

# 다변량 Monte Carlo 기법을 이용한 추계학적 강우 변동 생성기법에 관한 연구

## A Study on Generation of Stochastic Rainfall Variation using Multivariate Monte Carlo method

안기홍\* · 한건연\*\*

Ahn, Ki Hong · Han, Kun Yeun

### Abstract

In this study, dimensionless-cumulative rainfall curves were generated by multivariate Monte Carlo method. For generation of rainfall curve rainfall storms were divided and made into dimensionless type since it was required to remove the spatial and temporal variances as well as differences in rainfall data. The dimensionless rainfall curves were divided into 4 types, and log-ratio method was introduced to overcome the limitations that elements of dimensionless-cumulative rainfall curve should always be more than zero and the sum total should be one. Orthogonal transformation by Johnson system and the constrained non-normal multivariate Monte Carlo simulation were introduced to analyse the rainfall characteristics. The generative technique in stochastic rainfall variation using multivariate Monte Carlo method will contribute to the design and evaluation of hydrosystems and can use the establishment of the flood disaster prevention system.

**key words** : Multivariate Monte Carlo, Rainfall variation, Johnson system, log-ratio method

### 요 지

본 연구에서는 다변량 Monte Carlo 기법을 이용하여 무차원 누가강우량 곡선을 생성하였다. 이를 위해 30년 이상의 관측년 수를 갖는 강우자료를 활용하여 강우사상을 분리하고 이를 무차원화하여 강우의 지역적, 시간적 변동성을 제거하였다. 그리고 이들 무차원화된 누가강우량곡선을 4가지 형태로 구분하여 강우자료 특성을 반영한 누가강우량 곡선을 생성하였다. 무차원 누가강우량 곡선의 절점이 항상 0 이상이고 전체의 합이 1이 되어야 하는 제약조건을 극복하기 위해 log-ratio 기법을 도입하였고 Monte Carlo 기법을 이용한 다변량 생성시 요구되는 정규화와 상관계수 반영의 문제점을 Johnson 시스템과 직교변환을 도입하여 모형에 적용함으로써 제약조건을 극복할 수 있었다. 본 연구에서 적용한 다변량 Monte Carlo 기법을 이용한 강우변동 생성기법은 실제 강우량 자료의 특성을 가공없이 반영할 수 있어 해당 지역의 특성을 정확히 반영할 수 있었고 지역의 홍수대책 수립, 수공구조물 설계 및 분석 등 활용성이 매우 클 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 다변량 Monte Carlo, 강우 변동, Johnson 시스템, log-ratio

### 1. 서 론

우리나라는 기후의 계절적 변화가 뚜렷하며 산지와 평지가 혼재되어 지형의 공간적 특성이 상이하다. 그리고 강우량은 여름철에 집중되는 장마와 태풍에 주로 의지하고 있는 상황이고 수공구조물의 피해 역시 이 시기에 발생된다. 결국 강우의 시·공간적 특성인자의 반영은 수공구조물의 설계 및 분석에 있어 매우 중요하다. 하지만 유역 내 발생하는 강우에는 다양한 불확실성이 포함되어있고, 강우생성을 위해 일반적으로 강우량, 강우지속시간, 무강우기간 등 강우특성인자들

의 분포형을 가정하여 활용하고 있어 해당 유역의 특성을 제대로 반영하기는 힘든 실정이다. 이에 본 연구에서는 실제 강우특성을 반영한 시간에 따른 강우양상을 생성하였다.

강우양상의 분석에 있어 강우 특성자료는 여러 불확실성을 가진 자료로 구성되어 있다. 강우자료의 불확실성을 반영하기 위해 Melching(1987)은 강우-유출 모형에 있어 강우량, 유출량, 증발량, 지형자료 등의 각각에서 발생하는 오차와 불확실성의 근원 및 불확실성을 설명하는 방법에 대해 자세하게 언급하였고, Troutman(1982)은 강우 관측망 접근방법을 사용하여 강우의 공간적 시간적 분포가 유출에 미치는 영향을 조사

\* 한국수자원공사 댐유역관리처 공동연구원 (E-mail : khahn@kwater.or.kr)

