



마찰감쇠기의 특성과 건축구조물 제진성능

박지훈*

(단국대학교 건축공학과)

가장 중요한 설계변수인 슬립하중의 결정은 가속도 응답 내지는 이와 밀접한 관련이 있는 밀면전단력의 제어에 있어서 중요한 역할을 하며, 지진과 같이 많은 불확실성을 갖는 하중을 대상으로 하는 경우에는 하중의 확률적 속성과 맞물려서 보다 심도 깊은 연구가 지속적으로 수행되어야 하는 분야라고 할 수 있다.

1. 서론

지진이나 태풍 등의 동적 하중에 의해 발생하는 대형 건축/토목 구조물의 커다란 손상이나 파괴 및 붕괴를 방지하기 위한 구조물의 보강 방법은 크게 구조체 자체를 보강하는 방법과 구조물에 부가적인 장치를 설치하는 방법으로 분류할 수 있다. 이 가운데 구조물 자체를 보강하여 손상이나 파괴를 방지하는 방법에는 1) 구조물의 내력을 향상시키는 방법, 2) 구조물의 변형 능력을 향상시키는 방법, 3) 구조물의 질량을 증가 또는 감소시키는 방법이 있다. 그러나 이들 방법은 구조체 자체를 보강하기 때문에 공사비 및 공사기간이 증가하고, 부재 크기의 증대 또는 부재의 증설로 인해 건물내부의 공간 활용 효율성이 저하될 수 있으며, 구조체의 내력에 의해서만 하중에 저항하기 때문에 구조체의 영구변형 발생을 피할 수 없다는 문제점을 갖고 있다.

반면에 구조물에 유입되는 에너지를 소산시킬 수 있는 부가적인 감쇠기를 구조물에 설치하는 방법은 상대적으로 구조체에 유입되는 에너지를 최소화하여 그 성

능을 보존하는 방법이다. 따라서 구조물 자체의 소성변형을 방지하거나 최소화하고 감쇠기에만 변형이 집중되므로 하중 발생 이후의 보수 및 보강이 용이하고 비용이 적게 든다는 장점을 가지며, 구조물에 전달되는 진동을 효과적으로 차단 혹은 감소시켜서 내부에 수용된 여러 설비와 문화재 등을 보호하는 데 있어서도 월등한 성능을 갖는다.

감쇠기는 에너지 소산원리에 따라 크게 속도의존형과 변위의존형으로 분류할 수 있다. 이 가운데 변위의존형은 재료의 항복 또는 접합부의 슬립 현상을 이용하여 반복하중에 의해 구조물에 유입되는 에너지를 소산시키는 작용을 한다. 이번 기초강좌의 대상인 마찰감쇠기는 변위의존형 감쇠장치의 일종으로서 에너지 소산 메커니즘이 단순하고 설치 및 제작이 쉬운 이점을 가지고 있다. 또한 반복하중에 대한 이력거동이 안정적이고 마찰면에 작용하는 수직하력의 조절을 통해 원하는 최대마찰력을 얻기가 용이하다. 뿐만 아니라 마찰감쇠기를 구조물에 설치하는데 사용되는 가세의 좌굴을 방지하기 위해 다양한 시스템이 개발되고 있어 향후 그 수요가 점차 증가할 것으로 예상된다.

* E-mail : vibcont@hamail.net / Tel : (02) 799-1082

기초강좌

이 글에서는 우선 마찰감쇠기의 대표적인 형태와 그 역학적 특성 및 장단점을 알아본다. 다음으로는 마찰감쇠기의 수치해석을 위한 수학적 모델을 살펴보고, 이를 기초로 한 수치해석 결과를 통해 마찰감쇠기의 설계변수에 따른 구조물의 응답특성 변화를 통해 마찰감쇠기의 제진성능을 살펴보고자 한다.

