CFD기반 화재 대피 시뮬레이션 모델을 적용한 위험도 평가 분석 - 인천터미널역 역사를 대상으로

Risk Evaluation and Analysis on Simulation Model of Fire Evacuation based on CFD - Focusing on Incheon Bus Terminal Station

김민규* · 주용진** · 박수홍***

Min Gyu Kim · Yong Jin Joo · Soo Hong Park

요약 최근 실내 공간에서의 재난, 화재와 테러 등 대피상황을 재현하여 이를 가시화하기 위한 연구가 주목 받고 있으며, 실내 공간에 대한 모델을 설계하고 인명 안전 평가를 통한 신뢰성 있는 분석이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 실제적인 건물 화재 위험 요인을 고려하여 피난 안전성 분석과 피난 경로 안내가 가능한 시뮬레이션 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해 인천터미널역 역사를 대상으로 3차원 화재 및 피난 모델을 설계하고, 실내 내장재의 재질을 바탕으로 열 매개변수와 화재 인지 장치를 이용하여 화재 위험 분석을 수행하였다. 둘째, 인명안전을 위한 평가에 있어 화재 시뮬레이션인 FDS(Fire Dynamics Simulator)와 피난 시뮬레이션을 통해 재실자가 인체에 손상 없이 견딜 수 있는 피난허용시간(ASET: Available Safe Egress Time)을 산출하였다. 또한 화재를 감지하고 안전한 장소까지 완전하게 피난하는데 소요되는 피난요구시간(RSET: Required Safe Egress Time)을 계산하고 이를 비교 분석하였다. 결과적으로 연구대상의 3차원 공간적인 정보를 기반으로 한 실내 공간 모델과, 고시된 안전기준을 반영한 열차 내 화재 및 피난 위험도 측정 시뮬레이션 분석을 통해 보다 실제적인 안전성 평가를 수행 할 수 있었다.

키워드 : CFD, 피난안전성평가, 화재위험분석, 피난허용시간, 피난요구시간

Abstract Recently, the research to visualize and to reproduce evacuation situations such as terrorism, the disaster and fire indoor space has been come into the spotlight and designing a model for interior space and reliable analysis through safety evaluation of the life is required. Therefore, this paper aims to develop simulation model which is able to suggest evacuation route guidance and safety analysis by considering the major risk factor of fire in actual building. First of all, we designed 3D-based fire and evacuation model at a subway station building in Incheon and performed fire risk analysis through thermal parameters on the basis of interior materials supplied by Incheon Transit Corporation. In order to evaluate safety of a life, ASET (Available Safe Egress Time), which is the time for occupants to endure without damage, and RSET (Required Safe Egress Time) are calculated through evacuation simulation by Fire Dynamics Simulator. Finally, we can come to the conclusion that a more realistic safety assessment is carried out through indoor space model based on 3-dimension building information and simulation analysis applied by safety guideline for measurement of fire and evacuation risk.

Keywords : Evacuation Safety Evacuation Route Guidance, Fire Hazard Analysis, ASET, RSET

1. 서 론

현대사회의 발전되는 환경에 따라 한정적인 국토의 한계를 벗어나고자 건축물의 대형화와 고층화, 지하 공간을 활용한 공간계획에 관심을 가지고 있다. 그 예로 지하철역사의 경우 하나의 공간 면적과 다양한 직업군이 존재하는 환승지점으로 주위에 터미널, 백화

점, 시장 등이 인접하게 배치되는 구조로 되어있기에 피난 동선이 복잡하고 다양해지는 특성이 있다. 이렇게 공간상의 심층화·복잡화가 이루어지면서 지하 공간 화재 발생에 따른 인명 및 재산피해는 상당히 커지고 있으며 안전을 위한 대책이 매우 중요시 되고 있다. 최근 소방시설 등의 성능위주 설계 방법 및 기준 고시가 발표되면서 국내에서는 이러한 화재 안전성능평가

[†] This work was researched by the supporting project to educate GIS experts

[†] This work was researched by the supporting project to educate GNSS experts

* Min Gyu Kim, Master's Student, Dept. of GeoInformatic Engineering, Inha University. gisdev107@gmail.com

** Yong Jin Joo, Assistant Professor, Aerial GeoInformatics, Inha Technical College. jjy@inhac.ac.kr (Corresponding Author)

*** Soo Hong Park, Professor, Dept. of GeoInformatic Engineering, Inha University. shpark@inha.ac.kr

의 수행이 본격화되고 있으며, 건물에서의 화재발생 시 안전여부에 대한 분석대상으로 가장 많이 선택되는 부분이 거주자의 피난이다[5]. 이러한 피난에서 피난로 계획은 예상되는 여러 가지 재해현상에서 인간을 보호하고, 다른 사람의 도움 없이 스스로 대피하는 것을 원칙으로 하여 특정 안전지역까지 유도시키는 공간계획이라고 할 수 있다[1].

최근 지하철 화재 뿐 아니라 지하철 역사에서 건물 밖으로의 피난에 대한 화재유동 해석과 시뮬레이션에 연구가 진행되고 있으며[2], 지하철 역사에 대해 화재상황에서의 피난 시간을 산정하고 피난 인원을 면적당 재실자 밀도로 산정하는 화재 안전성 평가에 대한 연구가 수행되고 있다[4]. 그러나 대부분의 피난 안전성 평가 연구의 경우 화재나 테러와 같은 특정 상황과 최단거리에 기반한 대피 경로 안내만이 제공되고 있다. 결국 국토교통부나 소방방재청에서 고시한 건물 방재 설계 내용을 토대로 화재 시나리오를 반영하지 못하며 국내 화재안전기준에 적합한 시뮬레이션에 관한 연구가 미미한 실정이다. 이에 따라 화재 및 피난 시뮬레이션 분석 도구를 이용해 보다 지하철 내 화재 및 피난 시뮬레이션을 위한 고시내용을 기반으로 실내 공간에 대한 모델 설계와 인명 안전성 평가를 통해 대상 지역의 안전에 대한 분석이 요구되고 있다.

