

회전 마찰형 제진장치의 이력특성에 대한 실험적 연구

Experimental Study the on Hysteretic Characteristics of Rotational Friction Energy Dissipative Devices

박진영¹⁾ · 한상환²⁾ · 문기훈²⁾ · 이강석³⁾ · 김형준^{1)*}

Park, Jin-Young¹⁾ · Han, Sang Whan²⁾ · Moon, Ki-Hoon²⁾ · Lee, Kang Seok³⁾ · Kim, Hyung-Joon^{1)*}

¹⁾서울시립대학교 건축공학과, ²⁾한양대학교 건축공학과, ³⁾전남대학교 건축학부

¹⁾Department of Architectural Engineering, University of Seoul, ²⁾Division of Architectural Engineering, Hanyang University,

³⁾Department of Architecture, Chonnam National University

/ A B S T R A C T /

Friction energy dissipative devices have been increasingly implemented as structural seismic damage protecting systems due to their excellent seismic energy dissipating capacity and high stiffness. This study develops rotational friction energy dissipative devices and verifies experimentally their cyclic response. Based on the understanding of the differences between the traditional linear-motion friction behavior and the rotational friction behavior, the configuration of the frictional surface was determined by investigating the characteristics of the micro-friction behavior. The friction surface suggested in this paper consists of brake-lining pads and stainless steel sheets and is normally stressed by high-strength bolts. Based upon these frictional characteristics of the selected interface, the rotational friction energy dissipative devices were developed. Bolt torque-bearing force tests, rotational friction tests of the suggested friction interfaces were carried out to identify their frictional behavior. Test results show that the bearing force is almost linearly proportional to the applied bolt torque and presents stable cyclic response regardless of the experimental parameters selected this testing program. Finally, cyclic tests of the rotational friction energy dissipative devices were performed to find out their structural characteristics and to confirm their stable cyclic response. The developed friction energy dissipative devices present very stable cyclic response and meet the requirements for displacement-dependent energy dissipative devices prescribed in ASCE/SEI 7-10.

Key words: Rotational friction behavior, Energy dissipative devices, Brake-lining pads, Stainless steel sheet, Bolt torque

1. 서론

최근 들어 지진 발생 시 건물의 피해를 최소화 및 건물이용자의 사용성 개선을 위해 제진장치의 필요성이 대두되고 있다. 마찰 메커니즘은 비교적 높은 초기 강성으로 인하여 제진장치의 이력거동에 따른 에너지 소산을 극대화할 수 있다는 점에서 제진장치로 적용이 용이하다. 이러한 인식을 바탕으로 다양한 연구자들에 의해 마찰형 제진장치가 제시되었다. 대표적인 마찰형 제진장치로 건물 골조에 X형 브레이스 형태로 설치되는 폴 형(形)마찰 댐퍼(Pall et al, 1982)[1]는, 캐나다의 많은 구조물의 신축, 보강공사에 사용되었다. 그 후 슬롯 볼트 구멍을 이용한 마찰접합(FitzGerald et al., 1989)[2]이 개발되었는데, 건물 골조의 대각 브레이스와 거셋 플레이트의 접합부에 적용

되었다. 슬롯 홈을 이용하지 않는 마찰 댐퍼로서는 강재 실린더와 구리 마찰재로 구성된 마찰면의 피스톤운동을 이용한 제진장치(Soong and Dargush, 1997)[3]에 소개되었다. 앞에 소개된 마찰형 제진장치들은 모두 직선 마찰을 이용한 제진장치이다. 또 다른 마찰 거동인 회전마찰을 이용한 제진장치로는 볼트 체결부의 회전운동으로 거동하는 제진장치(Mualla and Belev, 2002)[4]가 있지만 회전마찰을 이용한 제진장치에 관한 연구는 직선 마찰을 이용한 제진장치의 연구보다 상대적으로 부족한 실정이다.

마찰형 이력거동을 이용하여 제진장치에 적용하기 위해서는 변위에 따라 일정한 마찰력을 유지하며 안정적인 이력거동이 보장되어야 한다. 하지만 일반적인 마찰형 제진장치는 반복가력 시 반복횟수가 증가하게 되면 마찰재의 마모에 의해 불안정한 마찰거동이 생기기도 하며, 마찰재의 마모로 인한 두께 감소가 마찰면에 지압력을 유발시키는 장치에 영향을 미쳐 마찰력을 감소시키기도 한다. 선택한 마찰재의 속성에 따라 속도의존성이 두드러질 수 있어 한 사이클 내에서도 마찰력이 변동을 보이기도 한다.

마모에 의해 생기는 부스러기 등은 마찰력의 급작스런 상승이나 현저한

*Corresponding author: Kim, Hyung-Joon

E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr

(Received 31 May 2013; Accepted 31 July 2013)

마찰력의 감소를 가져올 수 있으므로 안정적인 이력거동을 구현하기 어렵게 만든다. 동일한 금속재료간 마찰일 경우 장기간 수직압력이 작용된 상태에서 마찰거동이 발생하지 않을 경우 발생할 수 있는 냉용접현상(Cold Welding) 인한 마찰력의 불확실성 또한 발생할 수 있다. 따라서 이러한 마찰거동의 불안정성을 감소시키기 위한 노력이 필요하다.

Kim et al.[5], Christopoulos and Filiatrault[6], Bowden and Tabor[7], Rabinowicz[8], 에서는 마찰거동에 영향을 미치는 다양한 요인에 대한 보다 자세한 내용을 찾을 수 있다. Kim et al.[5]에서는 강판에 슬롯홀을 내어 전후운동을 할 수 있게 만든 마찰면에 볼트접합으로 지압력을 가한 후 반복 가력 실험을 통해 마찰거동을 관찰하였다. 제진장치의 마찰재로 브레이크 라이닝 패드- 연철(Mild Steel)을 사용한 경우와, 브레이크 라이닝 패드- 스테인레스 스틸을 사용한 경우를 비교하였고 마찰재의 차이에 따른 마찰거동의 차이를 관찰 할 수 있다. 그리고 Bowden and Tabor[7]과 Rabinowicz[8]에 기술된 마찰원리를 인용하여 실험체가 가지는 마찰거동의 특성을 설명하였다. Christopoulos and Filiatrault[6]는 마찰형 제진장치의 기본원리를 설명하면서 Bowden and Tabor[7]과 Rabinowicz[8]를 인용하여 마찰의 기본원리를 세가지 요소로 설명하고 있다. Bowden and Tabor[7]은 20세기 초 마찰, 마모, 윤활에 관한 학문(Tribology)의 대표적 연구자인 Bowden이 그 당시까지 확립된 해당분야의 이론을 정리한 문헌이다. 마지막으로 Rabinowicz[8]는 다양한 공학분야에서 응용되는 마찰, 마모, 윤활에 대한 원리를 Bowden을 비롯한 많은 연구자들의 연구결과를 토대로 설명한 문헌이다.

