

선박 구조 개선을 통한 승무원의 피난 효율 향상을 위한 연구

김원욱¹ · 이명호² · 김종수[†]

(원고접수일 : 2014년 1월 7일, 원고수정일 : 2014년 1월 17일, 심사완료일 : 2014년 3월 21일)

A study on the efficiency advancement for evacuation of the crews by ship structural improvement

Wonouk Kim¹ · Myoungho Lee² · Jongsu Kim[†]

요약 : 육상구조물의 대형화재는 특수한 소방장비와 그에 적합한 방법에 의해서 소방관에 의해서 진압된다. 하지만 해양구조물은 육상으로부터 어떠한 도움없이 승무원에 의해서 진압되고 이들은 선박의 구조적 특성과 선박의 충돌 및 화재와 같은 여러 가지 원인에 의하여 신속한 탈출이 어렵다. 일반적으로 화재에 의한 인명손상의 경우에는 연기에 의한 질식사 대부분을 차지하므로 탈출 시간의 단축은 생존율을 향상에 아주 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 3차원 화재 분석 전용 프로그램인 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 이용하여 화재 발생 시 승무원 생존을 분석을 위한 거주 공간내의 온도 및 연기유동에 의한 가시거리를 분석한다. 기존의 선박은 화재 경보 발령 시 방화문이 자동으로 폐쇄되도록 설계되어 있다. 이는 화재가 발생한 구역에 승무원이 없을 경우에는 화재의 확산 및 연기의 유동 지연에 아주 효과적이다. 그러나 대피시간이 지연될 경우에는 방화문 안쪽에 위치한 승무원들에게는 치명적일 수 있다. 이 논문에서는 화재로 인해 방화문이 폐쇄되어 승무원들이 이 방화문을 열고 탈출하는 경우와 연구에서 제안하는 차단막을 설치했을 경우의 화재 구역의 온도상승 및 연기유동 속도를 비교 분석한다.

주제어 : 연기구동, 가시거리, FDS, 방화문, 온도상승속도, 연기유동속도, 차단막

Abstract : Onshore great fires can normally be extinguished by firefighters using special firefighting equipment and its suitable method. However, offshore fires on the ships are to be extinguished by the crew without any supports from the onshore. Also, crews working on board are exposed to high risk of emergency evacuation due to the complicated structure arrangement of the ships and different accident types such as fire and ship collisions. As most of damage and loss of life in fire are associated with suffocation, shortening of evacuation time is an important factor to improve a survival rate. In this study, visibility in the accommodation area is analyzed by using the temperature and smoke flow which are obtained by the Fire Dynamic Simulator(FDS) as a Three-Dimensional Fire Analysis program to understand the survival rate of the crew upon the fire. The fire doors for most of ships are designed to close automatically when the fire alarm is activated. These automatic closing of the fire doors is a very effective system to delay the spread of flame and smoke flow for the unmanned spaces of the fire protected area. However, if the crew cannot escape within the estimated

† Corresponding Author: Division of Marine system Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: jongskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4831

1 Korea Institute of Maritime & Fisheries Technology, E-mail: kwo72@hanmail.net, Tel: 051-620-5816

2 Department of offshore plant management, Korea Marine Engineering University, E-mail: mhlee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5396

time, the crew inside the fire protected area will be damaged a lot. In this paper, the comparative analysis between the evacuations by using the fire door from the fire protected area and the suggested fire shielding structure in this study is carried out by the smoke flow rate and the temperature rise rate.

Keywords : Smoke flow, Visibility, FDS, Fire door, Temperature rise rate, Smoke flow rate, Shield

1. 서론

1.1 개요

선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초 및 화재 등이 있다. 이 연구에서는 다양한 해양사고 중 화재 발생 시 승무원 및 승객들의 대피 효율 향상 방안을 대해 검토하고자 한다. 기존의 선박은 화재 경보 발령 시 방화문이 자동적으로 폐쇄된다. 이는 화재의 확산과 연기의 유동을 지연시켜 승무원 생존을 향상에 아주 유용한 것으로 판단된다. 그러나 피난을 완료하지 못한 방화문 안쪽에 위치한 승무원들에게는 치명적일 수 있다. 이 연구에서는 화재 시 인명사고의 대부분을 차지하는 연기에 의한 질식을 줄이기 위하여 기존 구조에 연기 유동 속도를 감소시키는 방법에 대해 제안하고자 한다.