이에 본 연구의 목적은 실제 대상의 공간적인 데이터를 토대로 화재 및 피난 모델을 설계하고, 보다 신뢰성있는 피난 안전성 분석과 피난 경로 안내가 가능한 3D 시뮬레이션 모델을 개발하는 것이다. 또한 독성가스나 열과 일산화탄소 감지, 가시화 정도를 보다 실제적인 건물 화재 위험 요인으로 고려하여 안전성 평가를 수행한다. 이를 위해 신뢰성 있는 예측을 위한 실제 인천터미널역 역사를 사례지역으로 인천교통공사의 대상지 설계 수치 정보를 이용하여 화재 및 피난 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 둘째로, 인명안전을 위한 평가에 있어 전산유체역학 모델 기반의 화재 시뮬레이션인 FDS(Fire Dynamics Simulator)*와 피난 시뮬레이션을 통해 재실자가 인체에 손상 없이 견딜 수 있는 피난허용시간(ASET: Available Safe Egress Time)과 화재를 감지하고 안전한 장소까지 완전하게 피난하는데 소요되는 피난요구시간(RSET: Required Safe Egress Time)을 비교·분석하였다. 마지막으로, 3D시뮬레이션을 통해 피난 경로에 대한 연구결과를 종합

하고 건물의 피난 안전성 평가에 대한 시사점을 도출하였다.

2. 화재 및 피난 시뮬레이션

2.1 FDS 모델

화재 시뮬레이션을 위해 미국의 표준기술(National Institute of Standards and Technology)에서 만든 소프트웨어인 FDS프로그램을 이용하여 연소생성물, 열적 구동되는 흐름에 대해 적절한 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하는데 사용했다[11]. FDS는 CFD (Computational Fluid Dynamics)에서 난류 모델로써 사용되는 모델 중 LES(Large Eddy Simulation)을 이용한다.

FDS에는 화재로 인한 열이나 연기를 해석하기 위해 다음과 같은 난류모델, 연소모델, 복사모델, 가시도 모델을 사용한다[18].

2.1.1 난류모델

화재의 발생이나 전도를 해석하기 위해서는 질량, 운동량, 에너지, 상태 등의 방정식이 필요하며 FDS에서 사용되는 기본 방정식은 유체 이동 및 물질 보존에 대한 연속방정식(1), 유체의 이동을 위한 힘-뉴턴 제2법칙에 대한 운동량 방정식(2), 에너지보존-열역학 제1법칙 적용에 대한 에너지 방정식(3), 화학반응에 관련된 상태방정식(4)로 정리될 수 있다[12].

1) 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = m''' \quad (1)$$

2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

3) 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \mathbf{q}_b''' - \nabla \cdot \mathbf{q}'' + \epsilon \quad (3)$$

4) 기체 상태 방정식

$$p = \frac{\rho R T}{W} \quad (4)$$

* FDS: 화재 발생에 따른 유체 흐름의 전산유체역학(CFD: Computational fluid dynamics)모델. 연기와 화재로부터 열 수송에 중점을 두고 저속, 열 중심의 흐름을 위한 시뮬레이터

여기서 t 는 시간, ρ 는 밀도, u 는 속도 벡터, T 는 온도, p 는 압력, h_s 는 온도변화에 대한 엔탈피, g 는 중력가속, fb 는 외부의 힘 벡터, π_{ij} 는 전단응력(stress tensor), q''' 는 단위부피당 열 방출속도, qb''' 는 입자의 열 방출속도, q'' 는 전도와 복사에 의한 열 플럭스(heat flux), ϵ 는 소산율(dissipation rate), D 는 확산계수(Diffusion coefficient), mb''' 는 입자의 증발속도, W 는 혼합기체의 분자량, R 은 기체상수이다.

2.1.2 연소모델

화재시 발생하는 물질의 연소현상 예측과 관련된 연소모델은 원료와 연소 생성물을 대상으로 최초와 최종 결과의 반응식만으로 수식화한 것으로, 연소 시에 생성된 연기의 분율은 연료와 산소, 연소 생성물의 비율로 나타낸다[12,18].

식 (5)에서 질소는 N_2 이며, M 은 산소를 소비하지 않은 추가적인 연소 생성물의 몰(mol)단위의 평균 분자량이며, S 는 연기를 나타내고, X_H 로 인한 수소원자 분율은 C (탄소)와 H (수소)가 혼합되는 것으로 가정한다. V_i 는 화학양론계수로, 식 (6)와 식 (8)은 그을음에 대한 V_S 와 일산화탄소에 대한 V_{CO} 로 변환되는 화학양론계수를 나타낸다. 여기서 soot yield(y_s)는 식 (7)과 같이 식 (6)와 식 (8)의 관계를 통해 산출할 수 있다.

$$V_S = \frac{W_F}{W_S} y_s \quad (6)$$

$$W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad (7)$$

$$V_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad (8)$$

혼합분율에 대한 Z 는 연료에 대한 질량분율과 탄소 이송 생성물로 정의될 수 있으며 식 (9)와 같다.

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{x W_{CO_2}} + \frac{W_F}{x W_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{x W_S} Y_S \quad (9)$$

해당 식의 Y_i 는 질량분율로써, Y_F 는 연료의 질량분율이고 Y_{CO} 는 일산화탄소의 질량분율, Y_S 는 연기의 질량분율이다. 그리고 x 는 연소반응의 전화율이다.

따라서 식 (10)을 통해 연료와 연소생성물에 대한 질량분율을 산출할 수 있다.

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \quad (10)$$

2.1.3 복사모델

화재로 인해 발생한 에너지는 대류, 전도, 복사로써 전달이 되는데, 대류에 의한 열전달은 기본적인 에너지보존 법칙에 의해 표시되지만 전도나 복사에 의한 열전달은 경계면에서의 흡수와 방출의 상호작용이므로, 복사열의 흡수 및 방출을 전부 계산하는 것은 한계가 있어, 식 (11)와 같이 복사에너지에 대해서 전부 흡수하는 완전 복사체(흑체)에 적용하는 모델을 사용한다[12,18].

$$I_b(x) = \frac{\sigma T(x)^4}{\pi} \quad (11)$$

여기서 $I_b(x)$ 는 흑체의 복사강도이고, T 는 절대온도(K), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다.

