

시민행복과 상생협력을 선도하는 창의적 연구기관
Daejeon Sejong Research Institute

DAEJEON SEJONG FORUM

대전세종포럼

기획특집 기후변화 대응을 위한 지방정부 역할

신기후체제의 대응과 기후변화 적응을 위한 지방정부
기후변화에 따른 생태계 영향과 지자체 관리방안
기후변화 대응 스마트 시티 내 스마트 워터 그리드 구축 동향 및 시사점
기후변화 대응 거버넌스 구축
미세먼지 발생에 따른 도시차원 대응방안 검토
기후변화 대응과 미세먼지 저감

시민행복과 상생협력을 선도하는 창의적 연구기관



시민과 함께하는 행복한 미래 대전·세종

DAEJEON
SEJONG
FORUM

미래지향적 도시정책 연구 선도

- 도시의 미래 비전과 발전방향 연구
- 연구지원체계의 선진화
- 연구 인력의 역량 강화

정책기여도가 높은 연구성과 생산

- 활용도 높은 맞춤형 정책 개발
- 대전시와 세종시의 상생발전 지원
- 시민 참여형 정책네트워크 강화

열정과 창의가 넘치는 공동체 구축

- 공정하고 투명한 인사·회계시스템 확립
- 소통, 신뢰 및 상호존중의 조직문화 조성
- 경영관리시스템 혁신

대전세종포럼

통권 제68호

Contents

- 07 **신기후체제의 대응과 기후변화 적응을 위한 지방정부**
임영신 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터
전문연구원(지자체적응 사업책임)
- 27 **기후변화에 따른 생태계 영향과 지자체 관리방안**
이은재 대전세종연구원 책임연구원
- 47 **기후변화 대응 스마트 시티 내 스마트 워터 그리드
구축 동향 및 시사점**
주진철 한밭대학교 교수
- 69 **기후변화 대응 거버넌스 구축**
김태호 (재)국제기후환경센터 정책연구팀장
- 87 **미세먼지 발생에 따른 도시차원 대응방안 검토**
경대승 NH 토지주택연구원 책임연구원
- 103 **기후변화 대응과 미세먼지 저감**
이상신 충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원

대전세종포럼

DAEJEON
SEJONG
FORUM

1장

신기후체제의 대응과 기후변화 적응을 위한 지방정부

임영신 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터
전문연구원(지자체적응 사업책임)

신기후체제의 대응과 기후변화 적응을 위한 지방정부

DAEJEON
SEJONG
FORUM

임영신 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터 전문연구원(지자체적응 사업책임)

I. 머리말

2015년 12월 프랑스 파리에서 개최되었던 제21차 기후변화당사국총회(COP 21)에서 2020년 이후 신기후체제에서 교토의정서(Kyoto Protocol)를 대체할 파리협정(Paris Agreement)이 채택되었다. 신기후체제는 일부 선진국들만이 온실가스 감축의무를 부담한 교토의정서의 뒤를 잇는 새로운 기후변화체제로, 세계 195개국이 온실가스 감축에 동참하기로 한 최초의 세계적 기후합의로 평가되고 있다. 더불어 온실가스 감축 외에도 기후변화 적응, 자원, 기술, 역량배양 등을 포함한 포괄적 대응을 신기후체제 방향으로 제시함으로써 그 의미가 크다.

기후변화의 원인인 온실가스 저감을 위한 감축 노력과 기후변화 영향으로 인한 피해를 줄이고 새로운 기회성을 구현하기 위한 적응 행동은 기후변화 시대에 지속가능한 발전과 안전·안심한 지역사회를 구축하기 위한 가장 현명한 대처라고 할 수 있다. 그간 우리나라는 기후변화 대응을 위해 감축과 적응에서 관련정책 및 기술 등의 다양한 추진대책을 마련하여 그 기반을 다지고 있으며, 신기후체제에 부응하는 새로운 성장 패러다임으로의 전환을 위해 노력하고 있다.

앞으로 신기후체제에 대한 건실한 이행을 위해서는 온실가스 배출전망 대비 감축 실현과 기후변화에 안전한 사회 구현을 목표로 기후, 대기 및 에너지 등 관련 정책의 통합성 제고, 온실가스 배출 억제를 위한 제도 개선 노력과 부문/지역/계층별 기후변화 위험 감소·피해 최소화를 위한 과학적 영향 예측 및 리스크 관리, 사회 전반의 적응역량 제고를 위한 점검·관리체계 구축, 기후변화 대응 신산업 육성 및 신기술에 대한 연구투자 등이 필요하며, 이를 위한 국민적 공

감대 형성을 위한 인식제고와 기후변화 대응 거버넌스 체계 강화가 중요하다고 할 수 있다.

II. 신(新)기후체제의 이해와 대응방향

2015년 12월 프랑스 파리에서 개최되었던 제21차 기후변화당사국총회(COP 21)에서 2020년 이후 신기후체제에서 교토의정서(Kyoto Protocol)를 대체할 파리협정(Paris Agreement)이 채택되었다. 신기후체제는 일부 선진국들만이 온실가스 감축의무를 부담한 교토의정서의 뒤를 잇는 새로운 기후변화체제로, 세계 195개국이 온실가스 감축에 동참하기로 한 최초의 세계적 기후합의로 평가되고 있다. 더불어 온실가스 감축 외에도 기후변화 적응, 자원, 기술 및 역량배양 등을 포함한 포괄적 대응을 신기후체제 방향으로 제시함으로써 그 의미가 더욱 크다고 할 수 있다. 이와 같은 기후변화체제하에 우리나라는 기후변화 감축과 적응에 대한 대응책을 마련하고 있으며, 2015년 국가별 기여방안(Intended Nationally Determined Contribution, INDC) 제출을 통해 세계 기후변화 대응 동참을 약속했다.

신기후체제의 출범은 2011년 더반에서 열린 제17차 기후변화당사국총회(COP 17)에서 그 시작의 문을 열었다. 당시 2020년 이후부터 발효 및 이행 될 수 있는 기후체제를 논의하기 위해 ‘행동 강화를 위한 더반플랫폼 특별 작업반(Ad Hoc Working Group on Durban Platform for Enhanced Action, ADP)’ 마련이 합의되고 2015년까지 기후변화협약하의 모든 당사국에 적용 가능한 의정서, 또 다른 법적 문서, 또는 법적효력을 가지는 결과물을 만들기로 결정했다. 그리고 2013년 바르샤바 제19차 기후변화당사국총회(COP 19)에서 INDC형태로 2020년 이후의 감축목표를 제출하는데 합의했다. INDC는 2014년 리마 제20차 기후변화당사국총회(COP 20)에서 현재 실행하고 있는 감축행동 또는 목표보다 더 진전된 행동 또는 목표를 담고 있어야 한다는 진전원칙과 INDC에 대한 관련 정보 목록이 담긴 작성 지침에 대한 구체화에 합의했다. 이후 5차례의 공식적 ADP 협상과 INDC를 바탕으로 신기후체제 합의문을 도출했다. 파리협정문은 교토의정서와 비교했을 때 감축목표, 대상범위 및 국가, 설정방식 등이 강화되고 확대되었다는 점에서 차이가 나타난다(표 1).

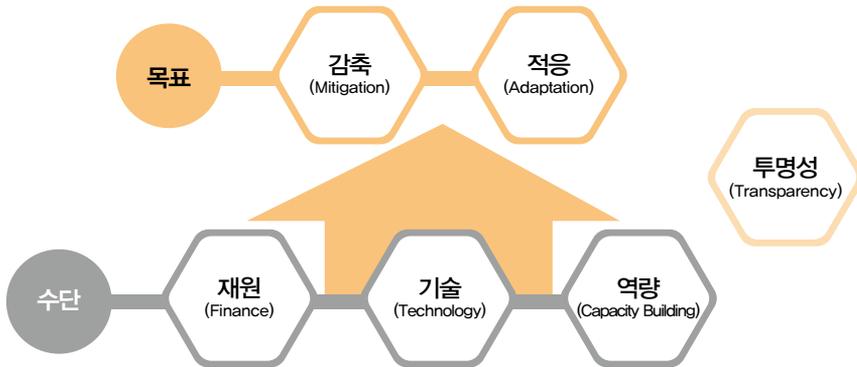
〈표 1〉 교토의정서와 파리협정의 비교

구분	교토의정서(2020년까지)	파리협정문(2020년 이후)
대상국	<ul style="list-style-type: none"> • 37개 선진국 및 EU(미국, 일본, 캐나다, 러시아, 뉴질랜드 불참) - 세계 GHG 배출량의 24~15% 대상 	<ul style="list-style-type: none"> • 선진국 · 개도국 모두 포함 (195개국) - 세계 GHG 배출량의 100%가 대상
범위	<ul style="list-style-type: none"> • 주로 온실가스 감축에 초점 	<ul style="list-style-type: none"> • 감축 · 적응을 포함한 포괄적 대응 - 감축, 적응, 재원, 기술, 투명성, 역량배양
적용시기	<ul style="list-style-type: none"> • 2020년까지 기후변화 대응방식 규정 - 1차 기간 : 2008-2020년 - 2차 기간 : 2013-2020년 	<ul style="list-style-type: none"> • 2020년 이후
감축목표	<ul style="list-style-type: none"> • 1990년대 수준 보다 5.2% 이하 감축 	<ul style="list-style-type: none"> • 2100년까지 지구온도를 2°C 이하로 유지, 1.5°C 목표 지향
목표 설정방식	<ul style="list-style-type: none"> • 하향식(Top-down) - 글로벌 감축목표를 각국(선진국)에 하향식으로 차등 부과 	<ul style="list-style-type: none"> • 상향식(Bottom-up) - 국가별 여건 · 역량에 따라 감축목표 설정
용어	<ul style="list-style-type: none"> • 공약(Commitment) 	<ul style="list-style-type: none"> • 국가기여방안(Intended Nationally Determined Contributions) - 자율성을 강조하는 중립적 용어
시장 매커니즘	<ul style="list-style-type: none"> • 청정개발체제(CDM), 공동이행제도(JI), 배출권거래제도(ETS) 도입 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 교토메커니즘 이외의 다양한 형태의 국제탄소시장 매커니즘 도입
재정지원	<ul style="list-style-type: none"> • 선진국(1992년의 OECD 국가) 	<ul style="list-style-type: none"> • 선진국 및 선진국 외 국가들의 자발적 재원 공급 장려
보고/검토	<ul style="list-style-type: none"> • 선진국 - 온실가스 인벤토리, 격년보고서(BR) 	<ul style="list-style-type: none"> • 모든 국가 - 온실가스 인벤토리, 감축목표 달성 성과, 개도국 지원 제공 · 수혜 내용

출처: 정학균 외(2016), 환경부 기후변화홍보포털

파리협정의 주요 내용을 요약하면 다음과 같다(그림 1). 첫째, 선진국과 개발도상국의 구분 없이 모든 나라가 온실가스 감축 의무를 가지며, 공동의 장기목표로서 감축 목표를 2°C로 강화하였다. 둘째, 감축목표에 대한 공약(Commitment)대신 국가기여방안(INDC)을 채택하여 자율성과 중립성이 강조되었다. 셋째, 각 국가는 2020년까지 장기 저탄소 개발 전략(long-term low greenhouse gas emission development)을 마련 · 제출한다. 넷째, 시장매커니즘은 온실

가스 감축목표의 효과적 달성을 위해 기존 교토매커니즘 이외 다양한 형태의 국제탄소시장 (International Market Mechanism, IMM) 설립에 합의했다. 다섯째, 2023년부터 5년 단위로 파리협정 이행 전반에 대한 국제사회 차원의 종합 이행점검(Global Stocktaking)을 실시한다. 종합 이행점검은 단순한 온실가스 감축(mitigation)에 관한 점검만이 아닌 기후변화에 대한 적응(adaptation), 재정(finance), 기술(technology), 역량배양(capacity building) 등을 포괄하고, 각국의 이행을 투명(transparency)하게 관리하는 절차로 개발도상국에는 일정 수준의 유연성을 허용한다고 나타내고 있다. 특히 파리협정은 적응을 감축과 동등한 수준의 목표로 제시함으로써 신기후체제에서 적응의 위상이 격상되었고 전지구적 적응목표와 역할을 설정하여 이를 종합적으로 추진할 체계를 마련했다는 점에서 큰 의의를 가진다고 할 수 있다. 또한 유엔기후변화 협약(UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 설립 당시부터 논의되어 온 감축의제에 비해 역사가 짧은 적응의제는 향후 활발한 후속 논의와 이행이 이루어질 것으로 기대된다.



〈그림 1〉 파리협정의 구조

출처: 정학균 외(2016), 환경부 기후변화홍보포털

신기후체제 합의문 '파리 협정(Paris Agreement)'은 16개의 전문과 29개의 조항으로 구성되며 이행절차에 관해 구속력을 지닌다. 전문에는 '공통의 그러나 차별화된 책임(CBDR)', '개별 국가의 능력(respective capabilities)' 및 '국가별 상황(national circumstances)' 등의 원칙을 명시하고 있다. 협정문 제2조부터 제14조 까지 신기후변화체제의 주요 6개분야(감축, 적응, 투명성, 자원, 기술이전, 역량 배양 등)를 포함하여 합의내용을 기술하고 있으며 제15조부터 제26조까지는 절차 및 행정 관련 내용을 담고 있다. 파리협정은 향후 55개 국가 또는 전 세계 배출량 55%이상 비준 시 발효 하게 되며, 후속조치 논의를 위해 '파리협정 작업반(Ad Hoc Working

Group on the Paris Agreement, APA)을 신설하였다. 파리협정의 주요 조항별 내용(표 2)을 살펴보면 다음과 같다.

1. 목표

유엔기후변화협약 이행을 제고함에 있어 국제사회 공통의 장기 목표를 구체화하여 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2°C보다 상당히 낮은 수준으로 유지하고, 15°C로 제한하기 위해 노력 할 것을 명시하였다. 형평성 및 각국의 다른 사정에 고려하여 공통의 온실가스 감축노력을 추진하며 국가별 차별화된 책임 및 각국의 능력에 따른 감축 원칙을 반영하도록 하였다.

2. 감축

협정문 제4조에서 감축에 대한 합의한 내용을 담고 있다. 주요 내용은 국가별 기여방안(INDC)은 스스로 정하는 방식을 채택하여, 5년마다 상향된 목표를 제출하되 공통의 차별화된 책임 및 구별 상황을 감안할 수 있도록 하였다. 선진국은 절대량 감축 방식을 유지하여 선도적 역할을 지속하며 개도국에게는 국가별 상황을 고려하여 경제 전반을 포괄하는 감축 목표를 점차적으로 옮겨 가도록 격려했다. 모든 국가는 차기 기여방안 제출시 이전 수준보다 진전된 목표를 제시하고 가능한 가장 높은 수준의 의욕을 반영하는 전진원칙을 제시하였다. 각국의 기여방안 제출은 구속력이 있으나, 이행은 국내적으로 노력해야한다. 모든 국가가 2050년 장기 저탄소 개발 전략을 2020년까지 제출하기 위해 노력할 것을 언급하였다.

3. 시장메커니즘

협정문 제4조에서 시장메커니즘에 대한 합의한 내용을 담고 있다. 온실가스 감축목표의 달성을 위해 유엔기후변화협약 중심의 시장 이외에 당사국 간의 자발적인 협력 형태도 인정하여 다양한 형태의 국제 탄소시장 메커니즘 설립을 합의하였다.

4. 적응

협정문 제7조에서 적응에 대한 합의한 내용을 담고 있다. 개발도상국, 특히 기후변화의 부정적인 영향에 취약한 개도국의 필요성을 고려하여 감축 외에 기후변화 대응을 위한 적응의 중요성과 적응에 대한 노력 및 국제협력의 중요성에 대해 중점을 두었다. 모든 국가가 국가적응계

획 수립·이행 등 적응 행동을 적절히 이행하며, 적응계획과 이행 내용 등에 대한 보고서를 제출하여 각국의 적응 정책, 이행사례 등에 대한 정보를 공유함으로써 협력을 강화한다.

5. 자원

협정문 제9조에서 자원에 대한 합의한 내용을 담고 있다. 개도국의협약하의 목적을 지속적으로 수행하기 위한 감축 및 적응에 있어 선진국의 자원 공급 의무를 규정하고 향후 지원규모 확대, 자원 지원에 관한 투명성 향상을 규정하였다. 협약에 따라 선진국은 개도국에 기후변화 대응을 위한 자원과 공급을 의무화 하는 내용을 규정하고, 기타 당사국들에게는 자발적인 자원 공급 및 지원을 장려하기로 하였다. 다양한 분야에서 자원조성 부분에서 선진국의 선도적인 역할을 강조하며 공공재원의 역할을 인정하고 이전보다 진전된 자원 조성 노력이 필요함을 확인하였다. 자원 공급과 관련하여 선진국은 양적·질적 정보를 격년으로 관련정보를 제출해야 하며, 선진국 이외 국가들의 자발적 정보제공을 장려하였다.

6. 기술개발 및 이전

협정문 제10조에서 기술개발 및 이전에 대한 합의한 내용을 담고 있다. 온실가스 감축 및 기후변화 회복력 제고에 있어 기술개발·이전의 핵심인 장기 비전을 공유하여 기술협력 확대 및 중장기 전략 마련을 위한 기술의 프레임워크 수립을 결정하며, 기술의 개발 및 이전에 관한 국가들 간의 협력이 강화·확대되도록 규정하였다. 효과적·장기적 기후변화대응을 위해 기술혁신 및 R&D 협력과 기술 활용 확대를 위해 기술·재정 메커니즘을 통한 지원을 진행하였다. 기술 개발·이전에 관한 협력을 강화하며, 이를 위해 선진국이 지원을 하기로 하였다.

7. 역량 배양

협정문 제11조에서 역량 배양에 대한 합의한 내용을 담고 있다. 당사국들이 개도국에 대한 효과적인 기후대응 역량 증진을 위해 협력의 필요성을 규제하였다. 역량배양에 대한 파리 위원회 설립에 관한 내용을 규정하였다. 협약의 이행을 지원하기 위해 역량배양 활동은 적절한 제도적 장치를 통해 제고되어야 한다. 이에 관해 제1차 파리협정당사국 총회에서 결정도입을 고려하고 있다.

8. 투명성 제고 및 글로벌 이행점검

협정문 제13조와 14조에서 투명성 재고 및 종합적 이행점검에 대한 합의한 내용을 담고 있다. 효과적인 이행 제고 및 INDC이행 투명성 강화를 위한 투명성 프레임워크 설립하였다. 모든 국가에 온실가스 인벤토리, 감축목표 달성 성과, 개도국 지원 등에 대해 보고를 의무 부여하고 내용에 대한 검토(review)를 실시하였다. 각 국의 온실가스 감축과 지원에 대해 전문가 검토와 다자협의를 거치는 등 이행을 보고하고 점검을 받되, 개도국에게는 보고 범위, 주기, 검토 범위 등 유연성을 부여하기로 하였다. 2023년부터 5년 단위로 파리협정의 목적과 장기 목표를 향한 공동의 노력을 평가하기 위해 국제사회 차원의 종합적 이행점검을 실시하기로 하였다. 종합 점검은 감축·적응·이행수단 및 지원을 고려하여, 포괄적이고 촉진적인 방식으로 시행하기로 규정하였다. 이행점검을 위하여 국가 온실가스 인벤토리, 감축목표 달성과 경과 등에 대한 보고를 의무화하기로 결정하였다.

〈표 2〉 파리협정의 주요 조항별 내용

조항	주요 내용
2조(목표)	산업화 이전 대비온도 상승을 2°C 이하로 유지하고 더 나아가 1.5°C 까지 억제하기 위하여 노력
3조(총칙)	진전원칙으로 각 분야에 대한 NDC 제출
4조(감축)	세계적으로 조속하게 배출정점 달성 5년마다 NDC 제출 의무 / 이행은 국내에 맡김
5조(REDD+)	산림을 포함하여 온실가스 흡수원과 저장고 보전
6조(국제 탄소시장)	당사국들이 자발적으로 연계하여 온실가스 배출 감축량을 국제적으로 거래하는 것을 허용
7조(적응)	기후복원력을 높이고 기후변화에 대한 취약성을 감소시키기 위하여 적응 능력을 배양
8조(손실과 피해)	기후변화로 발생한 손실과 피해 문제의 중요성
9조(재원)	선진국은 선도적으로 개발도상국을 위한 재원을 조성·제공하고 다른 국가들은 자발적으로 참여
10조(기술)	감축과 적응을 위하여 기술을 개발하고 개발한 기술을 이전하는 행위의 중요성 강조
11조(역량배양)	개발도상국의 역량을 배양하기 위하여 노력
13조(투명성)	감축·적응 행동 및 지원에 대하여 투명성 강화
14조(글로벌 이행점검)	년 단위로, 세계적으로 이행을 점검
15조(이행·준수·매커니즘)	당사국이 파리협정을 이행하고 준수하도록 하기 위한 위원회를 설립하고 운영

출처: 교토의정서 이후 신기후체제 파리협정 길라잡이(2016, 환경부)

우리나라는 신기후체제의 대상국으로서 파리협정에서 제시하고 있는 내용을 바탕으로 국가별, 지역별 및 부문별 대응과 이행이 적극적으로 이루어져야 할 것이다. 그 시작점으로 2015년 우리정부는 2030년 국가 온실가스 감축목표를 배출전망치(BAU) 대비 37% 감축을 최종적으로 결정하고, 감축목표를 비롯하여 기후변화 적응대책 및 산정 방법론 등의 내용을 담은 대한민국 INDC를 유엔에 제출했다(15.6.30, 국무회의 의결). 배출전망치 대비 37% 감축은 국내에서 25.7%, 해외의 11.3%를 목표로 최종 설정되었으며 이의 달성을 위한 국가차원의 다양한 수단을 마련하기 위해 노력하고 있다. 이러한 배경 하에 우리나라는 2020년까지 장기 저탄소 개발 전략의 제출에 따라 구체적인 세부이행계획 수립이 마련되어야 하므로 기후변화 대응에 기여할 수 있는 방안이 추진되어야 할 것이다. 또한 해외 감축을 위한 개도국 기후변화 적응 및 저감기술 협력과 이전 등의 국제협력 강화 방안 역시 필요할 것으로 사료된다.

지방정부는 기후변화 대응에 대한 국제적인 패러다임 변화와 중앙정부 정책과의 연계성을 위해 각고의 노력을 기울이고 있다. 그러나 정책의 지속성·체계성을 담보하고 사업 추진의 근거를 제공할 수 있는 제도적 기반이 미흡하고 완화와 적응 정책 간의 통합 관리를 비롯하여 자원 부족으로 인해 주요 정책별 사업 추진이 원활하게 이루어지지 않는 등 몇 가지 보완점이 드러나고 있는 것으로 판단된다. 파리협약에 따라 국제적으로 기후변화 대응에 대한 중요성이 보다 증가할 전망으로 이에 따른 행정적·재정적 지원 등이 강화될 것으로 기대되나 지자체가 신기후체제에 대비하고 성공적으로 기후변화에 대응하기 위해서는 다음의 사항을 우선적으로 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

- (1) 제도적 기반을 강화하기 위하여 기후변화 완화와 적응을 포함한 ‘기후변화 대응 조례’를 제정 또는 보완하여 종합적인 기후정책의 효율성·지속성 및 체계성을 확보하는 것이 중요하다. 더불어 기후변화 대응을 거버넌스(위원회 또는 협의체 등)를 정비 및 개선하여 대책 추진의 효율성과 책임성을 강화해 나가는 것이 필요하다.
- (2) 기후변화의 불확실성에 따른 지속적인 온실가스 감축과 기후영향·취약성 관리를 위해 관련연구 및 모니터링·DB 구축, 정책형성, 집행 및 효과 등 성과관리, 기후변화 대응교육·홍보 확산, 부문별 정책간의 통합기반 시너지 제고, 광역과 기초단위 정책과의 연계 등 다각적인 기후변화 업무를 효과적으로 추진하는 기반이 중요하다.

- (3) 지역 차원의 기후변화 이슈 및 문제 등의 발굴·해결을 위해서는 선택과 집중(중점 부문 및 우선순위 판단)을 통한 선제적이면서도 단기적 및 장기적인 전략과 접근이 필요하며, 올바르고 적절한 조치계획 마련과 투입(투자)에 대한 정책효과를 산출하는 것이 바람직할 것이다. 이를 위해 기후변화 대응에 대한 인식제고를 위한 교육·홍보 강화, 시민들의 기후변화 실천·참여 프로그램 확대, 민관산학연의 기후변화 거버넌스 체계 확립 및 안정적인 재원확보·운영체계 마련이 필요할 것으로 판단된다. 예를 들어 지역의 부족한 기후변화 재원을 탄력적으로 운용하기 위하여 신규 기금을 조성하는 것과 현재 운영되고 있는 부문별 기금 현황을 파악하여 기후변화와 연계하는 방안도 고려될 필요가 있다.
- (4) 신기후체제에 대비한 지역의 온실가스 감축(비산업분야) 관련 세부이행계획 마련을 위해서는 여러 부문의 이해관계자 간의 심도 있는 의사결정과정을 기반으로 지역의 특성과 미래 전망에 부합한 부문별 전략을 도출하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 기존부터 추진해오고 있던 온실가스 관련정책·사업들에 대한 종합적인 진단·정비를 통하여 효과성과 지속성을 판단하는 것이 선행되어야 한다. 예를 들어 부문별 감축효과가 높은 사업들에 대해서는 지속적인 장려·계승 등의 활성화가 필요한 반면 효과가 부족하거나 미진한 사업들에 대해서는 보완 또는 효과가 높은 신규 감축수단을 선정하는 것이 필요하다.
- (5) 신규 감축수단을 위하여 새로운 관련 지식, 기술·산업, 유형 및 효과 등에 대한 검토를 기반으로 지역특성·여건을 고려한 활용방안을 마련하는 것이 필요하다. 더불어 재원 마련 및 사업의 실행단계로 이어지는 과정에서는 관련 이해당사자의 참여 방안이 중요한데 이는 성과확산과 사업의 지속성 확보측면에서 중요한 기능과 역할을 수행하기 때문이다.
- (6) 온실가스 감축과 적응과의 연계를 통해 공동 편익(Co-benefit)을 창출하기 위한 정책적·기술적 접근도 앞으로는 필요하다. 예를 들어 산림·생태계 부문에서는 체계적인 산림자원관리(산림탄소상쇄제도)와 피해 최소화를 위해 적응을 함께 고려할 수 있다.

- (7) 부문별 배출원 파악, 배출량 산정·목표 설정, 목표기간 감축수단 선정, 이행과정 시 감축현황 관리 및 감축효과를 정량화 할 수 있도록 온실가스 인벤토리 시스템 구축을 통한 모니터링·환류기반을 마련하는 것이 중요하며, 감축목표 달성을 위한 세부 이행계획에는 다음의 사항들이 고려되는 것이 필요하다.
- 예상 배출량 산정, 분야별 감축 잠재량 분석
 - 기존 감축사업 진단 및 추가 가능한 감축수단 선정
 - 연차별 세부시행계획 및 자원계획 마련
 - 관련부서 간 협력 및 역할체계 정립
 - 다양한 이해관계자 참여기반 거버넌스 추진체계 마련
 - 국내외 교류·협력 네트워크 및 정책홍보·교육(실천 아젠다, 시민 캠페인 및 교육 프로그램 등) 방안

Ⅲ. 기후변화 적응을 위한 역할과 노력

폭염, 집중호우, 가뭄, 폭설 및 한파 등 기후변화로 인한 극단적인 기후현상과 이에 따른 영향·피해가 심화되고 있는 가운데 지역단위 기후변화 적응대책의 중요성과 노력이 보다 강조되고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에 따르면 기후변화의 주 원인물 질인 온실가스 농도를 2000년 수준으로 감축하더라도 이미 배출된 온실가스에 의한 지구온난화의 영향은 피할 수 없다고 보고하고 있다. 따라서 기후변화 대응(Response)을 위해서는 현재 배출되는 온실가스를 감축하기 위한 완화(Mitigation)와 동시에 지구온난화의 지속에 따른 새로운 기후변화 환경에 적응(Adaptation)하는 것이 필요하다. 2015년 9월 제70차 유엔개발정상회의(UN Sustainable Development Summit)를 통해 채택된 「우리 세계의 변혁: 2030 지속가능발전 의제(Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development)」상 제시된 지속가능발전목표(Sustainable Development Goal, SDGs)에 “기후변화 영향 방지를 위한 긴급 조치 추진(Goal 13)”이 포함된 것은 기후변화 적응의 시급성이 반영된 것이다.

최근 기후변화의 영향과 관련된 것으로 보이는 징후들이 극명하게 드러나고 있음에도, 현재

로서는 이러한 적응 진행과정을 어떻게 관리해야 할지에 대한 경험이 매우 적은 것이 사실이다. 또한 기후변화로 인해 누가, 언제, 어떻게 영향을 받는지를 정확하게 예측하는 체계적인 위험 평가방식도 현재로서는 명확하지 않다. 확실한 것은 기후변화로 인한 영향은 이미 실제로 발생하고 있으며 적응능력이 낮은 계층/부문/지역에게 더욱 극명하게 나타나고 있다는 것이다. 따라서 기후변화로 인한 영향과 관련하여 얼마만큼의 영향이 언제 누구에게 어떻게 발생할지에 대한 과학적인 근거를 찾는 노력도 필요하지만 정확하고 명확한 영향예측 결과를 담보할 수 없을지라도 기후변화 영향에 대하여 대비하는 노력을 시작하고 추진하는 것이 필요하다.

기후변화 적응은 기후변화로 인한 영향 발생예측에 기반하여 대책을 수립하게 되므로 불확실성을 내포한 채 수립·시행되며 기후변화에는 사회·경제적인 요소 등 간접적 영향이 복합적으로 작용하여 영향을 미치게 되므로 불확실성은 더욱 커진다. 기후변화 적응을 위해서는 이와 같은 불확실성을 감안하고 비용을 투자하여 조치를 취해야 하고 대부분의 경우 매우 큰 비용이 소요되므로 실제 경제적인 이익 창출 등을 목적으로 하는 민간영역에서 보다는 국가와 지자체 등의 공공영역에서 정책으로 수립하여 추진된다.

기후변화 문제를 해결하기 위한 여러 가지 해결책 중에 공공차원에서 수립되는 기후변화 적응대책을 포함하는 적응정책은 기후변화로 인한 악영향을 감소하고 순영향을 촉진하기 위하여 마련되는 정책 목적, 목표, 지표와 행동으로 이루어진 정책의 전체적인 구조와 과정 모두를 포함한다(환경부, 2010).

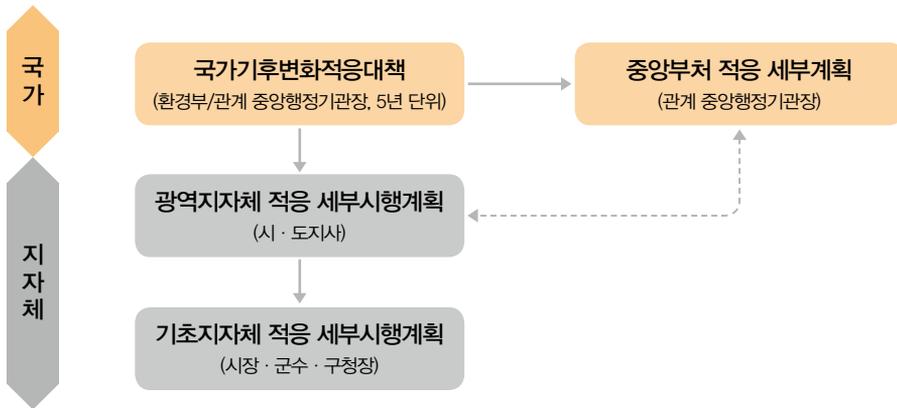
[기후변화 적응과 적응대책의 정의]

- (1) 적응: 현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 예측되는 기후변화의 피급효과와 영향에 대한 자연·인위적 시스템 조절을 통해 피해를 완화시키거나 더 나아가 유익한 기회로 촉진시키는 활동(IPCC, 2007)
- (2) 적응대책: 기후변화로 발생하는 부정적 영향을 줄이고 긍정적 영향을 극대화하기 위하여 국가, 중앙, 지방정부 등에서 기후변화 적응을 목적으로 목표, 지표 및 행동으로 이루어진 계획의 전체적인 구조와 과정을 의미

특히 기후변화 적응은 온실가스 감축에 비해 지역적인 접근이 매우 중요하다. 권역별 또는 지역별로 같은 기후변화 영향이 발생하더라도 그 피해 유형과 규모·크기 등의 양상은 해당 지자체가 가지고 있는 지리적 및 사회·경제적 여건과 기후변화에 대처하는 적응능력(Adaptive Capacity) 수준에 따라 다르게 나타나기 때문이다. 이러한 측면에서 기후변화 적응에 있어서 지자체는 기후변화 영향과 피해를 직접적으로 받는 당사자인 동시에 이로 인한 문제를 극복·개선하고 더 나아가 기후변화가 가져다주는 긍정적인 기회를 활용 및 창출할 수 있는 핵심주체로서 그 역할이 매우 중요하다. 기후변화로 인한 위험과 취약성에 대한 노출은 지역의 인프라와 서비스, 사회구성원, 취약계층 및 취약지역 등에 직간접적인 영향을 미치므로 지자체에서는 이에 대한 피해완화 및 사전예방 등을 위한 적응활동에 의무를 다하는 것이 필요하다. 더불어 기후변화는 주민의 안전, 삶의 질 및 경제활동에 직접적인 영향을 주며, 중장기적으로 지역의 경쟁력에 직결되는 중요한 사안이므로 선제적이면서도 능동적인 적응대책을 통하여 기후변화로 인한 부정적인 피해를 최소화하고 더불어 변화하는 기후에 긍정적인 기회를 창출하고 활용할 필요가 있다.

