

국내 기존 합성단위도 방법의 비교

The Comparison of Existing Synthetic Unit Hydrograph Method in Korea

정 성 원* / 문 장 원**

Jung, Sungwon / Moon, Jangwon

Abstract

Generally, design flood for a hydraulic structure is estimated using statistical analysis of runoff data. However, due to the lack of runoff data, it is difficult that the statistical method is applied for estimation of design flood. In this case, the synthetic unit hydrograph method is used generally and the models such as Nakayasu method, Snyder method, SCS method, and HYMO method have been widely used in Korea. In this study, these methods and KICT method, which is developed in year 2000, are compared and analyzed in 10 study areas. Firstly, peak flow and peak time of representative unit hydrograph and synthetic unit hydrograph in study area are compared, and secondly, the shape of unit hydrograph is compared using a root mean square error(RMSE). In Nakayasu method developed in Japan, synthetic unit hydrograph is very different from peak flow, peak time, and the shape of representative unit hydrograph, and KICT method(2000) is superior to others. Also, KICT method(2000) is superior to others in the aspects of using hydrologic and topographical data. Therefore, Nakayasu method is not a proper method to estimate a design flood in Korea and hydrologist had better avoid to use this method in hydrological practice. Moreover, it is considered that KICT model is a better method for the estimation of design flood. However, if other model, i.e. SCS method, Nakayasu method, and HYMO method, is used, parameters or regression equations must be adjusted by analysis of real data in Korea.

keywords : Representative Unit Hydrograph, Synthetic Unit Hydrograph, Nakayasu method, SCS method, HYMO method

요 지

수공구조물의 설계홍수량 산정은 일반적으로 유출자료의 통계적 분석을 통해 산정된다. 하지만 자료의 부족으로 통계적인 방법을 이용하기 힘든 경우 이에 대한 대안으로 주로 강우-유출모형이 이용되고 있으며, 이 중 유출모형

-
- * 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원
Senior Researcher, Division of Water Resources and Environmental Eng., Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea
(E-mail : swjung@kict.re.kr)
 - ** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원
Researcher, Division of Water Resources and Environmental Eng., Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea
(E-mail : jwmoon@kict.re.kr)

은 합성단위도법이 많이 이용되고 있다. 이러한 합성단위도 방법 중 국내에서는 Nakayasu 방법, Snyder 방법, SCS 방법, HYMO 방법 등이 주로 이용되거나 제안되었으며, 본 연구에서는 이러한 기존 방법들과 최근 개발된 건기연의 합성단위도법을 총 10개 유역의 지점 대표단위도와 비교 검토함으로써 국내 수문특성에 가장 적합한 방법을 결정해보고자 하였다. 먼저 지점 대표단위도와 각 방법으로부터 합성된 단위도의 침투유량 및 침투시간을 비교하였으며, 평균제곱근오차의 산정과 비교를 통해 단위도의 형상을 비교하였다. 그 결과, 일본에서 개발된 Nakayasu 방법은 단위도의 침투유량, 침투시간과 단위도의 형상에서 실제와 매우 다른 왜곡된 결과를 나타내고 있었으며, 나머지 방법들은 지점에 따라 차이는 있으나 전반적으로 건기연(2000)의 방법이 실제 대표단위도에 가장 근접한 결과를 주고 있었다. 또한, 합성단위도 개발에 이용된 자료, 지점 및 유역특성 등을 조사한 결과, 과거의 성과를 함께 이용한 건기연의 방법이 가장 포괄적임을 알 수 있었다. 따라서 수문실무에서 합성단위도법을 적용할 경우, Nakayasu 방법을 이용하여 실제홍수량을 추정하는 방법은 지양되어야 할 것으로 보여지며, 건기연의 방법을 이용하는 것이 가장 적절한 결과를 줄 것으로 판단할 수 있었다. 하지만 만약 SCS나 Nakayasu 방법을 적용한다면 할 지라도 국내 자료를 통해 해당 모형의 매개변수나 회귀식 등을 조정하여 이용한다면 보다 적절한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

핵심용어 : 대표단위도, 합성단위도, Nakayasu 방법, SCS 방법, HYMO 방법

1. 서론

우리나라는 연 강수량의 2/3가 6월에서 9월 사이의 기간에 집중되는 특성이 강하므로 이로 인해 해마다 심각한 홍수피해를 입고 있는 실정이다. 이러한 홍수로 인한 피해를 저감하기 위한 대책 중 하나는 하천에 수공구조물을 설치하는 것이며, 해당 구조물의 최적 규모 결정을 위해 적절한 설계홍수량의 결정은 매우 중요한 의미를 갖는다.

수공구조물의 설계홍수량은 관측된 유출자료를 통계 분석하여 결정하는 것이 일반적이나 미계측유역이 대부분인 우리나라의 특성상 이러한 방법을 적용할 수 있는 경우는 드물다. 이에 대한 대안으로써 주로 이용하는 방법이 강우자료를 빈도 분석하여 확률강우량을 결정한 뒤 이를 유역특성인자로부터 합성된 단위도에 적용하여 홍수량을 결정하는 합성단위도법으로, 국내에서는 Nakayasu 종합단위도(佐藤勝夫, 1982), Snyder 합성단위도(Snyder, 1938), SCS 무차원 단위도(Mockus, 1957) 등이 이용되고 있다. 하지만 이러한 방법들은 국내 자료로부터 제안된 결과들이 아니므로 우리나라의 수문특성을 제대로 반영하고 있는지는 확실하지 않다. 따라서 국내 자료를 이용하여 기존 방법들을 국내 특성에 적합하도록 수정한 연구 성과들이 다수 있으나(건설부, 1974; 건기연, 1989; 건설부, 1992; 건설부, 1993), 자료 부족 등의 이유로 아직 활발하게 이용되고 있지 못한 실정이다. 최근 건기연(2000)은 과거 단위도 관련 연구성과를 종합하고 설마천 시험유역의 2개 지점과 3개 IHP 유역의 17개 지점의 대표단위도를 추가하여 총

70개 지점의 대표단위도와 해당 지점의 유역특성인자와의 단계별 다중회귀분석을 통해 새로운 합성단위도법을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 유역면적 520km² 이하의 총 10개 유역의 지점대표단위도를 최근 제시된 건기연의 합성단위도법 및 국내에서 개발된 주요 합성단위도법으로 합성된 단위도와 비교 검토함으로써 국내 수문특성을 가장 적절히 나타내는 방법을 결정해보고자 하였다. 비교 검토를 위해 선정한 합성단위도 방법은 수정 SCS 방법(건설부, 1992), 일본에서 개발되었지만 국내에서 많이 사용되는 Nakayasu 방법, 수정 Nakayasu 방법(건설부, 1992), HYMO 방법(건기연, 1989) 및 2000년 건기연의 방법이다. 선택된 각 방법의 비교를 위해 지점별 대표단위도와 각 방법으로부터 합성된 단위도의 침투유량과 침투시간 및 단위도의 형상을 비교하였으며, 그밖에 이용된 자료 수와 지점 수도 함께 비교 검토하였다.

2. 기존 합성단위도 방법의 개요

단위도를 합성하기 위한 합성단위도 방법은 적지 않으나 본 절에서는 국내외에서 제시된 주요 연구 결과들 중 본 연구에서 이용된 방법들을 중심으로 간략히 살펴보고자 한다.

