

## 선박 실내공간에서 화재의 크기 및 위치에 따른 연기거동특성

한원희\* · 조대환\*

\*목포해양대학교 기관시스템공학부

# Smoke Movement Characteristics in the Ship's Indoor Spaces with Fire Size and Location

Won-Hui Han\* · Dae-Hwan Cho\*

\*Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**요 약** : 항해 중 발생하는 선박의 화재는 외부로부터 소방 활동을 기대할 수 없으므로 선내에서 자체적으로 처리해야 하기 때문에 매우 위험하다. 더구나 여객선의 경우에는 재산상의 피해는 물론이고, 대형 인명 사고로 이어질 수 있으므로 더욱 심각하다. 화재가 발생하면 연소과정에서 열 뿐만 아니라 많은 연기가 동시에 발생하고 다량의 유독성 연기는 질식사와 같은 인명피해를 가져오게 된다. 이 연구의 목적은 선박의 실내공간에서 화재의 크기 및 위치에 따른 연기거동 특성을 규명하는 것이다. 화원의 크기를 두가지로 하고 세가지 형태의 화재 위치에 따라 실험적 연구를 수행하였다. 그 결과 연기 및 열의 확산 특성은 모서리형 화재에서 가장 가파른 상승 곡선을 보였다.

**핵심용어** : 선박화재, 질식, 연기거동, 화원, 열확산,

**ABSTRACT** : It is very dangerous for ship's fire which occurs from navigating because of it will not be able to expect fire fighting from land so that handle with the oneself to control. Additionally, in the case of passenger ship is more serious for the reason of not only the property damage but also large life accident can be occurred continuously. When the fire occurs, the many smoke to occur simultaneously as well as the heat from combustion process and the poisonous smoke is brought the life damage as the death from suffocation. The purpose of this study is to examine the smoke movement characteristics in the ship's indoor spaces with fire size and location. An experimental study was carried out with two sized of fires and three typed of fire source locations. As the results, the smoke and heat diffusion characteristics has been showed the most quick rise curve in the case of corner type fire.

**KEY WORDS** : ship's fire, suffocation, smoke movement, fire source, heat diffusion,

### 1. 서론

선박 화재는 육상의 화재와 달리 항해 중에는 외부로부터 소방 활동을 기대할 수 없으므로 선내에서 처리하지 않으면 안 되고, 대화재로 번지게 되었을 경우에는 배를 버려야 하는 사태에 이른다. 또한 여객선의 경우 물적 재산 피해는 물론이고, 대형인명사고로 이어질 수도 있다. 만약 화재를 초기에 감지함으로써 연기 및 유독가스의 흐름을 효율적으로 제어한다면 이와 같은 인명피해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 연소가스에 의한 화재영역의 확산을 방지할 수 있다. 화재가 발생하면 열 뿐만 아니라 연소과정에서 많은 연기가 발생하는데 목재 등을 사용했던 옛날과는 달리 플라스틱 등 석유화학제품, 합성 섬유로 된 자재를 사용함으로써 화재시 발생하는 다량의 연기는 그 독성으로 인하여 질식사와 같은 인명피해를 가져오게 된다. 또한 시

계의 불투명성으로 인해 승무원 및 여객의 피난 및 화재 진압 활동에도 큰 방해원이 된다. 따라서 선박화재에서 방화 대상물의 안전성 확보 및 화재양상의 변화에 대처할 수 있는 과학적이고도 엄밀한 연구가 필요한 실정이다.

화재 현상에 대한 실험적 연구는 실측크기의 실험수행이 어렵고 연소 특성상 모형실험의 어려움으로 인하여 많은 제한을 받아왔다. 또한 실내공간 내에서 화재의 연소 현상과 그에 따른 연기의 유동은 굴뚝효과, 풍압, 구조 및 환기와 같은 요인과 물질전달, 열전달, 화학반응 등이 포함된 매우 복잡한 메카니즘에 의해 변화한다. 실내화재에서 화재의 발생위치에 따라 화원에 수직벽이 접해있지 않고 바닥의 중심부근에서 발생하는 중심형 화재(center fire), 화원의 한쪽 면이 수직벽에 접해있는 벽체형 화재(wall fire) 그리고 화원에 두 개의 수직 벽이 접해있는 모서리형 화재(corner fire)로 분류될 수 있다. 이때 확산화염(diffusion flame)의 구조와 연기거동은 각각 다르게 나타나며 화재안전 설계에 있어서 중요한 요소가 된다. 또한 같은 크기의 화재라도 화재의 성장속도에 따라 내부공간에

\* 대표저자 : 종신회원, winhan@mmu.ac.kr, 061)240-7239  
정회원, dhcho8@mmu.ac.kr, 061)240-7104

서 형성되는 연기층의 온도와 연층의 높이는 다르게 나타나게 되어 피난시간을 예측하는데 큰 차이를 보이게 된다.

