

기후변화를 고려한 도시 배수시설의 설계 기준 설정 필요성 Needs for the Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change



김 병 식 |

강원대학교 소방방재학부 | 방재전문대학원
도시·환경방재공학전공 교수
hydrokbs@kangwon.ac.kr



하 성 통 |

충북대학교 도시공학과 교수
simplet@chungbuk.ac.kr

1. 배경

전 세계적으로 기후변화로 인한 이상기후에 대한 관심이 높아지고 있다. 가속화되고 있는 지구온난화가 미래기후를 어떻게 변화시키고 이러한 변화로부터 받게 될 영향에 대한 우려가 증가되고 있으며, 실제로 현재기후에서도 전 세계 곳곳에서 이상기후로 인한 피해가 확인되고 있다.

우리나라도 지구온난화에 따른 기후변화로 연평균 강수량이 1910년대 1,155.6mm에서 2000년대 1,375.4mm로 약 19% 증가했으며 A1B 기후변화 시나리오에 따르면 21세기 말(2071~2100년)에는 20세기 말(1971~2000년)에 비해 약 17%가량 증가할 것으로 전망하고 있다. 특히, 최근 10년간(1999~2008년) 100mm/day 이상 집중호우의 발생빈도는

총 385회로, 70~80년대 222회에 비해 1.7배나 증가했다. 2002년도 태풍 루사 때는 강릉에 870.5mm의 일최대 강수량을 기록하며 많은 피해를 발생시켰다. 2011년 7월초부터 8월 중순까지 지속적인 장마와 집중호우로 인해 1285.3mm의 누적강수량이 발생하였으며, 특히, 올해 7월 서울 및 수도권 지역에 발생한 100년 빈도 설계강우량을 초과하는 집중호우로 인하여 비교적 수해에 안전하다고 여겨졌던 서울 중심부가 침수되어 많은 재산 및 인명피해를 발생시켰다.

기후변화는 과거에는 발생하지 않았던 기간에 강수가 발생하고 집중되거나 지속시간이 길어지는 기상이변 현상 즉, 비정상적 기후로 설명되는 극한 기상사상을 유발하기도 한다. Nicholls et al.(1996)은 현재까지 세계 각지에서 평균온도가 꾸준히 상승하고 있으며 이에 따라 강수량이 점차 증가하는 경향을 보인다고 하였다. 이는 온도의 변화에 따른 증기압 즉, 수증기의 변화를 측정하는 방법인 Clausius-Clapeyron 물리식 개념으로 설명할 수 있다. 이 물리식에 따르면 온도가 상승함에 따라 증기압이 증가하고, 이는 곧 홍수를 유발할 수 있는 잠재성적 가능성이 커지게 됨을 의미한다. 기후변화는 극한강수의 발생빈도와 강도를 변화시키고 있으며(Frei et al. 1998; Cubasch et al. 2001; IPCC, 2007). 특히, Trenberth (1999)은 기후변화로 인해 극한강수의 발생빈도가 증가할 가능성이 높다고 하였다.

이처럼 기후변화는 수공 관련 시설물을 설계하는데 있어 가장 중요한 변수인 극한 강우사상을 변화시키기 때문에 배수관련 기반시설물을 계획하고 설계하는데 있어 기후변화를 고려해야 한다는 것은 이제 현실이 되고 있다. 배수시스템 설계의 주목적은 특정 설계강우량에 대한 도시지역의 설계홍수량을 통과할 수 있도록 배수시스템의 규모를 결정하는 것으로 지금까지 설계에 이용되고 있는 보편적인 방법은 기후는 변화하지 않는다는 가정 하에 과거 기후자료만으로도 미래의 상황을 충분히 반영할 수 있다고 간주하고 있다. 즉, 기후자료는 시간에 따라 평균과 분산이 변하지 않는다는 정상성(stationary)을 전제로 설계되고 있다. 그러나 불행히도 기후변화로 인해 극한강수의 빈도(frequency)와 규모(magnitude)가 변화하고 있고 이로 인해 이전과는 다른 양상의 홍수가 발생하고 있다. 따라서 기존의 정상성을 가정한 설계방법은 많은 배수시설물 파괴의 원인과 설계범위를 벗어나는 원인이라고 할 수 있다.