1.2 연구방법

화재 시 선박 승무원의 생존율을 분석하기 위해서는 거주 공간내의 온도 및 피난에 필요한 가시거리 검토가 필요하다. 이를 분석하기 위해서 이 연구에서는 상·하층부의 온도 및 연기 하강시간을 고려한 3차원 공간에서의 정밀하고 세분화된 해석이 가능한 Field Model 방식을 사용하였다. 이 연구에서는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발하여 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하였다. 이 연구를 위해서는 화재구역 도면을 .dxf 파일로 제작하여 FDS에서 요구하는 데이터 포맷으로 변환한 후 FDS를 이용하여 연구를 수행하였다. 적용 방법은 Figure 1과 같다[1].

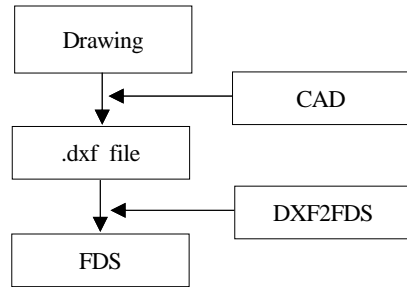


Figure 1: Diagram of flow

화재가 발생한 상황에서 방화문의 개폐와 이 연구에서 제안하는 차단막의 설치가 온도상승 및 연기유동 속도에 미치는 영향에 대해 비교·분석하고자 한다.

이 연구에서 검토된 선박의 세부 도면은 다음 Figure 2와 같으며, 방화문의 차단여부에 따른 온도 및 연기유동 속도 분석을 위해 복도 중앙에 방화문을 설치하였다. 차단막의 경우 복도 시작점에서 10m, 20m, 30m에 10m 간격으로 설치하였다. 시뮬레이션 환경 설정은 Table 1과 같다.

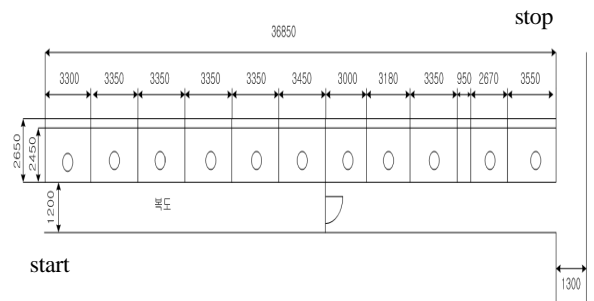


Figure 2: Diagram of flow

Table 1: Simulation area

Item	Figure (m)
Passage length	36.85
Passage width	1.20
Ceiling height	2.42



Figure 3: Fire Door installation (3D Graphic)

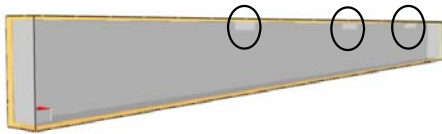


Figure 4: Shield installation (3D graphic)

2. 대피 허용시간 및 총 대피시간

대피 허용시간은 거실, 층, 복도로 나누어 설계지침을 정하고 있는데 이 연구에서는 “건설성 공시 제1441호(2000년 5월 31일)”의 복도 피난관련 수식인 $4\sqrt{A_{area}}$ 를 적용하였으며 거주 가능시간은 26.6초이다[2]. 즉, 모든 승무원 및 승객이 이 시간 내에 대피를 감행해야 한다는 뜻이다. SFPE(Society of Fire Protection Engineers)의 Harold E. "Bud" Nelson과 Frederick W. Mowrer의 비상시 이동 연구의 피난 계산방법에 의하면 군중밀도가 $0.54/m^2$ 이상일 경우 피난 완료시간 계산방법은 식 (1)과 같다[3].

$$T_p = \frac{P(\text{통과인원})}{(1-0.266D)kDW_e} \quad (1)$$

여기서,

T_p :한 군중의 사람들이 비상구 통로상의 특정지점을 통과하는데 걸리는 시간(sec)

k :피난속도 상수 (복도, 비상구는 1.4 적용)