그 동안 국외에서는 이러한 중심형, 벽체형 그리고 모서리형 화재에 대하여 많은 연구(Zukoski, 1995; Hansell, 1993; Zukoski, 1981)가 이루어져 왔으며 화재의 성장속도에 따른 피난시간의 산정과 관련된 연구(Kerrison et al., 1994; Poreh et al., 2000)도 지속적으로 발표되었다. 특히 선박과 관련해서는 국제항에 취항하는 여객선을 대상으로 여러 협약들이 만들어지고 일부는 적용되고 있는 실정이다. 그러나 국내에서는 이러한 분야의 실험연구들이 그리 활발하지 못하기 때문에 선박의 실내 공간 화재에 있어서 연기의 거동에 대한 이해가 아직까지 부족한 실정이다.

이 연구에서는 현재 운항중인 여객선의 축소 모델을 대상으로 선박 대형공간에서의 연기거동 특성을 고찰하였다. 화원의 크기 및 위치에 따라 축소모형 실험을 수행한 후, 그 결과를 비교·분석함으로써 선박화재와 관련된 물리적 이해를 증진시키고 방재 전문가나 선박 설계자들에게 보다 유용한 화재안전 설비에 관한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 수행된 실내화재 실험의 실제 모델로, 15,000톤급 여객선의 연회장을 1/10로 축소 제작한 것이며, 전체적으로 6각형의 구조이다. 크기는 가로 1410mm, 세로 1272mm (측면에서 전면에 이르는 구배의 길이는 535mm)이고, 높이가 370mm이며, 전면 좌우에는 폭이 250mm이고 높이가 250mm인 문이 2개 존재한다. 모형의 벽면은 8mm 두께의 베크라이트(Bakelite)와 석면판을 사용하여 단열벽면을 구성하였다.

연료는 순도 99%의 메탄올(methanol, CH<sub>3</sub>OH)을 사용하였으며 연료가 담겨있는 사각용기는 중심형 화재인 경우 바닥의 중앙면에, 벽체형인 경우 개구부에서 반대쪽 벽의 중앙면에, 그리고 모서리형 화재인 경우 직각의 모서리에 위치하였으며, 화원(火源)의 소스로 사용되는 사각용기는 정사각형으로 한 변의 길이가 90mm(화재크기 2.76kW), 70mm(화재크기 1.67kW) 크기를 사용하였으며 용기의 두께는 2mm의 철판을 사용하였다. 이때 발열량은 메탄올(연소열=20000 kJ/kg)의 연소량(0.017 kg/m<sup>2</sup>s)을 측정해 얻어진 값들이다. 공용구역에서의 열의 온도 및 이동과 하강속도를 측정하기 위해서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 화원을 중심으로 좌·우측에 각각 4개씩 350mm의 기둥을 수직으로 세운 다음 열전대(K-type thermocouples, -270℃~1300℃, CA 0.65mm)를 천장에서부터 25mm, 그 다음부터는 100mm간격으로 TC1에서 TC32까지 배열하여 설치하였다. 열전대에서 취득한 온도값은 Terminal block를 통해 Fig. 3과 같은 경로를 통해 컴퓨터에 데이터를 전송하며, 데이터 취득주기는 0.2초로 취득한 온도 값은 PC에 파일 형태로 저장된다. 또한 실험모형 내부의 공기를 배출하기 위하여 배기팬(80mm x 80mm x 25mm, 32.9CFM, 2500rpm ±10%, 180W) 4개를 설치하였다.

화재 실험의 초기온도는 약 9℃이며, 화재의 크기는

2.76kW, 1.67kW 2가지이다. 온도 계측을 위한 열전대의 배열은 출입구로부터 가장 먼 반대쪽 벽 좌측으로부터 1번~4번, 우측에 5번~8번의 기둥이 위치하며, 기둥의 위치는 Table 1과 같다. 각각의 기둥에는 4개씩(1번의 상부 열전대 TC1~8번의 하부 열전대 TC32)의 열전대가 배열되어 있다.

