가강수량 특성을 이용한 극치호우의 기후변화 예측

Extreme Storm Estimation by Climate Change Using Precipitable Water

박민규* · 박무종** · 김상단*** · 주진걸****

Park, Minkyu · Park, Moojong · Kim, Sangdan · Joo, Jingul

Abstract

In this study, probable maximum precipitation change was predicted using RCP 8.5 IPCC climate change scenario as extreme storm change. The modelling results based on average have the restriction on extreme rainfall value representation and future behavior prediction. To overcome these problems, this study uses air temperature change and precipitable water relationship in order to calculate the magnitude of probable maximum precipitation. The results showed about 40% increase in probable maximum precipitation. These were expected to use as reference of extreme storm increase such as IDF changes.

Key words : Climate change, Extreme storm, Precipitable water, Probable maximum precipitation, RCP 8.5

요 지

본 연구에서는 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 고려하여 극치호우로서 가능최대강수량의 변화를 예측하였다. 기존의 기후변화에 따른 극치호우 예측은 평균적인 모델링 결과를 기초로 하고 있어 극한값의 재현이나 거동 예측과 관련하여 많은 문제점이 지적되어왔다. 이와 관련하여 본 연구에서는 기후변화 시나리오에서 가장 신뢰도가 높은 기온의 변화와 물리적으로 상관성이 높은 가강수량 추정방법을 이용하여 가능최대강수량의 규모를 직접 추정하는 방법을 적용하였다. 그 결과 국내 가능최대강수량의 규모가 향후 100년 이후 약 40% 정도까지 증가할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 확률강우량의 변동폭 등과 관련해서도 간접적인 참고수치로 이용가능 할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 기후변화, RCP 8.5, 극치호우, 가능최대강수량, 가강수량

1. 서 론

기후변화로 인해 극한 수문사상의 규모와 빈도가 변화한다는 것은 이제 전세계적으로 인정하고 있다. 이와 관련해 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 5차 보고서 발간을 대비해 기후변화에 따른 극한 홍수나 가뭄의 변화에 대한 예측을 진행하고 있다. 기후변화는 대기 중의 이산화탄소와 같은 온실가스의 농도 증가가 지구의 기온을 꾸준히 상승시키는 것을 일컫는다. 문제는 이로 인해 수문순환 과정이 기존과 다르게 거동되어 결과적으로 과거 관측과는 다른 극한 사상이 발생할 수 있는 가능성이 커진다는 것이다. 이와 같은 문제점은 지난 십여년 동안 수문학 분야에서 많은 관심을 받아 왔으며 상당한 연구들이 지구 온난화로

극한 수문사상의 규모 및 빈도가 증가한다는 결과를 제시하였다(Kite, 1993; Boorman and Sefton, 1997; Panagoulia and Dimou, 1997; Gellens and Roulin, 1998; Saelthun et al., 1998; Mirza et al., 1998; Prudhomme et al., 2003; Meehl and Tebaldi, 2004; Kim et al., 2008). 이러한 연구결과를 살펴보면 대체로 북반부에서 고위도 지역으로 갈수록 강우량이 증가하나, 적도나 남반부 지역에서는 반대의 결과를 보인다. 이는 공통의 경향성을 가진다. 이 결과를 우리나라에 적용하면 향후 강우량의 증가가 예상되는 지역이라고 볼 수 있다.

그러나 기후변화 시나리오에 따른 GCM(Global circulation model)에 의한 강수의 증가에 대한 정량적인 결과는 아직까지 그 신뢰도에 대해 의문점이 많다(Grotch, 1988; Lettenmaire

*정회원. 중원대학교 방재안전과학과 교수(E-mail: mkhojin@gmail.com)

Member. Professor, Department of Disaster Mitigation and Safety Science, Jungwon University

**교신저자. 정회원. 한서대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-041-660-1051, Fax+82-041-660-1051, E-mail: mjpark99@gmail.com)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of civil Engineering, Hanseo University

***정회원. 부경대학교 환경공학과 교수

Member. Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

****정회원. 전북과학대학교 건축조경토목계열 교수

Member. Professor, Department of Division of Civil & Landscape architecture, Jeonbuk Science College

and Gan, 1990). IPCC 5차와 관련하여 진행중인 GCM은 135 km 격자로 구성되어 있고 이를 활용한 RCM 역시 12.5 km의 격자를 가진다. 이는 전통적으로 관측된 한 지점의 강수량이 아닌 지역평균 값의 성격을 가진다. 뿐만 아니라 이때 강수량은 지상에 내린 강수량의 개념이 아니라 지표면 수 km 상공에서 강수로 내릴 수 있는 수분의 양이라는 개념이기 때문에 공학적으로 실제 이용하려는 강수량의 개념과 일치하지 않는다. 무엇보다 가장 큰 문제는 기존의 GCM과 RCM의 모델링으로는 현재상태의 강수량의 발생을 재현하기가 힘들다는 점이다(NIMR, 2007). 정확한 강수량의 예보는 인공위성에 의한 원격탐사나 슈퍼컴퓨터에 의한 빠른 연산 등이 동원되고 있지만 아직까지도 요원하다고 할 수 있다. 매일매일 확인가능한 일기예보의 결과를 확인해보면 아주 쉽게 다음날의 일강수량이 작게는 수십 mm에서 크게는 수백 mm 이상 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 여러 가지 문제점으로 기후변화를 고려한 강수량의 모델링 결과는 대체로 정량적인 값이 아닌 몇 % 정도 증가라는 수준으로 제시된다. 따라서 기후변화를 고려한 기상모의 결과에서 강수량의 변화는 기존 변화에 비해 굉장히 그 신뢰도가 떨어진다고 할 수 있다. 반대로 표현한다면 기후변화와 관련해서는 기존 변화에 대한 추정 결과 정도만이 유일하게 신뢰할 수 정도를 가지고 있다(NIMR, 2007).

