

원전 방진기 검사 및 관리 현황

조용배[†] · 문균영^{*} · 유현주^{**}

Status of Inspection and Management for Nuclear Power Plants Snubbers

Yong-Bae Cho[†], Gyoon-young Moon^{*} and Hyun-Joo Yoo^{**}

(Received 28 April 2014, Revised 23 May 2014, Accepted 29 May 2014)

ABSTRACT

Recently, it is getting more and more important ensuring the integrity for the equipment degradation according to the increase of nuclear power plant operating period. In many equipment of the nuclear power plant, snubbers mainly installed in reactor coolant pumps, steam generators and piping protected the equipment and piping from the occurrence of transient dynamic loads such as the earthquake, thermal load during the plant operation. This report describes the function, regulation, inspection requirements and management status of the snubbers installed in domestic nuclear power plants.

Key Words : Snubber(방진기), Nuclear Power Plant(원자력발전소), Inservice Inspection(가동중검사), Inservice Testing(가동중시험) Visual Examination(육안검사), Functional Test(성능시험), Service Life Monitoring(사용수명 감시)

1. 서론

최근 원자력 발전소의 운영기간 증가로 기기의 열화정도가 증가함에 따라 기기의 건전성 확보 및 설비의 안전성을 정기적으로 확인하는 가동중검사가 더욱 중요시 되고 있다. 원자력발전소의 기기 또는 배관에 발생하는 열하중, 압력, 충격, 진동 등의 동적 또는 정적인 하중을 지지하는 구조물로는 방진기, 스프링 지지물, 앵커, 강체 지지물(rigid support) 등이 있으며 이중 방진기는 기기 또는 계통에 급격하게 전달되는 하중에 의한 변위를 구속하지만 온도에 의한 변위는 자유롭게 허용 하는 기기이다. 원자력 발전소에서 다른 기기들과는 달리 방진기의 기능상실 시 정상운전 중 온도, 압력 등이 직접 배관이나 기기

등 지지물에 전달되어 설계 시 고려하지 않은 추가 하중이 지지물에 작용하게 되고 지지계통의 불안전성이 증대하게 된다. 따라서 방진기의 경우 건전성을 확인하기 위해 규제요건에 따라 정기적으로 가동중검사(ISI: Inservice Inspection)와 가동중시험(IST: Inservice Test)을 장기가동중검사계획서(LTP: Long Term Plan)에 반영하여 매 계획예방정비 기간 중 정기적으로 수행하고 있으며 그 종류로는 육안검사, 성능시험 및 사용수명 감시 등이 있다. 따라서 본 원고에서는 국내 원전 방진기에 대한 규제요건, 검사 및 관리현황에 대해 기술하였다.

2. 방진기 기능 및 종류

원전에서 방진기(Snubber)는 지지하는 계통 또는 기기에 전달되는 온도에 의한 정상적인 열변위(Thermal Deformation or Movement)를 완전히 흡수

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail: cyb1394@khnpp.co.kr
TEL: (042)870-5564 FAX: (042)870-5549

^{*} 한국수력원자력(주) 중앙연구원

^{**} 한국수력원자력(주) 중앙연구원

하면서 급격하게 전달되는 동하중(Dynamic Load)은 지지하는 지지대이다. 특히 방진기는 동하중이 작용하지 않는 정상운전(Normal Operation)시 계통에 어떠한 부가적인 힘을 작용하지 않도록 해야 한다. 이러한 방진기는 기계식(Mechanical Type)과 유압식(Hydraulic Type)으로 분류할 수 있고 배관, 원자로냉각재펌프 및 증기발생기에 설치된다.

기계식 방진기는 왕복운동을 회전운동으로 바꾸주는 볼 스크류 샤프트(Ball Screw Shaft), 볼 너트(Ball Nut), 가속도 발생시 구속력을 작용하기 위한 관성질량(inertia mass) 및 방진기가 자유로이 회전할 수 있게 끝에 스페어리얼 베어링이 부착되어 있으며, 구조는 Fig. 1과 같다. 작동원리는 배관이 움직임에 따라 실린더가 수축하거나 팽창하며 이 실린더의 왕복운동은 볼 너트와 샤프트에 의해 회전운동으로 바뀌며 샤프트에 고정된 토오크 전달 드럼을 회전시킨다. 이때 토오크 전달드럼의 회전이 가속도가 거의 없는 회전일 때에는 관성질량이 함께 회전하여 양단에 도출된 Capstan spring의 구속작용을 하지 않지만 가속도가 허용치(0.02g) 이상일 경우에는 관성질량이 반발력을 일으켜 Capstan spring이 토오크 전달 드럼을 고정시키고 Telescoping Cylinder가 움직이지 못하게 고정시킨다.

