

Fuzzy AHP 기법을 이용한 도시지역의 내수침수위험도 평가 Evaluation of Inland Inundation Risk in Urban Area using Fuzzy AHP

신 지 예* / 박 예 준** / 김 태 응***

Shin, Ji Yae / Park, Yei Jun / Kim, Tae-Woong

Abstract

This study presented how to evaluate the inland inundation risk considering the characteristics of inland flood. Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process), which can deal with the uncertainty or ambiguousness of the decision-making process, was used to estimate the inundation risk. The criteria used for inland inundation risk include the physical index, social index and inland flood. Each index contains three detailed indicators then total nine indicators were employed in this study. The inundation risk evaluation was carried out for each node (manhole) within the drainage system, not to the administrative extent, which enabled us to point out nodes with high risk. The proposed Fuzzy AHP was applied to Geoje district in Busan. The results indicated that the junction of Oncheoncheon and Geojecheon has high risk which is consistent with the fact that this junction has already experienced floods in the past. The proposed method can be used for evaluating inland inundation risk and preparing flood prevention plans in inland flood-prone urban areas.

keywords : Fuzzy AHP, Inland inundation, Risk, Stormwater drainage system

요 지

본 연구는 도시지역의 내수침수 특성을 고려한 내수침수위험도 산정방법을 제시하였다. 의사결정과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 정량적으로 반영하기 위하여 Fuzzy AHP 기법을 활용하였다. 내수침수 위험도의 평가기준으로는 물리적 지표, 사회적 지표, 그리고 내수침수 시나리오 결과 등 세 가지로 구성하였다. 각각의 평가기준은 3개의 세부평가항목을 가지고 있어 총 9가지의 평가항목을 바탕으로 내수침수 위험도 분석을 수행하였다. 또한, 행정구역 단위가 아닌 배수시스템의 노드(맨홀)를 기준으로 침수위험도를 분석하여 침수위험도가 높은 지점을 상세하게 표현할 수 있었다. 본 연구의 대상지역인 부산시 거제지구에 Fuzzy AHP 기법을 적용한 결과, 온천천·거제천 합류부 저지대의 침수위험도가 크게 나타났으며, 이는 과거 피해이력과 일치하는 것이다. Fuzzy AHP 기법을 적용한 본 연구결과는 내수침수 위험도 산정 및 고위험도 지역의 내수침수 저감계획 수립을 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : Fuzzy AHP, 내수침수, 위험도, 우수배제시스템

*한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: starzee@hanyang.ac.kr)

Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (e-mail: swchz@hanyang.ac.kr)

Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

***교신저자, 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 부교수 (e-mail: twkim72@hanyang.ac.kr Tel: 82-31-400-5184)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Ansan 426-791, Korea

1. 서 론

최근 도시지역에서는 하천에 의한 외수침수보다는 내수침수로 인한 침수피해가 빈번하게 발생하고 있다. 특히, 2010년 이후 수도권을 비롯한 여러 도시지역에서 발생한 내수침수피해는 국지성 호우로 인한 우수관거 용량부족과 저지대에 위치한 지역특성이 주요 원인으로 작용하였다(Choi et al., 2011; Shim and Choi, 2012). Cruz et al. (2007)에 따르면, 우리나라는 앞으로 집중호우의 발생빈도가 증가할 것으로 예상되며, 집중호우의 증가는 도시지역에서 내수침수가 발생할 가능성을 증가시킨다. 내수침수가 주로 발생하는 도시지역의 침수재해는 지형적인 요인 외에도 우수관망의 노선 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다(Song and Lee, 2012). 그러므로 도시에서 발생하는 내수침수피해를 저감하기 위해서는 우선적으로 침수위험도 산정 및 평가가 이루어져야 한다. 도시 지역의 침수위험도는 지형적 요인 외에도 인문과 수문 특성을 포함하는 다양한 요소들의 영향을 종합적으로 평가해야 한다. 따라서 최근에는 다양한 적용기준을 활용하는 다기준의사결정기법이 침수위험도의 분석에 적용되고 있다(Park and Choi, 2008; Choi et al., 2013b).

다기준의사결정기법으로는 AHP (Analytic Hierarchy Process), PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation), ELECTRE (ELimination Et Choice Translating REality) 등이 있으며, 다기준의사결정기법을 적용하여 도시지역의 침수위험도를 산정한 다양한 연구가 수행되었다. Park and Choi (2008)은 PROMETHEE 기법을 적용하여 도시유역내 소유역간의 상대적 침수위험도를 산정하였고, Lee et al. (2011)은 Fuzzy C-Mean 알고리즘을, Song and Lee (2012)는 엔트로피(Entropy) 기법 및 PROMETHEE를 이용하여 도시유역의 침수위험도를 산정하였다. 하지만 위의 의사결정기법들은 평가기준에 대한 가중치 및 선호기준 산정 시 의사결정자의 주관성이 개입될 수 있다는 단점이 존재한다.

의사결정자들의 주관성을 의사결정과정에 정량적으로 포함하기 위하여 Laarhoven and Pedrycz (1983)은 Fuzzy 이론에서 활용되는 삼각 소속함수(triangular membership function)와 삼각 퍼지수(triangular fuzzy number)를 AHP에 접목하여 Fuzzy AHP 기법을 제안하였다. 그 이후, Chang (1996)은 쌍대비교 시에 Saaty (1980)의 9점 척도 대신에 삼각 퍼지수를, Buckley (1984)은 사다리꼴 퍼지수를 적용하였다. 의사결정이 필요한 산업공학, 컴퓨터공학, 경제학, 안전공학, 건축공학 등에서는 Fuzzy AHP

기법을 적용하여 다양한 대안들 사이에서의 우선순위 결정 및 재해위험도 분석이 수행되고 있다(Ahn et al., 2010; Han, 2012; Ryu and Her, 2012). 수자원공학 분야에서는 Srdjevic and Medeiros (2008)이 브라질 Paraguacu 유역의 다양한 수자원관리계획을 수립하기 위하여 5가지 평가항목과 24가지 세부항목을 바탕으로 Fuzzy AHP 기법을 적용한 바 있다. 또한, Yang et al. (2013)은 Fuzzy AHP 방법을 활용하여 4가지 평가항목과 16가지 세부항목에 대한 가중치를 결정하고 양쯔강 하류지역의 침수위험도를 산정한 후 침수위험지도를 작성하였다. 우리나라에서는 농업용 저수지의 추가 저수량을 확보하는 사업을 위한 여러 가지 대안의 우선순위 결정을 위하여 Fuzzy AHP 기법을 적용한 바 있다(Choi et al., 2013b).

