

토사재해 취약 지역 분류 및 구조적 대안 수립을 위한 위험지표 적용

오승명 · 송창근 · 정민형 · 성주현*

인천대학교 안전공학과 · *한국시설안전공단 시설성능연구소
(2017. 2. 28. 접수 / 2017. 6. 5. 채택)

Application of Risk Indexes for Classifying Vulnerable Zone and Planning Structural Alternative in Preparation for Debris Flow Disaster

Seung Myeong Oh · Chang Geun Song · Min Hyung Jung* · Joo-Hyun Seong**

Department of Safety Engineering, Incheon National University

*Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation

(Received February 28, 2017 / Accepted June 5, 2017)

Abstract : This study applied risk indexes to the disaster flow event occurred at Mt. Umyeon region in 2011. A 2D hydrodynamic model was employed to calculate flow characteristics, and the model was validated against two dam break flow problems conducted by Bellos and EU CADAM project. The model performance was shown to be satisfactory. In order to determine which index is more appropriate to assess the vulnerability of debris flow, 3 risk indexes (FII, FHR and VDI) were considered. It was found that VDI, which determines the risk level only by the velocity factor, consistently predicted the risk level corresponding to 6 because the velocity range was widely organized. However, in the case of FII and FHR, the risk was reasonably quantified due to combined consideration of significant factors of flow velocity and debris thickness. Therefore, FII and FHR are expected to be more accurate than VDI. However, two indexes still need to be improved to include major factors such as debris density or material properties.

Key Words : debris flow disaster, risk index, structural alternative, dam break problem

1. 서론

정부가 주도하는 경제성장 정책과 이에 따른 급속한 산업화 및 도시화에 대응하기 위해 1972년부터 3차에 걸쳐 국토종합개발계획이 시행되었다. 국토종합개발계획은 기간시설의 설치, 도시개발, 주택공급, 토지이용 및 국토자원의 관리 등의 측면에서 큰 역할을 수행하였지만 그 과정에서 산사면의 절취, 저지대 매립을 통한 도로 건설, 주거지 형성, 산업단지 조성 등의 행위가 대규모로 이루어졌다. 따라서 급경사지 인근에 산업지구와 주거지가 인접하여 위치하고 있으며 최근의 빈번한 국지성 폭우에 의해 토사재해 위험에 노출된 지역이 전국적으로 분포하고 있다. 2011년 서울 도심지에서 발생한 우면산 산사태가 대표적인 피해사례로 수많은 인명피해와 재산 피해를 야기하였다. 이처럼 도심지에서 발생한 토사재해는 주택, 산업시설, 공공시설 등에 직접적인 피해를 입히

므로 지역별 위험도 산정을 통한 정량평가가 필요하며 이를 토대로 한 예방대책이 필요하다.

현재까지 토석류 거동 예측에 관한 연구는 지리정보 시스템에 기반한 산사면을 따른 토석류 발생 가능 지역을 확률 회귀식을 통해 위험가능성을 나타내거나, 국외 상용모형을 충분한 이해 없이 적용한 사례가 다수를 차지하고 있으며, 따라서 토사재해 위험도 구획화 및 구조적 대안 수립을 위한 위험지표 적용에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Seong et al.¹⁾에서 개발한 토석류 유동 해석모형을 불연속 초기 조건에 의한 붕괴 흐름 문제와 주흐름 방향이 바뀌는 굽은 수로 문제에 적용하여 모의 성능을 검증하였다. 또한 2011년 우면산 토사재해 사상에 적용하여 실제 피해규모와 비교함으로써 위험도를 산정하는 등 도심지 토사재해 위험지역 구조적 대안 설정 기준 수립을 위한 기반을 제공하는 연구를 수행하였다.

