

유역형상을 고려한 도시 단위 소유역의 유출 해석 Runoff Analysis for Urban Unit Subbasin Based on its Shape

허 성 철* / 박 상 식** / 이 종 태***

Hur, Sung Chul / Park, Sang Sik / Lee, Jong Tae

Abstract

In order to describe runoff characteristics of urban drainage area, outflow from subbasins divided by considering topography and flow path, is analyzed through stormwater system. In doing so, concentration time and time-area curve change significantly according to basin shape, and runoff characteristics are changed greatly by these attributes. Therefore, in this development study of FFC2Q model by MLTM, we aim to improve the accuracy in analyzing runoff by adding a module that considers basin shape, giving it an advantage over popular urban hydrology models, such as SWMM and ILLUDAS, that can not account for geometric shape of a basin due to their assumptions of unit subbasin as having a simple rectangular form. For subbasin shapes, symmetry types (rectangular, ellipse, lozenge), divergent types (triangle, trapezoid), and convergent types (inverted triangle, inverted trapezoid) have been analyzed in application of time-area curve for surface runoff analysis. As a result, we found that runoff characteristic can be quite different depending on basin shape. For example, when Gunja basin was represented by lozenge shape, the best results for peak flow discharge and overall shape of runoff hydrograph were achieved in comparison to observed data. Additionally, in case of considering subbasin shape, the number of division of drainage basin did not affect peak flow magnitude and gave stable results close to observed data. However, in case of representing the shape of subbasins by traditional rectangular approximation, the division number had sensitive effects on the analysis results.

keywords : basin shape, urban runoff, time-area curve, FFC2Q, ILLUDAS

요 지

도시 배수구역의 유출특성을 해석하기 위하여서는 유역의 지형특성 및 유출경로를 고려하여 소유역을 분할하고 배수계통에 대한 유출량을 분석하게 되며, 이 과정에서 각 소유역의 도달시간과 시간-면적곡선은 유역형상에 따라 상이하게 구성되므로, 이로 인한 유출특성 또한 크게 변화하게 된다. SWMM 및 ILLUDAS 모형에서는 유역형상을 단순 직사각형으로 가정하여 해석함으로써 유역의 기하학적 형상이 지표면 유출에 미치는 영향을 충분히 반영하지 못하는 한계를 개선하기 위하여, 국토해양부의 FFC2Q 모형 개발연구에서는 유역형상을 고려하여 지표면 유출해석

* 경기대학교 토목공학과 박사수료

Ph.D candidate, Department of Civil Engineering, Kyonggi Univ., Seoul, 120-702, Korea
(e-mail: drhydro@kyonggi.ac.kr)

** 경기대학교 토목공학과 박사수료

Ph.D candidate, Department of Civil Engineering, Kyonggi Univ., Seoul, 120-702, Korea
(e-mail: sangsik74@naver.com)

*** 경기대학교 토목공학과 교수

Professor, School of Civi and Environmental Engineering, Kyonggi Univ., Seoul, 120-702, Korea
(e-mail: jtleee@kyonggi.ac.kr)

을 실시함으로써 유출분석의 정확도를 향상시키는 기법을 도입하였다. 즉, 지표면 유출해석을 위한 시간-면적곡선법의 적용에서 단위 소유역의 형상을 대칭형(사각형, 타원형, 마름모꼴), 분산형(삼각형, 사다리꼴), 집중형(역삼각형, 역사다리꼴) 형태로 각각 유형화하여 지표면 유출해석을 하였으며, 그 결과를 비교 분석한 결과 유역의 형상에 따라 유출특성이 크게 상이함을 알 수 있었다. 실제로 배수구역(군자 배수구역)에 적용한 결과 유역형상을 직사각형 보다는 마름모꼴로 적용한 경우에 첨두유출량과 유출수문곡선의 형태에서 실측치에 보다 접근하고 있음을 보여 줌으로써 개선된 결과를 제시하였다. 또한, 유역형상을 고려한 경우에는 첨두유출량의 경우 분할 수에 큰 영향이 없이 실측치와 유사한 안정된 값을 나타내고 있으나, 사각형으로 단순화한 경우에는 유역 분할 수가 계산 결과치에 민감한 영향을 주었다.

핵심용어 : 유역형상, 도시유출, 시간-면적곡선, FFC2Q, ILLUDAS

1. 서론

도시 배수구역의 유출특성을 해석하기 위하여서는 전유역을 배수계통을 고려하여 소유역으로 분할하게 되며, 각 소유역의 특성 및 주요 매개변수 등의 분석을 통해 유출량을 산정한다. 이때 첨두유출량에 매우 민감하게 반응하는 주요 유출 매개변수로는 유역면적, 불투수면적비, 유역길이(폭) 등이 있으며, 이들 매개변수를 적용하여 산정하는 도달시간, 유역형상에 따른 시간-면적곡선의 선택에 따라 유출해석 결과가 상이하게 나타날 수 있다. 따라서, 국토해양부 도시홍수재해관리기술연구단 연구(FFC2Q 모형)에서는 관측치 및 기존 모형들과의 비교를 통하여 개발모형의 적정성을 확인하였으며, 기존 도시유출모형에서 유역의 평면형상을 직사각형으로 단순 처리하는 방식으로부터 유역의 임의 형상을 유형화하여 지표면 유출해석을 하는 개선된 지표면 유출해석 기법을 도입한 프로그램을 개발하였으며, 이 논문에서는 이에 대한 구체적인 개념과 적용방법 및 그 개선효과를 분석하였다.

2. 지표면 유출해석과 유역형상

2.1 지표면 유출해석방법 및 도달시간의 산정

일반적으로 실무에서 적용되는 도시홍수 유출해석 모형으로서 RRL, ILLUDAS 및 SWMM 모형 등과 이들을 활용한 여러 상업용 모형들이 있다. 이들 모형에서 채택한 지표면 유출해석방법은 대부분 시간-면적곡선법과 운동과법 등이다. 이중 운동과법은 SWMM 모형에서 적용되고 있으며, 유역이 직사각형 형태를 가진다는 가정하에 계산되고 있다. ILLUDAS 모형에서의 시간-면적곡선의 작성에서도 SWMM 모형과 같이 유역형상이 직사각형이라는 가정하에 지표면 유출량을 산정한다. ILLUDAS, SWMM 모형에서의 지표

면 유출해석은 투수지역과 불투수지역에 같은 방법을 적용하고 있다.