본고에서는 기후변화로 인한 도시지역에서 발생하는 홍수발생의 특성을 간략히 살펴보고 기후변화로 인한 설계빈도(치수안전도)의 저하를 확인하고자 한다. 또한, 마지막으로 기후변화를 고려한 도시배수 설계기준 강화의 필요성과 외국의 대응사례와 방법론 등을 살펴보았다.

2. 최근 도시지역의 홍수발생 특성과 배수설계 체계의 한계

오래 전부터 사람들이 정착하는데 반드시 고려되었던 점은 물을 쉽게 공급받을 수 있어야 한다는 것이었다. 이로 인해 강변에 사람들이 모이기 시작하였고 마을이 형성되고 물을 충분히 공급받음으로써 산업이 활성화 되는 과정을 통하여 도시의 형태로 발전이 이루어졌다. 하지만 급속한 도시화로 인하여 도심부에는 강수를 저장할 수 있는 녹지공간이 없어지게

되고 그로 인해 집중호우가 도심에 집중적으로 내릴 경우 대부분의 도시들은 침수피해를 입게 된다. 올해 서울 등 수도권을 중심으로 도시배수시설의 설계용량을 초과하는 집중호우로 많은 주택이 침수되었다. 침수피해의 1차적인 원인은 하수관거 설계빈도를 초과하는 집중호우이지만, 지표면이 대부분 포장된 불투수면적으로 인해 우수를 침투, 저류시키는 시스템이 미흡했던 것도 피해를 가중시킨 점 또한 주요한 원인 중 하나이다. 현재 서울과 수도권 지역의 배수체계로는 금회와 같은 집중호우로 인한 도시 돌발홍수 및 침수피해를 피하기 어렵다. 현재 서울시와 수도권 지역의 도시들은 대부분 우수와 하수관거로 부터 집수된 우수와 하수를 한강 및 지천 인근 유수지로 모아서 이들 우수를 배수펌프장을 통하여 한강으로 배수하는 시스템을 갖추고 있다. 그러나 이들 배수펌프장들의 펌프용량 부족 및 고장으로 인해 서울 및 수도권 지역의 저지대에 빈번한 침수피해가 발생되었다. 그리고 높아진 한강수위로 인하여 배수펌프장으로부터 한강으로 토출되는 것이 역류현상으로 인하여 서울 및 수도권 지역의 저지대에 침수피해가 또한 많이 발생되고 있다. 그러므로 이렇게 도시지역의 돌발홍수로 단시간에 발생된 우수를 우수 및 하수관거 체계를 통하여서는 홍수 및 침수피해를 방지할 방법이 없다고 해도 과언이 아니다.

이러한 도시 홍수침수의 원인은 크게 3가지로 구분할 수 있다. 첫째는 가장 근본적 원인인 배수관망 설계빈도를 상향하는 강우의 빈번한 발생이다. 우리나라 도시는 지선은 5년 빈도, 간선은 10년 빈도로 설계되어 있다. 최근 도심지 국지성 집중호우로 인한 피해가 커지면서 설계빈도를 지선 10년, 간선 30년으로 상향 조정하고 있으나 아직 새로운 기준에 맞추어 관망 및 빗물펌프장이 증설된 비율은 매우 낮다. 서울시의 경우 10년 빈도는 65mm/hr, 30년 빈도는 75mm/hr의 강우량으로 2011년에 발생한 강우는 이 기준을 초과하였다(그림 1).

