



지구온난화에 따른 홍수피해 증가와 선진외국의 방재사례

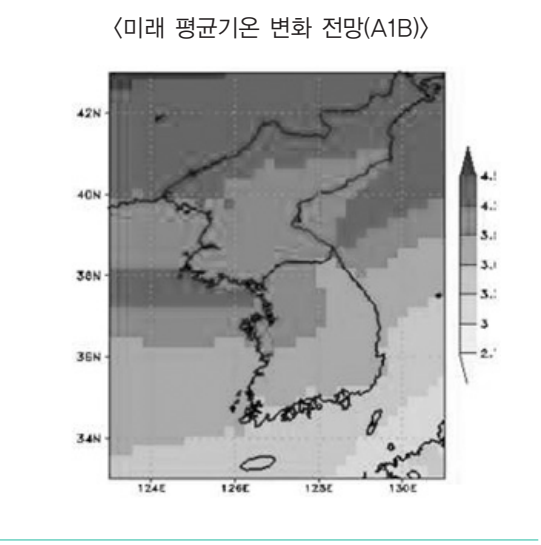
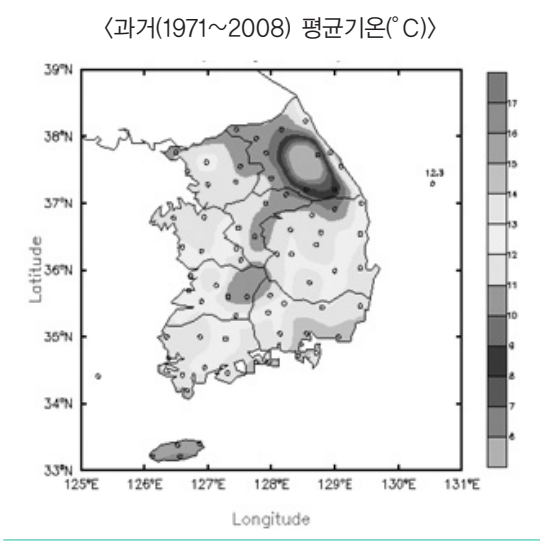


