

## 原電 防震機의 檢査 및 試驗에 관한 技術要件

홍순신  
한국원자력연구소

### Technical Requirements of Examination and Test for Nuclear Power Plant Snubbers

Soon-Shin Hong

Korea Atomic Energy Research Institute

요 약 原子力發電所의 방진기의 역할은 運轉中 地震이나 혹은 水擊作用등 순간적인 동적 하중의 발생으로부터 관련 配管과 機器를 보호하는 것이다. 1989년 이후 ASME Sec. XI에서 50kips 이상의 대형 방진기도 ASME/ANSI OM Part 4에 따라 肉眼檢査 및 性能試驗을 할 것을 추가 요구하고 있다. 따라서 본 보고서는 防震機 기능, 미국 원전 방진기의 손상 사례, 檢査 技術基準 및 要求事項을 檢査하여 검사 및 성능시험을 적절한 제반 기술기준에 의거 수행토록 하며, 수행 결과 수반되는 손상 방진기에 대한 原因 料明과 까다로운 後續措置의 실시로 원전 40여년 수명기간동안 配管系統 및 機器의 건전성을 확보하는데 기여코자 한다.

#### 1. 서 론

原子力發電所의 配管이나 機器에 발생되는 自重, 熱, 압력, 地震, 振動등의 靜的인 혹은 動的인 荷重을 지지하는 구조물로서 그 종류는 強體 支持物 (rigid support), 스프링 지지물(spring), 방진기 (snubber), 앵커(anchor)등이 있으며, 이중 방진기는 발전소의 정상 운전중에 발생하는 열하중, 低週期 動的荷重 혹은 압력하중등을 스스로 흡수하여 압력경계 구조물에 전달하지 않으며, 지진이나 水擊 荷重(water hammer)등 순간 동적 하중을 구속하는 기능이 있다.

原子力 發電所는 構造物 및 系統의 健全性 確認을 위해 ASME Code Sec. XI에 의거 주기적으로 검사를 수행하는 原電 稼動中 檢査(Inservice Inspection : ISI)가 있으며 거의 대부분의 비파괴검사 방법 (UT, RT, PT, MT, ECT, AE, LT, VT)이 이용되고 있다.

한편 ASME Code는 방진기, 밸브, 펌프등의 성능 시험도 요구하고 있다. 특히 원전 주요 배관이나 기기 지지물에 부착되어 있는 防震機로서 50kips 이상 대구경 유압식 방진기(large bore hydraulic snubber) 혹은 기계식 방진기의 검사 및 성능 시험을 ASME Code Sec. XI (89년도판 이후), IWF-5000에

서 ASME/ANSI OM Part 4에 따라 수행할 것을 요구하고 있다.

현재 원전의 配管 設計 概念이 양단 순간 파단(Double-Ended Guillotin Break : DEGB) 개념이 적용되어 왔으나 최근 파괴역학 분야의 발전과 원전 운전 경험으로부터 결합이 있는 배관은 파단하기 전에 보다 많은 누설을 한다는 결론을 얻어 결합이 큰 파단 영역에 도달할 수 있는 臨界(critical) 혹은 불안전 크기로 성장하기 전에 작은 결합들은 가동 중 검사 혹은 누설 감시로 확인할 수 있다는 즉 파단 전 누설(Leak Before Break : LBB) 개념이 적용되어 파단 및 파괴 형태를 미리 알아 적절한 예방을 할 수 있다는 것이다. 이와 같은 LBB 개념의 적용은 材料 特性, 破壞力學, 누설검출, 非破壞檢査(NDT)技術, 배관의 설치 및 지지 구조물 설계 등 綜合的인 研究가 進行되고, 기술 적용이 강화되어야 한다. 이와 관련 배관계통의 再解析이 進行되고 방진기의 減少方案이 대두되며 검사 및 성능 시험이 더욱 강조되고 있다. 따라서 국내 원자력발전소의 주요 배관이나 기기의 지지물로서 설치되어 있는 방진기에 대한 관련 규격요건에 따른 검사 및 성능 시험이 이뤄지고, 문제점이 보완되므로 원전 기기의 안전성 확보, 防震機 管理의 效率性을 向上 시키고자 기술한다.

