

도달시간 산정 방법의 개발

Development of an Estimation Method for Travel Time

정 종 호* / 금 종 호** / 윤 용 남***

Jeong, Jong Ho / Keum, Jong Ho / Yoon, Yong Nam

Abstract

The travel time of a flood through a river reach can be estimated by dividing the river length by the mean velocity with which the flood passes downstream. It is closely related to storage constant for the watershed routing of a flood. There are so many empirical formulas available for the estimation of travel time but the results computed generally show great different depending on individual formulas.

In the present study, the mean velocity data computed in the process of water surface profile computation for a probability flood through more than 100 different river reaches were collected along with the mean river bed slope of each river reach. And then, a regression analysis is made between the mean river bed slope and the mean velocity, which showed a wide scatter along the mean regression curve, which appears to be due to the different in the magnitude of probability rainfall and size of watershed area.

Therefore, methods have been developed to remove the effect of these factors and generalized empirical equation is proposed to relate the mean velocity to mean river bed slope of a reach. Hence, if the mean river bed slope of a river reach is estimated from the longitudinal river profile, the mean velocity can be computed by the generalized equation along with the probability rainfall and watershed area of the river reach under consideration, which leads to the estimation of travel time through a river reach.

Keywords : travel time, mean velocity, mean river bed slope

요 지

하도구간의 도달시간은 일정 구간별로 하도길이를 홍수가 하류로 유하하는 평균유속으로 나눴으로써 산정 할 수 있으며, 유역추적법에 의한 홍수량 산정 시 필요한 지류상수 등과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 이러한 도달시간을 산정 할 수 있는 경험공식이 많이 제시되고 있으나 경험공식별로 계산된 도달시간은 일반적으로 큰 편차를

* 새길엔지니어링 수자원부 이사, 고려대학교 대학원 박사과정수료
Director, Water Resources Dept. Seagil Engrg., Co., Ltd. Seoul 138-828, Korea
(E-mail : jhwater@hotmail.com)

** 새길엔지니어링 수자원부 주임
Assistant Manager, Water Resources Dept. Seagil Engrg., Co., Ltd. Seoul 138-828, Korea

*** 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

나타내고 있다.

본 연구에서는 100개 이상 하천의 확률홍수량에 대한 수면곡선계산 자료에서 구간별 하도의 평균경사와 평균유속을 수집하였다. 이러한 평균경사와 평균유속과의 관계를 회귀분석한 결과를 살펴보면 동일한 평균경사에서도 평균유속이 많이 산포 되어 있음을 알 수 있으며 이는 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이 등에 기인한다.

따라서, 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 제거하는 방법을 개발하여 일반화된 평균경사-평균유속 관계를 제시하였다. 이에 따라 하천중단에서 구간별 평균경사를 산정하면 일반화된 평균경사-평균유속의 관계를 사용하여 일반화된 평균유속을 산정 할 수 있으며, 이를 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대하여 보정하여 대상하천에 대한 평균유속을 산정하고 이를 이용하여 도달시간을 산정 하게 된다.

핵심용어 : 도달시간, 평균유속, 평균경사

1. 서론

강우에 의한 유역의 유출반응을 유역반응이라 하고, 유역반응을 나타내는 시간매개변수에는 도달시간(travel time), 집중시간(time of concentration), 지체시간(lag time) 등이 있다.

이러한 시간매개변수의 결정은 수문모형을 구축할 때나 설계시 매우 중요한 선행작업이며 한 개 이상의 시간매개변수가 수문분석에 반드시 필요하게 된다. 예를 들면 합리식의 설계호우 지속기간 결정 및 Clark 방법에 의한 유역추적의 매개변수인 저류상수 결정에는 집중시간이 필요(Singh, 1998)하고, Muskingum 방법 등에 의한 하도추적의 매개변수인 저류상수 결정에는 홍수파의 도달시간이 필요하며, SCS 방법 등에 의한 합성단위도의 매개변수 결정에는 지체시간이 필요하다.

여기서, 도달시간은 하도의 상류단에서 출구점까지의 유하시간으로 정의되고, 집중시간은 유역의 최원점에서 출구점까지의 유하시간으로 유역의 최원점에서 하도의 시작점까지의 유입시간과 하도구간의 유하시간의 합으로 정의되며, 지체시간은 유효우량 중심에서 직접유출 수문곡선의 중심까지의 시간 또는 유효우량 중심에서 직접유출수문곡선의 침투부분까지의 시간으로 정의된다.

현재 실무에는 통상 도달시간과 집중시간을 구분하지 않고 도달시간으로 사용하고 있으며 소규모 유역에서는 유입시간을 별도로 산정하여 더하여 주나 중규모 유역 이상에서는 영향이 미미하므로 유입시간을 고려하지 않고 있다. 또한, 지체시간의 경우 관측자료 등의 부족으로 인하여 통상 도달시간 또는 집중시간의 합수로 산정하고 있는 실정이므로 정확한 도달시간 산정이 유

역반응 시간매개변수 결정의 선결 과제임을 알 수 있다.

2. 기존 도달시간 산정 공식의 검토

우리나라의 경우 자연유역의 도달시간 산정에는 다음과 같이 외국에서 개발된 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven 공식(I), Kraven 공식(II) 등의 경험공식들을 주로 사용하고 있다.

- Kirpich 공식: 농경지 소유역을 대상으로 유도된 공식

$$T_c = 0.0663 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1)$$

- Rziha 공식: 자연하천의 상류부($S \geq 1/200$)에 적용되는 공식

$$T_c = 0.0139 \frac{L}{S^{0.6}} \quad (2)$$

- Kraven 공식(I): 자연하천의 하류부($S < 1/200$)에 적용되는 공식

$$T_c = 0.0074 \frac{L}{S^{0.515}} \quad (3)$$

- Kraven 공식(II): 자연하천의 경사별 유속을 적용하는 공식

$$T_c = \frac{L}{3.6V} \quad (4)$$

($S \leq 1/200$: $V=2.1$ m/s, $1/200 < S < 1/100$: $V=3.0$ m/s, $S \geq 1/100$: $V=3.5$ m/s)

여기서 T_c 는 도달시간(hr), L 은 유로장(km), S 는 무차원 하천평균경사, V 는 유속(m/sec)이다.

