호우사상의 공간규모 정량화를 위한 등가타원의 적용

Application of Equivalent Ellipses for the Qualification of the Spatial Scale of Rainfall Event

김 하 영* / 박 창 열** / 유 철 상***

Kim, Hayoung / Park, Changyeol / Yoo, Chulsang

Abstract

This study examined the quantification problem of a storm shape using the concept of equivalent ellipses. The equivalent ellipses of a storm event were estimated at every time step with respect to the several thresholds of rainfall intensity, which was also examined in terms of their size and number. In addition, the average equivalent ellipse was decided, and the confidence intervals of major axis, minor axis, and rotational angle were calculated to evaluate if the average equivalent ellipse could be the representative one. As results, the following results could be derived. First of all, the number of equivalent ellipses and the size of equivalent ellipses increase as the threshold increase. Secondly, the appropriate ratio of major and minor axes of equivalent ellipse is 2:1. Finally, the average rotational angle estimated with respect to several threshold rainfall intensities were all found not to be statistically different from that of all representative rotational angles.

Keywords : storm, spatial distribution, equivalent ellipse, rotational angle, threshold of rainfall intensity

요 지

본 연구에서는 등가타원을 이용하여 호우사상의 공간분포를 정량화 하는 문제를 살펴보았다. 주어진 호우사상의 등가타원을 매 시간별 한계강우강도에 따라 추정하고, 이 등가타원의 개수와 규모의 변화를 살펴보았다. 또한 한계강우강도별로 평균 등가타원을 결정하고, 이 평균 등가타원이 주어진 호우사상을 대표할 수 있는지 판단하기 위해 평균 등가타원의 장축과 단축, 그리고 회전각에 대한 신뢰구간을 산정하여 평가하였다. 연구결과, 한계강우강도가 커짐에 따라 등가타원의 개수와 크기는 감소하고 등가타원이 나타나는 시간도 늦어지는 것을 확인하였다. 또한 등가타원의 장축과 단축의 비는 2:1이 적절한 것으로 나타났으며, 한계강우강도별로 추정된 등가타원의 평균 회전각은 모든 등가타원의 평균 회전각과 통계학적으로 유사함을 확인하였다.

핵심용어 : 호우, 공간분포, 등가타원, 회전각, 한계강우강도

* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정 (e-mail: gkdudld85@korea.ac.kr)

** 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사수료 (e-mail: changyeol@korea.ac.kr)

*** 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Corresponding Author, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

1. 서론

여러 수문과정 중에서 강우과정의 시공간적인 변동성은 다른 어떤 과정보다도 크다. 따라서 강우과정에 대한 정량화는 수문학 분야의 오래된 연구주제이면서 아직 명확하게 해결되지 못한 대표적인 사례에 속한다. 강우과정의 정량화한 결국 평균적인 의미의 강우특성을 유도하는 것으로 이해할 수 있다. 예를 들어, 강우의 시간분포와 관련해서 보면, Mononobe, Huff, Keifer & Chu, Yen & Chow, 교호블록 등 매우 다양한 방법들이 언급된다. 바로 이 방법론들이 강우의 시간분포를 정량화한 사례들인 것이다. 이 중 국내 실무에서는 Huff 방법이 주로 사용되고 있다(건설교통부, 2007; 정종호와 윤용남, 2003; 윤용남, 2007). 강우강도-지속기간-재현기간(Rainfall Intensity-Duration-Frequency)의 경우도 강우 특성을 시간축에서 정량화한 또 다른 사례로 이해할 수 있다. 이와 반대로 강우의 공간적인 특성을 반영한 것으로는 면적감소계수(Areal Reduction Factor: ARF)가 대표적이다(김규호 등, 2001; 정종호 등, 2002; 유철상과 김경준, 2004; 김남원 등, 2005). 주어진 유역에 대해서, 또는 특정 호우에 대한 강우의 지속기간-면적-강우깊이(Rainfall Duration-Area-Depth) 관계도 중요하다. 이러한 정량화 결과는 다양한 수문학적 설계에 직접 이용된다.

그러나 강우과정의 정량화가 상대적으로 시간적 측면에 치중된 면이 없지 않다. 이는 기본적으로 강우의 공간적 분포에 대한 정량화 필요성이 상대적으로 약했기 때문이다. 실제로 대부분의 설계홍수량 결정에서 강우의 공간분포 특성은 면적감소계수 하나로 충분히 반영된다고 판단되어 왔다. 그러나 이러한 평균적인 개념의 면적감소계수는, 특히 유역 내 여러 지점에 대해 동일한 재현기간의 홍수량을 추정하는 경우, 상류-하류의 관계상 비상식적인 값이 유도될 수 있다(김원과 윤강훈, 1992; 국토해양부, 2008a; 윤용남 등, 2004). 참고로, 현재 국내에서 사용되는 면적감소계수는 강우가 내리는 면적과 강우의 지속기간 별로 다르게 적용하도록 되어있다. 따라서 홍수량 산정 시 산정지점마다 혹은 강우의 지속기간마다 상이한 면적감소계수를 적용해야만 한다(건설교통부, 2007; 오경두, 2009). 상류부는 상류부에 맞는 면적감소계수를 사용하고 하류부는 하류부에 맞는 면적감소계수를 사용하여 홍수량을 구하다 보니 결국은 서로 다른 특성의 호우로부터 유도되는 홍수량을 산정하게 되는 불합리한 결과가 유도되는 것이다. 다시 말해 소하천-중규모하천-대하천을 총체적으로 일관할 수 있는 홍수량이 아닌 일부분에 해당하는 홍수량만을 제각기 산정하게 되는 문제점을 낳는 것이다.

