한국지진공학회 논문집 19권 1호 (통권 제101호) 2015년 1월 ISSN 1226-525X / eISSN 2234-1099 EESK J Earthquake Eng Vol. 19 No. 1, 13-19 http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2015.19.1.013

# 원전 EQS 면진장치의 성능개선을 위한 연구

Study on the Performance Improvement of an EQS Device Applied Nuclear Power Plant

이유인<sup>1)</sup>\* · 이유진<sup>1)</sup> · 이홍표<sup>2)</sup> · 조명석<sup>2)</sup> · 지용수<sup>1)</sup> · 백준호<sup>1)</sup>
Lee, You In<sup>1)</sup>\* · Lee, Yu Jin<sup>1)</sup> · Lee, Hong Pyo<sup>2)</sup> · Cho, Myung Sug<sup>2)</sup> · Jee, Young Su<sup>1)</sup> · Beak, Jun Ho<sup>1)</sup>
<sup>1)</sup>(주)에스코알티에스, <sup>2)</sup>한수원(주) 중앙연구원
<sup>1)</sup>R&D Center, ESCO RTS, <sup>2)</sup>R&D Center, KHNP

# / ABSTRACT /

This paper presents the performance improvement of an EQS (Eradic Quake System) device applied to a nuclear power plant. For the nuclear facility, the EQS device needs to be ensured to have high quality, flexibility of design and reliability. To improve the reliability of the design, the hysteresis of the device must be exactly predicted. The friction coefficient of PTFE (PolyTetraFluoroEthylene) and the stiffness of the MER-Spring are considered as the factors influencing the hysteresis curve. In this paper, those factors are analysed to predict the behavior of the device and to improve the equipment of the EQS device. The results of the improved EQS device have been verified via a tests to be comparable with the predicted results. The estimation results indicate that considering those factors is more appropriate than the results of the previous design and method.

Key words: EQS device, Friction Coefficient, PTFE, stiffness, MER-Spring

# 1. 서 론

근래 전 세계적으로 지진의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 국내에서도 작은 규모이지만 그 빈도가 증가하고 있다. 기상청에서 보도된 국내 및 세계 지진발생 현황을 보면 지진발생은 21세기에 들어 평균 19.2에서 평균 44.5로 2배 이상 증가한 것을 확인 할 수 있다[1]. 이러한 지진에 대비하기 위해 주요 시설물들의 내진 설계가 중요하게 대두되고 있다. 특히 원자력발전소 밀집도가 세계에서 가장 높고 그 의존율이 40%에 육박하는 국내의 경우 원자력발전소의 안정성 확보는 반드시 필요하다. 국내원자력발전소는 지진에 대비하기위해 규모 6.5의 지진에 대해서 설계되고 있다[2]. 이는 원자력발전소 구조물은 지진으로 붕괴되기까지에 큰 안전율을 확보하고 있는 것이다. 그러나지반의 진동으로부터 구조물의 상부에 전달되는 최대가속도 계측시 0.8g~1.0g 이상의 가속도가 발생하게 되면 내진기술의한계를 느낄 수밖에 없대3, 4]. 따라서 과거의 내진 개념에서 벗어나 면진

시스템 개념을 원자력발전소에 적용하는 것이 필요하다. 면진설계는, 지진 발생 시 지진하중에 대해 구조물을 더욱 튼튼하게 건설하여 구조물의 강성으로 지진에 저항하는 내진설계 개념이 아닌 구조물과 바닥을 격리(Base Isolation)하여 구조물에 전달되는 지진 에너지를 면진장치가 흡수하게 하는 방식이다. 이는 구조물에 전달되는 지진력을 최소화시킬 수 있기 때문에 지진파의 불확실성에 효과적으로 대처할 수 있게 된다. 현재까지 원자력발전소에 면진장치를 적용한 예를 살펴보면, 프랑스와 남아프리카공화국이원자력발전소에 면진장치를 적용한 것을 기점으로 일본에서는 원자력발전소를 건설하기에 앞서 면진장치를 적용하기 위해 연구를 활발히 수행하고 있으며, 원자력발전소 내진설계기준에서도 면진장치의 사용을 허용하고 있다[2].