기존 도달시간 공식을 실제 유역에 적용하여 보면 대부분 그 결과의 차이가 매우 크게 나타나고 있으나 마땅한 채택 기준은 제시되지 않고 있다. 이에 따라 기

표 1. 기존 도달시간 공식의 경사별 유속 비교

방 법	유 로 연 장	경사별 유속(m/s)							비 고
		1/1000	1/500	1/200	1/150	1/100	1/50	1/20	
Kirpich	1km	0.29	0.38	0.55	0.61	0.71	0.93	1.32	
	10km	0.05	0.07	0.09	0.10	0.12	0.16	0.22	
Rziha	전 체	0.32	0.48	0.83	0.99	1.26	1.91	3.32	
Kraven (I)	전 체	1.07	1.53	2.45	2.84	3.50	5.01	8.02	
Kraven (II)	전 체	2.10	2.10	2.10	3.00	3.50	3.50	3.50	

존 경험공식을 주관에 의해 임의로 채택하거나, 산정된 도달시간에서 유속을 계산하여 홍수시 가능한 유속인 2.0~3.5m/s의 범위에 포함되는지 여부 등을 검토하여 유사한 결과를 나타내는 경험공식을 채택하고 있는 실정이다.

한편, 이와 같이 유속을 계산하여 도달시간 공식 채택의 적정성을 검토하는 것이 가장 직접적이고 현실적인 방안이므로 기존 도달시간 공식의 경사별 유속을 산정하여 공식의 특성을 사전에 파악하고 검토하는 것이 필요하다. 기존 도달시간 공식에 의한 경사별 유속 산정 결과는 표 1과 같고 이를 통하여 파악되는 기존 도달시간 공식의 문제점은 다음과 같다.

- ① Kirpich 공식은 경사가 1/30 이상인 급경사이고 유역면적이 0.5km² 이하인 산지 소유역에 적절한 공식이며, 이러한 기준에 부합되는 조건인 경사 1/20, 유로연장 1km인 경우의 유속은 1.32m/sec이므로 경사에 비해 유속이 지나치게 낮게 산정되는 것으로 판단된다.
- ② Rziha 공식은 경사가 1/200 이상인 급경사 유역에 적절한 공식이며, 이러한 기준에 부합되는 조건의 유속은 경사 1/200은 0.83m/s, 1/100은 1.26m/s이므로 경사에 비해 유속이 지나치게 낮게 산정되는 것으로 판단된다.
- ③ Kraven 공식(I)은 경사가 1/200 이하인 완경사 유역에 적절한 공식이며, 이러한 기준에 부합되는 조건의 유속은 경사 1/200은 2.45m/s이므로 비교적 적절하나 1/1000은 1.07 m/s이므로 경사가 매우 완만한 경우의 유속이 지나치게 낮게 산정되는 것으로 판단된다. 반면, 공식의 적용 범위를 벗어나지만 경사 1/200 이상에 대해 적용성을 검토하여 보면 유속이 지나치게 높게 산정되는 것으로 판단된다.
- ④ Kraven 공식(II)은 모든 경사에 대하여 적용이 가능하며 경사별 유속을 사용하여 도달시간을 산

정하므로, 단순히 유속의 적정성 측면과 적용성 측면만을 고려하면 가장 양호한 방법으로 판단된다. 하지만, 유속이 단지 3가지로만 구분되어 있어서 적용시 불연속이 발생하게 된다.

- ⑤ 상류와 하류의 지형학적 특성이 다를 경우에는 구간별로 적절한 공식을 다르게 채택하는 것을 원칙으로 하고 있으나 이러한 경우 불연속의 정도를 면밀히 검토하는 것이 필요하다. 불연속의 사례로 경사가 1/200 이상인 상류부는 Rziha 공식을 적용하고 1/200 이하인 하류부는 Kraven (I) 공식을 적용하는 경우를 살펴보면, 동일한 경사 1/200인 경우의 유속이 Rziha 공식은 0.83m/s, Kraven 공식(I)은 2.45m/s로 많은 차이를 나타내며 또한, 경사가 급한 구역인 상류부의 유속이 경사가 완만한 하류부의 유속보다 낮은 결과를 나타내고 있으므로 상당한 구간에서 불연속이 발생하게 된다.

상기와 같은 많은 문제점을 지니고 있는 기존 경험 공식에 얽매어서 도달시간을 산정하여 유역반응 시간대 개변수를 결정하고 이를 이용하여 홍수량을 산정하는 기존의 방법으로는 홍수량 산정 결과의 신뢰도를 보장할 수 없으므로 이에 대한 개선이 필요함을 알 수 있다.

3. 도달시간 산정 방법의 개발

3.1 자료수집

도달시간 산정 방법을 개발하기 위해서는 하도의 최원점에서 출구점까지의 유하시간으로 정의되는 도달시간의 정의에 따른 자료 수집이 가장 먼저 선행되어야 한다.

이를 위하여 하천정비기본계획이 수립된 국가하천 13개소, 지방하천 26개소 및 소하천 30개소 의 수면곡선계산 결과에서 측정별 하도경사-유속 자료를 수집하였으며, 자료수집시에는 하천의 등급 및 유역면적, 지역

별 위치 등이 최대한 균일하게 분포되도록 고려하였다.

3.2 평균경사-평균유속 관계곡선의 작성

도달시간에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 하도경사이므로 먼저 하도경사와 유속간의 관계를 설정하는 것이 필요하다. 통상 수면곡선계산에는 등간격(50~200m)의 측정간격을 사용하나 이와 같은 짧은 구간의 최심하상고를 연결한 하도경사를 분석에 직접 사용하는 것은 곤란하므로 수면곡선계산에서 동일 유량을 적용하는 구간별 평균경사-평균유속 관계곡선을 작성하여 사용하기로 하였다.

한편, 지금까지 도달시간은 재현기간에 상관없이 산정하고 있으나 재현기간이 상승되면 홍수량 증가에 따라 평균유속이 증가하게 되므로 도달시간이 짧아지게 된다. 따라서, 일단 기준 재현기간으로 유역규모에 상관없이 통상 사용되는 50년빈도를 채택하였다.

수집된 수면곡선계산 결과에서 50년빈도의 동일 유량을 적용하는 구간별 평균경사-평균유속 원자료를 나타낸 평균경사-평균유속 관계곡선은 그림 1과 같고, 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식은 식 (5)와 같다. 한편, 일반적으로 사용하는 다항식은 S-곡선 형태 제대로 나타낼 수 없기 때문에 이러한 형태의 회귀식을 채택하였다.

$$V_0^R = -\frac{0.006978}{S + 0.004468} + 3.399996, \quad (5)$$

$$R^2 = 0.53$$

여기서 V_0^R : 원자료에 의한 평균유속(V_0)을 회귀분석한 평균유속(m/s)

S : 평균경사(m/m)

R^2 : 결정계수

원자료에 의한 평균경사-평균유속 관계곡선인 그림 1을 살펴보면 동일한 평균경사에서도 평균유속은 많은 차이를 나타내고 있으며 결정계수도 0.53으로 그다지 높지 않음을 알 수 있다.

