

회전마찰감쇠기의 등가선형시스템에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Equivalent Linear System for Rotational Friction Damper

김형섭* 박지훈** 민경원*** 이상현**** 이명규*
Kim, Hyoung-Seop Park, Ji-Hun Min, Kyung-Won Lee, Sang-Hyun Lee, Myoung Kyu

ABSTRACT

In this study, equivalent linear damping and stiffness of a single-degree-of-freedom (SDOF) structure with a rotational friction damper are estimated using the result of experiments and compared with those obtained from non-linear time history analyses. First, the transfer function of the test model is constructed and then the equivalent stiffness and damping are calculated, using the half-power bandwidth (HPB) method. For comparative study, those properties are estimated based on stochastic theory in the time domain. Both equivalent linear systems identified from experiments and numerical analyses correspond well. Further, it is observed that there exists an optimal clamping force on the rotational friction damper from estimated equivalent damping.

1. 서론

지진 또는 바람에 의해 발생하는 구조물의 과도한 응답을 제어하는 방법으로서 다양한 진동제어장치가 개발 및 적용되고 있다. 수동형 진동제어장치의 한가지인 마찰형 감쇠장치는 제작 및 설치가 용이하다는 장점 때문에 건축토목구조물에의 적용이 점차 증가하고 있다⁽¹⁾. 마찰형 감쇠기는 마찰면을 구성하는 재료에 따라 차이는 있으나 상용화된 대부분의 마찰감쇠기는 반복하중 하에서도 안정적인 이력거동을 보인다는 것이 실험적으로 입증되어 있다. 또한 마찰형 감쇠기는 마찰면에 가해지는 조임력에 의해서 슬립(slip)이 발생하는 힘을 쉽게 변화시킬 수 있다는 장점이 있다. 특히 볼트를 사용해서 조임력을 가해주는 경우에 이론적으로 볼트에 가해지는 토크와 조임력 사이에 단순히 선형적 관계가 있어서 쉽게 원하는 조임력을 얻을 수 있다⁽²⁾. 또한 설치 측면에 있어서 가새에 압축력이 발생하지 않거나 또는 적은 양의 압축력만이 발생하도록 함으로써 좌굴을 방지할 수 있는 메커니즘도 개발되고 있다^{(3),(4)}.

그러나, 마찰감쇠기를 구조물에 설치하면 주구조물이 선형탄성범위 내에서 거동하더라도 전체구조물은 비

* 단국대학교 건축대학 건축공학과, 석사과정

** 단국대학교 건축대학 건축공학과, 연구교수

*** 단국대학교 건축대학 건축공학과, 부교수, 전화: 02-709-2731, E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

**** 서울대학교 공학연구소 객원연구원, 공학박사

선형 거동을 하므로 시간에 따라 구조물 속성이 변화하게 된다. 따라서 설계를 목적으로 감쇠기의 성능을 평가하기 위해서는 통계적으로 구조물의 동적특성을 정의해야 할 필요성이 있으며 이는 등가강성과 등가감쇠에 의해 정의되는 등가선형시스템을 정의함으로써 가능하다. 마찰 감쇠기는 슬립에 의해 발생하는 이력거동을 통해 구조물에 유입된 에너지를 소산시키며 결과적으로 전체구조물의 감쇠를 증가시킨다. 또한 감쇠기의 슬립이 발생하지 않은 순간에는 연결부재의 강성이 전체구조물의 강성을 증가시키는 역할을 한다. 그러나 이 두 가지 효과는 교대로 발생하며 결과적으로 그 불연속성으로 인해 감쇠 및 강성의 증가는 통계적인 의미를 갖게 된다. 이와 같은 의미에서의 등가선형시스템은 진동수영역 및 시간영역에서의 해석 또는 실험 결과를 통해 정의될 수 있다. 진동수영역에서의 등가선형구조물은 전달함수를 통해 구해지며 전달함수는 평균화(averaging)의 과정을 통해 구해지므로 그 자체로서 통계적 속성을 갖고 있다. 시간영역에서의 등가선형구조물은 응답의 시간이력으로부터 추계론적 방법을 통해서 구할 수 있다.

