

지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여
: 2. 지구 온난화에 따른 일강수량 분포의 변화 추정

On the Change of Flood and Drought Occurrence Frequency due to Global Warming
: 2. Estimation of the Change in Daily Rainfall Depth Distribution due to Global Warming

윤 용 남* / 유 철 상** / 이 재 수*** / 안 재 현****

Yoon, Yong Nam / Yoo, Chulsang / Lee, Jae Soo / Ahn, Jae Hyun

Abstract

In 60 years when the double CO₂ concentration is anticipated the average annual rainfall depth is expected to be increased by 5~10% due to global warming. However, in the water resources area the frequency change of meteorological extremes such as droughts and floods attracts more interests than the increase of annual rainfall amount. Even though recent frequent occurrences of this kind of meteorological extremes are assumed as an indirect proof of global warming, the prediction of its overall tendency has not yet been made. Thus, in this research we propose a possible methodology to be used for its prediction. The methodology proposed is based on the frequency distribution of daily rainfall by Todorovic and Woolhiser(1975), and Katz(1977), where the input parameters are modified to consider the change of monthly or annual rainfall depth and, thus, to result in the change of frequency distribution. We adopt two values(10mm, 50mm) as thresholds and investigate the change of occurrence probability due to the change of monthly and annual rainfall depth. These changes do not directly indicate the changes of occurrence probability of floods and droughts, but it may still be a very useful information for their prediction. Finally, the changes of occurrence probability were found to be greater when considering the monthly rainfall rather than the annual rainfall, and those in rainy season than those in dry season.

keywords: annual rainfall depth, monthly rainfall depth, frequency distribution of daily rainfall, global warming

요 지

지구온난화의 영향으로 배증 CO₂ 상태가 되는 약 60년 후의 한반도 평균강수량은 약 5~10% 정도의 증가로 예측되고 있다. 그러나 수 자원분야에서 평균강수량의 증가보다 더 중요한 것은 홍수 또는 가뭄과 같은 극치기상의 빈도 변화이다. 현재 국제적으로 이러한 극치기상의 빈번한 발생이 지구온난화의 한 증거로 받아들여지고 있기는 하나 그 양상이 어떻게 되리라고는 예측되고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 이러한 변화 양상을 예측해 보기 위한 방법론을 제시해 보는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서 사용한 방법은 Todorovic와 Woolhiser(1975), Katz(1977) 등의 일강수량 분포 관련 연구를 토대로 하여 월/연강수량의 변화에 따른 일강수의 특성을 매개변수의 변화로 고려하고 이를 통해 일강수의 분포변화를 예측하는 것이다. 본 연구에서는 두 일강수량(10mm, 50mm)을 임계치로 하여 월/연강수량의 변화에 따른 10mm이하 및 50mm이상의 발생확률을 조사하였다. 이러한 발생확률의 변화가 바로 가뭄과 홍수의 변화로 직결되지는 않으나 그 양상을 짐작하게 하는 좋은 지표가 될 수 있으리라 판단된다. 아울러 연강수량의 변화에 따른 일강수의 분포변화는 월강수의 변화를 고려하는 경우보다 그 정도가 작았으며, 특히 월강수량의 변화를 고려하는 경우 우기인 여름철에 그 발생빈도의 변화가 아주 큰 것으로 나타났다.

핵심용어 : 연강수량, 월강수량, 일강수빈도분포, 지구온난화

* 고려대학교 토목환경공학과 교수
 Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Korea Univ., Seoul 136 701, Korea

** 고려대학교 환경공학과 조교수
 Assistant Professor, Dept. of Envir. Eng., Korea Univ., Chungnam 339 700, Korea

*** 전주대학교 토목환경공학과 조교수
 Assistant Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Jeonju Univ., Jeonbuk 560 759, Korea

**** 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정
 Doctoral Student, Dept. of Civil & Envir. Eng., Korea Univ., Seoul 136 701, Korea

1. 서론

수문분야에서 지구온난화와 관련한 연구는 지구환경의 변화에 따른 강수량의 변화, 증발산량의 변화와 같은 양적인 변화뿐만 아니라 궁극적으로는 홍수나 가뭄과 같은 극단기상의 빈도변화에 까지 다양하다. 이들 중 연평균 강수량이나 평균온도의 변화에 따른 증발산량의 변화는 대기순환모형(General Circulation Model: GCM)을 이용하여 지구규모로 예측되고 있으며 국내의 경우는 주로 국외에서 개발되고 운영중인 여러 GCM의 결과를 수집, 한반도 주변 또는 동아시아 주변에 대해 각각의 결과를 개별적으로 또는 평균적으로 분석하여 결과를 얻고 있다. 그 분석은 통계적인 내삽방법이나 다중회귀분석을 주로 이용하여 추정하고 있다(한국과학기술연구원, 1993a, b; 한국과학기술연구원, 1994, 1995; 한국과학기술연구원과 시스템공학연구소, 1993, 1994, 1995). 특히 이러한 연구는 주로 지구온난화의 주원인으로는 뽑히는 대기중의 이산화탄소(CO₂) 가스의 양이 현재의 두배가 되는 시점을(대략 60여년으로 추정) 기준으로 하는 것이 일반적이다(오재호, 홍성길, 1995; 일본 건설성 토목연구소, 1996).