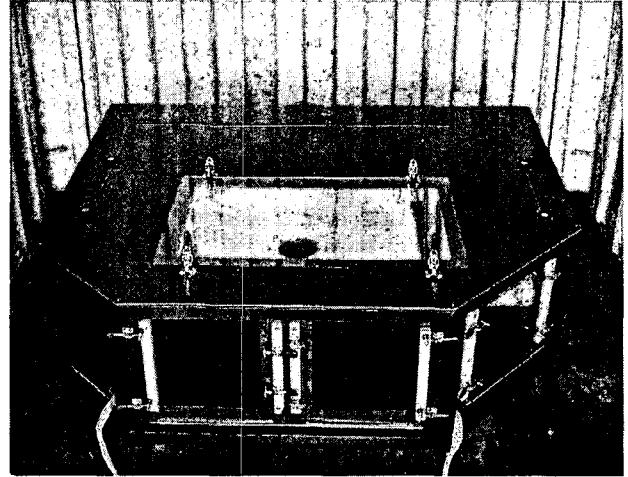


Fig. 1 Photograph of the experimental apparatus

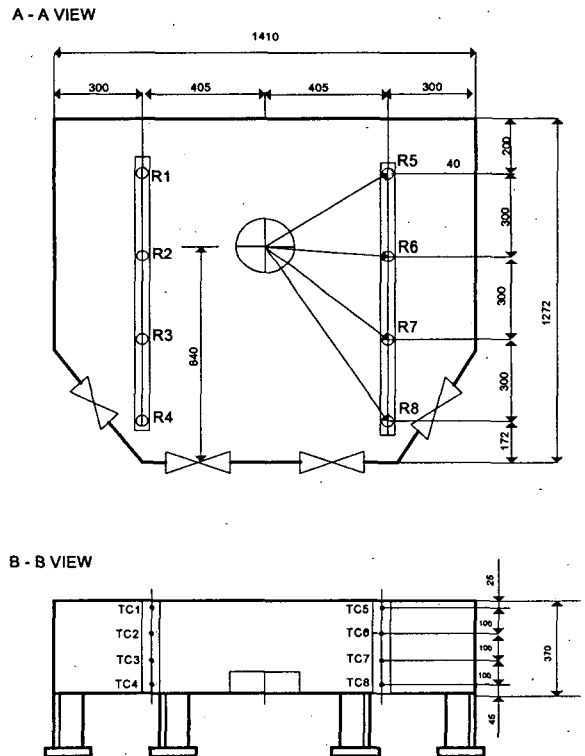


Fig. 2 Schematic diagram of the test section

선박화재는 크게 구분하여 보면 밀폐된 공간에서의 화재와 환기가 가능한 화재로 분류할 수 있고, 환기방법은 크게 자연환기와 기계환기로 나눌 수 있다. 자연환기는 출입문을 통하여 이

루어지며 기계환기(환기시스템 설치)는 흡기 또는 배기팬이나 흡배기 자동교환형 기계환기 시스템으로 이루어진다.

이 연구에서는 우선적으로 밀폐형 화재를 분석하기 위하여 모든 출입구 및 개구가 닫혀있고 배기팬이 작동하지 않는 조건을 실험조건으로 하였고, Table 2에 실험조건을 나타내었다. 화원의 크기에 따라 크게 2가지 Case로 나누고, 각 Case별로 화원의 위치는 중심형(center), 벽체형(wall), 모서리형(corner) 화재의 3가지로 하였으며, 각각의 경우 실험시간은 300초로 하였다.

Table 1 Location of rod

Rod No.	Coordinate of rod
R1	X = 300mm, Y = 200mm
R2	X = 300mm, Y = 500mm
R3	X = 300mm, Y = 800mm
R4	X = 300mm, Y = 1100mm
R5	X = 1110mm, Y = 200mm
R6	X = 1110mm, Y = 500mm
R7	X = 1110mm, Y = 800mm
R8	X = 1110mm, Y = 1100mm

Table 2 Experimental condition

Case	Fire Size	No.	Fire location	Coordinate of fire
1	2.76kW	1	Center	X=0, Y=705mm, Z=636mm
		2	Wall	X=0, Y=1410mm, Z=636mm
2	1.67kW	3	Coner	X=0, Y=1410mm, Z=1272mm

