고성능 낙석·토석 대책시설용 에너지 감쇄장치 개발 연구

Development of Energy-Dissipating Device for Rockfall and Debris-Flow Barriers

서상훈* · 최민형**

Seo, Sanghoon*, and Choi, MinHyong**

Abstract

In this study on the development of energy-dissipating devices, a significant component of the ring-net system was investigated for the localization of a high-performance rockfall fence and debris flow barriers. The energy-dissipating device was developed as a structure that dissipated the resistance and frictional forces generated by the pipe passing through two steel bars, and the tensile force was transmitted by utilizing the pipe deformation. The performance of the developed energy-dissipating device was verified through simulation analysis and tensile tests. It was confirmed that the most effective dissipating device was made of a D60.5-3.2t pipe subjected to a rolling interval of 40 mm, and the device exhibited an energy-dissipating performance of 52.8-60.2 kJ/m.

Key words : Rockfall Barrier, Debris Flow Barrier, Rockfall, Debris Flow, Energy Dissipating Device

요 지

본 연구에서는 100% 해외 기술이 적용되고 있는 고성능 낙석방지울타리 및 토석류 대책시설용 링형네트 시스템의 국산화를 위하여 링형네트 시스템의 주요 구성요소인 에너지 감쇄장치 개발연구를 수행하였다. 개발된 에너지 감쇄장치는 파이프가 2개의 강봉을 통과하며 발생하는 저항력과 마찰력, 파이프 변형을 활용하여 전달되는 인장력을 감쇄시키는 구조로 개발되었다. 개발된 에너지 감쇄장치는 시뮬레이션 분석과 실물인장시험을 통해 그 성능을 검증하였으며, 가장 효과적인 D60.5-3.2t 파이프와 롤링 간격 40 mm로 구성된 감쇄장치는 52.8~60.2 kJ/m의 감쇄성능을 갖는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 낙석방지울타리, 토석류 포획망, 낙석, 토석류, 감쇄장치

1. 서 론

낙석·토석 대책시설이란 낙석 및 토석류 발생을 예방하고 피해를 저감시키기 위하여 설치하는 시설물로 낙석방지망, 낙석방지울타리, 낙석방지옹벽, 피암터널, 토석류 대책시설 등으로 분류된다(KDS 11 70 20 낙석·토석 대책시설 설계기준; MOLIT, 2016a). 이중 낙석방지시설은 설계, 시공성 및 경제성으로 인하여 전체 위험비탈면에 대한 대책공법 중 70% 이상을 차지하고 있으며, 낙석방지울타리는 낙석방지시설의 20%를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다

(KICT, 1999).

낙석방지울타리가 폭넓게 활용되고 있음에도 불구하고 낙석방지울타리에 관한 성능기준과 설계 방법 등에 대하여 건설공사 비탈면 설계기준 및 표준시방서(MOLIT, 2016b), 도로안전시설 설치 및 관리지침(MLTM, 2008)에서 명기하고 있으나 방호성능 48, 61 kJ에 상응하는 낙석방지울타리에 국한되고 있기 때문에 그 이상의 방호성능을 갖는 고성능 낙석방지울타리에 관한 기준은 미흡한 실정이다.

특히, 고속도로 시설물 안전 및 유지관리 실태 감사결과 고속도로에 설치된 낙석방지울타리는 일반적으로 발생하는

*교신저자, 정회원, (주)대한지오이엔씨 기업부설연구소 차장(Tel: +82-31-713-5227, Fax: +82-31-713-6225, E-mail: mcrcux@naver.com)

Corresponding Author, Member, General Manager, Daehan Geo Engineering & Construction Corporation

**정회원, (주)대한지오이엔씨 기업부설연구소 상무이사

Member, Managing Director, Daehan Geo Engineering & Construction Corporation

고속도로의 낙석을 충분히 방호하지 못하므로 낙석방지울타리의 성능을 개선하여 설치하도록 권고 받은바 있으며, 국내에서 발생한 17개소의 낙석피해사례를 바탕으로 낙석 에너지를 검토한 결과 26~1,372 kJ 범위에서 평균 307 kJ로 분석됨에 따라 이를 바탕으로 국내에 적합한 낙석방지울타리를 50~1,500 kJ의 9등급으로 분류하는 것을 제안하기도 하였다(Kim et al., 2015). 이와 같은 국내 낙석방지울타리의 성능 부족으로 인하여 지속적인 피해사례가 발생하고 있으며(Fig. 1), 이에 대한 개선이 요구되고 있다.

