

# 기후변화 시나리오에 따른 일 강우자료의 카오스적 시간분해

## Chaotic Disaggregation of Daily Rainfall from the Climate Change Scenarios

경민수\*, Bellie Sivakumar\*\*, 김형수\*\*\*, 김병식\*\*\*\*  
Min Soo Kyung, Bellie Sivakumar, Hung Soo Kim, Byung Sik Kim

### 요 지

지구온난화로 인한 기후변화가 기정사실화 되면서 이러한 기후변화에 대비하기 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 수자원과 관련된 기후변화 연구를 살펴보면 초기에는 장기적 관점에서 기후변화가 유출에 미치는 영향에 대한 연구가 대부분을 이루고 있었으나 2003년을 기점으로 유럽을 중심으로 기후변화가 홍수량에 미치는 영향에 대한 연구가 시작되었다. 기후변화가 홍수에 미치는 영향을 평가하는데 가장 중요한 것은 수문시계열 자료의 해상도라고 할 수 있다. 이러한 시공간적 해상도 문제를 해결하기 위해서 세계 각국은 각국의 상황에 맞는 RCM을 개발하고 있으며 자국에 적합한 축소기법을 개발하고자 노력하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고해상도 수문기상자료의 생성을 위하여 기후변화 모형으로부터 생성된 일 단위 강우자료를 시자료로 분해하기 위한 기법을 제시하고자 한다. 지난 수십년 동안 강우나 기타 수문시계열 자료를 다양한 해상도의 자료로 변환하기 위한 연구가 진행되어왔다. 그러나 이러한 연구의 가장 큰 한계점은 대부분의 시계열 자료가 추계학적 특성을 가지고 있다고 가정한 후, 분석을 진행했다는 것이다. 이렇게 되면 강우발생에 따른 물리적 과정을 모형의 구조에 반영하는데 한계점을 드러내게 된다. 따라서 본 연구에서는 해상도를 변화시키는데 따른 강우의 운동역학적 특성을 고려하기 위하여 카오스를 기반으로 한 분해기법을 제시하고자 한다. 우선 카오스 분석을 통해서 지점 강우자료의 카오스 특성을 확인한 후, 현재까지 관측된 강우를 기반으로 2CO<sub>2</sub>에서의 일 강우를 일 단위 보다 작은 단위로 분해하였다.

**핵심용어** : 기후변화, 카오스, 분해기법, 홍수

### 1. 서 론

기후변화에 대한 사회적 관심이 증가하면서 기후변화연구에 대한 사회적 요구가 증가하고 있다. 현재까지 우리나라의 기후변화 관련 연구를 살펴보면, 대부분의 연구가 이수측면에서 수자원에 미치는 영향평가가 대부분을 차지하고 있다. 기후변화 연구에 있어서 홍수에 미치는 영향을 평가하는 것이 중요하기는 하나, 기후변화 모형을 통해서 모의되는 결과들의 시공간적 해상도 문제로 인하여 홍수관련 연구는 실제로 많이 이루어지지 못하고 있는 것이 현실이다. 그러나 영국을 중심으로 한 기후변화관련 연구의 선진국에서는 기후변화가 홍수에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구가 진행 중에 있으며, 이 들은 대부분 극한사상 재현을 위한 축소기법 개발과 불확실성 평가에 초점을 맞추고 있다(PRUDENCE project, STARDEX project). 따라서 이상홍수로 인한 피해가 증가하고 있는 상황에서 국내의 경우도 기후변화의 영향을 홍수측면에서 분석하는 연구

\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : gigatg@inha.ac.kr

\*\* Department of Land, Air and Water Resources, University of California, Davis, USA · E-mail : Sbellie@ucdavis.edu

\*\*\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 교수 · E-mail : hungkim@inha.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · E-mail : hydrokbs@kict.re.kr

가 필요한 시점이라고 하겠다. 이에 본 연구에서는 GCM/RCM으로부터 얻어진 일 단위의 수문 시계열 자료를 시단위로 분해하기 위한 기법을 제안하고자 한다. 수문분야에서 분해를 위해서 사용되는 대표적인 모형은 Rodriguez-Iturbe(1987,1988)에 의해서 개발된 BLRPM(Bartlett Lewis Rectangular Pulses Model) 이다. Bo et al., (1994)은 이를 발전시켜 분해모형을 개발하였으며, 이외에도 Econopouly et al(1990), Arnold and Williams(1989), Cowpertwait et al. (1996) 등에서 다양한 분해기법을 제시하였다. 이러한 모형들의 특징을 살펴보면 대부분 통계나 추계를 기반으로 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Sivakumar et al(2001)에서는 강우의 카오스 특성을 이용한 분해가 가능함을 제시하였고 이는 확정론적 이론에 근거한다는 점에서 다른 연구들과 구별된다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서도 확정론적 방법인 카오스를 이용한 분해기법을 GCM의 결과에 적용하여 고해상도 수문 시계열 자료를 생성하고자 한다. 이를 통하여 향후 발생할 기후변화가 홍수에 미치는 영향을 평가하는데 필요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 생각한다.

