

고열을 받는 방화문의 비정상 열전달

박일규 · 장동식 · 이연원* · 권오현[†] · 도덕희**

부경대학교 산업·시스템 안전 공학부 · *부경대학교 기계·자동차 공학부

**한국 해양 대학교 기계 공학부

(1999. 11. 3. 접수 / 2000. 1. 20. 채택)

Unsteady Heat Transfer of Fire Door Exposed to High Temperature

Il-Kyu Park · Dong-Sik Jang · Yeon-Won Lee* · Oh-Heon Kwon[†] · Deog-Hee Doh**

Department of Industrial and System Safety Engineering, Pukyong National University

*Department of Mechanical and Automatic Engineering, Pukyong National University

**Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime University

(Received November 3, 1999 / Accepted January 20, 2000)

Abstract : The purpose of this study is to investigate the details of unsteady heat transfer in a heated fire door. This investigation is carried out numerically for two dimensional fire door which is composed of normal plasterboard and mild steel including air layer or heat shield. It is shown from the results that the recirculation occurs at the inner part of fire wall due to gravity force by temperature difference. The case I gives better adiabatic effect than the case II because temperature around the fire wall reaches at 230.96°C in the case I and reaches at 450.37°C in the case II.

1. 서론

최근 현대인들의 생활이 날로 과학화, 복잡해지고 인구의 도시집중으로 화재로 인한 생명 및 재산에 대한 위험이 급증되고 있다. 그러므로 건물의 화재방비책은 시급하고도 중요한 과제로 이에 대한 연구와 대책이 필요하다. 따라서, 화재를 입은 내화 건축물의 화재성상에 대한 연구는 일찍부터 진전된 분야이다. 건축물에 화재가 발생되었을 때 화재가 성장하여 후에 진화 될 때까지 시간에 따른 화재온도의 변화를 밝히는 것은 당연한 일이다. 그 중에서 화재가 발생하는 장소를 구성하는 구조 부재료의 열적 성질도 중요한 요인 중의 하나이다. 그렇듯이, 화재시 화재확대의 방지와 건물내의 인명, 재산, 보호 등

의 방화대책의 목적을 실현하기 위해 개개의 건축물에 실시하는 방화대책은 많이 있으나 구조 부재의 내화성은 그 중에서도 중요한 대책의 하나이다. 또한, 구조부재(기둥, 보)는 화재 확대 방지의 직접적인 역할을 하는 바닥, 벽 등의 구획구조 부재를 지지구성하기 때문에 화재시에 구조 부재의 기능은 보장되어야 한다.¹⁾ 또한, 방화문은 화재시 가연성물질의 연소로 인한 건물 내·외벽의 온도와 압력차이로 인한 연돌 효과(stack effect)때문에 계단, 엘리베이터를 통한 연소 확대를 방지하기 위해 상당기간의 내화성능이 있는 구조이어야 한다. 이 때문에 많은 나라의 건축 법규에서는 건축물의 요구 내화성능을 규정하여 방화대책의 기본으로 하고 있다.²⁾ 따라서, 본 논문에서는 화재시 연소확대를 방지하고, 안전하게 거점을 확보하기 위한 방화문(fire door)을 채택하여, 그 부재 내에 공기 또는 단열재가 있는 두 가지의 경우를 한국 산업규격 건축 부분의 내화 시험방법(KSF2257)에 의한 가

[†] To whom correspondence should be addressed.
kwon@pknu.ac.kr

열 시험방법³⁾에 규정된 조건하에, 구조부재의 단면 형상, 구조 재료의 열 특성, 구조부재 표면의 열전달특성을 이용하여 가열된 방화문 내부의 비정상 온도 변화를 알아보기 위해 수치해석하였다.

2. 지배 방정식 및 수치해석

2.1. 계산영역

Fig. 1의 A-B 단면에서와 같이 실제 상황을 모사 하기 위한 가열 방법은 화염구 에서 화열을 방사하는 3차원적 상황이나 본 논문에서는 우선 2차원적으로 가정하여 해석하고자 한다. 방화벽 내의 구조는 Fig. 2에서와 같은 동일한 구조가 여러 개 있다. 단열재 내의 공기 층의 두께(L)는 90, 180mm 인 case I 과 단열재 두께(L') 90mm 인 case II의 세 가지 경우에 대해서 수치계산 한다.