국내에서 다양한 기후변화에 따른 극한 강우나 확률강우량의 변화를 검토한 연구결과가 있어왔으나 이들 대부분은 대체로 기후변화 시나리오에 따라 모의된 GCM의 강수량 모의 결과에 기초하고 있다. 그러나 이 결과는 앞서 소개한 여러 가지 문제점을 가지고 있어 이를 재가공한 장래 강수량의 변화에 대한 추정결과는 불확실성이 너무나도 크다.

본 연구에서는 이와 관련하여 물리화학적 기초를 가지는 수문기상학의 방법론을 이용하여 장래 극치 호우의 변화를 예측해 보려고 한다. 이는 기후변화 시나리오에 기초한 GCM의 모의결과 중 가장 신뢰도가 높은 것으로 알려진 기존의 변화를 이용하여 직접적으로 극치 호우의 규모를 추정하는 것을 의미한다. 이때 극치 호우는 주로 대담의 여수로 설계, 원자력발전소의 부지고 결정, 또는 주요지역의 홍수에 대한 비상대책계획 수립시에 필수적인 가능최대강수량(probable maximum precipitation)으로 정의된다. 이러한 물리적 방법론에 기초한 장래 극치 호우의 변화를 추정하는 것은 호우사상의 변화양상과 확률강우량의 변화를 추정하는 간접적인 지표로서 의미를 가질 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 IPCC 5차 기후변화 시나리오와 극치호우 발생

우리나라의 IPCC 5차 시나리오에서는 국제 기후변화모델 비교사업(CMIP5)에서 제시된 수평 분해능 약 135 km의 기후변화모델(HadGEM2-AO)을 사용하고 있다(NIMR, 2011). 이 모델의 기후변화모의에서는 지구의 기후시스템에 영향을 미치는 요인으로 온실가스의 변화 뿐만 아니라 태양복사량, 성층권 에어로졸 변화 등도 고려한다. 이러한 기후변화 요인

들을 종합적으로 고려한 대기상부에서 측정된 지구 단위면적당 에너지 변화율을 IPCC에서는 복사강제력(radiative forcing)이라고 명명하고 기후변화의 원인인자로 설정하였다. 이는 기후변화를 초래하는 다양한 인위적, 자연적 힘들의 정량적 비교를 통해 얻어지는 값으로 양수일 경우 지구의 에너지가 증가하여 온난화가 계속되고, 음수일 경우 에너지 감소로 지구가 냉각됨을 나타낸다. 양수가 나타나는데 영향을 미치는 요인으로는 태양복사와 온실가스 등이 대표적이고 음수를 보이는데 영향을 미치는 요인은 에어로졸과 알베도 등이 있다. 특히 화산활동은 에어로졸을 증가시키나 이를 기후변화 모델링에 반영하기 어려운 것도 기후변화 시나리오의 취약점이라고 할 수 있다.

