

R&D / 050203
11-1613000-002115-01

허용 저사량 향상 (최대 30%)을 위한 충격흡수용 Hypotential Net 공법 개발 최종보고서

2017. 12. 28.

주관연구기관 / (주)다산이엔지

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

Hypotential Net 공법 개발

허용 저사량 향상(최대 30%)을 위한 충격 흡수용

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘허용 저사량 향상(최대 30%)을 위한 충격 흡수용 Hypotential Net 공법 개발’(연구개발 기간 : 2014. 10.16 ~ 2017. 10.15) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2017 . 12. 28.

주관연구기관명 : (주)다산이엔지 (대표자) 주재건



주관연구기관 책임자 : 이 경 수



국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	#16CTAP-C078006-03	해당 단계 연구 기간	2014.10.16. ~ 2017.10.15.	단계구분	3/3 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	대과제명	허용 저사량 향상(최대 30%)을 위한 충격 흡수용 Hypotential Net 공법 개발			
	세부과제명	-			
연구책임자	이 경 수	해당단계 참여 연구원 수	총: 8명 내부: 8명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부:207,000천원 기업:147,000천원 정부 외: 0천원 계:354,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 8명 내부: 8명 외부: 0명	총 연구개발비	정부:522,000천원 기업:361,000천원 정부 외: 0천원 계:883,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)다산이엔지 지반기술연구소			참여기업명	-
국제공동연구	상대국명:	-		상대국 연구기관명:	-
위탁연구	연구기관명:	-		연구책임자:	-
• 멀티네트 공법 개발				보고서 면수 : 71페이지	
- 본 연구에서 개발한 멀티네트(Hypotential Net)에 작용하는 충격력은 동일한 조건에서의 사방댐 모형, 링네트 모형에 비해 각각 60.39%, 36.97% 저감된 것으로 분석됨. 이에 따라 허용 저사량 최대 30% 이상 향상된 멀티네트 공법 개발을 완료함.					
- 전면네트와 하부네트의 링 직경을 달리 적용, 토석류 방지시설의 저사능을 극대화 할 수 있는 하부네트 설계안을 제시함.					
• 실시간 무인계측 감응시스템 개발					
- 실시간 무인계측을 위하여 저전력 계측용 메인 시스템을 기반으로 장시간 외부 전원없이 구동하기 위한 태양광 패널(Solar Panel)과 태양광 패널에서 생산된 전기를 저장하기 위한 배터리, 센서를 통해 계측된 데이터를 전송하기 위한 LTE MODEM, 이들 데이터를 수신하기 위한 FTP Server 등으로 구성함에 따라 실시간으로 토석류 발생 데이터를 획득할 수 있는 시스템 개발을 완료함.					
- 태양전지 운용에 따른 시스템 운용기간 분석 결과 본 시스템은 효율적인 배터리 관리로 산악지형에서도 약 2~3개월 사용이 가능한 무인계측 시스템을 구축함.					

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	토석류는 자연 또는 인공비탈면이 붕괴되어 산지 비탈면을 구성하는 물질이 빠르게 이동하는 현상으로 국내에서도 토석류 발생빈도, 규모는 증가하는 경향을 보인다. 국내에서는 사방댐을 이용하여 토석류 피해를 최소화하고 있으나 사방댐의 구조적, 재료적 결함으로 이에 대한 보강공법 개발은 시급히 이루어져야한다. 본 연구에서는 토석류 모형실험, 수치해석 등을 수행하여 국내 토석류 특성을 고려한 Hypotential Net를 개발하여 토석류 피해를 저감하는 방안을 제시하였다.				
연구개발성과	본 과제에서는 토석류 모형흐름실험장치를 개발하고 이를 이용하여 모형 사방댐, 링네트, Hypotential Net에 가해지는 충격하중을 평가하였다. 실험결과 사방댐, 링네트 배면에는 충격하중이 6.40kN, 3.52kN 가해지는 반면, Hypotential Net에는 1.74kN으로 충격하중은 사방댐, 링네트와 비교시 약 60.39%, 36.97% 감소하는 것으로 검토되었다. 이와 같은 이유는 Hypotential Net 하단에 부착된 하부네트가 토석류 이동속도를 저감시키고 전면네트로 이동하는 토석류 물질의 양도 감소시켰기 때문으로 평가되었다.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	국내에서 사용중인 토석류 저감공법은 사방댐 또는 국외 기술인 유연성 링네트구조를 이룬다. 본 과제를 통하여 성능이 입증된 공법을 이용하여 토석류 피해저감을 최소화 하며 공법의 기술적 우위를 토대로 국내·외 토석류 저감공법 시장에서도 선도적 역할을 할 것으로 기대된다.				
핵심어 (5개 이내)	토석류	사방댐	링네트	하이포텐셜 네트	토석류 충격하중

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Debris flows are geological phenomena in which water-laden masses of soil and fragmented rock rush down mountainsides, funnel into stream channels, entrain objects in their paths, and form thick, muddy deposits on valley floors. In Korea, the frequency and scale of the debris tend to increase, the erosion control dam is used for prevention of damage of debris flow. However, due to the structural and material defects of the erosion control dam, it is urgent to develop the reinforcing method. In this study, we have developed the Hypotential Net and considers the characteristics of the Korean debris flow.				
Results	The experimental result show that the impact load is 6.40 kN, 3.52 kN for the erosion control dam and the ring net model, while the impact load of Hypotential Net is 1.74 kN, which is about 72% and 50% lower than that of the erosion control dam and the ring net. The reason is that the lower net attached to Hypotential Net reduces the debris flow velocity and the amount of debris moving through the net.				
Expected Contribution	In Korea, the method of mitigation of debris flow is dominated by the erosion control Dam or flexible ringtone, which is a foreign technology. By using the result of this study, it is expected that the damage of debris flow is reduced, and to play a leading role in the market of the domestic and foreign of debris mitigation.				
Keywords	debris	erosion control dam	ring net	Hypotential net	impact load of debris flow

< Table of Contents >

1. Summary	6
2. Development of domestic and overseas	9
3. Research activities and Result	10
4. Research achievement and Related field contribution	58
5. Usage plan of the result of the study	62
6. Science and Technology information surveyed from overseas	63
7. Security rating	64
8. Research facility and Equipment	65
9. Performance of safety measures	66
10. Representative Research Results	67
11. Others	68
12. References	69

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 국내외 기술 개발 현황	9
3. 연구 수행 내용 및 성과	10
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	58
5. 연구개발성과의 활용 계획	62
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	63
7. 연구개발성과의 보안등급	64
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	65
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	66
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	67
11. 기타 사항	68
12. 참고 문헌	69

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 연구과제에서는 토석류 발생에 따른 피해저감을 위해 토석류 모형시험, 수치해석 등을 수행한 뒤 제시된 결과를 토대로 국내 토석류 특성에 맞는 하이포텐셜 네트(Hypotential Net)를 개발하였다.

2. 연구개발의 필요성

토석류는 자연 또는 인공 비탈면이 붕괴되어 산지비탈면을 구성 물질이 빠르게 이동하는 현상으로 정의할 수 있다(Terzaghi, 1950). 2003년부터 2012년까지 국내에서 발생한 토석류를 포함하는 산사태 평균 피해면적은 1980년대 발생한 피해현황과 비교할 때 3배 이상 증가한 557.5ha로 2000년 이후부터 국내에서도 기상이변에 의한 태풍, 집중호우, 장마로 토석류 발생빈도, 규모는 증가하는 경향을 보인다(Park et al., 2004; Lee and Yoo, 2009).

산림청에서 제시한 토석류를 포함하는 전국 산사태 취약지역 현황을 분석한 결과, 2016년 8월 기준 전국적으로 총 21,406개소의 토석류 취약현장이 존재하는 것으로 파악되었다. 일반적으로 토석류 취약구간은 강원도 산악지형에 국한된 것으로 인식되지만 지역별 현황을 검토해보면, 경상도 26%, 전라도 16%, 충청도 13%, 강원도 9%로 토석류 취약현장은 전국적으로 산재해 있고 인구밀집지역인 서울·경기지역에도 11% 이상 존재하는 것으로 보고되고 있다(Korea Forest Service, 2016).

국내에서는 토석류에 의한 피해를 최소화하기 위해 1986년 이후부터 2000년대 후반까지 2,000 여개소 이상의 사방댐을 전국 단위로 시공하였으며 2017년까지 약 1.25조원의 예산을 추가 투입하여 5,000 여개소 이상의 사방댐을 추가적으로 시공할 계획을 수립 중에 있다(Song et al., 2013).

국내에 널리 적용되고 있는 사방댐은 불투과형 콘크리트 사방댐으로 이는 저수·저사에 따른 용수 이용이 가능한 장점이 있다. 그러나 콘크리트는 취성과파괴 특성을 보이므로 동적 에너지 흡수에 취약하며 따라서 대규모 암괴를 포함한 액상화된 토석류가 비탈면 하부방향으로 큰 운동성과 충격력으로 구조물에 도달할 경우, 손상발생에 따른 장기 안정성에 영향을 줄 수 있다. 이 외에도 사방댐은 시공 시 공간적인 제약이 많으며 환경오염 발생, 월류에 의한 2차 피해발생, 자연미관 훼손, 손상 발생 시의 유지보수 어려움 등이 발생한다(Baek et al., 2010; Cho et al., 2016).

이상과 같이 국내 토석류 발생빈도 및 규모는 증가하는 추세를 보이는 반면, 국내 토석류 발생현황을 고려한 방지시스템은 아직까지 개발되고 있지 않은 상황에서 피해저감을 최소화하기 위한 공법 연구개발은 하루빨리 수행되어야 한다.

3. 연구개발 범위

가. 1차년도 연구개발 범위 및 내용

연구 범위	구체적인 내용
토석류 거동 메커니즘 분석	· 토석류 발생구간의 지반공학적 특성을 분석 · 토석류 실내실험 장비를 개발함
충격 흡수네트 공법 개발	· 멀티네트(Hypotential Net)를 개발하여 개념을 · 정립하고, 실내실험 장비를 개발함
실시간 무인계측을 위한 감응시스템 개발	· 센서 및 무인 데이터로거를 개발함

나. 2차년도 연구개발 범위 및 내용

연구 범위	구체적인 내용
충격 흡수네트 공법 개발	· 사방댐 모형, 기존 링네트 모형, 멀티네트 모형 (Hypotential Net)에 대한 토석류 흐름 시험장치를 제작하여 각각의 방지 시설의 종류에 따른 토석류의 거동, 충격량 발생량 및 경향 등을 분석하기 위한 실험을 수행함 · 일반 강재, 니켈도금 강재, 아연도금 강재에 대하여 부식 속도 및 이에 따른 내식성을 비교하기 위하여 염수 부식시험을 실시함. · 수치해석적 기법을 통하여 네트를 구성하는 강연선의 형상에 따른 하중 분산 능력, 변위, 응력 등을 분석하여 최상의 성능을 발휘할 수 있는 네트 형상을 제안하기 위한 연구를 수행함. · 사방댐과 Hypotential Net에 대한 수명주기비용 비교를 수행하였으며, 세부 항목은 초기투자비, 유지관리비, 해체 및 폐기물 처분비를 고려하여 연구를 수행함.
실시간 무인 계측을 위한 감응시스템 개발	· 태양전지, 배터리, 충전컨트롤러, 제어장치 등을 이용하여 전체시스템의 안정적인 전력공급과 전압 제어를 수행하며, 태양전지 운용에 따른 배터리 타임 향상 연구를 수행함. · 데이터 전송 시스템 중 Sensor에 발생한 충격을 Sensor Controller를 통해 데이터를 유기적으로 수신하며 토석류 발생시 결과값을 획득할 수 있는 소프트웨어를 개발함.

다. 3차년도 연구개발 범위 및 내용

연구 범위	구체적인 내용
Net 공법 시공기법 개발	· 토석류 피해방지용 멀티 넷 (Multi net for reducing damages of debris flow) 특허 출원을 통해 멀티넷의 구성 및 시공방법을 정립함
실시간 무인 계측을 위한 감응시스템 개발	· 감응센서를 기반으로하는 계측 시스템에서 토석류 발생에 따른 사방시설(하이포텐셜 넷 또는 링넷)의 상태 경보를 전달할 수 있는 전송 시스템을 개발함. · Sleep & Active 모드로 효율적인 배터리 관리를 통하여 산악지형에서 1월 이상 무인계측 및 데이터를 획득할 수 있는 시스템을 구축함.
충격흡수넷 공법개발	· 모형 토조실험을 통해 사방댐 모형, 링넷 모형, 토석류 피해방지용 멀티 넷(Hypotential Net)의 모형의 거동 특성을 평가하였으며, 토석류 시료의 함수비, 토석류 흐름 각도에 따른 충격력도 비교 연구수행 · 본 토석류 모형실험을 FEM 방식의 수치해석을 통해 구현하여 실제 실험과 비교 분석, 이에 따른 토석류 방호책의 거동 특성 및 충격력 발생 분석
	· Hypotential Net를 구성하는 강재의 부식실험을 통해 부식촉진 환경에서 뿐만 아니라 실제 외기 환경에서도 아연도금 강재의 내 부식성을 확인

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 사방댐 (Erosion Control Dam)

사방댐은 토석류에서 조립질 유송물질을 세립질과 물로 분리한 후 조립질 유송물질의 퇴적을 통해 토석류 유동특성을 변화시켜 토석류 피해를 저감시키는 구조물로 정의할 수 있다 (Lee, 2014).

사방댐은 형식, 재료, 목적, 투과성 유무에 따라 분류되며 국내에서는 다수의 시공실적과 재료 수급이 용이한 불투과형 콘크리트 사방댐이 토석류 방지시설로 널리 이용되고 있다. 본 구조물은 1986년 황폐계류의 토사 유출과 토사재해를 저감하기 위한 목적으로 전국에 31기 시공된 이후 2011년까지 국유림에 697기, 사유림에 4,357기가 시공되었다. 그러나 콘크리트 사방댐은 재료열화에 의한 장기 내구성 저하 발생, 재료 특성에 따른 동하중에 대한 취약성, 토목공사 수행에 따른 공사비 증가, 시공관리 및 공중 복잡, 토공사 수행에 따른 자연훼손, 콘크리트 사용에 따른 중금속 발생 등 안정성·경제성·시공성·환경성 측면에서 여러 개선사항이 요구되고 있다.

국내에서는 불투과형 콘크리트 사방댐의 문제점을 해결하기 위해 2000년 이후부터 투과형 사방댐의 일종인 버트리스, 슬리트 사방댐을 적용하는 사례가 보고되었다(Song, 2010). 투과형 사방댐은 토석류 발생 시 유목을 포함하는 토석류를 포획하도록 설계된 점에서는 불투과형 사방댐과 기능적으로 유사하지만 계류의 수리적 연속성은 손상하지 않는 점에서는 큰 차이점을 보인다.

사방댐 시공 시 주요 고려사항은 집수유역면적, 설치구간의 지형·지질특성, 설치구간의 위치적 조건에 따른 저수·저사 겸용 목적 등으로 계상, 산각 고정, 저수를 목적으로 하는 구간에는 불투과형, 사방댐 시공에 따른 자연훼손이 심각히 발생하는 구간 또는 저사가 주요 목적으로 물 흐름에 따른 피해 발생이 예상되지 않는 구간에 대해서는 투과형 사방댐을 시공하는 것이 구조적, 환경적 측면에서 바람직한 것으로 보고되고 있다(Park, 2007).

2. 링네트 (Ring Net)

토석류 방지시설을 대표하는 불투과형 사방댐은 구조물 자중을 이용하여 토석류 충격력에 저항한다. 반면에, 링네트는 강재의 탄성거동을 이용하여 토석류 충격에너지를 흡수하도록 설계되었다(Baek et al., 2010). 그림 2.1은 국내 링네트 현황분석을 위해 강원도 산간지역에 설치된 실제 링네트를 촬영한 전경으로 본 구조물은 충격에너지를 구조체를 구성하는 강재의 탄성 늘음을 이용하여 흡수하며 불투과형 사방댐과 달리 구조물 전면으로의 토사, 지표수 유출을 허용하므로 국내에서도 토석류 저감 시스템으로 널리 사용되고 있다(Ma and Jeong, 2010).



(a) VX-Type



(b) UX-Type

그림 2.1 국내 링네트 적용 예(강원도)

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 장치개발

가. 토석류 흐름장치 개발

토석류는 그림 1.1과 같이 비탈면 경사와 유송물질의 퇴적규모에 따라 초기발생 구간, 이동 및 침식구간, 퇴적구간으로 구분할 수 있다. VanDine(1996)은 토석류 초기발생구간 (Initiation) 경사는 비탈면 경사가 25° 구간에서 가장 우세하며 침식(Transportation and erosion)은 15° , 퇴적(Deposition)은 10° 이하구간에서 가장 우세하게 진행되는 것으로 보고하였다.

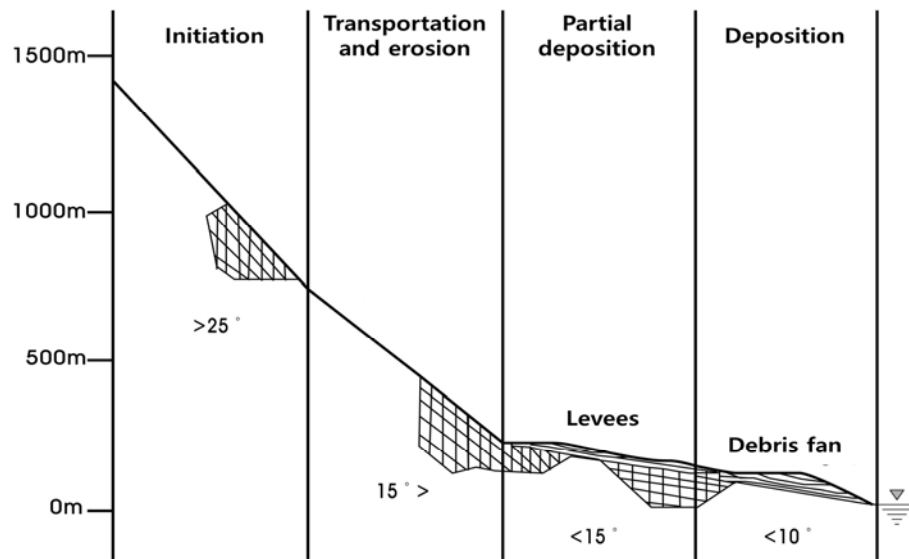


그림 1.1 토석류 흐름의 구간별 분류

Jeon et al (2013)은 강원도 180 여개소에서 발생한 토석류 발생구간에 대한 현황조사를 수행한 결과, 토석류 초기 발생구간 발생빈도는 그림 1.2에 제시된 바와 같이 비탈면 경사가 $30^\circ \sim 40^\circ$, 연장이 50.0m 지점에서 가장 우세한 것으로 기술하였다.

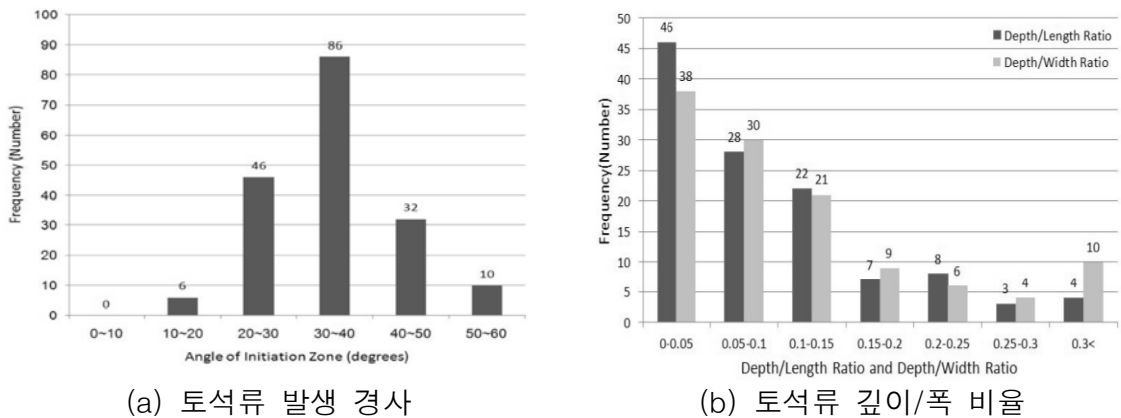


그림 1.2 강원도 토석류 현황조사 결과

본 연구에서는 강원도에서 발생한 토석류 현황을 고려하여 토석류 흐름장치는 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 까지 경사 조절이 가능하며 경사부 길이는 선행연구결과를 토대로 5.0m로 설계하였다. 그림 1.3은 본 연구에 사용된 토석류 흐름실험 장치로서 시료저장구간, 경사부(토석류 이동구간), 바닥부(토석류 퇴적구간)로 구성되었다. 시료 저장구간은 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m} \times 0.5\text{m}$ 크기로 최대 토석류 시료를 0.5m^3 저장할 수 있으며 유압을 이용하여 저장구간을 자동 개폐 할 수 있게 설계하였다. 바닥부는 토석류의 원활한 퇴적을 유도하기 위해 $2.5\text{m} \times 2.0\text{m} \times 0.5\text{m}$ 크기로 설계하였다. 마지막으로 흐름장치는 토석류 흐름에 따른 구조물 안정성 확보를 위해 주형 메인 프레임은 강철로 제작하였으며 실험시 토석류 흐름을 관찰하기 위해 전 구간은 10mm 두께 투명 강화 아크릴판을 메인 프레임에 부착하였다.

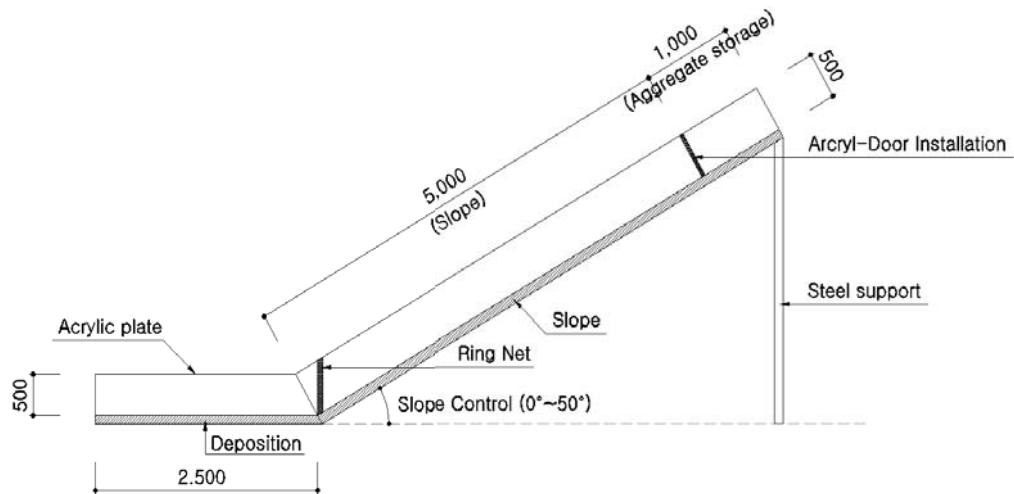


그림 1.3 토석류 흐름장치

나. 토석류 방지지설

(1) 사방댐

불투과형 사방댐은 비탈면 상부에서 발생한 토석류를 하부구간으로 흘려 내리지 않고 구조체의 강성 또는 자중을 이용, 충격하중에 저항하는 방식으로 설계된다. 본 연구에서는 그림 1.4와 같이 1.0m (높이) $\times$ 0.5m (폭) $\times$ 0.016m (두께) 크기의 강판(중량 : 약 62.4kg)을 불투과형 사방댐이라고 가정, 충격하중에 의한 구조물 변형과 방지지설 전면으로의 토석류 입자 투과는 발생하지 않게 모형실험을 수행하였다.