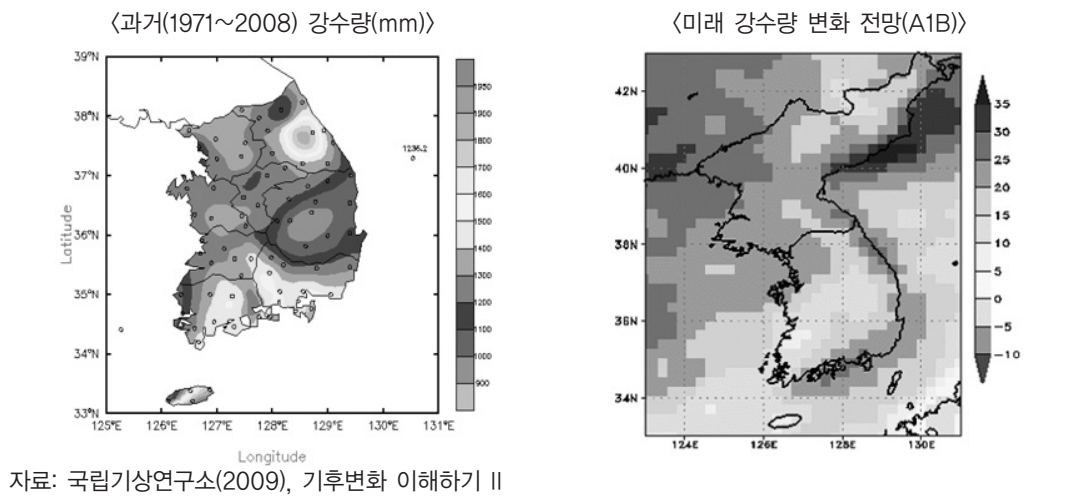
한우석
국토연구원 책임연구원
wshan@krihs.re.kr

1. 지구온난화에 따른 홍수피해 증가

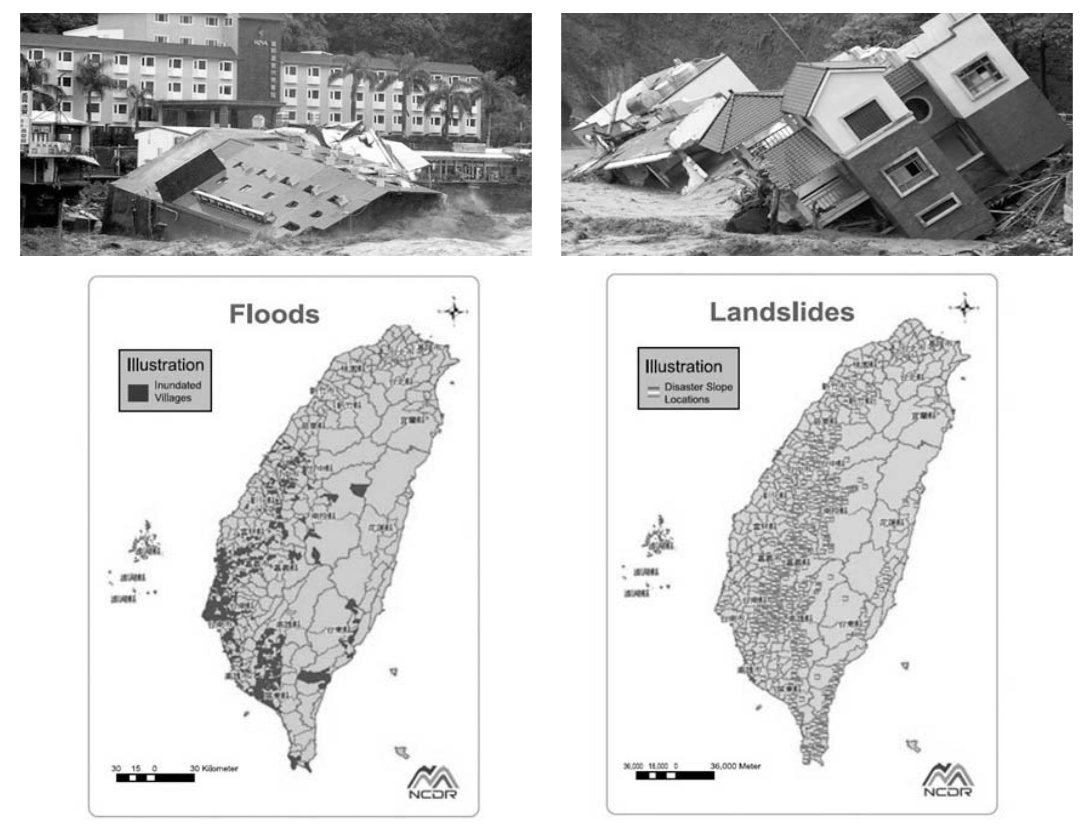
IPCC의 4차 보고서에 따르면 전 세계적으로 지구 온난화가 꾸준히 진행되고 있다. 전 세계적으로 지난 100년(1906~2005년)간 평균기온이 0.74°C 상승했고, 해수온도도 최근 43년(1961~2003년)간 0.1°C 상승했다. 우리나라의 경우 전 세계 평균값을 크게 상회하여 지난 100년(1906~2005년)간 평균기온이 1.7°C 증가했고, 해수온도는 최근 37년(1968~2004년)간 약 1.0°C 상승했다. 지구온난화는 지속적으로 진행되어 21세기말의 평균기온은 현재와 비교하여 약 4°C가 상승할 걸로 전망되고 있다.

지구온난화는 강수량 등과 같은 기후인자에도 크게 영향을 미쳐 많은 홍수피해가 지구촌 곳곳에서 발생하고 있다. 지구 온난화는 고위도의 차갑고 건조한 기류와 저위도의 온난 다습한 기류 충돌을 가중시켜, 세계 곳곳에 대형화 된 집중호우를 빈번하게 발생시키고 있다. 대만의 경우 2009년 8월에 태풍 모라콧에 의해 24시간 최대강수량 1,500mm, 4일 누적강수량 3,000mm 이상의 기록적인 폭우가 발생하여 699명의 인명피해와 6조원 이상의 재산피해를 발생시켰다. 또한, 파키스탄의 경우 2010년 7월말 문순에 의한 집중호우로 인더스강이 범람하여 국토의 약 20%가 침수하고





〈그림 1〉 한반도 평균기온 · 강수량 변화 및 전망



〈그림 2〉 태풍 모라꼿 당시 홍수와 산사태 피해

기획특집

1,600명이 사망, 2,000만명 이상의 이재민과 약 50조원에 달하는 재산피해가 발생했다.