본 연구에서는 회전마찰감쇠기⁽⁴⁾가 감쇠기가 설치된 단자유도구조물을 대상으로 실험을 통해 등가감쇠 및 등가강성을 추정하였으며 이를 비선형 시간이력해석을 통해 추정된 값과 비교하였다. 등가강성은 구조물의 전달함수로부터 구해진 고유진동수에 기초해서 추정하였고, 등가감쇠는 잘 알려진 half-power bandwidth (HPB)를 사용하여 추정하였다⁽⁵⁾. 또한 비교를 위해 시간영역에서도 등가감쇠 및 등가강성을 추정하였으며 여기에서는 불규칙 가진에 대한 구조물의 응답이 가우스 분포를 갖는 확률과정으로 가정하고 이와 같은 확률과정과 그 변화율 사이의 독립성을 이용하여 유도된 식을 사용하였다⁽⁶⁾. 또한 마찰형감쇠기의 성능은 마찰면에 가해지는 조임력에 의해서 결정되기 때문에 조임력의 크기를 변화시켜가면서 그에 따른 등가감쇠 및 등가강성의 변화양상을 조사하였다.

2. 회전마찰감쇠기

2.1 회전마찰감쇠기의 특성

회전 마찰감쇠기는 그림 1과 같이 두개의 수평 강판 사이에 한 개의 수직 강판으로 구성되어 있으며, 그 사이에는 각각의 마찰패드가 들어가 있다. 따라서 이 두 판 사이의 상대 회전각에 의해서 마찰모멘트가 작용하고 이 힘이 구조물에 가해지는 것이다. 이러한 중앙의 수직강판은 길이, h_a 를 가지고 있으며, 구조물의 수평프레임의 중앙에 핀으로 연결되어 있다. 따라서 마찰면의 회전 모멘트는 구조물의 수평프레임에 수평방향의 힘으로 작용한다. 그리고 길이가 $2r$ 인 수평 강판의 양쪽 끝에는 케이블이 연결되어 있어서 프레임의 아래 양단과 연결된다. 즉 케이블은 구조물에 뒤집힌 v자 형상의 가새로 작용할 수 있다. 또한 케이블에는 항상 인장만 작용한다. 그림 2는 단자유도 프레임에 설치된 마찰감쇠기의 형상을 나타낸 것으로서, 프레임에

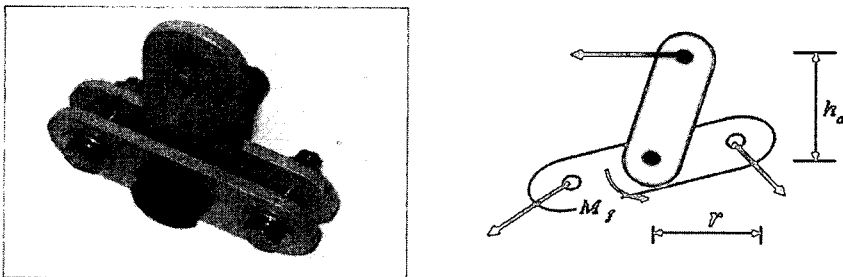


그림 1 회전형 마찰감쇠기의 사진 및 형상

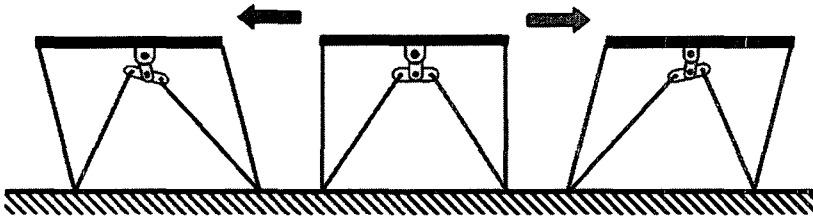


그림 2 단자유도 프레임에 설치된 회전마찰 감쇠기

수평변위가 발생하면 수평 강판과 수직강판 사이에 상대 회전각이 생긴다. 따라서 마찰패드로 인한 회전모멘트는 수직 강판의 상단에서 구조물에 제어력으로 작용한다⁽⁴⁾.

2.2 회전 마찰감쇠기의 해석

구조물의 수평 변위로 인하여 마찰면에 작용하는 모멘트는 구조물에 제어력으로 작용할 수 있다. 회전 마찰감쇠기가 구조물에 작용하는 하중, F_s 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$F_s = (M_f/h_a) \times (K_f/K_{bd}) \quad (1)$$

여기서 M_f 와 K_{bd} 는 각각 회전면에 작용하는 모멘트, 가새의 강성이다. 그리고 K_t 는 프레임과 가새가 통합된 구조물의 총 강성으로써 다음 식(2)와 같다.