이러한 원인으로는 하천의 지역별 확률강우량 차이, 유역면적 차이 등이 있으며, 이러한 인자들이 미치는 영향을 정확하게 파악하여 고려하는 것이 필수적임을 알 수 있다.

이를 위해 먼저 인자들에 의한 영향을 유속보정계수 형태로 정확하게 파악하고 원자료에 의한 평균경사-평균유속 관계곡선에서 이들 인자들의 영향을 제거하여 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선을 도출한 후, 편차 및 경향성 등을 검토하여 일반화가 적절한 과정인지를 판단하기로 하였다.

3.3 평균경사-평균유속 관계곡선의 일반화

3.3.1 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향 제거

지역에 따라 확률강우량의 차이가 있으며, 유역조건이 동일한 경우에는 확률강우량이 큰 경우의 홍수량이

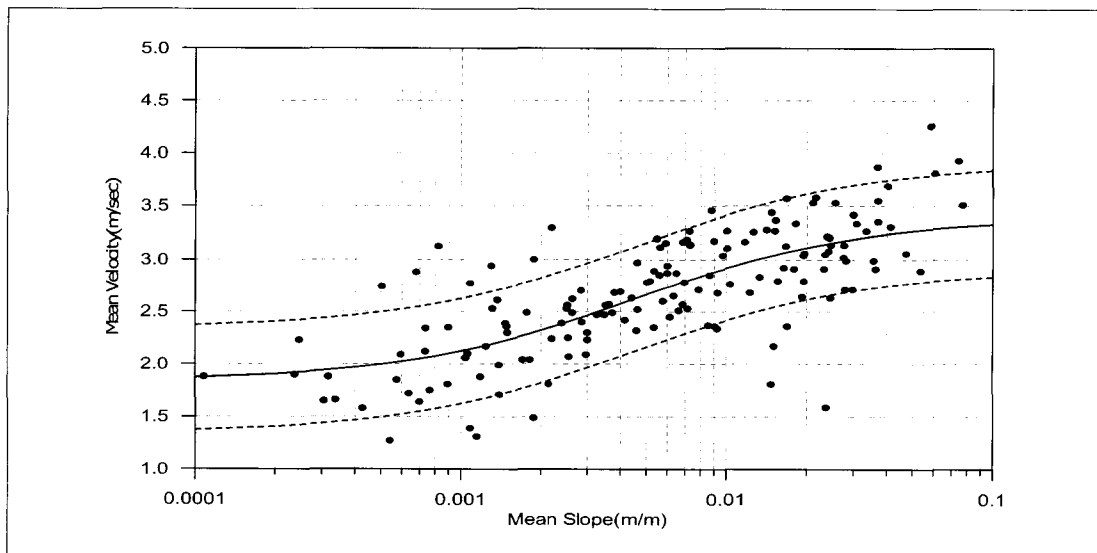


그림 1. 원자료에 의한 평균경사-평균유속 관계곡선

표 2. 주요 관측소의 지속기간별 확률강우량 및 전국평균 확률강우량(50년빈도)

(단위: mm)

관측소	Thiessen 계수	강우지속기간(분)				
		60	180	360	720	1440
속 초	2.97	56.9	108.6	162.0	235.2	340.8
춘 천	7.06	66.5	115.2	162.6	229.2	321.6
강 룡	6.62	60.5	113.7	169.2	247.2	357.6
서 울	4.04	100.6	159.3	201.6	262.8	345.6
인 천	0.90	89.3	154.2	199.2	260.4	345.6
원 주	9.33	84.8	145.8	202.2	278.4	381.6
수 원	3.66	80.9	150.3	213.6	295.2	398.4
서 산	3.59	69.7	121.5	177.6	255.6	360.0
청 주	5.20	75.2	113.4	151.8	205.2	280.8
대 전	3.56	86.1	146.4	195.0	258.0	340.8
추풍령	7.89	58.4	87.6	117.6	160.8	223.2
포 향	6.75	60.3	107.4	154.8	219.6	307.2
군 산	2.95	69.1	120.9	163.8	216.0	276.0
대 구	8.08	72.9	107.7	138.6	181.2	237.6
전 주	5.99	85.9	151.8	282.0	357.6	460.8
울 산	2.29	79.5	141.6	200.4	280.8	391.2
광 주	6.92	75.2	117.6	157.2	211.2	283.2
부 산	2.28	95.4	159.0	214.2	289.2	391.2
통 영	2.70	74.3	138.0	294.0	411.6	568.8
목 포	2.28	61.7	106.2	147.6	202.8	276.0
여 수	3.75	76.7	139.2	288.0	368.4	480.0
완 도	1.19	88.2	179.1	383.4	517.2	700.8
평 균	100.00	73.9	125.3	185.0	251.6	342.2

크고 유속도 커지는 경향을 나타내게 된다. 따라서, 원 자료에 의한 평균경사-평균유속 관계곡선에서 이와 같은 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거하는 일반화가 필요하다.

지역별 확률강우량의 차이를 살펴보기 위하여 「한국 확률강우량도 작성(건교부, 2000)」에 수록된 전국 22개 주요 관측소의 확률강우량도식으로 산정한 50년빈도 확률강우량 및 Thiessen 기중평균에 의한 전국평균 확률강우량은 표 2와 같다.

지속기간별 전국평균 확률강우량에 대한 분석된 해당 하천 확률강우량의 비율을 산정함으로써 지역별 확률강우량의 차이를 파악할 수 있으며, 전국평균 확률강우량에 대한 주요 관측소별 확률강우량의 비율을 산정한 결과는 표 3과 같다.

동 표를 살펴보면 태풍의 영향을 직접적으로 받는 통영, 여수, 완도 등과 같은 남해안의 관측소를 제외한 대부분 관측소의 지속기간별 확률강우량의 비율은 65~

135% 정도로 나타나고 있다.

한편, 주요 관측소의 지속기간별 확률강우량의 비율은 재현기간에 관계없이 거의 동일하게 나타나고 있으므로 기준 재현기간으로 채택한 50년빈도의 비율을 모든 재현기간에 동일하게 적용하는 것이 가능하다.