\*\* 정회원 · 경북대학교 공과대학 건축토목 공학부 교수

하였으며, Hromadka 등(1987)은 수문 분석이나 설계시의 불확실성의 영향을 조사하기 위하여 추계학적 적분식을 도입하였다. Borgman 등(1993)은 제약조건이 있는 다변량 Gaussian 모의를 조건부 다변량 Gaussian 모의로 변환하는 방법을 제시하였고, Zao 등(1997)은 이 방법을 무작위 단위도 생성에 적용하였으며, Wu 등(2006)은 강우양상 생성을 통해 강우의 불확실성을 반영하려 하였다. 한편 국내에서는 건설교통부(2002)에서 하천시설물 설계시 신뢰도 분석 개념을 도입하기 위해 추계학적 홍수량을 산정한 바가 있으나 이는 주로 수문학적 불확실성 인자를 설계홍수량의 분포형에서만 찾고 있어 실제 강우의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 실제 강우의 발생특성을 그대로 반영한 강우생성을 위해 강우사상을 분리하여 이를 무차원화시켰으며, 무차원 누기강우량 곡선의 절점이 항상 0이상이고 전체의 합이 1이 되어야 하는 제약조건을 극복하고 강우양상의 전체적 양상을 파악하여 이를 강우생성에 이용하고자 log-ratio 기법을 도입하였다. 또한, 실제 시간에 따른 강우변동의 형태는 비정규분포의 형태를 가지고 있기 때문에 Johnson 시스템을 도입하여 이를 극복하고 다변량 비정규분포를 갖는 강우양상을 생성할 수 있었다.

## 2. 강우양상의 특성화

### 2.1 강우사상의 무차원화

강우양상의 구분을 위해선 실제 강우량 자료에 포함되어 있는 장소와 시간의 다양성을 통일시키는 작업이 우선되어야 한다. Huff(1967)는 미국 Illinois주에 위치한 다양한 유역에서 발생한 호우에 대해 시간분포를 분석하여 시간분포 양상을 강우량의 최대분위 발생시기에 따라 4가지 형태로 구분하였다. 이를 일반적으로 Huff의 4분위라고 부르는데 국내에서는 사전제해영향평가 등에서 주로 사용되고 있다. 시간에 따른 강우양상을 적절히 나타낼 수 있는 강우양상의 형태별 분류수는 사전에 알 수 없기 때문에 주관적으로 결정하게 된다. 일반적으로 시간적 강우양상을 분류할 수의 결정은 시산법을 통해 결정하게 되는데 본 연구에서는 국내에서 주로 사용되고 있는 Huff 분위와의 개념의 연관성 상에서, 강우의 누기곡선을 이용하여 우량의 최대분위의 발생 시기에 따라 Type I, II, III, IV로 4가지 형태로 분류하였다. Type I, II는 강우 사상의 초기에 큰 강우강도를 가지는 형태이고, Type III, IV는 이와 반대로 상대적으로 강우 사상의 후기에 큰 강우강도를 가지는 형태가 된다. 본 연구에서는 이를 활용하여 강우사상의 무차원화를 시도하였다. 이에 각 시간별 강우량을 전체 강우량으로 나누고 시간은 전체 지속시간으로 나누는 무차원화를 실시하였다.

무차원 누기곡선의 각 절점은 비율형태의 자료가 되고 이는 다음과 같은 제약조건을 가진다.

$$P_1 + P_2 + \dots + P_k = 1.0 \quad (1)$$

$$P_r > 0, \quad r = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

여기서,

$P_r$ : 강우사상의 무차원 강우량

$k$ : 무차원 누기강우량 곡선 절점수

그리고 위의 제약조건을 만족하는 벡터  $P=(P_1+P_2+\dots+P_k)'$ 의 확률변수는 구성비자료(compositional data)라고 불린다.

### 2.2 log-ratio 기법

통계학에서 다루는 많은 형태의 자료들 중에는 자료들 간의 상대적인 크기를 나타내는 비율형태의 자료가 있다. 이러한 비율형태의 자료는 자료를 이루고 있는 벡터성분들의 측정 단위가 동일하고 이를 구성비 자료라고 부른다.

구성비 자료의 정형적 분석에서 일반적으로 자료 구분을 위해 1, 2, 3, ..., D와 같은 정수를 사용하고 이를  $x_1, x_2, \dots, x_D$ 와 같이 이랫첨자화하여 그 각각의 성분을 나타낸다. 이런 D개로 구분된 구성비 성분은 식 (3)과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$x_1 \geq 0, \dots, x_D \geq 0 \quad (3)$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_D = 1$$

0의 성분을 갖는 구성비 자료가 존재할 경우 비정상적인 자료의 구성을 의미하므로 Aitchison(1986)은 이를 제외하였다.

