

원자력발전소 방화벽 관통부 성능평가 시범 적용 Pilot Application of Fire Barrier Penetration Seal Evaluation in Nuclear Power Plant

박준현[†]

Jun-Hyun Park[†]

전력연구원(한국전력공사)
(2006. 10. 13. 접수/2006. 10. 31. 채택)

요약

원자력발전소 화재방호 규정에서 방화벽 관통부는 방화벽과 동등한 내화성능을 갖는 구조로 시공할 것을 요구하고 있다. 화재방호 규정이 제정되기 이전에 설계되어 방화벽 관통부 내화성능 인증되지 않은 'K' 원자력발전소에 대해서 내화성능을 평가하였다. 내화성능 평가는 육안점검에 의한 방법과 시공된 관통부 데이터와 시험체 데이터를 비교하여 판단하는 한계접근법을 적용하였다. 내화성능 평가 결과, 전체 관통부의 50%에 해당하는 관통부가 성능기준에 미달하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 성능평가 결과와 더불어 관통부 내화성능을 확보하기 위한 설비 개선, 유지관리 방안 등을 제시하였다. 본 연구는 가동 중인 발전소를 대상으로 한 실증평가로서 본 연구에서 적용한 평가방법, 연구결과 등은 향후 타발전소의 관통부 성능평가에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

The Fire Protection Regulatory documents require the fire-resistive rating of fire barrier penetration seals be same as that of fire barriers. Pilot application of penetration seal evaluation for K nuclear plant, built before penetration seal requirements were made, was done. In this evaluation, visual inspection and estimating fire rating by comparing installed configuration with tested configuration of penetration seals, called bounding approach method, were applied. Further improvements for retrofit and maintenance are recommended with penetration seal evaluation results also. The practical use of the methodology adopted in this study and the evaluation result of K nuclear plant will be anticipated for other plant's penetration seal evaluation.

Keywords : Penetration seal, Fire barrier, Fire rating, Fire protection, Nuclear plant

1. 서론

방화벽(Fire Barrier)은 화재가 발생장소 이외 지역으로 전파되는 것을 차단하는 물리적 방벽으로 방화지역(Fire Area) 경계를 구성하는 요소이다. 방화벽 관통부(Penetration Seal)는 건축물의 개구부, 개구부를 통과하는 관통재, 개구부 틈새를 밀폐하는 밀봉재 등을 종합한 내화충전구조를 말하며 화재가 타 방화지역으로 전파되는 것을 차단하는 역할을 한다.

원자력발전소 화재방호 규정¹⁾에서 방화벽 관통부는

방화벽과 동등한 내화성능을 갖는 구조로 시공할 것을 요구하고 있다. 또한 방화벽 관통부의 내화등급은 시험 등을 통해 성능이 입증되어야 하고 관통부 성능을 입증하는 문서를 구비하여야 함을 규정하고 있다. 이러한 화재방호 규정에 따라 미국의 많은 원자력발전소들이 방화벽 관통부의 성능평가를 수행하고 적정 성능을 확보하도록 구조 개선을 수행하였다. 미원자력규제위원회(USNRC)에서는 이러한 방화벽 관통부 개선 노력에 대한 종합적인 검토 결과를 NUREG-1522²⁾로 발간한 바 있으며, 미전력연구소(EPRI)에서는 방화벽 관통부 성능평가에 대한 경험적 방법론을 TR-1000196³⁾으로 발행하였다.

[†]E-mail: junpark@kepri.re.kr

국내 원자력발전소의 경우에도 미국과 마찬가지로 일부 발전소들이 화재방호 규정이 제정되기 이전에 건설되었기 때문에 관통부의 내화성을 입증하는 인증 서류가 구비되어 있지 않다. 또한 발전소 운영기간 동안 많은 관통부의 재질과 구조가 변경되어 내화성이 미흡한 관통부가 상당수 존재하여 이에 대한 평가 및 개선이 필요한 실정이다. 국내 원자력산업계에서도 이러한 문제점을 인식하고 방화벽 관통부의 성능을 개선하고자 하는 노력과 실험적 평가가 지속되어 왔다.^{4,6)} 최근에는 축적된 연구 경험을 토대로 운전중인 원자력 발전소까지 관통부 성능평가를 확대 적용하는 전면적인 실증평가 단계로 나아가게 되었다.^{7,8)} 본 논문에서는 운전중인 원자력발전소에 적용된 방화벽 관통부 성능평가 방법론과 실증 평가⁹⁾ 과정에서 얻어진 주요 경험에 대하여 기술하였다.