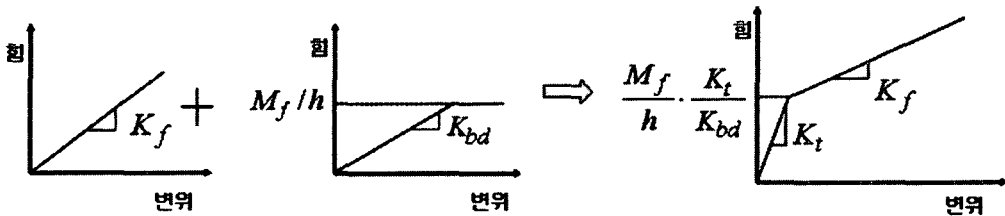
$$K_t = K_f + K_{bd} \quad (2)$$

따라서 프레임과 감쇠기가 설치된 시스템은 그림 3과 같이 이선형 거동으로 가정할 수 있다. 즉 통합된 구조물의 시스템은 초기강성이 K_t 이고 항복 후 강성, K_p 는 구조물의 강성으로써 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_p = K_f \quad (3)$$

프레임과 가새 구조물이 통합된 시스템은 결국 그림 3과 같은 시스템을 가진다고 할 수 있다. 그림 3의 (a)는 구조물의 거동으로써 항상 탄성변형을 한다고 가정하고, (b)는 마찰감쇠기의 이력 그래프으로써 항복 모멘트, M_f 에서 항복하여 이선형 거동을 한다. 그림 3의 (c)는 프레임과 마찰감쇠기가 통합된 시스템을 나타낸다. 따라서 프레임과 감쇠시스템이 통합된 구조물의 수치해석은 이선형 거동으로 가정을 하고 해석을 수행하였다. 다음으로 회전 마찰감쇠기의 설계 모멘트는 다음과 같이 정규화 하여 나타낼 수 있다.

$$\eta_M = M_f/M_u \quad (4)$$



(a)주 구조물의 이력거동

(b)마찰 감쇠기의 이력거동

(c)통합시스템의 이력거동

그림 3 주 구조물과 마찰 감쇠기의 통합시스템

여기서 M_u 는 외부하중에 의한 감쇠기에 요구되는 모멘트로써 다음과 식(5)와 같다.

$$M_u = h_a S_d K_{bd} \quad (5)$$

여기서, S_d 는 특정 하중에 의하여 구조물의 가새가 강성으로만 작용하였을 때, 즉 마찰면에 미끄럼이 일어나지 않았을 때의 최대 변위이다.

2.3 항복모멘트산정

구조물에 설치된 마찰감쇠기의 마찰면에 작용하는 모멘트를 수치적으로 알아내기는 쉽지 않다. 예를 들어 건물에 설치한 마찰감쇠기의 모멘트를 임의로 조정하거나 변화시키기 위해서는 다시 감쇠기를 해체해야 할 수도 있다. 하지만 그러한 과정을 거치지 않고 강판 사이에 설치된 나사의 조임력에 의해 마찰면의 회전 모멘트의 수치산정이 가능하고, 식(6)에 나타내었다⁽²⁾.

$$M_f = \frac{4}{3} \mu z \frac{T}{d_e \tan(\beta + \rho)} \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^3 - R_1^3} \quad (6)$$

여기서, μ , z , R_1 , R_2 , T , d_e , 그리고 β 는 각각 마찰면의 마찰계수, 마찰면의 개수, 마찰면의 안쪽반지름, 바깥반지름, 나사의 조임력, 나사의 유효지름 그리고 나사선의 기울임 각도이다. 또한 ρ 는 다음 식(7)에 의해 산정할 수 있다.

$$\rho = \tan^{-1} \left(\frac{\mu_b}{\cos \alpha} \right) \quad (7)$$

여기서, μ_b 와 α 는 각각 나사면의 마찰계수와 나사산의 각도이다.

