

## 국내 수문특성에 적합한 합성단위도의 개발 The Development of Synthetic Unit Hydrograph Suitable to the Hydrologic Characteristics in Korea

정 성 원\* / 문 장 원\*\*

Jung, Sungwon / Moon, Jangwon

### Abstract

Generally, the synthetic unit hydrograph method is presented to estimate the design flood in the ungauged watershed. However, due to the lack of rainfall-runoff data, the models developed in other countries such as U.S.A. and Japan have been widely used in Korea. Therefore, it may be essential to develop the rainfall-runoff model suitable for the hydrological characteristics in Korea. In this study, the representative unit hydrographs are derived from rainfall-runoff data at 19 basins in Selma-Cheon and 3-IHP experimental watersheds using ridge-regression method and Nash model. And a new synthetic unit hydrograph for Korea is suggested by integrating the described results and previous studies on unit hydrograph. The newly developed method is represented as two regression forms with three independent variables of watershed area, channel length, and channel slope by multiple regression analysis for the watershed and unit hydrograph characteristics. When the multiple regression analysis is carried out for each watershed, the coefficients of determination are not improved in all cases compared with the result of using all data. In Korea, it is more or less difficult to construct the synthetic unit hydrograph for each watershed. Therefore, when the new method is applied to some watersheds, the result analyzed for all data has to be used.

*keywords* : Representative Unit Hydrograph, Watershed Characteristic, Multiple Regression Analysis, Synthetic Unit Hydrograph, Regional Homogeneity

### 요 지

일반적으로 합성단위도법은 강우-유출기록이 없는 유역의 설계홍수량 산정을 위해 제안되었다. 그러나 국내에서는 아직까지 자료의 부족 등으로 외국에서 개발된 각종 유출모의 모형이 주로 이용되고 있다. 따라서 그 동안 축적

- 
- \* 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)

된 국내의 강우 유출 자료를 이용하여 국내의 수문특성에 적합한 유출모형의 개발이 절실한 상황이다. 이를 위해 본 연구에서는 설마친 유역의 2개 지점과 IHP 대표유역인 평창강, 보청천, 위천의 17개 지점에 대해 그동안 축적된 유출 관련 연구결과를 종합하여 새로운 합성단위도법을 개발하였다. 개발된 합성단위도는 유역특성인자와 단위도 지수(침투시간, 침투유량)와의 다중회귀분석을 통해 유역면적-유로연장-유로경사의 3가지 변수로 구성되는 선형 방정식을 이용하여 산정할 수 있다. 따라서 우리나라에서는 아직까지 수계별로 합성단위도를 분리하여 제시하기는 무리라고 보여진다.

**핵심용어** : 대표단위도, 유역특성인자, 다중회귀분석, 합성단위도, 지역적 동질성

## 1. 서 론

최근 우리나라 재해 상황을 살펴보면 치수사업의 활성화와 각종 법령과 제도의 정비가 이루어지고 있음에도 불구하고 재해 발생빈도와 피해규모가 대형화되고 있는 추세를 보이고 있다. 이러한 재해를 저감하기 위한 노력 중의 하나가 하천의 홍수량을 정확히 추정하는 것이며, 이는 하천정비와 수공구조물의 최적 규모 결정을 위해 매우 중요하다.

수공구조물의 설계홍수량을 산정하기 위해 유역특성을 변수로 하여 해당 유역의 단위도를 결정하는 합성단위도 방법을 주로 사용하고 있으며, Nakayasu 종합단위도(佐藤勝夫, 1982), Snyder 합성단위도(Snyder, 1938), SCS 방법(Mockus, 1957) 등이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 외국에서 개발한 것으로 우리나라 실정에 맞게 수정하여 적용하려는 시도가 있어 왔지만 분석한 자료의 낮은 신뢰도와 대상유역의 제한으로 아직까지 실무에 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다.

이러한 한계에도 불구하고 1992년 수자원관리기법개발연구조사(건설부, 1992a)의 내용 중 '설계홍수 추정 방법에 대한 설문조사' 결과에 따르면 국내의 수문 실무자들은 계측유역과 미계측유역 모두에서 국내외에서 개발된 합성단위도법을 여전히 많이 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 이는 국내에서 널리 활용할만한 연구 성과가 폭넓게 없음에도 불구하고 별다른 대안이 없기 때문인 것으로 판단된다.

합성단위도 관련 국내 연구성과를 살펴보면 김상용(1972)은 낙동강을 중심으로 Nakayasu 방법의 적용성을 검토하였으며, 건설부(1974)는 Clark의 유역추적법을 이용하여 한강, 금강, 낙동강 유역의 21개 지점에 대해 대표단위도를 유도하고 이로부터 Snyder형 합성

단위도를 유도한 바 있다. 또한 선우중호와 고영찬(1986)은 한강 유역에 대해 건설부(1974)의 Snyder 계수가 자료부족으로 인해 정확히 추정되지 못함을 밝히면서 수집된 자료를 근거로 조정공식을 제안하였다. 한국건설기술연구원(1989)은 전국의 31개 지점에 대해 Snyder형 합성단위도를 유도하였으며, 이와 함께 Williams와 Hann(1972)이 제안한 HYMO 모형의 매개변수도 추정한 바 있다. 건설부(1989a)는 IHP 대표유역인 평창강, 보청천, 위천의 3개 유역을 중심으로 Snyder 모형, SCS 모형, Nash 모형, Clark 모형을 선정하여 각 모형의 특성치 및 매개변수를 각 유역에 대해 추정하여 비교 분석하였다. 그 결과, Snyder형 합성단위도의 적용성이 가장 뛰어남을 밝힌 바 있다. 건설부(1992b)는 IHP 유역과 삼강 등 22개 지점에 대해 단위도를 유도하여 SCS 및 Nakayasu 방법의 매개변수를 도출하였으며, 국내에서 기존에 개발된 Snyder 모형 및 HYMO 모형과 비교 검토하였다. 또한 유출과 유역특성을 조사하여 우리나라를 전역과 수계별로 나누어 동질성 검토를 수행하였다. 건설부(1993)는 수자원관리기법연구조사 사업의 일환으로 전국의 65개 지점에 대해 능형회귀방법을 이용하여 지점 대표단위도를 유도하였으며, 이로부터 유역면적을 이용하여 단위도의 침투유량과 침투시간을 결정할 수 있는 Nash 모형에 의해 단위도의 증거를 결정할 수 있는 합성단위도 방법을 제안하였다.