본 연구는 원자력 융합 원천 기술 개발 사업연구의 일환으로 국내 토목 및 건축 구조물에 사용되고 있는 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침 (EQS, Eradic-Quake System)을 원전 구조물에 적용하기 위해 수행되었다. 원전 구조물의 경우 높은 안전율 및 신뢰성을 바탕으로 설계되지만 지진 발생으로 인하여 기능적 이상이나 손상이 발생할 경우, 피해 규모가 일반구조물보다 더 크게 발생할 수 있기 때문에 기존의 교량 및 구조물에 사용되어

<sup>\*</sup>Corresponding author: Lee, You In

온 EQS 면진장치보다 더 높은 품질과 설계의 유연성 및 신뢰성을 확보해야 만 한다. 설계 정밀도와 정확성을 높이기 위해 기존 EQS 면진장치에서 발생하는 미복원성 부분을 개선하였으며 설계의 신뢰성 향상을 위해 면진장치의 이력 거동에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 거동을 정확히 예측할수 있는 EAP(EQS Analysis Program)를 개발하여 이론을 검증하였다.

# 2. 원전용 EQS 면진장치

EQS는 구조물과 교량의 면진 받침으로 널리 사용되고 있는 받침 중의 하나이다. EQS 받침 구조는 Fig. 1과 같으며, 상판과 하판, 베어링 블록과 이에 접하는 마찰재와 복원력을 발휘하는 MER-Spring 그리고 연직하중을 지지하고 회전변위를 수용하는 Polytro Disk로 구성되어 있다. 상판은 교량 혹은 건물의 상부 구조물과 연결되어있고, 하판은 교각이나 교대 혹은 구조물의 기초부와 연결된다. 상판 및 하판 그리고 베어링 블록은 강재로 만들어지고, MER-Spring과 Polytro Disk는 플라스틱 계열 중 하나인 폴리우레탄으로 마찰재는 PTFE로 만들어진다. 교량 구조물에 적용되는 면진 장치는 도로교설계기준 내진설계 편에 명시된 품질 기준을 따르며 유효강성( $k_{eff}$ )과 한 Cycle당 소산된 에너지량(EDC, Energy Dissipated per Cycle) 값으로 면진장치의 성능을 평가한다.

기존 EQS 면진장치의 성능을 분석하기 위해 장치 특성 시험을 수행하였고 그 결과를 확인하였다. 시험에 사용된 장치는 연직하중 10,000 kN, 설계변위 100 mm, 유효강성 10.05 kN/m, 주기 2.0sec로 설계된 장치이다. 장치의 크기는 1,700 mm × 1,700 mm × 420 mm이고, 시험 시 가진 속도는 100 mm/sec이다. 거동시험 결과는 Fig. 2와 같다. 하중-변위 이력곡선을 살펴보면, 일정한 수평하중에서 마찰판의 마찰계수에 의해 항복이 발생하고, MER-Spring에 의한 이차강성이 발생하게 되는데 변위가 0 mm인부근에서 수평하중이 일정하게 유지 되는 것을 확인 할 수 있다. 압축력을 받은 MER-Spring이 원래의 길이로 복원되기 전에 다시 압축력을 받아서 발생하는 현상이다. 이러한 미복원 변위를 제거하기 위해서 MER-Spring에 선압축력을 적용하여 장치를 개선하였다. 시험 결과 얻은 또 다른 개선 사항으로는 마찰판에 발생하는 열에 의한 접착력 감소를 마찰판에 적용하는 접착재를 개선함으로 보완하였다. Fig. 3은 EQS의 내구성을 높이기 위해 개선한 EQS장치 모습이며, Fig. 4는 선압축을 하기위해 개선시킨 MER-Spring system의 모습이다.