결과적으로 토크렌치를 이용한 조임력과 마찰면에 작용하는 모멘트는 선형 비례관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 식(6)을 이용하면 마찰면과 나사의 특성만 알면 마찰면에 작용하는 토크렌치의 조임력으로 원하는 회전 모멘트를 구현할 수 있다. 그림 4는 실험에 의해 산정한 마찰면에 작용하는 모멘트, M_f 와 토크렌치의 조임력, T 와 관계를 나타낸 그래프이다. 그림 4의 (a)는 토크렌치의 각각의 조임력 마다 10회의 반복실험을 수행한 데이터를 나타내고 있으며, (b)는 10회의 반복실험을 평균한 점들을 연결한 것이다. 식(13)에 나타나 있는 것 같이 토크렌치의 조임력과 마찰면의 모멘트의 관계가 선형관계임을 알 수 있고, 그림 5의 데이터를 이용하면 설치 후에 단순한 토크렌치의 조임력만을 이용하여 원하는 마찰면의 모멘트를 구현할 수 있다.

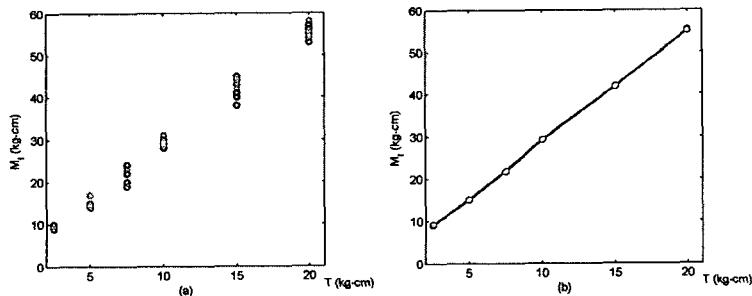


그림 4 토크렌치의 조임력과 마찰면의 모멘트와의 관계

3. 실험개요

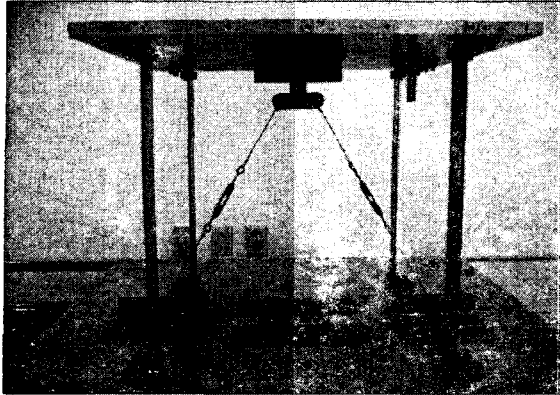


그림 5 1층 축소 건물과 내부에 설치된 회전마찰 감쇠기

단국대학교 구조해석 및 동역학 연구실에서 실험이 수행되었으며(그림 5), 축소모형의 구조물은 1층의 1경간 철골조 구조로 높이 50cm이고, 바닥판은 60c×60cm을 사용하였고 1축방향의 동적신호를 측정할 수 있도록 가진방향으로 기둥의 약축방향을 위치하였다. 구조물의 질량은 바닥 판에 집중된 것으로 가정하였으며, 층 질량은 42.25kg으로 측정 되었다.

그림 5과 같이 바닥판의 하부 중앙에 DAMPTECK사의 회전 마찰감쇠기와 유사한 형태로 제작한 감쇠기를 장착하였는데 수평방향의 거동만 발생하도록 양쪽에 L형강을 설치하여 그 중간에 감쇠기를 설치하였다. 감쇠기의 수평강판 양단을 바닥판과 케이블로 연결하였는데, 케이블에는 프리스트레스를 가하기 위하여 중간에 턴버클을 사용하였다.

가진기로는 단국대학교가 보유하고 있는 진동대를 사용하였으며, 서보모터를 사용하여 구동되는 1방향 가진 장치로 입력 전압신호로 모터의 속도를 제어함으로써 목표로 하는 바닥판 가속도를 구현하는 장치이다. 진동대는 Labview 프로그램에 의해 제어되며, 진동대는 AC 서보모터를 사용하였고 내셔널 인스트루먼트사의 (NI) BNC-2110 D/A 보드로 제어하였다. 지반과 1층 바닥판에 각각 1개씩의 가속도계를 설치하였고, 또한 1층에 동적변위측정계(LVDT)를 설치하고 실시간 디지털 신호 처리기(Real-Time Digital Signal Processor: DSP)을 사용하여 가속도와 바닥판과 1층 사이의 층간변위를 측정하였다.