## 2. 연구내용

본 연구에서는 기후변화가 홍수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 카오스 이론을 이용한 분해기법을 소개하고 이러한 분해기법을 기후변화 모형에 적용하는 방안에 대하여 연구를 진행하였다.

### 2.1 기후변화가 홍수에 미치는 영향에 대한 연구동향

세계적으로 기후변화관련 연구동향을 살펴보면 2003년까지는 주로 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 이수측면에서 평가하는 연구가 주를 이루고 있었다. 그러나 2003년을 기준으로 이수측면에서의 기후변화의 영향평가와 더불어 영국 등 유럽국가들을 중심으로 기후변화가 홍수에 미치는 영향의 평가에 대한 연구가 증가하기 시작하였다(Christel Prudhomme et al.,(2003), Alison et al.,(2006)). 국내의 경우, 1990년대부터 기후변화관련 연구를 시작하여 2000년대 초반을 기점으로 본격적인 기후변화 관련 연구가 시작되어 현재에 이르고 있다. 국내연구를 살펴보면 대부분이 기후변화가 이수측면에서 수자원에 미치는 영향평가가 대부분이며, 아직까지 이수측면에서 기후변화가 미치는 영향을 평가한 사례는 많지 않은 것으로 조사되었다. 기후변화가 홍수에 미치는 영향을 평가하는데 가장 큰 문제점은 기후변화 모형의 결과가 가지고 있는 해상도 문제이다. 기후변화 모의에 주로 쓰이는 대기순환 모형인 GCM의 경우, 대부분 200km ~ 300km의 공간적 해상도를 가지게 된다. 이를 기반으로 등지모형을 이용하여 축소하면 90km ~ 20km 규모의 RCM자료를 얻을 수 있다. 시간적 해상도의 경우, 3시간 단위까지 모의가 되는 것으로 알려져 있으나 불확실성 때문에 일반적으로 일단위 자료를 대부분의 연구에서 사용하고 있다. 이러한 시공간적 해상도 제약으로 인한 한계점 때문에 기후변화관련 연구에서 홍수에 대한 연구가 이수측면에서의 연구보다 늦게 시작되었다고 볼 수 있다. 본 연구에서 제시하고자 하는 분해기법은 현재 영국의 Tyndall 센터 에서도 진행되고 있는 연구분야로 NSRPM을 이용한 연구를 진행하고 있다(BETWIXT project). 이와는 다르게 본 연구에서는 카오스이론을 이용하여 확정론적 접근을 통한 연구를 진행하고자 한다.

### 2.2 국내강우 자료의 카오스 특성보유여부 확인

카오스이론은 아직까지 생소한 학문으로 특히 시계열자료에서 카오스 특성을 확인하는 연구는 아직까지 초기단계이다. 그럼에도 불구하고 카오스 이론은 자연과학이나 물리학분야에서 다양하게 적용이 되고 있다. 카오스 특성을 분석하는데 일반적으로 사용되는 것이 상관차수(Correlation dimension)을 이용한 방법으로 수문현상을 연구하는 경우에도 가장 많이 사용하고 있는 방법이다. 본 연구에서도 상관차수방법을 이용하여 국내 강우자료가 카오스특성을 보이는지에 대한 연구를 진행하였다. 수문시계열자료에 카오스이론을 적용하는데 가장 큰 문제점은 자료의 개수, 지체시간, 노이즈 문제이다. 그러나 노이즈 문제의 경우, Sivakumar(1999,2000)에서 상관차수에 크게 영향을 주지 않는다는 연구결과를 확인하였다. 따라서 상관차수를 이용한 카오스 분해의 경우, 노이즈로 인한 영향은 배제할 수 있을 것으로 생각된다. 상관차원방법은 우선 시계열 자료를 이용해서  $Y_j$  벡터를 생성한 후,  $Y_j$  벡터들을 대상으로  $r$ 의 반지름을 가지는 원을 그렸을 때 몇 개의 다른  $Y_j$  벡터가 포함되는 지를 나타내는 상관함수

(Correlation function,  $C(r)$ )를 산정해야 한다. 우선  $Y_j$  벡터를 구하는 과정은 다음과 같다.

