

원자력발전소 케이블관통부 충전시스템 평가용 소프트웨어 개발 I Development of a Software to Evaluate the CPFS(Cable Penetration Fire Stop) System in Nuclear Power Plants I

윤종필 · 권성필* · 조재규 · 윤인섭[†]

Jong-Pil Yun · Seong-Pil Kwon* · Jae-Kyu Cho · En-Sup Yoon[†]

서울대학교 응용화학부, *서울대학교 화학공정신기술연구소
(2003. 11. 21. 접수/2004. 2. 17. 채택)

요 약

본 논문은 원자력발전소 방화벽에 설치된 케이블관통부 충전시스템(CPFS: Cable Penetration Fire Stop) 안에서 일어나는 동적 열전달 현상을 해석하기 위해 수행된 실험을 다루고 있다. Dow Corning사의 내화성 충전물에 대해서 내화실험이 수행되었으며, 본 실험을 통해 준비된 CPFS 시험체가 성능위주 시험방법인 ASTM E-814의 F-rating과 T-rating을 동시에 만족시킬 수 있는지를 알아보았다. 그리고 여기서 얻어진 실험결과는 CPFS시스템 내화성능 평가용 소프트웨어를 개발하기 위해 사용되었다. CPFS 시스템 내에서의 열전도 현상은 주어진 초기조건과 경계조건하에서 Parabolic PDE(Partial differential equation)로 수식화 되었으며, 이렇게 수식화된 PDE는 다시 연속과완화법(SOR: Sequential over-relaxation)과 Galerkin 유한요소법(FEM: Finite element method)으로 구성된 혼합알고리즘에 따라 풀 수 있었다. PDE를 풀기 위해 널리 사용되고 있는 상용소프트웨어 Femlab을 이용하여 방화시스템 내에서의 온도분포를 계산하여 3차원 그래픽으로 나타내었다. 특히 CPFS시스템 내에서의 시간의 경과에 따른 온도 분포의 변화에 대한 실험과 수치해석을 병행함으로써 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있었다.

ABSTRACT

In this work the dynamic heat transfer occurring in a cable penetration fire stop system built in the firewall of nuclear power plants is three-dimensionally investigated to develop a test-simulator that can be used to verify effectiveness of the sealants. Here was carried out an experiment to observe the heat transfer in the cable penetration fire stop system made of DOW CORNING products. The dynamic heat transfer occurring in the fire stop system is formulated in a parabolic partial differential equation subjected to a set of initial and boundary conditions. And it was modeled, simulated, and analyzed. The simulation results were illustrated in three-dimensional graphics and were compared with experimental data. Through the simulations, it was shown clearly that the temperature distribution was influenced very much by the number, position, and temperature of the cable streams. It also was found that the dynamic heat transfer through the cable streams was one of the most dominant factors, and the feature of heat conduction could be understood as an unsteady-state process. It is certain that these numerical results are useful for making a performance-based design for the cable penetration fire stop system.

Keywords : Dynamic heat transfer, Finite element method, Sequential over-relaxation, Partial differential equation, Cable penetration fire stop system

1. 서 론

우리나라에서는 최근까지 산업과 가정에서 필요로

하는 전력을 충당하기 위하여 꾸준히 원자력발전소를 증설하고 있으며, 이에 따라 원자력발전소의 안전에 관한 사회적 관심이 어느 때보다 높은 실정이다. 특히 운전 중에 일어나는 화재사고는 원자력발전소 내에 있는 제어시스템에 급속히 전파되어 중대한 사고로 발전할

[†] E-mail: esyoon@pslab.snu.ac.kr

수 있으므로, 이렇게 증대한 잠재적 위험요소의 규모를 파악하여 위험을 예방하고 통제하는 관리체계가 어느 때 보다 절실하다. 이러한 위험관리 방안의 하나로써 사용되어 왔던 기존의 ASTM E-119에 따른 시험방법은 1975년 미국의 Browns Ferry 원자력발전소 사고를 계기로 ASTM E-814 또는 UL-1479를 따르도록 바뀌게 되었다.¹⁾ 새로운 ASTM E-814에서는 방화 시스템의 안전성을 증명하기 위해 유관으로 불꽃의 통과 여부를 확인하는 F-rating뿐만 아니라, 정해진 최고온도의 초과 여부를 확인하는 T-rating도 함께 시행하도록 규정하고 있다. 보통 원자력발전소 하나당 케이블이 통과하기 위하여 방화벽에 설치된 CPFS(Cable penetration fire stop) 시스템의 수는 3,000에서 10,000개에 이른다. 이렇게 많은 기존의 방화시스템에 새로운 시험방법인 ASTM E-814를 적용시켜 성능위주 시험을 실시하는데에는 많은 어려움이 따르므로, 시험용 소프트웨어를 개발하여 사용하는 것이 필요하다. 시험용 소프트웨어는 CPFS시스템 내에서의 시간에 따른 온도분포의 변화를 계산해 낼 수 있기 때문에, 특히 T-rating을 수행하는데 효과적이다.²⁾

