

DAD 분석을 위한 자동 강우장 탐색기법의 개발 및 적용

Development and Application of Automatic Rainfall Field Tracking Methods for Depth-Area-Duration Analysis

김 연 수* / 송 미 연** / 이 기 하*** / 정 관 수****
Kim, Yeon Su / Song, Mi Yeon / Lee, Gi Ha / Jung, Kwan Sue

Abstract

This study aims to develop a rainfall field tracking method for depth-area-duration (DAD) analysis and assess whether the proposed tracking methods are able to properly estimate the maximum average areal rainfall (MAAR) within the study area during a rainfall period. We proposed three different rainfall field tracking algorithms (Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking) and then applied them to the virtual rainfall field with 1hr duration and also compared DAD curves of each method. In addition, we applied the three tracking methods and a traditional GIS-based tool to the typhoon 'Nari' rainfall event of the Yongdam-Dam watershed and then assess applicability of the proposed methods for DAD analysis. The results showed that Box-tracking was much faster than the other two tracking methods in terms of searching for the MAAR but it was impossible to describe rainfall spatial pattern during its tracking processes. On the other hand, both Point-tracking and Advanced point-tracking provided the MAAR by considering the spatial distribution of rainfall fields. In particular, Advanced point-tracking estimated the MAAR more accurately than Point-tracking in the virtual rainfall field, which has two rainfall centers with similar depths. The proposed automatic rainfall field tracking methods can be used as effective tools to analyze DAD relationship and also calculate areal reduction factor.

Keywords : DAD analysis, rainfall field tracking method, Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking

요 지

본 연구에서는 격자기반의 공간분포 강우장에서 호우지속기간동안 지속시간별 면적최대강우량을 산정할 수 있는 탐색기법을 개발하여 DAD 분석을 실시하고 그 적용성을 평가하고자 한다. 우선, 세 가지 탐색기법(Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking)의 알고리즘을 구성하고, 가상의 강우장(1 hr 지속시간)을 대상으로 각 탐색기법의 성능을 검증하였다. 다음으로 용담댐 유역의 실제 강우사상을 선택하여 개발된 탐색기법과 GIS를 이용한 고전적인 방법을 사용하여 DAD 분석을 실시하고 그 결과를 비교·분석하였다. Box-tracking의 경우, Point-tracking과 Advanced point-tracking에 비하여 상대적으로 빠른 검색이 가능하지만, 강우장의 공간분포 형태를 고려하지 못하여 타 탐색기법

* 교토대학교 수문 및 수자원연구소 연구원 (e-mail: yeonsu0517@gmail.com)
Researcher, Hydrology and Water Resources Research Laboratory, Kyoto University

** 충남대학교 국제수자원연구소 연구원(e-mail: mysong814@naver.com)
Researcher, IWRI, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*** 교신저자, 경북대학교 건설방재공학부 조교수 (e-mail: leegiha@knu.ac.kr)
Corresponding Author, Department of Construction and Disaster Prevention, Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea

**** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)
Professor, Dept. of Civil Eng., Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

에 비해 유역크기별 면적최대강우량이 과대 산정되었다. 반면, Point-tracking과 Advanced point-tracking은 강우장의 공간분포 형태를 적절하게 반영하여 면적최대강우량 산정이 가능하였으며, 특히 두개 이상의 호우중심이 존재할 경우 Advanced point-tracking은 Point-tracking보다 우수한 탐색성능을 보여주었다. 따라서 본 연구에서 제안하는 탐색기법은 DAD 분석 및 면적감소계수 계산을 위한 유용한 도구로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : DAD 분석, 강우장 탐색기법, Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking

1. 서론

최근 지구온난화로 인한 급격한 기후변화에 의해 집중 호우의 빈도 및 강도가 증가하여 홍수 및 산사태 등 자연 재해의 대형화가 현실로 나타나고 있으며(Kim, 2009), 실제로 기존의 설계빈도를 초과하는 국지성 집중호우로 인해 하천구조물, 하수관거, 사방시설물 등 방재시설물의 설계 시 사용되는 확률강우량의 적정성에 대해 재논의가 검토되고 있다(Kim et al., 2009).

일반적으로 강우는 어느 특정한 지점에서 우량계를 통하여 측정된 점 강우 자료를 시간별, 일별, 또는 월별, 년별 단위로 수집하여 다양한 수문학적 관점에 따라 해석이 가능하게 된다. 또한, 수문학적인 관점에서 호우의 평가는 단순히 점 강우량에 의한 것이 아니라 강우의 유역면적과 지속시간에 의하여 결정되므로 지상우량계에서 관측한 점 강우량을 적절한 방법으로 면적강우량으로 환산해야 한다(WMO, 1969).

특히, 하천구조물 설계를 위한 설계홍수량을 산정하기 위해서는 유역면적별 최대강수량의 산정이 필수적이며, 댐 등과 같은 대규모 시설물의 경우 가능최대강수량(probable maximum precipitation: PMP)을 결정해야 한다. 이러한 설계 대상유역의 최대강수량은 일반적으로 지점 강우량을 면적강우량으로 환산하는 강우깊이-면적-지속시간 관계(depth-area-duration: DAD)의 분석을 통하여

유도된다(Svensson and Jones, 2010).

수문학 교과서에서 소개되고 있는 Fig. 1과 같은 유역중심의 면적고정(fixed-area) DAD 분석방법은 유역내의 호우가 일정한 패턴으로 이동하거나 또는 이동이 없이 정체되어 있는 경우, 다량의 강우자료를 빠르게 해석할 수 있기 때문에 매우 간편하며 그 정확도를 보장할 수 있다. Kim and Won (2004)은 소유역내 강우의 공간적 변화가 크지 않은 전선형, 저기압성의 호우의 경우는 호우의 이동이 크지 않기 때문에 실제로 유역중심 DAD 분석방법이 적합한 방법인 반면, 태풍과 같이 호우이동이 뚜렷한 경우에는 기존의 유역중심 DAD 분석방법으로는 실제 호우특성을 반영한 DAD 작성이 어렵다고 지적한 바 있다. 이에 Kim and Won (2004)은 호우이동을 고려할 수 있는 DAD 분석방법을 제시하고 이를 기반으로 하는 DAD 해석 프로그램을 개발하였으며, 우리나라의 전국단위 호우분석을 수행하여 그 결과를 유역중심 DAD 분석결과와 비교·검토한 바 있다.

DAD 해석을 위해서는 기본적으로 대상유역 내·외 지점강우량 자료들의 내·외삽을 통해 공간분포형 강우장(spatially-distributed rainfall field)을 작성할 필요가 있으며, 일정 강우지속시간동안 강우장 시계열(rainfall field time series)을 누적하여 도시함으로써 시간별 최대강우량이 위치한 유역의 시각화 등, 호우의 이동을 파악할 수 있다. 또한, 이러한 호우의 이동을 반영한 유역면적별 면적최대강우량(maximum areal average rainfall: MAAR)

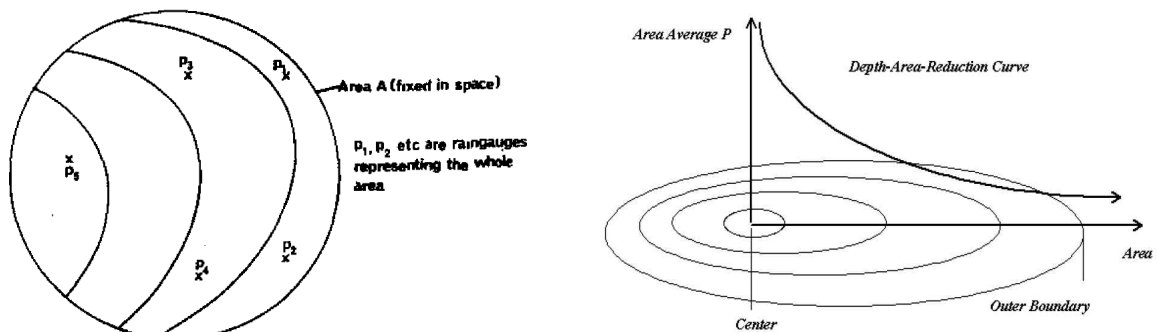


Fig. 1. Typical fixed-area DAD analysis (Bell, 1976 and Guo, 2012)

을 강우지속시간별로 도시함으로써 유역중심의 DAD 분석이 아닌 호우중심의 DAD 분석이 가능하다(Guo, 2012).