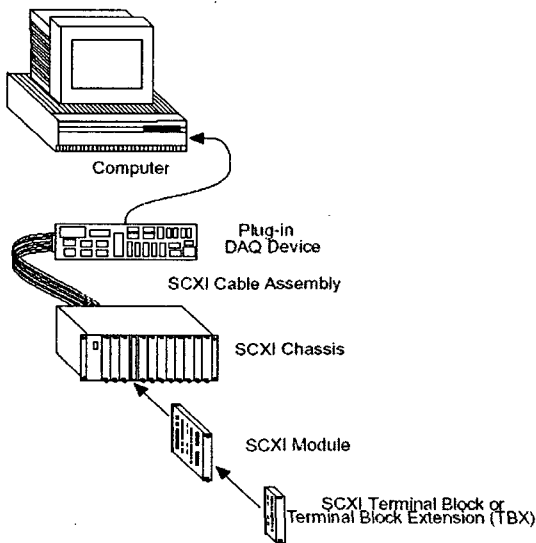


Fig. 3 Data converter for measurement system

### 3. 실험결과 및 고찰

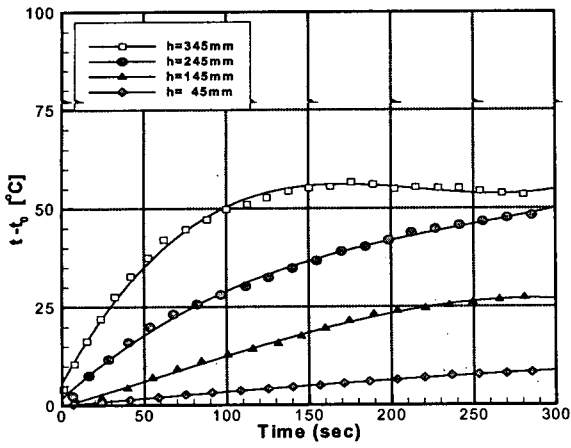
#### 3.1 화원의 위치 및 크기에 따른 온도 변화

실험에서 다른 화재의 유형은 공간적인 측면에서 볼 때 선박의 어떤 한 구획에서의 화재의 경우 연기거동을 고찰하기 위한 것으로 구획화재(compartment fire)란 화재가 어떤 방 한 개나 구조물 내 비슷한 크기의 구획 내로 제한되는 것이다. 발화 이후 초기에 화재의 규모가 작을 때는 개방상태의 화재와 같은 양상인 연로지배형 화재이며, 화염이 확산되어 어느 정도 자라게 되면 구획제한이 화재성장에 영향을 주는 환기배형 화재가 된다. 이것은 온도상승에 의한 부력으로 연기와 공기의 움직임이 발생하기 때문이다. 화재로 발생한 연기는 천장부터 채워져 아래로 움직인다. 개구부에서 누설이 있을 지라도 화재의 크기가 충분하면 실내를 채우게 되고 압력은 양압으로 유지되어 실외로 흐름이 생긴다. 그리고 화재가 산소부족으로 꺼지게 되면 냉각이 일어나고 압력은 부압이 되어 공기가 인입되어 화재는 다시 살아나고 공기가 계속 흡입된다. 구조물 내에서 연기의 이동은 계단, 샤프트 등을 통해 상부로 이동하며 하부에는 외부 공기가 인입되고 상부에서는 연기가 배출되게 된다.(Steckler et al., 1982)

중심형 화재, 벽체형 화재 또는 모서리형 화재시 화재의 크기가 증가함에 따라 급속한 대류와 난류의 확산이 이루어지고 복사열 전달이 증가하게 되어 실내의 온도 분포가 균일해지며, 화원이 바닥의 중심에서 멀리 떨어지고 벽에 접한 모서리형 화재 같은 경우 연기가 천장과 벽을 따라 전파되는 시간이 길어지게 되며, 또한 모서리에서 천장과 벽을 따르는 재순환 영역이 발생하게 되고 따라서 연층이 실내공간을 채우는 시간이 길어진다.

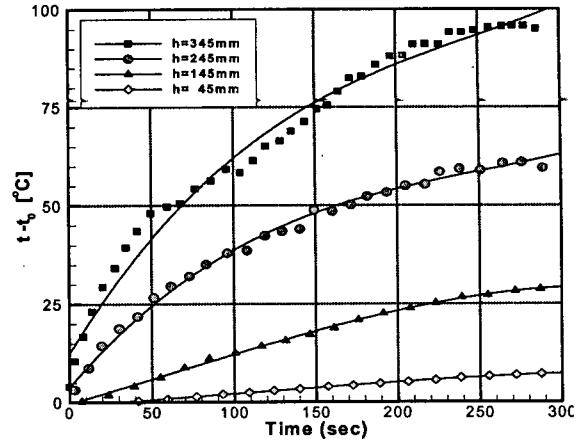
화재가 발생하면 연기는 위로 솟구쳐 올라 천장을 가득 메운 뒤 아래로 서서히 하강하는 형상이 되며, 화재시 사람이 안전하게 피난할 수 있는 연층의 높이는 약 1.5~1.6m이며, 본 모형실험에서는 각각의 Rod에서 145mm에 위치한 열전대가 그 높이에 해당한다. 본 화재 실험에서는 온도의 변화를 가지고 연기의 거동을 측정하였으며, 연층의 하강은 초기온도에 비해서 약 5~7°C 정도 상승할 경우 연층이 도달한 것으로 간주하였다.

Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6은 화원의 크기가 2.76kW인 Case 1의 경우에, 화원의 위치를 중앙, 모서리 및 벽으로 바꾸었을 때 Rod 2와 Rod 4의 열전대에서 측정된 값들로 시간이 지남에 따라 각 열전대에서의 온도의 변화를 보여주고 있다. 초기 연기 및 열의 확산은 모서리형 화재가 가장 가파른 상승 곡선을 보이며, 이는 양쪽의 벽면이 만나는 모서리의 영향으로 인하여 열 유속의 증가와 함께 화염의 높이가 증가하게 되어 천장에서 방사방향으로의 열확산이 증가하고 온도가 상승하게 되는 것이다. 따라서 밀도는 낮아지고 부력이 감소하게 되어 연기층의 두께가 얇아지고 천장과 벽이 만나는 부근에서 주위의 연기보다 더 높은 온도의 정체현상이 나타난다. 각각의 기둥의 145mm 높이에 연층이 도달하는 시간은 중심형 화재의 경우 약 79초~85초, 모서리 화재는 44초~81초, 벽체형 화재의 경우 45초~78초 정도이며, 연층의 이동속도는 벽체형 화재의 경우가 약 0.0144m/s로 가장 느린 중심형 화재에 비해 연층의 이동속도가 약 157% 빨랐으며, 출입구가 닫혀있고 통풍이 되지 않는 상태에서 화재가 발생했을 때 화원의 위치에 따라 차이를 보이지만 이 공간에서의 대피가능한 시간은 중심형 화재의 경우 평균 약 82초로 모서리형 화재보다 약 134%정도 긴 것을 알 수 있다.