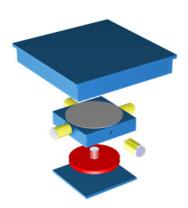


Fig. 1. Existing EQS Device

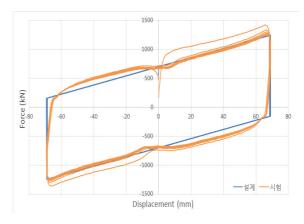


Fig. 2. Load-displacement behavior of EQS Device

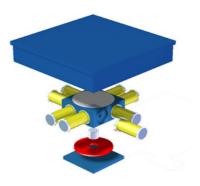


Fig. 3. Improved EQS Device

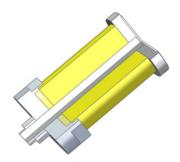


Fig. 4. MER-Spring System

# 3. 원전용 EQS 해석 프로그램

국내에서 사용되고 있는 면진장치의 동적 거동 시험 결과를 보면 설계 시 예상 거동과의 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 이유는 제품에 사용되고 있는 재료는 비선형성을 가지는데 반면 설계는 재료가 선형 이라는 가정 하에서 진행되기 때문이다. 일반 구조물보다 높은 신뢰성을 요구하는 원전 구조물에 면진 설계를 적용하기 위해서 EQS 면진받침의 설계에 따른 비선형 거동을 정량적으로 예측함으로써 설계 값과 시험 값의 오차를 최소화하며, 설계수명 내 외에서의 장치의 특성을 미리 예측할 수 있는 모듈이 필요하다. 이를 위해서는 EQS 장치를 구성하고 있는 PTFE와 폴리 우레탄의 재료적인 특성을 잘 파악하고 있어야 한다. PTFE는 마찰력이 운동방향에 반대되는 방향성을 가진다는 원리를 이용하여 에너지 감쇠기능

을 갖으며, 폴리우레탄 스프링(Polyurethane spring)은 2차 강성을 발현하여 수평방향의 변위가 종료된 후에도 내부 구조체와 PTFE를 복원시키는 복원력을 갖는다. 폴리우레탄 스프링은 강재 스프링과는 달리 탄성계수가 선형이 아닌 비선형성을 띄는 특징이 있다.

#### 3.1 거동방정식 및 동특성 영향 인자

EQS 면진 장치의 거동에 있어 동적 특성을 결정하는 인자로는 두가지가 있다. 첫째로는 PTFE에 의한 마찰이고 둘째로는 MER-Spring의 강성이다. 이 두가지 요소 모두 비선형성을 갖고 있으며, PTFE의 마찰계수는 PTFE에 작용하는 면압의 크기와 장치의 거동속도에 따라 달라지며, MER-Spring의 탄성계수는 변형률에 따라 달라진다. EQS의 거동 예측은 동적 특성을 결정하는 두가지 인자의 시험 및 분석을 통해서 이루어진다. 재료 특성시험을 통해 마찰재에 작용하는 접촉 압력이 증가할수록 마찰계수가 감소하고 속도가 증가할수록 마찰계수가 커지는 특성을 나타내는 것을 확인하였다[5].이러한 특성을 바탕으로 속도와 접촉압력에 따른 마찰계수식을 로그 식으로 식(1)과 같이 구성하였다.  $\mu(v)$ 는 속도에 따른 마찰계수이고,  $\alpha,\beta$ 값은 상수로서, 속도에 따른 마찰계수 값을 시험 결과의 역추 정으로 얻게 되는 값이다.

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

MER-Spring의 재료시험을 통해서 MER-Spring은 점탄성 물질로서 변형속도와 변형률에 따라 탄성계수가 변하는 비선형성을 갖는 것을 확인 하였고, 형상계수에 따라 경화될 때의 하중-변형률 곡선의 기울기가 다른 것을 확인하였다. 시험 결과로부터 곡선 맞춤 과정을 거치면 3차 다항식의 변형률에 따라 변하는 곡선식을 얻을 수 있으며 이를 미분함으로써 다음과 같은 MER-Spring의 탄성계수 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.  $a \sim f$ 는 시험 결과를 통해 얻어지는 상수 값이며, SF(Shape Factor)는 형상계수를 의미한다.

$$E_{poly}(\varepsilon) = a(\varepsilon)^3 + b(\varepsilon)^2 + c(\varepsilon) + d \tag{2}$$

$$E_c = E_{poly}(e + SF \times f) \tag{3}$$

### 3.2 EQS 장치의 동적 거동

EQS의 거동방정식은 식 (4)의 운동방정식을 기본으로 하여 EQS 장치의 특성에 따른 수식을 적용하여 나타낼 수 있다. EQS 장치의 특성 중 하나 인 면압과 속도에 따라 변하는 마찰계수를  $\mu(x(t),\sigma)$ 로 표현하고, 비선형 특성을 갖는 MER-Spring의 강성은  $k(\sigma(t))$ 으로 표현하였다.