4. 등가 강성과 감쇠 시스템

4.1 등가선형시스템 이론

본 연구에서 사용한 마찰감쇠기는 비선형성을 가지고 있기 때문에 구조물에 미치는 감성 및 감쇠를 수치적으로 산정하기 쉽지 않다. 또한 하중과 구조물의 특성에 따라 구조물에 추가되는 강성과 감쇠가 변화한다. 감쇠기를 추가함에 따른 구조물의 등가 강성과 등가 감쇠를 다음 식(8)과 식(9)에 각각 나타내었다⁶⁾.

$$K_{eq} = K_f + \frac{E[(F(t) - K_f x(t))x(t)]}{E[x(t)]^2} \quad (8)$$

$$C_{eq} = C_f + \frac{E[(F(t) - K_f x(t))\dot{x}(t)]}{E[\dot{x}(t)]^2} \quad (9)$$

여기서 $x(t)$, \dot{C}_f 그리고 $F(t)$ 는 각각 구조물의 변위, 고유 감쇠상수 그리고 구조물에 작용하는 복원력의

합이다. 따라서 오른쪽 부분의 분자 중 $F(t) - K_f x(t)$ 는 감쇠기를 구조물에 추가함으로써 생기는 제어력이라고 할 수 있다. 위에 식(8)에서 산정한 등가 강성은 전달함수의 최대값에서 채택된 진동수로 산정한 등가강성과 비교하였고, 등가감쇠는 변위전달함수를 이용하여 HPS법을 사용하여 계산한 것과 비교하였다⁽⁵⁾.

4.2 실험 및 해석 결과

마찰감쇠기가 설치된 단자유도 실험체의 등가선형시스템은 탄성 단자유도 구조물로 정의되며 질량, 감쇠 및 강성에 의해 결정된다. 질량은 측정된 실험체의 질량을 그대로 사용하였다. 감쇠 및 강성은 감쇠기가 항복한 경우와 그렇지 않은 경우에 다른 값을 가지므로 통계적으로 평균화된 값으로 정의되어야 한다. 구조물의 전달함수는 진동수 영역으로 변환된 입출력신호의 비율로 정의된다. 실험에서 구해진 전달함수는 측정잡음의 영향을 없애고 구조물의 비선형성에 따른 특성변화를 고려하기 위해서 평균화된 것을 사용하였다. 전달함수를 구하기 위한 입출력 데이터는 0.01초 간격으로 200초 동안 측정된 값을 이용하였다. 측정된 전체 입출력 데이터를 20.48초의 길이와 50%의 겹침(overlap)을 갖도록 나누어서 전달함수를 구하고 이를 평균화하였다. 입력신호는 실험체의 고유진동수와 진동대의 성능을 고려하여 차단주파수가 15 Hz인 저주파통과필터를 사용해서 생성된 필터통과백색잡음을 사용하였다.