최근 분포형 수문모형(distributed hydrologic model)이 개발 보급됨으로써 점 강우량을 공간분포형 강우장으로 내·외삽 하는 방법에 대한 연구(Lee et al., 2012)가 활발히 진행되고 있을 뿐만 아니라 레이더를 이용한 강우 측정 기술의 발달로 격자 기반의 레이더 자료의 활용이 가능해짐에 따라 공간분포형 강우자료를 사용한 강우 분석 기술에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다. 국외의 경우 2000년대 초반부터 Durrans et al. (2002)과 Tarun (2005)에 의해 레이더 강우자료를 이용하여 DAD 해석을 실시하는 기법들이 소개되었으며, Arizona주 수자원국에서는 DAD 분석 및 PMP 산정을 위한 ArcGIS기반의 프로그램(ADWR, 2013)을 개발하여 매뉴얼을 배포하고 있는 반면, 국내의 경우 이러한 격자기반의 공간분포 강우장을 활용하여 호우중심의 DAD 분석을 실시한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 호우의 이동과 형태를 고려하지 못하는 기존의 유역중심 DAD 분석기법을 보완하고자 격자기반의 강우장 시계열을 입력자료로 하여 호우지속시간 동안 지속시간별 면적최대강우량을 산정할 수 있는 자동 탐색기법을 개발하여 호우중심 DAD 분석을 실시하고, 그 적용성을 평가한다. 2장에서는 세 가지 강우장 자동 탐색기법(Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking)의 알고리즘을 소개하고, 지속시간 1시간의 가상 강우장(virtual rainfall field)을 대한 각 탐색기법의 DAD 분석결과를 3장에 정리하였다. 또한 4장에서는 용담댐 상류유역을 대상으로 실제 강우사상을 선택하여 개발된 탐색기법과 GIS를 이용한 고전적인 방법(유역중심 DAD 분석기법)을 사용하여 DAD 분석을 실시하고, 그 결과를 비교·분석하였다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 중요 연구결과를 요약하고, 향후연구에 대하여 기술하였다.

2. DAD 해석을 위한 자동 강우장 탐색기법의 개발

강우는 호우사상의 지속시간동안 시·공간적으로 계속적으로 변화하므로 이러한 강우의 시·공간적 변동성을 고려할 수 있는 DAD 분석기법이 요구된다. 그러나 전술한 바와 같이 기존의 유역중심 DAD 분석의 경우, 지속시간이 증가함에 따라 호우의 이동성향이 완전히 달라지거나 호우이동이 완전한 이동성 호우의 경우 DAD 분석결과에 상당한 오차를 포함할 수 있다(Kim and Won, 2004).

따라서 본 연구에서는 기존의 유역중심 DAD 분석기법의 단점을 보완하고자 GIS기반의 자동 강우장 탐색기법을

이용하여 지속시간별 유역면적별 최대강우량을 산정하고, DAD 곡선을 작성한다. 이상의 자동 강우장 탐색기법은 Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking으로 구별되며, 세 기법 모두 격자기반의 강우장 시계열을 입력 자료로 하여 특정 지속시간 및 면적별 최대강우량 정보를 제공해주며 이를 기반으로 DAD 분석을 실시하게 된다. 또한 각 탐색기법은 강우장 시계열 전반에 걸쳐 호우의 총 지속시간에서 도출될 수 있는 모든 지속시간에 대한 MAAR를 산정할 수 있도록 Eq. (1)과 같이 sub-duration의 개념을 도입하였다.

$$S=1, 2, \dots, L-D+1 \quad (1)$$

Eq. (1)과 같이 강우의 총 지속시간 중에 생성될 수 있는 강우 지속시간은 $L-D+1$ 개의 sub-duration을 가지고 있으며, 이 식에서 L 은 호우의 총 지속시간(event period), D 는 임의의 지속시간(duration), S 는 생성 가능한 sub-duration 개수를 의미한다. 예를 들어 호우가 10월 1일 1시에서 10월 1일 6시까지 측정되었을 경우, 강우의 총 지속시간은 5시간이며, 총 지속시간동안에 고려할 수 있는 강우의 지속시간은 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간까지 총 5개로 구분될 수 있고, 그 지속시간은 Fig. 2에서 제시한 것처럼 다수의 sub-duration을 갖게 된다. Fig. 2(a)에서 5시간의 총 강우 지속시간 중 분석대상 지속시간이 3시간일 경우, sub-duration 1 (1~4 am), sub-duration 2 (2~5 am), sub-duration 3 (3~6 am)의 총 3개의 sub-duration ($S=3$)을 갖게 되며, Fig. 2(b)에서 지속시간이 4시간일 경우는 sub-duration 1 (1~5 am), sub-duration 2 (2~6 am)의 총 2개의 sub-duration ($S=2$)을 갖게 된다.

2.1 Box-tracking

Box-tracking은 Fig. 3과 같이 대상유역에 해당하는 격자기반의 강우장의 시간에 따른 변화를 고려하여 유역 전반에 걸쳐 격자크기를 확대·탐색하면서 유역면적별 지속시간별 MAAR을 추적하는 기법이다. 여기서 강우장내의 각 격자의 강우 값은 지구통계학적 내삽법(geo-statistical interpolation)을 이용하여 지점우량계의 강우정보로부터 내삽된 값이다.

Fig. 3과 같이 Box-tracking의 추적절차를 살펴보면, 먼저 강우의 총 지속시간 중에서 지속시간 1시간에 대하여 한 개의 격자크기(1×1 box)를 유역전체 강우장 시계열에 대하여 탐색하여 1×1 box의 면적에 해당하는 MAAR을 찾는다. 여기서, 내삽을 통해 생성된 강우장의 격자크기가 1×1 km일 경우 1×1 box는 최소 면적단위인 1 km^2 을 갖게 된다.

Fig. 3(a)와 같이 강우장 시계열에 대한 탐색이 총 지속 시간에 걸쳐 수행되어 지속시간 1시간에 대한 MAAR 값은 강우장 시계열 sub-duration 30에서 발견되었으며, 이 정보를 1 km^2 구역면적에 대한 지속시간 1시간에 대한 MAAR 값으로 저장하게 된다. 1×1 box에 대한 탐색이 완료되면 격자크기를 2×2 box로 증가시켜 탐색을 수행하여 2×2 box(면적: 4 km^2)에 해당하는 MAAR을 찾게 되고, Fig. 3(b)와 같이 2×2 box의 MAAR은 sub-duration 31에서 검색된 것을 확인할 수 있다. 이는 호우가 이

동함에 따라 최대강우량을 갖는 구역의 위치가 변화함을 의미하며, Box-tracking을 이용한 DAD 분석은 호우의 이동을 고려할 수 있음을 의미한다.

이와 같이 1×1 box부터 $N \times N$ box까지 격자크기를 늘려가면서 MAAR의 탐색을 실시하고, 지속시간 1시간에 대한 1×1 box부터 $N \times N$ box까지의 검색이 완료되면 지속시간 2시간, 3시간, ..., T시간까지의 모든 지속시간에 대해 탐색이 실시되며, 강우 지속시간 내의 각각의 sub-duration에 대한 탐색과정을 완료하면 일련의 DAD 관계 곡선을 작도할 수 있다.

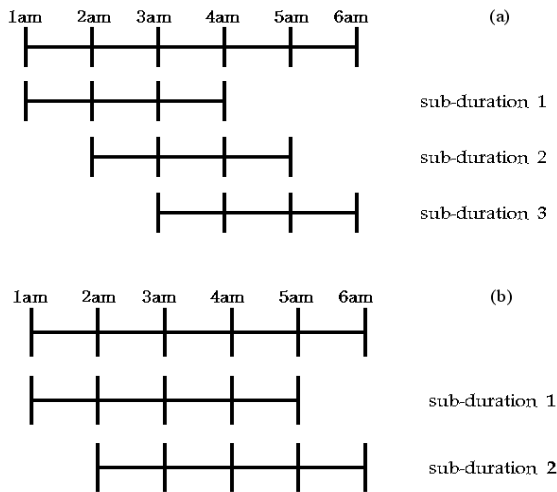


Fig. 2. Schematic Diagram of Sub-duration Concept

2.2 Point-tracking

Point-tracking은 정방형 형태(rectangular shape)로 구역면적을 증가시키는 Box-tracking과 달리 최대강우값을 갖는 호우중심을 기점으로 주위 격자들의 강우량 값들을 탐색하면서 좀 더 세밀한 형태로 MAAR을 탐색한다.