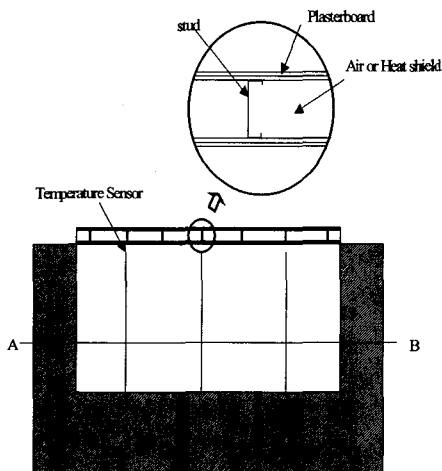


Fig. 1. Practical domain

2.2. 지배방정식

외부 유동은 밀도 변화에 의해서 야기되지만 그 변화가 미소하기 때문에 비압축성 유체로 가정한다. 벽체 내부의 공기층은 고온의 영역에 속하므로 이상기체 상태방정식을 따른다고 가정하면, 지배방정식은 다음과 같이 함으로 정리할 수 있다.

(1) 방화문 외부에 적용되는 운동량 방정식에서 부력항은 Boussinesq 가정을 이용한다.

(2) 유동은 비정상 2차원 층류 유동이다.

(3) 방화문 내부의 공기는 이상기체 상태방정식을 따른다.

따라서 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

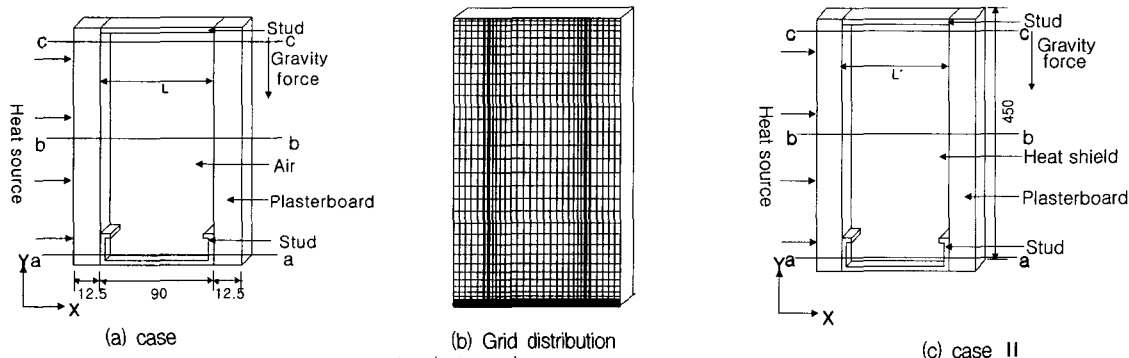
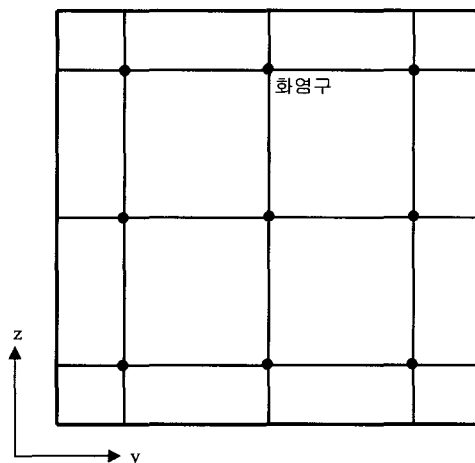


Fig. 2. Calculation domain and grid distribution (unit: mm)

· 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

· 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i^2} \right) + \rho g \beta (T - T_\infty) \quad (2)$$

g : 중력 가속도 β : 열팽창계수

· 에너지 방정식

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (\text{유체}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + \frac{\dot{q}}{k} \right) \quad (\text{고체}) \quad (4)$$

k : 열전도계수 α : 열확산율
 q̇ : 단위 체적당열발생률

2.3. 경계 조건

방화벽의 내부 구조는 동일한 구조가 반복적으로 구성되어 있다. 그러므로 사이클릭 조건으로 계산하고, Heat source는 실험적으로 측정된 시간경과에 따른 온도 분포곡선 (Fig. 3) 자료를 사용한다. 또한 초기 외부공기의 온도는 20°C이다.