등가강성 및 등가감쇠는 회전마찰감쇠기의 항복모멘트에 따라 변화한다. 따라서 제어효과에 대한 조임력의

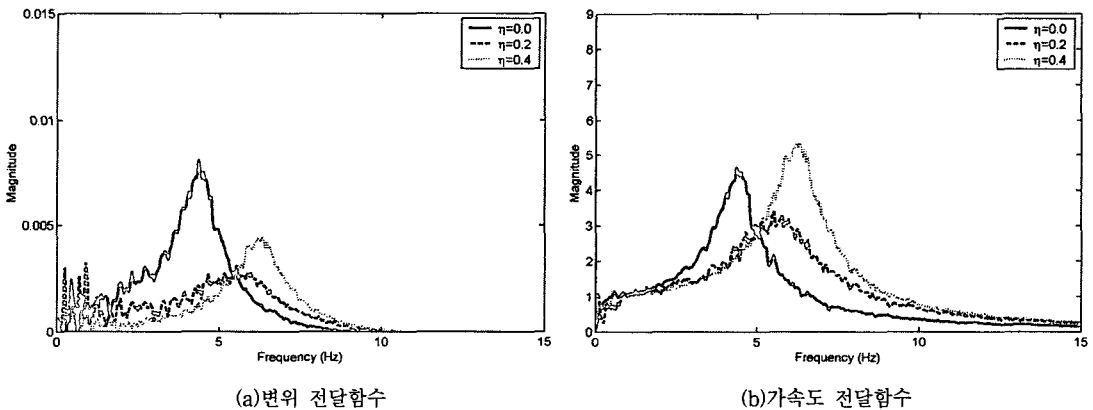


그림 6 실험에 의한 전달함수

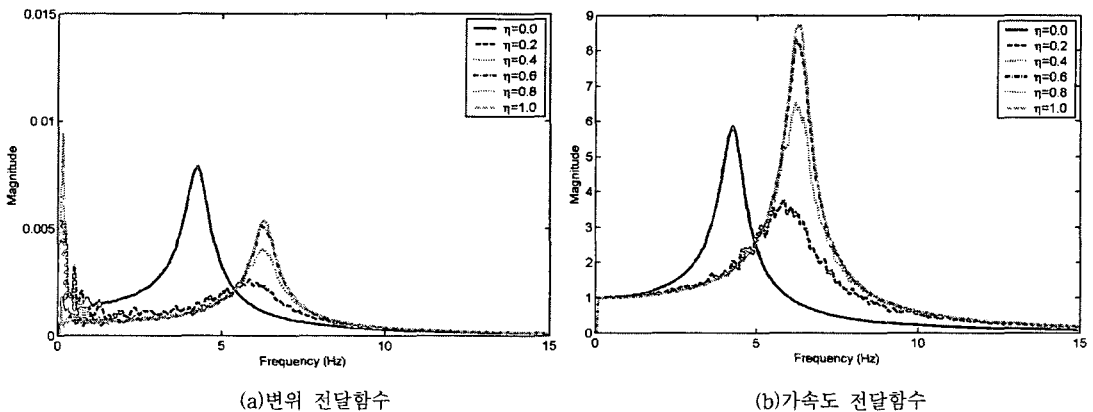


그림 7 해석에 의한 전달함수

영향을 파악하기 위해 식(4)로 정의되는 정규화 된 항복모멘트 η_M 가 0.0, 0.2, 0.4인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 회전마찰 감쇠기의 항복모멘트는 볼트에 가해진 토크와 그림 5로부터 산정되었으며 이를 기초로 정규화 된 항복모멘트가 계산되었다. K_{bd} 는 감쇠기의 조임력이 0인 경우와 슬립이 발생하지 않을 정도로 큰 값($T=30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$)을 갖는 경우에 대해서 각각 실험을 수행하여 얻어진 고유진동수 및 측정된 질량을 토대로 계산하였으며 약 37.18 kN/m 이다. S_d 는 후자의 실험결과로부터 얻어진 최대 변위이다. 비교를 위한 비선형 시간이력 해석은 정규화 된 항복모멘트를 0부터 1까지 0.05씩 증가시켜가면서 수행하였다. 비선형 시간이력 해석의 경우에는 속도 및 제어력에 대한 정보로부터 식(8)과 (9)를 사용하여 등가강성 및 등가감쇠를 계산할 수 있었다.

실험 및 해석에 의해서 구해진 변위 및 가속도의 전달함수는 각각 그림 6, 그림 7과 같다. 각 전달함수의 고유진동수는 정규화 된 항복모멘트가 증가함에 따라 점차 증가하는 것을 볼 수 있으며 슬립이 발생하지 않는 경우의 고유진동수로 수렴하고 있다. 변위의 전달함수의 피크는 정규화 된 항복모멘트가 증가함에 따라 처음에는 감소하다가 다시 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 초기에는 마찰감쇠기의 항복으로 인한 에너지 소산에 의해 응답이 감소하지만 마찰감쇠기의 항복모멘트가 증가하면 항복이 발생하는 빈도가 낮아져서 에너지 소산량이 줄어들기 때문인 것으로 볼 수 있다. 가속도 전달함수의 경우에도 유사한 경향을 볼 수 있다. 그러나 변위 전달함수의 경우에는 슬립이 일어나지 않더라도 가세에 의한 강성 증가는 여전히 변위를 감소 시키지만 가속도 전달함수의 경우에는 피크가 점차 증가하는 경향을 볼 수 있다. 따라서 가속도 제어에 있어서는 역효과가 발생하지 않도록 적절한 조임력을 설계하는 것이 중요함을 알 수 있다.