우리나라에서는 행정구역 혹은 배수분구의 소유역을 대상으로 다양한 의사결정기법을 적용한 침수위험도 평가에 대한 연구가 수행되었다(Park and Choi, 2008; Kim et al., 2012; Park et al., 2012; Choi et al., 2013a; Joo et al., 2013). 하지만 행정구역 단위의 침수위험도 분석결과는 침수 규모가 작은 내수침수를 대비하기 위한 자료로 활용하기에는 지역적 범위가 크다. 이에 본 연구에서는 유역면적 기준이 아닌 관망도 노트(팬홀) 기준으로 침수위험도를 산정함으로써, 지점에 대한 침수위험도 분석방법을 제시하였다. 또한, 기존의 연구에서 활용하였던 침수위험도 평가기준에 내수침수 특성을 반영하는 평가인자를 포함하여 내수침수위험도 분석을 수행하였다. 내수침수 위험도 산정을 위한 평가기준은 물리적 지표, 사회적 지표, 그리고 침수특성을 반영하기 위한 내수침수 시나리오 결과로 구성되었다. 내수침수 시나리오 결과는 Shin et al. (2014)가 수행하였던 다양한 강우사상을 XP-SWMM에 모의한 결과이다. 또한, 본 연구에서는 내수침수 시나리오 결과를 내수침수 위험도 평가기준에 활용하기 위하여 Fuzzy AHP 기법을 적용하였으며, 이를 통해 내수침수특성을 반영한 침수위험도 산정방법을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 Fuzzy AHP 기법

Fuzzy AHP는 의사결정과정에서 발생하는 애매함과 불확실성을 해결하기 위하여 제시된 방법으로, AHP 기법에 Fuzzy 이론을 결합한 의사결정기법이다.

AHP는 쌍대비교를 활용하여 다양한 대안들에 대한 우선순위를 도출한다(Saaty, 1980). 복잡한 문제를 계층구조로 변환하여 간단한 문제로 나타낼 수 있으며, 정량적이

고 정성적인 평가기준을 고려할 수 있어 수자원 분야를 비롯한 다양한 학문 분야에서 활용되고 있다(Lee and Shim, 2002). AHP를 적용한 의사결정방법은 계층구조 설계 및 가중치 산정의 두 가지 단계로 이루어져 있다(Saaty, 1996; Yang et al., 2013). 첫 번째는 계층화 단계로, 다양한 평가 기준에 대하여 관련있는 항목끼리 군집화하여 계층화 구조로 나열한다. 두 번째는 계층화 평가를 통한 가중치 산정 단계로, 평가대상(혹은 대안)의 우선순위 결정을 위하여 계층화된 평가항목에 대한 가중치를 도출한다. 쌍대비교방법으로 각각의 계층별 평가기준에 대하여 1:1 비교를 수행하여, Saaty의 9점 척도로 선호도를 나타낸다. 쌍대비교방법으로 구축된 쌍대비교행렬로부터 고유방법을 이용하여 계층마다 정규화된 우선순위벡터를 산출한다. AHP 기법은 사용의 편의 때문에 널리 활용되고 있는 의사결정 기법이지만, 평가항목별 가중치 산정 시 사용자의 주관적인 요소가 개입되는 경우가 있다.

Fuzzy 이론은 Zedeh (1965)가 애매모호한 자연언어와 인간의 판단과정에서 발생하는 부정확성과 불확실성을 고려하기 위하여 제안되었다. 원소 x 가 집합 X 에 포함될 가능성에 대하여 일반집합에서는 0 아니면 1로 표현되나, Fuzzy 이론을 기반으로 하는 Fuzzy 집합에서는 0에서 1사이의 실수로 나타낼 수 있다. 이처럼 Fuzzy 집합은 경계가 모호한 집합을 의미하며, 이를 나타내기 위하여 퍼지수(fuzzy number)가 도입되었다. 퍼지수는 정규 퍼지수, 삼각 퍼지수, 사다리꼴 퍼지수 등의 다양한 종류가 있으며, 본 연구에서는 Chang (1996)에 의하여 제시된 삼각 퍼지수를 활용하였다. 삼각 퍼지수는 상한, 중앙, 하한의 범위(l, m, u)로 구성되며, Eq. (1)과 같이 수학적으로 표현된다.

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x}{m-l} - \frac{l}{m-l}, & x \in [l, m] \\ \frac{x}{m-u} - \frac{u}{m-u}, & x \in [m, u] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

본 연구에서 내수침수 위험도 산정을 위하여 적용하는

삼각 퍼지수는 Table 1과 같다. $\delta=1$ 로 가정하면 삼각 퍼지수는 (1, 1, 2), (1, 2, 3), (2, 3, 4), (3, 4, 5), (4, 5, 6), (5, 6, 7), (6, 7, 8), (7, 8, 9), (8, 9, 9)과 같아진다.