따라서 지자체는 기후변화에 효과적 대응 및 관리를 위하여 적응을 기반으로 지역사회의 기후변화 회복력(Resilience)과 미래의 경쟁력을 향상시킬 수 있도록 계획된 적응을 바탕으로 지역의 특성을 반영한 적응대책을 수립하여 추진하는 것이 필요하다. 이를 통해 기후변화로 인한 지역의 종합적인 적응이슈와 시급한 적응부문, 계층 및 지역 등을 파악하고 현 정책의 수준을 진단·정비하여 지역의 관련 자원, 재원, 기술, 정책 및 제도, 등의 적응능력을 강화하는데 기여할 수 있다.

우리나라 기후변화 적응대책은 저탄소 녹색성장 기본법 제48조 및 동법 시행령 제38조에 따라 매 5년마다 “국가기후변화적응대책”을 수립하고 중앙행정기관과 광역시·도 및 기초 시·군·구로 하여금 국가적응대책의 소관사항에 대하여 “세부시행계획”수립을 의무화하여 추진하고 있다(그림 2). 법 제정(‘10.4.14)시 기후변화 적응대책 수립 범위는 국가, 중앙부처 및 광역지자체였으나 이후 기후변화 영향의 실질적 당사자인 기초단위의 기후변화 피해완화·예방의 필요성에 따라 동법 시행령 개정(‘12.12.27)을 통해 기초 시·군·구까지 적응대책 수립·시행(‘15.1)을 확대하였다.



〈그림 2〉 우리나라 기후변화 적응대책 수립·시행 체계

출처: 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 가이드라인(환경부, '14.7)

기후변화 영향의 불확실성을 감안한 5년 기후변화로 인해 발생하는 부정적 영향을 줄이고 긍정적 영향을 극대화하기 위하여 지역차원에서 기후변화를 대비하여 수립되는 법정계획으로써 기후변화 영향의 불확실성을 감안한 5년 단위 연동계획(Rolling Plan)이며, 중장기적 적응 방향성과 추진전략, 이를 달성하기 위한 다양한 부문(건강, 재난/재해, 농수산 등)의 실행계획(Action Plan)을 포함하는 종합대책이다.

지자체는 기후변화 적응차원의 종합 진단 및 정비 등을 통한 기존 정책의 개선·보완 및 신규 대책을 발굴·적용함으로써 기후변화로 인한 위험 및 취약성 등에 대비할 수 있으며 이를 통해 지역의 기후변화 적응능력과 회복력 향상에 기여할 수 있으며, 매년 계획의 이행점검 및 환류과정을 통하여 기후변화의 불확실성과 여건변화 등에 능동적 및 탄력적으로 대응하는 동시에 부문별 추진대책의 효과성과 지속성 등을 확보할 수 있다.

상기에서 언급한 성공적인 적응계획 수립을 위한 여러 필요요소 중 원칙은 계획의 방향성을 설정하는데 매우 중요한 사항이다. 이와 관련한 원칙은 다양하게 설정되고 제안될 수 있는데 우리나라 기후변화 적응대책의 주요 원칙은 다음과 같다.

첫째, 기후변화 적응은 경제-사회-환경의 조화와 균형을 이루는 지속가능발전의 틀 내에서 이루어져야 한다는 것이다. 이는 기후변화 적응이 경제의 성장, 사회의 안정과 통합 및 환경의 보전이 균형을 이루고 현재와 미래 세대의 필요를 충족하는 차원에서 이루어져야 함을 의미한다.

둘째, 기후변화 적응계획을 수립함에 있어서는 기후변화 취약계층을 고려하는 것이 필요하

다. 기후변화 영향은 취약계층·부문·지역에 더 크게 나타나므로 이들을 우선적으로 기후변화 위험으로부터 관리하고 적응의 편익을 분배하여 형평성을 높이는 노력이 필요하다.

셋째, 다양한 적응을 위한 대안 중 시급성, 탄력성 등을 종합적이고 통합적인 관점에서 검토하고 대책의 우선순위를 설정하여 추진함으로써 적응계획의 효율성과 효과성을 제고하여야 한다.

넷째, 기후변화의 불확실성을 감안하여 잠재적인 기후변화 영향과 취약성에 대한 정보를 기반으로 사전 예방적인 관점에서 기후위험을 관리하는 과학적 근거·지식·기술에 기반한 기후변화 리스크 관리와 대응이 이루어져야 한다.

다섯째, 기존 추진되고 있는 정책과 제도적 여건에의 적합성과 연계성을 감안하여 기존 정책·구조·과정의 수정 및 보완 등 기후변화 적응이 주류화될 수 있는 방향으로 추진되어야 한다.

여섯째, 부적절한 적응(mal-adaptation)을 방지하고 적응과 감축의 공동편익(co-benefit)을 극대화하며 장기·단기 및 적응-감축 정책간의 상충을 방지하는 방향으로 적응이 추진되어야 한다.

일곱째, 체계적이고 지속적인 모니터링 및 평가 환류시스템을 마련하여 기후변화 적응의 성과를 관리하고, 관련 이해당사자의 참여 확대 및 소통을 활성화하는 방향으로 추진되어야 한다.

〈 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 기본원칙 〉

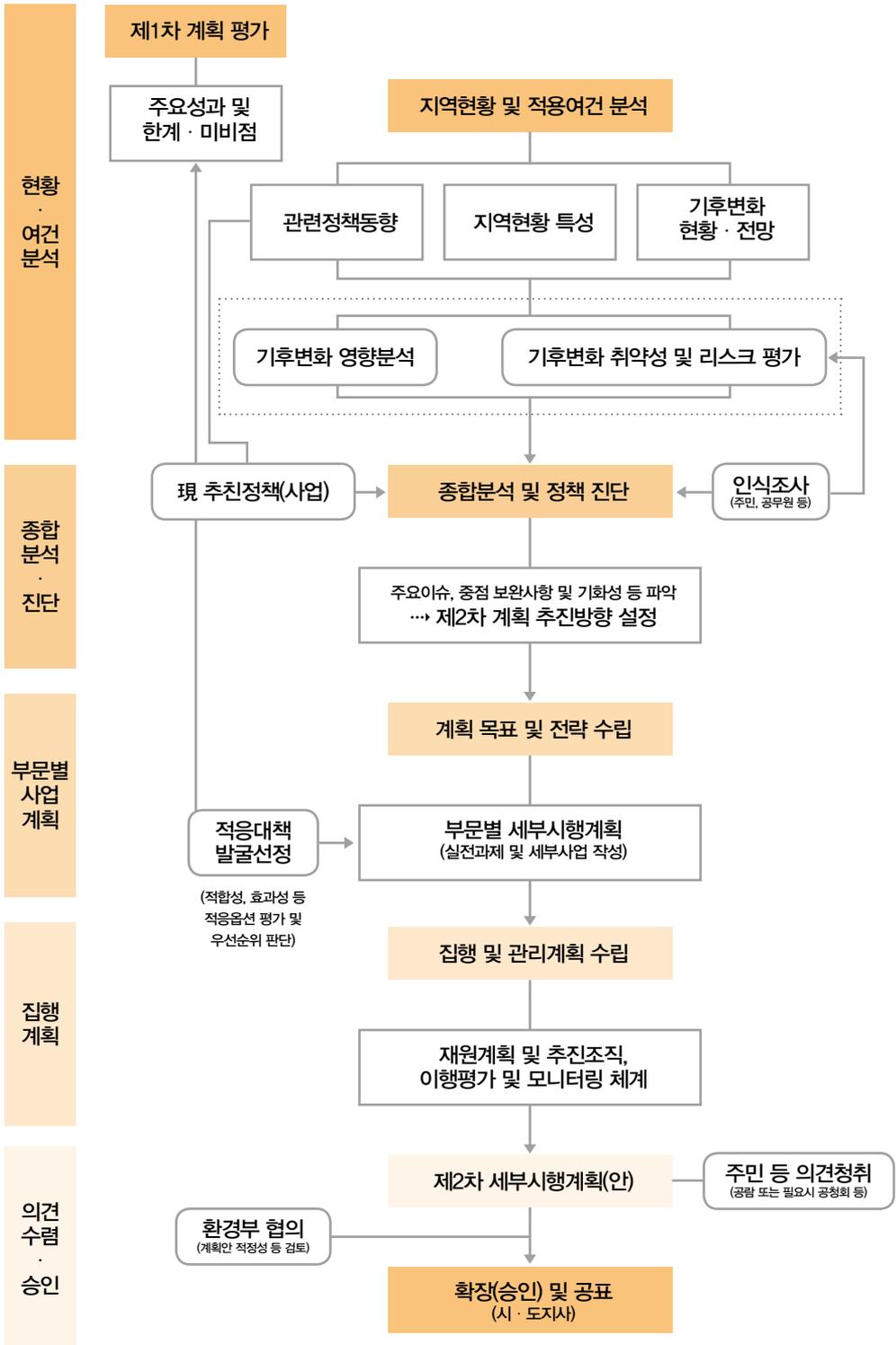
- (1) 기후변화 영향·피해로부터의 완화·예방 및 기회성 창출·촉진
- (2) 경제·사회·환경의 조화와 균형을 이루는 지속가능발전에 기여
- (3) 부적절한 적응 방지 및 적응-감축의 공동편익(Co-benefit) 증진
- (4) 기후변화 취약계층, 취약부문, 취약지역·시설 등 보호·관리
- (5) 기후변화 적응을 활용한 자연자원 보전·관리 및 지역사회 발전 추구
- (6) 최신의 과학적 근거·지식 및 기술 기반 기후변화 영향·취약성 및 리스크 관리 대응
- (7) 기존 정책의 종합 진단·정비 및 관련정책과의 연계·통합을 통한 시너지 창출
- (8) 적응대책의 효율성, 효과성, 시급성, 형평성 및 탄력성 등 통합적 고려
- (9) 체계적인 모니터링 및 평가·환류를 통해 정책의 실효성 및 유연성 확보
- (10) 주민 등 이해당사자의 참여·소통 및 홍보·교육 기반 강화

출처: 제2차 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립지침(환경부, '16.2)

지역의 특성을 반영한 합리적·효과적인 적응대책을 마련하기 위하여 계획의 수립과정에서는 지역 현황 및 기후변화 적응여건 분석, 종합분석·진단을 통한 개선·보완 등 파악, 계획의 목표 및 부문별 전략설정, 부문별 적응대책 검토 및 발굴, 부문별 세부시행계획 작성, 계획의 집행 및 관리에 필요한 사항 등이 고려되어 진다. 전체적인 계획의 수립절차 및 단계별 수립사항은 아래의 박스 내용과 같다.

〈 지자체 적응계획 수립사항 〉

- (1) 제1차 세부시행계획의 성과평가에 관한 사항
- (2) 지역 현황 및 기후변화 적응여건 변화에 관한 사항
 - ① 지역의 현황 및 특성 분석
 - ② 적응관련 정책·계획 및 동향 파악
 - ③ 기후변화 현황 및 전망 분석
 - ④ 기후변화 영향분석, 취약성 및 리스크 평가 등에 관한 사항
 - ⑤ 기후변화 적응 인식조사
- (3) 종합분석·진단을 통한 중점·개선·보완·정비사항 등 파악 및 제2차 계획방향 설정에 관한 사항
- (4) 계획의 목표와 부문별 전략설정 등에 관한 사항
- (5) 목표달성을 위한 부문별 세부시행계획 작성에 관한 사항
- (6) 계획의 집행 및 관리에 필요한 사항



〈그림 3〉 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립절차도

출처: 제2차 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립지침(환경부, '16.2)

지자체 기후변화 적응대책 수립이 현재 변화하고 있는 기후상황과 기후변화로 인한 위험·취약성 등에 얼마나 잘 적응하고 있으며 현재 시스템에서 변화와 대응이 필요한 부분이 무엇인지에 대해 진단·정비하는 과정이라면, 적응대책 이행과정은 계획수립을 통해 결정한 부문별 대책들이 실제로 기후변화 위험관리에 효과적으로 잘 대처하고 있으며 지역의 적응능력을 향상시키고 있는지를 모니터링 및 평가하는 과정이라고 설명할 수 있을 것이다.

결론적으로 지자체는 기후변화 적응대책 수립·이행 과정을 통하여 지역의 적응이슈와 문제점 등을 종합적으로 파악할 수 있으며, 기후변화 적응차원에서 기존 정책의 개선·보완과 신규 적응대책을 발굴 및 적용함으로써 기후변화로 인한 위험과 취약성 등에 대비할 수 있다. 특히 기존에 분산되어 있던 관련정책 및 사업간의 연계와 통합적 접근체계를 바탕으로 적응대책 추진의 시너지와 효율성을 보다 제고할 수 있으며, 기존 정책만으로 적응이 어려웠던 부문에 대한 적응능력을 강화시킬 수 있다.

더불어 지자체는 5개년 세부시행계획에서 결정된 연도별 추진대책에 대한 성과평가와 기타 과학기술 발전 및 사회·경제적 여건 변화 등을 함께 고려하여 연도별 추진대책을 수정·보완할 수 있으며 이를 반영한 차년도 실행계획을 추진함으로써 기후변화의 불확실성에 능동적 및 탄력적으로 대응하는 동시에 부문별 소관대책의 효과성과 실효성을 확보할 수 있다. 또한 지속적인 계획수립 및 이행과정에서 습득된 지식 및 정보 등의 공유·확산, 장애요인 등의 극복 및 개선, 성공사례 발굴 등은 지역사회, 시민, 공공 및 민간 등의 부문에 적응인식과 역량을 향상시키며, 향후 지역의 적응대책 프로세스와 거버넌스 역량을 증진시키는데 매우 큰 도움이 될 수 있다.

참고문헌

- 환경부(2016), 제2차 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립지침.
 - 환경부(2014), 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 가이드라인.
 - 관계부처 합동(2014), 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵.
 - 관계부처합동(2015), 제2차 국가기후변화적응대책.
 - 환경부(2016), 교토의정서 이후 신기후체제 파리협정 길라잡이.
 - 고재경(2011), <기후변화 완화와 적응정책 통합방안 연구>, 경기개발연구원.
 - 임영신 외(2013), <국가와 지자체의 기후변화 적응대책실효성 제고를 위한 연계강화 방안>, 한국환경정책평가·연구원.
 - Adger W.N., Arnell N.W., Tompkins E.L.(2005), "Successful adaptation to climate change across scales", *Global Environmental Change* 15: 77-86.
 - OECD(2009), *Integrating Climate Change Adaptation into Development Co-operation : Policy Guidance*. OECD, Paris.
-

대전세종포럼

DAEJEON
SEJONG
FORUM

2장

기후변화에 따른 생태계 영향과 지자체 관리방안

이은재 대전세종연구원 책임연구위원

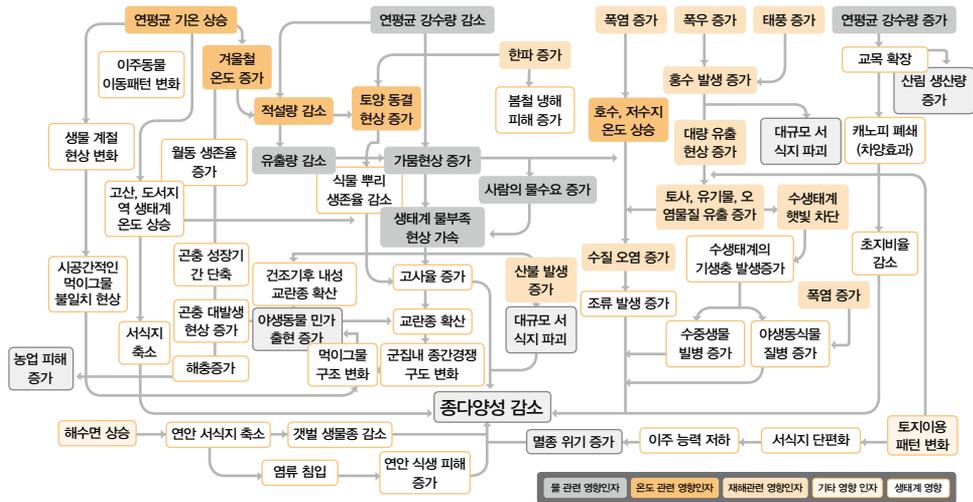
기후변화에 따른 생태계 영향과 지자체 관리방안

이 은 재 대전세종연구원 책임연구위원

DAEJEON
SEJONG
FORUM

I. 서론

지구의 기후는 변하고 있다. 일부 기후변화 부정론자가 있지만, 대부분의 과학자들은 기후변화가 실제 일어나고 있으며, 과거와 최근의 변화는 원인과 속도의 측면에서 다르다고 생각한다. 기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 '제 5차 기후변화에 관한 평가보고서'에서 1880년~2012년 사이에 0.85°C의 지표면 온도상승이 나타났으며 지난 1,400년 중 가장 따뜻한 기간이었을 가능성이 높다고 보고하였다. 또한, 현재 수준의 온실가스 배출이 지속된다면 21세기 후반에는 전지구의 평균기온이 현재 대비 3.7°C 증가하고, 해수면은 63cm 상승할 것으로 예측하였다. 한반도의 평균 기온도 지난 100년간 1.8°C 상승하였고, 특히 최근 40년 동안에만 1.4°C가 상승하여 기온의 상승추세가 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 이는 한반도가 지리학적으로 삼면이 바다로 둘러싸여 있을 뿐 아니라 국토의 약 65%가 산림으로 구성되어 있어 기후의 변화가 다양하고 빠르게 진행될 수 있다(국립생태원 2017). 뿐 만 아니라, 최근 국내의 급격한 도시화 및 산업화도 한 몫을 했을 것으로 생각된다. 특히 최근 한 연구에서 한반도 5km 해상도의 예측자료를 분석한 결과, 21세기 후반에는 20세기 후반에 비해 약 4.6°C 상승하며, 강수량은 30% 증가할 것으로 예측하고 있다(Lee and Bae 2013).



〈그림 1〉 기후변화 요인과 생태계 영향 관계

자료: 이상훈 2016

지속적인 지구환경의 변화 속에서 생태계는 끊임없이 반응하며 적응해왔다. 기후변화에 의한 생태계의 변화와 영향을 파악하고, 예측하는 등의 연구는 지구환경문제와 함께 중요성이 부각되고 있다. 이를 위해서는 다양한 생태계에서 일어나는 변화 양상을 장기적으로 추적하는 것이 필요하다(국립생태원 2018). 특히 여러 연구를 통해 최근의 급격한 기후변화가 멸종위기종의 증가, 생물다양성의 감소, 서식지 이용의 변화, 번식생태의 변화 등 다양한 측면에서의 생태적 변화의 원인으로 보고되고 있다(이상훈 2016). OECD(2011)에서 발표한 2050년 환경전망 결과에서는 지난 40년간 생물종 풍부도가 11% 감소하였고 2050년에는 10%의 추가적인 감소가 있으며, 생물종의 멸종은 인위적 교란이 없을 때에 비해 약 1,000배 빠르게 진행된다고 예측하였다. 또 다른 연구에서는 1970년부터 2004년까지 발표된 약 3만 여개의 동식물의 물리적 체계와 생물학적 특징에서의 변화 경향 중, 90%가 기후온난화와 일치하는 것으로 나타났다(Rosenzweig et al. 2008).

국내에서도 기후변화에 따른 생태계 영향을 파악하기 위한 연구가 환경부 및 산림청 등의 정부기관과 산하 연구기관을 중심으로 이루어지고 있다. 그러나 국내의 경우 관련 연구는 아직까지 국외 선진국에 비해 양적·질적으로 부족하며, 특히, 지방정부에서 기후변화에 따른 생태계의 영향과 관련한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본고에서는 기후변화에 따른 일반적인 생태계의 영향을 살펴보고, 이와 관련한 국내·외 연구 동향을 파악하고자 한다. 이를 통해 대전의 생태계 관련 조사·연구 현황을 검토하여 향후 지방정부 차원에서의 연구 및 정책 방향을 제시하고자 한다.

II. 기후변화와 생태계 영향

1. 기후의 불균형

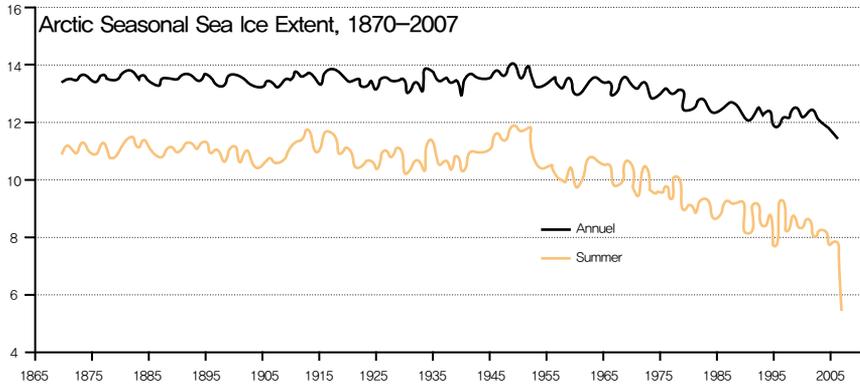
1) 산불 증가

최근의 기후변화는 기후의 불균형을 야기할 수 있다. 특히 이상건조현상에 의한 산불 발생 빈도 및 규모의 증가를 초래할 수 있다. 산불은 산림생태계에 서식하는 종들에게 직·간접적으로 영향을 준다. 산불로 인한 사망 등의 직접적인 영향은 식물의 경우 클 수 있으나, 대부분의 동물은 높은 이동성으로 크지 않다. 다만 산불 후 먹이자원의 부족, 경쟁, 포식압의 증가 등 간접적인 영향을 더 받는다. 특히, 산불은 야생동물 군집 및 종 구성의 변화를 야기한다. 산림성 야생동물 특히 숲 내부종의 밀도를 감소시키며, 개방된 서식지를 선호하는 황조롱이 등의 동물은 증가하기도 한다.

우리나라의 경우 치산녹화사업이 실시된 이후 산림이 울창해져 가연물질이 많아지면서 산불 빈도가 높아지고 대형화되는 추세이다. 특히 동해안 일대의 경우 봄철에 건조하고, 바람이 강해 1990년대 이후부터 빈번히 발생하고 있다. 1996년의 고성 산불(3,762ha), 2000년도 동해안 산불(23,794ha), 2002년도 충남 청양 산불(3,095ha), 2005년도 강원도 양양 산불(973ha) 등이 그 예이다. 다만, 최근 산불 예방 및 차단기술이 발달하면서 대형 산불 발생이 다소 줄어든 것으로 파악된다.



〈그림 2〉 삼척 산불피해지역 전경 및 산림 내부종인 하늘다람쥐



〈그림 3〉 북극 빙산 크기의 연도별 감소

자료: NASA 홈페이지

2) 기후 극값의 증가

기후변화는 지구의 온난화 뿐 아니라, 최고·최저온도 등 기후 극값의 증가를 포함하며, 이로 인해 홍수 및 가뭄, 산사태 등의 원인이 될 수 있다. 이는 생태계에 직접적인 영향을 미치며, 개체군 크기가 작거나 일부 지역에 국한하여 서식하고 있는 종의 경우 절종(extirpation) 및 멸종(extinction) 위기에 처할 가능성이 높다.

3) 해수면 상승

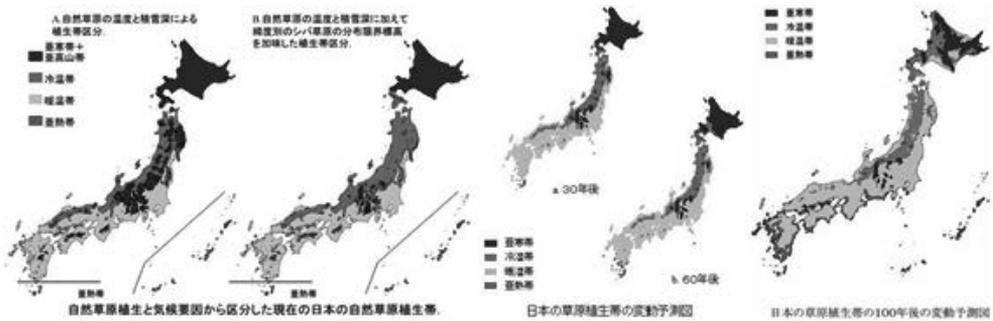
기후변화에 따른 해빙 및 이로 인한 해수면의 상승은 직·간접적으로 생태계에 영향을 미친다. 특히 빙산 크기의 감소로 인한 북극곰 먹이취식 장소의 감소를 유발한다. 북극곰은 얼음 위 구멍에서 바다표범 및 물개 등의 피식자가 숨을 쉬기 위해 나올 때 포획하는데, 북극 얼음의 해빙으로 인해 수면에서의 포획이 불가능하게 되며, 이로 인한 먹이 부족으로 인해 민가까지 접근함으로써, 인간과의 갈등이 커지고 있는 실정이다. 미국 지질 조사소(USGS)에서는 향후 50년간 북극곰의 개체수가 1/3으로 감소하며 최종적으로 북극해의 모든 얼음이 녹는다면 북극곰이 멸종할 것으로 예측하였다. 또한 바다달팽이의 경우 식물성 플랑크톤을 섭취하고, 물고기나 다른 부유생물의 먹이감이 되는 등의 생태학적 역할이 큰데, 해빙으로 인해 많은 이산화탄소가 물속으로 녹아들면서 바다가 산성화되어 껍질을 제대로 만들지 못하게 된다.

2. 야생동·식물 분포 변화

1) 식생대의 변화

기후변화로 인해 기온이 상승하게 되면 북반구의 식생대는 남쪽에서 북쪽으로, 저지대에서 고지대로 이동하게 된다. 연구 결과에 따르면 과거에는 식생의 이동속도가 100년간 약 4~200m인 것으로 밝혀졌으나, 현재는 그 속도가 더 빠르게 진행되고 있다. 평균기온이 1도 상승하게 되면 기후대는 북쪽으로 약 150km, 고도는 위쪽으로 약 150m 정도 이동한다고 한다. 특히 많은 종들의 경우 급속한 기후변화 속도를 따라가기가 쉽지 않으며, 속도에 뒤쳐진 식물 종들은 멸종될 가능성이 높게 된다. 특히, 고산지대에만 자생하는 식물의 경우에는 분포 범위가 줄어들거나 멸종될 가능성이 매우 높다. 우리나라의 경우 연평균 기온이 현재보다 4℃ 상승하면 남한 대부분의 지역은 난대 산림으로, 남부 해안지역은 아열대 산림으로 전환될 것으로 예측하고 있다.

또한 기후가 변화하면 나무에서 잎이 나오는 시기가 빨라지고 꽃이 피는 시기도 앞당겨진다. 우리나라를 포함한 온대기후지역의 경우 평균기온이 1℃상승하면, 개화시기는 5~7일 정도 빨라진다고 한다(국립산림과학원 2005). 이러한 개화시기의 변화는 곤충류 발생시기 뿐 아니라 이를 포식하는 조류의 번식시기를 변화시키는 등 생태계 전반에 영향을 미친다.



〈그림 4〉 기후변화에 따른 일본 식생대의 변화

자료: Nishimura et al, 2001

2) 야생동물 분포 및 이동 변화

기후변화로 인해 지구 온도가 상승하게 되면 야생동물, 특히 비행이 가능한 조류의 경우 서식 분포가 변화한다. 최근 국내에서도 동남아시아에 서식했던 종들의 서식이 확인되고 있다. 2,000년 이후 Malayan Night Heron(*Gorsachius melanolophus*)와 Blue-winged Pitta(*Pitta moluccensis*) 등 동남아시아 지역에 서식하는 70여종의 조류가 국내에서 관찰되었다. 조류 뿐 아니라 곤충도 국지적인 분포의 변화를 보일 수 있다.

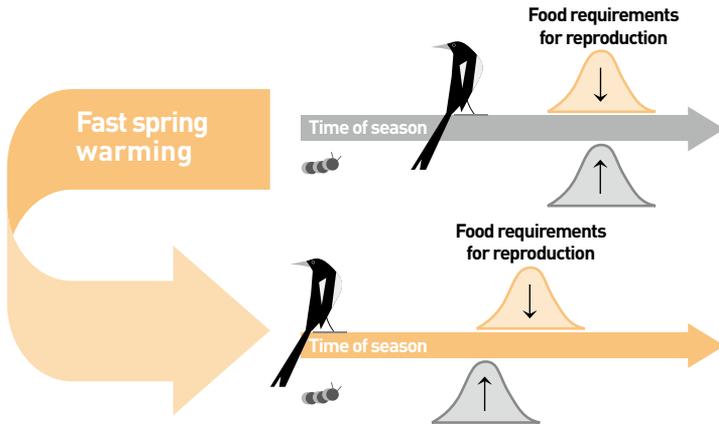
장거리 비행을 하는 철새의 경우 기후변화로 인해 이동시기 및 체류시간의 변화를 보인다. 독일 등 일부 선진 사례에서, 기후변화로 인한 조류의 이동과 관련한 장기 모니터링을 통해 도래시기가 빨라지고 월동지 복귀가 늦어져 번식지 체류시간이 증가하는 경향을 보이기도 하였다. 또한, 일부종의 경우에는 월동 및 번식을 위해 이동하기 위한 에너지 소모를 줄이기 위해 해당지역에 체류하여 텃새화되기도 한다.



〈그림 5〉 국내에서 서식이 확인된 아열대 조류

자료: https://en.wikipedia.org/wiki/Blue-winged_pitta#/media/File:Pitta_moluccensis_-_Kaeng_Krachan.jpg,
http://orientalbirdimages.org/search.php?Bird_ID=1096&Bird_Image_ID=17289

기후변화에 의해 조류 등 고차소비자의 먹이자원 발생시기가 빨라지면 번식시기와 시기적으로 차이가 발생하게 되며, 많은 종들이 이에 적응하려고 노력한다. 그러나 일부 종은 번식시기의 변화를 주지 못해 결국 개체수 급감을 초래하게 되며 멸종위기에 처하게 될 수도 있다.



〈그림 6〉 기후변화에 따른 조류의 번식시기와 먹이자원 발생시기의 변화

3) 해충 및 질병 발생

기후변화로 인한 생태계 영향 중 하나는 해충 발생의 증가이다. 주홍날개꽃매미의 경우 동남 아시아 서식종으로 알려져 있었으나 2006년도에 우리나라에서 처음 발견되어 충청 지역의 약 90ha 포도밭에 피해를 준 사례가 있다.

기후변화로 인해 질병 발생 가능성도 높아질 수 있다. 평균 기온이 0.5℃ 증가할 경우 쓰쓰가 무시(쓰쓰가무시병리케차와 쓰쓰가무시과 진드기 중의 일부나 그 유충에 물림으로써 사람에게 전파되는 급성 감염성 질환)와 렙토스피라(가축이나 야생동물의 대·소변이 공기중이나 하천에 유입되면서 인체에 감염되는 질환), 말라리아 등의 질병 발생률이 2~10% 증가할 것으로 예측한 보고도 있었으며, 모기의 개체수 증가 및 활동시기의 증가도 예측된다.



〈그림 7〉 주홍날개꽃매미와 털진드기

자료: <http://m.blog.daum.net/kim5250/11291706>, <https://ppqz77.tistory.com/170>

Ⅲ. 국내외 연구 동향

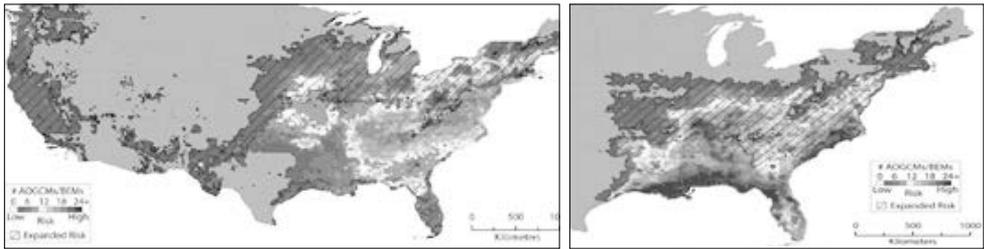
1. 국외 연구 동향

국외의 경우 유럽과 미국, 중국, 일본 등을 중심으로 수십 년에 걸친 장기 모니터링을 통해 기후변화에 따른 생태계 영향 관련 연구를 수행하고 있다. 식물과 다양한 동물 분류군을 대상으로 기후변화에 따른 서식지 이동과 서식지 교란, 식물계절학적 변화, 취약성·리스크 평가, 모델링을 통한 미래 예측 등 다양한 주제로 연구가 수행되었다.

1) 식물

기후변화와 관련한 식물 연구는 식물의 서식지 이동, 외래종 및 위해종 등에 의한 서식지 교란, 식물계절 변화, 군집구조와 상호작용 및 서식지 변화, 가뭄, 홍수, 산불과 같은 극한 현상 발생 증가에 의한 서식지 변화가 주를 이루고 있다(국립생태원 2016). 한 예로, 기후변화에 따른 식물 침입종의 증가와 관련한 연구가 미국 남부 지역을 중심으로 수행되었다. 기상청 자료와 AOGCM모델에 의해 bioclimatic envelopes를 적용하여 침과 쥐뚝나무의 분포변화를 모델링을 실시하여 분석한 결과, 분포권이 확대되는 경향을 보였다(Bradley et al. 2010).

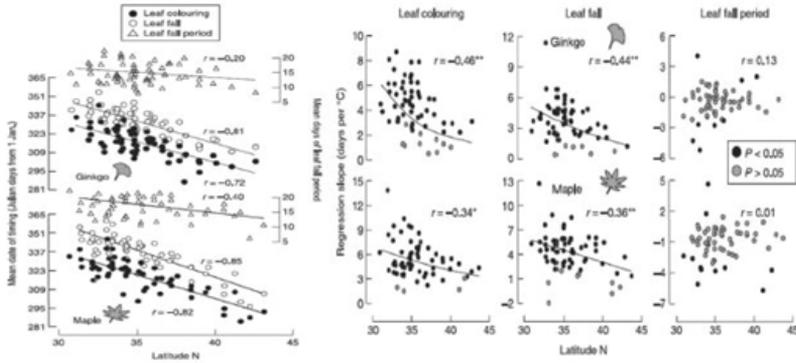
일본에서는 1953년부터 2005년까지의 봄과 가을 단풍 및 낙엽시기에 대한 기상청 모니터링



〈그림 8〉 유럽에서 기후변화와 위도·경도에 따른 철새 이동시기 연구

자료: Bradley et al. 2010

자료를 바탕으로 은행나무와 단풍나무를 분석한 결과, 가을철 은행나무는 10.7°C에서 20.5°C로, 단풍나무의 경우 8.7°C에서 20.5°C로 상승하는 경향을 보였으며, 위도가 감소할수록 단풍일이 늦어지는 양상을 확인하였다(Takahashi 2008).