기상 및 수문분야에서 중요하게 고려되어야 할 부분이 집중호우 및 가뭄 등과 같은 극치기상의 빈도 변화이나 지구환경의 변화를 고려한 관련 연구는 현재 전무한 상태이다. 이는 무엇보다도 모형의 해상도 문제에서 그 원인을 찾을 수 있다. 즉, 모형을 이용한 결과는 면적평균치이나 관측된 자료는 한 지점에서의 값이기 때문에 상대적인 비교가 어렵게 된다. 아울러 현재의 연구수준으로 볼 때 GCM 또는 중규모/소규모의 모형을 이용한 연구는 면적 또는 시간평균의 측면에서 그 변화를 살펴보는 것이 상대적으로 더 큰 신뢰도를 갖는 것으로 알려져 있다(Frederick and Rosenberg, 1994).

본 연구에서는 이와 같은 지구온난화의 결과로 유발되는 연평균 또는 월평균 강수량의 변화(즉, GCM 결과에 근거해 추정한 변화)에 따른 월별 또는 연중 일 강수량의 초과확률의 변화에 대해서 고찰해 보고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Todorovic과 Woolhiser(1975), Katz(1977) 등에 의해 제안된 일 강수량의 초과확률 산정 방법을 살펴보고 이를 월 또는 연강수량의 변화와 연결시켜 초과확률의 변화에 예측해 볼 것이다. 본 연구는 급강유역을 대상으로 하여

수행하였으며 급강유역 내 30년 이상 관측이 수행된 총 17개 지점의 자료를 이용하여 모형의 매개변수 추정에 이용하였다.

2. 일강수량 분포와 관련한 이론적 고찰

Todorovic과 Woolhiser(1975)는 10일, 20일, 30일의 지속기간의 일강수량 대상으로 강수의 발생은 이항분포 또는 일차 마코프(Markov)과정을 이용하고 아울러 일강수량의 빈도분포는 지수분포를 따른다고 가정하여 통계적으로 분석한 바 있다. 또한 Huff(1967), Alexander(1981), Nguyen과 Rousselle(1981)의 경우는 호우기간 동안의 시강우분포를 유사한 방법으로 분석한 바 있다. 이들의 연구는 주로 강우의 분포특성과 발생확률을 규명하는 데 있었으며 이것의 특성의 변화 가능성에는 주목하지 않았다. 본 연구에서는 먼저 이들이 사용한 이론을 살펴보고 아울러 연강수량 또는 월강수량의 변화에 따른 일강수량의 발생확률의 변화를 살펴보고자 한다.

2.1 기본 정의

임의의 n 일을 대상기간으로 하여 일강수량을 분석하는 경우 먼저 다음과 같은 추계학적 변수, n_j 를 정의할 수 있다. 이 때 n_j 는 j 번째 일에 강수가 있을 경우 1의 값을 강수가 없을 경우 0의 값을 갖는다. j 의 경우 임의의 값을 가질 수 있으며 본 연구와 같이 연강수량을 대상으로 하는 경우 j 는 1에서 365의 값을 가지며, 월강수량을 대상으로 하는 경우는 1에서 30 또는 31의 값을 갖는다. 따라서 대상 기간 중 총 강수일수, N_n 은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 N_n 값은 0에서 n 의 값을 가질 수 있다.

$$N_n = \sum_{j=1}^n n_j \quad (1)$$

다음으로 n -일 기간 중 i 번째 강수를 b_i 로 나타내자. 여기서 i 는 1에서 N_n 의 값을 가지며 b_{i-1} 의 강수가 발생한 후 임의기간이 지난 후 발생한 다음 번의 강수를 의미한다. 즉 달력상의 일의 개념과는 다른 의미이다. 여기서 추계학적 변수 b_i 는 서로 독립이고 동일한 분포함수를 가지며(independent and identically distributed) 변수로 정의되고 아울러 N_n 과도 서로 독립이다. 이러한 정의를 이용하는 경우

n -일 동안 내리는 총 강수량은 다음과 같이 표현된다.

$$S(n) = \sum_{i=1}^{N_n} p_i \quad (2)$$

위 식으로부터 총 강수량에 대한 발생확률을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P\{S(n)=0\} = P\{n_1=0, n_2=0, \dots, n_n=0\} \quad (3)$$

따라서,

$$P\{S(n)>0\} = 1 - P\{S(n)=0\} \quad (4)$$

$S(n)$ 의 분포함수를 다음과 같이 정의하자.

$$F_n(x) = P\{S(n) \leq x\} \quad (5)$$

여기서, $x \geq 0$ 이다. 이 분포함수를 p_i 와 N_n 의 확률함수로 나타내기 위해 다음과 같은 과정이 필요하다.

$$\begin{aligned} P\{S(n) \leq x\} &= P\left\{\sum_{i=1}^{N_n} p_i \leq x, \bigcup_{k=0}^n \{N_n = k\}\right\} \quad (6) \\ &= \sum_{k=0}^n P\left\{\sum_{i=1}^k p_i \leq x, N_n = k\right\} \end{aligned}$$

앞에서의 정의대로 p_i 와 N_n 는 서로 독립이므로 다음의 관계를 이끌어 낼 수 있다.

$$P\{S(n) \leq x\} = \sum_{k=0}^n P\{X_k \leq x\} P\{N_n = k\} \quad (7)$$

여기서

$$X_0 = 0; X_k = p_1 + p_2 + \dots + p_k, k = 0, 1, \dots, n \quad (8)$$

따라서, $S(n)$ 의 분포함수는 다음과 같이 표현된다.

$$F_n(x) = P\{N_n = 0\} + \sum_{k=1}^n P\{X_k \leq x\} P\{N_n = k\} \quad (9)$$

위의 관계식으로부터 $S(n)$ 의 평균과 분산을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$E\{S(n)\} = aE\{N_n\} \quad (10)$$

$$\text{Var}\{S(n)\} = \beta E\{N_n\} + \alpha^2 \text{Var}\{N_n\} \quad (11)$$

여기서, $\alpha = E\{p_i\}$, $\beta = \text{Var}\{p_i\}$ 이다.