우리나라의 경우도 지구온난화에 따른 기후변화로 연평균 강수량이 1910년대 1,155.6mm에서 2000년대 1,375.4mm로 약 19% 증가했다. 이러한 강수량 증가는 지속적으로 진행될 것으로 예상되며, IPCC에서 제공하는 A1B 기후변화 시나리오에 따르면 21세기말(2071~2100년)에는 20세기말(1971~2000년)에 비해 약 17%가 증가할 것으로 전망하고 있다.

특히, 여름철 집중호우 발생 강도 및 빈도가 증가하여 많은 홍수피해를 유발시키고 있다. 우리나라의 경우 최근 10년간(1999~2008년) 1일 100mm 이상 집중호우의 발생빈도는 총 385회로, 70~80년대 222회에 비해 무려 1.7배나 증가했다. 2002년도 태풍 루사때는 강릉에 870.5mm의 일 최대 강수량을 기록하며 많은 피해를 발생시켰다. 2011년의 경우 7월초부터 8월 중순까지 지속적인 장마와 집중호우로 인해 1285.3mm의 누적강수량이 발생했다. 특히, 7월 26일부터 28일까지 서울은

546mm의 누적강수량과 94mm의 최대시우량인 집중호우가 발생하여 53명의 인명피해와 9,957동의 주택이 침수하는 등 많은 홍수피해가 발생했다. 더구나, 7월 한 달 동안 지속된 장마로 인해서 지반이 약화되었고, 7월말에 기록적인 집중호우가 겹치면서 우면산 일대에는 산사태가 발생하여 많은 인명 및 재산피해가 발생했다.

2. 홍수피해 저감을 위한 도시차원 대책 필요

최근 발생하는 홍수재해의 일차적인 원인은 기후변화에 의해 집중호우의 발생빈도와 강도가 증가한데 있다. 전 세계적으로 홍수재해에 근원적인 원인이 되는 지구온난화에 따른 기후변화를 감소시키기 위해 대기 중의 이산화탄소를 저감시키는 완화(Mitigation)정책을 꾸준히 진행하고 있다. 하지만, 현재 대기 중에 존재하는 이산화탄소의 잔류기간은 짧게는 50년 길게는 200년에 달하는 점을 고려하면, 기후변화에 의한 재해는 꾸준히 발생할 것으로 전망된다. 이러한 점을 고려하면, 기후변화에



〈강남대로 침수〉



〈곤지암천 범람〉

〈그림 3〉 2011년 서울 집중호우 피해

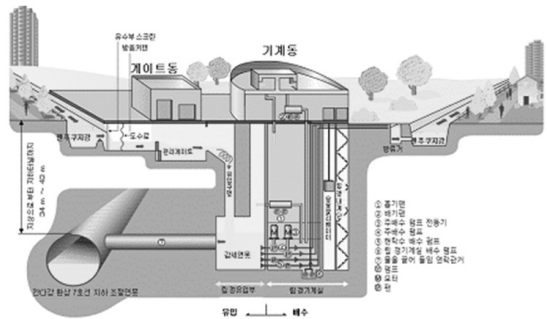
적응(Adaptation)하기 위한 노력이 필요하다. 홍수피해의 일차적 원인은 기록적인 집중호우지만, 홍수에 따른 피해를 가중시키는 주요 원인 중 하나는 도시화에 있다. 도시화의 진전으로 불투수 면적이 증가하고, 이로 인해 홍수도달시간 단축 및 침투홍수량이 증가하여 저지대로 물이 집중되는 내수가 빈번히 발생하여 피해를 가중시키고 있다. 안양천 유역의 경우 1975년과 2000년을 비교한 결과 불투수지역이 약 26% 증가하였고, 그로 인해 침투홍수량이 약 30% 증가했다. 특히, 도시는 인구와 기반시설이 집중되어 있어, 기후변화에 따른 집중호우 대책이 체계적으로 마련되지 않으면 많은 피해가 발생할 수 있는 취약지역이다. 하지만, 하수관거 용량 및 하천 폭 확장, 제방증고 등과 같은 전통적인 치수대책만으로는 대형화되고 있는 기후변화 재해에 효과적으로 대처하기 힘들다. 본 글에서는 기후변화에 의해 대형화 되고 있는 홍수 피해를 저감시키기 위한 외국의 사례를 검토함으로써, 우리나라 기후변화 적응방향을 모색하고자 한다.