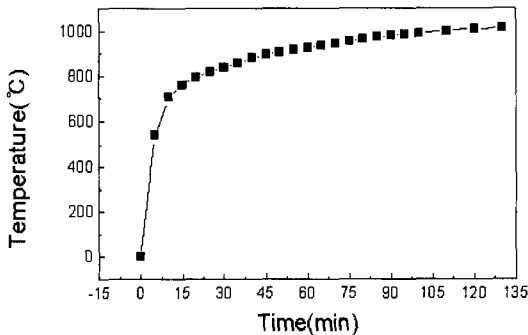


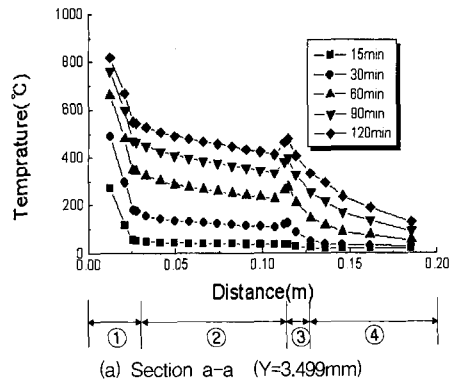
Fig. 3. Temperature data on the surface of fire door

3. 결과 및 고찰

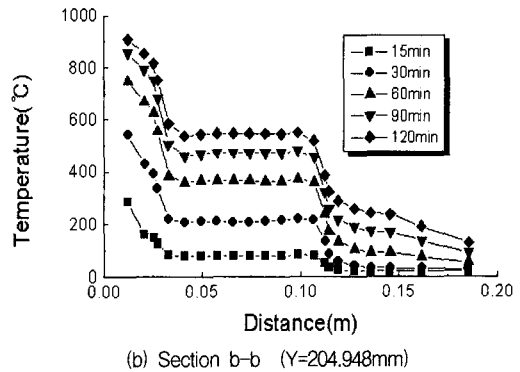
방화문의 방화 성능을 예측하기 위해서 범용 열 유동 해석코드 PHOENICS Ver3.1을 사용하여, 비정상 열전달을 계산하였다. 계산 domain을 사이클릭 조건에 따라서 한 영역만 선택하여, 전도, 대류를 고려하고, 부재간의 접촉저항은 무시한 2차원 비정상상태로 계산하였다. 격자계는

단열재 가까이에서의 급한 속도 구배, 온도 구배를 충분히 반영할 수 있도록 하기 위해서 단열재 가까이 갈수록 점차 조밀하게 구성하고, 가열 면을 따라서는 균일한 간격의 격자를 사용하였다. 시험 부재로 사용한 석고보드(plasterboard)는 열전도율이 0.16W/m°C, 스티드(steel)는 80W/m°C, 단열재는 0.782W/m°C, 공기는 0.0285W/m°C이다.

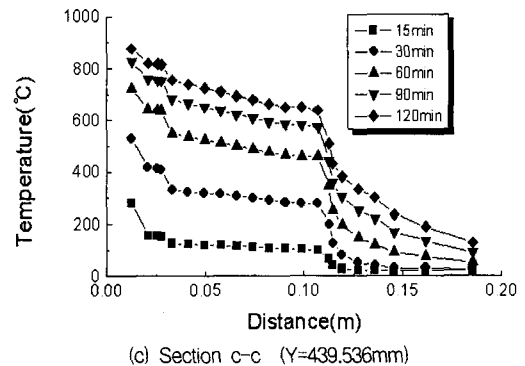
Fig. 4, 5는 시간경과에 따른 Fig. 3의 온도 분



(a) Section a-a (Y=3.499mm)



(b) Section b-b (Y=204.948mm)



(c) Section c-c (Y=439.536mm)

Fig. 4. Temperature distribution (case 1)

포곡선을 가열 조건으로 하여 방화벽이 비정상적으로 가열되는 경우 $Y=3.49, 204.948, 439.536$ mm 떨어진 지점에서의 시간에 따른 온도 분포 곡선을 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)의 ①구간은 석고보드와 스테르트가 위치한 곳으로 석고보드($k=0.16W/m^{\circ}C$) 영향으로 온도 분포 곡선이 감소하다가 스테르트($k=80W/m^{\circ}C$) 영역에서 열 전달이 크므로 곡선이 평형을 이루며, ②구간 공기($k=0.0285W/m^{\circ}C$)층에서는 열전도계수가 작고 온도차에 의한 대류효과가 활발해져 열전달을 촉진시키며,⁴⁻⁵⁾ ③구간에서는 공기 층 내에 스테르트가 존재하는 영역으로 열전도율이 높은 스테르트의 영향 때문에 곡선이 상승하게 된다.

