

Enthalpy Equation을 이용한 고층 건물의 제연해석 Numerical Analysis of Smoke Control for high-rise Building Considering with the Enthalpy Equation

배승용 · 노경철 · 고권현* · 유홍선†

Sung-Ryong Bae · Kyoung-Chul Ro · Gwon-Hyun Ko* · Hong-Sun Ryou†

중앙대학교 기계공학부, *동양대학교 건축소방행정학과
(2010. 3. 17. 접수/2010. 8. 16. 채택)

요 약

최근 도시 중심의 산업화에 의한 도시 내 인구 밀도의 증가는 생활환경의 고밀화, 집적화를 초래하였다. 이에 따라 도시 내에는 다수의 인원을 수용할 수 있는 다수의 고층 건축물이 축조되고 있는 추세이다. 하지만 고층 건물은 건물의 구조적 특성에 의해 화재발생 시 수직적 통로를 통한 연기확산속도가 증가하게 되어 높은 인명피해를 야기하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 고층건물의 제연해석을 위해 개발된 ASCOS 프로그램을 기반으로 엔탈피 보존방정식을 추가하여 에너지 전달을 고려한 제연해석 프로그램(CAU_ESCAP)을 개발하였다. CAU_ESCAP은 ASCOS의 제연해석결과와 비교를 통해 프로그램의 타당성을 검증하였으며, 건물 내 화재 발생에 대해 적용하여 건물 내 제연 특성을 분석하였다.

ABSTRACT

Recently, increases of population density due to the industrialization in the metropolitan cities has caused the high-density and integration of life environment. Then various high-rise buildings are constructed for accommodation. However, high-rise building fires can cause high casualties due to increases of smoke spread velocity through the vertical shaft. In this study, the new program based on the enthalpy conservation for analysis of energy transfer for smoke control system, CAU_ESCAP, was developed. CAU_ESCAP was validated by comparing with the result of ASCOS. The characteristic of smoke control was analysed by using CAU_ESCAP for high-rise building fires.

Key words : Analysis of smoke control, High-rise building, Enthalpy conservation

1. 서 론

최근 도시 중심의 산업화에 의한 도시 내 인구밀도의 증가는 생활환경의 고밀화, 집적화를 초래하였다. 이에 따라 도시 내에는 다수의 인원을 수용할 수 있는 대형 건축물이 축조되고 있는 추세이다.¹⁾ 건물의 대형화 및 고층화는 수직적 공간의 활용을 통해 토지의 효율성을 높인다는 장점을 가지는 반면, 일반건물에 비해 복잡하고 긴 이동경로는 재실자의 피난시간을 증가시켜 화재 등의 재난에 취약하다는 단점을 가지고 있다. 또한 고층 건물의 경우 외기와의 압력차에 의해 발생하는 연돌효과에 의해 엘리베이터실, 계단실 등의 수

직적 통로를 통한 연기확산속도가 증가하게 되어 높은 인명피해를 야기한다.²⁾

북미 지역에서 발생한 대표적인 고층건물 화재사례로는 One New York Plaza 화재(1970), MGM Grand Hotel 화재(1980), Inn on the Park Hotel 화재(1981), First Canadian Place 화재(1983), First Interstate Bank of California 화재(1988) 등이 있다. 이러한 화재에서는 화재 발생 후 계단실, 엘리베이터실, 덕트 등을 통해 건물 전층으로 연기확산이 이루어져 높은 인명피해를 야기하였다.³⁾ 그러므로 고층건물 화재시 유독가스에 의한 인명피해를 저감하기 위하여 연기의 발생과 이동경로, 연층 강하시간 등을 분석하고, 제연방법 및 가압방식에 대한 연구가 요구되어 진다.

최근 고층건물 내 화재 발생 특성을 이해하고 적절

† E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

한 제연 및 가압방식을 적용하기 위하여 고층 화재에 대한 실험 및 수치해석 모델을 이용한 화재 특성 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 건물 내 제연 및 가압에 대한 수치해석 연구의 경우 매우 복잡해 시스템의 특성에 대한 이해가 부족할 경우 높은 오차율을 보이는 해석 결과를 도출하게 된다. Klote와 Fothergill은 제연시스템에 의한 정상상태 압력분포 및 건물 내부의 공기유동을 계산할 수 있는 ASCOS를 개발하였다.⁴⁾ 특히 ASCOS는 Champs Sur Marne 실험 결과와 비교하여 프로그램을 검증하였으며, 건물의 제연량 및 공기유동 해석에 주로 사용되어진다.⁵⁾ Walton은 건물 내 압력분포 및 공기유동의 계산 속도를 개선하는 알고리즘을 개발하였으며, 해석 대상건물의 모델링 방법을 개선하여 효과적인 프로그램 사용이 가능하도록 하였다.^{6,7)}

