

Johnson 분포를 활용한 강우양상 생성 기법에 관한 연구

rainfall pattern generation method by johnson distribution

한건연*, 안기홍**, 이진영***, 류종현****

Kun Yeun Han, Ki Hong Ahn, Jin Young Lee, Jong Hyun Ryu

요 지

지구온난화로 인한 홍수빈도 및 강우강도의 증가로 홍수피해의 규모는 더욱 증가하고 있다. 그리고 방재 대책도 발생한 피해에 대한 복구를 주된 정책으로 하던 소극적 자세에서 벗어나 과학적·공학적인 접근을 통해 재해에 대응할 수 있는 기술을 개발하는 적극적인 홍수방어 체계를 구축하고 있다. 또한, 설계빈도의 무조건적인 상향조정에 따른 확정론적인 방법에 의존하기 보다는 체계적인 방법을 도입한 수문량 확충 및 매개변수의 불확실성 분석이 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

일반적으로 수공구조물의 설계 시에는 설계홍수량을 사용하는데 이는 홍수특성, 홍수발생빈도, 홍수발생가능성 등을 수공구조물의 규모와 파괴 시 예상되는 피해 정도에 따라 요구되는 안전성을 함께 고려해 수공구조물의 설계기준으로 활용된다. 설계홍수량은 지속시간과 재현기간을 사전에 지정하여 빈도분석을 통해 설계강우량을 산정하고 이를 강우-유출 분석을 함으로써 산정된다. 설계강우량은 빈도분석을 위해 선택된 강우형태에 따른 수문학적 무작위성을 포함하고 있다. 따라서 시간적 변동을 고려한 적절한 강우양상 형태의 선택은 수문학적으로 안전한 수공구조물의 설계 및 평가에 매우 큰 영향을 미친다. 현재의 경우는 강우형태에 대한 선택이 경험에 의해 임의로 이루어지므로, 토목공학자는 여러 가지 발생 가능한 강우형태에 따른 시간적 분포에 대해 고려해야 한다.

본 연구에서는 Huff분위에 따른 무차원 누가 강우곡선을 이용해 강우변동양상 생성을 위한 제약조건을 log-ratio 변환을 이용해 극복하였으며, 결과의 통계 특성치를 Johnson 분포를 통해 표준정규분포로 변환시켰다. 무작위 변수 발생 후 강우양상별 표준정규값의 상관행렬을 이용하여 상관성이 있는 무작위변수로 변환하였다. 얻어진 상관성을 갖는 무작위변수는 log-ratio 역변환을 통해 상관성을 갖는 변수로 재변환해서 무차원화된 강우곡선을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 강우변동양상, Johnson 분포, 무차원 누가강우곡선, log-ratio 기법

1. 서론

최근 지구온난화에 따른 이상기후 현상과 급격한 도시화 및 산업화에 따른 유출양상의 변화 등으로 인해 사상 유례가 없는 홍수들이 빈발하는 양상을 보이는데, IPCC 2007 보고서에 따르면 아시아 전역은 전 지구 평균을 상회하는 기온상승이 예상되며 특히 한반도를 포함한 동아시아지역은 여름철 더운 기간과 열파(heat wave)의 기간이 길어지고 강도와 빈도는 증가하는 경향을 보이며 여름철 강수량과 호우일수가 증가하는 것으로 나타났다. 우리나라의 경우 2006년 기상청 자료에 따르면 집중호우의 발생빈도를 가늠하는 1시간 최대 강수량 50mm 이상기록횟수를 지난 30년간 분석한 결과 1977~1986년 143회, 1987~1996년 159회, 1997~

* 정희원·경북대학교 공과대학 토목공학과 교수E-mail : kshanj@knu.ac.kr
** 정희원·한국수자원공사 댐유역관리처 공동연구원.E-mail : khahn@kwater.or.kr
*** 경북대학교 토목공학과 석사과정E-mail : freedomzero@naver.com
**** 한국수자원공사 수자원개발처E-mail : ruy123@kwater.or.kr

2006년 254회로 최근 10년간 집중호우 발생횟수가 크게 증가하고 있다. 결국 이러한 지구온난화로 인해 증대되는 홍수피해에 대해 과학적·공학적 접근을 통해 재해에 대응할 수 있는 기술을 개발하여 적극적 홍수방어 체계를 구축하여야 할 것이다. 또한, 설계빈도의 무조건적인 상향조정에 따른 확정론적인 방법에 의존하기 보다는 추계학적 방법을 도입한 수문량 확충 및 매개변수의 불확실성 분석이 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 이에 전 세계적으로 매개변수와 특성인자의 불확실성을 고려하고 인자들 간의 상관관계를 고려한 추계학적 방법 기반의 대책 수립이 추진되고 있는 상황이다.

