

원자력발전소 관통부 충전구조의 내화성능평가에 관한 연구 A Study on Assessment of Penetration Seals Performance of Nuclear Power Plants

조홍석[†] · 박준현* · 손봉세** · 임정순***

Hong-Seok Cho[†] · Jun-Hyen Park* · Bong-Sae Son** · Jung-Soon Im***

한전기공(주) 기술연구소 과장, *한전 전력연구원 선임연구원, **경원대학 소방시스템과 교수,
***경기대학교 토목환경공학부 교수
(2004. 11. 9. 접수/2004. 12. 15. 채택)

요 약

원자력발전소에서 방화벽 관통부 내화충전구조는 화재가 발생장소 이외의 구역으로 전파되는 것을 차단하여 타구역에 설치된 안전에 중요한 기기를 보호하는 중요한 구성요소이다. 그러나 국내 장기 가동중 원전의 경우 관통부 충전구조의 내화성능을 입증하는 인증시험서가 구비되어 있지 않아 별도의 내화성능평가가 이루어져야 하고, 성능평가 결과가 적정 내화등급을 만족하지 못하는 관통부에 대해서는 관통물질의 재배치 등의 구조변경이 이루어져야 한다. 본 연구는 분석적인 방법에 의한 관통부 충전구조의 내화성능평가기법을 정립하고, 분석적인 방법을 적용하여 실제 발전소에 설치된 관통부 충전구조의 내화등급을 결정하는 방법을 제시하였다. 이를 통하여 분석에 의한 관통부 충전구조의 내화성능평가방법은 내화인증시험서가 없는 국내 장기가동 원자력발전소에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The function of fire barrier penetration sealing is highly important to confine a fire propagation a fire severity within a fire area where the fire started. Especially for the penetration seals at the nuclear power plants with the long-term operated history, it is needed to make it clear that the conformance to the sealing requirements has been proven to guarantee the fire-resistive performance of fire barrier penetration parts. If there are any parts of fire barrier penetration sealing which can not meet the required rating for the fire endurance performance, the relevant parts must be modified to meet regulatory requirements. At this paper, the engineering analysis methodology was established to approximate the fire endurance rating for the fire barrier penetration seals. With this study, the method of engineering analysis to decide fire endurance rating for the fire barrier penetration seals was established and this way can be utilized to check the performance of the fire rating for the penetration seal at the domestic nuclear power plants.

Keywords : Penetration seal, Fire-resistive performance, Fire test, Engineering analysis

1. 서 론

1975년 3월 22일 미국 Brown Ferry 원전에서 화재가 발생한 이후에 미국 원자력규제위원회(USNRC)는 강화된 화재방호 규정인 10CFR50.48¹⁾, 10CFR50 부록 R²⁾ 및 BTP CMEB 9.5-1³⁾ 등을 제정하여 자국 내 모든 원전이 이 규정을 소급 적용하여 화재방호설비의

안전성을 향상시킬 것을 의무화하였다. 이와 같이 강화된 화재방호 규정에서 방화벽 관통부는 방화벽과 동등한 내화성능을 갖는 충전구조로 시공할 것을 요구하고 있다. 또한 내화시험을 통해 내화성능이 입증되어야 하며 적정 내화성능을 유지하고 있다는 것을 입증하는 인증서류를 구비할 것을 요구하고 있다. 원자력규제위원회에서는 이와 관련된 규제지침 및 기술정보를 GL 86-10⁴⁾ 등에서 명시한 바 있으며 미국내 원전의 관통부 내화충전구조에 대한 종합적인 검토 결과로

[†]E-mail: chs@kps.co.kr

NUREG-1552^{5,6)}로 발간하였다. 이와 같은 규제정책에 따라 미국 내 모든 원전은 관통부 충전제에 대한 내화성평가를 수행하고 성능이 미달된 관통부에 대해서는 적정 내화성능이 유지되도록 개선을 완료하였다.

국내의 경우 가동 중인 일부 원자력발전소는 방화벽 관통부에 대한 규제요건이 제정되기 이전에 건설되었기 때문에 관통부의 내화성능이 미달되거나 내화성능 인증서류가 구비되어 있지 않아 관통부 충전제에 대한 내화성능평가가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 많은 비용과 시간을 수반하는 직접 화재시험에 의한 관통부 충전구조의 내화성능평가대신에 기존의 화재시험데이터를 활용하여 공학적인 분석을 통하여 정량적으로 내화등급을 결정하는 방법을 제시하였다.

2. 원자력발전소의 관통부 현황

원자력발전소에 설치된 방화벽 관통부 내화충전구조는 내화요구에 따라 3시간, 2시간 또는 1시간의 내화등급을 가지도록 설계되어 있으며, 기능 및 구조형상에 따라 다양하게 분류된다. Fig. 1과 Fig. 2는 전형적인 케이블 트레이 관통부 및 배관관통부의 단면도를 보여준다.