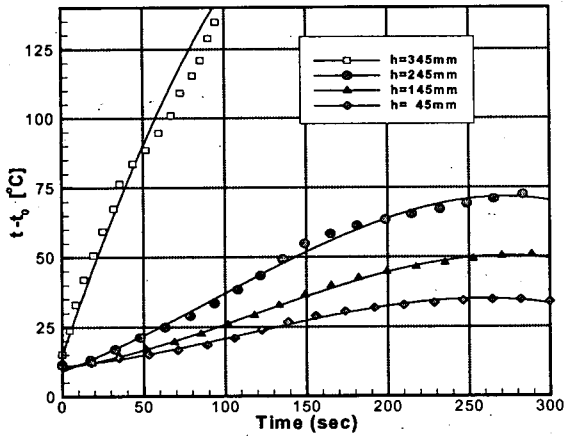
(a) Rod number R2

Fig. 4 Temperature distributions of center fire at case 1 (fire size 2.76kw)



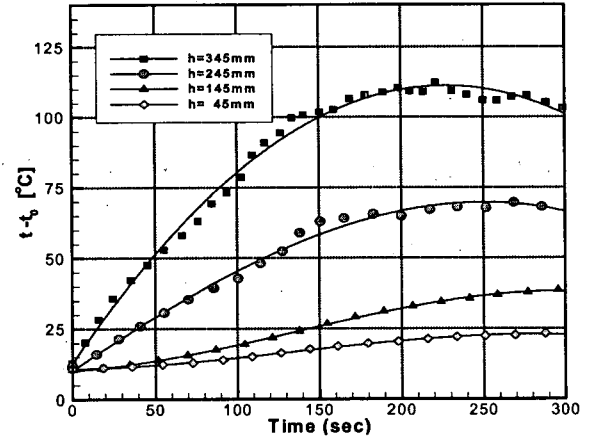
(b) Rod number R4

Fig. 4 Temperature distributions of center fire at case 1 (fire size 2.76kw)



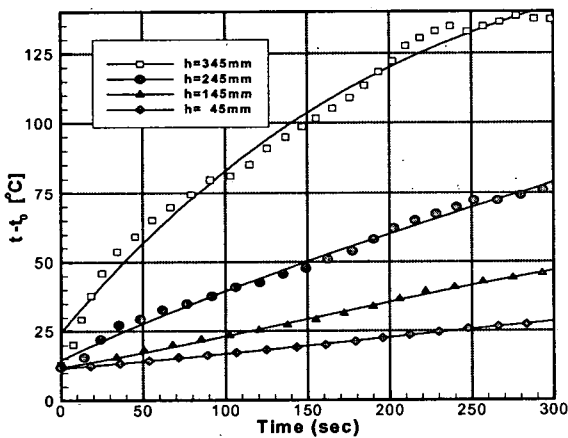
(a) Rod number R2

Fig. 5 Temperature distributions of corner fire at case 1 (fire size 2.76kw)



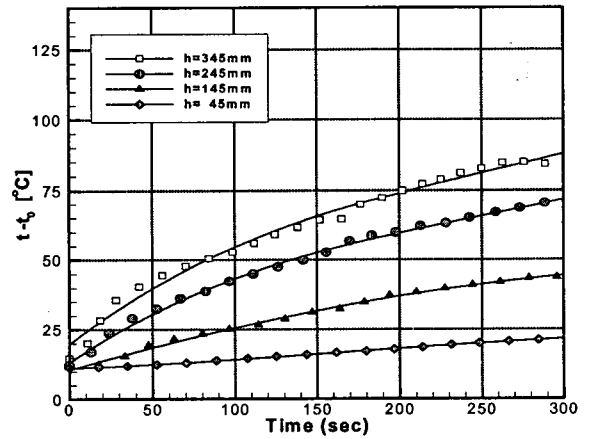
(b) Rod number R4

Fig. 5 Temperature distributions of corner fire at case 1 (fire size 2.76kw)



(a) Rod number R2

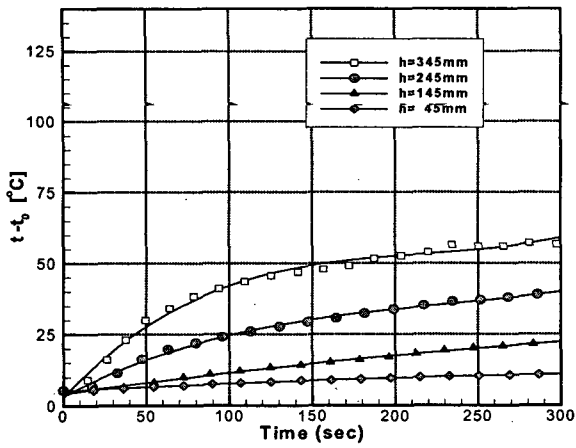
Fig. 6 Temperature distributions of wall fire at case 1 (fire size 2.76kw)