이와 같이 국내 수문 및 수자원 분야에서 단위도나 합성단위도를 다룬 연구성과들이 다른 분야에 비해 적지 않은 것이 사실이다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구성과들이 실무에 활발히 적용되거나 설계기준으로 채택되지 못하고, 대부분 외국에서 개발된 방법들이 그대로 이용되고 있다. 이는 그간의 연구성과들이 자료의 한계, 대상유역의 한계 및 연구성과 활용 노력 부족 등

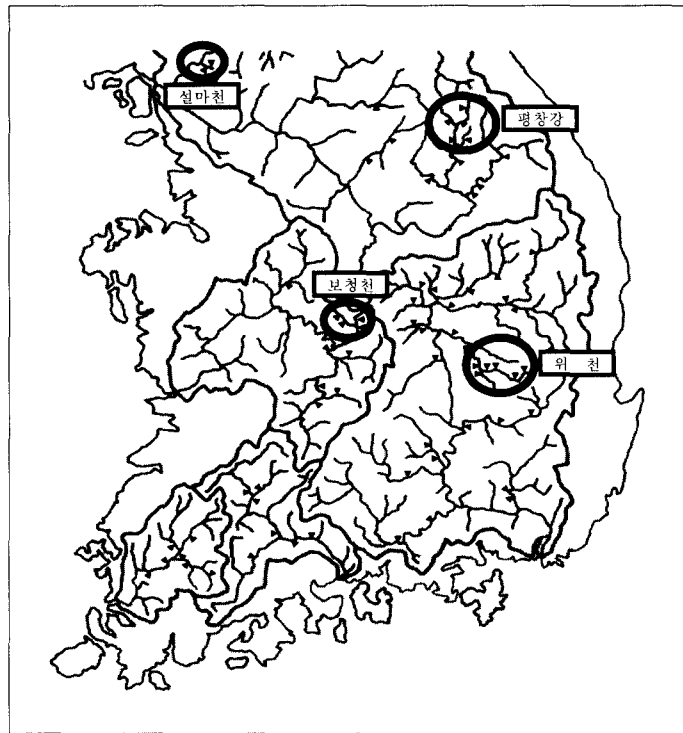


그림 1. 합성단위도 유도에 이용된 대상지점

으로 인한 것으로 보여진다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 이루어져온 과거 연구성과들을 최대한 활용하고, 여기에 유역면적 200km<sup>2</sup> 이하의 소규모 유역에 대한 분석결과를 추가함으로써 자료의 한계를 극복하고 국내 수문특성을 보다 적절히 대표할 수 있는 새로운 합성단위도법을 제안하고자 하였다. 이를 위해 기존 연구결과 중 총 51개 지점에 대한 대표단위도 유도결과를 조사하여 확보하였고, 현재 한국건설기술연구원에서 운영중인 설마천 시험유역의 2개 지점과 IHP 대표유역 17개 지점에 대한 대표단위도를 유도하여 기존 결과에 추가함으로써 총 70개 지점에 대한 대표단위도 유도결과를 이용하였으며, 각 지점의 위치는 그림 1에 간략히 나타내었다. 또한 각 지점에 대한 유역특성인자들을 결정하여 단위도 특성치(침투유량, 침투시간)와의 단계별 다중회귀분석을 통해 새로운 단위도 특성치 산정식을 제안하였으며, 침투부를 제외한 나머지 부분의 종거는 Nash 모형을 통해 결정할 수 있는 합성단위도 방법을 제안하였다. 참고로 본 연구에서 제시한 대상유역의 대표단위도와 합성단위도는 1시간-1mm 단위도임을 밝혀둔다.

## 2. 대표단위도의 결정

### 2.1 대상유역

단위도 관련 국내 연구성과 중 가장 많은 지점을 포괄하고 있는 것은 건설부(1993)로서 65개 지점에 대해 대표단위도를 유도한 바 있다. 최종적으로 합성단위도에 사용한 지점의 유역면적은 54.3~24,753.2km<sup>2</sup>에 이르고 있으나 500km<sup>2</sup> 이하인 지점은 6개 지점에 불과하다. 이 연구는 방대한 양의 자료를 구축하여 많은 지점에서 단위도를 유도하였으나 실무에서 필요로 하는 소규모 유역에 대한 단위도가 절대적으로 부족하다는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 포괄하고 있지 못한 유역면적이 작으면서 다량의 강우-유출 자료를 확보할 수 있는 지점으로 한국건설기술연구원에서 운영중인 설마천 시험유역의 2개 지점(전적비교, 사방댐)을 대상지점으로 선정하였다. 또한 건설부(1992b)의 연구에서는 IHP 대표유역의 1983~1989년의 자료를 이용하였으나 이후 10여년의 자료가 추가로 구축되었으므로 이를 이용하여 대표단위도를 재산정함으로써 정도를 향

표 1. 대상지점의 유역특성인자

하천	지점명	유역면적(km <sup>2</sup> )	유로연장(km)	유로경사
설마천	전적비교 사방댐	8.50	5.80	0.02346
		5.08	3.10	0.02648
평창강	방림 하반정 상안미 백옥포 장평 이목정	519.69	51.85	0.00745
		83.98	19.30	0.01315
		396.25	44.20	0.00810
		142.26	22.95	0.01159
		103.55	25.95	0.01248
보청천	산계대 기대부 탄이평 산성	475.68	49.00	0.00582
		346.54	30.32	0.00832
		72.53	19.20	0.01234
		79.52	16.81	0.01369
위천	무성천 병성 미성 고노 동곡 효령	472.53	42.83	0.01078
		302.13	40.65	0.01099
		171.25	30.90	0.01398
		109.73	18.90	0.02084
		33.63	8.00	0.04057
		151.03	21.80	0.03109

표 2. 대표단위도 유도에 이용된 각 지점별 강우-유출 자료

하천	지점명	이용자료	분석 호우사상수	총 강우량 평균 <sup>*)</sup> (mm)	직접유출량 평균 <sup>*)</sup> (mm)	평균 유출률 <sup>*)</sup>
설마천	전적비교 사방댐	1996-2000	35	89.6	48.9	0.516
			15	121.8	63.4	0.472
평창강	방림 하반정 상안미 백옥포 장평 이목정	1983-1999	52	117.1	82.5	0.632
			44	101.5	54.3	0.491
			48	99.5	71.7	0.657
			39	103.8	70.0	0.690
			38	111.1	74.0	0.633
보청천	산계대 기대부 탄이평 산성	1983-1999	45	106.9	86.4	0.758
			41	79.6	24.4	0.291
			42	87.6	52.4	0.559
			41	106.3	44.5	0.414
위천	무성천 병성 미성 고노 동곡 효령	1983-1997	39	91.7	46.7	0.485
			36	93.9	43.7	0.551
			42	88.5	54.9	0.550
			45	73.2	39.9	0.496
			44	83.7	44.7	0.474
			44	80.6	39.1	0.446
			44	85.1	44.8	0.480
			44	85.4	39.8	0.431

주) 단위도 유도를 위해 채택된 사상들의 결과임.

상시킬 수 있을 것으로 기대되어 IHP 3개 지역의 17개 지점을 추가로 선정하였다.

