

MUSIC모형의 매개변수에 관한 민감도 분석

Sensitivity Analysis of the MUSIC Model Parameters

임장혁*, 연지웅**, 박성식***, 송재우****
Jang Hyuk Im, Ji Woong Yeoun, Sung Sik Park, Jai Woo Song

요 지

최근 집중호우에 의한 피해가 증가함에 따라 도시화에 따른 불투수 면적이 유출량 증가의 주요한 원인으로 지목되고 있으며 도시의 인구집중으로 인한 지하수의 난개발로 지하수 오염 및 고갈이 빠르게 진행되고 있다. 이에 도시의 지속적이고 건전한 물 관리를 위하여 우수유출저감시설이 고려되고 있으며, 정량적인 저감효과의 분석방법이 요구되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 호주에서 물관리 및 우수유출저감을 고려한 도시유역계획을 위해 이용되고 있는 MUSIC모형에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 향후 국내 우수유출저감시설에 관한 수문 해석시 MUSIC의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

MUSIC의 매개변수 중 불투수율과 토양특성이 매우 중요한 매개변수로 고려되고 있으므로, 본 연구에서는 투수지역의 최대저류깊이, Soil storage(mm), 강우초기 최대저류깊이의 포화정도, Initial storage(%), 지하수위에 도달할 수 있는 Field capacity(mm), 최대 침투율에 영향을 미치는 전조토양상태의 침투율을 정의하는 계수 a와 함수비 증가에 따른 최대 침투율 감소를 정의하는 지수 b 등의 매개변수에 대해 초기값을 중심으로 일정비율로 각 매개변수를 10단계로 구분하여 민감도 분석을 실시하였다.

주요 매개변수의 민감도 분석 결과로부터 MUSIC의 모의를 위해서는 불투수율의 민감도 변화 범위가 가장 넓고 첨두유출량과 총유출량 변화가 함께 일어나므로, 이를 가장 우선적으로 조정하고 이와 함께 토양특성을 반영하는 Soil storage와 Initial storage를 고려한다면 MUSIC을 이용하여 개발에 의한 유출변화와 다양한 우수침투시설 설치에 따른 저감효과를 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : MUSIC, 민감도 분석, 우수유출저감효과, 불투수율

1. 서 론

도시내 불투수지역에 침투형 우수유출저감시설을 설치하여 도시화로 인해 증가한 유출량, 첨두유량을 자연상태 수준으로 감소시키고 물순환 개선의 효과도 기대할 수 있으며 이를 위해 투수성 포장, 침투통, 침투층구 등 다양한 침투형 우수유출저감시설이 계획되고 연구되고 있는 실정이다. 따라서 침투형 우수유출저감시설의 설치에 따른 유출량 변화를 예측하여 이를 효과적으로 설치, 운영하기 위해서는 침투형 우수유출저감시설에 의한 저감효과를 분석하기 위한 연구가 필요하다. 이를 위하여 국내에서 모니터링, 수리모형실험을 통하여 침투형 우수유출저감시설에 의한 저감효과를 연구하거나 수문모형을 이용하여 저감효과를 분석할 수 있는 방법들이 연구되고 있다. 이러한 침투형 우수유출저감시설의 저감효과를 분석하기 위해 호주에서는 하천생태, 유량, 수질을 통합하여 도시와 자연 유역의 물순환 관리를 위한 모형 및 계획을 수립하는 CRC(Cooperative Research Center)에서 개발한 도시유출모형 MUSIC(Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualization)을 이용하여 효율적으로 택지개발계획을 계획, 평가하고 더불어 배수시설을 이용한 강우처리방법을 계획하기 위하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 침투형 우수유출저감시설의 저감효과 예측이 가능한 MUSIC 모형의 개념적 일별 강우-유출모형의 국내 적용 가능성을 연구하기 위해 홍제천 유역에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