Chang (1996)이 제시한 Fuzzy AHP를 적용한 가중치 산정방법을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

- (1) 1단계: 퍼지 결합치(Fuzzy synthetic extent) 계산
삼각 퍼지수로 쌍대비교를 수행한 결과에 대하여 Eq. (2)를 활용하여 퍼지 결합치를 계산한다.

$$S_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \odot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서, S_i 는 i 번째 대상에 대한 퍼지 결합치, M_{ij} 는 삼각 퍼지수로 $M_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 으로 나타내며, 삼각 퍼지수의 계산방법은 Eq. (3)과 같다.

$$(l_1, m_1, u_1) \odot (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad (3a)$$

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1} \right) \quad (3b)$$

- (2) 2단계 : 퍼지 결합치를 사용한 가중치 벡터 계산
1단계에서 산정한 퍼지 결합치의 각 계층에 대한 상대적 중요도를 산정한 뒤, 가중치 벡터를 계산한다. 상대적 중요도는 두 삼각 퍼지수 사이에서 서로 큰 값을 가지는 확률의 정도이다. 두 삼각 퍼지수 $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ 과 $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ 가 있을 때, $M_2 \geq M_1$ 일 확률의 정도는 Eq. (4)로 정의된다.

$$V(M_2 \geq M_1) = 1 \quad \text{if } m_2 \geq m_1 \quad (4a)$$

$$V(M_2 \geq M_1) = 0 \quad \text{if } l_1 \geq u_2 \quad (4b)$$

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = u_{M_1}(d), \text{ otherwise} \quad (4c)$$

여기서, hgt 는 두 삼각 퍼지수의 교차점의 최대값(highest intersection point)으로 d 는 u_{M_1} 과 u_{M_2} 의 교차점의 x 축의 좌표값이다. Eq. (4b)는 l_1 이 u_2 보다 크기 때문에 두 삼각 퍼지수에 교차점이 없는 경우로 Fig. 1(a)와 같이 나타날

Table 1. Saaty and Fuzzified Saaty's Scale for Triangular Fuzzy Number

Definition	Scale of Saaty	Fuzzified Saaty Scale
Equal importance (M)	1	(1, 1, 1+ δ)
Somewhat more important (H3)	3	(3- δ , 3, 3+ δ)
Much more important (H5)	5	(5- δ , 5, 5+ δ)
Very much more important (H7)	7	(7- δ , 7, 7+ δ)
Absolutely more important (H9)	9	(9- δ , 9, 9)
Intermediate values	2, 4, 6, 8	(x-1, x, x+1), x=2, 4, 6, 7

때이며, Eq. (4c)는 두 삼각 퍼지수에 교차점이 존재하는 경우로 Fig. 1(b)와 같이 좌표축에 나타날 때이다. Eq. (4c)의 계산방법은 Eq. (5)와 같다.

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} \quad (5)$$

이어서 임의의 k개의 퍼지수보다 크기 위한 확률 계산을 위하여 Eq. (6)을 활용한다.

$$V(M \geq M_1, M_2, M_3, \dots, M_k) = \min V(M \geq M_i) \quad (6)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, k$ 이다.

가중치 벡터는 $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$ 라는 가정을 바탕으로 Eq. (7)을 활용하여 계산한다.

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (7a)$$

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (7b)$$

여기서, W' 는 각 요소의 가중치 벡터이며, W 는 정규화한 가중치 벡터이다.

2.2 내수침수 위험도 산정을 위한 평가요소 도출

우리나라 도시지역에서 발생하는 내수침수피해는 저지대의 내수배제불량이 주요 원인으로 작용하여 발생된다.

침수발생 규모가 행정구역 최소 단위인 ‘동’ 보다 작은 면적 크기로 발생하며, 아파트 지역보다는 다세대주택 및 연립주택에서 빈번하게 발생한다(Seoul Development Institute, 2007; Shin et al., 2014). 본 절에서는 내수침수 위험 지역을 파악하기 위한 내수침수 위험도 분석방법을 제시하고자 한다. 침수면적이 작은 내수침수 특성을 반영하여 내수침수 위험도 평가 대상을 우수배제시스템의 노드로 선정하여 지점 단위의 침수위험도 분석이 수행되었다. Song et al. (2013)에서 낙동강 홍수위험도 산정을 위하여 적용한 P-S-R 구조(압력지수, 현상지수, 대책지수)와 Joo et al. (2013)에서 제시한 침수에 영향을 미치는 물리적 인자를 참고하여 내수침수 위험도 평가기준의 물리적 지표와 사회적 지표를 구성하였다. 또한 내수침수 특성을 반영하기 위하여 Shin et al. (2014)의 내수침수 모의결과를 적용하였다. 가장 상위의 평가기준은 물리적 지표(C1), 사회적 지표(C2), 내수침수 모의결과(C3)의 세 가지 항목으로 이루어졌다. 각각의 평가기준에는 세부항목이 Fig. 2와 같이 포함되어 있다. 각각의 세부항목은 유역경사(C11), 유역면적(C12), 저반고(C13), 자연재해위험지구 지정현황(C21), 인구밀도(C22), 아파트 지역 여부(C23), 침수 발생 여부(C31), 월류량(C32), 그리고 최대 관거수두(C33)로 선정하였다.