2.2 $P\{X_k \leq x\}$ 및 $P\{N_n = k\}$ 의 계산

분포함수 $F_n(x)$ 를 결정하기 위해서 먼저 다음 확률의 결정이 필요하다.

$$P\{X_k \leq x\} \text{ and } P\{N_n = k\}, k = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

$P\{X_k \leq x\}$ 의 결정을 위해서는 먼저 일강수량의 분포에 대한 정보가 필요하며 본 연구에는 지수분포를 가정하여 다음과 같은 누가분포를 이용한다.

$$H(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (13)$$

위의 가정과 p_i 가 서로 독립이라는 가정을 이용하여 다음과 같은 분포함수를 유도할 수 있다.

$$P\{X_k \leq x\} = \frac{\lambda^k}{(k-1)!} \int_0^x u^{k-1} e^{-\lambda u} du \quad (14)$$

또한, $P\{N_n = k\}$ 의 결정을 위해 본 연구에서는 n_i 가 다음과 같은 특성을 갖는 이항분포를 따르는 독립된 추계학적 변수의 계열로 가정한다. 즉,

$$P\{n_i = 1\} = p, 0 < p < 1; i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

이 경우 $P\{N_n = k\}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P\{N_n = k\} = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad (16)$$

이러한 해석은 n -일의 기간중 임의 날의 강수의 발생확률은 일정하며 어떤 다른 날의 강수의 발생과 독립이라는 것을 의미한다. 따라서,

$$F_n(x) = (1-p)^n \left[1 + \int_0^x e^{-\lambda u} \frac{\alpha_n(p, u)}{u} du \right] \quad (17)$$

여기서,

$$a_n(p, u) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\lambda p u}{1-p} \right)^k \frac{\binom{n}{k}}{(k-1)!} \quad (18)$$

흔히 이 모형의 경우를 이항-지수 강우모형이라고 부른다. 위 모형은 월별 일강수의 빈도를 고려하는 경우처럼 n 이 상대적으로 작은 경우에는 분포함수의 계산에 문제가 없으나 일년을 대상으로 하여 일강수의 빈도를 고려하는 경우에는 계산상 발산의 문제가 발생한다. 따라서 이 경우 분포함수의 계산을 위해서 주어진 분포함수를 조정할 필요가 있는데 이 경우 이용할 수 있는 이론적 근거가 중심극한정리(central limit theorem)이다. 즉, 중심극한정리에 의하면 n 이 상대적으로 큰 경우에 이항분포는 다음과 같이 정규분포로 근사화 할 수 있고,

$$\begin{aligned} P\{N_n = k\} &\approx N(np, np(1-p)) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi np(1-p)}} e^{-(k-np)^2/2np(1-p)} \end{aligned} \quad (19)$$

따라서,

$$\begin{aligned} F_n(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi np(1-p)}} \left[e^{-(np)^2/2np(1-p)} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^n \frac{\lambda^k e^{-(np-k)^2/2np(1-p)}}{(k-1)!} \int_0^x u^{k-1} e^{-\lambda u} du \right] \end{aligned} \quad (20)$$

위 식을 이용하면 강우가 x 이하가 되는 확률을 수치적분하여 계산할 수 있다.

2.3 임의의 임계치를 고려하는 경우

본 연구에서와 같이 임의의 임계치 이상을 고려하는 경우, 즉 10mm나 50mm이상 또는 이하의 강수를 고려해야 되는 경우, 우리는 n 일의 기간 중 $p_i \geq T$ 에 대한 분포함수를 정의할 필요가 생긴다. 이 경우 일강수는 다음과 같은 절단지수분포(truncated exponential distribution)를 따르게 되고

$$H(x) = 1 - e^{-\lambda(x-T)}, \quad T \leq x < \infty \quad (21)$$

k -기간동안의 강수총량은 다음의 분포함수를 따르게 된다.

$$P\{X_k \leq x\} = \frac{\lambda^k}{(k-1)!} \int_0^{x-kT} u^{k-1} e^{-\lambda u} du \quad (22)$$

이때 $kT \leq x$ 이다. n 일 기간동안의 강수에 대한 $p_i \geq T$ 의 발생 확률은 앞에서 정의한 p 를 이용하는 경우는 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\begin{aligned} p_T &= P\{p_i \geq T\} p \\ &= p e^{-\lambda T} \end{aligned} \quad (23)$$

따라서 n -일 기간동안의 강수 총량이 x 보다 작은 확률은 다음과 같이 정의된다.

$$F_n(x) = (1-p_T)^n \left[1 + \int_0^x e^{-\lambda u} \frac{a_n(p_T, u)}{u} du \right] \quad (24)$$

3. 월/연강수량의 변화에 따른 일강수량 분포의 변화 추정

3.1 기존의 연구 결과 (GCM 이용 결과) 및 이에 따른 일강수의 분포 추정

대기중의 CO₂ 변화에 따른 한반도 강수량의 변화(오재호, 홍성길, 1995)에서는 3개의 GCM(CCC, UI와 GFDL GCM) 모의 결과에 근거한 한반도의 연강수량 변화를 CO₂의 배증에 따라 봄, 여름, 가을철에 10%, 13%, 24%의 증가를 겨울철에는 현재보다 약간의 감소(약 13mm/year)를 추정할 바 있다. 사용된 방법은 혼합적인 방법으로 GCM결과와 과거 관측자료를 다중회기 분석하여 얻은 것이다.