최종적으로 본 연구에서는 임진강 유역에 위치한 설마천 시험유역의 2개 지점, IHP 대표유역인 평창강의 방림 등 6개 지점, 보청천의 산계 등 5개 지점, 위천의 무성 등 6개 지점 등 총 19개 지점을 대표단위도 유도를 위한 대상지점으로 선정하였다. 표 1은 선정된 19개 대상지점의 유역특성인자를 나타낸 것이다.

## 2.2 수문자료 구축

본 연구에서 대상지점으로 선정한 19개 지점은 대표단위도 유도에 필요한 강우-유출 자료가 비교적 잘 정리되어 있는 지점들로서 관련 보고서에 수록된 주요 호우사상에 대한 시간 단위의 유역평균우량과 유출 자료를 그대로 이용하였다. 참고로 IHP 유역은 1983년부터 1989년까지는 1991년 수자원관리기법연구조사보고서 별책부록인 홍수수문자료집(건설부, 1991)의 자료를, 1990년부터 최근까지는 IHP 대표유역 연구보고서(건설부, 1990~1999)에 수록된 자료를 이용하였으며, 설마천 유역은 한국건설기술연구원의 기본과제 연구보고

서(1996~2000)에 수록된 자료를 이용하였다.

대표단위도 유도에 이용된 호우사상은 모두 778개 사상으로 설마천의 사방댐 지점이 15개로 가장 적으며, 평창강의 방림 지점이 52개로 가장 많은 사상을 확보할 수 있었다. 각 지점별로 대표단위도 유도에 이용된 호우사상의 수와 개략적인 특성은 표 2와 같으며, 이 중 직접유출량은 수평직선분리법을 통해 기저유출성분을 제거한 후 유역면적으로 나누어 산정된 결과이다. 여기서 위천 유역은 1998년과 1999년의 자료가 불량하여 분석대상에서 제외하였다.

## 2.3 대상지점의 호우사상별 단위도 유도

19개 대상지점의 대표단위도를 결정하기 위해서는 먼저 호우사상별 단위도를 유도하여야 한다. 본 연구에서는 각 사상별 단위도를 유도하기 위해 능형회귀방법(ridge regression method)을 이용한 단위도 유도방법을 이용하였으며 이에 대해 간략히 기술하면 다음과 같다.

직접유출에 의한 단위도 추정값의 정도를 판단하는 일반적인 방법은 실제로 측정된 유출량과 단위도로부터

표 3. 사방댐 지점의 호우사상 및 유도된 단위도의 특성

번호	기간 (연월일시)	강우량 (mm)	직접 유출량 (mm)	기저 유량 (mm/hr)	유출율	단위도			비고
						면적 (mm)	Qp (mm)	Tp (hr)	
1	1996.07.26.04~07.27.07	279.9	102.6	0.272	0.366	1.052	0.448	1.00	
2	1997.04.06.05~04.06.17	10.8	6.9	0.035	0.640	0.967	0.030	19.00	기각
3	1997.05.07.00~05.08.01	53.7	53.7	0.014	1.000	0.999	0.084	13.00	기각
4	1997.05.12.17~05.14.14	105.1	81.5	0.057	0.776	0.997	0.053	4.00	
5	1997.07.04.17~07.05.10	16.2	16.9	0.262	1.040	0.997	0.084	10.00	기각
6	2000.06.26.12~06.27.08	56.3	1.9	0.000	0.034	0.786	0.074	4.00	기각
7	2000.06.29.17~06.30.12	26.5	0.9	0.009	0.034	0.429	0.019	8.00	기각
8	2000.07.19.13~07.20.07	24.2	1.9	0.006	0.077	0.814	0.114	5.00	기각
9	2000.07.22.04~07.23.07	57.5	12.6	0.019	0.218	0.990	0.101	2.00	
10	2000.08.05.09~08.07.19	108.1	45.6	0.009	0.422	0.947	0.196	2.00	
11	2000.08.20.02~08.21.13	54.1	9.9	0.026	0.183	0.989	0.050	3.00	
12	2000.08.25.01~08.25.14	89.3	39.2	0.094	0.439	1.021	0.267	3.00	
13	2000.08.27.17~08.28.15	224.0	181.2	1.143	0.809	1.024	0.282	1.00	
14	2000.08.31.13~09.01.17	68.0	25.7	0.302	0.379	0.996	0.173	5.00	
15	2000.09.15.20~09.17.02	110.4	72.4	0.628	0.656	1.023	0.133	2.00	
평균 <sup>주)</sup>		121.8	63.4	0.283	0.472	1.004	0.189	2.56	

주) 평균은 단위도 유도를 위해 채택된 사상들에 대한 결과임.

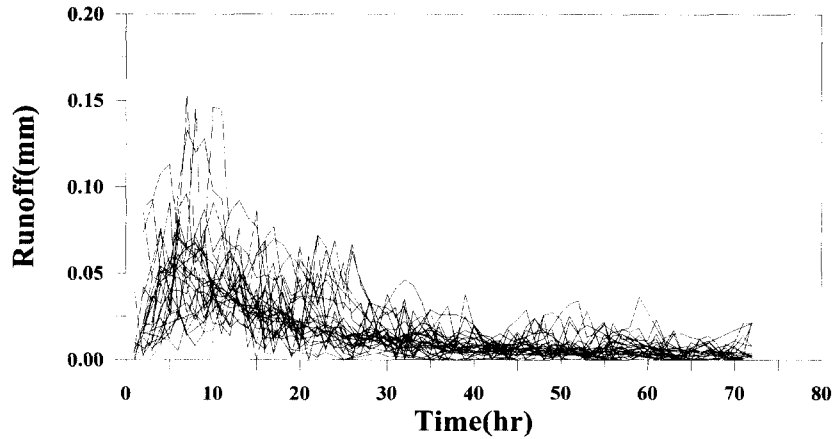


그림 2. 기대 지점의 홍수사상별 단위도

예측된 유출량간의 잔차를 조사하는 것이다. 잔차를 최소화할 수 있는 단위도 추정값을 산정하기 위하여 일반적으로 최소자승법이 많이 이용되고 있으나, 강우나 유출 자료의 작은 오차가 단위도의 추정에 큰 오차를 발생시킬 수 있으며 현실성이 없는 심한 분산을 보일 수 있다. Kuchment(1967)는 유도된 단위도에서 최대로 기대되는 평활도(smoothness)는 일종의 가중치를 두어 해결할 수 있다고 제안하였으며, Bruen과 Dooge (1984)는 이 방법을 이용하여 보다 안정적으로 단위도를 추정하는 방법을 발표하였다(건설부, 1993).

본 연구에서는 이들에 의해 제시된 능형회귀를 이용한 단위도 유도 방법을 이용하여 사상별 단위도를 유도하였다. 이를 위해 먼저 단위도를 유도하고자 하는 호우사상에 대해 수평직선분리법을 이용하여 기저유출 성분을 제외한 직접유출량을 산정하였고, 산정된 직접유출량과 총 강우량의 비를 각 시간별 강우량에 곱하여 유효우량을 산정하였다. 최종적으로 19개 지점에 대해 산정된 직접유출량과 유효우량을 이용하여 해당 사상에 대한 단위도를 유도하였다.

