

C-19

원자력발전소 방화벽 관통부 내화성능 평가

박준현, 김원국*
한전 전력연구원, RMS*

Assessment of Fire Barrier Penetration Seal Performance at Nuclear Power Plants

Jun-hyun Park, Won-kuk Kim*
*Korea Electric Power Research Ins., Risk Management Support Co.**

원자력발전소 화재방호 규정에서는 방화벽 관통부는 방화벽과 동등한 내화성능을 갖는 밀봉재로 시공하여야 하며 개별 관통부가 적정 내화성능을 유지하고 있다는 것을 입증하는 서류를 구비할 것을 요구하고 있다. 이러한 규제요건이 제정되기 이전에 건설된 국내 원자력발전소의 관통부는 내화성능이 미달되거나 내화성능 인증서류가 구비되어 있지 않는 경우가 대부분이다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 관통부 내화성능 평가 규제요건, 내화성능평가 방법, 시범적인 평가 결과, 개선방안 등에 대해 기술하였다.

1. 서론

원자력발전소 화재방호 규정에서는 방화벽 관통부(fire barrier penetration seals)는 방화벽과 동등한 내화성능을 갖는 밀봉재로 시공할 것을 요구하고 있다. 또한 관통부 밀봉재는 내화시험을 통해 내화성능이 입증되어야 하며 개별 관통부가 적정 내화성능을 유지하고 있다는 것을 입증하는 인증서류(qualification documents)를 구비할 것을 요구하고 있다¹⁾. 미국 원자력규제위원회(USNRC)에서는 이와 관련된 규제지침 및 기술정보를 GL 86-10²⁾ 등에서 명시한 바 있으며 미국 원전의 관통부 밀봉재에 대한 종합적인 검토 결과를 NUREG-1552^{3,4)}로 발간하였다. 이와 같은 규제정책에 따라 미국내 모든 원전은 관통부 밀봉재에 대한 성능평가를 수행하였으며 성능이 미달된 관통부에 대해서는 적정 내화성능이 유지되도록 개선을 완료하였다.

1975년에 발생한 미국 Brown Ferry 원전 화재는 촛불이 관통부 밀봉재에 인화되어 케이블을 타고 화재가 확산된 사건으로 관통부 밀봉재 내화성능의 중요성을 일깨워주는 계기가 되었다. 이 사건이후 미국에서는 관통부 밀봉재의 성능을 확보하기위한 다양한 연구가 제조회사, 시험기관, 전력회사 및 규제기관에서 수행되었으며 이와 관련된 기술이 성

숙단계에 이르렀다.

국내에서는 관통부 밀봉재의 생산 및 내화시험과 관련된 기술은 상당한 수준에 도달해 있으나 원자력발전소 관통부 밀봉재의 성능평가에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 장기 가동중인 일부 원자력발전소는 방화벽 관통부에 대한 규제요건이 제정되기 이전에 건설되었기 때문에 관통부 내화성능이 미달되거나 내화성능 인증서류가 구비되어 있지 않는 경우가 대부분이다. 본 연구는 국내 장기 가동원전의 관통부 밀봉재의 현황과 관리 실태를 조사하고 장기적인 개선대책을 마련하기 위해 수행되었다. 본 논문에서는 국내외 관통부 밀봉재에 대한 현황조사, 내화시험기준 비교, 시범적인 내화시험 결과, 화재방호규정을 만족하기 위한 개선방안 등에 대해서 기술하였다.

2. 관통부 밀봉재 현황

방화벽 관통부 밀봉재는 Silicone Foam, Glass Wool, 모르타르, Boot Seal 등 여러 종류의 재질이 사용되고 있으며 제조회사, 내화등급, 관통물질의 종류/형태, 용도(내화용, 방사선 차폐용, 내압용) 등에 따라 다양한 형태로 시공되어 있다^{4,5)}. 표 1은 미국 원전에 설치된 관통부 밀봉재의 재질별 수량을 조사한 것으로 발전소당 평균 3500개의 관통부가 설치된 것으로 나타났다. 표 2는 1989년부터 4년간 미국 원자력규제위원회에 제출된 LER(license event report)를 조사한 것으로, 전체 LER의 50%가 관통부 밀봉재와 관련된 것으로 나타나 규제기관과 전력회사가 관통부에 많은 관심을 갖고 있음을 보여주고 있다.