D :군중밀도 [인원수(명)/유효면적(m^2)]

W_e :출구폭 (m)

Figure 2에 의하면 총 11개의 침실이 있으며 하나의 침실에 총 4명이 거주하는 것으로 설정한다. 피난구는 복도가 끝나는 지점에 있으므로 이론식인 식 (1)에 의하면 총 피난시간은 35.7초가 된다. 하지만 선박의 경우는 롤링과 피칭에 의해 보행속도의 감소가 예상된다. 네덜란드의 TNO Human Factors는 BriteEuram 프로젝트인 MEPdesign(Mustering and Evacuation : Scientific Basis for Design)는 프로그램의 일환으로 18세에서 83세의 성인 150명을 대상으로 통로 및 계단의 경사와 동요에 의한 보행속도를 검토하였다. 이때 중동요 및 횡동요 모두에서 동요 주기 증가에 따라 약 15[%]정도 감소됨을 알 수 있었다[4]. 이 연구 결과를 적용하면 실제 피난시간은 약 42[sec]로 예상되므로 피난 허용시간인 26.6[sec]보다 길어서 대피 안전에 문제가 있는 것으로 보인다. 즉, 피난효율 향상을 위해서는 복도 폭, 천정의 높이, 군중밀도의 적절한 조정 등이 필요한 것으로 판단된다.

3. 화재시뮬레이션 및 결과

3.1 FDS의 개요

FDS는 화재로 발생하는 유체의 흐름을 계산하는 CFD모델로서 저속도의 열 흐름에 대한 Navier-Stokes 방정식의 한 형태를 수치 해석하는 필드모델로서 열과 연기의 흐름을 강조한 방정식을 계산하는 프로그램이다. 계산방법은 LES(Large Eddy Simulation) 또는 DNS(Direct Numerical Simulation)에 상관없이 보존방정식에 의해 예측된다. Navier-Stokes 방정식은 식 (2)와 같다[1].

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

여기서, u : 속도, f : 단위체적당 걸리는 외력

ρ : 밀도, p : 압력, ν : 압력

3.2 화재 시뮬레이션 환경

FDS를 사용하여 시뮬레이션을 하기 위해서는 DXF 파일로 화재구역을 제작해야하므로 AutoCAD를 이용하여 DXF 파일로 변환한 후 3차원 파일로 제작한다. 변환된 파일을 DXF2FDS 프로그램을 이용하여 FDS에서 원하는 파일로 변환한다. 이 시뮬레이션을 위한 물리적 조건은 아래와 같다. 화재 시 온도 및 가시거리 측정지점은 X축은 복도의 중간점인 0.6[m], Y축은 승무원들의 피난완료 지점인 복도 끝단인 35[m] 그리고 Z축은 사람의 거주 가능 시간을 측정하는 일반적인 사람의 호흡위치인 1.5[m]로 하였다.

- 시뮬레이션 시간 100[sec]
- 화재강도 100 [kW]
- 화원의 크기 60[cm] × 60[m]
- 가연성 물질 목재
- 실내온도 25 [°C]
- 화원 복도의 시작점
- 복도, 방화문 재질 철판

승무원 및 승객이 안전하게 대피하기 위해서는 대피공간의 온도는 60[°C]를 초과하지 않아야 하며 가시거리로서는 출입문, 벽, 계단 등 스스로 발광하지 않는 반사체는 약 6[m]에서 식별 가능한 조건을 만족하도록 규정하고 있다[5].

3.3 화재 시뮬레이션 설정

시나리오는 Table 2에서 보는바와 같이 첫째, 방화문이 차단되지 않은 경우 둘째, 방화문이 차단된 경우 오픈시간은 승무원들이 실제 방화문을 열고 닫을 다양한 경우를 감안하여 2[sec], 3[sec], 4[sec]로 설정하였다. 셋째, 방화문 대신 본 연구에서 제안하는 차단막(차단막의 길이 20[cm], 30[cm], 40[cm])을 설치하는 경우의 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 즉, Scenario 1은 현재 선박의 시스템을 Scenario 2는 본 연구에서 제안하는 방식이다.

