

폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 동적거동에 대한 실험 및 해석적 연구

Experimental and Analytical Study of the Dynamic Behavior of a Polyurethane Spring Restoring Disk Bearing

박형기¹⁾ · 이유인²⁾ · 정대유³⁾

Park, Hyung Ghee · Lee, You In · Jung, Dae Yu

국문 요약 >> 이 논문에서는 근래에 널리 사용되는 면진 장치인 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 동적거동에 영향을 미치는 구성재료의 인자에 대한 분석을 수행한 후, 그 결과를 이용하여 받침의 거동을 예측하여 거동 시험결과와 비교하였다. 여기서 동적거동에 영향을 미치는 인자로는 속도와 접촉압력에 따라 변하는 불소수지판(PTFE, PolyTetraFluoroEthylene, 폴리테트라플루오로에틸렌)의 마찰계수와 변형률에 따라 변화하는 폴리우레탄 스프링의 탄성계수가 고려되었다. 불소수지판은 W-PTFE virgin 제품을 사용하였고, 폴리우레탄 스프링은 직접 제작한 것을 사용하였다. 접촉압력, 속도에 따른 마찰계수 변화와 변형률에 따라 변하는 폴리우레탄 스프링의 탄성계수를 모사하는 식은 각각의 시험결과로부터 역추정 하여 사용하였다. 동특성 영향인자를 고려한 거동의 예측 결과는 동특성이 고려되지 않고 정적 인자만을 고려한 예측 결과보다 시험결과와 더 적절한 일치성을 보여주었다.

주요어 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침, 동적거동, 불소수지판, 마찰계수, 폴리우레탄 스프링, 탄성계수

ABSTRACT >> In this paper, the factors affecting the dynamic characteristics of a polyurethane spring restoring disk bearing are analysed to predict the dynamic behavior of the bearing. The prediction results and the test results are compared. The Young's modulus of the polyurethane spring, which varies according to strain of spring and the friction coefficient, of PTFE (PolyTetraFluoroEthylene), which varies according to the velocity and pressure of PTFE, are considered as the factors influencing the dynamic characteristics. W-PTFE virgin products are used and polyurethane springs are produced for the tests. The equation related to changing the friction coefficient and the modulus of elasticity are obtained through an inverse estimation of the test results. The estimation results, considering the factors affecting the dynamic characteristics, simulate the test results more appropriately than the estimation without the consideration of those factors.

Key words Polyurethane Spring Restoring Disk Bearing, Dynamic behavior, PTFE, Friction Coefficient, Polyurethane Spring, Young's modulus

1. 서론

근래에 지진 활동은 전 세계적으로 활발해지고 있는 추세이며, 우리나라 또한 2007년 평창 지진(규모 4.8)에서 볼 수 있듯이 지진 피해에서 완전히 안전한 상황이라 할 수 없다. 그러나 아직까지 서울에서 내진설계가 반영된 건물은 전체

의 10% 정도에 불과할 정도로 지진대책은 미미한 형편이다. 이에 따라 국가에서는 2009년 ‘지진재해대책법’을 발효하는 등 구조물의 내진대책에 지대한 관심을 쏟고 있다.

구조물의 내진성능을 증강시키기 위해 주로 쓰이는 방법 중 하나가 구조물의 기초부와 상부 구조물 사이에 에너지 소산능력을 가진 지진 격리 장치를 설치하는 방법이다. 이러한 지진 격리 장치 중 현재 국내에서 널리 적용되고 있는 장치로는 최근에 개발된 스프링 복원형 디스크 받침이 있다. 스프링 복원형 디스크 받침은 스프링의 탄성 복원력과 마찰 원리를 이용한 장치로서 불소수지판이라는 마찰재를 이용한 마찰댐퍼와 폴리우레탄 재질의 스프링으로 구성된다.

불소수지판은 PTFE(PolyTetraFluroEthylene) 재질의 판

¹⁾ 정희원·인천대학교 토목환경시스템공학과, 교수

²⁾ 에스코알티에스 기술연구소, 선임연구원

(교신저자: yinlee@enrtech.co.kr)

³⁾ 정희원·인천대학교 대학원 박사과정, 토목구조기술사, 철도기술사

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 1. 14 / 수정일 2011. 3. 10, 게재확정일 : 2011. 3. 11)

으로서 90년대 이후 세계적으로 널리 사용되고 있으며 다양한 주제에 관하여 연구가 진행되어 왔다. Biswas와 Vijayan의 문헌연구⁽²⁾에 의하면 불소수지판은 미끌림 속도가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하며 이를 지수 식 혹은 로그 식으로 나타낼 수 있다고 한다. 또한 마찰계수는 온도, 접촉압력이 증가함에 따라 감소하는 양상을 보이며, 온도, 접촉압력과 마찰계수 간의 관계는 실험결과와 통계분석을 통하여 다항식으로 나타낼 수 있음도 밝혀져 있다.⁽³⁾ 국외에서는 90년대 이후 이와 같은 다양한 연구들을 통해서 불소수지판의 동특성 요소에 관한 내용이 연구되었고, 이를 받침 제품에 적용하고 있는 단계이다. 국내에서도 불소수지판의 마찰 및 마모에 관한 연구가 일부 진행된 바 있다.⁽¹⁾ 그러나 국내에서는 불소수지판의 소개 및 적용의 역사가 오래 되지 않은 관계로 아직 동특성 요소에 관한 연구가 활성화되지 않은 상황이며 받침의 설계 시 불소수지판의 동특성 요소가 무시되고 있다.