기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경 관련 대책 연구(한국과학기술연구원, 1994, 1995)에서는 5개의 GCM(GFDL-R30, CCC, GISS, UKMO와 GFDL GCM) 모의 결과에 근거한 한반도의 연강수량 변화를 추정하였으며 CO₂의 배증에 따라 연평균 약 -5%~25%의 증가율, 계절별로는 -30%~35%의 증가를 예측하고 있다. 이와 같은 결과는 각 GCM 모의 결과의 차이를 나타내는 것이며, 이는 각 GCM속의 역학적, 물리적 과정의 차이뿐만 아니라 전환함수를 산출하는 방법도 충분히 객관적이지 못하다는 점을 그 원인으로 생각할 수 있다. 따라서 각 GCM의 결과에는 상당한 불확실성이 내재되어 있다는 점을 주의할 필요가 있다. 하지만 현재까지 GCM이외에 기후변화를 예측할 수 있는 적절한 도구는 없는 실정이며 관련연구도 이러한 결과에 근거할 수밖에 없는 실정이다.

위의 두 연구결과를 월별로 요약하면, 물론 어떠한

표 1. GCM에 근거한 1CO₂와 2CO₂ 상황에서의 남한내 월별 강수량의 변화
(한국과학기술연구원, 1995)

(단위 : %)

GCM	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
GFDL-R30	110	110	100	110	100	90	100	120	170	120	120	130	113
CCC	70	60	90	100	100	120	120	100	150	140	70	70	104
GISS	100	110	110	120	140	70	90	120	120	100	90	120	106
UKMO	100	110	80	130	80	80	150	80	120	90	90	110	99
GFDL	100	90	110	90	120	80	110	100	90	80	100	100	94
Mean (Min~Max)	96 (70~110)	96 (60~110)	98 (80~110)	110 (90~130)	108 (80~140)	88 (70~120)	114 (90~150)	104 (80~120)	130 (90~170)	106 (80~140)	94 (70~120)	106 (70~130)	103 (94~113)

GCM이나에 따라 그 결과가 상이하기는 하나 평균적으로서는 표 1과 같이 요약할 수 있다.

3.2 금강유역의 일강수 발생확률 및 지수분포 적용을 위한 매개변수추정

1장에서 논한 분포함수의 적용에 필요한 매개변수는 월별 또는 연강수량의 특성을 반영하게 되는데 월별

평균 강수일수 및 연평균 강수일수, 월별 평균 강수량 및 연평균 강수량 등을 이용해 쉽게 추정할 수 있다. 금강유역 17개 지점에 대한 30개년 일강수자료를 이용하여 추정한 월별 또는 연 강수발생확률(p) 및 일강수의 분포를 지수분포로 가정하는 경우 필요한 매개변수 λ 의 추정치 및 이들의 산술평균은 그림 1과 같다. 그림 1에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 강수발생확률의

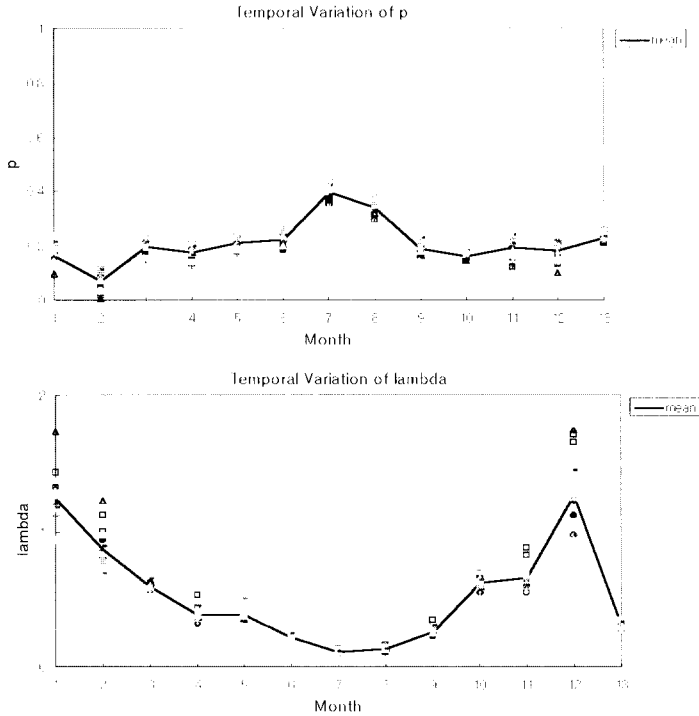


그림 1. 금강유역에 대한 매개변수 p 및 λ 의 추정치
(13월에 해당하는 값이 연평균값임)

공간적 변동폭보다는 강수 깊이의 공간적 변동폭이 훨씬 큼을 알 수 있다.

3.3 월강수량 및 연강수량의 변화에 따른 매개 변수의 변화

앞 절에 나타난 결과는 과거 30년의 평균에 대한 것으로서 총강수량의 변화에 대한 각 매개변수의 변동을 나타내고 있지는 못하다. 따라서 지구환경의 변화로 인한 연/월강수량의 변화, 아울러 이에 따른 일정깊이 이상의 일강수 발생의 변화를 살펴보는 데는 총강수 깊이와 이에 따른 매개변수의 변화를 살펴보아야 한다.

