

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

안전성 콘크리트 구조물의 관통부 밀봉재 성능 평가

Assessment of Fire Barrier Penetration Seals Performance

박준현

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

조성득

한국수력원자력(주)
서울시 강남구 삼성동 167

요 약

원자력발전소 안전성 콘크리트 구조물의 대부분은 방화벽 역할을 담당한다. 화재방호규정에서는 방화벽 관통부는 방화벽과 동등한 내화성능을 갖는 밀봉재를 시공할 것을 요구하고 있다. 국내 장기 가동원전에 대해 시범적으로 관통부 밀봉재의 내화성능을 평가해본 결과, 일부 관통부가 성능 기준을 만족하지 못하고 있거나 내화성능 인증서류가 구비되어 있지 않음을 확인하였다. 방화벽 관통부의 성능개선을 위해서는 개별 관통부의 현장 시공 상태가 적정 내화성능을 갖고 있는지를 종합적으로 평가하여야 하며 성능이 미달되는 관통부에 대해서는 적정 내화성능이 확보되도록 설비개선을 수행하여야 한다. 또한 내환경검증(EQ) 측면에서 내압력이 요구되는 관통부에 대해서도 사고환경의 압력하에서 성능이 유지되는 지를 평가하여야 한다.

Abstract

Most of safety related concrete structures in nuclear power plants served as a fire barrier. The fire protection rules of nuclear power plants require the fire endurance performance of penetration seal be equal to that of fire barrier structure. Prototype evaluation of penetration seal performance of operating nuclear power plants revealed that lots of penetration seal do not have qualification documents or appropriate performance. Whole penetration seal related with nuclear safety should require assessment of penetration seals performance and structure change be needed for that inappropriate seal. When doing the assessment of penetration seals performance, the performance of pressure seal for the environmental qualification as well as radiation shield seals should be followed.

1. 서론

원자력발전소 안전성 콘크리트 구조물의 대부분은 방화벽(fire barrier) 역할을 담당한다. 방화벽은 화재가 발생장소 이외 구역으로 전파되는 것을 차단하며 화재방호 심층방어(defence-in-depth) 관점에서 중요한 구성요소이다. 화재 초기단계에서 화재가 감지되고 자동진압설비가 작동될 때까지 방화벽은 화재전파를 차단하여 안전에 중요한 계통, 구조물 및 기기를 보호한다. 또한 방화벽은 자동진압설비가 기능을 상실한 경우나 소방대 대응이 지연되는 경우에도 피동적인 화재방호 기능을 수행한다. 방화벽 관통부 밀봉재(penetration seals)는 구조물 방화벽과 마찬가지로 심층방어 관점에서 피동적인 화재방호 기능을 수행하는 요소이다. 밀봉재는 방화벽을 관통하는 케이블, 배관, 닥트 등과 관통부 사이를 밀폐하는 내화충전구조로 화재가 타 화재구역으로 전파되는 것을 차단하는 역할을 한다.

원자력발전소 화재방호규정에서는 방화벽 관통부는 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 있다. NRC에서는 이와 관련된 규제지침 및 기술정보를 GL 86-10, IN 88-04 등에서 명시한 바 있으며 미국 원전의 관통부 밀봉재에 대한 종합적인 검토 결과를 NUREG-1552로 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 사건 이후 미국에서는 관통부 밀봉재의 성능을 확보하기위한 다양한 연구가 제조회사, 시험기관, 전력회사 및 규제기관에서 수행되었으며 이와 관련된 기술이 성숙단계에 이르렀다. 국내에서는 관통부 밀봉재의 생산 및 내화시험과 관련된 기술은 상당한 수준에 도달해 있으나 원자력발전소 관통부 밀봉재의 성능평가에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 국내 장기 가동원전의 관통부 밀봉재의 현황과 관리 실태를 조사하고 장기적인 개선대책을 마련하기 위해 수행되었다. 본 논문에서는 국내외 관통부 밀봉재에 대한 현황조사, 내화성능 기준비교, 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. 표 1은 미국 원전에 설치된 관통부 밀봉재의 재질과 수량을 조사한 것으로 호기당 평균 3500개의 방화벽 관통부가 설치된 것으로 나타났다.

표 1 관통부 밀봉재 재료별 분류

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

1989년부터 4년간 NRC에 제출된 LER(License Event Report)을 분석한 결과, 전체 LER의 50%가 관통부 밀봉재와 관련된 것으로 나타나 전력회사와 규제기관이 방화벽 관통부에 많은 관심을 갖고 있음을 보여주고 있다.