본 연구에서는 원자력발전소의 방화벽에 설치된 CPFS 시스템 내에서 일어나는 동적인 열전달 현상을 해석하기 위하여, 다양한 형태로 케이블의 종류와 배열을 바꿔 가면서 실험을 실시하였다. 그 밖에도 이러한 열전달 현상을 수치적으로 시뮬레이션 하여 검증하기 위하여 수식화하였다. 이 수식들은 FEM(Finite element method)을 이용하여 문제를 해결하는 상용프로그램 Femlab의 도움으로 수치적으로 풀렸다. 이렇게 얻어진 실험과 시뮬레이션 값들은 서로 비교·분석되었다. 선행된 다양한 실험결과들은 개발된 시험용 시뮬레이터의 신뢰도를 높이는데 효과적으로 사용될 수 있었다.

2. 실험

2.1 실험개요 및 절차

본 실험은 Dow Corning사의 내화충전물에 대한 3시간 동안의 내화시험을 수행하기 위해 한국화재보험협회부설 방재시험연구소에 위탁 실시한 실험결과를 다루고 있다. 이 실험 결과는 시뮬레이션을 통해서 계산된 값들에 대한 신뢰성을 높여줄 수 있기 때문에, 본 연구를 통해 최종적으로 개발하려고 하는 CPFS 시스템 평가용 프로그램을 제작하는데 중요한 역할을 한다.

본 실험에서는 벽체 관통계 틀래 개구부에 화재차단을 위하여 설치된 내화충전구조에 대해 ASTM E-814 (Standard Test Method for Fire Tests of Through-

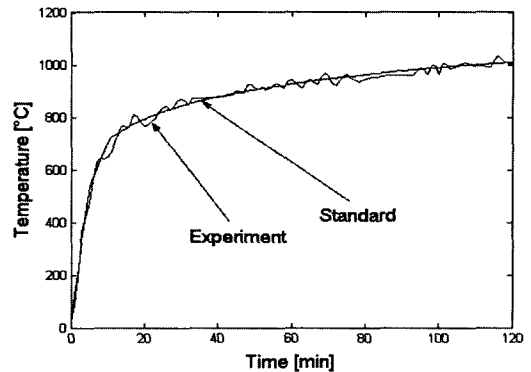


Fig. 1. The standard temperature-time curve of ASTM E-119 and the experimental time-temperature curve.

Table 1. List of Fire Stop system (unit: mm)

Classification	Dimension
Construction Frame	600×300
Penetration Cable system	Cable : 600V FR-81C×3.5 mm ² ×5 Tray : 400(width)×100(height) ×6(thickness)
System Supporter	Steel sleeve : 1.2(thickness)
Sealant	DOW CORNING 3-6548 Silicone Foam : 25(thickness)
The ratio of Penetration system to Frame	22.2%
Wall	ALC : 1000×1000×250 t (A.L.C)

Penetration Fire Stops, 1994) 시험방법에 따라 3시간 동안 가열시험과 주수시험을 통하여 내화성능을 측정하였다.

Table 1에는 실험에 사용된 구성 및 재질이 기술되어 있고, Table 2에는 충전재인 Dow Corning Firestop 3-6548 Silicone의 물성치를 정리해 놓았다. 이런 충전 물질이 성능위주의 시험방법인 ASTM E-814에서 요구되고 있는 방화 시스템의 안전성을 만족하기 위해서는 3시간 동안의 가열 후 개구부(Construction Frame)에서 화염의 관통이나 발생이 없어야 하는 F-rating은 물론이고, 이면 각 부위의 온도가 초기 온도 보다 181°C를 초과하지 않아야 하는 T-rating 기준을 만족시켜야 한다.

