2022년도 구조물 내진설계 경진대회 설계제안서

연세대학교 Y-Mecha 팀

팀장	팀원	팀원	팀원	지도교수님
윤주노	김지훈	이유정	김주원	김영주
기저 설계	이론 분석	TMD 설계	제안서 작성	지도-감독

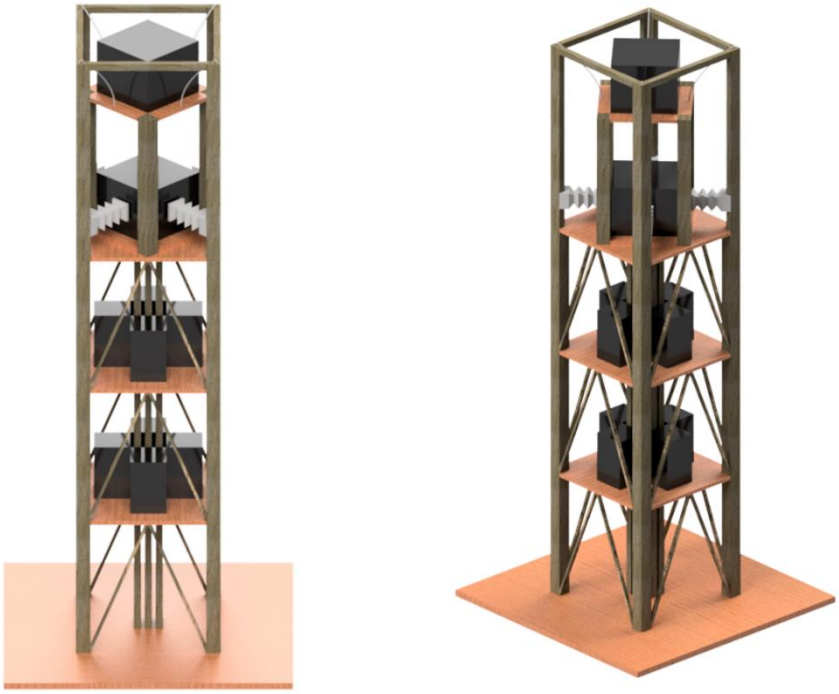

그림 1 Inventor로 설계한 구조물 전체 모습

설계 및 디자인 개요

우리 팀에서는 구조물 내진설계로, 1층과 2층까지는 내부 코어 기둥을 중심으로 하중블록을 균일하게 배분하여 튼튼한 하체구조를 제작한다. 그리고 3층과 4층에서는 건물 외부 골조에 대해 내부 구조물 전체를 TMD 시스템으로 응용하여 진동 진폭을 최소화하였다. 특히 실, 종이 댐퍼, 바닥 면 마찰로 총 3중 댐핑 시스템을 구상하여 TMD 시스템의 안정적인 움직임을 만들고자 하였다.

기둥들의 경우 unit column을 여러 개 뭉친 형태로 제작하여 실제 공정 시 보다 편하게 제작할 수 있도록 설계하였다. 1층부터 3층까지는 하나의 메가 기둥주변에 4개의 기둥을 설치하여 충분한 하체 강성을 확보하였다.

0.7g 가속도 가진에 대해, 구조물의 파괴를 유도하기 위하여 본 설계제안서에서는 실의 *failure stress*를 $\sigma_{failure}$로 가정하여 필요한 장력의 크기를 역학적으로 분석하였다. 향후 본선 진출 시 재료를 수급하게 되면 추가적인 물성치 분석을 통하여 실제적인 설계를 추가 수행할 것이다.

기저 설계

우리 팀에서는 지진의 진동에너지 흡수를 상층부의 TMD를 통해 감쇄하기 때문에 튼튼한 하체 구조가 필수적이다. 이를 위하여 구조물 내 모든 기둥들에 대하여 다음과 같은 unit column을 사용하였다.

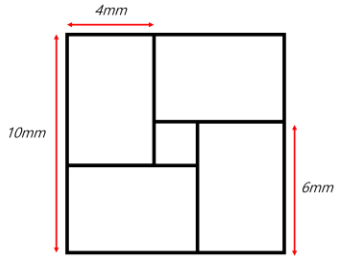

그림 2 unit column의 평면도

위 unit column은 재료로 제공되는 MDF Strip을 별도의 가공 없이 바람개비 형태로 조립하면 간단하게 완성되어, 가공성이 좋다는 장점이 있다.