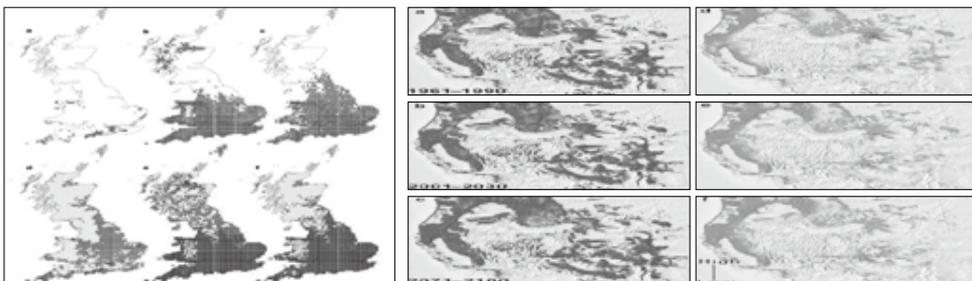
〈그림 9〉 일본의 은행나무와 단풍나무의 단풍 및 낙엽 시기변화

자료: Bradley et al. 2010

2) 무척추동물

기후변화에 따른 무척추동물의 영향은 주로 캐나다와 미국, 영국 등에서 서식지 변화와 생물 계절변화, 성장 및 생존율, 질병 및 해충 변화 등과 관련한 연구 위주로 수행되었다. 영국에서 기후변화에 따른 나비의 분포변화를 파악하기 위해 46종의 정주성 나비를 대상으로 120개의 고정조사구를 선정하여 1970~1999년까지 조사한 결과, 여름과 봄의 온도가 약 1.5°C 상승하여 나비종들이 북쪽으로 이동한 것으로 파악하였다. 특히 특수종(specialists)의 경우 기후변화에 더욱 민감한 것으로 나타났다(Warren et al. 2001).

또한, 미국과 캐나다에서 Canadian Regional climate Model(CRCM)을 이용하여 1961년부터 2100년까지 미래 기후를 예측하여 딱정벌레 2종의 계절적 적응 가능성과 겨울철 사망률을 파악한 연구도 있었다(Bentz et al. 2010).

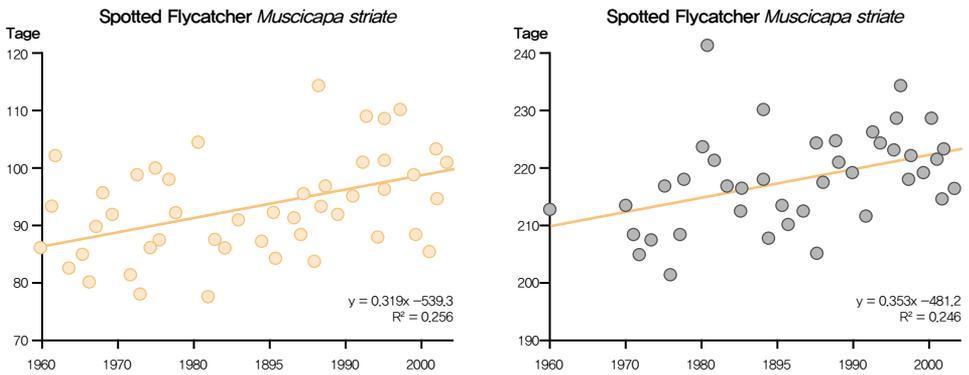


〈그림 10〉 영국 나비의 분포변화(좌), 미국과 캐나다 딱정벌레 2종의 계절 적응가능성 및 겨울철 사망률

자료: Warren et al. 2001, Bentz et al. 2010

3) 척추동물

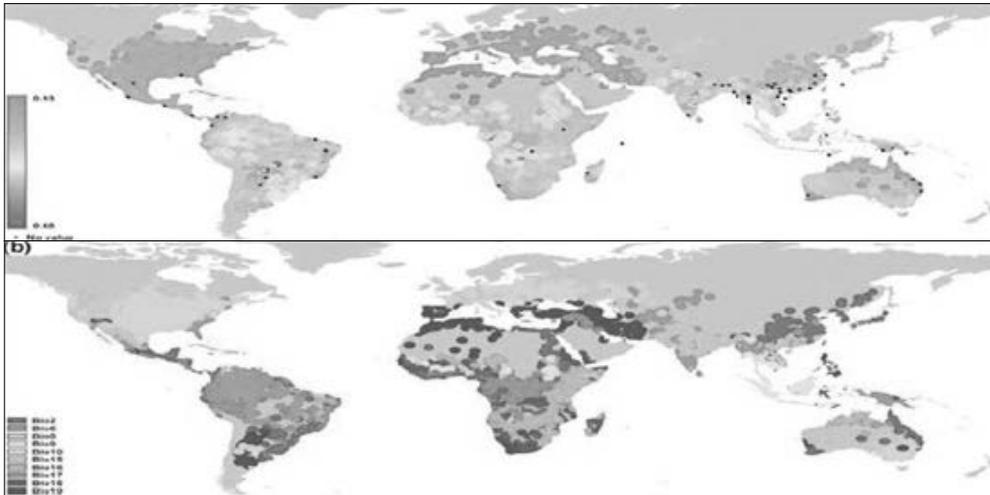
기후변화에 따른 척추동물의 영향은 주로 조류를 중심으로 유럽과 미국, 일본 등 여러 나라에서 번식시기, 이동의 변화, 취약성 평가 등을 주제로 수행되었다. 독일 북해 연안의 헬고라트 섬(heligoland)에서 1960년부터 2007년까지 솔딱새류(Spotted Flycatcher, *Muscicapa striata*)와 대륙검은지빠귀(Blackbird, *Turdus merula*)를 대상으로 봄철의 번식지 도래일을 파악한 결과 도래시기가 빨라지는 것을 확인했으며, 가을철에는 출발시기의 기온 상승이나 번식지 먹이조건 변화로 인해 월동지로 돌아가는 출발시기가 늦춰져, 결국 번식지에서의 체류 시간이 길어지는 결과를 도출하였다. 두 종의 경우 헬고란트섬에서 약 50년간 10.3일의 체류 시간이 증가하였다.



〈그림 11〉 기후변화에 따른 솔딱새류와 대륙검은지빠귀의 번식지 체류시간의 변화

자료: Stenvander et.al 2005

기후변화에 따른 거북류의 종풍부도와 미래의 서식변화에 대한 평가연구도 지구 전체를 대상으로 수행되었다. 총 190종의 거북류에 대해 기후 조건을 반영한 종분포모형을 2080년까지 모의한 결과 대부분 서식범위와 종풍부도가 급격히 감소하는 것으로 확인되었다. 특히 12%의 거북류는 현 서식지에서 완벽하게 이주할 것으로 예상되어 기후 스트레스 증가로 인한 서식지 단편화가 심각한 위협요인으로 사료되었다(Inlow et al. 2012).



〈그림 12〉 기후변화에 따른 거북류 분포의 변화

자료: Inlow et al. 2012

2. 국내 연구 동향

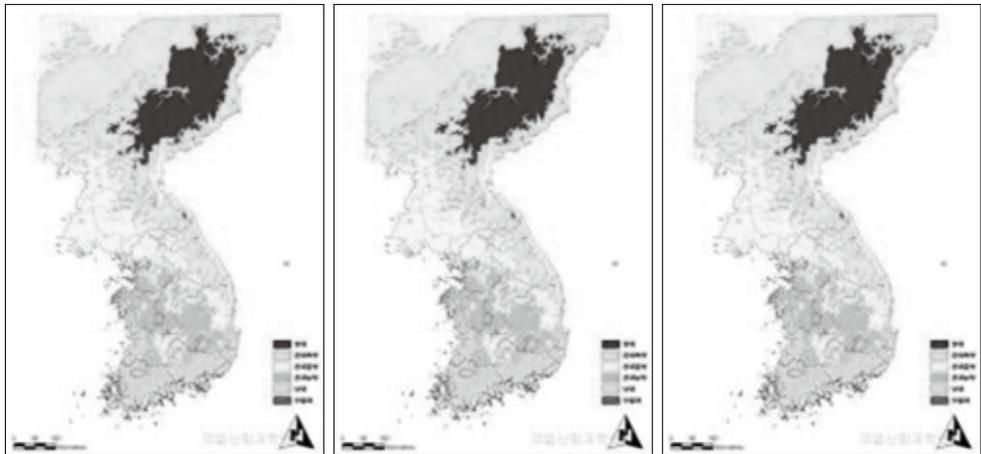
국내의 경우 유럽과 미국 등 일부 국외에 비해 다소 늦게 관련 연구가 수행되었다. 관련 연구는 국립산림과학원과 국립공원연구원 철새연구센터, 국립생물자원관 그리고 최근에는 국립생태원에서 활발한 연구가 진행 중에 있다.

1) 국립산림과학원

국립산림과학원에서는 임업부문의 기후변화협약 국가보고서 작성(1998)을 시작으로 기후변화 관련 연구가 국가적 차원에서 본격적으로 진행되어 온 것으로 파악된다. 이 보고서에서는 산림과 임업부분에서의 국가환경, 온실가스 흡수/배출량 통계 현황 및 전망, 정책 및 조치, 기후변화 영향 및 적응 수단, 연구와 공공인식 등에 관한 주제를 다루고 있다. 이후, 지구 온난화에 따른 산림식생대의 변화에 대한 연구가 이루어졌다(그림 13). 그 외에 기후변화에 의한 개미의 분포와 풍부도 변화 예측, 기후변화 대응 산림과학 연구 마스터 플랜, 산림재해 변화 예측 및 대응 전략 개발 등의 연구가 수행되었다.

2) 국립공원연구원 조류연구센터

국립공원연구원 조류연구센터는 동북아시아에 걸쳐 이동하는 조류 연구를 위해 2005년 전남 흑산도를 시작으로 설립되었으며, 이후 태안과 거제도에 출장소를 개소하여 가락지부착조사와 조류모니터링 등을 수행하고 있다. 특히, 조류모니터링을 통해 제비의 경우 봄철 이동이 빨라지는 경향을 관찰하였으며, 벌매는 과거에 비해 개체수가 감소하고 마지막 관찰일 또한 점차 늦어지는 경향을 보고하였다. 이는 철새의 번식시기와 먹이자원의 출현시기의 불일치에 따른 개체군 감소현상의 하나로 추측하였다(국립공원연구원 2017).

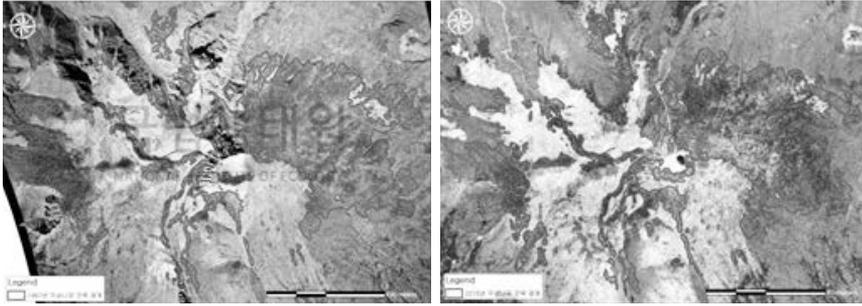


〈그림 13〉 기후변화에 따른 국내 식생대의 변화

자료: 국립산림과학원 2005

3) 국립생태원

최근 대부분의 생태연구는 국립생태원에서 수행하고 있다. 기후변화에 따른 생태계 영향 연구도 최근 들어 국립생태원에서 다양한 주제로 수행 중에 있다. 최근에는 기후변화에 따른 생태계 영향 연구, 기후변화 민감생태계 관리 및 보전방안 연구, 기후변화에 의한 생물 적응 현상 연구, 기후변화 리스크 평가를 위한 기초연구, 생태안전 위협요소 및 적응방안 연구, 생태계의 주요 조절 기능에 대한 기후변화 영향 연구 등이 수행되고 있다. 특히 아고산생태계 구상나무를 대상으로 위협요인과 보전방안 마련을 위한 연구가 수행되었다. 또한, 국내에 서식하는 모든 동물 종을 대상으로 리스크 평가를 수행 중에 있다.



〈그림 14〉 한라산국립공원 내 구상나무 분포 변화(좌: 1967년, 우: 2015년)

자료: 국립생태원 2017

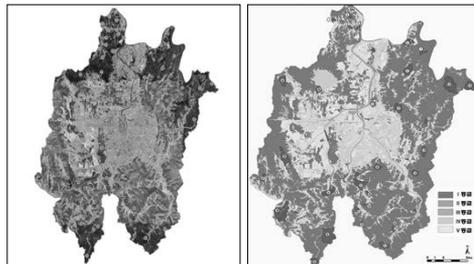
IV. 대전 조사·연구 현황 및 정책 제언

1. 대전 조사·연구 현황

대전에서 생태계를 대상으로 한 조사·연구는 자연환경조사와 생태계변화관찰 조사가 있다. 또한, 최근에는 깃대종 선정 및 정밀 모니터링이 이루어졌고, 2019년에는 도시생태현황 지도 구축 연구가 수행될 예정이다. 그러나 기후변화에 따른 생태계의 영향과 관련한 연구는 거의 없는 실정이다.

1) 자연환경조사

대전 자연환경조사가 2002년부터 10년 단위로 수행되고 있다. 2002년에 1차 조사가 수행되었으며, 2차 조사는 2012년부터 2014년에 걸쳐 수행되었다. 특히 2차 조사에서는 대전 전역에 임의로 100개 지점을 선정하여 동식물 조사를 수행하고, 중분류 수준의 도시생태현황지도를 구축하였다.



〈그림 15〉 대전광역시 2차 자연환경조사 지점 및 도시생태현황지도

자료: 국립생태원 2017

2) 생태계변화관찰 조사

대전에서는 2017년부터 주요 야생동·식물 서식지를 대상으로 동식물상 조사를 수행하고 있다. 이를 통해 주요 지역의 동식물상 변화와 원인 분석을 통해 향후 보전 방안 마련이 가능할 것으로 기대하고 있다. 2017년에는 대청호 추동습지와 유등천, 장태산, 계족산에서 수행되었으며, 2018년도에는 갑천과 식장산, 금수봉, 보문산에서 이루어졌다.

〈표 1〉 대전광역시 생태계변화관찰 조사대상지 현황

주	주요 서식 생물종	지역 특성	조사년도
대청호 추동습지	수달(멸종1급, 천연기념물), 흰목물떼새(멸종2급)	습지보호지역(2008.12. 26 지정) 상수원보호구역	17년
유등천	수달(멸종1급, 천연기념물), 감돌고기(깃대종) 등	멸종위기종 야생생물서식지	17년
장태산	하늘다람쥐, 이끼도롱뇽(깃대종) 등	깃대종 서식지	17년
계족산	황조롱이(천연기념물), 왕벚나무(멸종위기), 주목(취약종)	양호한 산림 분포 (대전 핵심 생태·녹지축)	17년
갑천	수달(멸종1급, 천연기념물), 미호종개(천연기념물), 황조롱이(천연기념물)	자연하천의 안정된 생태계 보유 (습지보호지역 지정 신청지역)	18년
식장산	하늘다람쥐(천연기념물, 멸종2급, 깃대종), 왕벚나무(멸종), 주목·금붓꽃(취약종)	멸종위기종 야생생물서식지 깃대종 서식지	18년
금수봉	샬(멸종2급), 수달(멸종1급), 너구리, 고라니, 붉은배새매(천연기념물)	멸종위기종 야생생물서식지	18년
보문산	마무리하늘다람쥐(천연기념물, 멸종2급, 깃대종), 수리부엉이(멸종2급), 남생이(멸종2급) 등	멸종위기종 야생생물서식지 깃대종 서식지	18년

자료: 대전광역시 2018

3) 깃대종 정밀 모니터링

대전에서는 2014년 2월에 공론화 과정을 거쳐 지역적 특성을 고려하여 하늘다람쥐와 이끼도롱뇽, 감돌고기 등 3종을 깃대종으로 선정하였으며, 2015년에는 깃대종 모니터링 및 보전방안 연구용역을 수행하였다. 이를 통해 깃대종 3종의 정밀 분포 및 밀도, 생태적 특징, 보전·활용 방안을 마련하였다.



〈그림 16〉 대전광역시 깃대종 3종 캐릭터

자료: 대전광역시 홈페이지

2. 대전의 기후변화에 따른 생태계 영향 관련 정책 제언

1) 주요 자연환경 관련 조사·연구 체계 확립

현재 대전에서는 자연환경조사가 2002년부터 10년 단위로 실시되고 있고, 생태계변화관찰은 매년 4개 주요지역을 대상으로 이루어지고 있으며, 2019년부터는 도시생태현황지도 구축·갱신이 5년 단위로 실시된다. 그러나 각 조사·연구별 조사 방법 및 목적 등 차별성에 대한 검토를 통해 대전 내 서식하는 야생동·식물 보전·복원과 기후변화에 따른 영향을 파악하기 위한 체계 구축이 필요할 때이다.

2) 생물계절학적 연구 수행

현재 대전에서 실시하고 있는 생태계변화관찰 조사는 매년 주요 4개 지역을 대상으로 수행되고 있으나, 예산 및 인력 부족으로 지역별 4회씩 조사가 수행되고 있다. 이는 그 지역의 주요 동식물상을 파악하는 것은 가능하나, 변화 양상이나 원인 규명이 쉽지 않다. 예산 및 인력을 보충하여 주요 지역 내에 고정조사구를 선정하고 봄철 주요 식물의 개화시기와 곤충 발생, 우점 조류의 번식시기 등의 변화를 파악하는 생물계절학적 연구를 수행함으로써, 기후변화에 따른 생태계의 영향을 파악하고 미리 대응할 수 있는 기초자료를 확보할 필요가 있다.



〈그림 17〉 생물계절학적 연구 (박새류 번식 단계 및 변화 파악)

3) 대전 서식 동·식물의 취약성·리스크 평가 및 보전방안 마련

현재 기후변화의 영향 및 취약성 평가 사업이 기관별로 진행되고 있으나 생태분야 평가 사업은 부분적으로만 수행되고 있다. 또한 기존의 취약성 평가는 기후변화에 대한 상대적인 반응 민감도와 미래의 악화 가능성 제시에 그치고 있어 실질적인 대응책 마련에 적용하기에는 한계가 있다. 이를 위해 최근 국립생태원에서는 국내 생태계에 대한 기후변화 리스크 항목을 발굴하고 생태분야 핵심 리스크 항목 선정 및 기후 위해 요소, 노출 서식지 및 생물종, 민감도 및 취약성 등에 기반한 평가 방법을 개발하고 있다(국립생태원 2018).

이러한 시점에서 대전에서도 지지체 차원의 대전 서식 동식물 현황과 생태적 특징을 바탕으로 취약성 및 리스크 평가를 통해 기후변화에 대응하기 위한 보전방안을 사전에 마련할 필요가 있다.

4) 대전 생태계의 기후변화 적응 및 보전을 위한 법/제도적 장치 마련

대전은 자연환경보전조례 등 기후환경정책과 관련한 15개 내외의 조례가 제정되어 있다. 그러나 일부 조례의 경우 최근의 동향에 맞춰 개정이 필요할 것으로 생각된다. 특히 도시생태현황지도 구축이 의무화되면서 이와 관련한 조례 신설 및 효과적 활용을 위한 법적/제도적 장치 마련에 대한 고민이 필요할 때이다.

5) 기후변화에 따른 생태계 영향 관련 교육·홍보

대전 시민을 대상으로 대전 내 동식물 현황과 보전의 중요성, 기후변화에 따른 생태계의 영향에 대한 지속적인 교육 및 홍보 방안을 마련할 필요가 있다. 이를 통해 대전 시민의 환경에 대한 관심 증대와 기후변화에 대한 이해가 높아질 수 있다. 특히 최근에는 여러 지자체에서 시민 모니터링단을 구성하여 시민과 함께 자연환경 조사 및 보전활동을 추진하고 있으며, 이러한 자료를 데이터베이스화하고 모든 시민들한테 정보를 제공할 수 있는 공간을 마련할 필요가 있다.

참고문헌

- 김국립공원연구원(2017), <조류모니터링 보고서>
- 국립산림과학원(1998), <임업부문의 기후변화협약 국가보고서 작성>
- 국립산림과학원(2005), <지구온난화에 따른 산림식생대의 변화>
- 국립생태원(2016), <생태계 기후변화 영향 취약성 리스크 평가 - 연구사례분석->
- 국립생태원(2017), <생태계 기후변화 조사 연구>
- 국립생태원(2017), <기후변화 민감생태계 관리 및 보전방안 연구 - 아고산생태계 구상나무의 위협요인과 보전->
- 국립생태원(2018), <생태계 장기모니터링 지역의 기후변화 영향>
- 국립생태원(2018), <생태계 기후변화 리스크 평가 및 적응대책 연구>
- 대전광역시(2014), <대전광역시 자연환경조사 연구용역>
- Bradley, B.A., Wilcove, D.S., Oppenheimer, M.(2010), Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. *Biological Invasions* 12: 1855-1872.
- Dunn P.(2004), Breeding dates and reproductive performance. *Advances in Ecological Research* 35: 69-87.
- Ihlow, F., Dambach, J., Engler, J.O., Flecks, M., Hartmann, T., Nekum, S., Rodder, D. (2012), On the brink of extinction? How climate change may affect global chelonian species richness and distribution. *Global Change Biology* 18: 1520-1530.
- IPCC.(2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II, III to the Fifth Assessment Report of the International Panel on Climate Change.*
- Lee, S., Bae, D.H.(2013), Local effects of climate change over South Korea with a high resolution climate scenario. *Climate research*, 54: 85-93.
- Nishimura, N., Sasaki H., Nishimura Y.(2001), Ecological consideration for the distribution of natural grassland vegetation zones in relation to the climate and climate change change in japan. *Grassland Science* 47: 86-92.
- Rosenzweig C. Karoly D. Vicairelli M. Neofotis P. Wu Q. Casassa G. Imeson A.(2008), Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* 453 (7193), 353-357.
- Stervander, M., Lindstrom A. Jonzen N., Andersson A.(2005), Timing of spring migration in birds: long-term trends, North Atlantic Oscillation and the significance of different migration routes. *Avian Biology* 36: 210-221.
- Takahashi, M.(2008), Latitudinal patterns in the phenological responses of leaf colouring and leaf fall to climate change in Japan. *Global Ecology and Biogeography* 17: 556-561.
- <https://www.nasa.gov/>
- <https://www.daejeon.go.kr/index.do>

대전세종포럼

DAEJEON
SEJONG
FORUM

기후변화 대응 스마트 시티 내 스마트 워터 그리드 구축 동향 및 시사점

주진철 한밭대학교 교수

기후변화 대응 스마트 시티 내 스마트 워터 그리드 구축 동향 및 시사점

주진철 한밭대학교 교수

DAEJEON
SEJONG
FORUM

I. 스마트 시티와 스마트 워터 그리드

전 세계적으로 기후변화 및 강우패턴의 변화에 따른 가뭄 발생빈도의 증가로 인해 용수 공급능력이 현저히 감소되고 있는 반면, 20세기 이후 물 사용량은 6배 이상 급증하여 2025년에는 세계 인구의 약 3분의 2 이상이 물 부족에 처할 것으로 전망되고 있으며, 이로 인해 지역 간 물 분쟁이 점차 가속화 될 것으로 보고되고 있다(SWRRC 2008). 그러나 환경과 경제성의 문제로 향후 대형 댐의 건설을 통한 대규모 수자원 확보가 용이하지 않으므로 용수의 안정적 공급이 어려울 것으로 예상되고, 취수·정수·송수시설의 노후화 진행과 비효율적 운영으로 인한 추가비용과 누수 발생으로 인해 향후 용수확보와 공급 서비스의 질적 하락이 예상된다(IBM, 2010; Loeff et al., 2011).

따라서 새로운 용수공급 및 관리시스템의 보급이 요구되며, 이러한 차세대 용수공급 및 관리 시스템은 분산형 시스템과 대체 수자원의 적극적인 활용을 통해 기후변화에 대응하여 '안전(safe)'하게 수자원을 확보할 수 있어야 하고, 용수관리 인프라 시설의 효율적인 유지관리 및 비용손실 최소화를 위해 '지능적(smart)'이며, 효율적 운영에 따라 에너지 절약 및 온실가스 배출량을 저감하여 '저탄소 지속가능성장(green)'에 기여해야 한다.

이에 따라 취수원에서 수도꼭지까지 용수공급 및 관리시스템 전 과정에 첨단 정보통신기술(information communication technology; ICT)을 접목하여, 과학적 관리로 안전하고 지능적이

주) 본 기고문의 일부는 주진철(2011, 2012a, 2012b)의 내용을 일부 발췌하여 재구성 및 편집하였습니다.

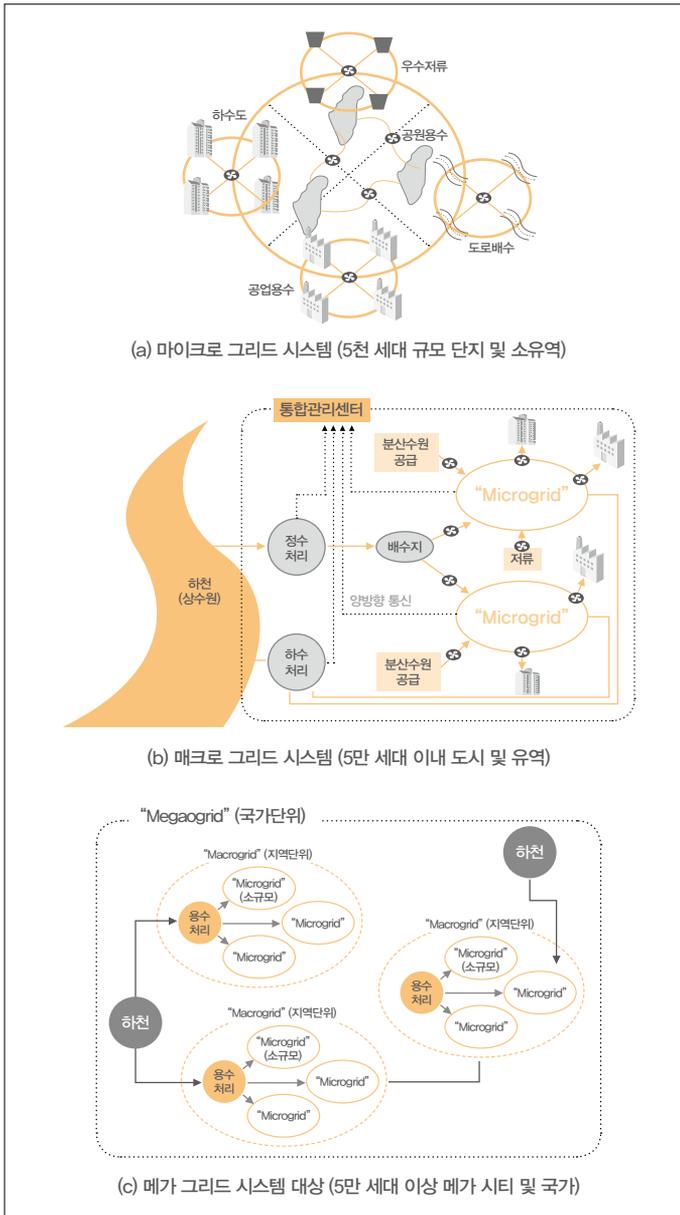
며 저탄소 지속가능한 용수공급 및 관리시스템을 갖춘 ‘스마트워터시티(smart water city, SWC)’ 건설이 요구된다. 최근에는 용수공급 및 관리시스템의 차세대 개념으로서 ‘스마트 워터 그리드(smart water grid, SWG)’가 제시되고 있으며, 이는 ICT, 빅데이터, 인공지능(artificial intelligence, AI)기술을 활용하여 하천수, 호소수, 우수, 지하수, 하폐수처리수, 해수 등 다양한 수자원을 효율적으로 배분·관리·수송하여 수자원의 지역적·시간적 불균형을 해소하는 차세대 지능형 용수공급 및 관리시스템이다(국토해양부, 2011; 주진철, 2011). 또한, SWG는 적용 규모에 따라, 마이크로(micro) 그리드, 매크로(macro) 그리드, 메가(mega) 그리드로 구분할 수 있으며(그림 1 참조), 용수의 생산 및 소비정보를 양방향·실시간으로 감시함으로써 용수공급 및 관리와 에너지 효율을 최적화 할 수 있는 장점이 있다(한국건설기술연구원 2010).

이러한 SWG의 요소기술로는 크게 (1) 다양한 수자원(자연형 수자원, 능동형 수자원 등)을 water platform에 수집·저장하며 수자원의 배분·관리·수송을 물리적으로 통제할 수 있는 수자원 관리기술과 (2) 수자원의 확보·수송·활용 등에 대한 실시간 모니터링, 수자원 정보의 관리 및 의사결정 지원이 가능한 ICT-기반 데이터 통합관리기술로 구분할 수 있다(그림 2 참조).

최근 들어 국내외에서 개발·적용 중인 스마트 워터 그리드의 핵심기술로는 (1) 지능형 검침 인프라(Advanced Metering Infrastructure, AMI), (2) 스마트 그리드를 이용한 물-식량-에너지 최적화, (3) 수자원 및 수질관리 센서 네트워크를 통한 수자원 정보의 지식네트워크 구축, 그리고 (4) 국가 단위의 효율적 광역 수자원 관리 시스템의 개발·적용을 예로 들 수 있으며, 제조기술, 정보통신기술 그리고 통합운영관리 기술이 접목되어 다양한 형태의 융복합 기술(클라우드 기반 수자원 및 용수관리 등)이 현재 개발·적용되고 있다(Hackney, 2010; Ponesse, 2010; 이상호, 2011; 주진철, 2011; Boyle et al., 2013; Joo et al., 2014; March et al., 2017).

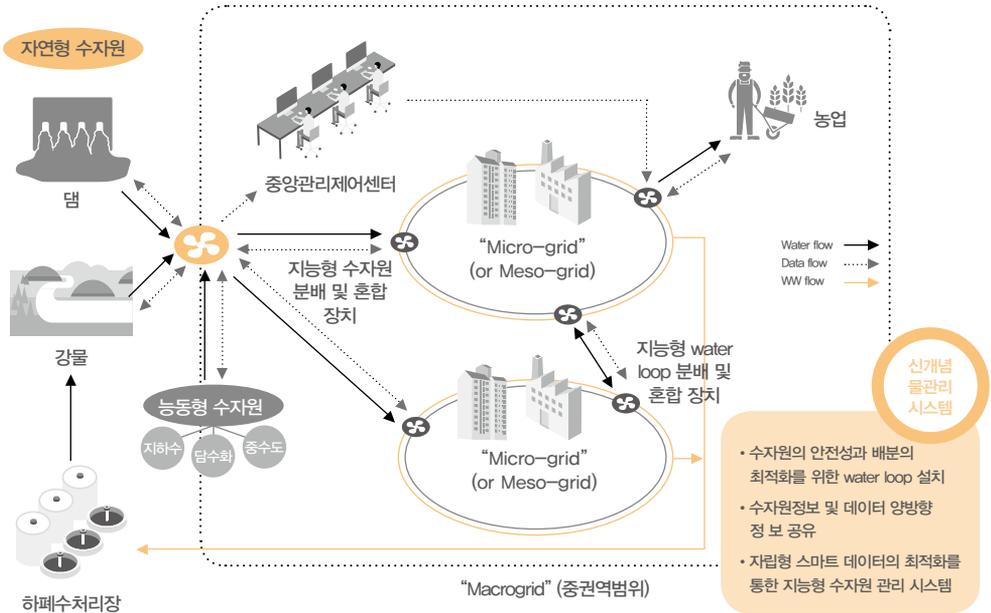
지능형 검침 인프라 중 상수도(waterworks) 원격검침시스템(automatic meter reading, AMR)은 수용가의 지속적 증가에 따른 검침업무의 난해함을 해소하고, 검침 누락 예방 및 고지업무의 투명성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 용수 사용의 실시간 고지·분석을 통해 누수 탐지가 가능하므로 용수 사용 절약을 유도할 수 있다. 또한, 전체 용수 소비량과 에너지 소비량의 절감을 유도하여, 용수공급인프라의 유지관리 효율성을 획기적으로 증대시킬 수 있다. 2002년 이후로 국내의 상수도 원격검침시스템이 서울시와 일부 지자체를 중심으로 도입되었으며, 많은 디지털 수도계량기(smart water meter)가 개발·개량되어 현장에 적용되었으나, 디지털 수도계량기의 종류나 통신방식이 통일되어 있지 않은 실정이다. 또한, 최근 건설되고 있는 신축 아파트 단지, 신도시의 전기·수도·가스·온수 데이터를 동시에 원격적으로 통합 검침할 수 있는 원격검침시스템의 도입이 활발히 이뤄지는 추세이다.

본 고에서는 양방향·실시간 용수관리를 위해 요구되는 디지털 수도계량기 연계형 상수도 원격검침시스템의 국외 현장 적용 사례 등을 조사·분석하였다. 또한 이러한 사례를 통해 향후 전 세계적으로 통용 가능한 디지털 수도계량기 연계형 원격검침시스템 통합기술(integrated technology)과 표준화기술(standard technology)을 선점하여 4차산업 선도도시이며 물순환 선도도시인 대전에 적용 가능한 전략에 대해 기술하고자 한다.