2. 마찰감쇠기의 특성

1.1 개괄

마찰감쇠기는 에너지를 소산시키기 위해 고체 간의 마찰 현상을 이용하는 방법으로서 타 분야에서는 비교적 오래전부터 발전되어 온 장치이다. 하지만, 건축/토목 분야에서는 Pall 등(1980)이 처음으로 도입하였고, 최근에는 신축 및 기존 구조물의 내진 성능 향상을 위해 이 장치가 많이 사용되고 있다. 마찰감쇠기의 장점은 상대적으로 낮은 비용과 설치 및 유지관리가 쉬울 뿐만 아니라, 그림 1에서와 같이 힘-변위의 관계가 직사각형에 가까우므로 힘-변위의 최대값이 동일하다면 에너지 소산량은 최대가 된다. 이것은 같은 수준의 에너지 소산 성능을 얻기 위해 더 작은 수의 감쇠기가 필요하고 따라서 비용이 절감된다는 의미를 갖는다.

또한, 마찰감쇠기의 힘-변위관계는 하중 크기나 가진 진동수에 의해 크게 영향을 받지 않는다. 그리고, 기계적인 메커니즘이나 마찰을 일으키는 표면의 재료에 따라 다양한 설계가 가능하다. 상용화된 대표적인 마찰감

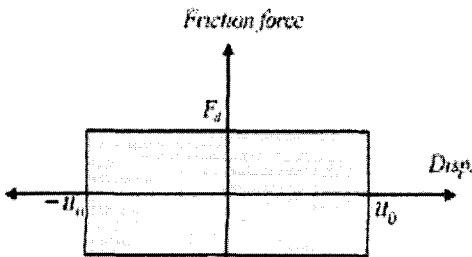


그림 1 쿨롱 마찰 감쇠의 이력곡선

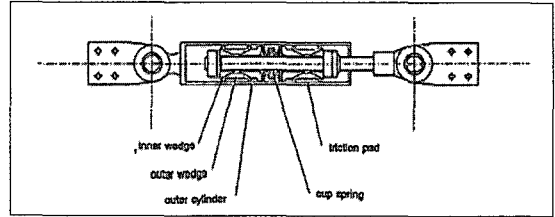


그림 2 Sumitomo 마찰감쇠기

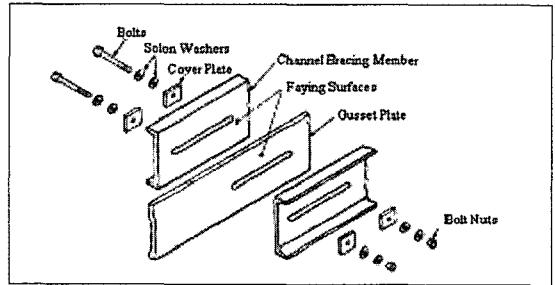


그림 3 슬롯 볼트형 마찰감쇠기

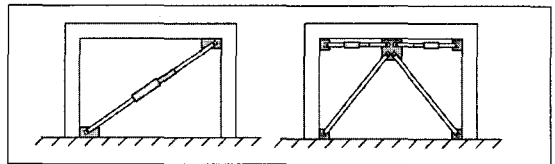


그림 4 감쇠기의 설치형상

쇠기로는 Sumitomo사의 마찰감쇠기와 Fitzgerald(1989)에 의해 제안된 슬롯 볼트형 마찰감쇠기 등이 있다. (그림 2, 3) Sumitomo 마찰감쇠기는 강재 원통과 그 안에 삽입된 황동 마찰패드 사이의 마찰을 이용하고 있으며 슬롯 볼트형 마찰감쇠기는 볼트 구멍을 타원형으로 만든 볼트접합부 형태로서 이들 감쇠기는 흔히 대각 가새 또는 쉼브론(Chevron) 가새를 이용해서 구조물에 설치된다(그림 4).

2.2 이력거동의 안정성

마찰이 발생하는 마찰면의 구성 재료에 따라 차이는 있으나 상용화된 대부분의 마찰감쇠기는 반복하중 하에서도 안정적 이력거동을 보임이 실험적으로 입증되