* 정회원·홍익대학교 토목공학과 박사수료·E-mail : scryer@empal.com

** 정회원·한국수자원공사 임진강 건설단 사원·E-mail : najiwoong@hotmail.com

*** 정회원·홍익대학교 방재연구센터 연구원·E-mail : ssspark72@empal.com

**** 정회원·홍익대학교 토목공학과 교수·E-mail : jwsong@hongik.ac.kr

2. 연구의 방법 및 대상유역 현황

2.1. 연구의 방법

MUSIC의 검정을 위해 주변지역의 도시화로 인해 도시유출특성이 뚜렷한 홍제천 유역을 대상유역으로 정하고 모의결과와 실측치를 비교하여 주요 매개변수의 결정범위와 유출량에 대한 민감도 분석을 통해 수정된 매개변수를 이용하여 유출분석을 하였다. 민감도는 다른 요소의 변화에 대한 한 요소의 변화율을 말한다. 이와 같은 정의는 두 개의 미분계수를 의미한다. 민감도 방정식은 앙해함수(explicit function) F_o 를 Tayler 시리즈로 전개를 하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_o = x(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (1)$$

요소 F_o 는 어떤 모형의 결과 또는 모형의 한 성분의 결과이다. 요소 F_i 의 변호에 따른 요소 F_o 의 변화는 식 (2)와 같다.

$$X(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) = F_o + \frac{\partial F_o}{\partial F_i} + \frac{1}{2!} - \frac{\partial^2 F_o}{\partial F_i^2} \Delta F_i^2 + \dots \quad (2)$$

만약 비선형항이 선형항과 비교하여 상대적으로 작으면 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$X(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) = F_o + \frac{\partial F_o}{\partial F_i} \Delta F_i \quad (3)$$

$$\text{따라서, } \Delta F_o \equiv x(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) - F_o = \frac{\partial F_o}{\partial F_i} \Delta F_i \quad (4)$$

여서서 식 (4)는 선형 민감도 방정식이다(McCuen, 1973). MUSIC 모형에서 중요한 매개변수들을 선정하고 매개변수 변화에 따른 유출량을 모의하여 총유출량비(Q_{TR}), 첨두유출량비(Q_{PR}), 유출민감도비($Q_{SR} = Q_{TR}/Q_{PR}$)와 같은 무차원 값을 정의하고 이를 이용하여 매개변수간의 상대적인 민감도를 분석한다.

$$\text{총유출량비}(Q_{TR}) = \frac{Q_{TR}}{(Q_{TR})_{\max}}, \text{ 첨두유출량비}(Q_{PR}) = \frac{Q_{PR}}{(Q_{PR})_{\max}}, \text{ 유출민감도비}(Q_{SR}) = \frac{Q_{TR}}{Q_{PR}} \text{이며,}$$

여기서, $(Q_{TR})_{\max}$: 최대총유출량, $(Q_{PR})_{\max}$: 최대첨두유출량, Q_{TR} : 단계별 총유출량, Q_{PR} : 단계별 첨두유출량이며, 최대총유출량에 대한 최소총유출량의 비(S_{TR})과 최대첨두유출량에 대한 최소첨두유출량의 비(S_{PR})를 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{총유출량의 민감도비율}(S_{TR}) = \frac{(Q_{TR})_{\min}}{(Q_{TR})_{\max}}, \text{ 첨두유출량의 민감도비율}(S_{PR}) = \frac{(Q_{PR})_{\min}}{(Q_{PR})_{\max}} \text{이며,}$$

여기서, $(Q_{TR})_{\min}$: 최소총유출량, $(Q_{PR})_{\min}$: 최소첨두유출량이다.

2.2. 대상유역 현황

홍제천은 북한산에서 발원한 후 남서류하다 북한산에서 발원해서 남하한 불광천과 합류되어 한강하류 우안쪽으로 유입되며 홍제천 하류 우안에 위치한 난지도, 성산대교에서 북동쪽으로 유로를 따라 장방향의 유역을 이루는 유역면적 19.37km², 유로연장 11.63km인 지방2급 하천이다. 표 1과 그림 1에 요약하여 나타냈다.

표 1. 홍제천 수위관측지점 유역현황

주요지점	기호	유역 면적(km ²)	유로연장(km)	유로형 교포(A/L)	유로평균경사
불광천합류전	HJ0	19.37	11.63	1.67	0.037
사천교	HJ1	19.08	10.94	1.74	0.039