2. 防震機 機能

방진기는 발전소의 정상 운전중에 발생하는 열하중, low frequency dynamic load 등을 압력 경계면에 전달하지 않고 緩衝 吸收하며, 지진이나 동적하중 즉 수격작용(water hammer), 순간밸브 닫힘 등으로 인한 하중 발생시 機器, 配管의 손상을 방지하도록 지지하는 보호장치이다.

방진기 종류는 機械式과 油壓式이 있으며 이중 대부분은 기계식 방진기이고, 대형 방진기로서 50 kips 이상은 유압식이 많다. 기계식 방진기는 왕복운동을 회전운동으로 바꿔 주는 볼 스크류 샤프트(ball screw shaft), 볼 너트(ball nut), 加速度 발생시 구속력을 작용하기 위한 慣性質量(inertia mass) 및 방진기가 자유로이 회전할 수 있게 끝에 스페리컬 베어링(spherical bearing)이 부착되어 있다. 배관이

움직임에 따라 텔리스코핑 실린더(telescoping cylinder)가 수축 혹은 팽창한다.

실린더의 往復運動이 볼 너트와 볼 스크류 샤프트에 의하여 回轉運動으로 바뀌며, 샤프트에 고정된 토오크 전달 드럼(torque transfer drum)을 회전시킨다. 이때 토오크 전달 드럼의 회전운동이 가속도가 거의 없는 회전일 때는 관성 질량이 함께 회전하여 양단에 돌출된 캡스탄 스프링(capstan spring)의 구속작용을 하지 않지만, 가속도가 있는 경우는 관성 질량이 반발력을 일으켜 캡스탄 스프링이 토오크 전달 드럼을 고정시키고 텔리스코핑 실린더가 움직이지 못하게 고정시킨다. 유압식 방진기는 배관의 움직임에 따라 움직이는 피스톤, 실린더 및 유체 흐름을 구속하는 밸브와 작동유를 저장하는 oil reservoir로 구성되며, 피스톤의 움직임은 속도가 규정치 이상이 되면 拘束力이 작용하도록 되어 있다. 방진기는 地震 등 동적인 하중만을 구속하고 配管의 熱膨脹은 구속하지 않아야 하기 때문에 배관의 열팽창등을 충분히 고려하여 설치하여야 한다.

만약 防震機가 완전 壓縮 혹은 완전 膨脹된 후에 그 이상의 배관의 변위가 있다면 방진기는 배관의 變位를 구속하게 되어 배관계통에 과도한 應力을 발생시키며, 또한 방진기도 손상을 입게 된다.

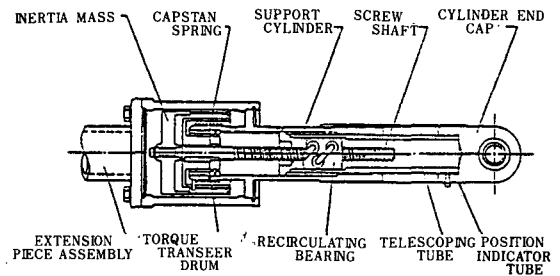


Fig. 1. Mechanical Snubber

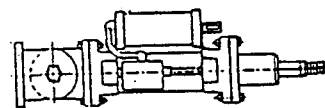


Fig. 2. Hydraulic Snubber

방진기의 기능 상실은 주요 運轉 條件 變化와 hydraulic transients damage의 발생으로 인하여 고착 상태에서 기능이 상실되는 경우가 대부분이며 이러

한 경우 방진기는 강제 지지물 기능밖에 할 수 없고 그 결과 다음과 같은 문제점이 정상 운전이나 사고 발생시 생긴다.

- 1) 正常 運轉 常態에서 하중이 직접 배관, 기기 및 방진기에 전달되므로 추가응력 증가 현상이 발생되고
- 2) 追加 荷重狀態에서 진동하중이나 疲勞荷重 加증으로 配管, 機器, 構造物의 피로파괴를 유발하며
- 3) 地震이나 系統異狀事故 發生시 사고확산 우려가 있다.