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) \tag{4}$$

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + mau(\dot{x}(t), \sigma) + k(\varepsilon(t))x(t)$$
(5)

기존 EQS 받침 설계는 하중함수 F(t) 에서 PTFE의 마찰계수와 폴리우레탄 스프링 강성을 상수로 가정하여 동특성을 고려하지 않고 분석하였다. 이와 달리 EAP 프로그램은 동특성을 고려한 분석으로 하중 함수 계산시 동특성 영향인자인 PTFE의 마찰계수와 폴리우레탄 스프링 탄성계수를 마찰 속도, 접촉 압력 및 변형률에 따라 예측하여 분석한다. 동특성을 고려한 식은 아래 식 (6)과 동일하다.

$$F(t) = mgu(\dot{x}(t), \mu) + k(\varepsilon(t))x(t)$$
(6)

EQS 거동 해석 프로그램의 하중-이력곡선의 기본방정식은 위와 같은 동적 분석 방법을 기반으로 하였다.

#### 3.3 EAP의 개발

프로그램을 구성하는 Input은 먼저 비선형 재료의 특성과 입력파(Sine, Triangle, Random wave)에 대해 정의하고, MER-Spring과 PTFE의 입력변수에 따른 제원을 입력한 후, 면적 등과 같은 제원의 특성 값을 계산하도록 하였다. 입력파의 구성은 진동수에 의해 구성되며, 시간에 따른 변위 그래프가 그려지게 된다. 시간 변화에 따른 변위 변화를 계산하고 나면 그에 따라 변하는 비선형 특성 값들을 결정하도록 되어있다. 모든 변수가 결정이되면 각각의 변위 변화에 따른 받침의 수평력이 결정된다. 이러한 EAP의 알고리즘 순서는 Fig. 5와 같다.

EQS 해석 프로그램을 구성하고 있는 해석 모듈은 MER-Spring의 변위와 복원 및 형상계수에 따른 비선형성과 면압과 속도, 왕복 변위와 형상에 따른 마찰계수의 비선형적 특성을 반영하고 있다. EAP에 적용된 비선형 동특성인자는 Table 1과 같다. 해석 프로그램을 통해 비선형 재료 특성에 따른 하중 변위곡선과 그에 따른 소산되는 에너지량, 1차 및 2차 강성, 유효강성, 항복강도를 예측할 수 있다. Fig. 6은 이러한 내용을 담고 있는 EAP의 전경이다.

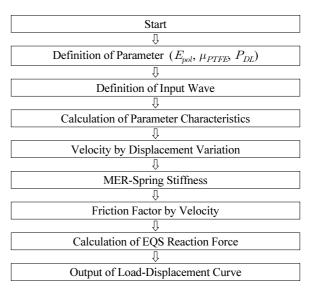


Fig. 5. Algorithms of Nonlinear behavior program

Table 1. Nonlinear characteristics applied to the EAP

	Friction Coefficient	MER-Spring Modulus
Nonlinear factor	stress	strain
	velocity	restoring factor
	displacement	shape factor
	shape factor	

