

'99년 경기 중북부지방의 집중호우에 대한 강우특성 및 DAD 분석

○ 박상우¹⁾, 김백조²⁾, 김민규³⁾, 장석환⁴⁾, 오재호⁵⁾, 전병호⁶⁾

1. 서론

1999년 7월 31일부터 8월 4일까지 임진강 유역을 비롯한 경기 중북부지방에서는 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. 한반도의 집중호우는 장마전선 상에서 발달하는 중규모 요란, 태풍, 북태평양 고기압의 가장자리에서의 대기 불안정성 등의 요인에 의해 주로 발생하며, 수평규모는 100~200km, 지속시간은 2~3시간정도인 중규모 기상현상이다. 이러한 집중호우의 정확한 예측은 복잡한 지형에 의한 국지 대기순환의 영향과 주변 해양의 영향 때문에 매우 어려운 실정이나, 집중호우의 원인 규명 및 특성 파악에 관한 연구는 국내에서 매우 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 1999년 7월 31일에서 8월 2일까지 경기 중북부지방에서 발생한 집중호우에 대해 강우의 시, 공간적인 분포 특성 및 기상학적 특성을 알아보려고 하였으며, 특히 군사분계선 남쪽의 임진강유역에 대하여 강우깊이-면적-지속시간(DAD)에 대한 분석 및 그 관계식을 정립하고자 하였다.

2. 분석자료 및 호우현황

1999년 집중호우의 강우 특성을 알아보기 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. 그리고 기상청의 종관 일기도와 위성 및 레이더 영상자료를 사용하였다.

경기 중북부지방을 중심으로 남쪽의 열대기단과 북쪽의 한대기단으로 형성된 수렴대가 1999년 7월 31일에서 8월 2일까지 3일간 유지되면서 이 지역에 200~700mm의 비를 내렸다. 표 1에서처럼 최대 누가강우량은 경기 북부지방에 위치한 철원에서 752.9mm였고 그 다음으로 동두천의 724.9mm를 기록하였으며, 경기 남부지방의 양평에서 166.5mm로 이들 관측소 중 최소 누가강우량을 보였다. 이러한 누가강우량은 서울, 경기북부, 강원북부지방 등 호우지역의 연평균 강수량의 35~45%에 해당된다. 이처럼 이번 집중호우는 주로 경기 북부지방과 강원 영서북부지방을 중심으로 아주 제한된 지역에서 발생하였다.

7월 31일 이른 오전에 경기 북서부지방에서 시작한 집중호우는 점차 동쪽으로 진행하면서 7월

1) 서남대학교 토목공학과 부교수

2) 기상연구소 예보연구실 연구관

3) 새길 엔지니어링 수자원부 차장(공학박사)

4) 대진대학교 토목공학과 조교수

5) 기상연구소 예보연구실 실장

6) 육군사관학교 군사과학대학원 원장

31일 밤에는 시간당 최고 30~50mm의 강우량을 기록하였다. 1999년 집중호우는 경기북부와 강원 북부지방에 국한되었으나 집중호우를 동반한 수렴대는 남북으로 약간의 진동하면서 호우지역이 점차 넓어지는 경향을 보였다. 특히 호우가 내린 3일 동안의 강우 강도는 낮동안에 다소 약하였다가 밤부터 점차 강해져 새벽무렵에 최대를 나타내는 뚜렷한 일일 주기성을 보였다.

표 1. 집중호우기간(7. 31~8. 2)동안 서울·경기지방의 누가강우량

관측소	누가강우량	관측소	누가강우량	관측소	누가강우량
동두천	724.9mm	수원	207.7mm	철원	752.9mm
서울	471.3mm	강화	585.5mm	춘천	450.6mm
인천	482.7mm	양평	166.5mm	인계	459.0mm

3. 강우 특성

3.1 강우 강도

표 2는 집중호우기간동안 서울·경기지방의 최대 강우강도, 강우 지속기간 그리고 평균 강우강도를 나타낸 것이다. 여기서 평균 강우강도는 총 누가강우량을 강우 지속기간으로 나눈 것으로 정의하였다. 집중호우의 최대 강우강도는 시간당 48.5mm/hr (동두천, 강화)이며, 평균적으로 10~40mm/hr의 강우강도를 보였다.