(b) Rod number R4

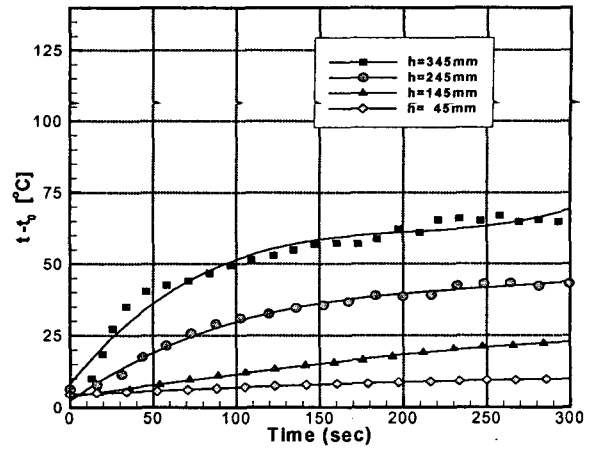
Fig. 6 Temperature distributions of wall fire at case 1 (fire size 2.76kw)

선박 실내공간에서 화재의 크기 및 위치에 따른 연기거동특성



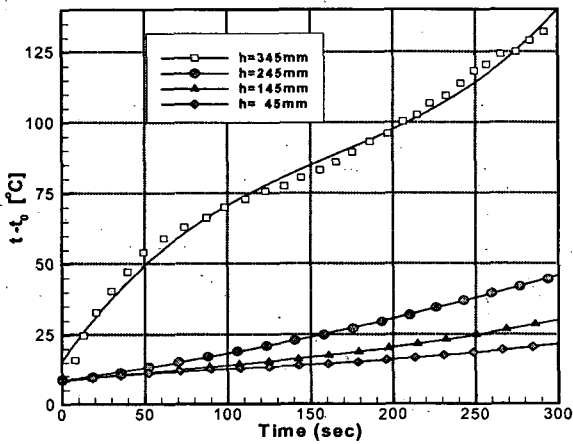
(a) Rod number R2

Fig. 7 Temperature distributions of center fire at case 1 (fire size 1.67kw)



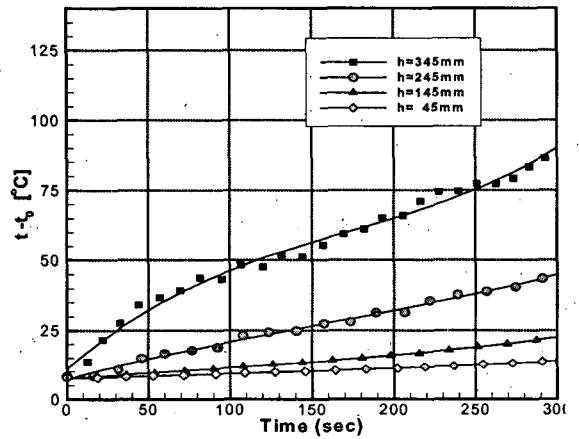
(b) Rod number R4

Fig. 7 Temperature distributions of center fire at case 1 (fire size 1.67kw)



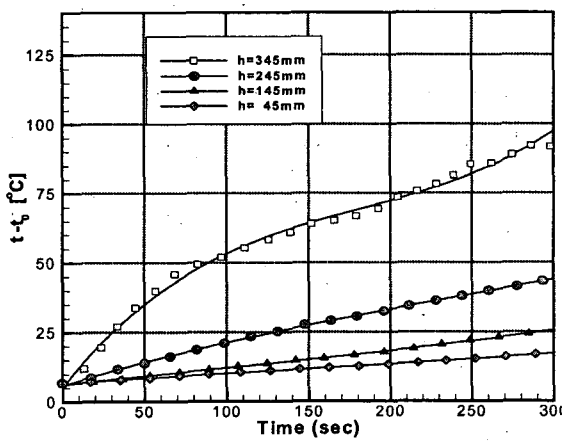
(a) Rod number R2

Fig. 8 Temperature distributions of corner fire at case 1 (fire size 1.67kw)



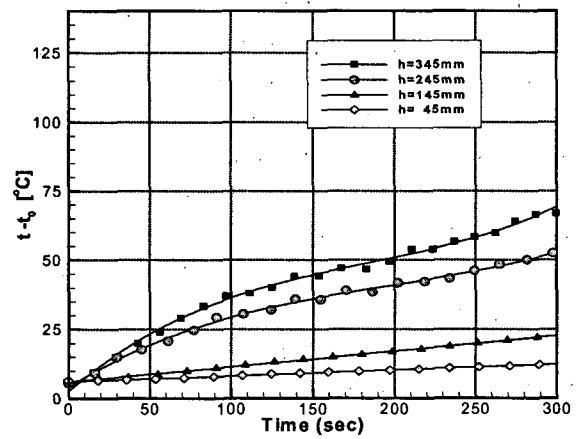
(b) Rod number R4

Fig. 8 Temperature distributions of corner fire at case 1 (fire size 1.67kw)



(a) Rod number R2

Fig. 9 Temperature distributions of corner fire at case 1 (fire size 1.67kw)



(b) Rod number R4

Fig. 9 Temperature distributions of corner fire at case 1 (fire size 1.67kw)

Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9는 화원의 크기가 1.67kW인 Case 2의 경우에, 화원의 위치를 중앙, 모서리 및 벽으로 바꾸었을 때 Rod 2와 Rod 4의 열전대에서 측정된 값들로 전체적인 경향은 Case 1과 같으나, 화재의 크기가 Case 1에 비해 작아짐으로써 공간의 대류 및 난류의 확산이 느려지고, 복사열의 전달이 감소하여 전체적인 온도의 증가가 완만함을 알 수 있다.