IPCC 5차에서는 기존에 사용되어온 시나리오 대신에 대표농도경로(RCP: Representative Concentration Pathway)를 이용한다. 기존 4차에서는 미래의 사회경제 형태를 먼저 결정하고 이에 따른 온실가스 농도 배출량 시나리오가 정해지는 방식이었다면 새로운 RCP 시나리오는 인간활동의 영향을 대기에 미치는 복사량으로 환산하여 온실가스 농도를 정하고 있다는 것이 차이점이다. RCP 시나리오는 크게 RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5시나리오로 나눌 수 있으며 복사강제력이 각각 2100년에 4.5 W/m^2 이하, 6.0 W/m^2 이하 그리고 2100년 이전에 8.5 W/m^2 이상이 되는 것을 의미한다. 이 시나리오는 각각 4차 시나리오의 B1, A1B, A2와 유사한 것으로 평가되고 있다. 이와 같은 IPCC 기후변화 예상 시나리오와 극치 호우 발생의 상관관계는 다음과 같이 설명할 수 있다. 지구표면 온도가 상승한다는 것은 열대저기압(태풍)이 따뜻한 열대해양으로부터 받은 열을 주요 동력원으로 사용하는 것이 더욱 용이해 진다는 것을 의미한다. 따라서, 온실가스가 야기하는 미래의 온난화는 열대저기압의 빈도, 강도, 트랙, 그리고 다른 속성들에게도 변화를 야기할 것이다. 지금까지의 여러 연구에서는 온난화된 기후에서 태풍의 잠재강도가 증가한다고 알려져 있다. 대표적인 것으로는 사이언스지에 2005년 실린 이래 굉장히 많은 토론(discussion)과 논평(comment)을 가져온 Webster et al.(2005)의 “온난화 조건에서 태풍의 수, 기간 그리고 강도의 변화(Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment)”와 비슷한 주제를 다룬 것으로 네이처지에 소개된 Emanuel (2005)의 “지난 30년간 태풍의 증가하는 파괴성(Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years)”을 들 수 있다. 여기서는 온난화 조건이 계속될 경우 매우 위험한 상황이 초래될 수 있음을 경고하고 있다. 이뿐 아니라 대기과학회지에는 태풍 카트리나보다 더 강력한 허리케인이 앞으로 올 징조(Is Katrina a harbinger of still more powerful hurricanes?)라는 기사가 Kerr(2005)에 의해 발표된 바 있다. 우리나라의 기상연구소(2007)에 따르면 이산화탄소 농도 2배 증가시 여름 태풍의 수가 35.6% 증가하는데 특히, 6, 7, 8월은 크게 증가하고 9, 10월은 약간 감소하는 것으로 소개하고 있다. 그리고, 태풍의 최대풍속과 지속기간도 온난화된 기후에서 증가할 것으로 예상하고 있다. Oh(2007)는 A2 시나리오에 따라 기온이 상승한 100년 후에 태풍 루사가

다시 내습한다면 한반도의 48시간 누적강수량은 기존보다 약 200 mm 정도 증가하는 지역이 상당할 것으로 예상하였다. Oh(2007)는 슈퍼태풍의 발생을 전망하면서 그 원인으로 기존에는 태풍이 한반도 상륙 후 약화되었으나 미래의 태풍은 내륙상륙 뒤에도 계속 발달하는 특성을 보일 수 있기 때문이라고 소개하였다. Moon et al.(2007)은 기후변화에 따른 한반도 상륙 태풍강도 변화를 검토하기 위해 국내에 내습한 지난 55년간의 태풍을 검토하여 미래의 태풍의 위력은 예상하기 힘들 정도로 엄청날 것이라고 보고한 바 있다.

2.2 가능최대강수량과 가강수량

가능최대강수량(Probable maximum precipitation, PMP)이란 어떤 지역에서 생성될 수 있는 가장 극심한 기상조건하에서 발생가능한 호우로 인한 최대강수량을 의미한다(Yoon, 2007). 이러한 가능최대강수량의 추정방법에는 수문기상학적 방법, 통계학적인 방법 및 기상현상에 대한 물리적인 모형을 이용한 방법의 3가지로 구분할 수 있으며 주로 수문기상학적인 방법이 사용된다(KWWA, 2008). 우리나라는 수문기상학적인 방법에 따라 PMP를 추정하고 있는데 국내에서 이에 대한 절차와 문제점을 검토하여 제시하고 있는 문헌으로는 MOCT(2004)의 전국 PMP의 재산정 보고서, KDI(2007)의 댐설계기준의 적정성 검토 보고서 그리고 KWWA(2008)의 PMP 및 PMF 산정절차 지침 수립보고서가 있다.

PMP의 추정 방법은 수분최대화, 호우전이 그리고 포락의 세 단계로 구분된다. 여기서 호우전이는 호우발생지점과 적용대상지점의 지역특성 차이를 고려하여 적용하여 산정된 수직전이비, 수평전이비, 지형영향비 등을 적용하는 과정이다. 그러나 기후변화의 영향이 발생할 경우의 두 지점간의 차이가 어떻게 변화할지를 객관성있는 자료로 제시하기 어렵고, 국내에서는 각 인자를 모두 고려한 조정계수가 거의 0.9~1.1의 범위에 있으므로 그 영향이 크지 않다고 할 수 있다. 한편, 포락은 여러 지속시간과 면적 규모를 고려해서 상대적으로 작게 산정된 조절된 강우량 값을 크게 조정하는 과정이다. 따라서 고도의 전문적인 검토가 필요하고 주관적인 판단이 필요하다. 본 연구에서는 극한 강우의 기후변화에 따른 변동특성을 연구대상으로 하므로 객관성을 유지하기 힘든 호우전이와 포락의 과정은 제외하고 기존에 관측된 최대강수량에 수분최대화비를 고려하는 방법으로 산정된 결과를 가능최대강수량으로 간주하기로 한다. 이러한 방법으로 산정된 강수량을 가능최대강수량으로 채택하고 있는 나라로는 영국(NERC, 1975)과 일본건설성 토목연구소(1978)이 있다. 따라서, 본 연구에서 정의하는 가능최대강수량은 여러 주요 관측호우의 강우량(일반적으로 DAD 해석결과)에 수분최대화비를 곱해서 가능최대강수량의 후보값(이하 최대가능강우량)들을 구했을 때 동일 지속시간, 동일 면적에서 가장 큰 강우량을 의미한다.