두 번째 원인은 도시하수관망과 도시하천의 연계 부족이다. 도시하천의 제방정비율은 비교적 높으나

기후변화를 고려한 도시 배수시설의 설계기준 설정의 필요성

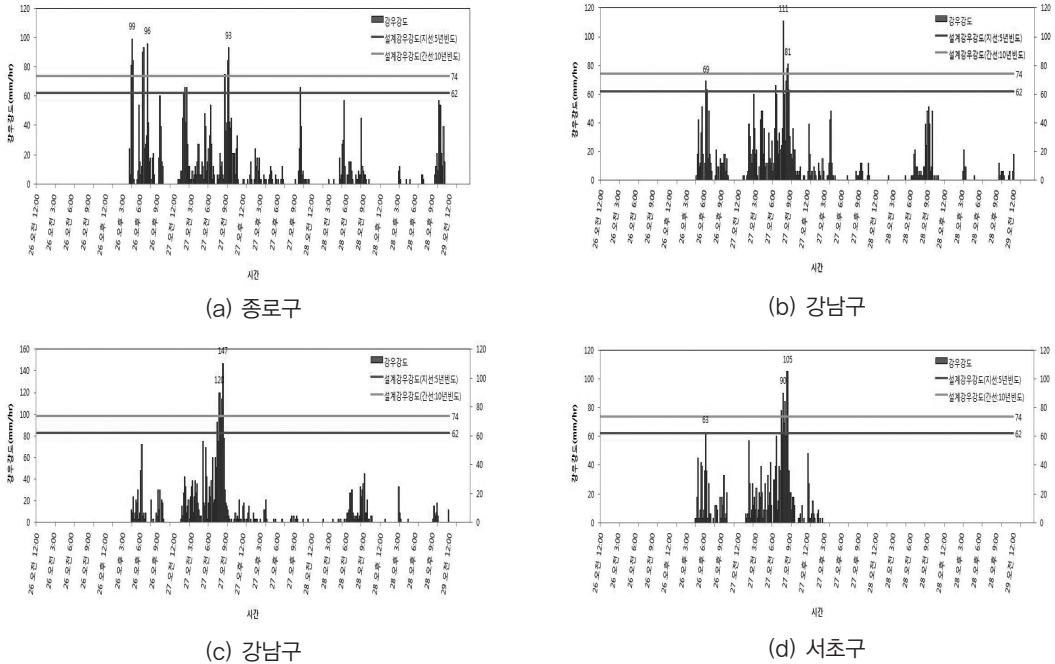


그림 1. 배수관망의 설계빈도를 상향하는 강우의 발생(2011년 7월)



그림 2. 2011년 7월 강남 배수범람 사례 (출처 : 연합뉴스)

하수관거와의 연계부족으로 하천수위 역류에 의한 배수불량 등으로 피해가 발생한다. 이는 우리나라 시설물이 빈도중심의 강우설계 방법을 이용하고 있으며 이는 시설물별로 서로 다른 빈도가 적용되어 통합적인 대책이 아닌 하천이면 하천, 관망이면 관망 이런 형태로 개별적으로 적용되기 때문이다.

세 번째 원인은 지형적인 요인으로 우리나라 도시 중 일부는 하천의 계획홍수위보다 낮은 지역에 많은

가옥과 공장, 농지 등이 위치해 있다. 이는 도시의 인구급증으로 인하여 주거 및 생활공간이 부족해지고 과거 하천범람이나 홍수발생 우려가 있는 저지대에 주택, 건물들이 개발되었기 때문이다. 이러한 이유로 연약지반인 지역과 구도심에서는 반지하, 지하 주택이 많이 건설되었고 이러한 지하공간의 증가는 도시 홍수발생시 피해를 가중시키는 요인으로 작용하고 있다(표 1, 표 2).

학술/기술기사

표 1. 최근 5년간 광역단체별 상습침수지구 및 침수원인 현황

지역	상습침수지구 개소		침수원인(개소)		
	계(개소)	구성비(%)	내수침수	외수침수	내외수침수
서울특별시	104	14.5	104	-	-
부산광역시	18	2.5	15	1	2
대구광역시	16	2.2	15	1	-
인천광역시	32	4.5	32	-	-
광주광역시	6	0.8	4	2	-
울산광역시	15	2.1	15	-	-
경기도	69	9.6	56	13	-
강원도	72	10.0	38	29	5
충청북도	28	3.9	10	16	2
충청남도	65	9.0	46	15	4
전라북도	5	0.7	5	-	-
전라남도	41	5.7	11	29	1
경상북도	87	12.1	54	31	2
경상남도	130	18.1	58	72	-
제주도	31	4.3	11	20	-
총계	719	100.0	474	229	16