### 3. 肉眼 檢查 및 性能 試驗

#### 3.1. 육안검사(Visual Examination)

현재 ASME/ANSI OM-Part 4에 따라 수행토록 하고 있으며, 검사를 위하여는 장기적인 검사 계획서를 작성하여 계획에 따라 核燃料 交替時期에 檢查 托록 하며 방진기 관련 정보를 종류별로 확보 유지하여야 한다.

##### 3.1.1. 稼動前 檢查(Preservice Examination)

설치완료 후 모든 防震機가 검사되어야 하며 초기 검사는 최소한 다음과 같은 것을 확인 검사하여야 한다.

- 貯藏 取扱 및 設置 過程의 손상 점검
- 설계 도면과 기술 사양서에 의한 방진기의 하중위치, 형상등을 점검
- 적절한 作動距離(swing clearance)가 보장되는지 여부
- 유압식인 경우 油壓 水位 및 누유여부
- 핀, 베어링, stud등의 결합부의 이탈여부

##### 3.1.2. 稼動中 檢查(Inservice Examination)

가동중 검사는 환경이나 가동 조건에서 損傷, 漏泄, 腐蝕 및 變質, 작동 현상등을 육안검사를 통해 점검한다. 재검사 주기 및 방진기 검사 수는 不滿足 防震機의 수에 의해 결정된다. 초기 가동중 검사는 原子爐 出力 5%에서 商業 運轉후 2~12 개월 사이에 모든 방진기를 검사한다. 이후 점검은 18개월 주기로 수행되며 단 불만족 방진기가 발생시는 다음

Table 1. 가동중 검사 주기표

불만족 방진기수	후속 검사 주기
0	18개월 ± 25%
1	12 〃
2	6 〃
3, 4	4 〃
5, 6, 7	2 〃
8개 이상	1 〃

검사 주기 표에 따라 수행된다.

초기 1차와 2차 검사는 전 방진기를 肉眼檢查 하여야 한다.

#### 3.2. 性能 試驗(Functional Test)

##### 3.2.1. 가동전 성능 시험 (Preservice Functional Test)

가동전 성능시험은 시험장비를 사용하여 인장, 압축시 작동 여부, 가속도, breakaway force(수축 팽창에 필요한 최소 힘), 抗力 (drag force, 일정속도로 작동시킬 수 있는 최소 힘) 등이 設計基準 내에 있는가를 시험하며 缺陷 발생시 原因 糾明에 의해 평가 분석되어야 하며 후속조치를 하여야 한다.

##### 3.2.2. 가동중 성능 시험 (Inservice Functional Test)

가동중 성능시험은 가동전 시험과 같은 내용이며, 試驗週期는 최소한 핵연료 교체시 수행되며, 불만족 발생시는 追加檢查를 수행해야 한다. 성능 시험표본은 전체 방진기의 10% 혹은 전체 방진기를 37개 選擇 標本 性能試驗을 실시한다. 선택은 설계, 적용의 유사성, 크기, 형태등에 따라 분류되어야 한다. 10% 시험 표본 계획시 결합 발생으로 추가시험 발생시는  $N = 0.1 n (1 + C/2)$  ( $N$  : 시험 방진기 수,  $n$  : 全體 防震機 數  $C$  : 불만족 방진기 수)의 공식에 따른다. 한편 37개 시험 표본 계획 경우는  $N = 18.18C + 36.49$ 의 公式에 의거 아래 그림과 같이 추가 검사량이 결정된다.

追加 檢查 對象은

- 동일 제조회사의 설계 방진기
- 不滿足 防震機 주변 방진기
- 동일 배관 계통

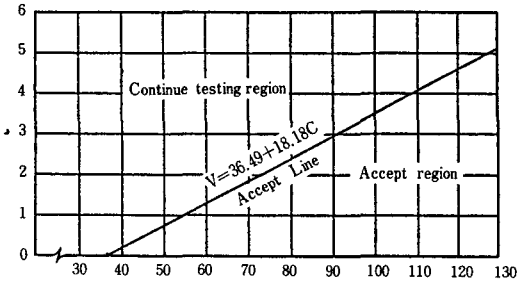


Fig. 3. 37 Sample plan

- 온도, 습도, 진동등이 유사 작동조건을 가진 타배관 계통
- 과거에 시험되지 않은 방진기등이 選定對象이 돼야 한다.