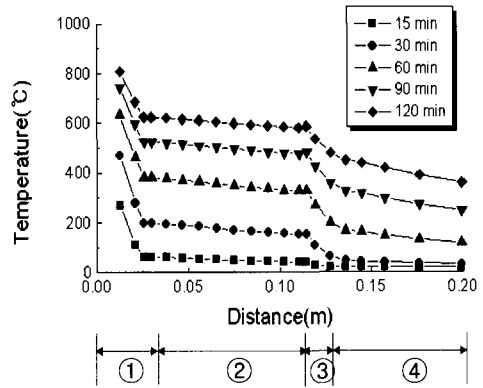
(b)의 ②구간에서는 대류에 의한 재 순환이 활발하게 일어나므로 온도 분포곡선이 평행을 이루게 된다. 내부 공기 층의 온도 구배가 비교적 완만하므로 복사의 영향에 의한 온도 변화가 크지 않음을 알 수가 있다. 즉, 좌우 벽의 온도차가 크지 않으므로 복사에 의한 상호 영향은 무시 할 수 있는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 Fig. 4의 공기층이 충전된 경우와 다르게 단열재로 충전된 경우로 단열재의 열전도율($0.782W/m^{\circ}C$)이 공기의 열전도율($0.0285W/m^{\circ}C$)보다 높아 열저항이 작아지므로, 온도 차단효과가 공기층으로 충전된 경우보다 작음을 알 수가 있다. 그리고, 부재들이 가지는 열전도 계수가 다르기 때문에 기울기가 다르게 나타난다.

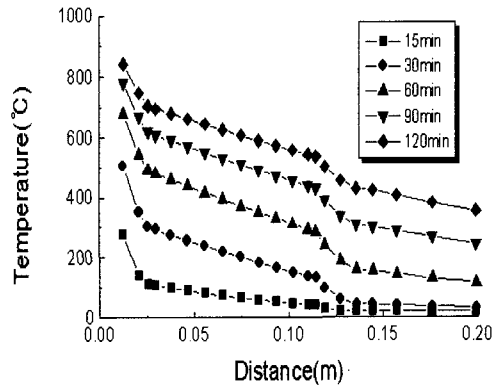
Fig. 6, 7, 8은 시간경과(30min, 90min, 120min)에 따른 등온선 분포와 유동 분포를 나타내고 있고, 유동 분포 옆 그림은 원 부분의 확대된 속도 벡터이다. Fig. 6, 7에서의 유동 분포를 살펴 보면, 전반적으로 열전달에 의한 밀도 변화로 외부 벽에는 상승기류가 발생되고, 벽체 내부에는 순환유동이 발생하고, 시간이 경과할수록 밀도차에 의한 순환유동이 활발해진다.^{6,7)} 따라서 내부 공기 층의 중앙 부분의 등온선은 평행을 이룬다.

Fig. 8의 case II의 경우 외부 공기층을 제외한 경우 단지 전도에 의해 열전달이 이루어진다. 단 열재 아래쪽 상·하부에서의 등온선 분포를 보면 중앙부 근처에서는 평행하지만 점점 멀리 떨어질수록 열전도 계수가 높은 스테르트($k=80W/m^{\circ}C$) 영향 때문에 등온선이 스테르트 쪽으로 기울

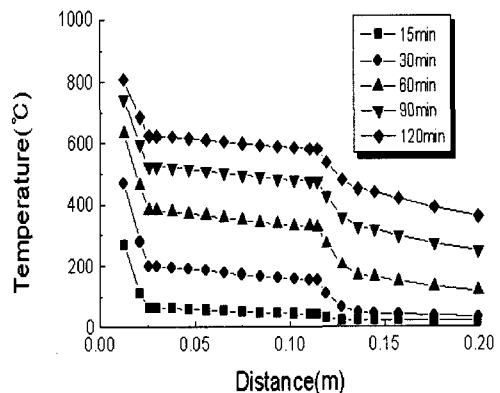
어짐을 관찰 할 수 있고, 윗 쪽에서는 열전도 계수차이에 의한 열유속이 감소하므로 온도가 정체되어 등온선이 스테르트 쪽으로 기울어짐을 관찰 할 수 있다.