이와 같은 지역별 확률강우량의 차이를 보정하기 위해서는 지역별 확률강우량의 차이에 따른 평균유속의 변화 관계를 설정하여 적용하는 것이 원칙이지만 직접 이러한 관계를 유도할 수는 없는 실정이다.

따라서, 이의 대안으로 하천별로 하천정비기본계획 보고서의 재현기간별 확률강우량 자료와 이를 이용한 수면곡선계산 결과의 평균유속 자료를 수집한 후, 기준 재현기간으로 채택한 50년빈도 확률강우량과 평균유속을 기준으로 재현기간별 확률강우량의 비율과 평균유속의 비율간의 관계를 분석하였다.

표 3 . 주요 관측소의 지속기간별 확률강우량의 비율

(단위 : %)

관측소	강우지속기간(분)				
	60	180	360	720	1440
속 초	77	87	88	93	100
춘 천	90	92	88	91	94
강 룡	82	91	91	98	105
서 울	136	127	109	104	101
인 천	121	123	108	103	101
원 주	115	116	109	111	112
수 원	109	120	115	117	116
서 산	94	97	96	102	105
청 주	102	91	82	82	82
대 전	117	117	105	103	100
추풍령	79	70	64	64	65
포 향	82	86	84	87	90
군 산	94	96	89	86	81
대 구	99	86	75	72	69
전 주	116	121	152	142	135
울 산	108	113	108	112	114
광 주	102	94	85	84	83
부 산	129	127	116	115	114
통 영	101	110	159	164	166
목 포	83	85	80	81	81
여 수	104	111	156	146	140
완 도	119	143	207	206	205

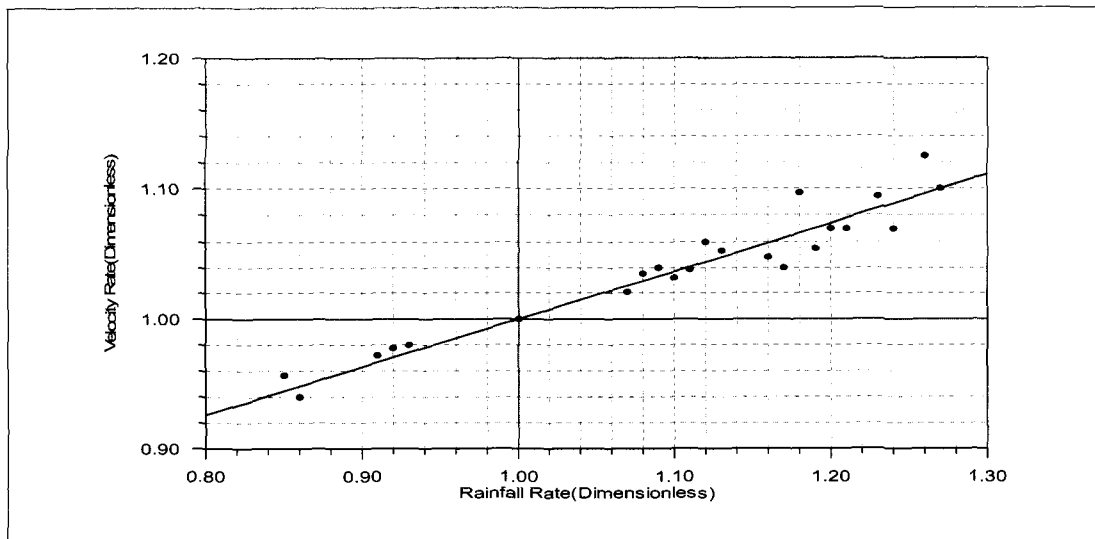


그림 2. 확률강우량의 비율과 평균유속의 비율 관계

상기와 같은 분석에서 확률강우량의 비율이 동일한 경우는 평균하여 나타낸 결과는 그림 2와 같고, 확률강우량의 비율에 대한 평균유속의 비의 회귀식은 식 (6)과 같다.

$$C_R = 0.3611 \times \frac{R_R}{100} + 0.6389, \quad (6)$$

$$R^2 = 0.93$$

여기서 C_R : 확률강우량의 비율에 대한 평균유속의 비이며 지역별 확률강우량의 차이에 대한 유속보정계수

R_R : 확률강우량의 비율(%)이며 동일 강우지속기간의 전국평균 확률강우량에 대한 해당 하천 확률강우량의 비율

R^2 : 결정계수

지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거하여 일반화된 평균경사-평균유속 관계를 도출하기 위하여 원자료의 평균유속은 식 (7)과 같이 보정하여야 한다.

$$V_{O-R} = \frac{V_O}{C_R} \quad (7)$$

여기서 V_{O-R} : 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거한 평균유속(m/s)

V_O : 실제 수면곡선계산 자료로부터 수집된 원자료의 평균유속(m/s)

지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거한 평

균경사-평균유속 관계곡선은 그림 3과 같고, 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식은 식 (8)과 같다.

$$V_{O-R}^R = -\frac{0.004668}{S + 0.002623} + 3.348403, \quad (8)$$

$$R^2 = 0.61$$

여기서 V_{O-R}^R : 지역별 확률강우량 차이에 대한 영향을 제거한 평균유속을 회귀분석한 평균유속(m/s)

S : 평균경사(m/m)

R^2 : 결정계수

한편, 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거한 결과를 살펴보면 동일한 평균경사에서 원자료에 비해 평균유속의 산포가 줄어들면서 결정계수 값이 0.53에서 0.61로 증가하게 되어 훨씬 뚜렷한 S-곡선 형태를 나타냄을 알 수 있다.

3.3.2 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향 제거

지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거한 평균경사-평균유속 관계인 그림 3을 살펴보면 아직까지 동일한 평균경사에서 평균유속은 많은 차이를 나타내고 있으며, 이러한 차이를 추가적으로 줄일 수 있는 인자로는 하천의 규모를 나타내는 유역면적 등이 있다.

이와 같은 하천별 유역면적의 차이에 따른 영향을 제거하기 위하여 평균경사-유역면적 관계 및 유역면적-평균유속 관계의 분석을 실시하여 유속보정계수를 산정하는 방법을 채택하였다.