표 2. 도시 침수 피해사례 및 원인분석

발생시기	주요 피해 내역	피해 원인
2001. 7	서울시 관악구 신림동 일대 침수	설계빈도 이상의 국지성 집중호우로 인한 복개하천 병목현상
	서울시 구로구 개봉동 제방 일부구간 월류	지속적인 개발사업으로 인한 자연 저류공간의 감소로 수위상승
	경기도 안양시 안양 2동 주택가 지하주택 침수	예기치 못한 집중호우 및 내수배제 불량
2002. 8 (집중호우)	경기도 안양시 만안구 석수동 침수	하수 역류
	경기도 부천시 오정구 원종동 침수	급속한 도시개발에 따른 유출계수 상승 및 도달시간 단축
	강원도 영월군 주택 침수로 30억 6,100여만원의 재산피해	예기치 못한 집중호우 및 내수배제 불량
	천안시 유량동 원성천 범람	도시화에 의한 유출계수 상승 및 도달시간 단축
	진천군 광혜원을 광혜원천 범람	내수배제 불량 및 소하천 유로 도심지구 관통
	진천군 미호천, 성암천, 백곡천, 성대소하천, 양백소하천 제방 및 호안유실	내수배제 불량, 소하천 제방고가 낮아 월류피해 발생
	전남 고흥군 고흥읍 저지대 주택 침수	내수배제 불량 등
	김해시 한림면 화포천 범람	내수배제 불량, 배수펌프장 노후화 및 침수발생
2002. 8 (태풍 루사)	강릉시 남대천 하류 침수	남대천 북쪽 중심가 지역 내수배제 불량 및 남대천 남쪽 외수유입으로 체내지 내수배제 불량
2003. 9 (태풍 매미)	대구시 수성구 황금동 일대 침수	하수관거의 배수불량에 따른 범람
2006. 7 (집중호우)	충북 봉화군 춘양면, 소천면, 석포면 일대 침수	유역경사가 급하고 홍수 도달시간이 짧음, 산지지역에서 떠내려온 유송잡물들이 소하천 횡단암거 등의 통로를 막아 대형피해 유발
2010. 9 (집중호우)	서울시 종로구, 용산구, 광진구, 영등포구, 강남구, 강서구 일대 침수	우수배수시설 노후화로 현재기후실정과 맞지않아 침수
2011. 7 (집중호우)	서울시 우면동, 사당역, 강남역, 광화문 일대 침수	예기치 못한 집중호우 및 내수배제 불량과 하수관 역류로 인하여 침수

3. 기후변화에 의해 변화하는 설계빈도

그림 3은 IPCC 5차보고서에 기여할 RCP8.5 기후변화 시나리오를 통해 전망된 미래 서울, 원주, 양평, 충주 등 수도권 지역의 GEV(Generalized Extreme Value) 분포의 확률밀도함수(probability density function)를, 그림 4는 현재기후와 21세기 초반, 중반과 말의 GEV 분포의 매개변수를 보여주고 있다. 그림 3과 4로부터 볼 수 있듯이 먼 미래로 갈수록 위치(location), 규모(scale) 매개변수는 증가하고 있고, 형상(shape) 매개변수는 감소하고 있음을 확인하였는데 이는 미래로 갈수록 극한강수의 평균, 변동성 증가와 함께, 큰 극한강수의 발생 빈도도 잦아질 수 있음을 의미하는 것이다.