표 1. 관통부 밀봉재 재료별 분류

밀봉재 재료	설치 수량/호기	평균 수량/호기
silicone foam	0 - 3700	1668
silicone elastomer	0 - 8500	820
mineral wool	0 - 2000	436
cement(mortar and grout)	0 - 3502	424
mechanical	0 - 250	33

표 2. 관통부 밀봉재에 대한 LER 분류

밀봉재 문제점	LER 건수
시공불량, 열화, 파손으로 인한 밀봉재 불량	82
밀봉재 미시공, 탈락	37
밀봉재 정기점검 미수행	14
밀봉재 인증시험 불량 또는 미수행	6
임시 또는 부적절한 밀봉재 시공	2

장기 가동중인 국내 원자력발전소에 대해 방화벽 관통부 밀봉재 관리실태를 조사하고 현장실사를 수행하였다. 해당 원전에서는 상업운전 이후 많은 수량의 관통부를 개선하여 왔지만 체계적인 관통부 성능인증 및 관리가 미흡한 상태이었다. 주요 발견사항은 다음과 같다.

- 관통물질의 종류로는 케이블, 케이블 트레이, 배관, 전선관이 주류를 이루고 있으며 내화성능 측면에서 케이블 및 케이블 트레이 관통부가 취약한 상태이다.

- 일부 관통부는 원형을 유지하고 있으나 많은 관통부가 재시공되었으며 재시공된 상당수 관통부가 성능기준에 미달될 것으로 판단된다.
- 재시공된 관통부는 생산업체로부터 내화시험성적서를 제출받았으나 내화시험 상태와 현장 시공상태가 상이하여 인증자료로 활용하기가 곤란하다.
- 일부 관통부 단면적이 내화시험 최대규격(2.4m × 2.4m)보다 커서 성능 인증이 불가능한 상태이다.
- Silicone elastomer로만 시공된 관통부는 구조적 강성이 부족하여 강구조물로 보강하는 등 구조 개선이 필요하다.
- 주지적인 관통부 점검 및 관리를 위한 절차서, 식별번호 부여가 미흡하고 관통부 DB가 구축되어 있지 않다.

3. 관통부 밀봉재 성능평가 절차

3.1 내화시험 기준

미국 원자력규제위원회에서 인증한 내화시험 기준으로는 ASTM E-119, E-814, NFPA-251, IEEE-634, UL-1479, FM 규격 등이 있으나 원자력발전소 화재방호규정에서 명시하고 있는 기술기준은 다음과 같다^{2,3,7)}.

○ 관통부 시험 기준

- 방화벽 관통부는 방화벽과 동등한 내화등급 시간동안 시험하여야 하며 시험동안 가열면 반대편에 화염이 노출되거나 케이블이 접화되지 않아야 한다.
- 방화벽 가열 반대편의 최고온도는 181°C 또는 대기온도보다 139°C 보다 높지 않아야 한다.
- 주수시험동안 방화벽은 건전해야 하며 가열 반대편으로 물이 흘러나오지 않아야 한다.

○ 관통부 품질인증

방화벽을 관통하는 문, 흡배기 개구부 및 기타 관통부는 내화시험을 하여 인증된 것을 사용하여야 한다. 시험 표본은 재질, 시공자 기량, 부품 크기 및 규격 등에서 시공된 것을 대표하도록 분류, 선정되어야 한다.

3.2 성능평가 절차

방화벽 관통부 성능평가 절차는 그림 1과 같다.

관통부는 크기, 형태, 관통을 등에 따라 많은 형태의 관통부가 있기 때문에 모든 관통부를 시험하고 인증하는 것은 불가능하다. 따라서 관통부를 유사한 형태별로 그룹화하여 대표 관통부를 선정하여 내화성능을 평가한 후에, 이를 유사한 관통부에 적용하는 그룹별 평가방법을 적용하는 것이 바람직하다.