표 2 관통부 밀봉재에 대한 LER 분류

밀봉재 문제점	LER 건수	비율
시공불량, 열화, 파손으로 인한 밀봉재 불량	82	58
밀봉재 미시공, 탈락	37	26
밀봉재 정기점검 미수행	14	10
밀봉재 인증시험 불량 또는 미수행	6	4
임시 또는 부적절한 밀봉재 시공	2	2

미국에서 내화충전구조의 성능을 확보하기위한 연구는 밀봉재 제조회사, 내화시험 인증기관, 전력 회사/규제기관 등에서 각각 필요한 기술을 개발하였다. 3M 등과 같은 제조회사는 건물이 요구하는 내화등급 충전구조 생산과 관련된 기술을 개발하였고, UL 등과 같은 내화시험 인증기관은 충전구조 내화시험 방법을 개발하여 규격화하였다. NRC는 발전소에 설치된 내화충전구조의 성능확보를 위하여 검사절차, 시험방법, 내화충전구조 성능평가 등 다양한 연구를 수행하였다. 다음은 이와 관련된 내화시험 기술기준이다.

- ASTM E-119, Standard test methods for fire tests of building construction and materials
- NFPA-251, Standard methods of fire tests of building construction and materials
- ASTM E-814, Standard test methods for fire tests of through-penetration fire stops
- IEEE-634 Standard cable penetration fire stop qualification test
- UL-1479 Fire tests of through-penetration fire stops
- GL 86-10, Supplement 1, Fire endurance test acceptance criteria for fire barrier systems used to separate redundant safe shutdown trains within the same fire area

국내 가동원전 중에서 화재방호 규정이 강화되기 이전에 건설된 원전에 대해 방화벽 관통부 밀봉재 관리실태와 현장실사를 수행하였다. 해당 원전에서는 상업운전 이후 많은 수량의 방화벽 관통부를 개선하여 왔지만 체계적인 관통부 성능 인증 및 관리가 미흡한 상태이었다. 주요 발견사항은 다음과 같다.

- 관통부 관통물질의 종류로는 케이블, 케이블 트레이, 배관, 전선관이 주류를 이루고 있으며 내화성능 측면에서 케이블 및 케이블 트레이 관통부가 가장 취약한 상태이다.
- 일부 관통부는 원형을 유지하고 있으나 대부분 관통부가 재시공되었다. 재시공시 관통부 내화 성능에 대한 기술적인 개념이 미흡한 상태로 시공되어 상당수 관통부가 성능기준에 미달될 것으로 판단된다.
- 재시공된 관통부는 구매단계에서 내화시험성적서를 제출받았으나 내화시험 상태와 현장 시공 상태가 상이하여 인증자료로 활용하기가 곤란하다.
- 상당수 관통부의 단면적이 내화시험 최대규격(2.4M * 2.4M)보다 크기가 커서 내화시험 인증이 불가능한 상태이기 때문에 관통부 단면적 축소가 필요하다.
- Silicone elastomer로만 시공된 관통부는 구조적 강성이 부족하기 때문에 강재 등으로 보강하는 등 구조 개선이 필요하다.

국내에서는 해룡실리콘 등과 같은 내화충전재 제조회사는 규격에 적합한 내화충전재 생산 기술을 보유하고 있다. 방재시험연구원에서는 내화충전재품을 인증하기 위한 시험을 수행하고 있으며 FS-012(내화충전구조의 화재시험방법)와 같은 자체 시험규격을 보유하고 있다. 또한 2001년에 산업자원부 기술표준원의 위탁을 받아 “설비 관통부위의 방화시험방법(fire test of through-penetration fire stops)” KS 규격 제정연구를 수행한바 있으나 현재까지 KS 규격으로 채택되지 않고 있다.

3. 관통부 밀봉재 내화성능 기준

NRC에서 인증한 관통부 내화시험 기준으로는 ASTM E-119, NFPA-251, ASTM E-814, IEEE-634, UL-1479, ANI 규격, FM 규격 등이 있으나 원자력발전소 화재방호규정에서 직접 명시하고 있는 기술기준은 다음과 같다. 아래 두 규정중에서 RG 1.189의 관통부 성능기준은 ASTM E-814의 T급 성능기준을 수용한 것이다.