국내 및 미국의 원자력발전소에 대한 방화벽 관통부 조사결과 실리콘 폼(silicone foam)이 주요 내화충전제로 사용되고 있는 것으로 나타났으며 이외에도 글라스울(glass wool), 모르타르(mortar), 부트 씸(boot seal) 등의 재질이 사용되고 있다. Fig. 3, Fig. 4는 각각 국내

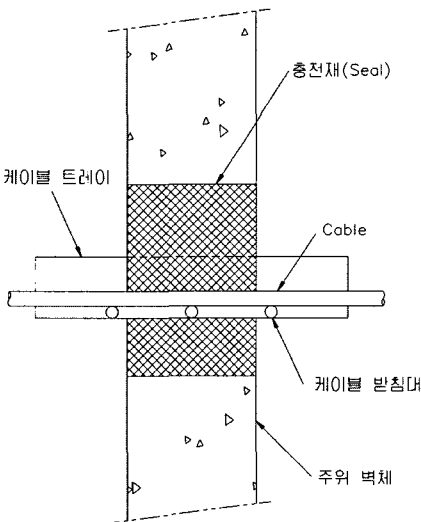


Fig. 1. Cable Tray Penetration Seal.

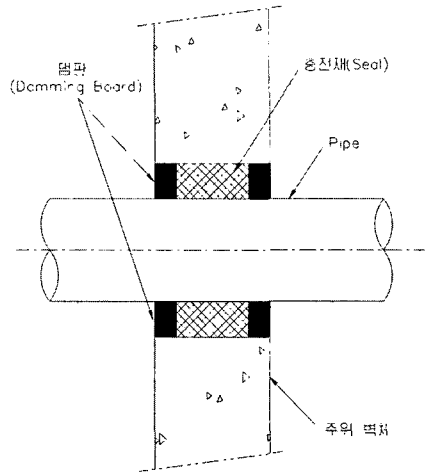


Fig. 2. Pipe Penetration Seal.

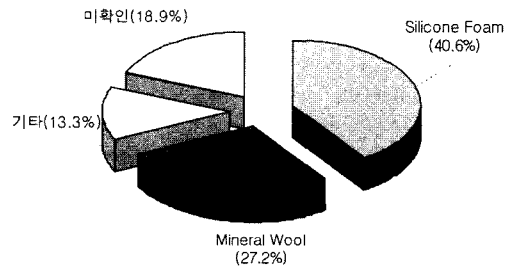


Fig. 3. Seal Installation Status (Domestic).

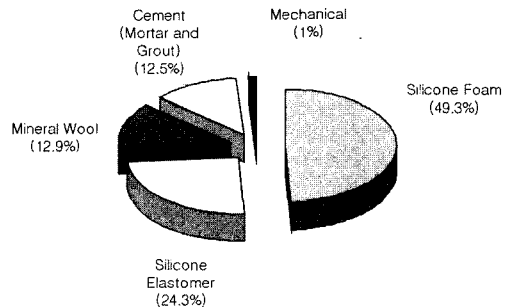


Fig. 4. Seal Installation Status (USA).

및 미국 원자력발전소 관통부 내화충전제의 적용현황을 보여준다.

미국은 Brown Ferry 원전에서 발생한 관통부 내화충전제를 통한 화재확대 사건을 계기로 관통부 내화충전제의 중요성을 인식하게 되었다. 1987년, 1988년에 규제기관은 그 동안의 발전소 사건보고서(LER: licensee event report)를 토대로 관통부 내화충전제에 대한 종합적인 평가를 수행하고 IN 88-04, IN 88-04

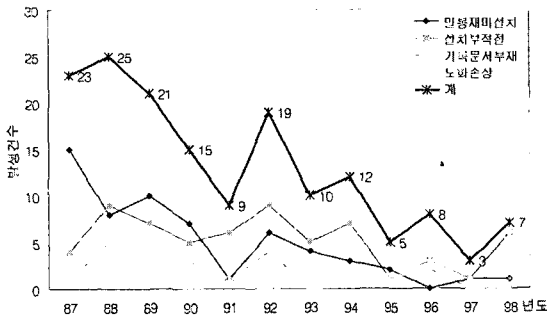


Fig. 5. Trend of Penetration Seal Problems Occurred (USA).

Supplement 1 및 IN 88-56⁷⁾을 발행하였다. 미국 내 45개 발전운영사업자의 관통부 내화충전재에 대한 점검 결과 대부분의 발전소에서 다양한 유형의 결함이 광범위하게 발견되었는데 주요 문제점은 내화충전재 미설치, 내화충전재의 부적절한 설치, 인중문서부족 및 내화충전재의 노화/손상 등으로 나타났다. Fig. 5는 1987년 1월부터 1998년 9월까지 규제기관에 제출된 관통부 내화충전재 관련 발전소사건보고서를 분석하여 나타난 관통부 내화충전재의 주요결함의 연도별 발생분포를 보여준다.^{5,6)}

3. 관통부 충전구조의 내화성능평가기법

원자력발전소의 방화벽 관통부에 대한 규제지침은 방화벽 관통부는 최소한 설치된 방화벽의 내화등급과 동등해야 한다는 것이다. 관통부 내화성능을 평가하는 방법에는 시험체를 제작하여 관련 시험기준에 따라 실제 내화시험을 하는 방법과, 시험을 하지 않고 엔지니어링 기법에 의하여 평가하는 방법이 있다. 그런데 시험에 의한 내화성능평가 방법은 많은 시간과 비용을 수반하므로 비현실적이다. 따라서 이에 대한 대안으로서 선진 외국에서는 실제 내화시험을 하지 않고 화재 시험 데이터, 재료의 노화영향 평가, 평가대상 재료의

유사성 분석 등을 통한 공학적 평가기법을 활용하여 내화충전구조의 성능평가를 수행하고 있으며 미국 원자력규제위원회는 이와 같은 공학적인 분석방법의 내화성능평가 결과를 허용하고 있다.