3. 선진외국의 기후변화 적응 사례

선진외국의 경우 도시는 집중호우 등과 같은 자연 재해를 유발시키는 기후변화의 주요 원인인 이산화탄소를 배출하는 주범인 동시에, 기후변화에 따른 집중호우 발생시 많은 피해가 발생할 수 있는 취약지역이라고 인식하여, 도시차원에서 기후변화 적응대책을 꾸준히 진행하고 있다. 선진외국의 경우 기후변화에 적응하면서 지속가능한 도시를 만들기 위해 기존의 전통적인 치수대책 뿐만 아니라 대형 구조물 대책, 소규모·분산형 방재대책, 토지이용과 연계한 비구조적 대책 등 다양한 적응정책을 모색하고 있다.

1) 일본 칸다가와 지하조절지

집중호우와 태풍 등의 영향으로 상습적으로 침수 피해가 발생하는 일본 칸다가와 중부지역에서는 향후 기후변화 영향으로 집중호우와 태풍이 증가할 것을 고려하여 환상 7호선 도로 지하에 연장 4.5km, 직경 12.5m, 저장량 54만m³의 대형 터널



자료: 심우배, 2009

〈그림 4〉 칸다가와 지하조절지

기획특집

식 지하 저류조를 설치했다. 지하저류조 사업은 10년에 걸친 대형사업으로 1997년에 완공하였다. 1997년 취수개시 이후 지하조절지로 23회(2008년 12월말)에 걸쳐 홍수를 유입했고, 하류지역의 홍수 피해는 급격히 줄어드는 효과가 발생했다.

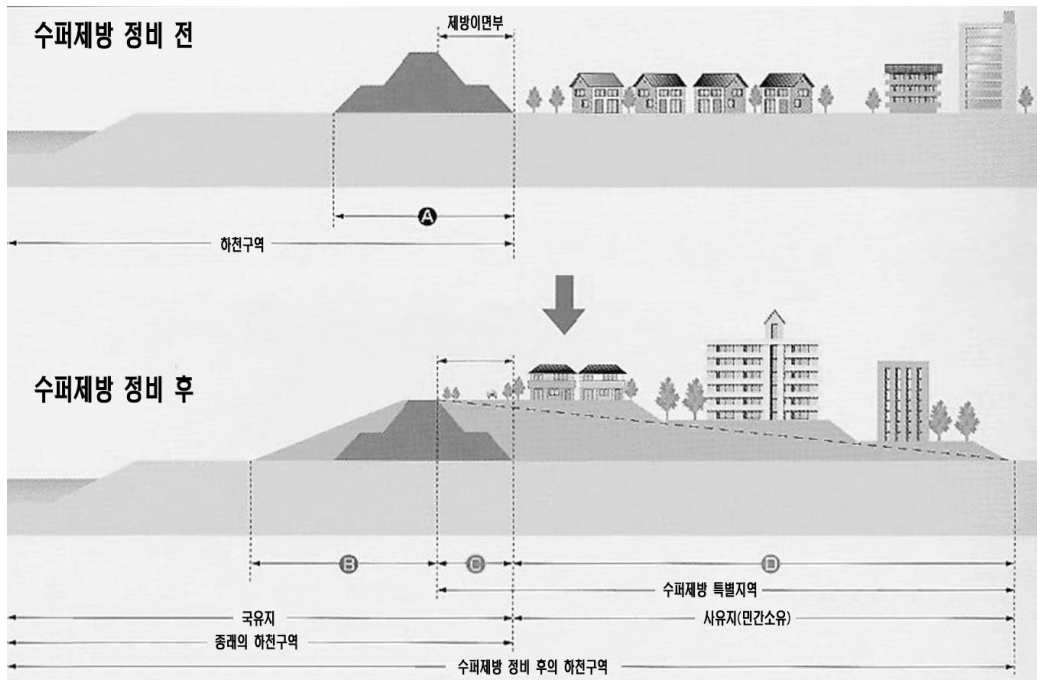
2) 일본 수퍼제방

일본 국토교통성은 하천범람구역에 위치한 도쿄와 오사카 등 대도시를 기후변화 따른 대형 홍수 및 지진 등에 의한 제방붕괴로부터 보호하기 위해 수퍼제방 사업을 1986년부터 꾸준히 추진했다. 수퍼제방은 기울기가 완만하고 폭이 넓은 제방으로 제방붕괴 위험이 상대적으로 적다. 수퍼제방의 경우 넓은 제방면적을 필요로 하기 때문에, 국토교통성

에서는 수퍼제방의 공사기간에 기존 주민들의 이주비용을 지원하여 이주시키고, 사업완료 후에는 주민들에게 제방 상부의 토지를 환지하는 방식을 사용하고 있다.