가. 10 CFR 50 Appendix R 기준

관통부 밀봉재는 불연성 물질을 사용해야하고 방화벽 시험과 동등한 시험으로 인증되어야 하며 합격기준은 다음과 같다.

- 케이블이 관통하는 밀봉재는 화염에 노출되지 않은 부분에서 케이블이 점화되거나 화염의 관통이 없어야 한다.
- 화염에 노출되지 않은 부분의 최고온도는 케이블 절연체의 점화온도보다 충분히 낮아야 한다.

다.

- 방화벽 관통부 밀봉재는 주수시험동안 화염에 노출되지 않은 부분으로 물이 흘러나오지 않아야 한다.

나. RG 1.189 기준

○ 관통부 설계 기준

구분된 화재구역을 관통하는 배관, 전선관, 케이블트레이의 관통부는 최소한 방화벽의 내화등급과 동일하도록 밀봉, 차폐되어야 한다. 직경 4" 이상의 전선관이 관통부를 통과하는 경우에 방화벽 관통위치가 밀봉되어야 한다. 직경이 4" 보다 작은 전선관은 방화벽 양쪽으로 5' 이상 전선관이 나와야 하고 연기 및 고온가스의 흐름을 차단하기 위해 양쪽 끝이나 관통부 위치에서 밀봉하여야 한다. 환경차폐, 차압을 유지하는 방화벽 관통부는 차폐벽 건전성을 유지하기 위해 다음과 같은 조건하에서 시험, 인증되어야 한다.

○ 관통부 시험 기준

방화벽 관통부는 독립된 시험기관에서 NFPA 251, ASTM E-119의 기준에 따라 시험하여야 하며 다음 기준을 만족하여야 한다.

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

○ 관통부 품질인증

관통부 밀봉재는 자격부여된 작업자에 의해 시공되어야 하고 적합한 품질관리절차 및 수단이 이행되어야 한다. 방화벽을 관통하는 문, 흡배기 개구부 및 기타 관통부는 내화시험을 하여 인증된 것을 사용하여야 한다. 시험 표본은 재질, 시공자의 기량, 부품의 크기 및 규격 등에서 시공된 것을 대표하도록 분류, 선정되어야 하며 건축물 시공시에도 선정된 대표관통부가 유효하여야 한다.

4. 방화벽 관통부 성능 평가 절차

방화벽 관통부 성능평가 절차의 흐름도는 그림 1과 같다. 고리 1호기와 같은 장기 가동원전은 관통부에 대한 DB 구축이 되어있지 않기 때문에 관통부 현장실사 및 DB 구축에 많은 노력이 필요하며 관통부 유지관리에 필요한 관통부 ID 부착, 도면 작성 등과 같은 부가적인 업무가 수반되어야 한다.