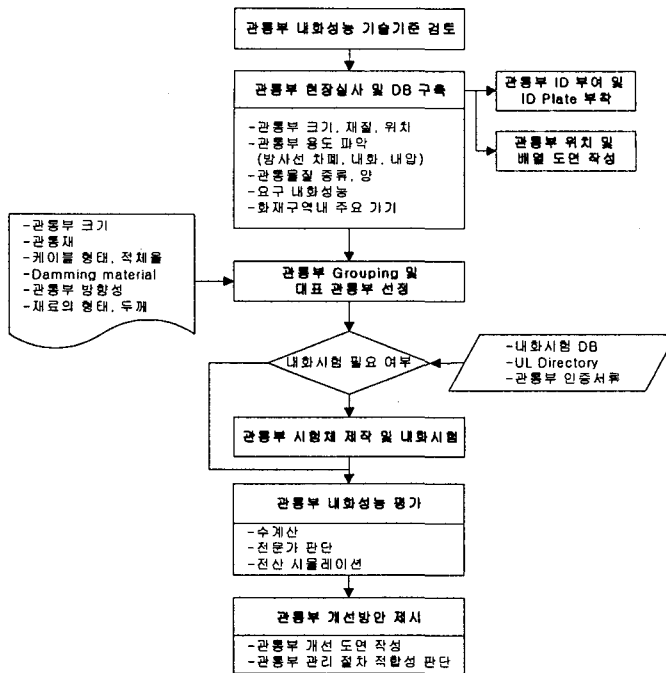


그림 1. 방화벽 관통부 성능평가 흐름도

대표 관통부를 선정하는데 필요한 주요 판단요소는 다음과 같다^{4,5)}.

- 관통부 크기 : 동일한 형태의 관통부에서 큰 규격의 관통부 시험결과는 작은 관통부를 인증하는데 사용 가능하다.
- 관통재(penetrating items) : 관통재가 특정한 배열 형태를 갖는 관통부의 내화시험 결과는 관통재 배열이 부분적으로 변형된 관통부를 인증하는데 사용 가능하다.
- 케이블 형태 및 적체(cable type and fill) : 특정 케이블 용도(전력, 계측, 제어) 및 적체율을 가진 관통부 시험 결과는 유사한 형태의 관통부를 인증하는데 사용 가능하다.
- Damming materials : 동일형태의 관통부에서 내화성능이 있는 차폐판을 관통부 한쪽 또는 양쪽표면에 사용하는 경우 관통부의 내화성능이 향상된다.
- 방향 : 대칭적인 설계형태가 동일하다면 수평형태 관통부 시험 결과는 동일한 형태의 수직 관통부 인증에 사용 가능하다.
- 재료의 형태 및 두께 : 동일한 충전재를 사용한 동일 형태의 관통부 시험결과는 더 두꺼운 관통부 인증에 사용 가능하다.
- 시험 종류 : 관통부 시험결과를 형태는 동일하지만 설계조건이 상이한 관통부 인증에 적용할 경우에는 최악의 설계조건 및 형태로 시험하여야 한다.

관통부 내화시험에는 많은 비용이 소요되므로 가급적 관통부 DB나 UL Directory와 같은 자료를 구입하여 사용하는 것이 경제적으로 유리하다. 관통부 성능평가 결과가 적정

내화등급을 만족하지 못하는 관통부에 대해서는 내화성능기준에 만족할 수 있도록 구조 변경, 밀봉재 재질변경, 관통물질 재배치, 단면적 축소 등과 같은 개선방안을 강구하여야 한다. 관통부 성능평가 결과는 인허가 문서로 규제기관에 제출되지는 않지만 내화성능 입증 및 관통부 유지관리에 반드시 필요한 서류이므로 QA 문서로 관리되어야 한다⁶⁾.

4. 내화시험 결과

위에서 기술한 대표 관통부 선정기준에 따라 각기 형태가 다른 4개 대표 관통부를 선정하였다. 현장 시공 상태와 동일한 시험체를 제작하여 공인시험기관에서 내화시험을 수행하였다. 그림 2~5는 대표 관통부 시험체 도면, 시험체 형태, 가열시험 및 주수시험 모습을 각각 보여주고 있다.

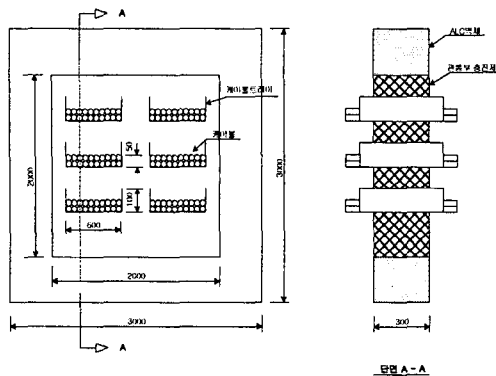


그림 2. 대표 관통부 형상

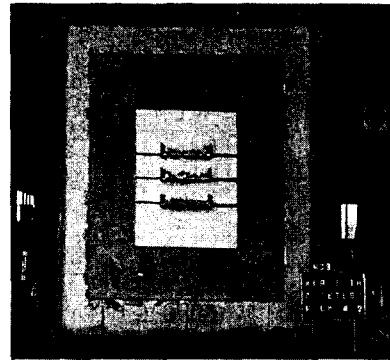


그림 3. 제작된 관통부 시험체



그림 4. 연소중인 시험체

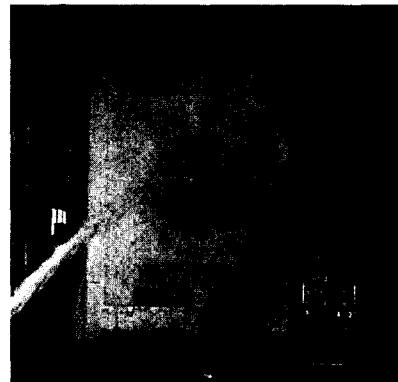


그림 5. 주수시험중인 시험체

내화시험은 ASTM E-814 기준에 따라 가열시험 3시간 및 1시간 가열후 주수시험을 수행하였다. ASTM E-814의 성능시험 기준은 표 3과 같다. 대표 관통부 4개 시험체에 대한