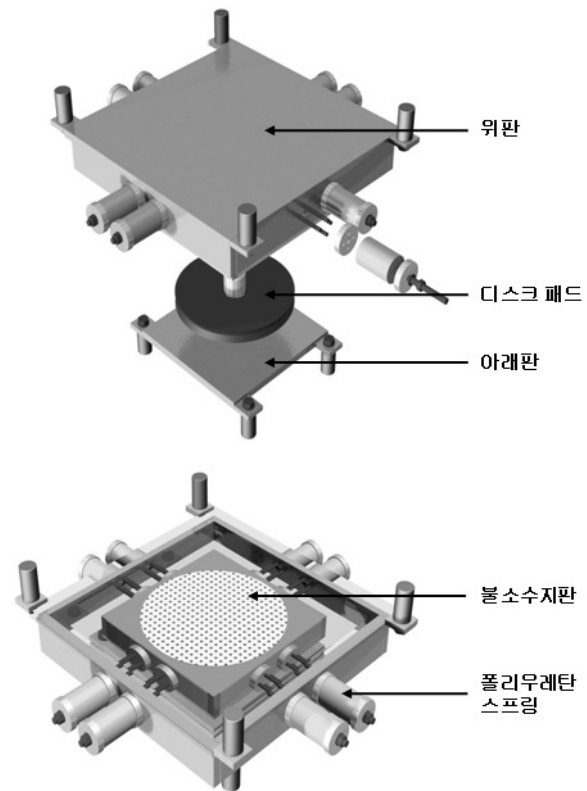
폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침에 사용된 스프링은 일반 강재 헬리컬 스프링이 아닌 폴리우레탄 재질의 스프링이다. 강재 헬리컬 스프링은 탄성계수가 일정하여 장치의 거동을 정확히 예측할 수 있는 장점이 있다. 하지만 부식의 위험이 있고, 강성이 약하여 교량받침에 이용되기에는 적절하지 못하다. 따라서 복원 장치로서 단면 대비 강성이 크고, 환경적 요소에 영향을 크게 받지 않는 폴리우레탄 스프링을 적용하게 되었다. 그러나 폴리우레탄 스프링은 거동이 강재스프링과 같이 선형적이지 않고, 변형률 및 변형 속도에 의해 거동이 비선형적인 성향을 갖는다.

이 논문에서는 불소수지판의 접촉압력 및 속도에 따른 마찰계수 변화와 변형률에 따른 폴리우레탄 스프링의 탄성계수 변화를 수식으로 구성하고, 이를 이용하여 스프링 복원형 디스크 받침의 거동을 예측하였다. 또한 받침의 거동 시험 결과와 예측 거동과의 비교를 통해 스프링 복원형 디스크 받침의 설계에 있어서 동특성 영향인자의 고려가 유효성을 지니는지 검토하였다.

2. 받침 구성재료의 동특성 영향인자 분석 시험

2.1 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 구조

폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 구조는 그림 1과 같다. 위판과 아래판이 각각 교량의 상부 구조물과 교대에 연결되며 디스크패드는 연직하중을 지지하고 회전 변위를 수용한다. 불소수지판은 마찰력이 운동방향에 반대되는 방향성을 가진다는 원리를 이용하여 에너지 감쇠 기능을 가



〈그림 1〉 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침 구조도

진다. 폴리우레탄 스프링은 2차 강성을 발현하며 수평 방향의 변위가 종료 된 후 내부 구조체와 불소수지판을 복원시키는 복원력을 갖는다.

2.2 불소수지판의 마찰계수

불소수지판의 마찰계수는 미끌림 속도가 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 양상을 보이며 이는 로그 식 혹은 지수 식으로 곡선 맞춤(Curve Fitting) 할 수 있다.⁽²⁾ 또한 접촉압력(Contact Pressure)에 대한 보정은 시험결과와 역추정을 통하여 다항식으로 구성할 수 있다. 이 논문에서는 속도에 따른 마찰계수(Friction Coefficient) 식을 로그 식으로 구성하고 접촉압력에 따른 마찰계수 보정 식을 다항식으로 구성하였다. 또한 불소수지판의 물성은 생산 방식이나 구성 재료에 따라 변할 수 있으므로 마찰계수 식의 상수 값은 기존 연구에서 검증된 값이 아닌 현재 받침에 사용되고 있는 불소수지판의 접촉압력별, 미끌림 속도별 마찰계수 시험 결과에서 역추정하여 계산된 값을 사용하였다.

2.2.1 속도 및 접촉압력에 따른 마찰계수 시험

속도 및 접촉압력에 따른 마찰계수의 변화를 알기 위해서 마찰계수 측정시험을 실시하였다. 동일한 시편 4가지에 각각

〈표 1〉 속도 및 접촉압력에 따른 마찰계수 시험조건

구분	속도	접촉압력 변화
시편1	2.54mm/sec	7MPa, 14MPa, 21MPa, 45MPa
시편2	25.4mm/sec	
시편3	101.6mm/sec	
시편4	254mm/sec	

다른 속도를 지정하여 접촉압력을 증가시키면서 마찰계수를 측정하였다. 시험 방식은 EN 1337-2를 참조하였다.⁽⁴⁾ 시험 조건은 표 1과 같다. 이 논문에서 다른 PTFE는 White-PTFE 로 Virgin 제품을 사용하였다.