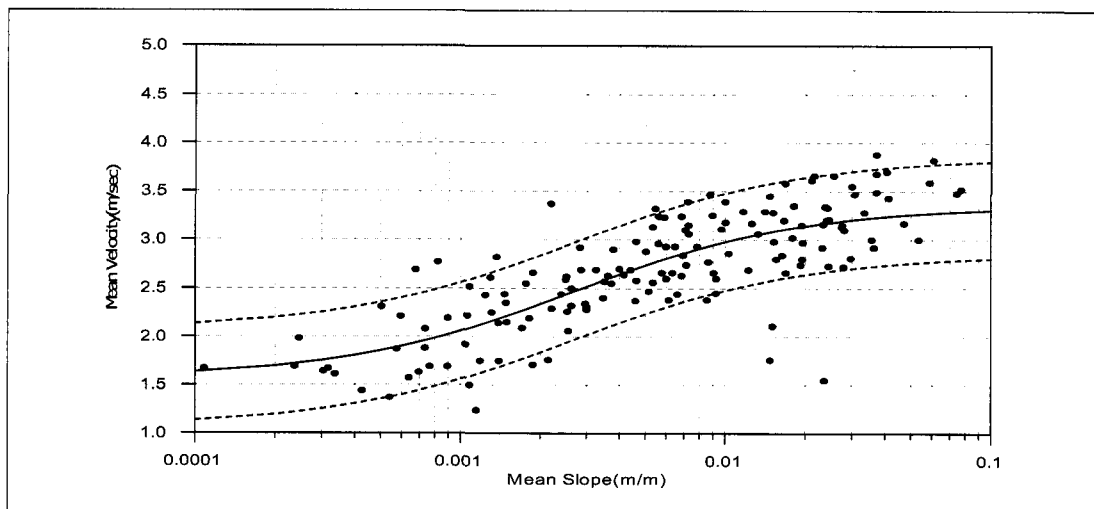


그림 3. 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거한 평균경사-평균유속 관계곡선

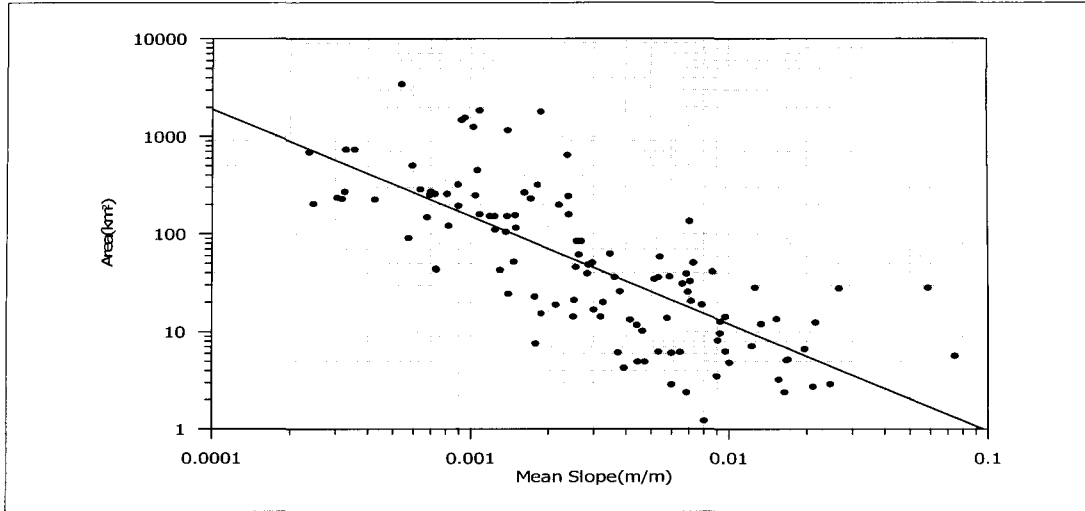


그림 4. 평균경사-유역면적 관계

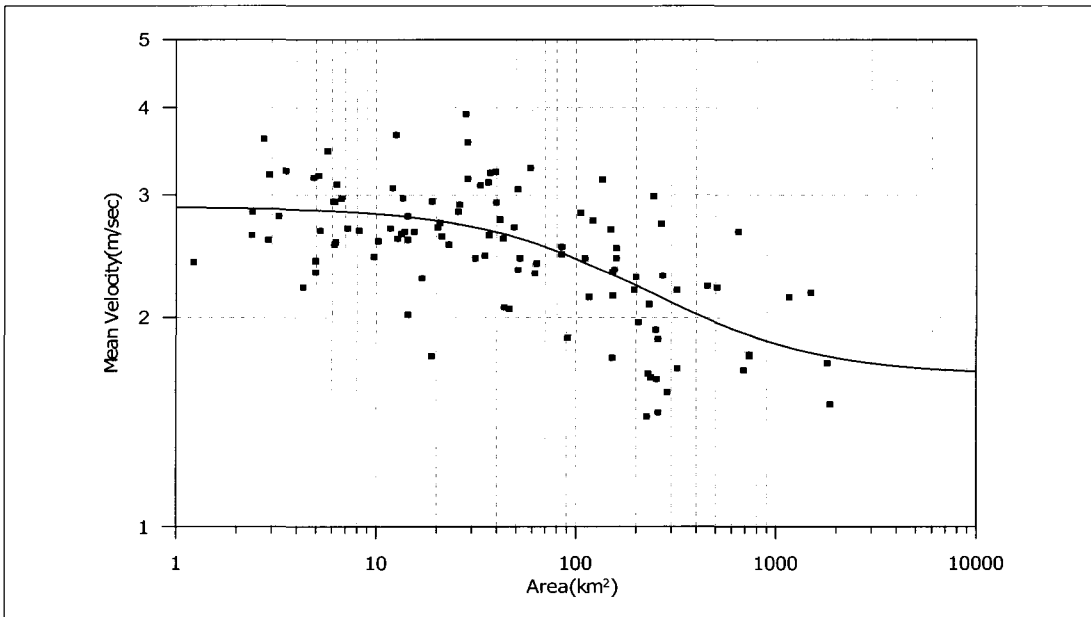


그림 5. 평균경사별 유역면적-평균유속 관계

실제 하천의 평균경사-유역면적 관계를 나타낸 결과는 그림 4와 같고, 이를 회귀분석한 식 (9)를 이용하여 산출된 유역면적을 실제 유역면적과 구분하기 위하여 평균경사에 대한 기준 유역면적으로 정의하였다.

$$A_{Rep} = 0.0760 S^{-1.1003}, \quad R^2 = 0.58 \quad (9)$$

여기서 A_{Rep} : 평균경사별 기준 유역면적(km²)

S : 평균경사(m/m)

R^2 : 결정계수

또한, 실제 하천의 유역면적-평균유속 관계를 나타낸 결과는 그림 5와 같고, 이를 회귀분석한 결과는 식(10)과 같다.

$$V_{Reg} = \frac{212.4250}{A + 171.8599} + 1.6520$$

$$R^2 = 0.40 \quad (10)$$

여기서 V_{Reg} : 원자료의 평균유속(V_0)을 회귀분석한 평균유속(m/s)
 A : 유역면적(km²)
 R^2 : 결정계수

유역면적에 대한 평균유속의 보정을 위해서는 먼저 실제 대상하천의 유역면적(A)과 아울러 대상하천의 평균경사에 대한 기준 유역면적(A_{Rep})을 식 (9)의 평균경사-유역면적 회귀식으로 결정하여 두 가지 면적을 결정한다.

