

# 저수지 방류량을 고려한 강우-유출 모형의 매개변수 추정에 관한 연구

## A Study on Parameter Estimation of Rainfall-Runoff Model Considering the Reservoir Discharge

이아름\*, 이도훈\*\*, 이은태\*\*\*

Ah Reum Lee, Do hun Lee, Eun Tae Lee

### 요 지

본 연구에서는 계산된 유량과 실측 유량을 비교하여 Clark 단위도 방법의 매개변수를 추정하고자 하였다. 오산천과 진위천 상류유역에 대하여 Arcview와 WMS로 지형자료에 대한 전 처리를 한후, HEC-HMS 프로그램을 이용하여 유출량을 산정하였다. 2001년부터 2005년까지 4개의 사상에 대하여 강우량, 기흥저수지와 이동저수지의 실제 방류량을 이용하여 유출량을 산정하였으며, Clark 모형의 매개변수를 Russel 공식, Sabol 공식 및 HEC-HMS 프로그램에 내장된 Nelder-Mead 최적화 방법을 이용하여 매개변수를 각각 산정하여 회화 지점의 실측 유출량과 비교·평가하였다.

빈도가 큰 유출사상의 경우에는 Sabol 식을 적용한 결과가 Russel 식을 적용한 모의결과보다 첨두유량의 재현성이 우수하게 나타났으며, 유출량이 작은 경우에는 Russel 식을 적용한 모의결과가 우수하였다. 첨두가중제곱평균제곱근오차, 잔차자승의 합, 절대잔차의 합 등 3가지의 서로다른 목적함수를 적용하여 매개변수를 자동 보정하였을 때, 목적함수에 따른 첨두유량의 오차는 거의 동일하였으며, 첨두시간에 대한 오차는 첨두가중제곱평균제곱근오차를 적용했을 때 가장 작은 것으로 분석되었다. 그리고 Clark 유역 추적모형의 자동보정을 통하여 추정된 매개변수인 도달시간과 저류상수는 강우사상에 따라서 변동하는 특성을 나타내기 때문에 최적의 도달시간 및 저류상수는 홍수사상별로 추정되어야 하며 이 결과는 홍수량 산정을 위한 매개변수 추정과정의 비유일성 및 복잡성을 암시하고 있다.

**핵심용어 : HEC-HMS, 매개변수 추정, Clark 단위도, 홍수량**

### 1. 서 론

Clark 모형의 매개변수는 도달시간-유하면적 관계식(time-area relation, TA)과 이 관계의 기저시간인 도달시간(time of concentration, Tc) 그리고 유역의 저류상수(storage coefficient, R)로 구성되는데 이들에 대한 적절한 추정을 위해 다양한 연구가 이루어져 왔다. 이들 매개변수를 추정하는 전통적 방법에 의하면 TA의 경우 지도를 통하여 도달거리-유하면적 관계를 작성하고, 우량주상도와 직접유출곡선의 시간특성 관계를 주관적으로 해석하거나 또는 적절히 가정된 수리학적 관계식을 이용하여 Tc를 계산한 후 이를 통하여 TA를 수립한다. 그리고 유역의 R은 유출수문곡선의 변곡점에서의 기울기와 유량간의 비를 통하여 산정하는 것이 일반적이다. 그러나 이와 같은 매개변수 추정방법은 실용적으로 적용하기 어려운 문제에 접하거나 또는 분석자마다 일치되지 않는

\* 정희원 · 경희대학교 일반대학원 수공학전공 · E-mail : yahroom@khu.ac.kr

\*\* 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · E-mail : dohlee@khu.ac.kr

\*\*\* 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · E-mail : etlee@khu.ac.kr

해석 등에 의하여 높은 불확실성을 내포하고 있는 것이 사실이다. 이에 따라 이러한 불확실성을 최소화하는 효과적인 방법론을 제시하는 연구는 Clark 모형에 대한 연구의 중요한 부분으로 인식되어 다양한 방법을 통하여 진행되어왔다.