3.1 시험에 의한 평가기법⁸⁻¹²⁾

미국 원자력규제위원회에서 인증한 관통부 내화시험 기준으로는 ASTM E-119, NFPA- 251, ASTM E-814, IEEE-634, UL-1479, ANI, FM 등이 있다. 이 중에서 ASTM E-814의 시험방법은 분석을 필요로 하는 전선관, 배관, 케이블 관통부를 대표할 수 있는 시험체를 제작하고 표준 시간-온도 곡선에 따르는 화재시험을 수행하여 내화충전구조의 구조안정성(stability), 차열성(integrity) 및 차열성(insulation)을 평가한다. Table 1은 ASTM E-814의 허용기준을 보여준다.

3.2 공학적 분석에 의한 평가기법

공학적 분석에 의한 관통부 내화성능평가는 2단계로 이루어진다. [단계 I]은 유사성 분석 단계로서, 관통부 충전구조의 내화성능 평가를 위하여 충전구조의 성능에 매우 중요한 영향을 미치는 물리적 특성만을 비교하여 내화등급을 설정한다. [단계 II]에서는 유사성이 입증된 관통부에 대하여 물리적 인자의 차이점을 상세하게 평가하고 [단계 I]에서 산출된 내화등급에 보정치를 반영하여 내화등급을 재계산한다. Fig. 6은 공학적 분석에 의한 내화성능 평가절차를 보여준다.

3.2.1 유사성 분석에 의한 내화등급 결정[단계 I]

(1) 시험데이터 확보(Step 1)

관통부 내화충전구조 시험데이터를 확보하여 데이터 베이스를 구축한다. 가능하면 평가대상 발전소의 관통부 유형별 시험데이터를 확보하는 것이 유리하지만 만약 해당 발전소의 화재시험데이터가 없을 경우에는 NRC의 PDR(public document room) 및 타 발전소 화재 시험데이터를 기반으로 기 구축된 데이터베이스를 입수하여 활용한다.

Table 1. ASTM E-814(1997) Rating Criteria

| 성능기준 | F 급 | T 급 |
|------|--|---|
| 시험항목 | | |
| 가열시험 | · 시험체 이면으로 화염이 관통하거나 시험체 이면에서 화염발생이 없을 것 | · 시험체 이면으로 화염이 관통하거나 시험체 이면에서 화염발생이 없을 것 · 시험체 각 부위의 이면온도가 초기온도보다 181°C를 초과하지 않을 것 |
| 주수시험 | · 주수시험중 시험체 이면으로 물이 누수되는 틈새가 발생하지 않을 것 | · 주수시험중 시험체 이면으로 물이 누수되는 틈새가 발생하지 않을 것 |

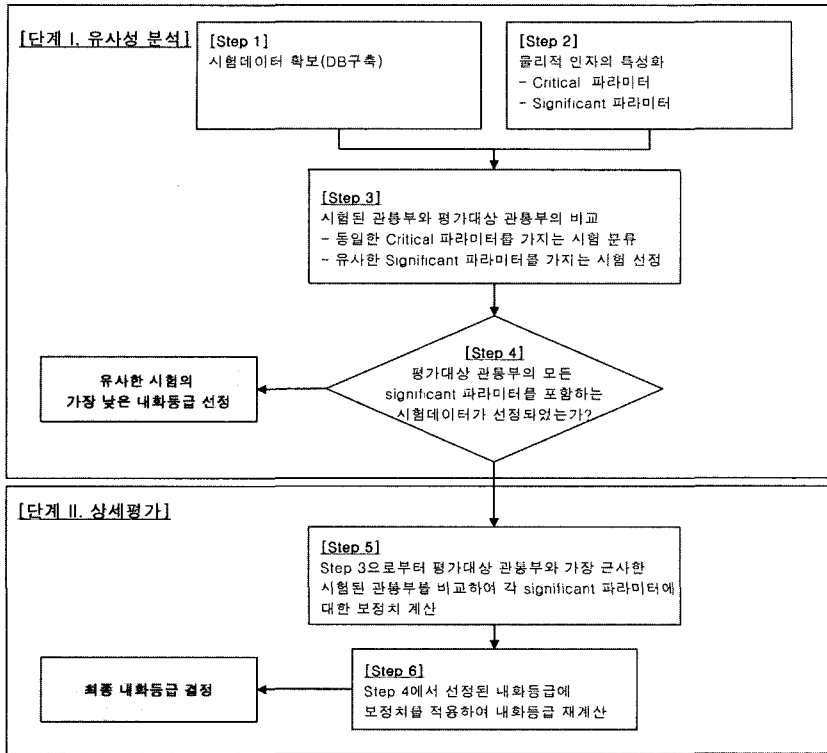


Fig. 6. Process of Estimating Fire Rating Using Engineering Analysis.