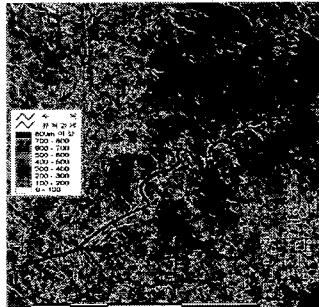


그림 1. 홍제천 유역도

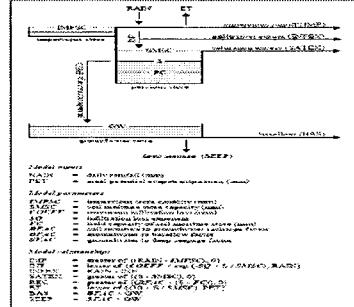


그림 2. 개념적 일별 강우 유출모형

3. MUSIC 모형의 개요

도시지역에 유출의 대부분은 불투수 표면에 의해 발생한다. 지표하 토양함수량(sub-surface soil moisture)과 지하수에 의해 영향을 받는 기저유출은 도시지역에서 활발하지 않아서 도시수문곡선에서 작은 부분을 차지한다. 따라서, 도시유출 생성에 적용된 알고리즘은 Chiew와 McMahon(1997)이 개발한 모형을 기초로 하여 유역의 강우-유출 과정을 불투수 면적과 2개의 토양 저류지로 단순하게 정의하였다. 최초로 개발된 그 모형은 그림 2에 나타난 것과 같이 단순화할 수 있고 sub-daily temporal pattern으로 발생한 일별 유출을 산정할 수 있으며, 이때 유역추적은 Muskingum-Cunge 홍수파 추적을 이용한다.

4. MUSIC의 매개변수 선정과 민감도 분석

4.1. MUSIC의 매개변수 선정

MUSIC은 도시화에 의한 유출변화를 예측하고 여러 종류의 우수침투시설을 이용한 물순환 개선을 위해 이용되고 있는 모형으로 이를 위해서는 불투수율과 토양특성이 매우 중요한 매개변수로 고려되고 있으므로 투수지역의 최대저류깊이 Soil storage(mm), 강우초기 최대저류깊이의 포화정도 Initial storage(%), 지하수위에 도달할수 있는 Field capacity(mm), 최대침투율에 영향을 미치는 건조토양상태의 침투율을 정의하는 coefficient a와 함수비증가에 따른 최대 침투율 감소를 정의하는 exponent b 등의 매개변수가 필요하다. 따라서 초기값을 중심으로 일정비율로 매개변수를 10단계로 구분하여 비교분석을 실시하였다.

4.2. 민감도 분석 및 결과

본 연구에서는 매개변수의 상대적인 민감도를 총유출량비(Q_{TR}), 첨두유출량비(Q_{PR}), 유출민감도비(Q_{SR})와 같은 무차원값의 변화를 이용하여 비교·분석하였다. 무차원값 중 총유출량비(Q_{TR})는 최종단계의 최대유출용적에 대한 각 단계별 유출 용적의 비로소 0부터 1.0까지의 값이 가능하다. 대개 0.4~1.0의 값을 가지며 이 값이 1.0에 가까울수록 변화의 폭이 적은 것을 의미한다. 첨두유출량비(Q_{PR})도 최종단계의 최대첨두유출량에 대한 각 단계별 첨두유출량의 비로서 총유출량비(Q_{TR})와 마찬가지로 0.4~1.0의 값을 가지며 1.0에 가까울수록 변화의 폭이 적은 것을 나타낸다. 총유출량비(Q_{TR})를 첨두유출량비(Q_{PR})로 나눈 유출민감도비(Q_{SR})는 각 단계에서 첨두유출량의 변화량과 총유출량의 변화량을 동시에 살펴볼 수 있다. 유출민감도비(Q_{SR})가 1.0인 경우 매개변수의 변화에 따라 총유출량과 첨두유출량의 변화량이 같은 비로 진행된다는 의미이고 1.0보다 큰 경우에는 첨두유출량의 변화량이 총유출량의 변화량보다 크게 나타나는 것으로 민감도가 상대적으로 큰 것으로 판단할 수 있다.

4.2.1. 불투수율

불투수율이 증가함에 따라 첨두유출량비(Q_{PR})는 0.44~1.0, 총유출량비(Q_{TR})는 0.44~1.0, 유출민감도비(Q_{SR})는 1.0~1.37, 첨두유출량 민감도비(S_{PR})는 0.44, 총유출량 민감도비(S_{TR})는 0.44로 나타났다. 이로부터 불투수율의 변화에 따라 총유출량보다 첨두유출량이 민감하고 총유출량 민감도비(S_{TR})와 첨두유출량 민감도비(S_{PR})가 동일하며, Q_{PR} 에 따른 Q_{TR} 의 변화를 그림 3에 나타내었다.