Fig. 1. Cases of Rockfall

본 연구는 위와 같은 고성능 낙석방지울타리 개발 필요성에 따라 국내외적으로 고성능 낙석방지울타리 및 토석류 포획망에 가장 많이 활용되고 있는 링형네트 시스템(Fig. 2) 개발을 위한 사전연구로서 고성능 낙석방지울타리의 주요 요소 중 하나인 에너지 감쇄장치(Energy Dissipating Device)의 개발과 성능 검증을 위하여 수행되었다.

Fig. 2. Example of Ring-Net Installation

2. 고성능 낙석방지울타리용 감쇄장치의 정의 및 시험 방법

2.1 고성능 낙석방지울타리 시스템

고성능 낙석방지울타리와 관련하여 유럽과 미국의 경우

각각 ETAG 027 (EOTA, 2008), NCHRP 24-35 (AASHTO, 2015) 등의 관련 기준에 따라 방호성능 100~5,000 kJ에 해당되는 9가지 등급의 낙석방지울타리를 규정하고 있으며, 고성능 낙석방지울타리 시스템은 네트(NET), 케이블(Cable), 지지부(Foundation), 지주(Post), 에너지 감쇄장치(Energy Dissipating Device) 등으로 구성된다고 정의하고 있다(Fig. 3).

Fig. 3. Rockfall Barrier System - Side View (ETAG 027)

이 중 주요 구성요소 중 하나인 에너지 감쇄장치는 일반적으로 케이블과 지지부 사이에 설치되며, 다음과 같은 두 가지 역할을 수행함으로써 낙석방지울타리 시스템 성능을 결정하는데 큰 영향을 미친다.

2.1.1 지지부 작용하중 저감효과

에너지 감쇄장치는 낙석 포획 시 네트와 케이블에 의해 1차적으로 저감된 충격에너지를 지지부로 전달하는 과정에서 에너지 감쇄장치 자체의 변형을 통해 충격에너지를 감쇄시키며, 이를 통해 지지부를 효과적이고 경제적으로 설계할 수 있도록 한다.

2.1.2 낙석방지울타리 변형량 조정효과

와이어로프와 감쇄장치의 변위량은 낙석 포획 시 낙석방지울타리의 변위량에 영향을 미치는데 와이어로프와 감쇄장치의 허용 변위가 클수록 지지부로 전달되는 하중은 감소하게 된다. 그러나 케이블의 탄소성 변형은 상대적으로 크지 않기 때문에 고성능 낙석방지울타리 시스템의 변형량은 결국 감쇄장치의 변형량에 의해 결정된다.

이러한 에너지 감쇄장치는 Fig. 4와 같이 다양한 소재를 활용한 다양한 형태의 에너지 감쇄장치가 개발되어 활용되고 있다. 에너지 감쇄장치는 작용메커니즘에 따라 크게 하중 작용시 감쇄장치 자체의 변형과 변형량에 의해 에너지를 저감시키는 변형형(Figs. 4(a)~(b), (i))과 감쇄장치와 와이어로프 사이의 마찰로 억제시키는 마찰형(Figs. 4(c)~(e)), 변형형과 마찰형을 조합한 복합형(Figs. 4(f)~(h), (j)) 등으로 분류된다.

Fig. 4. Cases of Energy Dissipating Device in Rock Fall Barrier System

2.2 감쇄장치 시험기준 및 거동 양상

링형네트와 링형네트를 구성하는 요소소재들의 시험기준은 ETAG 027에서 상세히 규정하고 있으며, 링형네트를 구성하는 에너지 감쇄장치에 관한 시험방법에 대해서도 서술하고 있다.

에너지 감쇄장치의 시험은 시험시편의 고정과 시스템 안정화를 위해 약간의 장력을 가하였다가 시험 시작전 장력을 0으로 셋팅하도록 하고 있으며, 시편이 파단될 때까지 2 mm/s의 속도로 인장력을 재하하여 시험을 수행하도록 하고 있다. 이와 같은 방법에 따라 에너지 감쇄장치에 대한 시뮬레이션 및 실험성능시험을 수행한 사례의 예는 Fig. 5와 같다

Fig. 5. Development Example of Energy Dissipating Device

(Grassl et al., 2003; Castro-Fresno et al., 2009; Castanon-Jano et al., 2017; Olmedo et al., 2017; Xu et al., 2018).

위와 같은 에너지 감쇄장치에 대한 시험방법은 준정적시험(Quasi-Static Test)으로 불리며, 일반적인 시험 결과는 Fig. 6과 같은 양상을 띤다. 감쇄장치에 하중이 작용하면, Fig. 6의 A지점인 F_A 하중까지 하중-변위간 선형거동을 보이는 초기 탄성 구간(Initial Elastic Section)을 갖으며, 이후 감쇄장치의 특성에 따라 다양한 거동양상을 보이는데 이때 A지점은 감쇄장치 활성화점(Activation Point)으로 정의된다.

Fig. 6. Typical Load-Displacement Curve from a Quasi-Static Test

이후 F_A - F_B 구간은 감쇄장치가 기능을 발휘하는 구간으로 주요감쇄구간(Main Dissipation Mechanism Section)으로 정의되며, 감쇄장치의 특성에 따라 선형, 지그재그, 물결형, 복합형 등의 다양한 거동양상을 보인다. 감쇄구간이 끝나는 B지점인 F_B 하중은 감쇄장치 경화점(Stiffening Point)으로 정의되며, 이후의 구간은 케이블 거동 구간(Single Cable Behavior)으로 정의된다. 일반적으로 F_B 하중 이후에는 보조 케이블이나 추가거동 방지장치 등 감쇄장치의 특성에 따라 하중이 증가한 후 파괴되는 양상을 보인다(Castanon-Jano et al., 2017).

한편, 감쇄장치에 대한 준정적시험 후 도식화된 그래프에서 하중-변위 그래프의 면적(Fig. 6의 빗금영역)은 다음 Eq. (1)에 의하여 감쇄장치가 발휘한 감쇄에너지로 정의할 수 있다.

$$W = F \cdot S$$

여기서, W = 감쇄에너지(J)

F = 힘(N)

S = 이동거리 또는 변위(m)

3. 에너지 감쇄장치 개발

3.1 에너지 감쇄장치 구성

기존 개발된 에너지 감쇄장치 중 가장 최근에 개발된 감쇄장치의 경우(Figs. 4(h), (j)) 마찰과 변형 특징을 모두 갖는 복합형 형태를 띠고 있으며, 감쇄장치 몸체와 부재의 분리와 결합이 용이하도록 고려되는 등 유지관리 측면에서 진보된 형식을 띠고 있다. 특히 동일한 감쇄장치 몸체에 다양한 형태와 길이의 감쇄 부재를 체결함으로써 감쇄장치의 성능을 조절하기 매우 유리한 것이 특징이다.

본 연구에서는 최근 개발되고 있는 에너지 감쇄장치 개발 연구 및 사례를 바탕으로 유사한 개념의 감쇄장치를 구상하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다. 고안된 감쇄장치는 감쇄장치 몸체를 감쇄부재인 파이프가 통과하면서 발생하는 변형과 마찰에 의해 기능이 발휘되도록 고려하였으며, 추가적으로 와이어로프를 감쇄장치 몸체에 체결한 후 여유장을 두고

(1) 지지부에 연결함으로써 감쇄장치가 성능을 다하거나 파손될 경우 와이어로프가 힘을 발휘할 수 있도록 하는 등의 안전장치를 추가하였다.

3.2 감쇄 부재 선정 및 시험

에너지 감쇄장치의 감쇄부재인 파이프는 경제성 확보를 위하여 상용화된 파이프를 활용하는 것으로 결정하였으며, 에너지 감쇄장치가 낙석방지울타리 상하부의 메인 케이블에 연결되어 지지부에 결속되므로 감쇄부재인 파이프의 파괴강도가 메인 케이블용 와이어로프에 준하는 강도를 갖는 사양으로 고려하였다.

고성능 낙석방지울타리의 경우 일반적으로 Table 1과 같이 방호성능 등급에 따라 직경 D18~25 mm의 IWRC 6 × 36 와이어로프를 활용하고 있으므로 이를 고려하여 감쇄부재 시험용 파이프를 선정하였으며, 그 제원은 Table 2와 같다.