국토해양부 도시홍수재해관리기술연구단의 FFC2Q (Flood Free City model for 2Q; Quantity and Quality) 모형(이종태, 2007; 김태화, 이종태, 2005)에서의 지표면 유출해석방법은 소유역의 유출특성에 따라 시간-면적곡선법, 운동과법, Clark 유역추적법 등 크게 3가지로 구분하여 산정할 수 있으며, 투수지역에서는 시간-면적곡선법과 Clark 유역추적법, 불투수지역에서는 시간-면적곡선법과 운동과법을 각각 선택하여 적용할 수 있도록 하였다. 또한, 유역의 형상을 고려하여 이에 따른 유출특성을 반영하였다.

등시간-면적곡선을 산정함에 앞서 도달시간의 산정은 매우 중요한 요소로서 도시유역의 도달시간 산정 방법으로는 Izzard식(1945), Hicks식(1944), Kerby식(1949), 운동과식(1965, 1973), SCS 평균유속식(1975) 등이 있으며, FFC2Q 모형에서는 ILLUDAS 모형에서와 같이 투수지역에서는 Izzard식, 불투수지역에서는 Hicks식을 각각 적용하였다(윤태훈, 윤용남, 1993).

Izzard식은 유역경사 $S < 0.04$, 강우강도(mm/hr)와 지표면길이(m)의 곱이 500 이하인 조건에서 실험을 통하여 유출수문곡선의 상승부에 대한 무차원 단위도를 개발한 것으로 강우강도가 증가할수록 평형상태에 도달하는 유출량의 도달시간은 감소하며 그 산정식은 다음과 같다.

$$t_c = \frac{3.173(0.1778I + C)L^{0.33}}{S^{0.33}I^{0.67}} \quad (1)$$

여기서, t_c 는 도달시간(min), I 는 단위시간당 유효강우량(mm/hr), L 은 지표면 유출길이(m), C 는 지체상수, S 는 유역경사(m/m)이다.

이 식에서 $I=1.0$ mm/hr, 지체상수 C 는 0.050으로 가

정하여 적용된다. 특이사항으로는 모든 투수지역은 불투수지역을 통과하여 유역의 유출구로 유입되는 것으로 산정되므로 투수지역의 도달시간은 최종적으로 불투수지역의 도달시간과 합산하여 적용된다.

유역 출구에 직접연결된 불투수지역의 도달시간 산정의 경우에는 Hicks식을 적용하며, 원래 이 식은 도로 배수구역에 적용되는 공식으로서 3.4~6.8 cms/km²으로 유량이 흐른다는 가정하에 Manning의 평균유속공식을 적용하여 산정하는 방식으로 초기 지체시간은 2분을 적용하였다(Eq. (2)).

$$t_c = \frac{L/V}{60.0} + 2.0 \quad (2)$$

여기서, $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$, t_c 는 도달시간(min), L 은 유역 길이(m), V 는 평균유속(m/s), n 은 Manning의 조도계수, S 는 유역경사, R 은 동수반경이다.

FFC2Q에서는 Manning식에서의 n 과 R 의 기본값을 0.02 및 0.06 m로 하였다.

2.2 유역형상을 고려한 FFC2Q 모형

도시유출해석을 위해서는 일반적으로 배수구역을 여러개의 소유역들로 나누고, 투수지역 및 불투수지역에 대한 지표면 유출수문곡선을 산정하게 된다. 이러한 과정을 통하여 얻어진 결과들은 유역 출구지점에 이르는 하류방향의 관거를 따라 흐름추적과 합성을 통하여 하류지점에서의 총 유출수문곡선을 구하게 된다. 이때, 설계 및 실측 강우는 등시간 간격으로 나누어 그 강우를 분할된 소유역에 적용한 후 그 유효우량에 의한 유출량과 소유역 출구점까지 도달하는데 걸리는 시간을 산정한다. 이때 소유역별 유역형상에 대하여 적정 형태를 고려하는 것은 유출특성을 개선하는데 매우 중요한 요소이다.

그러나, 도시가 격자형으로 잘 정비된 미국에서 개발된 모형으로서 ILLUDAS, SWMM 등에서는 소유역의 형상을 사각형 형태로 가정함으로써 우리나라의 실정에 부합되지 않은 경우가 많다. ILLUDAS에서는 지표면 유출해석방법으로 선형비례에 의한 시간-면적곡선법을 채택하고 있으나, 이는 모든 소유역이 도달시간과 각 계산시간간격에 의하여 나누어지는 면적이 동일한 직사각형의 면적을 가진다는 가정에 근거하고 있다. FFC2Q에서는 이를 개선하기 위하여 유역의 형상과 소유역 유출구의 위치를 고려하여, 유역의 형태를 대칭형(사각형, 타원형, 마름모꼴)과 분산형 및 집중형으로 유형화하여

선택적으로 적용함으로써 가능한 실제유역의 평면형상에 근사하도록 하였다.

2.2.1 시간-면적곡선

지표면유출량 산정방법중 시간-면적곡선법과 Clark 유역추적법에서 유역형상은 매우 중요한 매개변수로서 현재까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 시간-면적곡선에 대한 국내의 연구는 윤석영과 홍일표(1994) 등이 우리나라 국제수문개발계획(IIHP)의 대표유역인 위천유역의 동곡 소유역에 등시간도 작성 및 도달시간-집수면적으로부터 유출량 산정 및 도달시간 산정방법에 따른 등시간도 작성의 적용성 평가에 대한 연구가 있으며, 한국건설기술연구원(1994)에서는 등시간도 작성에 대한 기존 방법 및 경험식에 비하여 보다 손쉽게 산정할 수 있는 Clark-Kict 방법을 제시한 바 있다. 윤광원 등(1994)은 도달시간-집수면적도의 작성을 위한 소유역 구분방법을 유역특성에 따른 방법, 선형적인 방법, 비선형적인 방법으로 검토한 결과 그 영향이 비교적 크지 않은 것으로 판단한 바 있다. 성기원(2003)은 gamma 분포형 Clark 모형에서 TA를 도달시간-유하면적 관계가 아닌 도달시간-유출변화특성을 나타내는 합성TA를 단위면적으로 환산한 USTA로 정의하여 보다 손쉽게 시간-면적곡선을 산정하는 식을 제안하였다.