구성비 자료를 분석하기 위한 대부분의 전통적 다변량 분석기법들은 식 (3)의 제약조건인 구성비 자료의 벡터성분들의 합이 항상 1이라는 특수성을 극복하지 못하였다. 이에 Aitchison(1986)은 구성비 자료를 적절히 변환시켜 분석하는 방법을 제안하였는데 먼저 구성비 자료를 d개로 재구분하였다.

$$d = D - 1 \quad (4)$$

그러므로 식 (5)와 같이 d-ratio를 지정하면,

$$r_i = x_i/x_D \quad (i = 1, 2, \dots, d) \quad (5)$$

구성비 자료는 식 (6)을 통해 결정될 수 있다.

$$x_i = r_i/(r_1 + \dots + r_d + 1) \quad (i = 1, 2, \dots, d) \quad (6)$$

$$x_D = 1/(r_1 + \dots + r_d + 1)$$

그리고 구성비 벡터의 특정성분을 변환시킨 후 이를 로그 변환하여 심플렉스 공간(구성비 자료가 정의되는 기하학적 공간)의 벡터를 유클리드 공간의 벡터로 변환시키면 벡터들은 다변량 정규분포를 따른다고 가정하였다. 이와 같은 log-ratio 변환은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_i = \log\left(\frac{P_i}{P_{i^*}}\right), \quad 1 \leq i \leq D-1, \quad i \neq i^* \quad (7)$$

여기서,

$P_{i^*}$  : 분석자료의 임의 요소

$i = 1, 2, \dots, D$ 에 대해  $0 \leq P_i \leq 1$ 이기 때문에 변환된  $Y_i$ 는  $-\infty$ 에서  $\infty$ 까지 범위를 갖게 된다. 여기서  $P_i$ 와  $P_{i^*}$ 를 다 0이 되지 않도록 주의해야 한다. log-ratio 기법의 역 변환을 통해서 식 (6)과 같이 식 (8)을 통해 구할 수 있다.

$$P_i = \frac{\exp(Y_i)}{1 + \exp(Y_1) + \dots + \exp(Y_{D-1})}, 1 \leq i \leq D-1, i \neq i^* \quad (8a)$$

$$P_{i^*} = \frac{1}{1 + \exp(Y_1) + \dots + \exp(Y_{D-1})} \quad (8b)$$

여기서,

$$0 \leq P_i \leq 1, \sum_{i=1}^D P_i = 1$$

앞서 실시한 무차원화 시킨 강우자료의 각 성분은 강우양상의 전체적 양상을 파악하려는 본 연구의 목적과, 양의 값을 갖고 총 합이 1이 되는 구성자료비를 분석의 제약조건과도 부합된다. 이러한 무차원화 시킨 강우양상 형태는 log-ratio 기법을 통해 0과 1사이의 값들로 구성되어 있으며 항상 증가하는 값을 가지는 제약조건으로부터 벗어날 수 있게 된다. 즉, 제약조건이 있고 비정규분포를 가지는 다변량 문제를 제약조건이 없는 비정규 다변량 문제로 변환시킬 수 있게 된다.

### 2.3 Johnson 시스템

강우의 시간적 양상을 나타내고 있는 무차원 누가강우량의 절점은 다변량 비정규분포의 형태를 갖고 있기 때문에 Aitchison(1986)이 제안한  $Y$ 를 다변량 정규분포함수로 가정한 접근방법은 본 연구와는 차이가 있다. 그러므로 본 연구에서는 벡터  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_D)^T$ 의 무작위 변수의 주변분포(marginal distribution)를 위해 Johnson 분포를 활용하였다.

본 연구에서 분석하고자 하는 실제 시간에 따른 강우양상의 형태는 정규분포의 형태를 가지지 않고, 무차원화 시킨 강우양상 형태는 앞서 언급한 log-ratio 기법을 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 그리고 비정규분포를 갖는 다변량 문제를 해결하기 위해서는 자료의 표준 정규화가 필요한데 이에 본 연구에서는 자료의 표준 정규화를 위해 Johnson 시스템을 도입하였다

Johnson(1949)은 표준 정규화를 기반으로 하는 3가지 경험적 분포형을 제안하였는데, 이는 다음과 같다.

$$S_L: Z = \gamma + \delta \log(X - \xi), X > \xi \quad (9)$$

$$S_U: Z = \gamma + \delta \sinh^{-1}\left(\frac{X - \xi}{\lambda}\right) \quad (10)$$

$$S_B: Z = \gamma + \delta \log\left(\frac{X - \xi}{\xi + \lambda - X}\right), \xi < X < \xi + \lambda \quad (11)$$

여기서,

$Z$  : 표준정규변수(standard normal variable)

$X$  : 원 비정규변수(original non-normal variable)

$\gamma, \delta, \xi, \lambda$  : 모형 변수

### 2.4 다변량 비정규분포의 확률변수 생성

제약조건이 없는 다변량 비정규 확률변수를 모의하기 위한 일반적인 방법은 다음의 3가지 방법을 따른다.