Table 2: Fire simulation scenario

Scenario 1	Scenario 2
Fire door open	
Fire door open 2[sec]	Shield length 20[cm]
Fire door open 3[sec]	Shield length 30[cm]
Fire door open 4[sec]	Shield length 40[cm]

3.4 화재 시뮬레이션 결과

Table 3에서 보는바와 같이 온도는 방화문의 개폐에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 특히, 모든 시나리오에서 거주 가능 온도인 60[°C] 이내로 분석되었다. 가시거리의 경우 Table 4에서 보는바와 같이 안전 피난에 필요한 최소 거리인 6[m]는 모든 시나리오에서 만족하는 것으로 나타났으나 방화문의 개폐 여부가 방화문이 열려 있는 상황보다 가시거리가 더 감소하는 것으로 나타났다. 단, 방화문의 오픈 속도에 의한 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 3: Time(sec) to reach a Max. temperature (Scenario 1)

Condition	Max. temperature (°C)	Reaching time (sec)
Fire door open	33.32	99
Fire door open 2[sec]	38.04	96
Fire door open 3[sec]	36.26	96
Fire door open 4[sec]	36.22	88

Table 5에서 보는바와 같이 차단막의 유무에 따른 온도변화는 거의 없었으며 모든 상태에서 거주 가능 온도인 60[°C] 이내로 분석되었다. Table 6에서는 가시거리의 경우에는 안전 피난에 필요한 최소 거

Table 4: Time(sec) to reach the Min. visibility range (Scenario 1)

Condition	Min. visibility (m)	Reaching time (sec)
Fire door open	13.53	98
Fire door open 2[sec]	8.41	100
Fire door open 3[sec]	8.91	100
Fire door open 4[sec]	9.51	100

Table 6: Time(sec) to reach the Min. visibility (Scenario 2)

Condition	Min. visibility (m)	Reaching time (sec)
Fire door open	13.53	98
Fire door open 2[sec]	21.2	100
Fire door open 3[sec]	over 30	over 100[sec]
Fire door open 4[sec]	over 30	over 100[sec]

리인 6[m]는 모든 상태에서 만족하는 것을 나타내고 있으나 기존의 방화문 시스템을 이용하는 경우보다 가시거리가 양호한 것을 보여주고 있다. 특히, 차단막의 길이가 30[cm] 이상인 경우에 최대 측정거리인 30[m]를 100[sec] 동안 시뮬레이션을 실시한 결과를 보임으로서 가시거리에는 변화가 없음을 알 수 있다.

이러한 결과를 토대로 다음 절에서는 실제 승무원 및 승객들이 닫힌 방화문을 열고 대피하는 상황을 고려하여 방화문의 오픈시간을 2[sec], 3[sec], 4[sec]로 구분하여 시뮬레이션을 실시한 결과와 본 연구에서 제안하는 차단막을 설치하여 시뮬레이션한 결과를 비교 분석 하였다.

Table 5: Time(sec) to reach a Max. temperature (Scenario 2)

Condition	Max. temperature (°C)	Reaching time (sec)
Fire door open	33.32	99
Fire door open 2[sec]	33.32	99
Fire door open 3[sec]	31.07	100
Fire door open 4[sec]	27.02	100