각 관측호우의 결과로부터 최대가능강우량을 계산해내기 위해서는 수분최대화비를 먼저 산정해야 한다. 수분최대화비는 최대가능강우량과 관측강우량의 비로서 정의된다. 이때 최대가능강우량을 정의하면 관측강우량에 여러 조건이 충족되어 추가로 비가 더 내릴 수 있을 때 최대 내릴 수 있는 강우

량을 의미한다. 그러나 이러한 강우량을 직접적으로 파악하기 힘들기 때문에 가강수량이라고 불리워지는 기상인자를 이용한다. 이때 가강수량은 대표 가강수량과 최대 가강수량의 두 가지로 나누어서 생각할 수 있다. 대표 가강수량은 강우가 발생한 지역의 현재상태를 대표하는 가강수량으로 관측강우량과 연관된 지표이다. 최대 가강수량은 강우발생지역의 과거 기상기록을 조사하여 얻은 가장 큰 가강수량이다. 최대 가강수량은 통상 50~100년 재현기간의 이슬점 온도와 관련이 높고 여러 가지 조건이 충족될 때 최대 내릴 수 있는 최대가능강우량과 연관된 지표이다.

결국 수분최대화비의 산정에서 가장 주요한 인자는 가강수량(可降水量, precipitable water)이다. 가강수량은 대기 중 증기량을 물의 깊이로 나타낸 것으로 PMP 추정시에는 주로 이슬점 온도와 연관되어 사용되지만 다른 기상인자와도 관련성이 높은 것으로 알려져 있다. 이와 관련하여 유철상 등(2004)은 가강수량의 추정 및 분석에 관한 연구를 통하여 국내에서 관측을 통해 얻은 최대온도, 최소온도, 최대습도, 최소습도, 평균이슬점 온도 등과 가강수량에 대한 자료를 이용하여 관계식을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 이들 관계식 중에서 최고기온과 가강수량 사이의 관계를 보여주는 아래의 식 (1)을 이용하기로 한다. 이는 기후변화의 예측 결과 중 가장 신뢰도가 높은 인자가 기온으로 기온과 가강수량의 직접적인 관계식을 적용할 경우 기온의 변화에 기초한 가강수량의 변화를 바로 추정할 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 최저기온보다는 최대기온이 대기의 수분보유능력에 미치는 영향이 판단할 때 보다 적합할 것으로 고려되었기 때문이다.

$$\ln(Y) = 0.0742X + 1.336, R^2 = 0.806 \quad (1)$$

여기서 Y 는 가강수량(mm), X 는 최고기온($^{\circ}\text{C}$)이다.

3. 현재 시점의 가능최대강수량 산정

현재 기후조건에서의 가능최대강수량을 추정하였다. Table 1은 호우발생 당시의 이슬점 온도와 대표 가강수량의 관계, 최대 가강수량의 분석 등을 이용한 수분최대화비의 산정과정을 보여주고 있다. 이러한 수분최대화비를 한국의 주요 호우사상의 DAD에 반영하여 계산하면 현재 기후조건에서의 가능최대강수량을 추정할 수 있으며 Table 2와 같다.

이를 살펴보면 가장 작은 면적 25 km^2 에서 24시간 가능최대강수량이 994.6 mm이다. MOCT(2004)에서 발간한 전국 PMP도에 따르면 서울지점의 24시간 가능최대강수량이 1,090 mm로 금회 결과보다 큰데, 이는 본 연구에서 고려하지 않은 전이비, 포락 등이 반영되었기 때문으로 판단된다. 두 결과의 비교시 값의 차이는 조금 있으나 금회 추정된 PMP 값 역시 상당히 크기 때문에 가능최대강수량으로 간주하여도 무리가 없다. 또, 본 연구의 목적상 기후변화에 따른 PMP의 변화를 일관성 있게 추정하려면 동일방법으로 얻어진 현재의 PMP가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 금회 추정된 PMP를 현재 기후조건에서의 PMP로 채택하기로 한다.

