

방어구조물 형상에 따른 토석류의 유입특성과 위험도 평가

오승명 · 송창근 · 이승오*

인천대학교 안전공학과 · *홍익대학교 건설도시공학부
(2016. 3. 14. 접수 / 2016. 9. 30. 수정 / 2016. 12. 2. 채택)

Inflow Characteristics of Debris Flow and Risk Assessment for Different Shapes of Defensive Structure

Seung Myeong Oh · Chang Geun Song · Seung Oh Lee**

Department of Safety Engineering, Incheon National University

*School of Urban and Civil Engineering, Hongik University

(Received March 14, 2016 / Revised September 30, 2016 / Accepted December 12, 2016)

Abstract : This study analyzed the inflow characteristics of debris flow according to shape of defensive structure and computed risk index. In order to simulate debris flow, two shapes of defensive structure were considered. Initial mass distribution was set with a rectangular shape and defensive structures were set semi-circular shape and rectangular shape, respectively. It was found that a defensive structure with semicircular shape was more vulnerable to debris impact compared with rectangular shape because the flow mass became concentrated in quadrant part of the inner circle. If the velocity of the debris flow was less than 1 m/s, the risk assessment by FII (Flood Intensity Index) was much appropriate. However, when the movement of debris runout was faster than 1 m/s, the risk index of FHR (Flood Hazard Rating) provided improved classification due to its subdivided hazardous range.

Key Words : debris flow disaster, risk assessment, shape of defensive structure, FII, FHR

1. 서론

최근 지구환경 변화로 인해 집중호우, 태풍 등 기상 이변의 발생횟수와 규모가 증가함에 따라 토사붕괴로 인한 물적, 인적피해가 증가하고 있으며 그 재발빈도도 증가하고 있다. 우리나라 역시 비슷한 실정으로 국토의 2/3 이상이 산지로 구성되어 있으며, 경사가 급하고 토심이 얇아 집중호우 시 토압이 급상승하고 토사의 응집력이 저하되어 토사재해에 매우 취약하다. 또한 1970년대부터 시작된 국토개발계획으로 전국 곳곳에서 산이 절취되고 저지대가 매립되어 그 위에 도로를 건설하거나 주택을 짓는 경우가 많아졌다. 이로 인해 급경사지 인근에 산업지구와 거주지 등이 인접하게 되어 피해가 더욱 가중되고 있다. 2011년 발생한 우면산 산사태가 이를 여실히 보여주는 대표적인 사례로 이전에도 규모가 더 큰 산사태가 많았으나 우면산 산사태가 큰 파장을 불러온 이유는 서울 도심지에서 발

생하여 큰 인명피해와 재산피해를 불러일으킨 점이다. 이처럼 도심지에서 발생한 토석류로 인한 재해는 주택, 산업시설, 공공시설 등에 직접적인 피해를 입히므로 토사재해 대응 시설물에 의한 구조적 방어대책에 대한 연구가 시급한 실정이다.

토석류에 관한 최근 국내 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. Choi and Paik¹⁾은 Heim(1932)이 제안한 Sled 모형에 근거하여 토석류 이동성을 나타내는 토석류의 순효율 값을 국내 238개의 토석류 현장자료를 분석하여 산정하였다. Kim et al.²⁾은 토석류 대응 구조물인 사방댐의 국내 설계 시 고려되고 있지 않은 토석류의 충격력 특성을 평가하기 위해 동일한 경사 조건에서 토석류의 입자 크기를 다르게 하여 실험을 수행하였다. Seong et al.³⁾은 토석류의 충격력을 분석하기 위해 2차원 동수역학 수치모형을 이용하여 사태물질의 성질과 경사면이 동일한 조건에서 사태물질의 초기형상과 방어구조물의 형상 차이에 따른 결과를 비교하였다. Choi

* Corresponding Author : Seung Oh Lee, Tel : +82-2-325-2332, E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr
School of Urban and Civil Engineering, Hongik University, 94, Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066 Korea

et al.⁴⁾은 토석류에 의한 구조물의 취약성을 평가하는 방법으로 지진에 따른 구조물의 동적응답이론과 HAZUS-MH에서 제시한 손상함수를 적용하여 국내에도 적용할 수 있는지를 검증하였다. 위의 연구들을 살펴보면 토사재해가 발생하였을 때 토석류가 구조물에 미치는 영향에 크게 관여하는 독립 인자 도출에 관한 연구와 토사재해 발생량 통계를 근거로 하여 위험도를 분석하는 연구가 이루어지고 있는 추세이다. 토사재해의 경우 발생 시 그 진행속도가 매우 빠르고 피해가 크며 도심지에서 발생하였을 경우 빠른 복구가 필요하다. 따라서 발생확률을 구하여 해당 지역의 토사재해 위험도를 산정하는 것도 중요하나 실제 재해가 발생하였을 경우 구조물이 받는 피해 정도를 분석하여 그 정도에 따른 적절한 대처가 가능하도록 구조물의 위험도를 측정하는 연구도 필요하다.