구체적인 실험 방법은 다음과 같다.

(1) 시험체를 가열면적이 1 m×1 m인 수직 가열로에 고정시킨다.

(2) 가열로 내에 설치된 열전대 5개에서 측정된 온도의 평균값이 ASTM E-814의 시험 방법에 따른 표준가열온도시간곡선에 따르도록 시험체를 3시간 동안 가열

Table 2. Material properties on Dow Corning Firestop 3-6548 Silicone

Property	Unit	Value
Physical form		Flowable liquid
Color and consistency		Dark gray elastomeric foam
Snap time	Minutes	1.5
Density	kg/m ³	300
Tensile strength	MPa	0.07
Thermal conductivity	W/(m · K)	7.5 × 10 ⁻²
Linear coefficient of thermal Expansion (-25°C to 150°C)	1/°C	3.2 × 10 ⁻⁴
Volume coefficient of thermal Expansion (-25°C to 150°C)	1/°C	9.26 × 10 ⁻⁴
Volume resistivity	Ohm · cm	2.24 × 10 ¹⁵

한다(화로내 가열 온도측정 위치에서 측정).

(3) 가열시험 중 가열로 안에서의 압력이 대기압 보다 높은 정압이 되도록 제어한다.

(4) 가열시험 중 시험체 이면의 각 부위에 온도센서(thermal sensor)를 부착하여 증가한 온도를 측정한다.

2.2 내화시험결과

(주)FS.com ENG에 의뢰해서 제작 · 시공된 내화충전물에 대하여 ASTM E-814 시험규정에 따라 3시간 동안 내화성능시험을 실시한 결과 이 시험체의 내화성능은 F-rating을 기준으로 171분을 만족시켰지만, T-rating을 기준으로 141분 정도만을 만족시킬 수 있었다.

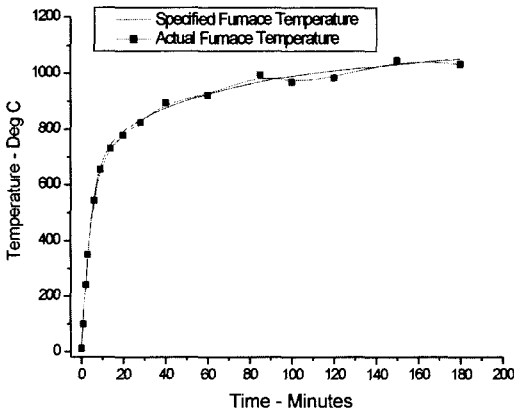


Fig. 2. The standard temperature-time curve of ASTM-814 and the experimental time-temperature curve.

즉, 내화충전물의 성능기준을 기존의 F-rating에서 T-rating으로 강화시키면, 보다 개선된 내화 충전물이 요구된다는 결론에 이르게 된다.

Fig. 2에는 ASTM E-814 표준가열온도시간 곡선과 온도센서를 이용하여 실제로 화로 안에서 측정된 온도가 나타나 있다. 이 두 경우에 있어서 시간에 따른 온도변화가 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 CPFS 시스템 내에서의 열전달 현상을 수치적으로 계산하기 위해서 화재발생시에 ASTM E-814 표준가열 온도시간 곡선(Fig. 1)을 따라 방안의 온도가 변한다고 가정했는데, Fig. 2를 통해서 이러한 가정의 정당성을 찾을 수 있다.²⁾

본 실험에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 CPFS 시스템 내부에 온도센서를 부착하지 않고, 반대벽면(z=Z)에만 온도센서를 달아서 시간에 따른 온도변화를 측정하였다. 결과 적으로 Fig. 4에는 이면(z=Z)에서의 시간에 따른 케이블, 받침대, 그리고 벽의 온도변화가 나타나 있으며, Fig. 5에는 우리의 주요 관심사항인 CPFS

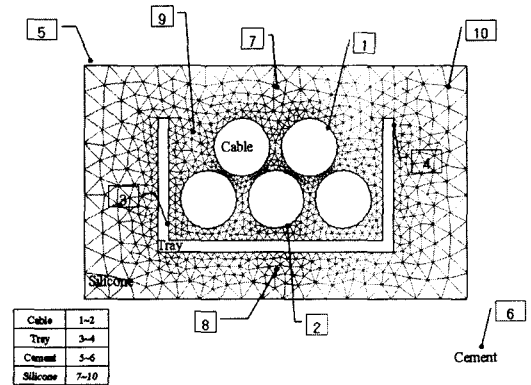


Fig. 3. Thermal sensor position on the CPFS System.