기후변화를 고려한 도시 배수시설의 설계기준 설정의 필요성

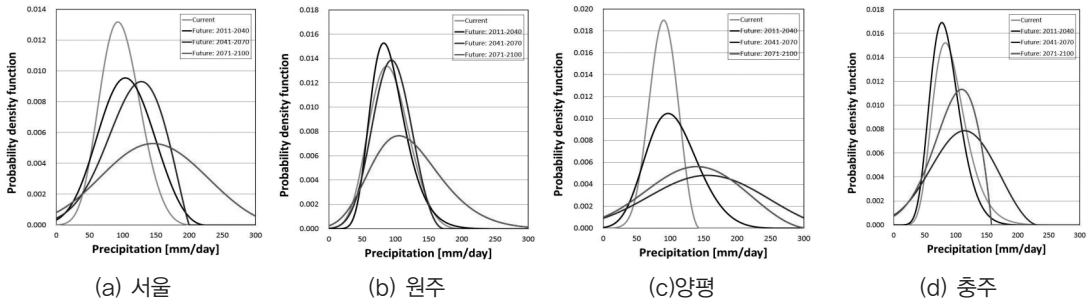


그림 3. RCP8.5 기후변화 시나리오를 이용한 미래 극한강우의 GEV분포 확률밀도함수의 변화

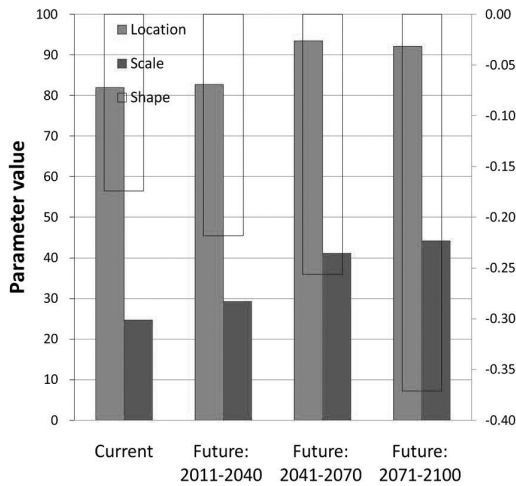


그림 4. RCP 기후변화시나리오를 이용한 미래 극한 강우의 GEV 매개변수의 변화

그림 3과 4를 통해 알 수 있듯이 이는 극한강우의 시

계열자료가 정상성을 잃어가고 있다는 것을 의미하며 비정상성은 위 그림들을 통해 확률밀도함수에 다음과 같은 형태로 요약할 수 있다. ① 전체적 확률분포형의 변화, ② 평균값의 변화, ③ 분산의 변화 즉, 비정상성은 빈도해석에 이용되는 연최대치 자료의 확률분포형을 지배하는 매개변수들이 시간에 따른 변수의 가변성이라는 것이다(그림 7 참조).

기후모형의 예측자료 뿐만 아니라 관측자료(기상청 관측지점 자료)에서도 강수의 빈도와 규모의 증가를 확인할 수 있다. 그림 5는 일강수 80mm와 100mm 이상 발생일수(days)를 나타낸 것으로 그림을 통해 알 수 있듯이 과거에 비하여 발생이 잦아지고 있다. 그림 6은 80 및 90 백분위수(percentile)에 해당되는 강수량의 시계열도를 나타낸 것으로 과거에 비하여 동일 분위수에 해당되는 강수량의 규모가 커지고 있음을 알 수 있었다.