표 3은 19개 대상지점 중 설마천 유역에 위치한 사방댐 지점의 각 사상의 특성과 유도된 사상별 단위도의 특성을 요약한 내용이며, 그림 2는 보청천 기대 지점의 유도된 각 사상별 단위도를 함께 도시한 결과이다. 표 3에서 비교에 기각으로 표시된 사상들은 이용된 강우-유출 자료의 부정확으로 유도된 단위도의 형상과 면적 등 그 특성이 적절하지 못하다고 판단되어 지점 대표단위도 유도시 고려대상에서 제외된 호우사상을 의미한다.

#### 2.4 대상지점별 대표단위도의 결정

임의 유역에서의 각각의 호우사상으로부터 유도된 단위도를 이용하여 해당 유역의 대표단위도를 결정하는 방법은 여러 가지가 있다. 각 단위도의 첨두유량과 첨두시간의 평균치를 구하여 대표단위도의 첨두부 좌표를 결정한 후 다른 단위도들의 형상과 비슷하게 스케치하여 결정하는 스케치법과 여러 개의 개별 단위도의 종거값을 평균하여 대표단위도의 종거를 결정하는 단순평균법이 있다. 또한, 각 단위도의 첨두시간을 먼저 평균하고 이에 각 단위도의 첨두시간을 일치시킨 후 각 시간에서의 단위도 종거를 결정하는 첨두시간조정법 등이 있으며, 이 방법은 다시 단위도의 종거를 결정할 때 이용되는 방법에 따라 평균값법과 중앙값법으로 분류될 수 있다. 형상요소법은 1975년 Reed 등에 의해 개발된 것으로 체적, 평균, 분산계수, 왜곡도 및 첨도 등과 같은 통계적 계수 등을 형상요소로 하여 대표단위도의 형상 결정에 객관적인 방법을 도입한 것이다(Booman and Reed, 1981).

지점의 대표단위도를 결정하는 방법은 위에 언급된 방법 이외에 다른 방법들도 많이 제시되어 있으나, 영국 수문연구소(Institute of Hydrology)에서는 1981년 위의 방법들을 상호 비교한 결과에서 첨두시간조정 중앙값법을 추천한 바 있으며, 일반적으로 단순평균법은 대표단위도의 첨두 부분이 완만해지는 경향이 있다고 알려져 있다.

본 연구에서는 건설부(1993)에서 이용된 방법인 사상별 단위도의 종거를 평균하여 평균단위도를 결정하고, 결정된 첨두유량과 첨두시간을 이용하여 단위도 면적이

표 4. 대표단위도 산정 결과

하천	지점	유역면적 (km <sup>2</sup> )	호우사상	단위도	첨두시간 (hr)	첨두유량 (mm)	기저시간 (hr)	기저유량 (mm/hr)	Nash 모형	
									n	k
실마천	전적비교	8.50	35	23	2.2	0.090	68.0	0.316	1.367	5.988
	사방댐	5.08	15	9	2.0	0.130	45.0	0.283	1.560	3.569
평창강	방림	519.69	52	42	7.5	0.058	77.0	0.330	2.343	5.583
	하반정	83.98	44	30	5.0	0.070	70.0	0.136	1.918	5.448
	상안미	396.25	48	37	7.0	0.062	72.0	0.414	2.338	5.233
	백옥포	142.26	39	26	6.0	0.062	76.0	0.442	2.020	5.885
	장평	103.55	38	27	5.5	0.065	74.0	0.338	1.952	5.779
	이목정	55.93	45	36	4.0	0.072	73.0	0.504	1.662	6.046
보청천	산계	475.68	41	26	9.0	0.066	62.0	0.089	3.377	3.786
	기대	346.54	42	26	8.0	0.055	80.0	0.256	2.371	5.835
	탄부	72.53	41	23	6.0	0.084	52.0	0.318	2.754	3.422
	이평	79.52	39	21	5.5	0.080	57.0	0.466	2.371	4.012
	산성	53.72	36	18	5.0	0.090	50.0	0.477	2.427	3.503
위천	무성	472.53	42	28	7.0	0.074	58.0	0.218	2.844	3.796
	병천	302.13	45	29	5.0	0.084	55.0	0.264	2.262	3.963
	미성	171.25	44	33	5.0	0.088	52.0	0.238	2.371	3.647
	고노	109.73	44	33	5.0	0.093	48.0	0.255	2.514	3.302
	동곡	33.63	44	32	4.0	0.095	51.0	0.437	2.058	3.781
	효령	151.03	44	30	6.0	0.089	48.0	0.191	2.950	3.077

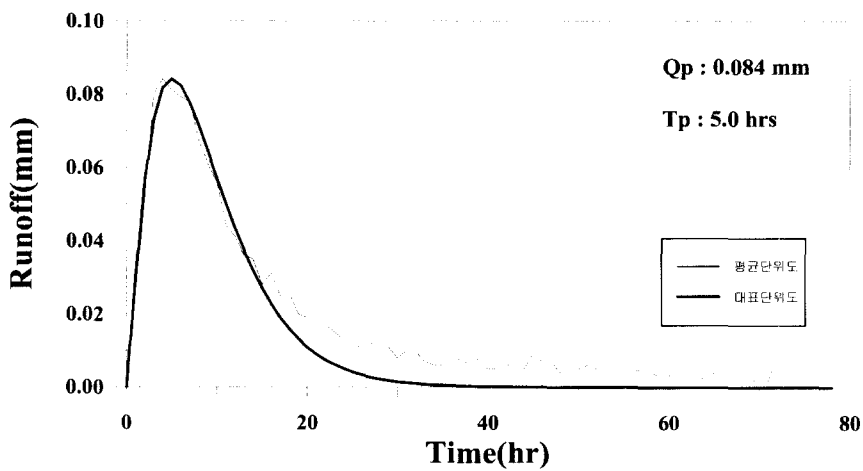


그림 3. 병천 지점의 대표단위도

이 되도록 Nash 모형에 의해 대표단위도의 증거를 결정시 사상별 단위도의 증거를 평균하여 결정한 평균 결정하는 변형된 단순평균법을 이용하였다. 대표단위도 단위도의 상승부 적합 정도와 첨두부 좌표를 중심으로