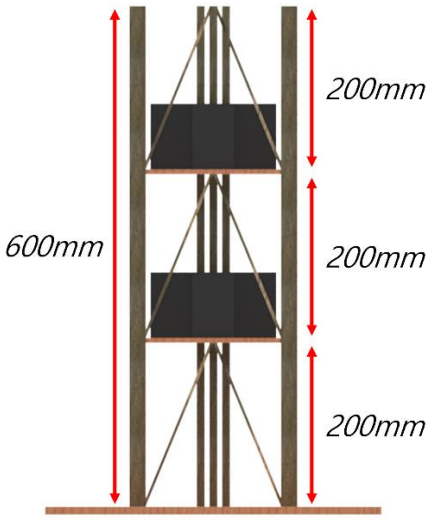

그림 3 하체 구조 정면도

마찬가지로 시공성을 확보하기 위하여 1층과 2층, 3층까지의 각 층의 높이를 200mm, 총 높이를 600mm로 설계하였다. 따라서 MDF Strip의 길이 가공 없이 바로 기둥 시공이 가능하다.

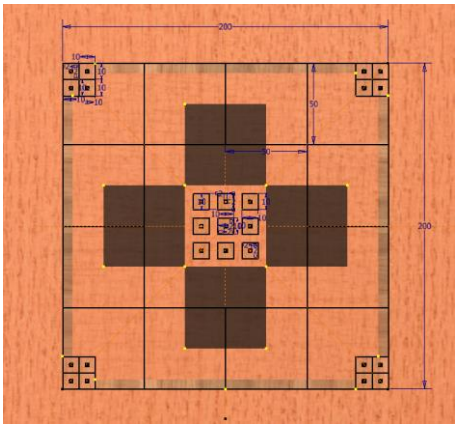

그림 4 하체 구조 평면도

하체 구조의 강성을 확보하기 위하여 바닥면 가운데에 9개의 unit column을 이용하여 제작하는 메가 기둥을 설계하였다. 그리고 사각형 각 꼭짓점에 4개의 unit column을 이용한 기둥을 설계하였다. 우리 구조물에서 메가기둥은 MDF 시스템의 하중을 직접적으로 받는 기둥으로, 횡압력이 아닌 압축력을 받도록 정중앙에 위치시켰다. 또한, 메가 기둥을 2층과 3층의 바닥면을 통과하는 형태로 제작하여 하체 구조의 중심이 잘 유지되도록 설계하였다.

그림 5 하체 구조에 사용한 'ㅅ'자 가새

바닥 면과 꼭짓점에 위치한 기둥을 연결하는 가새의 경우 시공성 확보를 위하여 단순한 'ㅅ'형태를 택하였다. 재료 수급 후 연습물 제작 시, 하체에 충분한 강성이 확보되지 않는다고 판단되면 추가적인 가새를 설치하거나 가새의 형태를 변경하여야 할 것이다.

다음은 하체구조에 하중을 가한 Inventor 내 응력 해석 결과이다. 질량 블록이 3개씩 적층 된 부분마다 29.4N의 하중을 주었다. 또, 이 하중의 2배, 3배, 4배, 5배, 6배까지 주어 구조물이 큰 가속도에서도 형상을 유지할 수 있는지 예측해보았다.