* Corresponding Author : Joo-Hyun Seong, Tel : +82-55-771-1603, E-mail : bluehill@kistec.or.kr

Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation, 16 Sadeul-ro, 123 beon-gil, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, 52852, Republic of Korea

2. 위험도 지표

토석류 흐름이 가지는 위험도를 정량적으로 평가하기 위해 Oh et al.²⁾에서 소개된 FII, FHR, VDI 위험도 지표를 고려하였다. FII(Flood Intensity Index)는 Beffa³⁾가 제안한 것으로 유속이 1 m/s 미만일 경우 수심, 유속이 1 m/s 이상일 경우 유속과 수심의 곱으로 표현하며 그 값의 범위에 따라 Table 1과 같이 위험도를 산정한다. FHR(Flood Hazard Rating)는 HR Wallingford⁴⁾에서 제안하였으며 속도에 0.5를 더한 후 수심을 곱하여 위험도를 산정한다. VDI(Velocity Damage Index)의 경우 Cruden and Varnes⁵⁾가 제안했으며 유속을 기준으로 Table 3과 같이 위험도를 구분한다.

Table 1. Flood intensity index

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 2. Flood hazard rating

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)

Table 3. Velocity damage index

VDI	Velocity range (m/s)	Probable destructive significance
1	$\sim 5 \times 10^{-10}$	Imperceptible without instruments
2	$5 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-8}$	Some permanent structures undamaged by movement
3	$5 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-6}$	Remedial construction can be undertaken during movement
4	$5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$	Some temporary and insensitive structures can be maintained
5	$5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$	Escape evacuation possible; structures and equipment destroyed
6	$5 \times 10^{-2} \sim 5.00$	Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape
7	5.00 ~	Buildings destroyed by impact of displaced material

3. 적용모형의 검증

3.1 불연속 초기 조건에 의한 붕괴 흐름

토사재해 위험도 구획화 및 구조적 대안 수립을 위한 위험도 산정 모형의 현장 적용에 앞서 모의 결과의

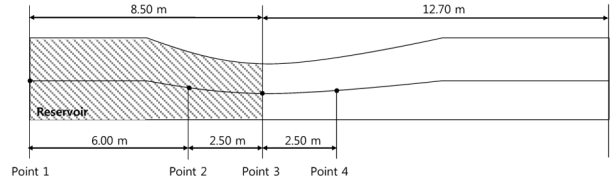
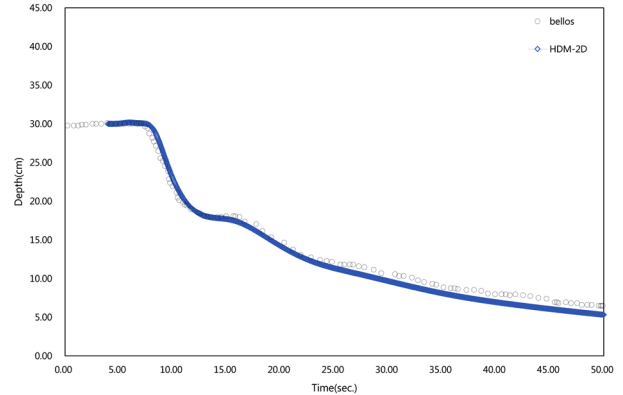
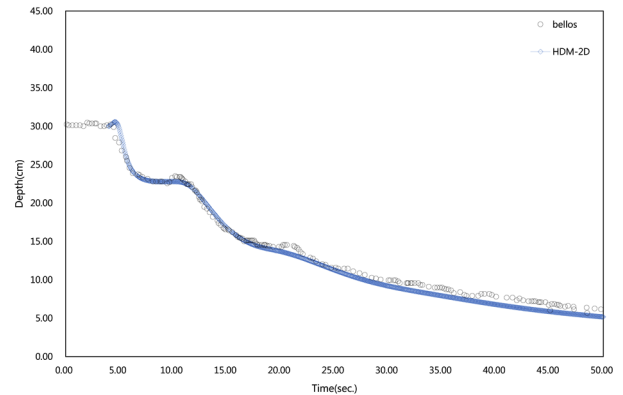


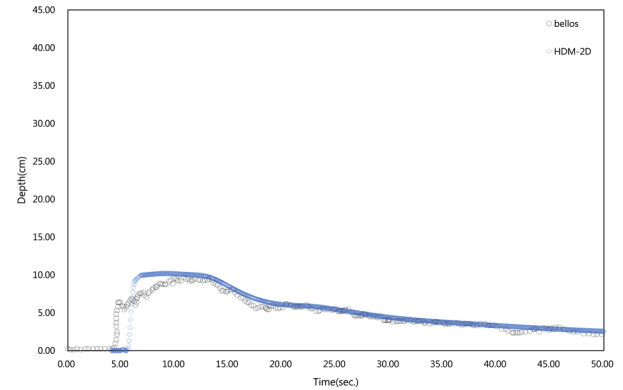
Fig. 1. Channel geometry for dam break problem.