2.1 SCS 방법 및 수정 SCS 방법 (건설부, 1992)

SCS 방법은 미국 토양보존국(Soil Conservation Service, SCS)이 제안한 방법으로 미국 내 여러 지방

의 유역에서 유도한 실측 단위도를 사용하여 결정된 무차원 단위도의 이용에 근거를 두고 있다.

SCS 방법에서는 단위도를 합성하기 위한 첨두유량과 첨두시간 산정 공식을 다음 식 (1), (2)와 같이 제안하고 있다.

$$t_p = \frac{t_r}{2} + t_p' \quad (1)$$

$$Q_p = \frac{2.08 A}{t_p} \quad (2)$$

여기서, t_p 는 강우 시작시간으로부터 첨두유량 발생 시간까지의 시간(hr)이며, t_r 은 유효우량의 지속기간(hr), t_p' 는 우량의 질량중심으로부터 첨두유량 발생시점까지의 시간, 즉 유역의 지체시간(hr), Q_p 는 첨두유량(m³/sec)이고, A는 유역면적(km²)이다.

SCS는 t_p' 에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 유역면적이라고 제시하였으며, 다음과 같은 회귀식을 통해 t_p' 를 결정할 수 있도록 제안하였다.

$$\begin{aligned} t_p' &= 1.44 A^{0.6} \quad (\text{미국 Texas주}) \\ t_p' &= 0.54 A^{0.6} \quad (\text{미국 Ohio주}) \end{aligned} \quad (3)$$

이와 같은 특성을 갖는 SCS 합성단위도법을 건설부(1992)는 국내 총 22개 지점의 대표단위도와 유역특성 인자를 이용하여 회귀분석 후 유역의 지체시간 산정식을 새롭게 제시한 바 있다. 이 때 대상지점의 유역면적은 1.46~519.69km²로서 대부분의 유역이 500km² 이하의 면적을 갖는 소유역으로 선정되었으나, IHP 대표유역을 제외한 나머지 지점들은 과거 70년대 후반에서 80년대 초반에 관측된 적은 수의 강우-유출자료를 이용할 수밖에 없는 한계를 포함하고 있다. 이러한 자료들로부터 유도된 지체시간 산정식은 다음 식 (4)로 제안하였다.

$$t_p' = 1.777 \left(\frac{A \cdot L}{S} \right)^{0.132} \quad (4)$$

여기서, L은 유로연장(km)이며, S는 유로경사(%)이다.

2.2 Nakayasu 방법 및 수정 Nakayasu 방법 (건설부, 1992)

이 방법은 Horner와 Flynt(1936)가 St. Louis시의 도시유역을 대상으로 개발한 방법을 일본의 Nakayasu(中安)가 일본 내 여러 유역에서 유도된 단위도의 특성변수와 유역의 지형학적 특성변수와의 관계를 조사

하여 무차원 단위도로 제안한 방법이다.

Nakayasu는 단위도의 상승부와 하강부를 다음과 같이 나누어 제시하고 있으며, 지속시간 t_r (hr)-유효우량 R_0 (mm)인 단위도는 다음 식으로 결정된다.

상승부 곡선 :

$$\frac{Q}{Q_p} = \left[\frac{t}{t_p} \right]^{2.4} \quad (5)$$

하강부 곡선 :

$$\begin{aligned} 0.3 \leq \frac{Q}{Q_p} \leq 1.0 \text{ 일 때} \\ \frac{Q}{Q_p} &= (0.3)^{\frac{t-t_p}{t_k}} \\ (0.3)^2 \leq \frac{Q}{Q_p} \leq 0.3 \text{ 일 때} \\ \frac{Q}{Q_p} &= (0.3)^{\frac{t-t_p+0.5 t_k}{1.5 t_k}} \\ (0.3)^3 \leq \frac{Q}{Q_p} \leq (0.3)^2 \text{ 일 때} \\ \frac{Q}{Q_p} &= (0.3)^{\frac{t-t_p+1.5 t_k}{2 t_k}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, Q_p 는 단위도의 첨두유량(m³/sec)이고, Q는 임의의 시간 t(hr)에서의 유량이다. t_p 는 호우시점부터 첨두발생시점까지의 시간(hr)으로 첨두유량 도달시간이라고 하며, $0.8t_r$ 시간부터 첨두발생시점까지의 시간을 첨두유량의 지체시간 t_g (hr)라고 한다. 또한 t_k , $1.5t_k$, $2t_k$ 는 유량이 Q_p 에서 $0.3Q_p$, $0.3Q_p$ 에서 $(0.3)^2 Q_p$ 로, $(0.3)^2 Q_p$ 에서 $(0.3)^3 Q_p$ 로 각각 감소하는 데 걸리는 시간이다.

Nakayasu는 t_g 와 t_k 를 결정하기 위해 유역면적, 유로연장 등 유출에 영향을 미치는 지형학적 인자들로 구성된 식 (7)과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} L < 15 \text{ km 일 때} & \quad t_g = 0.21 L^{0.7} \\ L > 15 \text{ km 일 때} & \quad t_g = 0.4 + 0.058 L \\ & \quad t_k = 0.47 (A L)^{0.25} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, L은 하천의 최대 유로연장(km), A는 유역면적(km²)이며, t_p 와 t_g 는 다음 식 (8)과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$t_p = 0.8t_r + t_g \quad (8)$$

또한, 첨두유량 Q_p 는 아래와 같이 표시될 수 있으며, 이러한 관계를 이용하면 유효우량 R_0 와 지속시간 t_r 인 단위도를 작성할 수 있다.

$$Q_P = \frac{0.2778R_0 A}{0.3t_P + t_k} \quad (9)$$

건설부(1992)는 국내 자료를 분석한 후 기존 Nakayasu 방법 중 식 (5)의 상승부 곡선식과 식 (7)의 tk 산정식, 그리고 식 (9)의 침투유량 산정식의 계수 등을 조정하여 수정 Nakayasu 방법을 제시하였으며, 각각의 관계식은 다음 식 (10), (11), (12)와 같다.

$$\frac{Q}{Q_P} = \left[\frac{t}{t_P} \right]^{1.59} \quad (10)$$

$$t_k = 2.951 (A L)^{0.104} \quad (11)$$

$$Q_P = \frac{0.2778R_0 A}{0.386t_P + t_k} \quad (12)$$

이 경우도 앞서 언급한 것과 마찬가지로 유역면적 500km² 이하의 22개 지점의 단위도 유도 결과가 이용됨으로써 소유역에 대한 특성을 어느 정도 포함하고 있으나, IHP 대표유역을 제외한 나머지 지점에서의 자료 부족으로 유역면적이 작은 소유역에서의 정확성은 다소 떨어진다는 한계가 있다.

2.3 HYMO 방법(건기연, 1989)

미 농무성에서는 1972년에 Williams와 Hann에 의해 무차원 단위유량도를 2변수-Gamma 분포로 해석하여, HYMO라는 이름으로 발표하였다. 이 모형은 강우-유출해석과 저수지 홍수추적 및 유사량 결정도 가능한 모형으로 이 방법에서 무차원 단위유량도는 아래와 같은 세 부분으로 구성되어 있다.