3.5 기존의 방화문만 사용하는 경우와 제안된 차단막을 설치할 때의 온도 및 가시거리 비교 분석

Table 7은 기존의 방화문을 설치하는 경우와 본 연구에서 제안하는 차단막을 설치하는 경우의 시뮬레이션 결과를 비교 분석한 것이다. 온도의 경우에는 측정 최소값인 25[°C] 보다 방화문 오픈시간 2[sec]시 13.04[°C], 3[sec]시 11.26[°C] 및 4[sec]시 11.22[°C]로 증가하였다. 그리고 20[cm]의 차단막을 설치하였을 경우에는 8.32 [°C], 30[cm]인 경우에는 6.07[°C] 그리고 40[cm]인 경우에는 2.02[°C]의 온도가 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 차단막 길이 40[cm] 설치시는 온도 상승폭이 적은 것으로 나타났다. 온도 상승에 대한 분석 결과 차단막을 설치하는 경우가 기존의 방화문만을 설치하는 방식보다 약 17.4[%] 감소하는 것으로 나타났다. **Figure 5**와 **Figure 6**은 **Table 7**의 분석 결과를 3차원 그래프로 표현한 것으로서 **Figure 6**의 차단막을 설치하는 경우에 있어서 **Figure 5**의 방화문만을 설치하는 경우보다 온도의 상승 분포가 짧고 낮은 것으로 나타나고 있다. **Figure 7**은 **Table 7**에 나타난 방화문 오픈 시간과 차단막의 길이를 다르게 하였을 경우의 화재구역 온도를 분석한 그래프이다.

Table 7: Time(sec) to reach a Max. temperature

Condition	Max. temperature (°C)	Tem. decrease improvement rate (%)
Fire door open	33.32	-
Fire door open 2[sec] /Shield length 20[cm]	38.04 /33.32	12.41
Fire door open 3[sec] /Shield length 30[cm]	36.26 /31.07	14.31
Fire door open 4[sec] /Shield length 40[cm]	36.22 /27.02	25.40

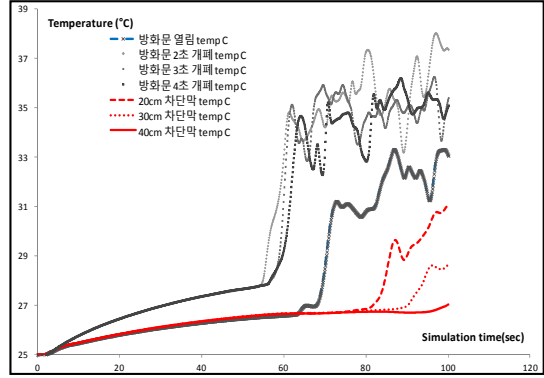


Figure 7: Analysis of temperature

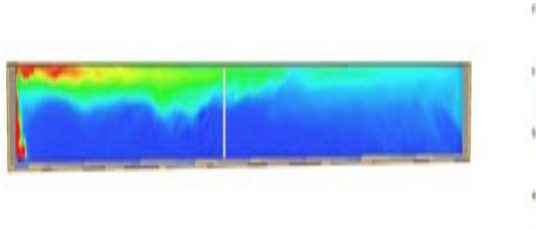


Figure 5: Analysis of temperature (Opening fire door/4[sec])

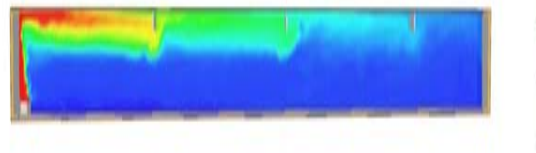


Figure 6: Analysis of temperature (Shield length/40[cm])

승무원의 신속한 탈출을 위한 가시거리 측정을 통한 분석의 경우에는 **Table 8**에서 보는바와 같이 방화문 오픈 시간을 2[sec]로 하였을 때의 최소 가시거리는 8.41[m], 3[sec]일 경우에는 8.91[m], 4[sec]의 경우에는 9.51[m]로 분석되었다. 제안하는 차단막을 설치하는 경우에 있어서 20[cm]의 차단막 설치시에는 최소 가시거리가 21.2[m]이지만 30[cm] 이상인 경우는 최대 측정값인 30[m] 이상으로 가시거리 확보에 아주 큰 효과를 주는 결과를 얻을 수 있었다.

가시거리 감소율에 대한 분석 결과에서는 차단막을 설치하는 경우가 기존의 방화문만을 설치하는 방식보다 약 301.4[%] 감소시키는 것으로 나타났다. 즉, 차단막 설치가 기존의 방화문만을 설치하는 경우보다 인명 안전성 확보에 있어서 보다 도움이 되는 것으로 판단된다. **Figure 8**과 **Figure 9**는 방화문만을 설치하는 경우와 차단막을 설치하는 경우의 최소 가시거리 시뮬레이션 비교 분석 결과인 **Table 8**의 내용을 3차원 그래픽으로 표현한 것이다. **Figure 9**의 차단막을 설치하는 경우가 **Figure 8**의 방화문만을 설치하는 경우보다 가시거리 정도에 있어서 크게 향상 되었으면 볼 수 있다. 또한, **Figure 10**은 **Table 8**에서 보여주는 분석 결과를 수치 그래프로 나타낸 것이다.