표 2. 집중호우기간(7. 31~8. 2)동안 서울·경기지방의 강우강도 및 지속기간

분석요소 관측소	최대 강우강도	강우 지속기간	평균 강우강도
철원	42.6 mm/hr	72.0 hr	10.5 mm/hr
동두천	48.5 mm/hr	67.3 hr	10.8 mm/hr
서울	39.1 mm/hr	56.2 hr	8.4 mm/hr
인천	46.2 mm/hr	56.2 hr	8.0 mm/hr
강화	48.5 mm/hr	57.8 hr	10.1 mm/hr
양평	24.0 mm/hr	41.3 hr	4.0 mm/hr

3.2 강우의 공간분포

그림 1은 7월 31일부터 8월 2일까지의 일별 강우량 분포를 보인 것이다. 먼저 7월 31일의 경우를 살펴보면 200mm이상의 강우량이 경기 북부지방에서 나타났으며 강원 영서지방에서도

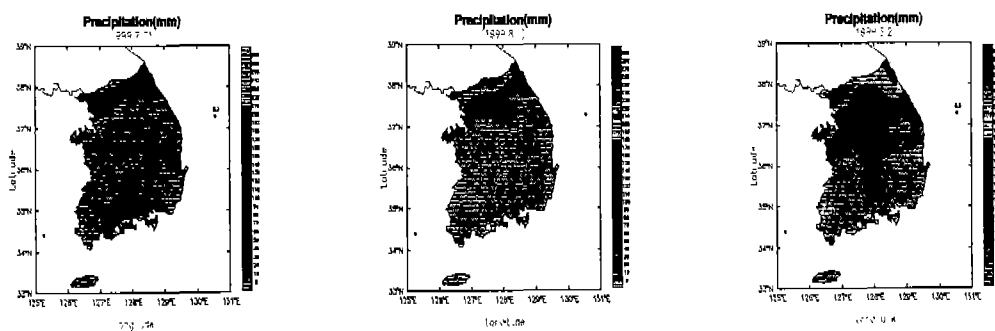


그림 1. 7월 31일부터 8월 2일까지 일별 강우량의 분포

50mm이상의 강우량을 보였다. 그리고 남부지방의 지리산부근에서는 10~30mm정도였다. 8월 1일에서는 철원, 춘천, 강화에서 강우량이 220mm을 기록하였으며 집중호우지역이 전날에 비해 확장되었지만 여전히 한반도 중부지방으로 제한되어 있다. 그 외 지역에서는 강우가 10mm 이내였다. 8월 2일의 경우 강우대가 다소 남하하여 200mm 이상의 호우지역이 서울과 태안반도, 경북내륙으로 이동하였다. 강우량이 100~200mm인 지역은 36° N이북지역에 널리 분포하고 있다.

4. DAD 분석과 관계식

4.1 DAD 분석

각종 크기의 유역면적에 대한 여러가지 지속시간을 가진 강우가 발생할 때 예상되는 지속시간별 최대 우량을 유역면적별로 결정해 두면 재반 수문학적 문제에 대한 해결에 대단히 유익하다. DAD해석은 상이한 면적과 강우 지속시간에 대한 강우량의 분포를 나타내며, 지속시간별로 면적별 최대 평균강우량을 제공해 준다.