Table 1. Calculation of moisture maximization index

Storm	Mean elevation (EL.m)	Typical dew point 1000 mb (°C)	Typical precipitable water (mm)	Typical 1000 mb mean elevation (mm)	Adjusted typical precipitable water (mm)	Maximum dew point 1000 mb (°C)	Maximum precipitable water (mm)	Maximum 1000 mb mean elevation (mm)	Adjusted maximum precipitable water (mm)	Moisture maximization index
R19720818	40.00	23.50	71.00	0.80	70.20	27.73	102.57	1.00	101.57	1.45
R19800720	170.00	25.00	81.00	3.40	77.60	27.84	103.56	4.25	99.31	1.28
R19810901	30.00	23.90	73.40	0.60	72.80	28.14	106.26	0.75	105.51	1.45
R20030911	470.00	23.40	70.40	9.05	61.35	27.35	97.8	11.75	86.05	1.40
R19870713	300.00	23.00	68.00	6.00	62.00	27.88	103.92	7.50	96.42	1.56
R19870721	30.00	24.40	76.80	0.60	76.20	27.93	104.37	0.75	103.62	1.36
R19900909	280.00	23.80	72.80	5.60	67.20	26.63	93.04	6.60	86.44	1.29
R19910821	80.00	22.60	65.60	1.60	64.00	27.78	103.02	2.00	101.02	1.58
R19980731	660.00	25.00	81.00	14.20	66.80	28.03	105.27	16.53	88.74	1.33
R19980805	50.00	24.70	78.90	1.00	77.90	27.69	102.21	1.25	100.96	1.30
R19980812	170.00	26.40	91.20	4.25	86.95	27.86	103.74	4.25	99.49	1.14
R19980928	0.00	21.30	58.50	0.00	58.50	24.96	80.72	0.00	80.72	1.38
R19990731	60.00	24.00	74.00	1.20	72.80	27.64	101.76	1.50	100.26	1.38
R20020830	30.00	23.00	68.00	0.60	67.40	25.98	87.86	0.60	87.26	1.29

Table 2. Estimated values of PMP in present times(1971 ~ 2000 years)

Classification	1 hr	2 hr	4 hr	6 hr	8 hr	12 hr	18 hr	24 hr	48 hr	72 hr
25	179.6	281.5	453.7	606.5	659.8	761.8	915.9	994.6	1117.1	1243.1
50	148.6	264.3	423.5	564.5	623.0	728.3	881.1	966.2	1090.9	1213.5
100	129.3	250.2	401.8	536.6	592.3	695.8	839.8	926.2	1064.7	1183.9
200	125.9	242.9	390.0	520.8	574.5	673.5	785.6	872.0	1038.4	1154.3
500	120.7	231.5	371.3	495.6	549.2	644.1	737.1	822.1	1003.8	1115.1
1,000	115.6	220.8	354.6	473.6	522.6	617.4	719.4	805.9	977.6	1085.8
2,000	98.7	205.8	335.8	447.5	495.0	588.3	693.5	761.3	940.3	1052.2
5,000	69.3	121.3	227.5	273.0	324.0	402.1	539.8	626.2	839.0	946.1
10,000	47.7	92.3	157.5	196.0	238.7	322.6	427.1	527.0	680.6	794.0
20,000	36.7	62.9	129.0	167.7	206.4	270.1	369.0	463.2	572.8	591.5

4. 극치 호우의 변화 추정

본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오에 따른 우리나라 기후변화에 기초하여 가능최대강수량의 변화를 해석한다. 이를 고려하기 위해 가능최대강수량의 추정시 가장 중요한 기상인자인

Fig. 1. Deviation of yearly maximum temperature change

가강수량의 변화로 먼저 추정하기로 한다. 이를 위하여 기상 연구소로부터 기온, 강수량, 상대습도 등에 대한 1971~2100년까지의 자료를 제공받아 가강수량의 변화를 추정하기 위한 자료로 이용하였다. 이용 가능한 여러 기상인자들 중에서 최고기온을 사용할 경우가 가강수량의 변화 및 그에 따른 가능최대강수량의 산정에 가장 적절한 결과를 준다고 보고 이에 대한 계산을 수행하였다. 우선 경년별 최고기온의 변화를 살펴보면 Fig. 1과 같다. 1971~2000년 사이의 최고기온 값들의 평균을 0으로 두고 장래 100년동안의 최고기온의 상승경향을 보여주고 있다.

식 (1)을 적용하여 최고기온의 변화에 따른 최대 가강수량의 증가를 도출한 결과는 Fig. 2와 같다. 기온이 증가하면 대기가 보유할 수 있는 수분의 양이 함께 증가할 것이기 때문에 가강수량 역시 증가할 것이다. 검토결과에 따르면 100년 후의 최대 가강수량은 현재보다 최대 약 60%, 평균 35% 정도 증가할 것으로 예상할 수 있다.

Table 3은 기후변화 시나리오에 기초하여 장래 2071~2100

Fig. 2. Increasing rate of yearly maximum precipitable water

년동안의 가능최대강수량의 평균적인 증가량을 추정할 것으로 앞서 얻어진 가강수량의 변화에 기초하여 수분최대화비를 산정하였다. 이를 기초로 한 장래 가능최대강수량의 추정 결과가 Table 4에 나타나 있다. 25 km²에서 24시간 가능최대강수량이 1,364.7 mm로 얻어졌으며, 현재의 가능최대강수량 994.6 mm와 비교할 때 약 370.1 mm 정도가 증가하는 것으로 예측되었다.