원점~변곡점(2변수-Gamma 분포) :

$$Q = Q_P \left[\frac{t}{t_P} \right]^{(n-1)} \exp \left[(1-n) \left(\frac{t}{t_P} - 1 \right) \right] \quad (13)$$

변곡점(t₀)~t₁(=t₀+2K) :

$$Q = Q_0 \exp \left(\frac{t_0 - t}{K} \right) \quad (14)$$

t₁ 이후 마지막 부분까지 :

$$Q = Q_1 \exp \left(\frac{t_1 - t}{K_1} \right) \quad (15)$$

여기서, Q는 임의시각 t에서의 유량(m³/sec), Q_P는 침투유량(m³/sec)이며, t_P는 강우중심으로부터 침투유량 발생시간까지의 지체시간(hr), n은 무차원 형상매개변수이다. 그리고 Q₀는 변곡점(t₀)에서의 유량이고, K는 감소상수(hr), Q₁은 시각 t₁에서의 유량이며, K₁은 2차 감소상수로 K의 3배로 정의하였다. 또한 무차원 형상

매개변수(n)는 K와 t_P의 함수로 표현되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{-t_P(t_0/t_P)^{n-1}}{(n-1) \left[(t_0/t_P)^{n-2} - (t_0/t_P)^{n-1} \right]} \quad (16)$$

여기서,

$$\frac{t_0}{t_P} = 1 + \left(\frac{1}{n-1} \right)^{0.5}$$

HYMO 방법에서 침투유량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_P = \frac{0.28A}{B \cdot t_P} \quad (17)$$

여기서, B는 유역매개변수로 다음과 같이 표현된다.

$$B = E + \left(\frac{Q_0}{Q_P} \right) \left[\left(\frac{K}{t_P} \right) \left(1 - \frac{Q_1}{Q_0} \right) + \left(\frac{Q_1}{Q_0} \right) \left(\frac{K_1}{t_P} \right) \right] \quad (18)$$

여기서, E는 무차원 단위유량도의 원점에서 변곡점(t₀)까지의 면적이며, 무차원 단위유량도를 적분하여 결정할 수 있다.

따라서 HYMO 모형에서는 K와 t_P가 결정되면 해당 유역의 단위도를 합성할 수 있으므로 이 두 가지 변수를 유역특성인자와의 관계식으로 설정하였으며, 건기연(1989)은 국내 31개 대상유역의 1시간 대표단위도로 부터 이들 관계를 재해석하여 다음과 같은 회귀식을 제안하였다.

$$K = 4.1725 (HT)^{-0.2752} (L)^{0.5957} \quad (19)$$

$$t_P = 0.5937 (A)^{0.2096} (L)^{0.3115} \quad (20)$$

여기서, HT는 표고차(m)이며, L은 하천의 유로연장(km), A는 유역면적(km²)이다.

건기연(1989)의 HYMO 합성단위도법은 합성된 단위도의 분포형을 제시해주며, 이용하기 편리하다는 장점이 있다. 그러나 이용된 자료가 최소 1개에서 최대 10개로 제한된 회귀식이 국내 유역의 특성을 대표한다고 보기 어려우며, 31개 대상지점들의 유역면적이 121.1~4,285.3km²로서 실무에서 필요로 하는 소유역에 대한 결과가 부족하다는 한계가 있어 추후 자료 확충 및 지점 확대를 통해 수정 보완이 필요하다고 볼 수 있다.

2.4 2000년 건기연의 합성단위도법

2000년 건기연은 과거 국내 단위도 연구성과들을 중

합하고 건기연에서 운영 중인 설마천 시험유역의 2개 지점과 IHP 유역 17개 지점의 단위도 유도 결과를 추가하여 총 70개 지점의 단위도 유도 결과와 유역특성인자와의 단계별 다중회귀분석 및 Nash 모형을 이용하여 새로운 합성단위도법을 제시하였다. 이 연구는 이용된 대상지점의 유역면적이 5.08~4,516.90km²로서 소유역이 다수 포함되어 있고 국내 연구성과 중 가장 많은 70개 지점의 결과를 포괄하고 있으며, 이용된 강우-유출자료 또한 가장 최근의 결과까지 포함하여 합성단위도법을 제시한 연구이다.

대상지점에 대한 유역특성인자와 단위도 특성치(침투유량, 침투시간)간의 다중회귀분석 결과, 다음 식 (21), (22)와 같은 회귀식을 제안하였으며, 제안된 식을 이용하여 단위도의 침투유량과 침투시간을 산정할 수 있도록 하였다. 이 때 제시된 회귀식은 유역면적의 경우 5.08~4,516.90km²이며, 유로연장의 경우 3.10~219.53km, 유로경사는 0.000757~0.040570의 범위를 갖는다.

$$T_p = 0.967 A^{0.255} L^{-0.040} Sc^{-0.137} \quad (21)$$

$$Q_p = 0.241 T_p^{-0.638} \quad (22)$$

여기서, A는 유역면적(km²), L은 유로연장(km), Sc는 유로경사이며, 식 (21)을 통해 계산되는 침투시간 TP의 단위는 시간(hr)이다. 그리고 식 (22)를 통해 산정되는 침투유량 Q_p의 단위는 mm/hr이며, 유량 단위로 환산하기 위해서는 적용 대상유역의 유역면적을 곱한 후 단위 환산하여야 한다.

또한 합성단위도의 종거를 계산하기 위해서 Nash 모형이 이용되었다. Nash 모형에 의하면 유역은 n개의

선형저수지의 조합으로 표현되며, 첫 번째 저수지에 대한 단위입력에 의해 생기는 n번째 저수지의 출력은 다음 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_n(t) = \frac{1}{k} \left(\frac{t}{k} \right)^{n-1} \frac{e^{-t/k}}{\Gamma(n)} \quad (23)$$

여기서, h_n(t)는 t시간에서의 유출량(mm/hr), n은 저수지의 개수, k는 저류상수(hr)이며, Γ()는 Gamma 함수이다. 이 식을 미분하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{n-1}{\Gamma(n)} (n-1)^{n-1} e^{-(n-1)} = Q_p \cdot T_p \quad (24)$$

여기서, Q_p와 T_p는 각각 단위도의 침투유량(mm/hr)과 침투시간(hr)이며, 침투유량과 침투시간이 주어지면 식 (24)를 이용하여 저수지의 수 n을 결정할 수 있고, n이 결정되면 다음 관계를 이용하여 저류상수 k를 결정할 수 있다.

$$k = \frac{T_p}{n-1} \quad (25)$$

따라서, 식 (21), (22)를 이용하여 먼저 단위도의 침투유량과 침투시간을 결정하면 식 (24) 및 (25)를 통해 Nash 모형의 매개변수 n, k를 결정할 수 있고, 이를 식 (23)에 대입하면 시간에 따른 유출량의 변화, 즉 단위도의 종거를 계산할 수 있으며, 이를 간단히 계산할 수 있는 프로그램을 함께 제시하였다.