본 연구에서는 Clark 모형의 매개변수 산정을 위하여, Kirpich, Rziha, Kraven 등의 공식을 사용하여 도달시간을 산정하였고, 이를 Russel과 Sabol 공식에 의해 저류상수를 추정하여 홍수량을 계산하였다. 도달시간 및 저류상수 추정공식의 적합성을 파악하기 위하여 HEC-HMS에 내장되어 있는 매개변수 자동보정 방법을 통해 유출량을 계산하고 실측유량과 비교하여 매개변수 산정방법을 평가하였다.

## 2. 모형의 적용 및 구성

### 2.1 대상구역

안성천 유역의 제 2 지류인 오산천은 용인시 기흥구에서 발원하여 수원천, 지곡천, 공세천과 함께 본 유역에 위치하고 있는 유효저수용량이 10,690천m<sup>3</sup>인 기흥저수지에 유입된다. 기흥저수지를 월류한 후, 고매천, 치동천, 신리천, 장지천, 궤리천, 가장천의 유입을 받아 유하하다가 평택시 진위면의 진위천(국가, 지방2경계)합류지점에 유입하는 하천이다. 유역면적은 150.68km<sup>2</sup>이고, 유로연장은 29.50km이다. 오산천내에는 실시간 수위를 관측할 수 없는 TM수위계가 존재하지 않기 때문에 진위천 내의 회화 수위계를 이용해야하므로 본 논문의 유역은 출고점이 회화인 진위천유역의 일부와 오산천 유역이라 하겠다. 유역의 모식도는 그림 2.1과 같다. 본 연구에서는 1:25,000의 수치지도를 이용하여 등고 자료를 추출한 후 GIS 분석도구인 ArcView GIS에서 소정의 처리과정에 의해 DEM자료를 생성하여 소유역을 분할하는데 기초자료로 활용하였다. 소유역별 특성은 표 2.1과 같다. 본 연구에서 사용된 저수지는 안성천 유역의 경기도 용인시 이동면 어비리에 위치한 이동저수지와 경기도 용인시 기흥구 고매동에 위치한 기흥저수지이다. 이동 저수지의 몽리면적은 3,152ha, 만수면적은 327ha, 총저수량은 17,290천m<sup>3</sup>, 유효저수량은 17,200천m<sup>3</sup>이다. 기흥 저수지의 몽리면적은 2,512ha, 만수면적은 231ha, 총저수량은 10,728천m<sup>3</sup>, 유효저수량은 10,690천m<sup>3</sup>이다.

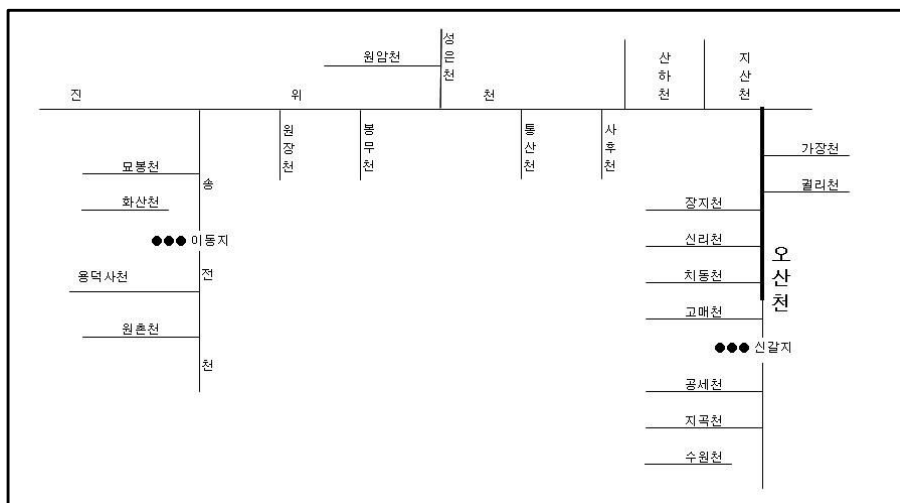


그림 2.1 유역 모식도

**표 2.1 유역 특성**

유역명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	유로연장 (m)	유역경사 (m/m)	CN (AMC-II)
A	51.64	10152	0.1711	48.9
B	95.96	16489	0.1215	55.4
C	115.03	15617	0.1568	52.5
D	91.73	13353	0.2518	43.2
E	3.31	2808	0.0325	72.3