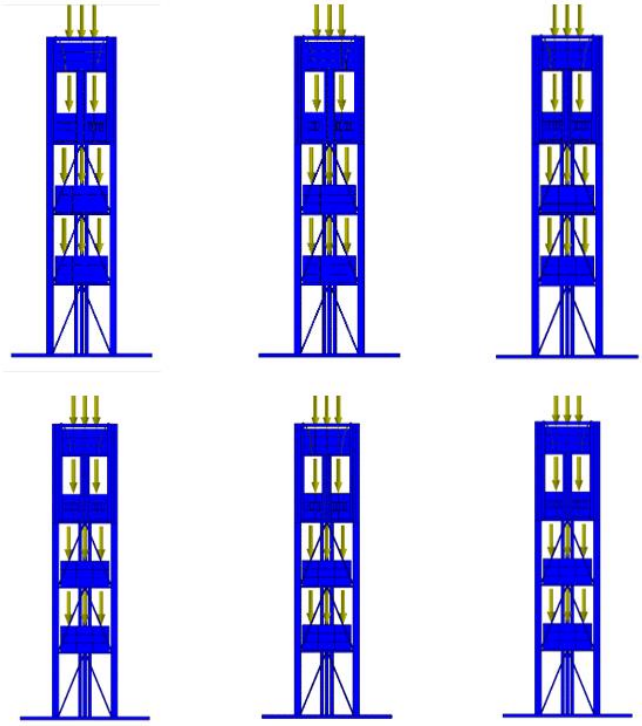

그림 6 하중을 1~6배까지 늘렸을 때 구조물의 변위

결과적으로, 하중을 6배까지 늘려도 구조물의 변위는 매우 작았다. 따라서 우리가 설계한 구조물의 수직 하중에 대한 강성이 충분하다고 예측할 수 있다.

파괴유도 및 TMD 설계

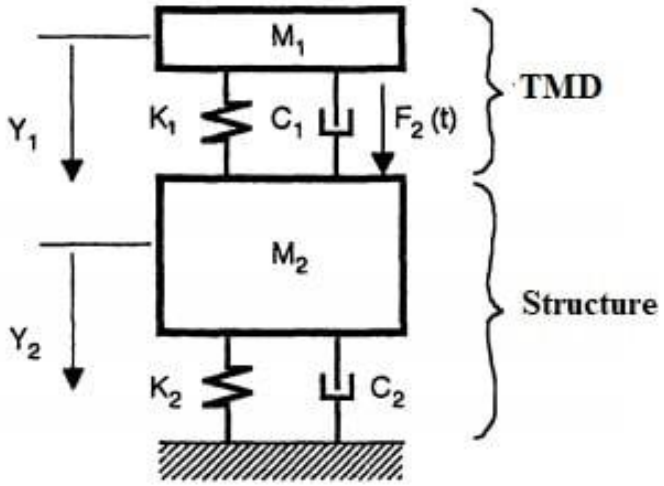

그림 7 Tuned mass damper operating principles[1]

[1] "*Tunded Mass Damper-Components, Working and Applications*", THE CONSTRUCTOR, Web. https://theconstructor.org/structural-engg/tuned-mass-damper/1198/

우리 팀에서는 설계 지진 초과 시에 대한 구조물의 파괴를 TMD 시스템을 지지하는 실이 끊어지도록 유도한다. 이를 통해서 구조물의 완전한 파괴를 방지하고, 구조물 파괴로 인한 주변 건물의 추가 손상 역시 막을 수 있다. 이를 위해서 지반가속도가 존재할 때, 우리 구조물에 대한 역학적 분석을 실시하였다.

우선 본 계획서에서는 분석의 단순화를 위하여 TMD 시스템을 제외한 구조물의 모든 부분은 강체라고 가정한다. 따라서 TMD 시스템의 실 부분을 제외한 모든 부분의 파단 가능성을 배제하며, 이를 통해 구조물에 가해지는 가진 상황을 TMD 시스템에 작용하는 강제 진동으로 해석할 수 있다.

우리 조에서 설계한 TMD 시스템을 위에서 바라본 평면도다. 파단이 유도되는 면 줄은 빨간색으로 표시하였다.

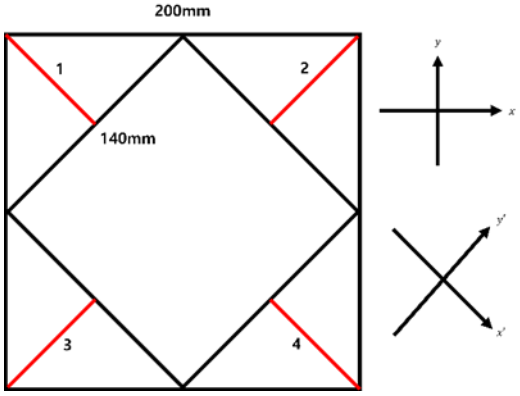

그림 8 면실을 나타낸 TMD 평면도

위 평면도에서 각 1, 2, 3, 4번줄에 각각에 가장 큰 Tension이 걸리는 상황은 x', y'축 방향으로 순수하게 진동이 가진 되었을 경우다. x, y축 방향으로 가진 될 경우 Tension이 두 줄에 걸쳐 걸리며 이로 인해 줄 하나씩 작용되는 $stress$는 절반 수준으로 줄어든다. 따라서 아래에서는 최대 Tension이 줄에 작용하는 상황을 살펴보기 위하여, 순수한 $+x'$ 축 방향으로 가진 된 경우만을 가정한다. 그러면 1번 줄은 구겨지며 Tension free가 되고, 2번과 3번줄, 그리고 4번줄에 Tension이 발생한다. 하지만 2번과 3번줄의 변위는 4번줄의 변위에 비해 무시할 정도로 작다. 따라서 본 계획서에서는 4번줄에 온전히 Tension이 걸리는 상황만을 살펴본다.