3) 미국 저영향개발(LID: Low Impact Development)

저영향개발은 소규모, 분산형의 자연친화적인 기법을 활용해 우수유출 발생원부터 우수유출량 및 비점오염을 저감, 유출속도를 지연시켜 도시지역의 물순환 상태를 개발이전에 가깝게 유지시키는 기법이다. 저영향개발의 핵심전략은 자연적인 우수유출 경로 등을 고려하여 도시개발계획 단계에서부터 소규모·분산형 저영향개발 시설물을 도심



자료: 심우배, 2009

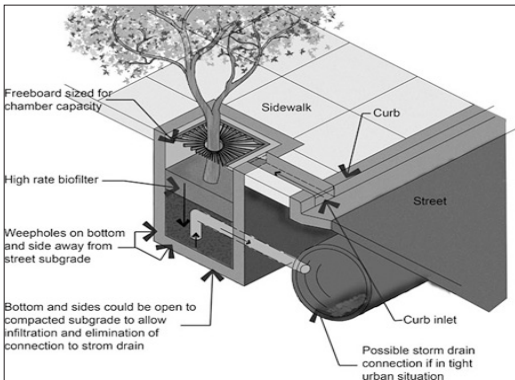
〈그림 5〉 수퍼제방 정비 전·후 개념도



〈빗물정원〉



〈생태저류지〉



〈가로수 저류〉



〈생태수로〉

〈그림 6〉 저영향개발 시설물

곳곳에 전략적으로 배치하여 효과를 극대화하는데 있다. 또한, 불투수지역은 최소화시키면서, 특히 DCIA¹⁾(Direct Connected Impervious Area)는 가능한 완전제거를 목표로 하고 있다. 도심에서 활용 가능한 저영향개발 시설물은 빗물 정원 (Rain Garden), 생태저류지 (Bio-Retention), 옥상녹화(Rooftop Garden), 가로수 저류(Treebox), 생태수로(Vegetated Swale), 지붕홈통 분리(Downspout Disconnection), 투수

성 포장(Permeable Pavements) 등이 있다. 저영향개발은 도심에서 우수유출을 저류 및 지연시키기 때문에 기존 하수관의 용량초과 부담을 저하시켜 홍수위험을 감소시킨다. 또한, 기후변화에 대응하기 위한 중앙집중식 하수관의 용량 확장비용 및 관리비용에 비해 상대적으로 저렴할 뿐만 아니라 친환경적인 자연요소를 활용한 수질개선, 자연환경 보전 및 쾌적한 주거환경 조성 등과 같은 부수적인 장점도 가지고 있어 최근 미국 북서부를 중심으로

1) DCIA: 우천시에 우수가 투수지역을 거치지 않고 불투수지역만을 따라 하수관거로 유입될 때, 이 우수유출 경로 상에 있는 연결된 불투수지역

기획특집

도시계획 차원에서 배수시스템 개선방법으로 적극 활용되고 있다.

미국 오레건주에 위치한 포틀랜드(Portland)시의 경우 ‘우수관리시설 규정 (Stormwater Management Facilities Required)’을 제정하여 신규건물 중 불투수면적이 46.5㎡가 넘는 모든 개발행위에 대해서 우수유출 수질과 유출량을 관리하고 있다. 신규 개발시 배수관리, 생태수로, 빗물정원, 우수 저류지 등과 같은 저영향개발을 활용하면 용적률 제고, 감세 등의 인센티브를 제공하여 주민들의 자발적인 저영향개발 시설물 설치를 유도하고 있다. 또한, 효율적 저영향개발 시설물 설치를 위해 세부적인 지침과 기준을 명확히 제시하

는 우수관리 매뉴얼(Stormwater Management Manual)을 개발·보급하고 있다. 특히, 2011년까지 윌라메트 강(Willamette River)의 범람을 94%까지 조절할 목적으로 인센티브를 적용한 빗물흡통 분리 프로그램 (Portland Downspout Disconnection Program)을 실행하여 민간의 자발적인 저영향개발 활용을 유도하고 있다. 결과적으로 현재까지 약 4만 4천여 가구들이 빗물흡통 분리 프로그램에 참여하여 연간 약 400만 톤의 우수 유출 저감효과를 발생시켰다. 포틀랜드시에서는 저영향개발 시설 설치시 초창기 추가 설치비용이 들지만, 장기적으로는 기후변화 등에 따른 배수시스템 추가 설치 및 관리, 홍수피해, 수질관리 등의