Point-tracking의 절차를 살펴보면, Fig. 4(a)와 같이 Box-tracking과 동일하게 먼저 지속시간 1시간에 대한 1×1 크기의 격자에서의 MAAR을 강우장 전체에 걸쳐 검색한다. 그 다음 단계에서는 Box-tracking이 box 크기를 정방형 형태로 증가시킨 후 강우장 전체에 대해 재탐색을 실시하는 반면, Point-tracking은 1×1 크기에서 MAAR이 검색된 격자(sub-duration 1)를 지점(point)으로 하여 면적을 증가시키면서 탐색을 하게 된다. 다만, 이와 같이

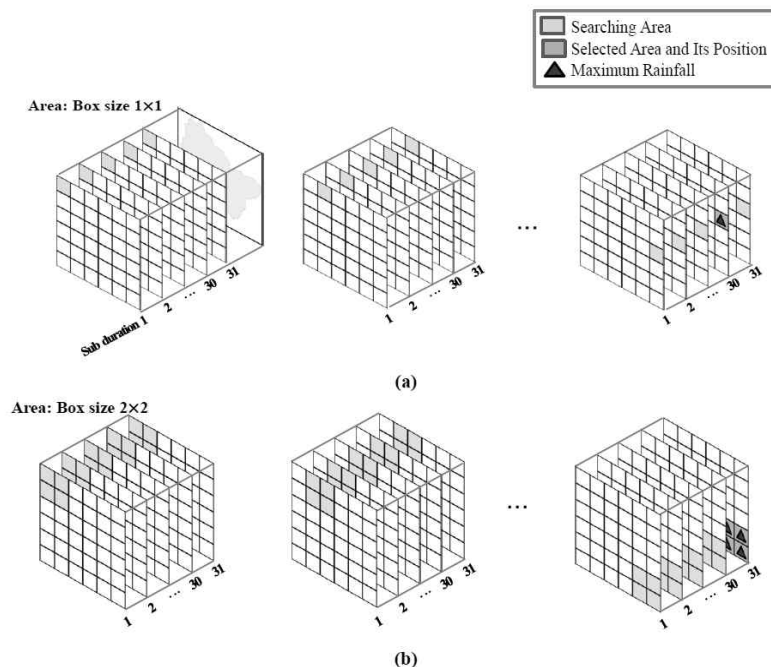


Fig. 3. Box-tracking Algorithm

결정된 지점은 강우 총 지속시간 동안의 모든 강우장에 대해 동일하게 적용하는 것으로 가정한다.

즉, Fig. 4(a)와 같이 1×1 MAAR 지점에 해당하는 격자를 기준으로 수직(위, 아래) 및 수평(오른쪽, 왼쪽)으로 확대(1×2: 2km² 또는 2×1: 2km²)된 면적을 강우 총 지속시간 동안 탐색하여 Figs. 4(b) and (c)에 묘사된 바와 같이 증가된 면적에 대한 MAAR (sub-duration 30)을 찾는다. 이와 같은 방법으로 격자를 한 개씩 증가시켜 면적을 증가시키고, 이에 대한 MAAR을 유역전반에 걸친 강우장에 대해 반복적으로 계산하게 된다.

이와 같은 탐색과정은 지속시간 1시간에 대한 탐색이 완료된 후, 지속시간 2시간, 3시간, ..., T시간까지 강우 총 지속시간에 대하여 반복적으로 Point-tracking이 시행되어 대상 호우사상에 대한 DAD 정보를 획득할 수 있다.

2.3 Advanced point-tracking

Advanced point-tracking은 강우의 총 지속시간에 대해 강우장 시계열 중 시·공간적으로 최대값을 갖는 격자

를 선별하고, 이를 호우중심으로 가정하여 MAAR를 제공하는 Box-tracking과 Point-tracking과 달리, 강우장에 그 크기가 근사한 두 개 이상의 호우중심이 발생할 경우 이를 고려할 수 있도록 Point-tracking을 보완한 기법이다.

Advanced point-tracking의 탐색절차는 다음과 같은 몇 가지 조건을 사용하여 두 개 이상의 호우중심 위치를 지정한다. 1) 호우중심이 되는 격자는 특정 지속시간에서 전체 강우장의 평균 이상의 값을 갖고 있어야 하며, 2) 호우중심 사이는 호우별로 결정되는 최소거리 이상을 유지하여야 한다. 이상의 조건을 만족하는 격자들은 호우중심이 될 가능성이 높다고 가정하고, 다수의 지점(points)으로 부터 Point-tracking을 실행한다. Fig. 5는 Advanced point-tracking을 이용하여 호우중심을 탐색하는 과정을 나타내고 있으며, 주요 절차는 다음과 같다.

- 1) 분석대상 지속시간의 sub-duration별 강우장 전체 평균 값 계산(Fig. 5(a))
- 2) 평균 강우 이상의 크기를 갖는 격자를 선택
- 3) 선택된 격자에서 격자에 인접한 8개의 격자와의 경

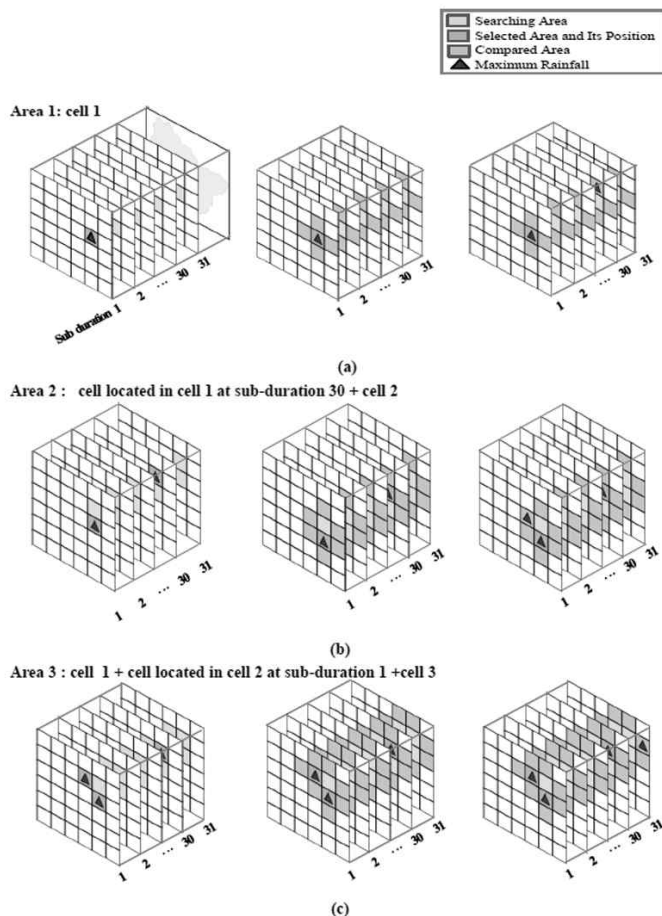


Fig. 4. Point-tracking algorithm

사를 비교하여 경사가 0보다 작은 격자 제거(음의 경사를 갖는 인접격자 제거)(Fig. 5(b))

- 4) 3단계까지 탐색된 격자 중 격자사이의 거리가 최소 거리(minimum distance, 본 연구에서는 5 km로 결정)보다 작은 격자를 제거(Fig. 5(c))
- 5) 4단계까지 필터링된 격자를 강우크기에 따라 내림차순으로 배열하여 최상위 3개의 격자 선택
- 6) 선택된 최종 3개의 격자를 지점으로 Point-tracking을 동시에 수행
- 7) Point-tracking에서 탐색된 면적별 강우 중 가장 큰 값을 갖는 경우 MAAR로 지정

이상의 탐색과정을 강우의 총 지속시간에 대하여 반복하여 대상 호우사상에 대한 지속시간별 DAD 정보를 획득할 수 있다.