앞서 가정한 상황에 대한 FBD는 다음과 같다.

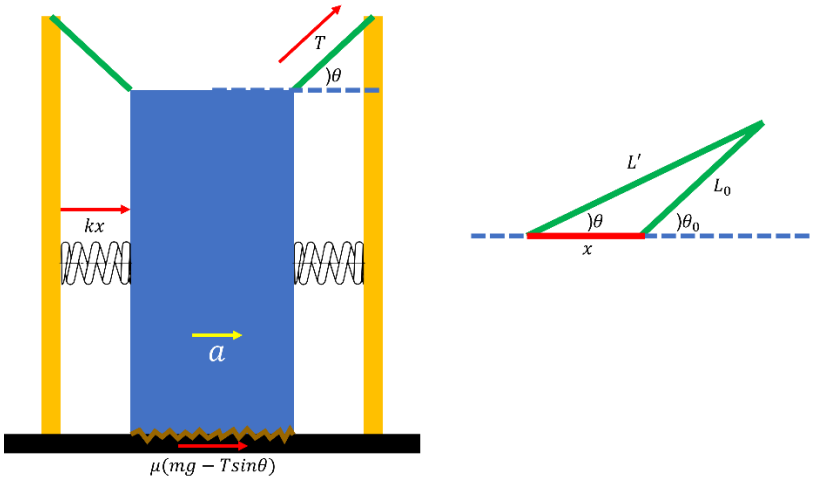

그림 9 TMD 시스템의 FBD와 압축길이 x의 기하적 분석

TMD 시스템을 제외한 구조물은 전부 강체라고 가정하였다. 따라서 TMD 시스템이 외부 골조에 대하여, 바닥이 가진 됨에 따라 발생하는 상대가속도를 a라고 하자. 그리면 가진 순간 관성에 의해, TMD 시스템은 상대적으로 왼쪽으로 이동한다. 이로 인해 댐핑 스프링이 압축되며 $+kx$의 힘이 작용하고, 바닥 면의 마찰력 역시 가속도 방향으로 발생한다. 그러면 x축 방향에 대한 운동방정식은 다음과 같이 세워진다.

$$\sum F_x \ : \ Tcos\theta + kx + \mu(mg - Tsin\theta) = ma$$

여기서 a 값은 바닥이 가진 되는 가속도이며, θ 값은 각 순간별로 기하적으로 정해지는 값이다. x 값 역시, 각 순간별로 댐퍼의 압축 길이에 따라 정해지는 상수다. 위 운동방정식을 T에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$T = \frac{ma - kx - \mu mg}{cos\theta - \mu sin\theta}$$

이때 기하적으로 압축길이 x는 θ에 종속된 값이다. 변형길이 L'이 거의 L_0와 같다고 가정하면,

$$x = L'cos\theta - L_0 cos\theta_0 \approx L_0(cos\theta - cos\theta_0)$$

따라서 T는

$$T = \frac{ma - kL_0(cos\theta - cos\theta_0) - \mu mg}{cos\theta - \mu sin\theta}, \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

가 된다. 향후 재료를 수득하게 되면 물성치 $k, \mu, A, \sigma_{failure}$를 알 수 있게 된다. 이를 위 식에 대입하고 θ에 대하여 미분하여 $T_{max,}\ \sigma_{max}$를 구할 수 있다. 이를 통해 $a = 0.7g$에 대하여 L_0를 설정하여 실의 파단을 유도한다.

다음은 TMD 상층 구조를 인벤터를 이용해 렌더링한 결과이다.