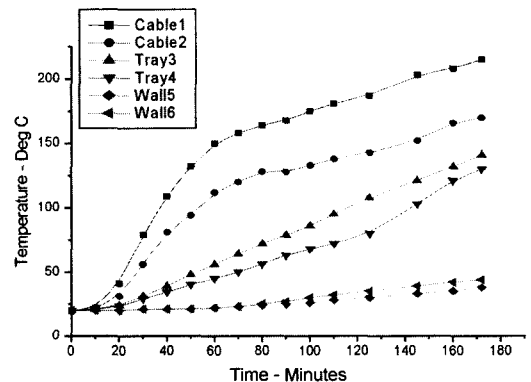


Fig. 4. Temperature profiles on sensors at z=Z.

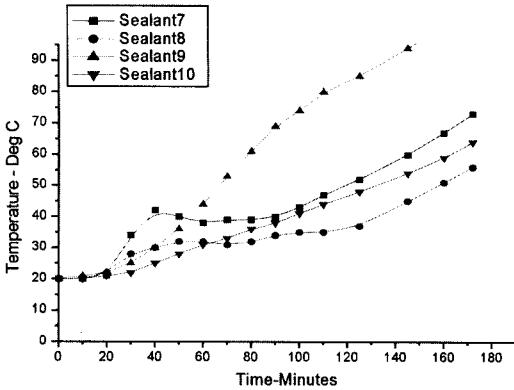


Fig. 5. Temperature profiles sensors at z=Z.

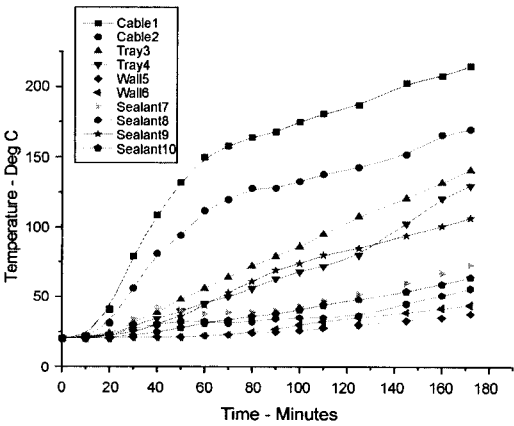


Fig. 6. Temperature profiles on sensors at z=Z.

시스템 내에서의 시간의 경과에 따른 온도변화가 나타나 있다. 이들 실험으로부터 CPFS 시스템에서의 온도변화가 동적인 거동을 보인다는 사실을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 모든 영역에서의 온도변화를 하나로 나타낸 것이다. 이상의 실험결과를 분석을 통해 각 영역에서의 동적인 열전달 거동을 알 수 있었다. 모든 영역들 가운데서 케이블의 온도변화가 가장 컸고 비정상상태의 열전달 현상이 분명하게 나타났다. 그리고 열전도도가 케이블 다음으로 높은 받침대 영역에서는 물론이고, 열전도도가 상대적으로 낮은 충전물과 벽 영역들에서도 비슷한 비정상상태의 열전달 현상이 나타났다.

3. FEMLAB을 이용한 시뮬레이션

3.1 CPFS시스템의 수식화

열전도도 k가 온도나 압력의 변화에 대해 일정하며,

충전물 시스템 내에서 추가로 열이 발생하지 않는다는 가정하에서, CPFS 시스템 내에서 일어나는 비정상상태의 열전도 현상의 지배방정식은 각각좌표에서 식 (1) 과 같이 포물선 PDE로 기술할 수 있다.^{3,5)}

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

실리콘(Silicone)으로 이루어진 충전물시스템의 내부는 모든 경계영역에서 식 (2)에 나타낸 바와 같이 초기온도 T_0 와 같다고 가정한다. 그리고 이 모든 경계영역의 안에 들어있는 CPFS시스템의 초기 온도는 식 (2)에 나타낸 것처럼 T_0 로 일정하다고 가정한다.