그 다음 이와 같은 두 가지 유역면적에 대하여 식 (10)의 유역면적-평균유속 회귀식으로 두 가지 유속을 산정한 후, 다음과 같이 이들의 비를 이용하여 유역면적 차이에 대한 유속보정계수(C_A)를 산정한다.

$$C_A = \frac{V_{Reg, Act}}{V_{Reg, Rep}} \quad (11)$$

여기서 C_A : 하천별 유역면적의 차이에 대한 유속보정계수
 $V_{Reg, Act}$: 실제 유역면적에 대한 회귀식에 의한 평균유속(m/s)
 $V_{Reg, Rep}$: 기준 유역면적에 대한 회귀식에 의한 평균유속(m/s)

3.3.3 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선

상기와 같이 주요 인자에 대한 영향을 제거하는 2단계 절차를 통해 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 제거한 평균유속은 식 (12)와 같이 산정할 수 있다.

$$V_{O-R-A} = \frac{V_{O-R}}{C_A} = \frac{V_0}{C_R \times C_A} \quad (12)$$

여기서 V_{O-R-A} : 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 제거한 평균유속(m/s)
 V_{O-R} : 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거한 평균유속(m/s)
 V_0 : 실제 수면곡선계산 자료로부터

터 수집된 원자료의 평균유속(m/s)

C_R : 지역별 확률강우량의 차이에 대한 유속보정계수
 C_A : 하천별 유역면적의 차이에 대한 유속보정계수

상기 식 (12)에 의해 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 제거한 평균유속을 이용한 평균경사-평균유속 관계곡선은 그림 6과 같고, 이를 회귀분석한 결과는 식 (13)과 같다.

$$V_G = V_{O-R-A}^R = -\frac{0.005671}{S + 0.003046} + 3.447620, \quad R^2 = 0.65 \quad (13)$$

여기서 V_G : 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 제거한 평균유속을 회귀분석한 일반화된 평균유속(m/s)
 S : 평균경사(m/m)
 R^2 : 결정계수

일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선을 작성하는 과정에서 결정계수의 변화를 살펴보면, 원자료의 평균경사-평균유속 관계곡선의 결정계수는 0.53이고 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 제거하면 0.61으로 크게 증가되며, 여기에 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향까지 제거하면 0.65로 약간 더 증가되는 것으로 나타나고 있다. 여기서, 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향의 제거에 따른 결정계수의 증가는 다소 미미하지만 유역 규모에 따른 특성을 고려하는 유일한 항목이라는 측면에서 필요한 과정이다.

이와 같이 일반화 과정을 실시하면 결정계수가 0.53에서 0.65로 증가되어 반대수지상에서 더욱 뚜렷한 S-curve 형태의 경향성을 나타내면서 신뢰구간은 대략 ± 0.5 m/s의 범위로 설정할 수 있게 되며 또한, 대부분의 자료들이 신뢰구간 범위로 들어오게 되므로 일반화 과정은 적절한 것으로 판단된다.

지역별 확률강우량의 차이에 대한 유속보정계수는 대부분 관측소의 확률강우량 비율이 65%~135% 정도 이므로 약 0.87~1.13 범위이며, 하천별 유역면적의 차

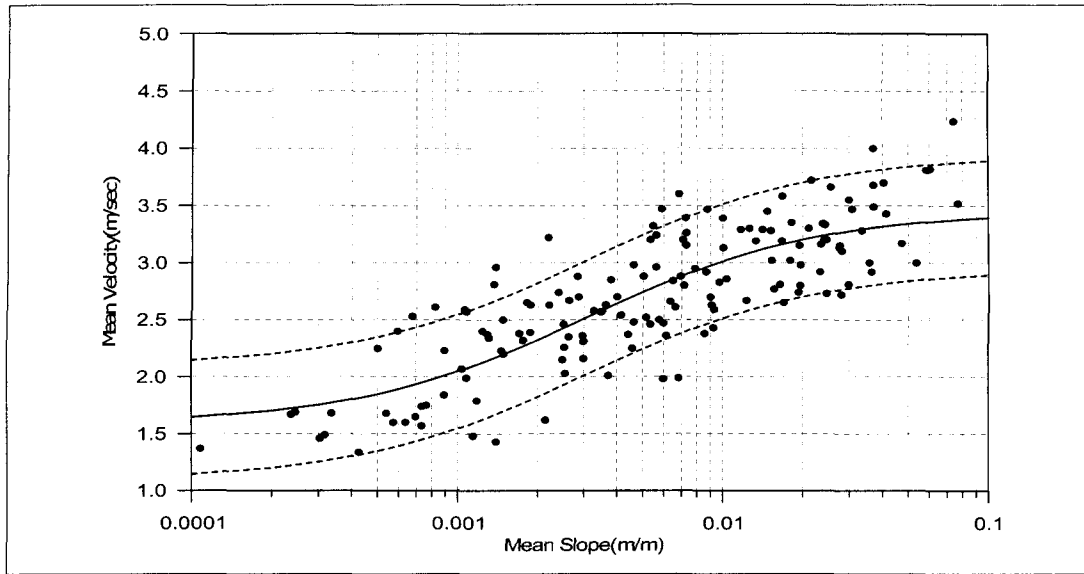


그림 6. 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선

이에 대한 유속보정계수는 약 0.82~1.23 범위를 나타내고 있으므로 이들 두 가지 유속보정계수를 모두 고려하면 보정범위는 0.71~1.39 정도가 된다. 따라서, 일반화된 평균유속은 대략 최저 1.6m/s에서 최고 3.4m/s 범위이므로 보정후 평균유속은 최저 1.1m/s에서 최고 4.7m/s 범위가 되며, 이와 같은 평균유속의 범위는 기준 재현기간으로 채택한 50년빈도 홍수시의 모든 경우의 유속을 포함하는데 충분한 것으로 판단된다.