3. 대상유역

단위도법의 적용한계가 보통 유역면적 5,000km² 라고 알려져 있으나 Ponce(1989)에 의하면 250km² 이하로

표 1. 대상지점의 유역특성인자

하 천	지 점 명	유역면적(km ²)	유로연장(km)	유로경사	표고차(m)
설마천	전적비교	8.50	5.80	0.02346	194.77
	사 방 댐	5.08	3.10	0.02648	172.55
평창강	방 립	519.69	51.85	0.00745	386.30
	상 안 미	396.25	44.20	0.00810	357.90
	장 평	103.55	25.95	0.01248	323.70
보청천	산 계	475.68	49.00	0.00582	285.00
	탄 부	72.53	19.20	0.01234	237.00
위 천	병 천	302.13	40.65	0.01099	446.74
	동 곡	33.63	8.00	0.04057	324.56
	효 령	151.03	21.80	0.03109	677.76

제한되고 있는 등 그 범위가 연구자에 따라 크게 다르다. 국내의 경우 유역면적 500km² 이하의 소유역에 대한 결과가 그 필요성에 비해 매우 부족하므로 본 연구에서는 대부분이 유역면적 500km² 이하인 IHP 유역과 설마천 시험유역의 10개 지점을 선정하였다. 선정된 10개 대상지점은 각각 설마천의 전적비교와 사방댐 지점, 평창강의 방림, 상안미, 장평 지점, 보청천의 산계, 탄부 지점, 그리고 위천의 병천, 효령, 동곡 지점으로, 유역면적에 따라 10km² 이하, 10~100km², 100~200km², 200~400km², 400km² 이상으로 구분하여 각각 2개 지점씩 선정하였다. 표 1은 10개 대상지점에 대한 유역특성인자들로 관련 보고서로부터 해당 내용을 조사하였으며, 설마천의 2개 지점에 대한 표고차는 1:25,000 지형도를 이용하여 직접 산정하였다. 이들 유역특성인자들은 각 방법을 이용한 단위도 합성시 해당 유역의 입력자료로 이용되었다.

4. 각 지점별 단위도 합성 결과의 비교·검토

선정된 10개 대상지점별로 수정 SCS, Nakayasu, 수정 Nakayasu, HYMO, 건기연의 방법을 적용하여 1시간-1mm 단위도를 합성하였으며, 합성된 각 지점별 단위도와 호우사상으로부터 유도된 지점 대표단위도를 비교하였다. 여기서 지점 대표단위도는 단위도 관련 연구결과 중 가장 최근이며 상대적으로 가장 많은 강우-유출자료로부터 유도된 건기연(2000)의 결과를 이용하였다.

4.1 첨두유량 및 첨두시간

표 2와 3은 5가지 합성단위도법을 적용하여 합성한 단위도와 지점 대표단위도의 첨두유량과 첨두시간을 나타낸 것이다. 표에서 ()안의 값은 각 합성단위도법으로부터 산정된 첨두유량 및 첨두시간과 지점 대표단위도의 첨두유량 및 첨두시간과의 비율을 의미한다. 지점

표 2. 지점 대표단위도와 합성단위도의 첨두유량 비교

지점명 (유역명)	유역면적 (km ²)	첨두유량 (mm)					
		대표 단위도	건기연	수정 SCS	Nakayasu	수정 Nakayasu	HYMO
사방댐 (설마천)	5.08	0.130 (1.000)	0.142 (1.092)	0.272 (2.092)	0.760 (5.846)	0.197 (1.515)	0.276 (2.123)
전적비교 (설마천)	8.50	0.090 (1.000)	0.131 (1.456)	0.237 (2.633)	0.588 (6.533)	0.169 (1.878)	0.198 (2.200)
동곡 (위천)	33.63	0.095 (1.000)	0.111 (1.168)	0.209 (2.200)	0.414 (4.358)	0.143 (1.505)	0.176 (1.853)
탄부 (보청천)	72.53	0.084 (1.000)	0.090 (1.071)	0.150 (1.786)	0.280 (3.333)	0.120 (1.429)	0.099 (1.179)
장평 (평창강)	103.55	0.065 (1.000)	0.086 (1.323)	0.139 (2.138)	0.238 (3.662)	0.109 (1.677)	0.089 (1.369)
효령 (위천)	151.03	0.089 (1.000)	0.087 (0.978)	0.151 (1.697)	0.233 (2.618)	0.110 (1.236)	0.113 (1.270)
병천 (위천)	302.13	0.084 (1.000)	0.072 (0.857)	0.114 (1.357)	0.166 (1.976)	0.090 (1.071)	0.072 (0.857)
상안미 (평창강)	396.25	0.062 (1.000)	0.067 (1.081)	0.105 (1.694)	0.153 (2.468)	0.086 (1.387)	0.064 (1.032)
산계 (보청천)	475.68	0.066 (1.000)	0.064 (0.970)	0.097 (1.470)	0.142 (2.152)	0.082 (1.242)	0.058 (0.879)
방림 (평창강)	519.69	0.058 (1.000)	0.064 (1.103)	0.099 (1.707)	0.137 (2.362)	0.080 (1.379)	0.059 (1.017)