〈그림 1〉 적용 규모에 따른 스마트 워터 그리드의 정의

자료: 한국건설기술연구원, 2010



〈그림 2〉 스마트 워터 그리드의 주요 요소 기술

자료: 국토해양부, 2011

II. 지능형 검침 인프라(advanced metering infrastructure, AMI) 정의 및 장점

일반적으로 '지능형 검침 인프라(advanced metering infrastructure, AMI)'의 정의는 스마트 미터(smart meter)를 활용하여 전기, 가스, 난방 및 수도 등의 소비량 및 미터 기기의 상태 관련된 데이터의 측정·전송·분석에 활용되는 다양한 스마트 미터기 및 주변 장치, 소프트웨어, 통신방식 및 인프라, 데이터 통합관리 시스템 등을 총칭하는 것으로 정의된다(주진철, 2011; 2012a; 2012b). 또한, 지능형 검침 인프라는 자동화 계량기 판독 또는 원격검침(Automated Meter Reading, AMR), 자동화 계량기 관리(Automated Meter Management, AMM) 또는 지능형 계량(Smart Metering) 등으로 세분화 할 수 있다(한국상하수도협회, 2009; 주진철, 2011; 2012a; 2012b; 2014).

첨단 센서네트워크를 활용해 실시간으로 자원의 수요·공급을 양방향으로 관리하여 에너지와 자원의 절감 및 활용을 극대화 할 수 있는 지능형 검침 인프라의 장점은 에너지절약, 절취

(누수)감소, 납부연체 감소, 데이터 보안 증진, 운영비용 절감 및 고객서비스 개선 등을 들 수 있다. 특별히, 전기, 가스, 난방, 수도 및 기타 자원을 보다 효율적으로 사용하며, 피크 타임(peak time) 사용 시간에 소비 감소에 따른 에너지 및 자원과 요금 절감을 유도할 수 있으며, 실시간 데이터에 접속하여 양방향통신으로 수요-공급을 조절 및 최적화 하여, 정확한 요금 청구와 비상시 신속하게 대처할 수 있는 장점이 있다(Pike Research, 2010; IBM, 2010).

Ⅲ. 지능형 검침 인프라(advanced metering infrastructure, AMI) 개발 동향

1. 상수도 지능형 검침 인프라의 구성

상수도 지능형 검침 인프라의 구성은 일반적으로 디지털 수도계량기(smart water meter), 센서(유량, 수질, 온도 등)를 통해 검출된 데이터를 수집기로 전송해 주는 검침단말기(meter interface unit, MIU), 검침단말기의 데이터를 전송하는 유·무선 통신망(communication networks), 전송된 데이터를 일정구역 단위로 저장하고 통합서버로 전송해 주는 수집기(data concentration unit, DCU), 정보처리 장치 및 검침된 데이터를 수집하고 관리하는 통합서버(integrated server)로 구성된다. 일반적으로 데이터를 수집기 및 통합서버로 전송하는 방식은 유선방식(전력선 통신, 인터넷 네트워크, 전화선, 케이블 TV 망 등), 단거리 무선방식(RF, Binary CDMA, Zigbee, bluetooth 등), 장거리 무선방식(CDMA, SMS paging network, 위성통신 등)으로 각각 구분할 수 있다(한국상하수도협회, 2009).

2. 디지털 수도계량기(smart water meter)의 개발 동향

고온의 온수, 우수 및 재생수 등도 측정할 수 있는 다양한 디지털 수도계량기가 개발되고 있으나, 대부분의 디지털 수도계량기는 가정용수의 검침에 집중되고 있으며 체적측정식(volumetric)과 추정식(inferential) 방식을 주로 활용하고 있다. 최근에는 정적(solid-state or static) 또는 반도체를 이용한 디지털 수도계량기도 생산이 되고 있으며, 이들 계량기는 전자식으로 작동되어 마모가 발생하는 운동 부속을 포함하고 있지 않아 기계적 부분의 폐색이 없으므로 부유물과 협잡물이 함유된 중수에도 활용가능하며, 매우 높거나 낮은 유량도 정확히 측정할 수 있

는 장점이 있다(주진철, 2011; 2012a; 2012b; 2014).

대표적인 국외의 디지털 수도 계량기 제조업체인 Neptune, Badger, Itron, Sensus, Aclara, Arad, Datamatic 등은 미국 또는 유럽업체들로서 원격검침시스템에 활용되는 전기, 가스, 상수의 디지털 계량기를 이미 생산하고 있으며, 북미뿐만 아니라 아시아 및 유럽에서도 원격검침시스템 사업을 확장하고 있다. 대부분의 제조업체는 원격검침용 디지털 수도 계량기에서 측정된 데이터를 활용하여 실시간 소비량 검침 및 비용 고지, 절수, 누수탐지, 수질 모니터링, 유량제어 등의 기능이 부가된 통합관리시스템과 연계하여 운영하고 있다(주진철, 2011; 2012a; 2012b; 2014).

3. 데이터 전송방식의 개발동향

1) 통신네트워크(Communication Network)

디지털 수도계량기, 센서(유량, 수질, 온도 등)를 통해 검출된 데이터를 근거리 통신망(neighborhood area network, NAN)을 통해 수집기로 전송 후 광역 통신망(wide area network, WAN)을 통해 검침서버를 운영하고 있는 상수도 사업본부로 전송된다. 국외의 데이터 전송방식은 도시 규모, 계량기의 밀도, 전력공급 여부 및 통신망의 설치 여부 등을 종합적으로 고려하여 결정되었다. 대부분의 디지털 수도계량기 제조업체들은 계량기의 부호기가 공급하는 판독 내용(데이터)을 전송할 검침단말기와 근거리 통신망을 연계하여 판매하였으며, 자체 소유 통신 프로토콜을 사용하여 라디오 주파수(RF) 통신 기술을 사용하고 있다. 북미 지역의 대다수의 디지털 수도계량기는 미국 연방통신위원회(FCC: Federal Communications Commission)로 부터 수도 계량용으로 허가 받지 않은 902MHz에서 928MHz 사이의 주파수대에서 운영되고 있으며, 일부는 허가받은 450MHz에서 470MHz 사이의 주파수대에서 운영되고 있다. 북미지역과 유사하게 유럽에서도 계량 시스템이 수도 계량용으로 허가 받지 않은 433MHz에서 868MHz 주파수대에서 운영되고 있으나, 영국은 수도 계량용으로 허가 받은 특별 주파수 184MHz를 활용하고 있다(Pike Research, 2010; IBM, 2010).

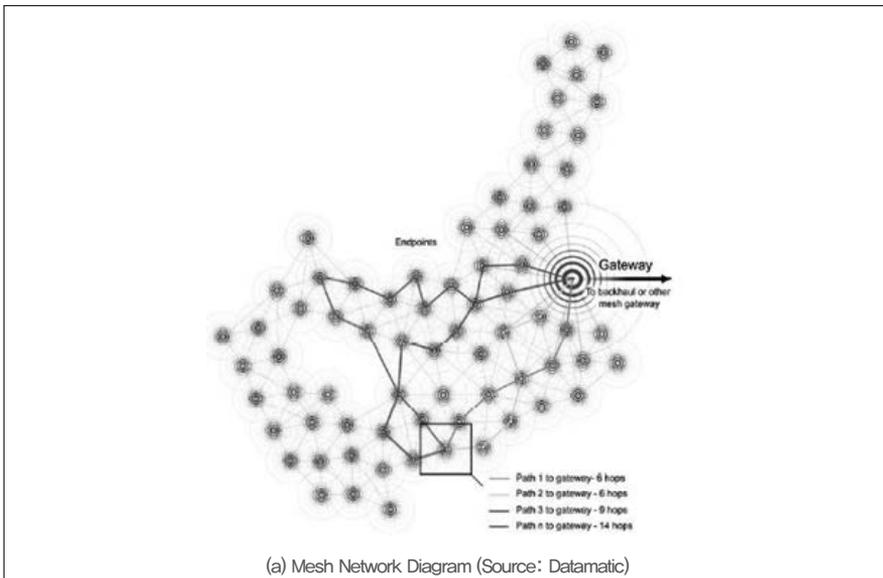
2) 통신망 구성형태(Network Topologies)

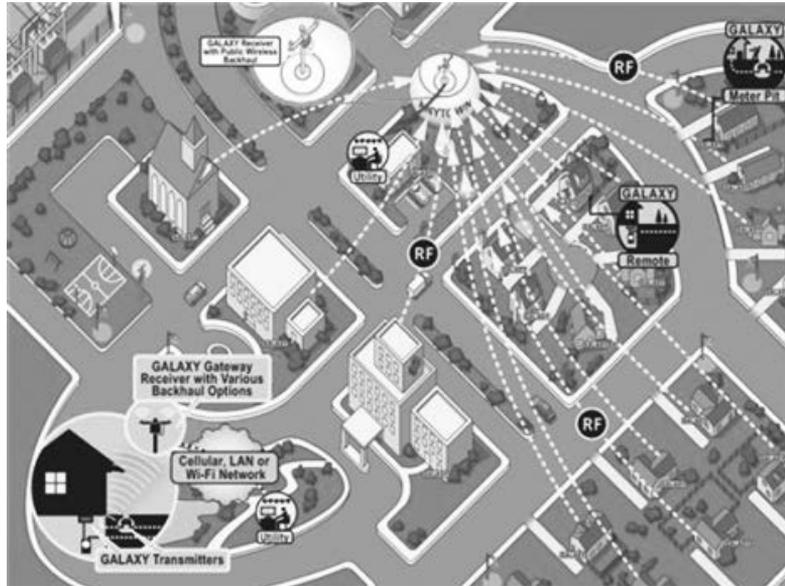
근거리 통신망에 적용된 통신망 구성형태란 말단의 계량기, 센서를 통해 검출된 데이터를 수집기로 전송 시 활용하는 데이터 전송 방법을 의미하며, 노드(말단의 계량기 및 센서)들과 이에 연결된 통신망 들을 포함한 네트워크의 배열이나 구성이 스타(star), 메쉬(mesh), 버스(bus), 나무

(tree) 등의 형태로 통신망이 구성되어 있으나, 스타와 메쉬형 통신망 구성형태가 가장 널리 활용되는 것으로 조사되었다(그림 3 참조). 메쉬 네트워크에서는, 각 말단이 데이터를 전송·수신·전달할 수 있으며 수집기로 돌아가는 다양한 다중 경로(gateway)를 지니고 있어, 데이터 전송은 한 지점에서 다른 지점으로 이동하며 매 회 같은 경로를 통해 전송되는 경우가 극히 적다. 이러한 데이터 전송의 유연성은 한 말단이 수집기로 전송이 되지 않을 경우에도 다른 경로를 통해 전송하며 자가복구가 가능한 장점이 있는 반면, 다중 통신 경로를 관리하기 위해 대규모 프로토콜을 필요로 하여 배터리 수명이 단축될 수 있다.

스타 네트워크에서는, 수집기와 각 말단의 계량기가 일대일로 통신하며, 수집기가 약 20,000~30,000개 사이 말단 계량기를 관할할 수 있다. 스타 네트워크는 비교적 계량기 밀도가 높은 대규모 도심에서 유용하며, 원활한 데이터 전송을 위해서는 계량기의 밀도, 전송 높이, 게이트웨이 등을 고려해서 결정해야 한다. 단일 경로(gateway)를 통해 데이터가 전송되는 반면, 다수의 수집기가 요구되므로 초기 투자 비용이 높을 수 있으나 비교적 안정적인 통신방식으로 보고되고 있다(Pike Research, 2010; IBM, 2010).

수집기에 취합된 데이터는 다양한 광역 통신망을 통해 상수도 사업본부의 데이터 통합관리 센터로 이동하며, 북미에서는 일반적으로 인터넷 기반 네트워크를 활용하며, 일부 국가에서는 통신사가 제공하는 휴대전화 시스템, 광네트워크, Wi-Fi 네트워크 및 전력선통신(power line communication, PLC) 네트워크를 활용한다. 실제로 Badger시는 Landis & Gyr 및 Aclara와 협약을 맺고 전력선 시스템에 수도 계량 기능을 추가하였다(Pike Research, 2010; IBM, 2010).



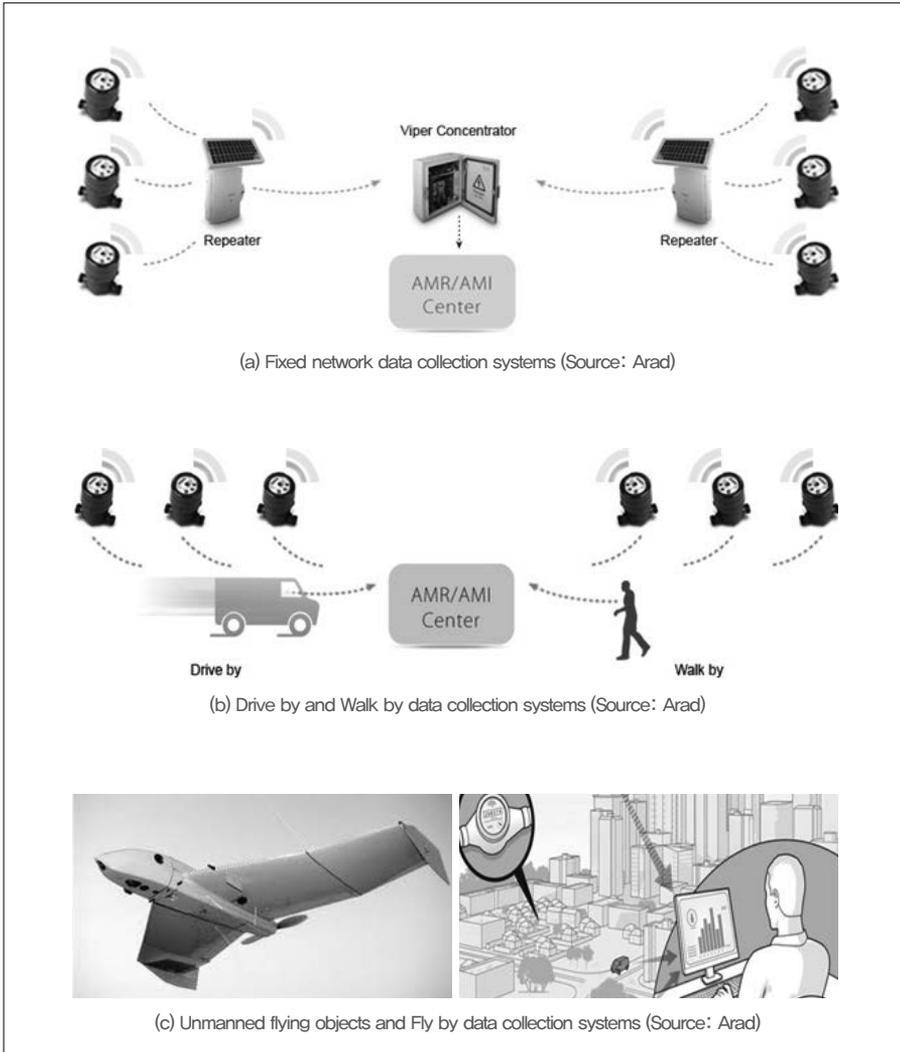


(b) Star Network Diagram (Source: Badger Meter)

〈그림 3〉 다양한 방식의 통신망 구성형태

4. 검침방식의 개발동향

국외의 원격검침시스템에서 적용되는 검침방식은 (1) 고정망(fixed network)을 통한 중앙 검침, (2) 차량(drive by)을 이용한 검침, (3) 사람(walk by)에 의한 검침 (4) Dialog3G의 휴대통신망을 사용하거나 디지털, 아날로그 통신 등이 가능한 시스템 등을 접목한 다양한 방식을 활용하고 있다(그림 4 참조). 기존의 검침원에 의한 터치-판독(touch-read) 대비 도보식이나 운전식 검침방식은 검침원이 데이터 취합 장치를 가지고 디지털 수도계량기 주위를 도보로 혹은 운전해서 지날 때 디지털 수도계량기에 내장된 소비 데이터를 라디오 주파수(RF) 통신을 통해 전송 받는다. 이외에도 이스라엘의 Arad사에서서는 무인비행물체(unmanned flying objects)를 활용한 비행식 검침방식을 도입하였으며, 동일 회사의 폐쇄회로를 통한 검침방식에 비해 운영경비가 25% 더 저렴한 것으로 보고하였다(Pike Research, 2010; IBM, 2010; 주진철, 2011; 2012a; 2012b; 2014).



〈그림 4〉 원격검침시스템에서 적용되는 다양한 검침방식

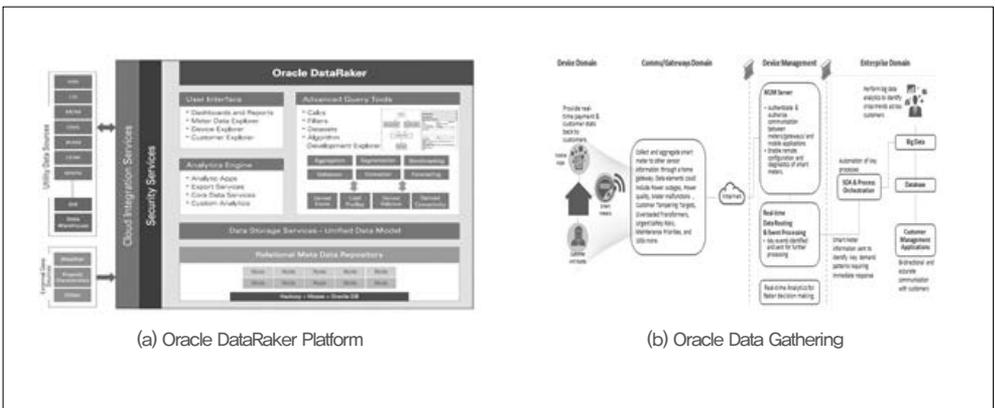
IV. 온라인 서비스 개발동향

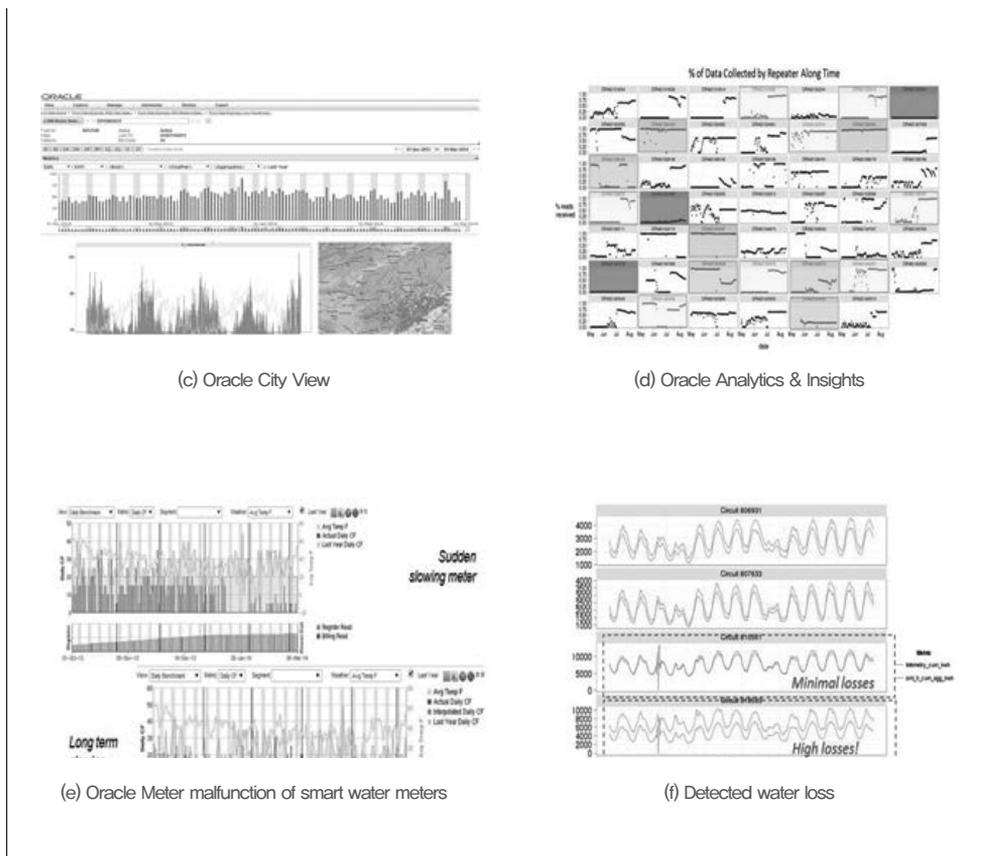
시스템 통합운영관리 업체들인 Cisco, Siemens, IBM, Oracle 등은 용수 인프라 관리 또는 통합네트워크 솔루션 등의 통합 물관리시스템(integrated water management system)을 개발하여 현장적용을 하고 있으며, 원격검침시스템을 통해 고객들의 현재 소비량과 과거 누적 소비량, 누수 감지 서비스 및 실시간 요금 고지 등을 실시간으로 웹 포털을 통해 제공하고 있다.

1. Oracle Smart Water AMI/AMR 운영 시스템 서비스

Oracle의 Data Ingestion and Data Model 주요 구성도는 다양한 인프라에서 수신된 데이터를 통합/관리하여 변환, 해석, 예측을 통해 소비자와 관리자 등이 필요로 하는 의사결정에 도움을 주는 서비스로 모델의 유연성으로 다양한 형태의 인프라와 데이터에 적용 가능하며, 도시 전체 인프라와 연동하여 해석이 가능하며 실시간 관측되는 자료의 도식화 및 정보공개를 통해 smarter city 서비스를 Web/App 기반으로 제공하며, 지속가능한 도시관리에 활용이 가능하다. 또한, 분산되어 있는 위치, 용수 이용자 정보, 날씨, smart water meter data, 자산 및 네트워크 정보를 통합하여 Big data 분석 엔진에 전달하여 Big data 분석 엔진에서는 통합, 데이터 시각화, 마이닝, 통합 및 학습화를 통한 예측을 실시하여 smart water meter의 적절 기능성 여부, 소비자의 용수 사용 내역, 자산관리 및 용수 과금 내역, 유지관리 효율화 및 에너지 효율 증진 방안 등을 제시하여 고객 만족도 증대, 공공 안전성 증대, 유지관리 비용 감소, 수자원 절감 등의 효과 등이 발생하는 것으로 보고되고 있다(그림 5 참조).

실제로 실시간 데이터를 활용해 도시 용수공급/소비 관리자가 주민의 용수사용량을 모니터링, 누수를 검지, 누수 검지 후 복구 현황 및 지속가능성 지수 평가 및 grid 기반 개별 가정의 smart water meter를 선정 후 각 smart water meter의 일일, 평균 용수사용량 및 사용 경향 파악이 가능하다. 또한, 시간과 공간에 따른 용수사용 예측, 누수 감지, 기상정보 등을 제공하고, 인공지능(AI)을 이용한 주민에게 절수 행동요령 제시, 도시용수 관계자에게 공급/소비 최적화 방안을 제시한다. 이를 통해 고장, 오작동하는 미터기의 신속 탐지, 가정용수의 비용을 80% 절감, AMI system의 고장/수리 시간을 기존 평균 90일에서 30일 이내로 단축하여 미고지 수량을 감소하여 50% 이상의 요금회수하여 기후변화에 대응한 효율적인 용수공급 및 관리가 가능했다.





〈그림 5〉 Oracle Smart Water AMI/AMR 운영 시스템 서비스

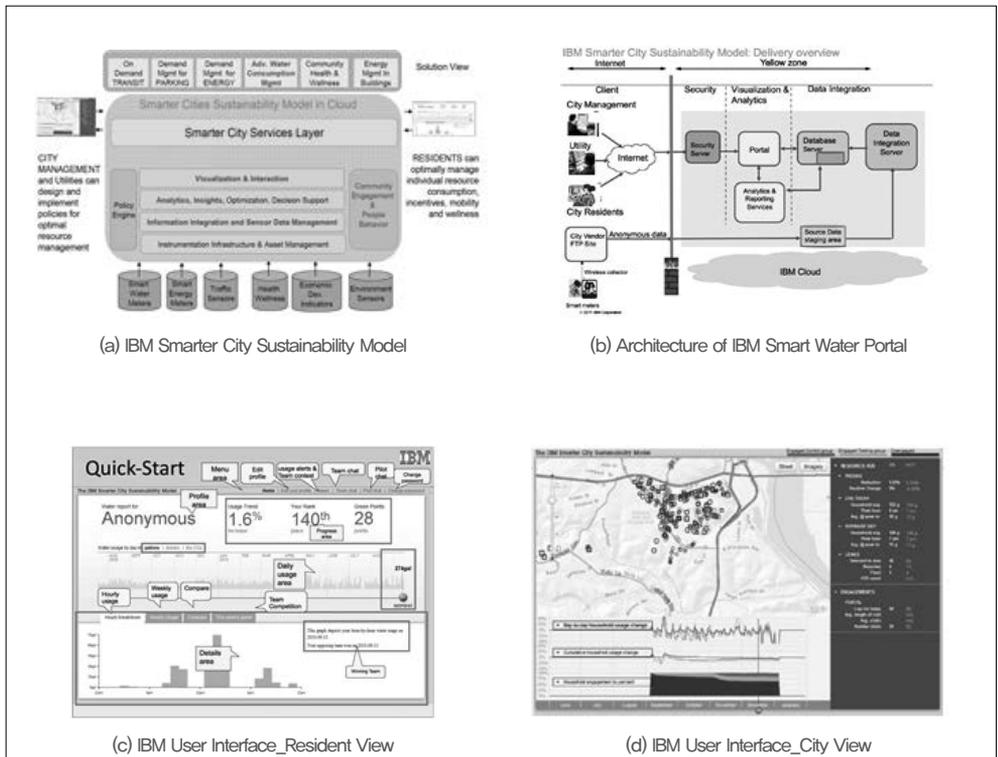
2. IBM Smart Water AMI/AMR 운영 시스템 서비스

IBM의 smarter city sustainability model은 차량 환승, 주차, 에너지, 용수 소비, 건물관리 등의 서비스로 구성되며, 이중 소비자 가정/상가 등에 설치된 다양한 미터/센서를 통해서 실시간으로 관측되는 자료를 통합/관리가 가능하다. 또한 실시간으로 관측되는 자료를 통해 분석/통찰/최적화/의사결정시스템을 통해서 도시 내 자원의 효율적 관리를 도모하고 축적된 자료를 활용해 공급된 도시자원 소비의 최적화를 위한 의사결정/정책자료에 활용하고 있다. Data Integration and Management는 용수소비관련 다양한 데이터를 추출/변환/저장 후 신뢰할만한 데이터로 변환 후 저장하고 Visualization component에서는 주민들이 본인들의 용수소비 등 관련 정보를 확인하고 도시관리자가 용수관련 통합 자료를 이용해 의사결정 할 수 있도록 통합데이터와 위치정보(GIS) 등을 연계해서 제공한다. Analytics component에서는 용수소비 관련 패

턴과 경향성을 분석 후 하루, 한주의 용수사용량을 예측, 누수 모니터링 및 비정상적 사용을 감지하는 서비스 제공하고 있다(그림 6 참조).

Smart Water Portal은 2개의 인터페이스(주민들 vs. 도시관리자)를 제공하며, Resident View에서는 주민들이 인증받은 ID와 password로 접속하여 시간대별, 주별 용수사용량 확인, 물사용 경향성 파악, 전체 가구 중 사용량 순위 및 녹색포인트 등이 확인 가능하다. 또한 누수를 미리 감지하거나, 누수 발생 시 실시간 검지하여 통보하며, 주민의 용수소비량 관련 몇 주 간의 데이터를 취득, 분석하여 일반적 사용 패턴을 분석하여 보고하고 있다. 도시 용수공급/소비 관리자가 주민의 용수사용량을 모니터링, 누수를 검지, 누수 검지 후 복구 현황 및 지속가능성 지수를 평가하고 실시간으로 주민의 용수소비량 관련 데이터를 모니터링하고, 용수공급의 최적화를 위한 의사결정지원이 가능하다.

축적된 데이터를 활용해 의사결정에 지원이 되는 의미있는 정보를 도출하고 도출된 분석결과를 활용해 주민과 도시용수 관계자에게 절수 및 용수 공급/소비의 최적화를 위한 의사결정지원시스템의 기본 자료를 제공한다. 또한, 인공지능(AI)을 이용한 주민에게 절수 행동요령 제시, 도시용수 관계자에게 공급/소비 최적화 방안을 제시하며 장기(일주) 및 단기(몇 시간) 용수사용량 예측을 통해 도시용수관리자가 선제적으로 대응이 가능하다.

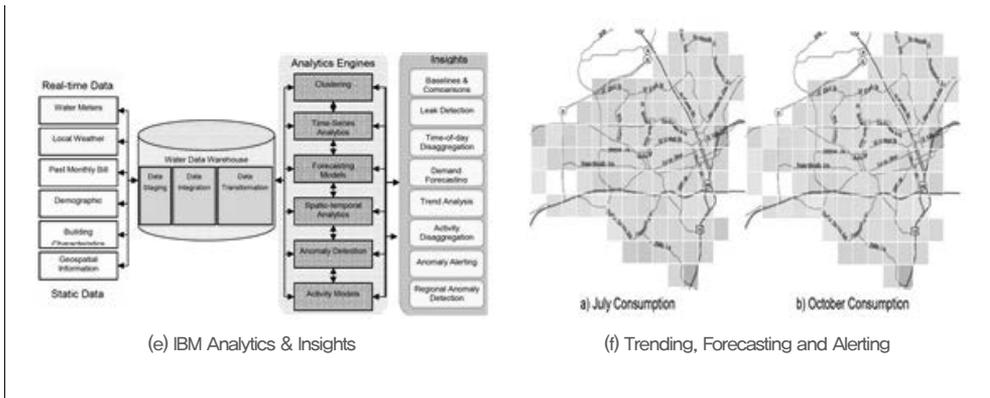


(a) IBM Smarter City Sustainability Model

(b) Architecture of IBM Smart Water Portal

(c) IBM User Interface_Resident View

(d) IBM User Interface_City View



〈그림 6〉 IBM Smart Water AMI/AMR 운영 시스템 서비스

V. 국외 상수도 원격검침시스템 적용 사례

1. 미국

1) 뉴욕주 뉴욕시

뉴욕주 뉴욕(New York)시 환경부는 2012년 1월까지 뉴욕시 전체에 25백만달러의 예산을 투자해 총 834,000개의 디지털 수도계량기를 추가로 설치 완료할 계획이라고 발표하였다. 원격 검침시스템을 통해 하루에 4회에 걸쳐 용수 소비량 및 요금 정보가 웹포탈 또는 스마트폰 앱을 통해 소비자에게 자동으로 전송되며, 소비자가 일/주/월/연 단위로 용수 소비량 및 요금 정보 등을 검색·분석하여 관리할 수 있는 시스템을 구축하였다(Pike Research, 2010).

2) 오하이오주 웨스터빌시

오하이오주 웨스터빌(Westerville)시는 2012년 9월 1,800여개의 디지털 전기계량기와 1,200여개의 디지털 수도계량기 등 전체 14,000개의 디지털 계량기 인터페이스를 교체하는 프로젝트를 수행하고 있으며, 1,200여개의 노후화된 기계식 수도계량기를 원격검침시스템과 연계된 Itron의 디지털 수도계량기로 교체하고 양방향 통신이 가능한 시스템을 구축하여 물관리의 효율화를 추구하였다(Itron, 2012).

3) 아이오와주 듀뷰크시

아이오와주의 듀뷰크(Dubuque)시는 그린 프로젝트인 'Dubuque 2.0'의 일환으로 2010년 9월부터 IBM사 공동주관으로 311개의 일반가정을 대상으로 디지털 수도계량기를 설치하는 용수관리 효율화 검증을 위한 파일럿 프로젝트를 실시하였다. 프로젝트를 통해 용수 소비량의 실시간 검침과 요금 고지 및 모니터링이 용수 소비량을 절감시키고 누수를 감지하고 예방하는데 큰 도움이 되는 것으로 판명되었다. 또한, 실증 참가 시민들의 수자원 보전 및 용수 소비량 절감에 대한 이해도가 향상되어 용수 절감 효과가 매우 우수한 것으로 보고하였다. 이를 근거로 추가적으로 60,000개의 디지털 수도계량기가 추가로 설치 완료할 예정이며, 용수 인프라 및 용수 공급·수요관리의 최적화를 구현 중이다(그림 7 참조)(IBM, 2010).

4) 캘리포니아주 팜 데저트시

캘리포니아주 팜 데저트(Palm Desert)시에서 구축한 디지털 수도계량기 연계형 원격검침시스템의 경우, 참가자들에게 15분마다 용수 소비량을 전송한 결과, 참가하지 않은 일반 가정보다 실험참가자들의 용수 소비량을 절반 이상으로 감소시킬 수 있었으며, 전체 용수 소비량도 약 17% 이상 감소된 것으로 조사되었다(Coachella Valley Water District, 2010).

5) 일리노이주 몰린시

일리노이주 몰린(Moline)시는 효율적인 물관리를 통해 에너지 비용을 절감하고자 2010년 4월부터 기존의 노후화된 기계식 수도계량기를 원격검침시스템 연계형 디지털 수도계량기로 교체·시공하는데 약 390만 달러를 투자하였다. 디지털 수도계량기는 Neptune사 제품으로 선정하였으며 수도계량기 교체 및 원격검침시스템의 구축은 상수도 관리 전문업체인 Northern Water Works사가 담당하였으며, 현재 용수 소비량의 실시간 검침과 요금 고지 및 모니터링 서비스를 제공 중이다(ITU-T, 2010).

2. 이스라엘

이스라엘은 고정 네트워크를 활용한 디지털 수도계량기 구축 비율이 세계 최고 수준이며, 설치된 총 수도계량기 중 25%가 원격검침시스템이 구축되어 있으며, 향후 5년 이내에 원격검침시스템 보급율을 설치된 계량기의 50% 이상으로 끌어올릴 전망이다. 텔아비브(Tel Aviv), 페타

크 티크바(Petach Tikva)의 지자체 및 수도국은 수도 계량기 70,000대에 원격검침시스템을 설치한 후에 말단의 시간별 유량 데이터를 통해 고지서 금액에 명시된 시스템 유입량과의 차이를 모니터링하여 누수를 탐지할 수 있었다. 국가 전역에 설치된 원격검침시스템의 90% 이상은 이스라엘 기반의 Arad Technologies에서 생산되며, 2008년 Badger Meter가 구입한 갤럭시(Galaxy) 원격검침시스템도 활용하고 있다(그림 7 참조)(Arad, 2011).