2.1.4 가시도 모델

피난시 가시거리 확보에 있어서는, 화재로 인한 그을음이나 타르의 응축물에 의한 연기에 의해 빛이 점점 감쇄되어 대피간의 어려움을 겪게 된다. 이러한 빛이 연기에 의해 감소되는 정도는 식 (12)의 Bouguer 법칙을 통해 알 수 있다[15,18].

$$\frac{I}{I_o} = \exp(-\alpha \dot{S}) \quad (12)$$

여기서 I 는 연기를 통과한 빛의 광도이고 I_o 는 처음 방출된 광도, $\dot{S}$ 는 투과된 길이이다.

2.2 공간 모델링

본 연구에서 대상이 되는 공간은 인천에 위치한 인천터미널역 역사로 실제 하루 약 21만명의 수송인원이 이용하며 버스터미널, 백화점과 인근공원이 연결된 복합적인 구조로 아래의 Figure 1과 같이 지하 1, 2층으로 되어있다. 지하 1층(B1)에 역무실, 점포, 엘리베이터, 매표소, 백화점 및 터미널 연결통로와 지하 2층 승강장으로 내려가는 계단, 에스컬레이터가 위치하고 있다. 그리고 지하 2층(B2)은 지하철 탑승을 위한 승강장 플랫폼이 있다. 인천지하철의 총 전량은 8

Figure 1. Subway station buildings in Incheon

Figure 2. An example of the FDS modeling

Figure 3. The structure modeling and The point of ignition

량이며 그 크기는 전장 17.5m, 전폭 2.75m, 전고 4m이고, 각 차량의 출입문은 4개로 가로 1.3m, 세로 1.86m로 되어있다. FDS는 격자로 구성되어진 메쉬 안에 원하는 공간정보를 입력하여 모델링을 수행할 수 있으며, *.fds 포맷에 맞추어 X, Y, Z와 함께 다양한 파라미터를 통해 표현할 수 있다. 다음 Figure 2는 지하철의 상단 부분으로 FDS 모델링의 사례를 보여준다. Figure 3은 FDS를 통해 전체적으로 모델링한 인천터미널역 역사를 나타내며, 출구는 EXIT 1, 2, 3, 4, 5로 구성되어있고, 지하 1층에는 지하 2층과 연결된 계단과 E/S(escalator)가 있다. 지하2층에 빨간색으로 표시되어 있는 플랫폼은 화재가 발생한 열차의 승강장이고,

검은색으로 표시되어 있는 플랫폼은 화재가 발생하지 않은 승강장이다.

피난 모델 설계에 사용한 Pathfinder는 긴급피난 프로그램으로, 건축물 및 화재 시스템 설계에 이용할 수 있는 도구이며 3차원적인 영상을 보여줌으로써 재실자의 움직임을 표현할 수 있다[19]. 여기서는 피난 시 발생할 수 있는 병목현상과 같은 상황을 반영하는 Steering 모드를 적용하여 한국인 대상의 다양한 재실자의 특성을 반영한 시뮬레이션을 수행하고자 하였으며, 피난 모델은 FDS에서 모델링한 기하정보를 *.fds 포맷으로 추출하고 입력하여 화재모델과 동일한 공간상의 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 구성하였다.

2.3 시나리오 설정

화재 시뮬레이션을 통한 안전성 평가 분석을 하기 위해서는 화재 발생상황, 화원의 위치, 열방출 강도, 실험 종료시간, 바람 속도, 대기온도, 제연설비, 스프링클러 등의 시나리오를 선정해야 한다. 주요 화재 발생 상황에는 전기합선에 의한 화재, 공사 중 과실에 의한 화재, 승객에 의한 테러 등의 상황이 있으며, 해당 시나리오에서는 운행 중인 전동차의 전기배선 이상으로 인해 객실 내 화재가 발생한 사고로, 화원의 위치는 Figure 3과 같이 전동차 4번째 량으로 가정한다. 객실내 의자는 폴리우레탄 폼 재질이며, 역사 내 벽은 콘크리트로, 지하철은 철 재질로 되어 있다고 가정하였다[14,18]. 화재 발생에 대한 열 매개변수으로써, 열방출 강도는 국내의 경우 건설교통부 철도시설 안전세부기준에 화재 및 승객피난 시뮬레이션을 수행할 때 10MW 이상을 적용해야 된다고 고시되어 있으며, 국외의 미국 NFPA규정에 의해 설계된 Los Angeles (21.4MW)와 Boston transitway(20MW)을 참고하여 해당 연구에서는 20MW 규모로 화원을 선정하였다 [9,10,16]. 실험 종료시간은 정거장내 열차 화재 시 연기 및 유독 가스로부터의 대피기준인 6분(360초)으로 하였고, 지하철 역사를 대상으로 한 화재에 의한 피해 여부만을 보기 위해서 제연설비 및 스프링클러는 작동하지 않는다고 가정하였다. 화재가 발생한 시기로는 6월의 평균온도인 20℃로, 실내공간에서의 바람은 무풍인 조건으로 정의하였다.

피난 시뮬레이션에서는 도시철도 정거장 및 환승, 편의시설 보완 설계 지침에 의거하여 각 층마다 하나의 E/S가 고장이 나서 계단으로도 사용할 수 없게 되는 상황을 바탕으로 엘리베이터는 이용할 수 없다는 상황을 설정하여 E/S4는 이용하지 않는다[8]. 또한 화

Table 1. Scenario condition for fire simulation

Simulator	FDS 5.0
Time	360 s
The point of ignition	Under the chair at fourth train
Initial Temperature	20 °C
Max. HRR	20MW

Table 2. Calculated number of evacuation person when occurring fire in the subway

	Number (Person)
Occupancy of the lead car	113
Occupancy of the Middle car	124
Person waiting on the platform at peak-hour	31
Train Capacity	970
Person who get off at peak-hour	33

Table 3. Body size in population (Unit : mm)

	Child	Adult	Elderly
Male	290.51	400.47	372.44
Female	291.06	361.15	345.6

Table 4. Walking speed by age

Age	Type	Speed (m/s)
10	Male	1.3
	Female	1.4
20~30	Male	1.49
	Female	1.35
40~50	Male	1.41
	Female	1.41
60	Male	1.61
	Female	1.32

Table 5. Criteria for human safety evaluation

	Criteria
Limits of Breath	1.8m above floor
Temperature	60°C
Visibility	5m
CO	1,400ppm