기초강좌

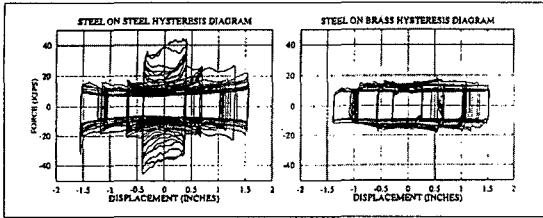


그림 5 마찰면 재료에 따른 이력거동의 차이

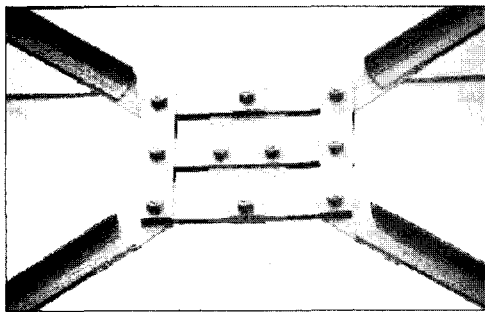


그림 6 Pall X-type 마찰감쇠기

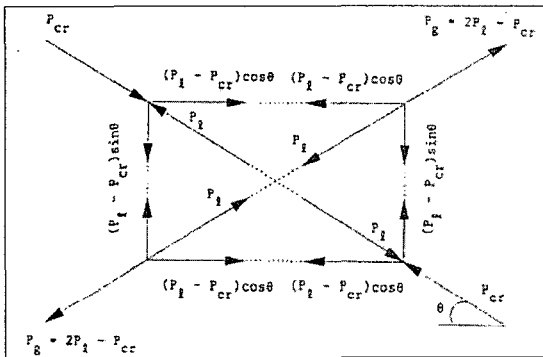


그림 7 Pall X-type 마찰감쇠기의 슬립 시 자유물체도

어 있다.

- ① 마찰면을 강재 및 황동 플레이트로 구성한 마찰감쇠기는 강재와 강재 플레이트로 구성된 마찰감쇠기에 비해 안정적인 이력곡선을 갖는다는 것이 400회의 반복재하 테스트를 통해 입증된 바 있다 (그림 5).
- ② 감쇠기의 이력 거동을 나타내는 힘-변위관계는 가

진 진동수에 무관한 이력 거동을 보이므로 구조물의 지배적 고유진동수에 따라 다른 성능을 지닌 마찰면을 제작할 필요가 없다.

- ③ 이력거동 특성이 변위 진폭에 크게 의존하지 않는다.

2.3 에너지 소산성능 제어의 용이성

설계과정에서 결정된 슬립하중을 마찰감쇠기에 부과하기 위해서는 마찰패드 및 여기에 접촉하는 강판의 면적 및 수를 변경시킬 수도 있으나, 마찰면에 가해지는 수직항력을 조절하는 것이 용이하며, 또한 일반적이다. 볼트를 사용해서 수직항력을 가해주는 경우에는 이론적으로 볼트에 가해지는 토크와 조임력 사이에 단순히 선형적 관계가 있어서 시공현장에서 쉽게 원하는 수직항력을 얻을 수 있다. 또한 스프링 와셔(spring washer)를 사용함으로써 나사의 풀어짐 등에 의한 조임력의 변동을 최소화하고 일정하게 유지하도록 할 수 있다.

2.4 좌굴 방지 구조

또한 설치 측면에 있어서 가새에 압축력이 발생하지 않거나 또는 적은 양의 압축력만이 발생하도록 함으로써 좌굴을 방지할 수 있는 메커니즘도 개발되고 있다. 대표적인 것으로는 Pall Dynamics사의 Pall X-type 마찰감쇠기(그림 6)와 DAMPTECK사의 회전형 마찰감쇠기(그림 8)가 있다. Pall X-형 마찰감쇠기는 X형 가새 중앙에 설치된 직사각형 구조가 평행사변형 형태로 변형하면서 모서리의 볼트 접합부에서 마찰에 의해 에너지를 소산시킨다. 이 때 그림 7에 나타낸 바와 같이 인장을 받는 대각선상의 모서리는 압축을 받는 대각선상의 모서리를 당기기 때문에 압축력이 인장력과 상쇄되어 가새에는 큰 압축력이 발생하지 않는다.