그림 1.4 불투과형 중력식 댐 모형 실험체

(2) 링네트

Wendeler and Volkwein(2015)는 링네트에 대한 실험결과 링 직경이 토석류 누적 통과백분율 90% 크기일 때 최적의 저사능력을 발현한다고 보고하였다. 본 실험에서는 토석류 시료로 직경 25mm(최대 40mm), 40mm(최대 60mm), 70mm(최대 85mm) 자갈을 1:1:1의 비율로 사용하였으며, 이에 따라 링네트 시험체를 구성하는 링의 직경은 70mm로 적용하였다. 그림 1.5는 모형실험에 사용된 링네트로 네트 크기는 직경 70.0mm 링을 각각 연결하여 1.0m × 0.5m 크기로 네트를 제작하였다.

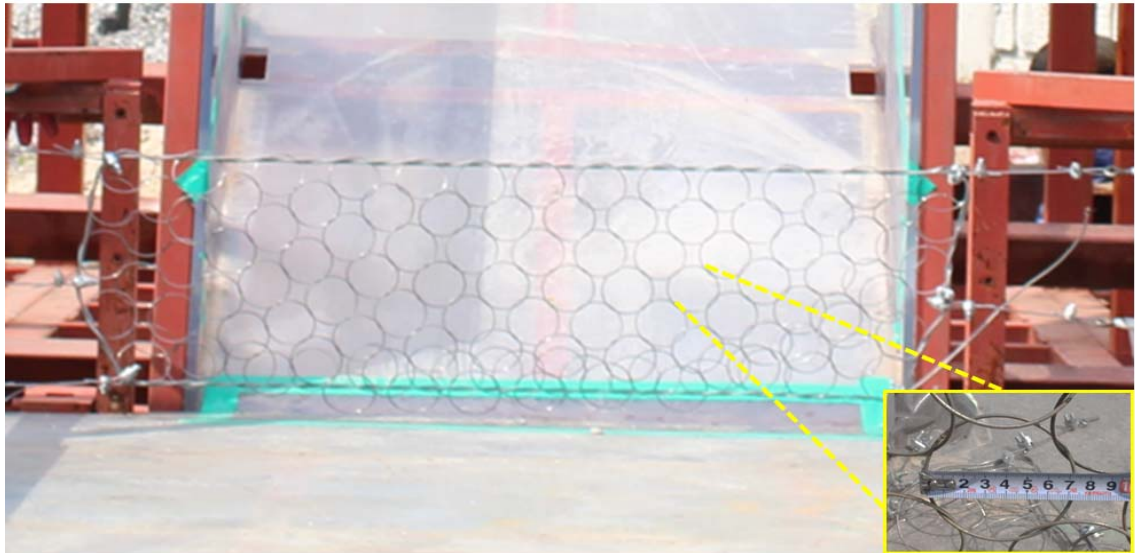


그림 1.5 유연성 링네트 모형 실험체

(3) Hypotential Net

본 연구에서 개발한 하이포텐셜 네트는 그림 1.6과 같이 기존의 유연성 링네트 장치에 하부네트(Lower Net)를 추가로 설치한 것으로 축소모형 시험에서는 링네트 장치와 동일한 상사를 적용하였으며, 규격은 1.0m × 0.5m로 하였다. 이 때 하부네트의 링 직경 크기에 따른 토석류 시료의 충격력 저감 효과를 분석하기 위해 하부네트 링 직경은 전면네트 링 직경 크기의 1.0배(7.0cm), 1.5배(10.5cm), 2.0배(14.0cm)의 3가지로 적용하여 실험을 수행하였다.



그림 1.6 Hypotential Net 모형 실험체

(4) 토석류 구성물질

토석류 구성물질은 대상구간의 지형적·지질적 특성에 좌우되지만 일반적으로 세립토와 수 m 이상의 암괴까지 다양한 입도분포를 보인다(Nasmith, 1972; Lister et al., 1984; Hwang, 2008).

본 연구에서는 그림 1.7과 같이 각각 직경이 다른 3종류의 굵은 골재(직경 25mm, 40mm, 75mm)를 혼합하여 토석류 흐름을 모사하였다. 또한, 토석류는 물과 직접적 관계가 있다. 따라서 국내에서 수행된 토석류 모형실험 대부분은 함수비 특성을 고려하여 수행되었다(Lee et al., 2009). 본 연구에서는 건조시료, 습윤시료, 포화시료를 모두 사용하여 함수비가 토석류 흐름 및 충격량에 미치는 영향, 각 방지시설 별 거동 특성에 대해 파악하였다. 여기서 습윤 시료는 골재를 24시간 이상 완전 수침시킨 후 간극수를 배수시킨 골재를 말한다. 습윤시료의 골재 입자는 표면건조 포화상태 내지는 습윤상태이기 때문에 골재 표면의 수분의 영향으로 토석류와 바닥면 사이의 마찰은 감소하고 토석류 중량은 건조시료에 비해 상대적으로 증가한다. 포화시료는 수침시킨 골재의 물을 배수시키지 않고 물과 골재를 함께 낙하시키는 것으로 입자 상태는 습윤상태이며, 물과 함께 혼합되어 낙하되므로 실제 토석류와 좀더 유사한 거동을 하도록 하였다.

그림 1.8은 굵은 골재의 함수량 상태를 나타내는 예이며, 그림 1.9는 포화된 시료의 낙하를 위해 시료 저장부에 물과 골재 시료를 함께 사용한 것을 나타낸 것이다. 토석류 배합비, 배합별 중량은 표 1.1을 참조한다.



(a) 쇄석 A(직경 25mm)

(b) 쇄석 B(직경 40mm)

(c) 쇄석 C(직경 75mm)

그림 1.7 연구에 사용된 토석류 시료

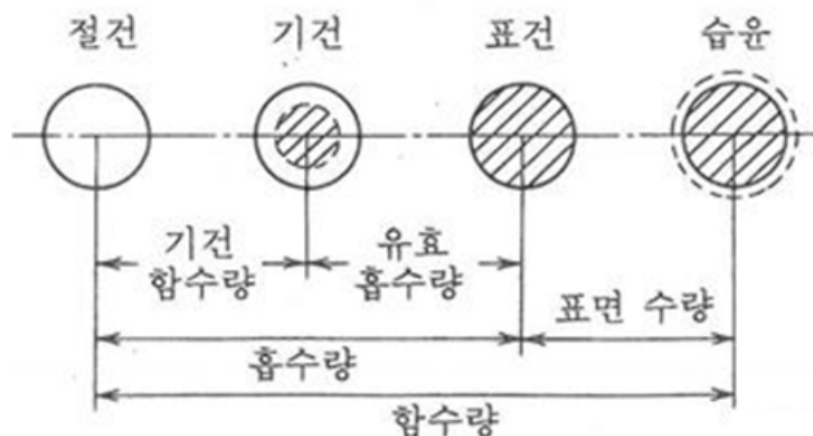


그림 1.8 골재 함수량에 따른 상태



그림 1.9 포화 시료를 사용한 실험

표 1.1 토석류 흐름실험에 사용된 토석류 배합비

구성물질	쇄석 A	쇄석 B	쇄석 C	물	총 중량
하중 (ton)	0.074	0.076	0.086	0.112	0.348
직경 (mm)	< 25mm (최대 40mm)	< 40mm (최대 60mm)	< 70mm (최대 85mm)	—	—

(5) 토석류 충격력 평가

토석류 방지시설 성능평가 연구결과를 검토해보면, 충격력 평가 시에는 하중계, 토압계, 스트레인게이지, 가속도계와 같은 역학센서가 널리 이용된다(Hubl et al., 2009; Moriguchi et al., 2009; Fangqiang et al., 2012). 선행연구결과를 토대로 토압계, 하중계를 적용하여 예비실험을 수행한 결과, 센서에 방어막을 설치하더라도 충격력이 상대적으로 크기 때문에 충격하중이 센서에 직접 전달되어 실험 시 손상되는 문제점이 발생하였다.

본 연구에서는 그림 1.10과 같이 강연선을 토석류 방지시설 측면의 상, 중, 하부구간에 연결한 뒤 각 강연선 표면에 스트레인게이지(strain-gage)를 부착시켜 토석류 충격에 의한 강연선 연신율(elongation)을 측정, 토석류 발생에 따른 방지시설 구간별 충격하중 분포 등을 평가하였다.

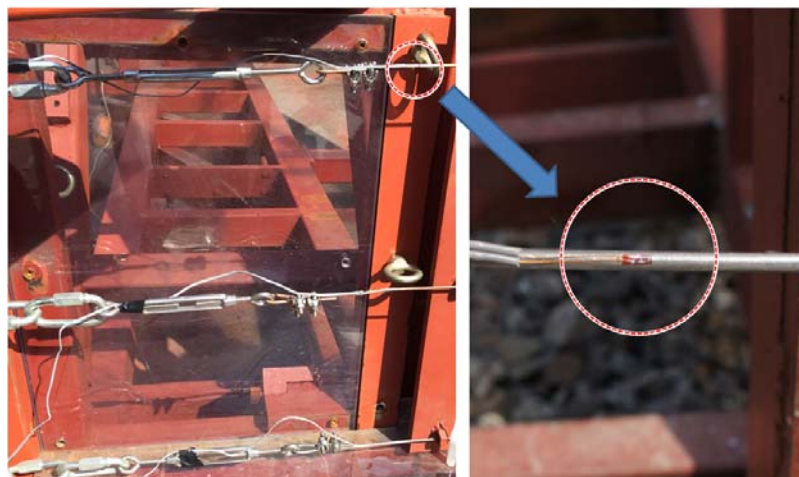


그림 1.10 충격량 측정을 위해 부착된 스트레인 게이지

토석류 방지시설은 3가닥의 강연선에 의해 고정되어 있기 때문에 x 축과 직교방향으로 토석류 충격력이 강연선에 전달되면 강연선은 그림 1.11과 같이 x 축 방향으로 인장력에 의한 Δx 만큼 늘음이 발생한다. 본 연구에서는 강연선 탄성계수, 스트레인게이지 변위량, 강연선 면적을 곱하여 구간별 방지시설에 가해지는 토석류 충격하중을 실시간 측정하였다. 본 연구에서 Gauge factor는 $2.16 \pm 1\%$, Gauge resistance는 $120.2 \pm 0.5 \Omega$, Transverse sensitivity는 0.6% , 게이지 길이 1.0mm , 폭 0.7mm 인 Tokyo Sokki사의 스트레인게이지 FLK-1-11을 적용, 실험을 수행하였다.

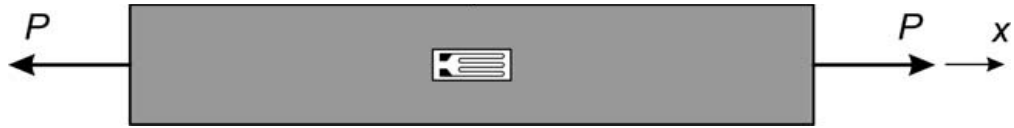


그림 2.11 충격력에 의한 강연선의 거동 특성

2. 토석류 방지시설 충격하중 모형실험 결과

가. 실험 개요

강원도 지역에서 발생한 토석류 현황을 분석한 결과, 토석류는 비탈면 경사가 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 구간에서 발생빈도가 가장 높은 것으로 평가되었다. 본 연구에서는 비탈면 경사 30° , 40° , 50° 에서 발생한 토석류에 의한 방지시설 배면에 작용한 충격하중을 검토하고, 각 실험에 사용된 토석류 시료는 건조시료, 습윤시료, 포화시료의 3종류를 사용하여 각 구조물에 대한 성능평가를 수행하였다.

나. 불투과형 사방댐 모형실험 결과

그림 2.1은 토석류 충격하중에 의한 불투과형 사방댐 거동특성을 나타낸 것이다. 토석류의 흐름거동으로 충격하중은 사방댐 배면 하부구간에 우선적으로 전달되었다. 그러나 불투과형 사방댐은 구조물 전면으로 토석류 이동을 허용하지 않도록 설계되어 구조물에 충격하중 전달 후 토석류 체적변화가 없기 때문에 사방댐 배면에는 토석류 충격하중이 모두 전달되며 이 후 발생 전 체적만큼의 정지토압이 작용하였다.



(a) 토석류 흐름 시작

그림 2.1 토석류 충격하중에 따른 사방댐 모형의 거동 (계속)



(b) 토석류 발생에 따른 사방댐 거동(초기)



(c) 토석류 발생에 따른 사방댐 거동(중간)



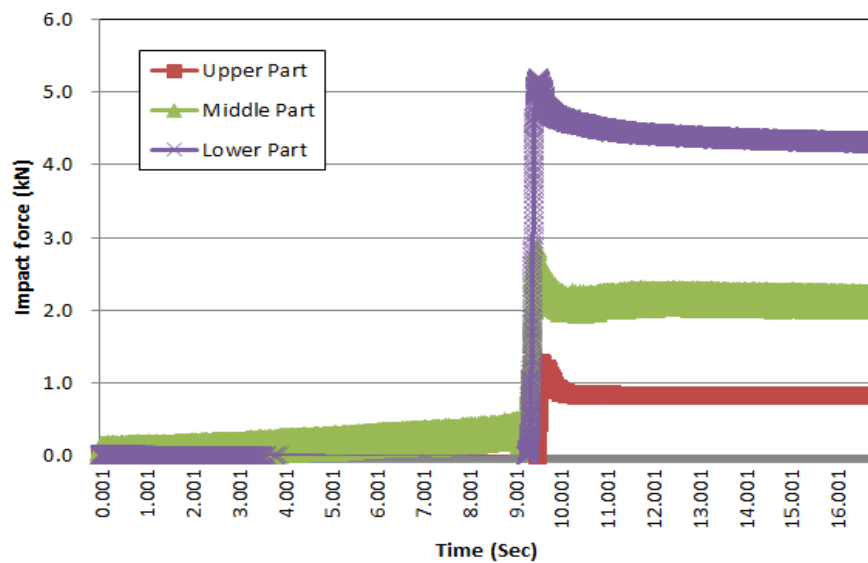
(d) 토석류 발생에 따른 사방댐 거동(최종)

그림 2.1 토석류 충격하중에 따른 사방댐 모형의 거동

그림 2.2는 토석류 거동에 의한 불투과형 사방댐 구간별 충격하중 결과(경사 40°)로서 토석류는 충격하중 전달 후 사방댐 배면에 퇴적됨에 따라 충격하중은 약 1초 이하의 시간간격을 두고 하부에서 상부로 작용구간이 이동하는 것으로 나타났다. 또한 각 시료 종류별 충격하중을 분석해보면, 건조시료의 경우보다 습윤시료, 포화시료의 충격하중이 각각 1.05배, 1.37배 더 큰것으로 나타났다. 이는 물에 의해 토석류 시료와 바닥면과의 마찰저항이 감소하는 반면 시료 중량은 증가하였기 때문으로 사료된다. 각 시료 종류별 네트에 가해지는 충격하중은 표 2.1을 참조한다.

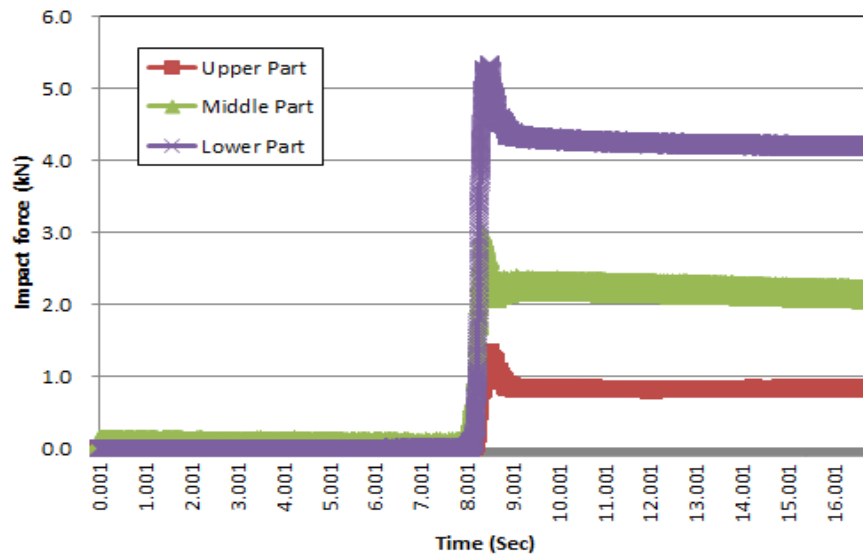


(a) 토석류 흐름 종료 후 사방댐 모형

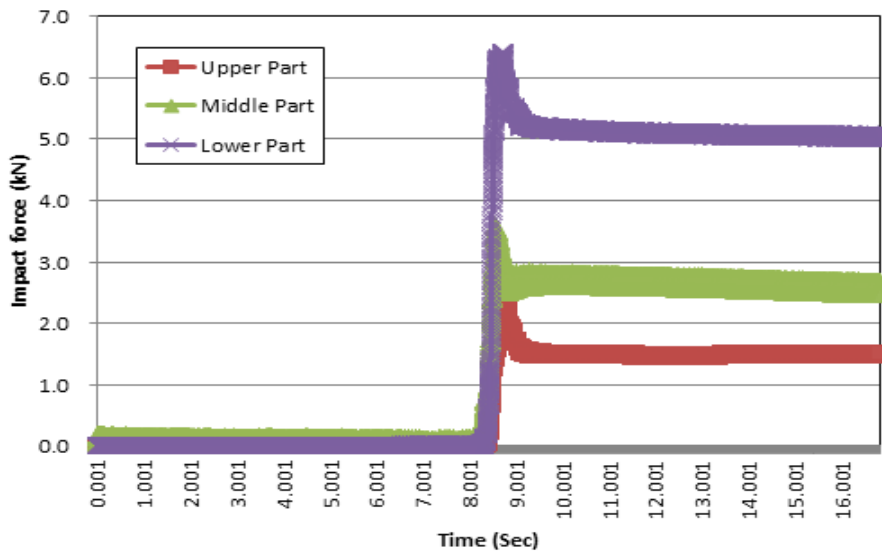


(b) 사방댐에 가해진 충격하중(건조시료)

그림 2.2 사방댐에 가해진 충격하중 (흐름경사 40°) (계속)



(c) 사방댐에 가해진 충격하중(습윤시료)



(d) 사방댐에 가해진 충격하중(포화시료)

그림 2.2 사방댐에 가해진 충격하중 (흐름경사 40°)

표 2.1 흐름경사에 따라 사방댐 모형에 작용하는 충격하중(kN)

충격하중 흐름경사	건조시료			습윤시료			포화시료		
	하부 구간	중간 구간	상부 구간	하부 구간	중간 구간	상부 구간	하부 구간	중간 구간	상부 구간
30°	4.46	2.58	1.13	4.59	2.65	1.24	5.35	3.10	1.36
40°	5.20	2.85	1.29	5.34	3.00	1.21	6.40	3.60	2.41
50°	5.45	2.92	1.41	5.99	3.21	1.55	6.61	3.88	2.51

다. 링네트 모형실험 결과

그림 2.3은 비탈면 경사 40° 에서의 토석류 흐름과 토석류 충격하중에 의한 링네트 방지시설 거동특성을 나타낸 것으로 실험시작과 함께 토석류는 유체와 유사한 흐름거동을 하면서 흐름장치 하부방향으로 이동을 시작하였다. 구조물 배면에 도달한 토석류 중 모래, 잔골재 일부는 링네트 실험체에 충격하중을 전달한 후 투과되며 일부는 링네트 배면 하부에 퇴적되었다. 토석류의 흐름거동으로 토석류는 링네트 배면 하부 퇴적구간을 지나 링네트 전면에 충격하중을 전달한 후 링네트 배면에 퇴적되거나 전면으로 투과되었으며 토석류 흐름에 의한 충격하중 작용구간은 시간흐름에 따라 토석류 퇴적에 의해 하부에서 상부구간으로 이동하였다.



(a) 토석류 흐름 시작



(b) 토석류 발생에 따른 링네트 거동(초기)

그림 2.3 토석류에 의한 링네트 구조물 거동(흐름경사 40° , 건조시료) (계속)



(c) 토석류 발생에 따른 링네트 거동(중간)



(d) 토석류 발생에 따른 링네트 거동(최종)

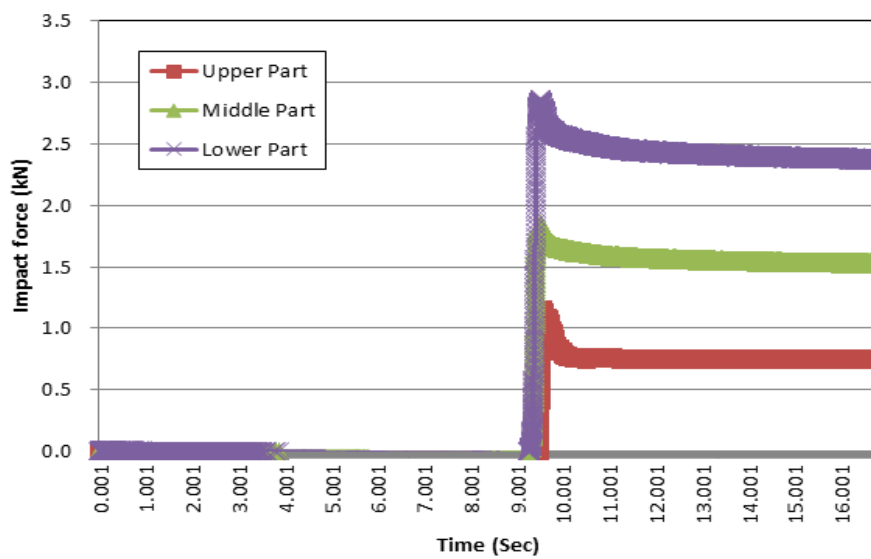
그림 2.3 토석류에 의한 링네트 구조물 거동(흐름경사 40°, 건조시료)

본 연구에서는 경강선을 이용하여 링네트를 제작하였기 때문에 토석류 충격하중이 구조물에 가해지면 충격하중은 경강선의 탄성 늘음에 의해 흡수되며 링 직경보다 크기가 작은 입자는 네트 전면으로 투과되도록 설계되었다. 모형실험결과, 링 직경보다 입자가 작은 토사가 링네트에 도달하면 구조물은 토석류 흐름방향으로 미약한 변형만 발생하는 반면, 토석류가 링네트 배면에 퇴적 또는 링 직경보다 크기가 큰 골재가 링네트에 충격하중을 전달한 이후부터 링네트는 탄성 늘음에 의해 토석류 거동을 구속하였다. 이와 같은 링네트 투과, 강연선 탄성 변형의 결과, 링네트는 그림 2.4(a)와 같이 배부름 형태로 변형되었다.