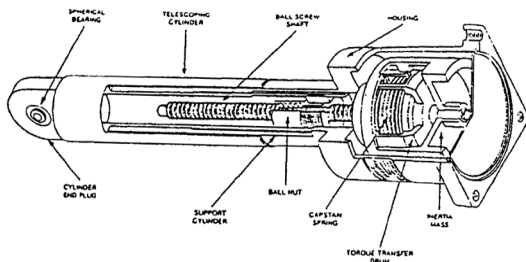
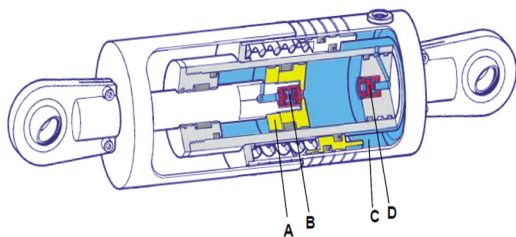


Fig. 1 Mechanical Snubber



A: Hydraulic piston B: Main Control Valve
C: Reservoir Cylinder D: Compensating Valve

Fig. 2 Hydraulic Snubber

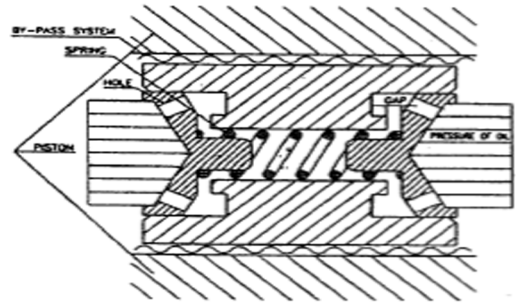


Fig. 3 Principle of Hydraulic Snubber Control Valve

유압식 방진기는 배관 및 기기의 움직임에 따라 움직이는 피스톤, 실린더 및 유체 흐름을 구속하는 조절밸브와 작동유를 저장하는 oil reservoir로 구성되며, 피스톤의 움직이는 속도가 규정치 이상이 되면 구속력이 작용하도록 되어 있다. 즉 열 변형으로 인하여 배관이 서서히 움직일 때, 방진기의 피스톤(A)도 같이 움직인다. 방진기가 압축될 때 피스톤이 우측으로 이동해야 하고 이때 우측저장조의 유체가 좌측 저장조로 제어밸브(B)를 통해 이동해야 한다. 즉 정상운전 시 방진기는 아무런 역할을 하지 않지만, 만약 동하중이 갑작스럽게 작용하여 압축력이나 팽창력이 작용할 때에 방진기는 동하중을 지지하여야 한다. Fig. 3은 유압식 방진기의 작동원리를 나타낸 것이다

즉 갑작스런 압축력이 작용할 때 우측 저장조의 유체가 Hole이나 Gap을 통해 좌측저장조로 이동해야 하나 작동 유체는 비 압축성 유체이므로 갑작스런 압축력으로 우측과 좌측의 압력차가 스프링의 압력차보다 크기 때문에 우측 밸브가 좌측으로 이동하여 좌측 Gap이 없어져 이 밸브가 잠기게 된다. 이를 “Lock-up”이라고 한다. 만약 이 동하중이 지속적으로 같은 방향으로 작용하면 유체는 제어밸브의 외벽을 통하여 우회(by-pass)하여 흐르게 된다. 이때 제어밸브 Hole에 비하여 제어밸브 외벽의 관이 길고, 직경이 작기 때문에 작은 유체가 흘러 피스톤은 아주 서서히 움직인다.

3. 방진기 규제요건

원자력발전소 방진기와 관련된 미국의 주요 규제요건 및 허용기준은 10CFR50.55a에서 수정 및 제한 사항을 반영한 ASME Code Section XI IWF 5000(장

기 가동중검사 계획서에 기술된 적용유효년도 판)과 그와 연계된 기술기준으로 적용되고 있는 ASME OM ISTD이다. 국내에서는 미국의 10CFR50.55a 요건 등을 반영한 원자력안전위원회 고시 2012-13호 “전력산업기술기준의 원자로시설 기술기준 적용에 관한 지침” 및 2012-10호 “원자로시설의 가동중검사에 관한 규정”이 미국의 10CFR50.55a와 동등한 기능을 하며, ASME Code Section XI 및 ASME Code OM Subsection ISTD와 동등한 KEPIC MIF 5000(방진기 가동중검사)과 KEPIC MOE(방진기 가동중시험)를 해당 발전소의 장기가동중검사계획서(LTP : Long Term Plan)에 따라 검사를 수행하고 있다.