(a) Section a-a ($Y=3.499mm$)



(b) Section b-b ($Y=204.948mm$)



(c) Section c-c ($Y=439.536mm$)

Fig. 5. Temperature distribution (case II)

고열을 받는 방화문의 비정상 열전달

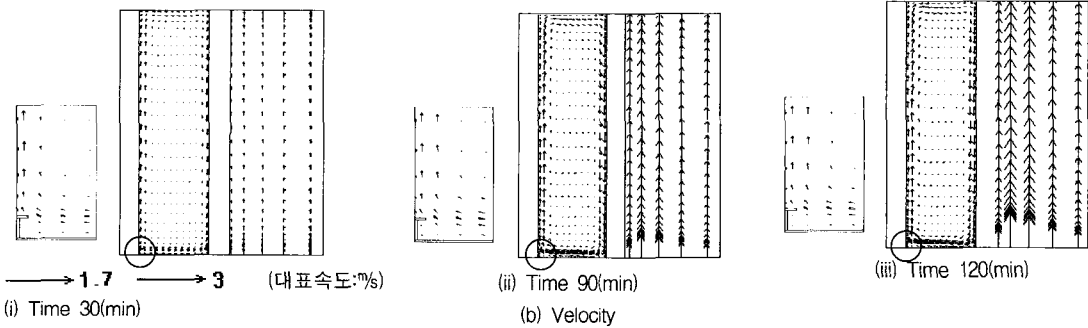
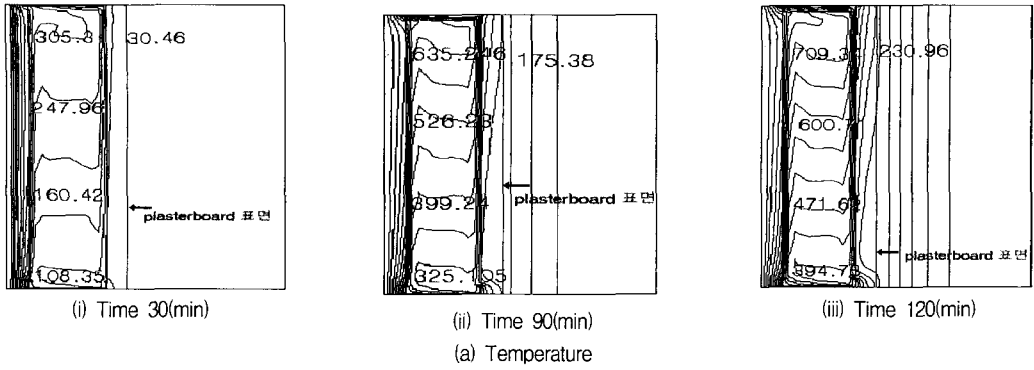


Fig. 6. Temperature contours and velocity vectors(Case I, L=90mm)

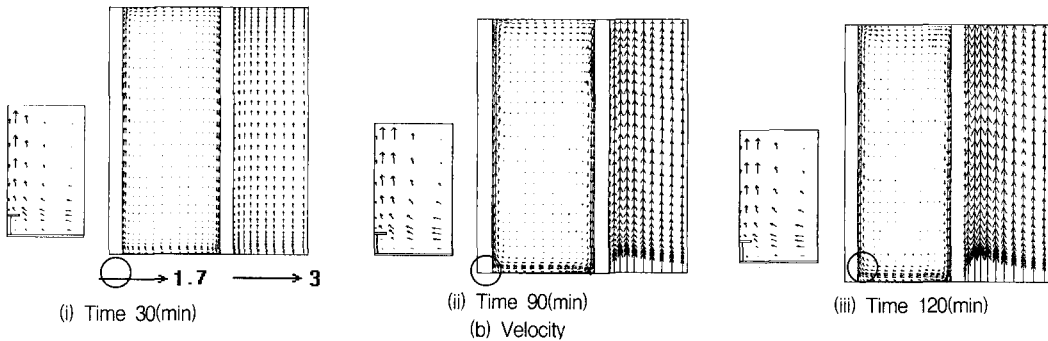
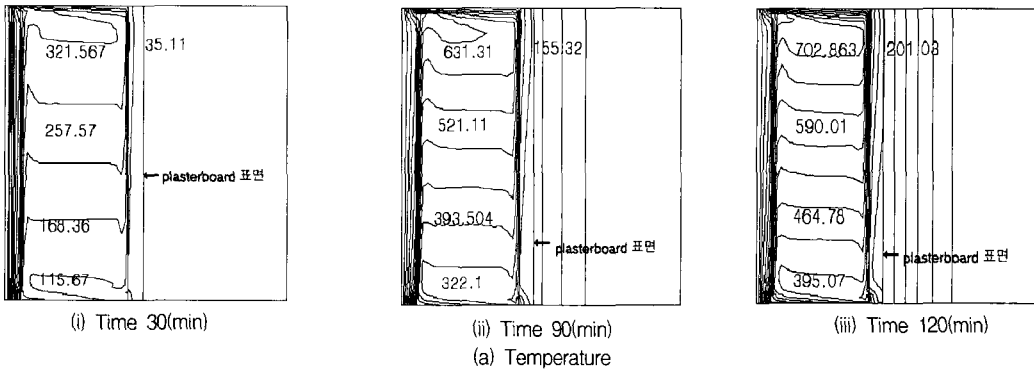


