

MCDM 기법을 이용한 도심지 토사재해 예방을 위한 도시계획적 대책 위치 결정방법 제안

문용희 · 이상은* · 김소은 · 김명수

국토연구원 도시연구본부 도시방재·수자원센터
(2017. 5. 22. 접수 / 2017. 7. 28. 수정 / 2017. 10. 19. 채택)

Determining the Location of Urban Planning Measures for Preventing Debris-Flow Risks: Based on the MCDM Method

Yonghee Moon · Sangeun Lee* · Soyeon Kim · Myoungsoo Kim

Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong, Korea
(Received May 22, 2017 / Revised July 28, 2017 / Accepted October 19, 2017)

Abstract : The landslide disaster damage has been increased by mountain development, leading to construction of educational facilities, medical facilities, petty industrial facilities, and large housing complexes. Therefore, effective regulation is required as an effort in urban planning solutions. For suggesting specific mitigation strategies on urban landslide, this study aims to define evaluation criteria for urban planning management of debris-flow disaster. AHP (Analytic Hierarchy Process), one of the multiple criterion decision making methods, was utilized in this study. This study makes use of 16 sub-criteria under the framework of hazard, exposure, and vulnerability, and well-planned expert survey measures their weights. The weights are also applied to evaluate each grid in urban space (min 10 x 10 m) and classify it with red, orange, yellow, or green grade so that areas at higher risk are clearly identified. This study concludes that the suggested method is useful to support a strategies for urban planning management of debris-flow disaster, particularly in a GIS base.

Key Words : debris-flow, AHP, risk mapping, urban planning approach

1. 서론

최근 기후변화에 따른 게릴라성 집중호우의 빈도 증가로 인해 산사태로 인한 재해가 증가되고 있다¹⁾. 산사태 피해면적은 80년대 231 ha, 90년대 349 ha, 2000년대 713 ha로 급속하게 증가하고 있는데, 이는 2000년대의 산사태 발생규모가 1980년대 대비 3배 이상 증가하였음을 의미한다²⁾. 산지면적이 국토의 절반이상을 차지하는 우리나라는 도시 외곽부가 대부분 산지로 많이 이루어져 있어, 과거 주거지 확보를 위해 무분별하게 산지 절개가 이루어졌다. 최근에도 도시 외곽부 산지에 교육 및 병원시설, 영세 산업시설, 주택단지 등이 진입하고 있다. 이 같은 상황에서 특히, 2011년 우면산 산사태가 발생한 것을 계기로 실효성 있는 예방 대책의 중요성을 인식하게 되었다. 아울러 정부와 연구자들은 도시계획차원에서 적절한 저감대책과 규제대책

을 강구하는 데 필요한 요소기술을 개발하기 위해 국가 연구 사업을 진행해 오고 있다^{3,4,5)}.

도심지 토사재해의 피해는 매우 다양한 변수들에 의해 변화될 수 있기 때문에 위험지역을 선정하는 작업은 복잡하고 어려운 의사결정을 필요로 한다. 따라서 토사재해 고위험지역을 보다 체계적으로 선정하기 위해, 다기준 의사결정기법(Multi Criteria Decision Making, MCDM) 중 하나인 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석기법의 유용성을 검토하고자 하였다^{6,7,8,9)}. AHP 분석기법은 여러 가지 대안(alternatives)의 우선순위를 판단하기 위해 다양한 평가기준(criteria)에 대한 성과의 가중 합(weighted sum)으로 결정하는 방법이다¹⁰⁾. AHP 분석기법은 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 특히 정량화가 어려운 부분에서 연구결과에 대한 신뢰성을 향상시키는 목적으로 가중치를 선정하고 의사결정을 내릴 때 좋은 기법으로 사용되고 있다. 대표적인 연구사례는

* Corresponding Author : Lee Sangeun, Tel : +82-44-960-0465, E-mail : selee@krihs.re.kr

Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, 5 Gukchaeyeonguwon-ro, Sejong 30147, Korea

산사태 취약지 결정 및 유발인자⁷⁾, 급경사지재해 취약성 평가표 개발⁸⁾, 댐건설사업 우선순위 결정방법⁹⁾ 등이 있다.

본 연구는 기존의 산지에 국한된 토사재해 위험등급 평가기법과는 차별된 직접적으로 재해가 발생하는 도심지 토사재해 예방을 위한 도시계획 수립단계에서 도시지역 토사재해의 저감대책과 규제대책을 추진할 수 있도록 고위험지역의 위치를 합리적으로 결정하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 방법론: 다기준 의사결정기법(MCDM)

2.1 계층 구조설계

본 연구는 도시지역 가운데 토사재해 고위험지역의 위치 결정을 위해 의사결정 문제를 Fig. 1과 같이 계층화 하였다. 토석류에 의해 직·간접적으로 피해가 미치는 영향은 다양하지만, 본 연구에서는 특별히 인적피해에 초점을 두고 평가 기준을 마련하였다. 취약성 항목에 건축 정보가 수집되므로 완전히 배제되었다고 할 수 없지만 건축에 대한 하위변수에 인적피해가 발생할 수 있는 구조를 가중치로 부여했으므로 재산피해에 대한 변수를 고려한 것은 아니다. 1단계 평가기준은 일반적인 위험도 구성요소를 고려해 재해특성, 노출특성 그리고 취약성의 3가지 항목으로 구분하였다. 2단계 평가기준의 경우, 재해특성은 각 공간의 확률강우량 30년 조건과 100년 조건 토사발생량으로 구분하였다. 노출특성의 경우 용도지역의 종류와 도시계획시설의 분포로 구분하였으며, 취약성은 인구와 건축물에 부속된 취약성으로 정의하였다. 3단계 평가기준의 경우 용도지역은 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역으로