**2.2 입력 자료 구축**

본 연구에서는 HEC-HMS모형의 입력자료 구축 및 모형의 보정, 검증을 위해 수문 자료의 수집 및 정리가 선행되었다. 강우 사상은 2001~2005년까지의 강우자료 중 연 최대강우사상을 가지는 것으로 선택하였다. 2001년 7월 29일, 2002년 8월 6일, 2003년 7월 21일, 2004년 7월 14일, 2004년 7월 28일 사상을 선택하였다. 유출량 자료는 강우사상에 맞게 선정 하였다. 기흥저수지와 이동저수지의 농번기 방류량 자료(농업기반공사)를 통해 각각 저수지의 방류량 조건표를 이용하여 시간당 방류량을 산정하였다. 이 논문에서는 유역이 강우량 보다 저수지 방류량에 의해 유출량이 지배를 받으므로 실시간 방류량이 아주 중요하므로 저수지 추적을 하지 않고 Source로 두어 시간당 방류량으로 입력하였다. 손실률은 SCS방법을 이용하여 산출하였으며, 단위 우량도는 Clark 단위도를 사용하여 계산하였다. Clark 방법의 도달시간은 계측유역에서는 유효유량 끝에서 수문곡선 변곡점까지 시간 등으로 결정할 수 있다. 미계측유역에서는 Kirpich, Rziha, Kraven공식이나 유하시간을 산정한 후 유입시간을 더한 도달시간으로 산정하여야 한다. 또 Clark 방법은 도달시간과 더불어 저류상수 K를 입력인자로 하는데, 저류상수 K는 우리나라의 경우 적절한 실측자료가 부족하여 이론적인 방법에 의하여 저류상수 K를 결정하기는 어려운 실정이다. 저류상수를 구하는 공식에는 Clark, Linsley, Russel, Sabol 공식등이 있으며, 현재 우리나라 적용에 있어서는 Sabol 공식이 가장 합리적이라고 판단되고 있다. 본연구에서는 Russel 공식과 Sabol 공식을 사용하였다. 매개변수 산정표는 표 2.2와 같다. 또한 Muskingum방법을 사용하여 하도의 홍수추적을 실시하였다.

**표 2.2 매개변수 산정표**

유역명	도달시간			저류상수					
				Sabol			Russel		
	Kirpich	Rziha	Kraven	Kirpich	Rziha	Kraven	Kirpich	Rziha	Kraven
A	0.78	0.41	0.19	0.61	0.32	0.14	0.78	0.41	0.19
B	1.29	0.81	0.36	1.06	0.67	0.30	1.29	0.81	0.36
C	1.12	0.66	0.30	0.88	0.52	0.24	1.12	0.66	0.30
D	0.83	0.42	0.20	0.64	0.33	0.16	0.83	0.42	0.20
E	0.55	0.30	0.12	0.44	0.24	0.10	0.55	0.30	0.12

**2.3 연구결과**

본 연구에서는 최적화에 사용되는 실측유량자료를 회화수위표지점의 유량으로 사용하였고 이 지점에 대해 사상별로 유출률을 분석하였다. 사상별 첨두홍수량과 첨두유량은 다음 표 2.3과 같다.

**표 2.3 회화의 유출량**

번호		1	2	3	4	5
강우사상		2001-07-29	2002-08-06	2003-07-21	2004-07-14	2005-07-28
회화	침투유량 (cms)	344.8	991.96	159.4	212.12	235.87
	침투시간	2001-07-30 17:00	2002-08-07 15:00	2003-07-23 0:00	2004-07-16 15:00	2005-07-28 15:00

Clark 유역 추적 모형의 매개변수인 도달시간과 저류상수를 경험식에 의해 추정하였을 때, 유출량 산정의 적합성을 평가하기 위하여 서로 다른 강우사상을 이용하였다. 도달시간은 Kirpich 공식을 이용하였고, 저류상수는 Russel과 Sabol공식을 각각 적용하였다.