〈표 1〉 PPS 25에 의한 홍수구역 및 연간 침수확률 기준

홍수구역 (Flood Zone)	연간 침수확률
Zone 1 (Low Probability)	1/1,000 미만인 지역
Zone 2 (Medium Probability)	- 내륙: 1/1,000 이상 1/100 미만 - 해안: 1/1,000 이상 1/200 미만
Zone 3a (High Probability)	- 내륙: 1/100 이상 - 해안: 1/200 이상
Zone 3b (Functional Floodplain)	- 기능적 홍수터(홍수발생시 물이 흐르거나 저류되는 지역) - 연간 침수확률 1/20 이상인 지역 또는 극한 홍수(0.1%)로 설계된 지역

주: 홍수방어시설이나 대책이 수립되기 전의 상태에서 연간 침수확률 계산

자료: U.K. Communities and Local Government, 2006

〈표 2〉 홍수구역별 가능 토지용도

홍수구역	토지용도				
	필수인프라	물과 부합하는 개발용도	홍수 취약도 매우 높음	홍수 취약도 다소 높음	홍수 취약도 낮음
Zone 1	○	○	○	○	○
Zone 2	○	○	예외검증 필요	○	○
Zone 3a	예외검증 필요	○	X	예외검증 필요	○
Zone 3b	예외검증 필요	○	X	X	X

주: ○ 개발적합, X 개발 불허

자료: U.K. Communities and Local Government, 2006

비용을 절감시킴으로 많은 경제적 효과가 발생할 것으로 전망하고 있다.

4) 영국 도시계획 체계(PPS, Planning Policy Statement)

PPS는 영국의 국가차원 계획정책지침으로 국토의 환경 친화적이고 지속가능한 개발에 초점을 맞추고 있다. 기후변화를 고려한 개발과 홍수위험 관련된 사항은 PPS 25 (Development and Flood Risk)에 주로 명시되어 있는데, PPS 25는 공간계획 수립과정에서 홍수위험을 고려함으로써 보다 안전하고 지속가능한 개발 달성을 목표로 하고 있다. 특히, 위험기반 접근방법(Risk-based Approach)을 활용하여, 계획과정의 모든 단계에서 홍수위험을 고려함으로써 홍수 취약지역의 개발을 회피하고, 안전한 지역으로 개발을 유도하고 있다.

홍수위험은 홍수위험평가제도(Flood Risk Assessment)를 활용하여 지역의 홍수 위험정도

를 평가하는데, 홍수위험 정도에 따라 크게 4개 홍수구역(Flood Zone)으로 구분한다. 개발입지 및 토지이용 계획시에는 홍수구역을 바탕으로 개발사업 후보지 중 홍수위험 최소지역에 우선적으로 할당하는 순차검증(Sequential Test)을 실시한다. 하지만, 순차검증 결과 합리적 이용지가 없거나 홍수 위험지역이지만 개발하는 편이 많은 이점을 가지고 있다면, 예외검증(Exception Test) 단계를 거쳐 엄격한 홍수 위험관리 방안 마련을 전제로 개발이 허용되기도 한다. 홍수구역별 개발허용 정도를 결정하기 위해 개발 토지용도를 필수인프라, 물과 부합하는 개발용도, 홍수 취약도 매우 높음, 다소 높음, 낮음으로 크게 5개로 구분한다.

PPS 25에는 기후변화 영향을 고려하기 위해 침투 강우강도, 침투 하천홍수량, 내륙지역 풍속, 극한파고 등 방재시설물 설치에 기준이 되는 기후요소들에 연도별 민감도 범위(Sensitivity Range)의 가중치를 적용할 수 있도록 제공하고 있다. 또한, 기후변화에 따른 해수면 상승을 고려하여 비상허용치(Contingency Allowance)를 제시하고 있다.