2.2.2 속도 및 접촉압력에 따른 마찰계수 시험 결과

시험 결과는 그림 2와 같다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 마찰계수는 모든 속도에서 접촉압력이 증가함에 따라 감소하는 양상을 보이며, 같은 접촉압력 하에서는 속도가 클수록 큰 값을 가지는 것으로 나타난다. 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침은 수평 변위가 발생하는 동안 접촉압력의 변화는 발생하지 않는 구조이므로, 연직하중에 따라 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 마찰재 크기가 결정된 이후에는 속도가 마찰재의 동특성을 좌우하게 된다. 그림 3은 각각의 접촉압력 하에서 속도에 따른 마찰계수의 변화를 정리한 것이다.

시험 결과에 따르면 마찰계수는 마찰속도에 따라 약 3~5 배까지 로그 함수 형태로 변화한다. 그러나 기존 설계 방식에서는 받침의 전체 거동에서 속도의 변화에 관계없이 속도가 100mm/sec일 때의 마찰계수를 사용한다.

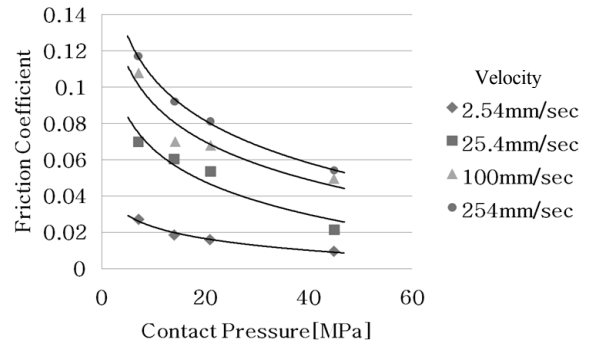
그림 3에서 볼 수 있듯이 기존 설계 방식에서의 마찰계수는 전체 속도에서의 마찰계수를 대표한다고 하기 어렵다. 따라서 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 거동 평가 시, 동특성 영향인자로서의 속도 고려는 필수적인 것이라 할 수 있다.

또한 접촉압력별로 다소 차이는 있지만 마찰계수는 마찰속도가 대략 100mm/sec 정도 이후에는 변화가 크지 않은 편이다. 특히 접촉압력이 증가할수록 100mm/sec 이후의 변화는 미미한 편이다.

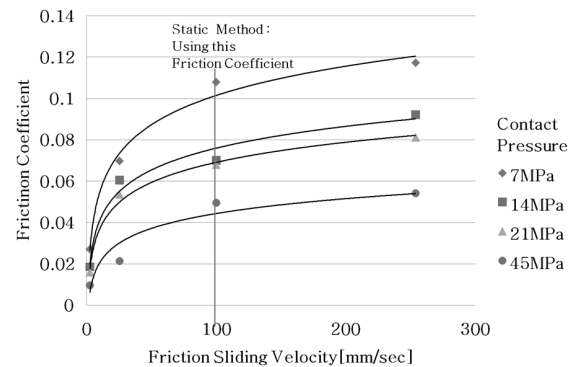
2.2.3 속도 및 접촉압력에 따른 마찰계수식

그림 2와 그림 3에서 보인 시험 결과로부터 시험결과에 대한 곡선 맞춤을 로그 식으로 하면 다음과 같다.

$$\mu(v) = \alpha + \beta \ln(v) \tag{1}$$



〈그림 2〉 접촉압력에 따른 마찰계수 시험 결과 및 모사 결과



〈그림 3〉 속도에 따른 마찰계수 시험 결과 및 모사 결과

〈표 2〉 접촉압력에 따른 상수 α, β

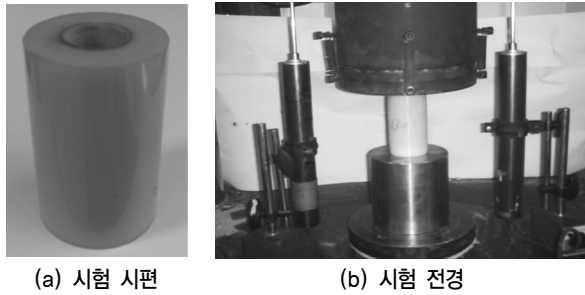
	접촉압력 [MPa]			
	7	14	21	45
α	0.0076	0.0059	0.0046	-0.0034
β	0.0204	0.0152	0.0140	0.0104

여기서, $\mu(v)$: 속도에 따른 마찰계수
 α, β : 상수

상수 α 와 β 는 접촉압력에 관한 다항으로 표시되며 이는 시험값으로부터 역추정하여 얻게 된다. 접촉압력에 따른 상수 α 와 β 의 값은 표 2와 같다.

폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 설계 시 마찰재의 크기가 지정되어 마찰재의 접촉압력이 지정되면, 표 2에 의해서 접촉압력에 따른 α 와 β 가 상수로 고정되고, 받침의 거동 시 식 (1)에 의해 마찰속도에 따라 마찰계수가 변화하게 된다.