본 연구에서는 중력에 의해 사면을 유하하는 사태물질이 방어구조물에 유입되는 흐름특성을 분석하고, 구조물에 가장 큰 충격력이 가해졌을 때의 위험도를 산정하였다.

2. 이론적 배경

토사재해가 방어구조물에 미치는 위험을 정량적으로 평가하기 위해 이용된 대표적인 위험도 지표로는 Beffa⁵⁾가 제안한 FII(Flood Intensity Index)와 HR Wallingford⁶⁾의 FHR(Flood Hazard Rating), Cruden and Varnes⁷⁾의 VDI(Velocity Damage Index)가 있으며, 본 연구에서는 이를 참고하여 모의결과를 위험도 지표로 나타내어 비교하였다. 하지만 본 논문에서는 VDI를 제외한 FII와 FHR 지표만을 서술하였는데 이는 VDI 지표의 경우 Table 1과 같이 토석류의 이동속도만으로 결과를 나타내어 본 연구에서 설정한 지형조건에서는 위험도를 도출할 수 없었기 때문이다. 또한 FII와 FHR 지표는 본래 홍수 시 침수에 의한 피해를 위험도로 산정하는 지표이나 본 연구에서는 토석류의 빠른 이동속도와 두께에 의한 흐름의 위험도를 정량화하기 위해 사용하였다.

FII와 FHR은 위험도를 산정하는 변수로 유속과 두께를 사용하여 위험도를 산정하는데 있어 그 차이를

Table 1. Velocity damage index⁷⁾

VDI	Velocity(m/s)
Level 0	0.00 - 0.05
Level 1	0.05 - 5.00
Level 2	5.00 -

보였다. FII는 유속이 1 m/s 미만일 경우 수심으로 부여되며, 유속이 1 m/s 이상일 경우 유속과 수심의 곱으로 산정한다. FHR의 경우 위험도 지수를 산정하는 식은 다음과 같다.

$$Flood\ Hazard\ Rating = Depth(Velocity + 0.5) \quad (1)$$

Table 2와 Table 3은 FII 및 FHR의 값에 따른 위험도 범주를 제시한 것이다. FII의 경우 위험도를 3단계로 구분하며, FHR의 경우 4단계로 구분한다.

Table 2. Flood intensity index⁵⁾

FII	Intensity
0.0 - 0.5 (Level 1)	Low (Limited damage)
0.5 - 2.0 (Level 2)	Medium (might be dangerous)
2.0 - (Level 3)	High (endangered)

Table 3. Flood hazard rating⁶⁾

FHR	Hazard
0.00 - 0.75 (Level 1)	Low (caution)
0.75 - 1.25 (Level 2)	Moderate (dangerous for some)
1.25 - 2.00 (Level 3)	Significant (dangerous for most)
2.00 - (Level 4)	Extreme (dangerous for all)

3. 적용 모형

중력에 의해 사면을 유하하는 사태물질이 방어구조물에 미치는 유입특성을 분석하고 이에 따른 위험도를 산정하기 위해 아래와 같이 질량 보존방정식인 식 (2)와 운동량 보존방정식인 식 (3)을 지배방정식으로 이용하였다⁸⁾.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial u}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - gn^2 \frac{u_i \sqrt{u_j u_j}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

u_i : i 가 1인 경우 x -, 2인 경우 y -방향 수심평균 유속
 ν : 난류동점성계수

- n : 조도계수
- η : 기준선으로부터 수면까지의 연직 거리
- h : 수심

본 연구에서는 지배방정식의 이산화를 통한 수치모형을 구성하기 위해 기저함수와 가중함수를 다르게 두어 흐름의 안정성을 향상시키는 Petrov-Galerkin 유한요소기법을 이용하였다⁹⁾. 수학적 모형의 구성, 수치기법의 특징 및 사행수로, 원형 실린더 붕괴, 공동유동, 사각도수 등의 다양한 흐름조건에서 개발된 모형을 적용하여 해의 정확성과 안정성을 검증한 내용은 Seo et al.¹⁰⁾에 상술되어 있다. 그러나 Seo et al.¹⁰⁾에서 사용한 모형은 물의 이동을 해석하는데 적합한 모형인 반면, 본 연구에서는 토석류 흐름특성이 반영되도록 점성계수를 변경하고 위험도 지수를 도출하도록 보완하여 연구를 진행하였다.