구분하였고, 도시계획시설은 인적피해 발생과 비교적 밀접한 관계가 있는 학교, 청소년수련시설, 종합병원, 사회복지시설, 공공시설 그리고 공급시설로 한정하였다. 또한 인구의 취약성은 인구밀도, 재해취약인구비율, 2층 이하 거주인구를 고려하였고, 건축물 취약성은 노후도, 건축구조 그리고 지하 유·무를 우선 고려하였다. 평가기준을 발굴함에 있어서, 평가의 공간단위에 해당하는 대안(alternatives)은 소규모 격자수준(10 m×10 m)으로 가정하였다. 본 연구에 대한 최종목표는 토사재해 예방형 도시계획을 위한 전략제시이므로 각 지면에 따른 전략제시가 필요하여 소규모 격자수준을 채택하였다. 이는 국가 연구개발 사업⁴⁾을 통해 최근 개발되고 있는 정밀 위험도 평가기술과 연계하기 위함이다. 최종적으로 설계된 계층구조에 대해서는 지반·수자원 분야 5인, 도시계획·방재 분야 3인 등 총 8인으로 구성된 전문가 자문회의를 실시하여 의견을 청취한 뒤 최종 보완하였다.

2.2 설문조사

Fig. 1의 계층구조에서 제시된 평가기준간의 상대적 중요도를 파악하기 위해 쌍대비교 설문을 작성하였다. 설문조사 항목은 평가항목 간 쌍대비교를 통해 이루어졌으며, 평가항목 간 중요도를 1부터 9까지 척도로 나누어 9점 척도로 구분하였다. 조사방법은 지반·수자원, 도시계획, 방재 등 관련분야에 종사하는 전문가 30인을 대상으로 개별연락을 취해 설문의 취지와 내용을 자세히 설명하였으며, 이후 이메일을 통해 설문지를 전달하였다. 조사기간은 2017년 2월 9일부터 2월 17일까지 8일 동안 이루어졌으며 설문답변은 30명 중 28인으로 총 93%의 회수율을 보였다.

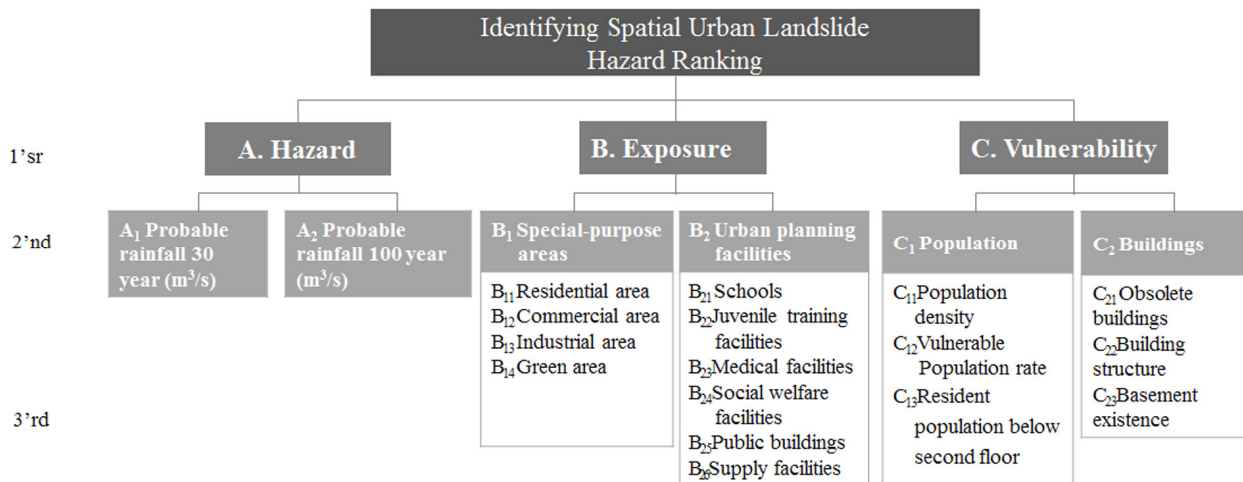


Fig. 1. Hierarchy structure of the evaluation factors for urban planning management of debris-flow disaster.

2.3 고유 벡터법을 활용한 가중치 분석

평가기준 간의 상대적인 중요도에 대한 응답결과를 토대로 응답자마다 쌍대비교행렬을 작성하였다. 각 응답자의 쌍대비교행렬은 아래와 같이 고유 벡터법(eigenvector method)을 이용해 가중치 값을 계산하였다.

$$A \cdot v = \lambda_{\max} \cdot v$$

A는 응답결과를 통해 작성된 응답자별 쌍대비교행렬이고, λ_{\max} 는 행렬 A의 최대 고유치(eigenvalue)이며, v는 고유벡터(eigenvector)를 의미한다. v의 각 성분을 벡터값의 합으로 나누어 정규화한 값이 가중치가 된다. 이와 같은 과정을 통해 각 평가항목에 대한 응답자 개인별 가중치를 도출한 후, 응답자 28인의 가중치를 평가항목별로 기하평균 계산을 하여 각 평가항목에 대한 최종적인 가중치를 얻었다. 하지만 평가기준간의 상대적인 중요도에 대한 개인별 응답에 있어서 논리적인 일관성이 결여되어 있다면, 해당 응답은 평가기준의 가중치를 결정하는 데 잘못된 영향을 미칠 수 있다. 개인별 응답의 논리적 일관성을 판정하기 위해 평가기준의 각 단계마다 전체 전문가 응답자 중 일관성비율(consistency ratio, CR)의 값을 기준으로, CR값이 허용 가능한 수준⁶⁾에 해당되는 0.2를 상회하는 응답자는 배

제하였다. 또한 타 응답자와 의견이 전혀 동 떨어지는 설문결과를 제외하기 위해 평가기준의 각 가중치 마다 Box Plot을 그린 뒤 3분위와 1분위의 차(IQR)의 1.5배 밖의 가중치를 부여한 응답자를 추가적으로 배제하였다. 나머지 응답자의 평가기준별 가중치를 각각 산정한 뒤 기하평균을 통해 전체 전문가 그룹의 가중치를 도출하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 AHP 분석 결과에 따른 평가항목별 가중치결과