물리적 지표는 침수에 직접적으로 영향을 미치는 물리

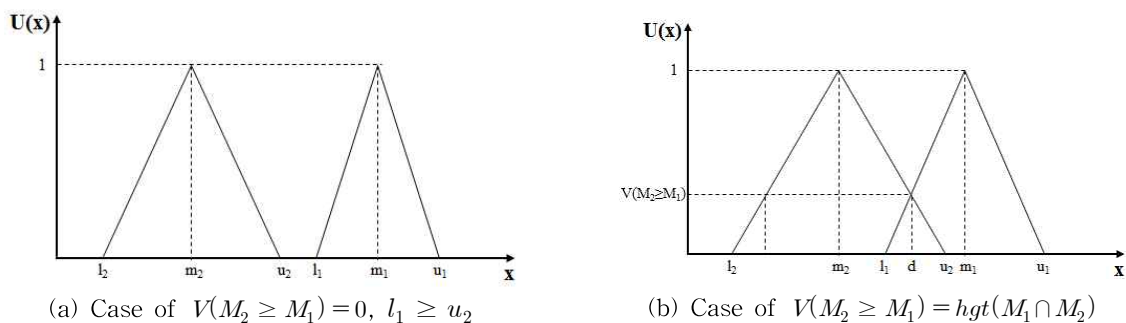


Fig. 1. Triangular Fuzzy Number Application

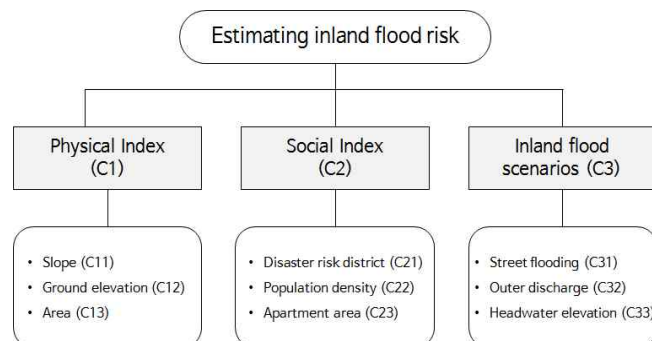


Fig. 2 Criteria and Indicators for Inland Inundation Risk

적 인자로, 일반적으로 대상지역의 관망도에 포함되어 있는 입력 자료가 이에 속한다. 물리적 지표에서는 각각 지점에 대한 유역경사, 유역면적, 지반고의 세부항목이 있다. 유역경사는 해당 노드가 가지는 유역면적의 지면경사를 의미하며, 유역면적은 노드가 지배하는 면적이고, 지반고는 노드가 위치한 높이를 의미한다. 사회적 지표는 침수피해 규모에 영향을 미치는 인자를 의미하며, 세부항목으로는 자연재해위험지구 여부, 해당 지점의 아파트 지역 여부 및 인구밀도가 포함되었다. 자연재해위험지구 여부는 해당 지점이 자연재해위험지구에 포함되었는지 여부를 의미한다. 인구밀도 및 아파트 지역에 대한 정보는 통계지리정보서비스(<http://sgis.kostat.go.kr/>)에서 해당지점의 인구밀도 수치 및 지점별 아파트 지역에 포함 여부를 확인할 수 있다. 내수침수 시나리오 결과는 다양한 강우 시나리오(혹은 강우강도)를 XP-SWMM으로 모의한 결과로(Shin et al., 2014), 노드별로 도출된 결과이다. 내수 침수 시나리오는 모의한 강우시나리오의 숫자만큼의 시나리오가 도출되므로, 해당지역에 다양한 강우를 모의할수록 침수발생 가능성이 높은 지역을 파악할 수 있다. 내수침수 시나리오 결과에 포함되는 상세항목으로는 각각의 노드에서의 범람 발생여부, 침수 발생한 노드의 유출량과 노드별 최대 관거수두가 포함된다.

3. Fuzzy AHP 기법을 적용한 내수침수 위험도 산정

본 연구에서는 부산시 거제지구에 Fuzzy AHP 기법을 적용하여 내수침수 위험도를 산정하였으며, 산정 과정은 Fig. 3과 같다.

3.1 대상지역

본 연구의 대상지역은 부산시 연제구의 거제지구로, Shin et al. (2014)에서 강우 시나리오를 바탕으로 XP-SWMM을 이용하여 99개의 내수침수 시나리오를 구축하였던 지역과 동일한 유역이다. Fig. 4는 대상지역의 관망도를 도시적으로 표현한 것이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 대상지역에는 총 195개의 노드가 존재하며, 노드에 대한 제원은 Table 2에 예시적으로 제시하였다.

3.2 Fuzzy AHP를 이용한 가중치 산정

본 절에서는 Fuzzy AHP 기법을 적용하여 2.2절의 평가 기준 및 세부항목에 대한 가중치를 산정하였다. 가중치 산정에 앞서, 수자원 분야에 종사하는 전문가 집단 15명(수자

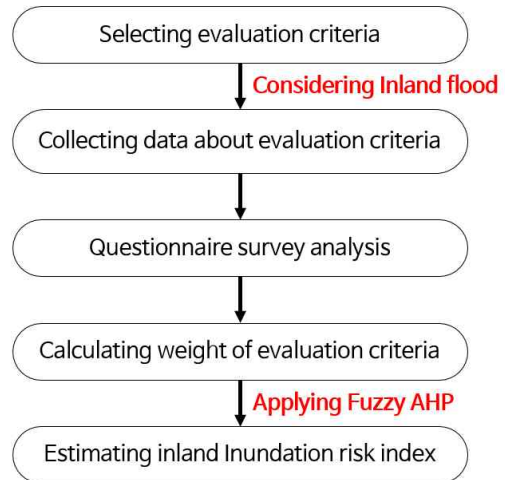


Fig. 3. Line Diagram for Estimating Inland Inundation Risk



Fig. 4. Study Area (Geje district and its sewer network)

원설계 실무자 5명, 대학원 연구원 10명)을 대상으로 설문 조사를 실시하였다. 본 연구에서는 설문결과를 바탕으로 삼각 퍼지수를 활용하여 쌍대비교행렬 구축하였다. Table 3은 쌍대비교행렬의 결과를 예시적으로 나타낸 것이다.