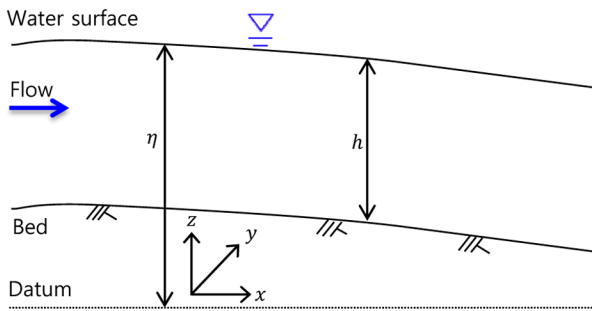


Fig. 1. Definition of coordinates and symbols.

4. 초기 질량분포 및 방어구조물 영향 분석

4.1 모의조건 및 입력자료 구축

모의조건 및 입력자료 구축을 위해 Ryu et al.¹¹⁾의 연구와 Seong et al.³⁾의 연구를 참고하였다. Ryu et al.¹¹⁾의 연구에서는 국내사면 붕괴 및 토사재해가 발생한 106개소의 사례를 분석하여 토사재해 발생 유형을 구분하였다. Seong et al.³⁾의 연구에서는 Ryu et al.¹¹⁾ 연구에서 분석한 결과를 토대로 지형과 입력자료를 구축하였으며 사태물질의 초기 형상(직육면체, 삼각기둥)과 방어구조물의 형상(직사각형, 반원)에 따른 차이점을 비교하기 위해 4가지 모의케이스를 구성하여 분석하였다. 본 연구에서는 방어구조물 형상에 따른 토석류의 유입특성을 살펴보기 위하여 사태물질의 초기질량분포는 직육면체로 고정하고, 방어구조물을 직사각형 형상과 반원 형상으로 구분하였다. 사태물질의 초기 질량분포가 길이 15 m, 폭 15 m, 높이 3 m를 갖는 직육면체 형상(R) 및 방어구조물이 길이 1 m, 폭 25 m의 직육면체

형상(R)을 가지는 경우를 RR로 칭하였다. RC에서는 RR과 동일한 직육면체 형상의 초기 질량분포와 내경 12.5 m, 외경 13.5 m, 폭 1.0 m를 갖고 경사면을 향해 열려있는 반원형상(C)을 고려하였다. RR 및 RC 방어구조물의 형상과 배치는 각각 Fig. 2-4 및 Fig. 5-7에 나타내었다.

4.2 방어구조물 형상에 따른 유입 특성

방어구조물이 사태물질로부터 최대 힘을 받는 시점에 구조물 형상에 따라 토석류의 두께와 속도가 어떠한 분포를 보이는지 분석하였다. RR은 15.5 s에 31.75 ρ N의 최대 힘을 받았으며 Fig. 2와 Fig. 3은 이때의 토석류 두께와 속도를 각각 나타낸 것이다. 토석류 두께의 경우 방어구조물 전면부로 갈수록 두께가 높아지는 양상을 보였으며 최대높이는 약 1.47 m였다. 토석류의 속도분포의 경우 구조물 전면부보다 경사면에서의 토석류 속도가 더 빠름을 보이며 구조물의 중심부보다 좌우측면의 토석류 속도가 더 빠름을 알 수 있다. Fig. 4는 구조물에 작용하는 힘이 최대인 15.5 sec에 구조물 전면에서의 토석류의 두께와 속도 분포를 도시한 것이다. 구조물의 좌측 끝단으로부터의 거리를 y'로 정의하고 폭을 W로 하여 무차원화 하였다. 토석류 두께의 경

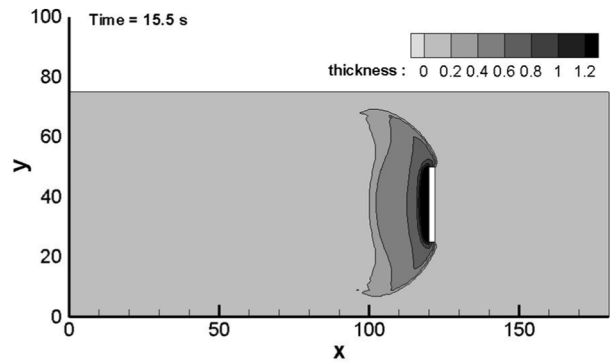


Fig. 2. Thickness distribution by RR(unit : m).