4. 원전 방진기 관리 및 운영현황

4.1 해외 원전 방진기 관리현황

미국의 경우 원전에 설치된 방진기에 대해서는 ASME Code Section XI IWF 5000 및 ASME OM Code Subsection ISTD에 따라 시험을 수행해오고 있다. 한편 1990년대 중반부터 Subsection ISTD에 방진기 사용수명감시에 대한 내용이 포함되면서 방진기 사용수명감시 프로그램을 수립하여 적용하고 있다. 방진기 사용수명감시 프로그램 수립은 ASME Code OM의 임의요건(Nonmandatory Appendix)에 해당되는 Appendix F에 제시되어 있어서 원전별로 사용수명 감시프로그램의 수립여부가 다르다.

Table 1 해외 원전 방진기 손상사례

원전명	년도	방진기 대상 기기	손상원인
Arkansas 2	'80	원자로냉각재펌프 지지대 방진기 손상	냉각재펌프 누설에 따른 분산부식
Bugey 4	'97	안전관련 릴레이랙 점검에서 방진기 손상사례 발견	-
Gentilly 2	'99	서비스전동 지붕의 증기배관 방진기 고착 확인	-
Sizewell B	'99	안전등급 1,2,3 배관의 방진기 연결부 나사 이완 발견	-
Hatch 2	'00	성능시험 중 방진기 기능상실 확인	-
Kewaunee	'01	유압식 방진기 O-ring 손상	장기간 운영에 따른 열화
Watts Bar 1	'02	적납용기 살수계통 방진기 성능시험 요건 불만족	수격현상
Millstone 3	'02	원자로냉각재계통에 사용된 Paul Munroe 유압식 방진기의 각동유 누설	-
Gravelines 4	'02	주급수배관 방진기 행커 plate가 밀봉되어 있지 않음을 발견	동적 파도현상
San Onofre 2	'06	주증기배관 방진기 손상 발견	설치결함
Turkey Point 4	'08	주증기계통 방진기 연결부 이완 발견	유체진동

방진기와 관련된 해외의 주요 손상 사례로는 원자로냉각재펌프 지지대 방진기 손상, 증기계통 방진기 손상, 유압식 방진기 O-ring 손상 등의 사례가 있었다. 방진기와 관련한 해외의 주요 손상사례를 Table 1에 제시하였다⁶⁾.

4.2 국내 원전 방진기 관리현황

국내 원전은 ‘13년 말 기준 23개 발전소가 운영중이며 운영중인 발전소에 설치된 총 방진기 수량은 8,322개이며 유압식 방진기 1,623개, 기계식 방진기 6,699개로 그 세부적인 설치현황은 Table 2과 Table 3에 제시하였다.

발전소별 주요 특성을 살펴보면 고리1,2호기 등 웨스팅하우스형인 발전소의 유압식 방진기 제작사는 미국 제작사(Paul Munroe)이며, 한빛 3,4호기 이후 원전 유압식 방진기는 독일 LISEGA사 제품이 설치되어 있다. 한울 1,2호기의 경우 Framatome 원전의 특성상 프랑스 제작사가 공급한 방진기(유압식 : QUIRI, 기계식 : Vibrachoc)를 사용하고 있으며 타 발전소와는 달리 배관방진기의 대부분은 유압식 방진기가 설치되어 있다.

월성2,3,4호기 배관방진기의 경우 모두 기계식으로 Anchor/Darling/PSA사의 방진기가 설치되어 있다. 국내 원전의 경우 중대한 방진기 손상사례가 제기된