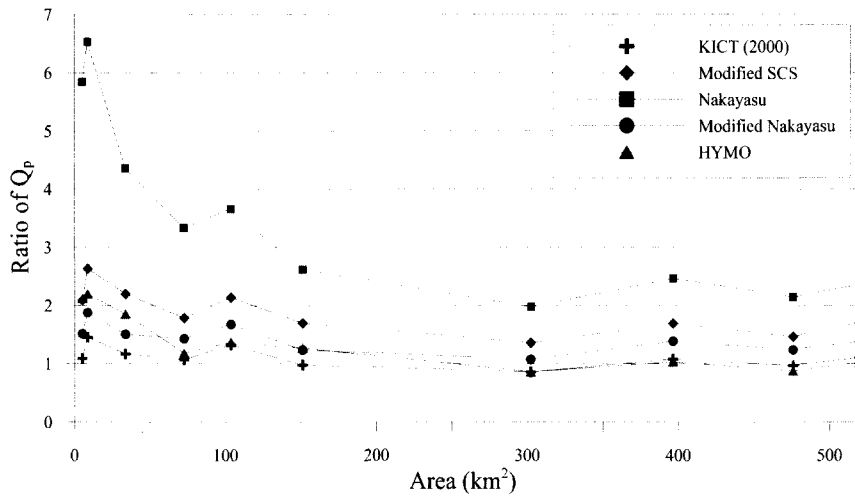


그림 1. 유역면적별 첨두유량 비의 변화

표 3. 지점 대표단위도와 합성단위도의 첨두시간 비교

지 점 명 (유역명)	유역면적 (km)	첨 두 시 간 (hr)					
		대 표 단위도	건기연	수정 SCS	Nakayasu	수정 Nakayasu	HYMO
사 방 댐 (설마천)	5.08	2.00 (1.000)	2.30 (1.150)	2.75 (1.375)	1.26 (0.630)	2.99 (1.495)	1.19 (0.595)
전적비교 (설마천)	8.50	2.20 (1.000)	2.60 (1.182)	3.16 (1.436)	1.52 (0.691)	3.83 (1.741)	1.61 (0.732)
동 곡 (위 천)	33.63	4.00 (1.000)	3.38 (0.845)	3.59 (0.898)	1.70 (0.425)	4.39 (1.098)	2.37 (0.593)
탄 부 (보청천)	72.53	6.00 (1.000)	4.68 (0.780)	4.99 (0.832)	2.31 (0.385)	5.39 (0.898)	3.66 (0.610)
장 평 (평창강)	103.55	5.50 (1.000)	5.05 (0.918)	5.39 (0.980)	2.71 (0.493)	6.39 (1.162)	4.33 (0.787)
효 령 (위 천)	151.03	6.00 (1.000)	4.94 (0.823)	4.96 (0.827)	2.46 (0.410)	5.78 (0.963)	4.44 (0.740)
병 천 (위 천)	302.13	5.00 (1.000)	6.64 (1.328)	6.58 (1.316)	3.56 (0.712)	8.55 (1.710)	6.23 (1.246)
상 안 미 (평창강)	396.25	7.00 (1.000)	7.39 (1.056)	7.14 (1.020)	3.76 (0.537)	9.07 (1.296)	6.77 (0.967)
산 계 (보청천)	475.68	9.00 (1.000)	8.07 (0.897)	7.70 (0.856)	4.04 (0.449)	9.77 (1.086)	7.26 (0.807)
방 립 (평창강)	519.69	7.50 (1.000)	7.96 (1.061)	7.60 (1.013)	4.21 (0.561)	10.19 (1.853)	7.53 (1.004)

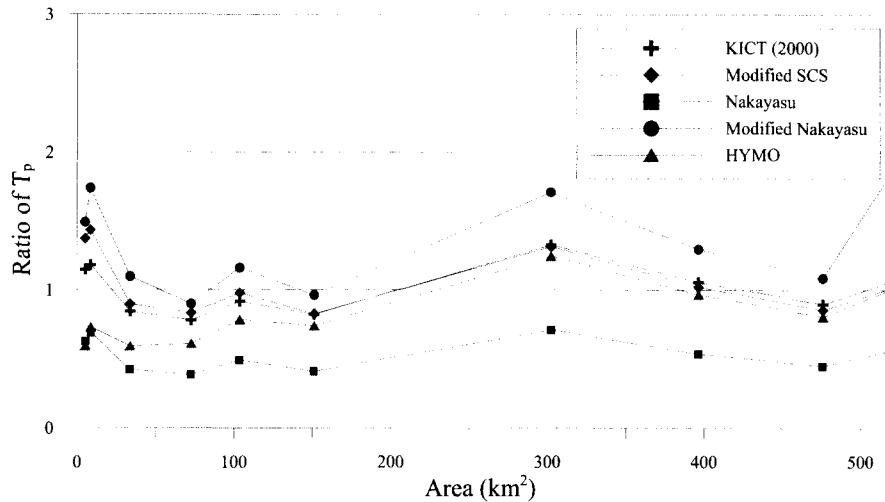


그림 2. 유역면적별 침투시간 비의 변화

대표단위도와 합성된 단위도의 침투유량 및 침투시간 비율이 1에 가까울수록 실제 사상으로 부터 유도된 지점 대표단위도와 유역특성인자로부터 합성된 단위도가 유사하게 나타난다고 볼 수 있으며, 음영 처리된 부분은 각 지점별로 1에 가장 근접한 결과를 주는 방법을 표시한 것이다. 또한 그림 1과 2는 표에 나타나 있는 침투유량 비와 침투시간 비를 유역면적별로 도시하여 그 변화양상을 나타낸 그림이다.

표 2의 침투유량에 대한 비교 결과를 살펴보면, 건기연의 방법이 총 10개 대상유역 중 7개 유역에서 가장 양호한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 특히 유역면적 200km² 이하 소유역에서의 결과는 나머지 방법들에 비해 매우 우수한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 1의 유역면적별 변화 양상에서도 건기연의 방법이 유역면적의 크기에 상관없이 각 지점별 대표단위도의 침투유량을 가장 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

표 3과 그림 2의 침투시간 비교 결과를 살펴보면, 수정 Nakayasu 방법이 4개 지점에서 가장 우수하게 나타나고 있으나 그 외 지점에서는 많은 차이를 보여, 유역면적에 따라 재현 정도가 불안정한 모습을 보여주고 있다. 이에 반해 수정 SCS 방법과 HYMO 방법, 그리고 건기연의 방법은 유역면적에 따른 재현 정도가 전반적으로 우수하게 나타나고 있으며, 세 방법 간에 큰 차이는 없으나 전반적으로 수정 SCS 방법이 침투시간의 재현성에서는 조금 우수하게 나타난다고 판단할 수 있다.

특히 침투유량과 침투시간의 비교 결과로부터 일본에서 개발된 Nakayasu 방법은 모든 지점에서 실제 대표단위도보다 매우 큰 침투유량을 나타내며, 침투시간 또한 매우 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 Nakayasu 방법이 일본의 산지하천의 자료로 유도된 방법이므로 우리나라 하천의 유출특성에는 적합하지 않다는 것을 의미한다. 따라서 설계홍수량 산정시 Na-

표 4. 대표단위도와 각 방법의 침투유량 비율 편차의 평균 및 표준편차

구분	건기연	수정 SCS	Nakayasu	수정 Nakayasu	HYMO
평균	0.149	0.877	2.531	0.432	0.431
표준편차	0.138	0.384	1.590	0.231	0.454

표 5. 대표단위도와 각 방법의 침투시간 비율 편차의 평균 및 표준편차

구분	건기연	수정 SCS	Nakayasu	수정 Nakayasu	HYMO
평균	0.151	0.177	0.471	0.358	0.242
표준편차	0.083	0.152	0.118	0.314	0.142

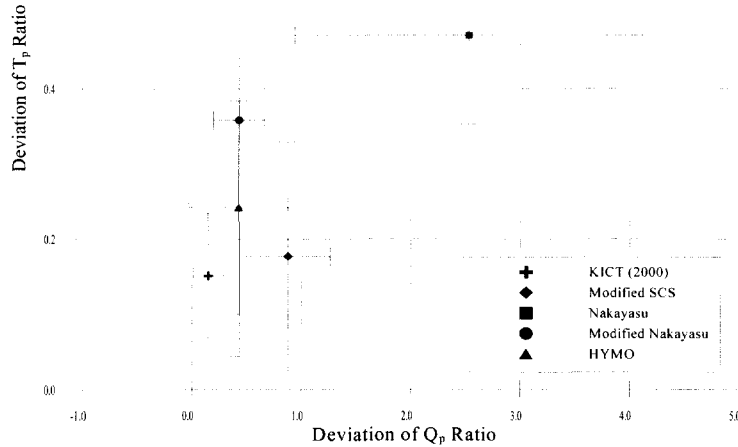


그림 3. 각 방법별 침투유량 비율-침투시간 비율 편차의 분포

kayasu 방법을 이용하는 것은 지양해야 할 것으로 판단된다.

표 4와 5는 각 지점별 대표단위도와 각 방법별 침투유량 및 침투시간 비율의 편차(절대치)를 구한 후 그 평균과 표준편차를 산정한 결과이다. 편차의 평균이 작을수록 실제 대표단위도의 침투부 좌표와 유사하게 나타남을 의미하며, 표준편차가 작을수록 유역면적의 변화에 따른 변동폭이 작게 나타남을 의미한다. 이러한 기준에서 보면 5가지 합성단위도법 중 건기연의 방법에 의한 결과가 평균과 표준편차 모두 가장 작게 나타나고 있으며, 이러한 결과는 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

따라서 본 연구에서 비교한 방법들 중 건기연의 방법, HYMO 방법, 수정 SCS 방법이 실제 지점 대표단위도의 침투유량 및 침투시간, 즉 침투부 좌표를 잘 재현하고 있음을 알 수 있으며, 이 중 전반적으로 건기연의 방법의 재현성이 두 가지 방법들의 결과보다 우수하게 나타난다고 판단할 수 있다.