본 논문에서는 위의 문헌들을 토대로 안정적인 마찰거동을 유도할 수 있는 마찰면의 구성과 에너지 소산능력을 극대화 할 수 있는 제진장치 형상을 결정하였다. 본 연구에서 제안하는 제진장치의 마찰면은 브레이크 라이닝 패드로 널리 사용되는 마찰패드와 얇은 스테인리스 강판으로 구성되고, 마찰면에 가해지는 지압력은 일반 건설현장에서 널리 사용되는 고력볼트를 이용하였다. 다양한 사전 연구를 통하여 에너지 소산량을 극대화할 수 있고 요구 성능에 따라 제진장치의 성능 조절이 비교적 간편한 회전 마찰형 제진장치의 형상을 개발하여 하였으며, 이를 다양한 반복가력 실험을 통하여 성능을 입증하고자 한다.

이를 위하여 우선, 회전 마찰형 제진장치는 볼트 토크(Bolt torque)에 의한 볼트 인장력을 이용하여 마찰면에 지압력을 발생시키는 방식을 사용한다는 점에서, 볼트 토크가 마찰력을 결정하는 중요한 인자가 될 수 있다. 두 가지 지름을 가진 고력볼트(M16, M20)에 다양한 크기의 토크를 가력하여 측정되는 지압력을 관찰하는 볼트 토크-지압력 실험을 실시하였다.

볼트 토크-지압력 실험결과를 바탕으로 마찰면적이 다른 4개의 회전 마찰형 제진장치 실험체를 제작하여 만능시험기(Universal Test Machine, UTM)를 이용한 유사정적실험을 수행하여, 각 실험체의 마찰특성과 이력거동, 에너지 소산능력을 평가하였다.

2. 회전 마찰형 제진장치

2.1 마찰거동에 영향을 미치는 인자

마찰면에서 발생하는 마찰력은 거시적인 관점에서 아래 식 (1)의

Coulomb의 법칙을 사용하여 구하는 것이 일반적이다.

$$F = \mu N \tag{1}$$

여기서, F는 마찰력, μ 는 마찰계수, N은 마찰면에 작용하는 지압력이다. 마찰면의 마찰계수와 마찰면에 가해지는 지압력이 클수록 마찰력은 증가하게 된다. 안정적인 마찰거동을 위해서는 마찰운동 중 마찰면의 마찰계수와 마찰면에 가해지는 지압력이 일정하게 유지되어야 한다. 마찰계수는 마찰면의 구성에 의하여 결정되며, 지압력은 마찰재와 지압력을 발생시키는 메커니즘의 상호작용에 의해서 결정된다. 거시적인 측면에서 마찰력은 일반적으로 식 (1)과 같이 간단하게 정의할 수 있지만, 미시적인 관점에서 보면 매우 복잡한 현상들에 의해 영향을 받게 된다.

미시적인 관점에서, 마찰력은 갈림작용에 의해 생기는 마찰력(Ploughing Component)과 접합 현상에 의해 생기는 마찰력(Adhesion Component), 그리고 두 마찰면 이외의 이물질에 의하여 생기는 마찰력(Third Bodies Component)으로 구성된다[6-8].

이 중 갈림작용은 표면의 거칠기로 인한 것과 경도가 큰 마찰재가 상대적인 경도가 작은 마찰재를 파고드는 현상으로 설명할 수 있다. 표면의 거칠기로 인해 생기는 마찰력은 Fig. 1(a)를 통해 설명된다. 마찰면의 표면이 서로 거칠 때 물체 2 위를 마찰하여 운동하는 물체 1의 위치는 표면을 따라 오르내리는 현상을 반복하게 되면서 마찰력이 발생하게 된다. 이와 달리, 파고들 현상은 Fig. 1(b)와 같이 경도가 큰 물체 1이 경도가 상대적으로 작은 물체 2 표면의 일부를 파고드는 현상이다. 파고들 현상은 마찰력의 갑작스러운 저하이후에 마찰력의 급격한 상승을 일으킨다. 파인 홈으로부터의 파편들이 마찰경로에 축적되면 마찰면이 그 축적된 파편을 넘는 과정에서 불안정한 마찰거동을 발생시키기도 한다. 따라서 안정적인 마찰거동을 위해서 갈림작용에 의한 마찰력을 최소화 시켜야 하는데, 이를 위해 마찰표면을 구성하는 마찰재들의 표면을 매끈하고 부드럽게 처리하여야 한다. 갈림작용은 마찰면을 구성하는 두 마찰재료 중 더 단단한 마찰재의 편평도와 더 무른 재료의 파편과 직접적인 관련이 있다.

Fig. 2에서 도식화하여 보여주고 있는 접합 현상은 마찰면 사이에 실제 접촉면이 순간적으로 일체화 되는 현상이다. 마찰면을 형성하는 마찰재 사이에서 발생하는 마찰력은 실제 접촉면적에 의해 결정된다. 마찰력 이상의

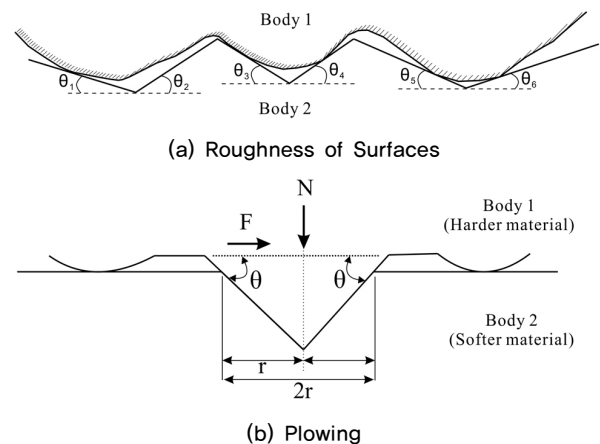


Fig. 1. Ploughing Component(Kim et al.[1])

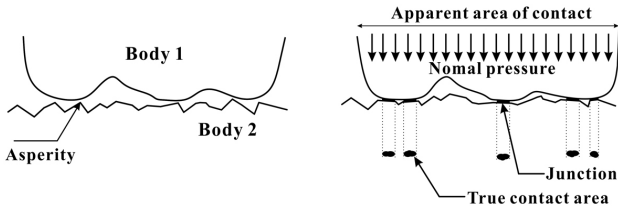


Fig. 2. Adhesion Component(Kim et al.[1])

하중이 마찰면에 가려지면 미끄러짐이 발생하게 된다. 표면이 평탄한 마찰재를 일수록 실제마찰면적이 증대되어 마찰력이 증가하게 됨을 알 수 있다.