- (i) 정규 영역으로의 변환
- (ii) 다변량 정규 확률변수의 생성
- (iii) 원 영역으로의 역 변환

비정규 분포를 갖는 확률변수를 생성하기 위해선 정규 영역으로의 변환이 우선시 되어져야 한다. 이러한 과정은 위에서 설명한 (i)단계에 해당하는데 (i)단계에서의 정규 영역으로의 변환은 종종 사전에 지정된 주변분포를 통해 이뤄진다(Liu 등(1986)). 그러나 실제 적용에 있어선 확률변수의 주변분포를 사전에 알 순 없다. 그러므로 정규변환은 확률변수의 통계적 특성으로부터 이뤄질 수밖에 없게 된다.

본 연구에서는 다양한 분포 형태를 포함할 수 있는 유연성을 지닌 Johnson 분포 시스템을 도입하여 정규화를 실시하였다. 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. 적용 및 검토

### 3.1 대상유역

본 연구에서는 낙동강의 주요지류중 하나이고 국가하천인 감천유역에 대해 시간에 따른 강우양상을 생성하였다. 이 지역은 태풍 '루사'와 '매미' 등으로 많은 침수피해를 입은 바 있다. 감천 유역은 유역면적이 약 1000 km<sup>2</sup>이고, 유역 전체 동서간의 길이는 38.8 km, 남북간의 길이는 47.8 km에 달하며, 동으로는 성주군, 칠곡군이 위치하고 있고, 서로는 전라북도 무주와 충청북도 영동군, 남으로는 경상남도 거창군, 북으로는 상주시 및 구미시와 인접하고 있다.

강우양상 생성을 위해 먼저 30년 이상의 관측년수를 가진 유역 인근에 위치한 기상청 관할의 강우관측소 자료를 수집하였다. 이는 시우량 자료의 관측년수가 짧으면 빈도해석 결과의 신뢰도를 보증할 수 없기 때문이다. 이에 본 연구에서는 추풍령관측소(1937~2008), 구미관측소(1973~2008), 거창관측소(1972~2008)의 강우량 자료를 활용하여 시간에 따른 강우양상을 분석하였다. 관측소의 현황은 Table 1과 같다.

Table 1. List of raingage stations

Station	location		Area (km <sup>2</sup> )	Elevation (EL. m)	Area ratio
	Latitude	Longitude			
Chupungnyeong	36°13'	120°00'	541.517	242.5	0.539
Gumi	36°08'	128°19'	381.361	47.9	0.380
Geochang	35°40'	127°55'	81.233	220.9	0.081

수자원관리기법개발연구조사보고서(건설교통부, 1999)를 참조하여 수집된 강우자료로부터 강우사상을 분리하였다. 사상 분리 세부기준은 무강우 최대기간 6시간 이상, 최소 지속 시간 4시간 이상, 최소 강우량 10 mm 이상, 시간강수 고이상치 기각 기준 200 mm 이상이다.

Table 2. Statistics about Type I dimensionless rainfall pattern

Type I	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$
Mean	0.18	0.25	0.19	0.09	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05
SD	0.14	0.11	0.13	0.07	0.03	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
Skewness	1.33	0.14	0.73	0.74	0.53	0.69	1.56	1.70	2.33	2.11
Kurtosis	1.99	0.02	0.06	0.38	-0.94	-0.97	2.21	2.52	7.00	4.77
$P_1$	1.00									
$P_2$	-0.35	1.00								
$P_3$	-0.54	-0.02	1.00							
$P_4$	-0.24	-0.24	0.49	1.00						
$P_5$	-0.24	-0.01	0.01	0.01	1.00					
$P_6$	0.08	-0.22	-0.29	-0.35	0.30	1.00				
$P_7$	0.01	-0.16	-0.44	-0.29	-0.13	0.29	1.00			
$P_8$	-0.13	0.02	-0.21	-0.22	-0.32	-0.15	0.28	1.00		
$P_9$	0.15	-0.18	-0.33	-0.18	-0.11	-0.23	-0.02	0.15	1.00	
$P_{10}$	-0.16	-0.16	-0.21	-0.27	0.32	0.34	0.08	-0.15	0.05	1.00