회전형 마찰감쇠기는 그림 8과 같이 중앙의 수직 플레이트와 두 개의 수평 플레이트, 그리고 그 사이에 위치한 두 개의 원형 마찰 패드로 구성되어 있다. 마찰 패드는 수직부재와 수평부재 사이에 발생한 회전변형을

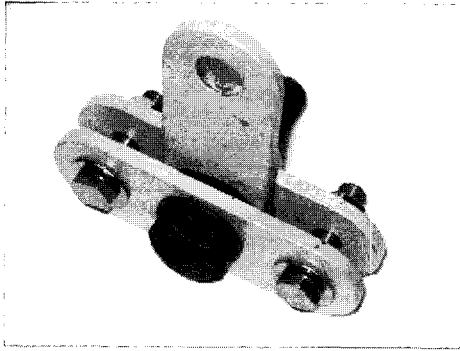


그림 8 회전형 마찰감쇠기

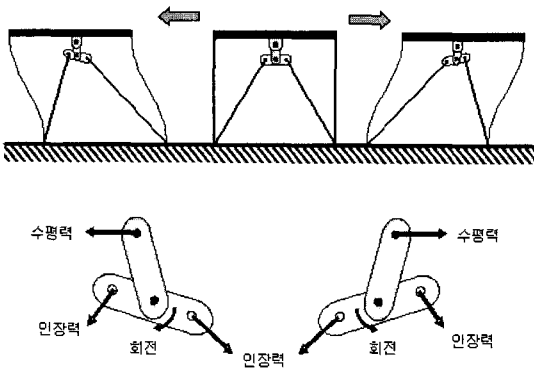


그림 9 회전형 마찰감쇠기의 거동

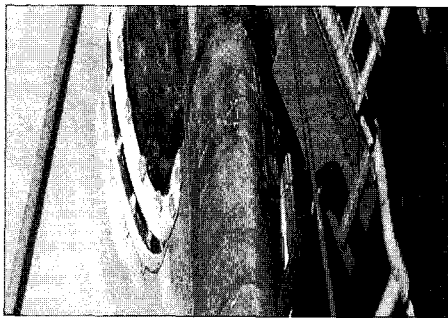


그림 10 실제 설치된 회전형 마찰감쇠기 및 가새

통해 에너지를 소산시킨다. 그림 9는 단층 라멘골조에 설치된 회전 마찰감쇠기의 형상과 거동을 나타내고 있

다. 여기서 볼 수 있듯이 라멘골조가 좌우 어느 쪽으로 변형하더라도 가새 부재에는 인장력이 발생하는 구조로 되어 있다. 따라서 가새를 주 구조물에 설치하기 위한 가새의 단면이 감소함으로써 설치가 용이해지고 형상에 비해 적은 비용으로 가새를 제작할 수 있으며 자중을 경감할 수 있다.

2.5 설계변수: 슬립하중의 역할

지진이나 바람과 같은 무작위 반복하중을 받는 마찰감쇠기에는 슬립(slip)과 잠김(lock) 상태가 교대로 발생하게 된다. 마찰감쇠기는 슬립 상태에서는 마찰에 의해 구조물의 운동에너지를 소산시킴으로써 구조물의 감쇠를 증가시키며, 잠김 상태에서는 설치용 부재의 강성만큼 구조물의 강성을 증가시키는 효과를 갖는다. 마찰감쇠기의 제진효과는 두 가지 상태가 전체 거동에서 차지하는 상대적인 비중에 따라서 달라지며, 어느 쪽 상태가 지배적이 될 것인가는 감쇠기에 작용하는 하중과 감쇠기의 최대마찰력 사이의 상대적인 비율에 의해 결정된다. 슬립하중이 크면 구조물의 강성이 증가되어 변위는 감소할 수 있지만 구조물의 절대가속도를 증가시켜서 기초에 작용하는 밀면전단력을 증가시킬 수 있다. 반면에 따라서 슬립 하중이 작으면 변위가 증가하는 반면에 가속도는 감소할 수 있다. 또한 감쇠기에 의한 에너지 소산량은 슬립하중이 크다면 슬립이 잘 일어나지 않아서 감소하게 되고, 슬립하중이 작다면 슬립이 쉽게 발생하더라도 작용력이 작아서 감소하게 되므로 적절한 슬립하중을 부여하는 것이 에너지 소산효과의 극대화 측면에서 중요하다.

3. 마찰 감쇠기의 역학적 모델

마찰감쇠기는 고체의 마찰 원리, 즉 마찰을 통하여 입력된 에너지를 열에너지로 소산시킴으로써 구조물의 진동을 제어하는 감쇠기이다. 마찰감쇠기의 하중-변위 모델은 물리적인 실험을 근거로 하고 있으며, 마찰의 기본원리는 다음과 같다.