(2) 평가대상 관통부 내화충전구조의 특성화(Step 2)
 내화충전구조의 내화등급에 영향을 미칠 수 있는 주요 물리적 인자를 확인하고 평가대상 관통부 내화충전구조를 특성화함으로써 내화등급의 추정이 가능토록 한다. 관통부의 내화등급을 결정하는데 중요한 물리적 인자를 “매우 중요한 인자(critical parameter)”, “중요한 인자(significant parameter)”, “중요하지 않은 인자(insignificant parameter)”로 분류한다. Table 2는 미국 원자력규제위원회에서 주요 관통부 충전재에 대한 화재시험결과를 근거로 관통부 충전구조의 내화성능에 영향을 미치는 각 물리적 인자의 중요도를 정리한 것이다.

(3) 평가대상 관통부와 시험된 관통부의 비교(Step 3)
 평가대상 관통부와 유사한 시험된 관통부를 비교하여 “매우 중요한 인자”가 동일한지를 검토한다. 만약 “매우 중요한 인자”가 동일하지 않다면 추가의 시험데이터에 대한 검토가 필요하다. 또한, 평가대상 관통부의 “중요한 인자”를 분류하고 선정된 시험데이터와 비교하여 보수성을 가지는지 즉, 평가대상 관통부의 모든 “중요한 인자”가 시험데이터의 범위에 포함되는지 (bounding)를 검토한다.

(4) 내화등급 결정(Step 4)
 중요한 물리적 특성이 시험된 내화충전구조와 동일한 평가대상 내화충전구조는 시험된 내화충전구조의 내화등급으로 결정한다. 여기에 해당되는 평가대상 관통부 내화충전구조에 대해서는 더 이상의 분석이 필요 없다. 그러나 만약 평가대상 내화충전구조의 “중요한 인자”중 하나 이상이 시험된 것과 동일하지 않다면 다음의 [단계 III]에서 상세평가를 수행하여야 한다.

3.2.2 상세평가[단계 III]

이 단계는 기존의 이용가능한 관통부 내화충전구조 시험데이터와 동일하지 않은 경우에 내화충전구조의 내화등급을 결정하는 과정이다. 이 과정의 적용을 위해서는 물리적 인자의 변화가 내화등급에 미치는 영향을 정량화한 데이터를 필요로 한다.

(1) 보정치 산정(Step 5)

시험된 것과 평가대상 내화충전구조 사이의 “중요한 인자”에 차이가 있을 경우에 그 차이로 인하여 관통부 충전구조의 내화성능에 미치는 영향을 정량화하고 각 인자별 보정치를 산출한다.

(2) 내화등급 결정(Step 6)

이론적으로 평가대상 충전구조의 내화등급은 가장

Table 2. Significant Physical Characteristics Influencing Seal Fire Rating

| 물리적 인자 | 관통부 유형 | | | | 실리콘 폼 | | 고밀도 충전재 (leaded elastomer) | 부트 씸 (boot seal) |
|-------------------|---------|--------|-----|-------|--------|---|-------------------------------|---------------------|
| | 케이블 트레이 | 배관/전선관 | 케이블 | 전선관내부 | 배관/전선관 | | | |
| 내화충전재 재질 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | |
| 설치위치 | ● | ● | ● | X | ● | ● | ● | |
| 관통부 종류 | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | |
| 내화충전재 두께 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | |
| 내화충전재 밀도 | | | | | ◎ | | | |
| 댐판(damming board) | ◎ | ◎ | ◎ | X | X | | | |
| 방화벽 두께 | ◎ | ◎ | ◎ | X | X | | X | |
| 트레이 재질(알루미늄) | ◎ | ◎ | | | | | | |
| 케이블 절연재/자켓재질 | ◎ | X | ◎ | X | X | | | |
| 관통부 개구부 크기 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | | | | |
| 자유공간 | ◎ | ◎ | ◎ | | | | | |
| 방화벽 재질 | X | X | X | X | X | X | X | |
| 트레이 재질(강재) | X | X | | | | | | |
| 트레이 종류 | X | | | | | | | |
| 트레이 크기 | X | | | | | | | |
| 케이블 적체율 | X | X | | | X | | | |
| 케이블 크기 | X | | | X | X | | | |
| 관통부 수 및 근접성 | X | ◎ | X | | | | | |
| 관통부 라이너 | X | X | X | | | | | |
| 배관 단열재 종류 | | ◎ | | | ◎ | ◎ | ◎ | |
| 배관/전선관 크기 | | ◎ | | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | |
| 배관/전선관 재질 | | | | | X | X | X | |
| 원주율 인자(CRF) | | ◎ | | | ◎ | | | |
| 케이블 크기 | | X | X | | X | | | |

주) ● : 매우 중요한 인자(critical parameter) - 화재상황에서 내화충전구조의 거동을 완전히 변화시키므로 내화등급 결정에 있어서 대단히 중요하다. 평가대상 관통부와 시험데이터간의 “중요한 인자”가 다르면 시험데이터를 활용한 공학적 분석에 의한 내화성능평가가 불가능하다.
 ◎ : 중요한 인자(significant parameter) - 잠재적으로 내화등급에 상당한 영향을 미칠 수 있는 인자로 시험데이터와 평가대상 관통부의 “중요한 인자”가 다를 경우에는 상호간의 차이점에 대한 공학적 분석 및 보정치의 적용이 필요하다.
 X : 중요하지 않은 인자(insignificant parameter) - 내화등급에 영향을 미치지 않는다.