응답자 28인에 대한 설문지를 토대로 고유 벡터법을 활용한 계산 결과를 단계별로 제시하였다. 1단계 평가 기준에서는 일관성이나 이상치 문제가 발견된 응답자는 전혀 없었다(부록 1). 기하평균을 통해 전체 응답자의 평가기준별 가중치를 계산한 결과, 전문가들은 재해 특성(0.299), 노출특성(0.332) 그리고 취약성(0.369)의 순으로 중요도를 부여하였다. 산사태 또는 토석류의 발생은 인간에게 피해를 입히지 않는다면 자연적 현상에 불과하지만 대피할 수 없는 취약인구나 붕괴되기 쉬운 건축물과 같은 취약성이 직접적으로 인명피해로 연결된다고 판단한 것으로 볼 수 있다¹¹⁾.

설문조사 응답자 28인에 대한 2단계 가중치 계산 결

Table 1. Global weighting and local weighting values of the first-step, second-step and third-step factors

1 st -layer Criteria	Local weighting	2 nd -layer Criteria	Local weighting	Global weighting	3 rd -layer Criteria	Local weighting	Global weighting
Hazard	0.299	Impact from rainfall with the 30-year return period	0.500	0.1495			
		Impact from rainfall with the 100-year return period	0.500				
Exposure	0.332	Special-purpose areas	0.4689	0.156	Residential area	0.5505	0.0857
					Commercial area	0.2681	0.0418
					Industrial area	0.1397	0.0218
					Green area	0.0416	0.0065
		Urban planning facilities	0.5311	0.176	Schools	0.1976	0.0349
					Juvenile training facilities	0.0776	0.0137
					Medical facilities	0.3275	0.0578
					Social welfare facilities	0.2093	0.0369
					Public buildings	0.0835	0.0147
					Supply facilities	0.1045	0.0184
Vulnerability	0.369	Population	0.8209	0.303	Population density	0.1452	0.0440
					Vulnerable Population rate	0.4971	0.1506
					Resident population below second floor	0.3577	0.1084
		Buildings	0.1791	0.066	Obsolete buildings	0.3798	0.0251
					Building structure	0.3627	0.0240
					Basement existence	0.2575	0.0170

Table 2. Evaluation indicators for urban planning management of debris-flow disaster

Criteria	Weighting	Classification	Evaluation value
Impact from rainfall with the 30-year return period	0.1495	> 10 m ² /s	1.00
		10 m ² /s ~ 3 m ² /min	0.67
		3 m ² /min ~ 0.9 m ² /hr	0.33
		< 0.9 m ² /hr	0.00
Impact from rainfall with the 100-year return period	0.1495	> 10 m ² /s	1.00
		10 m ² /s ~ 3 m ² /min	0.67
		3 m ² /min ~ 0.9 m ² /hr	0.33
		< 0.9 m ² /hr	0.00
Residential area	0.0857	O	1.00
		X	0.00
Commercial area	0.0418	O	1.00
		X	0.00
Industrial area	0.0218	O	1.00
		X	0.00
Green area	0.0065	O	1.00
		X	0.00
Schools		O	1.00
		X	0.00
Juvenile training facilities		O	0.67
		X	0.00
Medical facilities		O	1.00
		X	0.00
Social welfare facilities	0.4689	O	1.00
		X	0.00
Public buildings		O	0.67
		X	0.00
Supply facilities		O	0.67
		X	0.00
Population density	0.0440	>3 person/100m ²	1.00
		2-3 person/100m ²	0.67
		1-2 person/100m ²	0.33
		< 1 person/100m ²	0.00
Vulnerable Population rate	0.1506	>50 %	1.00
		30-50 %	0.67
		10-30 %	0.33
		< 10 %	0.00
Resident population below second floor	0.1084	>3 person/100 m ²	1.00
		2-3 person/100 m ²	0.67
		1-2 person/100 m ²	0.33
		< 1 person/100 m ²	0.00
Obsolete buildings	0.0251	>30 year	1.00
		20-30 year	0.67
		10-30 year	0.33
		< 10 year	0.00
Building Structure	0.0240	Light Steel framed and Wooden structure	1.00
		Masonry structure	0.67
		Reinforced concrete Structure or others	0.33
		None Structure	0.00
Basement existence	0.0170	O	1.00
		X	0.00

과는 부록 2에 정리하였다. 취약성에서 5인의 설문자료가 이상치(outlier)로 검출되어 계산에서 제외하였다. 노출특성의 2단계 평가기준에 대한 가중치 분석결과는 도시계획시설 0.531 그리고 용도지역 0.469로 도시계획시설의 노출이 다소 더 중요한 것으로 나타났다(부록 2). 취약성의 2단계 평가기준인 인구와 건축물의 가중치는 건축물(0.179)에 비해 인구(0.821)가 훨씬 높게 나타났다(부록 2). 이러한 결과는 토사재해가 인명피해와 관련성이 높으므로 지역주민의 거주 위치에 더 중요도를 부여한 것을 알 수 있다.