이물질에 의한 작용은 마찰재의 파편이나 부스러기 또는 얼룩 등에 의한 마찰면의 특성 변화와 관련 있다. 예를 들어, 마찰 거동 중 구형의 마찰재 파편이 발생하면 실제 마찰면적이 현저하게 감소하게 되어 마찰력이 저하된다. 이와 반대로 거친 모양의 마찰재 파편이 마찰면 사이에 존재하게 되면 파편이 마찰면을 파고들면서 마찰력이 증가할 수 있다. 마찰거동 중 마찰재의 마모로 인한 파편 또는 부스러기가 생기는 경우에는 마찰력에 미치는 영향을 판단하기 어렵기 때문에, 마찰재의 마모를 최소화하거나 매우 고온 파편이 발생할 수 있는 마찰재의 선택이 안정적인 마찰거동에 있어 매우 중요하다[6-8].

마찰력에 영향을 미치는 요소로는 언급한 세 가지 요소 외에도 냉용접현상, 속도의존성 또한 마찰거동에 영향을 미친다. 냉용접현상은 재질이 서로 유사한 마찰재가 오랜 시간동안 압착 되었을 때, 두 마찰재 사이의 분자 교환이 일어나 서로 일체화되는 현상을 말한다. 냉용접된 마찰면에 미끄러짐이 발생하기 위해서는 냉용접에 의한 강한 접합력 이상의 마찰력이 순간적으로 재해되어야 하기 때문에 충격하중과 같은 최대정지마찰력이 발생하게 된다. 마찰재의 미끄러짐 속도 또한 마찰력에 영향을 주는 인자이다. 미끄러짐 속도가 빠를수록 마찰력은 저하되는데, 운동 마찰력이 정지 마찰력 보다 작은 것이 일반적이다. 이와 같은 마찰거동의 속도의존성은 안정적인 마찰거동이 요구되는 마찰형 제진장치에서 제어되어야 할 중요한 인자이다.

2.2 마찰면의 구성

Pall et al.[1]은 다양한 마찰 표면처리에 따른 마찰 실험을 수행하였다. 12.7mm 직경의 고장력 볼트를 사용하여 동일한 지압력을 부과한 상태에서 다양한 마찰면에 대한 마찰실험을 실시하였다. 5가지 종류(Mill scale, Sand blasted, Inorganic zinc paint, Metallized, Polyethylene coating)의 표면처리를 한 강재-강재로 구성된 마찰면과 브레이크 라이닝 패드를 마찰재로 사용한 마찰면에 마찰거동을 조사하였다. 폴리에틸렌 코팅을 한 강

재-강재 마찰면을 제외한 나머지 마찰면은 불안정한 마찰거동을 보였으며, 폴리에틸렌 코팅을 한 강재-강재 마찰면에서는 비교적 안정적인 마찰거동을 보였으나 마찰력이 현저히 낮은 것으로 나타났다. 그러나 브레이크 라이닝 패드를 마찰재로 사용한 마찰면에서는 거의 직사각형의 이력형상을 보여 매우 안정적인 마찰거동을 하는 것으로 나타났다. 하지만, Pall et al.[1]의 실험에 사용한 브레이크 라이닝 패드는 석면을 사용한 제품으로서 제조 과정에 심각한 환경 문제를 야기시킬 수 있다.

석면 브레이크 라이닝 패드의 환경적인 문제점을 해결하기 위하여 비석면 유기체(Non-asbestos Organic Material 이하, NAO)를 사용한 브레이크 라이닝 패드가 일반적으로 사용되고 있다. Kim et al.[5]은 세 가지 재질(NF-916, NF-780, NF-330)의 NAO와 얇은 스테인리스 강판으로 구성된 마찰면의 마찰실험을 실시하였으며, Fig. 3은 실험결과이다. 실험체는 안정적인 마찰거동과 내구성 및 내부식성을 확보하기 위하여 표면이 매끄러운 1.5mm 두께의 스테인리스 강판에 NAO 재질의 마찰패드 맞대고 이를 3/4in(19.1mm) ASTM A325 고장력 볼트를 일반 마찰접합 방식(Snug-tightening method)에 따라 볼트 토크를 가려하여 마찰면에 지압력을 재하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고력볼트를 사용하여 지압력을 재하한 브레이크 라이닝 패드- 스테인리스 강판으로 구성된 마찰면은 매우 안정적인 이력거동을 하는 것으로 나타났다. 이는 매끄러운 스테인리스 강판을 사용하여 갈림작용이 최소화되고 마찰면을 구성하는 두 마찰재의 확연한 경도 차이로 인하여 경도가 작은 마찰재에 변형이 집중되어 실 접촉면적이 증대되었기 때문이다. 뿐만 아니라, 마찰거동 도중 발생하는 마찰재의 파편은 매우 고온 가루 형태로 이물질에 의한 영향도 최소화되었기 때문이다.

Kim et al.[5]의 실험결과를 이용하여 본 연구에서는 안정적인 회전 마찰거동을 구현하기 위하여 Fig. 4(a)의 NAO를 이용한 브레이크 라이닝 패드로 만든 마찰패드와 Fig. 4(b)의 내측 강판에 용접된 스테인리스 강판을 이용하여 마찰면을 구성하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이, 마찰 패드는 4분원으로 나뉘어 Fig. 4(c)에서 보이는 외측 강판의 2mm 깊이 홈에 끼울 수 있도록 제작하였다. 강재 강판에 파진 홈은 마찰패드가 마찰거동 중 마찰면을 이탈하지 않게 고정시키는 역할과 함께, 높은 지압력에 장기간 노출되

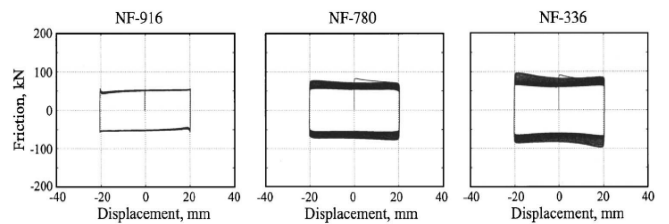


Fig. 3. Test results of friction pad on repeated loading(Kim et al.[1])

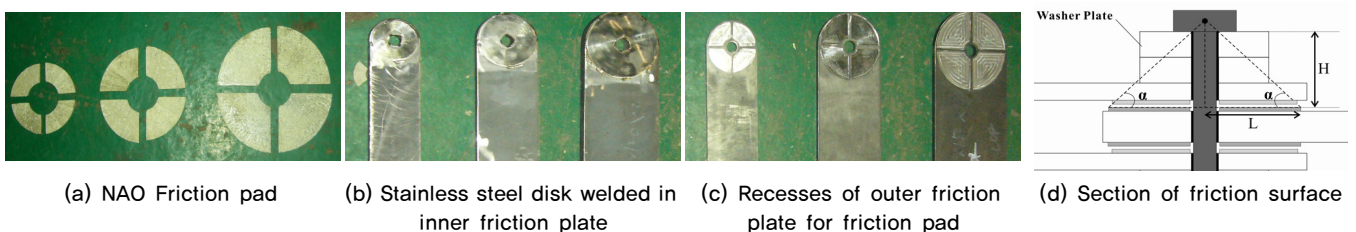


Fig. 4. Elements of friction surface

있을 때 발생할 수 있는 마찰패드의 변형을 방지하는 역할을 한다.