일반적으로 수공구조물의 설계 시에는 설계홍수량을 사용하는데 이 설계홍수량은 지속시간과 재현기간을 사전에 지정하여 빈도분석을 통해 설계강우량을 산정하고 이를 강우-유출 분석을 함으로써 산정된다. 설계강우량은 빈도분석을 위해 선택된 강우형태에 따른 수문학적 무작위성을 포함하고 있어 시간적 변동을 고려한 적절한 강우양상 형태의 선택은 수문학적으로 안전한 수공구조물의 설계 및 평가에 매우 큰 영향을 미친다.

이제까지 이 분야에 대한 연구는 수리학적 매개변수의 불확실성을 특정 분포형으로 가정하여 분석하는 것에 치우쳐 있었으며, 강우의 실제 발생양상을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 강우자료를 활용하여 발생 가능한 강우양상을 생성하고자 한다.

2. 강우양상 생성 기법

2.1 강우의 무차원화

강우량은 장소와 시간에 따라 다양하기 때문에 실제 강우량 자료를 통해 각각의 강우 양상을 구분하기 위해서는 각 강우사상별 시간에 따른 양상을 분류해야 한다. 또한 강우의 지속시간과 강우량 등 강우의 특성인자는 매우 다양하기 때문에 각기 다른 강우의 비교를 위해 시간적 양상의 구분이 필수적이다. 이에 각 시간별 강우량을 전체 강우량으로 나누고 시간은 전체 지속시간으로 나누는 무차원화를 실시하였다. 본 연구에서는 사전재해영향평가에서 주로 쓰는 Huff 분위에 따라 강우 양상의 형태를 Type I, II, III, IV의 4가지로 분류하였다. 무차원 수가 강우곡선의 절점은 비율형태의 자료가 되고, 이 절점들은 양의 값을 가져야 하고 모두의 합이 1이어야 하는 제약조건을 가진다. 본 연구에서는 이 제약조건을 극복하기 위해 log-ratio 변환을 사용했다. 무차원화 시킨 강우양상 형태는 log-ratio 방법을 통해 0과 1사이의 값을 가지고, 항상 증가하는 값을 가지는 제약조건을 극복하게 된다. log-ratio 변환식은 아래와 같다. D 는 전체 자료의 수이고, P_i 는 분석자료의 임의요소이며, $i = 1, 2, 3 \dots D$ 에 대해 P_i 는 $0 \leq P_i \leq 1$ 이다.

$$Y_i = \log\left(\frac{P_i}{P_{i^*}}\right), \quad 1 \leq i \leq D-1, \quad i \neq i^*$$

또한 다음의 역변환을 통해 P_i 와 P_{i^*} 를 구할 수 있다.

$$P_i = \frac{\exp(Y_i)}{1 + \exp(Y_1) + \dots + \exp(Y_{D-1})}, \quad 1 \leq i \leq D-1, \quad i \neq i^*$$

$$P_{i^*} = \frac{1}{1 + \exp(Y_1) + \dots + \exp(Y_{D-1})}$$

2.2 다변량 비정규분포 확률변수의 생성

제약조건이 없는 다변량 비정규 확률변수를 모의하기 위한 일반적인 방법은 먼저 정규 영역으로의 변환, 그리고 다변량 정규 확률변수의 생성, 마지막으로 원 영역으로의 역 변환 순으로 이루어진다. 앞서 언급한 log-ratio 기법을 이용하여 제약조건을 극복하였으므로 제약조건이 없는 다변량 비정규분포의 확률변수를 생