3. 가상 강우장을 이용한 탐색기법 성능 비교·분석

2장의 세 가지 강우장 탐색기법의 실제 적용에 앞서, Fig. 6과 같은 두 개의 호우중심을 갖는 지속시간 1시간을 갖는 가상의 강우장(격자해상도: 1×1 km)을 생성하고, 각 기법별 탐색 성능을 검토하였다. Fig. 6의 가상 강우장의 호우중심 A 격자와 B 격자는 각각 12 mm, 13 mm의 강우 값을 갖으며, 두 호우중심 사이의 거리는 24 km이다.

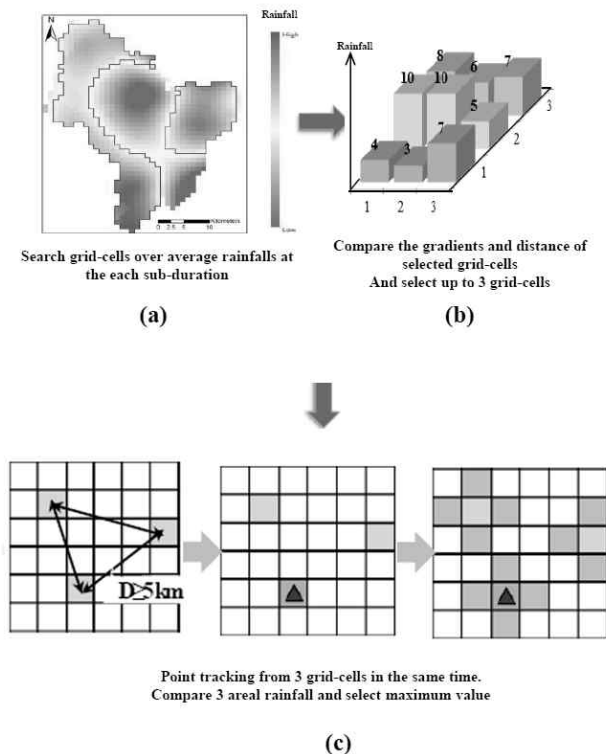


Fig. 5. Advanced Point-tracking Algorithm

또한, 두 지점강우량을 이용한 유역내 강우장의 공간분포는 Eq. (2)와 같은 역거리법(inverse distance method)을 이용하여 생성하였다.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n P_i d_i^{-m}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-m}} \quad (2)$$

여기서, P_x 는 강수량, d_i 는 관측소 좌표 i 까지의 거리, P_i 는 관측소에서의 강수량, m 은 가중치, n 은 추정을 위해 사용된 자료의 총 개수를 나타낸다. Eq. (2)와 같이 역거리법은 거리에 따라 비선형적으로 변화하는 경증률을 계산하여 강우의 공간분포도를 나타내는 방법이다.

3.1 Box-tracking의 탐색결과

가상 강우장에 대한 Box-tracking 검색 결과는 Fig. 7과 같다. 1×1 box 검색 결과, MAAR은 12 mm의 A 격자보다 1 mm 큰 B (13 mm) 격자에서 정확하게 검색되었고, box 크기를 2×2에서 8×8까지 증가시킨 box 검색결과는 B 격자를 포함한 영역에서 MAAR이 검색되었다. 그러나 box 크기를 9×9에서 한 단계씩 늘려가며 검색을 한 결과, 24×24까지 MAAR은 A 격자를 포함하는 영역에서 검색되었다. 또한 25×25 이상의 box에서의 MAAR은 두 호우중심을 모두 포함하는 것으로 분석되었다. 여기서, box안의

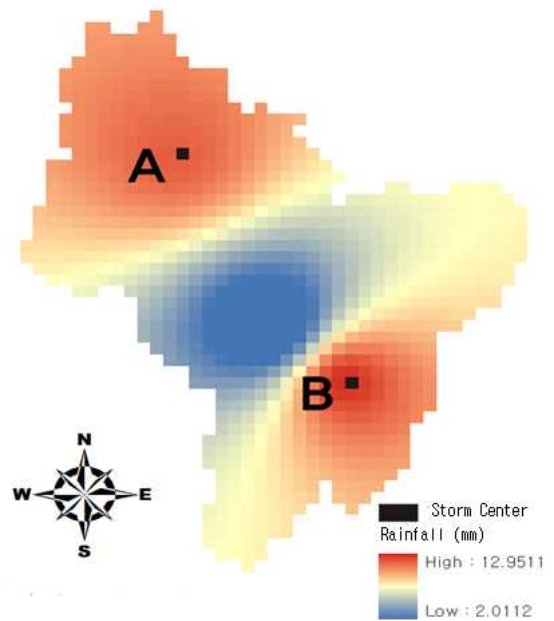


Fig. 6. Virtual Rainfall Field Generated by Inverse Distance Method Based on 2 Storm Centers

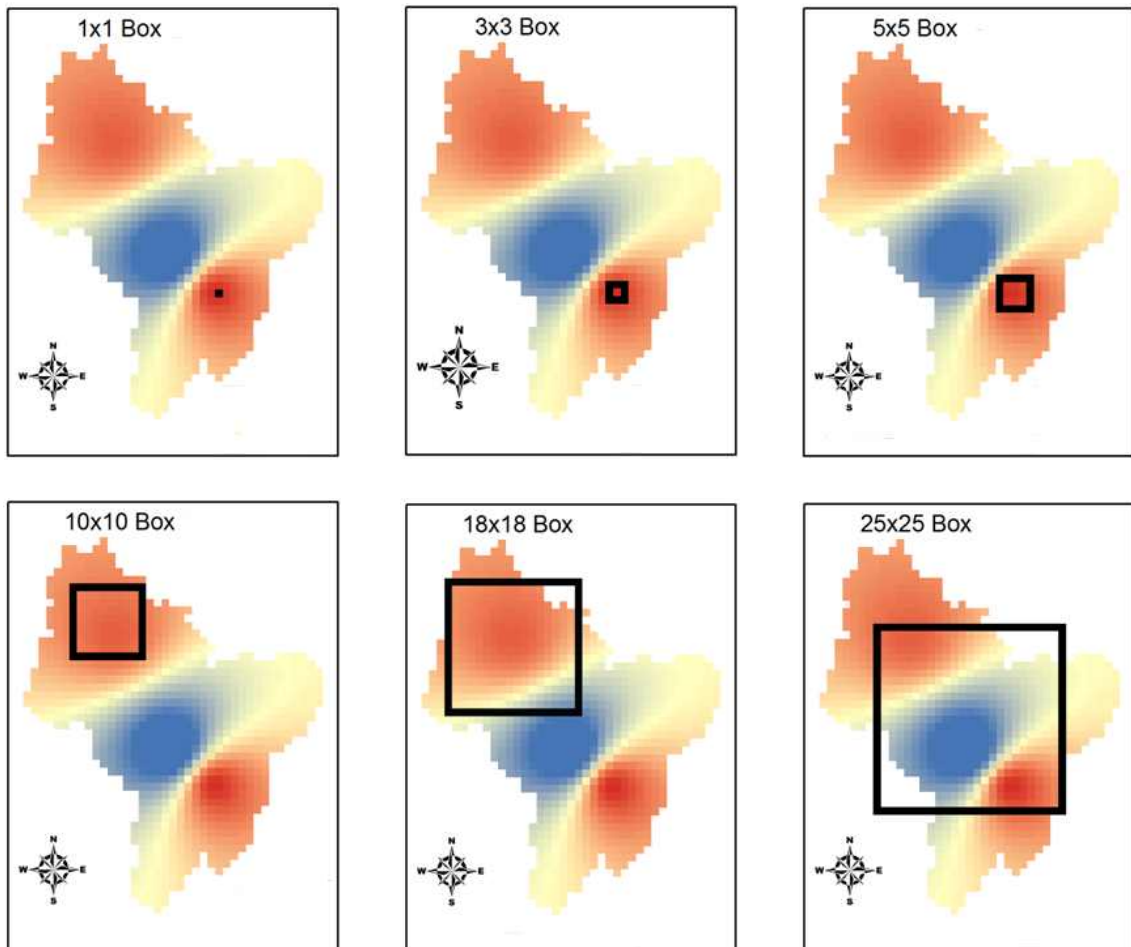


Fig. 7. Box-tracking Results on the Virtual Rainfall Field

유역경계를 벗어난 지역의 강우는 모두 0의 값을 갖는다.