3. 캐나다

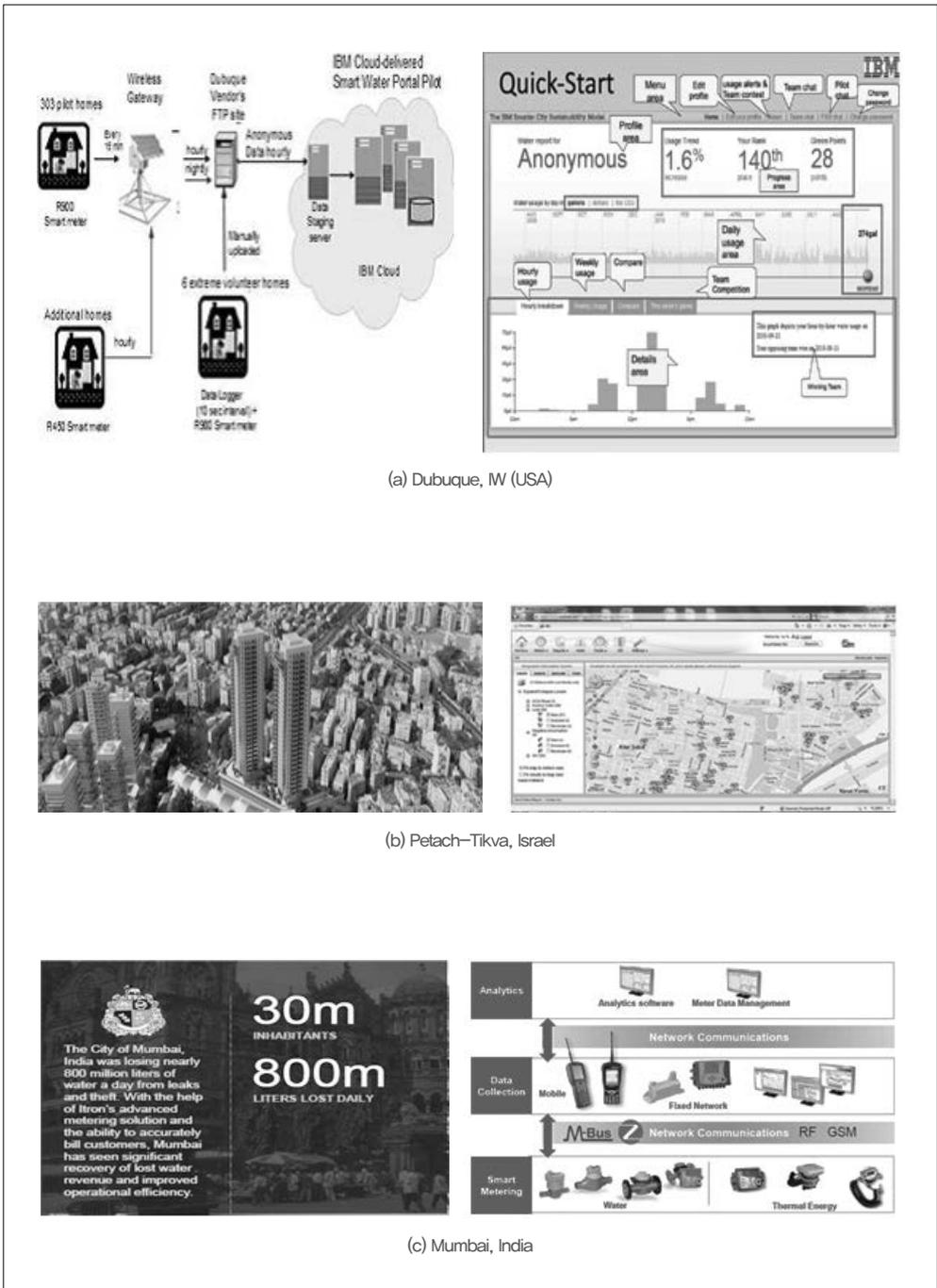
캐나다 동부 오타와주는 2,500만 달러를 투자하여 190,000개 의 디지털 수도계량기를 설치할 계획이며 토론토시 수도전력공사인 Toronto Hydro는 디지털 수도계량기를 통해 3,300만 달러의 에너지 비용을 절약하고 노후화된 계량기 교체로 인해 2,400만 달러의 에너지 비용 절감 효과가 발생할 것으로 전망하고 있다(Pike Research, 2010).

4. 유럽

유럽에 구축된 2억2천5백대 수도계량기의 8%는 원격검침기능을 지원할 수 있으며, 2009년 이후 유럽의 많은 국가에서 디지털 수도계량기를 130만대를 추가했다. 새로 구축될 디지털 수도계량기에는 계량 기능과 더불어 RF 통신망을 통해 운전식 또는 보행식으로 데이터를 수집할 수 있다. 프랑스의 경우, Veolia Water는 대략 80만개의 자동화된 디지털 수도계량기를 갖고 있으며 이중에서 20만개는 고정형 통신방식으로 구축하였으며, Yorkshire Water는 향후 5년 동안 원격검침시스템을 구현할 수 있는 500,000개의 디지털 수도계량기를 신규로 보급할 계획이다(Pike Research, 2010).

5. 인도

인도의 뭄바이 시는 원격검침용 디지털 수도계량기 30만대를 계약했으며, 향후 구매할 디지털 수도계량기를 120만대로 확대될 예정이다. 현지에 적합한 고정망 검침방식으로 구축되었으며, 일부 지역은 검침원의 PDA 등을 활용한 보행식 방식으로 데이터를 수집 및 검침·고지한다(그림 7 참조).(Pike Research, 2010).



〈그림 7〉 Case Studies of Advanced Metering Infrastructure for foreign countries

Ⅵ. 대전광역시 스마트 워터 그리드 발전방향

스마트 워터 그리드는 기존 수자원 관리시스템의 한계를 극복하고 지역간의 수자원 불균형을 해소하고 미래의 물복지 문제를 해결하기 위한 글로벌 물산업의 급격한 변화에 대비하는 차세대 물관리 시스템이다. 향후 전세계적으로 적용할 수 있는 통합기술(integrated technology)과 표준화기술(standard technology) 선점 및 IT·NT·BT 기술을 융합한 혁신기술(innovative technology) 개발을 통해 급성장하고 있는 미래물시장을 주도해야 할 것이다. 또한 다양한 실증단지 제공과 현장 적용을 통해 최종적으로 smart water grid 기술의 세계 표준화 및 사업화를 추진 시 안전하고 편리한 사회기반시설의 구축과 메가시티로의 변화에 능동적으로 대응하여 4차산업 선도도시, 물산업 선도도시를 표방하는 대전시의 신성장 산업을 육성하는 효과를 유발할 것으로 기대된다.

Ⅶ. 결론

본 고에서는 디지털 수도계량기(smart water meter) 연계형 상수도 원격검침시스템(automatic meter reading)의 국외 시장동향 및 원격검침시스템의 각 구성 요소기술의 개발현황과 현장 적용 사례 등을 조사·분석하였다. 국외의 디지털 수도계량기 제조업체는 주로 미국 또는 유럽 업체들로서 최근에는 북미뿐만 아니라 아시아 및 유럽에서도 원격검침시스템 사업을 확장하고 있으며 디지털 수도계량기는 2015년에는 186백만달러 규모로 성장하였으며, 이와 관련된 통신 및 네트워크관련 시장과 고객 데이터 관리 및 통합관리 솔루션(integrated management solution)시장도 기하급수적으로 성장할 것으로 예측하고 있다. 대부분의 디지털 수도계량기 제조업체는 원격검침용 디지털 수도 계량기에서 측정된 데이터를 활용하여 실시간 소비량 검침 및 비용 고지, 절수, 누수탐지, 수질 모니터링, 유량제어 등의 기능이 부가된 통합관리시스템(integrated water management system)과 연계하여 운영하고 있다. 데이터 전송방식은 디지털 수도계량기, 센서를 통해 검출된 데이터를 근거리 통신망(neighborhood area network)을 통해 수집기(data concentration unit)로 전송 후 광역 통신망(wide area network)을 통해 검침서버로 전송하였으며, 데이터 전송방식은 도시 규모, 계량기의 밀도, 전력공급 여부 및 통신망의 설치 여부 등을 종합적으로 고려하여 결정되었다. 전 세계적으로 디지털 수도계량기 연계형 원격검

침시스템이 확산되어 용수 및 에너지를 절감하고 수도 요금을 절약하여 온실가스의 배출을 최소화하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 대전에서도 디지털 수도계량기 제조업체와 고객 데이터 관리 및 인프라 유지관리·운영과 네트워크 솔루션 개발을 위해 시스템 통합운영관리업체가 협력하여 적극적인 개발과 투자에 나설 필요가 있다. 또한, 전 세계적으로 통용 가능한 디지털 수도계량기 연계형 원격검침시스템 통합기술(integrated technology)과 표준화기술(standard technology)의 선점 및 IT·NT 기술을 융합한 혁신기술(innovative technology) 개발을 위해서 대전시의 시범사업과 재정 지원을 시급히 추진해야 할 것으로 판단된다.

• 참고문헌

- Coachella Valley Water District(2010), Water wise at home.
- Coachella Valley Water District(2010), Water wise at home.
- Dunkelberg, C.(2010), "Water Technologies and the Blue Footprint", Smart water grid technologies conference, Nov. 3-4, Chicago, U.S.A.
- Hackney, E.(2010), "Create the Smart Water Grid", Dayton Water Conference, May 10, Dayton, U.S.A.
- IBM, IBM Research(2011), Smart Water Pilot Study Report, City of Dubuque, Iowa.

- ITU-T Technology Watch Report(2010), ICT as an Enabler for Smart Water Management.
- Jin Chul Joo, Hyun Je Oh, Hosang Ahn, Chang Hyuk Ahn, Saeromi Lee, Kyung-Rok Ko(2014), Field application of waterworks automated meter reading systems and analysis of household water consumption, *Desalination and Water Treatment*, 54 (4-5), 1401-1409.
- Loeff, B. and Fox, J.(2010), Smart Water Meters. Advanced Metering Infrastructure for Water Utilities : Market Drivers, Technology Issues, Deployment Case Studies, Key Industry Players, and Market Forecasts. Pike Research.
- March, H., Álvaro-Francisco Morote, Antonio-Manuel Rico, David Saurí(2017), Household SmartWater Metering in Spain: Insights from the Experience of Remote Meter Reading in Alicante, *Sustainability* 9, 582-600.
- PikeResearch(2010), Smart Water Meters. Advanced Metering Infrastructure for Water Utilities : Market Drivers, Technology Issues, Deployment Case Studies, Key Industry Players, and Market Forecasts.
- Ponesse, G.(2010), "Water Energy Nexus", Smart water grid technologies conference, Nov. 3-4, Chicago, U.S.A.
- SWRRC(2008), 우리나라 물분쟁 사례 조사.
- T. Boyle, D. Giurco, P. Mukheibir, A. Liu, C. Moy, S. White, R. Stewart(2013), Intelligent metering for urban water: A review, *Water* 5, 1052 - 1081.
- 국토해양부(2011), 〈Water Grid 지능화 기술 기획보고서〉.
- 이상호(2011), 스마트 워터그리드와 스마트 파워그리드의 비교, *물과 미래*, 44(8), 25-30.
- 주진철, 정진홍, 권재형, 김지영, 오현제(2011), 스마트 워터 그리드(Smart Water Grid) 맞춤형 저전력 원격검침 시스템, *물과 미래*, 44(12), 52-57.
- 주진철, 안호상, 안창혁, 고경록, 오현제(2012a), 상수도 원격검침시스템의 현장 적용성 평가 및 가정용수 사용량 분석, 〈대한환경공학회지〉, 34(10), 656~663.
- 주진철, 안호상, 안창혁, 고경록, 오현제(2012b), 국외 상수도 원격검침시스템의 개발 동향 및 현장 적용 사례 고찰, 〈대한환경공학회지〉, 34(12), 863~870.
- 한국건설기술연구원(2010), 〈스마트 워터 그리드 건설 요소기술 (Smart Water μ -Grid) 개발 기획보고서〉.
- 한국상하수도협회(2009), 〈수도사용량 원격검침 도입현황 및 타당성 조사 연구보고서〉.
- 한국상하수도협회(2009), 〈수도사용량 원격검침 도입현황 및 타당성 조사 연구보고서〉.

대전세종포럼

DAEJEON
SEJONG
FORUM

4장

기후변화 대응 거버넌스 구축

김태호 (재)국제기후환경센터 정책연구팀장

기후변화 대응 거버넌스 구축

김태호 (재)국제기후환경센터 정책연구팀장

DAEJEON
SEJONG
FORUM

I. 기후정책의 등장과 거버넌스

지구 환경에 부정적 영향을 미치는 온실가스는 1750년대 산업시대 진입 이후 경제성장과 인구 증가로 인해 지속적으로 증가하였다. 석탄, 석유 등 화석연료의 연소, 삼림 훼손, 농업활동 증가 등 인위적인 원인으로 인해 대기 중 온실가스가 많아졌으며, 이로 인해 지난 130여년 간 지구평균 기온이 상승하는 지구온난화를 유발하고 있다.

일반적으로 기후변화는 기후 특성의 평균이나 변동성의 변화를 통해 확인가능하고 수십 년 혹은 그 이상 오래 지속되는 기후상태 변화를 말하는데, 자연적 원인이나 인간 활동에 따른 대기조성 또는 자연환경 변화 등 강제적인 외부요인 때문에 발생한다. 하지만, 산업시대 이후 지속적인 온실가스 증가와 이로 인한 기후변화에도 불구하고 인간의 활동이 기후변화에 영향을 미쳤다는 주장은 받아들여지기까지 오랜 시간이 걸렸다. 증기기사였던 영국의 공학자 가이 칼렌다(G.S.Callendar)가 1938년 대기 중 이산화탄소가 지구의 온도에 영향을 줄 수 있다고 최초로 주장하여 당시 전문 기상학자들의 비웃음을 산 이후, 1990년이 되어서야 IPCC(기후변화에 관한 정부간 패널)가 첫 번째 평가보고서를 통해 “인간 활동으로 인한 배출은 실질적으로 온실가스의 대기 농도를 증가시킨다.”고 발표함으로써 국제적인 문제로 등장하였다. 또한, 제5차 평가보고서에서는 지구평균기온이 빠르게 상승하고 있으며, 1950년 이후 나타난 지구온난화는 화석연료의 사용 때문일 가능성이 매우 높다(95% 이상)고 결론을 내렸다.

특히, 1980년대 후반부터 본격적으로 부상한 국제환경규제 논의는 오존층 파괴와 관련된 물질을 제한하는 1987년 몬트리올 의정서 채택을 시작으로 1992년 6월 브라질 리우에서 개최된

‘지구환경회의’를 거쳐 에너지 소비에 의하여 발생하는 이산화탄소(CO2) 등 온실가스가 장기적으로 기후변화를 통하여 지구환경에 부정적 영향을 미친다는 인식을 공유하는 수준으로 진전되었다(한국환경정책·평가연구원, 2018: 340-341). 이러한 논의는 기후변화에 대한 최초의 국제적 노력으로 볼 수 있는 유엔기후변화협약(UNFCCC)의 채택으로 발전하여, 1997년 제3차 당사국 총회에서 교토의정서를 채택하였다. 하지만, 교토의정서는 미국, 중국, 인도 등 온실가스 다배출 국가가 참여하지 않은 채 진행되어 실질적인 효과를 거두지 못했으며, 국제사회는 교토의정서의 한계를 극복하기 위해 새로운 기후변화대응 협정인 ‘파리협정’¹⁾ 합의문을 2015년 12월에 채택하였다.

〈표 1〉과 같이 지속적인 국제적인 합의와 노력에도 불구하고, 현실은 지구온난화 방지 목표인 2°C 상승이라는 억제선이 무너질 수 있다고 진단되고 있다. 유엔환경계획(UNEP)은 모든 나라가 제시한 감축 계획이 성공적으로 진행된다고 하더라도 금세기 말 지구 평균 기온은 2°C를 뛰어 넘어, 빠른 시간 내에 3.0~3.5°C까지 올라갈 것으로 전망했다.

〈표 1〉 기후변화에 대응하기 위한 국제사회의 주요 노력

년 도	주요 내용
1972년	과학자들 국제적 범규 마련 촉구
1988년	유엔 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC) 발족
1992년	각국의 자발적 온실가스 배출 감축을 촉구하는 유엔기후변화협약(UNFCCC) 체결
1997년	선진국들은 온실가스를 2008~2012년까지 1990년 대비 5.2% 감축해야 하는 교토의정서 체결
2005년	교토의정서 발효(2월)
2009년	한국, 온실가스 배출량을 2020년까지 2005년 대비 4% 줄이는 목표치 발표(11월)
2009년	COP15에서 지구온도 2°C 내로 제한하는 목표 합의(12월)
2011년	세계 195개국, 2015년까지 법적 구속력을 갖춘 새로운 기후변화체제 수립 목표에 합의(11월)
2014년	페루 리마서 열린 COP20에서 “공동적이지만 차별화된 책임 갖는다”고 합의(12월)
2015년	프랑스 파리 COP21에서 “지구온도 상승폭을 2100년까지 2°C 이하로 제한” 합의(12월)
2016년	파리협정 발효(11월)

또한, 최근 발표한 IPCC의 ‘지구온난화 1.5도 특별보고서’에 따르면, 지구온난화로 인해 산업혁명 전과 비교할 때 지구의 기온은 2017년에 1°C가 올랐으며, 지금의 온실가스 배출이 계속 된다면 앞으로 10년마다 0.2°C씩 상승, 2040년쯤엔 1.5°C 상승할 것으로 예측했다. 산업혁명

1) 파리협정(Paris Agreement) : 국제사회 공동의 장기목표로 “산업화 이전 대비 지구 온도의 상승폭(2100년 기준)을 2°C보다 훨씬 낮게 (well below 2°C) 유지하고, 더 나아가 온도 상승을 1.5°C 이하로 제한하기 위한 노력(strive)을 추구한다.”고 합의함

때인 1889년부터 2012년까지의 기온 상승은 0.85℃, 10년마다 약 0.06℃이었지만, 앞으로 이러한 속도가 계속된다면 기온 상승 속도는 3배 빨라질 전망이다(PCC, 2018). 그리고, 미국 국립 기상학회(NOAA)의 제28차 연례기후보고서에 따르면, 2017년 전 세계의 이산화탄소 평균 농도는 405.0ppm으로 지구 역사상 지난 80만년 이래 최고치를 나타냈으며, 해수면 상승은 1993년에 비해 약 7.7cm 높아졌고(10년마다 평균 약 3.1cm 상승), 전 세계 빙하 면적은 38년 연속 감소한 것으로 나타났다. 또한, 역대 가장 더운 해는 2016년, 2위는 2015년, 3위는 2017년이었으며, 2018년은 역대 4번째로 더운 해로 기록될 전망이다²⁾.

기후변화의 원인인 온실가스 배출량은 유엔기후변화협약 채택 이후 지속된 국제사회의 합의와 노력에도 불구하고 지속적으로 증가하고 있다. 유엔환경계획이 2018년 11월에 발표한 '2018년 배출량 격차 보고서(Emissions Gap Report)'에 따르면, 2017년 온실가스 배출량은 535억 GtCO₂eq.로 전년 대비 1.2% 증가하여 유엔이 온실가스 배출량을 측정한 이래 가장 많은 수준으로 나타났다. 온실가스 배출량 증가세가 꺾일 줄 모르는 상황에서 각국이 현재의 감축 목표를 고수할 경우 지구 평균기온은 2100년까지 3.2℃ 상승할 것이라고 경고하고, 평균기온 상승폭을 2℃로 묶으려면 현재 감축 목표보다 3배, 1.5℃로 유지하려면 5배 더 많이 감축해야 한다고 지적하였다³⁾.

우리나라의 기후정책은 교토의정서가 채택된 이후 감축압력이 가중되면서 실질적인 감축 논의가 시작되었다. 1998년 이후 산업계와 전문 연구기관 등이 참여하는 범정부대책기구인 '기후변화협약 정부대책기구'를 설치하고, 1999년 최초의 기후변화대응 계획인 「기후변화협약 대응 제1차 종합대책」을 수립하여 추진하였으며, 2007년까지 총 4차례에 걸친 종합대책이 이어졌다. 2008년에는 녹색성장이라는 다소 논란의 여지는 있으나 적극적인 성장지향형 온실가스 관리정책 방안인 「기후변화대응 종합기본계획」을 수립하고, 2009년 기후변화대응과 지속가능발전, 에너지 정책 등을 포괄하는 대통령 소속의 '녹색성장위원회'를 설치하였으며, 2010년 1월 「저탄소 녹색성장 기본법안」을 제정·공포하였다(한국환경정책·평가연구원, 2018). 이후 2차에 걸쳐 「녹색성장 5개년 계획」을 수립·시행하고, 기후변화 적응대책은 2015년 「제2차 국가기후변화대응 대책」을 수립하여 현재 이행하고 있다. 또한, 파리협정에 따라 국가별 기여방안(NDC)으로 2030년 온실가스 감축목표를 배출전망치(BAU) 대비 37%로 확정하고 국제사회에 제출하였으며, 이의 이행을 위해 제1차 기후변화대응 기본계획과 2030 국가 온실가스 감축 로드맵을 확정하여 시행 중에 있다. 우리나라의 기후변화대응 주요계획을 살펴보면 <표 2>와 같다.

2) 뉴시스(NEWSIS), "2017년 온실가스 배출량 신기록...지구 사상 80만년 내 최고"(2018.8.2)

3) 경향신문, "전 세계 온실가스 배출량 증가...감축 목표량 격차 최대"(2018.11.28)

〈표 2〉 우리나라의 기후변화대응 주요 계획

구 분	녹색성장 5개년 계획	에너지 기본계획	배출권거래제 기본계획	기후변화 적응대책	기후변화대응 기본계획
현행	2차(2014~2018)	2차(2014~2035)	1차(2015~2024)	2차(2016~2020)	1차(2017~2036)
법령	저탄소녹색성장 기본법 9조	저탄소녹색성장 기본법 41조	온실가스배출권의 할당 및 거래에 관한 법률 4조	저탄소녹색성장 기본법 48조	저탄소녹색성장 기본법 40조
기간	2020년까지 매 5년마다	계획기간 20년 매 5년마다	10년 단위로 매 5년마다	5년 단위	계획기간 20년 매 5년마다
주체	국무조정실	산업통상자원부	기획재정부	환경부	국무조정실

기후변화의 원인인 온실가스 감축을 위한 우리나라 및 국제사회의 노력은 더디게 진행되고 있는 상황에서 전 세계적으로 기후변화의 위험은 미래의 문제가 아닌 현실적인 문제로 인식되고 있다. 이러한 온실가스 배출량의 지속적인 증가와 기후변화 현상의 심화는 현재와 같은 수준과 방법으로는 해결할 수 없다는 점에서 IPCC는 ‘지구온난화 1.5도 특별보고서’를 통해 국가 및 지자체, 시민사회, 기업 등의 전방위적인 대응을 위한 시스템 전환이 필수적이라고 지적하고 있다. 이러한 시스템의 전환은 다양한 이해당사자들이 참여하는 실제적인 감축 활동에 의해서 가능하다는 점에서 거버넌스는 매우 중요한 문제로 등장하고 있다.

특히, 온실가스 감축은 많은 비용과 노력이 필요하지만, 온실가스 배출의 대부분을 차지하고 있는 화석연료의 사용을 줄이면 경제활동이 위축될 수 있기 때문에 이해관계가 첨예하게 대립한다는 점에서 다양한 이해관계자의 참여와 협력이 매우 중요하다. 또한, 기후변화 적응은 top-down 방식의 관 주도적 노력이 필요한 부문이기도 하지만, 개인, 지역 등 사회 저변적 차원에서의 노력이 가장 큰 효과를 나타내기도 한다. 이는 원인자와 피해자가 다른 감축활동과 달리, 나와 우리 지역의 적응 역량 수준에 따라 그 영향과 피해가 그대로 다시 돌아오기 때문이다. 그렇기 때문에 적응 정책의 성공적인 이행을 위해서는 비정부 조직의 역할과 활동이 반드시 필요하다 (한국환경정책·평가연구원, 2018: 363).

또 다른 측면에서 기후변화 문제는 기후변화 현상과 정책의 불확실성과 불가역적 특성을 함께 지니고 있기 때문에 기후변화 문제를 대할 때 그것이 발생하지 않도록 하는 사전예방적 접근이 필요하다. 기후변화협약은 기후변화 문제에 대응하는 원칙으로 사전예방원칙을 제안하고 있다는 점에서 사회적 공감대 형성에 기반한 온실가스 감축과 주체별 참여의 보장이 필요하다. 또한, 물리화학적 현상인 지구상의 에너지 흐름은 인간사회의 정치경제적인 특성과 변

수에 의해 그 규모와 내용이 크게 좌우되기 때문이며, 과학적·기술적인 문제가 아니라 정치·경제·사회적 문제로 접근될 필요가 있다. 구체적으로는 정책과 인식의 간극, 기술과 정책의 간극, 규제와 성장의 간극이라는 세 가지 간극을 좁혀나가야 한다. 이러한 간극은 상호연계성을 가지고 있으며, 협력적 거버넌스에 기반할 때 성공적으로 이행될 수 있다.

일반적으로 거버넌스는 공간을 중심으로 하는 지방, 국가, 지구로 구분되는 수직축과 참여 주체를 중심으로 하는 시민사회, 정부, 기업으로 구분되는 수평축 사이에서 상호작용하는 복잡하고 다양한 구조를 이루고 있다. 따라서 본 연구는 공간적 범위로서 지방을 중심으로 하고 협력적 거버넌스에 대한 이해에 기반하여 기후변화문제 해결을 위한 전략을 제시하는 데 목적을 둔다.

II. 기후정책과 협력적 거버넌스

1. 협력적 거버넌스에 대한 이해

거버넌스는 1990년대 이후 미국, 영국, 뉴질랜드, 호주 등 OECD 국가들의 공공개혁 추진과정에서 정부와 시장 및 시민사회 등 문제해결 주체들 간의 관계를 새롭게 정립할 필요성이 대두되면서 등장하였다. 거버넌스는 공공부문과 민간부문이 힘을 합쳐서 문제를 해결해 나가는 새로운 패러다임으로서, 그 핵심은 ‘다중심성’과 ‘수평적·자발적 협력’에 있다(이명석, 2017: 6-9). 과거에는 사회문제 해결의 주요 수단이 국가에 의한 중앙집권적 통제였으나 오늘날엔 사회적 참여자들 간의 민주적인 조정절차가 강조되면서 거버넌스의 중요성이 강조되기 시작했으며, 사회가 복잡해지고 공공문제 해결을 위한 각 참여자들의 영향력이 신장되면서 협력과 네트워크를 강조하는 심화된 개념으로서 협력적 거버넌스(collaborative governance)가 주목받고 있다(안혁근, 2015: 14-15).

거버넌스는 구조적 차원에서 볼 때 <표 3>과 같이 계층제 거버넌스, 시장 거버넌스, 네트워크 거버넌스로 분류할 수 있으며, 기본적으로 구조와 제도의 측면을 강조하고 있다. 그러나, 이러한 거버넌스들은 현실 세계에서 독자적으로는 성공적인 작동이 어렵다. 즉, 현실세계의 복잡한 문제들을 해결하는 데 있어서 계층제는 시장이나 네트워크의 도움 없이 성공적으로 기능하기 어렵다는 점이 있으며, 시장은 현실에서 이기적인 행위자들로 인해 강제성을 가진 정부의 개입이나 자율성과 도덕성을 지닌 네트워크의 협력 없이 성공적으로 작동하기 어렵다. 그리고, 네트워크

역시 현실적으로 계층제의 제도적 뒷받침이나 시장의 경제적 유인이 수반되지 않을 경우 성공적으로 작동할 가능성은 매우 낮다. 따라서 복잡하고 다차원적인 문제일수록 최선의 해결방법은 계층제, 시장, 네트워크 등 세 가지 거버넌스 유형을 어떻게 적절히 혼합하고 이들을 관리할 것인가를 고민해야 하는데(이명석, 2017: 176), 여기서 협력적 거버넌스에 대한 필요성이 요구된다.

〈표 3〉 사회적 조정양식으로서 3가지 거버넌스

구 분	계층제	시장	네트워크
의사소통 수단	표준절차	가격	신뢰
갈등해결 수단	관리적 명령, 감독	소송, 사법적 판단	호혜성, 평판
유연성	저	고	중
분위기	관료적, 공식적	정확, 의심	개방적, 호혜적
구성원 행동 · 선호	의존적	독립적	상호의존적
운영원리	관료적, 공식적	계약에 의한 관리	신뢰, 협력
전제조건	완벽한 정보, 사적 동기 부재	완전경쟁, 외부효과, 거래비용 부재	신뢰, 평판, 이타심

자료: 이명석(2017: 144)

협력적 거버넌스는 계층제, 시장, 네트워크 등 세 가지 사회적 조정양식의 최적의 조합을 통한 자율적 행위자와 조직들 사이의 구조화된 상호작용을 활용하여 기존의 조직적 경계와 정책을 초월하여 새로운 공공가치를 창조하는 사회문제 해결방식이라 정의할 수 있다(이명석, 2017: 189).

또한, Ansell&Gash(2007)는 협력적 거버넌스를 “공공 정책이나 공적 프로그램, 자산 등을 집행 또는 만들기 위한 목적에서 하나 또는 그 이상의 공공기관이 이해관계에 놓인 비국가주체(non-state stockholders)들과의 공적이고 합의지향적이며 숙의적인 집합적 의사결정과정에 직접적으로 개입하는 것”이라 정의하고 있다. 이와 함께 협력적 거버넌스에 대해 다음과 같은 6가지 중요한 특성을 강조하고 있는데, 첫째, 협력적 거버넌스는 공공기관이나 제도에 의해 주도된다는 것이다. 둘째, 협력적 거버넌스에 참여하는 주체들에는 비국가 행위자들이 포함된다. 셋째, 참여자들은 의사결정 과정에 직접적으로 참여하며, 공공기관에 의해 단순히 조정되지 않는다는 점이다. 넷째, 협력적 거버넌스 과정은 공식적으로 조직화되어 집합인 회의로 진행된다. 다섯째, 협력적 거버넌스 과정은 합의에 의한 의사결정을 목표로 하며, 여섯째, 협력과정의 초점은 공공 정책 혹은 공공관리에 있다(Ansell&Gash, 2007: 544-545, 안혁근(2015)에서 재인용)는 점이다.

따라서, 협력적 거버넌스는 공공문제해결의 정책과정에서 합의 도출을 위한 이해관계자들 간의 공식적인 상호작용의 과정으로 이해할 수 있다(강병준, 2014: 53).

특히, 협력적 거버넌스는 그 특성상 많은 사회구성원들의 삶의 질에 밀접한 영향을 주는 환경문제, 재난문제 등으로 인한 갈등에서 유용성을 보인다. 환경문제처럼 “과학적이고 기술적인 특성을 가진 이슈뿐만 아니라 현실적인 정치적, 사회적 맥락에서 이해자들의 가치나 이데올로기, 제도 등의 다차원적인 특성을 고려”하고 갈등과 관련된 이해관계들의 관계적 특성을 파악해야 하는 상황에서는 다각적 협력이 가능한 협력적 거버넌스가 효율적 수단이 된다는 것이다 (Thompson&Nader, 2000; 건축도시공간연구원, 2014: 53 재인용).

2. 기후정책에서 협력적 거버넌스

현재 진행되고 있는 기후변화는 화석연료 등에 의해 발생하는 온실가스가 대기 중에 과도하게 축적되어 지구온난화 현상이 촉진되어 유발된다. 따라서 현재의 기후변화를 완화하기 위해서는 화석연료에 대한 의존을 줄이면서 화석연료를 효율적으로 사용할 필요가 있으며, 지속가능한 사회로의 전환을 위해서는 에너지와 환경, 사회의 상관성을 엄밀히 고려하지 않으면 안된다(환경부, 2005: 10-11). 또한, 경제활동에 의한 에너지 사용이 온실가스 배출의 주요 원인이라는 점을 감안할 때 기후변화대응과 경제개발 목표는 상충관계가 있는 것으로 인식된다(고재경 외, 2011: 25). 특히, 기후변화가 전 지구적인 문제이기는 하지만 국가의 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 지역의 참여와 행동이 필요하며, 이 과정에서 개발과 보전의 갈등, 비용의 배분과 기후변화 영향을 둘러싸고 형평성 문제 등이 제기될 수 있다(이홍주, 2010: 8-9). 이러한 측면에서 협력적 거버넌스는 지역의 감축목표를 결정하는데 있어 관련 이해관계자들이 의사결정에 참여함으로써 감축부담을 공동의 책임으로 부여할 수 있으며, 감축 부담에 따른 갈등으로 발생하는 사회적 비용을 줄임으로써 갈등상황을 극복할 수 있고 합의를 도출하는 데 효과적으로 작동할 수 있다. 특히, 기후변화 문제는 복잡하고 다차원적인 문제이기 때문에 이의 성공적인 해결을 위해서는 계층제적 지시와 자발적인 협력, 그리고 시장의 가격 경쟁이 모두 적절한 비중으로 혼합된 협력적 거버넌스가 가장 바람직한 방법이라 할 수 있다.

다만, 협력적 거버넌스가 복잡한 문제들을 해결함에 있어 성공적으로 작동하여 의미 있는 성과를 거두는 경우가 많더라도 실제로 실패할 수 있는 경우도 적지 않다. 특히, 협력적 거버넌스 실패의 가장 중요한 원인으로 ‘책임성’ 확보의 문제가 지목되고 있다(이명석, 2017: 257-259). 기후변화 문제에 있어서도 감축에 대한 책임성은 법률적 기반과 사회적 합의에 의한 방식이

아니라, 지방정부의 자발성에 기초한 책임의식에 기댈 수밖에 없어 높은 수준의 책임성을 확보하지 못하고 있다. 또한, 감축목표에 대한 책임성을 확보할 수 있는 장치가 마련되어 있지 못해 협력적 거버넌스 성공의 중요한 조건인 기후정책에 대한 참여자 사이의 신뢰구축이 이루어지지 못하고 있다. 그리고, 이상기후와 기후변화 대응에 있어서 적응의 중요성이 전 세계적으로 강조되고 있지만 국가 주도적 정책과 접근이 주요한 부문을 차지해 오고, 계획 중심의 적응정책은 시민들의 실질적인 기후행동으로 이어지지 못하고 있다.