수문기상학적인 방법에 기초하여 PMP의 변화를 예측할 때

문제가 되는 요소는 수분최대화비의 상한계 값의 설정에 대한 것이다. 미국의 경우 가능최대강수량의 추정시에 수분최대화비의 상한계 값으로 주로 1.7을 설정하여 사용하고 있으나, 영국과 같이 이에 대한 제한을 두지 않는 경우도 있다(WMO, 1986, 2008; NERC, 1975). 이는 뚜렷한 근거를 찾기 어려우나 미국의 경우 호우의 실제사례를 조사하여 관측호우가 보인 가장 큰 수분최대화비가 1.7 내외로 조사되었을 것으로 추정된다. 이와 관련해 국내에서 발생한 호우사상의 수분최대화비를 조사한 연구가 Lee(1999)에 의해서 수행된 바 있다. 이 연구에서는 국내 1977~1996년 사이의 기상자료를 이용하여 국내의 모든 호우사상을 분석하였다. 그 결과 우리나라의 가강수량은 91.2~105.0 mm이며 수분최대화비는 1.1~2.0의 범위를 보인다고 제시하였다. 해당 연구에서는 수분최대화비가 이렇게 큰 범위를 보이는 호우특성은 주로 태풍인 경우라고 조사결과를 제시하였으며 이를 인용하면 다음과 같다.

호우의 발생 원인에 따라 저기압, 장마전선, 열대성저기압(태풍), 대기불안정 및 기압골의 4가지로 분류하여 살펴보면 태풍을 제외한 나머지 세 가지 호우에서는 호우중심지역에서는 수분최대화비가 1.0~1.1, 그 밖의 지역에서는 1.2~1.3으로 추정되었다. 그러나 태풍의 경우 호우중심지역 외의 지역에서

Table 3. Estimated values of moisture maximization index in future times(2071~2100 years)

Storm	Mean elevation (EL.m)	Typical dew point 1000 mb (°C)	Typical precipitable water (mm)	Typical 1000 mb mean elevation (mm)	Adjusted typical precipitable water (mm)	Maximum dew point 1000 mb (°C)	Maximum precipitable water (mm)	Maximum 1000 mb mean elevation (mm)	Adjusted Maximum precipitable water (mm)	Moisture maximization index
R19720818	40.00	23.50	71.00	0.80	70.20	27.73	140.21	1.00	139.21	1.98
R19800720	170.00	25.00	81.00	3.40	77.60	27.84	141.57	4.25	137.32	1.77
R19810901	30.00	23.90	73.40	0.60	72.80	28.14	145.26	0.75	144.51	1.98
R20030911	470.00	23.40	70.40	9.05	61.35	27.35	133.69	11.75	121.94	1.99
R19870713	300.00	23.00	68.00	6.00	62.00	27.88	142.06	7.50	134.56	2.17
R19870721	30.00	24.40	76.80	0.60	76.20	27.93	142.67	0.75	141.92	1.86
R19900909	280.00	23.80	72.80	5.60	67.20	26.63	127.19	6.60	120.59	1.79
R19910821	80.00	22.60	65.60	1.60	64.00	27.78	140.83	2.00	138.83	2.17
R19980731	660.00	25.00	81.00	14.20	66.80	28.03	143.90	16.53	127.37	1.91
R19980805	50.00	24.70	78.90	1.00	77.90	27.69	139.72	1.25	138.47	1.78
R19980812	170.00	26.40	91.20	4.25	86.95	27.86	141.81	4.25	137.56	1.58
R19980928	0.00	21.30	58.50	0.00	58.50	24.96	110.34	0.00	110.34	1.89
R19990731	60.00	24.00	74.00	1.20	72.80	27.64	139.11	1.50	137.61	1.89
R20020830	30.00	23.00	68.00	0.60	67.40	25.98	120.10	0.60	119.50	1.77

Table 4. Estimated values of PMP in future times (2071~2100 years)

Classification	1 hr	2 hr	4 hr	6 hr	8 hr	12 hr	18 hr	24 hr	48 hr	72 hr
25	257.85	385.37	621.22	830.37	903.35	1043.08	1256.70	1364.67	1529.96	1702.51
50	213.35	361.87	579.92	772.88	852.98	997.21	1208.91	1325.73	1494.05	1661.95
100	177.44	342.61	550.18	734.75	810.97	952.69	1152.27	1270.86	1458.14	1621.41
200	172.36	332.52	534.02	713.10	786.58	922.18	1077.93	1196.52	1422.21	1580.85
500	165.22	316.98	508.44	678.64	752.03	881.87	1006.51	1122.64	1374.73	1527.25
1,000	158.33	302.39	485.57	648.40	715.54	845.32	982.38	1100.48	1338.82	1487.05
2,000	135.14	281.77	459.77	612.68	677.82	805.45	947.03	1039.60	1287.85	1441.03
5,000	94.84	170.74	311.50	373.80	443.58	549.07	737.11	855.12	1149.08	1295.77
10,000	67.86	131.14	223.88	278.60	327.55	440.53	583.21	719.59	932.11	1087.47
20,000	50.17	87.56	177.00	230.10	283.20	368.85	503.83	632.45	794.76	820.80

Table 5. Variability of PMP due to climate change

Year	Air temperature increase(°C)	Precipitable water increase(%)	24 hours PMP	
			Rainfall depth, mm (Increasing percentage, %)	Return periods (years)
Present (1971~2000)	-	-	994.6	234,148
2030	1.6	12.6	1,125.7(13.2)	699,051
2050	2.5	20.4	1,202.8(20.9)	1,198,373
2070	4.1	35.6	1,357.0(36.4)	4,194,304
2100	5.1	46.0	1,457.2(46.5)	8,388,608
Average for 2071~2100 years	4.19	36.7	1,364.7(37.2)	3,355,443

수분최대화비가 1.4~2.0으로 상당히 큰 값을 기록하고 있다.