2단계 평가기준 용도지역, 도시계획시설, 인구 그리고 건축물에 대한 3단계 평가기준들의 가중치 분석 결과는 부록 3, 4, 5에 정리하였다. 3단계 평가기준 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역에 대한 설문조사는 응답자 28명 중 5명은 일관성이 부족으로 6명은 이상치로 검출되어 계산에서 제외하였다(부록 3). 가중치 분석 결과는 용도지역 중 주거지역이 0.551로 가장 높게 계산되었고, 상업지역(0.268), 공업지역(0.136) 순으로 산정되었다. 주거지역이 다른 용도지역에 비해 가중치가 월등히 높게 책정된 것은 경제적 피해보다 인적재해가 우선적으로 고려되었기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 생각된다. 도시계획시설에 대한 3단계 평가기준 설문조사 결과는 설문응답자 28명이 일관성 비율이 0.2 이하로 설문응답에 대한 일관성이 높게 나타났으나 이들 중 5명은 이상치로 검출되어 분석에서 제외하였다(부록 5). 도시계획시설에 대한 3단계 평가기준 가중치 분석결과는 종합의료시설(0.328)이 가장 높게 나타났으며 다음으로는 사회복지시설 (0.209) 그리고 학교(0.198)로 나타났다. 이는 토석류 발생이후 2차적으로 발생 가능한 재해보다는 토석류 발생 시 대처능력이 부족한 연령층이 상시 거주하는시설에서 1차적인 토사피해 즉 인적피해가 발생 할 가능성이 높기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다. 인구에 대한 3단계 평가기준 설문조사 결과는 설문조사 응답자 28명 중 4명은 일관성이 부족 하여 제외하였고 24명 중 4명은 이상치로 검출되어 분석에서 제외하였다(부록 4). 3단계 평가기준에 대한 가중치 분석결과는 재해취약인구비율(0.497)로 가장 높게 나타났으며 다음으로는 2층 이하 인구비율(0.358) 그리고 인구밀도(0.145)로 나타났다. 이러한 결과 또한 도시계획시설과 마찬가지로 인적피해가 즉시 발생할 가능성이 높기 때문에 나타난 결과로 생각된다. 건축물에 대한 3단계 평가기준 설문조사 결과는 설문조사 응답자 28명 중 4명이 일관성 부족으로 분석에서 제외하였다(부록 5). 3단

계 평가기준들의 가중치 분석결과는 건축노후(0.379)가 가장 높게 나타났으며 다음으로는 건축 구조(0.363) 그리고 지하유무(0.258)로 나타났다. 평가기준들 간의 가중치가 거의 유사하게 분석되었다.

3.2 방재대책 위치 결정을 위한 평가기준 개발

토사재해 예방형 도시계획 대책을 위한 위험 지역 위치결정 기준을 마련하기 위한 1단계에서 3단계까지의 평가기준 각각의 항목별 가중치(Local weighting)와 전체 가중치(Global weighting) 결과를 Table 1에 정리하였다. 항목별 가중치는 단계별 변수들 간의 상대적인 가중치에 대한 평가가 용이하여 전체가중치는 계층구조에서 제시된 평가기준간의 상대적 중요도를 한눈에 파악 하는 것이 용이하다. 항목별 가중치에 대한 상대적 중요도에 대한 결과는 부록 1,2,3,4,5에서 논의된 바 있으며, 전체가중치에 대한 결과는 취약성 항목에서 취약인구비율에 대한 가중치가 가장 높고 다음으로는 재해특성 항목이 높게 계산되었다(Table 1).

토사재해가 발생가능 지역의 위험공간등급을 수치적으로 적용하기 위해서는 각각의 대리변수 단계에서 상세지표가 필요하다. 따라서 Table 1에 정리된 가중치 자료를 이용하여 각각의 평가기준에 대한 상세지표를 개발하였다(Table 2). 평가기준들에 대한 지수는 균등분할되는 것이 아니라 위험등급이 수치로 책정 가능한 평가기준에서는 참고문헌을 통해 기준을 마련하였다. 토지이용, 도시계획시설 그리고 건축물과 같이 조사대상지역의 존재 판단되는 평가기준은 가중치 값의 우선순위에 따라 등급을 판단하였다.

각각의 평가항목에 대한 상세기준에 대해 살펴보면, 재해특성(Hazard)의 2단계 평가기준인 확률강우량 30년 빈도와 100년 빈도에 대한 가중치는 각각 0.5로 분석되었다. 재해특성에 따른 재해위험 등급지수는 Cruden et al., (1996)¹²⁾와 Cascini(2004)¹³⁾ 등이 제안한 토사재해 위험 등급기준을 참고하여 토사높이와 속도를 고려한 체적량(m^2/s)의 값을 지표로 제안하였다.

인구에 대한 3단계 평가기준인 인구밀도는 전국에서 가장 인구밀도가 높은 서울시 양천구지역¹⁷⁾을 최상위등급(Red) 기준으로 선정하였으며, 취약인구비율은 Park et al.,(2014)¹⁴⁾이 제시한 사회경제적 관점 취약성 평가에 대한 정량화 기준을 참고하였다. 토사재해 발생 시 재해영향 높이인 2층 이하 거주인구 지표는 전국에서 세대 당 인구비율이 높은 충남 계룡시를 기준¹⁵⁾으로 정량화하였다. 정량화 지수의 공간적 범위는 100 m^2 (10 m×10 m) 셀 단위를 기준으로 산정된 것이다. 건

축물에 대한 3단계 평가기준인 건축노후도와 건축구조는 2016 서울특별시 도시 및 주거환경 정비조례를 기준으로 구분하였으며 지하유무는 지하가 존재하면 최상위등급(Red) 없으면 최하위등급(Green)으로 구분하였다.

위험 등급에 따른 정량화를 위한 지수는 최상위 등급(Red)은 1.0점 그리고 최하위등급(Green)은 0.0점으로 부여하고 항목별 가중치를 곱하여 평가점수를 책정하였다. 이러한 절대적인 점수를 부여함으로써 대상지와는 무관하게 위험도를 절대적인 축적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라 대상지 간의 비교도 가능하다. 그리고 추후 정밀 시뮬레이션 결과 및 공간정보를 사용해서 별도의 자료 가공작업 없이 공간의 평가점수를 직접적으로 도출 할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 Table 2에서 제시된 평가지표에 대한 기초 속성자료가 축적되면 토사재해 예방형 도시계획 최적입지 선정 기준을 위해 아래 식을 이용하여 대상지역의 셀별 공간 분석이 가능하다.