Fig. 4(d)는 마찰면을 구성하는 모든 요소를 볼 수 있는 단면도이다. 고력볼트의 머리로부터 와서 판, 외측 강판, 외측 강판에 끼워진 마찰패드, 내측 강판에 용접된 스테인리스 강판, 내측 강판이 상부 마찰면을 형성하고 이와 대칭으로 하부 마찰면이 형성됨을 알 수 있다. 볼트를 체결한 상태에서 지압력을 균등하게 마찰표면에 분포시키기 위하여 외 같이 볼트 머리와 마찰면과의 수직거리를 충분히 확보하여야 한다. 수직거리가 충분하지 않으면, 마찰면에 가해지는 지압력의 편차가 심하게 된다. 이럴 경우, 볼트 주변의 마찰면만 높은 지압력이 재하됨에 따라 불균등한 마찰면 마모가 발생하고 극한 상황에서는 마찰면이 기울어지게 되어 안정적인 마찰거동을 확보할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 볼트 머리 중심에서 수직방향으로 45° 각도로 지압력이 분포된다고 가정하고, 수직거리를 확보하기 위하여 와서 판을 사용하였다.

2.3 회전마찰형 제진장치의 형상

안정적인 회전 마찰거동을 유도할 수 있는 마찰면의 구성을 이용하여 회전 마찰형 제진장치의 형상을 아래 Fig. 5와 같이 고안하였다. 제안된 회전 마찰형 제진장치는 회전 마찰거동에 의한 에너지 소산능력을 극대화할 수 있으면서, 제진 구조물의 설계 자유도를 증대시킬 수 있도록 자유로이 제진 장치의 성능을 조절할 수 있는 형상을 가지고 있다.

회전 마찰형 제진장치는 양 끝단에서 수직방향변위가 발생하였을 때, 회전변형이 발생할 수 있도록 가위모양 부재와 가위모양 부재 내부와 가위모양 부재와 상하 부재를 연결부에 위치한 관절부로 구성되어 있다. 앞 절에서 제안하는 마찰면은 회전변형이 발생하는 관절부에 적용된다. 아래 좌·우측 그림은 각 각 제진장치에 압축/인장 변형이 발생하였을 때 변형 형상으로 압축변형 시 가위모양 부재의 내부 각이 줄어들면서 관절부에 회전변형이 발생하게 되는 반면, 인장변형 시에는 가위모양 부재의 내부 각이 커지게 되어 반대 방향의 회전변형이 발생하게 된다.

이러한 형상의 특징은 요구되는 제진장치의 성능(제진장치의 작동 하중과 한계 변형량)을 비교적 수월하게 만족시킬 수 있다는 점이다. 장치의 작동 하중(Activating load)은 마찰면에 재하되는 지압력의 크기 뿐만 아니

라 가위모양 부재의 개수(그림에서는 4개를 사용하고 있음) 이용하여 조절할 수 있다. 제진장치의 한계 변형량 또한 가위모양 부재의 내부 각을 이용하여 조절할 수 있다.

3. 볼트 토크와 지압력 상관관계

3.1 볼트 토크-지압력 실험

식 (1)에서와 같이 마찰거동에 있어 마찰력을 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나는 마찰면에 가해지는 지압의 크기이다. 본 연구에서 제안하는 회전 마찰형 제진장치는 볼트에 가해지는 토크에 의해 마찰면에 가해지는 지압력이 결정되기 때문에, 볼트 토크에 따른 마찰면에 가해지는 지압력을 측정할 필요가 있다.

볼트 토크에 따른 지압력은 로드셀을 사용하여 측정하였다. 사용된 볼트는 회전 마찰형 제진장치의 크기와 제진장치의 유사정적 실험에 사용될 UTM의 용량 등을 고려하여 16mm와 20mm 직경의 고력볼트, M16과 M20이다. 실험실 여건을 고려하여 볼트 길이는 마찰 댐퍼에 사용할 볼트의 길이와 유사한 M16은 113mm, M20은 134mm으로 하였다.

실험에 사용된 볼트는 전자식 토크렌치를 사용하여 150, 200, 250, 300, 320N·m를 순차적으로 가력하였다. 이와 함께, 현장에서 주로 사용하는 Turn-of-nut 볼트 체결 시 지압력도 측정하였다. Turn-of-nut 볼트 체결은 Snug-tightening 상태에서 추가적으로 1/8 턴을 하여 마찰면에 지압력을 재하하였다. Turn-of-nut 방식으로 체결한 경우와 300N·m 이상을 가력한 경우에 대해서는 볼트가 항복할 수 있음을 감안하여 새로운 볼트를 사용하여 지압력을 측정하였다. 마찰면에 가해지는 지압력의 변동성을 고려하여 Turn-of-nut 체결방식에서는 3번 반복실험을 수행하였으며, 나머지 토크 값에 대해서는 10번 반복실험을 수행하였다.