기초강좌

- 총 마찰력은 작용면에 수직으로 작용하는 힘의 크기에 비례한다.
- 저속으로 미끄러질 경우 총 마찰력은 속도에 무관하다.
- 쿨롬(Coulomb)의 법칙 적용이 적용된다.

3.1 쿨롬 감쇠

쿨롬 마찰력을 받는 단자유도 시스템의 개략도는 그림 11과 같다. 쿨롬 마찰력의 힘-변위 곡선은 그림 1과 같고 다음 식과 같이 표현할 수 있는데, 이 식에서 볼 수 있듯이 속도에만 관계되고 변위에 무관하므로 구조물의 강성 또는 그에 따른 고유진동수를 변화시키지는 못한다.

$$f = f_s \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (1)$$

3.2 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템

가새-마찰감쇠기 시스템은 항상 일정한 힘을 내는 마찰력과 가새 강성의 직렬연결 시스템으로 볼 수 있으므로 완전탄소성(elasto-plastic) 모델로 표현 가능하다. 또한 단자유도 구조물에 설치되는 경우에 그림 12와 같이

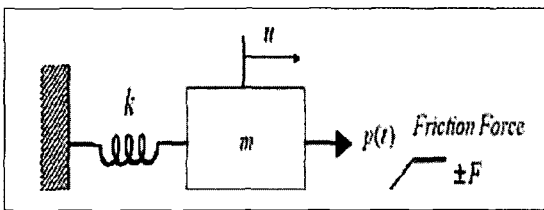


그림 11 쿨롬마찰력을 받는 단자유도 시스템

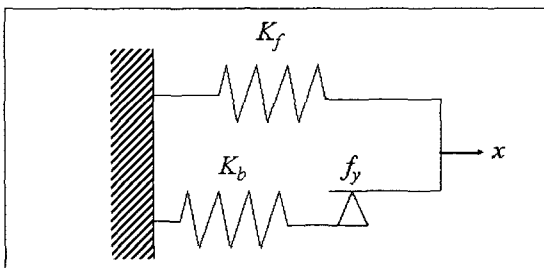


그림 12 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템

구조물의 강성이 가새-마찰감쇠기 시스템과 병렬로 연결되는 것으로 가정하여 그림 13에서 나타낸 것처럼 이선형(bilinear) 시스템으로 모델링 가능하다. 단자유도 구조물에 설치되는 경우에는 전술한 완전탄소성 모델을 적용하여 기존의 상용 구조해석 소프트웨어를 통해 용이하게 구조해석을 수행할 수 있다.

3.3 LSB형 볼트 접합부(Limited Slip Bolted Connection)

LSB형 볼트 접합부는 슬립이 제한되는 볼트 접합부의 형태를 갖는 마찰감쇠기로서 이를 그림 14에 나타내었다. LSB형 볼트 접합부는 다음과 같은 특징을 가지고

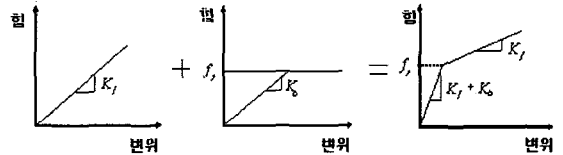


그림 13 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템 힘-변위 관계

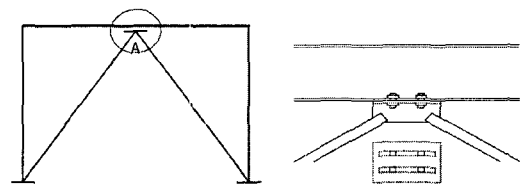


그림 14 LSB형 접합부 및 설치형상

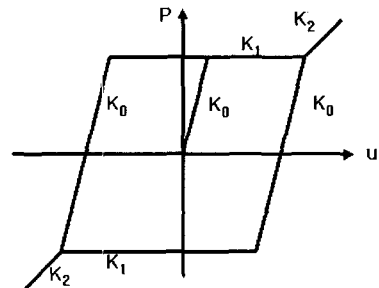


그림 15 LSB형 접합부의 에너지소산 모델

있다. 먼저 LSB형 볼트 접합부가 슬립하중(slip load)을 받을 때까지는 구조물에 순수하게 가새만 설치된 것과 같은 거동을 한다(탄성상태). 이후 슬립하중 이상의 힘이 작용하게 되면 볼트가 슬롯(slot)을 따라 미끄러지고(슬립상태) 슬롯의 끝에 다다르면 볼트의 전단저항력이 작용하게 된다(지압상태). 그림 15는 LSB형 볼트 접합부의 이력거동 모델이다.