주어진 시계열 자료를  $X_i, i=1,2,3,\dots,N$  라고 하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y_j = (X_j, X_{j+\tau}, X_{j+2\tau}, \dots, X_{j+(m-1)\tau})$$

$j \rightarrow 1, 2, \dots, N-(m-1)\tau/\Delta t$   
 $\Delta t \rightarrow$  Sampling Frequency

여기서  $m$ 은 Embedding dimension 이고  $\tau$  는 지체시간이다.

주어진 시계열 자료를  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$  라고 하고 Embedding dimension=2, 지체시간을 1로 가정하면  $Y_j$ 는 다음과 같다.

$$Y_j = (X_j, X_{j+1})$$

$$Y_1 = (X_1, X_2), Y_2 = (X_2, X_3), Y_3 = (X_3, X_4), Y_4 = (X_4, X_5), Y_5 = (X_5, X_6)$$

모든  $Y_j$  벡터를 연결하면 그림1을 얻을 수 있고, 이 그림을 Phase space라고 한다.

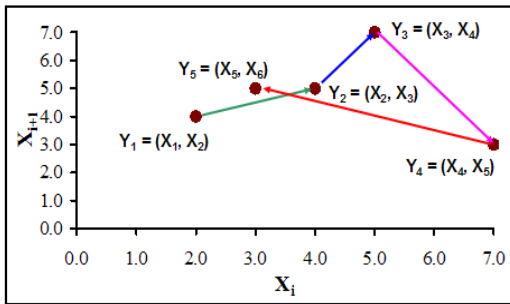


그림 1 Phase space (  $m=1, \tau=1$  )

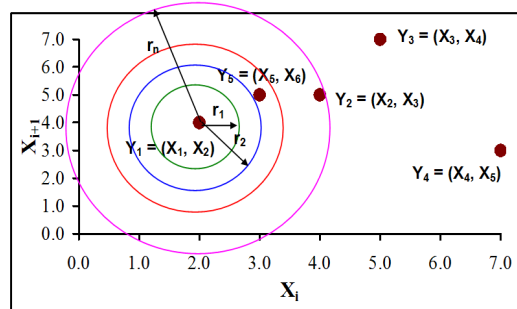


그림 2 r에 따른 상관함수 계산 개념

$Y_j$  벡터가 계산되면, 이를 이용하여 상관함수를 계산할 수 있다. 상관함수를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$C_r = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{(1 \leq i < j \leq N)} H(r - |Y_i - Y_j|)$$

여기서  $H$  는 Heaviside step function 으로  $u > 0$  이면  $H(u)=1$  이고,  $u \leq 0$  이면,  $H(u)$ 는 0이 된다. 이를 그림으로 나타내면 그림2와 같다.

구해진  $C_r$  값은  $r$  과 다음과 같은 관계를 가진다. 여기서  $v$ 는 상관지수를 나타낸다.

$$C(r) \sim ar^v (r \rightarrow 0, N \rightarrow \infty) , v = \lim_{r \rightarrow 0, N \rightarrow \infty} \frac{\log C(r)}{\log r}$$

상관지수를 Embedding dimension에 따라서 나타내면 그림 3과 같으며, 수렴하는 값이 운동역학적 모형을 구축하는데 필요한 변수의 개수를 나타낸다.

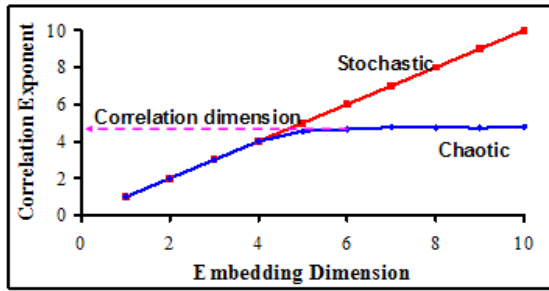


그림 3 Embedding dimension에 따른 상관지수

그림 3은 카오스 특성을 가지는 데이터와 추계특성을 가지는 데이터를 이용하여 각각 상관지수를 나타내었다. 그림에서 보듯이와 같이 상관지수가 하나의 값으로 수렴할 경우, 이 시계열자료는 카오스 특성을 가진다고 볼 수 있다. 반면에 수렴을 하지않고 계속 증가할 경우, 이 시계열 자료는 무작위 특성을 가진다는 것을 알 수 있다.