3.2 볼트 토크-지압력 실험결과

Table 1의 볼트 지압실험결과에서 보듯이 토크가 증가할수록 평균 지압력과 지압력에 대한 표준편차 또한 증가함을 알 수 있다. Turn-of-nut 방식에 의해 토크를 가력한 경우 평균 지압력은 320N·m 가력했을 때에 비하여 증가하였으나, 표준편차는 줄어들었다. 이와 같은 현상은 Turn-of-nut 방



Fig. 5. Configuration of rotational friction damper

Table 1. Normal pressure resulted from bolt-torque

	Bolt torque, N·m					
	150	200	250	300	320	Full
M16-113mm Bolt pressure, kN						
Mean	53.1	67.4	83.0	95.4	99.4	101.8
Stdev	6.1	8.8	9.7	13.8	15.0	4.7
M20-113mm Bolt pressure, kN						
Mean	43.3	57.4	72.7	86.7	92.9	
Stdev	1.7	2.6	5.0	4.9	5.7	
M20-134mm Bolt pressure, kN						
Mean	44.3	60.0	74.2	88.4	92.3	118.6
Stdev	2.2	4.1	5.2	5.7	9.6	1.4

식으로 토크를 가력했을 때 볼트가 항복하였기 때문에 판단된다[9]. M20 고력볼트를 사용한 경우, 볼트길이가 길수록 평균 지압력이 약간 증가하였지만, 표준편차 또한 증가하여 볼트 길이 113mm의 실험체가 보다 안정적인 지압력을 확보할 수 있는 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 길이가 113mm 인 M16과 M20 볼트의 평균지압력과 토크와

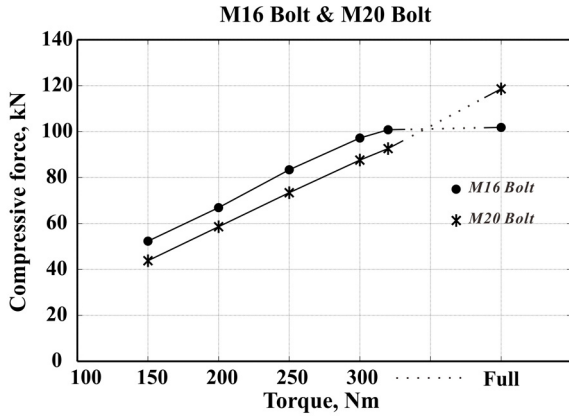


Fig. 6. Comparison of test results between M16 bolt and M20 bolt

의 관계로 선형 비례관계를 확인할 수 있다. 일반적으로 사용하는 지압력과 토크와의 다음 상관관계 식을 사용하면

$$T = k \cdot d_1 \cdot N \quad (2)$$

토크계수를 구하면, M16볼트는 0.19, M20볼트는 0.17로 나타났다. 여기서, 는 볼트에 가력한 토크이며, 는 볼트의 직경, 는 지압력이다. M16 볼트를 Turn-of-nut 방식을 적용한 실험체는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 320N·m 토크를 가력할 때부터 그래프의 기울기가 감소하여 볼트가 항복을 했을 것으로 판단된다.

4. 회전 마찰계수 평가

4.1 회전 마찰 실험

식(1)에서 보는 바와 같이 지압력과 함께 마찰력을 결정하는 변수는 마찰계수이다. 제안된 마찰면의 마찰계수를 측정하기 위해서 만능시험기를 이용하여 반복가력 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 변위시간이력

Table 2. Properties of rotational friction specimens and test results of friction coefficient test

Specimens	Angle °	Bolt		Friction pad		F _s , kN	P, kN	L, mm	l, mm	μ
		Size	Torque, N · m	Inner Diameter a, mm	Outer Diameter b, mm					
FC16S-1-A60	60	M16	200	30	64	9.25	67.4	259.8	47	0.193
FC16S-2-A60			300		64	16.4	95.4			0.242
FC16S-3-A60			Full		64	15	101.8			0.208
FC16L-1-A60		M16	200		84	10.65	67.4			0.190
FC16L-2-A60			300		84	14.65	95.4			0.184
FC16L-3-A60			Full		84	16.85	101.8			0.199
FC20S-1-A60		M20	200		114	6.2	60		0.101	
FC20S-2-A60			300		114	8.55	88.4		0.095	
FC20S-3-A60			Full		114	22	118.6		0.181	
FC20L-1-A60		M20	200		144	8.9	60		0.127	
FC20L-2-A60			300		144	12.25	88.4		0.119	
FC20L-3-A60			Full		144	22.4	118.6		0.162	
FC16S-1-A90	90	M16	200	30	64	9.45	67.4	212.1	47	0.161
FC16S-2-A90			300		64	20.05	95.4			0.242
FC16S-3-A90			Full		64	15	101.8			0.170
FC16L-1-A90		M16	200		84	12.35	67.4			0.180
FC16L-2-A90			300		84	20.5	95.4			0.211
FC16L-3-A90			Full		84	20.3	101.8			0.196
FC20S-1-A90		M20	200		114	6.9	60		0.092	
FC20S-2-A90			300		114	10.9	88.4		0.098	
FC20S-3-A90			Full		114	16.3	118.6		0.110	
FC20L-1-A90		M20	200		144	7.55	60		0.088	
FC20L-2-A90			300		144	16.35	88.4		0.129	
FC20L-3-A90			Full		144	32.2	118.6		0.190	

Full: Turn of nut method

(Displacement protocol)은 오른쪽 그림과 같이 10사이클의 45mm 강제 변위를 사용하였다. 가력 속도는 만능시험기의 성능을 고려하여 0.005Hz 로 고정하였다.

실험체는 서로 마주보는 두 개의 가위모양 부재를 사용하였으며, 그림에서 보이는 6 곳의 관절부 중 중앙부 두 곳에만 본 연구를 통하여 제한한 마찰 면을 설치하였다. 상하 부재와 가위모양 부재를 연결하는 4 곳의 관절부에는 핀 접합을 구현하여 마찰력이 발생하지 않도록 강판이 맞닿는 부분에 마찰계수가 매우 낮은 테프론(Teflon)을 위치시켰으며, 사용한 볼트에 기인 장력(Preload)를 재하지 않았다. 6 곳의 관절부의 볼트 구멍은 볼트 직경보다 1mm 크게 제작하여 설치가 용이하도록 하였다. Table 2는 회전 마찰 실험에 사용한 시험체와 실험 변수를 정리한 것으로, 마찰력에 영향을 줄 수 있는 가위모양 부재의 내부각, 볼트의 크기, 가력 토크, 4분절된 마찰패드의 내 외측 직경을 실험변수로 선택하였다.