본 연구에서는 임진강 유역에 대한 DAD관계를 얻기 위하여 1999년 7월 31일부터 8월 2일까지 임진강 유역 16개 지점의 기상청 AWS 시간별 강우자료로부터 지속시간 6시간, 12시간, 24시간,

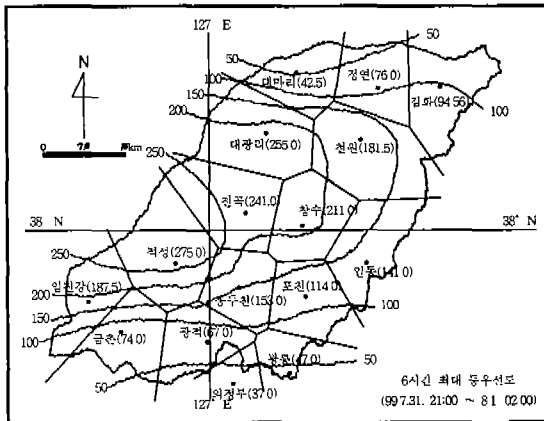


그림 2. 6시간 최대강우량 등우선도

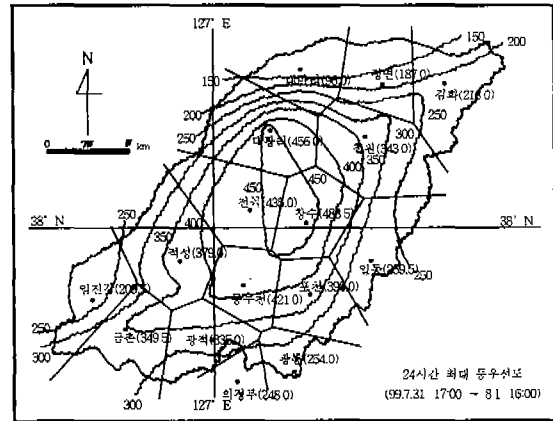


그림 3. 24시간 최대강우량 등우선도

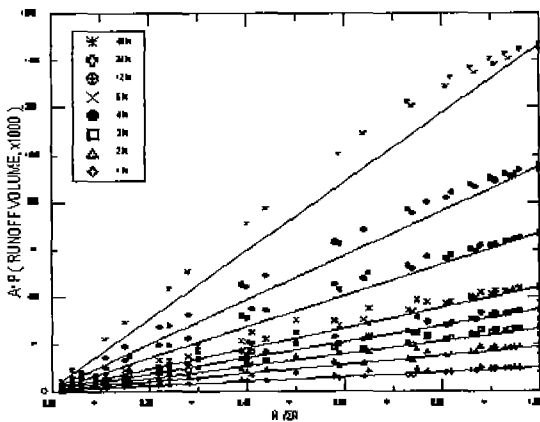


그림 4. 면적비-유출용적 관계도

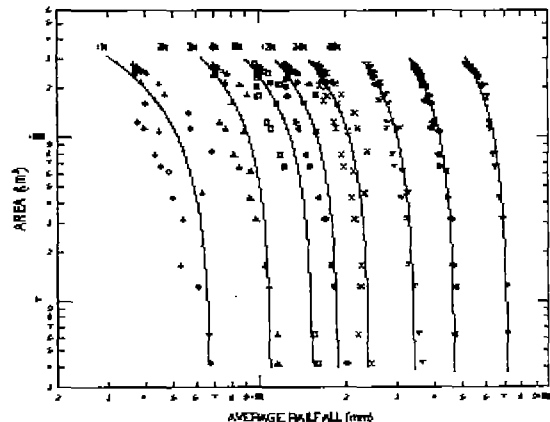


그림 5. DAD 곡선

48시간의 최대강우량 등우선도를 그림 2 및 3 등과 같이 작성하였으며, 이로부터 지속기간 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 6시간, 12시간, 24시간, 48시간에 대한 면적별 평균강우량을 산정하였다. 그러나 그림 2 및 3에서와 같이 강우의 진행양상에 따라 강우 지속기간별 등우선도의 양상과 최대강우의 발생지점이 달라지므로 일정한 관계의 DAD곡선을 분석하기가 매우 어려웠으며, 특히 짧은 지속기간의 평균강우량이 긴 지속기간의 평균강우량을 초과하는 모순된 곡선이 나타나는 경우도 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점의 해결방안의 하나로 그림 4와 같이 면적비(A/ΣA)에 대한 유출용적(A×P)을 대비시키고, 각 지속기간별로 분석된 최소면적비 및 최대면적비에 대한 최고유출용적을 직선으로 그어 각 직선사이의 평균강우량 자료들만 이용하여 그림 5와 같이 일괄된 DAD곡선을 분석하였다.