2. 방화벽 관통부의 일반 특성

원자력발전소의 방화벽 관통부 밀봉재는 실리콘폼, 압면, 몰타르 등 여러 종류의 재질이 사용되고 있으며 내화등급, 관통재 종류, 요구 기능 등에 따라 다양한 형태로 시공되어 있다. 방화벽 관통부는 기본적으로 내화성을 만족해야 하며 관통부가 시공된 방화지역의 운전조건에 따라 부가적으로 내압성능, 수밀기능, 방사선차폐기능 등을 가지게 된다. 고온배관이 관통하는 경우에는 배관 열팽창을 수용할 수 있는 밀봉재가, 고방사선지역의 관통부에는 방사선차폐기능이 있는 고밀도 밀봉재가 시공되어야 한다. 또한 침수우려가 있는 지역에는 수밀기능이 있는 밀봉재가 시공되어야 한다. 원자력발전소에서 널리 사용되고 있는 관통부 밀봉재 재질별 운전특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Operating condition of penetration seals

	내화	내압	수밀	방사선 차폐	움직임
저밀도실리콘폼	○	○	○	×	○
고밀도실리콘폼	○	○	○	○	×
압면	○	×	×	×	○
몰타르	○	○	○	○	×
댐판(방화보드)	×	×	×	×	-
Boot Seal	○	○	○	×	○

*본 논문에서 방화벽 관통부 성능평가를 수행한 원자력발전소를 편의상 'K' 발전소라 명명함.

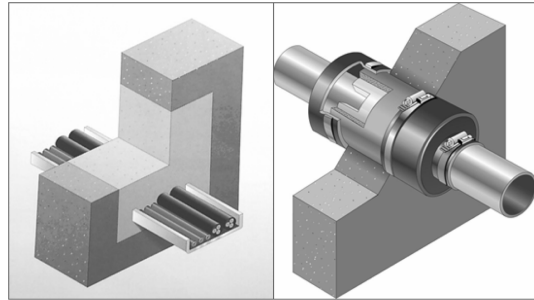


Fig. 1. Typical penetration seals (Left : Cable penetration, Right : Piping penetration).

Table 2. Penetration seal population of plant 'K'

밀봉재재질	실리콘폼	몰타르	압면	기타
수량(개)	384	93	194	188

관통부기능	내화	내압	수밀	방사선차폐
수량(개)	859	127	180	261

방화벽을 관통하는 주요 설비로는 배관, 덕트, 케이블, 케이블트레이, 전선관 등이 있으며, Fig. 1은 원자력발전소에서 흔히 볼 수 있는 전형적인 관통부 구조를 보여주고 있다.

방화벽 관통부 성능평가를 수행한 'K' 발전소의 밀봉재 재질별 관통부 수량, 관통부 기능별 수량 등에 대한 현황은 Table 2와 같다. 전체 방화벽 관통부는 859개로 확인되었으며 이중 15%가 내압성능, 21%가 수밀기능이 필요한 것으로 나타났다**.

3. 방화벽 관통부 성능평가 방법론

3.1 방화벽 관통부 성능평가 과정

방화벽 관통부 기능 측면에서 원자력발전소가 일반 산업설비와 다른 점은 기본적인 내화성능 이외에 내압성능, 수밀기능 및 방사선차폐기능을 가져야 한다는 것이다. 이러한 기능 차이 때문에 원자력발전소 방화벽 관통부 성능평가에서는 내화성능 이외에 내압성능 등과 같은 부가기능을 만족하는지도 평가하여야 한다. Fig. 2는 이러한 특성을 고려한 방화벽 관통부의 전체 성능에 대한 평가과정을 나타내고 있다.