각각의 설문자의 쌍대비교행렬에 대하여 Eqs. (1)~(7)을 적용하여 평가항목 및 세부항목의 가중치를 계산하였다. Eqs. (8)~(11)은 Table 3(a)의 설문결과에 대하여 평가항목 C1(물리적 지표), C2(사회적 지표), C3(내수침수 모의결과)에 대한 가중치의 계산과정을 나타낸 것이다. 우선, 같은 행에 속하는 삼각퍼지수의 하한, 중앙, 상한값을 더하여 각각의 행에서(3.167, 4.200, 5.250), (5.500, 7.000,

Table 2. Basic Information of Sewer System for Gwoje District

Node	Ground elevation (m)	Invert elevation (m)	Area (ha)	Basin slope (°)	Basin wide (m)	Curve number of pervious area	Time of concentration (min)
1	65	61.6	53.73	0.005	733.02	33	10
2	61	57.6	1.88	0.117	137.27	33	10
3	45	40.3	3.21	0.089	179.07	65	5
...							
94	5.1	1.3	22.38	0	473.04	65	5
...							
193	6.4	2.1	5.88	0.008	242.55	65	5
194	5	1.2	6.24	0	249.75	65	5
195	13	8.7	5.97	0	244.4	65	5

Table 3. Resulting Judgment Matrix using Triangular Fuzzy Number (a) Judgment Matrix for Main Criteria

(a) Judgment matrix for main criteria

Criteria	C1	C2	C3
C1	(1, 1, 1)	(0.167, 0.200, 0.250)	(2, 3, 4)
C2	(4, 5, 6)	(1, 1, 1)	(0.500, 1, 1)
C3	(0.250, 0.333, 0.500)	(1, 1, 2)	(1, 1, 1)

(b) Physical index of Judgment matrix

Criteria	C11	C12	C13
C11	(1, 1, 1)	(1, 1, 2)	(0.200, 0.250, 0.333)
C12	(0.500, 1, 1)	(1, 1, 1)	(0.250, 0.333, 0.500)
C13	(3, 4, 5)	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)

(c) Social index of judgment matrix

Criteria	C21	C22	C23
C21	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)
C22	(0.250, 0.333, 0.500)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)
C23	(0.167, 0.200, 0.250)	(0.250, 0.333, 0.500)	(1, 1, 1)

(d) Inland flood scenarios of judgment matrix

Criteria	C31	C32	C33
C31	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)
C32	(0.250, 0.333, 0.500)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)
C33	(0.250, 0.333, 0.500)	(0.250, 0.333, 0.500)	(1, 1, 1)

8.000), (2.250, 2.333, 3.500)을 계산하였다. 이어서, 앞의 세 가지 삼각 퍼지수의 각각의 값을 더하여 전체 행렬의 합인(10.917, 13.533, 16.750)을 계산한 뒤, Eq. (2)에 대입하여 퍼지결합치(S_1, S_2, S_3)를 Eq. (8)과 같이 산정하였다.

$$S_1 = (3.617, 4.200, 5.250) \odot \left(\frac{1}{16.750}, \frac{1}{13.533}, \frac{1}{10.917} \right) \quad (8a)$$

$$= (0.189, 0.310, 0.481)$$

$$S_2 = (5.500, 7.000, 8.000) \odot \left(\frac{1}{16.750}, \frac{1}{13.533}, \frac{1}{10.917} \right) \quad (8b)$$

$$= (0.328, 0.517, 0.733)$$

$$S_3 = (2.250, 2.333, 3.500) \odot \left(\frac{1}{16.750}, \frac{1}{13.533}, \frac{1}{10.917} \right) \quad (8c)$$

$$= (0.134, 0.172, 0.321)$$

퍼지 결합치 S_1, S_2, S_3 를 Fig. 5에 도시하였으며, Fig. 5와 Eqs. (4)~(5)를 활용하여 퍼지수들의 확률 정도를 계

산하여 Eq. (9)에 나타내었다.

$$V(S_1 \geq S_2) = \frac{(l_3 - u_1)}{(m_1 - u_1) - (m_3 - l_3)} = 0.424 \quad (9a)$$

$$V(S_1 \geq S_3) = 1 \quad (9b)$$

$$V(S_2 \geq S_1) = 1 \quad (9c)$$

$$V(S_2 \geq S_3) = 1 \quad (9d)$$

$$V(S_3 \geq S_1) = \frac{(l_3 - u_2)}{(m_2 - u_2) - (m_3 - l_3)} = 0.488 \quad (9e)$$

$$V(S_3 \geq S_2) = 0 \quad (9f)$$

이어서, Eq. (9)의 결과에 대하여 퍼지 결합치별로 최소값을 추출하여, 가중치가 되는 항목별 상대적 중요도를 Eq. (10)에 나타내었다.

$$d'(c_1) = V(S_1 \gg S_2, S_3) = \min(1.000, 0.424) = 0.424 \quad (10a)$$

$$d'(c_2) = V(S_2 \gg S_1, S_3) = \min(0.488, 0) = 0 \quad (10b)$$

$$d'(c_3) = V(S_3 \gg S_1, S_2) = \min(1.000, 1.000) = 1.000 \quad (10c)$$

Eq. (10)의 결과를 바탕으로 Eq. (11a)에 가중치를 나타내었으며, Eq. (11b)에 정규화된 가중치를 나타내었다.

$$W' = (0.424, 0, 1) \quad (11a)$$

$$W = (0.298, 0, 0.702) \quad (11b)$$

위와 같은 방법으로 각각의 평가항목 및 세부항목에 대한 가중치가 산정되었으며, Table 4에 제시하였다.

3.3 내수침수 위험도 산정

본 절에서는 내수침수 위험도 평가항목의 가중치를 활용하여, 부산시 거제지구 관망도 노드별 침수위험도를 산정하였다. 내수침수 위험도 산정에 앞서, 내수침수 위험도 산정을 위한 세부항목에 대한 노드별 자료를 구축하였다.