표 2.4는 3개의 소유역에 대하여 Russel 공식과 Sabol 공식에 의해 산정된 저류상수값과 침투유량 및 침투시간을 나타내고 있다. 모든 소유역에서 Russel 식에 의해 추정한 저류상수 값이 Sabol 공식에 의해 추정한 값보다 약간 큰 값을 나타내었으며, 소유역 B가 가장 큰 저류상수 값을 보였고, 면적이 작은 소유역 E가 가장 작은 값을 나타내었다. 두 공식사이의 침투시간은 거의 일치함을 알 수 있으며, 침투유량은 Sabol 공식이 Russel 공식보다 약간 큰 값을 나타내고 있다. 그리고 두 식에 의해 산정된 유출량은 동일한 경향을 보였지만, 유출량이 큰 사상의 경우에는 Sabol 식이 Russel식보다 침투유량의 재현성이 우수하였고, 유출량이 작은 경우에는 Russel 식이 Sabol 식보다 우수하였다. 그림 2.2~4는 강우유출그래프와 Sabol과 Russel공식으로 산출된 유출량을 비교한 것이다.

**표 2.4 Russel과 Sabol 식에 의해 산정한 매개변수와 침투유량 및 침투시간**

강우사상		하도 1		하도 2		하도3		소유역 B		소유역 C		소유역 E		침투유량 (CMS)	침투시간
		K	x	K	x	K	x	도달시간 (hr)	저류상수 (hr)	도달시간 (hr)	저류상수 (hr)	도달시간 (hr)	저류상수 (hr)		
20010729	Russel	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.29	1.12	1.12	0.55	0.55	372.34	2001-07-30 11:00
	Sabol	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.06	1.12	0.88	0.55	0.44	390.49	2001-07-30 11:00
20020806	Russel	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.29	1.12	1.12	0.55	0.55	847.99	2002-08-07 20:00
	Sabol	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.06	1.12	0.88	0.55	0.44	855.54	2002-08-07 19:00
20040714	Russel	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.29	1.12	1.12	0.55	0.55	272.64	2004-07-16 15:00
	Sabol	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.06	1.12	0.88	0.55	0.44	275.26	2004-07-16 15:00
20050728	Russel	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.29	1.12	1.12	0.55	0.55	268.83	2005-07-28 15:00
	Sabol	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.06	1.12	0.88	0.55	0.44	271.63	2005-07-28 15:00

HEC-HMS에 내장된 최적화방법을 이용하여 목적함수의 변화에 따른 매개변수산정 값들의 변동 특성 및 모의되는 유출량의 적정성을 평가하기 위하여 3가지의 서로 다른 목적함수들을 적용하여 매개변수 최적화를 실시하였다. 본 연구에서 적용한 목적함수들은 침투가중제곱평균제곱근오차 (PWRMSE), 잔차 자승의 합 (SSR), 절대 잔차의 합 (SAR) 이다.

추정되는 매개변수는 Clark 유역추적에 필요한 도달시간 및 저류상수, Muskingum 하도추적에 필요한 K 및 x 변수를 채택하였다. 매개변수의 초기값은 Kirpich 식과 Russel 식에 산정된 값으

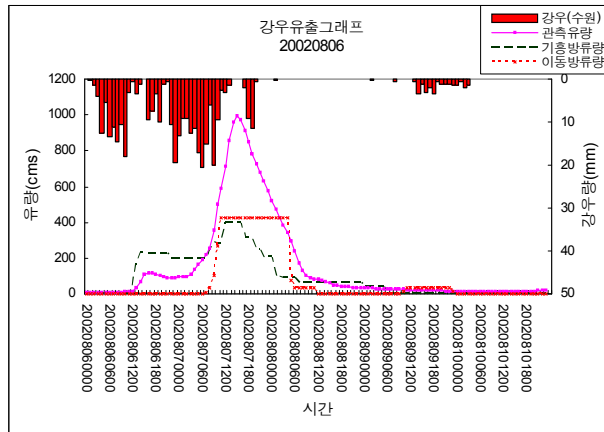


그림 2.2 유출수문곡선(2002년8월6일)