방화벽 관통부 성능평가 과정은 크게 두 단계로 나

**관통부 위치, 크기, 배열 등을 고려하여 관통부 고유번호를 어떻게 부여하느냐에 따라 방화벽 관통부 숫자는 매우 유동적임.

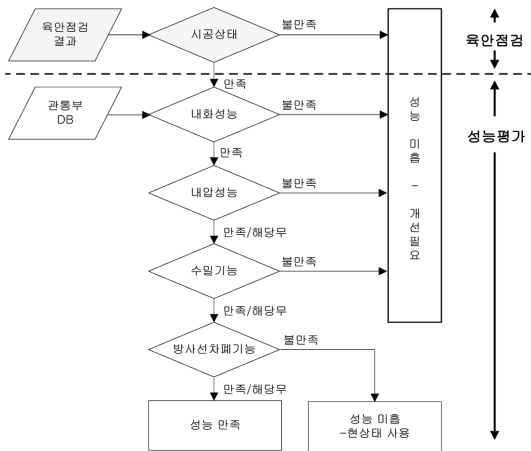


Fig. 2. Diagram of penetration seal evaluation process.

눌 수 있다. 첫 번째 단계인 육안점검은 밀봉제 시공 상태가 적정 내화성능을 유지하고 부가기능을 수행하는데 적합한지를 판단하는 과정이다. 이 단계에서 밀봉제 시공상태가 양호한 관통부만을 선별하고 불만족스런 관통부는 개선이 필요한 관통부로 분류한다. 두 번째 단계에서는 시공상태가 양호한 관통부에 대해 내화성능 및 부가기능을 만족하는지를 평가한다. 방화벽 관통부가 내화성능, 내압성능 및 수밀기능중 어느 하나라도 만족하지 못하면 성능이 미흡하므로 개선이 필요하지만 방사선차폐기능은 불만족하더라도 현상태 사용이 가능한 것으로 구분하였다. 그 이유는 가동중인 발전소에서는 관통부의 다른 성능에 비해 방사선차폐기능의 중요도가 상대적으로 낮기 때문이다.

본 논문에서는 논문의 목적상 관통부의 부가적 기능에 대한 평가는 생략하고 방화벽 관통부의 고유기능인 내화성능 평가방법 및 결과에 대해서만 다루었다.

3.2 방화벽 관통부 내화성능 평가 방법

관통부 내화성능을 확인하는 방법으로는 시험체에 대해 내화시험을 수행하여 성능을 확인하는 직접적인 방법과 과거에 시험된 데이터들을 활용하여 내화성능을 비교 평가하는 간접적인 방법이 있다. 발전소에 시공된 수많은 관통부에 대해서 일일이 동일한 시험체를 제작하고 시험하여 성능을 확인한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 경우에 관통부의 적절한 분류를 통해 제한된 시험데이터를 활용하여 내화성능을 확인하는 방법이 현실적으로 적용 가능한 대안이다. 관통부 내화성능평가에 대한 절차는 Fig. 3과 같으며 각 단계별 수행 내용은 다음 설명과 같다.

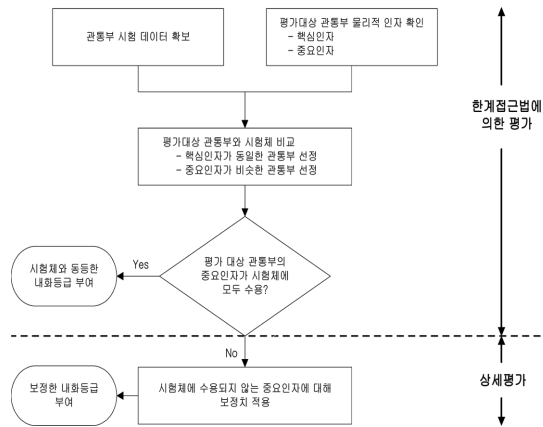


Fig. 3. Process of estimating fire rating of penetration seals.