(a) Point 1



(b) Point 2



(c) Point 4

Fig. 2. Depth comparison for dam break problem.

정확성을 검증하기 위해 Bellos⁶⁾가 수행한 댐붕괴 실험과 같은 조건으로 모의영역을 구축하고 결과를 비교하였다.

Fig. 1과 같이 길이 21.2 m, 넓이 1.4 m, 높이 0.6 m의 수로를 제작한 뒤 8.5 m 지점에 수문으로 물을 가두어 초기수심을 0.3 m로 유지시켰다. 이후 수문을 개방하면서 3개 지점에서 시간에 따른 수심변화를 측정하였다.

Fig. 2는 Point 1, 2, 4 지점의 수심결과와 Bellos⁶⁾의 실험값을 비교한 것이다. 각 지점마다 시간의 흐름에 따른 수심이 실측치와 매우 유사한 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 다만, 측정값과 실험값이 수문이 열린 직후 3 s 가량 차이를 보이는데 이는 실험과정에서 수문을 개방할 때 발생할 수 있는 요인에 의한 차이라고 판단된다.

3.2 주흐름 방향이 변하는 굽은 수로

토사재해 유동 해석모형의 추가검증을 위해 EU CADAM project의 수리실험 조건과 동일한 45° 굽은 수로 지형을 제작하여 모의를 수행하고 실측값과 모의값을 비교하였다. Fig. 3은 수로의 재원을 나타낸 것으로 수로는 약 4 m의 직선부 이후 45° 좌측방향으로 꺾여 있으며, 물이 채워져 있는 탱크의 바닥면은 수로보다 0.20 m 낮게 제작되었고 초기 수심은 0.25 m로 하였다. 이후 수문을 개방하면서 3개 지점(point 1, 3, 5)에서 시간에 따른 수심변화를 측정하였다.

Fig. 4(a)는 point 1에서의 수심을 비교한 것이다. 범례 중 experiment는 EU CADAM project의 실험값이며 boltzman은 boltzman 모형을 사용하여 동일한 실험을 수행한 Frazao et al⁸⁾의 결과이다. 본 연구에서 적용한 모형(HDM-2D) 결과가 실험값 및 타 연구의 수치모의 결과와 매우 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)와 3(c)는 수로가 꺾이는 단면 양 끝지점인 point 3과 point 5에서의 수심을 비교한 것이다. 원심력 및 편수위 현상에 의해 point 3에서의 수심이 point 5에 비해 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 그래프 형상은 실험값과 매우 유사하게 나타나고 있으며 수심이 차오르는 시간에서 약간의 오차가 발생하는 모습을 보이는데 이는 수문을

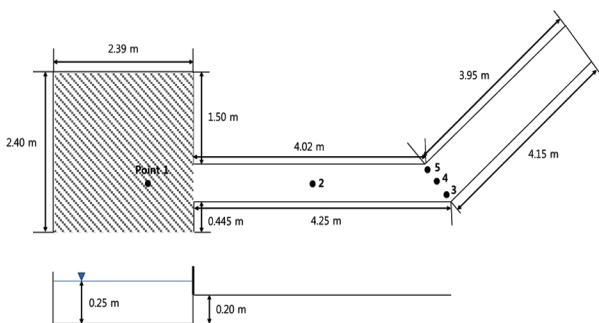
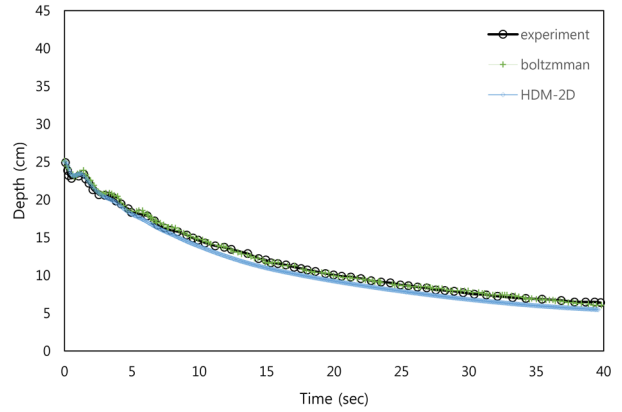
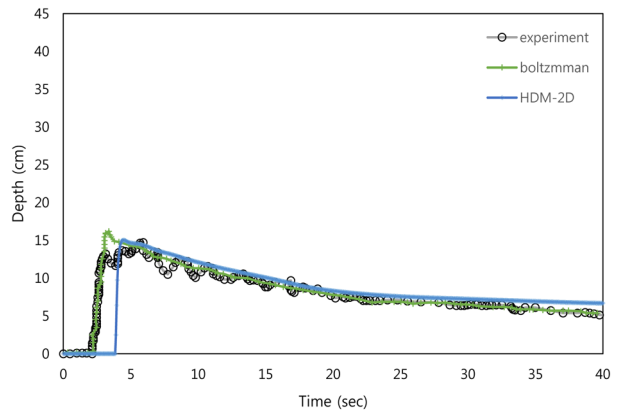