4.2 단위도 형상

각 대상지점별로 합성된 단위도의 형상과 지점 대표 단위도의 형상을 비교하기 위해 합성된 단위도와 대표 단위도의 종거를 이용하여 평균제곱근오차(Root Mean

Square Error, RMSE)를 산정하였다. 평균제곱근오차는 일반적으로 수문곡선의 전체적인 형태를 비교하기 위해 주로 이용되는 방법으로 다음 식 (26)을 통해 해당 값을 산정할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{obs,i} - U_{est,i})^2} \quad (26)$$

여기서, N은 단위도의 종거 수이며, Uobs는 지점 대표단위도의 종거(mm/hr), Uest는 합성된 단위도의 종거(mm/hr)이며, 평균제곱근오차 RMSE의 단위는 단위도 종거와 같은 mm/hr의 단위를 갖는다.

표 6은 각 지점별로 산정된 평균제곱근오차를 나타낸 것이며, 그림 4는 이를 유역면적에 따라 도시한 것이다. 식 (26)을 이용하여 산정된 평균제곱근오차가 작게 나타날수록 대표단위도와 합성된 단위도의 전체적인 형태가 유사하다는 것을 의미하므로 모형의 재현성이 뛰어나다는 것을 뜻한다. 표 6과 그림 4에서 알 수 있듯이 대부분의 지점에서 유역면적에 상관없이 건기연 방법이 가장 뛰어난 결과를 보이고 있다. 300km² 이하에서는 수정 Nakayasu 방법은 두 번째로 우수한 결과를 보이며, 300km² 이상에서는 HYMO 방법이 두 번째로 우수한 결과를 보이고 있다. 수정 SCS 방법은 앞선 3

표 6. 각 방법별 평균제곱근오차(RMSE) 산정 결과

지점명	평균제곱근오차 (mm/hr)				
	건기연	수정 SCS	Nakayasu	수정 Nakayasu	HYMO
사방댐	0.00594	0.05300	0.13025	0.02687	0.04645
전적비교	0.01885	0.05822	0.11021	0.02883	0.03973
동곡	0.00931	0.04536	0.08196	0.01759	0.03485
탄부	0.00997	0.03025	0.06230	0.01070	0.01698
장평	0.01063	0.03239	0.05174	0.01573	0.01223
효령	0.00755	0.02875	0.04946	0.00947	0.01520
병천	0.01120	0.01893	0.02287	0.02623	0.01247
상안미	0.00314	0.02053	0.02931	0.01447	0.00310
산계	0.00412	0.01670	0.03240	0.00879	0.00619
방림	0.00366	0.01963	0.02589	0.01458	0.00352
평균	0.00844	0.03238	0.05964	0.01733	0.01907

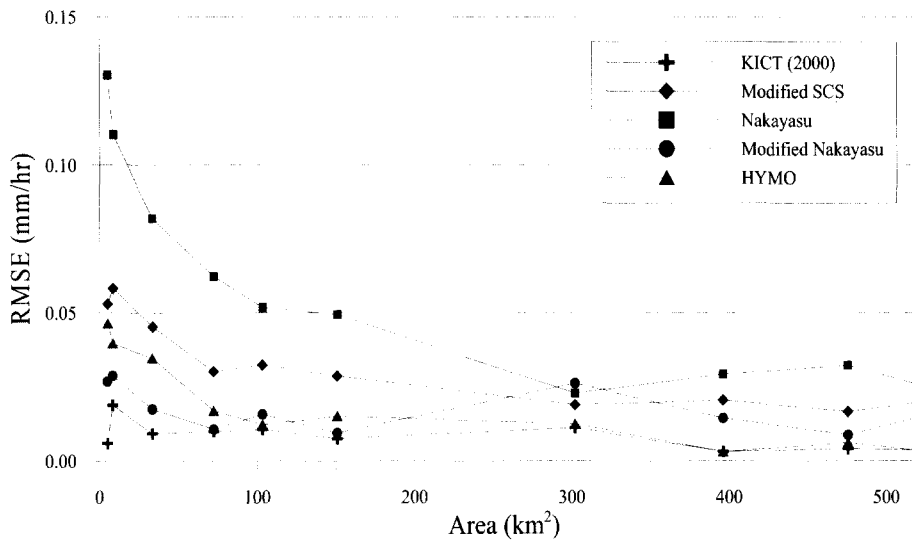


그림 4. 유역면적별 평균제곱근오차의 변화 양상 비교

가지 방법에 비해 상대적으로 떨어지는 결과를 보이고 있다. 또한, Nakayasu 방법은 다른 방법들에 비해 평균제곱근오차가 상대적으로 매우 크게 나타나 실제 대표단위도보다 상당히 왜곡된 결과를 주고 있으며, 이는 앞서 침투유량 및 침투시간에 대한 비교 결과와 동일한 결과이다.

그림 5는 10개 대상지점에 대한 대표단위도와 5가지 방법으로 합성된 단위도들을 함께 도시한 결과이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 건기연 방법으로 합성된 단위도

가 침투부 좌표 및 형상에서 실제 대표단위도를 가장 잘 따라가는 것을 알 수 있다. 그 다음으로 수정 Nakayasu, HYMO, 수정 SCS 방법 순으로 나타나고 있음을 알 수 있다. Nakayasu 방법은 앞서 언급한 것과 같이 단위도 형상에서도 매우 큰 차이를 보이고 있다.

대표단위도와 합성된 단위도의 형상 비교 검토를 종합하면, 건기연 방법이 다른 방법들에 비해 유역면적에 상관없이 우수한 결과를 보여주고 있다. 그러나 건기연