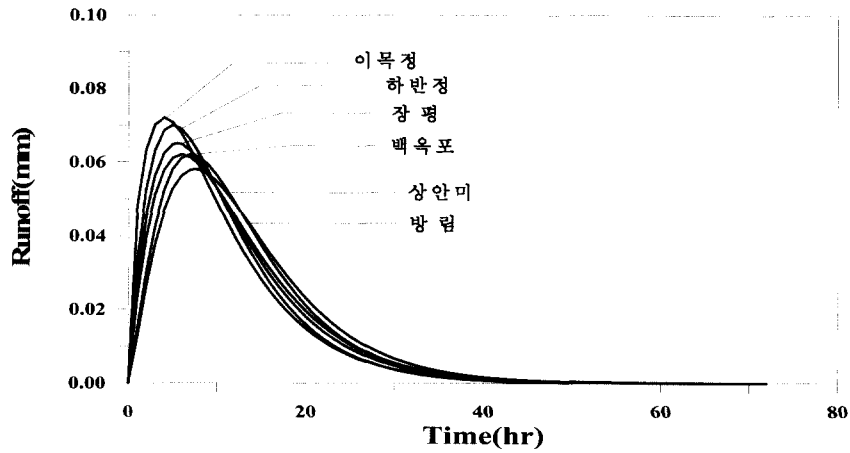


그림 4. 평창강 유역의 지점별 대표단위도의 비교

평균단위도의 분포특성을 가장 잘 표현할 수 있도록 첨두유량과 첨두시간을 조정하였다. 이 때 평균단위도의 감수부의 하단부분을 고려하지 않은 이유는 수평직선분리법에 의해 기저유량을 분리함에 따라 강우로 인한 직접유출의 지속기간이 실제보다 크게 산정될 수 있으며, 이로 인해 유도된 단위도의 형상이 실제보다 완만하게 감소하는 현상을 보일 수 있다고 판단했기 때문이다. 결과적으로 본 연구에서 적용한 방법으로 결정된 평균 단위도와 대표단위도는 감수부에서 다른 부분에 비해 상대적으로 큰 차이를 보이게 된다.

표 4는 19개 대상지점에서 산정된 대표단위도의 특성을 나타낸 표로서, 대표단위도 유도에 이용된 각 사

상별 단위도의 수는 설마천 유역의 사방댐 지점이 9개로 가장 적으며, 평창강 유역의 방림 지점이 42개로 가장 많은 수를 나타내고 있다. 대상 지점 전체적으로는 평균 28개의 단위도가 지점 대표단위도의 유도에 이용되었다. 여기서 이용된 호우사상 수와 단위도의 수가 차이가 나는 이유는 앞서 언급한 것과 같이 호우사상으로부터 단위도를 유도한 후 이를 검토하여 이용된 자료와 단위도의 형상 등이 적절치 않은 결과는 대표단위도 유도과정에서 제외하였기 때문이다.

그림 3은 19개 대상지점 중 위천에 위치한 병천 지점에 대해 앞서 언급한 방법으로 결정된 지점 대표단위도를 나타낸 것이다. 여기서 가는 실선으로 표시된 것

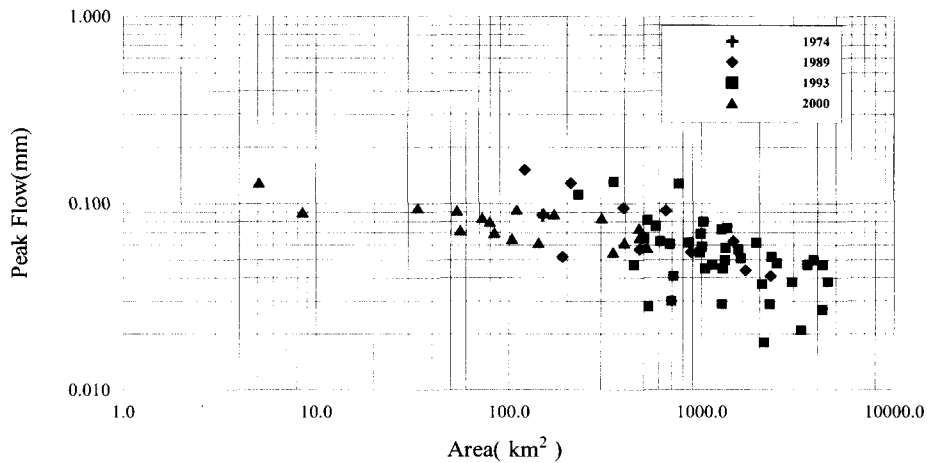


그림 5. 유역면적에 따른 첨두유량의 변화



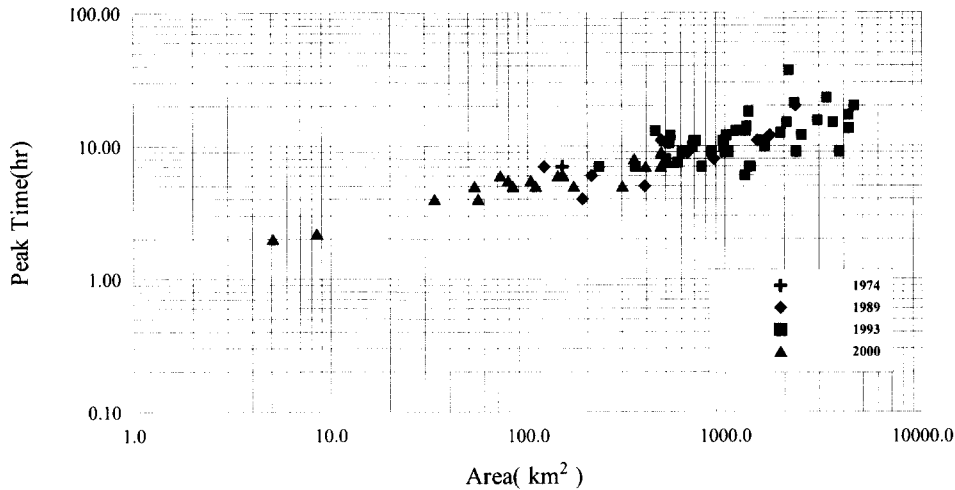


그림 6. 유역면적에 따른 침투시간의 변화

은 사상별 단위도를 평균한 평균단위도이며, 굵은 실선으로 표시된 것이 조정을 거쳐 최종적으로 결정된 대표 단위도이다. 또한 그림 4는 평창강 유역 내 6개 지점에 대해 산정된 대표단위도를 함께 도시한 결과이다. 그림 4에서 유역면적이 작아질수록 대표단위도의 침투유량은 커지고 침투시간은 빨라지는 결과를 보여주고 있으며, 이는 다른 유역에서도 동일하게 나타나고 있다.