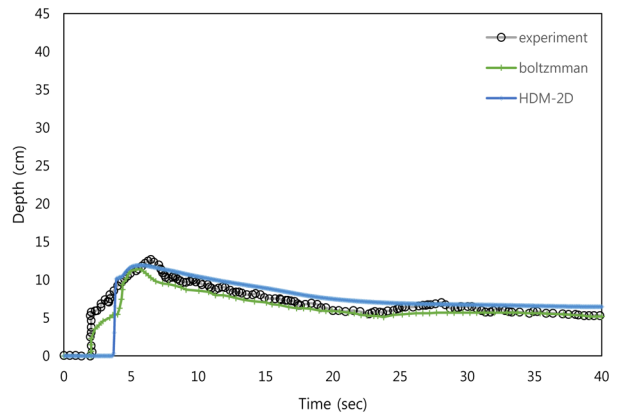
Fig. 3. Channel geometry for 45° bend channel problem.



(a) Point 1



(b) Point 3



(c) Point 5

Fig. 4. Depth comparison for 45° bend channel problem.

개방할 때 발생할 수 있는 차이라고 판단된다.

이상의 검증을 통해 수치모의에 의한 두께의 증감 양상이 실측값과 유사하게 나타난 것을 알 수 있다. 따라서 댐 붕괴류 형태의 토석류 모의에서 본 연구에서 개발한 모형이 적합한 것으로 판단되며, 다음 장에서 2011년 발생한 우면산 산사태 사상에 적용하여 위험도를 비교하였다.

4. 위험지표 적용

4.1 모의조건

2011년 7월 27일 집중호우로 발생한 우면산 토사재해 시 가장 피해가 컸던 ○○○아파트 유역 (Fig. 5)을 대상으로 하였다. Fig. 6에 흰색으로 표현된 공간이 아파트로 4개 동을 계산영역에 재현하였다. 초록색으로 표시된 직육면체 형상 (길이 36 m, 폭 48 m, 높이 3.2 m, 부피 5529.6 m³)의 사태물질을 초기조건으로 부여하였다.

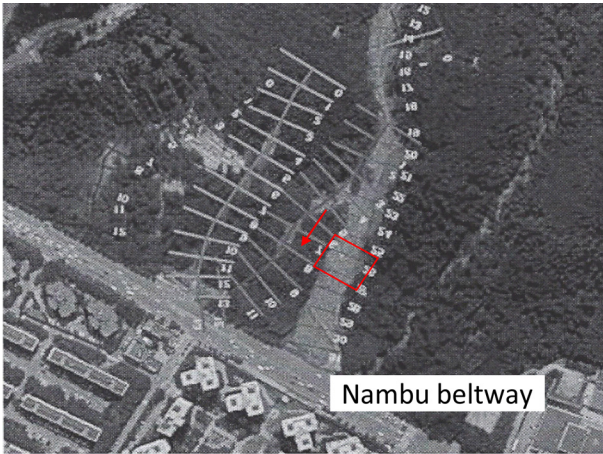


Fig. 5. Footage after debris flow disaster in Mt. Umyeon⁷⁾.