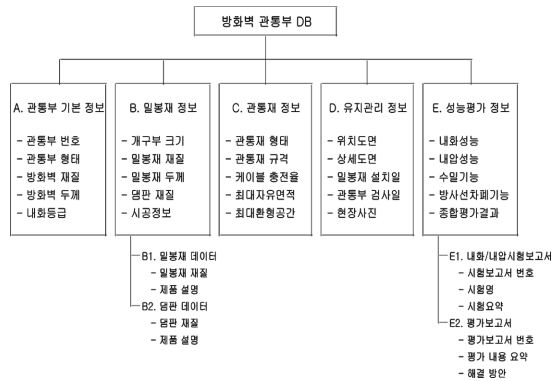


Fig. 4. Structure of penetration seal database.

3.2.1 한계접근법에 의한 내화등급 결정

한계접근법(Bounding Approach)에 의해 내화등급을 결정하는 단계로 평가 대상 관통부의 주요 물리적 인자가 시험체의 주요 물리적 인자에 수용되면 평가대상 관통부의 내화등급을 시험체의 내화등급으로 인증하는 과정이다.

(1) 관통부 자료 수집 및 DB 입력

시공된 관통부의 크기, 재질, 배열 등 성능평가에 필요한 자료를 수집하여 관통부 데이터베이스에 입력한다. Fig. 4는 본 연구에서 개발한 관통부 데이터베이스 구조를 보여주고 있다. 또한 이 단계에서는 관통부 육안점검을 통해 외관 상태가 고유기능을 유지하는데 이상이 없는지를 확인한다.

(2) 시험데이터 확보

FILK 및 UL Directory, 밀봉제 제조회사 시험자료

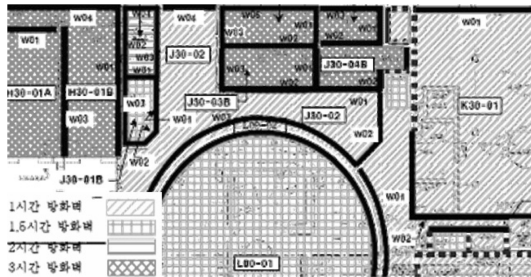


Fig. 5. Fire rating of plant K's fire areas.

등 과거에 시험된 관통부 자료를 확보하여 성능평가에 필요한 자료를 골라낸다*. 시험데이터는 발전소 평가대상 관통부와 비교하여 관통부 재질, 규격 등에서 대표성을 갖도록 면밀히 비교하여 선별하여야 한다.

(3) 방화벽의 내화등급 결정

방화지역별로 가연성물질을 조사하여 화재하중을 산출하고 방화벽의 내화등급을 결정한다. 방화벽을 경계로 인접 방화지역의 내화등급이 다른 경우에는 보수적인 내화등급을 적용한다. Fig. 5는 발전소 건물의 방화지역별 내화등급을 시간단위로 표시하여 보여주고 있다.

(4) 평가대상 관통부의 물리적 인자 확인

관통부의 내화등급에 영향을 미칠 수 있는 주요 물리적 인자는 다음과 같이 3가지 종류로 구분한다.

- 핵심인자 : 내화특성을 완전히 변화시키므로 내화등급 결정에 있어서 대단히 중요하다. 평가대상 관통부와 시험체간에 '핵심인자'가 다르면 비교를 통한 내화성능 평가가 곤란하다.
- 중요인자 : 내화등급에 상당한 영향을 미칠 수 있는 인자이다. '핵심인자'는 동일하나 '중요인자'가 서로 다를 경우에는 보수적인 방법으로 내화등급 결정이 가능하다.
- 무시가능인자 : 내화등급에 거의 영향을 미치지 않으므로 무시한다.

(5) 평가대상 관통부와 시험체 비교

평가대상 관통부를 유사한 시험체와 비교하여 '핵심

인자'가 동일한지를 확인한다. '핵심인자'가 동일하면 다른 '중요인자'가 시험체에 수용되는지를 확인한다. 주요 물리적 인자의 특성 및 수용여부 판단기준은 다음과 같다.