이러한 문제의 원인은 다양하게 설명할 수 있다. 먼저 물리적으로는 유역의 규모가 커서 실제 이보다 작은 호우가 주로 발생하는 경우나, 유역의 형상과 호우의 형상이 전혀 부합되지 않는 경우 등을 생각할 수 있다. 즉, 유도된 면적감소계수를 이용한 외삽의 한계 또는 대표성의 문제가 발생하는 것이다. 수문학적으로 보면, 유도된 면적감소계수가 면적에 민감한 경우, 강우강도식이 도달시간에 민감한 경우, 적용된 단위도의 매개변수가 유역의 특성에 민감하게 반응하는 경우, 아울러 유역 일부분이 유역 전체의 특성과 특이하게 다른 경우 등을 살펴볼 수 있다. 이러한 경우들에 있어 상-하류 설계홍수량의 추정이 일관성을 결여할 가능성이 생긴다. 그러나 현재 상태로는 그 해결 방안이 뚜렷하지 않다. 이런 상황에서 설계호우라는 개념이 그 대안으로 언급되고 있다(국토해양부, 2008b; 오경두, 2009). 즉, 단일 호우로부터 발생한 강우가 유역 상류부터 하류까지 하나의 수문순환시스템으로 형성되어 흘러나가는 과정을 일관성 있게 분석하여 설계홍수량을 구하고자 하는 것이다.

설계호우란 특정 구조물의 설계에 적절한 강우깊이, 강우지속기간, 시 공간분포를 갖는 강우사상으로 정의된다(국토해양부, 2008a). 그러나 이렇게 간단한 정의에도 불구하고 설계호우를 이용하는 데는 문제가 많다. 기본적으로 주어진 재현기간을 만족하는 설계호우의 작성방법이 마련되어 있지 않다. 쉽게 생각하면, 설계호우의 강우깊이는 소위 빈도해석을 이용하여 유도할 수 있을 것이며, 설계호우의 시 공간적 분포는 실제 강우의 분석을 통해 평균적인 의미로 적용하거나 가정을 통해 만들어 낼 수 있는 것처럼 보인다. 그러나 이렇게 할 수 있으면 다양한 중요한 문제들이 먼저 해결되어야 한다. 예를 들어, 강우강도의 공간분포는 어떤 형태가 되어야 하는가 하는 문제를 해결해야 하며, 그 변화가 등방성인지 이방성인지도 중요하다. 강우의 공간분포 형태는 어떤 모양이고, 아울러 그 규모가 어떻게 되어야 하는가 하는 문제도 중요하다. 여기에 이 공간분포가 재현기간에 따라 달라지는지 또는 같다고 할 수 있는지 하는 문제도 추가되고, 또한 호우사상의 시점부터 종점까지 호우의 공간규모가 같다고 해야 하는지 또는 어떤 규칙성을 가지고 변해야 하는 것인지도 결정해야 한다. 호우사상의 방향성 문제도 중요하고, 그 이동속도도 중요하며, 아울러 호우중심의 개수 및 변화 문제도 간단치 않아 보인다. 너무나 다양한 문제들이 이 설계호우의 개념 속에 들어가는 것이다. 이러한 문제를 최대한 간략화 한다고 해도 주어진 재현기간에 대해 대상 유역 전반에 걸쳐 적절하게 적용할 수 있는 설계호우를 작성하기 위해서는 보다 많은 연구 성과가 축적되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에서는 설계호우 작성에 필요한 다양한 주제들 중 그 공간분포를 정량화 하는 문제로 한정하여 다루어 보고자 한다. 기존의 연구를 살펴보면, 호우사상의 공간분포는 대부분 타원형으로 가정하는 경우가 많았다. 이는 물론 실제호우를 분석한 결과가 타원형으로 가장 잘 형상화되었기 때문이다 (Huff, 1967; Hansen et al., 1982; Suyanto et al., 1995). Feral et al. (2000)은 레이더 자료를 이용하여 호우장의 관성모멘트를 통해 호우를 등가타원 (equivalent ellipse)으로 정량화하고, Foufloula-Georgiou (1989)과 Pvodanovic et al. (2005) 역시 타원을 이용하여 호우사상을 나타낸 바 있다. 이 외에도 많은 연구들에서 호우사상의 형태를 타원형으로 적절히 나타내고자 하는 연구를 수행하였다 (Hansen et al., 1982; Wilson and Fourfoula-Georgiou, 1990; Watts and Calver, 1991; Lascelles et al., 2000; Kamran et al., 2003; Jensen and Pedersen, 2005; John et al., 2007).

본 연구에서는 호우사상 형태의 정량화 과정에서 이상과 같은 등가타원의 개념이 어느 정도 효율성 있게 적용될 수 있는지를 검토하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 주어진 호우사상에 대해 매 시간별로 호우의 공간적 특성을 반영하는 등가타원을 추정하고, 그들의 규모변화를 살펴봄, 아울러 이들을 대변할 수 있는 평균적 개념인 등가타원이 도입될 수 있는지를 판단하였다. 만일 주어진 호우사상을 대표하는 평균적 개념이 등가타원이 제시될 수 있다면, 주어진 재현기간을 만족하는 설계호우의 개발을 시도할 수 있는 여지가 생기게 된다.

2. 이론적 배경

2.1 관성모멘트의 개념을 이용한 호우장의 정량화

등가타원 (equivalent ellipse)의 개념은 Moussa (2003)에서 자세히 살펴볼 수 있다. 그의 연구는 호우사상이 아닌 유역을 대상으로 하고 있지만, 호우장의 정량화에도 동일하게 적용된다. 먼저, 집수평면 (유역의 경계를 수평면 위에 투영할 경우 얻어지는 평면도형)과 동일한 기하학적 특성을 갖는 등가타원을 결정하는 방법은 다음과 같다.

Fig. 1은 집수평면 Σ 를 2차원 평면 xAy 상에 도식한 것으로, 여기서 G 는 Σ 의 도심이다. Moussa (2003)에 의해 소개된 관성모멘트 (inertia moments)법에 따르면 집수평면 Σ 내의 한 점 P 의 좌표를 x, y 라고 할 때, 집수면적 S_0 , Σ 의 x 축과 y 축에 관한 1차 모멘트 M_x, M_y , 그리고 집수평면 Σ 의 도심 $G(x_G, y_G)$ 의 좌표는 다음과 같다 (Moussa, 2003).