먼저, 월 또는 연강수량의 변화에 따른 강수확률의 변화는 과거 자료에 근거한 선형회귀식을 이용해 추정해 볼 수 있다. 연강수량과 무강수일수와의 상관계수는 윤용남 등(1999)의 연구에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 대략 0.3정도로 매우 작게 나타나고 있다. 하지만 전체적으로 총 강수량이 많을수록 무강수일수가 작아지는 경향을 발견할 수 있으므로 본 연구에서는 금강유역의 17개 지점에 대해 회귀분석(표 2)을 각각 시행하고 이들을 평균하여 다음과 같은 회귀식을 추정하였다.

$$N_0 = 317.7 - 0.0323P_{year} \quad (25)$$

여기서, N_0 는 무강수일수, P_{year} 는 연강수량을 나타낸다.

아울러 강수확률, p 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$p = \frac{365 - N_0}{365} = \frac{47.3 + 0.0323P_{year}}{365} \quad (26)$$

표 2. 연/월강수량(P_i)과 무강수일수(N_i)와의 선형회귀결과 및 강수확률(p_i)

Month	N_i	p_i
1	$N_1=28.31-0.085P_1$	$p_1=(31-N_1)/31$
2	$N_2=27.24-0.036P_2$	$p_2=(28-N_2)/28$
3	$N_3=27.78-0.041P_3$	$p_3=(31-N_3)/31$
4	$N_4=27.19-0.023P_4$	$p_4=(30-N_4)/30$
5	$N_5=27.16-0.023P_5$	$p_5=(31-N_5)/31$
6	$N_6=26.82-0.017P_6$	$p_6=(30-N_6)/30$
7	$N_7=24.32-0.015P_7$	$p_7=(31-N_7)/31$
8	$N_8=25.46-0.014P_8$	$p_8=(31-N_8)/31$
9	$N_9=28.16-0.029P_9$	$p_9=(30-N_9)/30$
10	$N_{10}=28.68-0.044P_{10}$	$p_{10}=(31-N_{10})/31$
11	$N_{11}=27.29-0.070P_{11}$	$p_{11}=(30-N_{11})/30$
12	$N_{12}=26.24-0.060P_{12}$	$p_{12}=(31-N_{12})/31$
Annual	$N_{annual} = 317.7 - 0.0323P_{annual}$	$p_{annual} = (365 - N_{annual})/365$

배증 CO_2 를 고려하는 경우에 연평균강수량은 앞에서 언급한 바와 같이 GCM에 따라 약 -4~+13% (평균: +3%)의 변화가 예측되고 있고, 이 경우에 강수일수의 변화는 대략 +2~5일 (평균: -1일)로 나타나며 이에 따른 강수확률은 약 0.184~0.203(평균: 0.193)으로 과거 30년의 평균강수확률(약 0.190)과 비교할 경우 그 차이가 크게 나타나지는 않는다.

배증 CO_2 에 따른 월강수량의 변화는 연강수량의 경우보다 그 변화 폭이 더 큰 것으로 나타나고 있으며 (약 30~+30%), 이에 따른 무강수일수 및 강수확률도 그 변화 폭이 더 크게 나타나게 된다. 이를 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 월/연강수량의 변화에 따른 무강수일수 및 강수확률의 변화

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
강우변화	0.96	0.96	0.98	1.1	1.08	0.88	1.14	1.04	1.3	1.06	0.94	1.06	1.03
Mean (ratio)	(0.7-	(0.6-	(0.8-	(0.9-	(0.8-	(0.7-	(0.9-	(0.8-	(0.9-	(0.8-	(0.7-	(0.7-	(0.94-
(Min. Max.)	1.1)	1.1)	1.1)	1.3)	1.4)	1.2)	1.5)	1.2)	1.7)	1.4)	1.2)	1.3)	1.13)
건조일수변화	26.3	26.1	25.7	25.2	25.2	24.8	19.6	22.1	23.9	26.3	24.3	24.7	281
Mean (days)	(26.8	(26.5	(26.1	(25.6	(25.7	(25.2	(20.6	(22.8	(25.2	(26.9	(25.1	(25.2	(284
(Min. Max.)	26.0)	25.9)	25.4)	24.9)	24.6)	24.1)	18.2)	21.5)	22.6)	25.6)	23.5)	24.3)	277)
Changes in p	0.152	0.068	0.171	0.160	0.187	0.173	0.368	0.287	0.203	0.152	0.190	0.203	0.193
Mean	(0.135-	(0.054-	(0.158-	(0.147-	(0.171-	(0.160-	(0.335-	(0.265-	(0.160-	(0.132-	(0.163-	(0.187-	(0.184-
(Min. Max.)	0.161)	0.075)	0.181)	0.170)	0.206)	0.197)	0.413)	0.306)	0.247)	0.174)	0.217)	0.216)	0.203)
Changes in λ	1.299	0.901	0.610	0.352	0.358	0.252	0.099	0.128	0.204	0.585	0.699	1.190	0.31
Mean	(1.754-	(1.449-	(0.763-	(0.429-	(0.485-	(0.316-	(0.126-	(0.166-	(0.296-	(0.775-	(0.943-	(1.818-	(0.34-
(Min. Max.)	1.149)	0.787)	0.541)	0.298)	0.277)	0.185)	0.076)	0.111)	0.157)	0.442)	0.549)	0.980)	0.28)