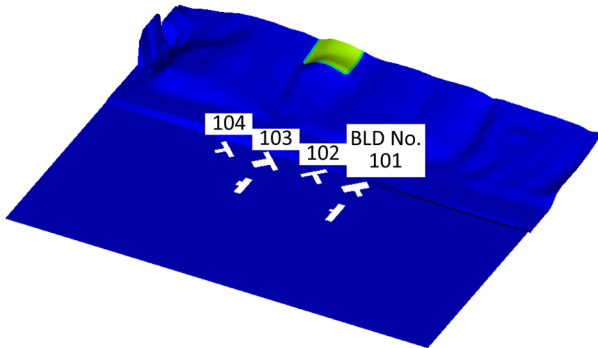


Fig. 6. Topography for simulating debris flow near Mt. Umyeon region.

4.2 위험도 비교

2011년 우면산 산사태로 인해 Fig. 6의 유역에서 반파 6세대의 파손피해와 사망자 3명의 인명피해가 발생했다⁸⁾. 이는 Table 3에서 VDI 6 (0.05 - 5.00 m/s)에 해당하는 토석류임을 알 수 있다. Fig. 7은 토석류가 103동 전면에 도달한 순간(18 s)의 VDI 6등급 구간 (0.05 - 5.00 m/s)을 나타낸 것이다. 그림에서 붉게 나타난 부분이 VDI 6에 해당하므로 인명손실과 구조물, 재산 및

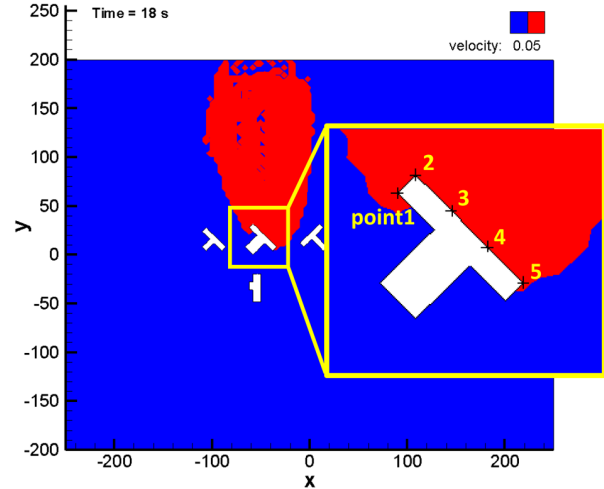


Fig. 7. Regional classification of VDI equivalent to level 6.

Table 4. Risk quantification by various indexes

(a) 18 s

	Velocity (m/s)	Thickness (m)	FII	FHR	VDI
Point 1	2.18	0.46	2	2	6
Point 2	0.03	2.29	3	2	5
Point 3	6.77	2.69	3	4	7
Point 4	4.79	3.71	3	4	6
Point 5	0.98	0.32	1	1	6

(b) 22 s

	Velocity (m/s)	Thickness (m)	FII	FHR	VDI
Point 1	3.18	0.26	2	2	6
Point 2	0.14	2.99	3	3	6
Point 3	0.95	2.3	3	4	6
Point 4	1.36	3.54	3	4	6
Point 5	3.15	3.45	3	4	6

(c) 26 s

	Velocity (m/s)	Thickness (m)	FII	FHR	VDI
Point 1	3.57	0.14	1	1	6
Point 2	0.09	2.47	3	3	6
Point 3	0.45	1.5	2	3	6
Point 4	0.12	2.89	3	3	6
Point 5	1.53	1.69	3	4	6

기기류의 파손이 가능한 영역이다.

Table 4는 Fig. 7에 표시된 103동 전면부 4개 지점과 측면부 1개 지점에서 18 s, 22 s 및 26 s 시간의 토석류 속도와 두께 모의 결과를 이용하여 위험등급을 나타낸 것이다. 이 표에서 VDI는 대체로 6등급을 보이나 FII와 FHR은 위험등급이 다양하게 나타나고 있다. VDI와 달리 FII와 FHR은 일정하게 높은 위험등급을 보이지는

않지만 사태물질의 흐름 특성상 임의의 시간대에 높은 위험등급이 기록되고 있기 때문에 토사재해 발생 시 위험도를 측정하는데 적합하다고 판단된다.