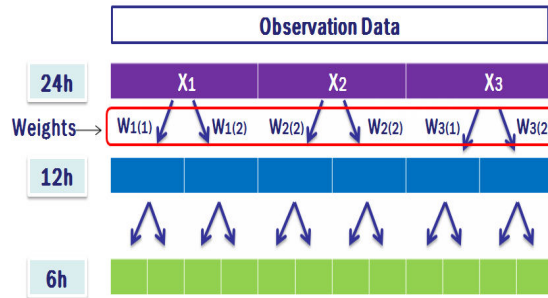


그림 4 강우 해상도에 따른 가중치 개념

### 2.3 카오스 이론을 이용한 분해

카오스를 이용해서 강우자료를 분해할 경우, 강우자료를 직접 이용하지 않고 강우자료의 해상도를 변경 하는데 따른 가중치를 이용하게 된다. 가중치에 대한 기본 개념은 그림4와 같다. 각각의 해상도 별로(24h-12h, 12h-6h, 6h-3h) 구해진 가중치를 이용하여 시계열 자료를 생성한 후 상관지수를 산정하여 가중치가 카오스 특성을 보이는지를 검토한 후, Local approximation 방법을 이용하여 분해를 하게 된다. Local approximation 방법은 분해하고자 하는 자료(예,  $2CO_2$ 자료로 일반적인 지속시간은 24시간 임)와 관측자료(예, 지점별 관측자료로 지속시간 1시간 자료를 이용하여, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간 자료를 생성 함)의 24시간 자료에 해당하는  $Y_j$  벡터를 계산한 후, 분해하고자 하는 벡터와 가장 값이 유사한 벡터를 관측자료에서 선정하게 된다. 이때 선정된 관측자료 벡터에 해당하는 가중치를 분해하고자 하는 벡터에 적용하게 된다.

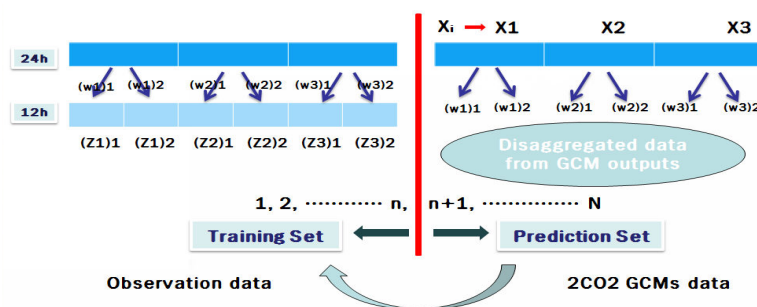


그림 5 GCM결과를 이용한 분해기법 개념

### 2.4 GCM 자료의 분해결과

대상지점은 국내 기상청 산하 서울, 춘천, 대구, 전주와 같이 4개 관측소의 1988년부터 1995년까지의 1시간 단위 자료를 이용하여 3시간, 6시간, 12시간, 24시간 자료를 각각 생성하였다. 생성된 자료의 통계적 특성은 표1과 같으며, 표2는 각 지점별로 12h자료를 24h자료로 변화할 때의 가중치를 이용해서 구한 상관차원이다.

표 1 관측자료의 통계적 특성

	3h	6h	12h	24h
자료 수	23376	11688	5844	2922
평균	0.44	0.88	1.76	3.53
표준편차	2.88	4.97	8.30	13.13
분산	8.32	24.72	68.96	172.49
최대값	90.3	116.40	203.10	233.80
최소값	0.00	0.00	0.00	0.00

표 2 24h-12h 가중치의 상관차원

	서울	대구	전주	춘천
지체시간	1	1	1	1
상관차원	1.74	1.78	1.84	1.87
필요한 변수	2	2	2	2

각 지점별로 모두 12시간 자료와 24시간 자료 사이의 가중치가 카오스 특성을 보임을 알 수 있었다. 따라서 YONU GCM을 대상으로 Local approximation 방법을 이용하여 분해가 가능하였으며, 분해결과를 이용하여 산정한 극값은 표3과 같다.

표 3 분해결과

최대값	서울	대구	전주	춘천
Obs 24h	233.8	89.8	152.1	307.5
Obs 12h	203.1	79.1	151.5	208
2CO2 24h	142.7	108.1	103.0	137.23
2CO2 12h	125.2	80.9	95.9	134.5

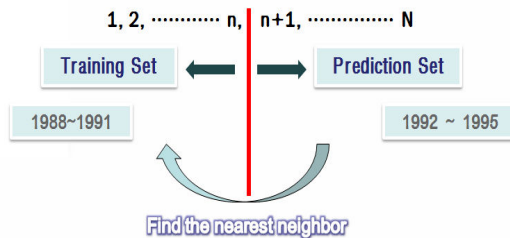


그림 6 분해기법의 검증 개념

실제로 분해기법을 적용할 경우, 대기순환모형으로부터 나온 미래의 모의 결과는 관측자료가 없기 때문에 검증하는 것이 불가능 하다. 따라서 현재의 관측자료를 훈련부분과 예측부분으로 그림6과 같이 나누어 분해기법을 적용한 후, 그 결과를 비교하였다(그림7).