실험 및 해석에 의해서 구해진 등가강성과 등가감쇠는 그림 8에 나타내었다. 해석을 통해 얻어진 경우에 전달함수에 기초한 등가선형시스템과 추계학적 이론으로부터 추정된 등가선형시스템이 잘 일치함을 확인할 수 있다. 실험에 의해 얻어진 전달함수에 기초한 등가선형시스템 역시 해석을 통해 얻어진 등가선형시스템과 잘 일치함을 알 수 있다. 등가강성의 경우에 정규화된 항복모멘트가 1에 가까워짐에 따라 슬립이 발생하지 않을 때의 강성에 수렴해감을 알 수 있다. 등가감쇠의 경우에 정규화된 항복모멘트가 0.1일 때 최대의 값을 갖으며 HPB법에 의해 구해진 등가감쇠와 추계학적 이론에 의해 구해진 값이 모두 동일한 경향을 갖는다. 이는 회전마찰감쇠기의 설계에 있어서 최적의 항복모멘트가 존재함을 의미한다. 그러나 등가감쇠가 최대가 되는 영역에서 등가강성은 급격하게 변화하고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서 강성을 고려한다면 최적의 항

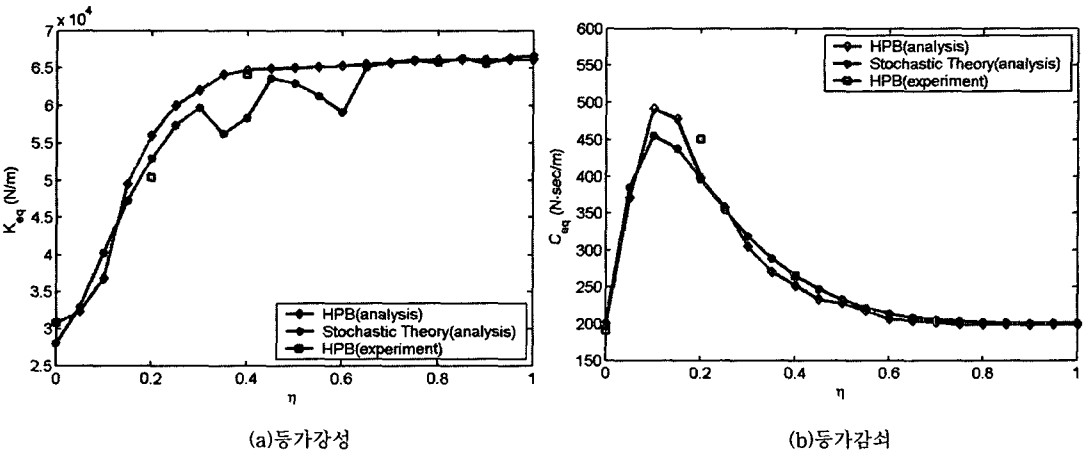


그림 8 실험 및 해석에 의한 등가시스템

복모멘트는 등가감쇠를 최대화하는 항복모멘트와 차이가 있을 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 회전마찰감쇠기의 성능을 평가하는 한 방법으로서 강성증가 및 에너지 소산효과를 정량화 하기 위하여 등가강성 및 등가감쇠를 실험을 통해 식별하고 해석결과와 비교하였다. 선행연구로서 회전마찰 감쇠기의 성능을 결정하는 감쇠기의 항복강도가 조임력을 발생시키는 볼트에 가해지는 토크와 선형의 비례 관계를 가짐을 실험을 통해 확인하였다. 이에 기초하여 회전마찰감쇠기에 가해진 토크에 따른 감쇠기의 성능 변화를 실험 및 비선형시간이력해석을 통해 파악하였고, 강성의 증가량에 의한 진동수 변화의 한계 및 최적의 에너지 소산효과를 위한 설계변수가 존재함을 확인할 수 있었다. 또한 전달함수에 기초한 등가선형시스템과 추계학적 이론을 통해 구해진 등가선형시스템이 서로 잘 일치하며 등가선형시스템을 식별하기에 적절한 방법임을 알 수 있었다. 또한 실험으로부터 얻어진 등가선형시스템이 비선형 시간이력해석을 통해 구해진 등가선형시스템과 잘 일치하였으며 이를 통해 이선형 시스템을 통해 회전마찰감쇠기의 거동을 비교적 정확하게 모델링할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

“건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03 산학연C103A2000010-03A0200-01010)에 의한 것임”

참고문헌

1. Li, C., Reinhorn, A. M., (1995), Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II - Friction Devices, Technical Report NCEER-95-0009
2. 조성철, “일반기계공학” 미전사이언스.
3. Filiatrault A., Cherry S., (1990), “Seismic design spectra for friction-damped structures”, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 116, p.p.1334-1355
4. Mualla, I. H., Belev, B. (2002), “Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation”, Engineering Structures, Vol. 24, p.p. 365-371
5. Chopra, A. K., (1995), Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering, Prentice Hall, NewJersey, 729 p.p.
6. Soong, T. T. and Dargush, G. F. (1997) Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons