

사장교 케이블 댐퍼의 동적 거동 비교

Comparison of Dynamic Behaviour of Cable Damper

안상섭† · 이상훈* · 박찬민**

Ahn, Sang-Sup, Lee, Sang-Hoon and Park, Chan-Min

1. 서 론

사장교 케이블은 진동에 취약하여 중장경간 사장교의 경우 대부분 케이블에 진동제어 목적으로 댐퍼를 설치한다. 현재 사용되는 댐퍼는 여러 종류가 있으며 적용실적도 다양하다. 이러한 댐퍼의 거동비교 연구(Sun 등, 2005)가 실규모 케이블에 대해 실시되었지만 각각의 댐퍼에 대한 장단점 분석 및 설계시 도움이 될 수 있는 효율에 대한 비교 연구는 없었다.

본 연구에서는 현재 사장교 케이블의 진동 제어 목적으로 사용되는 대표적인 댐퍼들을 실 규모 케이블 실험체에 설치하여 진동 실험을 실시하였다. 이러한 실험으로 케이블 댐퍼 형식에 따른 적용 범위를 결정할 수 있으며 구동특성 분석에 의해 댐퍼의 장단점을 파악할 수 있다. 또한 댐퍼의 기계적 특성 이외에 선형 및 비선형 댐퍼의 설계 방법 연구 및 효율 분석 등에 이용할 수 있다.

2. 실험 개요

사장교 케이블-댐퍼 시스템 실험체의 전체적인 모습이 그림 1에 나타나 있다. 케이블 앵커 구조물은 케이블에 소정의 장력을 도입하기 위한 구조물로 본 연구에서는 철근 콘크리트 구조물로 제작하였다. 케이블 앵커블록 사이에 벽체를 시공하여 케이블 장력을 지지하고 실험시 바람의 영향을 최소화한다. 사용된 케이블은 37개의 7연선으로 이루어져 있으며 MS 형식이다. 케이블은 수평으로 설치되며 어느 정도 비선형 효과를 발휘하도록 케이블 장력을 결정하였다.

표 1. 케이블 제원

| $A(m^2)$ | $w(kN/m)$ | $T(kN)$ | $L(m)$ | λ^2 | $f_1(Hz)$ |
|----------|-----------|---------|--------|-------------|-----------|
| 0.00555 | 0.4283 | 1470 | 100 | 0.017 | 0.92 |

† 안상섭; 한국도로공사 인천대교 건설사업단
E-mail : ahnss@ex.co.kr
Tel : (032) 850-4281, Fax : (032) 850-4269

* GS 건설 기술연구소

** 한국도로공사 도로교통연구원

케이블의 제원은 표 1에 나타나 있다.

케이블의 기본 장력은 1470kN이지만 옥외에 설치되고 케이블 색상이 검은 색인 관계로 대기의 온도 및 태양광의 영향을 많이 받을 것으로 예상된다. 따라서 본 실험에서는 정기적으로 새그를 측정하여 케이블 장력을 관리하며 관리값을 근거로 케이블의 진동수로부터 장력을 추정하여 댐퍼의 실험결과 분석시 고려하였다.

댐퍼의 성능을 좀 더 자세히 평가하기 위해서는 Bare cable의 감쇠비가 필요하다. Bare cable의 1차 모드에 대한 동적 특성치는 실험결과 케이블의 감쇠비는 변위뿐만 아니라 장력에 따라서도 달라진다. 하지만 모드에 대해서는 크게 변화가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 실험으로부터 다음과 같은 케이블 감쇠비 식을 산출하여 케이블 자체 감쇠를 계산하였다.

$$\xi_{bare}(\%) = (5.158 \times 10^{-4} T - 0.4539) \nu - 9 \times 10^{-5} T + 0.1534 \quad (1)$$

여기서 $T(kN)$ 는 케이블 장력, $\nu(m)$ 는 케이블의 중앙점 변위이다.

본 실험의 계측장치 배치는 그림 2에 나타나 있다. 케이블은 인력가진하였으며 가진 변위는 기본적으로 1차 모드에 대해서는 최대 200mm, 2차 모드에 대해서는 최대 100mm를 계획하였다.



그림 1. 케이블-댐퍼 시스템 실험체

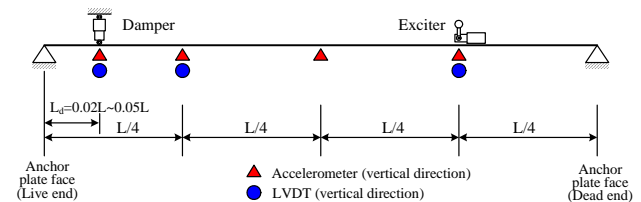


그림 2. 계측기 배치도

고감쇠고무댐퍼(HDR)는 고감쇠 고무를 감쇠물질로 사용하며 고무의 전단변형을 통해 에너지를 소산하도록 고안된 것이다. 오일+가스댐퍼(OGD)는 같은 용량의 피스톤을 3개 배치한 형태이다. IHD는 케이블 둘레로 설치된 Bladder 내부의 오일이 유동하면서 발생하는 마찰 점성을 이용하여 에너지를 흡수하는 구조이다. 최적의 감쇠 성능은 케이블 제원에 따라 오일의 점성을 조절하므로써 얻는다. IRD는 3개의 Hydraulic dashpot이 서로 120도 각을 이루며 케이블 둘레로 배치되는 형태의 댐퍼이다. 케이블의 움직이는 방향에 상관없이 피스톤은 항상 축력을 받게 되므로 방향성이 없는 댐퍼이다. FRD는 케이블에 고정된 마찰판이 외부 지지대에 고정된 마찰패드사이를 움직이면서 마찰력을 발생시켜 에너지 소산을 하는 댐퍼이다. 외부 지지대에 고정된 마찰패드는 지지대로부터 연결되는 반원형의 판스프링으로 적절한 압축력이 도입된다.