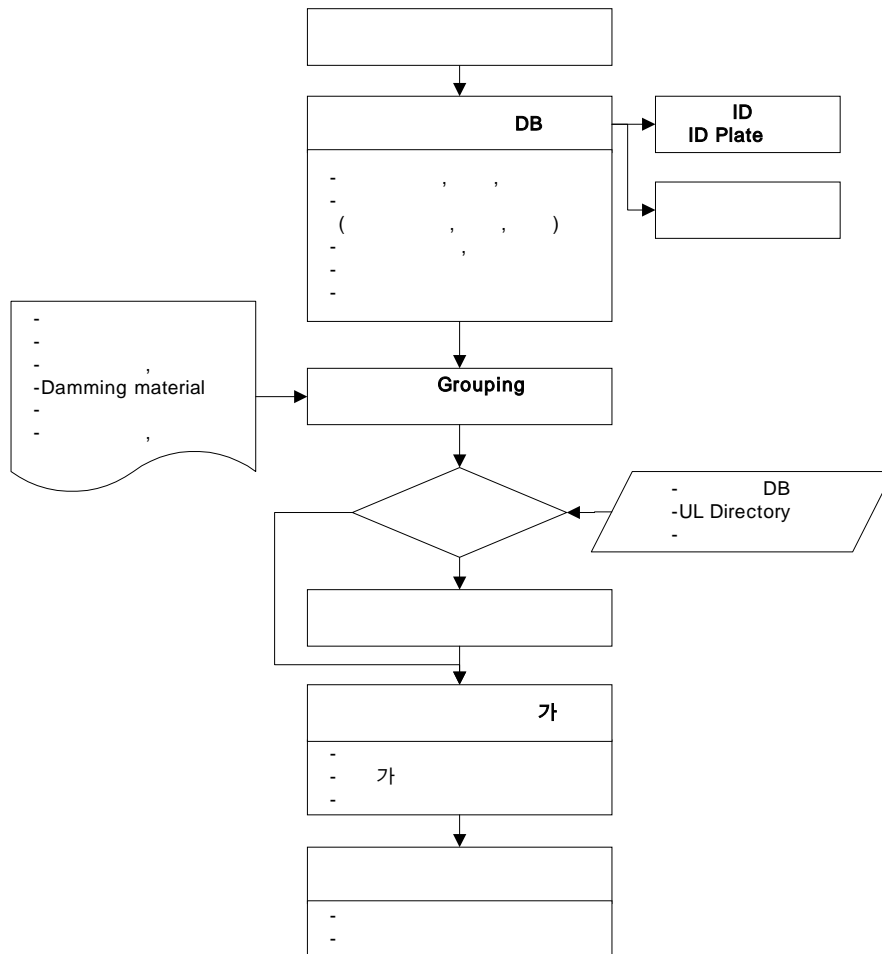


그림 1 방화벽 관통부 성능평가 흐름도

관통부는 크기, 형태, 관통율 등에 따라 많은 형태의 관통부가 있기 때문에 모든 관통부를 시험하고 인증하는 것은 불가능하다. 따라서 관통부를 유사한 형태별로 그룹화하여 대표 관통부를 선정 한 후에 이를 평가하여 만족하면 동일 그룹내에 관통부를 모두 인증하는 그룹별 평가방법을 적용 하는 것이 바람직하다. 대표 관통부를 선정하는데 필요한 주요 판단요소는 다음과 같다.

- 관통부 크기 : 동일한 형태의 관통부에서 큰 규격의 관통부 시험결과는 작은 관통부를 인증 하는데 사용 가능하다.
- 관통재(penetrating items) : 관통재가 특정한 배열 형태를 갖는 관통부의 내화시험결과는 관통재 배열이 부분적으로 변형된 관통부를 인증하는데 사용 가능하다. 한개 이상의 관통재 의 제거나 재배치, 특정관통재의 단면적 축소, 또는 관통재간의 간격증가 등은 추가적인 시험 없이 인증가능하다.
- 케이블 형태 및 적체(cable type and fill) : 특정 케이블 용도(전력, 계측, 제어) 및 적체율을 가진 관통부 시험 결과는 유사한 형태(동일하거나 작은 케이블 적체율, 동일한 케이블 자켓 또는 가연성이 적은 자켓)의 관통부를 인증하는데 사용 가능하다. 관통 케이블의 열전도도

(conductivity)도 중요한 요소이다.

- Damming materials : 동일형태의 관통부에서 내화성능이 있는 차폐판을 관통부 한쪽 또는 양쪽표면에 사용하는 경우 관통부의 내화성능이 향상된다. 다른 조건이 동일하다면 내화 차폐판이 없는 관통부의 시험결과는 내화 차폐판이 있는 관통부에 적용 가능하다.
- 방향 : 대칭적인 설계형태가 동일하다면 수평형태 관통부(관통부 아래에 화염이 있는 경우) 시험 결과는 동일한 형태의 수직 관통부 인증에 사용 가능하다.
- 재료의 형태 및 두께 : 동일한 충전재를 사용한 동일한 형태의 관통부 시험결과는 다른 조건이 동일하다면 더 두꺼운 관통부 인증에 사용가능하다.
- 시험 종류 : 특정 형태의 관통부 시험결과를 형태는 동일하지만 설계조건이 상이한 관통부의 인증에 적용할 경우에는 최악의 설계조건 및 최악의 형태로 배열한 상태로 시험하여야 한다.

관통부 내화시험에는 많은 비용이 소요되므로 가급적 해외 관통부 DB나 UL Directory와 같은 자료를 구입하여 사용하는 것이 경제적으로 유리하다. 관통부 성능평가 결과가 적정 내화등급을 만족하지 못하는 관통부에 대해서는 내화성능기준에 만족할 수 있도록 구조변경, 밀봉재 재질변경, 관통물질 재배치, 단면적 축소 등과 같은 개선안을 강구하여야 한다. 관통부 성능평가 결과는 인허가 문서로 규제기관에 제출되지는 않지만 내화성능 입증 및 관통부 유지관리에 반드시 필요한 서류이므로 QA 문서로 관리되어야 한다.