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad \text{on}$$

$$\partial \Omega = \partial \Omega_{\text{wall}} + \partial \Omega_{\text{tray}} + \sum_{j=1}^m \partial \Omega_{\text{cable}}^{\text{jth}} \quad (2)$$

j번째 케이블의 온도 $T_{\text{cable},j}$ 는 아래 식 (3)에 나타난 것과 같이 위치와 시간에 따라 변한다.

경계면 온도와 열전도도 k가 매우 큰 케이블 전체의 온도 T_{cable} 는 식 (4)와 같이 경계면 시작부분($z=0$)에서 항상 ASTM E-119 표준가열 온도시간곡선 $T_h(t)$ 를 따라서 변한다.

$$T_{\text{cable},j} = f(x, y, z, t) \quad \text{on} \quad \partial \Omega_{\text{cable}}^{\text{jth}} \quad (3)$$

$$T(x, y, 0, t) = T_h(t) \quad \text{on} \quad \partial \Omega_{\text{cable}}^{\text{jth}} \quad (4)$$

그리고 방화벽의 온도 T_{wall} 와 받침대의 온도 T_{tray} 는 각각 식 (5)와 식 (6)에 나타나 있다. 이 경우 두 온도는 경계영역을 따라서 z-축 방향으로만 온도변화가 일어난다. 그밖에도 방화벽과 받침대의 온도는 식 (7)과 같이 $z=0$ 에서 ASTM E-119표준가열온도시간곡선을 따른다.

$$T_{\text{wall}} = f(z, t) \quad \text{on} \quad \partial \Omega_{\text{wall}} \quad (5)$$

$$T_{\text{tray}} = f(z, t) \quad \text{on} \quad \partial \Omega_{\text{tray}} \quad (6)$$

$$T(x, y, 0, t) = T_h(t) \quad \text{on} \quad \Omega \quad (7)$$

여기서 $T_h(t)$ 는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 일정하게 시스템의 한쪽 끝 $z=0$ 을 가열하는 온도로서, ASTM E-119 표준가열온도시간 곡선을 따른다.^{1,2)}

마지막으로 뒤쪽 경계면($z=Z$)과 접하는 공기의 온도는 대류현상을 통해 항상 일정하게 유지되며, 초기온도 T_0 와 같다고 가정할 때, 뒷면을 통해서 단위면적당 빠져나가는 열의 흐름은 뒷면의 온도 $T(x, y, Z, t)$ 와 초기온도 T_0 간의 차이 ΔT 와 전열계수 h에 비례하므로,

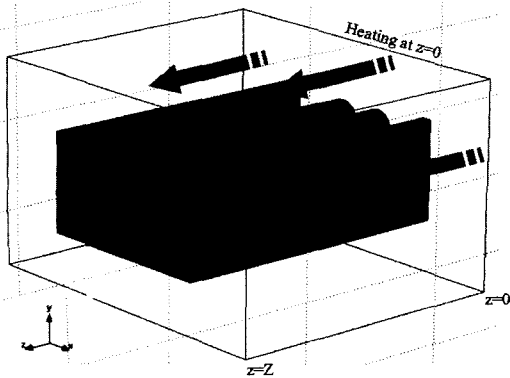


Fig. 7. Simplified CPFS System.

결국 뒷면에서의 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.³⁻⁵⁾

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z} = h(T - T_0) \tag{8}$$

따라서 CPFS시스템에서 일어나는 비정상 상태 열전도 현상은 포물선 PDE 식 (1), 초기조건 식 (2) 및 경계조건 식 (4), 식 (7), 식 (8)로 표현된다.

3.2 FEMLAB을 이용한 시뮬레이션

상용프로그램 Femlab은 PDE 문제를 풀기 위해 기본적으로 필요한 FVM(Finite volume method) 기능 외에도 전·후처리 작업을 위해 필요한 다양한 기능과 그래픽 기능을 가지고 있다. 특히, 상당히 복잡한 기하학적 문제들에 대해서도 사용할 수 있을 만큼 높은 신뢰도를 갖고 있다. 하지만 이러한 경우 컴퓨터가 처리해야 할 계산량이 너무 많다는 문제가 있다. 실제로 우리가 연구하고 있는 CPFS 시스템도 펜티엄IV 2.0 GHz 퍼스널 컴퓨터에서 FVM을 이용하여 시뮬레이션 하기에 상당한 어려움이 따랐다. 기하구조가 보다 복잡해서 형상함수의 차수를 올리거나 요소의 개수를 증가시킬 경우, 컴퓨터가 처리해야 할 계산량이 기하급수적으로 증가하여 계산이 중단될 수도 있다. 이처럼 규모가 큰 행렬을 동시에 계산하는 것은 시간