시험 표본 계획은 安全性 측면에서 요구되는 시험 방진기 수에 근거하며 이는 370개의 방진기까지는 10% 計劃이 적은 시험을 요구하고, 370개 이상의 경우는 37개 표본 계획이 적은 시험을 하게된다.

4. 美國 원전 방진기 損傷

미국의 방진기 손상 사례는 LER(license event report)를 근거로 발췌한 것이며 유압식 방진기의 손상을 일으키는 가장 심각한 문제는 seal 마모, 작동유의 상실, 점도 및 밸브 선정 값의 변화에 따른 작동不良등이 있었다. 이 같이 seal 마모, 누유 원인으로 기계식 방진기로 교체한 사례가 많으며, 기계식 방진기 경우는 내부의 腐蝕등으로 기능이 상실되어 고착되는 것이 방진기 손상의 主要原因이다.

미국의 경우는 水擊 作用(water hammer)에 의한 방진기 손상 사례도 자주 발생되고 있다. 국내 원전 방진기도 기술 사양서 및 ASME Code 요건에 따라 50kips 이하는 수행하고 있으나, 검사 결과에 대한

후속조치 및 관리에 더욱 관심을 가져야 하며 運轉中 異狀 과도 現象 발생시(예 : 수격 작용)는 點檢 計劃, 결과 및 후속 조치가 이뤄져야 할 것으로 사료된다.

5. 結 言

현재 원전에 사용되는 방진기는 그 機能, 容量등이 다양하며 이에 대한 검사 및 성능 시험이 LBB 設計 概念의 채택으로 더욱 강화할 필요가 있다고 思料된다. 특히 ASME Sec. XI('89년판 이후)에서 50kips 이상의 대형 방진기에 대한 검사 및 성능 시험을 추가 요구하고 있다. 國內 原電을 살펴볼 때 울진 원자력발전소는 대형 유압식 방진기가 특히 많으며 또한 대형 압력용기 지지용 방진기가 각 발전소마다 있으므로 이에 대한 防震機 性能 試驗을 대비하여야 하며 방진기 損傷事例 記錄管理 體制, 운전중 발생 가능한 과도현상(hydraulic transient event) 등의 발생시 점검계획과 검사수행 준수가 요구되며, 나아가서 系統 安全性 분석 평가체제를 갖추므로 系統의 健全性 確認 方法으로 이용돼야 한다. 外國 事例 및 조치내용을 검토하여 국내도 이 기술이 도입 실시될 수 있도록 해야겠다.

방진기의 不滿足 事項 발생시는 원인 규명이 실시돼야 하고 관련 배관 및 기기의 安全性 解析 方案이 강구되어 궁극적인 발전소 안전성에 기여토록 誘導돼야 하겠다.

방진기의 손상으로 제기능을 발휘 못할 때 40년 원전 壽命期間을 생각할 때 系統의 안전성을 확보하는데 문제가 발생할 수 있다. 특히 각 系統의 溶接部 부근의 취약 지역에서 應力集中으로 과단 혹은 龜裂이 발생되어 원전 사고로 확산된다고 생각할 때 防震機의 重要性은 再認識할 필요가 있다.

Table 2. 美國 원전 防震機 손상 사례(1981-1991)

년도 형태	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91
유압 계통	94	21	10	33	22	6		2			3
기계 계통		89	12	86	86	169	88	6	6		
미 상	3		5	17	19	38					

참 고 문 헌

1. ASME/ANSI OM Part 4, Operation and Maintenance of Nuclear power plants, (1990) ASME
2. ASME Sec. XI, IWF-5000, Inservice Inspection Requirements for Snubbers, (1989) ASME
3. ASME Code Class 1,2 and 3 Components, Com-

- ponent Supports, and Core Support Structure, (1981) USNRC SRP.
4. Closeout of IE Bulletin 81-01 : Suveillance of Mechanical Snubbers, (1985), NUREG/CR-4006
  5. 박용외 다수, 원자력 발전소 표준화 설계를 위한 조사 용역, 최종보고서, 제20권, (1987), pp 250-330