시험결과는 표 4와 같다. System 2와 3은 T급 3시간 성능기준을 만족하고 있으나 System 1과 4는 이면 온도가 허용기준을 초과하거나 화염이 시험체를 관통하였다. 따라서 System 1 및 4와 유사한 관통부는 2시간 이하 내화성능을 요구하는 지역에서는 유효한 관통부로 인정될 수 있으나 3시간 내화성능을 요구하는 지역에서는 인정될 수 없으므로 구조를 변경하여 내화성능을 향상시켜야 된다.

표 3. ASTM E-814 성능시험 기준

기준 시험종류	성능시험 기준	
	F급	T급
가열시험	가열시험시 화염이 개구부를 관통하거나 이면에 어떤 종류의 화염도 발생하지 않아야 함	<ul style="list-style-type: none"> 가열시험시 화염이 개구부를 관통하거나 이면에 어떤 종류의 화염도 발생하지 않아야 함 관통부를 포함한 이면의 개소의 온도는 시험 시작시의 최초온도보다 181℃를 초과하지 않아야 함
주수시험	주수시험시 이면으로 물의 방사를 허용하는 어떠한 개구부도 생기지 않아야 함	주수시험시 이면으로 물의 방사를 허용하는 어떠한 개구부도 생기지 않아야 함

표 4. 시험체 내화시험 결과

시험체 종류	내화성능(분)		비고
	F급	T급	
System 1	171	141	3시간 내화성능 불만족
System 2	180	180	3시간 내화성능 만족
System 3	180	180	3시간 내화성능 만족
System 4	180	164	3시간 내화성능 불만족

5. 결론

원자력발전소 화재방호규정에서는 방화벽 관통부는 방화벽과 동등한 내화성능을 갖는 밀봉재로 시공하여야 하고 관통부의 내화성능을 인증하는 서류를 구비할 것을 요구하고 있다. 국내 원전의 방화벽 관통부 개선방안을 마련하기 위해 장기 가동중인 발전소를 대상으로 관통부 밀봉재 현황, 유지관리 실태 등을 조사하였고 4개의 대표 관통부를 선정하여 내화시험을 수행하였다. 이 연구로부터 얻어진 주요 사항은 다음과 같다.

- 국내 일부 장기 가동원전은 방화벽 관통부 설계개념이 확립되기 이전에 건설되었기 때문에 관통부 내화성능 평가 및 인증서류가 구비되어 있지 않다.

- 관통부는 발전소 운영기간동안 주기적으로 점검, 관리되어야 하기 때문에 식별번호 부여 및 DB 구축이 필요하다.
- 현장 시공상태와 동일하게 제작된 4개 관통부를 시험한 결과 2개 관통부는 ASTM E-814의 3시간 성능기준을 만족하지 못하였다. 이러한 관통부는 구조를 변경하여 내화성능을 향상시켜야 한다.
- 내화시험을 통한 관통부 성능평가는 많은 비용이 수반되므로 가급적 생산되어 있는 인증자료를 활용하는 것이 바람직하다.
- 관통부 성능평가시에는 방사선 차폐성능이 필요한 관통부의 차폐성능평가, 설계기준 사고해석에서 내압성능이 필요한 관통부의 내압성능평가도 병행하여 수행하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 10 CFR 50. Appendix R, Fire Protection Program for Nuclear Power Plants Operating Prior to January 1, 1997.
2. GL 86-10, Implementation of Fire Protection Requirements(1986).
3. BTP CMEB 9.5-1, Guidelines for Fire Protection Nuclear Power Plants (1981).
4. NUREG-1552, Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants (1996).
5. NUREG-1552, Supplement 1, Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants(1999).
6. NRC IN 88-04, Inadequate Qualification and Documentation of Fire Barrier Penetration Seals(1988).
7. RG 1.189, Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants(2001).

후기

본 논문은 과학기술부의 원자력연구개발 중·장기계획사업의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부를 인용하여 작성한 것임.