Table 8: Time(sec) to reach the Min. visibility

Condition	Min. visibility (m)	Visibility decrease improvement rate (%)
Fire door open	13.53	-
Fire door open 2[sec] /Shield length 20[cm]	8.41 /21.2	252.08
Fire door open 3[sec] /Shield length 30[cm]	8.91 /30이상	336.70
Fire door open 4[sec] /Shield length 40[cm]	9.51 /30이상	315.46



Figure 8: Analysis of visibility (Opening fire door/4[sec])



Figure 9: Analysis of visibility (Shield length/40[cm])

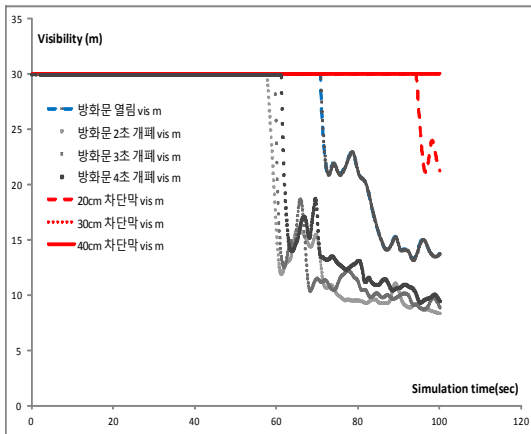


Figure 10: Analysis of visibility

4. 결론

기존의 선박에는 화재 확산을 방지하기 위해 방화문이 설치되어 있다. 서론에서 밝힌바와 같이 이 방화문은 탈출을 감행하는 승무원이 없을 경우에는 화재의 확산과 연기의 유동을 지연시켜 승무원의 생존율을 향상 시키지만 피난을 완료하지 못한 승무원들에게는 대피 시간을 지연시켜 안전에 치명적일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 선박에 설치된 방화문을 승무원들이 탈출을 하기 위해 오픈하는 시간을 2[sec], 3[sec], 4[sec]로 설정하고 온도 및 가시거리를 시뮬레이션을 통하여 수치적으로 분석하였으며 온도 및 연기의 유동 특성을 고려하여 탈출 통

로의 천정에 차단막을 20[cm], 30[cm], 40[cm]의 길이로 설치하는 방안을 제안하고 이를 실제 선박의 환경에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과에서 화재 시 온도 상승 정도와 가시거리를 측정하여 기존의 방화문만을 사용하는 경우와 차단막을 설치하는 경우를 상호 비교 분석한 결과, 온도의 상승 억제 측면에서는 제안한 차단막을 사용하는 경우에 있어서 방화문만을 사용하는 경우 보다 약 17.4[%]의 개선 효과를 확인하였으며 선박 승무원 인명 안전성 확보에 아주 중요한 역할을 하는 적정 가시거리 확보에 영향을 미치는 연기 유동의 경우에는 차단막을 사용하는 경우가 방화문만을 사용하는 경우 보다 약 301.4[%] 효율성이 높은 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] K. B. McGrattan, G. P. Forney, Fire dynamics simulator (Version 4) user's Guide, Technical reference guide. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 1018, 2004.
- [2] Ministry of Land Infrastructure, Notification No. 1441 of the Ministry of Construction, 2000.
- [3] Korean Fire Protection Association, The SFPE handbook of fire protection engineering, 2005 (in Korean).
- [4] H. T. Kim, "The effect on the mobility of evacuating passengers in ship with regard to list and motion," Industrial Engineering Interfaces, vol. 17, no. 1, pp. 22-23, 2004 (in Korean).
- [5] D. H. Rie and J. O. Lew, "A study of heat & smoke evacuation characteristics by the changing of operational method of tunnel fan shaft ventilation system for fire on subway train vehicle," Fire Science and Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 62-69, 2003.