Table 2 국내 원전 유압식 방진기 설치현황

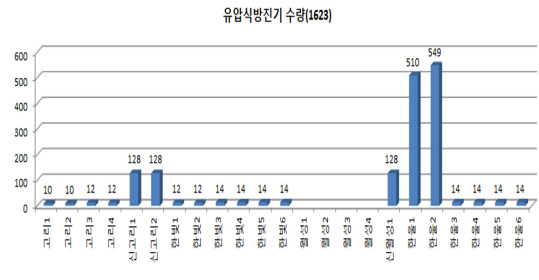
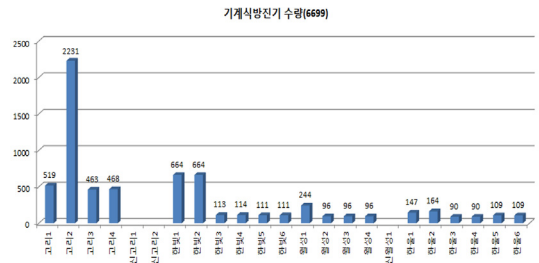


Table 3 국내 원전 기계식 방진기 설치현황



적은 없으며, 대부분은 설치 및 운영초기에 설치상 태 불량으로 인한 작동 미흡이 많았으며 유압식 방진기의 경우 오일 누유가 기계식 방진기의 경우 방진기 취급 부적절이 대부분 이었다. 방진기 관리측면에서는 국내의 경우 해외에 비해 방진기 손상 및 정비 이력 등 이력관리가 체계적으로 되지 않고 있다

5. 원전 방진기 시험 및 검사 현황

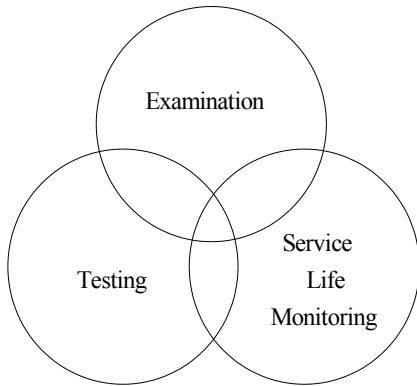


Fig. 4 Snubber Inspection Requirement

5.1 육안검사(Visual Examination)

KEPIC MIA 2213에 규정된 VT-3 육안검사를 적용하여 기기와 지지물의 일반적인 기계적, 구조적 상태를 판단하기 위해 틈새, 설정값 및 물리적 변위 등의 변수를 확인하고 볼트연결부 혹은 용접부의 건전성 상실, 부품의 헐거움 혹은 망실, 부식, 마모, 침식 등의 불연속부와 불안전부를 검사한다. 최초의 육안 검사는 5% 원자로 출력 도달 후 2개월~12개월 사이에 완료하며, 두 번째 가동중점검은 첫 번째 핵연료 재장전 기간에, 세 번째 가동중점검은 두 번째 핵연료 재장전 기간에 수행하고 그 후 연속되는 점검은 Table 4에 따라 수행하며 주로 불만족 방진기 수량에 의해 결정된다.

5.2 성능시험(Functional Test)

국내 원전 방진기의 성능시험은 KEPIC MOE(ASME OM ISTD와 동등함) 방진기 가동중시험 요건에 따라 수행하고 있으며 매 계획예방정비시 전체 설치된 방진기의 10%씩 성능시험을 수행하며 성능시험 결과 작동 불가능한 방진기가 있을 경우, 원인을 분석하여 제작자 잘못 혹은 설계상의 결함이 원인인 경우는

Table 4 불만족 방진기 수량 결정

방진기 수량	불만족 방진기 수량		
	A (주기연장)	B (동일주기)	C (주기단축)
1~	0	0	1
80~	0	0	2
100~	0	1	4
150~	0	3	8
200~	2	5	13
300~	5	12	25
400~	8	18	36
500~	12	24	48
750~	20	40	78
1000 이상	29	56	109

같은 유형의 방진기 10%를 추가로 더 점검하고 결함이 발견되지 않을 때까지 혹은 그 유형의 모든 방진기가 시험될 때까지 성능시험을 실시한다. 방진기 시험 표본계획은 10% 시험표본 계획과 37개 시험표본 계획이 있는데 국내 원전의 경우 10% 시험표본 계획을 적용하고 있으며 결함발생으로 추가시험 발생시는 $N \geq 0.1n(1+C/2)$ (N : 선정되어 시험된 총 방진기 수량, n : 시험계획군에서의 방진기 수량, C : 불만족 방진기 수량)의 공식에 따른다.