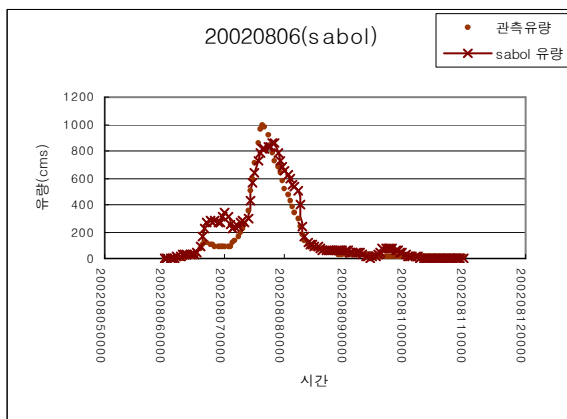


그림 2.3 2002년 8월 6일의 유출량 곡선

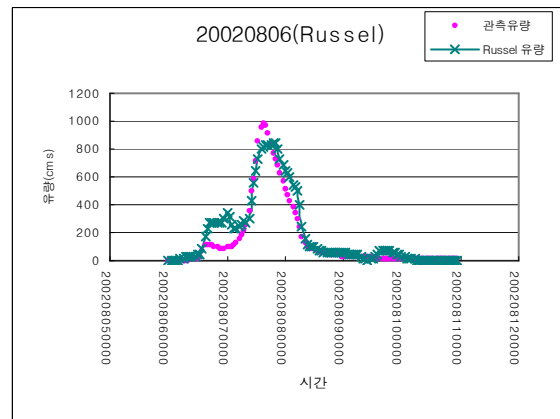


그림 2.4 2002년 8월 6일의 유출량 곡선

로 정의하였고, 회화 수위관측소 지점의 실측 유출량을 이용하여 Nelder와 Mead 알고리즘을 적용하여 소유역별 매개변수들을 자동보정하였다.

표 2.5는 3가지의 목적함수에 따른 추정된 매개변수 값들을 나타내고 있다. 추정된 매개변수들은 강우사상과 목적함수에 따라서 약간의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 표 2.6에서 2001년 7월 29일 사상의 경우에는 SSR을 목적함수로 적용했을 경우 가장 작은 첨두유출량 오차를 보이고 있으며, 나머지 사상의 경우에는 목적함수에 따라서 첨두유출량 오차가 유사하지만, PWRMSE를 적용하였을 경우 상대오차가 가장 작게 나타났다. 첨두시간에 대한 오차는 2002년 8월 6일 사상의 경우는 PWRMSE를 적용했을 때 가장 작은 오차를 보였으며, 나머지 사상의 경우에는 목적함수에 따른 첨두시간 오차는 거의 동일함을 알 수 있다. 유출량 변동에 따른 Clark 유역추적 모형의 매개변수인 도달시간과 저류상수의 변화경향을 분석하였다. 매개변수의 특성은 PWRMSE 목적함수를 이용하여 자동 보정된 매개변수 값을 선택하여 분석하였다.

표 2.5 목적함수에 따른 매개변수 값

강우사상		하도 1		하도 2		하도3		소유역 b		소유역 c		소유역 e	
		K	x	K	x	K	x	도달시간 (hr)	저류상수 (hr)	도달시간 (hr)	저류상수 (hr)	도달시간 (hr)	저류상수 (hr)
20010729	pwRMS	1	0.28	1	0.28	1	0.28	1.375	1.375	1.205	1.558	0.635	0.635
	SSR	1.2	0.3	1.1	0.31	1.4	0.28	1.395	1.327	1.245	1.363	0.605	0.639
	SAR	1	0.28	1	0.28	1	0.28	1.375	1.375	1.205	1.558	0.635	0.635
20020806	pwRMS	1	0.48	1	0.24	1	0.32	1.669	2.018	1.023	1.848	0.756	0.641
	SSR	1	0.25	1	0.25	1	0.22	1.358	1.464	1.207	1.471	0.625	0.444
	SAR	1	0.28	1	0.28	1	0.28	1.375	1.375	1.205	1.558	0.635	0.635
20040714	pwRMS	1.1	0.21	1	0.21	1	0.18	1.387	1.387	1.153	1.01	0.647	0.647
	SSR	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.29	1.12	1.12	0.55	0.55
	SAR	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.29	1.12	1.12	0.55	0.55
20050728	pwRMS	0.9	0.18	1	0.28	0.8	0.13	1.361	1.377	1.125	1.172	0.733	0.335
	SSR	1	0.2	1	0.2	1	0.2	1.29	1.29	1.12	1.12	0.55	0.55
	SAR	1	0.23	1.2	0.23	1	0.23	1.319	1.319	1.149	1.149	0.579	0.579