그림 2와 그림 3에서의 시험결과를 식 (1)로 구성된 로그 식으로 표현하였을 때, 그림 2에서 시험 결과와 로그 식 간의 상관 계수(Correlation Coefficient)는 0.9526~0.9992로 계산된다. 여기서 상관 계수란 두 변량사이의 상관 관계를 숫자로 표현한 것으로 상관 계수가 1에 가까울 수록 두 변



〈그림 4〉 폴리우레탄 스프링 시편 및 시험 전경

〈표 3〉 폴리우레탄 스프링 시편 제원

시편 수 [개]	외경 [mm]	내경 [mm]	길이 [mm]	압축 길이 [mm]	시험 속도 [mm/sec]
2	98	33.5	200	80	0.5

량이 일치함을 의미한다. 이는 시험 결과를 로그 식이 거의 정확하게 묘사하고 있음을 의미한다. 그림 3의 경우에도 시험 결과와 로그 식 간의 상관 계수가 0.9576~0.9935로 계산되어 속도에 따른 마찰계수의 변화를 로그 식으로 구성하는 것이 적합하다는 것을 보여준다.

2.3 폴리우레탄의 탄성계수

2.3.1 변형률에 따른 폴리우레탄의 탄성계수시험

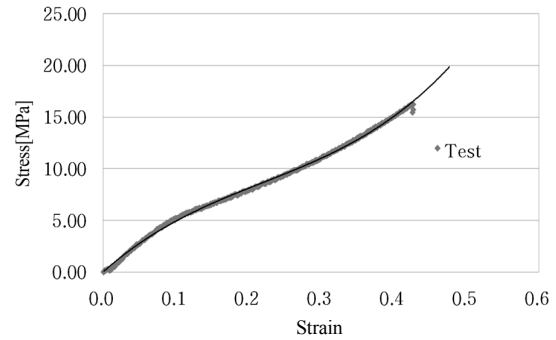
폴리우레탄 스프링은 점탄성 물질로서 일반 헬리컬 스프링과 달리 탄성계수가 비선형성을 가진다. 즉, 변형속도와 변형률에 따라 탄성계수가 변화하게 된다. 이 논문에서는 변형률에 따른 탄성계수의 비선형성을 고찰하기 위하여 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침에 사용되는 폴리우레탄 스프링을 직접 제작하여 탄성계수 시험을 수행 하였다.

폴리우레탄 스프링은 그림 4(a)와 같은 중공 원형 기둥 형태이다. 시험 전경을 그림 4(b)에 나타내었다. 시편은 표 3과 같은 제원을 가지도록 제작하여 시험에 사용하였다. 폴리우레탄은 이소시아네이트(Isocyanate)와 95A, 62D, 60D 등급 정도의 폴리올(Polyol)을 1몰(Mole) 대 1몰의 비율로 결합한 후 아민계열의 MOCA(경화제)를 사용하여 시편을 제작하였다.

2.3.2 변형률에 따른 폴리우레탄 탄성계수시험 결과

폴리우레탄 스프링의 압축시험 결과는 그림 5와 같다.

그림 5에서 점선은 응력-변형률 시험 결과이다. 시험 결과 폴리우레탄 스프링의 응력-변형률 그래프는 거의 직선에 가까운 편이다. 그러나 정확한 측정에 의하면 그림 5에서 볼 수 있듯이 변형률에 따른 응력의 증가는 약간의 비선형성을 나타낸다. 또한 이 시험 결과는 곡선 맞춤을 사용하여 3차



〈그림 5〉 폴리우레탄 스프링의 응력-변형률 그래프

다항식으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

2.3.3 변형률에 따른 폴리우레탄 탄성계수식

시험 결과로부터 곡선 맞춤 과정을 거쳐 얻은 3차식을 미분하면 압축 탄성계수(E_c)를 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$E_c(\epsilon) = l(\epsilon)^2 + m(\epsilon) + n \quad (2)$$

여기서, ϵ : 폴리우레탄 스프링의 변형률

l, m, n : 시험값으로부터 추정 되는 상수

E_c : 폴리우레탄의 압축탄성계수

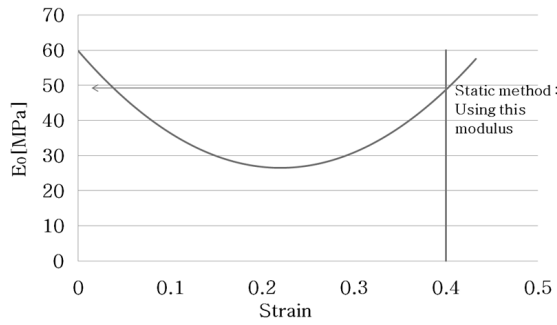
여기서 압축탄성계수란 폴리우레탄 물질 고유의 탄성계수가 아닌 압축 시험을 수행했던 시편의 스프링 모양 형상 계수 및 푸아송비가 고려된 값이다. 폴리우레탄 시편의 압축탄성계수는 폴리우레탄 물질 고유의 탄성계수(E_0)와는 식 (3)과 같은 관계가 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾

$$E_c = \frac{1.5E_0}{(1+\nu)}(1+2S^2) \quad (3)$$

여기서, ν : 푸아송비(폴리우레탄 스프링의 경우 0.49)

S : 폴리우레탄 스프링 시편의 형상계수

형상계수(Shape Factor)란 스프링의 형태에 따라 지정되는 상수이다. 형상계수의 값은 스프링이 압력을 받을 시 “압력을 받는 면적/압력을 받지 않는 면적”으로 계산된다. 따라서 시험 결과를 통해 시험 시편의 압축탄성계수(E_c)를 계산하고 이를 통하여 E_0 를 계산하여 폴리우레탄의 탄성계수를 구할 수 있으며 이렇게 계산된 탄성계수(E_0)는 다양한 형태의 폴리우레탄 스프링의 압축탄성계수 계산 시 사용될 수 있다. 식 (3)과 시험 결과로 얻은 식 (2)로부터 폴리우레탄의 고유 물성치인 탄성계수(E_0)는 식 (4)와 같은 변형률에