Box-tracking은 유역면적을 정방형 형태만을 사용하여 탐색을 실시하므로 정확한 호우의 형태는 고려하지 못하지만, 호우의 총 지속시간에 대한 강우장 시계열을 면적별로 탐색하기 때문에 매우 빠른 계산시간 내에 대상 호우에 대한 DAD 정보를 제공해줄 수 있다.

3.2 Point-tracking의 탐색결과

가상 강우장에 대한 Point-tracking 검색 결과는 Fig. 8과 같다. Point-tracking에서 1×1 격자에 대한 MAAR 지점은 Box-tracking의 1×1 box 탐색결과와 마찬가지로 B 격자에서 정확하게 탐색되었으며, 이후 Point-tracking 알고리즘에 의해 인접격자와의 비교를 통해 유역면적이 정방형 형태가 아닌 강우의 공간분포 형태와 유사하게 묘사하면서 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 7 and 8의 유역면적별 MAAR 탐색과정을 비교해보면, Point-tracking은 Box-tracking에 비해 보다 유

연하게 유역전반에 걸친 호우의 형태를 묘사할 수 있으며, 유역면적이 증가할수록 두 기법의 MAAR크기의 변동성이 커질 수 있음을 추측해 볼 수 있다. 하지만 이미 지적한 바와 같이 가상 강우장의 호우중심 A와 B를 동시에 고려하지 못하고 강우 값이 가장 크게 측정된 호우중심 B 격자를 지점으로 하여 MAAR 검색을 실시하여 Fig. 8의 400 point 이상의 경우와 같이 유역면적 크기가 또 다른 호우중심 A 격자에 근접하여 확대될 경우 비로소 A 격자를 포함하여 MAAR을 탐색하는 것으로 분석되었다.

3.3 Advanced point-tracking의 탐색결과

가상 강우장에 대한 Advanced point-tracking 검색 결과는 Fig. 9와 같다. Advanced point-tracking 역시 Box-tracking 및 Point-tracking과 마찬가지로 1×1 격자에 대한 MAAR 지점은 B 격자에서 정확하게 탐색되었다.

그러나 Advanced point-tracking의 경우 Fig. 8의 Point-tracking 탐색결과와 마찬가지로 격자 개수가 50개에 해

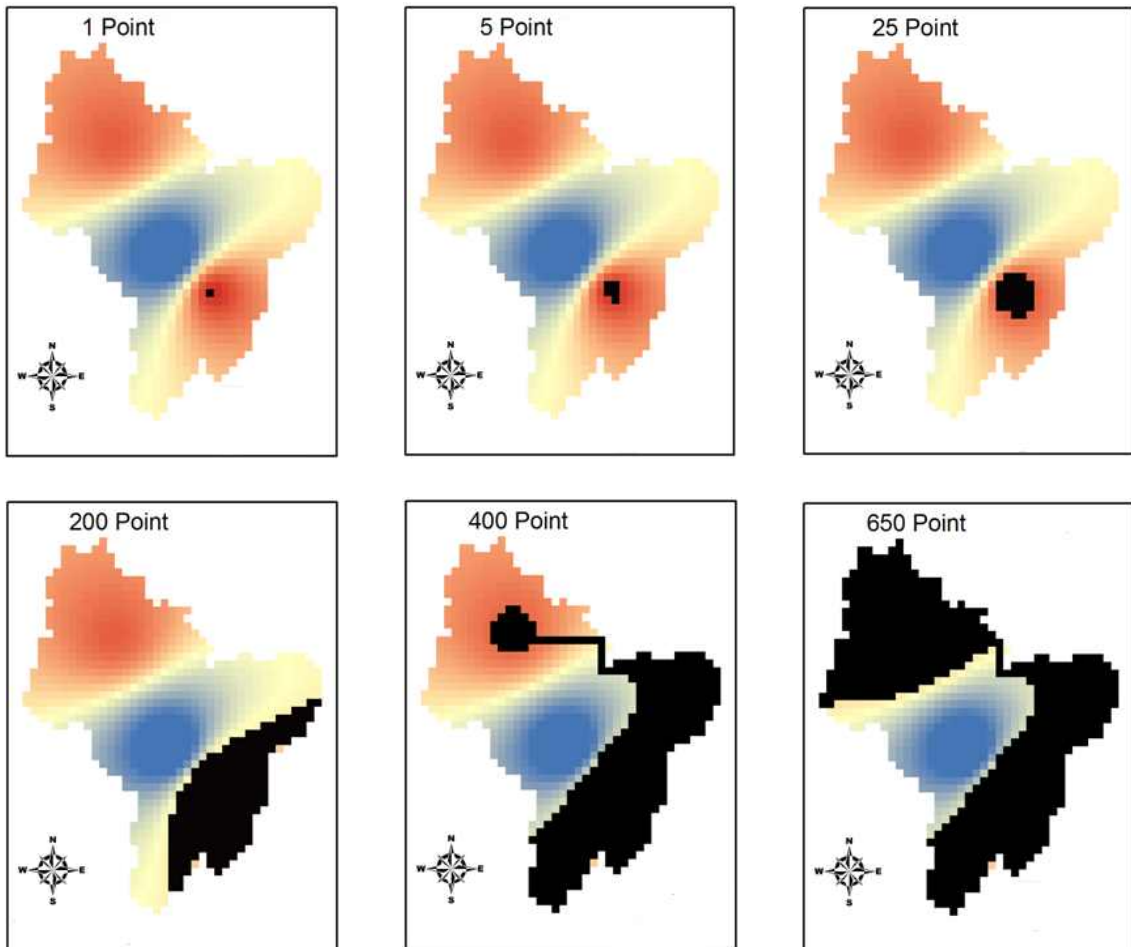


Fig. 8. Point-tracking Results on the Virtual Rainfall Field

당하는 면적까지는 B 격자를 포함하여 MAAR를 검색하였으나, Fig. 9와 같이 격자개수가 78, 100, 150으로 확대되면서 MAAR은 A점을 포함하는 것으로 검색되었다. Fig. 7의 Box-tracking 결과에서도 box 크기가 10×10 이상이 되면서 MAAR이 검색되는 것을 확인할 수 있다.

실제로 box의 크기가 100 km^2 (10×10)에 해당하는 유역면적의 경우는 B 지점보다 A 지점을 포함하는 강우장의 MAAR의 값이 크다. 즉, Advanced point-tracking은 두 개 이상의 호우중심을 고려함으로써 한 개의 호우중심을 대상으로 MAAR 정보를 제공하는 Point-tracking의 단점을 보완하고, Box-tracking에 비해 강우의 공간분포를 보다 상세하게 묘사할 수 있다. 다만, 대상유역의 호우중심이 뚜렷하거나 유역전반에 걸쳐 강우분포가 유사한 전선형 강우장의 경우 Box-tracking, Point-tracking 및 Average point-tracking 모두 비슷한 탐색결과를 제공할 수 있음을 유추해볼 수 있다.

3.4 가상 강우장에 대한 DAD 분석결과

Figs. 7~9와 같이 탐색된 각 기법에 대한 면적별 MAAR 정보를 이용하여 Fig. 10과 같이 지속시간 1시간에 대한 DAD 곡선을 도시하였다.

세 기법별 DA 곡선을 비교해보면, Box-tracking의 MAAR은 유역면적이 증가함에 따라 Point-tracking 및 Advanced point-tracking에 비해 현저하게 작은 강우 값을 나타내고 있다. 이는 Box-tracking이 유역면적을 정방형 형태만을 고려하여 강우장을 탐색하기 때문이며, 이러한 Box-tracking의 MAAR 과소산정 결과는 유역면적이 커질수록 심화된다. Fig. 10에서 Box-tracking의 경우 유역면적 49 km^2 까지는 타 기법과 비슷한 수준의 MAAR을 제공하고 있지만, 361 km^2 을 초과하면서 MAAR이 타 기법에 비해 급감하는 것을 확인할 수 있다.