상 제약이 되므로, 전체 시스템을 여러 부분의 모듈화로 만들어서 연속적으로 계산해서 계산량을 줄일 수 있다. 이를 위하여 제안된 혼합알고리즘은 SOR법과 Galerkin FEM을 번갈아 연속적으로 적용하여 문제를 해결한다. 이 알고리즘을 이용하여 케이블 모듈의 주변온도를 간단히 계산할 수 있었고, 벽이나 받침대 모듈들의 주변온도는 SOR법을 이용하여 계산했다. 이렇게 계산된 경계온도 값들은 최종적으로 충전물 내에서의 온도분포를 Femlab으로 계산하는데 경계조건으로 사용되었다.^{5,7,9)}

3.2.1 전처리 및 계산과정

(가) 열전달 지배방정식

CPFS 시스템 내에서 일어나는 열전도 현상은 다음과 같은 지배방정식을 통해 나타낼 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

여기서 ρ 는 밀도, C 는 비열, 그리고 k 는 열전도도를 나타낸다. 특히, 열전도도 k 는 축의 방향에 따라 달라지는 비등방성을 나타내지 않는다고 가정한다.⁷⁾

(나) 물성치 및 파라미터

각 부분영역에 대해서 보다 자세한 열전달 관계식을 다음과 같이 정리할 수 있고, 이 식에 Table 3에 주어진 물성치들을 추가하여 각 부분영역의 온도분포를 계산할 수 있다.

(다) 경계조건

아래 Table 4에서 얻어진 경계조건들을 초기값과 함께 각 모듈에 대입한다. 이때 케이블의 주변온도는 앞서 계산된 값들을 사용한다.

Table 4. The boundary conditions

Boundary Condition	Description
$n \cdot (k \nabla T) = Q(r, z, t)$	Cable surrounding Boundary flux
$n \cdot (k \nabla T) = 0$	Insulation or symmetry
$T = T_0 = 20^\circ\text{C}$	Initial Temperature
$T = 0$	Zero Temperature or Antisymmetry

Table 3. The subdomain parameters (at 293k~573k)²⁾

Parameter	Description	Subdomain Value				
		SEALANT (SiO ₂) ⁶⁾	CABLE (PVC)	CABLE (Cu)	WALL (CaCO ₃)	TRAY (Fe)
$\rho(\text{kg/m}^3)$	Density	0.3×10^3	1400	9840	1900~2300	7850
$C_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	Heat capacity	44/60.1	1.05×10^3	380	880	460
$k(\text{W/m} \cdot \text{K})$	Thermal conductivity	7.5×10^{-2}	0.16	387	0.8~1.4	45.8

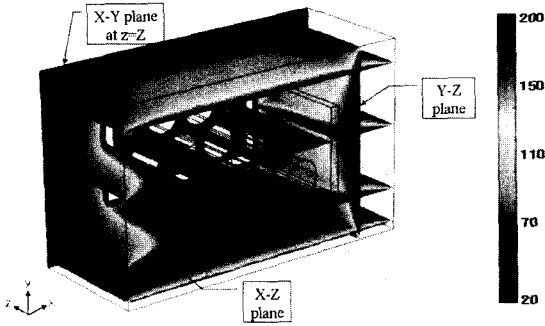


Fig. 8. Simulating the CPFS system in Femlab Software.

3.2.2 후처리 및 결과

화재발생 후 160분이 지났을 때 CPFS 시스템 내에서의 온도가 어떻게 변하는가를 보여주기 위한 시뮬레이션이 상용프로그램 Femlab을 이용하여 수행되었으며, 그 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 이론적 근거에 따라 예상했던 것과 같이 CPFS 시스템 내에서의 온도분포에 가장 큰 영향을 미치는 것은 바로 케이블이었다. 여러 차례의 시뮬레이션을 통해서 케이블의 반지름이 클수록 충전물의 온도가 훨씬 높게 올라간다는 사실을 알 수 있었다. 결국 케이블의 굵기가 가장 큰 변수로 작용을 했으며, 이런 문제를 갖는 CPFS 시스템은 그렇지 않은 것과 비교했을 때, 동일한 조건하에서 뒷면(z=Z)에서의 3시간 이내에 온도증가가 181°C를 넘을 가능성이 보다 높았다.