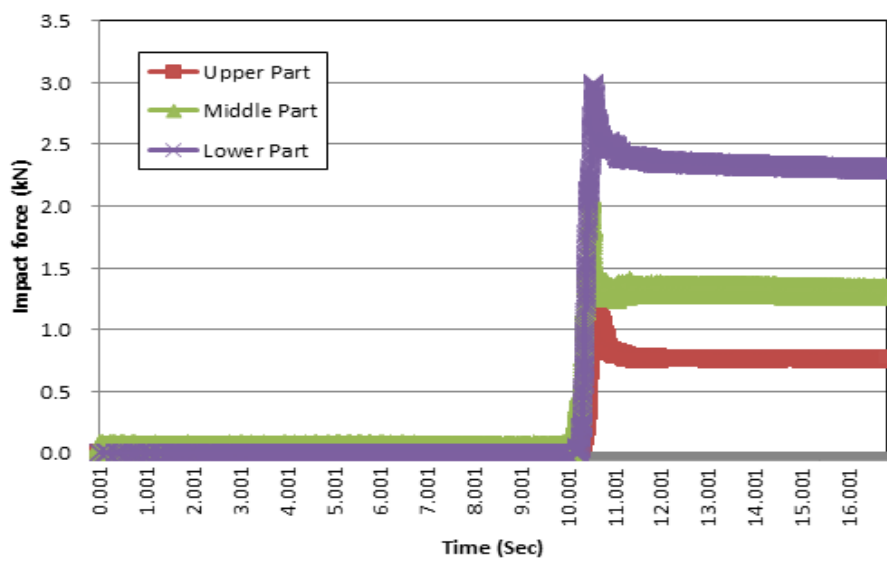
그림 2.4(b)~(d)는 링네트 배면에 가해지는 토석류 충격하중을 구간별로 충격하중-시간 그래프를 이용하여 나타난 결과이다. 토석류는 흐름거동으로 링네트 배면 하부에 우선적으로 충격하중을 전달함에 따라 구조물 배면에 도달 후 구간별로 1초 이하의 시간차를 두고 링네트 하부구간에서 상부구간으로 충격하중을 전달하는 것으로 분석되었다. 또한 각 시료 종류별 모형실험결과, 링네트 배면에 작용하는 충격하중은 사방댐 모형실험 결과와 같이 건조시료를 사용할 경우보다 습윤시료, 포화시료를 사용할 경우의 충격력이 1.05배, 1.25배 더 크게 나타났다. 토석류 흐름 각도별, 시료 종류별 링네트에 작용하는 충격력값은 표 2.2에 나타내었다.



(a) 토석류 흐름 시작

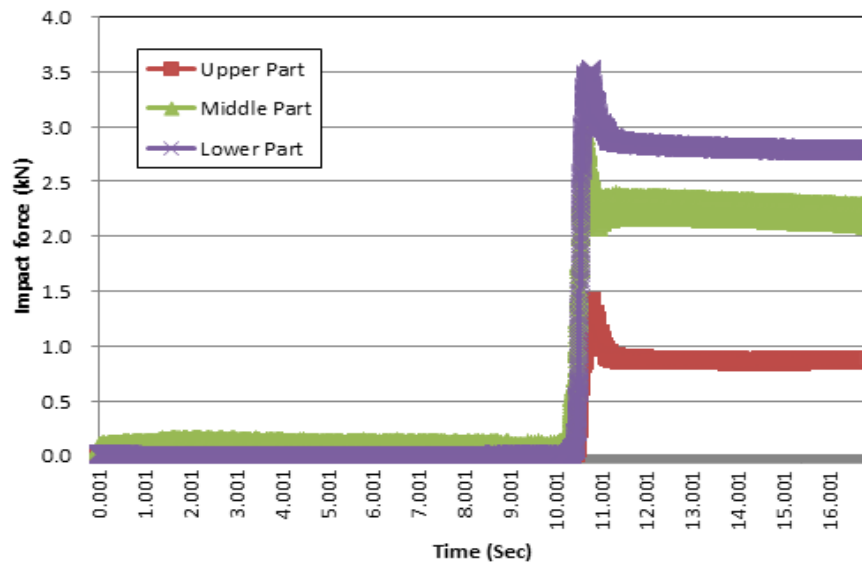


(b) 토석류 발생에 따른 링네트 거동(초기)



(c) 토석류 발생에 따른 링네트 거동(중간)

그림 2.4 링네트에 가해진 충격하중 (흐름경사 40°) (계속)



(d) 토석류 발생에 따른 링네트 거동(최종)

그림 2.4 링네트에 가해진 충격하중 (흐름경사 40°)

표 2.2 흐름경사에 따라 링네트 모형에 작용하는 충격하중(kN)

충격하중 흐름경사	건조시료			습윤시료			포화시료		
	하부 구간	중간 구간	상부 구간	하부 구간	중간 구간	상부 구간	하부 구간	중간 구간	상부 구간
30°	2.68	1.55	1.02	2.82	1.51	1.12	3.44	1.83	1.33
40°	2.87	1.84	1.16	3.00	2.09	1.24	3.52	3.01	1.41
50°	3.46	2.16	1.39	3.65	2.21	1.48	3.68	2.47	1.62

라. Hypotential Net 모형실험 결과

그림 2.5는 비탈면 경사 40° 에서의 토석류 흐름과 토석류 충격하중에 의한 하이포텐셜네트 거동특성을 나타낸 것으로 유체와 유사한 흐름을 보이며 이동한 토석류 시료는 하부네트에 도달, 충격력을 작용시키고 전면네트로 이동하였다. 하부네트 상부를 지나면서 일부 골재 및 물은 하부네트 아래로 투과되며 일부는 전면네트 배면 하부에 퇴적되거나 전면으로 투과되었으며, 토석류 흐름에 의한 전면네트 충격하중 작용구간은 시간흐름에 따라 토석류 퇴적에 의해 하부에서 상부구간으로 이동하였다.



(a) 토석류 흐름 시작 및 하부네트 도달



(b) 토석류 발생에 따른
하이포텐셜네트 거동(초기)



(c) 토석류 발생에 따른
하이포텐셜 네트 거동(중간)

그림 2.5 토석류에 의한 하이포텐셜 네트 구조물 거동(흐름경사 40°, 건조시료) (계속)



(d) 토석류 발생에 따른
하이포텐셜네트 거동(최종)

그림 2.5 토석류에 의한 하이포텐셜 네트 구조물 거동(흐름경사 40°, 건조시료)

본 연구에서는 하이포텐셜 네트에 설치되는 하부네트 링직경을 전면네트에 사용한 링의 크기보다 1.0배(case1), 1.5배(case2), 2.0배(case3)로 각각 적용하여 실험을 실시하였다. 표 2.3은 흐름경사 40° 에서 포화시료를 사용하였을 경우의 전면네트 충격량 결과를 나타낸 것으로 Case1의 경우 강선에 작용하는 충격력은 상부, 중간, 하부 강선에서 각각 1.27kN, 1.98kN, 2.97kN으로 나타난 반면 하부네트의 링 직경을 증가시킨 Case2의 경우 강선에 작용하는 충격력은 1.09kN, 1.42kN, 1.74kN(상부, 중간, 하부 강선)으로 Case1의 결과에 비해 약 27.9% 감소한 것으로 제시되었다. 이는 하부네트의 링직경이 상대적으로 작을 경우 링직경보다 작은 골재, 물 등의 필터링 효과가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Case3의 결과 강선에 작용하는 충격력은 1.07kN, 1.43kN, 1.71kN(상부, 중간, 하부 강선)으로 제시되었는데, 이는 Case2의 결과와 약 1.1%의 차이를 보이는 것으로 분석되었다. Case2와 Case3의 충격력 실험 결과가 큰 차이를 보이지 않는 것은, 사용된 토석류 골재의 크기가 최대 85mm이기 때문에, 이 이상의 링 직경 증가에 대해서는 추가적인 충격력 감소 효과는 나타나지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이에 따라 본 연구에서는 하부네트 링직경을 전면네트의 1.5배로 적용, 실험을 수행하였다.

표 2.3 하부네트 링직경에 따른 전면네트 충격하중(kN, 흐름경사 40°, 포화시료)

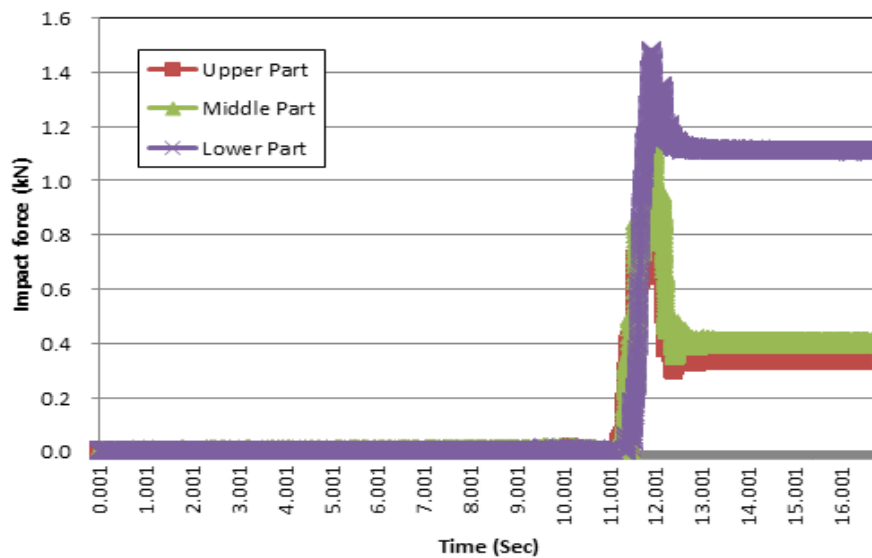
하부네트 링직경 / 전면네트 링직경	상부강선(kN)	중간 강선(kN)	하부강선(kN)
1.0 (CASE 01)	1.27	1.98	2.97
1.5 (CASE 02)	1.09	1.42	1.74
2.0 (CASE 03)	1.07	1.43	1.71

그림 2.6은 하이포텐셜 네트에 가해지는 토석류 충격하중을 구간별로 충격하중-시간 그래프를 이용하여 나타낸 결과이다. 토석류는 흐름거동으로 하부네트를 지나 전면네트 배면 하부에 우선적으로 충격하중을 전달함에 따라 구조물 배면에 도달 후 구간별로 1초 이하의 시간차를 두고 네트 하부구간에서 상부구간으로 충격하중을 전달하는 것으로 분석되었다. 또한 각 시료 종류별 모형실험결과, 링네트 배면에 작용하는 충격하중은 사방댐 모형실험 결과와

같이 건조시료를 사용할 경우보다 습윤시료, 포화시료를 사용할 경우의 충격력이 1.11배, 1.18배 더 크게 나타났다. 토석류 흐름 각도별, 시료 종류별 전면네트에 작용하는 충격력값은 표 2.4에 나타내었다.

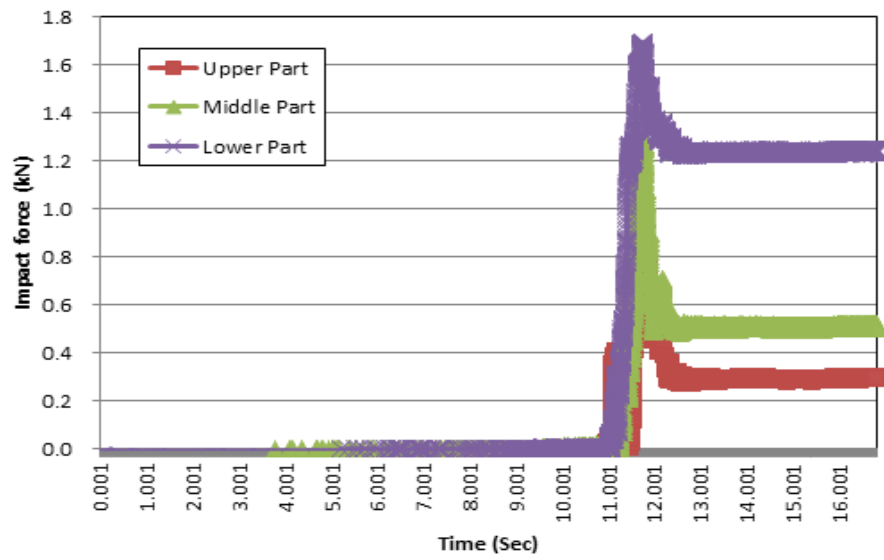


(a) 토석류 흐름 종료 후 하이포텐셜 네트 모형

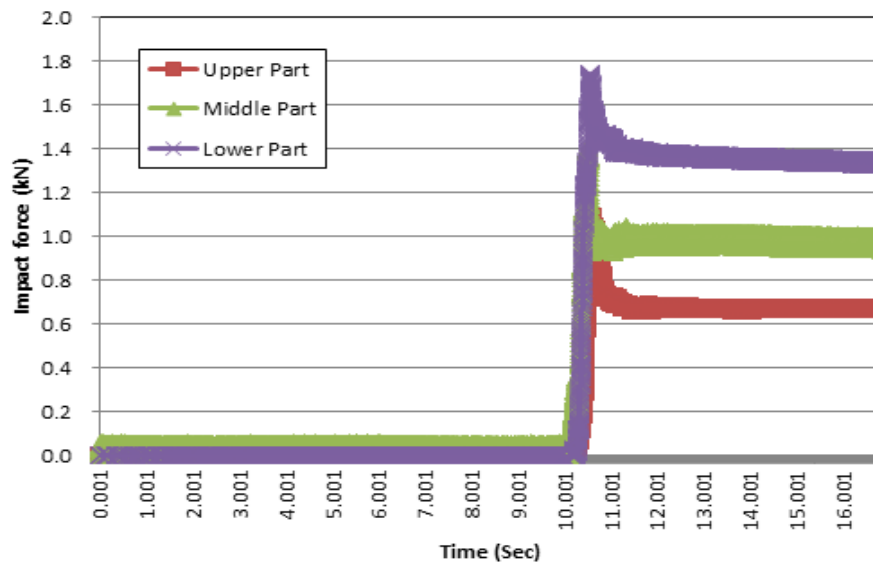


(b) 하이포텐셜 네트에 가해진 충격하중(건조시료)

그림 2.6 하이포텐셜 네트에 가해진 충격하중 (흐름경사 40°) (계속)



(c) 하이포텐셜 네트에 가해진 충격하중(습윤시료)



(d) 하이포텐셜 네트에 가해진 충격하중(포화시료)

그림 2.6 하이포텐셜 네트에 가해진 충격하중 (흐름경사 40°)

표 2.4 흐름경사에 따라 하이포텐셜 네트 모형에 작용하는 충격하중(kN)

충격하중 흐름경사	건조시료			습윤시료			포화시료		
	하부 구간	중간 구간	상부 구간	하부 구간	중간 구간	상부 구간	하부 구간	중간 구간	상부 구간
30°	1.09	0.83	0.77	1.19	0.99	0.80	1.29	1.05	0.81
40°	1.48	1.21	1.01	1.69	1.30	1.05	1.74	1.42	1.09
50°	1.69	1.42	0.92	1.95	1.69	1.01	1.98	1.88	1.14

마. 실험 결과 비교

표 2.5는 흐름 경사 40°, 포화시료 조건에서 사방댐, 링네트, 하이포텐셜 네트에 작용하는 충격력 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험 결과, 동일한 조건에서 방지시설 하부구간에 가해지는 충격력은 사방댐, 링네트, 하이포텐셜 모형에서 6.40kN, 3.52kN, 1.74kN으로, 링네트와 하이포텐셜 네트의 충격력 비율은 사방댐에 작용하는 충격력 대비 각각 55%, 27%로 제시되었다. 특히 하이포텐셜 네트의 충격하중 저감율은 강선 상부, 중간, 하부 구간에서 사방댐 대비 54.7%, 60.6%, 72.8%로 나타났다. 이는 하이포텐셜네트에 부착된 하부네트가 토석류 이동속도를 저감시키고 전면네트로 이동하는 토석류 물질의 양도 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다.

표 2.5 토석류 방지시설에 작용하는 충격하중

방지시설 강선위치	사방댐 모형		링네트 모형		하이포텐셜네트 모형	
	충격하중(kN)	비율(%)	충격하중(kN)	비율(%)	충격하중(kN)	비율(%)
하부 구간	6.40	100	3.52	55.00	1.74	27.19
중간 구간	3.60	100	3.01	83.61	1.42	39.44
상부 구간	2.41	100	1.41	58.51	1.09	45.23

강선에 작용하는 충격하중이 감소한 것은 하이포텐셜 네트의 변형 및 허용저사량과 관련이 있다. 강재는 일정 변형률에 도달하기 전까지는 탄성거동을 하므로, 동일한 토석류에 대해 충격하중에 의한 변형이 감소한 것은 그만큼의 추가 허용저사량을 증가시켰다는 의미로 판단되며, 향후 재료적, 구조적인 보완을 실시하여, 국내외의 토석류 위험 현장에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

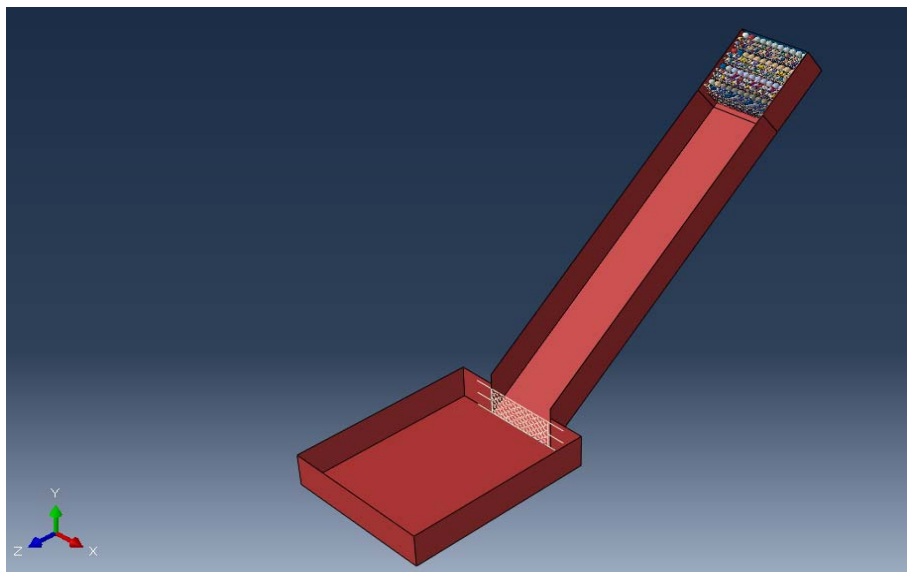
3. 수치해석기법을 이용한 토석류 방지시설 충격하중 해석결과

가. 개요

모형실험 결과, 토석류는 방지시설에 도달한 후 약 2초 이내에 충격하중을 구조물 배면에 전달한 뒤 퇴적되는 것으로 나타났다. 이와 같이 토석류 흐름거동으로 실험은 빠른 시간내에 종료되므로 육안관찰을 통해 토석류 충격하중에 의한 방지시설 거동을 분석하는 것은 상당한 어려움이 따른다. 본 연구에서는 수치해석적 기법을 적용하여 토석류 거동 및 토석류 충격하중에 의한 방지시설 거동·충격하중 흡수 메커니즘을 분석하였다.

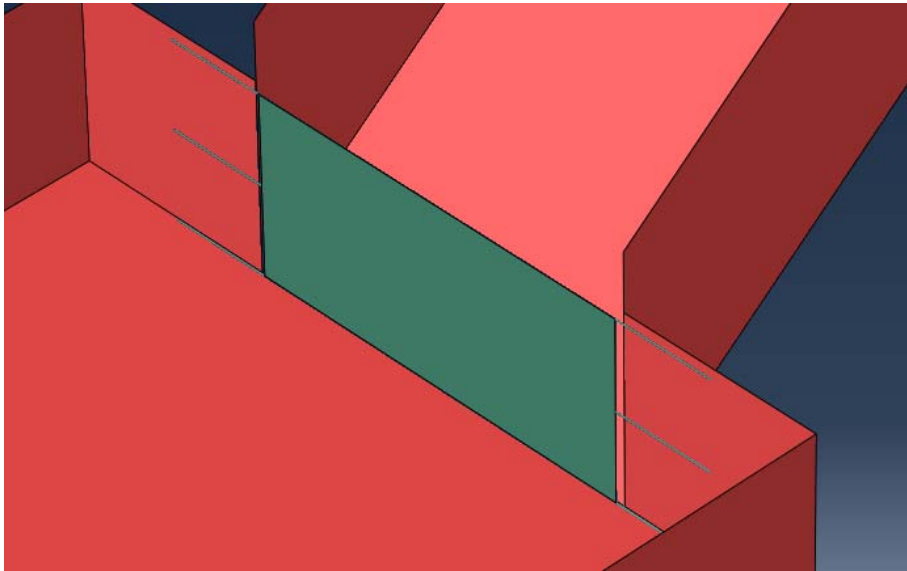
본 연구에 사용된 해석코드는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/CAE, Ver. 6.14 Standard/Explicit 모듈을 이용하여 토석류 흐름과 방지시설을 모사하였다. 토석류 흐름장치, 방지시설인 불투과형 사방댐, 링네트, 하이포텐셜 네트는 모형실험에 적용된 규격과 동일한 크기로 형상화하였다. 토석류 시료는 모형실험에 사용된 실제 재료를 모사하기 위해 직경 25mm, 40mm, 75mm의 구형대로 모델링하였으며, 충격하중 발생에 따른 입자형상 변화는 발생하지 않는다고 가정하여 각각의 입자는 강성체로 적용하였다.

토석류 이동 및 충격하중 발생에 따른 토석류 방지시설의 거동을 중점적으로 분석하기 위하여 토석류 흐름장치의 거동은 reference point를 이용하여 강체로 모델링 후 구속 경계조건을 부여하였으며, 각 방지시설을 고정하는 강연선은 끝에 고정단 경계조건을 부여, 충격하중 발생시 강연선의 거동을 분석할 수 있도록 하였다. 그림 3.1, 그림 3.2는 토석류 흐름장치, 불투과형 사방댐, 링네트, 하이포텐셜 네트, 토석류 시료를 ABAQUS/CAE 프로그램을 이용하여 형상화한 것이다.