3. 댐퍼의 성능 평가 방법

케이블 댐퍼의 부가 감쇠비는 댐퍼 비선형성, 댐퍼의 기계적 작동성, 지지대의 강성 등으로 이론치(설계치) 보다 일반적으로 효율이 낮다. 이러한 점을 평가하기 위한 척도로 본 연구에서는 아래와 같은 세 가지 효율 평가식을 정의하여 효율 평가를 한다.

댐퍼효율(Damper Efficiency)은 댐퍼자체의 부가 감쇠비 특성을 판단할 수 있는 척도로 사용될 수 있으며 감쇠 재료 및 댐퍼 형식에 따라 달라진다. 작동효율(Operation Efficiency)은 설계모델의 정확성, 설치위치, 지지대의 강성, 설치의 정밀도 등에 따라 달라진다. 식 (4)로 나타내지는 효율(Efficiency)은 댐퍼의 전체적인 성능을 하나의 지표로 나타낸 것이다. 설계치 부가 감쇠비는 댐퍼의 정확한 물성치, 댐퍼 설계 모델 그리고 최적 설계 조건 등에 따라 그 값이 달라진다. 이와 같이 변동성이 많은 설계치 부가 감쇠비를 제외한 효율(Efficiency)에 대한 값을 살펴보면 대상 댐퍼의 전체적인 성능을 파악할 수 있다.

$$\text{댐퍼효율}(DE) = \frac{\text{설계치 부가 감쇠비}(\xi_{design})}{\text{이상적 점성댐퍼의 부가 감쇠비}(\xi_{ideal})} \quad (2)$$

$$\text{작동효율}(OE) = \frac{\text{케이블 실험치 부가 감쇠비}(\xi_{damper})}{\text{설계치 부가 감쇠비}(\xi_{design})} \quad (3)$$

$$\text{효율}(E) = DE \times OE = \frac{\text{케이블 실험치 부가 감쇠비}(\xi_{damper})}{\text{이상적 점성댐퍼의 부가 감쇠비}(\xi_{ideal})} \quad (4)$$

4. 실험 결과 분석

본 연구에서는 변위에 따라 감쇠비가 달라지는 특성인 비선형성을 정량적으로 평가하기 위해 그림 3과 같은 평가식을 사용하였다. 이러한 평가식에 의한 비선형성이 표 2에 나타나 있다. IHD는 실험된 변위범위에

서는 최대 감쇠비점에 도달하지 않은 것으로 판단이 되어 비선형성 산정에서 제외되었다.

댐퍼의 효율을 알게 되면, 예비설계 단계 등에서 댐퍼 형식에 따라 주어진 케이블에 대해 설치 위치를 대략적으로 계산할 수 있다. 댐퍼 설치 위치를 a 라고 할 때 효율의 정

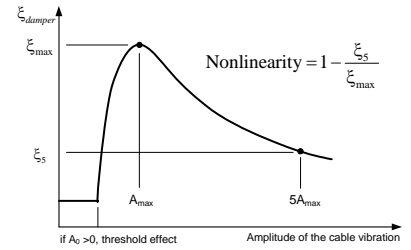


그림 3. 비선형성의 정의

의식에 따라 다음과 같은 식을 얻는다.

$$a = \frac{2L\xi_{damper}}{E} = \frac{2L(\xi_{require} - \xi_{bare})}{E} \quad (5)$$

여기서 $\xi_{require}$ 는 진동 검토 등을 통해 산정한 케이블의 요구 감쇠비이다. 만일 케이블의 길이가 100m이고 댐퍼에 의해 요구되는 부가 감쇠비가 0.5%라고 한다면 첫 번째 모드에 대해 설계하는 경우, HDR은 $2 \times 100 \times 0.5 / 30.2 = 3.3$ 로 앵커로부터 3.3m 위치에 설치하여야 하며, IRD의 경우, $2 \times 100 \times 0.5 / 88.3 = 1.1$ m 에 댐퍼를 설치하여야 한다.

표 2. 실험된 댐퍼의 성능평가

| 댐퍼 | 비선형성 | | | 효율(%) | | |
|-----|------|------|------|-------|------|-------|
| | 1st | 2nd | 3rd | 1st | 2nd | 3rd |
| HDR | 0.28 | 0.32 | 0.31 | 30.2 | 32.1 | 33.2 |
| OGD | 0.19 | 0.05 | - | 86.6 | 98.1 | - |
| IHD | - | - | - | 60.3 | - | - |
| IRD | 0.06 | - | - | 88.3 | - | - |
| FRD | 0.72 | 0.61 | 0.75 | 136.6 | 98.3 | 101.7 |

5. 결 론

본 연구의 실험결과를 보면 대상 댐퍼는 대부분 비선형성을 나타냈으며 형식에 따라 동적 거동 및 감쇠비 특성이 뚜렷이 나타났으며 그에 따라 각각의 형식에 대한 비교적 객관적인 효율을 산정할 수 있었다. 댐퍼 설계 방법 및 실 교량에 설치되는 형상에 따라 다소 효율이 달라질 수 있으나 본 연구의 결과를 이용하면 예비설계 단계에서 교량에 적합한 댐퍼 형식을 선정하는데 도움이 되리라 생각된다.

참 고 문 헌

Sun, L., Shi, C., Zhou, H., Cheng, W. (2005) A Full-scale Experiment on Vibration Mitigation of Stay Cable, *Sixth International Symposium on Cable Dynamics*, Charleston, USA.