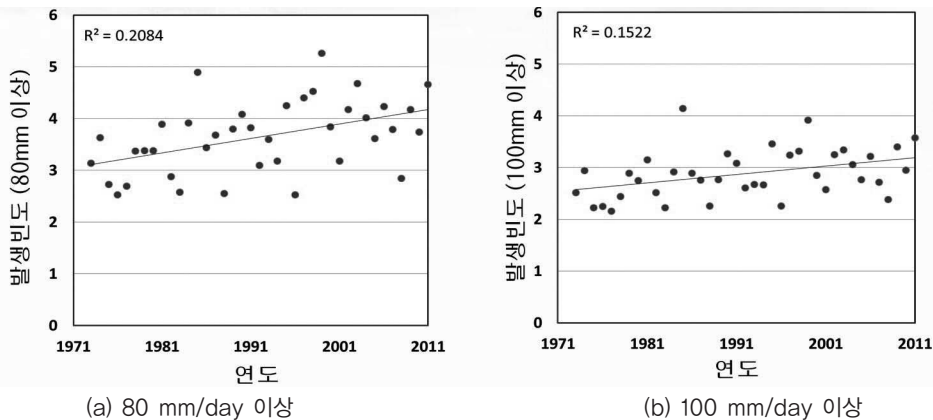


그림 5. 집중호우 발생 빈도수의 변화

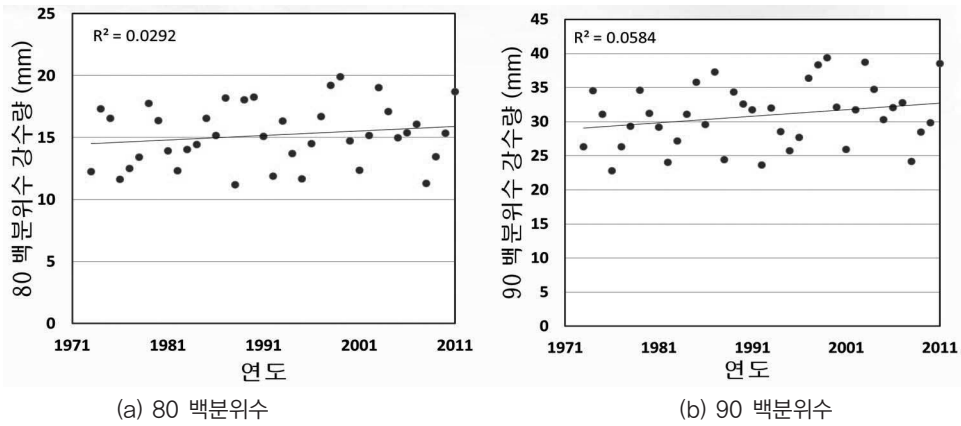


그림 6. 80 및 90 백분위수 강수량의 변화

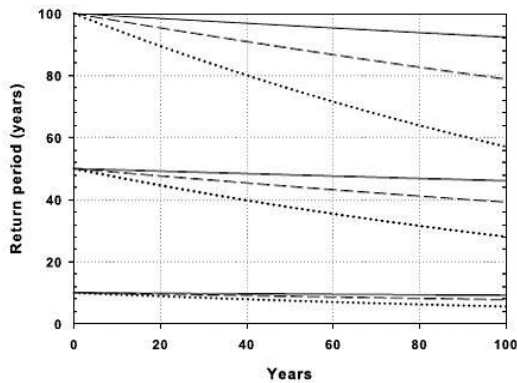


그림 7. GEV의 위치매개변수가 시간의 함수라는 가정 하에 산정된 재현기간별 Return Level의 변화 사례(Mailhot .A, 2011)

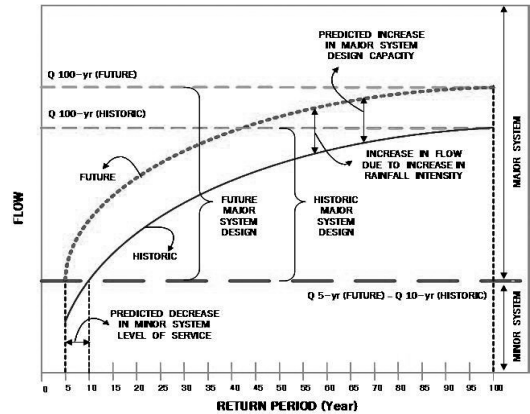


그림 8. 기후변화에 따른 배수시설물의 설계 빈도곡선의 변화

그림 8은 기후변화에 따른 배수시설물의 설계빈도곡선 변화를 개념적으로 나타낸 것으로 청색 실선은 과거자료만을 이용한 설계빈도곡선이며 적색 점선은 미래의 설계빈도곡선을 나타낸 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 과거 10년 빈도 설계량은 미래에는 5년 빈도 설계량으로 줄어들게 되며, 또한 100년 빈도 설계량의 경우에도 미래에는 과거에 비해 증가된다는 것을 보여 주는 것으로 기후변화로 인해 기존 배수시설물의 능력이 감소하게 되어 홍수 관리의 어려움이 증가될 수 있음을 알 수 있다. 앞서 본 저자는 기후변화가 배수관련 구조물의 설계에 영향을 미칠 수 있다는 점을 계속하여 언급하였다. 이에 기후변화가 한반도의 설계빈도에 미치는 영향을 전망하기 위