4. 마찰감쇠기의 제진성능

이 절에서는 일반적으로 마찰감쇠기를 설치하는데 요구되는 가새 부재가 충분히 큰 강성을 갖는 것으로 가정하여, 순수 쿨롬 마찰력이 작용하는 경우의 구조물의 거동특성을 알아본다. 마찰감쇠기의 진동제어효과를 알아보기 위한 예제구조물은 유연한 3층 전단건물(shear building)로서 1차 모드가 지배적이며, 1층의 층간변위가 가장 크다. 건축구조물의 감쇠비는 대체적으로 2% ~ 10% 정도에 해당되나, 파티션과 끼움벽을 가지고 있지 않은 철골뼈대로만 구성되는 건물은 1% ~ 2% 정도의 매우 작은 감쇠를 가지며 여기서는 모든 모드감쇠비가 2%인 것으로 가정한다. 총질량은 40 kg, 층강성은 60,000 N이고 1, 2 및 3차 고유진동수는 각각 2.74, 7.69 Hz, 및 11.11 Hz이다. 마찰감쇠기는 그림 14와 같은 LSB형 접합부의 형태이지만 슬롯의 길이가 충분히 길어서 지압상태는 발생하지 않고, 가새는 강체인 것으로 가정하며, 변위의존형 감쇠장치이므로 가장 큰 변형이 발생할 것으로 예상되는 1층에 마찰감쇠기가 설치된 것으로 가정한다. 동적하중의 크기와 종류는 대상 건물의 물성 치와 함께 마찰감쇠기를 설계하는데 있어 가장 중요한 설계변수이다. 대상 건물의 거동이 탄성거동이라는 조건하에서, 마찰감쇠기의 성능을 충분히 보여줄 수 있도록 가진 하중의 크기와 종류를 선택하여야 한다. 여기서는 조화하중(harmonic load), 백색잡음(white noise), 그리고 실제 지진하중(earthquake load)을 대상으로 마찰감쇠기의 성능을 알아본다.

4.1 조화하중

그림 16은 최대크기가 0.5 m/sec²인 조화하중으로 가진한 경우에 가진하중의 주파수에 따른 각 층 최대 변위응답이다. 변위응답의 경우 1차 모드가 지배적이며 2차와 3차 모드는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 예상한 바와 같이 슬립하중 f_y 가 증가할수록 모든 주파수 대역에서 응답이 감소한다. 마찰감쇠기의 최대마찰력이 20 N인 경우 공진시 최대응답이 비제어시 응답의 1/3 수준으로 감소함을 알 수 있다. 슬립하중이 100 N인 경우에는 비선형성이 크게 증가하여 구조물의 모드 특성이 거의 사라지게 된다.

그림 17는 가속도최대응답을 보여준다. 변위응답의 경우와 달리 2차, 3차 모드의 크기가 응답에 영향을 줌을 알 수 있다. 마찰감쇠기가 설치된 1층 가속도 응답의 경우 슬립하중이 증가할수록 응답이 증가한다. 이는 쿨롬감쇠 형태의 급격한 제어력 변화가 구조물의 거동에 급격한 변화를 일으켜 가속도 응답을 증가시켰기 때문으로 판단된다. 2층과 3층 가속도 응답은 제어력이 증가할수록 응답감소의 폭이 커지나 50 N 이상의 경우에는 효과의 차이가 미미하다. 결론적으로 변위를 제어하는데 있어서는 마찰감쇠기의 슬립하중이 클수록 유리하지만 가속도를 제어하는데 있어서는 오히려 역효과