따라서, 이와 같은 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식에서 산정된 일반화된 평균유속에 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 보정을 실시하여 대상 하천의 평균유속을 산정하고 이를 이용하여 도달시간을 산정하면 충분한 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 도달시간 산정 방법의 적용 절차

4.1 평균경사에 대한 일반화된 평균유속 산정

지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 제거하여 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식인 식 (13)에 대상 하천 구간의 평균경사를 대입하여 구간의 일반화된 평균유속(V_G)을 산출한다.

한편, 평균경사는 지금까지는 주로 단순경사를 사용하여 왔으나 이러한 단순경사를 적용하면 통상 유역 최

상류단 산지부 짧은 구간의 큰 표고차로 인하여 전체적으로 경사가 급해지면서 도달시간이 짧아지는 경향을 나타내므로 식 (14)와 같이 표현되는 등가경사를 사용하여야 한다. 한편, 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식인 식 (5)를 유도하는데 사용된 원자료의 평균경사도 등가경사를 사용하였다.

$$S = \left(\frac{\sum L_i}{\sum (L_i/S_i^{1/2})} \right)^2 \quad (14)$$

여기서 S : 등가경사(m/m)

L_i : 구간별 거리(m)

S_i : 구간별 경사(m/m)

이와 같이 산정된 일반화된 평균유속에서 대상 하천 구간의 특성에 부합되는 평균유속을 산정하기 위해서는 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식 작성시 고려된 바 있는 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 고려하여 주는 보정을 추가적으로 실시하여야 한다.

4.2 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 고려하는 보정

지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 고려하는 보정은 지역별 확률강우량의 차이에 대한 유속보정계수(C_R)를 식 (6)을 이용하여 산정한 후 이를 일반화된

표 4. 확률강우량의 재현기간별 비율(50년빈도 기준)

구 분	재현기간(년)							
	10	20	30	50	80	100	150	200
확률강우량 비율	0.73	0.85	0.92	1.00	1.08	1.12	1.18	1.23

평균유속에 곱하여 주는 방법을 적용한다.

이를 위해서는 먼저 강우지속기간 결정이 필요하며, 확률강우량 분석 결과의 유무에 따라 약간 다른 방법이 적용된다. 한편, 기준 재현기간으로 채택한 50년빈도가 아닌 다른 재현기간의 경우에 대하여 달리 산정하는 것도 여기서 고려하도록 되어있다.

1) 강우지속기간 결정

최근 강우지속기간 결정에 있어서 저류시설이 없는 경우에는 첨두홍수량이 최대로 발생하는 지속기간을 임계지속기간으로 채택하고 있는 추세이다. 이와 같은 임계지속기간은 산정된 첨두홍수량이 최대인 조건에서 채택하는 방법이기 때문에 홍수량을 산정하기 위한 인자인 도달시간을 산정하는데 필요한 강우지속기간으로 적용하기는 곤란한 실정이다.

확률강우량의 차이에 대한 영향을 고려하는 목적은 주로 지역별 차이를 고려하기 위한 것으로 지속기간별 차이를 고려하는 것은 다소 부수적인 점과 약간의 지속기간의 차이에 따른 확률강우량의 차이는 상대적으로 작은 점등을 감안하여 가급적 간단한 방법을 도입하기로 하였다.

이에 따라 「설계홍수 추정 지침서(건설부, 1993)」에 수록된 유역면적과 단위도의 침투시간 사이의 관계를 회귀분석한 식 (15)를 강우지속기간 결정에 사용하기로 하였다.

$$D = 0.2166 \times A^{0.4961} \quad (15)$$

여기서 D : 강우지속기간(hr)

A : 유역면적(km²)

2) 지역별 확률강우량의 차이에 대한 보정

확률강우량 분석 결과가 없는 경우, 표 3에 나타낸 전국 22개 주요 관측소 중에서 가장 인근에 위치한 관측소를 채택하고, 상기와 같이 계산된 강우지속기간에 대하여 표 3의 전국평균 확률강우량과 해당 관측소의 확률강우량 비율(R_R)을 선행보간하여 산정한다.

한편, 기준 재현기간으로 채택한 50년빈도 이외의 기타 재현기간에 대하여 적용할 경우에는 기 산정된 확

률강우량의 비율에 표 4와 같은 확률강우량의 재현기간별 비율을 곱하여 확률강우량의 비율을 재산정한다.

확률강우량 분석 결과가 있는 경우에는 표 2의 기준 재현기간으로 채택한 50년빈도 전국평균 확률강우량에 대한 대상 하천의 50년빈도 확률강우량의 비율(R_R)을 산정한다.

한편, 기준 재현기간으로 채택한 50년빈도 이외의 기타 재현기간에 대하여 적용할 경우의 확률강우량의 비율은 50년빈도 전국평균 확률강우량에 대한 대상 하천의 기타 재현기간 확률강우량의 비율로 재산정한다.

상기와 같이 산정된 확률강우량의 비율(R_R)을 식 (6)에 대입하여 확률강우량의 차이에 대한 유속보정계수(C_R)를 산정한 후, 식 (16)과 같이 일반화된 평균유속에 곱하여 보정한다.

$$V_{G+R} = V_G \times C_R \quad (16)$$

여기서 V_{G+R} : 일반화된 평균유속에 지역별 확률강우량의 차이에 대한 영향을 고려한 평균유속(m/s)

V_G : 일반화된 평균유속(m/s)

C_R : 지역별 확률강우량의 차이에 대한 유속보정계수

4.3 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 고려하는 보정

하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 고려하는 보정은 대상 하천의 실제 유역면적과 식 (9)으로 산정한 기준 유역면적을 각각 식 (10)에 대입하여 유속을 산정한 다음, 하천별 유역면적의 차이에 대한 유속보정계수(C_A)는 산정된 두 가지 유속의 비로서 식 (11)을 이용하여 산정한다.