재에 대한 피난 분석을 수행하기 위하기 위해 재실자의 사전행동이나 화재의 인지행동은 고려하지 않고 화재 상황 발생시 즉시 경보기가 작동하여 피난행동

Figure 4. The point of Exit, Stair, E/S and Detectors on the first basement-level

을 시작한다고 가정하였다. 재실자 수와 보행속도, 어깨너비, 보행특성을 정의하는데 있어서는 인천지하철 1000호대 편성인원과 2012년 인천지하철역 상반기 역별 시간대별 승하차인원 중 6월 에 해당하는 승·하차인원을 토대로 정거장내 열차화재에 고시된 산출 방법을 통해 Table 2와 같이 재실자 수를 정의하여 화재발생 승강장 인원은 1001명, 다른 승강장 인원은 64명으로 산정하였다. 어깨너비 및 보행속도는 Table 3과 Table 4와 같이 Size Korea의 한국인 인체치수 데이터베이스[17]와 Park[13]의 연령별 보행 평균속도를 이용하였다. 피난상황은 지하 2층 승강장에 정차된 전철에서 화재가 발생하여 재실자는 계단이나 E/S 등을 이용하여 지하 1층 출구 EXIT 1, 2, 3, 4, 5 밖으로 피난하는 상황이다.

2.4 화재안전성 평가를 위한 기준 선정

열차내 발화를 통해 생성되는 요소로서 인체에 해를 끼칠 수 있는 위험 인자는 온도, 가시거리, 일산화탄소 3가지가 있다. 밀폐된 실내 공간에서의 온도와 가시거리는 재실자의 피난에 있어서 급격히 상승한 열과, 시야의 미확보로 신체적·정신적인 스트레스를 증가시켜 피난활동에 피해를 미치게 되며, 일산화탄소는 독성으로 냄새가 없고 보이지 않아 가스질식으로 인한 큰 인명피해를 줄 수 있다. 본 연구에서는 이러한 위험요소를 토대로 ASET과 RSET을 분석하고 피난여유시간을 통해 피난시의 안전성여부를 평가하고자 하므로, Figure 4와 같이 지하철 역사에 위치한 출구와 1층의 계단 및 E/S 입구, 그리고 전체 공간에 대한 5m × 5m 그리드 격자를 기준으로 대피경로에 1.8m 높이의 온도, 가시거리, 일산화탄소 감지기를 설치하였으며, 앞서 말한 3가지 항목별 위험기준을

Table 5와 같이 소방방재청에서 고시한 내용에 따라 관측되는 수치를 가지고 분석을 수행한다. 이는 대피 상황에서 밖으로 빠져나가기 위한 경로가 되는 계단과 E/S, 그리고 화재상황으로부터 완전히 대피하기 위해 이용하는 전제 동선을 파악하고 이동경로에 대한 위험여부가 재실자에게 영향을 끼치게 되는 시간과 피난이 완료되었을 때의 시간을 분석하여 안전성을 평가하기 위함이다.

3. 화재 및 피난 안전성 분석

3.1 화재 안전성 분석

앞에서 정의한 설계 모델을 토대로 화재분석을 위한 시나리오에서 시뮬레이션을 통한 인명에 피해를 알아보기 위해 온도, 가시거리, 일산화탄소의 ASET 위험도 분석을 실시하였다. Figure 5는 지하 1층에서의 시뮬레이션 결과로, 지하 2층 화재가 발생한 이후 시간별 연기의 흐름을 나타내고 있다. 화재로 인한 연기가 지하 2층에서 지하1층으로 까지 상승하는데 화원에서 가장 가까운 경로인 E/S1에 15초에 통과하여, 출구 EXIT5 부근에 도달하는데 약 70초, 가장 멀리 있는 EXIT 2, 3 부근까지는 약 150초가 소비된다. 역사 내에는 연기층이 두터워지면서 실내에 검은 연기가 가득 차게 되고, 상대적으로 연기층에 가까운 EXIT2, 3이 EXIT1, 4보다 먼저 연기가 도달하게 된다.

Figure 5. Fire simulation result by time

그리고 약 300초 이후에는 검은 연기가 모든 출구를 통해 역사 밖 외부로 빠져나가게 된다.

다음은 시뮬레이션 결과에 대한 화재 안전성평가를 위해 온도, 가시거리, 일산화탄소의 위험요소별로 피난경로인 계단, E/S, 출구에서의 화재 위험도 측정결과를 분석·정리하였다.

3.1.1 온도

화재가 발생하고 나서 각 출구 및 계단, E/S 입구에 설치된 감지기의 온도 관측 결과를 Figure 6와 Figure 7에 나타내었다. 먼저 대피경로인 계단과 에스컬레이터를 보면 E/S1에서 18초에 온도에 의한 위험 기준치에 도달하고 50초부터 120℃를 유지하며 서서히 온도가 상승하여 최대 150℃가 된다. 그리고 나서 E/S3은 40초, ES4는 72초에 위험 기준치에 도달하게 되었다. 그 외, 다른 경로에서는 위험 온도에 도달하지 않는 것으로 확인되었다. 지하 1층의 출구에서는 앞서 선정한 화재인명 안전기준인 60℃보다 낮게 관측되었으며, 가장 높은 온도를 나타내는 EXIT2에서는 초기온도에서 30℃까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 또한

Figure 6. Temperature by stair and E/S

Figure 7. Temperature by exit

Figure 8. Visibility by stair and E/S

Figure 10. CO by stair and E/S

Figure 9. Visibility by exit

Figure 11. CO by exit

지하 1층 EXIT 2, 3 출구에서 150초가 되었을 때 갑자기 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 화재의 특징에 있는데, 화재는 발생한 연기를 통해 열을 받아 부력이 발생하여 상방향으로 상승하고 건물 천정에 부딪혀 방향을 바꾸어 수평으로 확산해 나가는 특징이 있다. 지하 1층의 깊이는 6.4m로 공간상 높은 구조로 되어 있고, 지하 2층의 지하철 4번째 랑에서 발생한 화재로부터 연기가 계단을 통해 지하 1층으로 상승하고, 수평으로 확산되어 연기가 더 이상 확대될 수 없는 벽과 같은 장애물에 부딪히고 나서야 아래로 연기가 이동하게 된다. 상승한 연기는 열을 가지고 출구 EXIT 2, 3과 EXIT5 쪽의 벽에 맞닿아 아래로 연기가 이동하면서 150초 이후부터는 다른 출구에 비해 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 결과를 종합해보면, 전 출구에서 관측된 온도는 최소 20℃에서 최대 30℃로 출구에서의 온도피해는 없을 것으로 보인다. 하지만 출구에 도달하기 전에 대피경로로써 이용하게 될 지하 1층의 계단과 E/S 중 E/S1, E/S3, E/S4는 위험기준치에 도달하며, E/S1에서는 342초에 피난을 위한 한계온도인 150℃에 미치게 되고, E/S3, E/S4에서는 피부를 화끈하게 하고 열사병과 같은 증상이 발생할