반면에 Point-tracking 및 Advanced point-tracking은 동일한 유역면적일지라도 인접격자와의 비교를 통해 여러

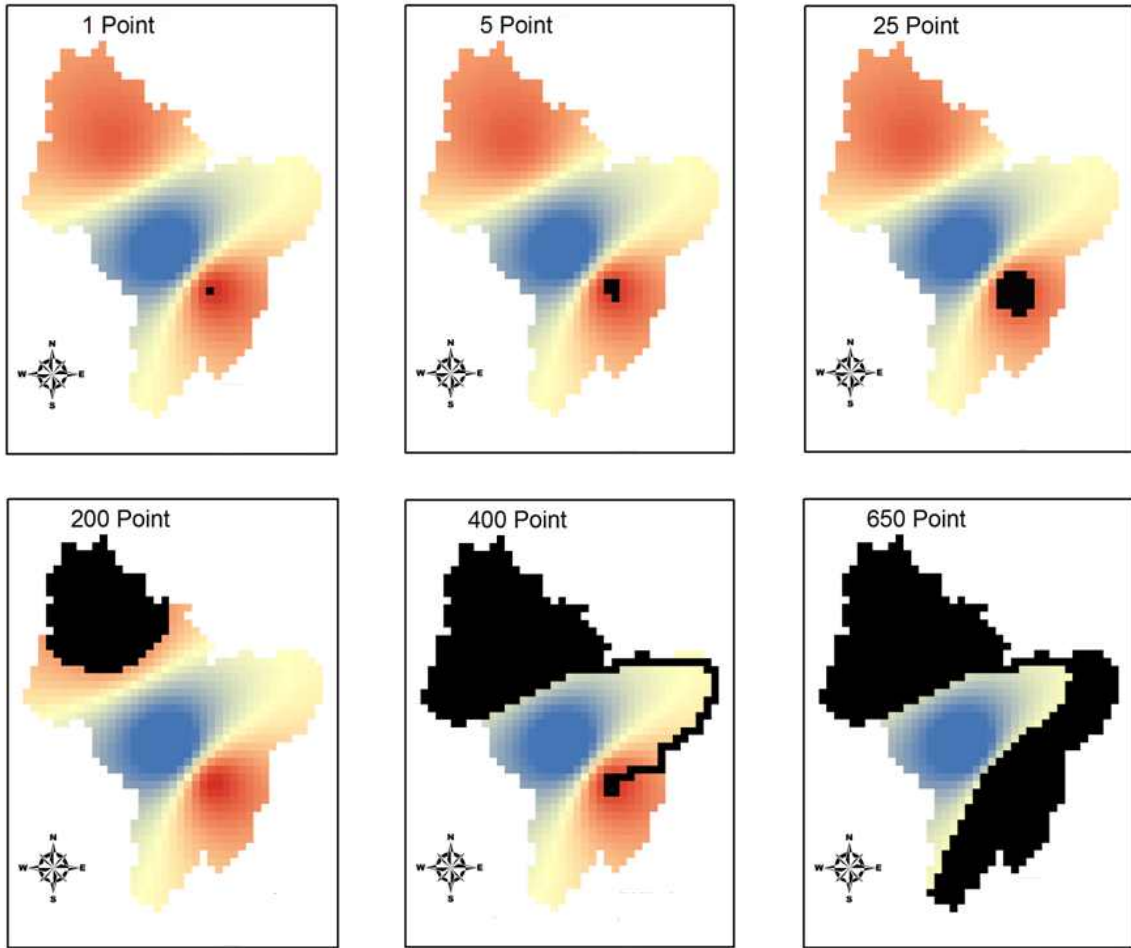


Fig. 9. Advanced Point-tracking Results on the Virtual Rainfall Field

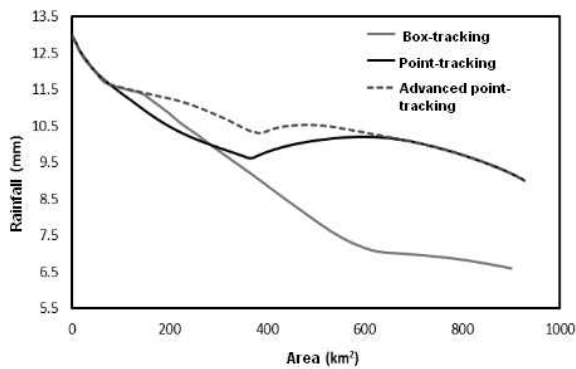


Fig. 10. Comparison of DAD Curves Based on Three Tracking Methods

가지 형태의 면적을 고려할 수 있기 때문에 호우중심이 뚜렷할 경우 Box-tracking보다 큰 MAAR을 제공하게 된다. 예를 들어 Fig. 11과 같이 유역면적 4km^2 에 대해 Box-tracking은 2×2 크기의 box로 된 MAAR을 검색하지만, Point-tracking 및 Advanced point-tracking은 보다 다양한

강우 형태를 고려하여 검색이 가능하므로 Box-tracking의 MAAR 보다 큰 값의 MAAR을 제공하게 되며, MAAR 결과에 대한 차이는 면적이 증가할수록 커지게 된다.

그러나 일부 유역면적($81 \sim 289\text{km}^2$)에서 Point-tracking의 MAAR이 Box-tracking의 MAAR보다 과소산정 되었는데 이는 Fig. 6의 강우장은 두 개의 호우중심을 가지고 있는데 Box-tracking은 10×10 box를 이용하여 탐색 시 MAAR이 호우중심 A 격자를 포함하고 있는 반면, 동일한 면적에 대한 Point-tracking의 경우 호우중심 B 격자를 지점으로 지속적으로 탐색을 수행하기 때문이다. 즉, 이 면적구간에서는 호우중심 A 격자 주변의 강우가 B 격자 주변보다 크에도 불구하고, Point-tracking은 이를 추적하지 못함을 의미한다.

Advanced point-tracking의 경우 강우장의 두 개의 호우중심 A와 B를 동시에 고려함으로써 실제적으로 작은 유역면적에 대해 Box-tracking 및 Point-tracking에 비해 비교적 큰 MAAR을 제공하고 있으며, Fig. 8과 Fig. 9에




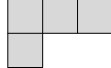


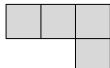

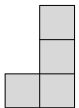

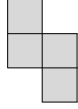

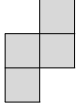

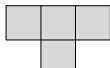
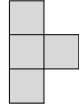
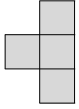
Box-tracking	Point- & Advanced point-tracking			
				
				
				
				

Fig. 11. Rainfall Field Spatial Patterns of Area 4 km² (2×2 box): Box- & Point-tracking

서 알 수 있듯이 두 개의 호우중심을 모두 포함하는 유역 면적 크기인 약 675 km² 이상이 될 경우 Point-tracking과 유사한 MAAR 값을 나타내고 있다.

따라서 유역전반에 걸쳐 강수량이 비슷한 전선형 호우의 DAD 분석의 경우, 비교적 단순한 Box-tracking 역시 효율적이며, Fig. 6과 같이 호우중심이 뚜렷한 호우의 경우 Point-tracking 및 Advanced point-tracking을 이용하는 것이 보다 정확한 DAD 분석결과를 제공할 수 있다. 다만, 호우중심이 여러 개인 경우 Advanced point-tracking을 이용할 경우보다 신뢰성있는 DAD 분석이 가능할 것으로 판단된다.

4. 실제 강우사상을 이용한 유역중심 DAD 분석방법과의 비교결과

3장에서 제시한 자동 강우장 탐색기법을 이용한 DAD 분석 방법의 성능 검증을 위하여 용담댐 유역의 실제 강우사상에 대하여 고전적인 유역중심 DAD 분석 방법의 결과와 비교-검토를 수행하였다. 용담댐 유역의 강우관측소 분포는 Fig. 12와 같으며, 대상호우는 2007년 태풍 '나리'에 해당하는 지속시간 34시간의 단일 강우사상(9월 14일 06시~9월 15일 16시)을 선택하여 DAD 분석을 실시하였다. 단, 태풍 '나리'의 경우 비교적 호우중심이 뚜렷하므로 자동 강우장 탐색기법 중 Box-tracking은 생략하고, Point-tracking과 Advanced point-tracking만을 적용하였다.