Fig. 1. Concept of Equivalent Ellipse (Moussa, 2003)

$$x_G = \frac{M_x}{S_0} \quad (1)$$

$$y_G = \frac{M_y}{S_0} \quad (2)$$

위 식에서,

$$S_0 = \iint_{\Sigma} dx dy \quad (3)$$

$$M_x = \iint_{\Sigma} y dx dy \quad (4)$$

$$M_y = \iint_{\Sigma} x dx dy \quad (5)$$

평면 xAy 를 원점 A 로부터 G 까지 평행 이동하면 $x'Gy'$ 라는 새로운 2차원 평면을 얻게 되고, $x'Gy'$ 평면위의 한 점 (x', y') 는 다음과 같다.

$$x' = x - x_G \quad (6)$$

$$y' = y - y_G \quad (7)$$

따라서, $x'Gy'$ 평면에서 집수평면 Σ 의 관성모멘트 (2차 모멘트)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{x'} = \iint_{\Sigma} y'^2 dx' dy' \quad (8)$$

$$I_{y'} = \iint_{\Sigma} x'^2 dx' dy' \quad (9)$$

$$I_{x'y'} = \iint_{\Sigma} x' y' dx' dy' \quad (10)$$

$x'Gy'$ 평면을 회전각 ω 만큼 회전시키면 XGY 의 새로운 평면을 얻을 수 있고, 이 평면위에서 P 점의 좌표는 다음 식과 같다.

$$X = x' \cos \omega + y' \sin \omega \quad (11)$$

$$Y = -x' \sin \omega + y' \cos \omega \quad (12)$$

위 두 식을 풀면 x', y' 을 얻을 수 있고, 따라서 ω 만큼 회전한 평면 XGY 에서의 관성모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_X &= \iint_{\Sigma} Y^2 dXdY = \iint_{\Sigma} (-x' \sin \omega + y' \cos \omega)^2 dx' dy' \\ &= I_{x'} \cos^2 \omega - I_{x'y'} \sin 2\omega + I_{y'} \sin^2 \omega \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} I_Y &= \iint_{\Sigma} X^2 dXdY = \iint_{\Sigma} (x' \cos \omega + y' \sin \omega)^2 dx' dy' \\ &= I_{x'} \sin^2 \omega + I_{x'y'} \sin 2\omega + I_{y'} \cos^2 \omega \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} I_{XY} &= \iint_{\Sigma} XY dXdY \\ &= \iint_{\Sigma} (x' \cos \omega + y' \sin \omega)(-x' \sin \omega + y' \cos \omega) dx' dy' \\ &= I_{x'y'} \cos 2\omega + \frac{I_{x'} - I_{y'}}{2} \sin 2\omega \end{aligned} \quad (15)$$

Eqs. (8) and (9)를 더한 값과 Eqs. (13) and (14)를 더한 값은 서로 동일할데, 이는 두 식의 합을 나타내는 값이 점 G 와 점 P 사이의 거리로 각속도 ω 와는 무관하기 때문이다. 따라서 I_X 가 최소가 되고, I_Y 가 최대가 되는 유일한 해, 즉 유일한 회전각 ω 가 존재하게 된다.

$$\frac{dI_X}{d\omega} = (I_{y'} - I_{x'}) \sin 2\omega - 2I_{x'y'} \cos 2\omega = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dI_Y}{d\omega} = (I_{x'} - I_{y'}) \sin 2\omega + 2I_{x'y'} \cos 2\omega = 0 \quad (17)$$

Eqs. (16) and (17)을 이용하여 회전각 ω 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tan 2\omega = \frac{2I_{x'y'}}{I_{y'} - I_{x'}} \quad (18)$$

XGY 평면의 GX 와 GY 는 회전각 ω 와 동일한 방향이며 Eqs. (16) and (17)을 만족시키는 축으로 이 두 축을 관성의 주축이라 부른다. 또한 최소관성모멘트 $I_{\min}$ 과 최대관성모멘트 $I_{\max}$ 는 다음과 같다.

$$I_{\max} = \frac{I_{x'} + I_{y'}}{2} + \left[\left(\frac{I_{x'} - I_{y'}}{2} \right)^2 + (I_{x'y'})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$I_{\min} = \frac{I_{x'} + I_{y'}}{2} - \left[\left(\frac{I_{x'} - I_{y'}}{2} \right)^2 + (I_{x'y'})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

위 Eqs. (19) and (20)의 최소관성모멘트와 최대관성모멘트를 이용하면 형상지수 R_i (shape index)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \quad 0 \leq R_i \leq 1 \quad (21)$$

호우장의 형태가 원형일수록 $I_{\min} \approx I_{\max}$ 가 되어 R_i 는 증가하거나 1에 가까워지며, 반대로 타원형에 가까워질수록 R_i 는 감소하게 된다 (김재한, 2005; Moussa, 2003).

2.2 호우장의 등가타원

등가타원 개념을 이용하여 호우장을 정량화 할 때 다음과 같이 등가타원의 성질을 가정한다 (Moussa, 2003). 즉, 호우의 중심 (강우강도가 가장 큰 곳)과 타원의 중심은 같고, 타원의 주축은 호우면적의 관성주축과 일치해야 하며, 타원은 한계강우강도선 이내의 호우장과 동일한 면적을 갖고, 마지막으로, 타원은 호우면적의 최소관성모멘트와 최대관성모멘트와 동일한 비율의 관성모멘트를 갖는다.