선정된 감쇄부재 시험용 파이프를 대상으로 파이프가 일정 간격으로 배치된 강봉을 통과하며 발생하는 거동양상을 확인하기 위하여 Fig. 8과 같은 파이프 롤링 시험을 수행하였다. 시험방법은 Fig. 8(a)와 같이 롤링 간격을 조절할 수 있는 외부지그와 파이프 시편을 고정시키는 내부지그로 구성된 파이프 롤링 시험 지그(Fig. 8(b))를 고안하여 Fig. 8(c)와

Fig. 7. Concept of Energy Dissipating Device

Table 1. Characteristic of Wire Rope (6 × 36 IWRC) for Rockfall Barrier

Division	D18	D20	D22	D25
Tensile Strength (kN)	214	265	332	414
Rockfall Barrier Class	~ 1,000 kJ class	~ 2,000 kJ class	2,000 ~ kJ class	

Table 2. Characteristic of Pipe for Energy Dissipating Device

Division	D60.5, 1.8t	D60.5, 3.2t	D60.5, 5.5t
Area (mm)	331.9	576.0	693.5
Tensile Strength (kN)	117.8	204.5	337.4

Fig. 8. Pipe Rolling Test

같이 압축 시험기에 거치한 후 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 감쇄부재인 파이프는 직경 60.5 mm, 5.5t의 배관용 탄소강관(KS D 3507)을 사용하였으며, 파이프 롤링 간격을 25, 30, 35, 40 mm로 조정하여 수행하였다.

본 시험은 핸드 유압기로 수행한 개략시험으로서 각 시험 조건이 상이하여 직접적인 비교는 힘들지만 롤링 간격이 작을수록 최대 롤링하중이 상승하였다(Table 3). 그러나 롤링간격 40, 35 mm 시험의 경우 시편의 탄성거동이 끝나고 소성변형이 시작되는 감쇄부재의 활성화점(Activation Point)인 F_A 하중이 확인되는 반면, 롤링간격 30, 25 mm 시험의 경우 감쇄부재의 활성화점이 명확히 구분되지 않은 특징을 보인다(Fig. 9).

Table 3. Result of Pipe Rolling Test

Division	Pipe Rolling Space (mm)			
	25	30	35	40
Max Load (kN)	95.6	85.8	76.2	48.6
F_A Load (kN)	-	-	57.2	36.5

Fig. 9. Load-Displacement Curve of Pipe Rolling Test Result

위와 같은 거동특성에 따라 감쇄장치용 파이프의 롤링간격은 40 또는 35 mm가 가장 적합할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 롤링간격 40 mm를 갖는 감쇄장치를 개발하였다.

3.3 에너지 감쇄장치 상세 설계 및 제작

에너지 감쇄장치 대한 구상 및 감쇄부재에 대한 시험 결과를 바탕으로 한 에너지 감쇄장치 상세 설계 및 시제품은 Figs. 10, 11과 같다. 감쇄장치 몸체 및 강봉은 일반 구조용 압연 강재(KS D 3503)에 적합한 SS275 강종을 사용하였으며, 감쇄 부재는 일반 구조용 탄소 강관(KS D 3566) 및 배관용 탄소강관(KS D 3507)에 적합한 외경 D60.5 mm의 자재를 사용하였다. 양단인 지지부 및 와이어로프 체결부는 가장 일반적으로 사용하는 미국 연방규격 RR-C-271D Type IVA, Grade A, Class 3에 적합한 샤클을 사용하였다.

Fig. 10. Detail Design of Energy Dissipating Device

Fig. 11. Prototype of Energy Dissipating Device

4. 에너지 감쇄장치 시뮬레이션 분석

4.1 에너지 감쇄장치 시뮬레이션 분석

현재 에너지 감쇄장치에 대한 실물성능 시험에 관한 연구 사례 및 제품개발 사례가 매우 부족하기 때문에 제품개발에 있어 많은 시행착오 및 반복 시험이 필요할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 설계된 감쇄장치에 대한 성능 확인을 위해 우선적으로 상용 유한요소해석 프로그램인 Explicit Dynamics를 활용하여 동적구조해석을 수행하였으며, 이를 실물성능시험과 비교하였다.