한층 더 나아가, 여러 적응분야의 정책과 주체 등이 상호 연계된 통합적인 거버넌스 체계 마련·운영은 활성화되어 있지도 못한 상태이며, 적응대책 수립 및 이행을 위한 중앙정부, 광역지자체, 기초지자체의 역할 구분이 분명하지 않아 실제적인 적응대책 이행과 행동이 부재한 상황이다. 결국, 이는 한국 사회가 지닌 기후변화 인지와 이에 대한 위기위식은 세계적 수준이나, 그 이행은 후진성을 면치 못하는 결과를 초래하고 있다(한국환경정책·평가연구원, 2018: 360).

이러한 문제를 해결하기 위해서는 협력적 거버넌스에 대한 제도가 형성되어야 한다. 제도설계에 있어서는 광범위한 참여자가 규칙에 포함되어야 하고, 중요한 이해관계자가 규칙에서 배제되면 안되고, 명확한 기본규칙이 있어야 하며, 규칙의 제정 과정이 투명해야 하며, 의견일치를 위한 기준이 필요하다(Ansell&Gash, 2007: 556-557). 기후변화 문제는 당장 해결할 수 있는 문제가 아니기 때문에 정책의 안정성과 지속성, 책임성을 담보하기 위해 거버넌스 기구의 공식화 내지 법제화가 필요하며, 개발과 보전 사이의 갈등을 조정하기 위한 갈등해결장치, 감시제도와 평가제도 등 제도적 장치가 마련되어야 한다. 특히, 사회 전 부문에서의 협력이 전제되어야만 가능한 기후변화 대응은 민간부문과 구성원들의 자기 규제와 자치통제 능력이 매우 중요하다.

한편, 협력적 거버넌스의 영역에서 기후정책은 공공성, 지역기반, 분권성, 형평성이라는 특성을 가지고 있다. 먼저, 협력적 거버넌스에의 공공성은 더 이상 공공부문이나 정부와 관련된 것에만 국한되는 조직중심의 개념이 아니라, 공공가치를 추구하고 사회문제를 해결하기 위해 다양한 주체들 간의 협력에 의해 공동으로 이루어지는 노력과 관련된 초점 중심의 개념으로 정의될 수 있다(이명석, 2017: 251-253). 이런 측면에서 기후변화 문제는 공공의 문제로서 국제사회와 정부차원에서 대응하고 기후변화와 관련된 공공기관 혹은 정부기관, 지방정부, 사업자, 시민단체, 시민 등이 공동으로 협력하여 해결해야 하는 문제라는 점이다.

특히, 지방정부는 에너지 소비의 주체이자 온실가스의 주요 배출원으로서의 역할, 에너지 생산과 배분의 주체로서의 역할, 규제자와 개발 주체로서의 역할, 촉진자 역할 등으로 인해 지역 기반의 온실가스 감축 목표를 설정하고 이행해야 할 책임이 있으며, 기후변화 대응을 위한 정

책과 조치를 시행할 경우 지역의 대기질 개선 및 에너지 효율화를 통한 재정 절감, 효율적인 에너지 시스템을 통한 새로운 일자리 창출과 지역의 경제발전 기여라는 지역사회 편익이 발생한다는 점에서 지역 기반의 특징을 가지고 있다. 또한, 적응정책은 기후변화에 따른 이상기후가 지역사회에서 구체적인 영향이 나타난다는 점에서 지역적 편익이 높지만, 정량화가 어렵고 지역 여건에 따라 비용-편익 차이가 발생한다는 특징을 가지고 있다.

여기에 경제활동에 의한 에너지 사용이 온실가스 배출의 주요 원인이라는 점에서 기후정책은 분권적인 특성을 지니고 있다. 이러한 관점에서 협력적 거버넌스가 가지고 있는 의미는 과거의 중앙정부 주도의 통치방식 혹은 의사결정과정의 편향성에서 다양한 이해관계자들에게 권한을 위임하고 의사결정 과정에 직접적으로 참여시키는 것이다. 즉, 지역 현실에 적합한 신재생 에너지를 생산하고, 지역사회에 공급함으로써 지방정부는 물론, 지역의 사업자, 지역 주민 등이 지역의 에너지 공급과 소비에 직접적으로 참여할 수 있는 특성을 가지고 있다. 예를 들어 신재생에너지는 에너지의 생산과 소비를 지역차원에서 자율적으로 결정할 수 있는 특성을 지니고 있으며, 신재생에너지가 에너지의 특성상 분권화되어 생산되고 소비되기 때문에 지역사회 이해관계자들의 자율적 의사결정을 내릴 수 있는 구조를 가지고 있기 때문이다(강병준, 2014: 62-63).

마지막으로, 기후변화에 대한 보다 강력한 노력과 규제들은 지구온난화에 따른 적응 및 감축으로 인한 장기적인 비용 감소와 기후변화 영향, 빈곤 퇴치와 불평등 해소 등에 기여할 수 있지만, 빈곤하고 취약한 인구나 지역에 대한 감축 비용 증가 등에 따른 차별적인 악형이 미칠 수도 있다. 이에, 전술과 같이 기후변화의 영향 및 대응은 사회적 복지, 경제 번영 및 환경 보호와 균형을 이루는 지속가능한 발전과 긴밀하게 연관되어야 한다. 그런 측면에서 협력적 거버넌스는 다양한 이해관계자들의 합의를 이끌어 내고 공동의 문제를 해결해 나가는 과정을 거치면서 사회적 불평등과 갈등을 해소하는데 기여한다. 즉, 협력적 거버넌스에 의한 기후변화 문제 해결이 지속가능한 발전을 이루기 위한 핵심적인 요소로서 사회적 형평성 증대에 기여할 수 있다.

III. 협력적 거버넌스에 의한 기후변화 문제해결 전략

1. 온실가스 감축 목표에 대한 사회적 합의와 이행체계 마련

온실가스 감축은 많은 비용과 노력이 필요하며, 경제활동에 의한 에너지 사용이 온실가스 배

출의 주요 원인이라는 점에서 온실가스 감축과 경제성장은 상충되는 등 다양한 장애요소가 존재한다. 따라서, 기후변화 대응은 공공의 문제로서 국제사회와 정부차원에서 대응하고 지방정부, 사업자, 시민단체, 시민 등이 공동으로 협력하여 해결해야 한다. 이를 위해 국가 및 지자체, 시민사회, 기업 등 전방위적인 대응을 위한 시스템 전환이 필수적이다. 특히, 온실가스 감축 정책은 합리적인 거버넌스에 의해 추진될 필요가 있다.

협력적 거버넌스의 과정은 합의에 의한 의사결정을 목표로 하며, 공공기관이나 제도에 의해 주도된다는 특성을 가지고 있다. 정부는 법제화와 계층제적 통제를 통하여 공식적으로 책임성을 확보하지만, 협력적 거버넌스의 핵심을 이루는 네트워크 거버넌스의 경우 법률적 기반이나 공식적 권한을 가진 통제가 이루어지기 어렵기 때문에 책임성을 확보하기가 어렵다. 이런 점에서 다양한 주체들이 참여하고 그 결과에 대한 책임성을 확보하기 위해 책임성 확보장치가 복합적으로 마련될 필요가 있다. 하지만, 전술한 바와 같이 지역의 온실가스 감축정책과 관련하여 감축에 대한 책임성은 법률적 기반이 존재하지 않아 지방정부의 자발성에 기초한 책임의식에 기댈 수 밖에 없는 상황이며, 자발적 목표 설정은 대부분의 지역에서 사회적 합의에 의한 방식에 의해 결정되지 않았기 때문에 정책의 신뢰성의 부족과 공동의 책임 부여가 어려운 상황이다. 특히, 온실가스 감축정책이 단기적인 편익보다는 장기적인 편익에 가까우며, 정치적 시급성이 낮다는 특성으로 인해 우선순위에서 밀려나는 경우가 많다. 또한, 민선시장의 취임은 시정철학의 변화를 야기하고, 이에 따른 시책들의 우선순위 변경은 기 추진중이었던 온실가스 감축 정책의 추진력을 약화시키는 원인이 될 수 있다. 재정자립도가 낮고, 예산이 적은 도시에서는 국가의 지원예산에 대한 의존도가 클 수밖에 없기 때문에 다양한 융합적 정책의 수립보다는 지원 예산 성격에 기반을 둔 정책 추진 형태로 접근되는 단편성을 갖게 되는 문제가 있다. 이런 점에서 지역의 온실가스 감축 목표를 결정하는데 있어 관련 이해관계자들이 의사결정에 직접 참여하는 협력적 거버넌스는 감축부담을 공동의 책임으로 부여하고, 정책의 지속성과 높은 책임성 및 신뢰를 보장할 수 있다.

이를 위해서는 먼저 지역의 온실가스 감축목표 설정과정에서 다양한 지역의 이해당사자들이 참여하고 논의하여 결정하는 방식으로 목표를 설정해야 한다. 또한, 목표의 달성 여부는 시민들의 목표에 대한 이해와 실천에 바탕을 둔다는 점에서 목표 및 정책성과에 대한 적극적인 홍보가 필요하다. 이를 위해 감축로드맵에 대한 시민들의 이해도 증진과 도시 내 이해당사자들이 참여하는 구체적인 로드맵 작성, 그리고 각 주체별로 어떠한 역할을 수행할 것인가에 대한 사회적 합의를 보다 강화시킬 필요가 있다. 또 다른 측면에서 감축목표는 강력한 정책적 의지의 표현이기도 하지만, 목표연도가 도달했을 때 또는 목표를 달성하기 위한 경로로 가는 과정에서

달성되지 못할 경우 이행에 대한 책임성과 시민들의 감축의지를 약하게 만들 수 있다. 따라서, 감축목표는 미래 정책여건에 대한 전망, 감축의지, 감축정책 실천 가능성 등을 종합적으로 고려하여 설정하는 것이 필요하다. 감축수단, 적용시기, 강도, 예산 규모, 시민참여 등을 종합적으로 고려하여 감축 예상량을 합산(Forecasting)하고 지자체의 감축의지(Backcasting) 등을 반영하여 목표를 결정하는 하이브리드(Hybrid) 방식을 적용한 목표설정이 필요하다.

또한, 온실가스 감축 정책은 정책전반에 걸친 패러다임의 변화와 종합적인 정책기조로서 인식될 필요가 있다. 이는 온실가스 감축 정책을 관리하는 주무부서가 아닌 지방정부의 전 부서의 노력이 함께 할 때 정책의 성공을 기대할 수 있다는 의미이다. 이를 위해서는 의사결정 권한이 있는 지방자치단체장(또는 부시장)이 주관하고 소관 국장 및 실·과장이 참여하는 실질적인 정책 협업구조로서 추진기획단이 만들어질 필요가 있다. 또한, 지방정부의 주요 계획 및 정책 수립 시 온실가스 감축 정책을 고려할 수 있도록 '온실가스 감축 사전 검토제도'를 마련하여 저탄소 정책 여부를 평가하는 제도적 설계가 필요하다. 그리고, 지역 내 협력적 거버넌스 기구로서 경제계, 학계, 종교계, 언론계, 시민사회단체 등 지역의 각계 인사로 구성된 거버넌스 기구를 구성하여 운영할 필요가 있다. 이는 정책 이행의 신뢰성을 확보하고, 시민공감대를 확산하는데 기여할 수 있다.

다음으로는, 저탄소를 지향하는 선도적인 도시들이 일반적으로 정책을 추진하고 있는 5단계 이행전략(배출량 파악·예측→목표 설정→계획 수립→대책 이행→평가 및 모니터링)에 맞추어 정책을 추진할 필요가 있다. 특히, 지역의 감축목표를 달성하기 위해서는 지역에서 발생하고 있는 온실가스 배출량을 세부적으로 매년 산정하고, 세부 분석 등을 통해 추진하고 있는 사업에 대한 성과 및 목표달성 여부를 모니터링할 필요가 있다. 이러한 과정은 객관적인 배출량의 기초 자료를 확보하고, 성과 평가 결과 피드백을 통해 효율적인 온실가스 감축 관리에 활용될 수 있으며, 국제사회에 지역의 감축 성과들에 대한 투명성과 신뢰성을 보다 확보할 수 있다. 이에, 도시 온실가스 배출량 분석을 위한 시스템을 마련할 필요가 있다. 특히, 도시계획에 적합한 에너지 및 온실가스 정보와 공간정보가 연계된 시스템을 개발하여 활용할 필요가 있다. 개발 전·후의 탄소 배출 평가 및 주변 유사 지역·건물과의 비교 분석 등을 통해 도시 개발 과정에서 온실가스 감축 정책을 내재화할 필요가 있다. 이는 그동안 지역에서 추진하였던 온실가스 감축 이행평가 및 검증이 단위사업별로 진행되었던 것을 공간적으로 결합함으로써 정책 의사결정에 활용하고 지역별로 실효적인 온실가스 감축 정책을 추진하는데 효과적인 수단이 될 것이다.

지방정부에서 온실가스 감축 관리권한에 있는 비산업 부문에서의 감축은 시민들의 자발적 참여와 실천 확산이 매우 중요하다. 이에 여러 지방정부에서는 다양한 홍보 및 교육, 실천사업

들을 적극적으로 발굴 추진하고 있다. 하지만, 현재의 교육 및 홍보사업은 시민참여를 유도하는 소극적인 정책이기 때문에, 보다 적극적으로 다양한 사업들을 발굴할 필요가 있다. 또한, 지속적으로 온실가스 감축 정책에 대한 공감대를 형성하고, 이를 바탕으로 한 지역사회 자원 연계와 역할 부여, 의사결정과정에서의 참여 보장, 지역의 각계 의사결정자로 구성된 거버넌스 조직 구성 및 운영 등 실질적이며 적극적인 거버넌스를 통해 시민참여를 보다 활성화해야 한다.

마지막으로, 기후변화 문제는 일반적으로 여타 환경문제와 마찬가지로 매우 강력한 윤리적인 특성을 가지고 있으며, 인류공동의 문제이면서 개별국가의 경제발전이 걸린 문제이기도 하다. 즉, 윤리적(정치적)인 문제인 동시에 경제적 문제인 것이다. 하지만, 그동안의 기후정책은 주로 당위적 측면에서 접근되고, 경제성장이라는 측면이 간과된 측면이 있다. 이제는 새로운 시장 확보의 기회를 창출하고, 새로운 성장 동력으로서 기후변화 문제를 인식할 필요가 있다. 이런 점에서 4차 산업혁명에 따른 기술의 활용은 경제적 발전의 동기 부여와 사회적 공감대 확산에 기여할 수 있다.

2. 실질적 기후변화 적응 거버넌스 체계 마련 및 사회 취약성 고려

적응정책은 기후변화의 결과를 다루며, 지역적 피해를 줄이는 것을 주요 목적으로 하고 있다. 이에 지방자치단체는 중앙정부와 파트너십을 구축하여 현장에서 적응대책을 시행하는 주체이며, 지역 특성에 맞는 적응 사업을 발굴하여 기후변화로 인한 위험을 최소화하고 지역 발전의 기회를 최대화하기 위한 지역 적응 역량을 강화하는 주체로서의 역할이 강조된다. 이에, 우리나라의 기후정책은 저탄소녹색성장기본법 시행령 제38조(기후변화 적응대책의 수립·시행 등) 제2항에 따라 기후변화 적응대책 세부시행계획을 중앙행정기관의 장 및 지자체가 수립 및 시행하도록 되어 있으며, 기후변화적응정책에서 파생된 소관 사항에 대하여 중앙 및 지자체는 이를 적응대책 세부시행계획으로 수립하여 시행하도록 되어 있다.

이상기후와 기후변화 대응에 있어 전 세계적으로 적응의 중요성이 갈수록 증대되고 있지만 아직까지 감축보다는 소홀하게 다루어지고 있으며, 지역에서의 적응의 주체인 공동체와 시민들의 실제적인 적응역량 강화와 행동으로 이어지지 못한 채 국가 주도과 계획 중심으로 추진되고 있다. 이렇다보니 단기적인 편익이 높고, 정치적 시급성 및 합법성이 높으며, 사회·경제적 요소에 대한 우선적 고려를 통한 기후변화 인식 및 실천의 주류화 용이, 거버넌스 활성화 기여 등 완화정책에 비해 적응정책이 가지고 있는 강점들이 제대로 작동되지 못하는 결과를 낳고 있다.

적응 전략의 마련 및 조치는 다양한 파트너 기관과 풀뿌리 조직과의 협력을 통해 마련 및 추

진될 때 실질적인 효과를 거둘 수 있다는 점에서 협력적 거버넌스가 더욱 요구된다. 이에, 실질적인 기후변화 적응 거버넌스 체계를 마련할 필요가 있다. 기후변화 리스크는 같은 지역이더라도 개개인의 대응 능력이나 주거형태, 소득, 지역 주민들의 대응능력에 따라 달라질 수 있기 때문에 이해관계자(공동체 및 지역 주민 등)와의 협력과 참여를 통해 리스크 평가시 사회적 취약성을 반영해야 한다. 이는 완화정책이 사회적 공감대와 합의, 책임 부여라는 측면에서 정책결정에 있어 영향력이 높은 당사자를 중심으로 한 협력적 거버넌스를 지향한다면, 적응정책은 협력적 거버넌스를 통해 리스크를 발견하고 이를 해결하기 위한 이해당사자와 지역주민을 중심으로 한 거버넌스를 지향한다는 점에서 차이가 있다. 따라서 적응 계획 수립 및 이행은 리스크에 대한 정확한 파악이 매우 중요하며, 이를 위한 과학적 기반이 조성되어야 한다. 데이터 수집은 증거를 수집하고 위험에 대한 이해, 약속(책임)을 얻기 위한 파트너십 형성을 그 목적으로 추진되어야 한다. 이러한 파트너십은 지금 당장 할 수 있는 것들을 찾고 협업 구조를 창출하는 형태로 운영될 필요가 있다. 특히, 데이터에 기반을 둔 기후위험요소에 대한 공간적 접근전략을 통해 핫스팟(hot spot)을 찾아내고 개선하는 방향으로 추진되어야 한다. 또한, 해당 지역의 기후 적응능력 향상과 위험에 대한 회피를 위해 지역의 이해당사자가 참여하고, 개별적 정책수단이 아닌 모든 정책수단을 통합적으로 고려함으로써 해당 지역의 취약요소를 전반적으로 개선하는 방향으로 추진되어야 한다. 그리고 시민들의 참여와 인식 개선을 위해 ‘어떻게 해야 하는지, 내가 살고 있는 곳은 어떤 위험이 있는지, 나를 위한 적응의 의미는 무엇인지’를 강조하는 형태로 적응 교육에 대한 접근법이 변화될 필요가 있다.

한편, 협력적 거버넌스에서 정부·시장·시민사회 간의 수평적이며 자발적 협력을 어떻게 이끌어내느냐가 가장 중요한 요건이 된다. 협력과정은 면대면 대화와 소통, 신뢰구축, 과정몰입, 공유된 이해, 중간성과 등으로 구성되는 반복적이고 순환적인 과정으로 이루어진다(이명석, 2017: 298). 하지만, 대부분의 거버넌스는 정부와 시민사회의 소통과 협력으로 이해되는 경향이 있으며, 시장은 소홀하게 다루어진다. 물론 시장은 현실에서 이기적인 행위자들로 인해 강제성을 가진 정부의 개입이나 자율성과 도덕성을 지닌 네트워크의 협력 없이는 성공적으로 작동하기는 어렵지만, 반대로 시장의 경제적 유인이 수반되지 않을 경우 강제성을 가진 정부의 개입이나 자율성과 도덕성을 지닌 네트워크의 협력 또한 성공적으로 작동할 가능성이 매우 낮다. 특히, 적응정책이 미래 기후변화에 대한 피해 예방이라는 접근도 있지만 기회의 활용이라는 측면도 존재한다는 점에서 적응정책은 적응기술 촉진을 통한 기후산업 육성이라는 경제적 기여를 고려해야 한다. 이는 먼저, 적응정책을 추진하는데 있어 적응정책을 안전 및 재난재해로 축소시켜 해석하는 인식과 실천을 극복해냄으로서 적응 정책의 확장성과 실효성을 높여나가는데 도움이

된다. 또한, 사회적 기업 및 지역기업들의 기후변화에 따른 경제적 취약성과 잠재적 영향 등을 평가하고 이에 대한 대응과 관련 기술의 육성 등은 협력적 거버넌스에서 취약한 시장의 참여를 촉진하는데 기여할 수 있다. 이는 계층제적 지시와 자발적인 협력, 그리고 시장의 가격 경쟁이 모두 적절한 비중으로 혼합된 협력적 거버넌스가 작동할 수 있는 기반을 형성해 준다.

마지막으로, 기후변화 적응의 실효적 효과를 높이기 위해서는 시장의 참여와 함께 기후변화를 사회적 부문과의 연계성을 높이고, 내재화해야 한다. 사회·경제적 취약계층과 지역을 우선적으로 고려하는 기후복지 정책으로 확장될 필요가 있다. 예를 들어 건강 및 사회복지 프로그램은 지역의 보건 전문가 및 관련 단체와 협력하여 기후변화로 인해 직면한 위험과 기회를 파악하고 그에 따라 적응하도록 돕는 방식으로 이루어진다. 특히, 취약계층(지역)을 도출하고 관련된 지역 정보, 대응 방법 및 사례에 대한 정보 제공 등은 정책의 집중성과 효율성을 높일 수 있으며, 지역 내에서의 적응 정책의 필요성과 수용성을 높여나갈 수 있다. 또한, 취약성이 높은 사람들에 대한 영향 정보를 수집하여 추진되는 기후변화대응은 사회적 불평등을 악화시키지 않도록 하며, 사회 전반에 대한 균형적인 지속가능성 발전을 촉진하는데 기여할 수 있다.

IV. 결론

본고에서는 복잡하고 다차원적인 문제인 기후변화 문제의 성공적인 해결을 위해서는 계층제적 지시와 자발적인 협력, 그리고 시장의 가격 경쟁이 모두 적절한 비중으로 혼합된 협력적 거버넌스가 가장 바람직한 방법이라고 제시하며, 협력적 거버넌스의 영역에서 기후정책은 공공성, 지역기반, 분권성, 형평성이라는 특성을 가지고 있다는 것을 살펴보았다. 이를 통해 기존 기후정책의 문제점을 평가하고 협력적 거버넌스에 의한 기후변화문제 해결 전략을 기후정책의 두 가지 유형인 완화(온실가스 감축)정책과 적응정책이라는 측면에서 제시하였다. 다만, 여기서 분류한 전략들은 개별적 정책의 차이나 우선 순위의 문제가 아닌 완화와 적응의 특성 차이에 따른 것으로, 기후변화 대응능력의 관점에서는 완화와 적응의 다양한 조합을 통해 시너지를 높이는 통합적 접근으로 이해하는 것이 바람직하다.

협력적 거버넌스는 상호의존성을 바탕으로 하는 공동의 자원, 공동의 목적, 공동의 가치 추구가 필요하다. 참여자들 사이의 상호의존성과 호혜성이 강할수록, 민·관 상호간의 신뢰가

높을수록 협력적 거버넌스의 성공가능성은 높아진다. 특히, 어느 하나의 주체가 단독으로 해결할 수 없는 기후변화 문제와 같은 복잡난해한 문제를 해결하고자 하는 '공동의 목적'은 협력적 거버넌스의 성공을 위한 가장 중요한 요소이다. 이에, 지방정부는 민간부문의 다양한 구성원들의 자원과 역량을 활용하여 보다 창의적이고 효과적으로 문제를 해결할 수 있는 방법을 강구해야 하며, 지역 내 시민사회, 기업, 전문가, 시민들과 함께 목표와 성과 공유, 자원과 수단의 공유, 결정에 대한 책임의 공유 등을 통해 적절한 수준의 연결망과 지속적인 관계를 유지하는 것이 중요하다.

또한, 여기서는 구체적으로 다루어지지 않았지만 기후변화의 영향과 대응은 사회적 복지, 경제번영 및 환경보호와 균형을 이루는 지속가능한 발전과 긴밀하게 연결되어야 한다. 기후정책은 유엔지속가능발전목표(UN SDGs)와 연계될 때 문제해결형 협력적 거버넌스를 촉진시킬 수 있다. 이는 그 영향과 범위가 거대하고 복잡한 기후변화 문제를 국가나 지역적 문제로 가져올 수 있고, 목표를 정확하게 부여할 수 있기 때문이다. 특히, 적응의 강화는 지속가능발전을 위협하는 여러 문제들을 효과적으로 제거하고, 지속가능발전과 기후정책과의 연계성을 증대시키기 위한 효과적인 방법이다. 적응 부문은 건강, 농축산, 물, 생태계, 재난, 해양 등 지속가능발전 세부 목표와 직접적으로 연계성을 가지고 있으며, 취약계층 및 지역의 적응 능력을 향상시키기 위한 사회경제적 요소들을 우선적으로 고려하기 때문이다.

기후변화는 한 국가나 지자체에서 자체적으로 해결할 수 없는 문제이며, 과학적·기술적 문제와 함께 정치·경제·사회적 문제라는 점에서 거버넌스의 역할은 매우 중요하다. 전지구적 문제인 기후변화에 대응하기 위해서 국가 및 지방정부, 시민사회, 기업 등이 협력적 거버넌스를 통해 공동 대응해야 한다. 또한, 협력적 거버넌스를 통한 성공적인 문제해결의 핵심요소인 시민의 기후변화 대응역량이 무엇보다도 강화되어야 한다.

참고문헌

- 강병준(2014), <협력적 거버넌스의 한국적 구조화 방안 연구>, 한국행정연구원.
- 고재경 외(2011), <녹색도시를 꿈꾸는 저탄소 사회 전략>, 한울아카데미.
- 고재경 · 김희선(2013), 기후변화 완화와 적응 통합에 관한 시론적 연구, <환경정책> 제21권 1호, 29~59.
- 안혁근(2015), <중앙-지방 간 협력적 거버넌스의 구축방안>, 한국행정연구원.
- 이명석(2017), <거버넌스 신드롬>, 성균관대학교 출판부.
- 이홍주(2010), <저탄소사회 실현을 위한 광주광역시 실천전략>, 광주발전연구원.
- 정희성 · 정희석(2013), <기후변화의 이해>, (사)환경과문명.
- 한국환경정책 · 평가연구원, <미래를 위한 환경정책 되돌아보기>, 크레파스북.
- 환경부(2005), <지방자치단체 기후변화대응 활성화 방안>.
- 환경부(2008), <지자체 기후변화대응 업무 안내서>.
- 환경부 온실가스종합정보센터(2018), <2018 국가 온실가스 인벤토리 보고서>.
- Ansell, Chris and Alison Gash.(2007), "Collaborative Governance in Theory and Practice", *Journal of Public Administration Research and Theory* 18:4, 543~572.
- Dang, H.H., A. Michaelowa and D.D. Tuan.(2003), "Synergy of Adaption and Mitigation Strategies in the Context of Sustainable Development : the Case of Vietnam", *Climate Policy* 3:1, 81-96.
- IPCC(2018), IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C.
- Swart, R. and F. Raes.(2007), "Making Integration of Adaption and Mitigation Work : Mainstreaming into Sustainable Development Policies?", *Climate policy* 7:4, 288-303.
- Thompson, Leigh & Nader Janice.(2000), Judgmental Biases in Conflict Resolution and How to Overcome Them. In M. Deutsch and P. T. Coleman. (ed.). (2000). *The Handbook of conflict Resolution: Theory and Practice*. San Francisco: Jossey-Bass.
- UNEP(2018), 2018 Emissions Gap Report.
- 기상청 기후정보포털 홈페이지, <http://www.climate.go.kr>

대전세종포럼

DAEJEON
SEJONG
FORUM

미세먼지 발생에 따른 도시차원 대응방안 검토

경대승 NH 토지주택연구원 책임연구원

미세먼지 발생에 따른 도시차원 대응방안 검토

경대승 NH 토지주택연구원 책임연구원

DAEJEON
SEJONG
FORUM

최근 국내 연중 미세먼지의 평균 오염도가 증가함에 따라 이를 저감하기 위한 적극적인 개선 대책이 요구되는 상황이다. PM₁₀ 오염도는 2012년까지 개선 추세였으나, 2013년부터 악화 또는 정체되고 있으며, 인체위해성이 더 높은 PM_{2.5} 평균농도(26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 세계보건기구 권고기준(10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 선진국 주요도시(도쿄 13.8, 런던 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 1.8~2.6배 높고 최근 고농도 발생이 빈번한 실정이다. 이에 정부는 관계부처 합동으로 2016년 「미세먼지 관리 특별대책」을 수립·추진하였으며, 최근 「미세먼지 관리 종합대책」을 발표하는 등 미세먼지 문제를 민생안전과 국민보건을 위한 최우선 해결 과제로 설정하고 추진하고 있다. 그러나 교통 및 대규모 배출원(발전, 산업, 수송) 등 거시적 차원에서의 획일적 규제에만 비중을 두고 있을 뿐 도시 내 생활권 공간단위에서의 구체적인 저감 대책은 미비한 실정이며, 국내 미세먼지 대응기술은 최고기술 보유국 대비 평균 70.5% 수준이다. 따라서 본고에서는 미세먼지에 대한 이해를 도모하고, 우리가 생활하고 있는 도시생활 공간에서 이를 해결할 수 있는 효과적인 방안을 검토해보고자 한다.

I. 미세먼지 발생 및 변동현황

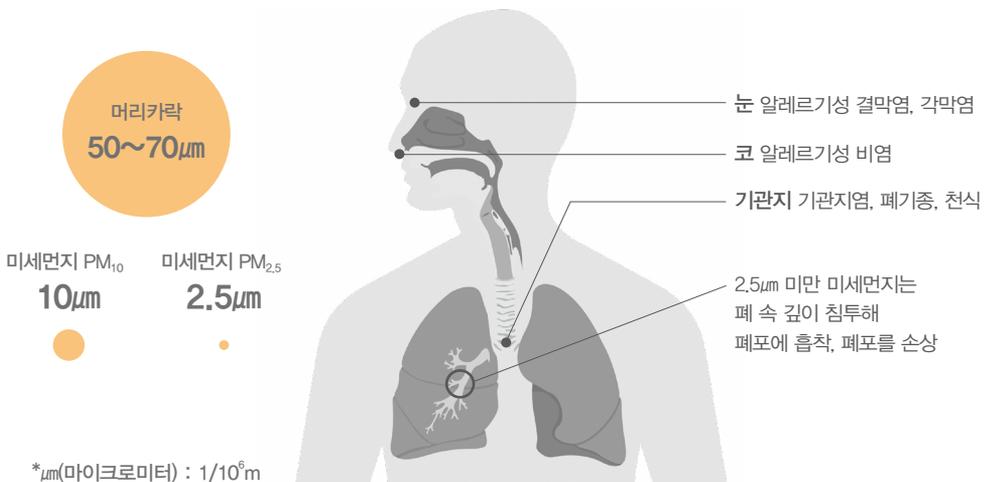
1. 미세먼지 개념

미세먼지(Particulate Matter)란 아황산가스, 질소산화물, 납, 오존, 일산화탄소 등을 포함하는

대기오염 물질로 대기 중 장기간 떠다니는 입경 10 μm 이하의 입자상 물질을 의미한다. 보다 구체적으로 먼지, 꽃가루, 곰팡이 등 직경 10 μm 보다 작은 입자를 PM₁₀으로 구분하며, 연소입자, 유기화합물, 금속 등 직경 2.5 μm 보다 작은 입자는 PM_{2.5}로 명명한다.

미세먼지 발생원인은 크게 국내와 국외영향으로 나누어 살펴볼 수 있다. 국내의 경우 자동차 배기가스(경유차, 건설기계 등), 산업시설 및 화력발전소 화석연료(석탄, 석유 등), 공사현장·비포장도로의 분진 등이 주요 원인으로 알려져 있다(국립환경과학원, 2013). 국외 미세먼지의 경우 대부분 중국 동북지역(상해, 허베이, 장쑤 등) 공장에서 발생하는 오염물질과 공몰사막에서 발생하는 황사가 중국을 거쳐 국내에 유입되는 것으로 알려져 있다. 또한 국외 유입비율은 계절·기상조건에 따라 상이하나, 평상 시 30~50%, 고농도 시 60~80% 수준인 것으로 파악되고 있다. 배출 특성에 따라서는 오염원 직접배출과 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs) 등이 미세먼지로 전환되는 간접배출로 구분되며, '17년도 NASA와의 공동연구 결과 2차 생성에 의한 간접배출이 전체의 75% 이상인 것으로 조사되었다.

미세먼지는 코점막을 통해 걸러지지 않고 흡입 시 폐포까지 직접 침투하여 천식·폐질환 유병률 및 조기사망률을 증가시킨다. PM₁₀의 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 경우 만성폐질환 입원율과 사망률은 각각 2.7%와 1.1% 증가한다. PM_{2.5}의 경우 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 경우 폐암발생율이 9% 증가하며, 장기간 노출 시 허혈성심질환 사망률이 30~80% 까지 증가하는 것으로 알려져 있다(김동식·반기성, 2017). 뿐만 아니라 미세먼지가 증가할수록 우울감 40%, 자살 24%, 스트레스 20% 증가 및 삶의 질이 38% 악화되는 것으로 보고되고 있다(매일경제, 2017).