성함으로서 강우양상을 생성할 수 있다. 본 연구에서 분석하고자 하는 실제 시간에 따른 강우양상의 형태는 정규분포의 형태를 가지지 않으므로 강우양상과 같이 비정규분포를 가지는 다변량 확률변수의 문제를 해결하기 위해서는 데이터의 표준 정규화가 요구된다. 이에 본 연구에서는 강우 자료의 표준 정규화를 위해 Johnson 시스템을 도입하였다. Johnson은 다항식의 형태로 표현할 수 있는 변환식을 다음의 3가지 형태로 제시했다.

$$\begin{aligned}
 S_L : Z &= \gamma + \delta \log(X - \xi), & X > \xi \\
 S_U : Z &= \gamma + \delta \sinh^{-1}\left(\frac{X - \xi}{\lambda}\right) \\
 S_B : Z &= \gamma + \delta \log\left(\frac{X - \xi}{\xi + \lambda - X}\right), & \xi < X < \xi + \lambda
 \end{aligned}$$

그리고 정규영역에서의 상관행렬을 통해 직교변환 함수 T 를 얻을 수 있다. 이는 상관성이 있는 표준 정규 확률변수인 Z 를 무상관 변수인 Z' 로 $Z' = T^{-1}Z$ 를 통해 변환시킬 수 있다. 이런 직교변환행렬은 Cholesky decomposition 혹은 spectral decomposition을 통해 얻을 수 있다. 그리고 (ii)단계에서의 다변량 정규분포를 가지는 확률변수는 먼저 무상관 확률변수의 생성한 후 이를 $Z = TZ'$ 를 통해 생성 가능하다. 그리고 다변량 비정규 확률변수는 $x_i = F_i^{-1}[\Phi(z_i)]$ 를 통해 얻을 수 있다. 여기서 $F_i^{-1}(x)$ 는 원 확률변수 X_i 의 역 CDF이고, $\Phi(\cdot)$ 는 표준 정규 CDF이다.

3. 실제 유역에 대한 적용

본 연구에서는 낙동강의 주요지류중 하나인 감천유역에 대해 시간에 따른 강우양상을 생성하였다. 강우양상 생성을 위해 먼저 30년 이상의 관측년수를 가진 유역 인근에 위치한 기상청 관할의 강우관측소 자료를 수집하였다. 강우자료의 특성치를 반영하여 무차원 누가강우량 곡선의 제약조건을 극복하기 위해 먼저 log-ratio 방법을 적용하였고 Hill 등(1976)이 개발한 1~4 통계적 모멘트를 활용하여 적정 Johnson 분포형 결정하였다. 표 1은 최적 Johnson 분포형 및 그 변수값의 예를 나타내고 있다.