한편, 기존에 제시된 시간-면적곡선식은 ILLUDAS 모형 등에서 제시된 선형적인 방법인 Eq. (4), HEC-1 모형 등에서 제시된 비선형적인 방법인 Eq. (5), MOUSE 모형 등에서 제시된 유역의 형태를 고려한 방법인 Eq. (6) 등이 있다. 또한, 지형도를 통하여 사용자가 직접 등시권도로 부터 시간-면적곡선을 작성하는 방법 등으로 구분할 수 있다. 지표면유출량 산정을 위하여 기존의 유출모형에서는 다양한 방법으로 유역형상을 고려하였다. 즉, ILLUDAS, SWMM 모형에서는 유역형상을 사각형으로 단순화하여 적용하였으며, HEC-1 모형(Clark 법)에서는 일반적인 유역형상을 타원형으로 가정하여 계산하는 비선형적인 방법을 제시하였다. MOUSE 모형에서는 직사각형 이외에도 집중형과 분산형을 고려할 수 있도록 개발하였다(김태화 등, 2005). 한편, 정대명과 배덕효(2003)는 GIS 기법을 이용하여 시간-면적곡선을 객관적으로 산정할 수 있는 방법을 제안하였고, HEC-1의 비선형적인 방법과 비교한 결과 침투시간의 편차가 비교적 크게 나타났으나, 침투유출량의 크기에는 큰 차이가 없는 것으로 분석하였다. 조효섭 등(2003)은 GIS 기법으로 등시간도 작성을 수행한 바 있다. FFC2Q 모형에서는 유역형상을 대칭형과 분산형, 집중형으로 유형화하여 소유역에서 유

출을 지배하는 면적을 실제 형상과 유사할 수 있도록 다양화하였다.

(1) 선형적인 방법

$$A_r = T_r \quad (3)$$

(2) 비선형적인 방법

$$A_r = 1.414 T_r^{1.5} \quad 0.0 \leq T_r < 0.5$$

$$1 - A_r = 1.414(1 - T_r)^{1.5} \quad 0.5 \leq T_r \leq 1.0 \quad (4)$$

(3) 유역의 형태를 고려한 방법

$$A_r = 1.0 - (1 - T_r)^{\frac{1}{c}} \quad 0.5 < c < 1.0$$

$$A_r = T_r^c \quad 1.0 \leq c \quad (5)$$

여기서, A_r 는 누가면적비, T_r 는 도달시간비, c 는 시간-면적계수이다.

2.2.2 유역형상에 따른 시간-면적곡선

FFC2Q에서는 Fig. 1과 같이 유역의 일반적인 형상을 대칭형 형태인 사각형($n=1.0$), 타원형($n=1.5$) 및 마름모꼴($n=2.0$)과 사다리꼴 형태로서 집중형(converging)과 분산형(diverging)으로 유형화한 무차원 시간-면적 관계식을 유도하였다.

즉, 대칭형 유역형상은 상하류의 폭이 같은 사다리꼴 형태인 사각형 유역과 상하류의 폭이 없고 중앙부의 폭에 의해 유출이 크게 지배되는 타원형과 마름모꼴로 구분하였다. 사다리꼴 유역형상으로서 집중형은 상류의 폭이 하류의 폭에 비하여 넓어서 유역의 유출지배면적이 상류측에 위치하는 경우이며, 분산형은 상류폭에 비

하여 하류폭이 큰 경우로 지배면적은 하류측에 위치하게 되는 형태이다.

이 연구에서는 시간-면적곡선 산정시 관거가 유역 중심선에 위치한다는 가정하에 길이를 산정하고 관거길이에 따른 도달시간을 고려하여 유역형상별 유역의 누가면적비를 도달시간비로 시간-면적곡선식으로서 대칭형의 경우 Eq. (6), 집중형 및 분산형의 경우 Eq. (7)을 적용한다. 이때 하도는 유역폭의 중심을 따라 관류한다는 가정하에 도달시간에 따른 집수면적을 계산한다.

$$A_r = 2^{n-1} T_r^n \quad 0.0 \leq T_r < 0.5$$

$$1 - A_r = 2^{n-1} (1 - T_r)^n \quad 0.5 \leq T_r \leq 1.0 \quad (6)$$

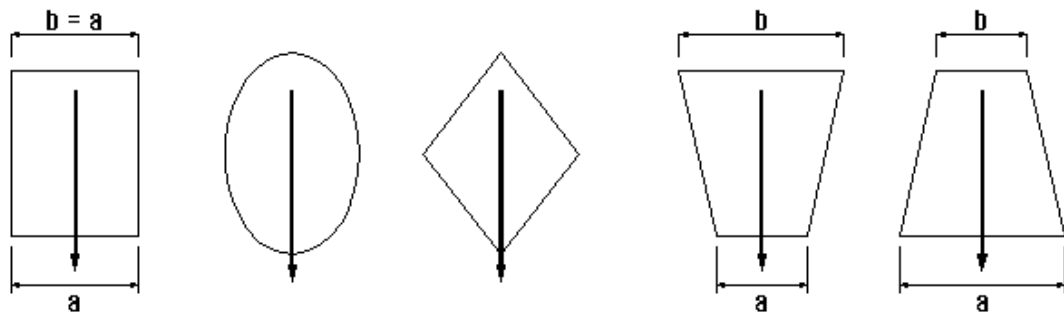
$$A_r = \frac{T_r}{b+a} \{(b-a)T_r + 2a\} \quad (7)$$

여기서, a 는 하류부 유역폭, b 는 상류부 유역폭, n 은 유역형상에 관한 계수(직사각형:1.0, 타원형:1.5, 마름모꼴형:2.0)이다.

2.2.3 유역형상과 유출특성

동일 유역면적과 유로연장 및 경사를 갖는 가상 배수구역의 형상(Tables 1 and 2)을 대칭형, 집중형, 분산형으로 각각 구분하고 각 유역형상에 따른 시간-면적곡선을 비교하였으며, 서울관측소(Huff 2분위)의 1시간 지속시간, 10년 빈도 66.0 mm 강우량에 대하여 유출특성을 분석하였다.