Table 3. Statistics about Type II dimensionless rainfall pattern

Type II	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$
Mean	0.05	0.07	0.14	0.22	0.23	0.13	0.05	0.04	0.03	0.03
SD	0.07	0.06	0.10	0.11	0.14	0.09	0.04	0.04	0.04	0.06
Skewness	2.49	0.86	0.77	1.06	0.35	0.91	0.69	2.01	1.92	4.09
Kurtosis	6.81	0.09	-0.02	1.96	-0.01	0.71	-0.20	4.41	3.60	20.10
$P_1$	1.00									
$P_2$	0.24	1.00								
$P_3$	-0.11	0.29	1.00							
$P_4$	-0.13	-0.13	0.12	1.00						
$P_5$	-0.10	-0.36	-0.56	-0.38	1.00					
$P_6$	-0.34	-0.46	-0.39	-0.44	0.45	1.00				
$P_7$	-0.08	-0.05	-0.08	-0.28	-0.21	0.17	1.00			
$P_8$	-0.02	0.03	0.02	-0.10	-0.45	-0.12	0.37	1.00		
$P_9$	0.01	0.10	-0.19	-0.27	-0.22	-0.06	0.27	0.56	1.00	
$P_{10}$	-0.10	-0.07	-0.02	0.25	-0.29	-0.26	-0.12	-0.02	0.02	1.00

### 3.2 강우특성 분석

앞서 수집된 강우사상은 무차원화하여 강우양상의 형태별로 4가지로 구분하였다. 이러한 무차원화 된 강우양상의 형태를 10개의 절점을 갖도록 구분하여 추계학적으로 발생 가능한 강우양상 생성을 위한 기본적 통계자료를 생성하였다. Table 2~5는 강우양상 형태에 대한 1~4 통계적 모멘트 및 상관계수를 나타내고 있다. 각 무차원 누가강우 자료의 절점의 통계적 모멘트와 상관계수는 각각의 특성을 포함하고 있고, 서로의 상관관계를 내재하고 있기 때문에 기존의 일반적인 Monte Carlo 모의를 통해서 그 상관관계를 반영할 수 없다. 이에 본 연구에서는 2절에서 소개한 다변량 Monte Carlo 기법을 적용하였다.

Table 4. Statistics about Type III dimensionless rainfall pattern

Type III	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$
Mean	0.04	0.04	0.05	0.06	0.11	0.20	0.23	0.16	0.08	0.04
SD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.11	0.12	0.12	0.07	0.04
Skewness	2.69	2.10	1.18	0.40	0.76	0.44	1.20	1.02	0.64	2.29
Kurtosis	9.62	5.19	0.96	-1.14	0.00	0.18	2.09	0.83	-0.72	6.67
$P_1$	1.00									
$P_2$	0.14	1.00								
$P_3$	-0.08	0.28	1.00							
$P_4$	-0.10	0.05	0.54	1.00						
$P_5$	-0.19	-0.09	-0.08	0.19	1.00					
$P_6$	-0.10	0.25	-0.02	0.08	0.34	1.00				
$P_7$	0.11	-0.25	-0.36	-0.38	-0.34	-0.39	1.00			
$P_8$	-0.18	-0.30	-0.15	-0.28	-0.29	-0.64	0.03	1.00		
$P_9$	-0.18	-0.27	-0.16	-0.18	-0.32	-0.23	-0.12	0.18	1.00	
$P_{10}$	-0.03	-0.10	-0.11	-0.14	-0.24	-0.08	-0.06	-0.09	0.31	1.00

Table 5. Statistics about Type IV dimensionless rainfall pattern

Type IV	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$
Mean	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.07	0.18	0.28	0.16
SD	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.12	0.13
Skewness	1.07	0.72	1.19	1.07	0.96	0.98	0.29	1.60	0.45	1.99
Kurtosis	0.01	-0.47	0.17	0.28	0.56	-0.05	-1.08	3.72	0.26	5.20
$P_1$	1.00									
$P_2$	0.13	1.00								
$P_3$	-0.23	0.54	1.00							
$P_4$	0.06	-0.19	0.27	1.00						
$P_5$	0.07	-0.20	-0.17	0.32	1.00					
$P_6$	-0.03	-0.23	-0.30	-0.01	0.17	1.00				
$P_7$	-0.24	-0.11	-0.19	-0.25	-0.21	0.61	1.00			
$P_8$	-0.29	-0.24	-0.14	-0.30	-0.06	-0.10	0.25	1.00		
$P_9$	-0.09	-0.26	-0.08	-0.08	-0.12	-0.25	-0.34	-0.26	1.00	
$P_{10}$	0.05	0.15	-0.14	-0.08	-0.20	-0.12	-0.20	-0.57	-0.12	1.00