〈그림 1〉 미세먼지가 인체에 미치는 영향

2. 국내 미세먼지 현황

최근 국내 연중 미세먼지의 평균 오염도가 증가함에 따라 이를 저감하기 위한 적극적인 개선 대책이 요구되고 있는 상황이다. PM₁₀의 연평균 농도는 지속적으로 정체·감소하고 있는 상황이나 인체 위해성이 상대적으로 높은 PM_{2.5}의 연평균 농도는 '15년 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 '17년 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하였다(장영기, 2016). 또한 세계보건기구(WHO) 기준과 국내 대기환경기준을 모두 초과하고 있으며, 미세먼지 주의보(경보) 발령횟수가 '15년 72회에서 '17년 92회로 역시 증가하였다. 이에 정부는 '22년까지 총 7.2조원을 투자하여 국내 미세먼지 배출량 30% 감축과 전국 미세먼지 나쁨(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 초과일수 70% 감축 목표를 설정한 상황이다(관계부처합동, 2017).

〈표 1〉 연도별 수도권 미세먼지 연평균 농도

미세먼지	연평균기준*	WHO기준	도시	2012	2013	2014	2015	2016	2017
PM ₁₀	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (100)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (50)	인천	47	49	49	53	49	46
			서울	41	45	46	45	48	44
			경기	49	54	54	53	53	51
PM _{2.5} (초미세먼지)	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (35)	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (25)	인천	-	-	-	29	26	25
			서울	-	-	-	23	26	25
			경기	-	-	-	26	28	27

자료: 국립환경과학원

국내 미세먼지 농도는 계절에 따라 주기적으로 변화하며, 지역별로 상이한 농도분포를 나타낸다. '10~'17년 PM₁₀ 전국평균 농도를 기준으로 여름(34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)철 미세먼지 농도가 가장 낮으며, 가을(39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 겨울(43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 봄(57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 농도가 상승하는 경향을 보인다. 또한 서울(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 인천·경기(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 충청(47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 지역은 전국 평균(44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 미세먼지 농도보다 항상 높은 수준을 유지하고 있다.

II. 도시 미세먼지 개념 및 특성

1. 도시 미세먼지 개념

도시 미세먼지(Urban particulate matter)는 도시 내에서 생성되고 활동하는 미세먼지를 의미

하며, 배출원에서 직접 배출되는 1차 미세먼지와 이러한 미세먼지가 도시 공간에서 대기 중 물질과 화학적으로 반응하여 생성되는 2차 미세먼지를 포함한다. 도시 내 미세먼지의 주요 발생원은 자동차와 같은 이동오염원이며, 이 밖에도 산업, 전력, 지역 및 가정 난방에 기인한다. 대부분의 대도시에서 미세먼지 배출의 약 40% 이상이 자동차에서 배출되는 것으로 알려져 있으며, 이는 자동차 엔진의 작동, 타이어 마모 등을 통해 직접 배출되는 미세먼지와 배기가스의 질소산화물 성분 등이 생성하는 다량의 2차 미세먼지 때문인 것으로 판단된다.

〈표 2〉 미세먼지 배출특성

구 분	합 계	직접배출 (1차 배출)	간접배출 (2차 생성)			
			소계	NOx	SOx	VOCs
수도권	53,634톤 (100%)	14,427톤 (27%)	39,207톤 (73%)	21,348톤 (40%)	10,857톤 (20%)	7,002톤 (13%)
전 국	324,109톤 (100%)	91,460톤 (28%)	262,649톤 (72%)	90,416톤 (28%)	118,418톤 (37%)	23,817톤 (7%)

자료: 환경부

따라서 도시 내에서는 통행량이 많은 도로변이 미세먼지 농도가 가장 높고 도시민에게 큰 영향을 미치는 'hot spot' 지역이다. 또한 도시 내 미세먼지 농도는 100m 미만의 제한된 공간에서 주변 환경요소 및 도시 공간구조에 따라 높은 변동성을 나타낸다. 즉, 동일한 지역일지라도 다양한 특성에 따라 미세먼지 농도 및 영향 범위 등이 변화할 수 있다.



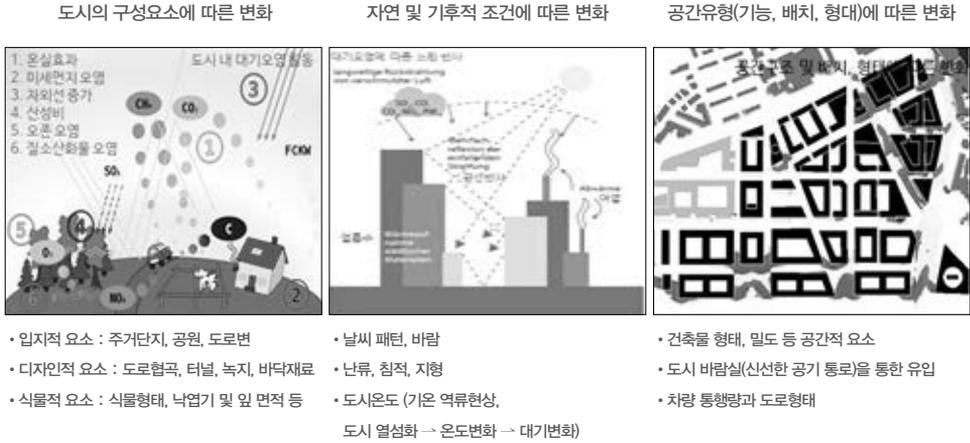
〈그림 2〉 미기후·공간구조에 따른 풍속 및 미세먼지 농도 변화

2. 도시 미세먼지 특성

도시 미세먼지 농도는 크게 도시 구성요소, 자연 및 기후적 조건, 공간유형과 높은 상관관계가 있다. 도시 구성요소적인 측면에서 미세먼지는 도시의 입지 및 디자인 등에 따라 직·간접적으로 영향을 받는다. 인구밀도가 높은 주거단지, 대기오염도가 높은 산업 및 상업시설이 인접한 지역의 경우 상대적으로 미세먼지 농도가 높은 편이다. 반면 근린공원, 완충녹지, 도로변 가로수 등은 배출된 미세먼지를 흡수·흡착하여 활동을 억제시키고 저감하는 역할을 한다. 또한 건축물의 형상, 터널의 유무, 교차로의 형태, 도로 포장재료 등 디자인적인 요소들도 미세먼지의 이동 및 농도변화에 영향을 미치는 주요한 인자로 작용할 수 있다(김정곤·경대승·이성희, 2019).

자연 및 기후적인 측면에서는 도시의 온도, 습도, 풍속·풍향 등이 미세먼지의 활동에 직접적인 영향을 미친다. 최근 도시화로 인해 빈번하게 발생하는 기온역전 현상은 공기의 흐름을 정체시켜 시민들을 고농도의 미세먼지에 노출시킨다. 또한 습도가 높은 지역의 경우 수증기 입자가 오존, 암모니아 등 대기 중 오염물질과 결합하여 도시 내 2차 미세먼지 생성원인으로 작용한다. 이와 같이 자연 및 기후조건에 따른 영향은 미세먼지 농도 예측을 어렵게 할 뿐만 아니라 피해를 증가시키는 원인이 되고 있다.

공간유형적인 측면에서 도시의 기능, 배치, 형태 등은 차량 동선과 밀도에 영향을 미치며, 이는 2차 미세먼지 생성 원인이 되는 질소산화물 배출 농도와 연관성을 갖는다. 따라서 교통량이 많은 중심도로변에 배치된 주거단지는 다른 지역에 비해 미세먼지 피해에 더욱 많이 노출되게 된다. 또한 도시에 신선한 공기를 유입하기 위해 조성한 바람길은 공간유형에 따라 미세먼지나 생성 전구물질을 유입하는 통로로 작용할 수도 있다. 반면 산업단지나 상업지역으로부터 분리하기 위해 조성한 완충녹지나 밀집된 가로수 등은 미세먼지의 유입을 차단하는 역할을 할 수 있다. 따라서 도시 내 미세먼지 저감효과를 극대화하기 위해서는 도시의 특성을 사전에 파악하고 이에 적합한 전략을 마련하는 것이 필요하다.



〈그림 3〉 도시 미세먼지의 특성 및 주요내용

자료: LH 연구원

Ⅲ. 도시 미세먼지 저감방안

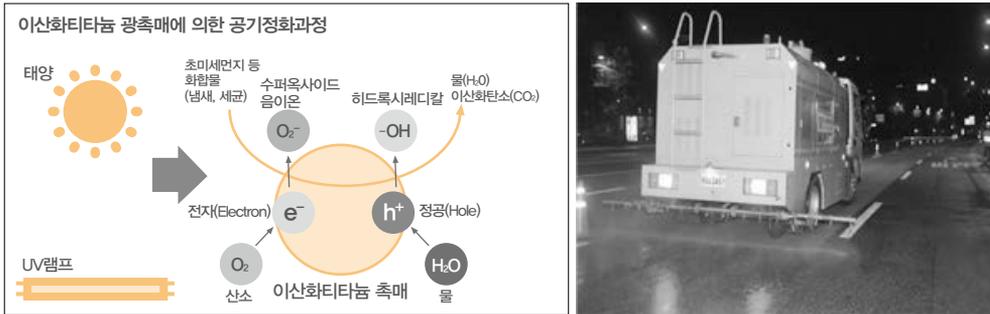
도시 내 생활권 공간에서 발생하는 미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 사전에 미세먼지를 차단·저감하거나 배출된 미세먼지의 노출을 저감시키는 기술 및 기법 도입이 필요하다. 본 고에서는 실외 미세먼지 배출 저감을 위해 도로포장 및 시설물 광촉매 기법활용, 클린로드 시스템, 미세먼지 저감·제거 장치 설치, 도시공간별 생태적 저감기법 도입 가능성을 검토하고자 한다.

1. 광촉매 활용

미세먼지 저감을 위해 유동인구가 많은 횡단보도, 보행자 보도블럭, 지하철 입구나 아파트 벽면, 터널 등에 미세먼지 발생을 저감시킬 수 있는 광촉매 활용 가능성을 검토해 볼 수 있다. 빛을 받아들여 화학반응을 촉진시키는 이산화티타늄(TiO₂)과 같은 광촉매 물질을 도로나 시설물에 코팅함으로써 미세먼지 생성원인 물질을 제거할 수 있다. 광촉매 반응을 통해 생성된 활성화 산소(OH·, O₂⁻ 라디칼 등)가 2차 미세먼지 생성 주요물질인 황산화물, 질소산화물 등의 제거에 실효성을 거둘 수 있을 것으로 기대된다.

“대기오염 저감을 위한 광촉매 콘크리트 제조 및 실용화 기술 개발” 연구에 따르면, 광촉매(TiO₂)가 5% 혼입된 광촉매 콘크리트(1,000m²)의 질소산화물 제거 성능평가 결과 8시간 기준으로 3.688g의 질소산화물 제거 효과가 있는 것으로 밝혀졌다(한국건설기술연구원, 2015). 이

는 휘발유 차량 34.4대, 경유차량 1.67대에 해당하는 질소산화물 효과와 동일하다. 또한 보도블럭 상단 6~7mm에 TiO₂를 섞어 굽는 방식으로 개발된 국내 D사 제품의 경우 축구장 1개 넓이 (7,140m²)에 광촉매가 코팅된 포장재를 시공할 경우 시간 당 17.35g의 질소산화물 분해 효과가 있으며, 시공 후 15~20년간 질소산화물 제거가 가능한 것으로 나타났다.



〈그림 1〉 광촉매 활용을 통한 미세먼지 저감

자료: 디지털 타임즈, 신아일보

또한, 최근 서울시는 양재역 버스정류장 왕복 8차로 250m 구간에 도로포장 광촉매를 시공하였으며, 실내실험 결과 20분 내에 미세먼지 42.8% 감소 효과가 있다고 보고하였다. 현재 유럽에서 사용되고 있는 제품의 경우 1m² 당 7~8만원 수준이며, 국내에서 개발한 대기정화 보도블럭은 3만원 수준으로 기존 제품보다 경제성이 높은 편이나 실질적인 적용을 위해서는 장기적인 미세먼지 저감 효과 모니터링과 경제성 개선이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

2. 클린로드 시스템 설치

클린로드 시스템은 미세먼지 다량 배출예상 지역에 지속적으로 물을 분사하여 미세먼지 입자를 응축시켜 제거한다. 배수관과 물 분사 설비(살수노즐)를 도로 중앙분리대에 설치하며, 농도계측 및 노면 센서를 활용하여 미세먼지 농도가 높은 경우 자동으로 분사한다. 건설현장, 산업단지 등 미세먼지 배출농도가 높은(연평균 미세먼지 농도 50µg/m³ 이상) 지역에 적용하면 효과적인 것으로 나타났다.



〈그림 2〉 클린로드 시스템 활용을 통한 미세먼지 저감

자료: 연합뉴스

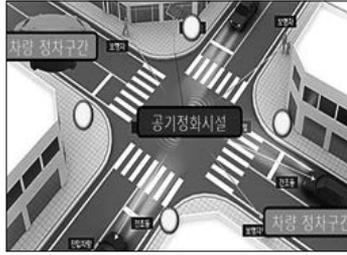
대구광역시의 경우 '11-'13년 지하철 2호선 10개 역사에서 배출되는 깨끗한 지하수를 활용하여 도로 중앙분리대의 노즐 3,600개를 통해 분사할 수 있는 클린로드 시스템을 설치하고 운영하였다. 클린로드 시스템을 활용한 결과 18%의 미세먼지 저감 효과를 보였으며, 경제성 측면에서도 실효성이 있는 것으로 판단되었다. 대구시의 운영조건으로 통행량이 많은 판교-양재 구간에 클린로드 시스템을 설치·운영할 경우 B/C 3.84(비용현재 가치: 173억원, 편익 현재가치: 665억원)로 사업성이 있는 것으로 분석되었으며, 총 미세먼지 저감량은 273톤으로 기대된다. 또한 클린로드 시스템을 20년 동안 운영할 시 약 16.5억원/km의 비용소요가 예상된다.

3. 미세먼지 저감·제거 시스템 설치

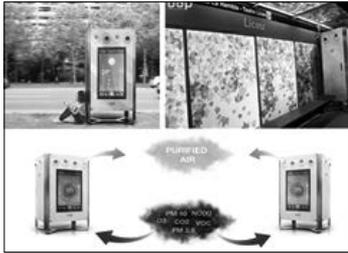
최근 국내외에서 버스정류장, 유동인구 밀집지역, 주거단지 쉼터 및 놀이터, 도로변 방음벽 등 다양한 도시 생활공간에 적용하여 미세먼지 인체 노출농도 저감 및 제거가 가능한 시스템의 도입 가능성을 검토하고 있는 상황이다. 도시민이 실제 생활하는 4m 이하의 공간에 미세먼지 저감·제거 시스템을 설치하여 운영할 경우 효과적으로 미세먼지 노출 영향을 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 외부 오염물질 유입 방지, 공기정화장치 등을 접목한 스마트클린 버스 쉼터의 경우 도로주행 차량에서 발생하는 배기가스와 미세먼지로부터 버스이용승객을 보호할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 횡단보도 대기구간에 공기정화 장치를 설치할 경우, 주행·정지 차량에서 배출되는 미세먼지로부터 횡단보도 대기 보행자를 보호할 수 있을 것으로 판단되며, 식생을 이용한 입체녹화와 태양광을 활용한 집진패널을 결합한 통합 모듈형 장치도 도시 주요 생활 공간에서 미세먼지 저감에 효과적일 것으로 예상된다.



스마트클린 버스쉘터



횡단보도 대기공간 공기정화



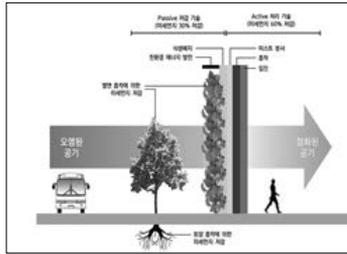
어린이공원 공기정화



유동인구 밀집지역 공기정화



차량도로 공기정화



미세먼지 저감 통합모듈형 장치

〈그림 3〉 도시생활 공간 내 미세먼지 저감·제거 시스템 활용

현재 플라즈마 이온 에어커튼을 활용하여 외부 오염물질 유입을 막고 내부 공기를 정화하는 시스템을 활용한 스마트클린 버스쉘터는 공동주택 밀집지역 4개소에서 시범 운영 중에 있다. '18년 7월 실시한 두 차례의 실증시험 결과 20~30%의 미세먼지 저감효과가 있는 것으로 확인되었다. 또한 “도로터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리장치 사업화 과제”를 통해 전기집진과 흡착저감방식을 동시에 적용할 경우 도로터널 내 미세먼지(PM_{2.5}) 및 유해가스(VOCs) 처리에 실효성이 있는 것으로 판별되었다(국토교통부, 2017). 지하철 터널 내 미세먼지 농도는 51~470 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 일반 대기에 비해 농도가 높고 대부분 철산화물을 중심으로 한 금속원소로 구성되어 인체에 유해한 것으로 알려져 있으나, 상기 처리 시스템을 실규모 처리용량(100m³/s)으로 설치 시, 미세먼지 처리효율은 평균 91.4%, 유해가스 처리효율은 평균 83%로 우수한 것으로 나타났다. 향후 지속적인 연구를 통해 오픈된 공간의 공기 흐름을 제어할 수 있는 방안을 강

구하고 저배압 초소형 집진모듈 및 시스템 개발, 신재생 발전시스템 복합적용 등을 통해 경제성을 확보한다면 일정한 범위 내에서 미세먼지 프리존을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 미세먼지 저감 생태기법 활용

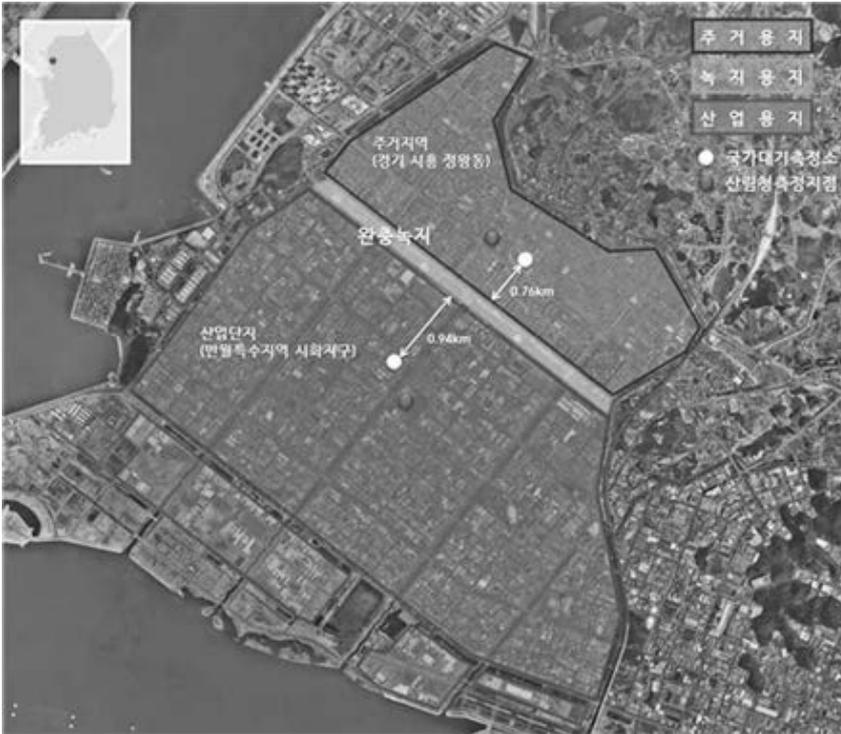
지면·옥상·수직 등 도시공간별 녹화 및 식재 밀도, 구조 등의 변화를 통한 녹지 기능개선을 바탕으로 미세먼지를 저감할 수 있는 방안을 검토하였다. 식생을 활용할 경우 잎 표면 왁스층에 미세먼지가 붙잡히거나 기공을 통해 식물체 안으로 들어가 식물효소의 작용으로 미세먼지가 저감되는 효과가 규명되었다(환경부, 2017). 식물은 포름알데히드나 벤젠 같은 휘발성유기화합물(VOCs) 제거에 효과적이며, 수중에 따라 미세먼지 흡수율은 14배 정도 차이가 발생한다. 비술나무, 목련, 물푸레나무, 소나무 등 미세먼지 흡수·흡착 효율이 높은 식물선정 및 효과적인 공간배치를 통해 미세먼지 노출농도 저감이 가능할 것으로 판단된다.



〈그림 4〉 미세먼지 저감 생태적 기법

미국 연방산림청이 개발한 프로그램(i-Tree) 분석결과, 도심에 있는 나무들이 CO, NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등 오염물질 88톤(도시대기 발생량의 7%)를 제거하는 것으로 나타났다. 또한 경기도 시흥시에 236,000m² 규모와 10m 높이의 도시숲을 조성한 결과 주거단지(53.7 μg/m³)

의 미세먼지 농도는 산업단지(59.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교하여 12% 낮아진 것으로 관측되었으며, 녹지 조성 후 최근 3년 동안 미세먼지 농도가 '나쁨' 단계(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)를 나타낸 날도 산업단지가 109일, 주거지역이 75일로 31% 낮아졌다.



〈그림 5〉 경기도 시흥시 정왕동 및 반월특수지역 시화지구

자료: 환경미디어

IV. 결론

미세먼지는 국민건강 보호 측면에서 우려의 수준을 넘어 환경성 질환 및 질병부담 증가와 같은 부정적인 현상을 야기하고 있다. 따라서 도시 내 생활권 공간에서 발생하는 미세먼지 문제 해결을 위해서는 사전에 미세먼지를 차단·저감하거나 배출된 미세먼지의 경우 인체 노출 농도를 저감시키는 것이 중요하며, 미세먼지의 발생원인이 다양한 것처럼 융·복합적인 기술 및

기법의 연계를 통한 해법을 도출해야 할 것으로 판단된다. 고농도 미세먼지 대규모 배출원의 경우 미세먼지 저감 효과와 사업성이 우수한 클린로드 시스템 설치를 의무화 할 필요성이 있으며, 활용범위가 다양한 미세먼지 저감 장치의 경우 어린이, 노약자 등 취약계층을 대상으로 학교, 놀이터, 주거단지 쉼터 등에 우선적으로 도입하고 경제성 개선을 위한 노력을 경주해야 할 것으로 사료된다. 또한 미세먼지 저감 장치의 경우 대용량 단일시설 설치보다 소규모 분산형으로 설치하고 이를 지속적으로 유지·관리·운영할 수 있는 시스템 구축이 수반되어야 한다. 질소산화물 제거 광촉매 활용기법의 경우 교통량이 많고, 차량 정체가 심한 도로 구간 내 시범 적용을 통해 효과를 검증하고, 보행자 보도블럭, 아파트 벽면 등 활용범위를 확대할 필요성이 있다. 또한 투수성 포장재 내 미세먼지 적층, 질산염 지하수 유입 등 활용과정에서 발생할 수 있는 문제점을 인식하고, 이를 개선할 수 있는 요소기술의 추가 개발 및 효과검증도 동시에 이루어져야 한다. 마지막으로 생태적 기법을 활용한 미세먼지 저감방안의 경우 폭염 대응, 기후변화 완화 등의 도시환경 문제와 연계하여 효과를 증대시킬 수 있는 방안을 마련한다면 효과적인 미세먼지 저감이 가능할 것이다.

참고문헌

- 김동식 · 반기성(2017), 〈미세먼지 극복하기〉, 프리스마.
- 김정곤 · 경대승 · 이성희(2019), 〈미세먼지 저감도시 조성기법 및 사례연구〉, LH연구원 연구보고서.
- 관계부처합동(2017), 미세먼지 관리 종합대책.
- 국립환경과학원(2013), 대기오염물질 배출량 통계.
- 국립환경과학원(2015), 대기환경연보 2014.
- 국토교통부(2017), 도로터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리장치 사업화, 국토교통기술사업화지원사업 최종보고서
- 장영기(2016), 미세먼지 오염의 현황과 문제점, 〈환경논총〉 제58권 4~13.
- 장영기(2016), 미세먼지 문제의 현황과 추이, 〈도시문제〉 제575권 16~19.
- 한국건설기술연구원(2015), 대기오염 저감을 위한 광촉매 콘크리트 제조 및 실용화 기술개발, 2015년도 주요사업 최종보고서.
- 흥한국환경정책 · 평가연구원(2016), 최근 미세먼지 농도 현황에 대한 다각적 분석, 〈KE 포커스〉 제4권 3호.
- 환경부(2016), 바로알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?
- 환경부(2017), 보도자료, 도시숲은 미세먼지 잡아먹는 하마.
- 매일경제(2017), 미세먼지 농도 높을수록, 남성 우울감 높아져.
<http://news.mk.co.kr/newsRead.php?year=2017&no=742976>
- 신아일보(2018), 서울시, 광촉매 도로포장으로 미세먼지 1.5배 감소.
<http://www.shinailbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=1125072>
- 환경미디어(2018), 시흥시 ‘도시숲’ 미세먼지 저감 효과 톡톡이.
<http://ecomedia.co.kr/news/newsview.php?ncode=1065606028256768>
- News1(2014), 대구 클린로드 시스템, 미세먼지 개선 효과 확인
<http://news1.kr/articles/?1864498>

대전세종포럼

DAEJEON
SEJONG
FORUM

기후변화 대응과 미세먼지 저감

이 상 신 충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원

기후변화 대응과 미세먼지 저감

이 상 신 충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원

DAEJEON
SEJONG
FORUM

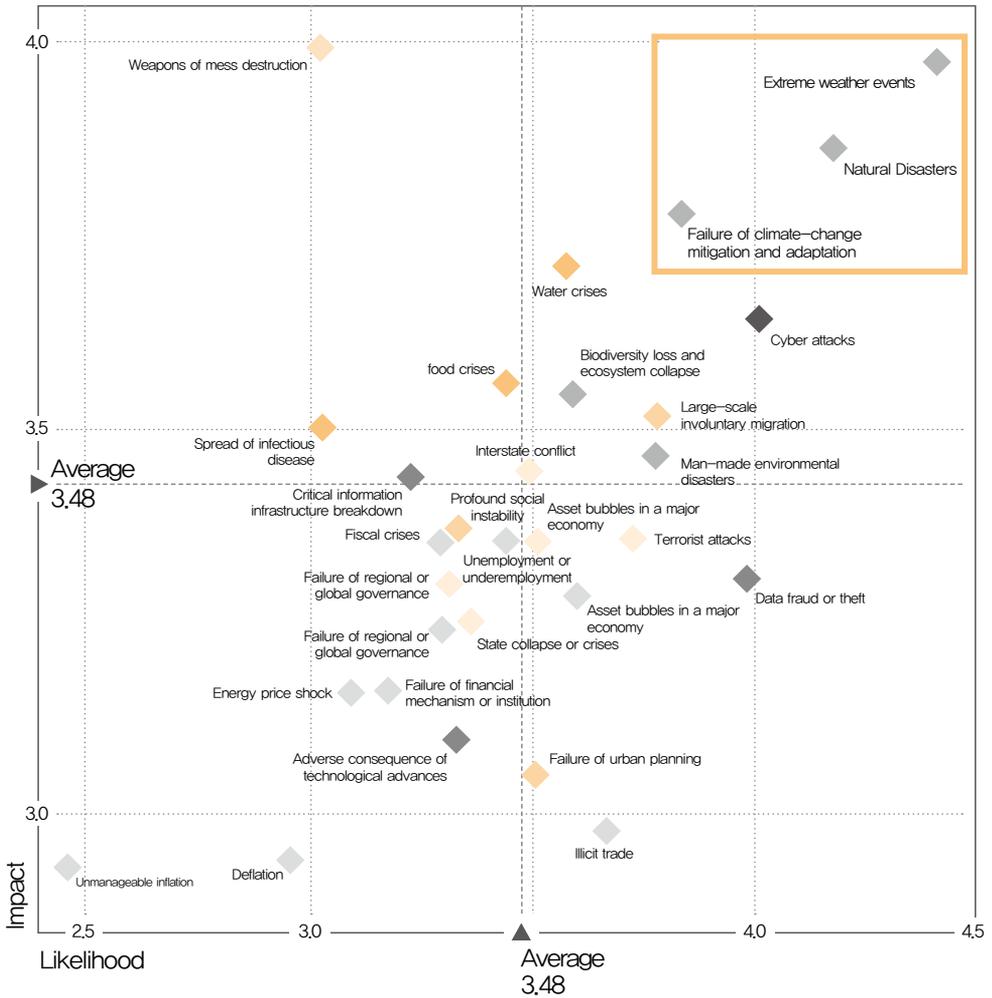
I. 기후변화는 현재진행형

1. 기후변화 현황

기후변화에 따른 영향은 전 세계적으로 지속적으로 나타나고 있으며 그 피해 빈도와 규모가 점점 커지고 있다. 기후변화는 환경, 경제, 사회 전반적인 분야에서 핵심이슈로 자리잡고 있어 현대사회를 기후변화 시대라고 해도 과언이 아닐 정도로 광범위하게 영향을 미치고 있다. 세계 경제포럼(2019)¹⁾은 2018년 글로벌 리스크 전망에서 가능성과 영향측면에서 극한기후사상, 자연재해, 기후변화 완화와 적응실패 등 기후변화 관련 항목들은 발생가능성이 높고 영향도 높을 것으로 전망하고 있다(그림 1).

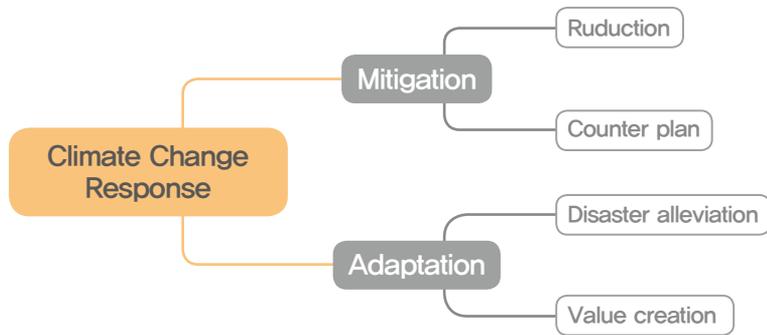
이렇듯 기후변화 시대를 살아가고 있는 우리는 기후변화를 지연시키기 위한 방안으로 온실가스 감축에 대해 지속적으로 논의하고 있으며, 온실가스 감축과 더불어 기후변화 시대에 어떻게 적응해서 살아 갈 것인가에 대한 고민과 관련 연구들도 지속하고 있다. 기후변화 대응은 <그림 2>와 같이 온실가스 감축으로 대변되는 기후변화 완화활동과 현재와 미래의 기후변화 영향을 최소화 하거나 극복하기 위한 적응활동으로 구분된다.

1) <http://reports.weforum.org/global-risks-2018/global-risks-landscape-2018/#landscape>, 세계경제포럼, 2019.2.5.



〈그림 1〉 2018년 글로벌 리스크 전망

자료: 세계경제포럼, 2019



〈그림 2〉 기후변화대응의 분류

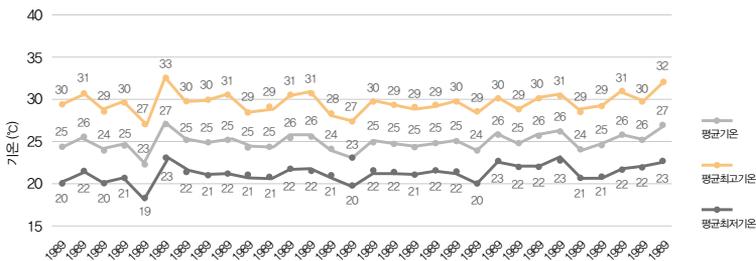
기후변화 완화는 온실가스를 감축함으로써 지구온난화를 지연시켜 미래 기후변화로 인한 영향을 최소화하는데 목적이 있는데, 온실가스 감축은 화석연료 사용을 억제하는 것이 최우선적으로 고려되고 있다. 화석연료는 연소시 온실가스 뿐만아니라 다양한 대기오염물질을 함께 배출하고 있어 대기질 관리문제의 중요한 부분을 차지하고 있다.

기후변화 적응관점에서는 기후변화 원인인 온실가스 증가보다 기후변화 영향에 대한 논의가 더욱 필요하며, 2018년 여름과 같은 폭염 등 극한 기후에 어떻게 적응할 것인가가 중요한 문제로 대두된다. 특히, 취약계층에 대한 정책개발이 시급한데, 이를 국제적으로 확대하여 생각하면 저개발국가 일수록 기후변화 적응문제에 집중할 필요가 있다는 것을 알 수 있다. 기후변화 완화는 국제협약 이행이 결과물을 만들어 냄으로써 국가의 역할이 중요한 반면, 기후변화 적응문제는 사회기반시설 관리 책임이 있는 지자체의 역할이 크다고 하겠다. 개인이나 지역의 입장에서 기후변화는 완화보다 적응의 문제에 좀 더 관심을 기울일 필요가 있다.

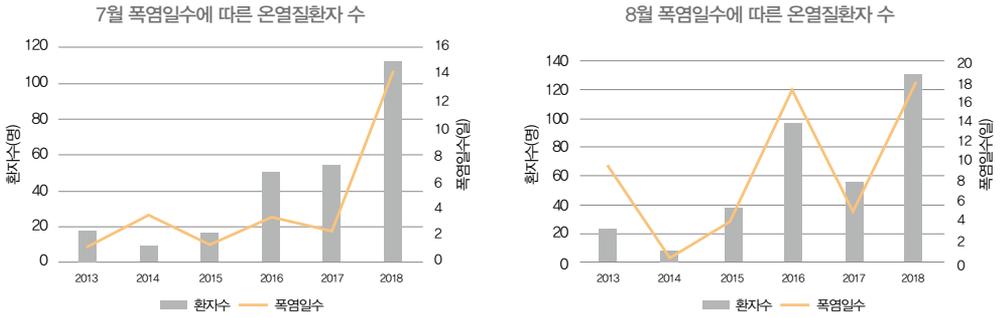
2. 2018년 여름, 110년 만의 폭염

지난 2018년 여름 지구촌은 폭염과 집중호우의 피해가 지속적으로 발생했다. 러시아는 7월 기온이 관측 이래 130년만에 가장 더운날을 보였으며, 평년대비 평균온도가 7.8도 이상 상승했다. 우리나라도 최고의 폭염을 맞이했는데, 특히 7월의 이른 폭염이 사회시스템 전반에 영향을 미쳤다. 기상관측 시스템이 도입된 이래 110년 만에 최고 기온을 기록하는 한편, 최저기온이 30도를 웃도는 기록적인 열대야를 나타내며, 인명피해와 에너지 관리에 힘든 여름을 보냈다.