- 관통부 크기 : 동일한 형태의 관통부에서 큰 규격의 관통부 시험결과는 작은 관통부를 인증하는데 사용 가능하다.
- 관통재 : 관통재가 특정한 배열 형태를 갖는 관통부의 내화시험결과는 관통재 배열이 부분적으로 변형된 관통부를 인증하는데 사용 가능하다.
- 댐판 : 동일 형태의 관통부에서 내화성능이 있는 댐판을 관통부 한쪽 또는 양쪽표면에 사용하는 경우 관통부의 내화성능이 향상된다.
- 방향 : 대칭적인 설계형태가 동일하다면 수평형태 관통부 시험 결과는 동일한 형태의 수직 관통부 인증에 사용 가능하다.
- 두께 : 동일한 충전재를 사용한 동일한 형태의 관통부 시험결과는 더 두꺼운 관통부 인증에 사용 가능하다.

(6) 내화등급 결정

평가대상 관통부의 '핵심인자'가 시험체와 동일하고 평가대상 관통부의 '중요인자'가 모두 시험체에 수용된다면 평가대상 관통부의 내화등급은 시험체와 동일한 것으로 간주한다. 그러나 평가대상 관통부의 '중요인자'가 시험체에 수용되지 않는다면 다음 단계인 상세평가를 수행하여야 한다.

3.2.2 상세평가

이 단계는 평가대상 관통부의 '중요인자'가 시험체의 중요인자에 수용되지 않을 때 평가대상 관통부의 내화등급을 결정하는 과정이다. 이 과정에서는 물리적 인자의 변화가 내화등급에 미치는 영향을 정량화한 데이터가 필요하다. 이와 같은 데이터는 EPRI Penetration Seal Handbook³⁾에 있는 데이터를 활용할 수 있다. 평가대상 관통부의 내화등급은 시험체의 내화등급에 중요인자별로 산출된 보정치를 적용하여 다음과 같이 결정한다.

$$FR_{\text{Installed}} = FR_{\text{Tested}} \times F_{\text{Parameter 1}} \times F_{\text{Parameter 2}} \times \dots \times F_{\text{Parameter N}}$$

- 여기서, $FR_{\text{Installed}}$: 시공된 관통부의 내화등급
 FR_{Tested} : 시험된 관통부의 내화등급
 $F_{\text{Parameter}}$: 인자 1에 대한 보정치
 $F_{\text{Parameter N}}$: 인자 N에 대한 보정치

*본 시범 평가에서 활용한 관통부 밀봉재 시험 데이터는 다음과 같음

- 2001-05 외 3종, 2004 FILK Directory
- 2003-2207 외 2종, 전력연구원
- 1999-1319 외 8종, 국내의 밀봉재 제조회사
- U475 외 1종, 2005 UL Directory

4. 성능평가 결과

4.1 관통부 내화성능 평가 결과

‘K’ 원자력발전소의 방화벽 관통부에 대해서 위에서 기술한 관통부 시공상태 육안점검 및 관통부 내화성능을 평가한 결과, 전체 관통부의 약 48%(413개소) 성능기준에 미달하는 것으로 나타났다. 성능기준 미달 사유로는 시공 불량, 미시공, 인증규격 초과, 재질 부적합 등이며 상세 결과는 Table 4와 같다.

관통부 내화성능 평가에 대한 사례는 Table 5에 요약하여 나타내었다.

본 내화성능 평가에서는 Fig. 3에서 기술한 한계접근법에 의한 방법만을 적용하였으며 ‘중요인자’의 보정을 통한 상세평가 방법은 적용하지 않았다. 주된 사유로는 현장실사를 통해 수집한 관통부의 데이터의 오차 범위가 커서 ‘중요인자’의 보정을 통한 내화등급을 결정하는 것이 현실적으로 어려웠기 때문이다. 또한 본 연구에서는 충분한 수준의 시험체 데이터를 확보하고

Table 4. Result of penetration seal evaluation

시공 상태	내화 성능	종합 평가		
		유형	개소	점유비
양호	만족	만족	446	52%
양호	불만족	불만족	20*	2%
불량	불만족	불만족	231	27%
미시공	불만족	불만족	162	19%
계			859	100%