〈그림 6〉 폴리우레탄 스프링의 탄성계수

관한 2차 함수로서 구해진다.

$$E_0(\epsilon) = A(\epsilon)^2 + B(\epsilon) + C \quad (4)$$

여기서 A, B, C 는 시험 결과로부터 역추정하여 정해진 상수이다. 이 결과를 보이면 그림 6과 같다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 폴리우레탄의 탄성계수는 변형률이 작을 때는 큰 값을 나타내다가 20%정도의 변형률에서 최소값을 나타내고 이후 계속적으로 증가하는 양상으로 변화한다. 그러나 현재 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 설계 시에는 폴리우레탄 스프링의 탄성계수를 상수로 가정하여 설계를 하고 있다. 즉, 변형률에 관계없이 변형률이 40%일 때의 탄성계수를 폴리우레탄 스프링의 탄성계수로 지정한다. 그러므로 실제 거동 시의 2차 강성과 에너지 감쇠가 설계 시에 예상한 값과 일치하지 않게 된다. 따라서 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 거동 평가 시, 변형률에 따른 폴리우레탄 스프링의 물성치 변화 고려는 필수적이라 할 수 있다.

3. 받침의 거동 분석

폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 1자유도계 운동 방정식은 다음 그림 7과 같으면 이를 수식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + mg\mu(\dot{x}(t), \sigma) + k(\epsilon(t))x(t) \quad (5)$$

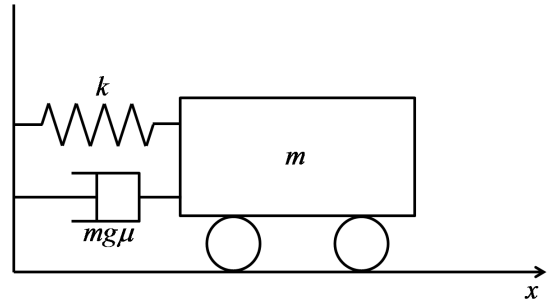
여기서, $F(t)$: 수평력

m : 상부 질량

$x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$: 변위, 속도, 가속도

g : 중력가속도

σ : 불소수지판에 가해지는 접촉압력



〈그림 7〉 1자유도계 자유물체도

$\mu(\dot{x}(t), \sigma)$: 불소수지판의 마찰계수

$k(\epsilon(t))$: 폴리우레탄 스프링의 강성

$\epsilon(t)$: 폴리우레탄 스프링의 변형률

$$\epsilon(t) = \frac{x(t)}{L}$$

L : 폴리우레탄 스프링의 길이

이 논문에서는 받침의 거동 분석 시 속도 및 변형률에 따라 그 값이 달라지는 상수인 불소수지판의 마찰계수 $\mu(\dot{x}(t), \sigma)$ 와 변위에 따라 변하는 폴리우레탄 스프링의 강성 $k(\epsilon(t))$ 를 동특성 영향인자로 고려하였다. 거동 분석은 동특성을 고려하지 않은 기존 방식인 정적 분석과 동특성을 고려한 분석 두 가지로 수행하였다.

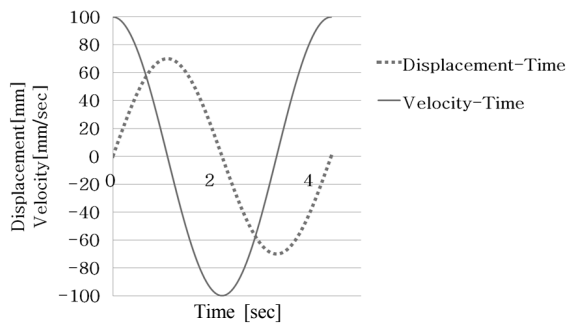
두 가지 분석을 수행함에 있어 식 (5)의 첫째항은 고려되지 않는다. 식 (5)는 실제 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침이 질량이 있는 상부 구조물 아래에 설치되었을 때의 거동 방정식이다. 그러나 시험 시에는 상부 질량이 없이 연직 하중만을 가하게 되므로, 거동 예측 시 식 (5)의 첫 번째 항은 무시하게 된다. 또한 mg 는 실 구조물에서의 상부의 무게를 고려한 연직하중으로 적용된다.

3.1 정적 분석

정적 분석이란 기존 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 설계 시에 사용되던 방법으로, 식 (5)의 하중 함수에서 불소수지판의 마찰계수와 폴리우레탄 스프링의 강성을 상수로 가정하고 거동을 예측한 것이다. 이는 아래의 식 (6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$F(t) = mg\mu + kx(t) \quad (6)$$

정적 분석 결과인 폴리우레탄 스프링 디스크 받침의 히스테리시스 곡선(Hysteresis Curve)을 그림 8에 보였다.