### 3.3 추계학적 강우양상 생성

앞서 분석한 강우자료의 특성치를 반영하여 무차원 누가강우량 곡선의 제약조건을 극복하기 위해 먼저 log-ratio 기법을 적용하였는데, log-ratio 기법을 통한 강우양상을 생성하기 위해 임의의 지정  $P_{i*}$  후 2절에서 소개한 식 (7)을 적용하였다. 임의의  $P_{i*}$  선정은 임의적 일 수 있으나 앞서 언급한 바와 같이  $P$ 와  $P_{i*}$  둘 다 0이 되면 안되는 제약조건을 갖고

있다. 이에 어느 하나라도 0을 포함하고 있는 강우 확률은 강우양상에 대한 log-ratio 변환에서 제외시켰다. log-ratio 변환을 통한 각  $Y_i$ 에 대해 자료의 수가 비교적 많으므로 본 연구에서는 Hill 등(1976)이 개발한 1~4 통계적 모멘트를 활용한 적정 Johnson 분포형 산정방법을 적용하였다. Table 6~9는 각 강우양상에 대한 log-ratio 변환결과의 통계 특성치와 변환 결과 값을 통한 최적 Johnson 분포형 및 그 변수

Table 6. Result of log-ratio conversion and Johnson distribution system(Type I)

Type I	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_9$	$Y_{10}$
Mean	-0.56	-0.42	-1.18	-1.79	-1.56	-1.32	-1.83	-1.98	-2.21
SD	1.31	1.37	1.68	1.12	1.24	1.16	1.45	1.56	1.64
Skewness	0.83	-1.12	-0.88	0.11	0.05	0.75	-0.70	-0.01	0.11
Kurtosis	0.53	1.48	1.03	-0.42	-0.31	0.34	0.42	-1.17	-0.55
$Y_1$	1.00								
$Y_2$	0.16	1.00							
$Y_3$	0.55	0.72	1.00						
$Y_4$	0.57	0.12	0.35	1.00					
$Y_5$	0.37	0.16	0.05	0.53	1.00				
$Y_6$	0.58	0.16	0.22	0.40	0.63	1.00			
$Y_7$	0.29	0.24	0.25	0.20	0.19	0.52	1.00		
$Y_9$	0.42	0.01	0.37	0.20	0.04	0.26	0.21	1.00	
$Y_{10}$	0.47	0.21	0.37	0.42	0.34	0.48	-0.02	0.67	1.00
gamma	1.0332	-1.535	-1.403	0.53	0.4619	0.9594	-1.043	-0.094	0.4611
delta	0.8262	1.0689	1.0926	1.1196	1.4242	0.8003	0.9154	0.6523	1.0066
lambda	6.5448	9.1582	10.887	6.0332	7.9922	5.573	7.6717	5.7093	8.1265
xi	-2.345	-7.495	-9.348	-4.208	-4.978	-2.903	-7.321	-4.974	-5.51
Type	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SB

Table 7. Result of log-ratio conversion and Johnson distribution system(Type II)

Type II	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_9$	$Y_{10}$
Mean	-0.50	0.93	1.45	1.39	0.75	-0.02	-0.41	-0.76	-1.24
SD	1.38	1.64	1.61	1.92	2.09	1.86	1.84	1.91	1.91
Skewness	1.21	0.39	1.25	0.08	0.19	0.36	0.69	0.16	0.48
Kurtosis	2.36	1.47	0.73	0.44	-0.03	0.67	0.27	0.29	-0.53
$Y_1$	1.00								
$Y_2$	0.42	1.00							
$Y_3$	0.56	0.82	1.00						
$Y_4$	0.61	0.66	0.80	1.00					
$Y_5$	0.50	0.72	0.78	0.86	1.00				
$Y_6$	0.50	0.66	0.78	0.75	0.87	1.00			
$Y_7$	0.45	0.67	0.76	0.63	0.67	0.77	1.00		
$Y_9$	0.40	0.47	0.61	0.65	0.64	0.68	0.76	1.00	
$Y_{10}$	0.59	0.55	0.75	0.78	0.69	0.67	0.76	0.81	1.00
gamma	5.965	-1.479	1.1049	-2.597	1.1995	4.6175	1.1139	3.6034	0.6534
delta	2.3337	2.6909	0.7163	4.9613	1.722	3.0407	0.9807	3.4066	0.6368
lambda	44.453	3.5303	7.7437	8.176	16.987	37.764	10.308	34.045	7.4821
xi	-3.933	-1.251	-0.424	-3.179	-5.092	-6.993	-3.308	-9.664	-3.698
Type	SB	SU	SB	SU	SB	SB	SB	SB	SB