Fig. 7. Temperature contours and velocity vectors(Case I, L=180mm)

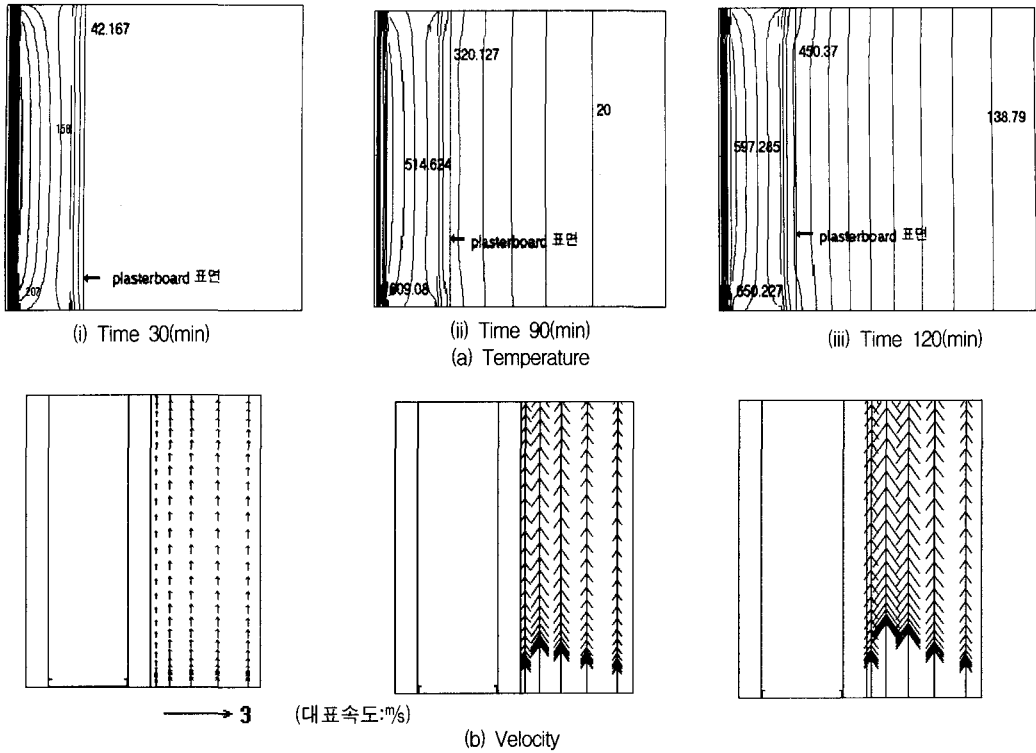


Fig. 8. Temperature contours and velocity vector(Case II, $L = 90\text{mm}$)

Fig. 9는 가열 후 외부공기의 온도가 가열 전 초기 온도(20°C)와 같아지는 위치를 시간에 따라 나타낸 그림이다.

2시간 가열후의 20°C 도달 거리를 보면, 공기층으로 충전된 case I은 $0.83\text{m}(L=90\text{mm})$, $0.67\text{m}(L=180\text{mm})$ 이고, 단열재로 충전된 case II는 1.96m 임을 알 수가 있다.

이는 단열재 보다 공기층의 열 저항이 크기 때

문이다. 공기층의 길이에 따라서는 유동형태는 크게 변화하지 않고, 공기층의 길이가 클수록 열 차단 효과를 증대하는 결과가 나타난다.

한국산업규격 건축구조 부분의 내화시험 방법(KSF2257)에 따르면 가열 후 가열 면의 반대면 온도가 260°C 이하이면 시간에 따라서 30분 · 1 · 2 · 3 · 4시간 가열 내화성능을 인증하고 있다.