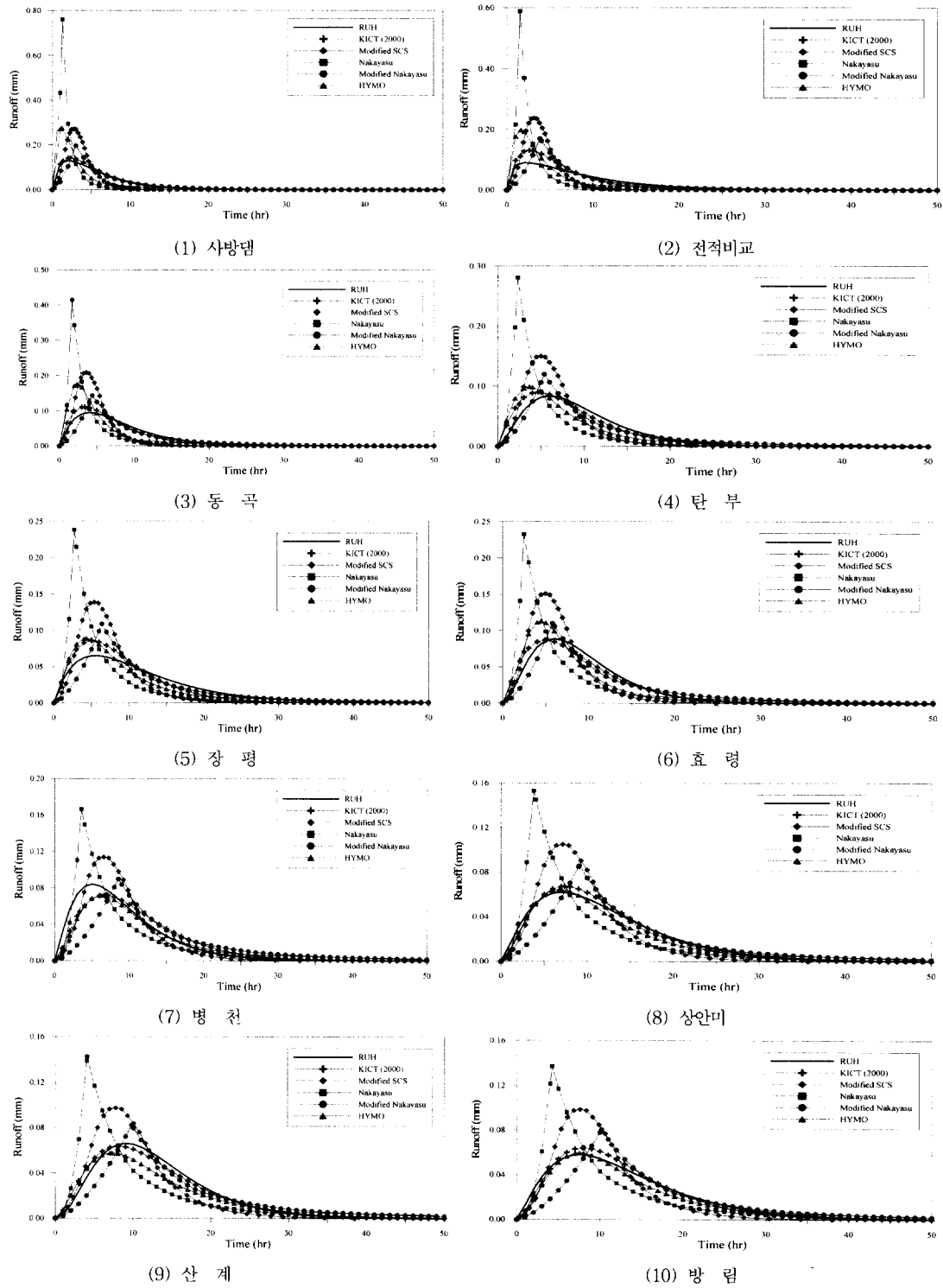


그림 5. 대표단위도(RUH)와 합성단위도의 비교

표 7. 합성단위도의 유도조건

구 분		건기연 (2000)	수정 SCS 및 수정 Nakayasu (1992)	HYMO (1989)
대상 지점	갯수	70	22	31
	분포	전국	IHP 대표유역 중심	전국
이용 자료 수	최소	2	2	1
	최대	99	34	10
	합계	2181	526	150
	평균	31.2	23.9	4.8
단위도 수	최소	1		1
	최대	42		9
	합계	941		118
	평균	13.4		3.8
유역면적 (km ²)		5.08~4,516.9	1.46~519.7	121.1~4,285.3
유로연장 (km)		3.10~219.53	1.50~51.85	21.8~176.0

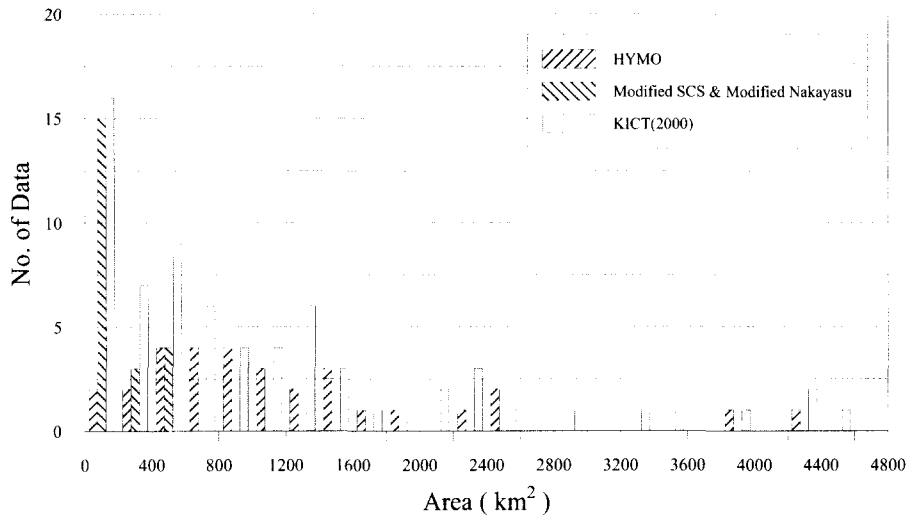


그림 6. 유역면적별 대상지점 수의 분포

방법이 비교 기준인 지점 대표단위도와 같은 방법을 사용하였기 때문에 단위도 형상을 정의하는 형태가 상이한 다른 방법들과 직접적으로 비교하는데는 무리가 있다. 또한 지점 대표단위도가 건기연 방법을 유도하는데 직접 이용된 단위도이기 때문에 다른 방법보다는 더 잘 재현할 수 있다. 따라서 단순히 단위도 형상을 비교하여 지점 대표단위도를 잘 재현하고 있거나 평균제곱근 오차가 더 작다고 해서 그 방법이 뛰어나다고 결론짓기에는 무리가 있다. 다만, 전반적으로 건기연 방법이 지

점 대표단위도의 침투유량 및 침투시간 뿐만 아니라 전체적인 형상도 잘 재현하고 있으며, 특히, 유역면적에 관계없이 안정적으로 재현하고 있으므로 건기연 방법이 다른 방법들에 비해 우수하다고 볼 수 있을 것으로 판단된다.

5. 이용자료 및 대상지점 비교

침투유량 및 침투시간과 단위도 형상의 비교 검토에서 알 수 있듯이 건기연 방법이 가장 우수하며 국내에

서 개발된 다른 합성단위도 방법들도 정도의 차이는 있지만 지점 대표단위도를 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 본 절에서는 이러한 방법들을 유도하기 위해 이용된 자료와 대상 지점들을 검토함으로써 각 방법들의 적용성을 간접적으로 검토해 보고자 한다.

표 7은 HYMO 방법, 수정 Nakayasu 방법 및 수정 SCS 방법, 그리고 건기연 방법을 유도하기 위해 이용된 지점 및 자료 특성을 나타낸 것이다. 대상지점 수를 보면 건기연 방법이 70개로 가장 많으며, 공간적인 분포도 비교적 다양함을 알 수 있다. 단위도 유도를 위해 이용한 강우-유출 자료 수를 살펴보면 HYMO 방법이 지점 당 평균 4.8개로 가장 적으며, 건기연 방법이 평균 31.2개로 가장 많음을 알 수 있다. 또한, 합성 단위도 방법을 유도하기 위해 이용한 단위도 수는 수정 SCS 및 수정 Nakayasu 방법은 관련 문헌에 언급된 바가 없으므로 알 수 없지만, HYMO 방법이 지점 당 평균 3.8개인 반면에, 건기연 방법이 13.4개로 상대적으로 많은 단위도를 이용하여 합성단위도를 개발하였음을 알 수 있다. 합성단위도 유도에 이용된 지점의 유역면적과 유역연장도 건기연 방법이 폭넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 건기연 방법이 유역면적별 지점 분포가 다양한 것뿐만 아니라, 500 km² 이하의 소유역에서도 가장 많은 지점 수를 확보하고 있다.