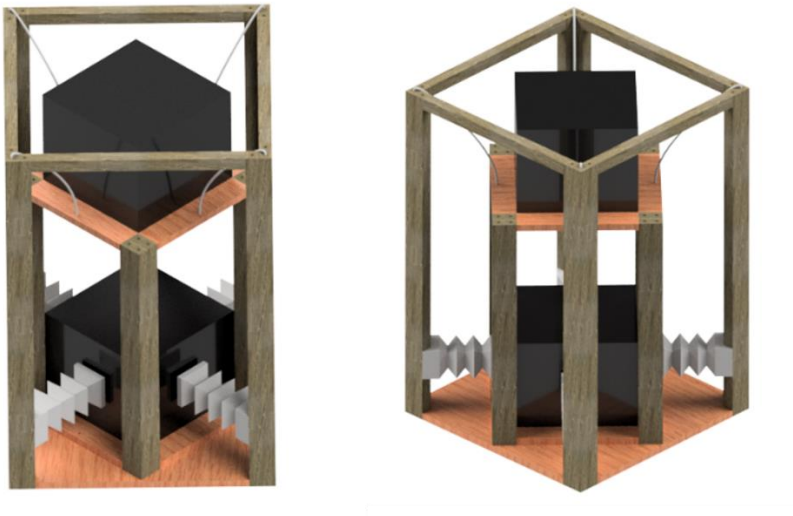

그림 10 TDM 상층구조 렌더링 결과

외부 기둥은 충분한 강성을 확보하기 위하여 3개의 unit column을 뭉쳐서 제작한다. 그리고 내부하중 블록과 외부 기둥에 종이 댐퍼를 연결한다. 바깥 기둥의 9개 unit column 중 가장 안쪽의 unit 기둥에 대해 면줄을 통과시켜 면줄을 하부지지체에 튼튼히 고정한다. 그리고 면줄을 하중블록을 지지하는 내부구조의 바닥 판의 구멍에 연결하여 면줄에 의한 댐핑 시스템을 완성한다. 이때, 실의 장력을 적당히 조절하여 바닥 면끼리 발생하는 마찰의 크기를 조절한다.

다음은 TMD 상층 내부 구조와 외부 구조에 대한 평면도다.

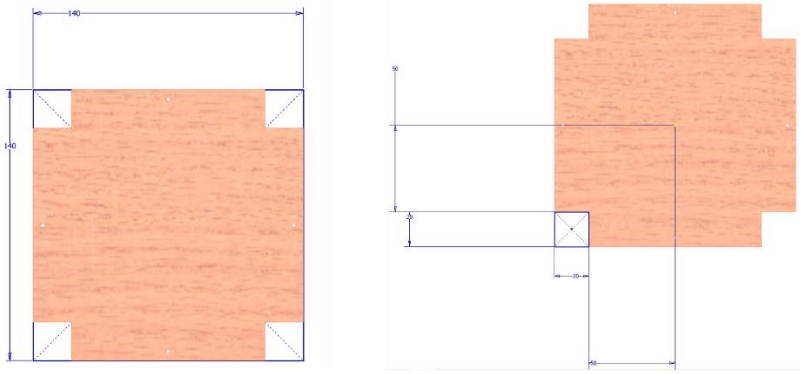

그림 11 TMD 상층 내부 구조 평면도

내부 구조에서는 기둥으로 4개의 unit column을 뭉쳐서 만든다. 기둥의 길이가 짧으므로 충분한 강성이 확보될 것이라 예상되어 가새 없이 기둥과 보를 이용해 설계하였다. 실제로 부품 수득 후 제작 시, 강성이 부족하면 추가적으로 가새를 사용할 것이다. 하중블록은 정중앙에 대칭적으로 배치하여 치우침 없이 내부구조가 움직일 수 있도록 한다. 그리고 내부 구조 판의 각 정중앙에 구멍을 뚫어 면실이 연결되도록 한다.