태풍의 수분최대화비가 1.4~2.0에 이른다는 내용은 태풍의 경우 관측강우량보다 경우에 따라서는 약 50~100% 정도의 비가 더 내릴 가능성이 있다라고 해석할 수 있다. 따라서 앞으로 먼 장래에도 호우유형이 저기압, 장마전선 또는 불안정한 기압골이라면 지금보다 그렇게 큰 강우량의 증가는 보이지 않을 가능성이 높다. 그러나 대상 호우가 태풍이 된다면 다르다. 향후의 극심한 강수기록을 루사의 경우처럼 태풍이 경신할 가능성이 높다. 이를 대기과학적인 측면에서 살펴보면 태풍의 경우 특정 지역에서 다른 지역으로 빠른 속도로 이동하기 때문이라고 설명할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 태풍은 이동 중에 수분을 많이 포함하고 있는 새로운 공기층을 만날 가능성이 높다. 그리고, 새로이 공급받은 수증기는 강우의 추가 공급원이 되어 강우량을 증가시킬 것이다. 이러한 기후변화에 따른 장래 2100년까지의 가능최대강수량의 변화를 주요 연도별로 추정한 결과는 Table 5와 같다.

위 결과를 보면 100년 이후의 서울의 가능최대강수량은 약 1,500 mm까지 증가할 수 있다. 이와 관련하여 일본의 24시간 강우량의 최대치는 1,500 mm를 넘는 것으로 소개되고 있다. 우리나라는 과거 온대기후대로 구분되었으나 최근에는 점점 일본과 유사한 아열대기후대로 구분될 수 있는 지역이 증가하고 있다(NIMR, 2007). 이러한 내용을 미루어 알 수 있는 것은 지구온난화가 계속해서 진행될 경우 2100년에 우리나라가 만나게 될 기후조건을 현재 보여주고 있는 곳이 일본이라는 사실이다. 우리나라의 24시간 최대강우량이 970 mm를 기록한 것처럼 일본의 최대강우량이 우리나라에서도 발생할 수 있을 것이라라고 고려하게 된다면 1,500 mm의 강수량은 상당히 신빙성 높게 현실로 다가오는 추정결과라고 볼 수도 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기후변화 시나리오에 기초하여 장래 극한 호우사상을 나타내는 가능최대강수량의 변화를 예측해 보았다. 공학적으로 유용하게 사용되고 있는 극치 호우사상의 상한에 해당하는 개념은 가능최대강수량이다. 가능최대강수량은 개념 상으로는 물리적으로 특정 지역에서 가장 큰 값으로 고정된 값이다. 그러나 그 추정방법론상 기준에 관측된 호우사상의 자료특성에 기초할 수 밖에 없고 이러한 자료특성은 또한 지

역별로 상이한 기온의 영향을 받는다. 따라서 대부분의 국가에서는 수문기상학적인 방법으로 가능최대강수량을 추정하고 있으며 시간의 경과와 함께 변화하는 수문기상학적 환경을 고려하여 재추정을 실시함으로써 지속적으로 가능최대강수량의 값을 갱신하고 있다.

본 연구에서는 우리나라의 현재 기후조건에서의 가능최대강수량을 추정한 후 지구온난화에 따라 장래 지역기후 특성이 변동함에 따라 초래되는 기온변화에 기초하여 가능최대강수량이 어떻게 변화할지에 대한 예측을 수행하였다. 이러한 연구성과는 향후 기후변화 시나리오에 따라 수문기상학적 환경이 변화될 경우 새로이 추정될 가능최대강수량의 값의 변화를 미리 예측해 볼 수 있다는 측면에서 의의를 가진다. 가능최대강수량이 다목적댐이나 원자력발전소 등과 같이 반영구적으로 그 안전성이 확보되어야 할 필요성이 있는 시설물의 계획의 기준으로 사용되고 있음을 고려한다면 그 값의 변화를 미리 고려한 국가 주요 시설물의 치수적인 안정성을 확보하기 위한 계획수립이 필요하고 해당 목적에서 본 연구성과가 활용될 수 있다.