수 있는 온도 100℃까지 상승하게 되어 재실자가 피난하는데 있어서는 온도의 피해가 발생할 수 있을 것으로 보인다.

3.1.2 가시거리

화재가 발생하고 나서 각 출구 및 계단, E/S 입구에 설치된 감지기의 가시거리 관측 결과를 Figure 8와 Figure 9에 나타내었다. 계단 및 E/S에 대한 결과를 보면 가장 가까운 E/S1에서 12초에 가시거리 인명기준에 도달하고 연기가 확산됨에 따라 다른 경로에 위치한 계단과 E/S에도 시야가 감소되어 약 70초 이후에는 모든 경로에서 가시거리 미확보로 인한 위험이 클 것으로 보인다. 지하 1층의 출구에서는 화재인명 안전기준에 따라 온도와는 다르게 출구 EXIT 2, 3, 5에서 각각 154, 161, 174초에 안전기준치에 도달하는 것으로 나타났다. 해당시간 이후부터는 급격하게 가시거리가 감소됨에 따라 피난 시 시야장애로 대피인원과 발생될 수 있는 이동간의 충돌과 보행속도 감소로 피난 소요시간이 증가하여 위험이 클 것으로 보인다. 나머지 출구 EXIT 1, 4는 위험 상황에서 빠져나가기

Figure 12. Occupants of the platform and the first basement level

에 가까운 거리에 위치되어 있고 약 300초가 되었을 때 안전기준치에 도달함에 따라 상대적으로 다른 출구보다는 가시거리에 의한 피해에 안전할 수 있다. EXIT 1, 4가 화원에서 다른 출구에 비해 가깝지만 가시거리에 의한 피해가 낮게 분석되는 이유는 앞에서 언급했듯이, 화재로 인한 연기가 상승하여 수평 확장함으로써 EXIT 2, 3, 5로 연기가 확장되기 때문이다. 결과를 종합해 보면, EXIT 2, 3, 5는 가시거리에 대한 피해가 상대적으로 빨리 발생됨에 따라 EXIT 1, 4의 대피경로가 다른 출구보다 가시거리 확보에 유리할 것으로 분석된다.

3.1.3 일산화탄소

화재가 발생하고 나서 각 출구 및 계단, E/S 입구에 설치된 감지기의 일산화탄소 관측 결과를 Figure 10과 Figure 11에 나타내었다. 계단 및 E/S 입구에서는 화재에서 가장 가까운 곳에 위치한 E/S1에서 18초에 가장 먼저 기준치의 농도를 초과하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 E/S2에서 43초, E/S3와 E/S4는 50초, STAIR1은 112초, 그 외 STAIR2, 3, 4는 약 340초 정도에 위험기준치에 도달하는 것으로 확인되었다. 각 출구는 일산화탄소에 대한 독성가스 위험은 없었다. 그 이유는 지하철 역사의 건물 내부 구조상 천장이 높아 열로 인한 부력으로 일산화탄소 가스가 지하 1층 천장부에서 서서히 두터운 연기 및 가스층을 생성하기에 대피 기준인 6분 내에 출구에까지 독성가스(일산화탄소)가 도달하지 않는 것으로 분석된다. 그에 따라, E/S를 이용하여 피난할 시 일산화탄소 중독증상으로 인한 재실자의 인명피해가 클 것으로 보인다. 지하 1층의 출구에서는 가장 가까운 출구 EXIT5에서 화재가 발생하고 70초가 되고나서 일산화탄소 농도가 관측되기

Figure 13. Occupants flow by exit

시작하였으며, 360초쯤에 EXIT2에서 960ppm의 최대치가 확인되었다. 이 결과는, 화재인명기준치에는 도달하지 않지만 24시간 동안 가스에 노출되었을 때 두통, 현기증, 구토 등이 발생할 수 있는 기준치(800ppm)를 넘는 것으로 확인되었다. 결과를 종합해 보면, 출구에서는 화재 연기의 특징으로 인해 EXIT 2, 3, 5에서 다른 출구에 비해 높은 농도가 측정되었지만 위험기준치를 넘지는 않았다. 하지만 출구에 도달하기 위해 이용하게 되는 E/S와 Stair의 전 경로에서 위험기준치를 넘어서 피난시 독성가스로 인한 피해가 있을 것으로 사료된다. 특히나 E/S에서는 Stair에 비해 빠르게 위험기준치에 도달하였기 때문에 E/S를 이용한 재실자는 상대적으로 위험도가 더 클 것으로 보인다.

3.2 피난 안전성 분석

인천터미널역 역사를 대상으로 피난 시뮬레이션을 수행한 결과로, 시간에 따라 각 층별에서의 재실자 수와 출구를 빠져나가는 데 걸리는 유동률을 나타내었다. Figure 12를 보면 화재가 발생했을 시 지하 2층 승강장에 위치한 모든 재실자는 출구로 빠져나가기 위한 행동을 시작하면서 약 10초에 계단을 통해 지하 1층으로 올라감으로써 지하 2층의 화재 승강장과 맞은편 승강장의 재실자가 감소하게 된다. 화재 승강장은 많은 인원으로 인해 대피시 병목현상이 발생하게 되고, 그러면서 약 60초가 되었을 때는 모든 인원이 계단과 E/S를 통해 지하 1층으로 이동하게 된다. 화재가 발생하지 않은 승강장은 다소 인원이 적으므로 대피간의 충돌없이 이동할 수 있으므로 약 30초가 되었을 때 모든 인원이 지하 1층으로 이동하였다.