4.2 회전 마찰 실험결과 분석

회전 마찰 실험을 통하여 제한된 마찰면의 마찰계수와 마찰거동의 안정성을 확인하고자 반복가력 실험을 실시하였으며, 이 중 가위모양 부재의 내부 각이 90도인 실험체의 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다 그림에서 보는 바와 같은 마찰면의 이력거동 형태와 안정성을 확인할 수 있었다. 하중의 방

향이 바뀌는 시점에서 슬립이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 테프론을 이용한 핀접합에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 핀 접합부에 발생하는 슬립 현상을 제외하면 모든 실험체의 마찰거동은 사이클에 따라 유사한 에너지 소산면적을 가지는 안정적인 이력거동을 보였다. 또한 강재-강재로 구성된 마찰면에서 주로 관찰되는 사이클 수의 증가에 따른 급격한 마찰력의 저감 이 거의 발생하지 않았으며, 영변위에서 마찰력이 감소되는 사이클 내 속도 의존성도 거의 없는 것으로 나타나, 안정적으로 지진에너지를 소산하는 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

회전 마찰 실험을 통하여 제한된 마찰면의 마찰계수를 직접적으로 얻을 수 없기 때문에 Fig. 8과 같은 회전 마찰 거동의 역학적인 특성과 지압응력 분포를 이용하였다[10]. 회전 마찰 실험결과로부터 영변위에서 측정된 평균 마찰력 F_s 로부터 마찰면에 작용하는 모멘트 $M_s = F_s \cdot L$ 를 계산하고 이를 바탕으로 마찰면의 회전 마찰계수 μ 를 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$\mu = \frac{F_s L}{16\pi c P l^2 \int_a^b \frac{x^2}{x^2 + l^2 \sqrt{x^2 + l^2}} dx} \tag{3}$$

$$c = \frac{1}{4\pi l^2 \int_a^b \frac{x}{x^2 + l^2 \sqrt{x^2 + l^2}} dx} \tag{4}$$

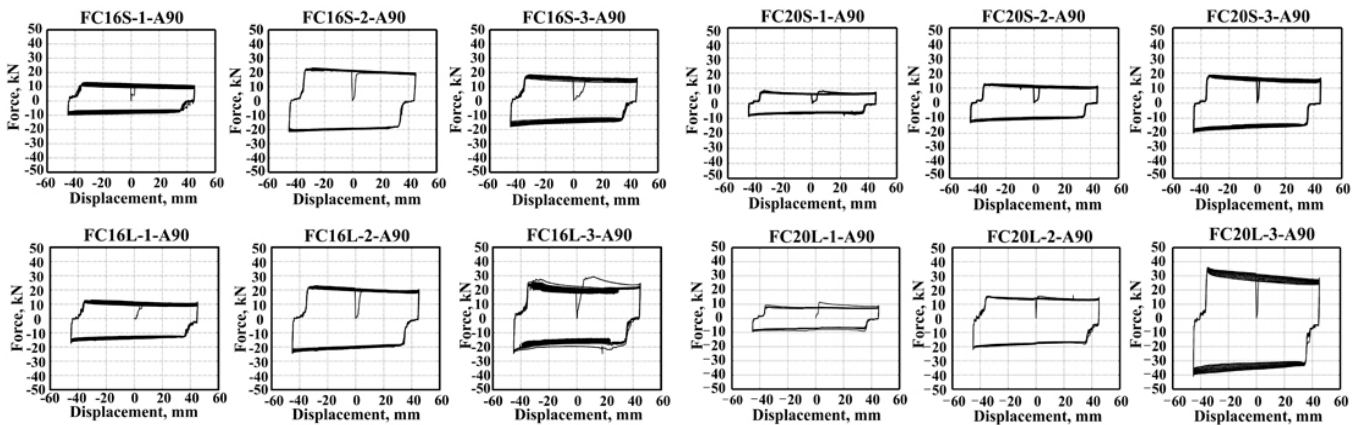


Fig. 7. Results of friction coefficient test of specimens set with angle 90°

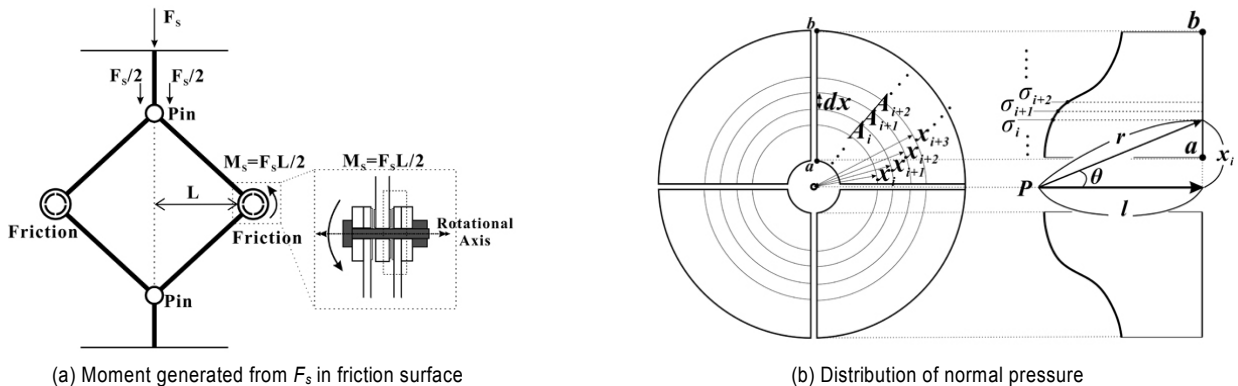


Fig. 8. Distribution of normal pressure in friction pad

식 (3)를 이용하여 구한 마찰면의 마찰계수를 Table 2에 정리하였다. M16볼트를 사용한 실험체가 M20볼트를 사용한 실험체에 비하여 볼트 토크에 상관없이 균등한 마찰계수를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 M16볼트를 사용한 실험체 중 마찰 패드의 면적이 클수록 마찰계수가 일정하게 유지되어 마찰 패드의 면적이 마찰계수에 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, 회전 마찰 실험체의 내부각이 마찰계수에 미치는 영향은 미미하였다. 결론적으로, M16볼트를 사용한 실험체의 평균마찰계수는 약 0.20인 반면, 200 또는 300N·m로 체결한 M20볼트를 사용한 실험체의 평균마찰계수는 0.11이고, Turn-of-nut 방식으로 체결한 M20볼트를 사용한 실험체의 평균 마찰계수는 0.16이었다.

5. 제진장치의 성능실험

5.1 회전 마찰형 제진장치 실험

제진장치의 성능을 확인하기 위하여 반복가력 실험을 실시하였다. 앞서 언급한 회전 마찰 실험체에서 사용한 설치방법과 가력방법을 이용하여 제진장치의 성능 확인 실험을 수행하였으나, 가위모양 부재 내부의 마찰면에

서만 마찰거동이 발생하도록 계획된 회전 마찰 실험과 달리, 제진장치에는 실험체 내 모든 관절부에 마찰거동이 가능하도록 실험체를 계획하였다.

제진장치의 성능 실험에 사용된 실험변수는 Table 3에서 정리된 것처럼 회전 마찰형 제진장치의 성능에 영향을 줄 수 있는 볼트의 크기와 토크, 마찰 패드의 면적이다. 제진장치 성능실험에서는 회전 마찰 실험에서 실험변수로 사용한 내부각은 90도로 고정하였고, 총 4개의 가위모양 부재를 사용하였다. 이를 바탕으로 총 12개의 실험체를 제작하였다.