물리적 지표는 관망도의 입력 자료 중 각각 노드에 해당하는 유역면적, 유역경사, 지반고의 수치값으로 구성하였다. 사회적 지표의 세부항목인 재해위험지구에 대한 자료는 해당 지역에서의 자연재해위험지구 고시지역을 확인한 뒤, 노드별 재해위험지구 여부를 판단하였다. 아파트 지역 여부 및 인구밀도에 대해서는 통계지리정보서비스에서 제공하는 아파트 지역의 정보 및 인구밀도 자료를 활용하였다. 재해위험지구 및 아파트 지역의 여부의 세부항목은 해당 노드가 자연재해위험지구와 아파트 지역에 포함되면 '1'로, 그렇지 않으면 '0'으로 나타내었으며, 인구밀도 항목은 통계지리정보서비스에서 제시하는 5개의 범례로 구분된 인구밀도 통계값을 '1~5'의 지수로 나타내었다. 내수침수 모의결과는 Shin et al. (2014)에서 제시한 강우 시나리오를 XP-SWMM에 모의하여 구축하였다. Shin et al. (2014)에서는 강우의 지속시간을 3시간부터 1시간씩 증가시켜 15시간까지의 13가지의 지속시간에 대하여 시간당 강우량 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 mm 등 7가지 강우강도를 고려한 91가지의 강우시나리오를 제시하였다. 제시된 강우시나리오를 대상지역 거제지구에 적용하여 XP-SWMM으로 모의한 결과를 바탕으로 내수침수 시나리오(Scenario #1~#91)를 도출하였다. 본 연구에서는 내수침수 시나리오에서 노드별 범람 발생여부, 최대관거수두, 침수 발생한 노드의 유출량 자료를 추출하여 활용하였다. 노드별 범람 발생여부는 범람이 발생하였을 경우에는 '1'로, 범람이 발생하지 않았을 경우에는 '0'으로 나

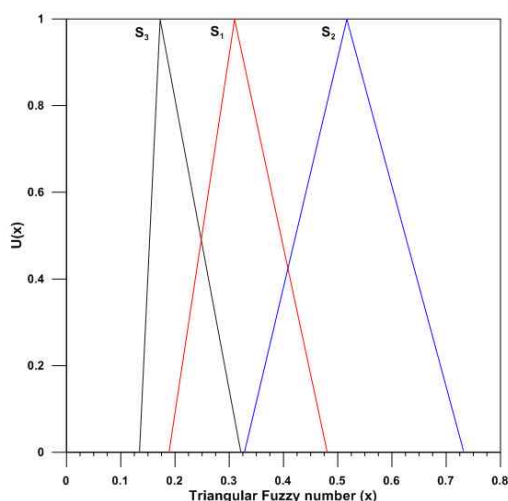


Fig. 5. An Example of Calculated Triangular Fuzzy Numbers

Table 4. Resulting Weighting Values for AHP

C1			C2			C3		
0.356			0.194			0.450		
C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33
0.090	0.242	0.023	0.169	0.019	0.006	0.193	0.244	0.013

로 도출된 정량적 수치를 그래도 활용하였다. 9가지 세부 항목별 정량적 수치는 Table 5와 같이 정리되었다. Table 5는 Scenario #65 (지속시간 660분, 강우강도 60 mm)에 대한 내수침수 모의결과를 예시적으로 보여주는 것이고, 본 연구에서는 전체 91개의 내수침수 모의결과를 Table 5와 같은 형태로 구축하였다.

Table 5에 정리된 세부평가항목의 노드별 수치는 값의 범위가 상이하어 절대적인 비교가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 각각의 세부항목의 값을 정규분포를 따르다고 가정하고(Jeon and Lee, 2010), Eq. (12)를 활용하여 표준정규변량으로 변환하였다.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (12)$$

여기서, x 는 노드별 세부항목에 대한 수치값, μ 와 σ 는 세부항목에 대한 전체 노드의 평균과 표준편차이고, Z 는 x 에 대한 표준정규변량이다.

세부항목에 대하여 표준정규변량값과 Fuzzy AHP 가

중치와 곱한 뒤 각각의 항목을 합하여 노드별 침수위험도를 산정하였다. 유역면적, 지반고와 아파트 지역은 표준화된 값이 작을수록 침수위험도가 작다는 것을 고려하여 산정된 가중치의 음의 값을 곱하였고, 나머지 항목에 대해서는 가중치를 그대로 곱하여 적용하였다.

Table 6은 노드별 세부항목 결과를 표준정규변량으로 변환한 결과와 Scenario #65에서의 내수침수 위험도 결과(Inundation Risk Index: IRI)를 나타낸 것이다. 이어서, 전체의 내수침수 모의결과(Scenario #1~#91)에 대한 각각의 내수침수 위험도를 계산한 뒤, 평균값으로 해당지역의 내수침수 위험도를 도출하였다(Table 7).

부산시 거제지구의 전체 노드에 대한 내수침수 위험도(Table 7)는 Fig. 6과 같은 분포를 보이는 결과가 도출되었다. 본 연구에서 제시한 내수침수 위험도 분석의 적절성 검토를 위하여 Fig. 6을 참고하여 상위 20%(내수침수 위험도 0.348 이상)에 해당하는 노드에 대하여 대상지역의 과거 침수이력(Yeonjegu, 2012)과 Shon et al. (2010)

Table 5. Quantitative values of sub-criteria (Scenario #65)

Node	C1			C2			C3		
	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33
1	0.005	733.02	65	0	1	1	1	0	0.880
2	0.117	137.27	61	0	1	1	1	0	2.201
3	0.089	179.07	45	0	1	1	1	0	0.853
...									
104	0.030	266.76	29	0	1	1	1	0	1.069
...									
193	0.008	242.55	6.4	0	1	3	2	358	4.960
194	0	249.75	5	0	1	3	2	114173	5.196
195	0	244.40	13	0	1	2	1	0	1.851