가까운 시험된 충전구조의 내화등급(step 3에서 결정된)에 step 5에서 산출된 보정치를 적용하여 다음과 같이 결정한다. 여기서, 지수로 산출되는 보정치는 곱셈(×)을, 시간단위로 산출되는 보정치는 덧셈(+)을 한다.

$$FR_{Installed} = FR_{Tested} \times (or +) F_{Parameter 1} \times (or +) F_{Parameter 2} \times (or +) \dots \times (or +) F_{Parameter N}$$

여기서, $FR_{Installed}$ 은 평가대상 충전구조 내화등급을,

FR_{Tested} 는 시험된 충전구조 내화등급을, $F_{Parameter}$ 는 각 인자에 대한 보정치이다.

4. 관통부 충전구조 내화성능평가 실제적용

4.1 기초데이터 확보를 위한 화재시험¹³⁾

내화충전재 재질, 두께, 댐판의 유무, 방화벽 두께,

Table 3. Fire Rating for Fire Tested Specimen

| 시험체 번호 | 개구부 크기 (cm) | 관통재 | | | 충전재 | | 담판 (damming board) | 관통부/개구부 면적비 (%) | 방화벽 (cm) | 내화성능 (분) | |
|--------|-------------|-----------------------------------|-------------------------|-------|--------------|----------|--------------------|-----------------|---------------------|----------|-----|
| | | 케이블 | 케이블 트레이 (cm) | 설치 위치 | 재질 | 두께 (cm) | | | | F급 | T급 |
| 시험체1 | 160×200 | 전력 제어 계측 CV케이블 (FR-60 연소방지 도료 도포) | 아연도금 강판 (30×10×0.23×12) | 벽 | 실리콘폼 | 30 | - | 0.45 | 24×25×30t (철근 콘크리트) | 171 | 141 |
| 시험체2 | 17×20 | | 아연도금 강판 (10×15×0.23×1) | 벽 | 실리콘폼 | 30 | - | 8 | | 180 | 180 |
| 시험체3 | 40×25 | | 아연도금 강판 (30×10×0.23×1) | 벽 | 실리콘폼 | 30 | - | 8.2 | | 180 | 180 |
| 시험체4 | 100×100 | | 아연도금 강판 (60×10×0.23×3) | 벽 | 실리콘폼 | 30 | 세라크올 하드보드 1(cm)-양면 | 2.2 | 35×16×30t (철근 콘크리트) | 180 | 164 |
| 시험체5 | 50×40 | | 아연도금 강판 (30×10×0.23×1) | 바닥 | 세라크올 | 30 | 세라믹 내화보드 | 3.6 | | 180 | 180 |
| 시험체6 | 80×40 | | 아연도금 강판 (30×10×0.23×2) | 바닥 | 세라크올 실리콘폼 | 15 15 | 1.25(cm)-단면 | 5.7 | | 180 | 115 |

관통부 설치위치, 관통부 종류, 케이블 절연재/자켓 재질, 관통부 개구부 크기, 자유공간 등을 고려하여 내화성능 및 구조강도 측면에서 취약한 각각 다른 형태의 케이블 트레이 관통부 6개를 대표 관통부로 선정하였다. 각각의 대표 관통부를 현장 시공상태와 동일하게 시험체를 제작하고 ASTM E-814의 시험방법에 따라 국내 공인시험기관에서 내화시험을 수행하여 내화성능 데이터를 취득하였다. Table 3은 내화성능시험 대표 시험체의 사양 및 내화시험결과를, Figs. 7~10은 대표 관통부 시험체의 표준 온도-시간 곡선, 배치도, 가열시험 장면을 각각 보여준다.

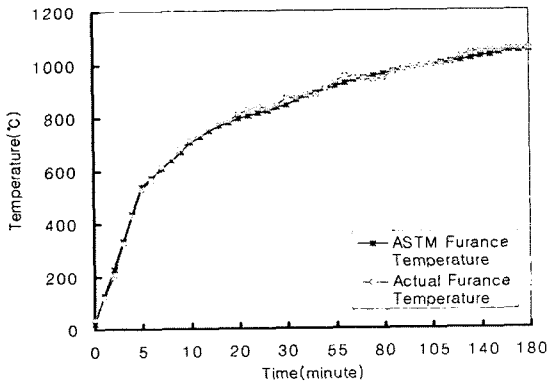


Fig. 7. Time-Temperature Curve (Specimen 1).

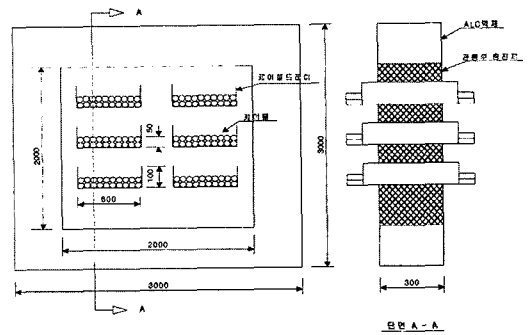


Fig. 8. Diagram of Fire Tested Penetration Seal (Specimen 1).