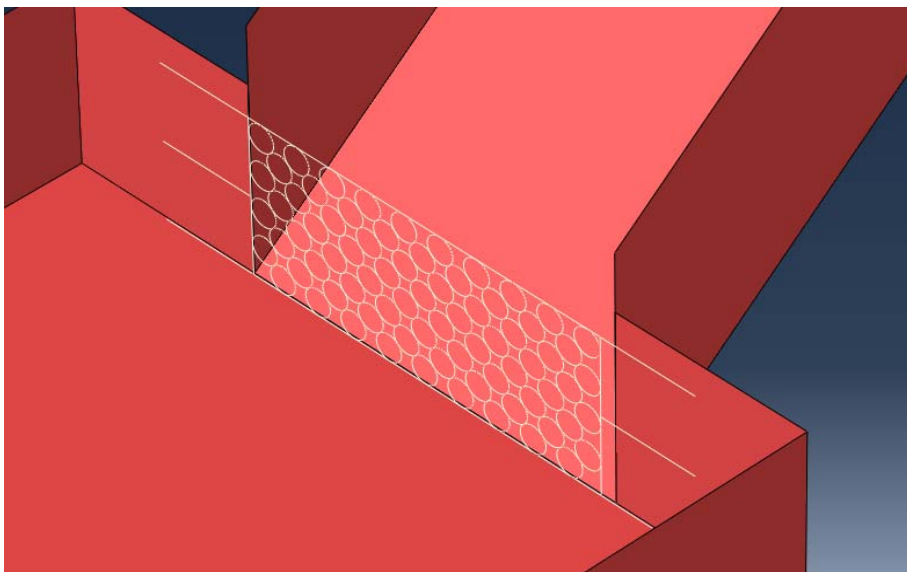


(a) 토석류 흐름장치 모델링

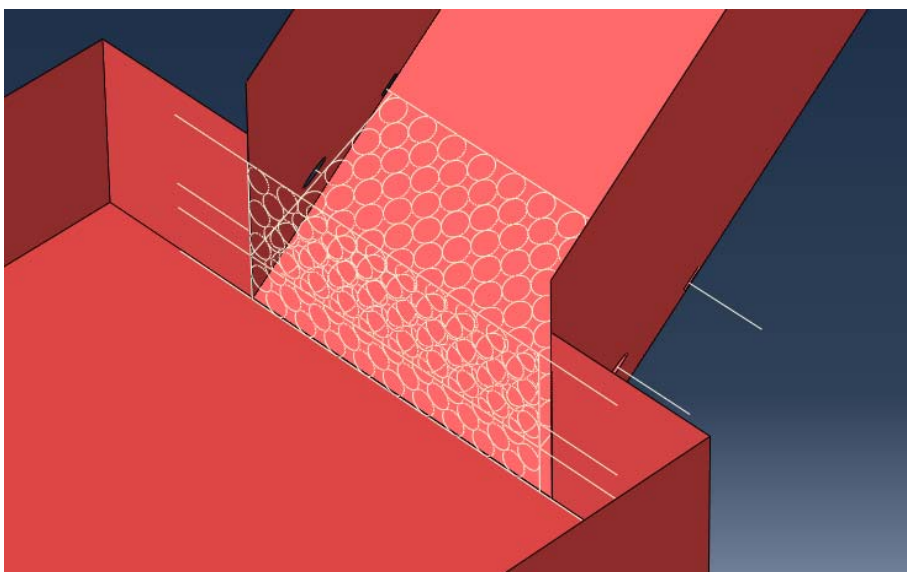
그림 3.1 토석류 흐름장치 및 토석류 방지시설 3차원 모델링 (계속)



(b) 사방댐 모형

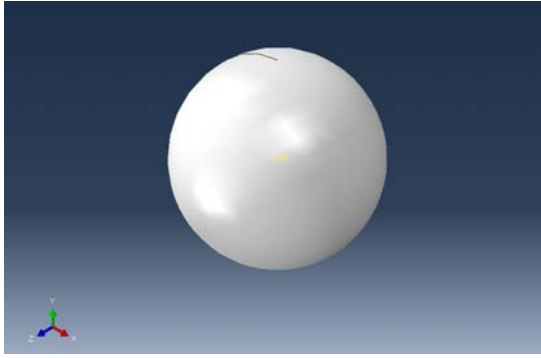


(c) 링네트

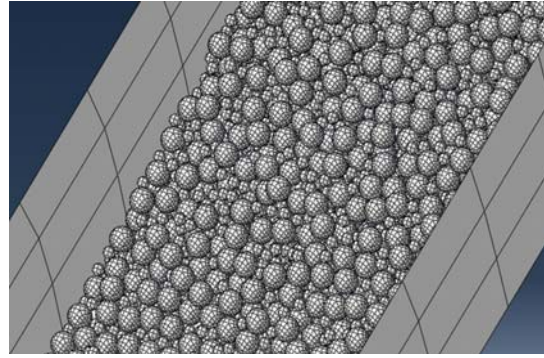


(d) 하이포텐셜 넷

그림 3.1 토석류 흐름장치 및 토석류 방지시설 3차원 모델링



(a) 골재 모델링

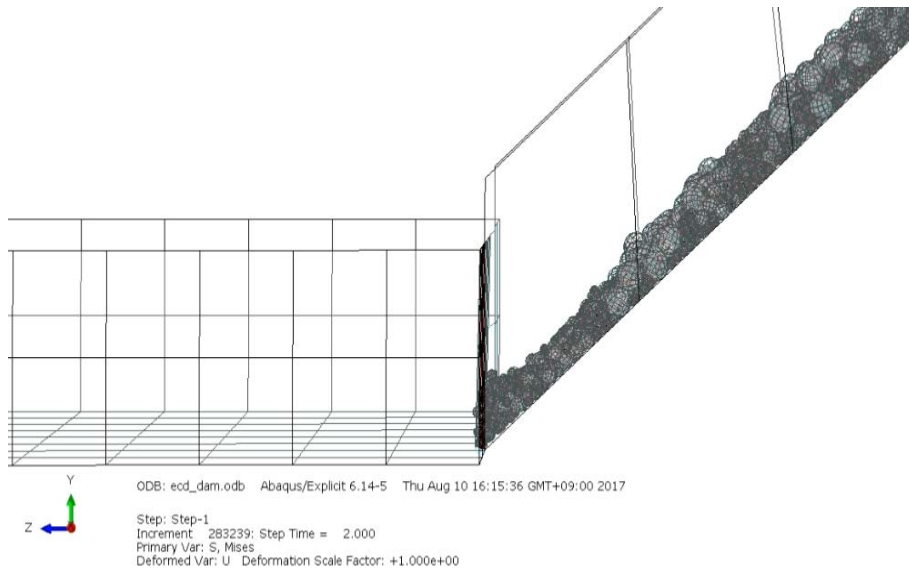


(b) 흐름 형상

그림 3.2 토석류 시료 모델링 (구 형상, 강체)

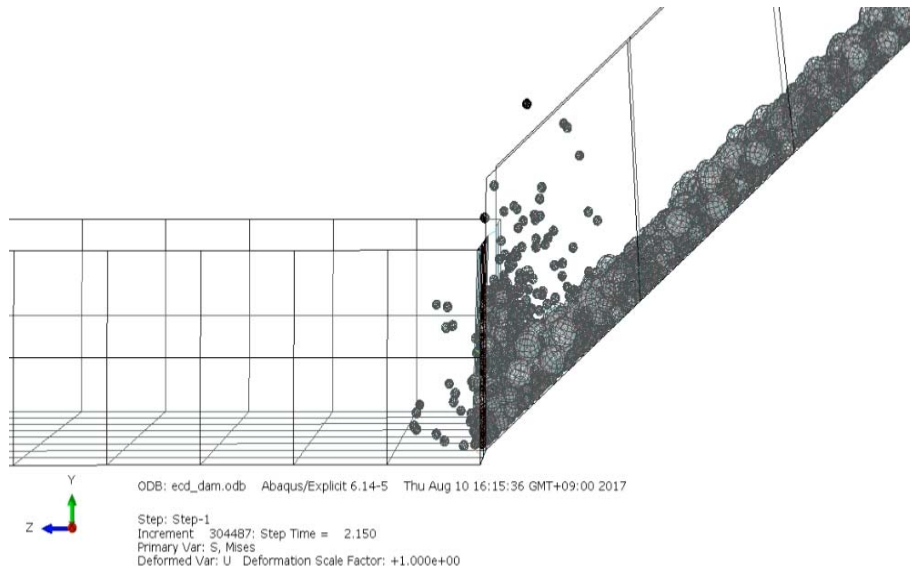
나. 불투과형 사방댐 충격하중 흡수 메커니즘

수치해석 결과를 토대로 불투과형 사방댐의 토석류 충격하중 흡수메커니즘을 분석해보면, 그림 3.3과 같이 토석류는 사방댐 배면 하부에 충격하중을 전달한 후 퇴적되는 것으로 해석되었다. 토석류 흐름거동은 실제 모형실험 결과와 유사하게 구조물 배면 하부에 충격하중을 전달 뒤에도 구조물 방향으로 실험 종료시까지 이동을 계속하였다. 이와 같은 토석류 거동특성으로 토석류는 해석초기 사방댐 배면에 퇴적된 토석류를 지나 구조물에 충격하중을 전달한 후 상부구간에 퇴적되거나 전면에 퇴적된 토석류에 추가적 동하중을 전달한 후 사방댐 배면 상부구간으로의 입자이동을 유도한 뒤 배면에 퇴적되는 것으로 해석되었다.

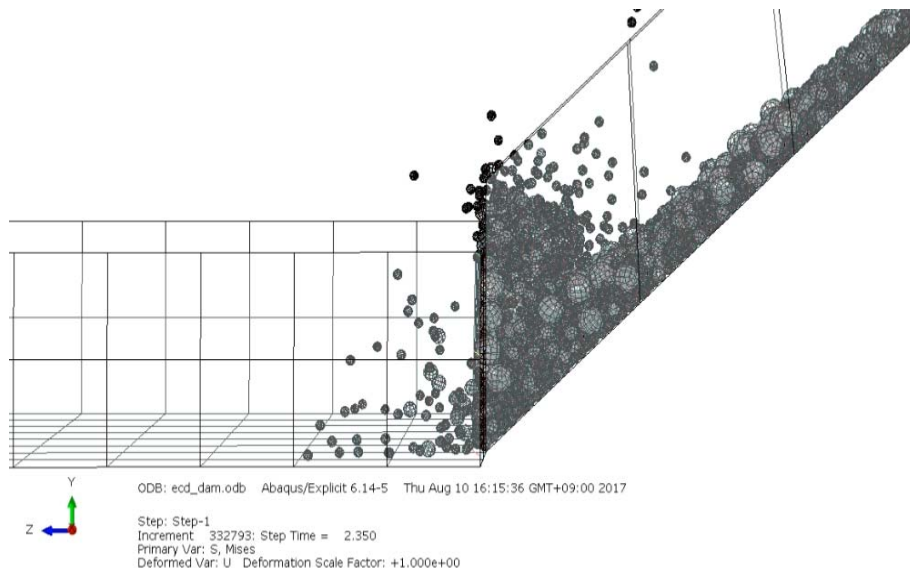


(a) 사방댐 하부구간 충격력 작용

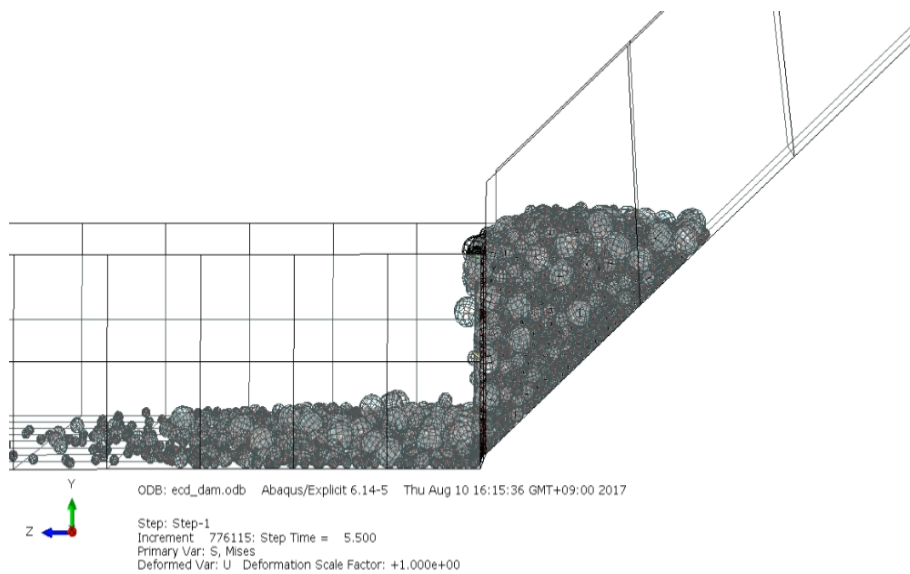
그림 3.3 수치해석을 통한 사방댐 모형의 충격력 흡수 메커니즘 분석 (계속)



(b) 사방댐 중간구간 충격력 작용



(c) 사방댐 상부구간 충격력 작용



(d) 해석 종료

그림 3.3 수치해석을 통한 사방댐 모형의 충격력 흡수 메커니즘 분석

수치해석 결과, 불투과형 사방댐은 두께 16mm강판으로 제작됨에 따라 토석류 충격하중이 구조물 배면에 가해지더라도 구조물 변형은 발생하지 않으며 토석류는 구조물 배면에 충격하중 전달 후 퇴적되는 것으로 해석되었다. 그림 3.4는 불투과형 사방댐 배면에 작용하는 토석류 충격하중, 토압 모식도를 나타낸 것으로서 흐름초기에는 사방댐 배면 하부구간에 동하중만이 작용한다. 사방댐은 동하중에 의한 구조물 거동이 발생하지 않기 때문에 토석류 충격에너지는 구조물에 흡수되고 이 후 토석류는 구조물 배면에 토압으로 하중을 전달한다. 토석류 흐름이 계속될수록 토석류 충격하중 작용구간은 토석류 퇴적으로 사방댐 배면 상부로 이동하며 토석류 흐름 종료 시에는 사방댐 배면에 더 이상의 동하중이 가해지지 않고 정지토압만이 작용한다.

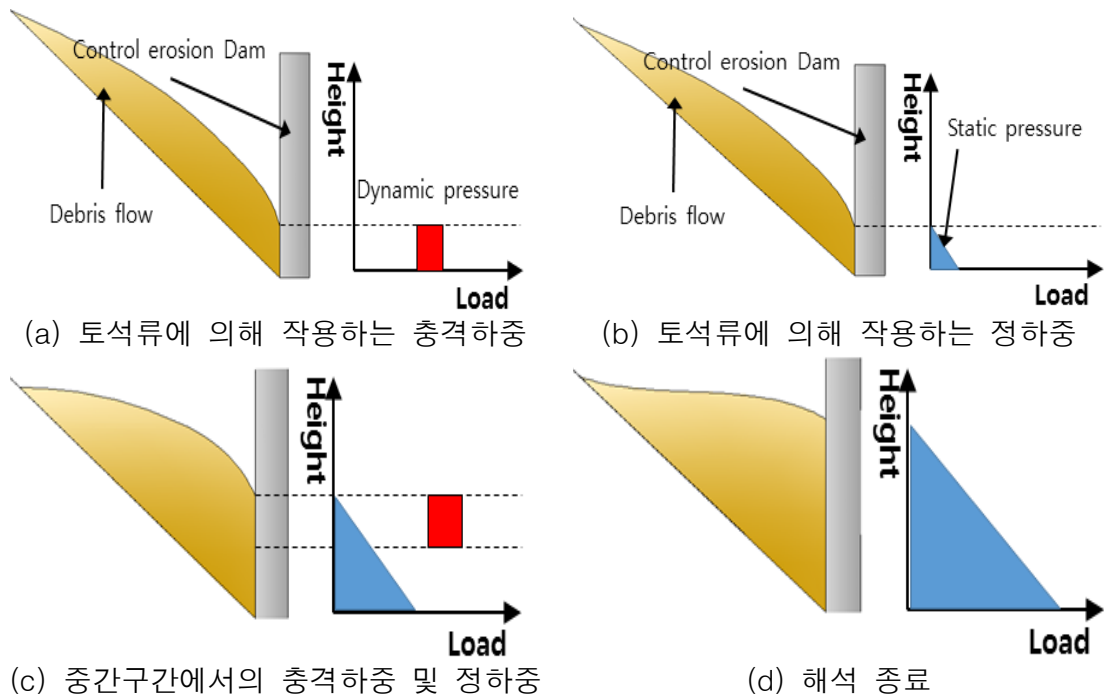
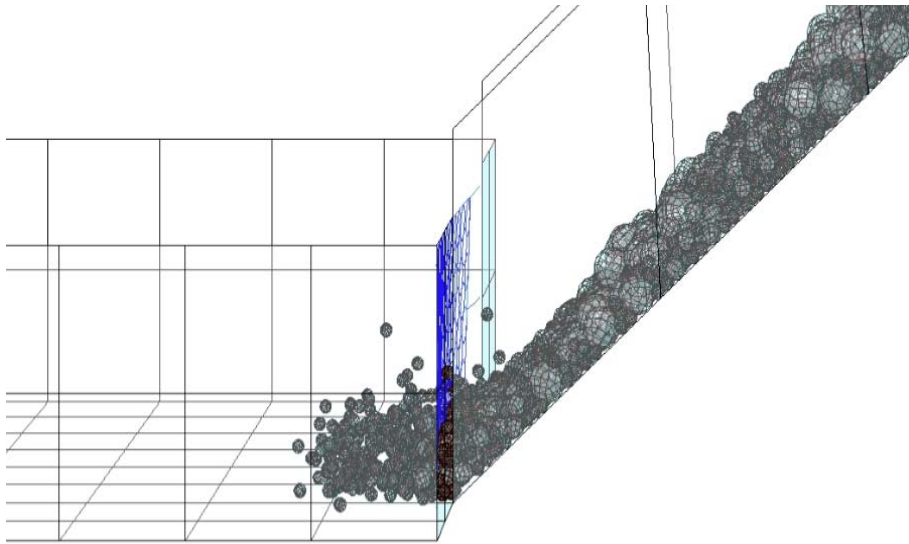


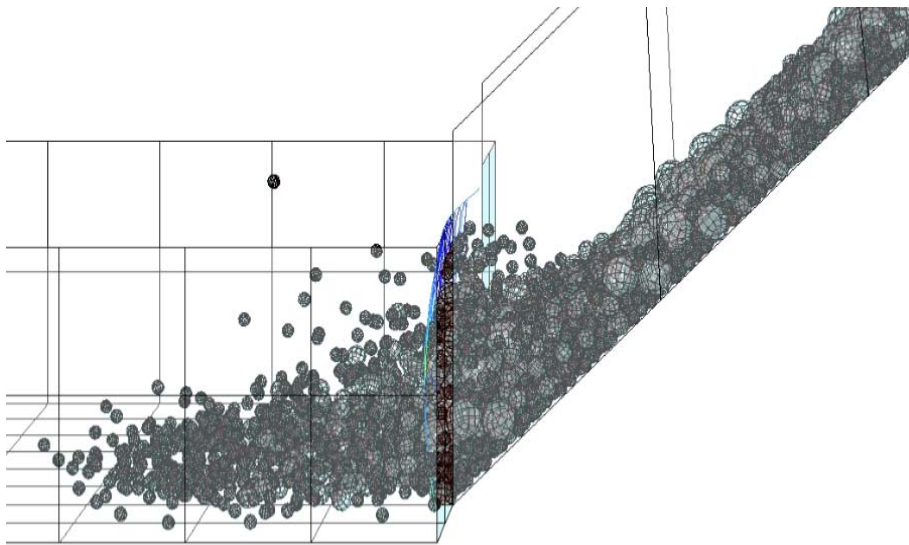
그림 3.4 사방댐 배면에 작용하는 토석류 충격하중, 토압 모식도

다. 링네트 충격하중 흡수 메커니즘

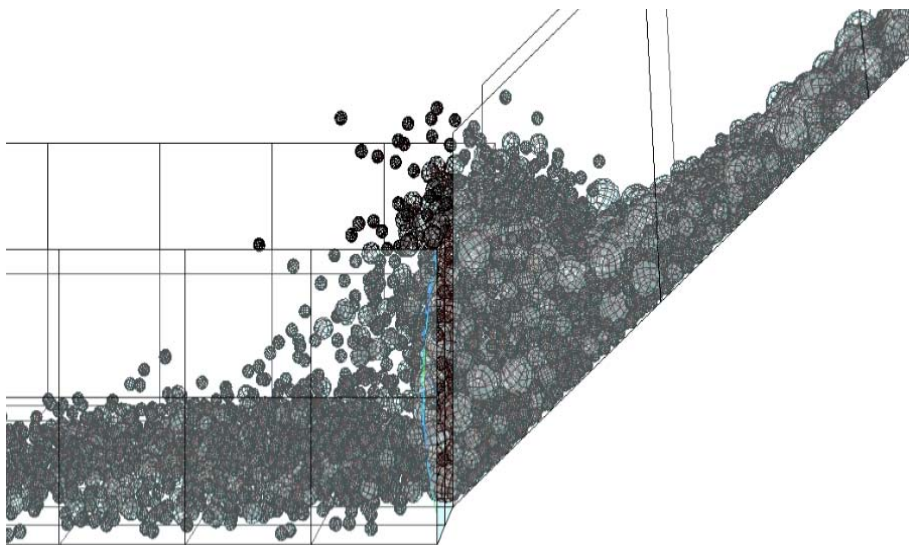
그림 3.5는 토석류 충격하중에 의한 링네트 거동을 수치해석적 기법을 적용하여 나타낸 결과로서, 링네트는 각각의 링의 변형을 이용하여 충격하중을 흡수하므로 링네트 하부구간에 충격하중이 전달됨과 동시에 링네트는 토석류 흐름방향으로 변형되면서 충격하중을 구조체가 흡수하고 링 직경보다 입자가 작은 토석류 일부는 구조물 전면으로 투과하는 것으로 해석되었다. 해석이 계속될수록 링네트는 토석류 흐름방향을 따라 변형이 진행되며 해석 종료시에는 배부름형태의 변형이 발생하였다.



(a) 링네트 하부구간 충격력 작용

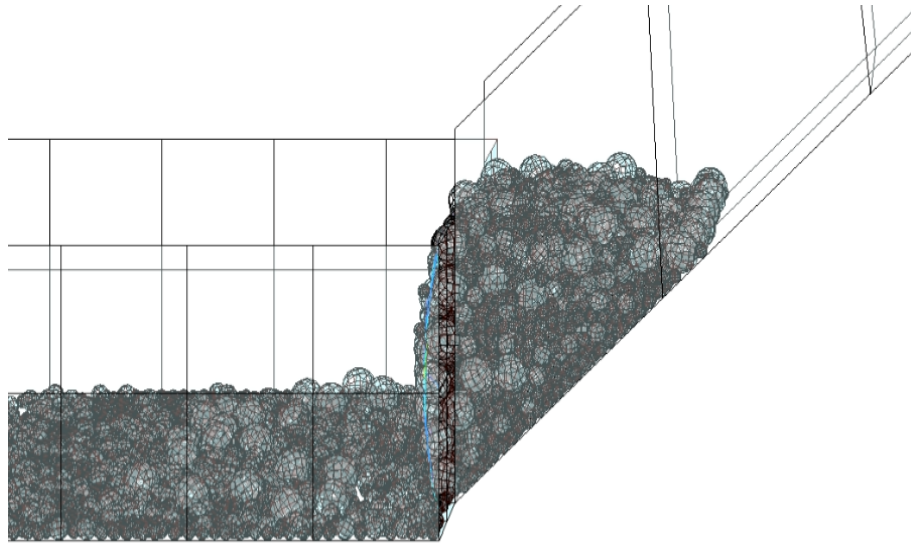


(b) 링네트 중간구간 충격력 작용



(c) 링네트 상부구간 충격력 작용

그림 3.5 수치해석을 통한 링네트 모형의 충격력 흡수 메커니즘 분석 (계속)

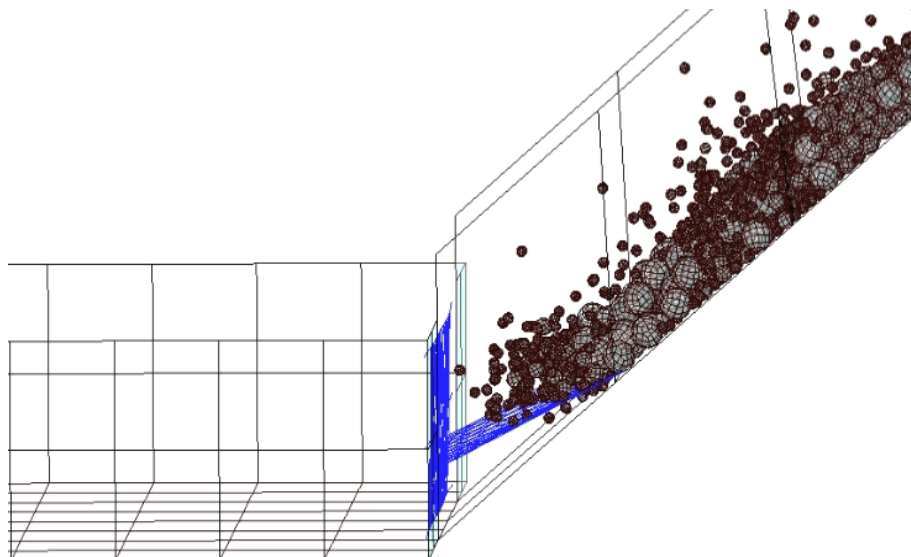


(d) 해석 종료

그림 3.5 수치해석을 통한 링네트 모형의 충격력 흡수 메커니즘 분석

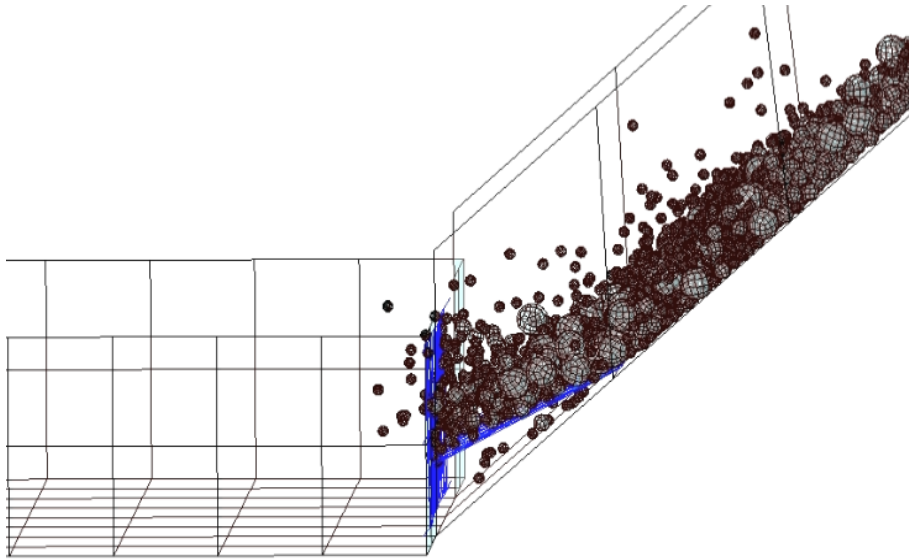
라. 하이포텐셜 네트 충격하중 흡수 메커니즘

그림 3.6은 토석류 충격하중에 의한 하이포텐셜 네트의 거동을 수치해석적 기법을 적용하여 나타낸 결과로, 토석류 시료가 하부네트에 도달 시 하부네트가 변형, 진동하며 충격력을 1차로 흡수하는 것으로 해석되었으며, 이 때 하부네트 링 직경보다 작은 입자는 하부네트를 통해 네트 아래로 투과되는 것으로 분석되었다. 하부네트의 변형, 진동에 의해 이동 속도가 감소한 토석류 시료는 전면네트에 충격력을 가한 후 전면네트를 통해 투과 또는 네트 배면에 퇴적되며, 하부네트는 처짐이, 전면네트는 링네트 실험결과와 유사한 배부름이 발생하였다.