5.2 회전 마찰형 제진장치 성능실험 결과

회전 마찰형 제진장치의 성능실험결과는 실험변수와 함께 Table 3에 정리하였다. 또한 표에는 ASCE/SEI 7-10[11]의 18.9.5.1에 제시된 마찰형 제진장치에 대한 요구사항과의 적합성을 판단할 수 있도록 영변위, 최대 압축변위, 최대 인장변위에서 각각 측정된 마찰력의 평균값들과 그 지점에서 측정된 최대 마찰력, 최소마찰력과의 차이를 퍼센트로 표시하고 있고, 마찰 거동에 의한 이력곡선면적으로 계산된 한 사이클 내 최대/최소 소산에너지량과 평균 소산에너지량과의 차이를 퍼센트로 표시하고 있다. 모든 실험체는 ASCE/SEI 7-10[11]에서 제시하고 있는 오차의 기준인 15% 미만의 편

Table 3. Suitability evaluation of rotational friction damper at zero, maximum tensile and at maximum compression displacement

Specimen	Bolt		Friction pad		Slip force at zero disp.				Slip force at (-)maximum disp.				Slip force at (+)maximum disp.				Dissipated energy, kN · mm	
	Size	Torque N · m	Inner dia. mm	Outer dia. mm	Tensile load, kN		Comp. load, kN		Tensile load, kN		Comp. load, kN		Tensile load, kN		Comp. load, kN			
					Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min		
FR16S-1	M16	200	30	64	35.8	32.3	-37.6	-33.6	40.2	35.1	-45.0	-42.4	34.5	31.0	-35.0	-31.8	6497.4	5892.6
					5.4%	4.9%	4.8%	6.4%	12.9%	1.4%	5.1%	0.9%	9.5%	1.6%	7.4%	2.5%	8.6%	1.5%
FR16S-2	M16	300	30	64	60.9	58.0	-57.8	-55.3	63.1	58.8	-67.3	-66.3	57.8	55.0	-53.5	-44.3	10151.4	9424.8
					2.5%	2.4%	2.2%	2.3%	4.3%	2.8%	0.7%	0.7%	2.5%	2.5%	10.3%	8.7%	4.1%	3.4%
FR16S-3	M16	Full	30	64	65.1	55.8	-58.1	-48.0	56.3	55.5	-66.5	-56.0	61.0	51.0	-44.5	-42.5	9588.6	8610
					6.6%	8.7%	8.4%	10.4%	0.7%	0.7%	5.6%	11.1%	8.9%	8.9%	4.2%	0.5%	4.9%	5.8%
FR16L-1	M16	200	30	84	50.8	43.9	-46.1	-37.9	51	48	-54.8	-47.0	50.0	42.0	-36.5	-34.0	8076.6	7182
					7.0%	7.5%	9.9%	9.5%	3.2%	2.8%	6.0%	9.1%	8.7%	8.7%	4.3%	2.9%	5.6%	6.1%
FR16L-2	M16	300	30	84	73.9	69.6	-81.9	-76.9	71.7	63	-95.0	-88.0	72.0	68.5	-73.0	-67.0	13091.4	12033
					2.8%	3.2%	3.5%	2.8%	6.5%	6.4%	3.3%	4.3%	4.2%	0.9%	4.3%	4.3%	4.5%	4.0%
FR16L-3	M16	Full	30	84	75.9	70.2	-71.1	-65.27	76.8	74.4	-86.0	-81.5	74.0	69.2	-59.4	-57.5	12440.4	11869.2
					3.7%	4.1%	3.5%	5.0%	1.2%	2.0%	4.4%	1.1%	2.8%	3.9%	1.4%	1.9%	2.5%	2.2%
FR20S-1	M20	200	30	114	28.8	27.0	-37.0	-36.0	26.7	25.5	-45.2	-43.7	29.8	27.5	-33.9	-32.3	5695.2	5418
					4.9%	1.9%	0.2%	2.7%	2.7%	1.9%	1.6%	1.8%	4.6%	3.5%	3.4%	1.5%	2.9%	2.1%
FR20S-2	M20	300	30	114	51.0	48.1	-47.0	-44.6	54	47	-59.0	-52.5	51.0	48.0	-43.5	-36.0	8715	7707
					3.3%	2.5%	3.0%	2.4%	7.8%	6.2%	8.9%	3.1%	3.0%	3.0%	10.1%	8.9%	7.3%	5.1%
FR20S-3	M20	Full	30	114	84.4	79.0	-76.5	-71.3	85.5	78	-95.0	-83.0	85.0	77.0	-67.0	-55.0	13965	12306
					3.1%	3.5%	3.8%	3.4%	4.3%	4.9%	6.7%	6.7%	6.0%	4.0%	10.9%	8.9%	6.7%	6.0%
FR20L-1	M20	200	30	144	35.3	32.8	-41.6	-39.5	35	33	-51.0	-49.0	35.0	33.0	-35.5	-33.5	6468	6174
					4.3%	3.0%	1.5%	3.6%	2.9%	2.9%	2.0%	2.0%	2.9%	2.9%	4.4%	1.5%	2.7%	2.0%
FR20L-2	M20	300	30	144	72.8	68.	-65.0	-60.3	74	67.3	-80.0	-72.0	74.0	67.3	-57.0	-52.0	11844	10890.6
					3.4%	2.6%	3.8%	3.7%	4.7%	4.7%	5.3%	5.3%	4.7%	4.7%	7.5%	1.9%	4.8%	3.7
FR20L-3	M20	Full	30	144	128.4	117.6	-118.6	-107.8	128	117	-145.0	-130.0	128.0	117.0	-105.0	-99.0	21084	19530
					4.2%	4.6%	5.1%	4.4%	4.5%	4.5%	5.5%	5.5%	4.5%	4.5%	2.9%	2.9%	3.8%	3.8%