Fig. 10은 시간의 경과에 따른 방화문에서 외부

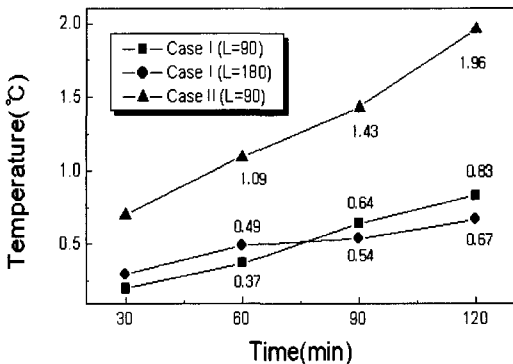


Fig. 9. X-direction distance reached 20°C

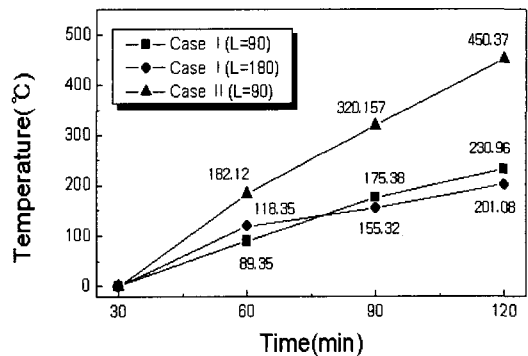


Fig. 10. Temperature distribution

공기와 접촉하는 표면의 온도분포이다. 그림에서 보는 것과 같이 1시간후의 온도는 89.35℃, 118.47℃, 182.12℃이므로 1시간 내화성능이 있지 않은, 2시간 후에는 case II(pla L=90)가 450.37℃로 KSF2257조건을 만족하지 못하는 결과를 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 방화문의 방화성능을 예측하기 위하여 가열되는 방화문의 시간 경과에 따른 방화벽내의 비정상 온도 분포를 계산하였다. 방화벽 사이에 공기가 충전된 경우(L=90, 180mm)와 단열재가 충전된 두 가지 경우를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공기가 충전된 경우에는 온도차에 의한 부력으로 인해 벽체 내부에 재순환 유동이 일어난다.
- 2) 한국 산업 규격 구조부분의 내화시험 방법에 의해서, 1시간 후는 1시간의 내화 성능을 가지지만 2시간 경과 후 방화 문 표면에서의 각 case의 온도는 230.96℃, 201.03℃, 450.37℃로서 2시간 내화 성능은 만족하지 못한다.
- 3) 단열재 내에 공기가 충전된 경우가 단열재로 충전된 경우보다 단열 특성이 우수하다.

감사의 글 : 본 연구의 수행에 있어서 동기부여 및 조언을 해주신 포항 산업 과학원 강 구조 연구소 최광 님께 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) 이성재, 박학길, 화재시 고열을 받는 철근콘크리트 기둥의 내력특성과 해석(I), 대한건축학회 논문집 Vol. 3, No. 4, pp. 135~143, 1987.
- 2) 홍봉희, 건축화재와 연기에 대하여, 대한건축학회지 Vol. 14, pp. 63~68, 1970.
- 3) 건축 구조 부분의 내화시험 방법, 한국 산업 규격집, pp. 1~8, 1993.
- 4) 이진호, 김무현, 모정하, 단열 및 등온수평 경계조건을 갖는 직각 밀폐용기내 공기의 자연대류 열전달, 대한기계학회논문집 Vol. 14, No. 7, pp. 207~213, 1990.
- 5) 이재현, 김재근, 박만홍, 경사진 직사각형 공간내에서 내부적으로 가열되는 유체의 자연대류 유동 및 열전달, 대한기계학회논문집 Vol. 16, No. 3, pp. 555~568, 1992.
- 6) 한화택, 사각공간내에서의 부분바닥가열에 의한 자연대류에 관한 연구, 공기조화·냉동공학 논문집 Vol. 7, No. 2, pp. 287~297, 1995.
- 7) H. H.-S. Chu, S. W. Churchill, C. V. S. Patterson, The Effect of Heater Size, Location, Aspect Ratio, and Boundary Conditions on Two-Dimensional, Laminar, Natural Convection in Rectangular Channels Journal of Heat Transfer pp. 194~201, 1975.