에너지 감쇄장치에 대한 시뮬레이션은 실제 낙석 발생시 에너지 감쇄장치의 거동 특성을 고려하여 전체 거동시간을 약 0.1 s 조건으로 수행하였으며, 적용한 입력물성치 및 모델링 결과는 다음 Table 4, Figs. 12~13과 같다.

Table 4. Characteristic of Energy Dissipating Device for Simulation

Yield Strength	Modulus of Elasticity	Poisson's Ratio
355 MPa	2E+05 MPa	0.3

Fig. 12. Modeling of Energy Dissipating Device for Simulation

Fig. 13. Result of Energy Dissipating Device Simulation

특히, 감쇄장치의 성능을 결정하는 감쇄부재인 파이프는 재료의 비선형적인 특성을 고려하기 위해 bilinear curve를 사용하였으며, 그 외 다른 부재들은 선형재료를 적용하여 수치해석을 수행하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

감쇄장치에 대한 시뮬레이션 결과는 Table 5, Fig. 14와 같다.

Table 5. Result of Energy Dissipating Device Simulation in Real Test Condition

Division	D60.5-1.8t	D60.5-3.2t	D60.5-5.5t
F_A Load (kN)	4.4	13.3	40.7
F_B Load (kN)	15.9	59.5	173.9
F_C Load (kN)	-	70.0	-
δ_A Dis. (mm)	18.0	24.3	23.6
δ_B Dis. (mm)	755.4	785.5	820.6
δ_C Dis. (mm)	-	816.4	-
E_{abc}/δ (kJ/m)	12.5	50.1	143.5

Fig. 14. Load-Displacement Graph of Energy Dissipating Device Test Result

4.2.1 D60.5-1.8t 재원의 파이프를 활용한 감쇄장치

F_A 하중 4.4 kN까지 초기 탄성구간을 갖으며, 감쇄장치 경화점인 F_B 하중 15.9 kN까지 감쇄장치가 기능을 발휘하는 주요감쇄구간을 갖는다. 예상되는 감쇄장치의 성능은 12.5 kJ/m로 분석되었다.

4.2.2 D60.5-3.2t 재원의 파이프를 활용한 감쇄장치

F_A 하중 13.3 kN까지 초기 탄성구간을 갖으며, 감쇄장치 경화점인 F_B 하중 59.5 kN까지 감쇄장치가 기능을 발휘하는 주요감쇄구간을 갖는다. 예상되는 감쇄장치의 성능은 50.1 kJ/m로 분석되었다.

4.2.3 D60.5-5.5t 재원의 파이프를 활용한 감쇄장치

F_A 하중 40.7 kN까지 초기 탄성구간을 갖으며, 감쇄장치 경화점인 F_B 하중 173.9 kN까지 감쇄장치가 기능을 발휘하는 주요감쇄구간을 갖는다. 예상되는 감쇄장치의 성능은 143.5 kJ/m로 분석되었다. 한편, F_B 하중은 감쇄부재인 파이프 롤링시험시 확인된 하중 365 kN 보다 높은 것으로 분석되었는데 이는 파이프 롤링시험시 파이프에 가해지는 하중 방향이 파이프의 축방향과 동일하였지만 감쇄장치에 가해지는 하중 방향은 감쇄장치 몸체와 파이프의 간섭으로 인하여 파이프의 축방향에서 15° 기울어져 발생하기 때문인 것으로

로 판단된다.

감쇄부재인 파이프 두께에 따른 3가지 형식의 감쇄장치에 대한 시뮬레이션 결과 D60.5-3.2t 제원의 파이프를 감쇄부재로 선정하여 제작한 감쇄장치가 가장 적합할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 D60.5-1.8t 파이프를 활용한 감쇄장치 실험시험 1회, D60.5-3.2t 파이프를 활용한 감쇄장치 실험시험 3회, D60.5-5.5t 파이프를 활용한 감쇄장치 실험시험 1회를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

5. 에너지 감쇄장치의 실물성능 실험

5.1 실험 방법

개발된 에너지 감쇄장치에 대한 실물성능시험은 국내에 에너지 감쇄장치에 관한 시험관련 기준이 마련되어 있지 않기 때문에 공인인증시험기관인 (주)한국건설시험원 부설 유니콘기술연구소와 그 방법을 조율하여 수행하였다(Fig. 15). 실물성능시험은 유럽 관련 기준인 ETAG 027에 준하여 수행하였으며, 시험시 계측데이터는 LVDT에 의한 변위와 Load Cell에 의한 하중을 측정하였다(Fig. 16).