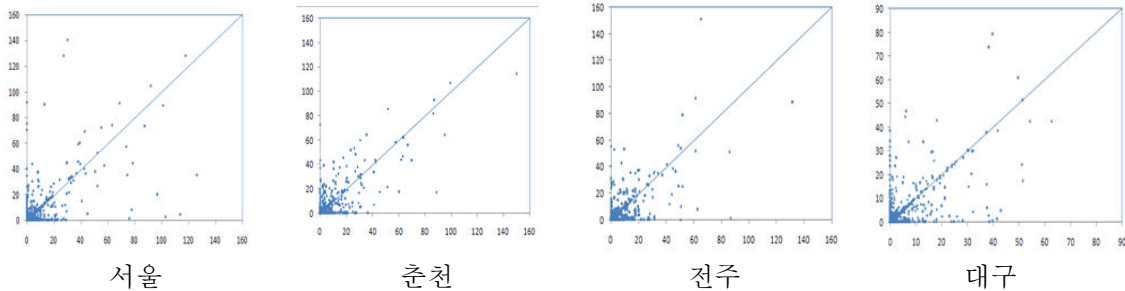


그림 7 검증결과

### 3. 결론

본 연구에서는 기후변화가 홍수에 미치는 영향을 평가하는데 필요한 고해상도 강우자료를 획득하기 위한 기법을 제시하였다. 현재 기후변화 모형의 시간적 해상도는 RCM의 발전과 더불어 1h, 3h 단위의 결과를 얻을 수 있는 기술을 가지고 있으며, 실제로 유럽에서는 이러한 결과들을 이용한 연구를 진행 중임을 알 수 있다. 그러나 아직까지 국내의 경우는 이정도의 고해상도자료가 없기 때문에 국내 RCM자료로부터 얻을 수 있는 일 단위 자료를 분해하여 고해상도 자료를 얻을 수 있는 기법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 확정론적 분해기법인 카오스이론을 이용한 분해기법을 기후변화 모형의 결과에 적용하여 일자료를 12h간 자료로 분해하였으며, 연구결과를 확장하여 1h단위의 자료까지 분해를 진행할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Alison L. Kay, Nicholas S. Reynard, Richard G. Jones, (2006) RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation, *J. Hydrol.*, 318, pp.151-162
2. Arnold, J. G., and J. R. Williams, (1989) Stochastic generation of internal storm structure, *Trans. ASAE*, 32(1), 161-166
3. Bo, Z., S. Islam, and E. A. B. Eltahir, (1994) Aggregation-disaggregation properties of a stochastic rainfall model, *Water Resour. Res.*, 30(12), 3423-3435.
4. Christel Prudhomme, Dörte Jakob, Cecilia Svensson, (2003) Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments, *J. Hydrol.* 277, pp. 1-23
5. Cowpertwait, P. S. P., P. E. O'Connell, A. V. Metcalfe, and J. A. Mawdsley, (1996) Stochastic point process modeling of rainfall, II, Regionalization and disaggregation, *J. Hydrol.*, 175, pp.47-65.
6. Econopouly, T. W., D. R. Davis, and D. A. Woolhiser, (1990) Parameter transferability for a daily rainfall disaggregation model, *J. Hydrol.*, 118, pp.209-228.
7. Rodriguez-Iturbe, I., D. R. Cox, and V. Isham, (1987) Some models for rainfall based on stochastic point processes, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 410, pp.269-288.
8. Rodriguez-Iturbe, I., D. R. Cox, and V. Isham, (1988) A point process model for rainfall: Further developments, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, pp.417, 283-298.
9. Sivakumar, B., (1999). Identification of chaos and influence of noise on prediction: Singapore rainfall, Ph.D. thesis, Dep. of Civ. Eng., Natl. Univ. of Singapore, Singapore.
10. Sivakumar, B., (2000). "Chaos theory in hydrology: Important issues and interpretations", *J. Hydrol.*, vol. 227, pp. 1-20.
11. Sivakumar, B., (2001) "A approach to rainfall disaggregation", *Water Resources Research*. Vol.37, No. 1, pp. 61-72.