타원은 두 점정에서부터 거리의 합이 일정한 점의 자취를 말한다. 다음 식은 타원방정식의 일반형이다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (22)$$

타원의 장축은 타원과 $(-a, 0), (a, 0)$ 에서 만나고, 단축은 $(-b, 0), (b, 0)$ 에서 만난다. 타원 위의 한 점 P 의 x, y 그리고 타원 내 미소면적 dS 는 다음과 같다.

$$x = a \cos \theta \quad (23)$$

$$y = b \sin \theta \quad (24)$$

$$dS = 2x dy = 2ab \cos^2 \theta d\theta$$

Fig. 2. Point P on the Ellipse Over the Polar Coordinates

타원의 면적은 다음과 같이 계산된다.

$$A = \int_{-b}^b dS = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} 2ab \cos^2 \theta d\theta = \pi ab \quad (26)$$

타원의 최소관성모멘트 $I_{\min}$ 과 최대관성모멘트 $I_{\max}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$I_{\min} = \int_{-b}^b y^2 dS = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} 2ab^3 \sin^2 \theta \cos^2 \theta d\theta = \frac{\pi ab^3}{4} \quad (27)$$

$$I_{\max} = \int_{-a}^a x^2 dS = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} 2a^3 b \cos^4 \theta d\theta = \frac{\pi a^3 b}{4} \quad (28)$$

Eq. (21)의 형상지수 R_i 는 위 식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \frac{I_{\min, e}}{I_{\max, e}} = \frac{b^2}{a^2} \quad (29)$$

등가타원은 한계강우강도를 이용하여 미리 선정한 호우장의 면적 S_0 와 동일하며, 등가타원의 형상지수 역시 Eqs. (19)~(21)을 이용하여 결정된 형상지수 R_i 와 동일하다는 가정을 가지고 유도된다. 등가타원의 장축과 단축은 다음과 같다.

$$a = \left[\frac{S_0}{\pi} \left(\frac{1}{R_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$b = \left[\frac{S_0}{\pi} (R_i)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

위 식에서,

$$S_0 = \pi ab \quad (32)$$

$$R_i = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{b^2}{a^2} \quad (33)$$

3. 주어진 호우사상에 대한 등가타원의 결정 및 평가

3.1 대상호우사상

본 연구에서는 2007년 9월 16일 13시에 부터 2007년 9월 16일 24시까지 총 12시간동안 지속된 호우사상을 대상으로 하였다. 이 대상 호우사상은 대류성 강우의 특성을 띠고 있는 것으로 보인다. 이 기간 중 우리나라 전역 기상청 산하 65개 지점에서 측정된 강우강도가 25 mm/hr 이상인 경우는 모두 10곳으로(완도, 고흥, 남해, 진주, 산청, 함천, 대구, 거창, 의성, 포항), 이 지점들의 시간별 강우강도는 Table 1과 같다. 이 중 7곳(남해, 함천, 의성 제외)은

Fig. 3. The Moving Path of Maximum Storm Center and the Rain Gauges which have the Intensity more than 25 mm/hr

매 시간별 최대강우강도를 나타내는 지점과 중복된다 (Fig. 3). 시간별 최대강도를 나타내는 지점이면서 동시에 강우강도가 25 mm/hr 이상인 지점을 시간에 따라 연결해 보면 Fig. 3의 화살표와 같다. 우리나라 남서쪽 완도에서 시작한 호우는 고흥을 지나 진주, 산청, 거창으로 북상하다가 대구, 포항으로 비스듬히 빠져나가고 있다. 남서쪽에서 발원한 호우가 비스듬히 북상하여 최초 근원지에서 북동쪽으로 빠져나가고 있는 형태이다.

3.2 등가타원의 결정

등가타원을 결정하기에 앞서 먼저 호우장의 중심과 면적이 결정되어야 한다. Fig. 3에서 산정된 25 mm/hr 이상의 강우강도를 가진 10곳을 등가타원의 중심이라 가정하고, 이 중심을 기준으로 호우장의 면적을 결정하였다. 한만도를 1×1 km의 셀로 나누고, 크리깅 기법을 이용하여 각 셀마다 강우강도 값이 입력되도록 하였다. 미리 설정해 놓은 등가타원의 중심을 시작으로 조금씩 범위를 넓혀가면서 한계강우강도 이상의 강우강도를 가진 셀을 등가타원의 면적으로 고려하였다. 각 셀의 강우강도가 I 라 할 때 한계강우강도 τ 를 경계로 해서 $I \geq \tau$ 인 곳의 내부 면적을 등가타원의 면적으로 결정할 것이다(Goldhirsh and Musiani, 1986).

Fig. 4. Equivalent Ellipses Developed at Every Time Step

본 연구에서는 한계강우강도 τ 를 3, 10, 25 mm/hr 세 가지로 설정하였다. 25 mm/hr을 최대 한계강우강도로 설정한 이유는 기존연구에서 25 mm/hr을 집중호우의 기준으로 많이 설정하고 있기 때문이다 (Hershfield, 1984; Doswell, 1993; DayFdyuk et al., 2009). 그러나 25 mm/hr 이상의 강우강도는 등가타원을 결정하기에는 너무 크기 때문에 이보다 작은 한계강우강도로 3 mm/hr과 이 두 값의 중간인 10 mm/hr를 추가로 선정하였다. 0 mm/hr가 아닌 3 mm/hr의 값을 채택한 이유는 등가타원의 면적이 과도하게 커지는 경우를 방지하기 위함이다. 본 연구의 대상 호우사상에 0 mm/hr의 한계강우강도를 적용하면 등가타원의 면적은 한반도의 절반을 크게 상회하는 규모로 커지게 된다. 그러나 어떤 기준이 하한계 강우강도로 적절한 지는 아직 판단하기 어려우며, 향후 추가로 다루어져야 할 추가의 문제로 넘기고자 한다.

총 12시간동안 매시간 결정된 등가타원은 Fig. 4와 같다. 전체적으로 보면, 호우발생 초기 단계, 즉 호우 발생 1 시간에는 한 지점(완도)에서만 3 mm/hr 한계강우강도를 가진 등가타원이 한 개 결정되고, 2시간에는 3 mm/hr, 10 mm/hr 한계강우강도를 가진 등가타원이 각각 한 개씩 나타난다. 그러나 3시간부터는 호우의 중심이 2개로 증가하면서 등가타원의 크기도 증가한다. 4시간부터는 한계강우강도가 25 mm/hr 이상인 등가타원이 나타나기 시작하고, 5시간에는 25 mm/hr 한계강우강도를 갖는 등가타원의 중심이 이동하면서, 6시간에는 25 mm/hr 한계강우강도를 갖는 등가타원이 2개로 늘어난다. 시간이 지남에 따라 등가타원의 개수와 크기가 모두 증가하고 있는 것이다.

Fig. 4에서는 또한 매시간 강우강도가 지도에 음영으로 나타나는데 강우강도가 약할수록 밝게, 강우강도가 강할수록 어둡게 표시된다. 강우강도가 30 mm/hr 이상인

Fig. 5. Temporal Change of Equivalent Ellipses Derived with Respect to Thresholds 3, 10, and 25 mm/hr

곳은 Fig. 4의 한반도 지도에서 검은색으로 표시되는데, 호우 발생 8시간 후에 검은색으로 나타나는 부분의 면적이 가장 넓고 뚜렷하게 보인다. 또한 이 시간에는 강우강도가 25 mm/hr 이상인 지점이 3개 (산청, 진주, 함천)가 되고, 9시간에 강우강도가 25 mm/hr 이상인 지점의 한 시간 전이므로 총 4개의 지점에서 9개의 등가타원이 결정된다. 8시간에 나타난 등가타원의 중심은 대부분 한곳으로 집중 되어있고, 동일한 한계강우강도를 가진 등가타원들은 모두 비슷한 크기와 회전각으로 결정되었다. 8시간을 지나 9시간부터 검은색으로 나타나는 부분이 조금씩 벌어지면서 등가타원의 크기가 감소하기 시작하고, 10, 11, 12 시간에 나타나는 등가타원은 서로 중심이 조금씩 떨어지면서 분산된 형태를 보이고 있다. 따라서 총 12시간 지속된 호우사상 동안 호우발생 8시간 뒤에 산청, 진주, 함천을 중심으로 강우량이 가장 많았고, 산청된 등가타원이 모두 비슷한 크기와 비슷한 회전각을 가지고 가장 넓은 지역에 분포되고 있는 것으로 보아 한반도의 중부이남 대부분 지역에서 비교적 강한 비가 내린 것을 파악할 수 있다.

이상과 같이 유도된 각 등가타원을 한계강우강도에 따라 구분하면 Fig. 5와 같다. 한계강우강도가 가장 작은 3 mm/hr의 경우에는 호우시작과 동시에 등가타원이 나타난다. 시간이 지남에 따라 타원의 크기가 커짐과 동시에 타원의 개수도 증가한다. 한계강우강도가 10 mm/hr인 경우의 등가타원은 한계강우강도 3 mm/hr의 등가타원보다 한 시간 늦게 나타나고, 그 크기도 상당히 줄어든다. 3

mm/hr 한계강우강도 등가타원이 최대 네 개 까지 결정된 것에 비해, 10 mm/hr 한계강우강도 등가타원은 최대 세 개만 까지 나타나고 있다. 한계강우강도가 가장 큰 25 mm/hr 경우에는 한계강우강도 10 mm/hr의 등가타원보다 한 시간 늦게 나타나고 한 시간 먼저 끝나는 양상을 보인다. 등가타원의 크기가 매우 작아져서 대부분 호우중심 부분만을 둘러싸고 있으며, 호우가 정점에 달하는 8시간에서 최대 3개의 등가타원을 나타내고 있다. 당연히 한계강우강도가 커질수록 결정되는 등가타원의 개수와 크기는 감소하고, 등가타원이 나타나는 시간도 늦어지게 된다.

세 가지 한계강우강도에 따라 결정된 호우상의 평균 면적, 호우상의 평균 강우강도, 등가타원 중심의 평균 강우강도, 등가타원의 장축과 단축의 평균 길이, 평균 회전각, 평균 형상지수를 정리하면 Table 2와 같다. 한계강우강도가 증가함에 따라 등가타원의 장축과 단축의 평균 길이, 호우상의 평균 면적은 감소하고, 등가타원 중심의 평균 강우강도와 호우상 면적 내 평균 강우강도는 증가하고 있다. 또한 형상지수 R_h 는 등가타원의 반단축 b 와 반장축 a 길이비의 제곱이므로 평균 형상지수 R_h 값을 통해 등가타원의 평균적인 형태를 짐작할 수 있다. Table 2를 보면 대상호우의 형상지수 R_h 는 가장 작은 한계강우강도에서 0.36, 중간 한계강우강도에서 0.32, 가장 큰 한계강우강도 0.37로 계산되었다. 한계강우강도에 따라 증가하거나 감소하는 경향을 보이지는 않았지만 세 가지 경우 모두 비교적 비슷한 값으로 결정되었다.

Table 2. Characteristics of Equivalent Ellipses Derived with Respect to Thresholds 3, 10, and 25 mm/hr

Threshold (mm/hr)	Average degree (°)	Average length of major axis (km)	Average length of minor axis (km)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Average shape index R_i	Average area of rainfall (km ²)	Average center intensity (mm/hr)
3	8.7	235.9	164.6	10.4	0.36	38079.2	28.3
10	357.8	175.6	81.4	19.4	0.32	11082.7	32.8
25	353.1	93.5	51.7	32.2	0.37	4214.1	47.3

참고로, Hansen et al. (1982)은 미국에서 발생한 주요 호우를 분석하여 호우의 가장 대표적인 형상은 타원형임을 파악하였고, 지속기간에 상관없이 53개 호우의 장축/단축의 비, 그리고 각각의 경우 호우장의 면적에 대한 연구하였다. 그 결과 호우의 규모가 작을수록 장축/단축의 비율이 작게 나타나는 경향이 있었고, 호우의 규모가 5,000 mi²(약 13000 km²)에서 50,000 mi²(약 130,000 km²)사이 일 때에는 장축/단축의 비율이 대부분 2로 나타났다. 또한 호우의 규모가 커질수록 장축/단축의 비율이 증가하여 3에 가까워진다는 것을 관찰하였다. Feral et al. (2000)은 1, 3, 5, 8, 12, 16 mm/hr의 다양한 한계강우강도를 사용하여 호우장을 타원형으로 정량화 하고 이 때 타원의 장축, 단축의 길이를 계산한 결과, 한계강우강도와 상관없이 장축의 길이가 단축의 길이보다 2배 더 긴 것으로 나타났다. Table 2에서 각 한계강우강도에 따라 결정된 장축과 단축의 평균길이를 이용하여 장축/단축의 길이비를 계산해 보면, 3 mm/hr 한계강우강도에서 1.80, 10 mm/hr 한계강우강도에서 2.16, 25 mm/hr 한계강우강도에서 1.81의 비율을 보이고 있다. 세 가지 경우 모두 장축과 단축의 길이비가 대략 2에 가까운 것을 알 수 있고, 이는 선행 연구들과의 결과와도 어느 정도 일치함을 보여주었다. 또한 한국 수자원학회 (2008)에 따르면 현재 우리나라의 경우 PMP 산정 시 이산형 (isohyet) 공간분포를 사용하고, 이 때 가상호우의 형상비는 2:1을 사용한다. 본 연구의 경우에도 가상호우의 장축/단축의 비가 약 2:1로 이 연구와 유사한 것으로 확인되었다.

3.3 호우사상을 대표하는 등가타원의 결정

만일 매 시간별로 결정된 등가타원이 일정한 특성을 가지고 있다면 가상 호우사상을 대표하는 등가타원의 결정이 가능해진다. 이런 등가타원을 대표 등가타원이라고 하자. 이 대표 등가타원은 물론 앞서 이용한 한계강우강도 별 등가타원의 평균적인 특성이 통계적으로 유의한 경우에 성립하는 개념이 된다.

대표 등가타원을 선정하기에 앞서 한계강우강도 별 등가타원의 평균적인 특성을 도출할 수 있다. 먼저 등가

타원의 방향, 즉 회전각의 평균과 신뢰구간을 구하는 것을 생각해 보자. 등가타원의 회전각처럼 방향성을 가진 자료의 경우, 평균과 신뢰구간을 구할 때 자료의 벡터특성을 이용해야 한다. 유철상과 박정열 (2010)에 의하면 다음과 같은 방법으로 평균 회전각 ω 와 신뢰구간을 구할 수 있다.

$$\omega = \begin{cases} \tan^{-1}(S/C) & S > 0, C > 0 \\ \tan^{-1}(S/C) + \pi & C < 0 \\ \tan^{-1}(S/C) + 2\pi & S < 0, C > 0 \end{cases} \quad (34)$$

여기서, $C = \sum_{i=1}^n \cos \omega_i$, $S = \sum_{i=1}^n \sin \omega_i$ 이다.

평균 회전각 ω 의 신뢰수준 $(1-\alpha)$ 에 대한 신뢰구간은 원형표준오차(circular standard error) $\hat{\sigma}$ 와 원형분산 $\hat{\delta}$ 를 추정하여 계산할 수 있다.

$$\hat{\sigma} = \hat{\delta}/n \quad (35)$$

$$\hat{\delta} = (1 - \hat{\rho}_2)/(2\hat{\rho}_1) \quad (36)$$

여기서,

$$\hat{\rho}_1 = (1/n) \sum_{i=1}^n \cos(\omega_i - \bar{\omega}) \quad (37)$$

$$\hat{\rho}_2 = (1/n) \sum_{i=1}^n \cos 2(\omega_i - \bar{\omega}) \quad (38)$$

주어진 원형분산의 추정치를 가지고, 평균 회전각의 신뢰수준 $(1-\alpha)$ 에 대한 신뢰구간은 Eq. (39)과 같다.

$$(\bar{\omega} - \sin^{-1}(z_{\alpha/2} \hat{\sigma}), \bar{\omega} + \sin^{-1}(z_{\alpha/2} \hat{\sigma})) \quad (39)$$

한계강우강도별로 평균 회전각과 신뢰구간이 Fig. 6에 표시되어 있고, 계산결과는 Table 3과 같다. Fig. 6에서 화살표로 표시된 선이 평균 회전각을 가리키고, 회색으로 열게 칠해진 부분이 95% 신뢰수준에 대한 신뢰구간을 의미한다. 일반적으로 신뢰 구간이란 $(1-\alpha)$ 의 신뢰수준에서 모수의 참값(모평균)이 포함될 구간을 나타내는 것으로, 점추정값(평균)이 모수와 정확히 일치하리라 기대하기 어렵기 때문에 점추정값(평균)의 정확성을 길이로 나

Fig. 6. Rose Diagram of Rotational Angle ω , Mean Value (solid line) and Confidence Interval with Respect to Thresholds of 3, 10, and 25 mm/hr

Table 3. Confidence Intervals of Mean Totalational Angle ω with Respect to Thresholds 3, 10, 25 mm/hr and Total

Threshold	95% confidence intervals of mean degree of ellipses (°)			
	3 mm/hr	10 mm/hr	25 mm/hr	Total
Upper limit	14.9	6.3	3.6	6.6
Mean value	8.7	357.8	353.1	1.8
Lower limit	2.5	349.3	342.6	357.0

Table 4. Confidence Intervals of Mean Length of Major, Minor Axis

Threshold	95% confidence intervals of mean length of major and minor axis (km)					
	Length of major axis			Length of minor axis		
	3 mm/hr	10 mm/hr	25 mm/hr	3 mm/hr	10 mm/hr	25 mm/hr
Upper limit	314.0	198.3	115.2	175.9	89.8	61.4
Mean value	295.6	175.6	93.5	164.6	81.4	51.7
Lower limit	277.7	153.0	71.8	153.3	73.0	42.0

타낸 것이다 (Walpole et al., 2007).