Fig. 15. Experimental Device

(a) LVDT Installation (b) Load Cell Installation

Fig. 16. Installation Position of Sensors

5.2 실험 결과

감쇄장치에 대한 실물성능시험은 Fig. 17과 같이 D60.5-1.8t

1회, D60.5-3.2t 3회, D60.5-5.5t 1회, 총 5회를 수행하였으며, 그 결과는 Table 6, Figs. 18~19와 같다.

5.2.1 D60.5-1.8t 제원의 파이프를 활용한 감쇄장치

F_A 하중 4.2 kN까지 초기 탄성구간을 갖으며, 감쇄장치 경화점인 F_B 하중 12.1 kN까지 감쇄장치가 기능을 발휘하는 주요감쇄구간을 갖는다(Fig. 19(a)). 예상되는 감쇄장치의 성능은 12.2 kJ/m로 분석되었다.

5.2.2 D60.5-3.2t 제원의 파이프를 활용한 감쇄장치

F_A 하중 10.0~12.5 kN까지 초기 탄성구간을 갖으며, 감쇄장치 경화점인 F_B 하중 39.9~42.6 kN까지 감쇄장치가 기능을 발휘하는 주요감쇄구간을 갖는다(Figs. 19(b)~(d)). 예상되는 감쇄장치의 성능은 52.8~60.2 kJ/m로 분석되었다.

5.2.3 D60.5-5.5t 제원의 파이프를 활용한 감쇄장치

F_A 하중 67.2 kN까지 초기 탄성구간을 갖으며, 감쇄장치 경화점인 F_B 하중 166.2 kN까지 감쇄장치가 기능을 발휘하는 주요감쇄구간을 갖는다(Fig. 19(e)). 예상되는 감쇄장치의 성능은 171.9 kJ/m로 분석되었다.

감쇄장치에 대한 실험시험 결과 감쇄장치 활성화점인 F_A 하중은 시뮬레이션 결과 대비 유사하거나 높게 측정되었으며, D60.5-5.5t 제원의 파이프를 활용한 감쇄장치의 경우 시뮬레이션 보다 약 1.65배 높은 값으로 측정되었다(Fig. 20). 이와 같은 이유는 감쇄장치 몸체를 와이어로프에 체결할 때 Fig. 21(a)와 같이 감쇄장치 몸체에 3/4" 샤클을 2개 체결한 후 1" 샤클로 고정부(또는 와이어로프)에 연결하였는데 연결된 샤클이 감쇄 부재인 파이프에 밀착되면서 마찰을 발생시켜 감쇄 부재인 파이프의 롤링시 하중을 상승하게 한 것으로 판단된다(Fig. 21(b)).

감쇄장치 경화점인 F_B 하중까지인 F_A - F_B 구간의 경우 시뮬레이션에서 지속적으로 하중이 증가하는 것으로 분석되었으나 실제 실험성능시험 결과 하중이 증가 된 후 유지되거나 증가한 후 소폭 감소하는 특성을 보이며, 경화점인 F_B 하중 직전에 5~10 kN이 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 감쇄 부재인 파이프의 변형이 한계 이상으로 발생하는 것을 억제하기 위하여 스톱퍼 역할을 하는 볼트를 체결하기 위하여 파이프를 천공하였기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 22).

한편, 감쇄장치의 최대 하중인 F_C 하중의 경우 Stopper가 모델링이 되지 않은 시뮬레이션에서는 확인이 되지 않으나 Stopper를 설치한 실험시험에서는 확인된다. D60.5-1.8t 제원의 파이프를 활용한 감쇄장치의 경우 F_C 하중은 F_B 하중 대비 약 20 kN 증가되며, D60.5-3.2t 제원의 파이프를 활용한 감쇄장치의 경우 F_C 하중은 F_B 하중 대비 약 40 kN 증가되는 것을 확인하였다. 이는 Stopper로 활용되는 볼트의 강도뿐만 아니라 Stopper가 설치되는 파이프의 강도에 의해서도 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 17. Energy Dissipating Device Test Setting