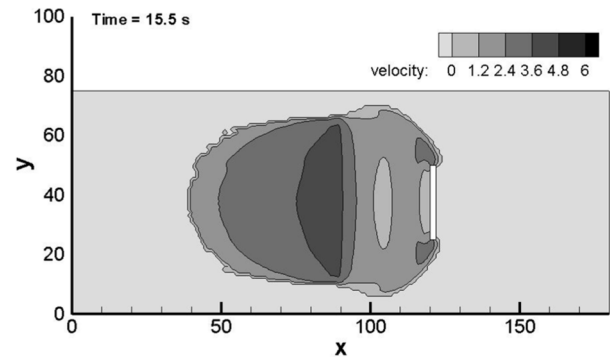


Fig. 3. Velocity distribution by RR(unit : m/s).

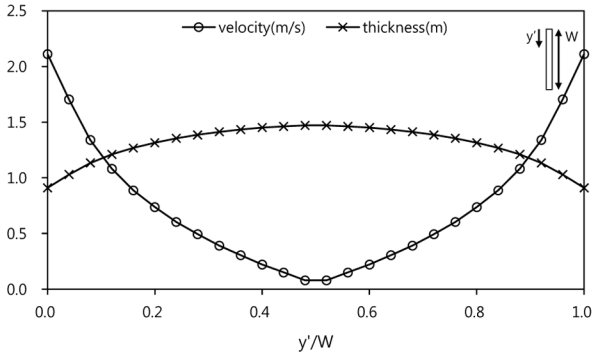


Fig. 4. Velocity and thickness exerted on structure by RR (T=15.5 sec).

우 중심부와 좌우측면의 차이가 크지 않으나 토석류의 속도는 좌우측면이 중심부보다 급격히 빨라지는 것을 보인다. Fig. 4를 통해 방어구조물 좌우측면이 중심부보다 힘이 더 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

RC는 17.0 sec에 66.22ρ N의 최대 힘을 받았으며 이때의 토석류의 두께와 속도를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. RC도 RR과 마찬가지로 토석류 두께는 구조물의 전면부로 향할수록 높아졌으나 구조물의 중심부보다 좌우측면과 중심의 사이부분이 더 높은 값을 보였다. 또한 RC의 경우 사태물질이 방어구조물 전면에 도달

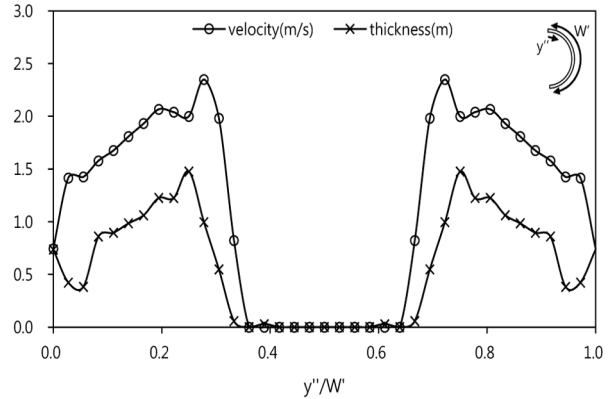


Fig. 7. Velocity and thickness distribution on structure by RC.

하였을 때보다 0.2 sec 빠른 시점에 충격력이 더 큰 값을 보였다. 이는 사태물질이 반원형 구조물에 최초 도달한 뒤 계속 밀려들어가며 중심부로 갈수록 두꺼워져 위와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다. 토석류 속도는 경사면에서의 속도가 전면부보다 더 빠름을 보였다. Fig. 7은 17 sec에 구조물 전면에서의 토석류의 두께와 속도 분포를 도시한 것으로 구조물 좌측끝단으로부터의 호를 따른 거리를 ‘y’로 정의하였으며, 구조물 내측의 호의 길이를 ‘W’로 하여 무차원화 하였다.