국내 원전의 경우 발전소 별로 각각 성능시험 장비를 보유하고 있으며, 매 계획예방정비시 마다 성능시험을 수행하여 왔기 때문에 충분한 운전경험을 확보하고 있는 상태이다. 운영중인 발전소의 성능시험 불만족 방진기의 대부분은 운영 초기에 발생된 것으로 신제품으로 교체 후 성능시험 요건을 만족하였다

5.3 사용수명 감시(Service Life Monitoring)

방진기 사용수명 감시란 방진기 사용 중이나 보관 중 경년열화에 대해 감시함으로써 방진기가 사용수명에 이르기 전에 방진기 정비나 교체를 통해 방진기의 작동성을 최적화 하는 활동이다. 국내의 경우 방진기와 관련해서는 사용수명 감시 보다는 방진기에 대한 점검과 관리에 더 많은 비중을 두어 왔고 규제기관이 제기한 지적 및 권고 사항도 육안검사 및 성능시험의 적절성, 절차서 수립여부, 점검결과에 대한 조치방안 등에 대한 내용이 주를 이루었다. '80년대 이후 미국의 규제기관인 NRC에서 방진기에 대한 규제측면의 연구자료를 발간함에 따라 국내에도 1990년대 초부터 사용수명 감시의 필요성이 언급되기

Table 5 방진기 사용수명감시 표본 선정방법

그룹	분류기준	표본대상
일반	A-E그룹에 포함되지 않은 일반 환경의 방진기	-
A	온도영향 감시대상	운전온도가 가장 높은 기기나 배관에 설치된 방진기
B	진동영향 감시대상	회전기기 전 후단에 설치된 방진기
C	과도상태 하중영향 감시대상	주중기/보조급수배관 방진기 가운데 고온값/저온값의 변위차가 가장 큰 방진기
D	방사선 영향 감시대상	방사선에 의해 운할제가 영향을 받을수 있는 환경에 설치된 방진기
E	습도/공기중 이물질 영향 감시대상	습기, 이물질 등으로 인해 고착되어 교체되었던 방진기

시작하였고 국내 방진기 사용수명감시의 경우 2007년 9월 방진기 사용수명감시 프로그램을 제정하여 안전등급 기기 및 배관에 설치된 방진기에 대해 Table 5와 같이 운전환경별로 선정된 대표 방진기에 대해 매 계획예방정비 기간 중 방진기 사용수명을 평가하여 한 주기 동안 계속사용 가능여부를 평가하고 있다

6. 결론

원자력 발전소의 가동 년수 증가에 따른 기기의 노후화가 심화됨에 따라 기기의 건전성 확보가 더욱 중요시 되고 있다. 기기 또는 계통에 급격하게 전달되는 하중에 의한 변위는 구속하고 온도에 의한 변위는 자유롭게 허용하는 방진기의 경우 원전의 주요 설비인 원자로냉각재 펌프, 증기발생기 및 주요 배

관에 설치되어 건전성 확보는 더욱 중요하게 되었다. 국내 원전 방진기는 규제요건에 따라 매 계획예방정비기간 마다 전체 방진기에 대해 가동중검사 100%와 10% 샘플을 통한 가동중시험을 수행하여 방진기의 건전성을 확인하고 있으며 30년 이상 발전소 운영기간 동안 중대한 방진기 손상사례가 제기된 적은 없고 대부분은 설치 및 운영초기에 설치상태 불량으로 인한 작동 미흡, 오일 누유 및 성능시험 불만족인 경우가 대부분이었다. 그러나 국내의 경우 해외에 비해 방진기 손상 및 정비 등 이력관리가 체계적으로 되지 않아 궁극적으로는 그 방안을 강구하고 검사 및 정비 이력을 관리할 필요성은 제기 되었다.

참고문헌

1. 대한전기협회, KEPIC MIF 5000, 2005, 방진기 가동중검사
2. 대한전기협회, KEPIC MOE, 2005, 방진기 가동중시험
3. ASME Code Subsection XI, IWF-5000, 2000, Inservice Inspection Requirements for Snubbers
4. ASME OM Subsection ISTD, 2000, Preservice and Inservice Examination and Testing of Dynamic Restraints(Snubbers) in LWR NPPs
5. KINS, 2004.12, Regulation Guidance and Aging Evaluation for Nuclear Power Plant Snubber pp 2~8
6. KHNP CRI, 2011.2, Development of Snubber Service Life Monitoring Guidance for Wolsong #1 NPP
7. USNRC Regulations, 10CFR50.55a, Codes and Standards
8. USNRC NUREC/CR-5870, Results of PWR Snubber Aging Research, 1992
9. NRC Inspection Manual, Temporary Instruction 2515/189,2013.9