유역형상에 따른 시간-면적곡선의 산정결과 Fig. 2와 같이 대칭형의 경우에는 도달시간비 50%를 기준으로 누가면적비가 크게 변화하였으며, 집중형의 경우는 하류



(a) Symmetry type(rectangle, ellipse, lozenge) (b) Convergent type (c) Divergent type

Fig. 1. Classification of Basin Shapes

Table 1. The Condition of Hypothetical Basin

| Classification | Area (km ²) | Channel length (m) | Basin slope (%) | Manning' roughness | Remark |
|--------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------|
| hypothetical basin | 1.0 | 1,000 | 0.13 | 0.02 | |

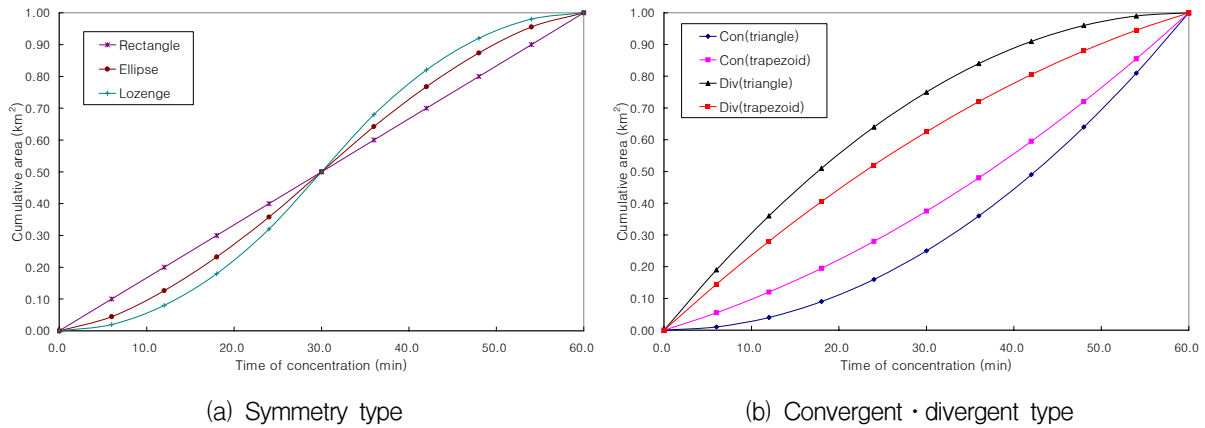


Fig. 2. Time-area Curve Considering Basin Shapes

Table 2. Basin Shape (Hypothetical Basin)

| Classification | | Width of upstream basin (m) | Width of downstream basin (m) |
|----------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Symmetry | Rectangle | 1000 | 1000 |
| | Ellipse | Width at center : 1250 | |
| | Lozenge | Width at center : 1250 | |
| Convergent | Inverse triangle | 2000 | 0 |
| | Inverse trapezoid | 1500 | 500 |
| Divergent | Triangle | 0 | 2000 |
| | Trapezoid | 500 | 1500 |

단에 누가면적이 작게 나타나다가 상류단으로 갈수록 커지며, 분산형은 집중형과 반대 현상을 나타내었다.

Fig. 3은 소유역 형상에 따른 지표면 유출곡선을 비교한 것이다. 대칭형 유역형상의 경우 첨두유출량의 발생시점이 수문곡선의 중앙에 위치하고 있으며, 집중형의 경우 후방에, 분산형의 경우에는 전방에 위치하고 있다. 이는 유역의 형상을 그대로 반영한 결과로서 시간-면적곡선법에서는 유역의 형상에 따른 지배면적의 위치에 따라 첨두홍수량의 발생시점이 크게 달라짐을 보여주고 있다. 사각형 유역을 중심으로 집중형 유역은 하류부에 유출면적이 지배적이며, 분산형의 경우에는

상류의 유역이 유출에 지배적인 것으로 분석되었다. 또한, 타원형과 마름모꼴의 경우에는 중앙부 유출면적이 지배적이었으며 마름모꼴 유역에서 보다 더 뚜렷한 유출량의 변화를 나타내고 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 첨두홍수량은 마름모꼴이 가장 크게 나타났으며, 사각형유역에서 가장 작은 첨두홍수량을 보였다. 삼각형과 사다리꼴 유역의 경우 집중형과 분산형에서 비슷한 첨두홍수량을 보이고 있다. 또한, 유역형상에 따라 Fig. 4와 같이 누가유출량 분포곡선의 변화폭도 매우 컸다.

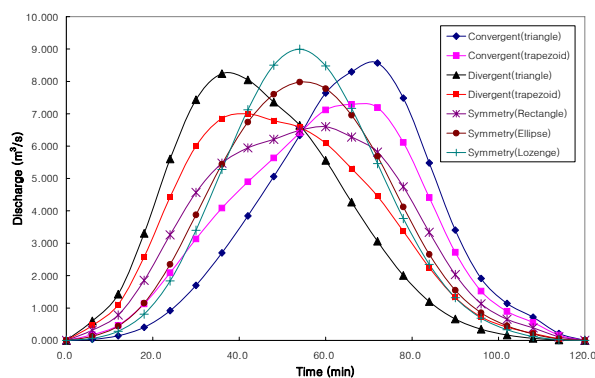


Fig. 3. Runoff Characteristic Considering Basin Shape

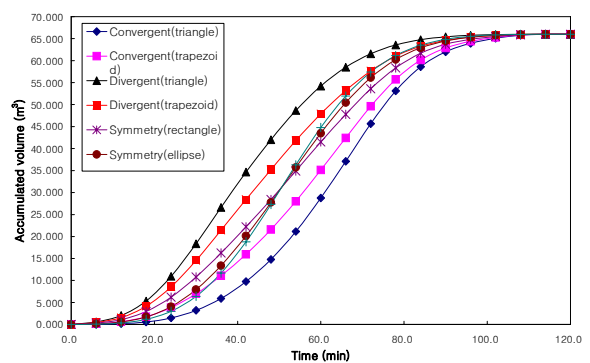


Fig. 4. Accumulated Volume Considering Basin Shape

Table 3. Comparison of Runoff Characteristics Considering Basin Shape (Hypothetical Basin)

| Classification | | Peak flow (cms) | Volume (m ³) | Concentration time (min) |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| Symmetry | Rectangle | 6.600 | 23,760 | 60 |
| | Ellipse | 7.977 | 23,759 | 60 |
| | Lozeng | 8.993 | 23,759 | 60 |
| Convergent | Inverse triangle | 8.567 | 23,760 | 72 |
| | Inverse trapezoid | 7.289 | 23,758 | 66 |
| Divergent | Triangle | 8.239 | 23,762 | 36 |
| | Trapezoid | 6.997 | 23,758 | 42 |

3. 시험유역에의 적용

3.1 시험유역 및 적용강우

이 연구에서는 실측치를 통하여 지표면 해석방법의 적정성을 판단하기 위하여 검토 대상 유역을 군자 배수구역(Fig. 5, Table 4)으로 선정하였다(백덕효 등, 2005). 지표면 유출해석에서 민감한 매개변수로는 불투수면적비, 관경사, 관 조도계수 등이 있으며, 이들 매개변수의 경우 지형도 및 관망도에 의하여 선정하였다(이종태,

2005). 유역형상에 따른 유출특성만을 분석하기 위하여 불투수/투수지역의 조도계수 및 지면저류 등의 유출매개변수는 모두 동일하게 적용하였다.