### 3.2 연기거동 특성

연기는 유기물질이 연소될 때의 기상생성물로서 고상 또는 액상의 작은 입자가 분산되어 있는 것으로 가연성가스에서 유리된 탄소입자와 검댕(soot)상태의 매연, 미연소물질의 응축액, 물방울 입자 등이 공기중에 부유 확산되어 있는 상태이다. 화염 연소로부터의 연기는 거의 대부분이 고체입자로 구성되고 연기 중 일부는 기상에서의 불완전연소, 저산소하의 고온열분해 결과로 생성된다. 입자상의 물질은 연료가 기상 또는 액상인 경우에도 발생하며 발생 연기는 가연성이며 인화성 분위기 형성으로 유도 가능하다. 발생 연기는 고요한 공기하에서 직경 1 $\mu$ m가 되는 여러 크기의 입자로 분포되고 표면이 집적되어 기름성분의 찌꺼기가 된다. 연기의 유동은 화재시 발생하는 열기류에 의한 상승력으로 화재가 발생한 공간에 매우 빠르게 확산 전파되며, 연층은 아래로 하강하게 된다(Quintiere, 1984).

Fig. 10은 사람이 보행하여 화재공간을 벗어날 수 있는 연층의 높이인 1.5m 즉, 축소 모형실험에서 바닥으로부터 열전대가 장착된 각각의 막대의 높이 145mm지점의 열전대의 온도 변화를 Case 1의 조건에서 얻은 값으로, 같은 조건에서 얻은 값이 그래프상 큰 차이를 보이지 않는 것은 실험장치의 규모가 작아 복사열에 의한 영향으로 열전대에 직접 열이 전달된 것으로 보이며, 이는 향후 동등의 실험이 행해질 때 반드시 고려되어야 할 문제이다. 화원이 바닥의 중심에서 멀리 떨어지고 벽에 접한 모서리형 화재 같은 경우 연기가 천장과 벽을 따라 전파되는 시간이 길어지게 되며, 또한 모서리에서 천장과 벽을 따라 재순환 영역이 발생하게 되고 따라서 연층이 실내공간을 채우는 시간이 길어진다. 따라서 개구부가 있는 실내공간에서 화재 발생 시 화원의 벽에 접해 있는 벽체형 또는 모서리형 화재보다 벽으로부터 멀리 떨어져 공간의 중심부근에서 발생하는 중심형 화재가 연기의 확산 및 하강시간이 빠름을 알 수 있다.

Fig. 11은 각기 화원의 크기가 다른 Case 1 과 Case 2의 조건에서 중심형 화재일 때 R4 Rod의 TC15에서 온도 변화를 나타낸 것이다. 화재의 크기가 증가함에 따라 급속한 대류와 난류 확산이 이루어지고 복사열전달이 증가하게 되는 것을 알 수 있으며, 연층의 하강 시간도 84초와 103초로 Case 2의 조건이 약 122% 긴 것을 알 수 있다.

실내공간에서 화재시 천장에서 방사방향으로 열 확산이 이루어지는데 이를 천장 Jet라 한다. Fig. 12는 Case1의 경우에, Fig. 13은 Case2,의 조건에서 중심형 화재시 R3 Rod와 R4 Rod의 온도변화를 측정된 것으로, 화원의 크기가 상대적으로 큰 Case 1의 경우에 Case 2의 경우보다 2배 정도 빠른 열확산 분

포를 보이고 있다.

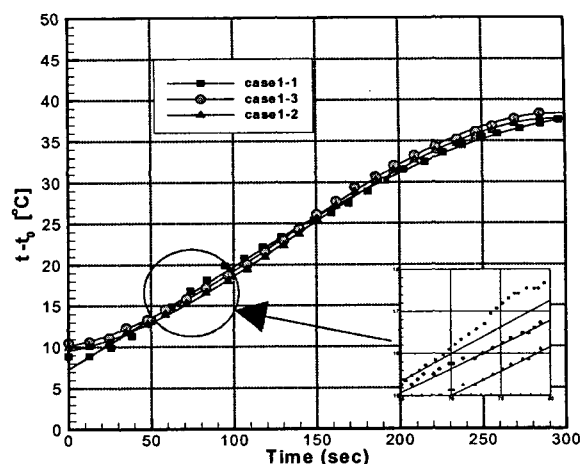


Fig. 10 Comparison of temperature distribution of TC15 at case 1

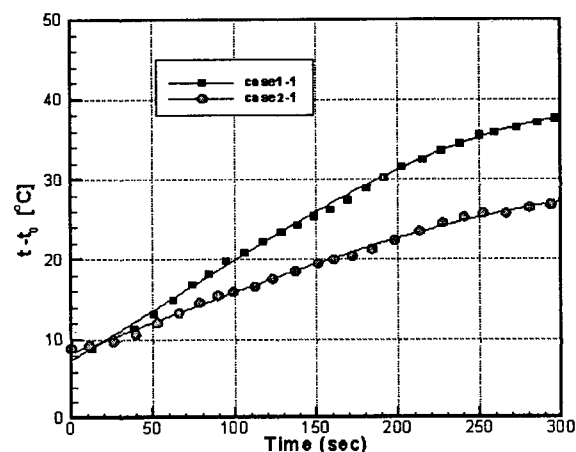


Fig. 11 Comparison of center fire temperature distribution of TC15 at case 1 and 2