또한 여러 개의 케이블과 그 배열에 대한 시뮬레이션을 통해 충전물 내부의 온도분포는 케이블의 구성(Configuration)과 밀도(Density)에 많은 영향을 받는 것으로 나타났기 때문에, 이들이 CPFS 시스템의 안전성에 결정적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

또한 Fig. 8에 나타나듯이 충전물 내부로의 열전달은 y-z-좌표 평면이나 x-z-좌표 평면과 같이 케이블을 중심으로 포물선을 그어가는 동적인 열흐름을 보인다. CPFS 시스템의 시간에 따른 온도변화를 Femlab을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그 계산된 결과를 아래 Fig. 9에 나타내었다. 케이블이 통과하는 CPFS 시스템에서 화재가 발생한 후 시간에 따른 온도분포의 변화를 시뮬레이션 했다. 본 연구에서 제안된 혼합알고리즘을 이용한 계산방법의 개선은 계산량을 줄여 줌으로써 Femlab으로 CPFS 시스템 내에서 일어나는 열전달 현상을 계산할 수 있도록 해준다. 다음 단원에서는 Femlab에 의해 수치적으로 계산된 값들을 실제 실험값들과 비교함으로써, 얼마나 신뢰할 수 있는지 알아보도록 한다.

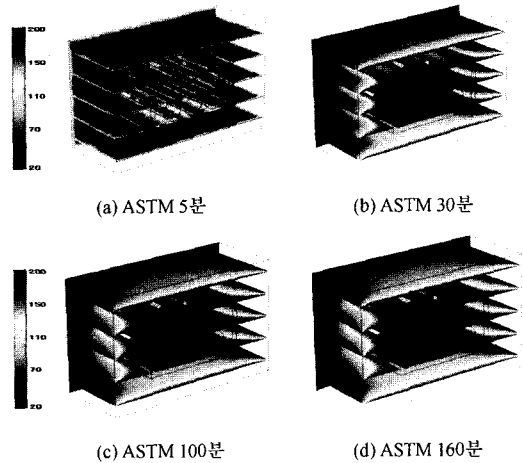


Fig. 9. Dynamic Temperature Distribution.

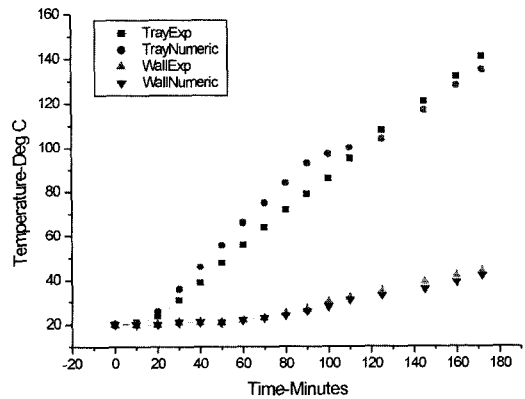


Fig. 10. Experimental and numerical results on the tray and the wall.

3.3 실험결과와의 비교

실험값들은 뒷면(z=Z)에서만 측정할 수 있었기 때문에, CPFS 시스템 내부에서의 온도 변화를 비교할 수는 없었으며, 다만 특정 결점에서의 수치해석적인 계산 결과와의 비교를 나타낸 것이다. Fig. 10에는 케이블과 충전물 위에서의 온도를 실험값과 비교한 결과가 나타나있다. 수치해석적으로는 평면 전체에 대한 결과를 계산해낼 수 있는 반면에 실험값은 특정 위치에서의 온도만을 찾아내므로 가장 큰 값만을 비교대상으로 해서 나타냈다. Fig. 11도 마찬가지로 CPFS 시스템 내부에서의 온도변화는 알 수 없지만 반대벽면에서 최종 시간에 비슷한 최대치의 온도를 비교할 수 있었다. 본 프로그램의 시뮬레이션 결과를 실험값과 비교함으로써 그 계산의 신뢰도를 향상시켰다. 열역학적 매개변수 값들을 찾기 위해서 최적화 방법을 사용하지 않고, 매개