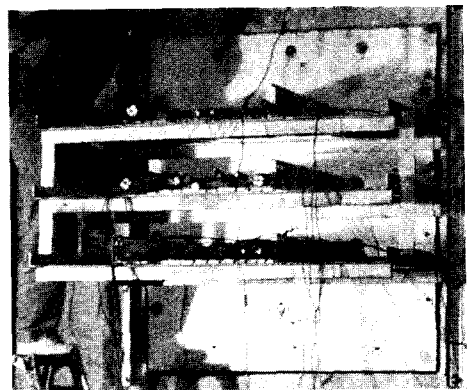


Fig. 9. Penetration Seal for Fire Test (Specimen 1).

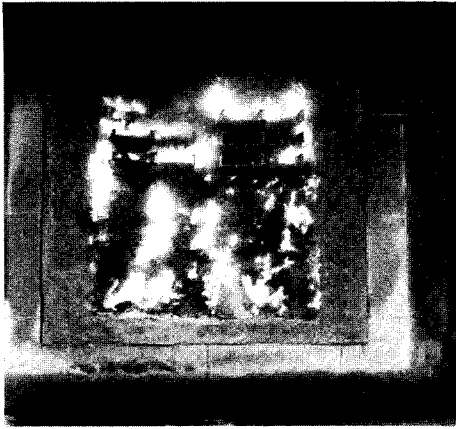


Fig. 10. Photograph of Ongoing Fire Test (Specimen 1).

4.2 공학적 분석을 통한 내화성능평가

4.2.1 평가대상 관통부 선정

직접 화재시험을 하지 않고 유사한 관통부의 화재시험 데이터베이스를 기반으로 공학적 분석방법을 이용한 내화성능평가를 위하여 제어건물에 설치된 케이블 트레이 관통부(K32-01A-2-12)를 시험 선정하여 내화성능을 평가하였다. Fig. 11은 평가대상 관통부의 배치도를 보여준다.

4.2.2 평가대상 관통부 특성 분류

평가대상 관통부 충전구조는 실리콘 폼의 케이블 트

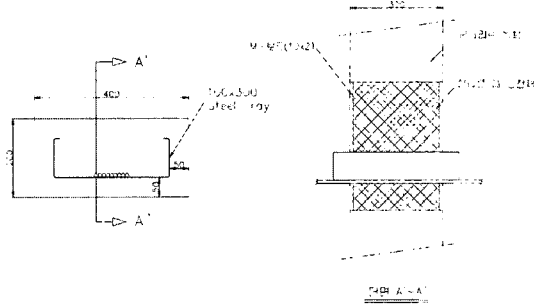


Fig. 11. Diagram of Penetration Seal for Engineering Analysis.

레이 관통부로 내화성능에 영향을 미치는 “매우 중요한 인자”는 내화충전재의 재질, 관통부의 설치위치, 관통부의 종류이며, “중요한 인자”는 내화충전재의 두께, 댐판의 설치 여부, 방화벽의 두께, 케이블 트레이의 재질, 케이블의 종류, 케이블 절연재/자켓의 재질, 관통 개구부 크기, 자유공간인 것으로 나타났다.

4.2.3 시험된 내화충전구조와 평가대상 내화충전구조의 비교

공학적 분석방법의 충전구조의 성능평가를 위한 첫 번째 조건은 평가대상 관통부와 시험체 관통부의 “매우 중요한 인자”가 동일해야만 한다. 만약 평가대상 관통부와 시험체 관통부의 “매우 중요한 인자”가 동일하지 않으면 공학적 분석에 의한 내화성능평가는 사실상

Table 4. Comparison of the Physical Characteristics for Engineering Analysis

| 물리적 인자 | | 평가대상 관통부 (K32-01A-2-12) | 시험체 관통부 (시험체 3) | 판정 |
|----------------------------|--|--|-------------------------------|--------|
| 매우 중요함 (critical) | 내화충전재 재질 | 실리콘 폼 | 실리콘 폼 | 동일 |
| | 관통부 종류 | 케이블 트레이 | 케이블 트레이 | 동일 |
| | 설치위치 | 벽 | 벽 | 동일 |
| 중요함 (significant) | 내화충전재 두께 | 30 cm | 30 cm | 동일 |
| | 댐판(damming board) | 1 cm M-보드 | 없음 | 평가필요 |
| | 방화벽 두께 | 30 cm | 30 cm | 동일 |
| | 트레이 재질 | 강재(아연도금) | 강재(아연도금) | 동일 |
| | 케이블 종류 | 동력, 제어 및 계측 | 동력, 제어 및 계측 | 동일 |
| | 케이블 절연재/자켓 | CV 케이블 | CV 케이블 | 동일 |
| | 개구부 크기 | 40×20=800 cm ² | 40×25 (1000 cm ²) | 평가필요 |
| 자유공간 | 800 cm ² - 7.1 cm ² =793 cm ² | 1000 cm ² - 82.3 cm ² (917.7 cm ²) | 평가필요 | |
| 중요하지 않음 (insignificant) | 트레이 크기 | 10 cm×30 cm | 10 cm×30 cm | 평가 불필요 |
| | 케이블 적체율 | 2.4% Actual | - | 평가 불필요 |
| | 트레이 수 | 1 | 1 | 평가 불필요 |
| | 관통부 라이너 | 없음 | 없음 | 평가 불필요 |

불가능하므로 시험에 의한 내화성능평가를 수행해야 한다. 그러나 이미 미국 등의 선진국에서는 원자력발전소에서 사용하는 모든 종류의 관통부에 대한 시험 데이터베이스가 구축된 상태이므로 발전소 실무 적용 단계에서는 관련 데이터베이스의 확보 및 활용이 가능하다. “매우 중요한 인자”의 비교결과 평가대상 관통부와 시험체 관통부가 동일하므로 평가대상 관통부는 공학적 분석에 의하여 내화등급을 결정할 수 있다. 다음에는 평가대상 관통부와 시험체 관통부의 “중요한 인자”에 대한 유사성을 분석한다. 평가대상 관통부와 시험체 관통부의 물리적 특성에 대한 검토 결과는 Table 4와 같다.