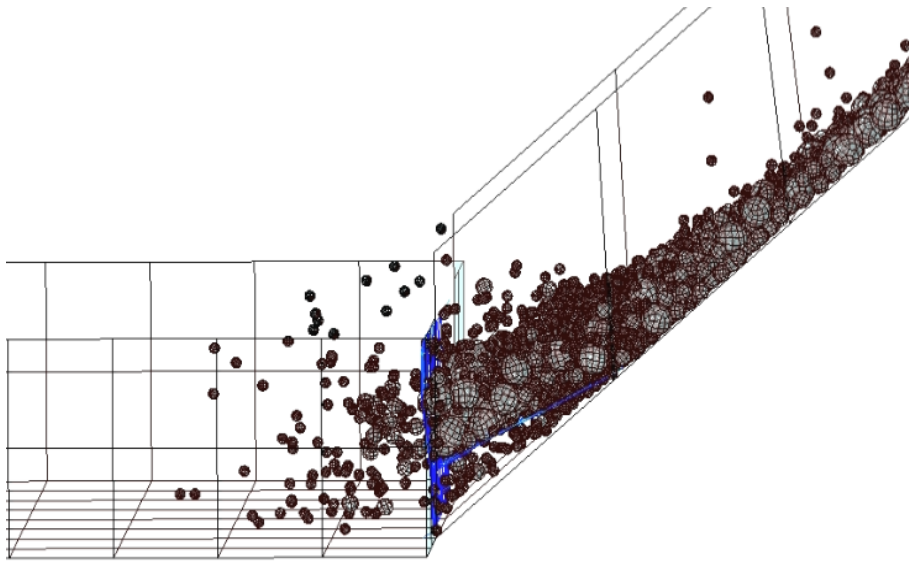


(a) 토석류 시료 하부네트 구간 통과

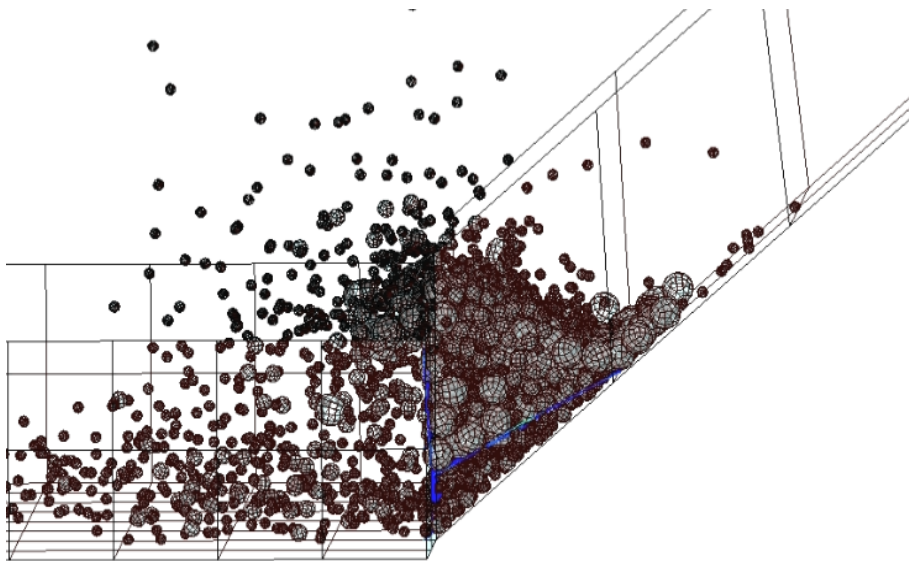
그림 3.6 수치해석을 통한 하이포텐셜 네트 모형의 충격력 흡수 메커니즘 분석 (계속)



(b) 전면네트 하부구간 충격력 작용



(c) 전면네트 중간구간 충격력 작용

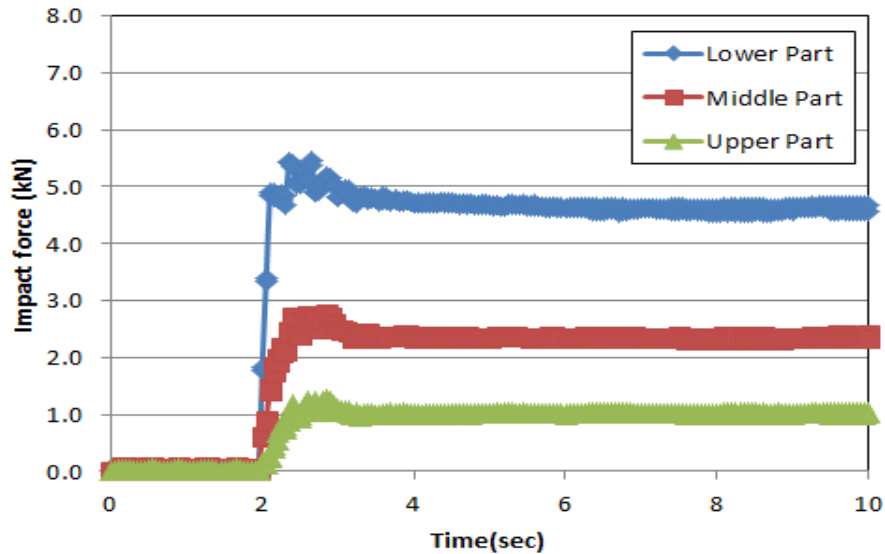


(d) 전면네트 상부구간 충격력 작용

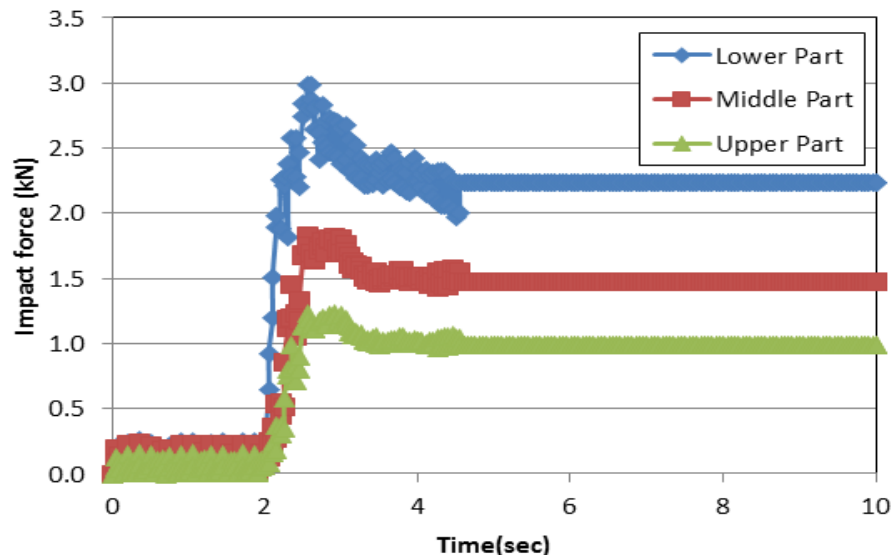
그림 3.6 수치해석을 통한 하이포텐셜 넷 모형의 충격력 흡수 메커니즘 분석

마. 수치해석 결과를 이용한 토석류 방지시설 충격하중 비교

그림 3.7은 수치해석 기법을 이용한 토석류 방지시설 구간별 충격하중 결과로서 모형실험, 수치해석 모두에서 토석류에 의한 충격하중은 방지시설에 전달된 후 약 3초 뒤부터는 변화가 미약하므로 본 연구에서는 충격하중 발생 1초 전부터 발생 후 약 3초 후까지의 결과를 제시하였다. 방지시설에 가해진 충격하중에 대한 수치해석 결과를 검토해보면, 사방댐은 하부구간 5.45kN, 중간구간 2.77kN, 상부구간 1.28kN, 링네트는 구간별로 2.99kN, 1.83kN, 1.24kN, 하이포텐셜 네트는 구간별로 1.55kN, 1.25kN, 1.05kN이 가해진 것으로 해석되었다. 표 3.1은 방지시설에 가해진 충격하중에 대한 구간별 모형실험결과와 수치해석 결과를 비교한 것으로서 모형실험결과 대비 수치해석에서 획득한 결과의 정확성은 90% 이상 일치하는 것으로 검토되었다.

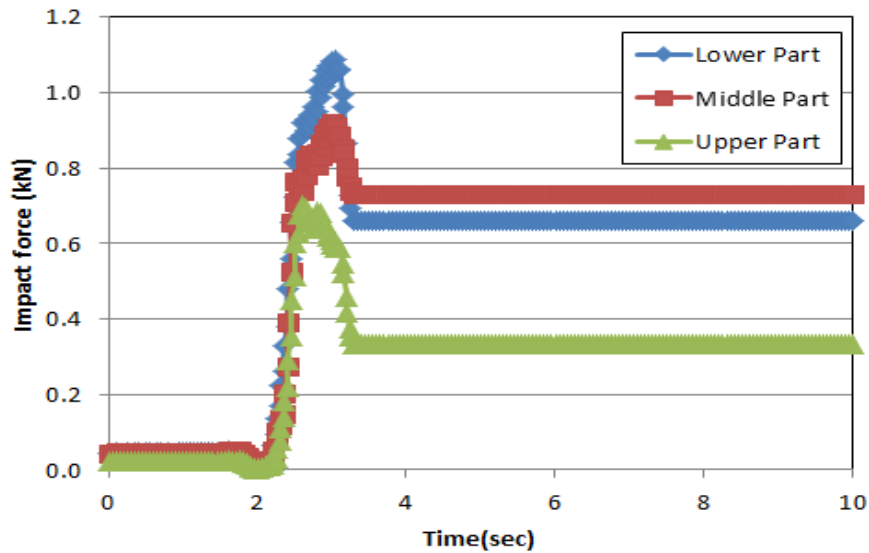


(a) 사방댐 모형



(b) 링네트 모형

그림 3.7 수치해석 결과 토석류 방지시설 별 충격하중 비교 (계속)



(c) 하이포텐셜 넷 모형

그림 3.7 수치해석 결과 토석류 방지시설 별 충격하중 비교

표 3.1 토석류 방지시설별 축소모형실험과 수치해석 결과 비교 (건조시료, 흐름경사 40°)

구 분		상부강선(kN)	중간 강선(kN)	하부강선(kN)
사방댐	모형시험 결과	1.29	2.85	5.20
	수치해석 결과	1.28	2.77	5.45
일치율 (수치해석결과/모형시험결과)		0.99	0.97	1.05
링넷	모형시험 결과	1.16	1.84	2.87
	수치해석 결과	1.24	1.83	2.99
일치율 (수치해석결과/모형시험결과)		1.07	0.99	1.04
하이포텐셜 넷	모형시험 결과	1.01	1.21	1.48
	수치해석 결과	1.05	1.25	1.55
일치율 (수치해석결과/모형시험결과)		1.04	1.03	1.05

한편 본 연구에서는 교통성에서 제시한 불투과형 사방댐 배면에 가해지는 토석류 충격력 예측 식을 이용하여 사방댐 배면에 가해지는 충격하중을 검토하였다. 여기서, 토석류 단위중량 γ_d 는 21kN/m³, 흐름속도 V 는 모형실험결과 모형실험장치 기울기가 40° 일 때 2.5m/s~3.0m/s인 것으로 측정되었으며 토석류 횡단면에서의 평균 수심으로 정의되는 토석류 수심 D_d 는 식 (2)를 이용한 결과 0.117m로 계산되었다. 토석류 충격계수 α 는 경험상수로서 각각의 기관에서는 실험결과를 토대로 표 3.2에 제시된 바와 같이 1.0~3.0의 결과를 제시하였다 (VanDine, 1996; Lo, 2000; SWCB, 2005; MLR, 2006; NILIM, 2007; Hubl et al., 2017).

제안식에 충격계수 중 널리 이용되는 1.0을 적용할 경우 사방댐 배면에는 최대 2.25kN의 충격하중이 작용하는 것으로 검토되었다. 모형실험결과 사방댐 배면에 작용한 최대 충격하중은 비탈면 경사 50° 일 때 하부구간에서 6.60kN으로 제안식을 이용한 사방댐 배면에 가해지는 충격하중은 모형실험결과와 비교시 충격하중을 과소평가하는 것으로 검토되었다. 충격

계수 α 는 구성입자 성분에 따라 결정되는 경험상수로서 구성성분 중 자갈성분이 많을수록 계수는 높은 경향을 보인다. 본 연구에 사용된 토석류와 같이 굵은골재 중량이 전체 구성비의 대부분을 차지하는 재료는 2.95를 적용할 경우 실제 모형실험 결과와 동일한 결과가 제시되는 것으로 계산되었다. 국내 토석류 발생현황을 고려한 충격계수 결정이 필요할 것으로 판단된다.

표 3.2 토석류 충격계수 (α)

구분	HongKong (2000)	British Columbia (1996)	China (2006)	Japan (2007)	Taiwan (2005)
α	3	1	1.0~1.3	1	1

$$F = \alpha \cdot \frac{\gamma_d}{g} \cdot D_d \cdot V^2 \quad (1)$$

여기서, F : 단위폭당 토석류 충격력 (kN/m)
 γ_d : 토석류 단위중량으로 21kN/m³ 적용
 V : 토석류 흐름속도로서 3.0m/s 적용
 g : 중력가속도로서 9.8m/s²
 α : 토석류 충격력 계수 (1~3)
 D_d : 토석류 흐름 깊이로서 0.117m 적용

$$D_d = \frac{Q_d}{V \cdot B} \quad (2)$$

여기서, D_d : 토석류 수심
 Q_d : 토석류 유량 0.35t/m² 적용
 V : 토석류 흐름속도로서 3.0m/s 적용
 B : 토석류 폭으로 1.0m 적용

4. 부식 방지 처리를 한 강재의 내부식성 및 장기강도 평가

가. 개요

토석류(debris flow)는 집중호우 등에 의해 부유물 및 유사가 물과 함께 흘러가는 현상을 말하며 이에 대한 피해를 방지하기 위한 토석류 방지시설은 대부분 산지, 계곡 등에 설치된다. 본 연구에서 개발하는 Hypotential Net는 강재(강연선, 강재 프레임 등)로 이루어져 있으며, 대기 중의 수분, 산성비 및 자외선 등에 의해 설치 직후부터 부식이 발생하기 시작한다. 미약한 부식은 강재의 강도나 탄성거동에 미치는 영향이 미미하나, 부식 환경에 따라 수년 혹은 수십 년에 걸쳐 부식이 일어날 경우 토석류 발생에 대응하여 구조물의 정상적인 성능을 보장할 수 없으며, 강재 부식에 따른 녹 발생으로 미관적, 환경적 문제가 뒤따른다.

본 연구과제에서 실시한 강재 도금 방법에 따른 부식 속도 비교 실험 결과, 그림 4.1과 같이 강재에 아연도금을 실시하는 것이 강재 부식방지에 보다 효과적이라는 결론이 제시되었다. 그러나 이는 염수를 이용하여 짧은 시간동안 부식을 촉진시킨 후 결과를 분석한 것으로 본 연구에서는 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 도금 강재를 실제 사용환경과 유사한 환경에 노출시켜 강재의 부식 상태를 분석하였다. 또한 실제 도금처리를 하지 않은 강재와 도금처리를 한 강재에 대하여 각각 인장실험을 실시함으로써 강재의 장기 강도에 대해 분석하였다.

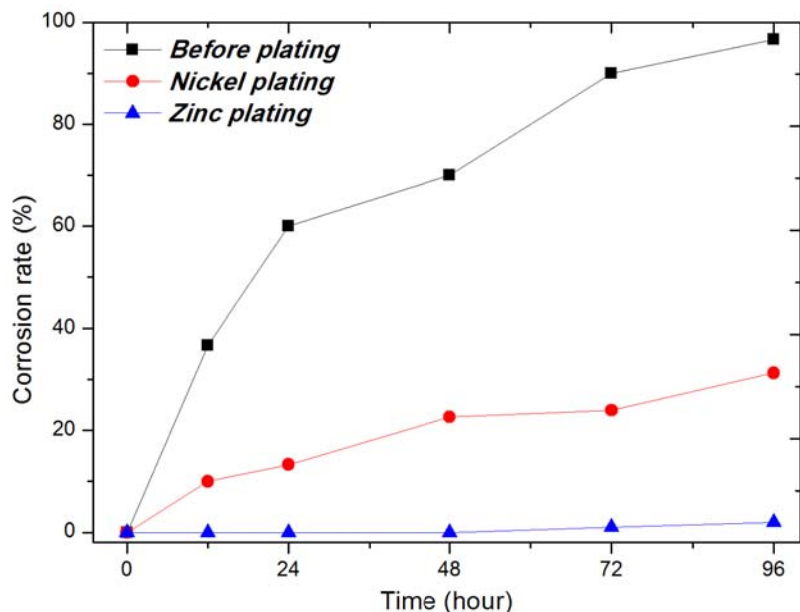
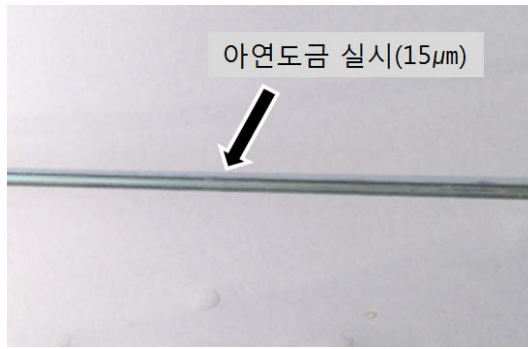


그림 4.1 경강선 시험편의 부식률 측정 결과(염수 부식 실험)

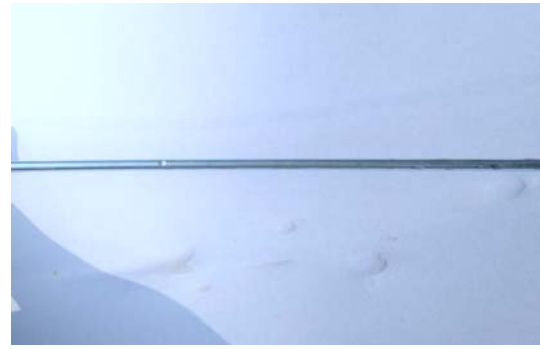
나. 실험 방법

(1) 실험 시료

본 연구에서는 도금한 강재와 도금하지 않은 강재의 실제 사용환경에서의 내부식성과 장기강도를 분석하기 위해 직경 3mm의 경강선을 사용하였으며, 길이는 0.25m로 각 시험편에 동일하게 적용하였다. 강연선은 그림 4.2에 나타난 바와 같이 내부식처리를 실시한 강재와 실시하지 않은 강재의 두 군으로 나뉘어 각각 실험을 실시하였으며 각 종류별로 경강선 시험편은 4개씩을 사용하여 시험의 정확성을 도모하였다. 강재 내부식 처리 방법은 이미 니켈 도금보다 아연 도금이 효과적이라는 결론을 제시한 바 있으므로 니켈 도금은 비교 군에서 제외하여, 아연 도금만을 실시하였으며, 도금 두께는 15 μ m로 하였다.



(a) 아연도금 경강선

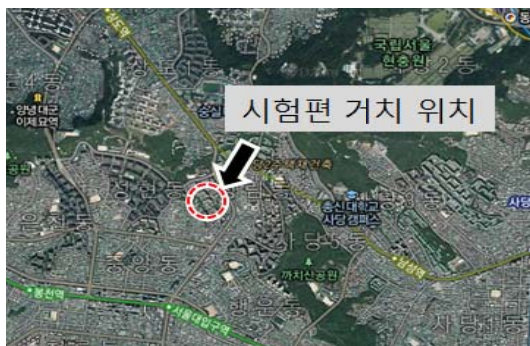


(b) 미(未)도금 경강선

그림 4.2 경강선 시험편

(2) 부식 환경 및 기간

토석류 방지시설이 설치되는 장소는 산속이나 기슭의 계곡부이며 이러한 장소에서 강재의 부식을 일으키는 가장 대표적인 원인은 공기중의 수분(상대습도)이며, 설치장소가 해안가인 경우는 염분 등에 의해 그 부식속도가 가속화 된다. 그 밖의 부식 원인으로는 자외선 및 산성비, 외기 온도 등이 있다. 본 연구에서는 시험 시료를 서울시 관악구 관악로 37길 56에 위치한 건물 옥상(5층)에 거치하여 집중 호우 및 자외선, 외기 온도 등 영향을 직접적으로 받도록 하였으며, 시험기간은 2017년 6월 20일 ~ 2017년 8월 22일 (10주)로, 관찰 주기는 주당 1회로 하여 시험편의 부식진행을 관찰, 분석하였다. 그림 2.27은 시험편 거치 위치 및 거치 모습을 나타낸 것이다.