이와 같이 유도된 총 19개 대상지점의 대표단위도가 과거 연구결과와 동일한 경향을 보이고 있는 지 알아보기 위해 본 연구에서 합성단위도 유도시 함께 이용했던 과거 연구결과와 비교해 보았다. 그림 5와 6은 과거 유도된 대표단위도의 침투유량과 침투시간을 유역면적에 따라 도시한 결과이며, 본 연구에서 유도한 대표단위도 결과도 포함되어 있다. 여기서, 1974, 1989, 1993으로 표현된 것은 각각 건설부(1974), 한국건설기술연구원(1989), 건설부(1993)의 연구결과이며, 2000으로 표현된 것은 본 연구에서 직접 대표단위도를 유도한 지점들에 대한 결과이다. 그림 5의 침투유량과 유역면적을 도시한 결과를 살펴보면, 전반적으로 분산되어 나타나고 는 있으나 경향에 있어서는 본 연구의 대표단위도 유도 결과도 과거 연구결과와 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 6의 침투시간에 대한 도시결과에서도 본 연구에서 유도된 대표단위도의 결과들이 과거 연구결과와 동일한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

### 3. 합성단위도의 유도

#### 3.1 유역특성인자 추출

일반적으로 합성단위도는 관측된 강우-유출 자료가 없어서 대표단위도를 유도할 수 없을 경우 해당 유역의 지형학적 특성인자를 이용하여 단위도를 합성하는 방법이다. 따라서 합성단위도를 유도하기 위해서는 대상유역의 유역특성인자를 결정하여야 하며, 본 연구에서는 합성단위도 유도를 위한 유역특성인자로서 유역면적(A, km), 유로연장(L, km), 유로경사(Sc), 유역경사(Sw), 표고차( $\Delta E$ , m)의 5가지 인자를 이용하였다. 이를 위해 합성단위도 유도를 위한 대상지점으로 선정된 총 70개 지점에 대해 각각의 유역특성인자를 결정하였으며, 유역면적은 한국수문관측소 일람(건설부, 1989b)의 내용을 인용하였고, 나머지 유로연장, 유로경사, 유역경사 및 표고차는 1:50,000 지형도를 이용하여 직접 추출하였다. 유로연장과 유로경사, 유역경사, 표고차를 산정한 방법에 대해 간략히 기술하면 다음과 같다.

#### 가. 유로연장(Main Channel Length, L)

유로연장은 본류 하천을 따라 지도에 표시된 하천 시작점까지의 거리이다. 일반적으로 유로연장은 침투홍수량 발생시간에 큰 영향을 준다고 알려져 있으며, 통상 지형도로부터 거리측정기를 이용하여 측정한다. 본 연구에서의 유로연장은 1:50,000 지형도에서 유역출구로부터 최원거리에 위치한 본류 하천 시작점까지의 거리로 정의하였으며, 구적기를 이용하여 측정하였다.

#### 나. 유로경사(Main Channel Slope, Sc)

하천의 평균경사를 결정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 최근 많이 이용되고 있는 하천구간장 평균제곱법을 이용하였다. 이 방법은 각 소구간의 유하시간이 소구간 경사의 제곱근에 반비례하고 전구간의 유하시간은 등가경사에 반비례한다고 보고 하천의 평균경사를 결정하는 방법으로 다음 공식으로 산출된다.

$$S = \left( \frac{\sum L_i}{\sum \sqrt{S_i}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,  $L_i$ 는 소구간별 유로연장을 의미하며,  $S_i$ 는 소구간별로 산정된 유로경사를 의미한다.

이 방법을 적용하는 절차는 먼저 지형도 상에서 본류를 따라 등고선이 하천을 횡단하는 지점과 수위관측소가 위치한 지점 등 표고를 알 수 있는 지점들을 이용하여 구간을 나눈 뒤 각 소구간에 해당하는 유로연장과 유로경사를 산정한 후 식 (1)을 이용하여 하천의 평균 유로경사를 산정하였다.

#### 다. 유역경사(Basin Slope, Sw)

유역의 평균경사는 지표면 유출속도를 좌우하는 중요한 지형학적 요소이다. 유역의 평균경사를 결정하는 방법으로는 등고선 면적법, 등고선 연장법, Horton의 방법 등 여러 가지가 있으나 이러한 방법들을 이용하여 유역의 평균경사를 산정하는 데는 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 하천의 시작점에서 유역경계까지 연장선을 긋고 유역출구로부터의 거리를 결정한 후 해당 유역경계와 유역출구와의 고도차를 측정된 거리로 나누어 산정된 값으로 유역경사를 산정하였다.

#### 라. 표고차(ΔE)

해당 지점의 표고차는 1:50,000 지형도에서 하천 시작점의 표고를 산정하고 유역출구지점의 표고와 차이로 결정하였다.

### 3.2 합성단위도의 유도

표 5. 단위도 특성치와 유역특성인자간의 상관계수

구 분	유역면적 A	유로연장 L	유로경사 Sc	유역경사 Sw	표고차 ΔE	침투시간 Tp
침투유량 Qp	-0.6364	-0.6299	0.5384	0.4391	-0.2176	-0.7589
침투시간 Tp	0.8475	0.8137	-0.7911	-0.6782	0.1744	1.0000

합성단위도의 형태를 결정하기 위하여 유도된 각 지점별 대표단위도의 특성치와 결정된 각 대상지점별 유역특성인자간에 단계별 다중회귀분석을 수행하였다. 이에 앞서 단위도의 특성치인 침투유량과 침투시간을 대수변환한 후 유역특성인자인 유역면적, 유로연장, 유로경사, 유역경사, 표고차의 대수변환 결과와 상관분석을 실시하였으며, 그 결과는 표 5와 같다.

표 5의 결과를 보면, 대체적으로 침투유량보다는 침투시간과 유역특성인자간의 상관관계가 크게 나타나고 있다. 또한, 침투유량의 경우 유역특성인자들과의 상관관계보다 침투시간과의 상관성이 크게 나타나고 있으므로 본 연구에서는 제안하고자 하는 합성단위도의 유도 절차를 먼저 유역특성인자를 이용하여 침투시간을 결정하고, 결정된 침투시간을 이용하여 침투유량을 결정하는 방법을 채택하였다. 그리고 침투좌표가 결정되면 단위도의 나머지 증거는 Nash 모형에 의해 결정할 수 있도록 하였다.

단계별 다중회귀분석 수행시, 표 5의 결과에서 알 수 있듯이 5가지 유역특성인자들 중 상대적으로 상관관계가 낮게 나타나는 표고차는 고려대상에서 제외하였으며, 유로경사와 유사한 의미를 갖는 유역경사의 경우, 유로경사보다 상관관계가 떨어지므로 표고차와 마찬가지로 고려대상에서 제외하였다. 결과적으로 본 연구에서 합성단위도 유도를 위해 적용한 유역특성인자는 유역면적, 유로연장, 유로경사의 3가지이며, 유역의 형상을 나타내는 유역형상계수(A/L<sup>2</sup>)와 유역의 평균폭(A/L, km)을 추가하여 다중회귀분석을 수행하였다.