5. 내화성능 평가 결과

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

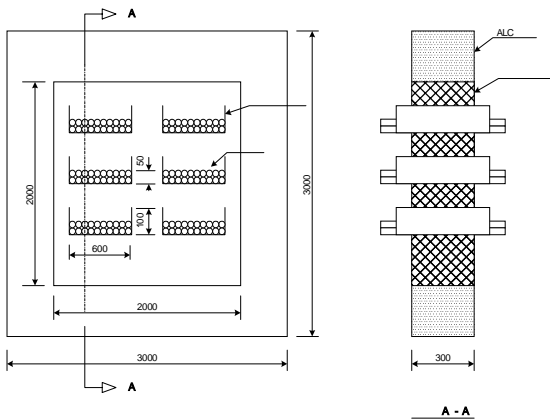


그림 2 대표 관통부 형상

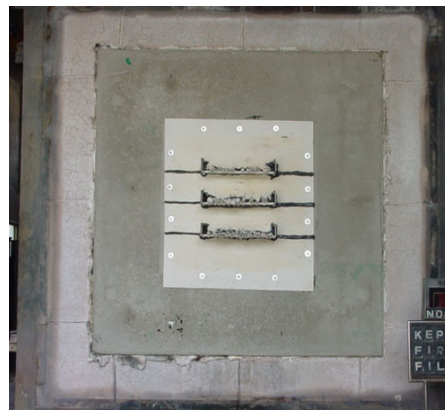


그림 3 제작된 관통부 시험체



그림 4 연소중인 관통부 시험체

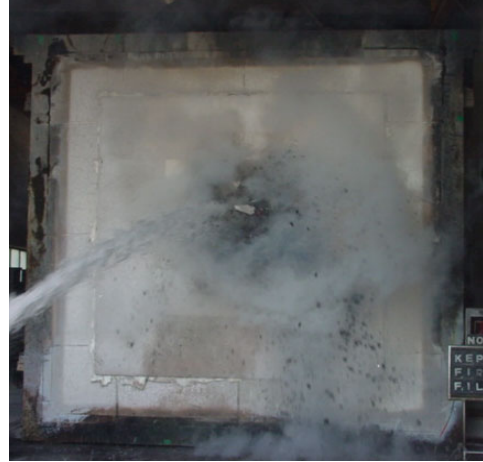


그림 5 주수시험중인 관통부 시험체

표 3 ASTM E-814 내화시험 기준

기준 시험종류	성능시험 기준	
	F급	T급
가열시험	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 주수시험시 이면으로 물의 방사를 허용하는 어떠한 개구부도 생기지 않아야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 주수시험시 이면으로 물의 방사를 허용하는 어떠한 개구부도 생기지 않아야 함

내화시험은 ASTM E-814 기준에 따라 가열시험 3시간 및 1시간 가열후 주수시험을 수행하였다. ASTM E-814의 합격기준은 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 인증될 수 있으나 3시간 내화성능을 요구하는 지역에서는 인증될 수 없으므로 구조를 변경하여 내화성능을 향상시켜야 된다.

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

6. 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.

- 고리 1호기 등과 같은 장기 가동원전은 방화벽 관통부 설계개념이 확립되기 이전에 건설되었기 때문에 관통부 내화성능 인증서류가 구비되어 있지 않다.
- 관통부 밀봉재는 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 성능평가지에는 방사선 차폐성능이 필요한 관통부의 차폐성능평가, 설계기준 사고해석에서 내압성능이 필요한 관통부의 내압성능평가도 병행하여 수행하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 10CFR50. Appendix R
2. GL 86-10, Implementation of Fire Protection Requirements
3. BTP CMEB 9.5-1, Guidelines for Fire Protection Nuclear Power Plants
4. SECY 96-146, Technical Assessment of Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants, 1996.6
5. NUREG-1552, Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants, 1996.7
6. NUREG-1552, Supplement 1, Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants, 1999.1
7. NUREG-1801, Generic Aging Lessons Learned(GALL) Report, 2000.8

8. NRC IN 88-04, Inadequate Qualification and Documentation of Fire Barrier Penetration Seals
9. NRC IN 88-04, Supplement 1, Inadequate Qualification and Documentation of Fire Barrier Penetration Seals
10. RG 1.189, Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants, 2001
11. KEPIC-FP 화재예방, 2000, 대한전기협회

후기

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