Table 8. Result of log-ratio conversion and Johnson distribution system(Type III)

Type III	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_9$	$Y_{10}$
Mean	-0.24	0.33	0.66	1.25	1.91	2.10	1.73	0.88	-0.01
SD	1.26	1.27	1.49	1.55	1.32	1.23	1.61	1.73	1.85
Skewness	0.23	-0.27	-0.45	-0.02	0.06	0.65	0.16	0.01	0.11
Kurtosis	-0.05	0.26	-0.10	0.31	0.69	1.02	0.34	-0.51	-0.42
$Y_1$	1.00								
$Y_2$	0.19	1.00							
$Y_3$	0.27	0.66	1.00						
$Y_4$	0.16	0.37	0.57	1.00					
$Y_5$	0.30	0.37	0.56	0.80	1.00				
$Y_6$	0.45	0.41	0.59	0.70	0.75	1.00			
$Y_7$	0.31	0.41	0.50	0.59	0.55	0.78	1.00		
$Y_9$	0.33	0.37	0.51	0.50	0.63	0.68	0.65	1.00	
$Y_{10}$	0.39	0.45	0.56	0.55	0.70	0.79	0.64	0.84	1.00
gamma	1.1691	-2.051	-0.947	1.1995	-0.748	3.3715	6.0137	0.2435	0.6222
delta	1.5693	2.1439	1.022	5.0186	3.1618	2.1708	4.3337	1.4374	1.3033
lambda	9.4967	13.764	8.1491	7.3896	3.8396	17.999	43.452	11.061	11.296
xi	-3.429	-9.494	-4.922	3.0672	0.9429	-1.215	-7.062	-4.229	-4.478
Type	SB	SB	SB	SU	SU	SB	SB	SB	SB

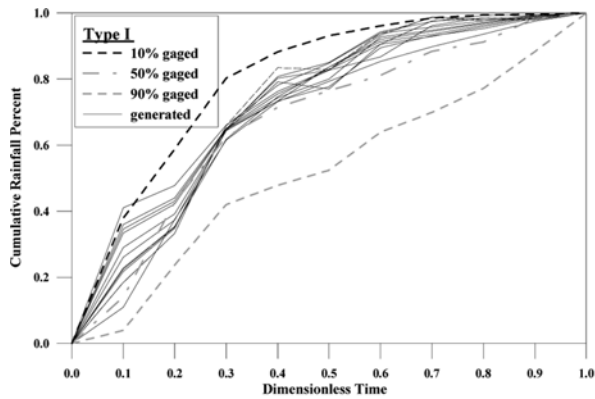
Table 9. Result of log-ratio conversion and Johnson distribution system(Type IV)

Type IV	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_9$	$Y_{10}$
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								
$Y_2$	0.12	1.00							
$Y_3$	0.53	0.62	1.00						
$Y_4$	0.52	0.40	0.77	1.00					
$Y_5$	0.27	0.18	0.46	0.62	1.00				
$Y_6$	0.33	0.50	0.66	0.70	0.76	1.00			
$Y_7$	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	-1.266	-3.682	5.3479	0.7944	2.5607	0.8919	1.8769	1.8023	0.9198
delta	1.1389	3.4748	4.9853	2.7631	1.9281	1.1239	1.194	1.1067	0.6943
lambda	10.601	2.8243	47.472	4.2031	19.809	9.2948	11.179	9.1835	6.7593
xi	-8.007	-3.816	-12.14	1.7181	-4.774	-2.687	-0.732	0.1519	-0.643
Type	SB	SU	SB	SU	SB	SB	SB	SB	SB

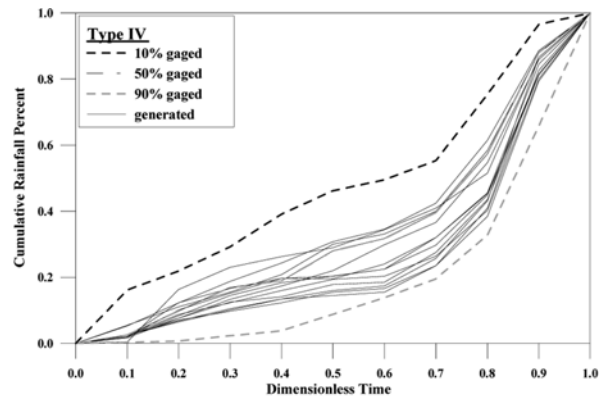
값을 나타내고 있다.