3.4 월강수량 및 연강수량의 변화에 따른 가뭄 및 홍수의 발생확률 변화

여기서는 가뭄의 경우 강수가 발생하더라도 그 깊이가 10mm 이하일 확률과, 홍수의 경우는 50mm 이상일 확률과 관계 있다고 가정하고 월강수량 및 연강수량의 증감에 따른 변화를 살펴보았다. 본 연구에서 사용하고 있는 임계값이 반드시 가뭄과 홍수를 완벽하게 대변하리라고 보지는 않으나 앞서의 강우자료 분석에서 살펴본 바와 같이 총강수량의 변화와 큰 상관을 보이는 이 두 임계값을 고려함으로써 결과의 신뢰도를 높이고 아울러 이를 통해 가능한 경향의 변화를 판단해 보는데 이용하고자 하였다.

그림 2는 과거 30년자료의 평균 및 배증 CO₂의 상황을 고려한 각 GCM 모의 결과의 평균치, 최저치 및

최고치에 대해 강수가 발생하는 경우 그 깊이가 임의 깊이가 (그림에서 x-축) 이하일 확률을 월별 및 일년을 대상으로 하였을 경우로 나누어 나타낸 것이다. 이 그림에서는 먼저 강수가 일정깊이 이상일 확률이 우기(예를 들어 7, 8, 9월)와 건기(예를 들어 12, 1, 2월)에 뚜렷한 차이를 가지고 나타남을 살펴 볼 수 있다. 즉, 9월의 경우 강수가 발생했을 경우 그 깊이(일강수 깊이)가 10mm 이상(이하)일 확률은 대략 0.7이상(0.3이하)으로 나타나나 2월의 경우 그 확률은 0.05이하(0.95 이상)로 확인한 차이를 보여주고 있다.

그림 2는 또한 표 3에서 추정한 매개변수를 이용하여 강수가 발생하였을 경우 그 깊이가 일정 깊이 이하일 확률이 월별로 어떻게 달라지는 지를 보여주고 있다. 이러한 변화는 건기보다는 우기의 경우에 크게 나타나고 있는데 이는 총강수량이 증가한다는 GCM의