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^K p^k \times E_{ij}^k$$

R_{ij} 는 공간좌표 (i, j)에 위치한 곳의 위험도 점수(0~1), p^k 는 k번째 평가기준의 가중치값, E_{ij}^k 는 공간좌표 (i, j)에

위치한 곳의 k번째 평가점수로 계산할 수 있다. R_{ij} 의 점수는 Red(>0.75), Orange (>0.5), Yellow(>0.25), Green (<0.25)으로 위험등급지수를 분류할 수 있다. 연구 대상 지역에 대한 항목별 자료가 축적되면 GIS 분석기법을 이용하여 주제별 재해지도가 도출될 것으로 판단되며 토사재해에 대한 위험등급(Red, Orange, Yellow, Green)에 따라 토사재해 위험지도가 표출될 수 있다. 또한 셀 단위 (Min. 10 m×10 m)별로 토사재해 예방형 도시계획을 위한 전략제시가 가능할 것으로 생각된다. 그리고 동일 등급 지역이라도 셀별 속성에 따라 위험공간에 따른 상이한 대책이 제시될 것이다. Fig. 2에서 제시된 흐름도에 따라 향후 토사재해 저감 및 규제대책을 위한 위험도 평가가 가능할 것으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 다기준 의사결정법(MCDM) 중 하나인 AHP 분석기법을 이용하여 도시지역 토사재해의 예방을 위한 고위험지역의 위치 선정 방법을 마련하고자 하였다.

전문가 설문을 통해 AHP 분석방법으로 각각의 평가기준에 대한 가중치가 계산되었다. 가중치 자료를 바탕으로 각각의 평가기준에 대한 상세지표를 개발하였다. 평가기준들에 대한 지수는 균등 분할되는 것이 아

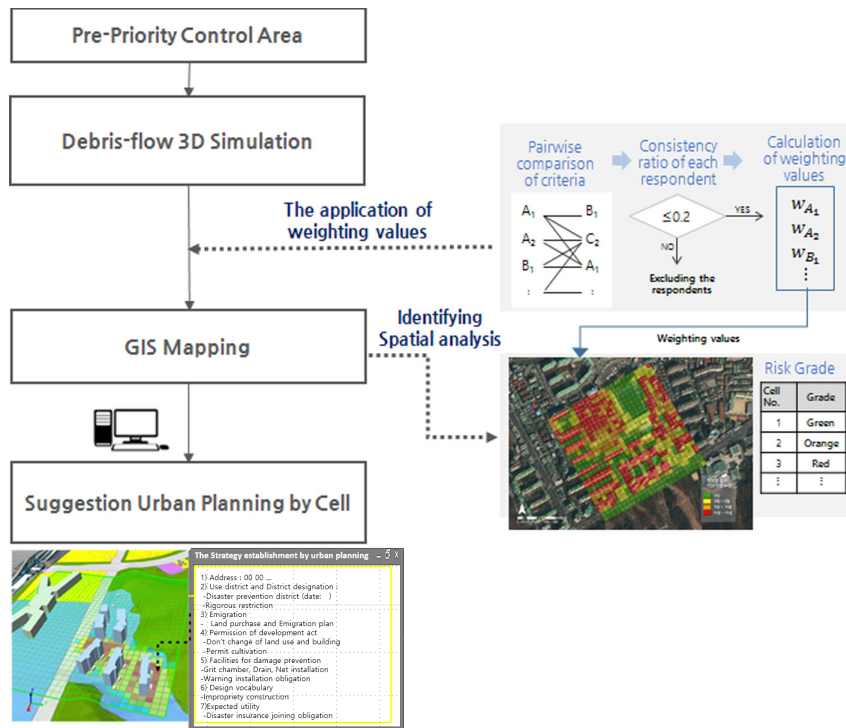


Fig. 2. A schematic flow chart for urban planning management of debris-flow disaster.

나라 위험등급이 재해위험, 인구, 건축노후도와 같이 수치로 책정 가능한 평가기준에서는 특정기준에 따라 4등급(Red, Orange, Yellow, Green)으로 분류하였다. 그리고 토지이용, 도시계획시설 그리고 건축물과 같이 조사대상지역의 존재유무에 의해 판단되는 평가기준은 가중치 값의 우선순위에 따라 등급을 판단하였다. 위험 등급에 따른 정량화는 최상위 등급인 Red(>0.75), Orange (>0.5), Yellow(>0.25), 최하위등급 Green(<0.25)으로 위험등급지수를 분류할 수 있다. 따라서 토사재해 예방형 도시계획을 수립하기 위한 대상지역에 대해 각 평가항목별 속성자료를 수집하고 위험등급별 기준에 대한 평가점수를 합산하면 셀별 공간분석이 가능하다. 또한 동일 등급지역에 대한 도시 계획적 방재 대책이 수립되는 것이 아니라 셀별 속성에 따라 상이한 대책이 제시될 것이다.