(a) 시험편 거치 위치



(b) 거치 장소 전경

그림 4.3 시험편 거치 위치 및 거치 장소 전경

(3) 부식 판정 방법

본 연구에서는 KS D 9502에서 규정하는 면적법에 의한 판정 방법을 사용하였다. KS D 9502 면적법은 시험편의 유효면에서 적어도 5,000mm²의 면적을 선정하여 면적대비 부식이 일어난 비율을 측정하는 방법으로 식 (3)은 면적법을 사용한 부식면적률 산정식이다. 그러나 본 연구에서 사용한 시험편은 직경 3.0mm의 경강선이므로 5,000mm²의 면적을 선정하는 것은 거의 불가능하며, 경강선 주면으로 부식이 일어난 면적을 판정하는 정밀도도 낮다. 따라서 본 연구에서는 그림 4.4와 같이 시험편의 단위길이 대비 부식이 일어난 길이를 비율로 산정하여 부식률을 측정하였으며, 식 (4)는 본 연구에서 사용한 부식률 산정식이다. 이 때, 단위 길이는 시험편의 양 끝단을 포함하지 않은 가운데로 하여 15cm를 기준으로 측정하였으며, 부식 길이는 적색~황적색 녹이 육안으로 확인 되는 길이를 기준으로 하고, 도금 표면의 변형이나

변색은 무시하였다.

$$\text{부식면적률(\%)} = \frac{\text{부식면적}}{\text{전체면적}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{부식률(\%)} = \frac{\text{부식길이}}{\text{단위길이}} \times 100 \quad (4)$$

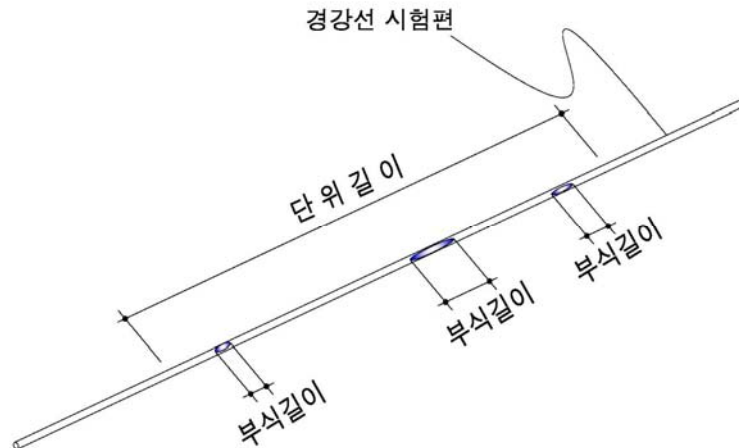


그림 4.4 경강선 시험편의 부식률 측정 방법

다. 실험 조건

강재의 부식을 유발하는 인자로는 강우(산성비) 및 온도, 햇빛에 의한 자외선 등이 있으며, 이 중에서 대표적인 것은 대기중의 습도 및 강수량이다. 기존 연구결과에 의하면 그림 4.5와 같이 대기중 습도가 60% 이상이 증가되면 수분의 응축(凝縮)에 의해 강재의 부식률이 급격히 증가하며, 대기온도 20 ~ 40℃의 범위에서 온도에 비례하여 부식률이 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Baek et al., 2004). 따라서 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 날씨정보시스템을 이용, 실험 기간동안의 일강수량, 상대습도, 대기온도 등을 분석하였다. 그림 4.6은 실험 수행기간 내의 기상청 자료를 분석하여 정리한 결과로 일강수량은 최대 144.5mm/day, 강우가 발생한 날은 총 34일, 상대습도는 최저 43.4% ~ 96.5% (평균 73.1%), 실험 기간 동안의 최고기온은 20.5 ~ 34.1℃ (평균 25.4℃)로 제시되었다.

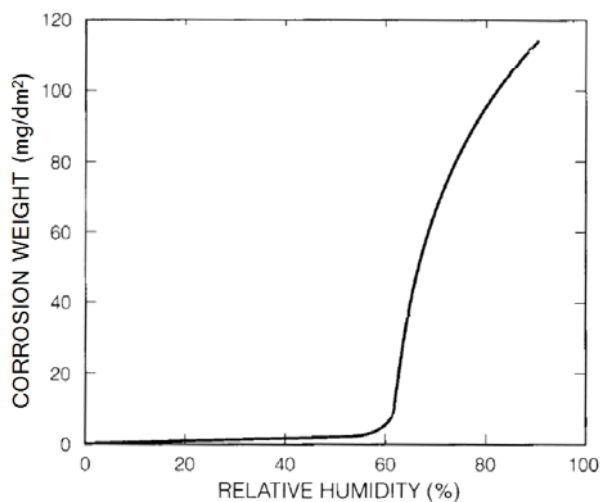


그림 4.5 상대 습도와 강재 부식과의 관계성(Baek et al., 2004)

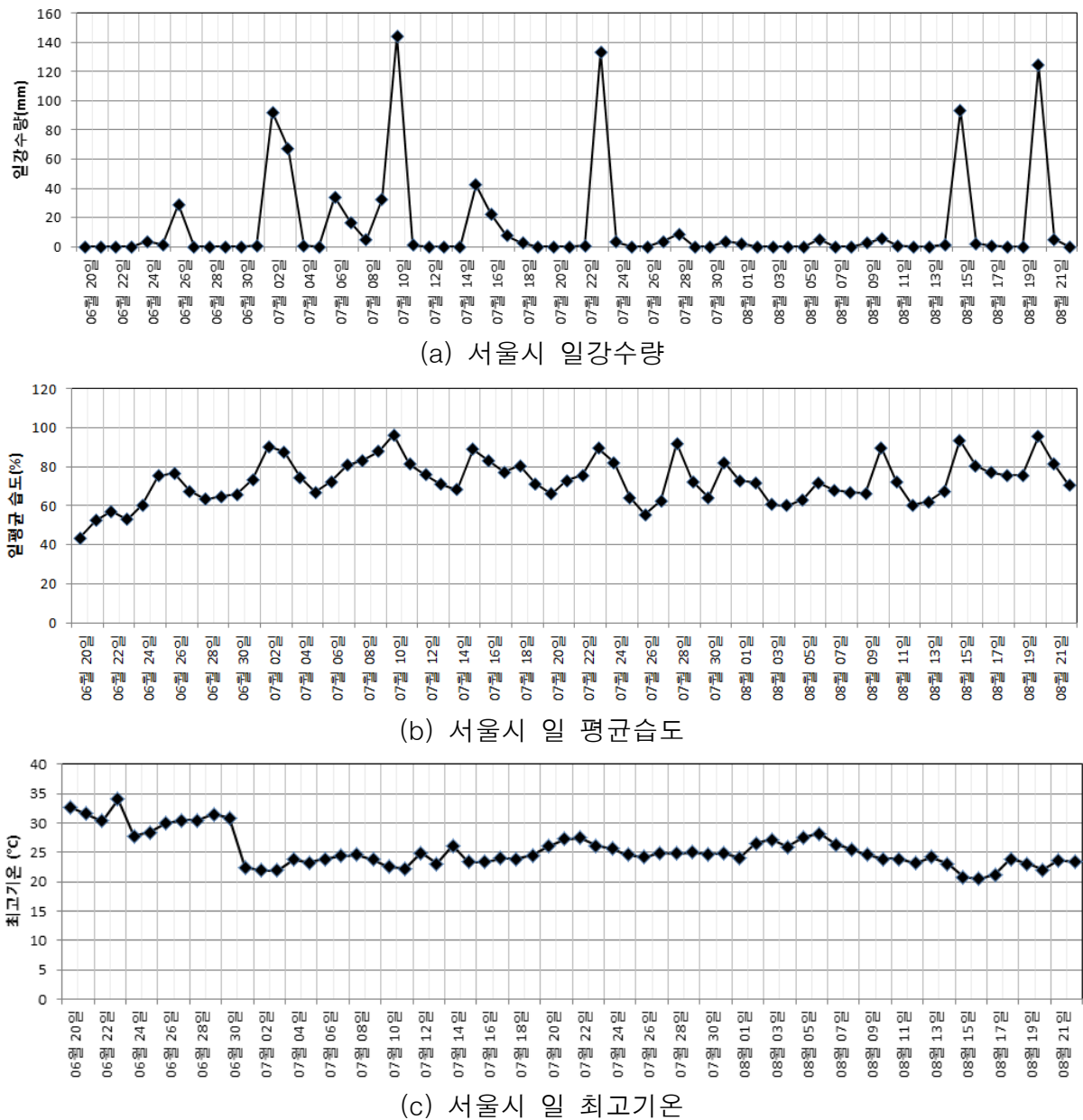


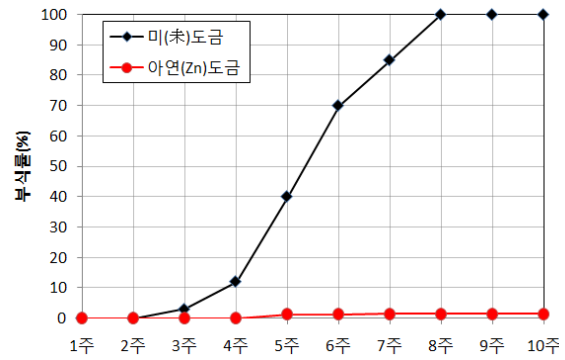
그림 4.6 서울시 기상 분석 결과

라. 실험 결과

그림 4.7은 위의 부식환경에 노출된 시험편의 부식률을 1주간격으로 측정한 결과로 미(未)도금 경강선의 경우 상대습도 및 집중호우의 영향으로 3주 후부터 급격하게 부식률이 증가, 시험 시작 8주만에 시험편 전체가 부식되는 결과가 제시된 반면, 아연도금 경강선의 부식률은 집중호우가 시작된 3주까지도 부식이 일어나지 않았으며, 실험이 종료된 10주 후에도 2% 미만의 부식률을 보였다.



(a) 실험 종료후 경강선 부식 상태



(b) 부식률 판정 결과

그림 4.7 경강선 부식실험 결과

본 연구에서는 실제 부식이 일어난 경강선의 성능을 평가하기 위해 인장강도 실험을 실시하여 각 경강선의 강도변화를 분석하였다. 표 4.1은 강연선 인장시험 결과를 나타낸 것으로 부식 실험전에 직경 3mm, 길이 0.25m 경강선 시료의 인장강도는 1604.5MPa로 제시되었다. 그러나 미도금 강재의 경우 부식 실험 후 시험편 전체에 부식이 발생하였으며 인장강도는 부식 발생 전 강도의 약 63% 수준인 1017.4MPa이 제시되었다. 반면 아연도금을 실시한 경강선의 경우 10주간의 대기환경 노출에도 부식률 2%미만으로 인장강도 실험결과는 1589.4MPa로 부식 실험 전 강도의 99% 이상의 강도를 유지하고 있는 것으로 제시되었다.

표 4.1 인장강도 실험 결과

구 분	인장강도 실험 결과 (MPa)		강도 감소 비율
	부식 실험 전	부식 실험 후	
미도금 경강선	1604.5	1017.4	0.63
아연도금 경강선		1589.4	0.99

본 연구에서 실시한 부식실험 결과 일반 강연선의 경우 대기중에서 8주만에 부식률이 100%에 달하고 인장강도 또한 본래 인장강도의 60% 수준으로 감소한 반면, 아연도금 처리를 한 경강선은 10주동안의 부식 환경 노출에도 부식률 2% 미만, 강도 감소 비율 1% 미만으로 제시되었다. 이는 구조물의 장기 강도와 직접적으로 관련이 있으며, 구조물이 제 기능을 발휘할 수 있는 한계하중을 인장강도의 60%로 가정시, 구조물 수명과도 직결된다.

Hypotential Net를 구성하는 링 직경 12.7mm, 인장강도 1,860 MPa를 기준으로 하였을 때 견딜수 있는 하중은 235.6 kN이다. 제시된 실험결과와 같이 완전부식(부식율 100%)이 일어날 경우, 부식에 의해 저하된 강도는 원 강도의 약 60%이므로 허용 저사 하중은 141.4 kN으로 감소하나, 아연도금을 실시할 경우 강도 감소율은 1% 미만이므로 계산상으로 233.2 kN의 저사하중을 확보할 수 있는 것으로 계산된다. 이 결과는 금속의 최소 도금두께인 15 μ m을 적용한 결과이며, 자중 등에 의한 크리프 하중, 기타 다른 부식인자에 의한 영향을 모두 고려할 경우 미도금 강재와 아연도금 강재의 장기강도 차이는 더 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 이에 따라 아연도금 강재를 사용 시, Hypotentail Net의 내부식성 및 수명, 허용 저사성능 등을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 실시간 무인계측을 위한 감응시스템 개발

가. 개요

토석류 재해로부터의 안전에 대한 국민의 요구가 증대되고 있는 오늘날 사방시설 안전관리 기술 개발의 필요성과 중요성은 더욱 높아지고 있다. 현재 국토해양부 및 도로공사에서는 사방시설에 대한 안전관리(정기점검, 수동계측 등)를 지속적으로 수행하고 있으나 인력중심의 안전관리 업무처리로 인해 긴급상황발생 시 신속한 대응이 저하될 수 있다. 또한 최근 토목공사 및 구조물 유지관리 부문에서도 IT기술의 발전으로 자동화 계측 시스템을 도입하고 있으나, 운영되고 있는 대부분의 시스템은 계측 현장에서 자동으로 데이터를 수집하고 로컬 컴퓨터에 저장만 하는 실정으로 계측데이터를 분석하고 시설물 안정성 평가하여 관리주체에 보고하는 업무는 인력에 의존하게 할 수 밖에 없다. 따라서 긴급하게 시설물 이상여부를 보고해야 하는 경우에는 상당한 지체시간이 발생되며, 자동화 계측시스템의 실시간 계측 및 정보발생능력을 적절하게 활용하지 못하게 된다.

따라서 본 연구에서는 감응센서를 기반으로하는 계측 시스템에서 토석류 발생에 따른 사방시설(Hypotential Net)의 상태 경보를 전파할 수 있는 전송 시스템을 개발하였다. 이에 토석류 발생시 즉각적인 위험 경보가 가능하며 인명 및 재산피해를 최소화 할 수 있는 실시간 무인계측 감응 시스템을 구축하였다.

나. 실시간 무인계측 감응시스템

본 시스템은 그림 5.1과 같이 실시간 무인계측을 위하여 저전력 계측용 메인 시스템을 기반으로 장시간 외부 전원없이 구동하기 위한 태양광 패널(Solar Panel)과 태양광 패널에서 생산된 전기를 저장하기 위한 배터리, 센서를 통해 계측된 데이터를 전송하기 위한 LTE MODEM, 이들 데이터를 수신하기 위한 FTP Server 등으로 구성되며, 그림 5.2는 각 구성 시스템 요소에 대한 실제 이미지, 표 5.1은 구성 요소 및 역할을 요약하여 나타낸 것이다.

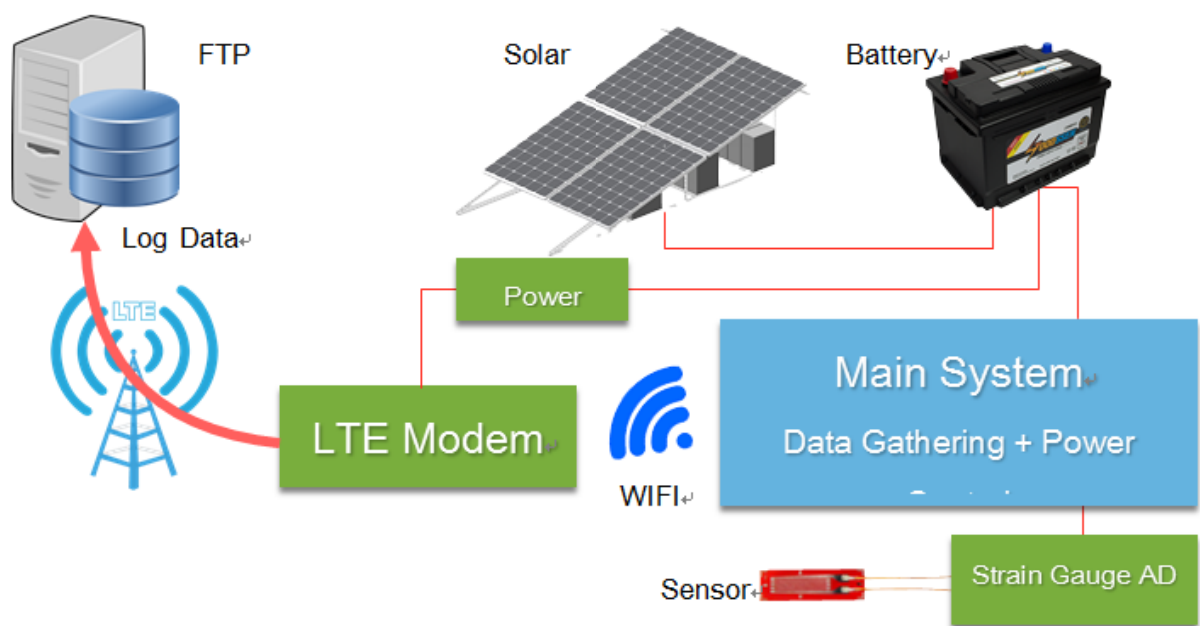


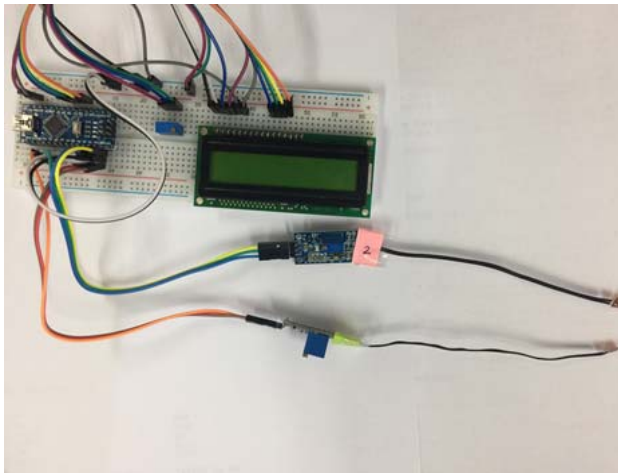
그림 5.1 실시간 무인계측 시스템 개요도



(a) FTP Server



(b) 메인시스템



(c) 센서 및 AD Converter



(d) 태양광 패널 및 배터리

그림 5.2 시스템 구성요소

표 5.1 실시간 무인계측 감응시스템 구성 요소 및 역할

항 목	내 용
1, Main System	데이터 수집, 전원제어, 로그 데이터 저장, LTE Modem을 이용하여 FTP 규약으로 데이터 전송
2. 센서, AD Converter	다채널 센서 데이터 수신, 데이터 변환, 센서 전원 공급, 토석류 충격 발생시 위험경보 등의 역할 수행
3. 태양광 패널	태양의 빛 에너지를 전기에너지로 전환하는 장치이며, 전력공급(충전)의 주에너지원 역할 수행
4. 배터리	태양광 패널에서 생산된 전기를 저장하는 장치이며, 사용 되는 모든 시스템에 필요전기를 공급하는 역할 수행
5. LTE Modem	Main System의 데이터를 LTE 통신망을 이용하여 서버로 전송하는 역할 수행
6. FTP Server	원격에서 FTP(File Transfer Protocol) 규약을 통해 수신된 데이터를 저장하는 서버 역할 수행

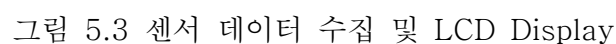
The schematic diagram illustrates the RPi00022 circuit, which is a microcontroller-based system. The main components and their connections are as follows:

- Power Input Section:** The circuit starts with a power input section (top left) featuring a 220V AC input, a fuse, and a bridge rectifier. The output is filtered by a 1000µF electrolytic capacitor and a 100k resistor, providing a 5V regulated supply to the microcontroller.
- Microcontroller Section:** The central component is the RPi00022 microcontroller, which is connected to various peripheral components. It includes a 10k pull-up resistor on its VCC pin and a 10k pull-down resistor on its GND pin. The microcontroller is also connected to a 10k resistor network for its address and data lines.
- Display Section:** The microcontroller is connected to a display section (bottom right) via a 10k resistor network. The display section includes a 10k resistor network and a 10k pull-up resistor on its VCC pin.
- Other Components:** The circuit includes several other components, such as a 10k resistor network for the microcontroller's address and data lines, a 10k pull-up resistor on the microcontroller's VCC pin, and a 10k pull-down resistor on its GND pin.

The title block at the bottom right of the diagram contains the following information:

Project Name	Ver.
RPi00022	Nikolay R. - November 24
Author	Ver. 0004.02
Rev.	0004.02
Drawn By	0004.02
Checked By	0004.02

토석류 발생시 충격력 데이터는 센서와 AD Converter를 통하여 획득된다. 센서에 토석류 충격력을 Threshold 임계값으로 지정하고, 이들 지정된 임계치 이상의 반응이 있는 경우 수집을 시작하여 약 30분간 저장하게 되며, 저장이 완료되면 LTE Modem을 통해 데이터를 지정된 FTP Server 로 전송하게 된다. 본 시스템에 사용된 센서는 토석류 발생시 측정 정밀도를 고려하여 전기식 부착형 스트레인게이지를 사용하였다. 이 외에도 그림 5.3과 같이 센서에 LCD Display를 설치하여 토석류 충격력 발생시 사용자가 값을 직접 읽을 수 있도록 장치를 구성하였다.



FTP Server는 무인계측 시스템에서 전송되는 데이터를 FTP 규약을 통해 수신받으며, 수신된 데이터는 별도의 파일 혹은 데이터 베이스로 저장하는 역할을 수행한다. 본 과제에서 획득된 데이터는 CSV 파일 형태로 저장되며, DDNS를 이용하여 공인 IP 주소를 간접적으로 할당받아 외부 네트워크에서도 접속할 수 있도록 설정하였다.

다. 토석류 축소모형실험에 따른 실시간 무인계측 감응시스템 적용

그림 5.4는 토석류 축소모형실험 현장에 적용된 실시간 무인계측 감응시스템을 나타낸 것이다. 본 시스템을 이용하여 토석류 축소모형실험을 수행하기 전 실험조건과 동일한 상태에서 토석류 충격력 사전테스트를 실시하였다. 비탈면 경사는 40° 기준으로 링네트와 하이포텐셜 네트의 중간구간(Middle Part)에 센서를 설치하여 실험을 수행하였으며 건조 상태, 포화 상태로 구분하여 사전테스트를 실시하였다.