결과적으로 본 연구에서는 먼저 단위도의 침투시간과 유역특성인자간 다중회귀분석을 통해 가장 적절한 회귀모형을 결정하고, 침투시간과 침투유량간의 단순회귀분석을 실시하여 새로운 합성단위도 방법을 제안하였다. 이를 위한 단계별 다중회귀분석은 종속변수를 침투시간으로 고정하고 독립변수를 변화시켜가면서 각각의 경우에 대해 회귀분석을 수행하였으며, 각 적합모형을 결정하기 위해 각 단계별로 결정계수(R<sup>2</sup>)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 산정하였다. 이 때 회귀곡선에 의한 적합 정도를 나타내는데

표 6. 단계별 회귀분석 결과

종속변수	독립변수	결정계수 (R2)	RMSE (hr)	비고
Tp	A, L, Sc	0.7366	0.11735	채택
	A, Sc	0.7363	0.11652	
	AL, Sc	0.7315	0.11758	
	AL/Sc	0.7313	0.11675	
	A, L	0.7194	0.12020	
	A	0.7183	0.11956	
	L, Sc	0.7140	0.12136	
	AL	0.7070	0.12192	
	A/L, Sc	0.7047	0.12331	
	L	0.6622	0.13092	
	A/L	0.6590	0.13153	
	A/L <sup>2</sup> , Sc	0.6380	0.13653	
	Sc	0.6259	0.13777	
Qp	A/L <sup>2</sup>	0.1408	0.20879	
	Tp	0.5759	0.12342	

는 일반적으로 결정계수가 많이 이용되므로 본 연구에서는 우선적으로 결정계수를 기준으로 모형을 판단하고 평균제곱근오차는 참고자료로 이용하였다.

일반적으로 회귀분석시 나타나는 오차는 잔차에 의한 부분과 회귀직선으로 인한 부분의 합으로 이루어지며, 이는 총 편차의 제곱합인 총 제곱합과 회귀모형의 편차에 대한 회귀제곱합, 잔차에 의한 잔차제곱합으로 표현된다. 여기서 총 제곱합 중 회귀제곱합이 차지하는 비율을 회귀직선의 기여율 또는 결정계수라고 부르며, 이 값이 1.0에 가까울수록 점들이 회귀직선 주위에 밀집되어 나타나게 되므로 회귀에 의한 설명이 잘됨을 의미한다. 그리고 평균제곱근오차는 관측치와 추정치의 잔차제곱합을 그 자유도로 나눈 결과의 제곱근을 의미하며, 이 값이 작게 나타날수록 최소제곱회귀직선에 의한 적합이 실제 관측 결과를 잘 설명해주는 것이라고 볼 수 있다.

표 6은 단계별 다중회귀분석 결과 나타난 각 회귀모형별 결정계수와 평균제곱근오차를 정리한 것이다. 여기서 유역면적과 유로연장의 곱을 의미하는 AL의 변수 형태는 Nakayasu형 합성단위도에서 이용되는 변수 형태이며, 유역면적 A만이 포함되는 형태는 SCS 합성단위도법에서 이용되는 형태이다.

앞서 언급한 내용을 기준으로 다중회귀분석을 수행한 결과, 표 6에서와 같이 유역면적(A), 유로연장(L),

유로경사(Sc)의 3가지 인자가 모두 포함된 경우가 가장 좋은 결과를 보여주고 있으므로 3가지 유역특성인자가 독립변수로 포함된 경우를 채택하였다. 이 때의 결정계수는 0.7366으로서 전체 산포의 약 74% 정도가 회귀식에 의해 설명될 수 있다고 볼 수 있으며, 또한 기존 합성단위도의 변수형태인 AL이나 A의 경우에는 상대적으로 결정계수가 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존 합성단위도 방법들이 국내 자료로부터 유도된 결과가 아니므로 국내 유역의 수문 특성을 정확히 대표하기 힘들다는 것을 의미하므로 이러한 방법을 이용하여 수문 분석을 수행할 때는 보다 신중한 판단이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 결과로부터 유역특성 인자로부터 단위도의 침투시간을 산정할 수 있는 다음 식 (2)와 같은 회귀식을 결정할 수 있었다.

$$T_p = 0.967 A^{0.255} L^{-0.040} Sc^{-0.137} \quad (2)$$

여기서, A는 유역면적(km<sup>2</sup>), L은 유로연장(km), Sc는 유로경사이며, 식 (2)를 통해 계산되는 침투시간 Tp의 단위는 시간(hr)이다. 또한 유역특성인자로부터 결정된 침투시간을 이용하여 또 하나의 단위도 특성치인 침투유량을 산정하기 위한 회귀식은 다음 식 (3)과 같으며, 이 때의 결정계수는 0.5759로 산정되었다.

$$Q_p = 0.241 T_p^{-0.638} \quad (3)$$

여기서, 침투유량  $Q_p$ 의 단위는 mm/hr이며, 유량 단위로 환산하기 위해서는 적용 대상유역의 유역면적을 곱한 후 단위환산을 해주어야 한다. 산정된 식 (2), (3)을 이용하여 단위도의 침투유량과 침투시간을 결정할 수 있으며, 이를 Nash 모형에 적용하여 단위도의 나머지 종거를 계산할 수 있도록 하였다.

이와 같이 본 연구에서 제시된 합성단위도법은 분석에 이용된 각 유역특성인자의 한계가 유역면적의 경우 5.08~4516.90km<sup>2</sup>이며, 유로연장의 경우 3.10~219.53km, 유로경사는 0.000757~0.040570이므로 실제 유역에 본 방법을 적용할 때는 해당 유역의 유역특성인자가 각 한계를 벗어난다면 보다 신중하게 적용할 필요가 있다.

#### 4. 수계별 동질성 검토

앞 절에서 제시한 단위도 합성을 위한 회귀식은 수계 구분 없이 전국을 하나의 권역으로 보고 유도된 식이며, 본 절에서는 동일한 분석을 각 수계별로 실시함으로써 회귀식의 정확도가 개선되는가를 판단하고자 하였다. 이를 위해 식 (2)와 동일한 형태로 다중회귀분석을 수행하였으며, 각 적합모형의 결정계수를 산정하고 이를 전국 자료를 이용한 결과와 비교함으로써 동질성 검토를 수행하였다. 식 (4)는 앞서 단위도의 침투시간에 대해 제시된 회귀방정식을 일반화하여 나타낸 것이다.

$$T_p = a A^b L^c Sc^d \quad (4)$$

여기서, a, b, c, d는 회귀분석 결과 산정되는 회귀계수들이며, 표 7은 각 수계별 분석 결과이다.

표 7의 결과를 통해 수계별 분석 결과가 전체 자료를 이용한 경우보다 그 정확도가 일관되게 향상되고 있지 못함을 알 수 있다. 5대강 수계에서 한강, 금강, 영산강 수계만이 결정계수에 있어 양호한 결과를 주고 있으나, 낙동강과 섬진강 수계의 경우에는 그 정확도가 보다 안 좋게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 낙동강 수계를 제외한 나머지 수계들은 회귀분석에 이용된 자료의 수가 7~16개 지점에 불과하므로 해당 수계의 수문 특성을 대표한다고 보기는 힘들 것으로 판단되며, 영산강과 섬진강은 유역면적 200km<sup>2</sup> 이하의 소유역에 대한 자료가 전무하므로 수계별 분석을 통한 결과를 적용하기는 힘들 것으로 보여진다.