본 연구에서 개발된 평가지수를 토대로 향후 도심지 토사재해 도심지 토사재해가 발생했던 지역에 GIS 분석기법을 적용하여 주제별 위험지도 작성을 수행할 예정이다. 그리고 셀별 속성자료에 따라 토사재해 방재 대책을 위한 도시 계획적 위치에 대한 전략제시를 수행할 것이다. 이러한 결과는 방재지구 선정 및 도시·군관리계획에 기초자료로 활용 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통기술연구개발 연구사업의 연구비지원 (도심지 토사재해 예측 3D 시뮬레이션 기술개발 및 통합관리시스템구축 연구사업)에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) J. Oh and H. J. Park, "Analysis of Landslide Triggering Rainfall Threshold for Prediction of Landslide Occurrence", *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol.14, No.2, pp. 115-129, 2014.
- 2) Korea Forest Service, *The Integrated Management System Research of Landslide Occurrence Danger Zone*, KFS Research-report, 2013.
- 3) C. Moon, "The Implementation of Disaster Preventing Urban Plan in district Unit Plan", *The Korea Regional Development Association*, Vol.27, No.2, pp. 155-174, 2015.
- 4) M. S. Kim, Y. Moon and S. Y. Lee, "The Improvement Suggestion of a Natural Disaster Management by Debris-flow Predict 3D Simulation", *The Magazine of the Korea Society Hazard Mitigation*, Vol.16, No.4, pp.51-59, 2016.
- 5) K. Kim, M. Kim and J. S. Lee, "Planning Strategy and Guidelines for the District Unit Plan for Landslide Adaption", *The Korea Society Hazard Mitigation*, Vol.16, No.6, pp. 145-155, 2016.
- 6) Y. M. Kim and I. K. Oh, "A Study on the Applicability of the AHP for Tourism Research", *Korea Academic Society of Tourism Management*, Vol.7, No.8, pp.25-39, 1996.
- 7) I. T. Yang, K. S. Chun and J. H. Park, "The Effect of Landslide Factor and Determination of Landslide Vulnerable Area using GIS and AHP", *Journal of The Korean Society for Geo-Spatial Information System*, Vol.14, No.1, pp.3-12, 2006.
- 8) B. G. Chae, Y. C. Cho, Y. S. Song and Y. S. Seo, "Development of an Evaluation Chart for Landslide Susceptibility using the AHP Analysis Method", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.19, No.1, pp.99-108, 2009.
- 9) G. H. Kim, S. S. Pyo, K. D. Yeo and H. S. Kim, "Determination of Investment Priority for River Improvement Project at Downstream of Dams Using PROMETHEE", *Korea Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.1, pp. 41-51, 2012.
- 10) T. L. Satty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1980.
- 11) J. C. "Jung The Impact of Institutional Settings on Local Hazard Mitigation Effects", *Journal of Korea Planners Association*, Vol.47, No.1, pp.223-242, 2012.
- 12) D. M. Cruden and D. J. Varnes, *Landslide Types and Process In Landslides-Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report No. 247 (A.T. Turner & R.L. Schuster ed.), National Academy Press, Washington DC: 36-75, 1996.
- 13) L. Cascini, Risk Assessment of fast landslide-from theory to practice, *Proc 9th International Symposium on Landslides. Landslides: Evaluation and Stabilization. ISL 04*, 2014.
- 14) Statistics Korea, *Statistical information System*, <http://www.kostat.go.kr>, 2015.
- 15) Y. K. Park, S. Jeong and S. Kim, "Natural Disaster Vulnerability Assessment at Boroughs and Census Output Areas in Seoul Focusing on Socio-economic Perspective", *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* Vol.14, No.6, pp.439-449, 2014.

부록 1. Weighting values of first-step factors for debris-flow susceptibility.

Criteria	Hazard	Exposure	Vulnerability	CR
Respondent 1	0.4286	0.4286	0.1429	0.0000
Respondent 2	0.1916	0.6344	0.1740	0.0080
Respondent 3	0.8000	0.1000	0.1000	0.0000
Respondent 4	0.0542	0.2026	0.7432	0.1037
Respondent 5	0.0933	0.1661	0.7406	0.0121
Respondent 6	0.2772	0.6535	0.0693	0.0569
Respondent 7	0.0542	0.7432	0.2026	0.1037
Respondent 8	0.6272	0.0800	0.2927	0.1204
Respondent 9	0.3077	0.6154	0.0769	0.0003
Respondent 10	0.6397	0.1030	0.2573	0.0336
Respondent 11	0.1429	0.1429	0.7143	0.0003
Respondent 12	0.0800	0.2927	0.6272	0.1204
Respondent 13	0.7473	0.0804	0.1723	0.1193
Respondent 14	0.7532	0.1897	0.0571	0.2178
Respondent 15	0.1030	0.2573	0.6397	0.0336
Respondent 16	0.0920	0.7109	0.1971	0.1193
Respondent 17	0.1293	0.5937	0.2770	0.1187
Respondent 18	0.0505	0.2528	0.6967	0.1603
Respondent 19	0.0605	0.2115	0.7280	0.1641
Respondent 20	0.2573	0.1030	0.6397	0.0336
Respondent 21	0.3196	0.2165	0.4639	0.1172
Respondent 22	0.6227	0.0722	0.3050	0.1664
Respondent 23	0.1030	0.6397	0.2573	0.0336
Respondent 24	0.7859	0.1656	0.0485	0.1882
Respondent 25	0.1630	0.2968	0.5401	0.0078
Respondent 26	0.5957	0.1280	0.2763	0.0049
Respondent 27	0.4286	0.4286	0.1429	0.0000
Respondent 28	0.1293	0.2770	0.5937	0.1187
Geometric mean (revision)	0.2987	0.3321	0.3692	(N=28)