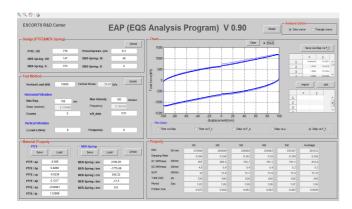


Fig. 6. EQS Analysis Program

# 4. 원전용 EQS 면진 장치의 성능 평가

장치를 개선시킨 원전용 EQS 면진장치가 기존 EQS 면진장치보다 더 높은 설계 정밀도와 정확성을 확보하는 것을 확인하기 위해 동적 특성을 결 정하는 변수에 따라 장치 특성을 수행하였고 이를 개발한 EAP프로그램과 비교분석 하였다. 시험에 사용된 면진 장치는 동적 특성을 결정하는 인자인 속도와 변위 그리고 면압에 대해 각 각 시험을 수행하였다. 의존성 시험을 통해 장치가 거동함에 있어 지진파의 속도와 장치에 상재되는 하중이 거동 에 어떤 영향을 미치는지 확인 할 수 있으며, 각각 시험 결과에 의한 하중-변 위 곡선도 확인하였다. 또한, 접착강도를 높인 마찰재의 재료특성을 확인하 기 위해 내구성 시험을 수행하였고 시험 후에 마찰재의 상태를 확인하였다. 속도 의존성 시험은 수평방향 가진 속도를 저속과 고속으로 1 mm/sec, 5 mm/sec, 20 mm/sec, 100 mm/sec에 대하여 시험을 진행하였고, 면압 의 존성 시험은 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa에 대해서 실시하였다. 변 위 의존성 시험은 20 mm, 40 mm 60 mm, 100 mm에 대하여 수행하였다. 내구성 시험은 100 mm/sec의 속도로 400회의 반복시험을 수행하였다. 기 존 EQS 면진장치와 원전용 EQS 면진장치는 동일한 제원인 1,700 mm × 1,700 mm × 420 mm 크기에 최대 연직용량 1,000 ton, 수평변위는 100 mm이다. Fig. 7은 특성시험을 수행한 시험기의 전경이다.

#### 4.1 속도에 따른 EQS 면진 장치의 거동 시험

속도에 따른 EQS 면진 장치의 특성을 확인하기 위하여 저속과 고속으로 나누어 속도별 시험을 수행하였다. 기존 EQS 면진장치와 원전 EQS 면진 장치의 속도에 따른 시험 결과와 EAP 해석 결과는 Figs. 8, 9, 10에 나타내었다. 기존 EQS(Fig. 8)와 원전 EQS(Fig. 9)의 시험결과를 비교해 보면, 기존 EQS의 경우 MER-Spring의 미복원성으로 인해 발생하는 부분이,



Fig. 7. SGS Testing System

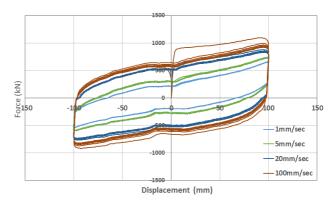


Fig. 8. Test results according to the velocity about existing EQS

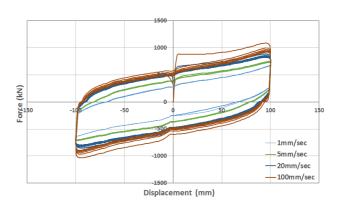


Fig. 9. Test results according to the velocity about NPP EQS

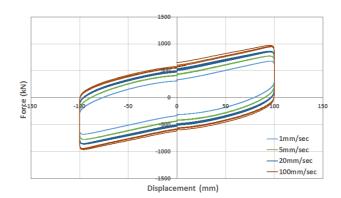


Fig. 10. Analysis of EAP

MER - Spring을 개선시킨 후에는 변위가 0인 부분에서 2차 강성을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 이는 MER - Spring이 압축된 이후 다음 압축 시까지 미복원량이 거의 발생하지 않았음을 의미한다. 또한 시험 결과를 보면 저속에서 고속으로 갈수록 감쇠 면적이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 마찰판 역할을 하는 마찰재가 속도가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하기 때문에 발생하는 현상으로 이러한 특성으로 인해 EQS 장치가 지진파의 크기에따라 효과적으로 저항 할 수 있을 것으로 판단된다.

# 4.2 면압에 따른 EQS 면진 장치의 거동 시험

면압에 따른 EQS 면진 장치의 특성을 확인하기 위하여 장치에 작용하는 연직하중의 크기를 달리하여 시험을 수행하였다. 시험 속도와 변위는 100 mm/sec와1000 mm로 동일하게 적용하였고, 면압의 크기는 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa로 5 MPa씩 증가 시켜 진행하였다. Figs. 11, 12는 면압에 따른 기존 EQS와 원전 EQS의 시험 결과 이며, Fig. 13은 EAP 해석 결과이다. 시험 결과를 보면, 면압이 증가함에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 그 변화량이 크지 않기 때문에 연직하중이 감소하더라도 EQS장치의 특성은 크게 변하지 않을 것을 알수 있다. EAP해석결과와 이력곡선을 비교해 보면, EDC의 오차가 나는 것을 확인 할 수 있지만, 전체적인 EQS의 거동양상은 동일 한 것을 알 수 있다.