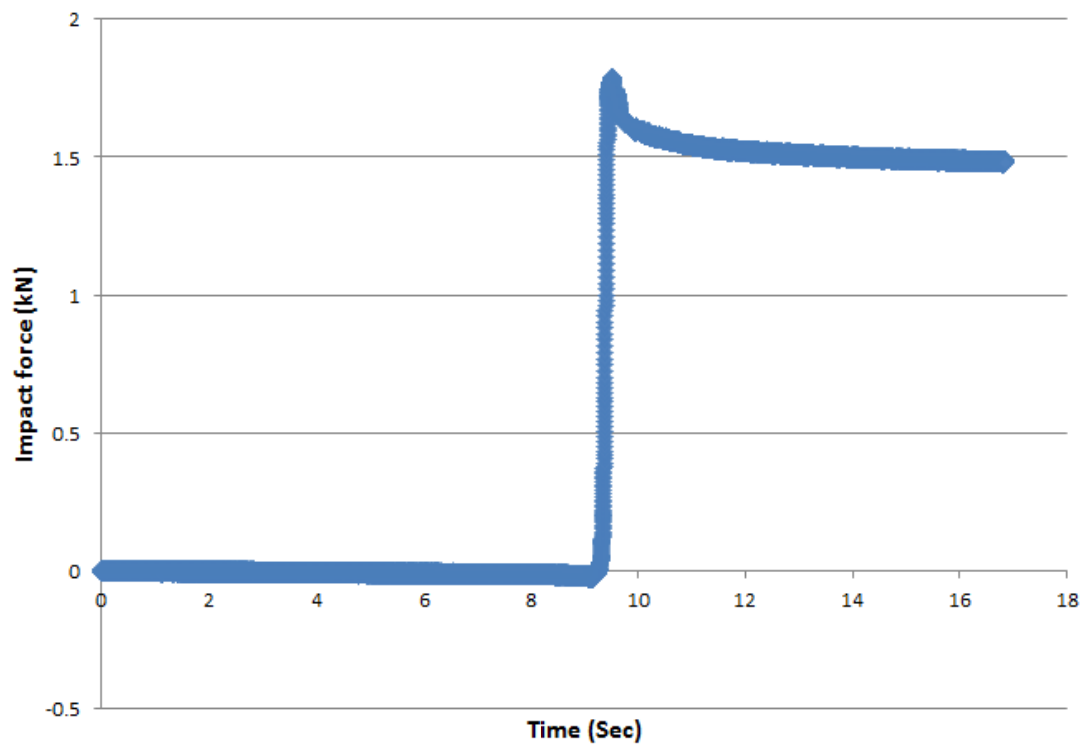


그림 5.4 토석류 축소모형실험 현장에 적용된 실시간 무인계측 감응시스템 전경

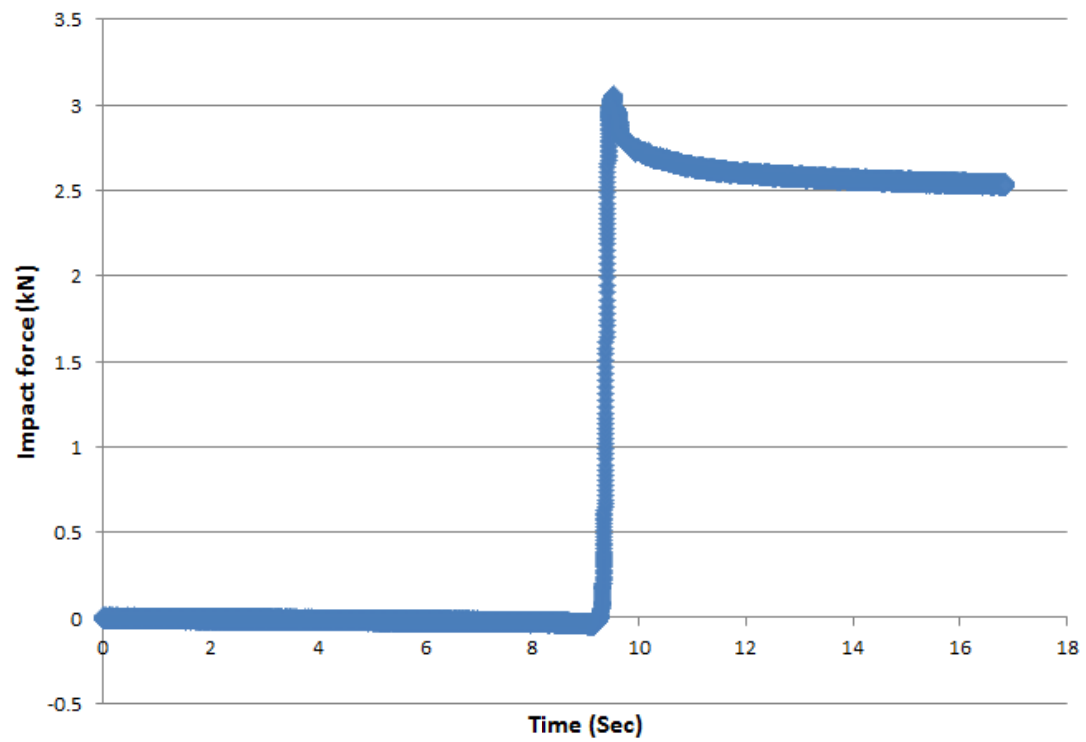
실험결과, 표 5.2, 그림 5.5~5.6과 같이 링네트 건조시료 40° , 링네트 포화 40° 의 경우 최대 충격력은 각각 1.79kN, 3.06kN으로 측정되었다. 하이포텐셜 네트 결과 역시 건조 40° , 포화 40° 에서 각각 1.25kN, 1.48kN으로 측정되었다. 본 시스템에서 획득된 토석류 충격력 결과는 '2장의 토석류 방지시설 충격하중 모형실험 결과'에서 획득된 수치와 비교시 유사한 것으로 검토되었다.

표 5.2 링네트 및 하이포텐셜 네트에 작용하는 충격하중 비교(kN)

구분	건조시료 (40°)	포화시료 (40°)
	중간 구간	중간 구간
링네트	1.79	3.06
하이포텐셜 네트	1.25	1.48

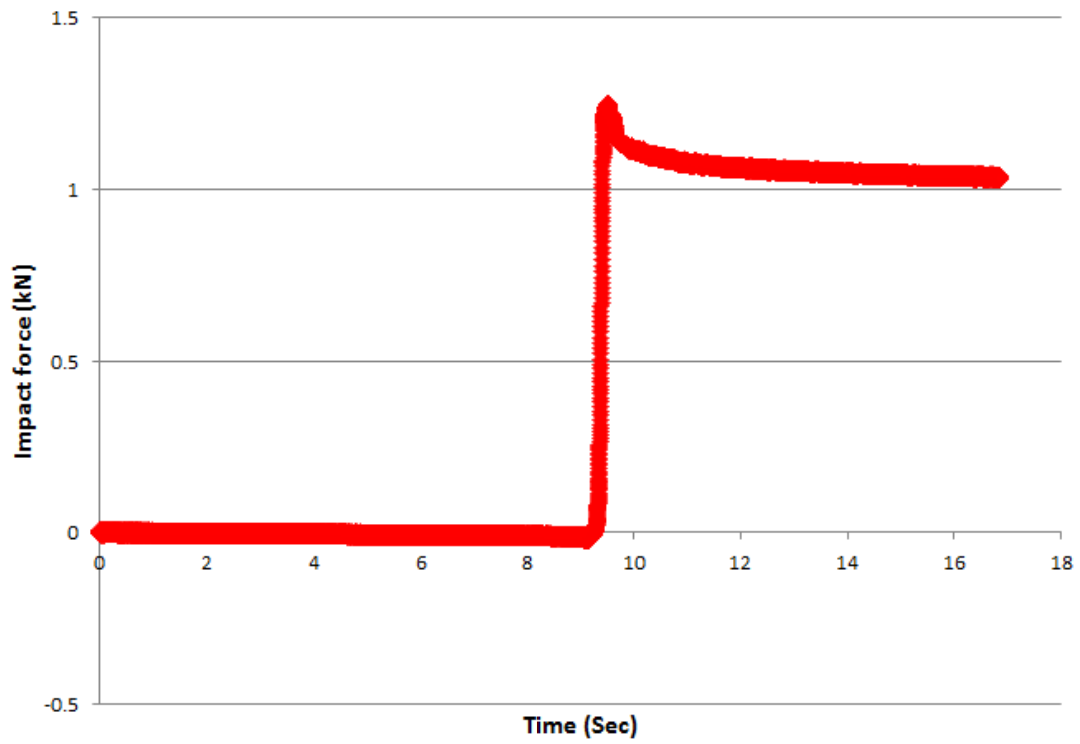


(a) 링네트 건조시료 (40°)

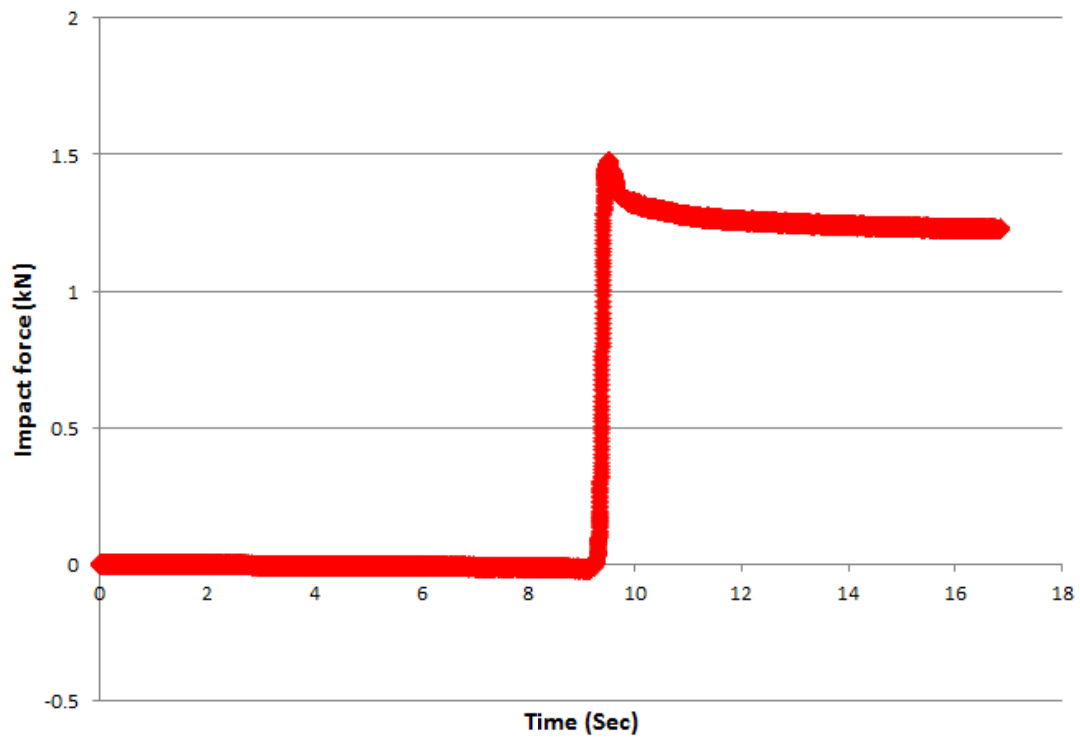


(b) 링네트 포화시료 (40°)

그림 5.5 링네트에 가해진 충격하중 결과 (흐름경사 40°)



(a) 하이포텐셜 넷 건시료(40°)



(b) 링넷 포화시료(40°)

그림 5.6 하이포텐셜 넷에 가해진 충격하중 결과 (흐름경사 40°)

라. 토석류 실험현장에서의 시스템 운용기간 분석 결과

표 5.3은 시스템 구성에 따른 최대 소비 전류를 나타낸 것으로 기존 2차년도에는 임베디드 컴퓨터의 경우 최대 소비 전류가 0.6A로 구성되었으나, 3차년도에 시스템 업그레이드(저전력 MCU 사용)를 통하여 0.4A로 효율을 개선하였다. 그러나 토석류 충격력 결과 획득을 위한 AD Converter 및 자료 전송을 위한 LTE Modem을 사용함에 따라 필요 소비전류는 총 1.1A가 사용되는 것으로 분석되었다. 이에 따라 배터리 용량 100A를 상시전원으로 사용하면 표 5.4와 같이 90.91시간, 약 3.79일 정도 사용이 가능하며, Sleep & Active 모드로 운용시간 하루 2시간으로 지정할 경우 최대 45일 이상 운용이 가능하도록 제작되었다.

본 시스템은 부족한 전력량을 보충하기 위하여 태양전지가 항상 운용될 수 있도록 제작되었으므로 이를 고려하여 시스템 운용을 고려할 경우, 태양전지는 1일 기준 89.6A의 충전이 진행되었으며 이에 따라 7일 ~ 86일 사용이 가능한 것으로 분석되었다(표 5.5 참조).

실시간 무인계측 감응시스템이 설치된 현장은 경기도 양주시 공장부지로써 일정한 일조량을 받을 수 있는 환경이었으며, 이를 토대로 실제 일조량을 측정해본 결과 평균 6시간 이상으로 측정되었다. 토석류 축소모형실험은 약 2주간 진행되었으며, 본 시스템의 효율을 확인하기 위하여 Sleep & Active 모드는 상시사용으로 셋팅 후 운용기간을 분석하였다. 그 결과, 약 11.2일 사용할 수 있었으며 이는 최대 소비전류를 기준으로 소비 전류 용량을 산정하여 이보다 적게 소비전류가 들어간 점, 일조량이 4시간 이상 확보됨에 따라 충전용량이 증가한 점 등에 따라 표 5.5에 검토된 상시사용시간보다 사용시간이 길어진 것으로 분석되었다.

실시간 무인계측 감응시스템은 유저 인터페이스 설정에 따라 자유롭게 사용시간 조절이 가능하며, 추후 압전소자 적용을 통한 웨이크 업 시스템으로 발전시켜 업그레이드된 시스템을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

표 5.3 시스템 구성에 따른 최대 소비 전류

사용 보드 및 부품	최대 소비 전류 [A]		비 고
	2차년도	3차년도	
임베디드 컴퓨터 (Raspberry Pi)	0.60	0.40	최대 소비 전류 기준
LTE Modem	—	0.50	최대 소비 전류 기준
AD Converter	—	0.10	최대 소비 전류 기준
Strain-gauge × 2ea	0.10	0.10	최대 소비 전류 기준
합 계	0.70	1.10	—

표 5.4 태양전지 미운용에 따른 시스템 운용 기간 분석

사용조건			100 [A] 기준		비 고
			2차년도	3차년도	
태양전지 미운용	상시사용	시간 (hour)	143.86	90.91	상시 사용할 경우
		날짜 (day)	5.99	3.79	
	하루 4시간	시간 (hour)	863.16	545.45	한 시간마다 12회 센서 체크할 경우
		날짜 (day)	35.97	22.72	
	하루 2시간	시간 (hour)	1726.32	1090.92	한 시간마다 6회 센서 체크할 경우
		날짜 (day)	71.93	45.45	

표 5.5 태양전지 운용에 따른 시스템 운용 기간 분석

사용조건			100 [A] 기준		비 고
			2차년도	3차년도	
태양전지 운용	상시사용	시간 (hour)	271.86	172.36	상시 사용할 경우
		날짜 (day)	11.32	7.18	
	하루 4시간	시간 (hour)	1631.16	1034.18	한 시간마다 12회 센서 체크할 경우
		날짜 (day)	67.97	43.09	
	하루 2시간	시간 (hour)	3262.32	2068.36	한 시간마다 6회 센서 체크할 경우
		날짜 (day)	135.93	86.18	

태양전지운용시 하루 평균 일조시간은 총 4시간으로 가정함(한국에너지공단 자료 참조).

6. 수명주기 비용 연구

가. 개요

시설물의 내용연수 동안 소요되는 유지관리비는 일반적으로 초기 건설공사비를 초과하고 있기 때문에 시설물을 계획하는 단계부터 유지관리비를 고려하면서 총 사업비를 결정하여야 한다. 이러한 고려를 하지 않고 법률에서 정하는 대로 안전 및 유지관리만 한다면 경제성 평가를 토대로 한 적절한 유지관리 투자가 시의 적절하게 이루어질 수 없는 것이다. 결국 시설물은 안전성이 감소하고 이용도가 저하하여 계획된 수명을 다하지 못하게 되어 대대적인 보강을 하거나 철거에 따른 총 비용이 증가하게 된다.

특히 우리나라의 경우 한정된 재원으로 부족한 사회기반시설을 신규로 건설하고, 기존 시설물에 대한 유지관리에도 예산을 투입해야 하는 점을 고려할 때, 유지관리의 적정 수준을 도출할 수 있는 평가수단을 마련하여야 할 것이다. 다시 말하면 시설물에 대한 유지관리가 적절하게 이루어져야 국민들의 부담을 최소화하면서 편익을 증진시킬 수 있다는 것이다.

시설물은 유지관리수준에 따라서 노후화의 진행속도가 달라질 수 있고 수명이 증대될 수 있기 때문에 시설물의 안전관리와 보강(rehabilitation) 또는 교체(replacement) 등 유지관리에 관한 의사결정을 할 수 있는 체계의 구축이 필요하다. 이러한 의사결정체계를 구축하는데 있어서 근간이 되는 것이 LCC분석모델의 정립이다.

시설물 수명주기(Life Cycle : LC) 분석이란 시설물 또는 설비시스템 등에 대하여, 경제적 수명 전반에 걸쳐 발생하는 제비용의 합 즉, 총비용을 비교하기 편리한 일정한 시점으로 등가환산한 가치로써, 경제성을 평가하는 방법이다. 초기공사비뿐만 아니라 유지관리비까지 고려하여 경제성을 평가하므로 실질적으로 경제적인 안을 선택할 수 있다. 요약하면 시설물의 LCC는 시설물의 수명주기 동안에 발생하는 모든 비용의 합을 지칭하는 의미로서 시설물의 생산에서 철거에 이르는 전 과정을 말한다.

나. 공법별 수명주기비용 산정 및 분석결과

본 연구에서는 비탈면 폭 20.0m, 설치구간 높이 4.0m로 가정하여 링네트와 Hypotential Net에 대한 수명주기비용을 분석하였다. 표 6.1, 표 6.2는 링네트 공법과 Hypotential Net에 대한 수명주기비용을 나타낸 것으로서 초기투자비, 유지관리비, 해체 및 폐기물 처분비 비교시 모든 항목에서 Hypotential Net 공법이 링네트 공법에 비해 경제성이 우수한 것으로 평가되었다. 이에 대한 세부 분석결과는 아래와 같다.

① 초기투자비

토석류 발생에 의하여 사방시설(링네트, Hypotential Net)에 동일한 충격력이 발생할 경우, Hypotential Net 공법이 대비 링네트 공법 대비 36% 감소하는 것으로 분석되므로 동일한 충격력에 저항하기 위해서는 링네트 공법은 다단식으로 설치되어야 한다. 따라서 링네트 공법의 초기투자비는 적용구간이 2개소로 산정되며 천공, 앵커설치, 네트 제작, 네트 설치, 감응시스템 설치 등을 고려하였을 때 약 9,600만원이 소요되는 것으로 분석되었다.

Hypotential Net의 경우, 네트 제작비는 하부네트 설치에 의하여 링네트 공법 대비 약 400만원 증가하였으나 단일 구간 설치로 네트 설치비, 감응시스템 설치비 등이 약 1,200만원 절감되는 것으로 분석되었다. 따라서 초기투자비 경제성 분석결과, Hypotential Net 공법은 링네트 공법 대비 약 27% 절감되는 것으로 분석되었다.

② 유지관리비

링네트 공법 및 Hypotential Net 공법은 주재료가 강재이므로 부식억제를 위하여 아연도금, 크롬도금 등의 특수도금이 사용되는 것으로 조사되었다. 본 연구의 부식 실험 결과에서도 아연도금을 수행할 경우 10주 동안 외기에 노출된 상태에서도 약 2% 미만의 부식률을 보임에 따라 링네트와 Hypotential Net은 토석류가 미발생할 경우 약 10년 이상 사용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 유지관리비는 무인계측 시스템 사용에 중점을 두었으며, 링네트 공법은 다단식, Hypotential Net 공법은 단일구간에 설치됨에 따라 표 6.1, 표 6.2에 나타난 바와 같이 Hypotential Net 공법이 링네트 공법 대비 약 50% 유지관리비가 절감되는 것으로 분석되었다.

③ 해체 및 폐기물 처분비

각 공법에서 사용되는 주재료는 모두 강재로서 링네트 공법의 경우 다단식으로 설치됨에 따라 폐기물 해체비, 폐기물 운반 및 처리비는 톤당 16,080원, 111,213원이 소요되는 반면, Hypotential Net 공법은 단일식으로 설치됨에 따라 폐기물 해체비, 폐기물 운반 및 처리비는 톤당 10,720원, 74,142원으로 산정되었다. 이에 따라 해체 및 폐기물 처분비의 경우, Hypotential Net 공법이 링네트 공법 대비 약 28% 절감되는 것으로 분석되었다.

표 6.1 링네트 공법 수명주기비용

공 종		규 격		단위	수량	적용 구간	구 분		비고
							단가(원)	금액(원)	
1)	초기 투자비	시공	천공	개소	6	2	154,000	1,848,000	
			앵커설치 (조립 및 삽입)	개소	6	2	2,130,000	25,560,000	PC 강선 (12.7×4ea)
			네트제작	개소	1	2	6,400,000	12,800,000	링직경 30cm
			네트설치	개소	1	2	7,800,000	15,600,000	
			감응시스템 설치	식	1	2	7,500,000	15,000,000	
subtotal							70,808,000		
2)	유지 관리비	무인 계측	무선랜 사용료	개월	36	2	30,000	2,160,000	
			배터리 교체비	회	9	2	1,200,000	21,600,000	연 3회
subtotal							23,760,000		
3)	해체 및 폐기물 처분비	구조물 해체		톤	12	—	16,080	192,960	
		폐기물 운반 및 처리		톤	12	—	111,213	1,334,556	
subtotal							1,527,516		
Total							96,095,516		

표 6.2 Hypotential Net 공법 수명주기비용

공 종		규 격		단위	수량	적용 구간	구 분		비고
							단가(원)	금액(원)	
1)	초기 투자비	시공	천공	개소	12	1	154,000	1,848,000	
			앵커설치 (조립 및 삽입)	개소	12	1	2,130,000	25,560,000	PC 강선 (12.7×4ea)
			네트제작	개소	2	1	8,400,000	16,800,000	전면:30cm 하부:45cm
			네트설치	개소	1	1	10,800,000	10,800,000	
			감응시스템 설치	식	1	1	7,500,000	7,500,000	
subtotal							62,508,000		
2)	유지 관리비	무인 계측	무선랜 사용료	개월	36	1	30,000	1,080,000	
			배터리 교체비	회	9	1	1,200,000	10,800,000	연 3회
subtotal							11,880,000		
3)	해체 및 폐기물 처분비	구조물 해체		톤	13	—	10,720	139,360	
		폐기물 운반 및 처리		톤	13	—	74,142	963,846	
subtotal							1,103,206		
Total							75,491,206		

7. 최종 성과물

본 연구에서는 토석류 방지시설을 축소한 모형실험, 수치해석결과를 토대로 Hypotential Net의 우수성에 대한 성능을 입증하였으며 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

기존 불투과형 사방댐 공법은 토석류 충격 전체를 구조체가 저항하므로 충격력이 가장 크게 전달되는 것으로 검토되었다. 반면에 링네트는 구조체를 구성하는 강재의 탄성늘음, 네트 전면으로의 입자 이동으로 동일한 토석류 조건하에서도 충격력은 36% 감소하며, Hypotential Net은 하부네트 추가에 따른 토석류 입자 속도감소, 하부로 입자 유실 등이 추가적으로 발생하여 사방댐 대비 46% 이상 감소하는 결과가 제시되었다.

모형실험결과에 따르면 동일한 조건(실험 위치, 시료 체적 등)에서 실험을 수행하였음에도 토석류 충격력은 사방댐 대비 Hypotential Net가 약 46% 이상 감소하는 것으로 나타났다. 토석류는 일회성이 아닌 다발성으로 발생하므로 Hypotential Net 설계당시 사방댐과 동일한 충격력이 가해진다고 가정, 설계를 하였을 경우 구조물 배면에 46% 감소한 충격력이 작용하면 Hypotential Net는 추가적으로 감소한 충격력만큼의 토석류에 대해 저항이 가능한 것을 의미한다. 토석류 충격력은 방지시설 배면에 가해지는 토석류 양과 직접적 상관관계가 있으며 2차년도 모형실험결과, 링네트 전면네트로의 입자 통과로 배면에 퇴적된 입자량은 사방댐 대비 18% 감소함에 따라 충격력 또한 18% 감소한 것을 고려할 때 Hypotential Net는 하부네트 설치로 토석류 허용저사량은 기존 사방댐 대비 30% 이상 향상된 것으로 판단된다.

아래 그림은 토석류 발생예상구간에 설치된 하이포텐셜 네트(실시간 무인계측 시스템 부착) 개념도로서 모형·수치해석 결과 제안된 공법은 허용저사량이 기존 사방댐, 링네트보다 60.39%, 36.97% 향상되었다. 본 공법 개발을 통하여 토석류 차단 설계기술을 확보하였으며, 도로 및 철도 등 사회인프라 안전 구축으로 인명 및 재산을 보호하고 토석류 방재 산업 육성의 기반을 마련하였다.