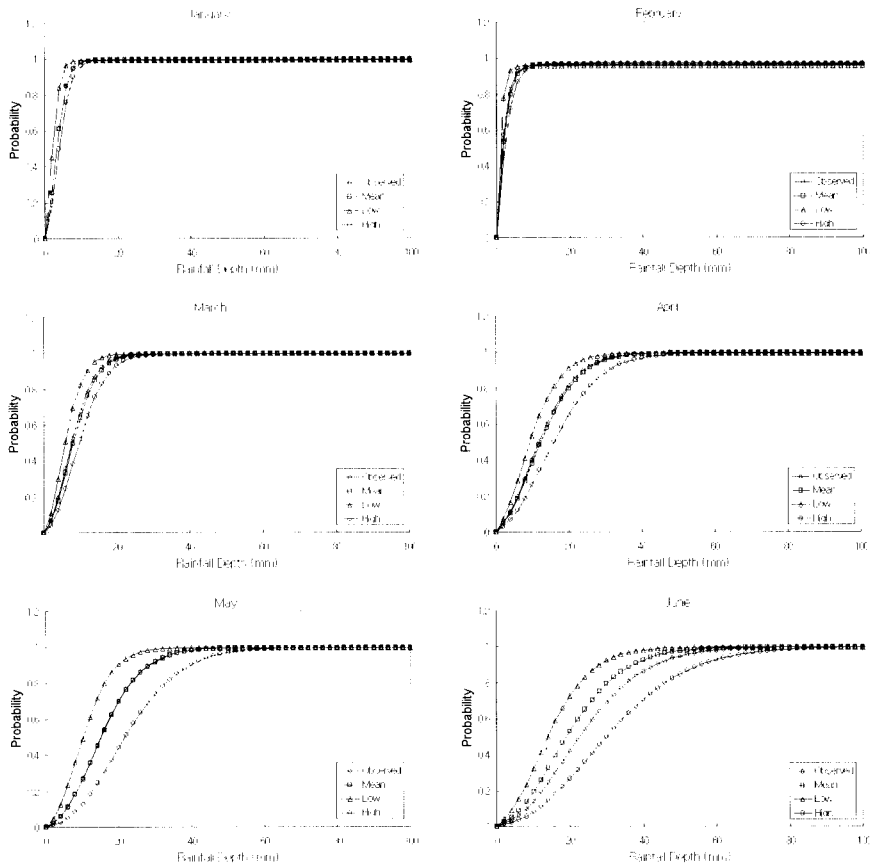


그림 2. 월별 관측자료 및 배증 CO₂의 GCM 모의 결과에 대해 발생한 일강수의 깊이가 임의 깊이가 이하일 확률

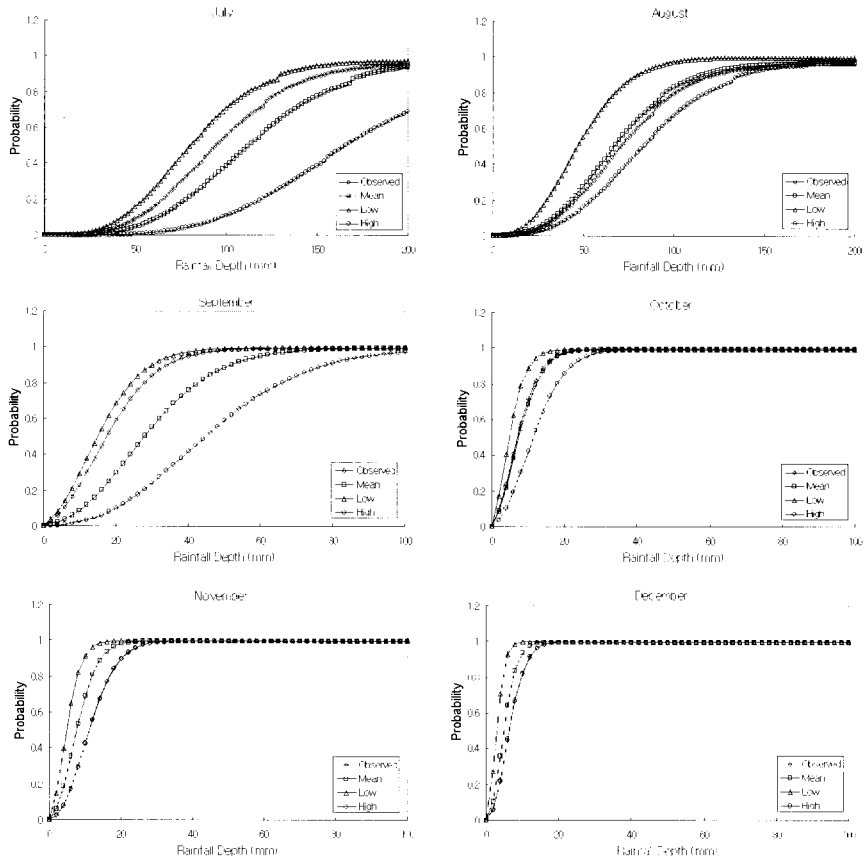


그림 2. 월별 관측자료 및 배증 CO₂의 GCM 모의 결과에 대해 발생한 일강수의 깊이가 임의의 깊이 이하일 확률(계속)

표 4. 배증 CO₂의 상황에서 일강수 깊이가 10mm 이하일 확률의 변화

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Based on Observed Data	0.984	0.963	0.676	0.402	0.272	0.143	0.001	0.004	0.229	0.716	0.429	0.819	0.167
Calculated Probability: Mean (Min. - Max.)	0.984 (0.965 - 0.993)	0.963 (0.957 - 0.969)	0.644 (0.524 - 0.824)	0.381 (0.263 - 0.536)	0.268 (0.131 - 0.493)	0.196 (0.082 - 0.323)	0.001 (0.000 - 0.002)	0.005 (0.003 - 0.016)	0.088 (0.024 - 0.294)	0.688 (0.424 - 0.890)	0.692 (0.426 - 0.917)	0.936 (0.823 - 0.996)	0.209 (0.154 - 0.273)

표 5. 배증 CO₂의 상황에서 일강수 깊이가 50mm 이상일 확률의 변화

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Based on Observed Data	0.004	0.034	0.003	0.005	0.004	0.053	0.911	0.759	0.015	0.005	0.001	0.001	0.013
Calculated Probability: Mean (Min. - Max.)	0.004 (0.003 - 0.006)	0.032 (0.028 - 0.041)	0.003 (0.002 - 0.004)	0.005 (0.004 - 0.009)	0.004 (0.003 - 0.029)	0.024 (0.006 - 0.154)	0.954 (0.842 - 0.993)	0.732 (0.448 - 0.842)	0.114 (0.009 - 0.419)	0.004 (0.003 - 0.007)	0.002 (0.001 - 0.004)	0.001 (0.001 - 0.002)	0.013 (0.005 - 0.023)

결과에 근거하여 지구온난화에 따라 특히 홍수의 빈도 변화가 기문의 빈도변화보다 크게 나타날 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있을 것이다. 표 4와 5는 그림 2로 나타난 결과 중에서 일강수깊이 10mm와 50mm의 경우에 대한 것을 정리한 것이다.

그림 3은 대상기간을 일년으로 하였을 경우에 강수 깊이가 일정깊이 이하의 확률을 나타내고 있다. 여기서 주목할 사항은 대상기간을 일년으로 하여 추정된 확률이 월별로 추정된 확률을 일년의 기간에 대해 평균한 값과 크게 다르지는 않다는 점이다. 이런 결과는 무엇보다도 각 GCM의 모의 결과가 연평균에 대해서는 상대적으로 변동폭이 작은 값을 주지만 월평균치에 대해서는 상당히 다른 결과를 주고 있다는 점에서 그 원인을 찾을 수 있다. 즉, 일년의 기간에 대해 평활화(smoothing)된 결과를 이용하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 훨씬 적은 차이를 주는 것은 당연하다고 할 수 있다. 아울러, 상대적으로 많은 양의 강수가 발생하는 우기에서의 변화가 전체적인 결과에 많은 영향을 미치고 있음을 살펴볼 수 있었다. 이와 같은 차이는 본 연구에서 정한 임계값 10mm와 50mm에 대해 표 6에 정리하였다.