Figure 13은 각 출구에 따른 재실자의 초당 유동율을 나타내고 있다. 출구 EXIT5는 약 40초부터 출구를 통과

Figure 14. Remaining and Exited occupants

하는 인원이 발생하는데 그 이유는 대피시 사람의 지광본능, 추종본능, 군집속성 등으로 인해 대다수의 사람이 움직이는 방향이면서 위험한 장소로부터 가장 가까운 곳으로 선택하기 때문이다. 그렇기 때문에 가장 유동율이 높은 EXIT5는 40초에 유동율은 5명 이내로 나타나다가 60초가 되었을 때는 15명 정도로 나타난다. 그러면서 100초 이후에는 대부분 출구를 통해 빠져나가 다시 5명으로 감소한다. 그 외 다른 출구인 EXIT4, 5는 80초부터 출구 EXIT5에 병목현상이 최대로 발생하면서 다른 경로를 찾으면서 총 인원 중에서 각각 28명, 12명이 이용하게 된다. 하지만 대부분의 재실자는 가장 가깝고 위급한 상황에서의 군집을 형성하면서 상당수가 이용하게 되는 EXIT5를 통해 대피하게 된다.

Figure 14는 화재대피 상황에서 재실자의 수와 대피 완료인원의 수를 시간에 따라 보여준다. 지하 2층에 위치하는 모든 재실자는 약 10초부터 계단 및 E/S를 통해 지하 1층에 올라와 40초부터 출구를 통해 외부로 빠져나가기 시작하고 약 85초에는 전체인원의 절반이 대피를 완료하게 된다. 그 결과, 총 1065명의 재실자가 피난을 완료하게 되는 시간은 128초이다.

3.3 화재 및 피난 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 화재 및 피난 시뮬레이션을 수행하여 피난 안전성에 대한 평가를 위해 ASET과 RSET을 산출하였다. ASET은 화재 위험요소인 온도, 가시거리, 일산화탄소가 인명안전기준에 도달하는 시간으로, RSET은 화재에 의한 경보기 작동시간, 인지하는 시간, 피난이동시간이 포함되며 해당 연구에서는 순수한 피난 이동시간에 대한 안전성평가를 위해 화재시 즉시 피난한다고 가정하였고, 각 출구별 피난이 완료된 시간으로 나타내었다. 화재 및 피난 시뮬레이션

Figure 15. The result of evacuation simulation according to the time in the first and second basement-level

에 대한 결과를 토대로 안전성평가를 할 때는 ASET이 RSET보다 길어야 해당 요인에 대해 안전하다고 판단할 수 있다.

Figure 15는 시간별 피난시물레이션을 나타내며, 지하 1층과 2층의 모든 경로에 대한 안전성 평가를 하기 위해 열, 가시거리, 일산화탄소의 위험 기준치가 넘는 곳을 색으로 구분하여 나타내었다. 먼저, (a)의 지하 2층을 보면 화재 발생 15초가 되었을 때 모든 재실자는 대피경로인 계단과 E/S에 집중되고있으며, 계단과 E/S의 이용빈도가 높아 재실자간의 군집현상이 발생되고 있다. 이때 화재가 발생한 전철 주변에 온도, 가시거리, 일산화탄소가 위험 기준치에 넘는 것으로 보이지만 해당 위치에 머무르고 있는 재실자는 없었다. 하지만 E/S1로 검은 연기가 통과하고 있어 해당 경로를 이용하는 재실자는 가시거리로 인한 인명피해가 발생할 것으로 보인다. 시간이 지남에 따라 18초 이후에는 (b)에서 보이듯이 E/S1에 일산화탄소와 온도에 대한 위험까지 더해져 독성가스, 열의 위험 또한 더해지게 된다. 45초 이후에는 (c)와 같이 Stair1, 3과 E/S1, 2, 3, 4에 가시거리와 일부 일산화탄소와 열에 대한 위험도가 확산되고, (d)와 같이 60초가 지난 후에는 피해범위가 더욱 넓어졌으며, 74초가 되었을 때 모든 인원이 지하1층으로 대피하였다. (e)에서 지하1층을 보면 15초부터 E/S1을 이용하는 재실자는 가시거리의 피해를 얻게 된다. 대부분의 인원이 지하1층으로 올라온 (f)를 보면 E/S4에는 가시거리에 대한 위험이, E/S2, 3과 Stair3입구 부분은 가시거리와 일산화탄소에 대한 위험이, E/S1에는 추가로 열에 의한 위험까지 가지게 되어 가시거리 미확보로 인한 출구로의 피난경로 확인이 어렵고, 일산화탄소의 독성가스에 유출될 수 있으며, 열에 의한 피해를 입어 인명피해가 높을 것으로 사료된다. 재실자들은 개찰구 부분에서 군집을 형성하게 되고, 이 인원들이 가장 가까운 EXIT5로 대피하고 있어 (g)와 같이 EXIT1, 2를 이용하는 인원이 발생하게 되며, 그러고 나서 120초에는 (h)와 같이 위험요소에 대한 피해 범위가 더욱 확장된다. 지하1층의 전체 재실자는 128초에 각 출구로 빠져나가 안전한 곳으로 피난을 완료한다.

화재의 위험도 분석 결과를 보면, 피난이 완료되는 128초를 기준으로 해당 지하철 역사는 온도에 대한 피해가 다른 요인들에 비해 낮았으며 가시거리의 경우 다른 요인들과는 달리 대피경로에 있는 계단이나 E/S외에 출구에 까지 위험을 줄 수 있는 요소로 확인되었다. 그리고 대피시 질식과 같은 인체에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 독성가스인 일산화탄소는 E/S1, 2, 3, 4에서 18~50초 안에 안전 기준치의 농도를 초과

하는 것으로 나타났다.