4.2.4 내화등급 결정

평가대상 관통부 충전구조와 시험된 충전구조의 주요 물리적 특성의 비교를 통하여 평가대상 관통부 충전구조는 ASTM E-814의 기준을 만족하는 3시간 내화등급의 시험된 관통부 충전구조와 유사한 것으로 판단된다. 그러나 “중요한 인자” 중에 댐판, 개구부 크기 및 자유공간에 대한 사양이 평가대상과 시험체 상호간에 차이가 있으므로 이들 인자의 차이가 내화성능에 미치는 영향을 공학적으로 규명하고 반영하여야 한다.

4.2.5 보정치 계산

관통부 충전구조의 내화등급은 위에서와 같이 유사성 분석에 의하여 추정할 수 있으나, 이는 기존의 유효한 관통부 내화충전구조 시험데이터와 평가대상 관통부의 물리적 인자의 정성적인 유사성분석에 근거하므로 상당히 보수적인 결과를 도출하게 된다. 따라서 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 기존의 시험데이터와 평가대상 관통부의 동일하지 않은 물리적 인자가 관통부 충전구조의 내화성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 내화등급에 반영하였다. Table 5는 정량적인 평가가 필요한 주요 물리적 인자와 해당 인자별 보정치 산출결과를 보여준다.

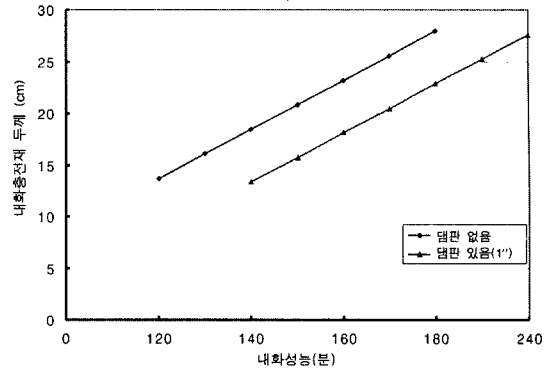


Fig. 12. Impact of Damming Board on Fire Rating.

(1) 댐판(damming board)

댐판은 직접적인 화염의 접촉으로부터 실리콘 폼을 단열시키고 탄화과정을 지연시켜 내화충전구조의 내화성능을 개선하게 된다. 10 mm 두께의 댐판이 설치된 평가대상 관통부 충전구조는 댐판의 설치와 내화성능의 상관관계 분석을 통하여 내화성능을 약 8분 증가시키는 것으로 나타났다. Fig. 12는 댐판이 내화성능에 미치는 상관관계를 보여준다.

(2) 개구부 크기

큰 개구부의 내화충전구조는 더 작은 개구부의 내화충전구조보다 탄화속도가 더 빠르게 진행된다. 구조적 안정성 또한 더 큰 개구부가 낮다. 실리콘 폼은 큰 열팽창계수를 가지므로 큰 개구부에 설치된 내화충전구조는 훨씬 큰 뒤틀림으로 인하여 결국 조기 손상의 원인이 된다. 그러나 케이블 트레이 관통부를 가지는 실리콘 폼 내화충전구조의 개구부 크기가 비록 중요한 인자이긴 하나, 평가대상 관통부와 시험데이터간의 큰 차이가 없고 실제로 내화등급에 중요한 영향을 미치는 것은 자유공간이므로 개구부의 크기변화에 따른 보정치는 적용하지 않았다.

(3) 자유공간 크기

Table 5. Adjustment Factors to Approximate the Fire Endurance Rating

| 중요한 인자 (significant) | 평가대상 관통부 (K32-01A-2-12) | 시험 데이터(시험체 3) | 보정치 | 보정치 근거 |
|----------------------|---|--|-----|---|
| 댐판 | 1 cm M-보드 (양면) | 없음 | +8분 | · Fig. 12에 근거하여 10 mm 댐판 설치로 내화성능 약 8분 증가 |
| 개구부 크기 | 40×20 (800 cm ²) | 40×25 (1000 cm ²) | 1.0 | · 개구부의 크기에 따른 내화성능 영향은 작을 것으로 판단됨. · 보정치 미적용 |
| 자유공간 | 800 cm ² - 7.1cm ² (792.9 cm ²) | 1000 cm ² - 82.3 cm ² (917.7 cm ²) | +2분 | · Fig. 13에 근거하여 자유공간의 감소로 인한 내화성능 약 2분 증가 |

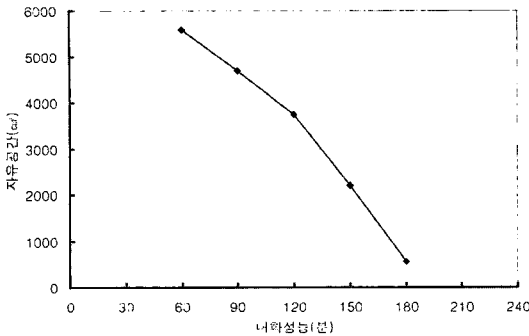


Fig. 13. Impact of Free Area on Fire Rating.