충남지역 폭염기록만 살펴봐도 지난 30년간 7, 8월 평균기온 기준으로 가장 더웠으며(그림 3), 8월 폭염일수와 열대야 일수도 각각 17.6일과 8.4일을 기록하여 지난 30년간 가장 많은 발생일수를 기록하였다. 폭염의 영향으로 2013년 이후 가장 많은 온열질환자 수가 발생하였는데, 2018년은 특히 과거 기록과 달리 7월과 8월 모두 온열질환자 수 발생이 높았다.(그림 4).



〈그림 3〉 충남지역 2018년 여름(7, 8월) 기온변화



〈그림 4〉 충남지역 2018년 여름 폭염일수와 온열질환자수 변화

3. 기후변화 예측

기후변화 영향은 폭염증가에 국한되지 않고 한파, 폭설, 집중호우 등 극한사상의 발생빈도 증가도 확인할 수 있다. 기상청(2019)²⁾ 기후변화시나리오(RCP8.5)에 따르면 2020년 대비 평균기온이 2030년대 0.3℃ 증가를 시작으로 2050년대까지 10년 평균 약 1.0℃ 증가하고, 폭염일수도 대전시 11.7일, 세종시 10.6일, 충청남도 9.9일이 증가하는 등 매10년간 약 10일의 증가가 예측되고 있다. 열대야일수 또한 2020년대 대비 충청권은 2030년대 약 3일 내외, 2040년대 약 5일 내외, 2050년대 약 11일 내외가 증가할 것으로 예측하고 있다(표 1).

〈표 1〉 2020년 대비 기후변화 시나리오(RCP8.5)에 따른 기후사상 변화량

구분		2030년대	2040년대	2050년대	10년 평균 증가율
평균기온 (℃)	대전	0.3	0.9	1.6	0.9
	세종	0.3	1	1.6	1.0
	충남	0.3	1	1.6	1.0
폭염일수 (일)	대전	7.8	11.2	16	11.7
	세종	6.3	10.7	14.7	10.6
	충남	6.7	10.2	12.9	9.9
열대야일수 (일)	대전	4.2	6.7	12.4	7.8
	세종	2.8	5.5	10.1	6.1
	충남	4.3	6.8	11.5	7.5

자료: 기상청기후정보포털, 행정구역기반 기후변화 시나리오 조회결과

2) http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents/33_1_areapoint.php 기상청기후정보포털, 2019, 2.8.

이렇듯 미래 기후변화 예측결과에서도 극한사상의 발생빈도가 증가할 것으로 예측됨에 따라 기후변화 대응을 위한 지속적인 노력이 필요하다. 특히, 전지구적 기온상승이 지역적 영향으로 이어지고 있으며 근본원인 해결을 위한 온실가스 감축 및 적응노력을 지역차원에서 동시에 추진할 필요가 있다.

II. 기후변화와 미세먼지

1. 어디에 집중해야 하나?

기후변화의 원인은 지속적인 전지구적 온실가스 증가가 원인이며, 온실가스 증가는 자연적 원인과 인위적 원인으로 구분할 수 있다. 자연적인 원인에는 지구외적 요인인 지구 자전축의 경사변화, 세차운동, 지구 공전궤도 이심률 변화, 태양 흑점활동 변화 등과 내적요인인 화산분화에 의한 에어로졸 증가, 기후시스템 요소간의 상호작용 등이 포함된다. 이러한 자연적인 원인에 더하여 인간 활동에 의한 온실가스 증가가 기후변화 가속화를 일으키는 주요 원인이며, 그 대표적인 원인으로 화석연료 사용량 증가를 꼽을 수 있다. 화석연료 연소시 일산화탄소와 질소 산화물, 황산화물, 탄화수소 등이 배출되며 대표적인 온실기체인 이산화탄소 농도를 증가시키는데, 온실가스 배출에 화석연료 비중은 전체 배출량의 70~80%를 차지하여 지구온난화를 가속시킨다. 즉, 기후변화의 가속화 원인인 화석연료 사용량 증가는 대기오염물질 배출량 증가로 이어져 지구온난화와 함께 대기질에 영향을 미치고 있다. 연료연소는 가스나 입자오염물질을 환경으로 배출함으로써 대기 질, 인체건강이나 기후에 1~2차 영향을 주는 것이 특징이다 (ReSEAT, 2009)³⁾, 화석연료나 바이오연료의 연소는 1차 에어로졸과 2차 반응물질을 생성하는 전구물질로 미세먼지와 기후에 영향을 미치고 있다.

따라서, 기후변화 대응정책 즉 온실가스 감축에 집중된 많은 정책들이 대기오염 개선, 미세먼지 저감효과를 가져올 수 있고, 기후변화 적응과 마찬가지로 미세먼지에 적용할 수 있는 정책들도 동일한 적응영역에서 다뤄질 수 있음을 짐작할 수 있다.

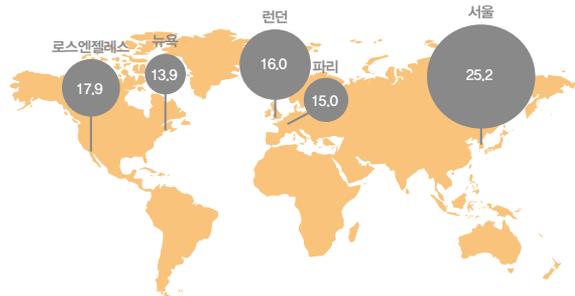
대기오염물질과 인간 건강문제의 상관성에 대해서는 선행연구들에서 확인이 가능하며, 이를 위해 많은 건강영향조사들이 진행되고 있다. 박혜경(2018)⁴⁾은 건강(천식환자)에 영향을

3) ReSEAT 분석리포터(2009.3.23.) 대기질과 기후에 미치는 연소배출의 영향

4) 박혜경(2018), 대기오염과 기후변화: 천식에 미치는 영향

주는 대기오염물질은 미세먼지, 오존, 질소산화물, 이산화황 등이며 기온과 습도 등 기상 요소가 대기오염물질의 건강영향에 다르게 작용함을 제시하고 있다. 이렇듯 기온이나 습도 등 기상 요소 자체만으로도 천식환자의 경과에 영향을 주며, 대기오염물질과의 상호작용을 통해 천식환자의 경과에 악영향을 증가시킴을 연구결과로 제시하였다.

그린피스(2015)⁵⁾에서는 초미세먼지를 침묵의 살인자로 규정하고 석탄화력발전소의 초미세먼지로 인한 건강피해를 연구한 결과 석탄화력발전소에서 나오는 초미세먼지로 매년 최대 1,600 명이 조기사망하는 것으로 보고하고 있다. 보고서에서 제시하고 있는 세계주요도시 초미세먼지(PM_{2.5}) 연평균 농도비교를 보면 서울의 농도가 북미, 유럽의 대도시 2배에 가까운 연평균농도를 보이고 있다(그림 5). 세계 500개 대도시의 탄소발자국을 연구한 Carbon Footprints of World Cities(2019)⁶⁾에 따르면 서울은 세계에서 가장 많은 온실가스를 배출하는 도시이며, 온실가스 배출이 높은 도시들은 대부분 대기오염물질 농도가 높을 수 있음을 연구결과를 통해 추론할 수 있다.



〈그림 5〉 2012년 세계 주요도시 초미세먼지 연평균 농도비교

자료: 그린피스, 2015

Urban Cluster	Country	Footprint/cap (t CO ₂)	Population	Footprint (Mt CO ₂)	Global ranking	Domestic ranking
Seoul	South Korea	13.0 ±2.4	21,254,000	276.1 ±51.8	1	1
Guangzhou	China	6.1 ±1.0	44,309,000	272.0 ±46.2	2	1
New York	USA	17.1 ±5.5	13,648,000	233.5 ±75.4	3	1
Hong Kong SAR	China	34.6 ±6.3	6,029,000	208.5 ±37.8	4	1
Los Angeles	USA	14.6 ±3.2	13,482,000	196.4 ±43.7	5	2
Shanghai	China	7.6 ±1.9	23,804,000	181.0 ±44.6	6	2
Country of Singapore	Singapore	30.8 ±6.5	5,235,000	161.1 ±34.1	7	1
Chicago	USA	21.1 ±5.1	7,260,000	152.9 ±37.2	8	3
Tokyo/Yokohama	Japan	4.0 ±0.6	32,999,000	132.8 ±21.4	9	1
Riyadh	Saudi Arabia	20.7 ±4.6	5,747,000	118.8 ±26.4	10	1
Dubai	UAE	22.3 ±6.2	4,971,000	110.8 ±31.0	11	1

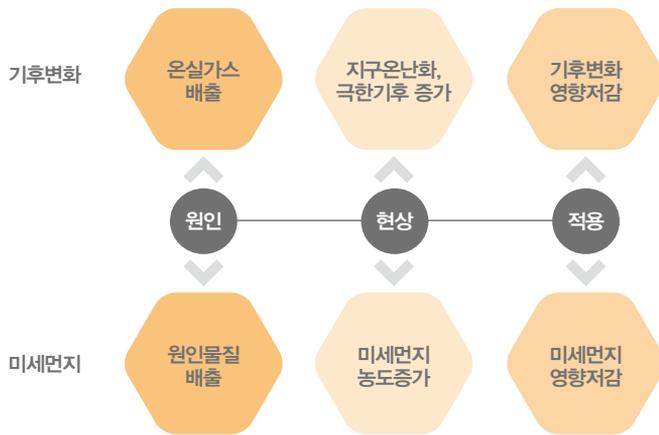
〈그림 6〉 세계 500대 도시 탄소발자국 순위

자료: Carbon Footprints of World Cities, 2019

5) 그린피스(2015), 침묵의 살인자, 초미세먼지

6) Carbon Footprints of World Cities(2019.2.8), <http://citycarbonfootprints.info/>

온실가스 배출량을 조절하는 것은 미세먼지를 비롯한 대기오염물질을 저감할 수 있고 기후 변화 원인과 이로 인한 기후변화 현상발생, 이에 적응하기 위한 기후변화 적응문제는 각각 미세먼지 원인물질 배출과 이로 인한 미세먼지 농도증가, 실생활에서 고농도 사례가 빈번한 현재를 적응해서 살아가야 하는 미세먼지 적응문제와 연관되어 기후변화와 미세먼지는 동일한 정책흐름을 가진다(그림 7). 따라서, 기후변화 대응과 미세먼지 농도저감을 위한 정책은 공동의 편의 도출이 가능하며, 어느 곳에 집중할 것이 아니라 정책의 효과를 기후변화-미세먼지 모든 분야에서 예측하고 분석하여 추진해야 할 것이다.



〈그림 7〉 기후변화와 미세먼지 대응 흐름

2. 기후변화와 미세먼지 관계

1) 미세먼지 고농도 사례 분석

지금은 미세먼지라는 단어가 친숙하지만 오래전부터 우리는 계절적 영향으로 황사를 경험해 와서 황사라는 단어가 더 익숙했었다. 정도의 차이는 있었으나 황사는 매년 3월~5월 집중발생 하였으며 과거에는 10일 이상 발생하는 경우가 드물었다. 최근 몇 년 전 고농도 미세먼지 발생 사례가 계절에 상관없이 발생했을 때도 황사발생시기가 일정치 않다는 언론의 보도가 있었듯 황사와 미세먼지를 구분할 수 있는 국민이 많지 않았다. 하지만, 지금은 황사와 미세먼지를 구분하고 초미세먼지(PM_{2.5})의 위험성에 대한 인식도 개선되고 있다. 우리나라 미세먼지 저감정책은 대부분 배출량관리로 지역의 배출량을 관리함으로써 대기질을 개선하는 오염물질 출구관리에 집중하고 있는 수준이다. 하지만, 미세먼지는 기상학적 특성과 상관성을 가지고 있으며 지역규모의 기

상학적 특성에 따라 농도변화가 크게 차이가 나는 경우가 있다.

기후변화는 전지구 기후시스템의 변화를 의미하고 지구규모의 변화가 지역규모의 변화를 유발하게 되는데 특히, 기후변화로 인해 기압의 장기적인 변화에 따라 풍속이 저감되고 이러한 풍속 저감으로 인해 특정지역에 대기가 정체 되어 오염물질의 농도가 증가하는 패턴을 보이기도 한다.

고농도 미세먼지 발생 시 기상학적 특성을 분석해 보면 미세먼지와 기상요소 간 상관성을 찾을 수 있다. 충남연구원(2017)⁷⁾의 연구에서 최근 10년간(2006~2015) 서산기상대와 천안기상대 기상자료를 분석한 결과 2012년 이후 미세먼지 농도의 증가와 함께 서산시와 천안시에서 풍속과 강수량, 시정의 감소가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다. 고농도 발생 시 기상요소 분석결과 고농도 발생 시 두 지점에서 풍속은 3.0m/s 이하로 대기가 정체되어 있었던 시기와 일치함도 확인할 수 있었다. 또한 기상요소와 미세먼지(PM₁₀)와의 상관관계를 분석한 결과 분석 대상 모두에서 일교차가 가장 강한 양의 상관을 보였으며, 강수량과 최저기온이 강한 음의 상관관계를 나타냈다. 연구결과 기상요소별 미세먼지 변동과의 상관성은 아래와 같이 요약할 수 있다(그림 8).

- 강수에 의한 대기 세정효과로 인해 미세먼지 농도는 낮아지기 때문에 음의 상관을 나타냄
- 풍속이 약해질수록 대기정체로 인한 미세먼지의 농도가 높아지기 때문에 음의 상관을 나타냄
- 기온과 상대습도도 음의 상관을 나타냈는데, 고농도의 주된 발생시기가 건조한 봄철, 겨울철과 관계된 것으로 판단됨
- 일반적으로 구름이 없고 일사가 강한 날에 큰 일교차를 보이며 야간 안정층 내에서 대기 확산이 약화되어 지상의 미세먼지 농도가 높게 나타날 수 있고 최저기온이 낮은 것도 큰 일교차를 유발함

7) 충남연구원(2017), 고농도 미세먼지 발생 시 기상학적 특성 파악에 대한 연구

기후변화 대응과 미세먼지 저감

(a)서산		PM ₁₀	평균기온	최저기온	최고기온	일교차	강수량	풍속	상대습도	일조	일사	전운량
PM ₁₀	상관계수 유의확률 N	1 3467										
평균기온	상관계수 유의확률 N	-0.13** 0.00 3467	1 3652									
최저기온	상관계수 유의확률 N	-0.18** 0.00 3467	0.98** 0.00 3652	1 3652								
최고기온	상관계수 유의확률 N	-0.06** 0.00 3467	0.98** 0.00 3652	0.94** 0.00 3652	1 3652							
일교차	상관계수 유의확률 N	-0.36** 0.00 3467	-0.15** 0.00 3652	-0.32** 0.00 3652	0.04** 0.03 3652	1 3652						
강수량	상관계수 유의확률 N	-0.19** 0.00 3467	0.18** 0.00 3652	0.23** 0.00 3652	0.12** 0.03 3652	-0.32** 0.00 3652	1 3652					
풍속	상관계수 유의확률 N	-0.15** 0.00 3467	-0.04** 0.00 3652	0.02** 0.19 3652	-0.13** 0.00 3652	-0.40** 0.00 3652	0.17** 0.00 3652	1 3652				
상대습도	상관계수 유의확률 N	-0.13** 0.00 3466	0.39** 0.00 3652	0.46** 0.00 3651	0.33** 0.00 3651	-0.42** 0.00 3651	0.32** 0.00 3651	-0.18** 0.00 3651	1 3651			
일조	상관계수 유의확률 N	-0.11** 0.00 3467	0.01** 0.45 3652	-0.09** 0.00 3652	0.13** 0.00 3652	0.61** 0.00 3652	-0.33** 0.00 3652	-0.14** 0.00 3652	-0.48** 0.00 3651	1 3652		
일사	상관계수 유의확률 N	-0.11** 0.00 3467	0.35** 0.00 3652	0.26** 0.00 3652	0.44** 0.00 3652	0.45** 0.00 3652	-0.30** 0.00 3652	-0.13** 0.05 3652	-0.38** 0.00 3651	0.81** 0.00 3652	1 3652	
전운량	상관계수 유의확률 N	-0.18** 0.00 3467	0.23** 0.00 3652	0.33** 0.00 3652	0.11** 0.00 3652	-0.64** 0.00 3652	0.34** 0.00 3652	0.17** 0.00 3652	0.51** 0.00 3651	-0.85** 0.00 3652	-0.57** 0.00 3652	1 3652

(b)천안		PM ₁₀	평균기온	최저기온	최고기온	일교차	강수량	풍속	상대습도	일조	전운량
PM ₁₀	상관계수 유의확률 N	1 3512									
평균기온	상관계수 유의확률 N	-0.23** 0.00 3512	1 3652								
최저기온	상관계수 유의확률 N	-0.29** 0.00 3512	0.98** 0.00 3652	1 3652							
최고기온	상관계수 유의확률 N	-0.15** 0.00 3512	0.98** 0.00 3652	0.93** 0.00 3652	1 3652						
일교차	상관계수 유의확률 N	0.40** 0.00 3512	-0.08** 0.00 3652	-0.26** 0.00 3652	0.12** 0.00 3652	1 3652					
강수량	상관계수 유의확률 N	-0.25** 0.00 3512	0.20** 0.00 3652	0.26** 0.00 3652	0.13** 0.00 3652	-0.34** 0.00 3652	1 3652				
풍속	상관계수 유의확률 N	-0.15** 0.00 3511	-0.17** 0.00 3651	-0.13** 0.00 3651	-0.22** 0.00 3651	-0.23** 0.00 3651	0.06** 0.00 3651	1 3651			
상대습도	상관계수 유의확률 N	-0.20** 0.00 3512	0.31** 0.00 3652	0.40** 0.00 3652	0.22** 0.00 3652	-0.49** 0.00 3652	0.35** 0.00 3652	-0.35** 0.00 3651	1 3652		
일조	상관계수 유의확률 N	0.14** 0.00 3500	-0.01** 0.51 3640	-0.13** 0.00 3640	0.12** 0.00 3640	0.64** 0.00 3640	-0.34** 0.00 3640	0.02** 0.27 3639	-0.58** 0.00 3640	1 3640	
전운량	상관계수 유의확률 N	-0.23** 0.00 2284	0.27** 0.00 2397	0.37** 0.00 2397	0.14** 0.00 2397	-0.63** 0.00 2397	0.37** 0.00 2397	0.00** 0.89 2396	0.57** 0.00 2397	-0.85** 0.00 2385	1 2397

* **는 상관계수가 99% 이상 유의, *는 95% 이상 유의함을 나타냄. * 천안기상대는 일사자료를 제공하지 않아 상관계수 표에서 제외함.

〈그림 8〉 고농도 미세먼지 사례일 PM₁₀과 기상요소 상관관계표

자료: 충남연구원, 2017 인용

미세먼지 저감정책은 장기간의 평균농도를 낮추는 것도 중요하지만 인간 건강에 미치는 영향을 고려했을 때 연속되는 고농도 사례를 줄이는 것이 무엇보다 중요하며 이러한 연속되는 고농도 사례일 발생은 배출량의 문제라기보다 대기정체로 대변되는 기상현상에 의해 좌우된다고 하겠다. 특히 지역적 기상요소 패턴이 기후변화 영향으로 변화하고 있어 과거 황사발생이 먼지에 대한 유일한 걱정거리였던 시기와 유사한 기상요소 패턴을 위해서는 기후변화가 지역 기상요소에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하며, 미세먼지 특히 고농도 미세먼지 발생에 대한 연관성 연구도 필요하다.

2) 온실가스 감축과 미세먼지 농도 저감

유럽환경청(European Environment Agency, EEA)(2017)⁸⁾은 대기환경(미세먼지) 개선이 인간의 건강문제 뿐만 아니라 기후변화 문제 해결에 기여하며, 미세먼지는 이산화탄소와 같이 기후변화 유발물질(climate forcer)로서 직접적으로 지구온난화에 기여함을 제시하였다. 전절에서도 언급한 바와 같이 온실가스와 대기오염물질은 화석연료 연소라는 동일한 배출원에 기인함으로 단기체류 기후변화 유발물질(SLCF, short lived climate forcer) 배출을 저감하는 것이 인간 건강문제 해결과 기후변화 문제해결에 기여한다고 할 수 있다.

APEC 기후센터 연구팀(이현주 등, 2018)⁹⁾은 한반도 고농도 미세먼지와 연관된 대기패턴을 기반으로 Korea Particulate matter Index(KPI)를 개발하여 RCP기후변화 시나리오 RCP4.5(온실가스 저감정책 추진)와 RCP8.5(저감정책 미시행)에 대해 우리나라 고농도 미세먼지 발생 빈도와 강도 분석결과, 기후변화 진행에 따라 고농도 미세먼지 발생 기상조건인 대기정체 조건이 자주 발생하여 온실가스 증가가 고농도 미세먼지 사례일 증가에 기여할 수 있음을 제시했다.

미세먼지 농도증가와 풍속저감의 상관성에 대한 많은 연구결과들을 종합해 보면, 최근 50년 사이 전 지구적으로 육지 풍속이 0.7m/s 감소하였는데, 이를 온난화에 따른 공기 흐름의 평온화(stilling) 현상이라 하고 고농도미세먼지 발생의 원인으로 기후학자들은 이를 '기후 페널티'라고 부른다.

이러한 연구결과를 종합하면 기후변화시대를 살고 있는 우리는 고농도 미세먼지 발생을 억제하기 위해서 대기오염물질 배출 저감정책 개발과 시행 노력이 필요하다. 이를 통해 미세먼지 농도 저감이 가능하며 역으로 이는 온실가스 감축과 일맥상통한다고 할 수 있다.

따라서 온실가스 감축과 미세먼지 저감은 동일한 정책으로 성과를 이룰 수 있다는 것을 의미하며 온실가스 감축을 위한 다양한 기후변화 대책은 미세먼지 대책과 공통점이 존재한다(표 2).

8) EEA(2017), Cleaner air benefits human health and climate change

9) 이현주 등(2018), 한반도 미세먼지 발생과 연관된 대기패턴 그리고 미래전망

〈표 2〉 기후변화 대책과 미세먼지 대책 비교

기후변화 대응	공동	미세먼지 대응
<ul style="list-style-type: none"> • 온실가스 배출량 감축 • 온실가스 배출기준 강화 • 연안침식 감시 • 산사태 방지 시스템 마련 • 건축 구조물 기준연구 • 재난관리 시스템 강화 	<ul style="list-style-type: none"> • 화석에너지 비중 축소 • 재생에너지 보급 확대 • 친환경차 보급 • 노후 석탄발전소 가동 중단과 폐쇄 • 낡은 경유차 조기 폐차 • 대중교통 확대 • 에너지 효율 기준 강화 • 폐기물 재활용 • 취약계층 보호 강화 • 극한상태(폭염, 고농도 미세먼지 등) 예보 강화 	<ul style="list-style-type: none"> • 미세먼지 배출량 감축 • 대기배출 총량제 확대 • 사업장 대기오염물질 배출 기준 강화 • 도로 청소 확대 • 미세먼지 기준 강화 • 취약시설 공기청정기 설치 지원 • 한-중 미세먼지 협력 강화

자료: 국무조정실(2007)¹⁰⁾, 관계부처 합동(2017)¹¹⁾

III. 지자체 기후변화 대응사업과 미세먼지 저감정책

지자체 기후변화 대응사업과 미세먼지 저감사업의 공통점을 충청남도 사례를 통해 살펴보았다. 충청남도 2018년 온실가스 감축사업 계획(충남연구원, 2018)¹²⁾〈표 3〉과 충청남도 대기환경 개선 계획(충청남도, 2018)¹³⁾〈표 4〉의 사업을 목록화 하고 각각 서로의 대책에서 공통의 목적달성이 가능한 사업을 자체판단에 의해 살펴보았다.

기후변화 대응(온실가스 감축) 43개 사업 중 직접적으로 미세먼지 저감에 기여하는 사업은 15개 사업(34.9%), 간접적으로 기여하는 사업은 21개 사업(48.8%)으로 전체 사업 중 83.7%의 사업이 직간접적으로 미세먼지 저감에 기여하고 있는 것으로 판단되었다. 대기환경 개선(미세먼지 저감) 41개 사업 중 직접적으로 온실가스 감축에 기여하는 사업은 11개 사업(26.8%)이며 간접적으로 온실가스 저감에 기여하는 사업은 6개 사업(14.6%)으로 전체 사업 중 41.5% 사업

10) 국무조정실(2007), 제4차 기후변화종합대책

11) 관계부처합동(2017), 미세먼지 관리 종합대책

12) 충남연구원(2018), 충청남도 2017년도 온실가스 감축 이행평가 및 2018년도 감축계획 수립

13) 충청남도(2018), 미세먼지 중심 충청남도 대기환경개선 계획(안)

이 직간접적으로 온실가스 감축에 기여하는 것으로 판단되었다. 지자체별 정책방향에 따라 다소 차이가 있을 것으로 예상되나 높은 비율의 사업들이 기후변화 대응과 미세먼지 저감의 공동 목표달성에 기여하는 사업으로 확인되었는데 이는 중장기 계획 수립시 공동편익을 고려할 필요가 있다는 것을 의미한다.

〈표 3〉 충청남도 2018년 온실가스 감축계획내 사업

부문	사업
가정	녹색생활 실천 및 생활화, 탄소포인트제 운영, 신재생에너지 주택지원(그린 홈)사업, 그린 빌리지 조성사업, 빗물 재이용시설 설치, 도시가스 공급확대, 그린홈 으뜸 아파트선정
농축산	시설원에 지열 냉·난방 시스템 보급, 시설원에 목재펠릿 난방기 설치, 조사료 생산 이용 활성화, 축산농가 악취저감제 지원, 가축분뇨 공동자원화시설 확충
상업/공업	환경기초시설 탄소중립 프로그램, 신재생에너지 지역지원사업, 공동주택 미니태양광 보급사업, 취약계층 LED조명 보급 확대, 제5에너지(에너지절약)운동 전개, 고효율 LED 조명등 보급, 그린카 보급확대, CNG차량 보급확대, 농어촌 마을단위 LPG 배관망 사업, 에너지 자립섬 구축사업, 친환경 에너지타운 조성, 화력발전소 온배수 활용사업, 내포신도시 스마트그리드(SG) 구축, 수소연료전지 발전사업, 친환경 녹색 건축 건립 활성화, 친환경 도로정비 및 관리, 자전거 이용활성화 기반구축, 공공자전거 운영, 녹색 기간교통망 철도시설 확충, 신도시 재생에너지 열공급 시설 도입, 녹색 생태하천 조성, 탄소감축 바다숲 조성, 원격근무(모바일행정업무) 환경조성
임업	산촌 산림휴양치유마을 조성, 산림바이오매스 생산 및 보급, 조림 등 탄소흡수원 확충관리, 도시녹지 조성사업, 산림보호기능 강화 및 재해방지, 산림휴양문화 체험공간조성
폐기물	소각여열 회수 및 이용확대, 하수처리장 에너지 자립화 사업

자료: 충남연구원(2018), 충청남도 2017년도 온실가스 감축 이행평가 및 2018년도 감축계획 수립

〈표 4〉 충청남도 미세먼지 중심 대기환경개선 계획내 사업

부문	사업
에너지 산업 연소 관리	석탄화력발전소 노후기준 단축(30년→25년)으로 조기 폐기, 배출허용기준 강화에 따른 대기오염물질 감축, 봄철 노후 석탄화력 일시 가동중단, 고농도 미세먼지 발생시 화력발전 상한 제약, 석탄화력 발전연료를 저유황탄으로 전환, 옥외 저탄장 실시간 비산먼지 관리
산업부문 저감대책	대기오염물질 배출사업장 자발적 감축 이행 및 감축대상 확대, 사업장 대기오염물질 배출허용기준 강화, IoT 기반의 청정(Clean) 산업단지 프로젝트 추진, 저녹스 버너지원 및 컨설팅을 통한 배출량 개선, 지역별 배출량 산정을 위한 인벤토리 시스템 구축, 굴뚝자동측정기(TMS) 관리강화
이동배출원 관리	친환경차 및 인프라 시설 보급 추진, 경유버스를 친환경버스로 대전환, 도로분진 흡입차량 보급, 노후 경유차 순차적 폐차, IoT 기반의 이동배출원 미세먼지 관리, 석탄화력발전 부두 및 선박에 육상전력 공급장치(Alternative Maritime Power, AMP) 보급, 대형 건설차량 매연저감장치 부착, 항만 정박지 선박관리 조례 제정
대기오염 총량관리제 도입	공공 및 민간 측정소 통합관리와 효율적 운영, 충남형 대기질 분석·진단 시스템 구축, 미세먼지 경보제 3개권역 확대 운영, 대기오염측정소 확충, 집중측정소 및 종합대기측정소 설치, 도서지역에 미세먼지 장거리이동 측정소 설치
과학적 관리기반 구축	환경민감지역 주민건강 영향조사, 실내공기질 관리 및 환경성 예방사업 추진, 환경민감계층 실시간 실내공기 측정기 운영, 미세먼지 저감 도시숲 조성, 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행, 미세먼지 정보 알림판 설치
건강보호 등 생활환경 개선	미세먼지 대책마련을 위한 협의체 운영, 이웃 지자체 및 대외 기관과의 협력 강화, 미세먼지 저감을 위한 국외협력 강화, 미세먼지 저감 관련법 제·개정 지속 건의
대외협력 및 정책건의	어린이보호구역 개선 및 유지관리, 어르신 교통사고 방지, 안전한 보행환경 구축
교육 및 홍보	미세먼지 발생 예방교육 및 홍보, 학교 미세먼지 교육 강화

자료: 충청남도(2018), 미세먼지 중심 충청남도 대기환경선 계획(안)

IV. 지자체 미세먼지 저감정책 발굴을 위한 제언

우리의 일상생활에 미세먼지가 이슈화 되고 실생활에 영향을 미치기 시작한 것은 그리 오래 되지 않았다. 최근 몇 년간 대부분의 미세먼지 저감노력을 살펴보면 대기오염물질 배출량을 줄이는 데 집중되어 있었는데, 실상은 아직도 지자체의 정확한 배출량 파악이 되지 않아 저감 효과분석 등 정책결과에 대한 분석에 한계가 있는 실정이다. 따라서, 모든 미세먼지 저감정책의 기초자료로 활용할 수 있도록 정확한 지역 배출량 현실화가 우선적으로 수행되어야 할 것이다.

지속적으로 높아가는 지역주민 요구에 의해 광역지자체는 물론이거니와 기초지자체에서도 미세먼지 대책수립이나 관련 센터 설립추진 등 새로운 정책개발에 집중하고 있으나, 본고에서 살펴본 바와 같이 새로운 사업의 발굴도 중요하지만 현재 진행 중인 기후변화 관련 사업에 대한 재조명을 통해 기존 기후변화 대응사업의 미세먼지 저감효과를 분석할 필요가 있다. 이를 통해 기후변화 관련 분야(에너지 전환 등)에 대한 미세먼지 저감 공동편익효과 분석을 실시하여 기후패널티를 극복할 방안을 마련해야 할 것이다.

참고문헌

- Carbon Footprints of World Cities(2019.2.8), <http://citycarbonfootprints.info/>
- EEA(2017), 〈Cleaner air benefits human health and climate change〉
- ReSEAT(2009), 〈대기질과 기후에 미치는 연소배출의 영향〉, ReSEAT 분석리포트(2009. 3. 23.).
- 그린피스(2015), 〈침묵의 살인자, 초미세먼지〉
- 기상청기후정보포털(2019. 2.8.),
http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents/33_1_areapoint.php
- 박혜경(2018), 대기오염과 기후변화: 천식에 미치는 영향, 〈Allergy asthma & respiratory disease〉 6권2호, 79~84.
- 세계경제포럼(2019.2.5.), <http://reports.weforum.org/global-risks-2018/global-risks-landscape-2018/#landscape>
- 이현주 등(2018), 한반도 미세먼지 발생과 연관된 대기패턴 그리고 미래전망, 〈한국기후변화학회지〉 9권4호, 423~433
- 충남연구원(2017), 〈고농도 미세먼지 발생 시 기상학적 특성 파악에 대한 연구〉
- 충남연구원(2018), 〈충청남도 2017년도 온실가스 감축 이행평가 및 2018년도 감축계획 수립〉
- 충청남도(2018), 〈미세먼지 중심 충청남도 대기환경개선 계획(안)〉

편집위원

위원장 박노동(대전세종연구원 기획조정실장)	
위원 박근수(배재대학교 여가서비스경영학과 교수)	지남석(대전세종연구원 책임연구위원)
설성수(한남대학교 경제학과 교수)	문충만(대전세종연구원 연구위원)
장온정(목원대학교 사회복지학과 교수)	이윤희(대전세종연구원 연구위원)
이범규(대전세종연구원 선임연구위원)	민경선(대전세종연구원 연구위원)
한상헌(대전세종연구원 책임연구위원)	

대전세종포럼

대전세종포럼 통권 제68호

발행일 2019년 3월 5일

발행인 박재묵

발행처 대전세종연구원

등록번호 대전중. 바00002

주소 34863 대전광역시 중구 중앙로 85(선화동)

전화 042-530-3500

팩스 042-530-3508

제작 (주)봄인터랙티브미디어 (Tel.042-633-7800)

대전세종포럼

DAEJEON
SEJONG
FORUM

연구과제 제안 안내



DAEJEON
SEJONG
FORUM

대전세종연구원은 대전시·세종시 각계각층의 연구요구를 수용하고
활발한 지적교류와 정책연구에 반영하기 위하여
연구과제 아이디어를 모집합니다.

연구과제로서 적절하다고 판단되는 참신한 아이디어가 있으시면
대전세종연구원 홈페이지(www.dsi.re.kr) 시민의소리(연구제안)로
신청하여 주시기 바랍니다.

여러분들의 많은 관심과 참여 부탁드립니다.



DAEJEON
SEJONG
FORUM

www.dsi.re.kr