상기와 같이 하천별 유역면적의 차이에 대한 유속보정계수(C_A)를 산정한 후, 식 (17)과 같이 일반화된 평균유속에 곱하여 보정한다.

$$V_{G+A} = V_G \times C_A \quad (17)$$

표 5. 도달시간 산정 결과 비교

하천등급	하천명	원자료의 도달시간 (min)	공식별 도달시간(min)				본 연구	비고
			Kirpich	Rziha	Kraven(I)	Kraven(II)		
국가하천	내성천	302	565	975	305	214	290	
	영산강	811	1724	4701	1322	490	731	
	황구지천	154	538	1000	290	129	133	
	탐진강	303	882	1949	552	215	263	
지방하천	곡릉천	144	666	1333	383	162	177	
	안평천	134	472	804	243	138	146	
	원동천	34	185	226	72	54	47	
	화양천	50	215	280	87	60	48	
소하천	너발천	26	77	65	23	21	22	
	문단천	40	139	151	49	45	43	
	지동천	35	82	67	24	26	25	
	청기리천	33	93	78	29	32	29	

여기서 V_{G+A} : 일반화된 평균유속에 하천별 유역 면적의 차이에 대한 영향을 고려한 평균유속(m/s)
 V_G : 일반화된 평균유속(m/s)
 C_A : 하천별 유역면적의 차이에 대한 유속보정계수

4.4 도달시간의 산정

일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식에서 산정된 일반화된 평균유속에 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 보정을 실시하여 대상 하천의 구간별 최종 평균유속을 산정하는 방법은 식 (18)과 같이 표현된다.

$$V_M = V_{G+R+A} = V_G \times C_R \times C_A \quad (18)$$

여기서 V_M : 일반화된 평균유속에 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 영향을 고려한 최종 평균 유속(m/s)
 V_G : 일반화된 평균유속(m/s)
 C_R : 지역별 확률강우량의 차이에 대한 유속보정계수
 C_A : 하천별 유역면적의 차이에 대한 유속보정계수

따라서, 대상 하천의 도달시간은 식 (18)에서 산정되는 평균유속을 사용하여 식 (19)와 같이 산정한다.

$$T_c = \frac{L}{3.6V_M} \quad (19)$$

여기서 T_c : 도달시간(hr)
 L : 유로연장(km)
 V_M : 평균유속(m/s)

본 연구에서 제안한 방법을 사용하여 산정한 도달시간을 기존 경험공식의 도달시간과 비교한 결과는 표 5와 같다.

동 표를 살펴보면 본 연구에서 제안한 방법의 결과가 원자료인 수면곡선 계산상의 도달시간과 가장 유사함을 알 수 있으며 또한, 기존 경험공식 중에서는 비교적 Kraven(II)와 유사한 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

현재 도달시간 산정시에는 많은 문제점을 지니고 있는 외국의 기존 경험공식에 얽매어서 결정하고 있으며 이는 홍수량 산정 결과의 신뢰도를 저하시키는 가장 근본적인 원인이 되고 있는 실정으므로 이러한 문제점을 개선하기 위하여 우리나라의 유역특성에 맞는 도달시간 산정 방법을 개발하였다.

도달시간 산정 방법을 개발하기 위하여 먼저 도달시

간에 가장 영향을 미치는 인자가 하도경사인 점을 감안하여 기존 하천정비기본계획의 수면곡선계산 결과에서 동일 규모의 홍수량이 적용된 구간별 평균경사-평균유속 자료를 수집하고, 이와 같은 자료에서 동일한 평균경사에서도 평균유속은 많은 차이를 나타내는 주요 원인을 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이 등으로 파악하고 이들 인자에 대한 영향을 제거하여 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식을 작성하였다.

이와 같이 일반화 과정을 실시하면 결정계수가 상당히 증가되어 반대수직상에서 더욱 뚜렷한 S-curve 형태의 경향성을 나타내면서 신뢰구간은 대략 $\pm 0.5\text{m/s}$ 의 범위로 설정할 수 있으며 또한, 대부분의 자료들이 신뢰구간 범위로 들어오게 되면서 일반화된 평균유속은 대략 최저 1.6m/s 에서 최고 3.4m/s 정도로 적절한 범위를 나타내었다.

이러한 일반화를 실시하는 이유는 최종 도달시간 산정에서 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식에서 산정된 일반화된 평균유속에 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이를 고려하는 보정을 실시하는 절차로 유역특성에 부합되는 평균유속을 산정하기 위함이다.

구체적인 도달시간 산정 방법의 적용은 일반화된 평균경사-평균유속 관계곡선의 회귀식에 대상 하천 구간의 평균경사를 입력하면 일반화된 평균유속을 산정할 수 있으며, 여기에 지역별 확률강우량의 차이와 하천별 유역면적의 차이에 대한 보정을 실시하여 대상 하천 구간의 평균유속을 산정하고 이를 이용하여 도달시간을 산정하는 절차로 수행하게 된다.

현재 우리나라는 유역의 지역적 위치, 규모 등에 따른 특성을 전혀 고려하지 못하는 외국의 기존 경험공식인 Kirpich, Rziha, Kraven 공식 등을 적용한 후, 이 중에서 적절한 결과를 주는 공식을 채택하고 있으며 채

택된 공식에 의한 유속이 다소 비합리적이라고 판단되더라도 수정없이 사용하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서 개발한 도달시간 산정 방법의 주요 장점은 다음과 같다.

- 실제 수면곡선계산 자료를 토대로 회귀분석을 실시하였기 때문에 산정되는 평균유속이 현실적으로 타당한 범위를 가진다.
- 경사에 관계없이 하나의 방법으로 일관되게 산정하므로 하천별 또는 구간별 불연속이 발생하지 않는다.
- 지역별 확률강우량의 차이, 하천별 유역면적의 차이를 고려하므로 유역의 특성을 충분히 반영하게 되며 또한, 확률강우량의 차이에서는 재현기간에 따른 차이를 포함시켜 고려할 수 있으므로 재현기간별로 도달시간을 달리 산출할 수 있다.

이와 같이 본 연구에서 개발한 방법은 외국의 기존 경험공식의 문제점을 대부분 개선하였으므로 향후 이를 사용할 경우 도달시간은 물론 홍수량 산정 결과의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 건교부 (2000). 수자원관리기법개발연구조사 보고서 제1권 - 한국 확률강우량도 작성, pp. 94~97, 183~254.
- 건설부 (1993). 수자원관리기법개발연구조사 보고서 별책 부록 - 설계홍수 추정 지침서, pp. 92.
- 새길엔지니어링 (2002). 수자원공학, pp. 3-68~3-73
- Singh, V.P. (1998). *Hydrologic Systems Volume I Rainfall-Runoff Modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., pp. 105.

(논문번호:02-48/접수:2002.07.29/심사완료:2002.10.24)