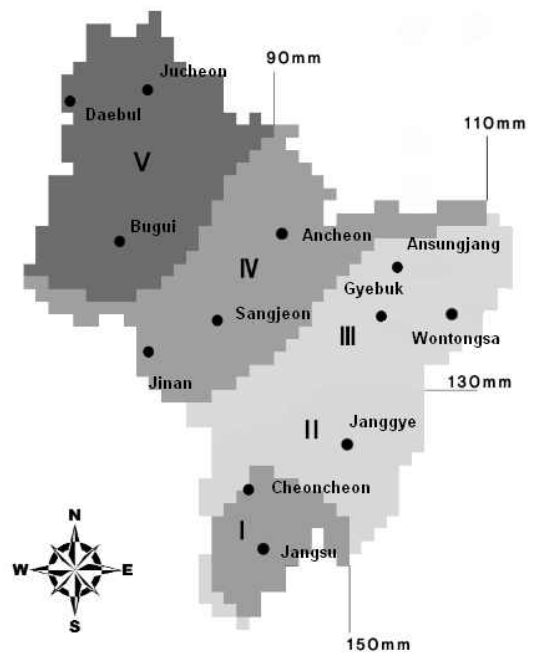


Fig. 12. Isohyet of Yongdam-dam Watershed for Typhoon 'Nari' Event (34 hrs duration)

유역중심의 DAD 분석을 위해 대상 강우사상에 대하여 관측소별 누가우량자료는 Table 1과 같으며, 관측소의 누가우량자료의 등우선도(isohyet)를 이용하여 분할된 용담댐 유역의 소유역도(소유역은 I에서 V까지 총 5개로 구분)는 Fig. 12와 같다. 또한, 각 소유역에 대한 평균누가우

Table 1. Cumulative Rainfall of Each Rain Gauges

unit: mm

Time (hr)	Gyebuk	Daebul	Buqui	Sang jeon	Ansung gjang	An cheon	Won tongsa	Jang gye	Jangsu	Jucheon	Jinan	Cheon cheon
4	1	0	0	1	2	0	5	7	12	0	0	4
6	1	0	3	2	2	1	6	7	12	1	3	4
8	1	1	4	2	2	1	6	8	13	2	3	4
10	2	1	4	2	2	1	6	8	13	2	3	4
12	4	3	5	3	4	2	9	10	17	4	4	8
14	6	3	5	3	5	2	11	12	21	4	5	11
16	15	27	15	5	13	6	20	20	32	20	10	19
18	16	32	18	8	14	8	21	21	33	25	16	21
20	24	39	34	43	21	38	31	31	52	37	44	40
22	32	62	61	57	28	49	39	45	74	59	64	65
24	96	65	64	77	84	69	118	123	145	64	77	121
26	108	71	71	87	97	80	132	135	156	69	85	133
28	115	71	71	90	103	83	143	145	165	69	89	139
30	123	71	72	94	111	87	151	153	174	69	93	148
32	126	71	73	95	114	88	155	156	178	69	94	151
34	126	71	73	95	114	88	155	156	178	69	94	151

량의 산정을 위한 관계식은 Eqs. (3)~(7)과 같으며, 면적 가중인자는 Thiessen 다각형을 이용하여 산정하였다.

$$P_1 = \frac{54P_{장수} + 21P_{천천} + 3P_{장계}}{78} \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{9P_{장수} + 35P_{천천} + 101P_{장계}}{145} \quad (4)$$

$$P_3 = \frac{10P_{천천} + 13P_{장계} + 64P_{계북} + 57P_{원동사} + 27P_{안성장} + 16P_{상천}}{187} \quad (5)$$

$$P_4 = \frac{42P_{진안} + 77P_{상천} + 32P_{안성장} + 97P_{안천} + 9P_{부귀}}{257} \quad (6)$$

$$P_5 = \frac{114P_{부귀} + 15P_{안천} + 94P_{주천} + 35P_{대불}}{258} \quad (7)$$

여기서 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 는 5개 소유역의 평균누가우량(mm)이며, $P_{(관측소명)}$ 은 각 관측점에서의 누가강우량(mm)이다.

Eqs. (3)~(7) 및 Table 1을 이용하여 소유역별 평균누가우량을 산정한 후 소유역별 평균누가우량에 각 소구역의 전체 유역면적에 대한 면적비를 고려함으로써 Table 2와 같이 누가면적별 평균누가우량을 산정할 수 있다. 이상의 결과로부터 지속시간 2, 4, 8시간에 대한 GIS기반의 유역중심 DAD 해석결과는 Table 3과 같다.

Table 3의 유역중심 DAD 해석 및 본 연구에서 제안한

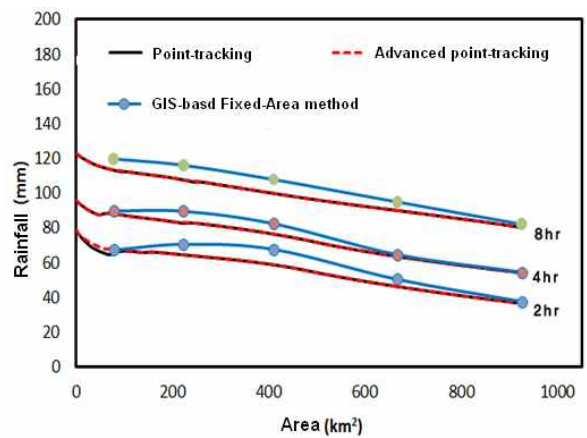


Fig. 13. Comparison of DAD Curves between Fixed-area Method and Tracking Methods

강우장 탐색기법(Point-tracking 및 Advanced point-tracking)으로 생성된 지속시간 2, 4, 8시간에 대한 DAD 해석 결과는 Fig. 13과 같으며, 본 연구에서 제시한 Point-tracking 및 Average point-tracking 기법은 실제 강우사상에 대해서 지속시간별로 유역면적이 증가함에 따라 MAAR이 감소하는 신뢰성 있는 해석결과를 제공해주고 있음을 확인할 수 있다.

그러나 GIS 기반의 유역중심 DAD 분석결과의 경우, 강우장 탐색기법에 의한 결과에 비해 유역면적 223 km²와 410 km²에 해당하는 MAAR 값이 과대 산정되었다. 이는

Table 2. Cumulative Average Rainfall for Cumulative Sub-catchments

unit: mm

Sub-catchment Time (hr)	I	I ~ II	I ~ III	I ~ IV	I ~ V
4	9.65	7.66	5.51	3.60	2.59
6	9.65	7.66	5.69	4.20	3.51
8	10.38	8.41	6.12	4.48	3.98
10	10.38	8.41	6.28	4.57	4.05
12	14.31	11.47	9.01	6.69	5.99
14	17.96	14.29	11.33	8.23	7.10
16	28.04	23.14	19.86	15.11	15.90
18	29.31	24.39	21.09	16.98	18.34
20	47.96	39.19	34.39	35.87	35.91
22	70.46	58.22	49.16	50.12	52.80
24	137.69	128.71	116.78	100.45	90.40
26	149.00	140.43	128.90	111.87	100.42
28	157.23	149.14	137.23	118.32	105.11
30	166.19	157.68	145.39	125.03	110.14
32	169.88	160.96	148.61	127.49	112.05
34	169.88	160.96	148.61	127.49	112.05

Table 3. MAAR of Cumulative Sub-catchment for Each Duration (2, 4, 8 hrs)

unit: mm

Sub-catchment Time (hr)	I (78 km ²)	I ~ II (223 km ²)	I ~ III (410 km ²)	I ~ IV (667 km ²)	I ~ V (925 km ²)
2	67.23	70.50	67.62	50.33	37.61
4	89.73	89.52	82.39	64.58	54.50
8	119.69	116.04	107.80	94.90	82.07

기존의 유역중심 DAD 분석 방법이 공간분포형 강우장의 시계열에 대한 정보를 충분히 활용하지 않고 단지, 강우 관측소에서의 총강수량만을 이용하여 추정된 등우선도를 사용함으로써 실시간 호우정보를 정확히 반영하지 못하는 문제점으로 판단된다. 또한, Table 3 및 Fig. 13에서 알 수 있듯이 지속시간 2시간의 경우, 유역면적 78 km²에서의 MAAR이 67.23 mm인 반면, 유역면적이 약 3배 이상 증가한 223 km²임에도 불구하고 MAAR은 약 3 mm 증가한 70.5 mm로 분석된 것을 확인할 수 있다.