4.2.2. Soil storage

Soil storage가 증가함에 따라 첨두유출량은 305.87~126.14(m³/s), 유출총량은 2,027,043.06~927,447.10(m³/s)로 감소하여 첨두유출량비(Q_{PR})는 1.0~0.41, 총유출량비(Q_{TR})는 1.0~0.46, 유출민감도비(Q_{SR})는 0.91~1.49, 첨두유출량 민감도비(S_{PR})는 0.41, 총유출량 민감도비(S_{TR})는 0.46로 나타났다. 이로부터 Soil storage 변화에 따라 총유출량보다 첨두유출량이 민감하고 총유출량 민감도비(S_{TR})가 첨두유출량 민감도비(S_{PR})보다 크며, Q_{PR} 에 따른 Q_{TR} 의 변화를 그림 4에 나타내었다.

4.2.3. Initial storage

Initial storage가 증가함에 따라 첨두유출량은 125.96~305.92(v/s), 유출총량은 1,136,290.30~2,048,115.01(m³/s)로 증가하여 첨두유출량비(Q_{PR})는 0.41~1.00, 총유출량비(Q_{TR})는 0.55~1.00, 유출민감도비(Q_{SR})는 1.0~1.35, 첨두유출량 민감도비(S_{PR})는 0.41, 총유출량 민감도비(S_{TR})는 0.55로 나타났다. 이로부터 Initial storage 변화에 따라 총유출량보다 첨두유출량이 민감하고 총유출량 민감도비(S_{TR})가 첨두유출량 민감도비(S_{PR})보다 크며, Q_{PR} 에 따른 Q_{TR} 의 변화를 그림 5에 나타내었다.

4.2.4. Field capacity

Field Capacity가 증가함에 따라 첨두유출량은 149.98~149.79(m³/s), 유출총량은 1,449,360.81~1,436,040.05(m³/s)로 증가하여 첨두유출량비(Q_{PR})는 1.00, 총유출량비(Q_{TR})는 1.0~0.99, 유출민감도비(Q_{SR})는 0.99~1.0, 첨두유출량 민감도비(S_{PR})는 1.0, 총유출량 민감도비(S_{TR})는 0.99로 나타났다. 이로부터 Field capacity 변화에 따라 총유출량과 첨두유출량은 변화가 없고 총유출량 민감도비(S_{TR})와 첨두유출량 민감도비(S_{PR})도 변화가 없으며, Q_{PR} 에 따른 Q_{TR} 의 변화를 그림 6에 나타내었다.

4.2.5. Coefficient a

Coefficient a가 증가함에 따라 첨두유출량은 149.85~278.90(m³/s), 유출총량은 1,440,234.63~1,669,442.67(m³/s)로 감소하여 첨두유출량비(Q_{PR})는 0.54~1.00, 총유출량비(Q_{TR})는 0.86~1.00, 유출민감도비(Q_{SR})는 0.95~1.61, 첨두유출량 민감도비(S_{PR})는 0.54, 총유출량 민감도비(S_{TR})는 0.86로 나타났다. 이로부터 Coefficient a 변화에 따라 총유출량보다 첨두유출량이 민감하고 총유출량 민감도비(S_{TR})가 첨두유출량 민감도비(S_{PR})보다 크며, Q_{PR} 에 따른 Q_{TR} 의 변화를 그림 7에 나타내었다.

4.2.6. Exponent b

Exponent b가 증가함에 따라 첨두유출량은 149.85~285.37(m³/s), 유출총량은 1,440,159.61~1,740,848.69(m³/s)로 증가하여 첨두유출량비(Q_{PR})는 0.53~1.00, 총유출량비(Q_{TR})는 0.83~1.00, 유출민감도비(Q_{SR})는 0.95~1.61, 첨두유출량 민감도비(S_{PR})는 0.53, 총유출량 민감도비(S_{TR})는 0.83로 나타났다. 이로부터 Exponent b 변화에 따라 총유출량보다 첨두유출량이 민감하고 총유출량 민감도비(S_{TR})가 첨두유출량 민감도비(S_{PR})보다 크며, Q_{PR} 에 따른 Q_{TR} 의 변화를 그림 8에 나타내었다.

또한, 주요 매개변수의 민감도는 표 2에 나타냈으며, 그림 9에 각 매개변수별 민감도를 비교도시하였다.