그리고 각  $Y_i$ 에 해당하는 분포형과 그 분포형의 변수에 따라 log-ratio 변환 값의 표준 정규값을 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 산정하였다. 각 강우양상별 표준 정규값의 상관행렬을 Cholesky decomposition을 통해 변환행렬  $T$ 를 생성하였

으며, 각 Johnson 분포형별 발생시킨 확률변수를 이를 이용하여 상관성을 가지는 확률변수로 재변환하였다. 얻어진 상관성을 갖는 확률변수는 log-ratio 역 변환을 통해 0과 1사이의 제약조건을 갖는 상관성을 갖는 변수로 변환하였다. 일련의 과정을 통해 산정된 값들은 결국 각 Type별 무차원 수문곡



(a) Type I



(b) Type IV

Fig 1. Sample of generated rainfall type

선의 절점이 된다. Fig. 1은 각 Type I과 IV에 대한 추계학적 발생가능한 강우양상 형태의 예를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 무차원 누가강우량곡선이 가지는 비정규분포 형태를 반영하여 감천유역에 대해 8, 9월에 발생가능한 다양한 무차원 누가강우량곡선을 다변량 Monte Carlo 기법을 도입하여 생성하였다. 이를 위해 먼저 30년 이상의 관측년수를 가지는 강우관측소 자료를 수집하고 이들 자료로부터 강우사상을 분리하여 무차원화를 실시하였다. 그리고 이들 무차원화된 누가강우량곡선을 4가지 형태로 구분하여 강우자료 특성을 반영한 누가강우량 곡선을 생성하였다. 무차원 누가강우량 곡선의 제약조건을 극복하기 위해 log-ratio 기법을 도입하였고 Monte Carlo 기법을 이용한 다변량 생성시 요구되는 정규화와 상관계수 반영의 문제점을 Johnson 시스템과 직교변환을 도입하여 모형에 적용함으로써 제약조건을 극복할 수 있었다.

본 연구에서 생성한 무차원 누가강우량 곡선은 특정 분포형을 가정해 실시되는 기존의 방법과는 달리 실제 강우량 자료의 특성을 가공없이 반영할 수 있어 해당 유역의 특성을 정확히 반영할 수 있었다. 그리고 수공구조물의 붕괴 및 침수피해가 국내의 경우 주로 8, 9월에 발생한다는 점에서 본 연구결과는 강우의 지역적 특성 및 시간적 특성을 반영하고 있어 해당 유역의 홍수대책 수립, 수공구조물 설계 및 분석 등 활용성이 매우 클 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 건설교통부 (1999) 수자원관리기법개발연구조사보고서.
- 건설교통부 (2007) 홍수량 산정기법 가이드라인(보완).
- Aitchison, J. (1986) *Statistical analysis of compositional data*. Chapman & Hall Inc., NY, USA.
- 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.
- Huff, F.A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy rainfalls. *Water Resources Res.*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Johnson, N.L. (1949) Systems of Frequency Curves generated by methods of translation. *Biometrika*, Vol. 36, pp. 149-176.
- Liu, P.L. and Der Kiureghian, A. (1986) Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances. *Probabilistic Eng. Mech.*, Vol. 1, No. 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-Champaign.
- Troutman, B.M. (1982) An analysis of input errors in precipitation-runoff models using regression with errors in the independent variables. *Water Resources Res.*, Vol. 18, No. 4, pp. 947-964.
- Wu, S.J. and Tung, Y.K. (2006) Stochastic generation of hourly rainstorm events. *J. of Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, Vol. 21, pp. 195-212.
- Zhao, B., Tung, Y.K., Yeh, K.C., Yang, J.C. (1997) Reliability analysis of hydraulic structures considering unit hydrograph uncertainty. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 11, No. 1, pp. 33-50.

© 논문접수일 : 09년 06월 08일  
 © 심사의뢰일 : 09년 06월 09일  
 © 심사완료일 : 09년 06월 16일