각 요소별로 화재 위험도 및 피난 안전성 평가를 수행한 결과는 Table 6에 나타내었다. 재실자가 피난시 이용하지 않는 EXIT2,3을 제외하고 결과를 보았을 때, Stair2,3,4에서는 피난시의 여유시간이 있어 안전하게 이용할 수 있지만 나머지 E/S1,2,3에서는 대피를

Table 6. Assessment of fire and evacuation safety (Unit: s)

	ASET			RSET	Margin
	Temperature	Visibility	CO		
Stair1	-	34.6	112.3	66	-31
Stair2	-	69.1	334.8	59	10
Stair3	-	49.0	345.3	41	8
Stair4	-	68.8	348.5	41	28
E/S1	18.3	12.3	18.4	74	-62
E/S2	-	41.4	43.6	68	-27
E/S3	40.3	15.5	50.1	48	-33
E/S4	72	40.3	50.4	-	-
EXIT1	-	294	-	101	193
EXIT2	-	154	-	-	-
EXIT3	-	161	-	-	-
EXIT4	-	293	-	104	189
EXIT5	-	174	-	128	46

Table 7. Risk assessment by fire on the evacuation route

Evacuation Route	Persons Using the Route (person)	Deaths and Injuries (person)			Risk Assessment
		Temperature	Visibility	CO	
B2-Stair1-B1-EXIT	272	0	150	0	Danger
B2-Stair2-B1-EXIT	232	0	0	0	Safety
B2-Stair3-B1-EXIT	20	0	0	0	Safety
B2-Stair4-B1-EXIT	17	0	0	0	Safety
B2-E/S1-B1-EXIT	263	241	261	241	Extremely dangerous
B2-E/S2-B1-EXIT	234	0	105	97	Extremely dangerous
B2-E/S3-B1-EXIT	27	4	26	0	Danger

완료하기 이전에 열, 가시거리, 일산화탄소에 의한 피해가 발생할 것으로 나타난다. 각 출구는 피난이 완료되는 시간 이후에 가시거리에 대한 위험 기준치가 측정되어 피난상황에서의 위험은 없는 것으로 보인다. 다시 말해, 출구에서의 위험도 보다는 출구로 향하는 경로인 계단이나 E/S에서 위험요소에 의한 인명피해가 발생할 것으로 보인다.

전체 피난 경로에 따라, 대피시의 가장 적합한 피난 경로를 분석하였으며 그 결과를 이동경로에서의 총 이용인원수, 사망 혹은 부상자, 위험도 평가에 따라 Table 7에 나타내었다. 그 결과 B2-Stair2-B1-EXIT, B2-Stair3-B1-EXIT, B2-Stair4-B1-EXIT의 경로를 이용하여 출구로 빠져나갈 경우는 안전하게 빠져나갈 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 B2-Stair1-B1-EXIT과 B2-E/S3-B1-EXIT은 가시거리 미확보로 건물내 피난경로 탐색을 위한 목표물 식별이 어려울 수 있으며, 열에 의한 피해를 입을 수도 있다. 위험한 이동경로는 B2-E/S1-B1-EXIT과 B2-E/S2-B1-EXIT로, E/S2를 통해 피난을 하는 전체 이용 인원(263명)의 약 40% 이상이 가시거리와 일산화탄소에 의한 피해로 인해 사망 또는 부상의 인명피해를 입을 것으로 보인다. 특히 E/S1은 이용인원의 90% 이상이 열과 가시거리, 그리고 일산화탄소 3가지 위험요소 모두에 노출되어 가장 위험한 경로로 판단된다. 그러므로 화재가 발생한 승강장을 기준으로 피난 시 위험에 이르기까지의 여유 시간에 따라 Stair2를 통해 지하1층으로 이동하여 출구로 빠져나간 인원들이 다른 경로를 이용한 인원보다 안전하게 피난할 것으로 판단된다. 또한 화재가 발생하지 않은 승강장에서는 Stair3, 4을 이용하여 피난하는 것이 안전할 것으로 사료된다.

4. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 인턴터미널역 역사를 대상으로 실내 공간 안에서 일어날 수 있는 화재상황에서의 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 FDS와 Pathfinder를 이용하여 인천교통공사로부터 수집한 지하철역사의 설계수치를 바탕으로 화재 및 피난 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에 20MW의 화재크기와 대피인원의 피난 안전성을 검토하기 위한 각각의 온도, 가시거리, 일산화탄소 감지기를 출구, 계단, E/S 등 역사내 5m x 5m 그리드 격자를 기준으로 설치하였으며, 지하철역사의 화재 발생시 피난에 대한 안전성 평가를 위하여 고시된 안전위험기준과 피난인원산정 방법을 바탕으로 ASET과 RSET을 산출하여 안전성 평가를 수행

하였다.

그 결과, 해당 시나리오에서의 화재 및 피난 상황에 대해 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 화재시뮬레이션에서 화재연기가 지하1층까지 상승하는데 E/S1에 약 15초, 출구인 EXIT5에 도달하는데 약 70초, 가장 멀리에 위치한 EXIT2,3까지는 약 150초로 나타난다. 이는 지하철내의 연돌효과로 인해 역사내 화재로 발생한 연기가 계단이라는 상승로를 통해 확산되고 열의 부력을 얻어 천장에 이르러 사방으로 빠르게 퍼지기 때문이다. 그래서 EXIT2,3보다 상대적으로 천장에서부터 발생하는 연기와 먼 EXIT1,4가 연기의 확산이 늦고, 그에 따른 가시거리에 대한 피해도 적은 것으로 분석되었다.
- 2) 화재 시뮬레이션을 통해 분석한 화재위험 인자 중에서 가시거리는 빠르게 확산되는 연기에 의해 안전 기준인 5m에 모든 경로와 출구에서 도달하게 되어 피난시의 시야확보와 피난행동에 많은 영향을 미칠 것으로 보인다. 특히 E/S1은 열과 독성가스(일산화탄소)의 피해까지 더해져서 대피 시 가장 위험할 것으로 보인다.
- 3) 피난시뮬레이션을 통해 전체 재실자의 피난 이동시간은 128초로 확인되었다. 재실자의 96%는 가장 가까운 출구인 EXIT5를 통해 대피하였고 나머지 4%만이 EXIT1,2를 이용하였다. 그 이유는 가장 가까운 출구에 병목현상이 발생되면서 다른 출구를 찾는 대피상황의 특성이 반영되었기 때문이다.
- 4) 화재 및 피난 시뮬레이션의 결과를 종합해 볼 때 대피 시 안전에 피해를 줄 수 있는 가시거리 및 온도, 일산화탄소에 대한 위험도가 가장 높은 E/S1이 포함된 경로를 이용할 경우 피난 시 매우 위험할 것으로 보인다. 가장 안전한 경로로는 화재 승강장의 재실자는 STAIR2를 이용하는 것이고, 다른 승강장은 STAIR3,4를 통해 출구로 대피하는 것으로 확인되었다. 해당 시나리오에서 E/S보다 계단을 이용하는 것이 더 안전한 이유는 연기 및 독성가스의 확산 방향과 지하2층에서 지하1층으로 올라가는 E/S입구가 같은 방향으로 위치하고 있어 반대 방향인 계단보다 연기의 확산과 유입이 빠르게 되어 위험요소의 노출되기 쉽기 때문이다.