표 2.6 목적함수별 침투유량의 상대오차

강우사상	목적함수별	상대오차	순위
1	PWRMSE	0.069	2
	SSR	0.009	1
	SAR	0.069	2
2	PWRMSE	0.150	1
	SSR	0.153	3
	SAR	0.150	1
3	PWRMSE	0.278	1
	SSR	0.286	3
	SAR	0.278	1
4	PWRMSE	0.131	1
	SSR	0.140	3
	SAR	0.139	2

표 2.7은 매개변수 값들의 최소값, 최대값 및 4개 강우사상에 대한 평균값을 보여주고 있다. 소유역별 도달시간은 유출량에 따라서 약간 변화하고 있지만, 소유역별로 서로 다른 경향을 나타내고 있다. 침투유량이 344.8 m<sup>3</sup>/s보다 작은 경우는 도달시간이 거의 일정한 값을 나타내었고, 침투유량이 991.96 m<sup>3</sup>/s에서는 B와 E 소유역의 도달시간은 약간 증가하였으며, 소유역 C의 도달시간은 감소하고 있다. 소유역 C의 저류상수는 유출량에 따라 저류상수 값이 증가하는 경향을 나타내며, 소유역 B는 침투유량이 991.96 m<sup>3</sup>/s보다 작은 사상의 경우에는 저류상수 값이 거의 동일하였다.

표 2.7 추정된 매개변수 값의 범위

		최소값	최대값	평균값
유역 b	도달시간	1.361	1.669	1.448
	저류상수	1.375	2.018	1.539
유역 c	도달시간	1.023	1.205	1.127
	저류상수	1.01	1.848	1.397
유역 e	도달시간	0.635	0.756	0.693
	저류상수	0.335	0.647	0.570
하도 1	x	0.18	0.48	0.288
	K	0.9	1	1
하도 2	x	0.21	0.28	0.253
	K	1	1	1
하도 3	x	0.13	0.32	0.228
	K	1	0.8	0.95

### 3. 결 론

미개발지역이 개발지역으로 변함에 따라 토양이 불투수층으로 바뀌게 되고, 이로 인해 하천의 유출 용적이 증가하며, 유역 하류부분의 제방과괴 및 홍수 범람 등으로 인해 재산피해가 심각한 현실에서 정확한 홍수량 산정은 필수 불가결하다.