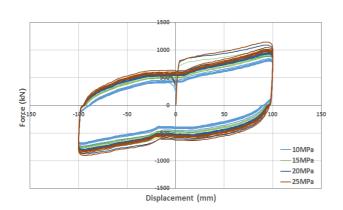


Fig. 11. Test results according to the bearing stress about existing EQS

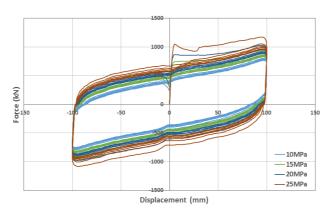


Fig. 12. Test results according to the bearing stress about NPP EQS

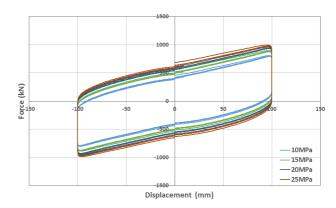


Fig. 13. Analysis of EAP

또한, 제작 및 시험에 의한 오차를 고려한다면, EAP 해석결과의 오차가 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

# 4.3 변위에 따른 EQS 면진 장치의 거동 시험

변위에 따른 EQS 면진 장치의 특성을 확인하기 위하여 장치의 시험변 위를 달리하여 시험을 수행하였다. 시험 변위는 20 mm, 40 mm 60 mm, 100 mm로 4단계로 진행하였고, 장치의 시험 결과는 기존 EQS는 Fig. 14,

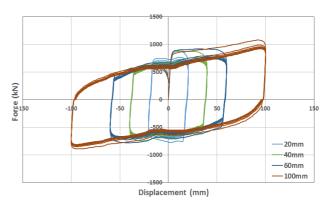


Fig. 14. Test results according to the displacement about existing EQS

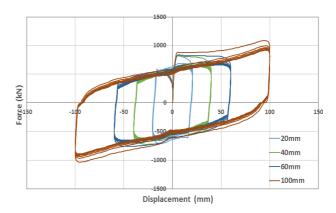


Fig. 15. Test results according to the displacement about NPP

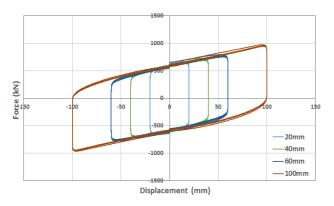


Fig. 16. Analysis of EAP

원전 EQS 장치는 Fig. 15, EAP 해석 결과는 Fig. 16과 같다. 속도와 면압에 따른 결과와 동일하게 원전 EQS 장치의 미복원 변위부근이 거의 없는 것을 다시 확인할수 있다. 또한, 변위 시험 결과 시험 변위와 관계없이 항복 강도 이후 동일한 이차강성을 나타내는 것을 알수 있다. 이는 변위가 증가하더라도 장치의 특성에는 변화가 없음을 판단할수 있다. 기존 EQS와 원전 EQS의 시험결과를 EAP의 해석결과와 비교해봤을 때, 원전 EQS가기존 EQS보다 개선을 통해 해석 값과 더 일치한다는 것을 알수 있으며, 개선을 통해 설계에 대한 신뢰성을 높였을 것으로 판단하였다.

