

1999년 임진강 유역의 집중호우에 대한 DAD모형의 연구

박 상 우 · 김 백 조 · 장 석 환**

서남대학교 토목공학과 · 기상연구소 예보연구실 · 대진대학교 토목공학과
(2001년 12월 26일 접수; 2002년 7월 18일 채택)

A Study on Depth-Area-Duration Models of Heavy Rainfall, 1999 in the Im-Jin River Basin

Sang-Woo Park, Baek-Jo Kim* and Suk-Hwan Jang**

Dept. of Civil Engineering, Seonam University, Chonbuk 590-711, Korea

*Forecast Research Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

**Dept. of Civil Engineering, Daejin University, Kyunggi 487-711, Korea

(Manuscript received 26 December, 2001; accepted 18 July, 2002)

Depth-area-duration(DAD) relations are important to hydrological plans and designs for the water resources as well as the flood defence. And these relations have been still in analysis and use today because they can be applied to readily available data. In this paper, rational and consistent DAD models were developed using the multiple regression analysis and basic relationships of area ratio-runoff volume about heavy rainfall occurring in the Im-Jin river basin, 1999. In addition, revised DAD models and curves that can convert a maximum point rainfall to mean area rainfall were developed and evaluated. As results, these models seem to have predictive value in order to plan and design hydrological structures of flood defence in the Im-Jin river basin.

Key words: Depth-area-duration(DAD), Heavy rainfall, Im-Jin river

1. 서 론

1999년 7월 31일부터 8월 4일까지 임진강 유역을 비롯한 경기 중북부 지방에서는 5일 동안 800mm가 넘는 엄청난 비가 내렸다. 이런 집중호우로 인하여 제방, 댐, 교량, 철도, 배수펌프장 등 사실상 거의 모든 홍수방어시설에서 설계홍수량을 초과한 대홍수가 발생하였으며, 이에 따른 피해가 임진강 전 유역에서 발생하였다. 특히 이 지역은 1996년, 1998년에 이어 지난 4년중 3년동안 홍수를 겪게 되어 홍수관리에 국가적인 위기의식을 느끼게 하였다.

1999년 호우는 그 원인이 이상기후에 의한 것인지 규명하기가 어렵지만, 적어도 1998년도에 발생한 소위 '케릴라성'이나 소낙성 호우와는 다른 것으로 판단된다. 1999년도 호우는 우리나라에 큰 비를 몰고 오는 전형적인 기압배치를 가지고 있었다. 임

진강 유역이 북쪽의 대륙성 고기압과 남쪽의 북태평양 고기압의 경계에 놓이면서 전선은 정체되어 있었고, 남서쪽으로부터는 고온다습한 기류가 계속 유입되어 큰 비를 내릴 수 있는 여건을 갖추고 있었다.¹⁾ 그래서 나홀동안 억수같은 비가 경기 중북부 전 지역에서 내렸고, 결과적으로 계곡 상류에서만 홍수피해가 발생하였던 1998년 호우와 달리 상류에서 하류까지 유역 어느 곳이나 피해가 발생하지 않은 곳이 없었다.²⁾

임진강 유역은 한반도의 중앙을 가로지르는 38도선에서 남북으로 길게 위치하고 있다. 이 유역의 본류인 임진강은 함경남도 덕원군에 위치한 마식령산맥에서 발원하여 강원도와 황해도를 거쳐 경기도로 들어와 제1지류인 한탄강과 합류한 후 서해의 강화만으로 유입한다. 유역면적은 8,118km², 하천연장은 254.6km, 유역평균폭은 31.9km, 유역경사는 0.185이며, 유역의 약 63%가 군사분계선 북쪽에 위치하고, 남쪽의 유역면적은 약 3,009km²이다. 그 동안 군사분계선 남쪽의 임진강 유역은 북한과의 접경지역이라

Corresponding Author : Sang-Woo Park, Dept. of Civil Engineering, Seonam University, Chonbuk 590-711, Korea
Phone : +82-63-620-0232
E-mail : psw0232@tiger.seonam.ac.kr

는 이유로 개발이 자제되어 왔으며, 이와 더불어 기상관측이나 수문해석이 미비하였던 것 또한 사실이다. 이에 1999년 호우는 우리에게 많은 교훈을 주고 있으며, 기상학적으로나 수문학적으로 매우 중요한 홍수사상이 되고 있다.

강우깊이-면적-지속기간(Rainfall Depth-Area-Duration; DAD)의 관계는 과거 30여년간 많은 수공학자들 사이에 수공구조물의 설계에 대한 기초로써 연구되어 왔으며,^{3,4)} 최근에는 도시유역이나 비도시유역으로부터 홍수시 비점오염의 관리 및 계획에 이르기까지 폭 넓게 이용되고 있다. 그러나 몇몇 학자들은 여러 유역에서 분석된 DAD관계에 많은 차이가 있음을 보였는데, 이는 유역별 강우의 면적분포가 서로 상이하기 때문이라고 지적하고 있다.^{5,6)} 따라서 DAD분석은 각 유역별로 이루어져야 이용 가능성이 높다고 할 것이며, 이에 본 연구에서는 군사분계선 남쪽 임진강 유역의 1999년 집중호우에 대하여 DAD의 관계를 분석하고, 특히 DAD 관계곡선의 분석에 있어서 보다 합리적인 방법의 모색 및 실무에 이용 가능한 DAD모형을 정립하고자 하였다.

2. 분석자료 및 호우현황

1999년 집중호우의 특성을 파악하고 DAD분석을 실시하기 위하여 경기 중북부지방에 위치하는 기상청 산하 9개소의 기상대(서울, 강화, 철원, 춘천, 인제, 양평, 동두천, 수원, 인천)와 기상청에서 운영하는 임진강 유역내외의 15개 자동기상관측소(AWS)의 시간별 강우량 자료가 이용되었다.

이번 집중호우는 경기 중북부지방을 중심으로 남쪽의 열대기단과 북쪽의 한대기단으로 형성된 수렴대에 기인하였으며, 1999년 7월 31일 이른 오전부터 경기 북서부지방에서 시작되어 점차 동쪽으로 진행하면서 7월 31일 밤에 시간당 최고 30~50mm의 강우량을 기록하였다. 이 집중호우는 경기 중북부와 강원도 북부지방에 국한되었으나 집중호우를 동반한 수렴대가 남북으로 약간의 진동하면서 호우지역이 점차 넓어지는 경향을 보였으며, 이 지역에 수렴대가 7월 31일에서 8월 2일까지 3일간 유지되면서 200~700mm의 비를 내렸다.

기상대에서 관측된 이번 집중호우의 최대 누적강우량은 Table 1에서와 같이 강원도-철원의 752.9mm 이었고 그 다음으로 경기도 동두천의 724.9mm를 기록하였으며, 경기 남부지방의 양평에서 166.5mm로 이들 관측소 중 최소 누적강우량을 보였다. 이러한 누적강우량은 서울, 경기북부, 강원북부지방 등 호우지역의 연평균 강수량의 35~45%에 해당된다. 특히 이번 집중호우의 현상은 호우가 내린 3일 동안의

Table 1. Cumulative rainfall at each meteorological station in Seoul and Kyunggi areas during the period of July 31 to August 2, 1999

Station	Cumulative rainfall (unit: mm)	Station	Cumulative rainfall (unit: mm)	Station	Cumulative rainfall (unit: mm)
Dongducheon	724.9	Suwon	207.7	Chulwon	752.9
Seoul	471.3	Ganghwa	585.5	Chuncheon	450.6
Incheon	482.7	Yangpyong	166.5	Inje	459.0

강우강도가 낮 동안에는 다소 약하였다가 밤부터 점차 강해져 새벽 무렵에 최대를 나타내는 뚜렷한 일일 주기성을 보였다.

3. DAD 분석 및 모형

3.1. DAD 분석

강우는 유역면적의 전반에 걸쳐 균일하게 발생하는 경우는 극히 드물고, 강우의 중심을 형성하여 중심으로부터 멀어짐에 따라 강우량이 적어지는 것이 일반적인 현상이다. 또한 강우의 지속기간이 길어지면 총 강우량은 증가하나 강우강도는 지수적으로 감소하게 된다.⁷⁾

이러한 관계의 분석으로부터 각종 크기의 유역면적에 대한 여러 가지 지속기간을 가진 강우가 발생할 때 예상되는 지속기간별 최대 우량을 유역면적별로 결정해 두면 제반 수문학적 문제에 대한 해결에 대단히 유익하다.⁸⁾ DAD분석은 상이한 면적과 강우 지속기간에 대한 강우량의 분포를 나타내며, 지속기간별로 면적별 최대 평균강우량을 제공해 준다.

DAD분석은 어떤 지역에서 일어난 강우중 최대값을 선택하여 분석하는 것이 보통이며, WMO⁹⁾에서 제안한 그 일반적인 분석절차는 다음과 같다.

- ① 유역의 강우기록중 최대 강우량 자료를 택한다.
- ② 관측지점에 있어서 지속기간별 최대 강우량을 누적우량곡선에서 결정한다.
- ③ Thiessen 방법에 의하여 Thiessen 다각형을 구한다.
- ④ 강우자료에 대하여 등우선도를 작성한다.
- ⑤ 각 등우선 내의 면적을 구한다.
- ⑥ 각 등우선 구간에 대하여 평균 누적우량곡선을 구한다. 즉, 등우선 내에 포함되어 있는 관측소의 누적우량곡선을 Thiessen 다각형을 참조하여 각 관측소의 가중치를 구한 다음, 이 가중치를 곱하여 평균 누적우량곡선을 구한다.
- ⑦ 등우선 내의 면적을 점차적으로 합하면서 면적이 증가되는 데에 따른 평균 누적우량곡선을 구

한다.

⑧ 구한 면적별 평균 누적우량곡선으로부터 지속 기간에 따른 최대 강우량을 구한다.

⑨ 구한 면적별, 지속기간별 강우량을 반대수지 또는 전대수지에 지속기간을 매개변수로 하여 DAD 곡선을 그린다.

본 연구에서는 임진강 유역에 대한 DAD관계를 분석하기 위하여 1999년 7월 31일부터 8월 2일까지 임진강 유역 16개 지점(철원관측소 포함)의 기상청 AWS 시간별 강우자료로부터 지속기간 6시간, 12시간, 24시간, 48시간의 최대 강우량 등우선도를 Fig. 1과 Fig. 2 등과 같이 작성하였으며, 이로부터 지속 기간 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 6시간, 12시간, 24시간, 48시간에 대한 면적별 평균강우량을 산정하여 Figs. 3~5 등과 같은 DAD곡선을 작성하였다.

그러나 Fig. 1와 Fig. 2에서와 같이 강우의 진행 양상에 따라 강우 지속기간별 등우선도의 양상과 최대 강우의 발생지점이 달라지므로 비록 동일한 유역에서의 동일한 호우사상이지만 최대 강우량의 지속기간을 달리한 등우선도로부터 작성된 DAD곡선들은 그 관계가 다소 다르게 나타나고 있다. 이러한 결과는 임진강 유역에 있어서 하나의 일정한 관계의 DAD곡선을 분석하기 위하여 각기 다른 DAD 곡선을 Fig. 6과 같이 단순히 중첩시켜 분석하는 경우 짧은 지속기간의 평균강우량이 긴 지속기간의 평균강우량을 초과하는 모순을 초래하고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점의 해결방안의 하나로 Fig. 7과 같은 면적비(A/ΣA, A: 각 등우선내 면적, ΣA: 전체 유역면적)에 대한 유출용적(A×P)의 관계를 이용하고자 하였다. 즉, 동일한 강우 지속기간에 대하여 평균강우깊이(P)는 면적이 커짐

에 따라 작아지나 면적에 대한 유출용적(강우 총량)은 많아지게 된다. 또한 동일한 면적에 대해서 강우 지속기간이 길어지면 평균강우강도는 작아지나 유출용적은 역시 증가하게 된다. 이러한 관계로부터 각 지속기간별로 분석된 최소 면적비 및 최대 면적비에 대한 최대 유출용적을 직선으로 연결하고 각 지속기간별 직선사이의 평균강우량 자료들만 이용하여 Fig. 6보다 일관성 있는 Fig. 8의 DAD곡선을 분석할 수 있었다.

3.2. DAD모형 및 비교

본 연구에서는 Fig. 8에서와 같이 분석된 각 지속기간별 DAD곡선을 식(1)과 같은 수학적 모형으로 나타내고자 하였다. 또한 어떤 크기의 유역면적에 내린 강우의 평균강우량(면적강우량)은 우량계에 의해 측정되는 점우량과는 그 크기가 다르므로 해당 유역내의 우량계에 의하여 측정된 최대 점강우량으로부터 면적강우량을 산정할 수 있는 R-DAD(Revised DAD)모형을 식(2)와 같이 분석하고자 하였다.

$$P = e^{-aA+b} \quad (1)$$

$$P = P_M e^{-kA^*} \quad (2)$$

여기서, P는 면적이 A(km²)인 유역에 내린 일정 지속기간의 평균강우량(mm)이고, P_M은 유역내의 호우 중심지점에 내린 최대 점강우량(mm)이다.

본 연구에서는 임진강 유역에서 발생한 1999년 7월 31일부터 8월 2일까지의 호우에 대하여 각 강우 지속기간에 대한 식(1)의 DAD모형 및 식(2)의 R-DAD모형을 다중회귀분석으로부터 Table 2와 같은 계수를 유도하였으며, 여기서 R²은 결정계수이다.

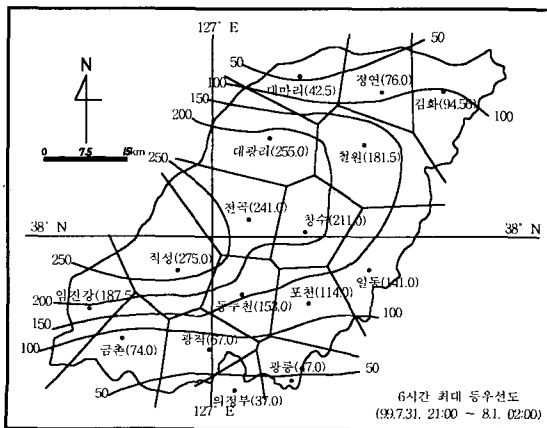


Fig. 1. Distribution of 6-hour maximum rainfall.

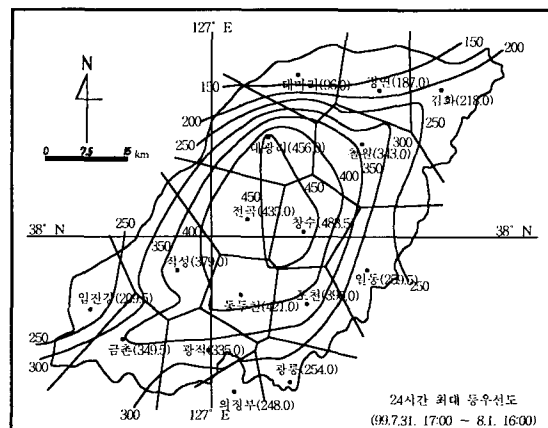


Fig. 2. Distribution of 24-hour maximum rainfall.

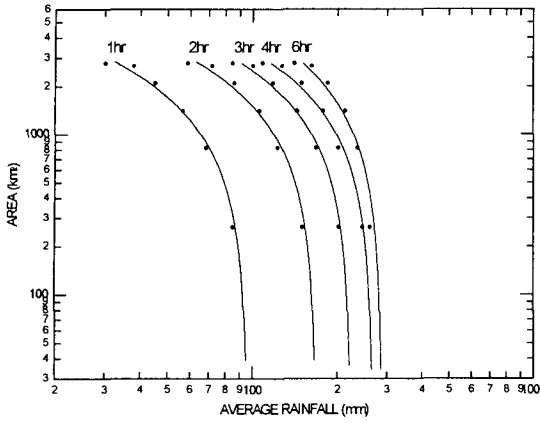


Fig. 3. DAD curves computed from 6-hour rainfall.

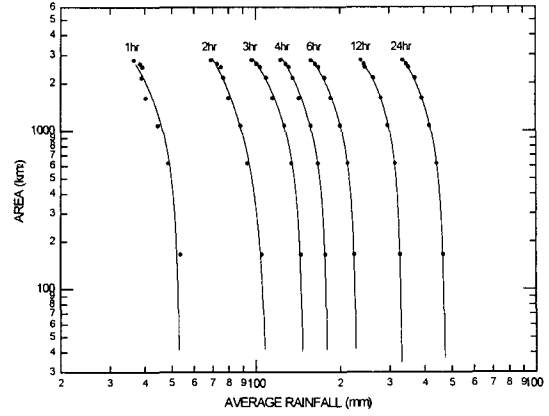


Fig. 4. DAD curves computed from 24-hour rainfall.

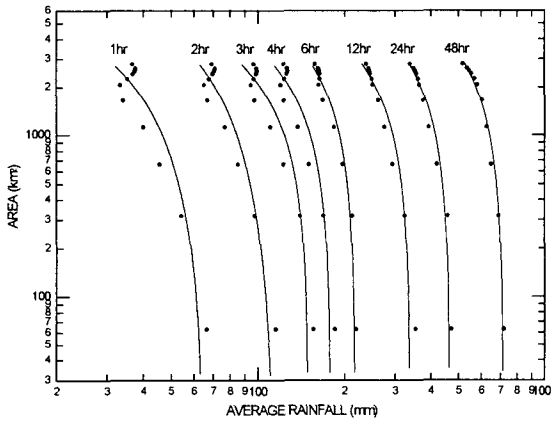


Fig. 5. DAD curves computed from 48-hour rainfall.

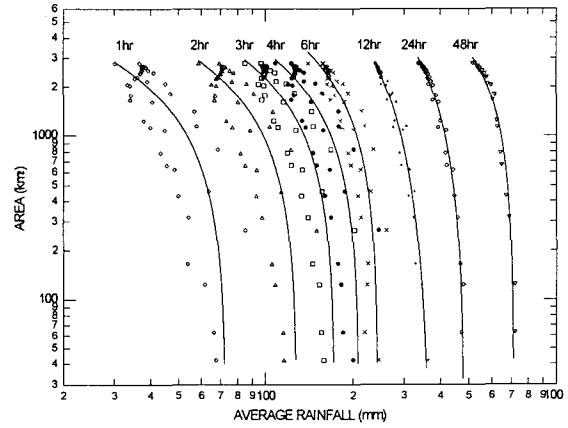


Fig. 6. DAD curves overlapped by each DAD curve.

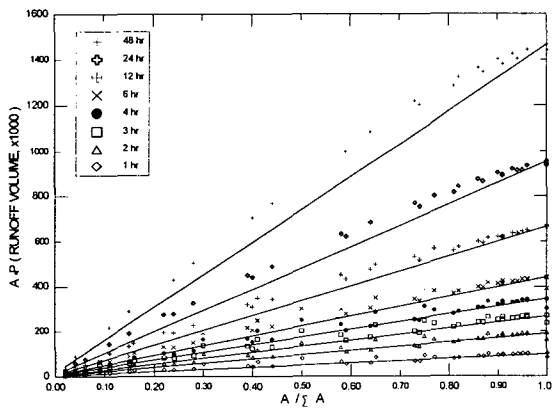


Fig. 7. Relation of area ratio and runoff volume.

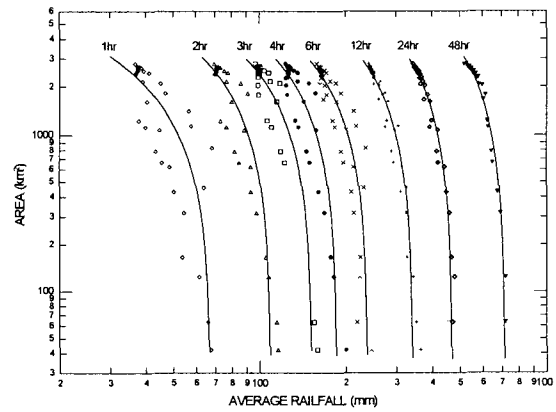


Fig. 8. DAD curves from area ration and runoff volume.

1999년 임진강 유역의 집중호우에 대한 DAD모형의 연구

Table 2의 결과를 식(1)과 (2)의 모형에 적용하여 임의의 강우 지속기간에 대한 면적강우량을 계산하여 비교 분석한 결과 Table 3 및 Fig. 9와 같았다. Table 3에서 임진강 유역의 DAD모형에 의한 면적강우량은 유역면적 50~3,000km²에서 강우 지속기간

1시간의 경우 66.7~31.0mm, 지속기간 6시간의 경우 237.2~148.0mm, 지속기간 24시간의 경우 467.3~328.0mm의 범위를 보이고 있으며, R-DAD모형에 의한 면적강우량은 강우 지속기간 1시간의 경우 67.3~38.3mm, 6시간의 경우 240.7~166.2mm, 24시간의 경우 478.9~339.2mm의 범위를 보이고 있다. 이러한 DAD모형 및 R-DAD모형에 의한 면적강우량은 Fig. 9에 도시된 바와 같이 비교적 잘 일치하고 있다.

또한 특정 강우지속기간에 대한 최대 점강우량으로부터 면적강우량을 환산하기 위한 관계곡선을 분석하여 Fig. 10과 같이 작성하였다. Fig. 10에서 최대 점강우량과 면적강우량과의 비율은 지속기간이 짧을수록 그리고 면적이 커질수록 지수적으로 감소함을 알 수 있으며, 임진강의 유역면적 3,000km²에 대한 면적강우량은 지속기간 1시간의 경우 최대 점강우량의 약 40%, 6시간의 경우 약 60%, 24시간의 경우 약 70%에 해당하는 것으로 분석되었다.

Table 2. Analysis result of DAD and R-DAD models

Duration (hour)	DAD			R-DAD		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²
1	0.00026	4.213	0.680	0.14329	0.232	0.654
2	0.00019	4.698	0.785	0.16114	0.207	0.907
3	0.00018	5.028	0.784	0.05902	0.221	0.939
4	0.00017	5.230	0.770	0.05623	0.220	0.891
6	0.00016	5.477	0.838	0.03734	0.325	0.731
12	0.00014	5.840	0.937	0.00250	0.652	0.928
24	0.00012	6.153	0.966	0.00122	0.712	0.953
48	0.00011	6.576	0.964	0.00126	0.964	0.975

Table 3. Comparison of area rainfall between DAD model and R-DAD model

(Unit: mm)

Area (km ²)	1hour(P _M =96.0)			6hour(P _M =275.0)			12hour(P _M =368.0)			24hour(P _M =488.5)			48hour(P _M =738.5)		
	DAD	R-DAD	Error (%)	DAD	R-DAD	Error (%)	DAD	R-DAD	Error (%)	DAD	R-DAD	Error (%)	DAD	R-DAD	Error (%)
50	66.7	67.3	0.9	237.2	240.7	1.5	341.4	356.4	4.4	467.3	478.9	2.5	713.7	724.6	1.5
100	65.8	63.3	-3.8	235.3	232.8	-1.1	339.0	349.9	3.2	464.5	472.9	1.8	709.8	716.1	0.9
200	64.1	58.8	-8.3	231.6	223.1	-3.7	334.3	340.0	1.7	459.0	463.3	0.9	702.0	702.6	0.1
500	59.3	52.4	-11.6	220.7	207.5	-6.0	320.5	318.7	-0.6	442.7	441.2	-0.3	679.3	672.2	-1.0
1000	52.1	47.1	-9.6	203.8	193.3	-5.2	298.9	293.6	-1.8	417.0	413.4	-0.9	642.9	634.2	-1.4
2000	40.2	41.6	3.5	173.6	176.8	1.8	259.8	258.0	-0.7	369.8	371.7	0.5	575.9	577.3	0.2
3000	31.0	38.3	23.5	148.0	166.2	12.3	225.9	231.8	2.6	328.0	339.2	3.4	515.9	532.9	3.3

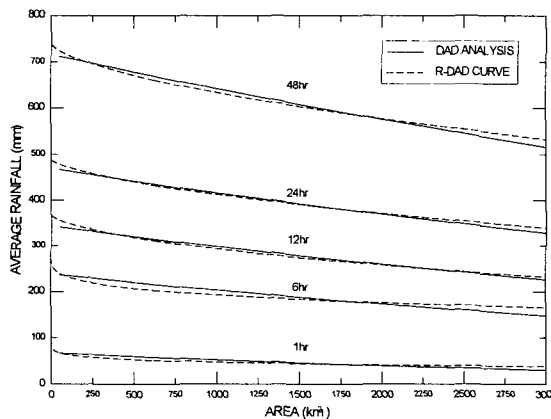


Fig. 9. Comparison of computed area rainfall between DAD model and R-DAD model.