해 RCP(Representative Concentration Pathways: 대표농도경로)8.5 기후변화 시나리오를 이용해 생산된 지역기후모형(regional climate model)의 여름철 강수를 외부인자로 고려한 비정상성 빈도해석을 적용하였다(김병식 등, 2011). 아래 그림에서 알 수 있듯 바와 같이 미래 21세기 설계강수량의 변화를 공간분포로 비교해 보면 서울을 포함한 중부지방, 강원 동해안 지역과 남해안 지역에서 빈도 강수량이 증가하며 경북내륙 지역에서 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 서울과 수도권을 포함한 대부분의 대도시 지역의 치수안전도가 줄어든다는 것을 의미하는 것으로 거의 현재 대비 50% 수준의 치수안전도를 확보할 수 없다는 것을 의미한다.

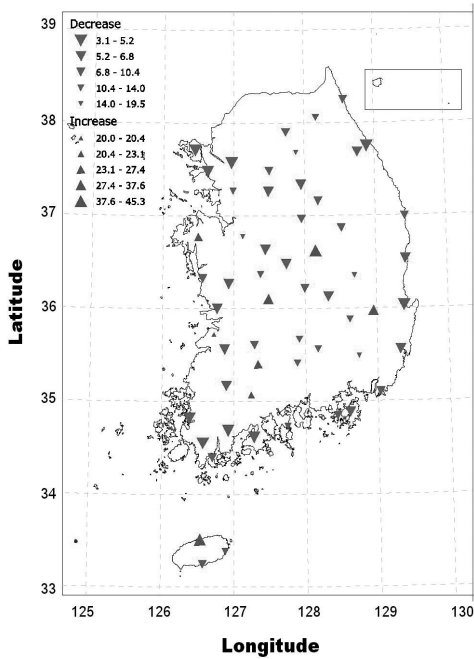


그림 9. 20년빈도 설계강수량의 변화

4. 기후변화를 고려한 목표연도 설계강우량 산정의 필요

미래기후에서 도시배수체계의 기후변화의 대비한 효과적인 대응법은 충분히 극한강우를 설계에 반영할 수 있는지에 달려 있다. 기후변화 관련한 연구 선진국들에서는 국가 표준 시나리오를 선정하여, 미래 기후에서의 수공구조물의 안전 기준을 정비하고 있다. 대표적인 예로 독일 바이에른 주는 2050년까지 중소규모 하천 홍수량을 40~50% 증가시키고, 100년 빈도 설계홍수량을 15% 증가시키도록 하고 있다. 영국은 2115년까지 최대 강우강도는 30%, 최대 하천유량은 20% 증가시키도록 하고 있다(김광섭, 2011). 보편적으로 기후변화 대응계획은 목표연도를 100년 정도로 하여 수립되기 때문에 대응 전략수립은 기후변화 예측기술이 발전에 따라 주기적으로 갱신될 수 있으며 각 단계별 대응전략에 따라 배수체계의 전체적인 효율성이 재해석될 필요가 있다. 이때