Fig. 18. Result of Energy Dissipating Device Test

Fig. 19. Load-Displacement Curve of Energy Dissipating Device Test Result

Table 6. Result of Energy Dissipating Device Tensile Test

Division	D60.5-1.8t	D60.5-3.2t Test 1	D60.5-3.2t Test 2	D60.5-3.2t Test 3	D60.5-5.5t
F_A Load (kN)	4.2	11.8	10.0	12.5	67.2
F_B Load (kN)	12.1	42.0	39.9	42.6	166.2
F_C Load (kN)	30.2	82.7	83.4	85.8	-
δ_A Dis. (mm)	10.6	9.4	6.7	9.9	28.8
δ_B Dis. (mm)	811.4	765.0	753.6	759.1	905.4
δ_C Dis. (mm)	816.2	814.9	815.8	806.1	-
E_{abc}/δ (kJ/m)	12.2	60.2	54.3	52.8	171.9

Fig. 20. Load-Displacement Graph of Energy Dissipating Device Test Result **Fig. 21.** Effect by Coupling Shackle **Fig. 22.** Installation and Effect of Stopper

5.3 기존 기술과의 비교 분석

기존 개발된 감쇄장치에 대한 실험결과(Castanon- Jano

et al., 2017)와 본 연구를 통해 개발된 감쇄장치의 실험결과 비교 결과는 Table 7과 같다. 표와 같이 개발된 감쇄장치 중 기존 개발된 감쇄장치와 유사한 거동을 특성을 보이는 것은 D60.5-3.2t와 D60.5-5.5t 파이프를 감쇄부재로 사용하는 감쇄장치인 것으로 확인된다.

Table 7. Comparison with Existing Energy Dissipating Device

Division	MACCA -FERRI	GEO -BRUGG	VARI	GITECO	Developmnets		
					1.8t	3.2t	5.5t
F_A Load (kN)	38.0	75.7	27.0 -182.0	7.0 -60.0	4.2	10.0 -12.5	67.2
F_B Load (kN)	62.0	-	27.0 -182.0	20.0 -78.0	12.1	29.9 -42.6	166.2
F_C Load (kN)	95.0	260.0	-	140.0 -160.0	30.2	82.7 -85.8	-
δ_A Dis. (mm)	150.0	26.5	12.7 -38.0	53.0 -100.0	10.6	6.7 -9.9	28.8
δ_B Dis. (mm)	1010.0	-	381.0	180.0 -720.0	811.4	759.1 -765.0	905.4
δ_C Dis. (mm)	1035.0	920.0	-	790.0 -870.0	816.2	806.1 -815.8	-
E_{abc}/δ (kJ/m)	24.6	59.4	26.1 -75.8 -103.0	13.0 -53.5 -68.2	12.2	52.8 -60.2	171.9

특히 D60.5-3.2t 파이프를 감쇄부재로 활용한 감쇄장치의 경우 기존 개발된 감쇄장치의 거동특성과 가장 유사하며, 평균적인 감쇄효과를 발휘하는 것으로 확인되었다.

D60.5-5.5t 파이프를 감쇄부재로 활용한 감쇄장치의 경우 초기 거동(F_C , δ_A)은 기존 개발된 감쇄장치와 유사한 거동을 보이지만, 감쇄장치 경화점 하중 F_B 가 상대적으로 매우 크기 때문에 전체적인 감쇄효과는 매우 클 것으로 판단된다. 그러나 D60.5-1.8t, D60.5-3.2t 파이프를 활용한 감쇄장치의 거동양상과 다소 상이하므로 추가적인 시험과 검토가 필요 할 것으로 판단된다.

한편, D60.5-1.8t 파이프를 감쇄부재로 활용한 감쇄장치

의 경우 거동특성이 기존 개발된 감쇄장치에 비해 매우 낮은 것으로 확인되며, 이에 따라 고성능 낙석방지울타리에 대한 감쇄장치로의 사용은 어려울 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 국내외에서 고성능 낙석방지울타리 및 토석류 대책시설로 활용되고 있는 링형네트 시스템에 대한 국산화를 위하여 링형네트 시스템의 주요 구성 요소인 에너지 감쇄장치를 개발하여 시뮬레이션과 실물성능시험을 통해 그 성능을 검증하였다.

개발된 감쇄장치는 감쇄부재인 파이프가 2개의 강봉을 통과하며 발생하는 저항력과 마찰력, 파이프 변형을 통해 전달되는 인장력을 감쇄시키는 구조로 개발되었다. 이와 같은 구조는 주요 감쇄부재인 파이프의 연장과 제원을 조정하거나 강봉의 간격을 조정하여 감쇄장치의 성능을 조절하기 용이한 특징을 갖는다.