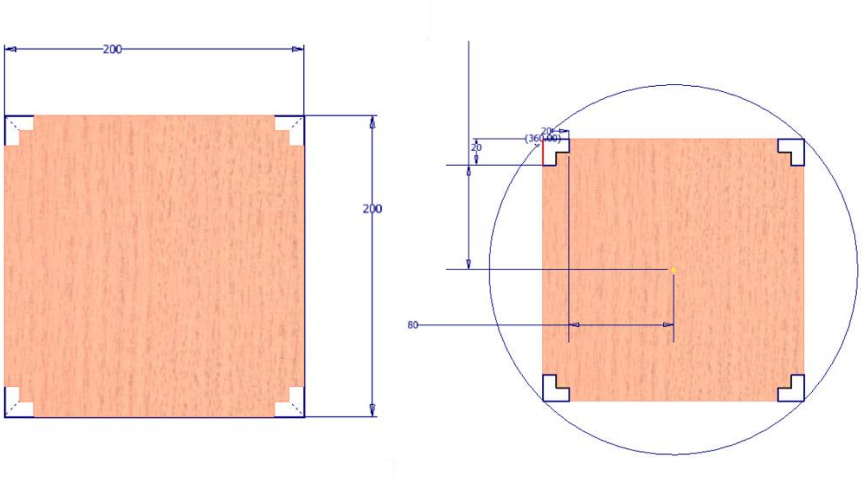

그림 12 TMD 상층 외부구조 평면도

외부 구조에서는 기둥으로 3개의 unit column을 뭉쳐서 충분한 강성을 확보한다. 이때 실을 가장 모서리에 존재하는 unit column을 통과하고 하부지지체에 튼튼히 고정되도록 시공하여 실로 인해 강제 진동되는 기둥의 에너지가 하체구조로 잘 전이되도록 한다.

다음으로 Inventor 내 모달 해석을 통해 고유진동수에서 TMD 시스템의 고유 진동수에서의 mode shape를 예측해보았다.

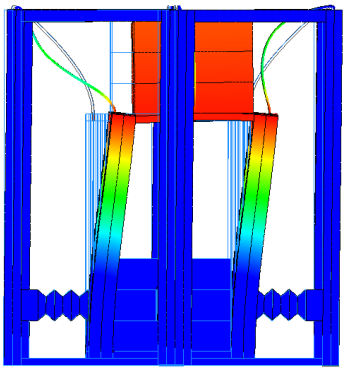

그림 13 TMD 시스템의 모달 해석 결과

실제 시스템의 물성치를 고려할 수 없어, Inventor내 라이브러리 물성치를 이용하였다. 기둥과 바닥면에는 MDF 중간밀도 섬유판을, 실은 나일론을, 질량 블럭은 강철의 물성치를 사용했다. 따라서 실제상황과는 차이가 있는 결과라고 볼 수 있다. 다만 본 설계제안서에서는 위 결과를 정성적으로 다루고자 한다.

위 시뮬레이션 결과 TMD 시스템의 고유 진동수는 19.32Hz로, 지진의 진동수인 0.5~10Hz와 다소 차이가 있다. 따라서 실제 지진이 발생했을 때도, TMD 시스템이 공진을 피할 수 있을 것이라 기대할 수 있다. 또, 시뮬레이션 결과, 외부 기둥은 변위가 거의 없는 반면 내부 구조는 변위가 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 지진 시 본 구조물의 TMD 시스템의 효용성을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다

그리고 TMD 시스템의 파단이 실에서 일어나기 위해서는 실의 변위가 가장 커야 한다. 모달 해석 결과 그림에서 실과 내부구조가 연결된 부분의 변위가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 우리 팀이 원한 것처럼 구조물의 파단이 아닌, 실의 파단을 유도할 수 있을 것이라 기대할 수 있다.

면마찰을 이용한 댐퍼 설계

3층과 4층의 내부 구조물 전체를 TMD 시스템으로 응용하여 전체 건물 외벽의 진동 진폭을 최소화를 기대한다. 내부 구조물과 외부의 바닥 면 마찰로 댐핑 시스템을 구상하여 TMD 시스템의 안정적인 움직임을 기대할 수 있다.

마찰형포트받침[2] 구조물 지진 격리장치를 건물에 응용하여 TMD가 수평방향으로 진동할때의 에너지를 효과적으로 소산시키고 하중을 안정적인 방향으로 전달한다. 이 구조물을 건물에 적용하여 수평방향의 진동 움직임을 수직방향의 힘으로 일부 전환할 수 있다. 그리고 TMD의 과한 진동으로인한 파손을 막기위해 응답변위을 줄여주는 역할도 한다.