4.2 관계식 및 면적강우량

본 연구에서는 그림 5에서와 같이 분석된 각 지속기간별 DAD곡선을 식(1)과 같은 관계곡선식으로 나타내고자 하였다. 또한 어떤 크기의 유역면적에 내린 강우의 평균깊이는 우량계에 의해 측정되는 점우량과는 그 크기가 다르므로 해당 유역내의 우량계에 의하여 측정된 점강우량으로부터 면적강우량을 산정할 수 있는 관계식(R-DAD)을 식(2)와 같이 분석하고자 하였다.

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

$$P = P_M e^{-kA^n} \text{-----}(2)$$

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

본 연구에서 임진강 유역의 1999년 7월 31일부터 8월 2일까지 강우 지속기간에 대한 식(1)의 DAD 관계식 및 식(2)의 R-DAD 관계식을 분석한 결과 표 3과 같은 계수를 유도하였다. 표 3에서 지속기간이 길어질수록 좋은 결정계수(R²)를 보이고 있는데, 이는 여러개의 등우선도로부터 짧은 지속기간의 강우량-면적관계의 자료는 다양하고 많이 얻어지는 반면에 지속기간이 길어지면 그 수가 제한되기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. DAD 및 R-DAD 관계식의 계수 분석결과

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

그림 6은 특정 강우지속기간에 대한 최대 점강우량으로부터 면적강우량을 환산하기 위한 관계 곡선의 분석결과이다. 그리고 표 3의 결과를 식(1)과 (2)에 적용하여 임의의 강우 지속기간에 대한 면적강우량을 계산하여 비교 분석한 결과 표 4 및 그림 7과 같았다. 표 4에서 임진강 유역의 면적강우량은 강우 지속기간 1시간의 경우 유역면적 50km²의 66.7mm에서부터 유역면적 3,000km²의 31.0mm 정도의 범위를 보이고 있으며, 강우 지속기간 48시간의 경우에는 유역면적 50km²의 713.7mm에서 유역면적 3,000km²의 515.9mm 정도의 범위를 갖는 것으로 분석되었다.

표 4. DAD 및 R-DAD 관계식에 의한 면적강우량의 비교 (단위:mm)

지속 기간 (시간)	1시간(P _M =96.0)			6시간(P _M =275.0)			12시간(P _M =368.0)			24시간(P _M =488.5)			48시간(P _M =738.5)		
	DAD	R-DAD	오차(%)	DAD	R-DAD	오차(%)	DAD	R-DAD	오차(%)	DAD	R-DAD	오차(%)	DAD	R-DAD	오차(%)
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