Table 6. Normalized Value of Sub-criteria and Calculated Inundation Risk Index (Scenario #65)

Node	C1			C2			C3			IRI
	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33	
1	-0.800	5.518	0.909	-0.288	-0.365	-0.365	-0.601	-0.210	-0.556	-0.647
2	1.234	-0.645	0.771	-0.288	-0.365	-0.365	-0.601	-0.210	0.071	-0.280
3	0.726	-0.212	0.217	-0.288	-0.365	-0.365	-0.601	-0.210	-0.570	-0.210
...										
104	-0.890	1.461	-1.183	3.474	-0.365	-0.365	1.664	1.481	1.897	1.462
...										
193	-0.745	0.444	-1.120	-0.288	-0.365	-0.365	1.664	-0.183	1.382	0.435
194	-0.890	0.519	-1.169	-0.288	-0.365	-0.365	1.664	8.260	1.494	2.493
195	-0.890	0.463	-0.892	-0.288	-0.365	-0.365	-0.601	-0.210	-0.095	-0.097

과 비교하였다. Fig. 7에는 2009년 7월에 발생하였던 온천천 및 거제천 합류부 저지대 침수구역 및 Shon et al. (2010)에서 모의한 내수침수 위험지구 중 거제1동과 연산1동이 나타나 있다. 상위 20%의 내수침수 위험도에 속하

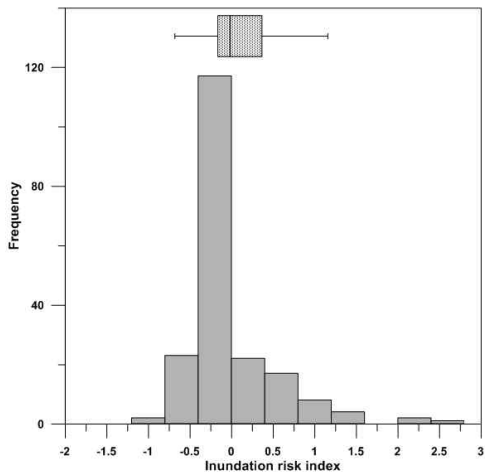


Fig. 6. Histogram of Inundation Risk Index

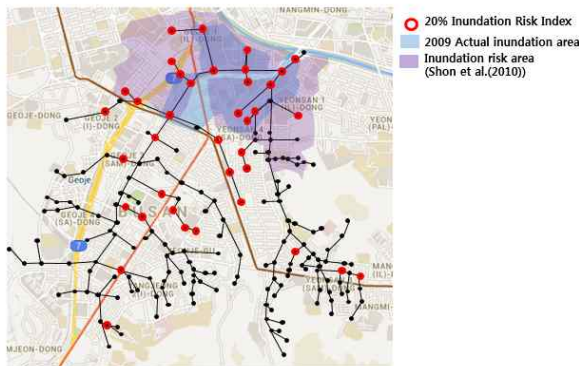


Fig. 7. Comparison for Inland Inundation Flood Risk in Geoje District

는 노드에 대하여 본 구간이 포함됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Fuzzy AHP 기법과 내수침수 위험도 평가기준을 활용한 내수침수위험도 산정방법을 제안하였다. Fuzzy AHP 의사결정기법은 애매모호성과 불확실성을 포함함 Fuzzy 이론과 다기준의사결정기법인 AHP가 결합한 의사결정기법으로, 의사결정과정에서 발생하는 의사결정자의 주관성을 삼각 퍼지수로 나타내어 반영하였다. Liou and Wang (1992)와 Yang et al. (2013)은 애매성과 모호성을 포함할수록 좋은 의사결정모형이며, 인간의 의사결정시의 불확실성을 반영한 모형일수록 신뢰성이 높은 모형이라 하였다. 본 연구에서는 Fuzzy AHP 기법을 적용함으로써, 신뢰성 높은 내수침수 위험도 산정방법을 제시하였다.

내수침수 발생 특성을 반영하기 위하여 내수침수와 관련된 인자를 반영한 내수침수 평가기준을 활용하여 침수 위험도를 산정하였다. 내수침수 위험도 평가기준은 3가지 평가기준(물리적 지표, 사회적 지표, 내수침수 시나리오 결과)과 9가지 세부평가기준(유역경사, 유역면적, 지반고, 자연재해위험지구 지정현황, 인구밀도, 아파트 지역 여부, 침수 발생 여부, 월류량, 최대 관거수두)로 구성되어 있다. 평가기준 중 내수침수 시나리오 결과와 사회적 지표 중 아파트 지역 여부 및 자연재해위험지구 지정현황은 내수침수 특성 반영을 위한 평가기준이다. 본 연구에서 제시한 방법의 검증을 위하여 부산시 거제지구 유역에 대하여 내수침수 위험도를 산정한 뒤, 과거에 발생하였던 내수침수피해지역과 비교를 수행하였다. 비록 설문조사의 표본수가 적어 산출된 결과를 그대로 적용할 수는 없지만, 본

Table 7. Calculation example for inundation risk index

Scenario Node	1	2	3	4	...	88	89	90	91	Average
1	-0.642	-0.642	-0.645	-0.646	...	-0.641	-0.642	-0.648	-0.645	-0.644
2	-0.282	-0.282	-0.281	-0.278		-0.275	-0.276	-0.281	-0.278	-0.274
3	-0.205	-0.206	-0.208	-0.210		-0.205	-0.206	-0.212	-0.208	-0.207
...										
104	-0.188	-0.189	-0.190	-0.192	...	-0.187	-0.188	-0.193	-0.190	-0.189
...										
193	0.420	0.423	0.429	0.436	...	0.434	0.433	0.427	0.431	0.431
194	2.478	2.478	2.493	2.496		2.583	2.578	2.503	2.449	2.371
195	-0.097	-0.097	-0.099	-0.100		-0.091	-0.092	-0.101	-0.098	-0.097