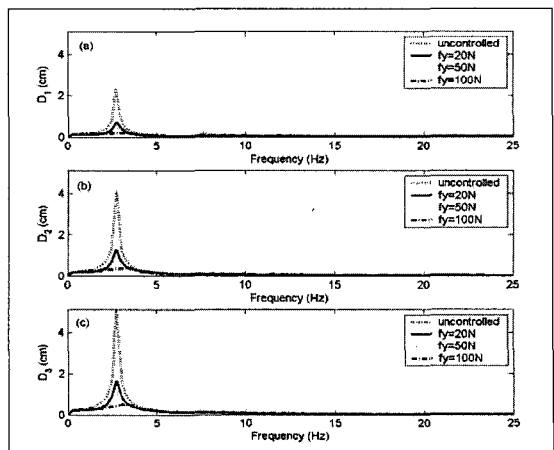


그림 16 조화하중 가진시 각 층 최대 변위 응답
(a) 1층, (b) 2층, (c) 3층

기초경진

가 발생하므로 두 가지 응답을 모두 제어해야 하는 경우에는 적절한 슬립하중을 선택하는 것이 중요함을 알 수 있다.

4.2 백색잡음(white noise) 해석

마찰감쇠기는 그 비선형성으로 인해, 하중의 크기에 따라 제어효과가 달라진다. 여기서는 크기가 다른 백색잡음에 대한 응답분석을 통해 하중의 크기에 따른 마찰감쇠기의 제어효과 변화를 살펴본다. 그림 18은 백색잡음의 크기 변화에 따른 정규화된 응답 변화를 나타내고

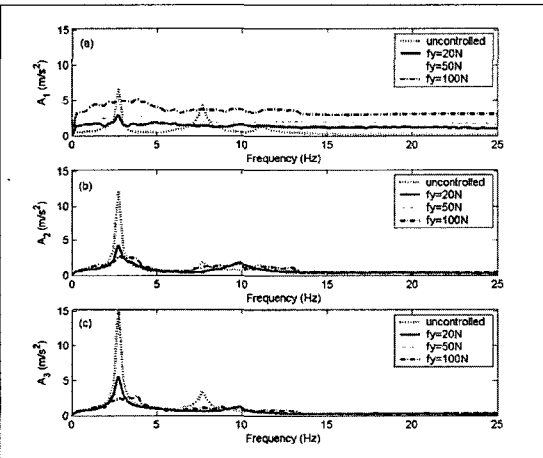


그림 17 조화하중 가진시 각 층 최대 가속도 응답 (a) 1층, (b) 2층, (c) 3층

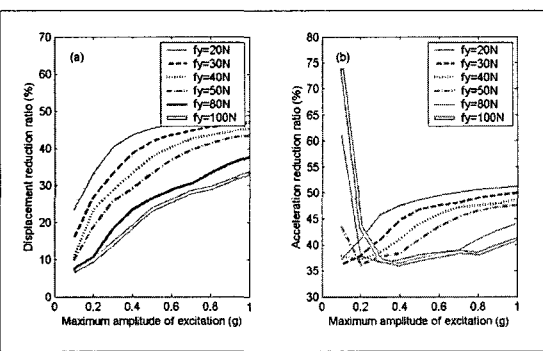


그림 18 백색잡음 가진시 최대 응답 감소율 (a)변위 응답 감소율, (b)가속도 응답 감소율

있으며, 이는 제어시의 응답을 비제어시의 응답으로 정규화한 것이다. 정규화된 변위는 동일한 크기의 하중에 대해서는 최대제어력이 증가할수록 줄어드나, 동일한 최대제어력의 경우 하중의 크기가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 이것은 마찰감쇠기의 최대마찰력이 일정한 경우에는 큰 하중을 받아 구조물의 응답이 증가하면 마찰감쇠기가 구조물에 미치는 영향이 상대적으로 줄어들기 때문에 발생하는 현상이다. 정규화된 가속도의 경우 큰 하중에 대해서는 변위와 같이 최대제어력이 클수록 정규화된 응답이 감소하나 작은 하중에 대해서는 증가하는 현상이 나타난다. 이것은 하중의 크기가 작아 구조물의 응답이 미소한 경우에는 큰 제어력이 필요 없음을 의미한다.