이 때 강우는 Table 5와 같이 '06년 5월 22일 및 '07년 6월 28일의 2개 실적 강우를 적용하였다.

3.2 유역형상의 영향

군자 배수구역에 대하여 적용 가능한 유역형상으로서 대칭형(사각형, 타원형, 마름모꼴) 및 집중형을 대상으로 각 유출특성을 비교 분석하였다.

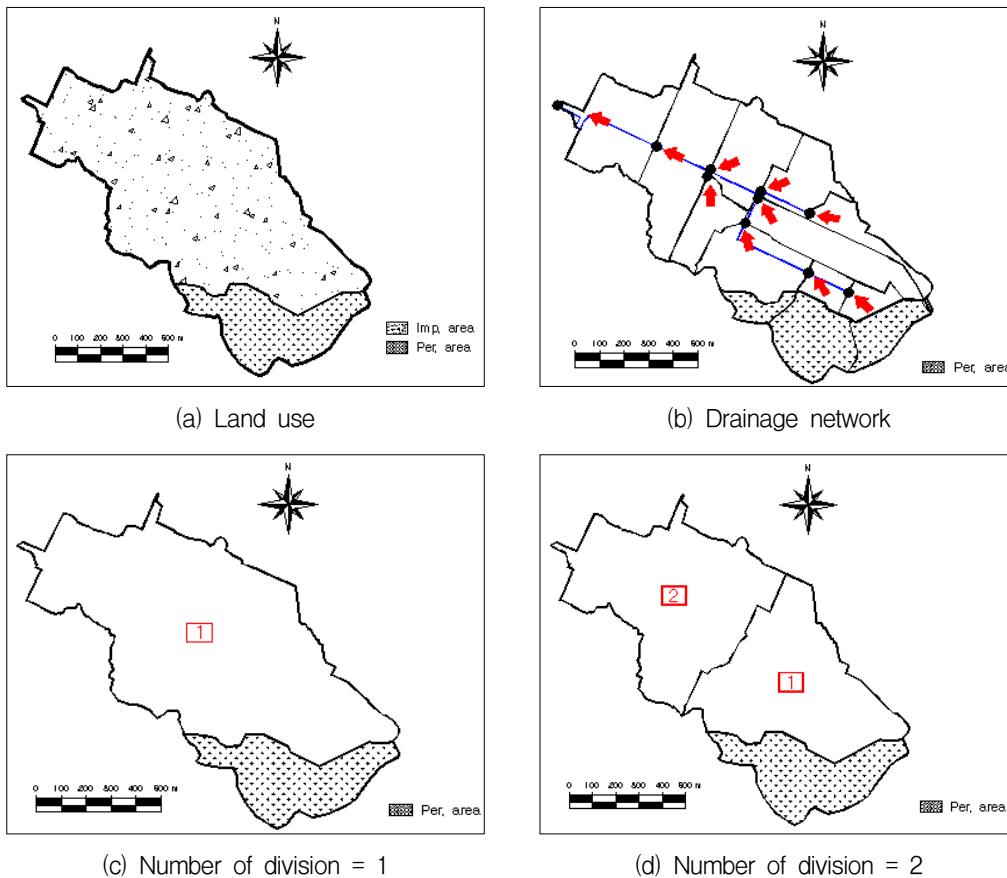
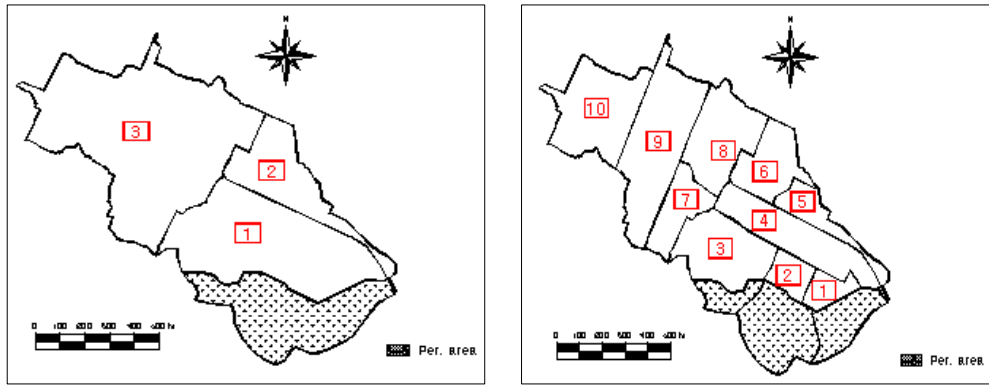


Fig. 5. Land Use, Drainage Network, and Division Number of Subbasin



(e) Number of division = 3

(f) Number of division = 10

Fig. 5. Land Use, Drainage Network, and Division Number of Subbasin(Continued)

Table 4. The Present Condition of Gunja Basin

| Name of basin | Area (km ²) | Channel length (km) | Location | Impermeable area (%) | Basin slope (%) | Soil type | Land use |
|---------------|-------------------------|---------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------|--|
| Gunja | 0.96 | 2.15 | Seoul Gunja-dong | 80 | 2.10 | B | Residential area : 49% Grass area : 20% |

Table 5. Actual Rainfall Event in Gunja Basin

| Classification | Time | Total rainfall (mm) | Duration (min) |
|----------------|--------------|---------------------|----------------|
| E1 | 2006. 05. 22 | 4.0 | 30 |
| E2 | 2007. 06. 28 | 11.0 | 80 |

군자 배수구역에서 2개의 강우사상에 대하여 FFC2Q 모형으로 전 배수구역을 단일유역으로 본 경우에 대하여 유역형상을 고려한 유출해석을 실시하였다. Table 6에서와 같이 유역형상의 선택이 결과치에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 유역형상을 마름모꼴로 채택할 때 E1 및 E2의 강우에서 실측치와 가장 유사한 결과를 보여주었다.

즉, 단일유역의 유역형상을 고려한 유출해석결과 전체적으로 첨두유출량, 수문곡선형상 및 도달시간에서 마름모꼴에서 실측치와 비교적 유사한 값을 보이고 있으며, 이는 군자 배수구역의 유역형태가 전체 불투수지역의 경우에서 마름모꼴 형태를 지니고 있는 점과 잘

일치하였다. 각 유역형상에 따른 유출특성 비교 결과는 Fig. 6 및 Table 6과 같다.