좀 더 정확한 홍수량을 산정하기 위해서는 강우자료 뿐 아니라 저수지 방류량(실시간), 지형자료, 매개변수 등이 고려되어야한다. Clark 단위도를 유도하기 위해서 일반적으로 시간 매개변수 추정을 위한 주관적인 판단과 도달시간-유하면적 관계를 도출하기 위한 자원 소모적인 지도작업이 요구된다. 더욱이 도달시간 유하면적 관계를 합성곡선으로 대체하려할 경우 이 곡선의 형태나 특성에 대하여 미리 판단할 근거가 부족하다 .그러므로 본 연구에서는 Clark 유역추적방법과 Muskingum 하도추적 방법을 적용하여 홍수시 유출수문곡선을 산정하고, 도달시간, 저류상수, Muskingum 추적방법의 변수들에 대한 매개변수를 추정하는 연구에 의해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) Clark 유역추적 모형에서 Russel 식과 Sabol 식에 의해 저류상수를 추정하여 계산된 유출수문곡선은 동일한 경향을 나타내었지만, 강우사상에 따라서 재현성이 다르게 평가되었다. 유출량이 큰 경우에는 Sabol 식이 Russel 식보다 첨두유량의 재현성이 우수하였고, 유출량이 작은 경우에는 Russel 식이 Sabol 식보다 더 우수한 결과를 나타내었다.
- (2) 첨두가중제곱평균제곱근오차 (PWRMSE), 잔차 자승의 합 (SSR), 절대잔차의 합 (SAR) 등 3가지 목적함수를 적용하여 Nelder와 Mead 알고리즘으로 Clark 유역추적 방법과 Muskingum 하도추적 방법의 매개변수들에 대한 최적화를 수행하였을 때, 목적함수에 따른 첨두유량 오차는 큰 차이가 없었으며, PWRMSE를 목적함수로 적용했을 때, 첨두시간에 대한 오차가 가장 작은 것으로 평가되었다.
- (3) Clark 유역추적모형의 매개변수인 도달시간과 저류상수는 유출량에 따라서 변동하는 특성을 나타내므로 최적의 도달시간과 저류상수는 홍수사상별로 추정되어야 한다. 그리고 도달시간과 저류상수의 평균값을 적용하여 계산된 첨두유량 오차는 Russel 식 또는 Sabol 식을 적용하였을 경우보다 작게 산정되어서 개개 홍수사상에 대한 도달시간과 저류상수의 평균값은 빈도 홍수량 산정에 유용하게 적용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 이은태 외 3인(2001), 현대 수리학, 구미서관
2. 윤용남(1999), 공업수문학, 청문각
3. 정중호, 윤용남(2003), 수자원 설계실무, 구미서관
4. 윤용남(2000), 수리학, 청문각
5. 우효섭(2001), 하천 수리학
6. 한국수자원 학회, 제 13회 수공학 워크샵
7. 성기원(1999), 유역의 상사성을 이용한 Clark모형의 매개변수 해석, 수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제 4호, pp. 427-435
8. 성기원(1997), 수문지형특성 및 시간응답특성의 상사성을 이용한 Nash 모형의 해석, 한국수자원학회, 제 30권, 제 2호, pp. 97-106
9. 성기원(2003), Gamma 분포형 함수 적합을 이용한 Clark모형의 매개변수 간접 추정, 한국수자원학회, 제 36권, 제 2호, pp. 223-235
10. 윤광원, 원석연, 윤용남(1994), Clark 유역 추적법에 의한 계획 홍수량 산정에 미치는 매개변수 민감도 분석, 한국수자원 학회 논문집, 한국수자원학회, 제 27권, 제4호, pp. 85-94
11. 윤석영, 홍일표(1995), Clark모형의 매개변수 산정방법 개선, 대한 토목학회논문집, 대한토목학회, 제 15권, 제 5호, pp. 1287-1300
12. 백경록, 최종남, 유철상, 김중훈(2000), 강우-유출관계의 변동성에 관한 고찰, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 20권, 제3-B호, pp. 377-386
13. 유철상, 김상단, 윤용남(2002), 면적평균강우의 추정오차와 유출계산에 미치는 영향, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제35권, 제3호, pp.307-319
14. 윤석영, 홍일표(1994), 홍수유출예측을 위한 수리수문학적 인자 결정 :clark 및 nash 모형을 중심으로. 연구보고서, 건기연 94-WR-113, 한국건설기술연구원
15. 윤여진(1998), 설계홍수량에 영향을 미치는 매개변수 민감도 분석 : 자연유역을 중심으로, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제31호, 제 6호, pp. 695-708
16. Bhaskar, N.R. (1988), Projection of urbanization effects on runoff using Clark instantaneous unit hydrograph parameters." *Water Resources Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 113-124.
17. Jain, S.K, Singh & RD., and Seth, S.M. (2000). "Design flood estimation using GIS supported GIUH approach." *Water Resources Management*, Vol. 14, No. 5, pp. 369-376.
18. Khan, A.Q., and Ormsbee, L.E. (1989). "Comparison of two hydrologic models for steeply forested watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 109, No. 3/4, pp. 325-349.
19. Kull, D.W., and Feldman, AD. (1998). "Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff." *Journal of Hydrologic & Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-11.
20. Wilson, B.N., and Brown, J.W. (1992). "Development and evaluation of a dimensionless unit hydrograph." *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, No. 2, pp. 397-4053,
21. Sabol, G.V. (1988), Clark Unit Hydrograph and R-parameter estimation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.114, No.1, pp. 103-111