4.3 위험도 분석

Fig. 8은 RR 및 RC의 방어구조물 전면에서의 FII를 계산하여 도시한 것이고 Fig 9는 RR, RC의 방어구조물에서 FHR 지표를 비교하여 위험도 단계로 구분하였다. Fig. 8의 경우 RR과 RC 모두 중심에서 좌우측면으로 갈수록 위험도 지표가 높아지고 있는 양상을 보이는데 이는 Fig. 4과 Fig. 7에 비교해 보았을 때 유사한 형상을 보임을 알 수 있다. 특히 RC의 경우 중앙부(x 축 0.3 ~ 0.7)에서 FII 지표가 Level 1을 이루는데 이는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 최대 힘을 받는 시간에 속도와 두께 모두 0에 근접함을 이유로 들 수 있다. Fig. 9 역시 구조물 중심부에서 좌우측면으로 갈수록 위험도 지표가 높아지는 것을 알 수 있으나 RR의 경우 좌우측면의 지표가 다시 낮아짐을 보인다. 이는 FHR 지수를 산정하는 식이 속도에 가중치를 둔다는 점이 원인이 된다.

위 결과를 종합해보면 서로 다른 구조물의 형상에서는 물론 동일한 형상의 모의에서도 위험도 지표가 다른 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 지형이 가파르거나 토사의 유동성이 큰 경우 FHR 지표를 이용하면 토석류의 이동 속도를 주요 인자로 반영하게 되므로, 보다 합리적으로 위험도를 산정할 것으로 판단되며, 반

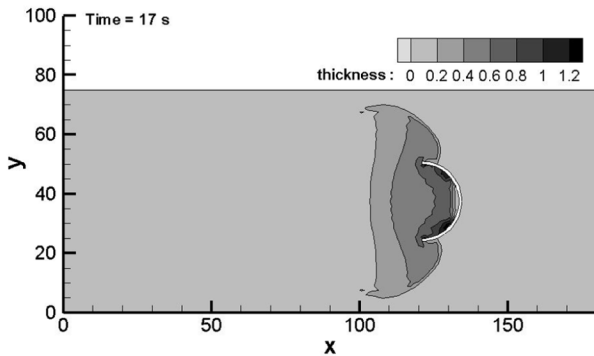


Fig. 5. Thickness distribution by RC(unit : m).

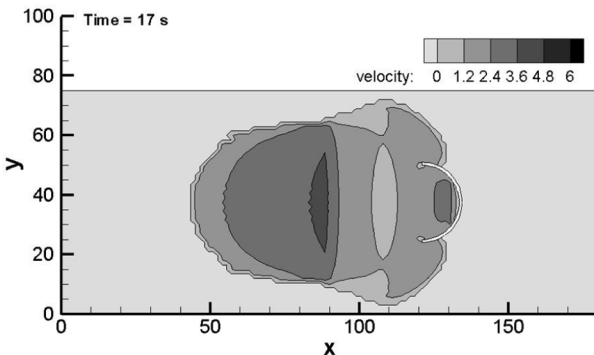


Fig. 6. Velocity distribution by RC(unit : m/s).

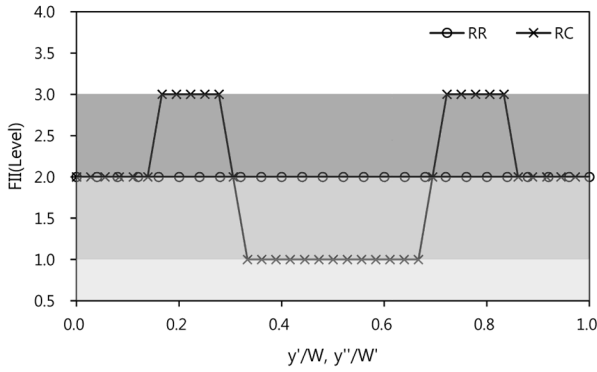


Fig. 8. FII comparison.

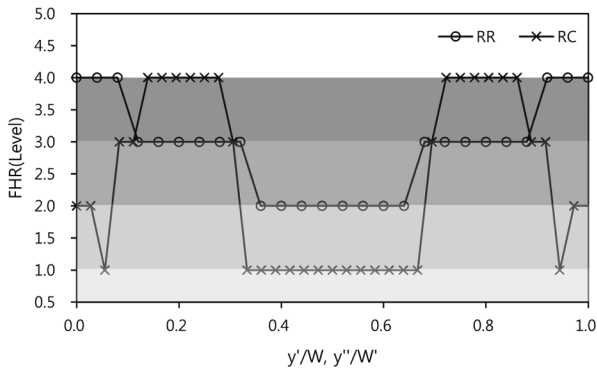


Fig. 9. FHR comparison.