Table 5. Examples of penetration seal evaluation summary

관통부 번호	내화 등급 (hr)	밀봉재 재질	시공 상태	내화시험 번호	내화성능 평가	종합 평가	개선방안	수용시험체
K50-01-F01-01	2	mineral wool	부분 보수 필요	-	2시간 F급 내화성능 필요	불만족	암면 탈락 부위를 방화 쉴런트로 보강할 경우 내화성능 만족	2001-03호 (구조3)
K50-01-F01-15	2	저밀도 실리콘폼	양호	2003-2206호 (구조1)	3시간 T급 내화성능을 갖는 시험체에 수용되므로 2시간 T급 내화등급 만족	만족	-	-
K50-01-F01-39	2	저밀도 실리콘폼, mineral wool	양호	03-5980-003호 (구조T3)	3시간 T급 내화성능을 갖는 시험체에 수용되므로 2시간 T급 내화등급 만족	만족	-	-

*인증규격 초과 18개소, 재질 부적합 2개소

있었기 때문에 한계접근법만으로도 충분히 보수적으로 내화등급을 결정하는 것이 가능했기 때문이다.

4.2 관통부 내화성능 개선방안

내화성능 기준을 만족하지 못하는 관통부의 불만족 상태 유형과 개선방안은 Table 6에 요약하여 나타내었다. 시공측면에서 부적합한 관통부는 주로 재질 변경 및 재시공이 필요하지만 성능측면에서 부적합한 관통부는 관통부 구조변경과 같은 근본적인 개선이 필요한 경우가 상당히 나타났다.

원자력발전소 관통부중에서 가장 많은 비중을 차지

Table 6. Category of penetration seal problems and improvements

유형	불만족 상태	개선 방안
시공 측면	밀봉재 미시공	공인기관에서 인증된 밀봉재로 시공
	시공 방법 및 상태 부적합	밀봉재 제조사가 권고한 방법대로 시공 개선
	밀봉재가 부분적 또는 전체적으로 파손	파손 부위 재시공 또는 전면 재시공
성능 측면	재질은 적합하나 요구 내화성능에 미달	관통부 구조를 인증된 형태로 구조 변경
	최대 인증규격 초과하여 인증 곤란	관통부 규격 축소 또는 수개로 분할(Fig. 6 참조)
	인증되지 않은 재질 또는 구조	관통부를 인증된 재질로 시공 또는 인증된 구조로 변경

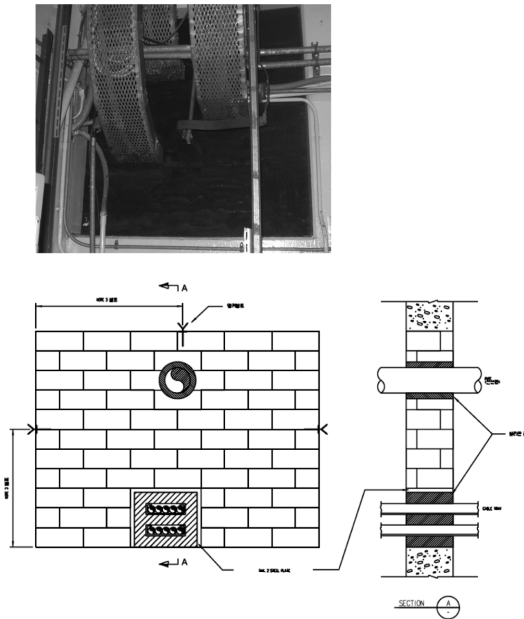


Fig. 6. Modification of penetration seal configuration (above: as-built, below: retrofit).

하는 것은 케이블 관통부이다. 케이블 관통부는 다른 관통부와는 달리 절연체가 가연성물질이기 때문에 화재에 취약하다. 또한 발전소 운영기간동안 케이블 재포설, 신축설이 빈번하게 발생하므로 관통부 개보수 인원이 어느 관통부보다 많다. 따라서 케이블 관통부 관리 및 내화성능 유지가 방화벽 관통부 유지관리의 핵심이라 할 수 있다.