우리나라는 이용 가능한 유출 자료가 아직은 제한적이라고 볼 수 있으므로 수계별로 유출 특성을 정확하게 파악하고, 이를 기준으로 수계별로 합성단위도를 분리, 제시하는 것은 현재의 여건으로서는 무리라고 판단된다. 따라서 우리나라 전체에 대해 합성단위도법을 제시하는 것이 자료의 수를 보완한다는 측면에서도 보다 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 운영하고 있는 설마천 시험유역의 2개 지점과 IHP 3개 대표유역의 17개 지점 등 총 19개 지점에 대해 지금까지 축적된 강우-유출 자료를 이용하여 지점별 대표단위도를 유도하였다. 사상별 단위도 유도를 위해 능형회귀방법을 이용하였으며 Nash 모형을 이용하여 지점 대표단위도를 유도하였다. 또한, 과거 국내에서 이루어져온 단위도 관련 연구결과를 조사하고 이에 본 연구에서 유도한 대표 단위도 결과를 추가하여 유역특성인자와 단계별 다중회

표 7. 수계별 다중회귀분석 결과

수계명 (지점수)	회귀계수				결정계수 (R <sup>2</sup> )	유역면적(km <sup>2</sup> )	
	a	b	c	d		최소	최대
전국 (70)	0.967	0.255	-0.040	-0.137	0.7366	5.1	4,516.9
한강 (16)	0.860	0.190	0.210	-0.070	0.9318	5.1	2,426.2
낙동강 (29)	0.722	0.239	-0.095	-0.252	0.6830	33.6	4,516.9
금강 (11)	1.262	-0.043	0.249	-0.220	0.8318	53.7	2,942.6
영산강 (7)	0.013	-0.195	-0.182	-1.388	0.9289	230.3	2,249.7
섬진강 (7)	0.683	0.099	-0.167	-0.419	0.5738	350.9	4,255.7

귀분석을 함으로써 국내 수문특성에 보다 적합한 새로운 합성단위도법을 개발하였다. 그리고 제시된 합성단위도법에 대한 수계별 분석을 통해 지역적 동질성을 검토하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 지점 대표단위도의 침투유량, 침투시간과 유역특성인자들과의 상관분석을 수행한 결과, 침투유량은 유역면적, 유로연장, 표고차와는 음의 상관관계를, 유로경사와 유역경사는 양의 상관관계를 보였으며, 침투시간은 침투유량과 반대의 결과를 나타내고 있었다. 또한 침투유량과 침투시간 사이에는 음의 상관관계를 보였고, 침투유량의 경우 유역특성인자보다는 침투시간과의 상관관계가 높게 나타났다.
- 2) 합성단위도 유도에는 5가지 유역특성인자 중 상대적으로 상관관계가 낮게 나타나는 표고차와 유역경사를 제외한 나머지 3가지 인자와 유역형상인자인 형상계수와 평균폭 등 총 5가지 인자를 이용하여 단계별 다중회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 유역면적, 유로연장, 유로경사의 3가지 인자가 독립변수로 포함된 경우를 새로운 합성단위도의 침투시간 산정을 위한 회귀식으로 결정할 수 있었으며, 침투유량은 침투시간과의 회귀식으로 제시할 수 있었다.
- 3) 전체자료를 분석하여 제안된 회귀식과 동일한 형태로 각 수계별 회귀분석을 수행한 결과, 그 정확도가 일관되게 향상되고 있지 못함을 알 수 있었다. 아직까지 우리나라는 이용 가능한 강우-유출자료가 제한적이라고 볼 수 있으므로, 수계별로 유출특성을 파악하고 이를 기준으로 수계별 합성단위도를 분리하여 제시하는 것은 무리라고 판단되며, 현재의 여건에서는 전국을 하나로 보아 합성단위도를 제시하는 것이 자료의 수를 보완한다는 측면에서도 보다 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같이 본 연구에서 제시된 새로운 합성단위도법은 과거 국내에서 이루어져온 기존 연구들에 비해 분석대상지점 수나 이용자료 측면에서 풍부하며, 유역면적 200km<sup>2</sup> 이하의 소유역에 대한 결과가 다수 포함되어 있으므로 소규모 유역의 유출특성을 보다 잘 표현할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법은 홍수량 산정을 위한 방법으로 충분히 이용가능한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구에 이용된 수문자료(IHP 대표유역, 설마천 시험유역) 및 연구성과(건설부, 1974; 건기연, 1989; 건설부, 1993)를 제공해주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고로 본 연구에서 제시된 합성단위도법의 검증을 위해 기존 방법(Nakayasu, SCS, HYMO 방법 등)과 비교하였으며, 이에 대한 내용은 “국내 기존 합성단위도 방법의 비교”라는 논문으로 작성하였으므로 이를 참고하시기 바랍니다.

## 참고 문헌

- 건설부(1974), 홍수량 추정을 위한 합성단위유량도 유도의 연구조사보고서
- 건설부(1989a), 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서
- 건설부(1989b), 1989년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서 별책부록 한국수문관측소일람
- 건설부(1990~1999), 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서
- 건설부(1991), 1991년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서 별책부록 홍수수문자료집
- 건설부(1992a), 1992년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서
- 건설부(1992b), 국제수문개발계획 연구보고서, 국내 기존 합성단위유량도의 비교분석
- 건설부(1993), 1993년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서
- 김상용(1972), “단위유량도에 의한 유출해석-낙동강을 중심으로”, 대한토목학회지, Vol.20, No.4, pp. 89~105
- 선우중호, 고영찬(1986), “단위유량도 합성을 위한 Snyder 계수의 조정”, 한국수문학회지, Vol.19, No.1, pp.57~63
- 한국건설기술연구원(1989), 실제홍수량 산정을 위한 단위유량도의 합성방법 개발, 연구보고서, 건기연 88-WR-111
- 한국건설기술연구원(1996~2000), 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구, 연구보고서
- Booman, D. B. and Reed, D. W.(1981), Derivation of a Catchment Average Unit Hydrograph, Institute of Hydrology Report No.71, Institute of Hydrology

- Bruen, M. and Dooge, J. C. I.(1984), "An Efficient and Robust Method for Estimating Unit Hydrograph Ordinates", *Journal of Hydrology*, 70, pp.1~24
- Kuchment, L. S.(1967), "Solution of Inverse Problems for Linear Flow Models", *Sov. Hydrol.*, Select. Pap. 2, pp.194~199
- 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
- Reed, D. W., Johnson, P. and Firth, J. M.(1975), "A Nonlinear Rainfall-Runoff Model, Providing for Variable Lag Time", *Journal of Hydrology*, 25, pp.295~305
- 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:01-053/접수:2001.07.09/심사완료:2001.10.17)