대로 경사가 완만하거나 토석류 유동성이 크지 않은 경우 속도가 큰 변수로 작용하지 않다고 볼 수 있으므로 FII 지표를 사용하여도 무방하다는 결론을 도출할 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 방어구조물의 형상에 따른 사태물질의 유입특성과 구조물에 최대 충격력이 작용하는 시점에서의 위험도를 산정하여 비교하였다. 요약내용은 다음과 같다.

(1) 토사재해가 가장 빈번히 발생하는 붕괴면적, 사면경사, 사면길이를 참고하여 방어구조물에 미치는 유입 특성을 분석하였다.

(2) 방어구조물에 최대 충격력이 발생하였을 때의 단면적을 분석하여 속도와 두께를 도시하고 그 흐름양상을 분석하였다.

(3) 최대 충격력 발생 시점에서 방어구조물 형상에 따른 위험도를 산정하여 차이를 비교하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 위험도 지표의 종류에 관계없이 RC(사태물질 : 직육면체 형상, 방어구조물 : 반원 형상)가 RR(사태물질 : 직육면체 형상, 방어구조물 : 직육면체 형상)에 비해 위험도 범위가 넓게 나타났는데 이는 특정부분에 토석류가 집중되는 형상이기 때문이다.

(2) RC(사태물질 : 직육면체 형상, 방어구조물 : 반원 형상)의 경우 방어구조물 중심부에서의 위험도가 가장 낮게 나타났는데 이는 최대 충격력을 받는 시점에서 사태물질이 구조물 중심부에 도달하지 않았기 때문에 보이는 결과이다.

(3) 토석류 발생 조건이 동일하여도 위험도 지표가 방어구조물의 형상 및 지형에 영향을 받으므로, 현장 여건 등을 고려하여 합리적이고 적합한 지표선정이 필요하다.

본 연구에서는 토사재해 발생 시 방어구조물에 미치는 유입특성을 분석하고 위험도를 정량화하였다. 이는 방어구조물 설계 시 최소한의 기준이 될 것으로 판단된다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(13SCIPS04 연구사업)에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) D. Y. Choi and J. C. Paik, "Characteristics of Runout of Debris Flows in Korea", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 32, No. 3, pp. 193-201, 2012.
- 2) J. H. Kim, Y. S. Lee and K. B. Park, "A Study on Model Experiment for Evaluation of Debris Flow's Impact Force Characteristics", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 11, pp. 5-15, 2010.
- 3) J. H. Seong, S. M. Oh and C. G. Song, "Analysis of Initial Mass Distribution and Facility Shape to Determine Structural Alternative for Hazardous Zone Vulnerable to Debris Flow Disaster", Journal of the Korean Society of Safety, 2016 (in press).
- 4) W. I. Choi, S. G. Lee, B. K. Lee and S. J. Jang, "A Study of Vulnerability of Structure by Debris Flow", Journal of the Korean Society of Hazard, Vol. 12, No. 3, pp. 141-146, 2012.
- 5) C. Beffa, "Two-Dimensional Modelling of Flood Hazards in Urban Areas." Proc. 3rd Int. Conf. on Hydrosience and Engineering, D-Cottbus, 1988.
- 6) H. R. Wallingford, "Flood Hazard Research Centre and Risk and Policy Analysts Ltd", Flood Risk to People, Phase 2,

- FD2321/TR2, Guidance Document, Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme, 2006.
- 7) D. M. Cruden and D. J. Varnes, "Landslide Types and Processes", Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, US National Research Council, Report 247, pp. 36-75, 1996.
 - 8) I. W. Seo and C. G. Song, "Development of 2D Finite Element Model for the Analysis of Shallow Water Flow", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 2B, pp. 199-209, 2010.
 - 9) C. G. Song and I. W. Seo, "Numerical Simulation of Convection-dominated Flow Using SU/PG Scheme", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 32, No. 3, pp. 175-183, 2012.
 - 10) I. W. Seo, Y. D. Kim, and C. G. Song, "Validation of depth-averaged flow model using flat-bottomed benchmark problems," The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 197539, 18 pages, DOI: 10.1155/2014/197539.
 - 11) J. H. Ryu, H. J. Sung, Y. Kim, "A Study on the Major Factors Causing the Sediment Disasters by Case Analysis", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 6, pp. 151-157, 2014.