〈그림 8〉 변위-시간 과 속도-시간 이력

3.2 동특성을 고려한 분석

동특성을 고려한 분석이란 하중 함수 계산 시 동특성 영향인자인 불소수지판의 마찰계수와 폴리우레탄 스프링 탄성계수의 마찰 속도, 접촉압력 및 변형률에 따른 계속적인 변화를 고려하여 계산하는 거동 예측 방식이다. 이는 식 (7)에 의해서 계산된다.

$$F(t) = mg\mu(\sigma, \dot{x}(t)) + k(\epsilon(t))x(t) \quad (7)$$

식 (7)에서의 마찰계수 $\mu(\sigma, \dot{x}(t))$ 는 미끄럼 속도와 접촉 압력에 관한 함수로 식 (1)과 같고, 변형률에 따른 강성 $k(\epsilon(t))$ 은 식 (8)과 같다.

$$k(\epsilon(t)) = \frac{E_c A_s}{L} \quad (8)$$

여기서 A_s : 스프링의 단면적

E_c : 식 (3), (4)를 통해 계산 되는 압축탄성계수

또한 식 (6)과 식 (7)에서 $x(t)$, $\dot{x}(t)$ 는 각각 변위와 속도를 나타낸다. 변위는 sine 형태의 변위를 고려하였으며 변위 및 속도는 아래의 식 (9), (10)과 같이 구성되고 이를 그림 8에 도시하였다.

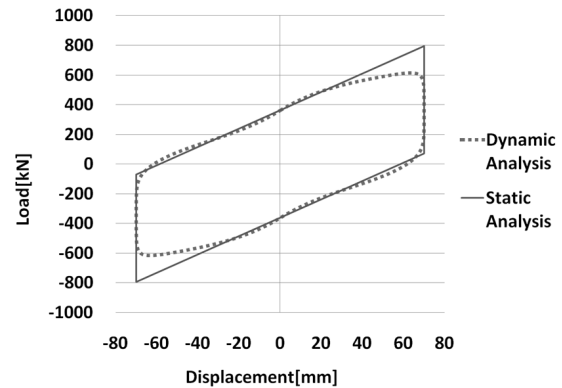
$$x(t) = D \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

$$\dot{x}(t) = 2Df \pi \cos(2\pi ft) \quad (10)$$

여기서, D : 변위의 진폭

f : 진동 주파수

식 (7)을 사용한 분석 결과인 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 히스테리시스 곡선도 그림 8에 도시하였다.



〈그림 9〉 정적 분석 및 동특성을 고려한 분석의 히스테리시스 곡선

그림 9를 보면 정적 분석과 동특성을 고려한 분석의 거동 예측 곡선이 확연히 다른 모습을 하고 있음을 알 수 있다. 두 분석 결과를 다음 장에서 실제 받침의 거동시험 결과와 비교 분석하여 각각의 유효성을 검증한다.

4. 받침에 대한 동적거동 시험 및 결과 분석

폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 동적거동 시험을 수행하고 시험 결과를 전장에서 수행한 두 가지 방법의 분석결과와 비교 분석하였다.

4.1 동적거동 시험 개요

4.1.1 시험체 제원

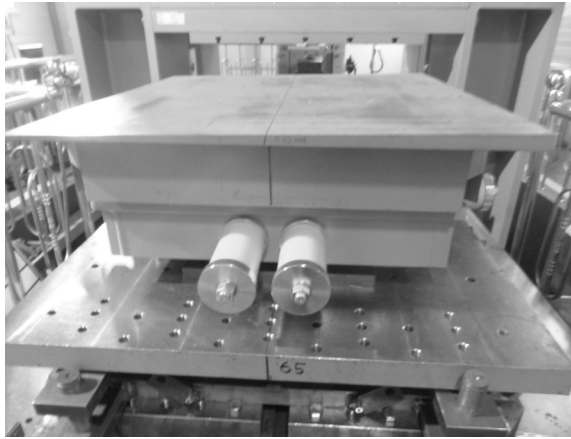
시험에 사용되는 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침은 경인 아래벧길 제 3공구 공사에 사용되는 받침으로서 최대 연직 하중 8500kN으로 설계되었으며 시험체의 형상 및 시험 전경은 그림 10과 같다.

4.1.2 시험기 제원

폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 동적거동 시험을 위해서는 상부의 무게를 감안한 연직 방향의 하중과 횡방향의 변위를 동시에 가할 수 있는 시험기가 필요하다. 본 시험에서 사용된 시험기는 15000kN 정·동적시험기이다. 이 시험기는 연직방향의 최대하중이 15000kN이며 수평방향의 최대하중은 1500kN까지 가할 수 있다. 수평방향의 최대변위와 최대속도는 각각 200mm, 130mm/sec이다.

4.1.3 시험조건

받침의 동적거동 시험은 받침의 위쪽에서 연직력을 가한 상태에서 횡방향 변위를 변위제어법을 통해 가하는 방식으



(a) 시험체



(b) 시험 전경

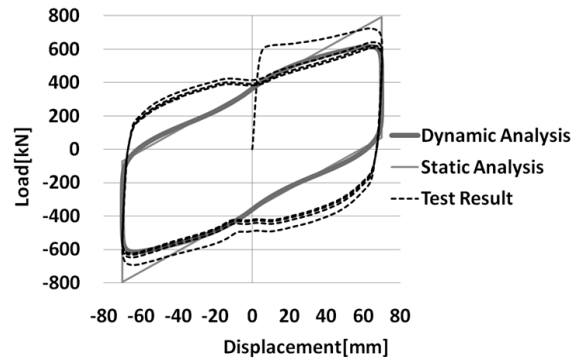
〈그림 10〉 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침 시험체 형상 및 시험 전경