의존성 시험 결과를 정리하면 Table 2와 Table 3과 같다. 기존 EQS 면 전장치의 하중·변위 곡선 성능특징은 변위가 0인 지점에서 2차강성이 거의 0인 것을 확인할 수 있다. 이는 시험의 종류와 조건에 관계없이 동일하게 발생하며, MER-Spring이 압축된 이후 복원되기까지 걸리는 시간보다 EQS 의상판이 이동하는 시간이 더 빠르기 때문에 발생하는 미복원 현상이다. 시험 조건에 따른 특징으로는 면압 의존성 시험 결과에서 면압이 증가할수록 연직하중과 수평하중의 비인 마찰계수가 감소하는 것이다. 변위 의존성 시험 결과를 통해서는 변위의 증가에 상관없이 면진장치의 거동 경향에는 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. 속도 의존성 시험의 결과를 보면, 속도가증가함에 따라 마찰계수가 증가함을 확인할 수 있다. 이 결과는 기존에 시험했던 결과들과 동일한 경향으로 위에서 언급한 것 과 같이 마찰재가 속도가빨라지면서 마찰계수가 증가하는 현상에서 비롯된 것이다.

원전 EQS 면진장치 시험결과를 보면, 기존 EQS 면진장치의 하중-변위 곡선은 미복원 구간으로 변위가 0인 지점에서 2차강성이 거의 0이였으나, 원전 EQS는 MER-Spring을 선압축하여 변위가 0인 지점에서도 2차 강성이 이론에 의한 값과 유사하게 나타남을 확인하였고, 모든 시험에서 동일하게 2차 강성이 발현되는 결과를 나타냈다. 시험 조건에 따른 특징으로는 기존 EQS 면진장치와 크게 다르지 않음을 알수 있다. 마찰계수는 면압이 클수록 감소하고 속도가 빠를수록 증가하는 경향이 있는 것과, 유효강성 및 EDC는 변위가 클수록 증가하는 경향을 갖는 점이다. 이 결과를 통해 EQS의 면진장치의 특성은 기존이나 개선된 원전 장치나 그 특성은 거의 변하지 않고 동일한 결과를 나타내는 것을 알수 있다.

EQS장치의 특성 시험 후, 설계값을 기준으로 원전 EQS장치의 소산된에너지량 및 유효강성의 차이를 비교해보면, 각각 5%, 10% 발생하였고,해석결과 값과 원전 EQS 시험값과는 EDC는 9%, Keff는 7%의 오차를 보인다. 설계값을 기준으로 기존 EQS장치의 EDC 및 Keff의 오차율은 18%,

Table 2. Test results about existing EQS

Test Type	Condition	EDC (kN, mm)	Keff (kN, mm)
rest type		` , ,	Kell (KN, IIIII)
Dependence of bearing stress	10 MPa	169,197	7.636
	15 MPa	204,494	8.486
	20 MPa	223,130	8.984
Dependence of displacement	25 MPa	234,095	9.342
	20 mm	48,753	35.106
	40 mm	93,314	17.861
	60 mm	142,219	12.494
Dependence of velocity	100 mm	232,046	9.045
	1 mm/sec	86,084	5.978
	5 mm/sec	119,957	6.596
	20 mm/sec	198,969	7.960
	100 mm/sec	236,215	9.126

Table 3. Test results about NPP EQS

Test Type	Condition	EDC (kN, mm)	Keff (kN, mm)	
Dependence of bearing stress	10 MPa	156,681	7.836	
	15 MPa	190,425	8.542	
	20 MPa	215,893	9.174	
	25 MPa	246,186	9.995	
Dependence of displacement	20 mm	41,568	31.953	
	40 mm	82,316	16.726	
	60 mm	125,232	11.7	
	100 mm	216,165	9.04	
Dependence of velocity	1 mm/sec	103,863	6.541	
	5 mm/sec	144,455	7.202	
	20 mm/sec	191,801	8.324	
	100 mm/sec	215,308	9.574	

Table 4. Comparison of test result with analysis result

Content	EDC	Keff [kN, mm]	error	
	[kN, mm]		EDC	Keff
Design	200,000	10.050	-	
Exist. EQS	236,215	9.126	1.18	0.91
NPP EQS	210,315	9.616	1.05	0.96
Analysis	231,312	10.362	-	

9% 발생하였다. Table 4와 0 같이 설계 하중,변위 및 100 m/sec를 기준으로 설계하였을 때, 기존 EQS 면진 장치보다 개선한 원전 EQS 면진 장치가설계 값과 더 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 시험 후 장치의 상판을 제거하여 마찰재의 개선을 육안으로 확인하였다. Fig. 17은 시험 후 원전 EQS의 마찰재의 모습으로 PTFE의 변형이 발생하지 않음을 확인 할 수 있었다. 400회 시험 뒤에 마모가 발생한 것을 확인 할 수 있으나 이는 장치성 능에는 문제가 되지 않으며, 100 mm/sec로 400회 반복이기 때문에 실제지진이 발생하는 변위보다도 훨씬 더 많은 변위로 왕복 시험을 한 것이다.