3.3 단위 소유역 형상을 고려한 유출특성 분석

한 유역을 여러 소유역 단위로 구분하고 각 소유역별 유역형태를 사각형, 집중형, 분산형 및 마름모꼴의 형태로 구분하여 적용함에 따른 계산결과치의 영향을 분석하기 위하여 Fig. 5와 같이 군자 배수구역에 대하여 적용한 소유역의 분할수 및 각 형상을 지형도 및 배수계통도를 바탕으로 적정 형상을 구분한 결과는 Table 7과 같다.

Table 7의 소유역별 적정 유역형상을 고려한 경우와

Table 6. Comparison of Runoff Characteristics Considering Basin Shape (Gunja Basin, Number of Division = 1)

| Classification | Observation | Peak flow (m ³ /sec) | | | |
|----------------|-------------|---------------------------------|---------|---------|-----------------------------|
| | | Symmetry Type | | | Convergent Type (Trapezoid) |
| | | Rectangle | Ellipse | Lozenge | |
| E1 | 0.853 | 0.524 | 0.704 | 0.858 | 0.551 |
| E2 | 2.307 | 1.973 | 2.085 | 2.353 | 1.859 |

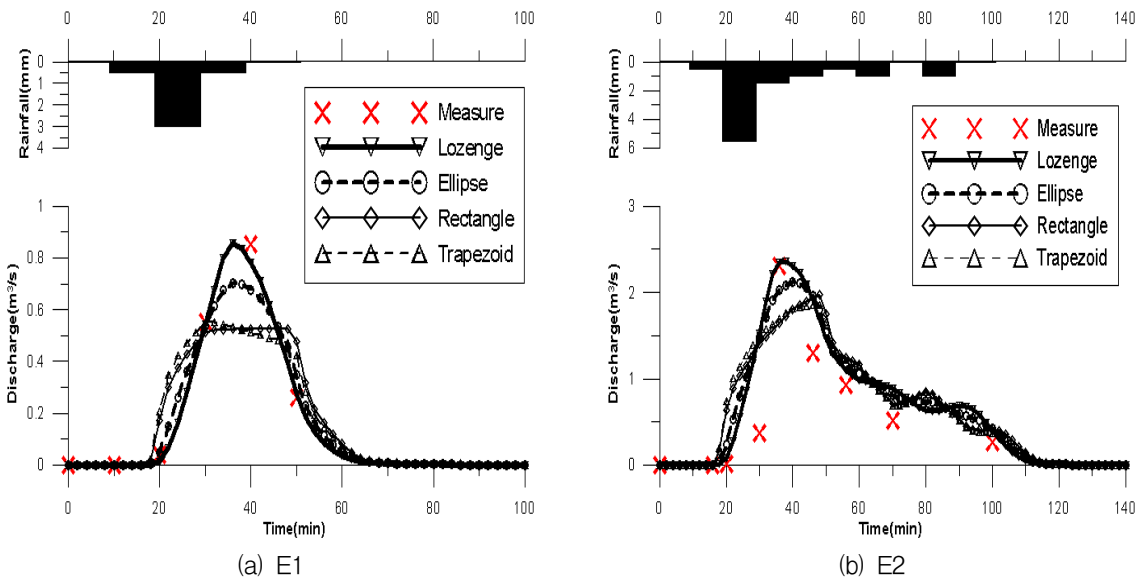


Fig. 6. Comparison of Hydrographs Considering Basin Shape (Gunja Basin, Number of Division = 1)

Table 7. Subbasin Shape (Gunja Basin)

| Number of division | Subbasin | Subbasin shape type | Basin area (m ²) | Width of upstream (m) | Width of downstream (m) |
|--------------------|----------|---------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 1-1 | Lozenge | 963,900 | 750 | 750 |
| 2 | 2-1 | Convergent | 432,700 | 750 | 100 |
| | 2-2 | Divergent | 531,200 | 550 | 750 |
| 3 | 3-1 | Convergent | 432,700 | 750 | 0 |
| | 3-2 | Convergent | 111,400 | 450 | 0 |
| | 3-3 | Divergent | 419,800 | 0 | 300 |
| 10 | 10-1 | Convergent | 75,700 | 260 | 0 |
| | 10-2 | Convergent | 117,500 | 300 | 100 |
| | 10-3 | Lozenge | 122,900 | 396 | 396 |
| | 10-4 | Rectangle | 103,700 | 108 | 108 |
| | 10-5 | Convergent | 43,300 | 126 | 0 |
| | 10-6 | Convergent | 68,100 | 284 | 0 |
| | 10-7 | Convergent | 53,400 | 140 | 70 |
| | 10-8 | Convergent | 97,000 | 324 | 0 |
| | 10-9 | Convergent | 158,000 | 640 | 390 |
| | 10-10 | Convergent | 124,500 | 390 | 100 |

기존의 모형처럼 전 소유역을 직사각형으로 단순화한 경우에 대하여 각각 계산하고 그 결과를 실측치와 비교하였다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 소유역의 형상을 고려한 경우에서 보다 실측치에 근접하는 개선된 결과를 보여주었다. 즉, 유역형상을 고려한 경우의 계산치는 전반적으로 실측치에 근접하였다. 그러나 전 소유역의 형상을 사각형으로 단순화하여 계산한 경우에는 실측치와의 편차가 컸으며, 소유역 분할 수가 증가할수록 개선된 결과를 나타내었다.

전체적으로 유역형상을 적정하게 고려한 경우의 계산값은 균일하게 직사각형으로 적용한 경우에 비하여 첨두유출량 및 수문곡선의 형상을 비교적 실측치에 근접하게 나타내어 유역의 유출특성을 잘 나타낼 수 있는 것으로는 판단된다. 한편, 직사각형 형태의 경우에서도 소유역의 분할 수가 많고 강우량이 작은 경우에는 유역형상의 단순화에 따른 오차가 감소되어 나감을 확인할 수 있었다. 즉, 실측치와 소유역 분할 수에 따라 유역형상 고려여부에 의하여 산정된 첨두유출량과의 비로 나

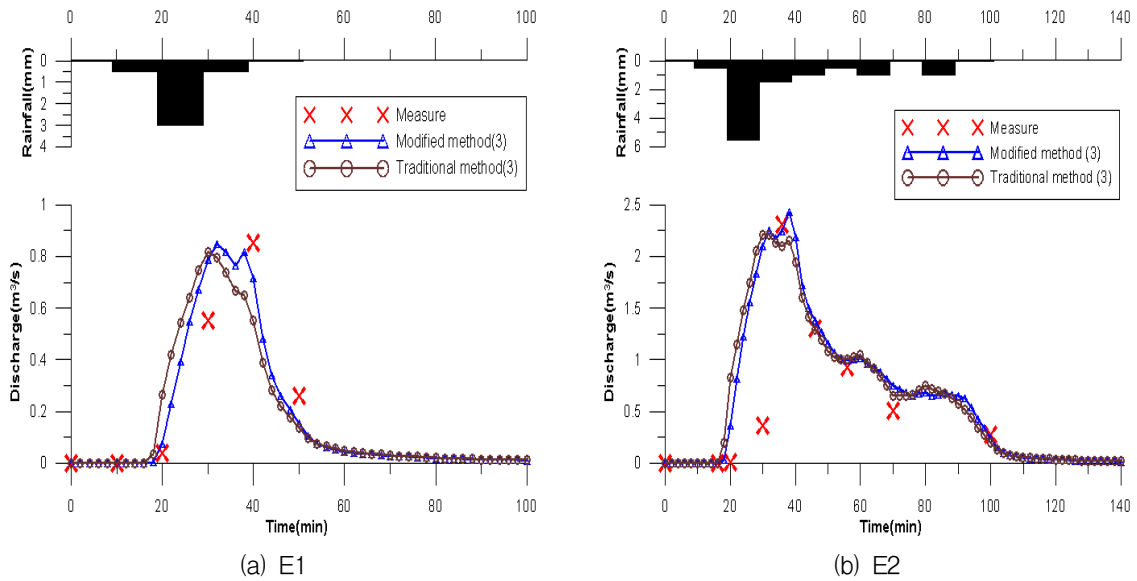


Fig. 7. Comparison of Hydrographs Considering Basin Shape (Gunja Basin)

Table 8. Comparison of Runoff Characteristics Considering Basin Shape (Gunja Basin)

| Classification | Observation | Peak flow (m³/sec) | | | | | | | | Ratio of Peak flow (%) ^(주) | | | | | | | |
|----------------|-------------|---|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|---|-----|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|-----|
| | | Modified method considering basin shape | | | | Traditional method(rectangle) | | | | Modified method considering basin shape | | | | Traditional method(rectangle) | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 10 | 1 | 2 | 3 | 10 | 1 | 2 | 3 | 10 | 1 | 2 | 3 | 10 |
| E1 | 0.853 | 0.858 | 0.849 | 0.849 | 0.870 | 0.524 | 0.773 | 0.819 | 0.867 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 2.0 | 38.6 | 9.4 | 4.0 | 1.6 |
| E2 | 2.307 | 2.353 | 2.479 | 2.434 | 2.235 | 1.973 | 2.194 | 2.210 | 2.204 | 2.0 | 7.5 | 5.5 | 3.1 | 14.5 | 4.9 | 4.2 | 4.5 |

(주) 침투홍수비율(%)은 계산치의 실측치에 대한 비율임.

타낸 결과 소유역형상을 고려한 경우에 유역 분할 수에 관계없이 비교적 안정된 값을 나타내고 있었으나 직사각형으로 단순화한 경우에는 그 변화폭이 커져 불안정한 결과를 나타냈다.

이 연구에서의 FFC2Q 모형은 유역형상을 고려함으로써 침투유출량에 있어서 직사각형으로 단순화한 기존 모형의 지표면 유출해석 방법을 크게 개선하였음을 알 수 있었으며, 특히 단일 유역에 대해서는 그 효과가 매우 큼을 알 수 있었다.

이 분석을 통하여 지표면 유출해석에서 유역의 형상이 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있었으며, 기존의 방법에서의 경우에는 소유역 분할 수가 증가할수록 그 영향이 감소되고 있는 점을 감안할 때 유역의 형상을 직사각형으로 단순 적용하는 기존의 모형에서는 유역의 적정 분할 수가 계산의 능률과 정확도의 향상에 중요한 요소임을 확인할 수 있었다.

E1, E2 강우사상을 통하여 관측유량과 계산유량의 통계적 특성치를 산정하고 계산의 정확도를 평가하기 위하여 상관계수(CC), 평균제곱오차(RMSE), 유출용적

오차(EQ) 등의 방법을 사용하였다.

유역형상 고려 여부에 따른 유출특성을 분석한 결과 Table 9에서 보는 바와 같이 침투유출량에서는 유역형상 및 소유역 분할수에 따른 영향이 가장 크게 나타났으며, 유역형상을 고려한 경우에 보다 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다. 침투발생시간은 유역 분할 수에 따라 큰 변화를 보이고 있으며, 이는 분할에 따른 관거의 짧은 도달시간에 기인하는 것으로 판단된다. 상관계수, 평균제곱오차, 유출용적오차의 경우에는 동일 분할 조건에서 유역형상을 고려한 경우에 양호한 결과를 나타내었다.

4. 비교 고찰

FFC2Q 모형에 의한 이상의 검토결과를 기존의 도시 유출모형으로서 국내에서 많은 검증을 거친 ILLUDAS, SWMM 모형과 비교하였다. 검토 대상강우는 앞서 적용한 강우와 동일한 강우사상을 적용하였으며, 소유역 분할 수를 10개로 동일하게 선정하였다.

비교결과 Table 10에 나타난 것과 같이 침투홍수량

Table 9. Analysis of Runoff Characteristics Considering Basin Shape (Gunja Basin)

| Classification | | Observation | Modified method considering basin shape | | | | Traditional method(rectangle) | | | |
|----------------|-------------------|-------------|---|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 10 | 1 | 2 | 3 | 10 |
| E1 | Peak flow (m/sec) | 0.853 | 0.858 | 0.849 | 0.849 | 0.870 | 0.524 | 0.773 | 0.819 | 0.867 |
| | Peak time (min) | 40 | 38 | 40 | 34 | 32 | 44 | 34 | 32 | 32 |
| | CC | - | 0.984 | 0.869 | 0.742 | 0.468 | 0.826 | 0.615 | 0.434 | 0.377 |
| | RMSE | - | 0.004 | 0.017 | 0.032 | 0.068 | 0.068 | 0.028 | 0.039 | 0.076 |
| | EQ | - | 0.164 | -0.669 | 2.374 | 0.859 | -5.985 | -0.783 | 1.364 | 1.364 |
| E2 | Peak flow (m/sec) | 2.307 | 2.353 | 2.479 | 2.434 | 2.235 | 1.973 | 2.194 | 2.210 | 2.204 |
| | Peak time (min) | 35 | 38 | 38 | 38 | 30 | 48 | 38 | 32 | 30 |
| | CC | - | 0.911 | 0.737 | 0.627 | 0.193 | 0.778 | 0.541 | 0.420 | 0.113 |
| | RMSE | - | 0.228 | 0.345 | 0.435 | 0.685 | 0.685 | 0.301 | 0.469 | 0.721 |
| | EQ | - | 41.448 | 41.151 | 43.281 | 41.103 | 39.640 | 42.682 | 44.024 | 41.561 |

Table 10. Comparison of Runoff Characteristics with Urban Runoff Model (Gunja Basin)

| Classification | Peak flow (m/sec) | | | | | Peak time (min) | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------|-------|-----------------|-----------------|--------------------|---------|------|
| | Observation | FFC2Q | | ILLUDAS | SWMM | Observation | FFC2Q | | ILLUDAS | SWMM |
| | | Modified method | Traditional method | | | | Modified method | Traditional method | | |
| E1 | 0.853 | 0.870 | 0.867 | 0.814 | 0.582 | 32 | 32 | 32 | 36 | 40 |
| E2 | 2.307 | 2.235 | 2.204 | 2.151 | 1.475 | 35 | 30 | 30 | 34 | 46 |

의 경우에는 유역형상을 고려한 FFC2Q, ILLUDAS 모형에서 실측과 유사한 값을 나타내고 있었으며, SWMM 모형에서는 침투유출량이 가장 작은 값을 나타내고 있었다. 이는 불투수지역과 투수지역을 별도로 계산하는 FFC2Q, ILLUDAS 모형과는 달리 두 지역을 합성하여 산정하는 SWMM 모형의 해석방법의 차이에서 의한 것으로 판단된다. 침투 도달시간의 경우에는 ILLUDAS와 SWMM 모형에서 유사한 값을 보였으나 FFC2Q 모형에서 약간 짧은 도달시간을 나타내었다.

5. 결 론

이 연구에서는 도시 단위 소유역의 형상을 대칭형(사각형, 타원형, 마름모꼴), 분산형(삼각형, 사다리꼴), 집중형(삼각형, 사다리꼴) 형태로 구분하여 적정 유역형상을 고려하여 무차원 시간-면적곡선을 산정하는 방법을 제시하였으며 이로 인한 해석결과의 향상 효과를 FFC2Q 모형에 의하여 분석하였다.

- 1) 유역형상을 대칭형(사각형, 타원형, 마름모꼴), 분산형(삼각형, 사다리꼴), 집중형(삼각형, 사다리꼴) 형 등으로 유형화하는 분류기법을 제시하고 FFC2Q에서 시간-면적법에 의한 지표면 유출해석

결과를 분석하였다.

- 2) 유역형상을 고려하여 유출특성을 분석한 결과 유역의 유출특성을 지배하는 면적의 위치에 따라 유출특성이 크게 상이함을 알 수 있었다. 즉, 침투 유출량의 경우에는 대칭형의 마름모꼴과 타원형, 분산형과 집중형의 삼각형 형태의 유역에서 크게 나타났으며, 사각형 유역에서 가장 작은 값을 나타냈다. 침투유출량 발생시간의 경우 집중형 유역에서 전방위, 일반형 유역에서 중앙, 분산형 유역에서 후방위에 발생하는 것으로 분석되었으며, 총유출체적은 유사한 값을 나타내었다.
- 3) 실측강우량을 통하여 군자 배수구역에 적용한 결과 침투유출량과 유출수문곡선의 형태에서 마름모꼴 유역이 가장 실측치와 유사하였으며, 이는 유역의 형상이 이에 유사한 형태이고 유역출구가 유출구 꼭지점으로 집중되는 형태를 가지는 군자 배수구역의 유역형태와 일치하는 결과를 나타내었다.
- 4) 유역형상을 고려한 경우에 분할 수와 상관없이 침투유출량이 실측치와 유사한 안정된 값을 나타내고 있으나, 사각형으로 단순화한 경우에는 유역

분할 수가 계산 결과치에 민감한 영향을 주었다.

- 5) 향후 개발중인 FFC2Q 모형의 지속적인 연구를 통하여 유역형상에 대한 정량화를 도모하여 보다 정밀한 도시유역 유출해석에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술혁신사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다. 또한, 본 연구의 체계와 방법에 대해 고견을 주신 고려대학교 윤재영 교수께도 감사드립니다.

참고 문헌

- 김태화, 김태민, 이종태 (2005). "MOUSE 모형의 적용성 향상을 위한 최적화 및 민감도 분석." **대한토목학회 2005년도 정기 학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1888-1891.
- 김태화, 이종태 (2005). "도시유역의 유출·수질해석을 위한 ILLUDAS-NPS 모형." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 791-800.
- 배덕효, 김형섭, 이종태, 김이현 (2005). **중랑천 시험유역 수문자료집**, 도시홍수재해관리기술연구단 기술보고서(FFC04-05).
- 성기원 (2003). "Gamma분포형 함수 적합을 이용한 Clark 모형의 매개변수 간접추정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제2호, pp. 223-235.
- 윤광원, 원석연, 윤용남 (1994). "CLARK 유역추적법에 의한 계획홍수량 산정에 미치는 매개변수의 민감도 분석." **한국수자원학회 논문집**, 제27권, 제4호, pp. 85-94.
- 윤석영, 홍일표 (1994). "소유역의 응답시간특성 산정방법에 따른 시간-면적도의 작성과 적용." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 279-284.
- 윤태훈, 윤용남 (1993). "합리식과 우수관거/ILLUDAS 모형." 제1회 수공학워크숍 교재.
- 이종태 (2005). **도시유출 해석모형의 실무적용 지침 (안) 및 적용예제**. FFC 04-01, 건설교통부 도시홍수재해관리기술연구단.
- 이종태 (2007). **도시하천 유역의 유출·수질해석기술**. 건설교통부 도시홍수재해관리기술연구단 제4차년도 중간보고서.
- 정대명, 배덕효 (2003). "시간-면적곡선의 유역유출해석 영향분석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제2호, pp. 211-221.
- 조효섭, 김계호, 정관수, 김재한 (2003). "GIS를 이용한 등시간도 작성의 평가." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 925-936.
- 한국건설기술연구원 (1994). **홍수유출예측을 위한 수리 수문학적 인자의 결정 : Clark 및 Nash 모형을 중심으로**. 건기연 94-WR-113.

(논문번호:08-12/접수:2008.01.24/심사완료:2008.03.21)