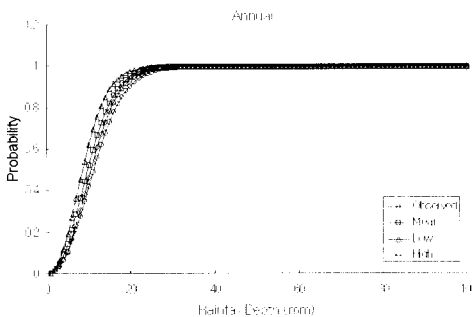


그림 3. 연도별 관측자료 및 배증 CO₂의 GCM 모의 결과에 대해 발생한 일강수의 깊이가 임의 깊이 이하일 확률

표 6. 대상기간을 월로 하는 경우와 일년으로 하는 경우 일강수 깊이가 10mm 이하 또는 50mm 이상일 확률

	10mm 이하	50mm 이상
Annual	0.209	0.013
Monthly	0.434	0.156

4. 결 론

지구온난화의 영향으로 배증 CO₂ 상태가 되는 약 60년후의 한반도 평균강수량은 대략 5~10%정도 증가하는 것으로 예측되고 있다. 본 연구에서는 이러한 예측 결과를 근거로 하여 홍수 또는 가뭄과 같은 극치기상의 빈도 변화를 예측해 볼 수 있는 방법에 대해 고찰해 보았다. 먼저, 본 연구에서는 Todorovic과 Woolhiser(1975), Katz(1977) 등의 일강수분포 관련 연구를 토대로 월/연강수량의 변화가, 즉, 월/년도별 강수 또는 무강수 확률 및 평균 일강수강도의 변화가 일강수의 분포에 반영될 수 있게 하였으며, 이를 통해 일정 깊이 이상 일강수의 발생 빈도 변화를 추측해 볼 수 있게 하였다. 이미 윤용남 등(1999)의 연구에서 밝힌 바와 같이 가뭄해는 무강수일수보다는 무강수일수를 포함한 10mm이하의 강수일수와, 홍수해의 경우는 50mm이상의 강수일수와 큰 상관을 보임으로써 이 두 일강수량을 임계지한 분석이 다른 강수깊이의 사용하는 경우에 비해 신뢰도가 높음을 알 수 있었다. 본 연구에서도 이 두 값을 임계치로 하여 월/연강수량의 변화에 따른 발생확률의 변화를 조사하였으며, 이를 통해 가뭄과 홍수 빈도의 변화 양상을 추측해 보는데 이용되도록 하였다. 물론 이 두 값의 발생확률이 홍수나 가뭄의 발생을 완벽히 설명하리라고 판단하지는 않으나 그 양상을 어느 정도 짐작할 수 있게 하는 좋은 지표가 될 수 있으리라 판단한다.

아울러, 연강수량의 변화에 따른 일강수의 분포변화는 월강수의 변화를 고려하는 경우보다 그 정도가 훨씬 작았으며, 특히 월강수량의 변화를 고려하는 경우 우기인 여름철에 그 발생빈도의 변화가 아주 큰 것으로 나타났다. 이는 물론 GCM으로 모의된 결과를 월별 또는 연도별로 평균함으로써 평활화(smoothing)된 정도를 반영한 결과이다. 국내의 경우는 우기와 건기의 뚜렷한 차이를 보임으로 월별 또는 계절별 변화를 살펴보는 것이 더 적절하다고 판단된다.

마지막으로 본 연구에서 얻은 결과는 GCM 모의 결과를 근거로 하여 얻은 것이라는 것을 밝혀두고 싶다. 이미 본문에서 살펴본 바와 같이 GCM의 모의 결과는 어느 GCM을 사용하느냐에 따라 매우 다르게 나타나고 있어 이에 대한 신뢰도 문제는 바로 본 연구결과와 신뢰도로 연결된다고 할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과도 그러한 측면에서 이해되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 국제수문계획(IHP)의 연구지원 및 한국과학재단의 장려센터로 지정된 고려대학교 방재과학기술연구센터의 연구지원으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

오재호, 홍성길 (1995). “대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제3호, pp. 143-157.

윤용남, 유철상, 이재수, 안재현 (1999). “지구온난화에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도의 변화와 관련하여(1. 연/월강수량의 변화에 따른 일강수 분포의 변화분석: 금강유역을 중심으로).” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 인쇄중.

일본 건설성 토목연구소 (1996). 지구온난화가 일본 지역에서 수문순환에 미치는 영향의 예측에 관한 보고서, 일본 건설성.

한국과학기술연구원 (1993a). 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움 : II. 해양, 수문학 분야, 기상청.

한국과학기술연구원 (1993b). 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움 : IV. 기후변화 예측시나리오, 기상청.

한국과학기술연구원 (1994). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구 (I), 과학기술처.

한국과학기술연구원 (1995). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(II), 과학기술처.

한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1993). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(I), 환경부, 과학기술처.

한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1994). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(II), 환경부, 과학기술처.

한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1995). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(III), 환경부, 과학기술처.

Alexander, K. (1981). “Determination of rainfall duration statistics for rain-out models from daily records.” *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 3, pp. 521-528.

Frederick, K. D. and Rosenberg, N. J. (1994). Assessing the impact of climate change on natural resource systems, *reading*, Kluwer Academic Publishers.

Huff, F. A. (1967). “Time distribution of rainfall in heavy storm.” *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.

Katz, R. W. (1977). “Precipitation as a chain-dependent process.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, No. 7, pp. 671-676.

Nguyen, V. T. V. and Rousselle, J. (1981). “A stochastic model for the time distribution of hourly rainfall depth.” *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 2, pp. 399-409.

Todoroviv, P. and Woolhiser, D. A. (1975). “A stochastic model of n day precipitation.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 17-24.

(논문번호:99-035/접수:1999.05.04/심사완료:1999.09.18)