Fig. 17. Friction materials test of Improved PTFE (400cycle)

# 5. 결론

본 연구에서는 원전 구조물에 적용하기 위한 EQS 면진장치의 개선 사항을 도출하였고, 개선 사항이 반영된 EQS 면진장치를 제작 및 시험하여 기존의 EQS와 비교 분석하였다. 또한, EQS면진장치의 설계 신뢰성을 높이기 위해 비선형 해석 프로그램을 개발하였고, EAP 성능 검증을 위하여 EQS 면진장치의 실증실험을 하여 그 결과와 비교 검증하였다.

- 1) 기존 EQS에 대한 개선 사항으로는 EQS 면진장치의 하중-변위 이력곡선 상의 복원강성이 발생하지 않는 구간을 제거하기 위해 MER-Spring의 System을 개선하였고, 접착재의 접착력을 개선하기 위해 새로운 접착재로 개선하였다. 새로운 접착재에 따른 마찰재의 특성변화를 분석하기 위해 400회의 반복시험을 수행하였고 그 결과 반복시험에 따른 마모는 있었지만 PTFE의 변형은 발생하지 않은 것을 확인 하였다. 추가적으로, 고내구성과 고강도를 갖는 소재를 도입하여 시험을 수행할 계획이다.
- 2) 설계의 높은 신뢰성을 확보하기 위해 EQS 면진장치의 비선형 해석프로그램인 EAP를 개발하여 이를 검증하기 위해 특성 시험 결과와 비교 분석하였다. 각 시험 및 해석 결과의 비교 그림들을 통해 각각의 결과가 거의 같은 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 제작 및 시험 오차를 일부고려한다면, 실험과 해석결과가 거의 일치하는 결과이며, 향후 재료특성에 대한 추가적인 분석과 비선형 EQS의 동적 수학적 모델의 개발을통해 오차 범위를 더 줄일 계획이다. 결과적으로 본 연구로 통해 개발된 EAP가 EQS 면진장치 설계 시 보다 정확한 예측과 설계에 도움이 될것으로 판단된다.

# / 감사의 글 /

본 연구는 2014년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을받아수행한 2단계연구과제입니다 (No. 2014151010170D).

### / REFERENCES /

- Nam HW. Status of Domestic and Global earthquake 2012. Korea Meteorological Administration Press Release; c2012.
- 2. Choi IG. Safety of Nuclear Power Plant for Earthquake. Korea Atomic Energy Research Institute.
- Kim SH, Base Isolation Device for Preventing Earthquake -Device.
   v 13. Korea Society of Seismic isolation and Vibration Control;
   c2011.
- Ha JJ. Niigata Earthquake and Seismic design of Nuclear power plant. Korea Atomic Energy Research Institute.
- Park HG, Lee YI, Jung DY. Experimental and Analytical Study on Dynamic Behavior of Polyurethane Spring Restroing Disk Bearing. Proceedings of Earthquake Engineering Society of korea. 2011; 15(2):61–69.
- Dolce M, Cardone D, and Croatto F. Frictional behavior of steel-PTFE interfaces for seismic isolation. Bulletin of earthquake ngineering. 2005;3(1):75-99.
- Lee YI, Ji YS, Han WJ, Kim KI, Lee HP, Cho MS. Analysis for Dynamic Non-Linear characteristics of Polyurethane Spring Restoring Disk Bearing Using Matlab. Proceedings of Computational Structural Engineering institute of Korea; p.118-121.
- 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, 1992;158(1):193-211.
- Shim HH, Kwon OK. Friction and Wear Characteristics of PTFE– Polyimide Composite. Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 1995;11(4):28–34.