〈표 4〉 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 동적거동 시험 조건

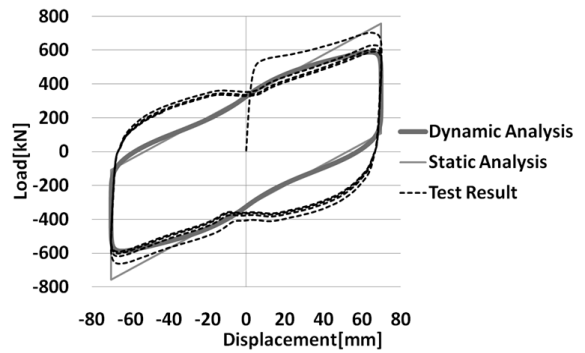
구분	연직하중 [kN]	시험변위 [mm]	접촉 압력 [MPa]	폴리우레탄 스프링			
				외경 [mm]	내경 [mm]	길이 [mm]	개수 [개]
시험 1	5100	±70	18.2	40	130	140	2
시험 2	4080	±70	14.5	40	130	140	2
시험 3	3060	±70	10.9	40	130	140	2

로 진행되었다. 시험 방법은 AASHTO 시방을 참조하였다.⁽⁷⁾ 시험 결과로는 변위에 따른 수평방향의 하중을 구할 수 있다.

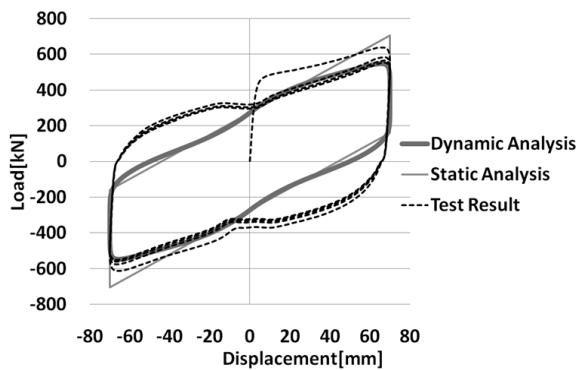
앞에서 설명한 바와 같이 PTFE의 마찰계수는 속도가 100mm/sec를 넘어서면 변화가 급격히 감소한다. 따라서 최대 시험 속도가 100mm/sec인 sine파 형태로 변위를 가하였으며 시험 주파수는 0.227Hz로 계산된다. 동일한 시험체에서 접촉압력을 점차 감소시키면서 시험을 실시하였으며 각 하중별로 왕복 5회의 변위를 가하였다. 기타 시험 조건은 아래 표 4와 같다.



(a) 접촉압력이 18.2MPa



(b) 접촉압력이 14.5MPa

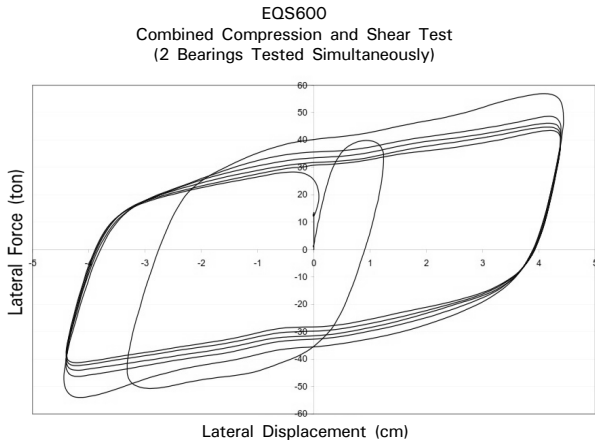


(c) 접촉압력이 10.9MPa

〈그림 11〉 받침의 동적거동 시험 이력곡선과 해석적 분석 결과

4.2 시험결과 분석 및 고찰

동적거동 시험 결과를 3장에서 설명한 정적 분석 결과 및 동특성을 고려한 분석 결과와 함께 그림 11에 보였다. 그림 11의 세 그래프에서 볼 수 있듯이, 그래프는 0점을 기준으로 1사분면과 3사분면의 경우 시험 결과와 동특성을 고려한 분석 결과가 거의 일치하고 있다. 정적 분석의 경우 초기 기울기가 변위 내내 유지되어 하중을 시험 결과에서의 하중보다 크게 예측하고 있는 반면, 동특성을 고려한 분석의 경우 실제 시험결과를 거의 정확하게 모사하고 있다. 그러나 2사분면과 4사분면의 경우 시험결과와 분석 결과가 일치하지 않음을 볼 수 있다.



〈그림 12〉 일반적인 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 동적거동 시험 이력 곡선 양상

일반적인 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 시험 결과는 그림 12와 같이 하중 증가와 하중 감소가 거의 일정한 양상으로 진행되게 된다. 그림 12는 미국 RJ-Watson 사의 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침 거동 시험 결과이다.⁽⁸⁾

이 논문의 시험 결과는 일반적인 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 거동 시험 결과인 그림 12와 달리 2사분면과 4사분면에서 감쇠 효과가 과대 적용된 것처럼 보인다. 그림 11의 세 시험 결과에서 모두 같은 양상이 나타나는 것으로 보아 이는 받침의 마찰감쇠가 아닌 시험기 자체의 감쇠 효과가 적용된 것으로 판단된다.

또한 첫 번째 사이클의 그래프는 다른 사이클의 그래프보다 항복 및 최대값이 크게 발생하였다. 이는 첫 번째 사이클의 시험에서는 시험기와 받침간의 유격으로 인한 관성, 고정의 불완전성, 초기속도의 부재 등으로 인하여 시험값이 크게 튀는 현상이 발생한 것을 판단된다. 따라서 이 연구에서는 첫 사이클의 시험값은 비교 대상에서 제외 하였다.