내화충전재의 내화성능은 자유공간의 크기가 증가할수록 감소한다. 평가대상 관통부의 자유공간은 792.9 cm²로 시험체 관통부의 자유공간 917.7 cm²에 비하여 약간 작은 것으로 나타났다. 이 차이에 의한 내화성능의 변화를 자유공간과 내화성능과의 관계로부터 내삽법(interpolation)을 적용하여 계산하면 약 2분 정도의 내화성능이 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 13은 자유공간과 내화성능과의 관계를 보여준다.

4.2.6 내화등급 결정

평가대상 관통부 내화충전구조의 내화등급은 3.2.2의 Step 6에서 정의된 방정식을 이용하여 시험체 관통부의 내화등급(180분)에 보정치(4.2.5에서 계산된)를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 FR_{\text{Installed}} &= FR_{\text{Tested}} \times (\text{or } +) F_{\text{Parameter 1}} \times (\text{or } +) F_{\text{Parameter 2}} \\
 &\quad \times (\text{or } +) \dots \times (\text{or } +) F_{\text{Parameter N}} \\
 &= 180\text{분} \times 1.0(\text{개구부 보정치}) + 8\text{분}(\text{댐판 보정치}) + 2\text{분}(\text{자유공간 보정치}) = 190\text{분}
 \end{aligned}$$

위의 계산은 각각의 인자에 대하여 보정치가 독립적으로 설정되었다. 그러나 시험된 것과 평가대상 충전구조간에 차이가 있는 2개 이상의 인자로 인하여 내화성능에 미치는 영향은 알려져 있지 않으므로 가장 신뢰할 수 있는 하나의 인자만의 보정치를 적용하여 재계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 FR_{\text{Installed}} &= 180 + 8\text{분} \\
 &= 188\text{분}(\text{댐판 영향 반영시}) \\
 FR_{\text{Installed}} &= 180 + 2\text{분} \\
 &= 182\text{분}(\text{자유공간 영향 반영시})
 \end{aligned}$$

즉, 2개의 인자로 인한 영향을 각각 검토하고 보수적으로 평가대상 충전구조의 내화등급은 최소한 182분

이상이라는 결론을 내릴 수 있다. 이 결과는 평가대상 관통부가 원자력발전소에서 요구되는 내화등급 3시간의 요건을 만족함을 입증하는 것이다.

5. 결 론

(1) 실리콘 폼 내화충전재를 사용하는 케이블 트레이 관통부의 내화성능에 중요한 영향을 미치는 물리적인 인자는 내화충전재의 재질, 관통부의 종류, 설치위치, 내화충전재 두께, 댐판(damming board)의 유무, 방화벽 두께, 트레이 재질, 케이블의 종류, 케이블 절연재/자켓의 재질, 개구부의 크기 및 자유공간인 것으로 나타났다.

(2) 내화등급 180분의 시험체 관통부와 평가대상 관통부의 물리적 인자가 다른 것은, 댐판의 유무, 개구부의 크기 및 자유공간인 것으로 확인되었고, 이들 인자의 차이에 대한 평가결과 최종적으로 평가대상 관통부의 내화등급은 182분이라는 결과를 얻음으로써 원자력발전소의 요구 내화등급 3시간의 요건을 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 본 연구를 통하여 공학적인 분석에 의한 관통부 충전구조의 내화성능평가기법은 내화인증시험서가 없는 국내 장기가동 원자력발전소에 효율적으로 적용할 수 있음을 확인하였다. 그러나 이 기법의 적용을 위해서는 다양한 관통부 내화충전구조에 대한 시험데이터 베이스의 확보가 전제되어야 하고, 보다 효율적인 평가를 위해서는 공학적 분석을 지원할 수 있는 전산 시스템의 개발이 필요하다.

참고문헌

- 10 CFR 50.48, Fire Protection(1981).
- 10 CFR 50, App. R, Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to January 1(1979).
- BTP CMEB 9.5-1, Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants.
- Generic Letter 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”, dated March 25(1994).
- NUREG-1552, Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants(1996. 7).
- NUREG-1552, Supplement 1, Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants(1999. 1).
- Information Notice 88-56, “Potential Problems With Silicone Foam Fire Barrier Penetration Seals”, dated August 4(1988).

8. ASTM E-119, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.
9. NFPA-251, Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials.
10. ASTM E-814, Standard Test Methods for Fire Tests of Through-Penetration Fire Stops.
11. IEEE-634 Standard Cable Penetration Fire Stop Qualification Test.
12. UL-1479 Fire Rests of Through-penetration Fire-stops
13. TM.02NE16.P2004.361, 방화벽 관통부 내화층전구조 성능평가(2차년도), 한국전력공사 전력연구원(2004).