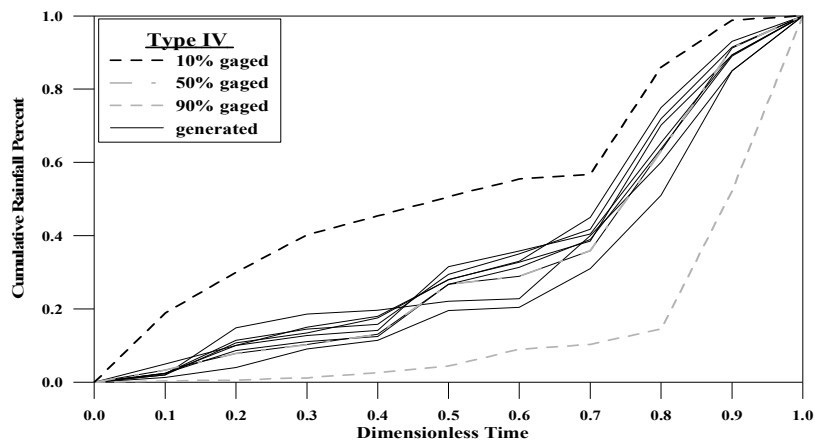


그림 1. 시간적 강우양상 생성 예

Type IV	Y_1	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}
Mean	-0.34	-0.08	0.05	0.41	-0.38	0.44	1.51	1.96	1.22
SD	1.67	1.39	1.81	1.70	1.72	1.62	1.41	1.22	1.53
Skewness	-0.64	0.52	0.08	-0.12	0.58	0.32	1.29	1.45	0.88
Kurtosis	0.52	1.58	0.36	1.23	1.02	-0.09	1.84	2.00	0.27
Y_1	1.00								
Y_3	0.12	1.00							
Y_4	0.53	0.62	1.00						
Y_5	0.52	0.40	0.77	1.00					
Y_6	0.27	0.18	0.46	0.62	1.00				
Y_7	0.33	0.50	0.66	0.70	0.76	1.00			
Y_8	0.23	0.62	0.63	0.73	0.62	0.85	1.00		
Y_9	0.50	0.56	0.74	0.83	0.49	0.76	0.82	1.00	
Y_{10}	0.50	0.39	0.71	0.79	0.47	0.72	0.65	0.90	1.00
gamma	-1.27	-3.68	5.35	0.79	2.56	0.89	1.88	1.80	0.92
delta	1.14	3.47	4.99	2.76	1.93	1.12	1.19	1.11	0.69
lambda	10.6	2.82	47.47	4.20	19.81	9.29	11.18	9.18	6.76
xi	-8.01	-3.82	-12.1	1.72	-4.78	-2.69	-0.73	0.15	-0.64
Type	SB	SU	SB	SU	SB	SB	SB	SB	SB

표 1. log-ratio 변환 결과 및 Johnson 분포형 결정 예

그리고 각 해당하는 분포형과 그 분포형의 변수에 따라 lor-ratio 변환 값의 표준 정규값을 산정하였고 각 강우양상별 표준 정규값의 상관행렬을 Cholesky decomposition을 통해 변환행렬 T 를 생성하였으며, 각 Johnson 분포형별 발생시킨 확률변수를 이를 이용하여 상관성을 가지는 확률변수로 재변환하였다. Fig.1은 태풍기에 대한 각 Type별 추계학적 발생가능한 강우양상 형태의 예를 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 강우의 변동을 고려할 수 있도록 통계적 기법을 이용해 강우 양상을 생성하는 방법을 정립했다. 강우의 특성에 따라 시간적 변동양상의 구분을 위해 무차원화를 실시하였고, log-ratio 변환을 통해 무차원화 시킨 강우 자료의 제약조건을 극복했다. 제약조건이 없는 비정규분포 다변량 확률변수는 Johnson분포형을 이용해 표준정규화 시켰다. Johnson분포형 별로 생성시킨 다변량 정규변수를 앞의 방법을 역순으로 실제 강우자료와 동일한 조건을 가지는 확률변수-강우데이터를 얻을 수 있었다.

본 연구기법을 통해 실제 강우자료를 활용하여 발생 가능한 시간에 따른 강우변동 양상을 생성할 수 있으므로 현재의 일률적으로 적용되는 수공구조물의 설계 및 안정성 평가 기준에 대해 강우변동 양상에 따른 영향을 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 수공구조물의 안정성 평가 시 강우의 불확실성을 고려함으로써 보다 합리적인 홍수대응책을 마련하는데 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Aitchison, J. (1986). *Statistical analysis of compositional data*, Chapman & Hall Inc., NY, USA.

- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. I-II, John Wiley & Sons, Inc.
- Borman, L.E. and Faucette, R.C. (1993). "Frequency-domain simulation and stochastic interpolation of random vectors in multidimensional space." *Computational Stochastic Mechanics*.
- Chang, C.H. and Tung, Y.K. (1994). "Monte Carlo Simulation for Correlated Variables with Marginal Distributions." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 313-331.
- Hill, I.D., Hill, R., and Holder, R.L. (1976). "Algorithm AS 99. Fitting Johnson curves by moments." *Appl. Stat.*, Vol. 25, pp. 180-189.
- Hromadka, T.V., McCuen, R.H., and Yen, C.C. (1987). *Computational Hydrology in Flood Control Design and Planning*, Lighthouse Publications.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007 : Synthesis Report*.
- Liu, P.L. and Der Kiureghian, A. (1986). "Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances." *Probabilistic Eng. Mech.*, Vol. 1(2), pp. 105-112.
- Melching, C.S. (1987). *A Reliability Analysis on Flood Event Forecasting with Uncertainties*, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Ill. at Urban- Chanpaign.
- Tung, Y.K. and Yen, B.C. (2005). *Hydrosystem engineering uncertainty analysis*, McGraw-Hill Book Company, NY, USA.