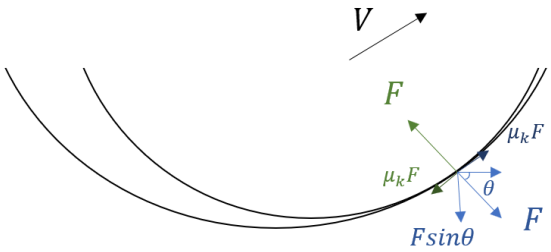

그림 14 상층 구조물과 하층 구조물의 접점에 대한 힘 분석

위 구조물이 아래 구조물에 대해 오른쪽 방향으로 움직이는 상황을 보자. 위 구조물의 면과 면이 닿는 부분에는 수직항력이 작용하고 운동방향의 반대로 마찰력이 작용한다. 아래 구조물에는 이에대한 반작용이 작용한다. 위 구조물이 오른쪽으로 이동한 상황에 대한 FBD를 위 그림에 나타내었다.

위 구조물과 아래 구조물에 대한 각각의 힘 분석은 아래와 같다.

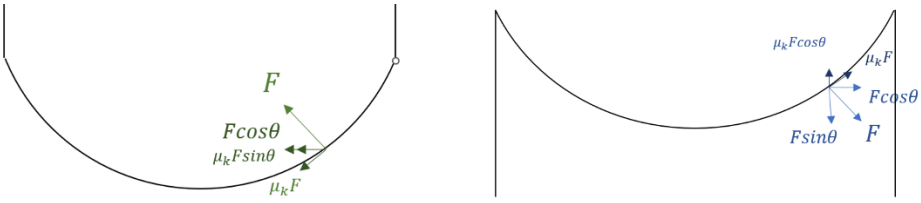

그림 15 상층 구조물과 하층 구조물 각각에 대한 힘 분석

[2] 마찰형포트받침: 지진격리시스템의 일종으로, 마찰감쇠를 이용하여 지진격리에 의해 증가한 응답변위를 조절하는 포트받침이다.

면 사이의 수직항력을 F, 운동마찰은 $f = \mu_k F$이라 하자. 이때 곡면의 접면과 각도 θ를 통해 수평방향 성분과 수직방향성분으로 분해할 수 있다. 위 구조물의 수평방향으로 받는 힘은 $\mu_k F sin\theta + F cos\theta$ 이며 이 힘은 TMD의 수평방향 진동을 감쇠시켜주는 역할을 한다. 아래 구조물이 받는 수직방향의 힘은 $F sin\theta - \mu_k F cos\theta$이며 건물 수직구조로 전달된다.

마찰력의 수직성분인 $\mu_k F cos\theta$ 이 아래 구조물로 전달됨을 확인할 수 있으며 마찰에 의한 에너지 가 아래 구조물로 전달되며 안정적인 움직임을 기대할 수 있다.

이때 표면에 종이와 접착제로 요철을 만들어서 이 요철의 변형을 이용한 댐핑효과를 증가시킨다, 그리고 종이뭉치와 접착제 자체의 탄성력을 이용하여 에너지를 수직 아래방향으로 효과적으로 전달한다. 아래는 면 마찰 장치의 제작 예상도이다. 실제 제작 시, 종이를 둥글게 말아 록타이트로 고정할 예정이다.

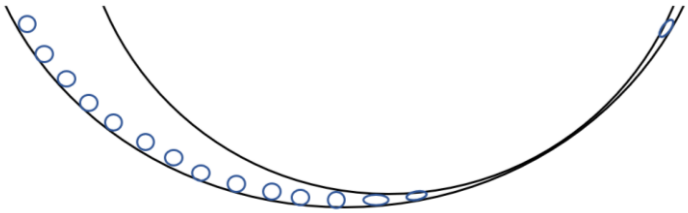

그림 16 면 마찰 장치 예상도

제작비 예산 내역

	부재명	개수	규격	비용(백만원)	합계(백만원)
Strip	내부코어	4*1*9	4mmx6mmx600mm	360	1600
	1~3층 외부기둥	4*4*4	4mmx6mmx600mm	640	
	4층 외부기둥	4*3*4/2	4mmx6mmx300mm	240	
	TMD 외부기둥	4*4*4/3	4mmx6mmx200mm	220	
	TMD 보	4*1*4/3	4mmx6mmx160mm	60	
	가새	8*3/3	4mmx6mmx200mm	80	
Plate	MDF base	1	400mmx400mmx6mm	-	기본제공
	1,2,3 층 plate	3	200mmx200mmx6mm	300	400
	TMD층 plate	1*2/2	140mmx140mmx6mm	100	
A4지	댐퍼	4	A4	40	40
면줄	면줄	4*2	600mm	80	80
접착제	접착제	1	20g	200	200
총계	2320				