이러한 결과를 통해서 정리한 시험값, 정적 분석, 동특성을 고려한 분석 3가지 각각의 소산 에너지, 유효강성, 감쇠비, 최대하중의 비교를 다음 표 5에 보였다. 여기서 소산 에너지는 이력곡선 내부 면적을 의미하고, 유효강성(k_{eff}) 및 등가감쇠비(β_i)는 도로교 설계기준(2005)에 의해서 계산되었다.⁽⁹⁾

표 5의 시험값에서의 소산 에너지 및 유효강성은 각 사이클별 시험값의 평균값을 명기하였다. 앞서 기술한 바와 같이 첫 번째 사이클에서는 신뢰할 만한 시험값을 얻기 어려우므로 첫 번째 사이클의 시험값은 제외하고 평균값을 계산하였다. 최대하중은 측정 하중 값 중 최대값을 기술하였으며 마찬가지로 첫 번째 사이클의 데이터는 제외하였다.

〈표 5〉 시험값과 동특성을 고려한 분석, 정적 분석의 비교

구분	시험값	동특성을 고려한 분석		정적 분석		
		분석 값	오차 [%]	분석 값	오차 [%]	
5100kN	소산에너지 [kN·mm]	112778	93226	17.3	102219	9.36
	유효강성 [kN/mm]	9.40	8.82	6.12	11.1	17.7
	등가감쇠비 [%]	39.0	34.3	12.0	30.0	23.0
	최대하중 [kN]	641	615	4.06	795	24.0
4080kN	소산에너지 [kN·mm]	100535	85490	15.0	90960	9.52
	유효강성 [kN/mm]	8.98	8.39	6.57	10.5	16.8
	등가감쇠비 [%]	36.4	33.1	8.98	28.2	22.5
	최대하중 [kN]	629	587	6.68	758	20.5
3060kN	소산 에너지 [kN·mm]	89379	70079	21.6	76407	14.5
	유효강성 [kN/mm]	8.15	7.83	3.94	9.74	-12.0
	등가감쇠비 [%]	35.6	29.1	18.4	25.5	28.5
	최대하중 [kN]	583	548	6.00	706	21.1

표 5에서 볼 수 있듯이 동특성을 고려한 분석을 사용하면 정적 분석을 사용하는 것보다 유효강성과 감쇠비 및 최대하중에서 더 정확한 예측이 가능하다. 소산에너지의 경우 정적 분석이 더 작은 오차를 갖는 것으로 보인다. 그러나 이는 정적 분석이 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 거동을 더 정확히 예측한 것이 아니라 정적 거동 분석 그래프 내부의 면적(소산에너지)이 시험 결과 그래프 내부의 면적과 비슷한 것에 기인한다. 전체적으로 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 거동 양상 및 유효강성, 등가감쇠비에서 동특성을 고려한 분석은 정적 분석보다 실제 거동을 더 정확히 모사하는 것으로 판단된다. 시험기 자체의 감쇠 효과를 배제할 경우 동특성을 고려한 분석 방법은 시험 결과를 더 정확히 모사할 수 있다고 할 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침 거동을 정적 분석과 동특성을 고려한 분석을 통하여 예측하였

고, 이를 시험 결과와 비교하였다. 동특성을 고려한 분석에서는 불소수지판의 마찰계수와 폴리우레탄 스프링의 탄성계수를 동특성 영향인자로 정의하였다. 이를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 거동 평가를 수행 시에는 불소수지판의 마찰계수의 정량적 평가에 접촉 압력의 크기 및 상부구조 속도의 변화를 고려하는 것이 필수적이다. 또한 폴리우레탄 스프링의 탄성계수도 변형률에 따라 최대 두 배까지 변화하는 것으로 나타나 동적 영향 인자로서의 고려가 필요하다.
2. 마찰계수와 탄성계수의 동적 영향 인자를 고려하면 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 거동을 적절하게 모사할 수 있으며, 동적하중에 대한 교량의 거동을 보다 정확하게 예측 가능하다고 판단된다.
3. 이 연구에서 수행하지 못한 폴리우레탄 스프링의 탄성계수에 영향을 미치는 변형 속도의 영향이나 주위 온도 등에 대한 동적 요소에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 심현해, 권오관, “PTFE-폴리이미드 복합 재료의 마찰과 마모 특성” 한국윤활학회지, 제11권, 제4호, 28-34, 1995.
2. Biswas, S.K., and Vijayan, K., “Friction and wear of PTFE - a review,” *An international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear*, Vol. 158, No. 1, 193-211, 1992.
3. Dolce, M., Cardone, D., and Croatto, F., “Frictional behavior of steel-PTFE interfaces for seismic isolation,” *Bulletin of earthquake engineering*, Vol. 3, No. 1, 75-99, 2005.
4. *European Standard*, EN 1337-2, 2000.
5. Treloar, L.R., Hopkins, H.G., Rivlin, R.S., and Ball, J.M., “The Mechanics of Rubber Elasticity [and Discussions],” *Proceeding of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical sciences*, Vol. 351, No. 1666, 301-330, 1975.
6. Havinga, J.S., and Meij, S., “Engineering with Natural Rubber,” *Natural rubber*, Vol. 13, 2-3, 1999.
7. AASHTO, *Guide Specification for Seismic Isolation Design*, 1999.
8. RJ Watson Inc., *Seismic Isolation Bearing Test Report*, 2003.
9. 한국도로교통협회, *도로교 설계기준*, 2005.