4.3 지진하중 해석

그림 19는 최대가속도가 0.3 g를 가지도록 스케일링된 El Centro (1940, NS component) 지진하중을 받는 경우의 최상층 변위와 가속도의 시간이력을 보여준다. 비제어된 경우와 비교할 때 변위응답과 가속도 응답이 모두 크게 감소함을 알 수 있다. 그림 20은 각 층 최대응답을 보여준다. 변위응답의 경우에는 최대제어력이 증가할수록 전 층에 걸쳐 응답이 감소하나, 가속도 응답의 경우에는 제어력이 직접 전달되는 1층의 절대가속도가 제어력이 큰 경우에 증가함을 알 수 있다.

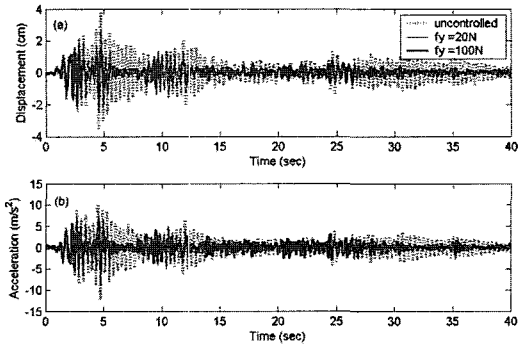


그림 19 El centro 지진 가진시 응답 (a)3층 변위 응답, (b)3층 가속도 응답

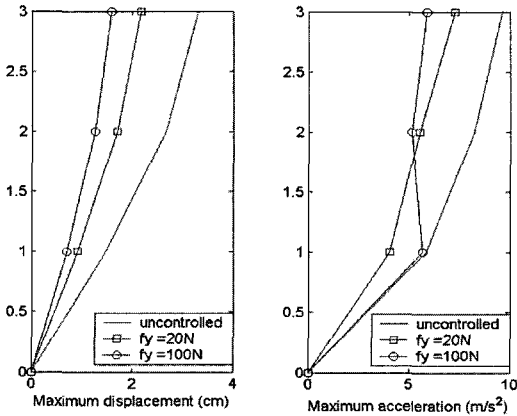



그림 20 층별 최대 응답: (a)변위, (b)가속도

5. 맺음말

지금까지 건축/토목 구조물의 제진장치로서 점차 그 적용사례가 증가하고 있는 마찰감쇠기의 특성과 제진 성능에 대해서 간단히 알아보았다. 사실상 마찰감쇠기의 역학적 특성은 컬럼 감쇠를 기본으로 하기 때문에 수식화 하기가 쉽고 실제 거동도 안정적으로 나오기 때문에 마찰감쇠기와 관련된 연구는 이 글에서도 일부 소개된 좌굴방지 메커니즘과 설계방법론에 집중된 경향이 있다. 특히 가장 중요한 설계변수인 슬립하중의 결정은 가속도 응답 내지는 이와 밀접한 관련이 있는 밀면전단력의 제어에 있어서 중요한 역할을 하며, 지진과 같이 많은 불확실성을 갖는 하중을 대상으로 하는 경우에는 하중의 확률적 속성과 맞물려서 보다 심도 깊은 연구가 지속적으로 수행되어야 하는 분야라고 할 수 있다. 최근 들어 전 세계적으로 강진에 의한 피해가 증가하고 있으

며, 이에 따라 국내에서도 2005년에 내진설계 규준이 크게 강화되었으며 점차 제진기술에 대한 관심이 높아져 가고 있다. 아무쪼록 본고를 통해 소음·진동 독자 여러분들께서 건축물의 제진기술에 대한 관심을 가질 수 있는 계기가 되었기를 바라면서 글을 맺는다. 

참고문헌

- (1) Soong, T. T. and Dargush, G. F., 1997, *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons.
- (2) Filiatrault A. and Cherry S., 1990, "Seismic Design Spectra for Friction-damped Structures", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, 1334~1355.
- (3) Mualla, I. H. and Belev, B., 2002, "Performance of Steel Frames with a New Friction Damper Device under Earthquake Excitation", *Engineering Structures*, Vol. 24, 365~371.
- (4) Li, C. and 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. National Center for Earthquake Engineering Research.
- (5) 민경원, 건설핵심기술 연구개발사업 연차실적 및 계획서, (2004) 철골조 시설물의 붕괴를 방지 하는 설치 용이한 경제적인 보강기구 개발, 과제 번호: C103A2000010-03A0200-01010, 2004.