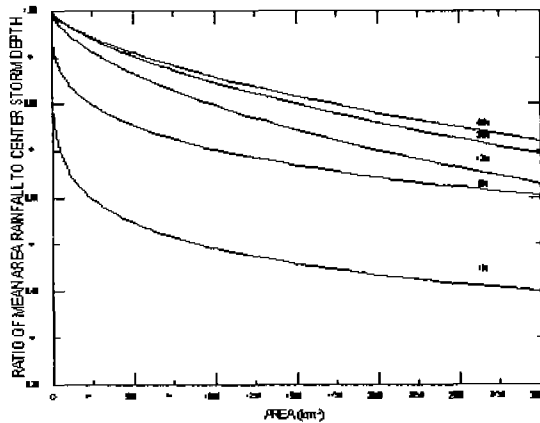


그림 6. 면적강우량 환산곡선

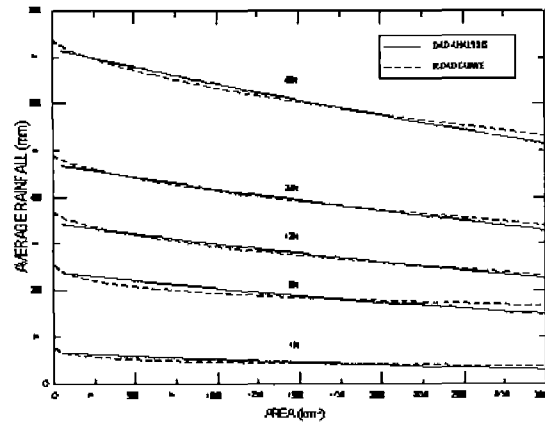


그림 7. DAD 및 R-DAD 관계식의 면적강우량 비교

5. 결론

1999년 7월 31일에서 8월 2일까지 3일 동안 서울, 경기 및 강원 북부지방을 중심으로 120~750mm의 집중호우가 발생하였다. 이번 집중호우에 대한 강우 및 기상특성을 조사하고, 임진강 유역에 대한 DAD 분석을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

경기 중북부지방을 중심으로 남쪽의 열대기단과 북쪽의 한대기단으로 형성된 수렴대가 1999년 7월 31일에서 8월 2일까지 3일간 유지되면서 철원에서 752.9mm의 최대 누가강우량이 기록되었으며, 최대 강우강도는 시간당 48.5mm/hr (동두천, 강화)이고 평균적으로 10~40mm/hr의 강우강도를 보였다. 이러한 누가 강우량은 서울, 경기북부, 강원북부지방 등 호우지역의 연평균 강수량의 35~45%에 해당된다. 특히 호우가 내린 3일 동안의 강우강도는 낮동안에 다소 약하였다가 밤부터

점차 강해져 새벽무렵에 최대를 나타내는 뚜렷한 일일 주기성을 보였다.

집중호우와 관련된 기상특성으로 호우 전에 점차 상층 Jet가 남하하면서 중부지방에서 경압성이 증가되고 상층 발산에 의한 하층에서 상승류가 발달되고 있었으며, 7월 31일 상층 기압골이 산동반도 부근의 열대 저압부와 연관하여 서해상에 정체·회전하면서 강한 수분과 에너지를 수송하였다. 집중호우 전부터 지속적으로 북태평양 고기압 가장자리에서 유입되었던 남서류와 합류(하층 제트)되어 중부지방으로 강하게 유입되었고, 유입된 수증기와 에너지가 상층 제트에 의해 형성된 상승류를 타고 오르면서 수증기가 중부지방에서 수렴되어 발생한 것으로 보인다. 한편, 태풍 올가가 북상하면서 중부지방에서 형성되었던 이러한 종관 상태를 약화시키면서 수렴대가 태풍의 밴드내로 합류되어 빠른 속도로 북상하여 중부 지방에서 집중호우는 종료된 것으로 사료된다.

임진강 유역의 DAD 분석은 여러가지의 지속기간에 대한 최대강우량 등우선도를 작성하고 이로부터 일관된 DAD 관계곡선을 유도하고자 면적비-유출용적 관계를 분석하여 합리적인 DAD 곡선을 정립할 수 있었다. 또한 DAD 곡선의 관계를 식으로 나타내었으며, 최대 점강우량으로 면적강우량을 환산할 수 있는 면적강우량 환산곡선 및 그 관계식을 분석하고 이 관계식으로부터 면적강우량을 계산하여 비교한 결과 비교적 만족한 값을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것이며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김성삼, 1973 : 우리나라 중부지방 대홍수의 기상조건에 대하여, 한국기상학회지, 9, 73-80.
박순용 등, 1986 : 호우의 종관적 특징분석, 한국기상학회지, 22(1), 42-81.
Kulkarni, A.K., et al., 1994 : A Study of heavy Rainfall of 8-10 June, 1991 over Maharashtra, India, AAS, Vol.11(3), 353-366.
Lee, D. K, 1993 : Numerical Simulation of Heavy Rainfall in Korea, Korea & Engineering Foundation (KOSEF 90-0700-09)
Nicks, A.L., et al., 1980 : A Depth-Area-Duration Model of Storm Rainfall in the Southern Great Plains, WRR, Vol.16(5), 939-945.
WMO, 1969 : Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precipitation, WMO-No.237, TP192.