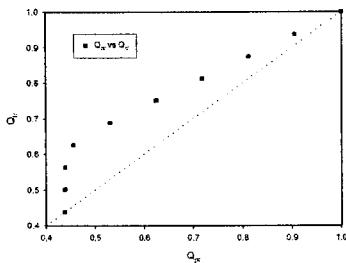


그림 3. 불투수율의 민감도

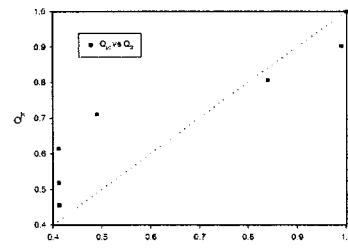


그림 4. Soil storage의 민감도

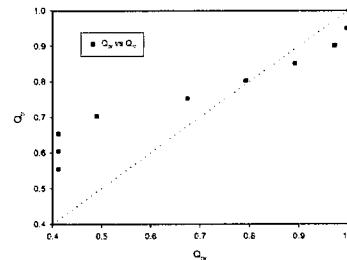


그림 5. Initial storage의 민감도

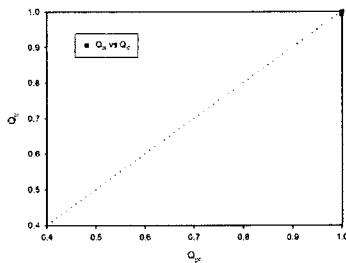


그림 6. Field capacity의 민감도

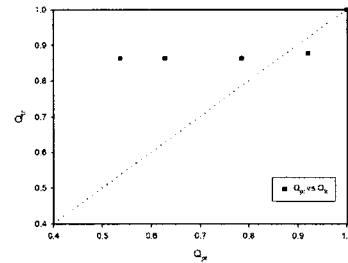


그림 7. Coefficient a의 민감도

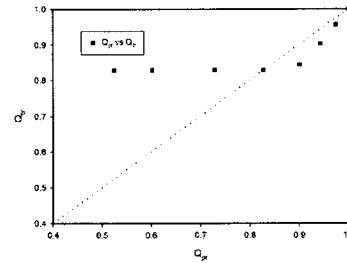


그림 8. Exponent b의 민감도

표 2. 주요매개변수의 민감도

구분	불투수율	Soil storage	Initial storage	Field capacity	a	b
$Q_{SR(min)}$	1.00	0.91	0.93	0.99	0.95	0.94
$Q_{SR(max)}$	1.37	1.45	1.59	1.00	1.61	1.58
S_{PR}	0.44	0.41	0.41	1.00	0.54	0.53
S_{TR}	0.44	0.46	0.55	0.99	0.86	0.83

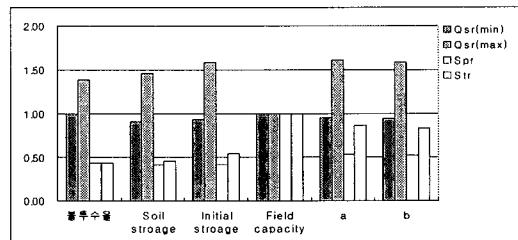


그림 9. 주요 매개변수의 민감도 비교

5. 결 론

주요 매개변수의 민감도 분석결과로부터 유역의 수문학적 거동을 고려하여 정확한 MUSIC의 모의를 위해서는 불투수율의 민감도 변화범위가 가장 넓고 첨두유출량과 총유출량 변화가 함께 일어나므로 이를 가장 우선적으로 조정하고 이와 함께 토양특성을 반영하는 Soil storage와 Initial storage를 고려한다면 MUSIC을 이용하여 개발에 의한 유출변화와 다양한 우수침투시설 설치에 따른 저감효과를 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 향후, 매개변수에 대한 현장자료를 확보하고 시험유역을 운영하여 모니터링 한다면 침투형 우수유출저감시설에 관한 저감효과를 예측할 수 있는 유출모형으로 국내에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 서규우, 조원철(1998), 유역특성 변화에 따른 도시유출모형의 매개변수 민감도분석(I), 한국수자원학회 제 31권 제 3호, pp. 243-252.
- CRC for Catchment Hydrology, Australia(2005), MUSIC User Guid.
- Fletcher, T.D., Wong, T.H.F., Duncan, H.P., Coleman, J.R. and Jenkins, G.A.(2001), Managing Impacts of Urbanisation on Receiving Waters: A Decision-making Framework, proceedings of the 3rd Australian Stream Management Conference, Brisbane, 27-29 August, pp. 217 - 223.