뿐만 아니라 본 연구에서 사용된 탐색기법은 최소 유역 면적 1 km²에서 927 km²까지의 모든 면적에 대한 MAAR 정보를 제공하는 반면, Table 3의 유역중심 DAD 해석 결과는 등우선도에 의해 분할된 소유역을 대상으로 78, 223, 410, 667, 925 km²의 5개의 면적에 대한 MAAR만을 검색하기 때문에 MAAR이 제공되지 않은 용담댐 유역면적에 대해서는 불충분한 DAD 정보를 이용해서 또다시 내·외

삽을 시행해야하므로 해석결과에 대한 불확실성이 증가하게 된다.

본 연구에서 제안하는 자동 강우장 탐색기법은 GIS를 이용한 다양한 공간분포 강우장 및 레이다 실시간 자료 등을 이용하여 DAD 분석 및 면적감소계수(areal reduction factor) 계산 등을 위한 유용한 도구로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

기존의 WMO (1969)에서 제시한 유역중심의 DAD 분석 방법은 이동성향이 뚜렷한 호우 또는 대유역에 호우중심이 여러 개일 경우, 강우의 공간분포 정보를 정확히 반영하지 못하여 유역면적별 최대강수량 산정 시 그 결과가 과대 또는 과소 산정될 수 있다. 또한, 최근 GIS 기술의 발달로 인하여 지구통계학적 기법에 의해 점강우량을 이

용하여 다양한 형태의 공간분포를 갖는 강우장의 생성이 가능할 뿐만 아니라 레이더 관측기술의 발달로 인하여 지점강우의 내삽없이 레이더 강우장으로부터 호우의 공간분포를 실시간으로 확인하고, 분석할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 유역의 크기 및 호우의 특성과 상관없이 호우의 이동 및 형태를 고려하고, 강우지속기간동안의 공간분포 강우장의 시계열 정보를 이용하여 보다 객관적이고 정확한 DAD 분석이 가능하도록 자동 강우장 탐색기법인 Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking 기법을 개발하고 그 적용성을 검토하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 공간분포형 강우장 시계열 자료를 입력자료로 하여 강우사상의 총 지속기간동안 임의의 지속시간에 대한 유역면적별 면적최대강우량 정보를 자동으로 산정할 수 있도록 Box-tracking, Point-tracking, Advanced point-tracking의 세 가지 자동 강우장 탐색기법 알고리즘을 개발하고 이를 프로그래밍하였다.
- 2) 용담댐 유역을 대상으로 임의의 강우값(12 및 13 mm)을 갖는 두 지점을 기점으로 역거리법으로 공간분포형 가상 강우장을 생성하고, 개발된 강우장 탐색기법의 탐색성능을 검증한 결과, 세 탐색기법 모두 1×1 (유역면적: $1 \cdot \text{km}^2$) 격자의 경우 13 mm의 강우를 갖는 격자를 성공적으로 탐색하였으며, 일정 유역면적까지 동일한 DAD 관계곡선을 제공하였으나, 유역면적이 100 km^2 (10×10)을 초과하면서부터 Box-tracking는 Point-tracking 및 Advanced point-tracking에 비해 과소산정된 면적최대강우량을 제공하였다. 이는 Point-tracking 및 Advanced point-tracking 기법은 최대강우값을 갖는 격자를 호우중심으로 하여 좀 더 세밀한 형태로 유역면적을 묘사하여 면적최대강우량을 탐색하는 반면, Box-tracking은 격자크기를 정방형($1 \times 1, 2 \times 2, \dots, N \times N$)으로 증가시키면서 지속기간별 면적최대강우량을 탐색함으로써 나타나는 문제점으로 분석되었다. 또한, Advanced point-tracking은 두 개 이상의 호우중심을 고려할 수 있도록 알고리즘을 구성함으로써 본 연구에서 사용한 유사한 두 개의 호우중심을 갖는 가상의 강우장에서 Point-tracking과 비교하였을 때, 보다 정확한 DAD 정보를 제공해주었다.
- 3) 기존의 유역중심의 면적고정 DAD 분석기법과 본 연구에서 제안한 탐색기법을 이용한 DAD 분석기법과의 비교를 위하여 2007년 용담댐 유역의 태풍 '나리' 강우사상(총 강우지속시간: 34시간)을 이용하여

DAD 분석을 실시하고, 그 결과를 비교·검토하였다. 태풍 '나리' 강우사상의 경우 지속시간에 따른 호우의 이동의 뚜렷한 점을 고려하여 Box-tracking은 생략하고, Point-tracking과 Advanced point-tracking 탐색기법만을 적용한 결과, 등우선도로 구분된 5개 유역면적에 대해서만 면적최대강우량 정보를 제공하는 기존의 GIS 기반의 유역중심 DAD 분석결과에 비해 유역면적 최초 1 km^2 부터 용담댐 유역면적에 해당하는 최종 925 km^2 에 대해 보다 신뢰성있는 DAD 해석결과를 보여주었다.

이상과 같이, 본 연구에서 개발한 강우장 탐색기법은 지점강우정보를 활용한 다양한 공간분포 강우장 및 레이더 자료 등을 이용하여 DAD 분석 및 면적감소계수(areal reduction factor) 계산 등 지점강우량의 면적강우량 환산을 위한 유용한 도구로 활용이 가능할 것으로 기대된다. 다만, 개발된 탐색기법은 강우장 시계열을 입력자료로 사용하기 때문에 내삽기법 선택에 따라 강우장의 공간분포가 달라질 수 있으므로 다양한 내삽기법에 의한 DAD 분석결과와의 불확실성을 평가할 필요가 있으며, 강우장의 공간해상도(spatial resolution)의 변화에 따른 DAD 해석결과와의 변동성에 대한 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Arizona Department of Water Resources. (2013). "Probable Maximum Precipitation Study for Arizona PMP Evaluation Tool Description and Usage." Manual.
- Bell, F.C. (1976). *The Areal Reduction Factor in Rainfall Frequency Estimation*. Institute of hydrology, Report No. 35.
- Durrans, S.R., Julian, L.T., and Yekta, M. (2002). "Estimation of depth area relationships using radar data." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 5 pp. 356-367.
- Guo, J.C.Y. (2012). "Storm Centering Approach for Flood Predictions from Large Watersheds." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 960-964.

- Kim, B.S. (2009). "Adaptation Strategies for Extreme Flood to Cope with Future Climate Change." *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 57, No. 9, pp. 27-41.
- Kim, M.M., Jung, C.S., Yeo, W.G., and Sim, J.H. (2009). "Assessment of Design Rainfall for River Improvement due to Climate Change." *Meteorological Technology and Policy*, Vol. 2, No. 2, pp. 28-37.
- Kim, N.W., and Won, Y.S. (2004). "DAD Analysis on Storm Movement." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 5, pp. 437-448.
- Lee, G.H., Lee, K.H., Jung, K.S., and Jang C.L. (2012). "A Comparative Analysis on Slope Stability Using Specific Catchment Area Calculation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 7, pp. 643-656.
- Svensson, C., and Jones, D.A. (2010). "Review of methods for deriving areal reduction factors." *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 3, pp. 232-245.
- Tarun, D.G. (2005). *Transformation of Point Rainfall to Areal Rainfall by Estimating Areal Reduction Factors, using Radar Data, For Texas*. Master Thesis, Texas A&M University.
- WMO (1969). *Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precipitation*. Technical Paper 129, Geneva.

논문번호: 14-020	접수: 2014.02.18
수정일자: 2014.03.19	심사완료: 2014.03.19