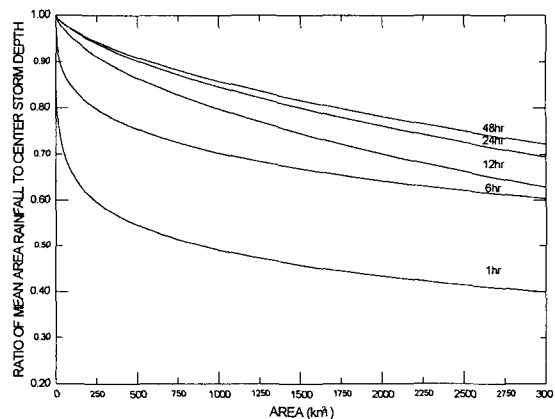


Fig. 10. Curves of converted area rainfall.

4. 결 론

홍수의 원인은 많은 양의 강우이다. 따라서 홍수의 방어를 위한 수공구조물의 계획 및 설계는 정확한 강우의 해석과 이해로부터 시작된다고 하겠으며, 특히 최대 강우사상에 대한 강우깊이-면적-지속기간의 관계는 그 기본이 된다고 하겠다.

본 연구는 강우에 대한 수문학적 연구의 일환으로 1999년 임진강 유역에 내린 집중호우에 대하여 여러 가지의 강우 지속기간에 대한 최대 강우량의 등우선도를 작성하여 DAD분석을 실시하였다. 그러나 DAD분석 결과 동일한 호우사상이지만 강우의 진행 양상과 이에 따른 최대 강우의 발생지점이 달라지는 관계로 짧은 지속기간의 면적 강우량이 긴 지속기간의 면적강우량을 초과하는 모순을 보였다. 따라서 본 연구에서는 이로부터 보다 합리적이고 일관된 DAD곡선을 유도하고자 면적비-유출용적의

기본관계를 이용하여 DAD곡선을 유도하였다. 또한 이러한 DAD곡선을 다중회귀분석을 통하여 수학적 모형으로 유도하였으며, 최대 점강우량으로부터 면적강우량을 쉽게 구할 수 있는 R-DAD모형 및 면적강우량 환산곡선도 분석하여 이를 도식적으로 이용할 수 있도록 면적강우량 환산곡선을 작성하였다. 본 연구에서 분석된 모형들은 비교적 좋은 상관관계를 보이고 있으며, 홍수방어시설이 미비한 임진강 유역에 있어서 향후 수공구조물의 계획과 설계에 많은 도움이 되리라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 세부과제 중규모 기상재해 저감 기반 기술 개발로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

- 1) 오재호, 김백조 등, 1999, 99년 집중호우의 강우 및 기상특성, 한국수자원학회지, 3(5), 24-37.
- 2) 한국건설기술연구원, 1999, 1999년 8월 임진강 유역 대홍수, 양서문화사.
- 3) Huff, F.A., 1968, Area-Depth Curve - A Useful Tool in Weather Modification Experimental, J.Appl. Meteorol., 7(5), 940-943.
- 4) Chow, V.T., et al., 1987, Applied Hydrology, McGraw-Hill.
- 5) Nicks, A.L., et al., 1980, A Depth-Area-Duration Model of Storm Rainfall in the Southern Great Plains, WRR, 16(5), 939-945.
- 6) Renard, K.G. and D.L. Brakensiek, 1976, Precipitation on Intermountain Rangeland in the Western United States, Paper Presented at the Fifth Workshop of USA/Australia Panel, Logan, Utah.
- 7) 선우중호, 1983, 수문학, 동명사.
- 8) 윤용남, 1988, 공업수문학, 청문각.
- 9) WMO, 1969, Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precipitation, WMO-No. 237, TP192.