부록 2. Weighting values of second-step factors

Criteria	Exposure			Criteria	Vulnerability		
Sub-criteria	Special-purpose areas	Urban planning facilities	CR	Sub-criteria	Population	Buildings	CR
Respondent 1	0.2500	0.7500	0.0000	Respondent 1	0.7500	0.2500	0.0000
Respondent 2	0.5000	0.5000	0.0000	Respondent 2	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 3	0.2500	0.7500	0.0000	Respondent 3*	0.5000	0.5000	0.0000
Respondent 4	0.8333	0.1667	0.0000	Respondent 4*	0.5000	0.5000	0.0000
Respondent 5	0.1250	0.8750	0.0000	Respondent 5	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 6	0.1667	0.8333	0.0000	Respondent 6	0.7500	0.2500	0.0000
Respondent 7	0.1667	0.8333	0.0000	Respondent 7	0.8750	0.1250	0.0000
Respondent 8	0.6667	0.3333	0.0000	Respondent 8	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 9	0.6667	0.3333	0.0000	Respondent 9*	0.2500	0.7500	0.0000
Respondent 10	0.6667	0.3333	0.0000	Respondent 10	0.8750	0.1250	0.0000
Respondent 11	0.5000	0.5000	0.0000	Respondent 11*	0.5000	0.5000	0.0000
Respondent 12	0.2500	0.7500	0.0000	Respondent 12	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 13	0.5000	0.5000	0.0000	Respondent 13	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 14	0.8571	0.1429	0.0000	Respondent 14	0.8571	0.1429	0.0000
Respondent 15	0.1250	0.8750	0.0000	Respondent 15	0.7500	0.2500	0.0000
Respondent 16	0.8750	0.1250	0.0000	Respondent 16	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 17	0.8333	0.1667	0.0000	Respondent 17	0.7500	0.2500	0.0000
Respondent 18	0.7500	0.2500	0.0000	Respondent 18	0.8889	0.1111	0.0000
Respondent 19	0.1667	0.8333	0.0000	Respondent 19	0.7500	0.2500	0.0000
Respondent 20	0.3333	0.6667	0.0000	Respondent 20	0.8000	0.2000	0.0000
Respondent 21	0.1667	0.8333	0.0000	Respondent 21	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 22	0.2500	0.7500	0.0000	Respondent 22*	0.5000	0.5000	0.0000
Respondent 23	0.7500	0.2500	0.0000	Respondent 23	0.8889	0.1111	0.0000
Respondent 24	0.2500	0.7500	0.0000	Respondent 24	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 25	0.7500	0.2500	0.0000	Respondent 25	0.7500	0.2500	0.0000
Respondent 26	0.6667	0.3333	0.0000	Respondent 26	0.7500	0.2500	0.0000
Respondent 27	0.8000	0.2000	0.0000	Respondent 27	0.8333	0.1667	0.0000
Respondent 28	0.2000	0.8000	0.0000	Respondent 28	0.8333	0.1667	0.0000
Geometric mean (revision)	0.4689	0.5311	(N=28)	Geometric mean (revision)	0.8209	0.1791	(N=23)

*Outlier excluded

부록 3. Weighting values of third-step factors for the special-purpose areas.

Alternative	Residential areas	Commercial areas	Industrial areas	Green areas	CR
Respondent 1	0.5318	0.2091	0.2091	0.0501	0.0274
Respondent 2	0.3969	0.3969	0.1467	0.0594	0.0076
Respondent 3 [*]	0.3293	0.1378	0.4885	0.0444	0.1363
Respondent 4 ^{**}	0.7228	0.1936	0.0605	0.0231	0.3066
Respondent 5 ^{**}	0.6097	0.2909	0.0674	0.0321	0.2269
Respondent 6 [*]	0.1228	0.2732	0.5669	0.0370	0.0645
Respondent 7 [*]	0.0483	0.3827	0.3827	0.1862	0.1007
Respondent 8	0.3868	0.4830	0.0955	0.0347	0.1019
Respondent 9	0.4706	0.2353	0.2353	0.0588	0.0000
Respondent 10	0.6619	0.2044	0.0906	0.0430	0.0647
Respondent 11	0.6039	0.1233	0.2403	0.0325	0.1947
Respondent 12	0.5989	0.2334	0.1213	0.0464	0.1914
Respondent 13 [*]	0.4795	0.2828	0.1516	0.0861	0.1168
Respondent 14 ^{**}	0.6054	0.2675	0.0918	0.0354	0.2150
Respondent 15 [*]	0.1545	0.5076	0.2909	0.0470	0.0875
Respondent 16	0.3369	0.5149	0.1157	0.0325	0.1964
Respondent 17	0.4923	0.3619	0.1200	0.0257	0.1589
Respondent 18 ^{**}	0.4642	0.3710	0.1351	0.0296	0.2039
Respondent 19	0.6286	0.2571	0.0838	0.0305	0.1771
Respondent 20	0.5896	0.1712	0.1712	0.0679	0.0226
Respondent 21	0.4978	0.3119	0.1615	0.0288	0.1216
Respondent 22 ^{**}	0.5915	0.2872	0.0948	0.0266	0.2006
Respondent 23	0.6286	0.2571	0.0838	0.0305	0.1771
Respondent 24	0.6462	0.2239	0.1035	0.0263	0.1733
Respondent 25	0.5107	0.2536	0.1728	0.0629	0.0593
Respondent 26	0.5562	0.2874	0.1048	0.0516	0.0646
Respondent 27	0.6295	0.1679	0.1679	0.0348	0.1313
Respondent 28 ^{**}	0.5464	0.3187	0.1110	0.0239	0.2428
Geometric mean (revision)	0.5505	0.2681	0.1397	0.0416	(N=17)

*Outlier excluded, **CR>0.2 excluded

부록 4. Weighting values of third-step factors for the urban planning facilities.