〈표 3〉 영국의 기후변화 영향을 고려한 강우 등에 대한 민감도 범위 가중치

구분	1990~2025년	2025~2055년	2055~2085년	2085~2115년
침투 강우강도	+5%	+10%	+20%	+30%
침투 하천홍수량	+10%	+20%		
내륙지역 풍속	+5%		+10%	
극한파고	+5%		+10%	

자료: U.K. Communities and Local Government, 2006

〈표 4〉 영국의 기후변화를 고려한 해수면 상승에 대한 비상허용치

구분	1990년과 비교한 순해수면 상승(mm/년)			
	1990~2025년	2025~2055년	2055~2085년	2085~2115년
영국 동부, East Midlands 런던, 영국 남동부	4.0	8.5	12.0	15.0
남서부	3.5	8.0	11.5	14.5
영국 북서부 및 북동부	2.5	7.0	10.0	13.0

자료: U.K. Communities and Local Government, 2006

기획특집

또한, PPS 25에서는 홍수피해 저감을 위해 발생원, 지구, 지역관리 등 유출경로 전반에 걸쳐 우수 유출 관리를 하는 '지속가능한 배수체계(SUDS, Sustainable Urban Drainage System)'의 활용을 적극 유도하고 있다. SUDS는 30년 빈도 강우에 대응하여 하수관을 설치하고, 30년 빈도가 넘는 극한 강우 발생시에는 건물이 없는 지역으로 우수유출방향을 유도함으로써 인명 및 재산피해를 최소화하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 SUDS 기법은 유출경로 전반에 걸쳐 투수성 포장, 생태수로, 생태저류지, 연못 및 습지, 침투트렌치 등을 배치하여 우수유출을 체계적으로 관리한다.

4. 맺음말

2010년과 2011년 여름 한국의 중심인 서울에서 대형 홍수피해가 잇달아 발생했다. 이러한 홍수피해는 기후변화의 영향으로 대형화되고 빈번히 발생할 것으로 예상된다. 홍수피해 저감을 위해서는 전형적인 치수대책 보강 뿐만 아니라, 상습 취약지역에 대해서는 지하저류조나 수퍼제방과 같은 대형시설물 설치도 고려해야 한다. 또한, 현재의 재해 취약성 뿐만 아니라 기후변화를 고려한 미래의 재해 취약성도 고려하여, 가능하면 안전한 지역으로 개발을 유도하고 불가피한 경우에는 안전에 대한 철저한 대비를 한다는 조건하에 개발을 허가해야 한다. 이미 개발된 도심지역에서는 소규모·분산형의 저영향개발 시설물을 전략적으로 설치하여 우수유출을 지연 및 저감시켜야 한다. 저영향개발은 미국 북서부에서 발전한 요소기술이기 때문에, 우리나라 도시의 높은 불투수율과 여름철 집중호우를 고려한 한국형 저영향개발 기법을 개발하고 보급하는 것도 필요하다. 기후변화에 의해 대형화되는 홍수재해에 적응하기 위해서는 전형적인 치수대책을 넘어서 공원, 녹지, 심지어는 도로, 건물 등 모든 도시요소에

서 방재를 고려한 대책을 준비해야 한다.

<참고문헌>

강두기. 2009. 저영향개발. 대한토목학회논문집
 국립기상연구소. 2009. 기후변화 이해하기
 기상청. 2010. 2010 이상기후 특별보고서
 심우배 외. 2009, 2010, 기후변화에 안전한 재해
 통합대응 도시 구축방안 연구(I, II), 국토연구원
 심우배 외. 2010. 국가 표준 기후변화 시나리오 활
 용방안 연구(I). 기상청 국립기상연구소.
 심우배 외. 2011. 기후변화 적응도시 조성방안 연
 구(I). 국토해양부
 이길성, 김성은. 2007. PCSWMM 모형을 이용한
 안양천 유역에서 내수침수의 시·공간적 해석, 한
 국수자원학회논문집
 Hinman. 2005. Low Impact Development
 (Technical Guidance Manual for Puget
 Sound)
 Intergovernmental Panel on Climate
 Change(IPCC), Working Group II, 2007,
 Climate Change 2007: Impacts, Adaptation
 and Vulnerability, The 4th Assessment
 Report.
 PGDER. 1999. Low-Impac Development
 Design Strategies (An Integrated Design
 Approach)
 UK Dept. of Communities and Local
 Government, 2006, Code for Sustainable
 Homes: A Step-Change in Sustainable
 Homes Building Practice.
 Unified Facilities Criteria (UFC). 2004. Low
 Impact Development
<http://www.epa.gov.tw>