또한, VDI는 위험등급을 정하는 최고속도가 최저속도의 100배의 차이가 나기 때문에 큰 속도 차이를 보이더라도 같은 위험등급으로 판정되는 단점이 있다. 반면 FII와 FHR은 토석류의 속도와 두께를 이용하여 위험도 등급을 정하므로 위험등급이 다양하게 나타나고 있어 더욱 정확한 위험 예측이 가능하다고 판단된다. 예를 들어 0.05 m/s의 토석류는 VDI 6등급의 위험도를 갖지만 토석류 두께가 0.1 m라면 FII와 FHR은 level 1(low)의 위험도를 보이게 되며 토석류 흐름 시간에 따라 정확한 위험도를 판단하는 것이 가능하게 된다.

다만 FII와 FHR은 본래 홍수위험도를 나타내는 지표이기 때문에 토석류 흐름특성에 적합하게 밀도나 재료 특성 등을 반영하여 FII와 FHR를 개선하는 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 토석류 유동 해석모형을 불연속 초기 조건에 의한 붕괴 흐름 문제와 주흐름 방향이 바뀌는 굽은 수로 문제에 적용하여 모의 성능을 검증하였다. 또한 2011년 우면산 토사재해 사상에 적용하여 실제 피해규모와 비교함으로써 위험도를 산정하였다. 본 연구에서 분석한 주요내용은 다음과 같다.

(1) 토사재해 위험의 정량적 평가를 위해 사용된 위험도 지표로 Beffa가 제안한 FII, HR Wallingford의 FHR, Cruden and varnes의 VDI를 적용하였다.

(2) VDI의 경우 속도뿐만 토석류 위험등급을 결정하기 때문에 대체로 6등급의 위험등급이 측정되었다.

(3) FII와 FHR의 경우 속도와 두께를 변수로 하여 위험등급을 산정하기에 각 시간대마다 다양한 위험등급을 보였으며, 전체의 토사재해 흐름을 보았을 때 임의의 시간대에 최고 위험등급이 나타나는 결과로 보아 토석류 위험도 산정에도 적합하다고 판단된다.

(4) 특히 FII와 FHR은 위험도 범위가 넓게 나타나 VDI보다 더욱 자세한 위험도를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) FII와 FHR은 본래 홍수위험도를 나타내는 지표이기 때문에 토석류 흐름특성에 적합하게 밀도나 재료 특성 등을 반영하여 FII와 FHR를 개선하는 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 토석류 흐름에 의한 위험 정도를 정량적으로 판단할 수 있도록 위험지표를 적용하는 연구

를 수행하였으며 토사재해로 인한 피해를 선제적으로 저감하는데 이용될 수 있다. 나아가 토사재해 취약 지역을 분류하고, 구조적 대안을 수립하는데 본 연구의 위험지표 적용 방법론이 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업-도시특성을 고려한 도심지 토사재해 예측·평가 및 통합 관리기술 개발 (과제번호 16SCIP-B069989-04)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) J. H. Seong, S. M. Oh, Y. H. Jung, Y. S. Byun 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, Vol. 31, No. 2, pp. 76-82, 2016.
- 2) S. M. Oh, C. G. Song and S. O. Lee, "Inflow Characteristics of Debris Flow and Computation of Risk according to Shape of Defensive Structure", Journal of the Korean Society of Safety, Vol.31, No.6, pp. 93-98, 2016.
- 3) Beffa, C, "Two-Dimensional Modelling of Flood Hazards in Urban Areas" Proc. 3rd Int. Conf. on Hydroscience and Engineering, D-Cottbus, 1988.
- 4) HR 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.
- 5) 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.
- 6) C. V. Bellos, "Experimental Measurements of Flood Wave Created by a Dam Break", European Water, EWRA, Vol. 7, No. 8, pp. 3-15, 2004
- 7) S.S. Frazao, X. Sillen and Y. Zech, "Dam-break Flow through Sharp Bends-Physical Meeting Wallingford (United Kingdom, du 02/03/1998 au 03/03/1998), In: Proceedings of the CADAM Meeting Wallingford, European Commission : Bruxelles1999, pp. 151-169, 1998.
- 8) Korean Geotechnical Society, "Final Report of the Cause Investigation and Recovery Measures at Mt. Umyeon Landslide", Seoul Metropolitan Government, 2011.