현재 수행되고 있는 IPCC 5차 기후변화 관련된 주요 연구들은 주어진 시나리오에 기초할 때 평균적인 수문사상이 아닌 극한 수문사상이 어떻게 변화할지를 목적으로 하고 있다. 이러한 연구들은 주로 물리적인 기반의 대기 및 해양모형에 기초하여 장시간이 소요되는 수치모의에 기초하고 있다. 본 연구의 적용방법론은 이에 비해 비교적 간단하고 객관적인 절차로 구성된 수문기상학적인 방법을 이용하여 유사한 결과를 얻을 수 있다는 점에서 특징을 가진다. 본 연구를 통하여 추정된 특가능최대강수량의 향후 100년 이후의 증가폭은 약 40% 정도에 이를 것으로 예상되었다. 이러한 수치는 참고적인 수치로써 확률강우량의 기후변화에 따른 변동을 고려하는 것에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시예측 및 국가정책 지원강화사업(CATER 2012-3110)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Boorman, D.B. and Sefton, C.E.M. (1997) Recognizing the uncer-

- tainty in the quantification of the effect of climate change on hydrological response, *Climate change*, Vol. 35, pp. 415-434.
- Emanuel, K. (2005) Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, *Nature*, Vol. 436, pp 686-688.
- Gellens, D. and Roulin, E. (1998) Streamflow response of Belgian catchment to IPCC climate change scenarios, *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 242-258.
- Grotch, S.L. (1988) Regional intercomparisons of general circulation model predictions and historical data, Tech. Note DOE/NBB0084, US Dept. of Energy, Washington, D.C.
- Kerr, R.A. (2005) Is Katrina a harbinger of still more powerful hurricanes?, *Atmospheric Science*, Vol. 309, p. 1807.
- Kim, B., Kim, B., Kyung, M.S. and Kim, H.S. (2008) Impact Assessment of Climate Change on Extreme Rainfall and I-D-F Analysis, *Journal of Korea Water Resources Association*, vol. 41, No. 4, pp.379-394..
- Kite, G.W. (1993) Application of a land class hydrological model to climate change, *Water Resource Research*, Vol. 29, pp. 2377-2384.
- Korea Development Institute (KDI) (2007) Adequacy of Dam Design Criteria-PMP and PMF calculation.
- Korea Water Resources Association (KWWA) (2008) PMP and PMF calculation procedures guidelines.
- Lee, K. (1999) A hydrometeorological study on the maximum 12-h persisting dew point at 1000 hPa for moisture maximization of heavy precipitation recorded in South Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 35, No. 4, pp.519-530.
- Lettenmaier, D.P. and Gan, T.Y. (1990) Hydrologic sensitivities of the Sacramento-San Joaquin river basin, California, to global warming., *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 69-86.
- Meehl, G.A. and Tebaldi, C. (2004) More intense, more frequent and longer lasting heat waves in the 21st century, *Science*, Vol. 305, pp. 994-997.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2004) National PMP Map.
- Mirza, M.Q., Warrick, R.A., Ericksen, N.J. and Kenny, K.J. (1998) Trend and persistence in precipitation in the south asia, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 43, No. 6, pp. 845-858.
- Moon, I., Choi, U., Shim, J., and Park, K. (2007) Variations of Typhoon Intensity due to Climate Change, *2007 Spring Proceedings of Korean Meteorological Society*, pp. 312-313.
- National Institute of Meteorological Research (NIMR) (2007). The Application Report of Regional Climate Change Scenario for the National Climate Change (III).
- National Institute of Meteorological Research (NIMR) (2011). Report of Climate Change Scenarios in 2011 for the IPCC 5th Assessment Report.
- Natural Environment Research Center (1975) Flood Studies Report, Vol., Meteorological Studies, London, pp.38-41.
- Oh, J. (2007a). Future Typhoon Intensity Change : Climate Change Impact on East Asia Typhoon, *Climate Change 5th Workshop*, pp. 21-24.
- Oh, J. (2007b). Typhoon Simulation using GME model, *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 5, No. 2, pp. 9-13.
- Panagoulia, D. and Dimou, G. (1997) Sensitivity of flood events to global climate change, *Journal of hydrology*, Vol. 191, pp. 208-222.
- Prudhomme, C., Jakob, D. and Svensson, C. (2003) Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchment, *Journal of hydrology*, Vol. 277, pp. 1-23.
- Saelthun, N.R., Aittoniemi, P., Bergstrom, S., Einarsson, K., Johansson, T., Lindstom, G., Ohlsson, P.O., Thomsen, T., Vehrilainen B. and Aamodt, K.O. (1998) Climate change impacts on runoff and hydropower in the Nordic countries, *TemaNord*, Vol. 552, p. 170.
- Webster, P.J., Holland, G.J., Curry, J.A. and Chang, H.R. (2005) Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, Vol. 309, pp. 1844-1846.
- World Meteorological Organization (WMO) (1986) Manual for estimation of probable maximum precipitation 2nd Ed., Operational Hydrology Report No.1., Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization (WMO) (2008) Manual for estimation of probable maximum precipitation 3rd Ed., Operational Hydrology Report No.1., Geneva, Switzerland.
- Yoon, Y. (2007) *Hydrology*. Cheongmoongak.
- 建設省土木研究所水資源開発研究所. (1978). 日本の主要地点における可能最大日雨量－湿度補正法による推定結果－. 土木研究所資料, 土研資料第1392號.

◎ 논문접수일 : 2012년 12월 11일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 12월 13일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 12월 21일