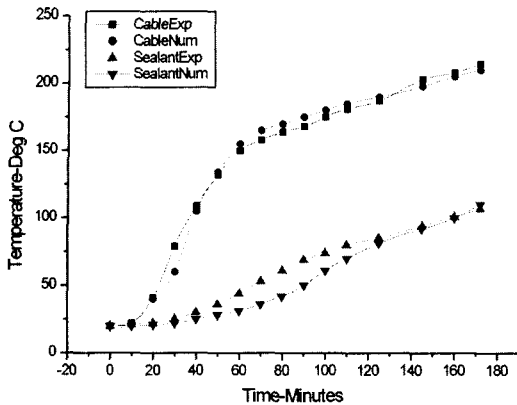


Fig. 11. Experimental and numerical results on the cable and the sealant.

변수 동일화(Parameter identification) 방법을 사용했다. 가령 열전달 계수 h 의 조절을 통해 계산결과에 대한 실험값과의 차이를 좁혀갔다.⁸⁾ 결과적으로 수치적 시뮬레이션 결과에 따르면, 180분이 경과한 후 CPFS 시스템 내에서의 온도분포의 변화는 시간이 변함에 따라 동적인 열흐름을 보이면서 40°C~214°C를 나타냈고, 또한 이는 실험결과와 대략적으로 일치했다.

4. 결 론

본 연구에서는 CPFS 시스템 내에서 일어나는 동적 열전도 현상을 해석하기 위해서 Dow Corning사의 내화충전물에 대한 3시간 동안의 내화실험이 수행되었다. 또한 이 실험결과는 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성을 높이는데 사용되었으며, 궁극적으로 CPFS 시스템의 안전성을 평가하기 위한 소프트웨어를 개발하는데 중요한 근거로 사용될 수 있다. 원자력발전소의 방화벽에 설치된 CPFS시스템 내에서 열전도가 어떻게 일어나는가를 알아보기 위해 여러 방법들이 사용되어 왔지만, 본 연구에서 실시된 실험과 Femlab을 이용한 3차원 열전도 해석은 실제로 사용되고 있는 시험방법과 일치한다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다.⁵⁾ 본 연구는 CPFS시스템을 관통하는 케이블이 안전성에 미치는 영향에 대한 연구에 주안점을 두어졌다. 이번 연구

의 장점은 케이블이 관통하는 물질의 시간의 변화에 따른 공간상의 온도분포를 보여줄 수 있었다는 것이다. 더욱이 본 연구에서 제안된 혼합알고리즘은 열전도 현상을 해석하는데 있어서 매우 효율적인 방법이다. 케이블의 통과가 충전물의 열전도 현상에 매우 중요한 역할을 한다는 사실을 보여주었다. Fig. 1에 나타나 있는 ASTM E-119 표준가열온도시간 곡선에 따라 변하는 가열 조건에 대해서, 동적으로 변하는 충전물의 온도분포의 변화를 알 수 있었다. 앞으로의 연구에서는 보다 복잡하고 다양한 기하구조와 방화벽 내부의 동적 열전도에 대한 연구가 진행될 것이다.⁷⁾ 그리고 본 논문에서 제안된 혼합알고리즘을 기반으로 한 stand alone 형태의 시험용 소프트웨어가 개발될 것이다.

참고문헌

1. ASTM, "ASTM Standards in Building Codes: Specifications, Test Methods, Practices, Classifications, Terminology", American Society for Testing and Materials, 30th ed., Philadelphia, Pa.(1993).
2. D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd ed.(1998).
3. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, "Fundamentals of Heat Transfer", Wiley, New York(1981).
4. F. P. Incropera, D. Witt, and P. David, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, New York(1996).
5. S. Moaveni, "Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS", Prentice-Hall, pp.289-292(1999).
6. M. Jakubith, Memofix: Chemie und Chmie-technik, VCH, Weinheim(1992).
7. 윤종필, 권성필, 남재욱, 조재규, 윤인섭, "복잡한 CPFS에서의 동적인 열전달을 모사하기 위한 SOR과 FEM의 사용", Proceedings of 2003 KICHe Fall Meeting, p.235(2003).
8. J. V. Beck and K. J. Arnold, "Parameter Estimation in Engineering and Science", John Wiley and Sons New York, p.444(1997).
9. COMSOL AB. FEMLAB Ver.2.2, "Reference Manual", November(2001).