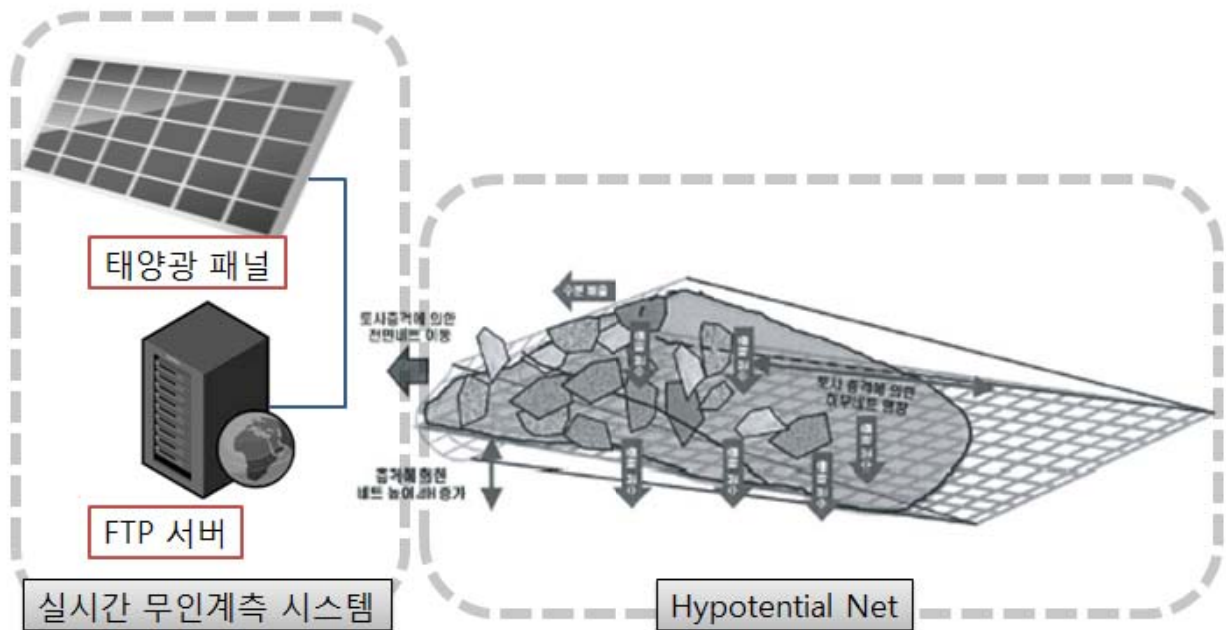
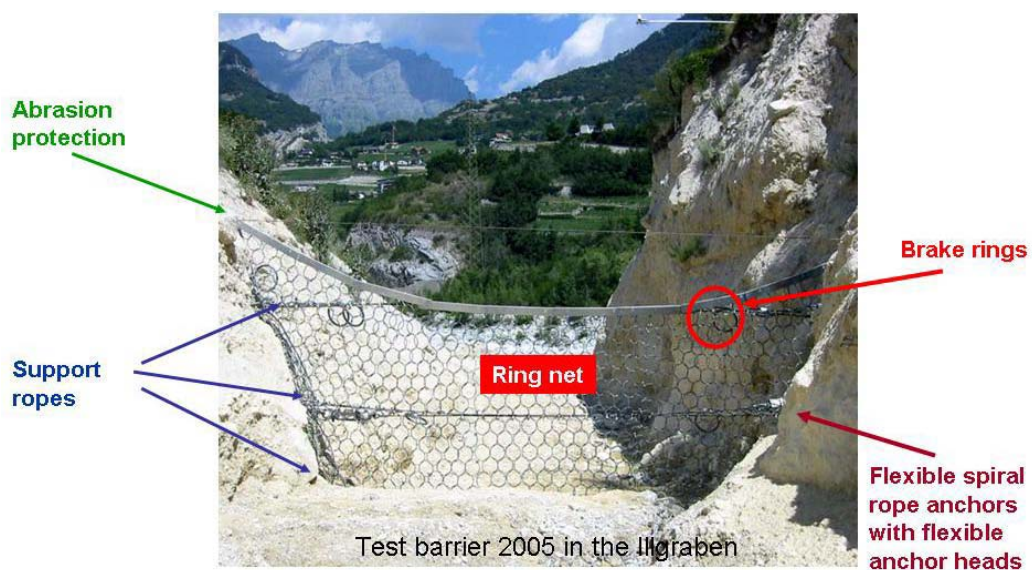


그림 6.1 토석류 발생예상구간에 설치된 Hypotential Net(실시간 무인계측 시스템 부착) 개념도

토석류는 지형적, 지질적 특성에 따라 입자구성성분, 크기가 각기 다르므로 Hypotential Net 및 하부네트 크기는 현장조건을 고려하여 설계되어야한다. 기존 문헌검토 결과 전면네트 크기는 토석류 최대크기의 90% 이내, 하부네트는 모형실험 결과, 전면네트의 1.5배를 사용하는 것이 가장 효과적인 것으로 확인되었다. 그러나 제시된 결과 또한 각각의 연구목적에 의해 제안된 결과로써 본 연구에서는 분체이론을 통한 수치해석을 통해 네트형상, 크기 등을 결정할 것을 제안한다(기존 충격력 제안식은 적용되는 인자 결정에 따라 실제 충격력과 상이한 결과를 제시할 수 있음).

이 외에도 Hypotential Net 연장이 길어질수록 탄성늘음량 또한 증가하므로 아래 그림과 같이 링네트와 같이 설치되는 구간의 지형적 특성, Hypotential Net의 설치 연장에 따라 지주를 설치하여 구조적 안정성을 확보하며 전면네트는 3m~6m 높이로 설치할 것을 제안한다. 기존 불투과형 사방댐은 기계화 시공이 필수이며 담수 또는 토석류 발생 시 저사가 필요한 구간에 설치되는 반면, Hypotential Net는 설치가 간편한 장점으로 토석류 발생 예상 인접구간에 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.



(a) VX type



(b) UX type

그림 6.2 지형적, 지질적 특성에 따른 유연성 링네트 타입 현황

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 1차년도

세부연구 목표	달성도 (%)	자 체 평 가
네트 충격에너지 흡수 메커니즘 분석	100	· 토석류 발생구간의 지반공학적 특성을 분석 - 토석류와 산사태의 정의 분석 - 2004~2013년까지의 토석류 및 산사태 피해현황 분석 - 토석류 발생구간에 대한 지형적 특성 분석 (사면경사, 이동거리, 발생 폭 등) · 토석류 메커니즘 분석 - 토석류 해석이론 : 연속체 역학모델, Lumped mass model - 거동 해석방법 : GIS를 이용한 취약성 분석법, 로지스틱 회귀분석법, 인공신경망, Shed 모형, 무한평면사면안정모델, 수치해석 등이 있음 · 토석류 발생구간의 지반공학적 특성 분석 및 토석류 메커니즘 분석을 완료함에 따라 목표달성도는 100%로 자체평가됨.
멀티네트 공법개발	100	· 토석류 실내실험을 위한 모형 토조를 개발함 (높이: 5.2m, 경사부 : 5.0m, 경사 : 0~45°) · 모형 네트 제작 (네트내경 : 5.0mm, 강선직경 : ϕ 2.9mm) · 멀티네트(Hypotential Net)를 개발 및 개념 정립, 실내실험 장비를 개발함에 따라 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.
무인전력공급 시스템 개발	100	· 감응시스템 충전기 개발에 있어 태양광 패널과 효율적인 배터리 관리 시스템을 구축하여 임베디드 시스템에 최대 30일 이상 전력공급이 가능하도록 시스템을 구성하였으므로, 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.

나. 2차년도

세부연구 목표	달성도 (%)	자 체 평 가
멀티네트 공법 개발	100	· 전면네트에 하부네트를 결합한 형태의 Hypotential Net를 개발하여 토석류 모형실험수행 · Hypotential Net의 전면네트에 작용하는 최대충격하중은 사방댐 대비 44%, 링네트 대비 16% 감소하는 것으로 분석됨 · 멀티네트 공법은 기존 사방시설 대비 허용저사량이 향상됨에 따라 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.
수명주기비용 연구 (Life Cycle Cost)	100	· Hypotential Net 공법과 사방댐 공법의 수명주기비용 비교 분석 (초기투자비, 유지관리비, 해체 및 폐기물 처분비) · Hypotential Net 공법의 수명주기비용은 사방댐 공법 대비 약 35% 수준으로 경제성이 우수한 것으로 분석됨에 따라 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.
네트 부식 억제 및 접합방식 개선	100	· 강제 부식시험기를 이용한 내부식성 비교 실험 - 아연도금을 실시한 강재의 수명은 도금을 실시하지 않은 강재에 비하여 60배 이상으로 부식환경에서 네트의 내부식성을 크게 향상시키는 것으로 분석됨. · ABAQUS 수치해석을 이용한 네트 형상 고려 - 네트 형상에 따른 성능 비교 분석 결과 원형 네트의 인장응력이 사각형 및 육각형 네트에 비하여 평균 30% 감소함 · 네트 부식 억제 및 접합방식 개선을 통하여 사용 강재의 내구성을 향상시킴에 따라 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.
무인 전력공급 시스템 개발	100	· 태양전지 미운용(일조량이 없는 악조건)과 태양전지 운용에 따른 전력공급 시스템 운용 기간 비교 - 태양전지 미운용시 최대 71일 사용이 가능하나 태양전지를 운용하면 최대 135일을 사용할 수 있으며 소비전력 효율은 약 90%가 증가하는 것으로 분석되었음. 이에 따라 1차년도 대비 배터리 효율을 향상시켰으므로 목표 달성도는 100%로 평가됨.
데이터 전송 시스템 개발	100	· 소프트웨어는 리눅스를 기반으로 구성된 프로그램이며 임베디드 컴퓨터, 센서, 데이터 로거를 연동시켜 이벤트 발생에 따른 데이터 송수신 확인 - 본 소프트웨어를 이용하여 실시간으로 데이터를 수집 및 보관할 수 있으며 토석류 발생시 결과값을 획득하여 분석이 가능하도록 시스템을 구성하였으므로 목표 달성도는 100%로 평가됨.

다. 3차년도

세부연구 목표	달성도 (%)	자 체 평 가
시공기법 개발	100	· 전면네트에 하부네트를 결합한 형태의 Hypotential Net를 개발, 특허 출원을 통해 멀티네트의 구성 및 연결상세, 시공 방법을 정립함에 따라 목표달성도는 100%로 자체평가됨.
실시간 무인계측을 위한 감응시스템 개발		· 전력공급 장치와 데이터 전송 시스템을 결합하여 실시간 무인계측을 위한 감응시스템을 개발함. · 본 시스템은 실시간 무인계측을 위하여 저전력 계측용 메인 시스템을 기반으로 장시간 외부 전원없이 구동하기 위한 태양광 패널(Solar Panel)과 태양광 패널에서 생산된 전기를 저장하기 위한 배터리, 센서를 통해 계측된 데이터를 전송하기 위한 LTE MODEM, 이들 데이터를 수신하기 위한 FTP Server 등으로 구성함에 따라 실시간으로 토석류 발생 데이터를 획득할 수 있는 시스템 개발을 완료함. · 태양전지 운용에 따른 시스템 운용기간 분석 결과 본 시스템은 효율적인 배터리 관리로 약 2~3개월 사용이 가능한 것으로 검토됨에 따라 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.
멀티네트 공법개발	100	· 물을 첨가한 토석류 시료를 이용한 모형 토조 실험 결과, 본 연구에서 개발한 멀티네트(Hypotential Net)에 작용하는 충격력은 동일한 조건에서의 사방댐 모형, 링네트 모형에 비해 각각 60.39%, 36.97% 저감된 것으로 나타나, 허용저사량은 최대 30% 이상 증가한 것으로 제시됨에 따라 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.
네트 부식방지 및 접합방지 개선	100	· 토석류 방호시설을 구성하는 재료인 강재에 아연도금을 실시하여 이를 부식 촉진기와 실제 부식환경(외기)에 노출시켜 부식 정도를 평가한 결과, 아연도금 강재의 부식률은 실험 종료시 2% 미만으로 일반 강재 또는 니켈 도금 강재에 비해 현저히 낮은 것으로 분석됨에 따라 목표 달성도는 100%로 자체평가됨.

2. 관련 분야 기여도

가. 토석류 방호 시설 기초 연구

토석류 방호 시설에 관련한 연구는 국내에서는 토석류 자체의 거동연구에 초점이 맞추어져 있으며, 방호 시설 자체의 구조적 성능에 관한 연구는 이루어지지 않음. 본 연구 보고서 및 연구결과를 활용하여 후속 연구의 기초를 마련할 수 있음

또한 본 연구에서 개발한 Hypotential Net는 기존 유연성 링네트 구조를 획기적으로 개선 및 보완한 구조로서, 모형 토조 실험을 통해 Net의 거동 특성, 충격력 발생량 등의 데이터를 축적하였음.

나. 무인 계측 시설 기초 연구

본 연구에서는 토석류 방호책인 Hypotential Net를 산지 등에 설치 시에 무인 전력 공급 시스템 및 데이터 전송 시스템을 적용할 수 있도록 하여, 인력이 없이도 토석류의 거동 유무, 발생 유무 등을 실시간으로 관리자에게 전달할 수 있는 기술을 개발함. 이를 통해 별도의 전력 공급원 없이도 태양광 패널과 자체 시스템을 이용하여 장시간 계측이 가능하도록 하였으며, 실제 모형토조 실험에도 적용하여 데이터를 축적함. 이는 후속 연구의 기초를 마련할 수 있음.

이는 토석류 발생을 조기에 탐지하여 발생 가능한 피해를 최소화할 수 있는 기술이며, 개선 보완할 경우, 다른 분야 (건설, 환경, 도로, 방위 산업 등)에도 응용이 가능하여 타 산업의 발전에도 기여가 가능함.

다. 국내외 최초 기술개발

본 연구에서 개발한 Hypotential Net는 국내 및 해외에서 널리 쓰이기 시작한 유연성 링네트에 하부네트를 추가로 부착하여 토석류 저사 성능을 극대화한 구조로서 이는 세계 최초의 발명에 해당하며, 본 장치를 이용한 실험 자료 획득으로 기술의 지속적인 개량, 보완이 가능함. 이를 통해 현장 적용성 확대, 실용화가 가능할 경우, 국내 적용은 물론, 해외 주요 방호 업체와 기술제휴 등을 통해 국가 경쟁력 확보에 이바지할 수 있을 것으로 판단됨.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. Hypotential Net

본 과제에서는 모형실험을 토대로 제안된 모델인 Hypotential Net에 대한 성능실험을 수행하였다. 향후 수치해석기법을 토대로 공법의 단점을 보완한 후 추가적인 현장실험을 수행하여 최종 제품을 개발할 계획이다. 개발된 공법은 논문, 보고서, 토석류 방지시설 전문업체(지오부르크 코리아, 동아특수건설)와의 기술제휴를 통해 시작품화할 계획이다.

2. 감응시스템

감응시스템은 Hypotential Net 공법 이 외에도 인력 계측이 어려운 구간에 설치할 계획이며 당사에서 주체적으로 수행하는 계측구간에 시범적으로 설치할 계획이다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 링네트 직경 결정방법

2015년 스위스에서 수행한 링네트의 그물 직경에 대한 실험 결과, 링네트의 방호 성능은 토석류를 구성하는 입자의 크기에 따라 달라지며, 일반적으로 토석류 입도 분석 결과 d_{90} 에 해당하는 크기로 링 직경을 구성할 경우 링네트가 최적의 방호성능을 발휘할 수 있다는 실험 결과를 도출하였다.

2. 토석류 방지시설에 가해지는 충격하중 경험식

VanDine(1996)의 연구결과에 의하면 토석류 방지시설에 작용하는 충격하중은 토석류의 흐름 속도, 흐름 깊이, 단위중량, 그 밖에 토석류 입자 구성 등에 의해 결정되는 토석류 충격계수에 의해 결정된다. 연구결과 방지시설에 가해지는 충격하중 경험식은 다음 식과 같다.

$$F = \alpha \cdot \frac{\gamma_d}{g} \cdot D_d \cdot V^2 \quad (1)$$

여기서, F : 단위폭당 토석류 충격력 (kN/m)
 γ_d : 토석류 단위중량으로 (kN/m³)
 V : 토석류 흐름속도 (m/s)
 g : 중력가속도 (m/s²)
 α : 토석류 충격력 계수 (1 ~ 3)
 D_d : 토석류 흐름 깊이 (m)

$$D_d = \frac{Q_d}{V \cdot B} \quad (2)$$

여기서, D_d : 토석류 수심
 Q_d : 토석류 유량 (t/m²)
 V : 토석류 흐름속도 (m/s)
 B : 토석류 폭 (m)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

본 과제의 보안등급은 ‘일반’으로 되어 있습니다.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전점검

가. 연구실 일상 점검

- 연구활동 시작 연구실 책임자가 육안으로 장비 및 시설을 매일 점검.

나. 연구실 정기 점검

- 내용 : 과학기술분야 연구실의 일반안전, 산업위생, 전기안전, 소방안전, 등의 전문분야 점검.
- 실시 : 매월 주기적으로 점검.

2. 교육 훈련

- (1) 개요 : 연구실의 안전을 확보하고 종사자의 건강을 보호하여 연구활동에 기여하고, 또한 연구실 안전환경조성에 관한 법률에 의거하여 연구실의 환경안전교육이 의무화됨에 따라 연구자 전원은 환경안전교육을 의무적으로 수강.
- (2) 교육대상 : 소속연구원 및 연구참여자
- (3) 교육실시
 - 상반기 : 법정 교육시간인 6시간을 온라인 및 집합교육으로 실시.
 - 하반기 : 법정 교육시간인 6시간을 온라인 교육으로 실시.

3. 건강 검진

- (1) 개요 : 연구활동 종사자의 건강을 보호함.
- (2) 건강검진 실시 : 매년 1회 건강검진 대상자를 선정하여 건강증진센터에 의뢰하여 건강검진 실시.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	축소모형시험을 이용한 토석류 방지시설 성능평가	(주)다산 이엔지	주관	방재학회지 /대한민국	-	2016.10.16	단독사사 (국토교통 과학기술진 흥원)	-
2	특허	토석류 피해방지용 멀티네트	(주)다산 이엔지	주관	특허청/ 대한민국	-	2017.06.08	단독사사 (국토교통 과학기술진 흥원)	특허번호 제 10- 1747284호
3	특허	토석류 피해저감을 위한 웨이크 업 무인계측 시스템 및 그 운용방법	(주)다산 이엔지	주관	특허청/ 대한민국	-	2017.06.29	단독사사 (국토교통 과학기술진 흥원)	특허번호 제 10- 1754202호
4	논문	모형축소실험을 이용한 토석류 방지시설 충격하중 평가	(주)다산 이엔지	주관	대한지질공 학회지/ 대한민국	-	2016.09.30	단독사사 (국토교통 과학기술진 흥원)	-

제11장. 기타 사항

없음

제12장. 참고 문헌

- Baek, Y., Choi, Y. C., Kwon, O. I., and Choi, S. I., 2010, Hazard prevention using multi-level debris flow barriers, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Korean Geo-Environmental Society, 11(8), 15-23 (in Korea).
- Cho, S. H., Yoo, B. S., Kim, J. H., and Lee, K. S., 2016, Performance assessment for debris mitigation structure by using scale model tests, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(6), 247-260 (in Korea).
- Choi, J. S., 2011, Model experiments on characteristics of debris flow behavior by artificial raining, MSc Thesis, Gangwon National University, 25-28 (in Korea)
- Fangqiang, W., Hongjuan, Y., Kaiheng, H., and Sergey, C., 2012, Measuring internal velocity of debris flows by temporally correlated shear forces, *Journal of Earth Science*, 23(3), 373-380.
- Ha, I. S., Seo, M. W., Park, D. S., and Park, D. H., 2006, Application of geotechnical centrifuge, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, 54(10), 24-35 (in Korea).
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., and Scheidl, C., 2009, Debris flow impact estimation eleventh international symposium on water management and hydraulic engineering, 137-148.
- Hübl, J., Nagl, G., and Suda, J., 2017, Standardized stress model for design of torrential barriers under impact by debris flow, *International Journal of Erosion Control Engineering*, 10(1), 50-54.
- Hwang, Y. C., 2008, Proposal on evaluation system of damage protection method from debris flow, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Korean Geo-Environmental Society, 9(4), 26-33 (in Korea).
- Jeon, K. J., Kim, G. H., and Yun, C. Y., 2013, Analysis of debris flow type in gangwon province by database construction, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, 33(1), 171-179 (in Korea).
- Kim, K. H., 2011, The spreading of debris flow in model test and effect of mitigation facilities, PHc Thesis, Sangji University, 62-69 (in Kora).
- Lee, C. J., and Yoo, N. J., 2009, A study on debris flow landslide disasters and restoration at inje of gangwon province, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, 9(1), 99-105 (in Korea).
- Lee, K. S., Yoo, B. S., and Cho, S. H., 2015, Debris flow scaled model test development for flexible ring net improvement, *Korean Society Civil Engineers 2015 Convention Civil Expo & Conference*, 15-16 (in Korea).
-

Lister, D. R., Morgan, G. C., VanDine, D. F., and Kerr, J. W. G., 1984, Debris torrents in howe sound, british columbia, proceedings, 4th international symposium on landslides, toronto, 649-654.

Lo, D., 2000, Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design, Geotechnical Engineering Office, 8-42.

Ma, H. S., and Jeong, W. O., 2010, Characteristics analysis of debris flow disaster in korean national parks, Journal of The Korean Society of Environmental Restoration Technology, The Korean Society of Environmental Restoration Technology, 13(4), 52-64 (in Korea).

MLR, 2006, Specification of geological investigation for debris flow stabilization, Natinal Land Resources Department, 32.

Moriguchi, S., Borja, R., Yashima, A., and Sawada, K., 2009, Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction, Acta Geotechnica, 4(1), 57-71.

Nasmith, H. W., 1972, Engineering geology of the southern cordillera of british columbia, 24th International Geological Congress, Montreal, Quebec, Excursion 8(8), 34.

NILIM, 2007, Manual of technical standard for designing sabo facilities against debris flow and driftwood, Technical note of NILIM, Natural Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 73.

Park, B. S., 2007, Conditions and improvement of slit erosion control dam, MSc Thesis, Gangwon National University, 11-17 (in Korea).

Park, D. G., Kim, T. H., and Oh, J. R., 2004, A study on the debris-flow and mitigation techniques, Research Report of National Institute for Disaster Prevention, National Institute for Disaster Prevention, 295-317 (in Korea).

Song, B. W., 2010, Countermeasures prefecture and design factor analysis of debris flow, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Korean Geo-Environmental Society, 11(1), 15-27 (in Korea).

Song, B. W., Yoon, H. S., and Kim, S. M., 2013, In-situ experiment method on evaluation of debris flow, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Korean Geo-Environmental Society, 14(7), 31-38 (in Korea).

SWCB, 2005, Soil and water conservation handbook, Soil and Water Conservation Bureau of the Council of Agriculture, Taiwan and Chinese Soil and Water Conservation Society, 692.

Terzaghi, K., 1950, Mechanisms of landslides, Application of geology to engineering practice, Geological Society of America, Berkley, 83-123.

VanDine, D. F., 1996, Debris flow control structures for forest engineering, Ministry of Forests, 10-62.

Wendeler, C., and Volkwein, A., 2015, Laboratory tests for the optimization of mesh size for flexible debris-flow barriers, Natural Hazards and Earth System Sciences, 15, 2597-2604.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.