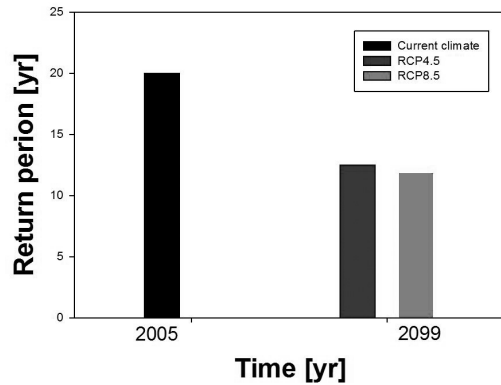


그림 10. 전국평균 치수안전도(설계빈도) 변화

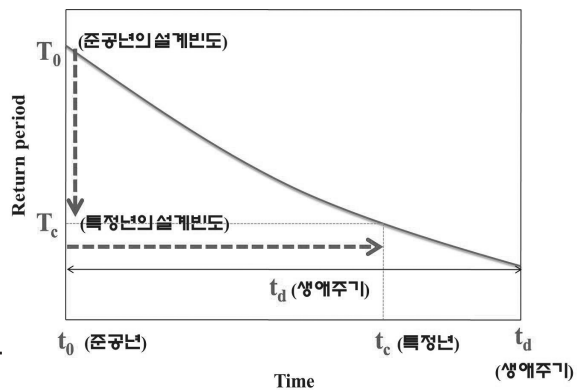


그림 11. 배수 관련 시설물의 생애주기와 설계수명의 관계

가장 중요한 대책 중 하나가 앞서 설명한 예와 같이 설계기준의 개정 및 보완이다(예를 들어 관직경의 15% 증가 등). 이를 위해서는 비정상성을 반영한 설계기준 산정 방법을 도입하여 변화하는 기후에서의 배수체계의 위험성을 평가해야 한다.

앞에서 계속해서 언급 한 바와 같이 정상성이라는 가정은 기후변화에서는 더 이상 유효하지 않다. 그러므로 우리가 직면한 문제는 극한 강우사상의 변화를 어떻게 설계기준에 고려 할 수 있는냐는 것이다. 사실상, 설계기준의 정의에 있어 기후의 비정상성을 고려하기 위해서는 배수시설의 생애주기와 설계수명을 구분해야 한다. 그림 10은 배수 관련 시설물의 생애주기와 설계수명을 나타낸 것이다. 여기서, t_0 는 준공년, t_d 는 생애주기, t_c 는 특정년, T_0 는 준공년의 설계빈도, T_c 는 특정년의 설계빈도를 의미한다. 특정 배

수시시설물의 설계빈도를 결정할 때 시설물의 준공년을 기준으로 설계빈도를 결정한다면 시간이 지남에 따라 미래 특정 목표연도에는 설계빈도의 저하를 초래할 수 밖에 없다. 그러므로 본 저자는 특정시설물의 빈도를 상향하는 방식 보다는 “기후변화를 고려한 목표연도 설계강우량의 산정”을 제안하는 바이다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부[교육과학기술부]의 재원으로 한국연구재단의 지원(과제번호 : 20110028914)을 받아 수행되었습니다. ☺

참고문헌

1. 김광섭 (2010). “강수극치사상의 비정상성 빈도해석 최신 연구동향.” 물과 미래, 한국수자원학회, 43(8), pp. 41-46.
2. 김병식, 이정기, 김형수, 이진원 (2011). “기후변동을 고려한 조건부 GEV 분포를 이용한 비정상성 빈도 분석.”, 한국습지학회논문집, 한국습지학회, 13(3), pp. 499-514.
3. Alain Mailhot and Sophie Duchesne (2010). “Design Criteria of Urban Drainage Infrastructure under Climate Change.”, Journal of Water Resources Planning and Management, MARCH/APRIL
4. Cubasch, U., et al. (2001). “Projections of future climate change. Climate change 2001: The scientific basis.” Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J. T. Houghton, et al., eds. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp. 525-582.
5. Frei, C., Schar, C., Luthi, D., and Davies, H. C. (1998). “Heavy precipitation processes in a warmer climate.” *Geophys. Res. Lett.*, 25(9) pp. 1431-1434.
6. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2007). “Climate change 2007: The physical science for policy makers.” Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
7. Nicholls, N. N., and Coauthors (1996). “Observed climate variability and change. Climate Change 1995.”, The Science of Climate Change, J. T. Houghton et al., Eds., Cambridge University Press, pp. 135-192.
8. Trenberth, K. E. (1999). “Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change.” *Clim. Change*, 42, pp. 327-339.