시뮬레이션 결과, 대피시 가장 위험한 요인으로써 가시거리 미확보와 독성가스로 인한 일산화탄소로 분석되었다. 이 중 가시거리 미확보는 안전한 장소로 빠

져나오기 위한 경로를 탐색하는데 어려움이 따를 것으로 보이며, 이에 효과적인 안전 피난경로로의 유도 등을 설치하여 재실자의 이동을 도울 필요가 있다. 일산화탄소 독성가스에 대한 피해는 연기의 확산으로 인해 빠르게 확산되므로 이를 대처하기 위한 방안으로 방화셔터를 활용할 수 있다. 하지만 방화셔터는 피난경로에 위치할 수 있어 재실자의 대피로를 차단할 수 있으므로 관리자 측면에서 방화셔터를 효율적으로 활용할 수 있는 방안이 필요하다. 그리고 앞에서 언급한 연돌효과로 인해 연기가 대피경로에 많이 확산되었을 경우, 실제 화재사례를 참고했을 때 계단을 통한 대피보다 터널을 이용하는 것이 더 안전할 것으로 판단된다.

본 연구는 실내공간의 구조적인 부분을 묘사하고 객실내 전기합선으로 인해 화재가 발생한 상황을 가정하여 지하철 역사를 대상으로 온도, 가시거리, 일산화탄소에 대한 위험여부를 사전 모의실험으로 수행한 것으로, 피난상황에서의 안전한 이동동선 파악에 대한 의사결정에 도움을 줄 수 있었으나 향후에는 실질적인 실험 및 검증을 통해 결과를 입증할 필요가 있다. 또한, 주로 발생되고 있는 다양한 화재의 원인인 고압 전선에 대한 전기적 사고와 공사 중 과실에 의한 화재 사고와 같은 시나리오를 선정하여 피난시의 안전성 여부를 검토하고자 한다. 그리고 보행자의 행동특성에서 대피시 보행자간의 충돌과 충돌시의 회복할 때까지의 기다림 등의 세부적인 행동 사항을 적용할 필요성을 느꼈으며 이 부분에 대한 연구가 심층적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Hong, W. H; Jeon, G. Y. 2005, A study on safe egress countermeasure in Underground Space through the Analyzing survivors' exit patterns of Daegu city subway arson, Journal of the architectural institute of Korea, 21(1):235-242.
- [2] Jang, Y. J; Kim, H. B; Lee, C. H; Jung, W. S. 2008, The Study on Fire Phenomena in The Deeply Underground Subway Station, Journal of the Korean Society for Railway, June 1760-1767.
- [3] Jeon, H. J; Choi, Y. S; Choo, H. L. 2010, A Numerical Study for the Atrium Smoke Control by Fire Shutter and Evacuation, Korean Institute of Fire Science&Engineering, 24(5):50-59.
- [4] Kim, B. C; Kim, S. J; Kim, G. G; Lee, J. H; Kwon, Y. J. 2011, Simulation analysis for evacuation safety countermeasure in underground facilities, 2011(4):100-105.
- [5] Kim, J. H; Yoo, B. J; Hwang, E. K; Youn, H. J. 2012, Comparison of Experiment and Egress Modeling for Bottleneck Effect, 28(1):93-100.
- [6] Michael, B; Dmitry, D; David, K. 2010, Optimization of Smoke Management System in Short Transportation Tunnels, Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, March 545-548.
- [7] Min, S. H. 2012, A Study on the Evacuation Risk of Simultaneous Fires from Exterior, Korean Institute of Fire Science&Engineering, 26(4):48-54.
- [8] MOLIT, 2010, Engineering instructions of Urban railway station, Transfer and Convenient facilities.
- [9] National Emergency Management. 2011, A Method and Standards for performance based fire safety design of the fire protection system.
- [10] NFPA, 2000, "the SFPE handbook of fire protection engineering" NFPA Third Edition.
- [11] Kevin, M; Randall, M; Simo, H; Jason, F. 2010, Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide.
- [12] Kevin, M; Howard, B; Ronald R; William, M; Randall, M. 2010, Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide.
- [13] Park, S. J; Lee, J. S; Jung, E. H; Jeon, H. J; Park, S. B. 2007, Walking speed and stride length by age for the study, 2007 Fall Conference of Ergonomics Society of Korea, November 430-434.
- [14] Park, K. J; Lee, K. J; Lee, J. H; Shin, D., I. 2011, Smoke Control According to the Ventilation Capacity in Subway Tunnel Fire : I . FDS Simulation, The Korean Institute For Gas, 15(3):31-38.
- [15] Philip, J. D. 2002, The SFPE handbook of fire protection engineering 3rd edition., Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association.
- [16] Rie, D. H. 2004, A Study of Heat and Smoke Exhaust to Subway Tunnel Direction, 2004, Journal of the Korean Society of Safety, 19(3):1-8.
- [17] Size Korea, <http://sizekorea.kats.go.kr/>.
- [18] Sonh, Y. S. 2008, Analysis of Heat and Smoke Behavior using Fire Dynamics Simulator in the

Subway Fires, Myongji University Master's Thesis.

- [19] Thunderhead Engineering. 2011, Pathfinder User Manual.
- [20] Yuan, J. P; Fang Z; Tang Z; Sun J. Y. 2011, Performance-Based Fire Safety Assessment of City Underwater Tunnel, The 5th Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering, Procedia Engineering, 11:86-90.

논문접수 : 2013.09.03

수 정 일 : 2013.12.02

심사완료 : 2013.12.29