강우-유출 자료가 제한적인 우리나라의 상황을 감안한다면 건기연의 방법이 상대적으로 지점 수와 이용자료, 유역특성인자 등에서 가장 폭넓은 요건을 확보하고 있다. 따라서 침투유량 및 침투시간, 단위도 형상 등 앞 절에서 검토한 각 모형별 재현성에서 뿐만 아니라 합성 단위도의 개발에 이용된 제반 조건도 건기연의 방법이 상대적으로 뛰어남을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내에서 수정 제안되거나 새롭게 제시된 5가지 합성단위도 방법들을 이용하여 합성된 단위도를 비교 검토하고, 합성단위도 유도조건을 함께 검토함으로써 국내 수문특성에 가장 적절한 방법을 판단해 보았다. 대상지점 선정시, 한국건설기술연구원에서 운영 중인 설마천 시험유역과 3개 IHP 대표유역에 위치한 지점 중 유역면적별로 10개 지점을 택하여 건기연(2000)의 연구결과로서 제시된 대표단위도와 지점별로 합성된 단위도를 비교하였다.

본 연구에 이용된 합성단위도 방법은 국내에서 많이

이용하는 SCS 방법, Nakayasu 방법, HYMO 방법을 이용하였으며, 이 중 SCS 방법과 HYMO 방법은 국내 자료를 이용하여 모형의 매개변수 또는 회귀식이 새롭게 수정 제시된 방법을 적용하였고, Nakayasu 방법은 기존 일본에서 유도된 방법과 국내 자료를 통해 수정된 방법을 모두 적용하였다. 여기에 최근에 건기연에 의해 제시된 새로운 합성단위도법도 추가하여 총 5가지 방법을 비교 분석하였다.

비교를 위해 먼저 합성된 단위도의 침투유량과 침투시간을 대표단위도의 침투유량, 침투시간과 비교하였고, 두 번째로 대표단위도와 합성된 단위도에 대한 평균제곱근오차(RMSE)를 산정하여 전체적인 단위도의 형상을 비교하였다. 또한 합성단위도 방법을 유도하는데 이용된 자료와 대상 지점의 특성을 검토하였다.

이상의 분석 결과로부터 지금까지 본 연구에서 적용된 5가지의 합성단위도 방법 중 Nakayasu 방법은 실제와 매우 다른 왜곡된 결과를 주고 있음을 확인할 수 있었으며, 나머지 방법들은 지점에 따라 차이는 있으나 전반적으로 양호한 결과를 주고 있었다. 또한 Nakayasu 방법과 국내 자료로 수정 제시된 수정 Nakayasu 방법을 비교한 결과, 수정 Nakayasu 방법이 실제 대표단위도에 보다 근접한 결과를 주고 있음을 알 수 있었다. 이로부터 기존 외국에서 개발된 방법을 국내 유역에 적용할 때는 국내 자료로 분석하여 수정한 방법을 이용하는 것이 타당하다는 결론을 얻을 수 있었다.

하지만 국내 자료로부터 수정 제시된 수정 SCS 방법, 수정 Nakayasu 방법, HYMO 방법의 경우에도 기존 모형보다는 국내 수문특성에 적합한 결과를 주고 있다고 판단할 수 있으나, 소유역에 대한 분석자료가 부족하여 유역면적 200km² 이하의 소유역에서의 정확성은 상대적으로 떨어지는 결과를 나타내고 있었다. 이에 비해 건기연의 방법은 침투유량 및 침투시간에 대한 비교 결과, 침투유량의 경우 유역면적에 상관없이 실제 대표단위도에 가장 근접한 결과를 나타내고 있으며, 침투시간 또한 큰 편차 없이 양호한 결과를 주고 있는 등 본 연구에서 이용한 5가지 방법 중 가장 우수한 결과를 나타내고 있었다. 또한 단위도 형상을 비교한 결과에서도 객관적인 비교 기준은 될 수 없으나 이와 동일한 결과를 얻을 수 있었으며, 합성단위도 개발에 이용된 지점 수와 이용자료, 유역특성인자 등에서도 건기연 방법이 상대적으로 가장 폭넓은 요건을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

이러한 결과는 건기연의 모형이 과거 주요 연구성과를 함께 이용하였고, 특히, 유역면적 200km² 이하의 소유역에 대한 자료가 다수 포함된 자료로부터 유도되었기 때문이라고 보여지며, 따라서 이러한 소유역에서의 단위도 특성을 보다 잘 반영할 수 있음을 나타내는 결과라고 판단할 수 있다.

이와 같은 결과로부터 수문 실무에서 합성단위도법을 적용할 경우, Nakayasu 방법을 이용하여 설계홍수량을 추정하는 방법을 이용하는 것은 지양되어야 할 것으로 판단되며, 본 연구 결과에서 가장 우수한 결과를 주는 건기연의 방법을 이용하는 것이 가장 적절한 결과를 줄 것으로 판단할 수 있었다. 만약 SCS나 Nakayasu 방법을 적용한다 할 지라도 국내 자료를 통해 수정 제시된 모형을 이용하거나 실제 자료를 직접 분석하여 해당 모형의 매개변수나 회귀식 등을 조정하여 이용하는 것이 보다 적절한 결과를 주게 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

건설부(1974), 홍수량 추정을 위한 합성단위유량도 유도의 연구조사보고서
 건설부(1992), 국제수문개발계획 연구보고서, 국내 기존 합성단위유량도의 비교분석
 건설부(1993), 1993년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서
 한국건설기술연구원(1989), 설계홍수량 산정을 위한

단위유량도의 합성방법 개발, 연구보고서, 건기연 88-WR-111
 한국건설기술연구원(2000), 시험유역의 운영 및 수문 특성 조사·연구 -합성단위도 개발을 중심으로-, 연구보고서, 건기연 2000-092
 Horner, W.W. and Flynt, F.L.(1936), "Relation between Rainfall and Runoff from Small Urban Area", *Transactions of ASCE*, Vol. 101, pp.140~183
 Mochus, V.(1957), "Use of Storm and Watershed Characteristics in Synthetic Hydrograph Analysis and Application", Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service
 Ponce, V.M.(1989), *Engineering Hydrology-Principles and Practices*, Prentice Hall
 Snyder, F. F.(1938), "Synthetic unit-graphs", *Transaction of American Geophysical Union*, Vol.19, pp.447~454
 Williams, J. R. and Hann, R. W.(1972), "HYMO, a Problem-oriented Computer Language for Building Hydrologic Models", *Water Resources Research*, Vol.8, pp.79~86
 佐藤勝夫(1982), 洪水流出計算法, 山海堂
 (논문번호:01-054/접수:2001.07.09/심사완료:2001.11.02)