Alternative	Schools	Juvenile training facilities	Medical facilities	Social welfare facilities	Public buildings	Supply facility	CR
Respondent 1	0.2197	0.0397	0.2197	0.2197	0.0816	0.2197	0.0063
Respondent 2*	0.0712	0.0712	0.1892	0.1892	0.0307	0.4485	0.0148
Respondent 3	0.0484	0.1579	0.4150	0.2767	0.0750	0.0270	0.1786
Respondent 4	0.4769	0.1315	0.1943	0.1134	0.0587	0.0251	0.0874
Respondent 5	0.4078	0.0229	0.1680	0.2680	0.0896	0.0437	0.0576
Respondent 6*	0.3552	0.0807	0.0517	0.1204	0.3552	0.0368	0.0245
Respondent 7	0.4415	0.0246	0.1530	0.0421	0.0704	0.2684	0.0949
Respondent 8	0.2508	0.1286	0.2887	0.2775	0.0199	0.0344	0.1340
Respondent 9	0.1250	0.1250	0.2500	0.2500	0.1250	0.1250	0.0000
Respondent 10*	0.2676	0.0554	0.2676	0.0304	0.2676	0.1114	0.0197
Respondent 11*	0.2302	0.2302	0.2224	0.2302	0.0600	0.0272	0.0368
Respondent 12	0.0988	0.0988	0.2964	0.2964	0.0838	0.1257	0.0226
Respondent 13	0.1757	0.0524	0.3592	0.2062	0.1130	0.0934	0.0688
Respondent 14	0.1565	0.0306	0.3342	0.0661	0.0402	0.3724	0.1238
Respondent 15*	0.4197	0.0902	0.0603	0.0357	0.2344	0.1598	0.0868
Respondent 16	0.1111	0.0509	0.1767	0.1767	0.1318	0.3527	0.0786
Respondent 17	0.2912	0.0857	0.3639	0.0806	0.0357	0.1428	0.0903
Respondent 18	0.1614	0.0730	0.3977	0.1707	0.0425	0.1548	0.0581
Respondent 19	0.4268	0.0456	0.2043	0.2043	0.0940	0.0249	0.0415
Respondent 20	0.3377	0.1673	0.1748	0.1225	0.0747	0.1229	0.0920
Respondent 21	0.1665	0.0619	0.3717	0.2127	0.1132	0.0741	0.1001
Respondent 22	0.0566	0.0965	0.4072	0.1975	0.0323	0.2100	0.0879
Respondent 23	0.1173	0.0507	0.4163	0.2751	0.1076	0.0330	0.0788
Respondent 24	0.0794	0.0318	0.3271	0.2943	0.0775	0.1899	0.1704
Respondent 25	0.2642	0.1984	0.3131	0.1041	0.0715	0.0487	0.0413
Respondent 26	0.1037	0.0607	0.4066	0.2600	0.1298	0.0393	0.0670
Respondent 27	0.1063	0.0601	0.2085	0.3017	0.0786	0.2449	0.0570
Respondent 28	0.1557	0.0533	0.4410	0.2352	0.0868	0.0281	0.1032
Geometric mean (revision)	0.1976	0.0776	0.3275	0.2093	0.0835	0.1045	(N=23)

*Outlier excluded

부록 5. Weighting values of third-step factors for population and buildings.

Sub-criteria	Population				Buildings			
Alternative	Population density	Vulnerable Population rate	Resident population below second floor	CR	Obsolete buildings	Building structure	Basement existence	CR
Respondent 1	0.1630	0.5401	0.2968	0.0078	0.1630	0.5401	0.2968	0.0078
Respondent 2*	0.5818	0.1093	0.3090	0.0034	0.5818	0.1093	0.3090	0.0034
Respondent 3	0.0899	0.6328	0.2773	0.0750	0.0899	0.6328	0.2773	0.0750
Respondent 4	0.2026	0.7432	0.0542	0.1037	0.2026	0.7432	0.0542	0.1037
Respondent 5	0.1661	0.7406	0.0933	0.0121	0.1661	0.7406	0.0933	0.0121
Respondent 6	0.1030	0.2573	0.6397	0.0336	0.1030	0.2573	0.6397	0.0336
Respondent 7	0.0605	0.7280	0.2115	0.1641	0.0605	0.7280	0.2115	0.1641
Respondent 8**	0.3087	0.2084	0.4828	0.4905	0.3087	0.2084	0.4828	0.4905
Respondent 9	0.2000	0.4000	0.4000	0.0000	0.2000	0.4000	0.4000	0.0000
Respondent 10*	0.6397	0.1030	0.2573	0.0336	0.6397	0.1030	0.2573	0.0336
Respondent 11	0.1550	0.6607	0.1843	0.0253	0.1550	0.6607	0.1843	0.0253
Respondent 12**	0.0986	0.3137	0.5877	0.2655	0.0986	0.3137	0.5877	0.2655
Respondent 13	0.3333	0.3333	0.3333	0.0000	0.3333	0.3333	0.3333	0.0000
Respondent 14**	0.1897	0.7532	0.0571	0.2178	0.1897	0.7532	0.0571	0.2178
Respondent 15	0.1030	0.2573	0.6397	0.0336	0.1030	0.2573	0.6397	0.0336
Respondent 16*	0.7109	0.0920	0.1971	0.1193	0.7109	0.0920	0.1971	0.1193
Respondent 17	0.0863	0.3514	0.5622	0.0468	0.0863	0.3514	0.5622	0.0468
Respondent 18	0.2146	0.6379	0.1474	0.0940	0.2146	0.6379	0.1474	0.0940
Respondent 19	0.1030	0.2573	0.6397	0.0336	0.1030	0.2573	0.6397	0.0336
Respondent 20	0.1093	0.3090	0.5818	0.0034	0.1093	0.3090	0.5818	0.0034
Respondent 21	0.2586	0.3276	0.4138	0.0466	0.2586	0.3276	0.4138	0.0466
Respondent 22	0.1140	0.6196	0.2664	0.0641	0.1140	0.6196	0.2664	0.0641
Respondent 23	0.0642	0.7399	0.1959	0.0825	0.0642	0.7399	0.1959	0.0825
Respondent 24*	0.7550	0.1611	0.0838	0.2075	0.7550	0.1611	0.0838	0.2075
Respondent 25	0.1293	0.5937	0.2770	0.1187	0.1293	0.5937	0.2770	0.1187
Respondent 26	0.0892	0.2160	0.6948	0.0466	0.0892	0.2160	0.6948	0.0466
Respondent 27**	0.0699	0.7077	0.2224	0.2684	0.0699	0.7077	0.2224	0.2684
Respondent 28	0.0793	0.2115	0.7091	0.1940	0.0793	0.2115	0.7091	0.1940
Geometric mean (revision)	0.1452	0.4971	0.3577	(N=20)	0.1452	0.4971	0.3577	(N=20)

Note) * and ** were excluded for outlier and consistency problems, respectively.