이러한 분석에서 중요한 점은 과연 세 가지 다른 한계 강우강도에 대해 추정한 대표타원의 방향이 일치한다고 가정할 수 있는지를 판단하는 것이다. 만일 그렇다면 설계 호우의 작성이 훨씬 용이해 질 수 있기 때문이다. 본 연구 대상 호우의 경우, Table 3의 결과를 참고하면, 먼저 한계 강우강도 3 mm/hr인 경우 등가타원의 평균 회전각은 8.7°이고, 95% 신뢰수준에 대한 신뢰구간은 2.5°에서 14.9°로 나타난다. 한계강우강도 10 mm/hr의 경우 평균 회전각은 357.8°이고, 95% 신뢰수준에 대한 신뢰구간은 349.3°에서 6.3°로, 한계강우강도 25 mm/hr의 경우 평균 회전각은 353.1°이고, 95% 신뢰수준에 대한 신뢰구간은 342.6°에서 3.5°로 나타난다. 즉, 본 연구의 대상 호우사상은 세 개의 한계강우강도에 대해 추정한 대표타원의 방향성에 대한

신뢰구간이 모두 중복되는 구간이 존재함을 확인할 수 있었고, 따라서 각각의 경우가 서로 다른 방향성을 갖는다고 판단할 수 없다. 또한 한계강우강도에 상관없이 계산한 모든 등가타원을 대표하는 평균 회전각은 1.8°로 계산되었고, 이 평균 회전각이 각 한계강우강도에 대해 추정한 대표 회전각의 신뢰구간에 모두 포함되므로 대표 등가타원의 회전각으로 판단할 수 있을 것이다.

등가타원의 회전각에 이어 등가타원의 장축과 단축의 평균길이에 대해 생각해 볼 수 있다. 먼저, 각 한계강우강도 별 등가타원의 장축과 단축의 평균길이 $\bar{x}$ 를 산술평균을 통해 구하고, 각 경우에 대한 표준편차 s 를 이용하여, 장축과 단축의 평균길이에 대한 $(1-\alpha)$ 의 신뢰수준에 대한 신뢰구간을 구할 수 있다. 산정된 평균길이와 신뢰구간은 Table 4에 정리하였다.

Fig. 8. The Representative Equivalent Ellipses and Their Confidence Intervals with Respect to Thresholds of 3, 10 and 25 mm/hr

등가타원의 형태에 대한 분석에서 가장 중요하게 검토되어야 할 것은 과연 추정된 3개의 대표타원이 동일한 형태일 수 있느냐 하는 것이다. 즉, 세 타원의 형상계수 또는 장축과 단축의 비가 일정한지 살펴보는 것이다. 본 연구에서는 앞서 간단히 언급했던 장축과 장축의 비 2:1과 추가로 2.5:1의 상황을 검토해 보고자 한다. 먼저, 2:1의 경우는 세 가지 한계강우강도의 경우 모두 가능한 것으로 나타난다. 즉, 장축의 신뢰구간 및 단축의 신뢰구간에 대해 장축과 단축의 비 2:1을 만족하는 값을 찾아낼 수 있다. 그러나 2.5:1의 경우는 그렇지 못하다. 한계강우강도 3mm/hr의 경우에 이러한 비율은 만족시키지 못하는 것으로 나타난다. 반면에 한계강우강도 10, 25 mm/hr의 경우, 장축의 신뢰상한값과 단축의 신뢰하한값을 이용하면 2.5:1의 형태까지도 만족시킬 수 있는 것으로 나타난다.

마지막으로, 이상과 같이 살펴본 내용을 종합하여, 본 연구의 대상호우에 대한 한계강우강도별 대표 등가타원을 나타내면 Fig. 8과 같다. 세 개의 대표 등가타원은 실선으로 표시되어 있고, 이 등가타원들은 모두 동일하게 1.8°만큼 기울어져 있다. 또한 회색영역으로 표시된 것은 각 대표 등가타원의 장축과 단축에 대한 95% 신뢰수준의 신뢰구간이다.

4. 결론

본 연구에서는 등가타원의 개념을 이용하여 호우사상의 경량화를 시도하였다. 3, 10, 25 mm/hr의 세 가지 한계강우강도에 따라 호우상의 면적을 결정하고, 호우상 면적의 최소, 최대 관성모멘트를 계산하여 등가타원을 결정하였다. 유도된 등가타원의 특성을 살펴보고, 한계강우강도별 평균 등가타원을 계산하여 호우사상을 대표하는 등가타원을 결정하였다. 또한 평균 등가타원의 신뢰구간을 추

정하여 평균 등가타원의 대표성을 판단해 보았다.

유도된 등가타원을 한계강우강도 별로 살펴본 결과, 3 mm/hr 한계강우강도 등가타원은 강우시작과 동시에 등가타원이 생성되어 강우 종료까지 등가타원이 계속 존재하고, 10 mm/hr 한계강우강도 등가타원은 3 mm/hr 한계강우강도 등가타원에 비해 한 시간 늦게 나타난다. 25 mm/hr 한계강우강도 등가타원은 10 mm/hr 한계강우강도 등가타원 보다 두 시간 늦게 발생하고, 한 시간 먼저 사라지게 된다. 시간이 지남에 따라 결정된 등가타원의 크기와 개수는 점점 증가하게 되고, 최대 강우강도를 나타내는 8시간이 지난 후에는 점차 등가타원의 개수와 크기가 감소하게 된다.

한계강우강도 별 평균 등가타원의 장축과 단축의 길이는 산술평균을 통해 산정하였으며, 세 개의 평균 등가타원의 장축/단축의 비는 약 2:1로 나타나는 것을 확인하였다. 평균 등가타원의 평균 회전각은 방향성을 가진 자료의 백터 성분을 고려하여 산정 한 결과, 각각 8.7°, 357.8°, 353.1°로 나타났다. 또한 한계강우강도 상관없이 모든 등가타원을 대표하는 평균 회전각을 계산한 결과 1.8°로 계산되었다. 한계강우강도 상관없이 구한 평균 회전각과 한계강우강도별로 구한 평균 회전각의 95% 신뢰수준에 대한 신뢰구간이 중첩되는 부분이 거의 유사하여, 한계강우강도 상관없이 구한 평균 회전각 1.8°가 대표 등가타원의 회전각이라 할 수 있을 것으로 판단되었다.