본 연구를 통해 외경 60.5 mm의 파이프를 감쇄부재로 활용할 경우 2개 강봉의 롤링 간격은 40 mm가 가장 적당한 것으로 확인되었으며, 이를 바탕으로 파이프의 두께에 따라 1.8t, 3.2t, 5.5t 3가지 형식의 감쇄장치를 제작하여 시뮬레이션과 실물성능시험을 수행하였다.

개발된 감쇄장치에 대한 시뮬레이션 결과 감쇄부재인 파이프의 두께에 따라 1.8t, 3.2t, 5.5t 각각 12.5, 50.1, 143.5 kJ/m의 감쇄성능을 발휘할 것으로 분석되었으나 실물성능 시험 결과 12.2, 52.8~60.2, 171.9 kJ/m의 감쇄성능을 발휘하는 것으로 확인되었다. 실물성능시험 결과가 높게 측정된 것은 감쇄부재인 파이프가 감쇄장치 몸체에 체결된 샤클과의 간섭으로 인하여 보다 마찰력이 크게 작용하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 감쇄장치 몸체에 체결된 샤클은 감쇄부재인 파이프가 압착되는 과정에서 파이프를 중앙에 위치하도록 가이드 하는 역할을 수행하기 때문에 추가적인 형상 변경은 수행하지 않고 최종 시제품으로 결정하였다.

기존 개발된 감쇄장치에 대한 실물시험사례와 비교하여 본 연구를 통해 개발된 감쇄장치중 가장 효용성이 높은 형식은 D60.5-3.2t의 파이프를 감쇄부재로 하는 52.8~60.2 kJ/m의 감쇄성능을 갖는 감쇄장치인 것으로 확인되었으며, 이를 활용하여 고성능 낙석방지울타리 및 토석류 대책시설 국산화를 위한 링형네트 개발에 활용할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 2019년 국토교통기술촉진연구사업 창의도전연구분야의 연구비지원(20CTAP-C152052-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2015). *Guidelines for certification and management of flexible rockfall protection systems*. NCHRP 24-35.
- Castanon-Jano, L., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D., and Ballester-Muñoz, F. (2017). *Energy dissipating devices in falling rock protection barriers*. *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 50, No. 3, pp. 603-619.
- Castro-Fresno, D., del Coz Díaz, J.J., Garcia Nieto, P.J., and Norambuena Contreras, J. (2009). *Comparative analysis of mechanical tensile tests and the explicit simulation of a brake energy dissipater by FEM*. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, Vol. 10, No. 8, pp. 1059-1085.
- European Organization for Technical Approvals (EOTA). (2008). *Guideline for European technical approval of falling rock protection kits*. ETAG 027.
- Grassl, H., Bartelt, P., Volkwein, A., and Wartmann, S. (2003). Experimental and numerical modeling of highly flexible rockfall protection barriers. *Proceedings of 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Cambridge, Massachusetts, USA, pp. 2589-2594.
- Olmedo, I., Robit, P., Bertrand, D., Galandrin, C., Coulibaly, J., and Chanut, M.-A. (2017). Extended experimental studies on rockfall flexible fences. *Proceedings of 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*, Barcelona, Spain, pp. 181-184.
- Kim, K.D., Ko, M.G., Kim, D.S., and Moon, B.G. (2015). Performance assessment for rockfall protection systems I: Performance assessment criteria. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 1, pp. 63-76.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT). (1999). *Development and operation of road cut-slope management system (II)*. Ministry of Construction & Transportation.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2008). *Installation and management guidelines of road safety facilities-rockfall fence*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016a). *Design standard for falling rock and debris flow countermeasure facilities (KDS 11 70 20)*. Korean Design Standard, Korea Construction Standards Center (KCSC).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT).

(2016b). *Design standard of slope*.

Xu, H., Gentilini, C., Yu, Z., Qi, X., and Zhao, S. (2018). *An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers*. *Engineering Structures*, Vol. 173, pp. 831-852.

<i>Received</i>	September 24, 2020
<i>Revised</i>	September 28, 2020
<i>Accepted</i>	October 5, 2020