연구에서 침수 위험도가 높게 나온 지점이 과거의 침수지역을 포함한다는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 본 연구에서 제안한 내수침수 위험도 평가방법이 실제 배수지역에 적용가능하다는 것을 예증하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 면적 단위가 아닌 지점 단위(노드 기준)로 침수위험도를 산정함으로써, 침수 가능성이 높은 지점을 행정구역 단위로 나타내었던 기존의 연구보다 침수지역의 정보를 구체적으로 나타낼 수 있었다. 또한, 최근 발생빈도가 높아지는 도시지역의 내수침수 특성을 반영한 침수위험도를 Fuzzy AHP 기법을 활용하여 정량적으로 나타내고자 하였다. 본 연구에서 제시한 내수침수 위험도 산정 방법은 추후, 내수침수피해 저감 대책 수립을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원[NEMA-자연-2011-42]을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, S.H., Lee, Y.H., and Hwang, M.K. (2010). "Development of framework for measuring performance of service SCM using Fuzzy-AHP." *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-10 (in Korean).
- Buckley, J.J. (1985). "Ranking alternatives using fuzzy numbers." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 15, No. 1, pp. 21-31.
- Chang, D.Y. (1996). "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP." *European Journal of Operation Research*, Vol. 95, No. 3, pp. 649-655.
- Choi, E.H., Bae, S.S., and Ji, H.K. (2013a). "Prioritization for water storage increase of agricultural reservoir using FAHP method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 171-182 (in Korean).
- Choi, H.I., Park, S.Y., Song, J.H., and Park, M.J. (2013b). "Identification of flood risk areas using a multi-criteria decision making method." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 2, pp. 237-243 (in Korean).
- Choi, S.J., Kang, S.K., Han, S.S., and Lee, D.R. (2011). "Survey the inland flood damage caused by localized rainfall-in Gangnam Seoul-." *Magazine of Korea Water Resources Association, Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 10, pp. 25-29 (in Korean).
- Cruz, R.V., Harasawa, H., Lal, M., Wu, S., Anokhin, Y., Punsalmaa, B., Honda, Y., Jafari, M., Li, C., and Huu Ninh, N. (2007). "Asia." *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Edited by Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., and Hanson, C.E., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 469-506.
- Han, S.H. (2012). "Risk assessment of submerged floating tunnels based on Fuzzy AHP." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 77, pp. 3244-3251 (in Korean).
- Jeon, W.H., and Lee, Y.I. (2010). "Development of evaluation method for environmental friendly property in national highway." *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 87-92 (in Korean).
- Joo, J.G., Jang, J.M., and Kim, J.H. (2013). "Assessment of inundation risk degree for urban areas." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 1, pp. 129-136 (in Korean).
- Kim, J., Park, M., Lee, J., and Jun, H. (2012). "An evaluation of inundation risk of urban watershed using data envelopment analysis." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 4, pp. 179-186 (in Korean).
- Laarhoven, P.J.M., and Pedrycz, W. (1983). "Fuzzy extension of Saaty's priority theory." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 11 pp. 229-241.
- Lee, H.J., and Shim, M.P. (2002). "Decision making for priority of water allocation during drought by analytic hierarchy process." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 703-714 (in Korean).
- Lee, J.H., Lee, W.W., Kim, J.H., and Jun, H.D. (2011). "Estimation of urban inundation risk using Fuzzy C-means." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 4, pp. 229-235 (in Korean).
- Liou, T.S., and Wang, M.J.J. (1992). "Ranking fuzzy

- numbers with integral value.” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 50, pp. 247-256.
- Park, M., Song, Y., Kim, S., and Park, M. (2012). “A study on the assessment method for high risk urban inundation area using flood vulnerability index.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 245-253 (in Korean).
- Park, M.J., and Choi, S.W. (2008). “Development of an inundation risk evaluation method based on a multi criteria decision making.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 4, pp. 365-377 (in Korean).
- Ryu, S.W., and Her, D.G. (2012). “Cost risk analysis for preparing budgets of information security using Fuzzy AHP.” *Journal of the Korea Safety Management and Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 119-126 (in Korean).
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process*. RWS Publication, Pittsburgh.
- Seoul Development Institute (2007). Improvement of the flood insurance for Seoul citizen.
- Shim, J.H., and Choi, S.Y. (2012). “Analysis of urban flood damage and adaptation strategies for flood response in future.” *Magazine of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 45, No. 7, pp. 16-22 (in Korean).
- Shin, J.Y., Lim, S.M., Kim, J.H., and Kim, T.W. (2014). “Analysis of urban flood damage characteristics using inland flood scenarios and flood damage curve.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 1, pp. 291-301 (in Korean).
- Shon, T.S., Kang, D.H., Jang, J.K., and Shin, H.S. (2010). “A study of assessment for internal inundation vulnerability in urban area using SWMM.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 105-117 (in Korean).
- Song, J.H., Kim, S., Park, M.J., Choi, H.I. (2013). “Estimation of flood risk index for the Nakdong River watershed.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-45 (in Korean).
- Song, Y.H., and Lee, J.H. (2012). “Evaluation method of urban inundation risk using multi criteria decision making method.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 209-214 (in Korean).
- Srdjevic, B., and Medeiros, Y.D.P. (2008). “Fuzzy AHP assessment of water management plans.” *Water Resources Management*, Vol. 22, pp. 877-894.
- Yang, X., Ding, J., and Hou, H. (2013). “Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measure analysis.” *Natural Hazards*, Vol. 68, pp. 657-674.
- Yeonjegu (2012). Basic design and working design of Maintenance project on natural disaster prone areas in Geoje district.
- Zadeh, L. (1965). “Fuzzy set.” *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-390.

논문번호: 14-051	접수: 2014.06.23
수정일자: 2014.08.18/08.20	심사완료: 2014.08.20