한계강우강도별로 추정된 대표타원의 형태는 장축과 장축의 비 2:1을 모두 만족시키는 것으로 나타났다. 그러나 장축과 단축의 비 2.5:1은 한계강우강도 10, 25 mm/hr의 경우에는 만족되나, 한계강우강도 3 mm/hr의 경우에는 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 결론적으로 본 연구의 대상 호우사상을 대표하는 타원의 형태로는 2:1이 보다 적절한 것으로 확인되었다. 향후 좀 더 다양한 호우사상의 적용을 통하여 호우사상의 공산형태에 대한 경량화 및 검증이 필요한 것으로 파악되었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(KRF-2008-313-D01083). 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

김규호, 박성식, 박재현 (2001). "설계강우를 위한 면적우량 환산계수 산정." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제4-B호, pp. 381-391.

- 김남원, 원유승, 이정은 (2005). “호우중심형 면적우량 감소계수.” **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1502-1505.
- 김원, 윤강훈 (1992). “면적우량환산계수의 산정과 그 지역적 변화.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제25권, 제3호, pp. 79-86.
- 건설교통부 (2007). **홍수량 산정기법 가이드라인 보고서**. 국토해양부 (2008a). **한강유역종합치수계획 요약보고서**. 국토해양부 (2008b). **치수정책 수립을 위한 강우-유출 모형의 적용성 분석 연구**.
- 김제한 (2005). 수문계의 수학적 모형-선형계를 중심으로-, 새론.
- 오경두 (2009). “미래지향적인 소하천 치수계획을 위한 소고.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제42권, 제5호, pp. 23-37.
- 유철상, 김경준 (2004). “혼합분포를 이용한 면적감소계수의 산정.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp. 759-769.
- 유철상, 박정열 (2010). “호우사상의 대표 이동방향 결정.” **한국방재학회논문집**, 제10권, 제2호, pp. 99-102.
- 윤용남 (2007). 수문학-기초와 응용. 청문각.
- 윤용남, 강성규, 장수형 (2004). “유역의 시 공간적 분포특성을 고려한 면적감소계수 산정.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1112-1116.
- 정종호, 윤용남 (2003). 수자원설계실무. 구미서판.
- 정종호, 나창진, 윤용남 (2002). “한강유역이 면적감소계수 산정.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제35권, 제2호, pp. 173-186.
- 한국수자원학회 (2008). **PMP 및 PMF 산정절차 지침수립**. Daydyuk, V., Bunton, J.D., and Guo, Y.J. (2009). “Study on high rate long range wireless communications in the 71-76 and 81-86 GHz bands.” *Proceedings of the 39th European Microwave Conference*, Italy, pp. 1315-1318.
- Doswell, C.A. (1993). “Flash flood-producing convective storms: Current understandings and research.” *Joint workshop on Natural Hazards*, Barcelona, Spain, pp. 8-11.
- Eagleson, P.S. (1970). *Dynamic Hydrology*; McGraw Hill.
- Feral, L., Mesnard, F., Sauvageot, H., Castanet, L., and Lemorton, J. (2000). “Rain cells shape and orientation distribution in south-west of france.” *Physics and Chemistry of the Earth part B*. Vol. 25, No. 10-12, pp. 1073-1078.
- Foufoula-Georgiou, E. (1989). “A probabilistic storm transposition approach for estimating exceedance probabilities of extreme precipitation depths.” *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 5, pp. 799-815.
- Goldhirsh, J., and Musiani, B. (1986). “Rain cell size statistics derived from radar observations at Wallops Island, Virginia.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE24, No. 6, pp. 947-954.
- Hansen, E.M., Schreiner, L.C., and Miller, J.F. (1982). “Application of probable maximum precipitation estimates-United States East of the 105th Meridian” Hydrometeorological Report, No. 52, National Weather Service, Washington, DC, pp. 1-168.
- Hershfield, D.M. (1984). “Extreme rainfall intensities.” *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, Vol. 35, No. 1-2, pp. 67-80.
- Huff, F.A. (1967). “Time distribution of rainfall in heavy storms.” *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Jensen, N.E., and Pedersen, L. (2005). “Spatial variability of rainfall: Variations within a single radar pixel.” *Atmospheric Research*, Vol. 77, pp. 269-277.
- John, F.E.J., Mark, L.V., and Pierre, Y.J. (2007). “Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed.” *Journal of Hydrology*, Vol. 347, pp. 229-241.
- Kamran, H.S., David, C.G., Donald, E.M., and Soroosh, S. (2003). “Spatial characteristics of thunderstorm rainfall field and their relation to runoff.” *Journal of Hydrology*, Vol. 271, pp. 1-21.
- Lascelles, B., Favis-mortlock, D.T., Parsons, A.J., and Guerra, A.J.T. (2000). “Spatial and temporal variation in two rainfall simulators: Implications for spatially explicit rainfall simulation experiments.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, pp. 709-721.
- Moussa, R. (2003). “On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response.” *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 33-58.
- Pvordanovic, P., Cunderlik, J., and Simonovic, S.P. (2005). “Synthetic storm model for climate change impact modeling.” 17th Canadian Hydrotechnical Conference, pp. 39-46.
- Suyanto, A., O'Connell, P.E., and Metcalfe, A.V. (1995). “The influence of storm characteristics and catchment conditions on extreme flood response : A case

study based on the brue river basin, U.K.” *Surveys in Geophysics*, Vol. 16, No. 2, pp. 201-225.

Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., and Ye K. (2007). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. Pearson Education.

Watts, L.G., and Calver, A. (1991). “Effects of spatially-distributed rainfall on runoff for a conceptual catchment.” *Nordic Hydrology*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-14.

Wilson, L.L., and Fofoula-Georgiou, E. (1990). “Regional rainfall frequency analysis via stochastic storm transportation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 7, pp. 859-880.

논문번호: 10-032	접수: 2010.04.19
수정일자: 2011.02.15/04.15	심사완료: 2011.04.15