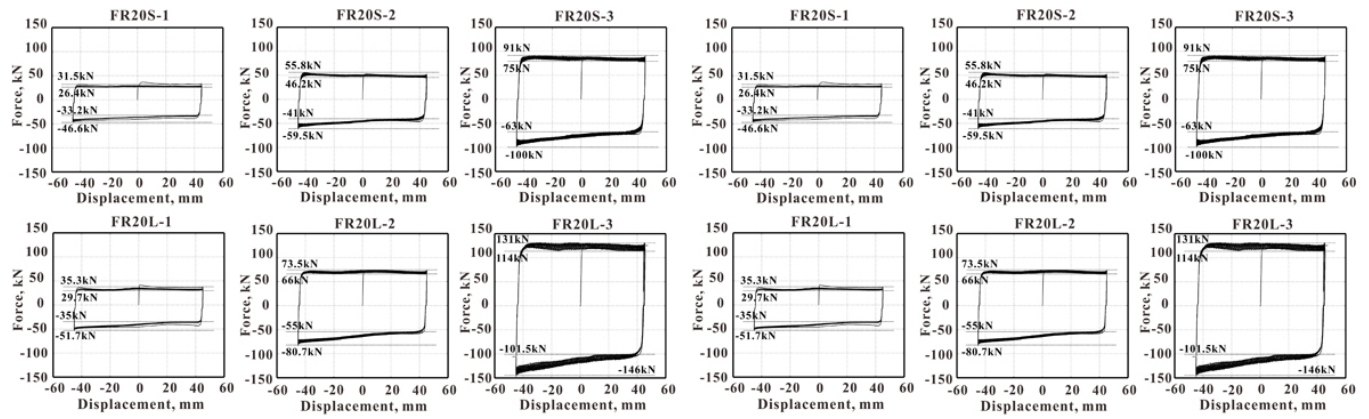


Fig. 9. Hysteresis of rotational friction damper

차를 보여 제진장치로서의 요구조건을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만, 본 연구의 제진장치 성능실험은 적용대상 구조물을 결정하지 않은 상태에서 수행하는 것으로 실제 적용을 위해서는 표본 구조물에 대한 동적특성과 지진응답변위를 고려한 추가적인 실험 등이 필요할 수도 있다.

회전 마찰형 제진장치의 이력곡선은 Fig. 9에 나타내었다. 그림에는 실험을 수행하는 동안 측정된 인장과 압축측에서 최대 및 최소 마찰력 또한 표시하였다. 회전 마찰 실험결과로부터 예상할 수 있는 것처럼, 실험에서 사용한 변수에 상관없이 모든 제진장치 실험체가 매우 안정적인 마찰거동을 보였다. 사용 볼트의 크기가 증가할수록, 마찰패드 면적이 클수록, 볼트 토크가 증가할수록 마찰력은 증가하는 반면, 전반적으로 사이클이 진행함에 따라 발생하는 마찰력 저감 또한 증가함을 알 수 있다. 하지만, 마찰력 저감은 강재-강재로 구성된 마찰면에 비하여 무시할 수 있는 수준으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 회전 마찰형 제진장치를 개발함에 있어, 안정적인 마찰거동을 할 수 있는 마찰면을 제안하고, 이를 이용한 제진장치를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 마찰면의 이력거동에 영향을 줄 수 있는 인자에 대한 영향을 파악하고자 볼트 토크-지압력 실험과 회전 마찰 실험을 수행하였다. 회전 마찰 실험 결과를 분석하여 제진장치 성능 파악을 위한 실험체를 제작하고 정적 반복가력시험을 통하여 제진장치의 반복응답성능을 파악하였다. 이상을 실험적 연구를 통하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 볼트 토크-지압력실험: 실험한 M16과 M20 볼트의 평균지압력과 토크는 선형비례관계가 보였으며, 토크가 증가할수록 평균지압력과 지압력에 대한 표준편차가 증가하였다. 단, Turn-of-nut 방식에 의해 토크를 가력한 경우 평균지압력은 320N·m 가력했을 때에 비하여 증가하였으나, 표준 편차는 줄어 들었는데, 이는 Turn-of-nut 방식으로 토크를 가력했을 때 볼트가 항복 하였기 때문으로 판단된다.
- 2) 회전 마찰 실험: 모든 실험체의 마찰거동은 사이클에 따라 유사한 에너지 소산면적을 가지는 안정적인 이력거동을 보였다. 사이클 수의 증가에 따른 급격한 마찰력의 저감이 거의 발생하지 않았으며, 영변위에서

마찰력이 감소되는 사이클 내 속도의존성도 거의 없는 것으로 나타났다. 간접적인 방법에 의하여 측정된 평균마찰계수는 M16볼트를 사용한 실험체는 약 0.20, 200 또는 300N·m로 체결한 M20볼트를 사용한 실험체는 0.11, Turn-of-nut방식으로 체결한 M20볼트를 사용한 실험체는 0.16이었다.

- 3) 회전 마찰형 제진장치 성능실험: 회전 마찰형 제진장치는 실험 변수에 상관없이 매우 안정적인 마찰거동을 보였다. 사용 볼트의 크기가 증가할수록, 마찰패드의 면적이 클수록, 볼트 토크가 증가할수록 마찰력은 증가하는 반면, 마찰력 저감은 무시할 수 있는 수준으로 평가되었다. 따라서, 제안된 회전 마찰형 제진장치는 ASCE/SEI 7-10[11]에서 제시하고 있는 마찰형 제진장치에 대한 요구조건을 만족하는 것으로 나타났다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학연공동기술개발사업(No. 00045373-1)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

/ REFERENCES /

1. Pall AS, Marsh C. Response of Friction Damped Braced Frames, J. Struct. Div., ASCE, 1982 Jun;108(ST6):1313-1323.
2. FitzGerald TF, Anagnos T, Goodson M, Zsutty T. Slotted Bolted Connections in Aseismic Design for Concentrically Braced Connections, Earthquake Spectra, 1989 May;5(2):383-391.
3. Soong TT, Dargush GF. Passive energy dissipation systems in structural engineering. Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England: John Wiley and Sons Ltd; c1997; p.83-90.
4. Mualla IH, Belev B. Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation, Engineering Structures Elsevier, 2002;24:365-371.
5. Kim HJ, Christopoulos C, and Tremblay R. Experimental characterization of bolt stressed non asbestos organic(NAO) material-to-steel interfaces Report, Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, Canada; c2004; p.6-30.

6. Christopoulos C, Filiatrault A. Principles of passive supplemental damping and seismic isolation, Italy: IUSS press; c2007. Chapter 5, Metallic and Friction (Hysteretic) Dampers; p.113–35.
7. Bowden FP, Tabor D. Friction: an introduction to tribology. Anchor Press, Garden city, New York, U.S.A. c1973; 1–24.
8. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. New York, U.S.A: John Wiley & Sons, Inc; c1996. Chapter 4, Friction; p.65–121.
9. Kulak GL, Fisher JW, Struik JHA. Guide to design criteria for bolted and riveted joints 2nd edition, Chicago, IL, U.S.A: AISC; c2001.
10. Ugural AC, Fenster SK. Advanced Strength and Applied Elasticity. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, U.S.A; c2003; p.117–119.
11. ASCE/SEI 7–10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston Virginia: American Society of Civil Engineers; c2010; p.196–97.