케이블 관통부의 내화성능을 확보하기 위한 방안중의 하나는 구조개선을 통해 밀봉체의 단면적을 축소하는 방안이다. Fig. 6의 상부 그림처럼 관통부 크기가 커서 내화성능을 만족하지 못할 경우에는 조적방화벽을 시공하여 개구부를 수 개로 분할하고 단면적을 축소함으로써 내화성능을 만족시킬 수 있다. 이러한 구조변경 방안은 관통부의 배열, 내화등급, 시공조건 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다.

4.3 관통부 데이터베이스

관통부 밀봉체 자료를 효과적으로 관리하고 이를 성능평가에 효과적으로 활용하기 위해서는 관통부 데이터베이스가 무엇보다 필요하다. 수천 개 관통부의 특성을 파악하고 이를 시험체 데이터와 비교하여 내화등급을 결정하는 일을 수작업으로 한다는 것은 너무나 비효율적이기 때문이다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 관통부 데이터베이스를 개발하여 사용함으로써 성능평

가 효율 향상은 물론 성능평가 인증서류를 체계적으로 유지 관리할 수 있는 기틀을 마련하였다.

5. 결 론

원자력발전소 화재방호 규정이 제정되기 이전에 설계되어 방화벽 관통부 내화성능 인증이 이루어지지 않은 국내 'K' 원자력발전소에 대해서 관통부 내화성능을 평가하고 인증서류를 생산하였다. 관통부 내화성능 평가는 육안점검에 의한 방법과 시공된 관통부 데이터와 시험체 데이터를 비교하여 판단하는 한계접근법을 적용하였다. 본 연구에서는 Fig. 3에서 설명한 '중요인자'의 보정을 통한 상세평가 방법은 적용하지 않았다. 주된 이유로는 현장실사를 통해 수집한 관통부의 데이터의 오차 범위가 커서 '중요인자'의 보정을 통한 내화등급을 결정하는 것이 현실적으로 어려웠기 때문이다.

대상 발전소의 내화성능을 평가한 결과 전체 관통부의 50%에 해당하는 관통부가 성능기준에 미달하는 것으로 나타났다. 성능이 미흡한 관통부는 대부분 재시공 또는 구조변경이 필요하며 구체적인 개선방법은 관통부 기능, 배열, 내화등급, 시공조건 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다.

내화성능을 확보하기 위한 시공 및 설비개선 이외에 중요한 요소는 시공된 관통부의 내화성능을 인증하고 이를 유지 관리하는 일이다. 이러한 일을 효과적으로 수행하기 위한 방안으로 관통부 데이터베이스를 개발하여 사용하였으며 이 데이터베이스에는 관통부 기본 정보는 물론 성능평가 정보까지 수록하여 DB 자체가 인증서류로 활용되도록 하였다. 관통부 육안점검이 이루어지거나 수리, 구조변경 등이 발생하는 경우에는 해당 관통부 정보를 수정하여 항상 최신의 정보가 DB에 입력되고 관리되도록 하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. USNRC, "Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants", Regulatory Guide 1.189(2001).
2. USNRC, "Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants", NUREG-1552(1996).
3. EPRI, "Fire Barrier Penetration Seal Handbook", TR-1000196(2000).
4. 박준현, 김원국, "원자력발전소 방화벽 관통부 성능평가", 한국화재소방학회주최학술대회논문집, pp.415-421(2003).
5. 전력연구원, "방화벽 관통부 내화충전구조 성능평가 (2차년도)", TM.02NE16.P2004.361(2004).

6. 조홍석, 박준현, 손봉세, 임정순, “원자력발전소 관통부 충전구조의 내화성능평가에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 18, No. 4, pp.93-102(2004).
7. 한수원(주), “고리1호기 방화벽 관통부 성능평가 최종보고서”(2006).
8. 한수원(주), “월성1호기 방화벽 관통부 성능평가 최종보고서”(2006).