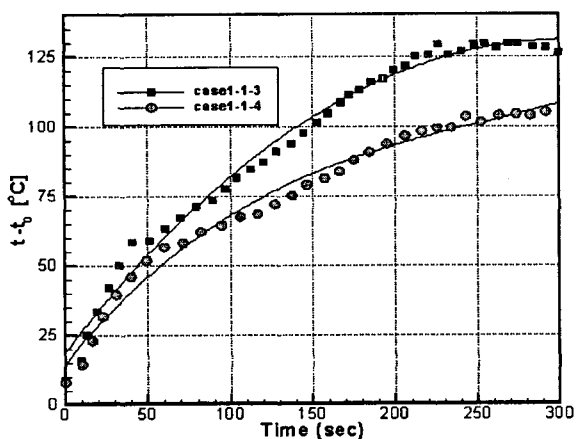


Fig. 12 Comparison of center fire temperature distribution of TC9 and TC13 at case 1

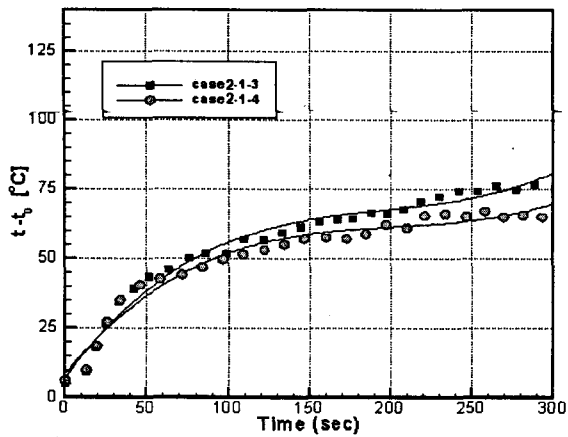


Fig. 13 Comparison of center fire temperature distribution of TC9 and TC13 at case 2

#### 4. 결론

이 연구에서는 일정한 3차원 실내공간에서 메탄올이 담겨있는 사각용기를 화원으로 하여 화재의 크기 및 화원의 위치에 따른 연기거동의 특성을 알아보기 위한 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

연기 및 열의 확산은 모서리형 화재가 가장 가파른 상승 곡선을 보이는데, 이는 양쪽의 벽면이 만나는 모서리의 영향으로 인하여 열유속의 증가와 함께 화염의 높이가 증가하게 되어 천장에서 방사방향으로의 열확산이 증가하고 온도가 상승하게 되기 때문이다. 또한 화원으로부터의 거리, 화원의 크기에 따라 연층이 1.5m 높이까지 도달하는데 걸리는 시간은 44초에서 180초 정도로 다르며, 이를 근거로 외부로부터 공기의 유입이 없는 벽체형 화재의 경우 연층의 이동속도는 평균 0.0144m/s로 가장 느린 중심형 화재에 비해 약 157% 빠르다.

선박 실내공간에서의 화재에 대한 정량적인 데이터를 확보하기 위해서는 개구부의 개폐, 배기팬에 의한 흡입 및 배출 등의 조건을 변경하여 추가 실험 및 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] Hansell, G.O.(1993), Heat and mass transfer process affecting smoke control in atrium building, Ph. D. Thesis, South Bank Univ., London.
- [2] Kerrison, L., Galea, E.R., Hoffmann, N. and Patel, M.K.(1994), A comparison of a FLOW3D based fire field model with experimental room fire data, Fire Safety J., Vol. 23, pp.387-411.
- [3] Poreh, M. and Garrad, G.(2000), A study of wall and corner fire plumes, Fire Safety J., Vol. 34, pp.81-98.
- [4] Quintiere, J.G.(1984), A Perspective on compartment fire growth, Combustion Sci. and Tech., Vol. 39, pp.11-54.
- [5] Steckler, K.D., Quintiere, J.G. and Rinkinen, W.J.(1982), Flow induced by fire in a compartment, Nineteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp.913-920.
- [6] Zukoski, E.E.(1995), Properties of fire plumes. In: Cox, G., Editor, Combustion fundamentals of fire, London: Academic Press, pp.101-220.
- [7] Zukoski, E.E., Kubota, T. and Cetegen, B.(1981), Entrainment in fire plumes", Fire Safety J., Vol. 3, pp.107-121.

원고접수일 : 2005년 05월 10일  
 원고채택일 : 2005년 06월 24일