하지만 현재까지 개발되어 주로 사용되고 있는 제연 해석 프로그램은 화재에 의한 건물 내부의 온도변화를 무시하고, 각 구역간의 압력차만을 이용하여 공기유동을 계산한다. 이는 고온의 열원을 갖는 실제 화재특성을 무시하게 되어 건물 내부의 압력 계산 시 오차가 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 실험결과와 검증을 통해 개발된 ASCOS 프로그램을 기반으로 하여, 화재에 의해 발생하는 에너지 변화 및 각 실 간의 에너지 전달을 고려한 제연 해석 프로그램(CAU_ESCAP)을 개발하였다.

2. 제연해석 프로그램

2.1 질량 보존방정식

본 연구에서는 에너지 전달을 고려한 고층 건물 내 제연해석을 위하여 기존에 개발된 ASCOS 프로그램을 기반으로 하여 Enthalpy Equations을 추가하였다. 기존 ASCOS 프로그램에서는 건물 내 각각의 공간을 하나의 노드(Node)로 설정하고, 각각의 노드는 동일한 압력과 온도를 갖는다고 가정한다. 또한 노드 간 공기 유동은 공간의 중심 높이에서 발생한다고 가정하고 각각의 노드에 정의된 압력을 이용하여 유량을 계산하며, 공기의 유량은 아래의 식으로 정의된다.

$$\dot{m} = SCA \cdot \sqrt{2\rho|\Delta P|} \quad (1)$$

여기서 S는 압력차의 부호를, C는 유동상수(flow coefficient)를 나타내며 제연해석을 할 경우 일반적으로 0.6에서 0.7 사이의 값을 사용한다.⁸⁾ A는 공기가 흐르는 단면적을, ΔP 는 노드간 압력차를 나타내며, 노드간 압력차는 (2) 식을 이용하여 계산된다.

한국화재소방학회 논문지, 제24권 제4호, 2010년

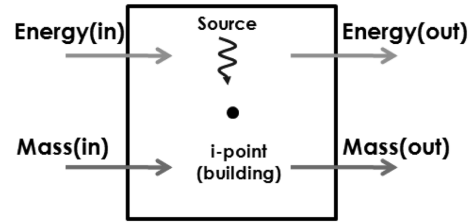


Figure 1. Applied types for flow calculation.

$$\Delta P = P_{(i)} - P_{(j)} - \frac{g\bar{P}}{RT}(z_{(i)} - z_{(j)}) \quad (2)$$

여기서 P_i , z_i 는 각각 i 노드의 압력과 높이를, g 는 중력가속도를, R 은 이상기체상수를, T , \bar{P} 는 각각 평균 온도와 평균압력을 나타낸다. 또한 반복계산을 통해 계산된 유량이 아래의 질량보존식을 만족하도록 압력을 보정한다.

$$\sum_{j=1}^{N_c} \dot{m}_{(i,j)} + \sum_{k=1}^{N_c} \dot{m}_{O(i,k)} + \dot{m}_{f(i)} = 0 \quad (3)$$

여기서 $\dot{m}_{(i,j)}$ 은 i 노드와 j 노드 사이에 흐르는 공기의 유동을, $\dot{m}_{O(i,k)}$ 은 i 노드와 외기 사이의 유동을, $\dot{m}_{f(i)}$ 은 i 노드에서 제연설비에 의해 발생하는 유량을 나타낸다. Figure 1은 하나의 노드에 적용되는 유동을 개략화한 것으로써, 해당 노드로 유입되는 유동은 (+)로 유출되는 유동은 (-)로 계산한다.

2.2 엔탈피 보존방정식

본 연구에서는 화재에 의해 발생하는 건물 내 온도 변화 및 에너지전달은 정압준평형(Constant Pressure Quasi-Equilibrium) 과정으로 이루어진다고 가정하였다. 정압준평형 과정의 열전달은 엔탈피 변화량과 같으며, 엔탈피 변화량에는 내부에너지의 변화량과 과정동안 시스템이 한 일을 포함한다.⁹⁾ 정압준평형 과정의 엔탈피 보존식은 아래의 식으로 정의하며, 이를 통해 해당 노드의 엔탈피 및 온도를 보정한다.

$$\sum_{j=1}^{N_c} \dot{m}_{(i,j)} h_{(i,j)} + \sum_{k=1}^{N_c} \dot{m}_{O(i,k)} h_{O(i,k)} + \dot{m}_{f(i)} h_{f(i)} = 0 \quad (4)$$

여기서 \dot{m}_α 는 각각의 질량유량을 나타내며, 질량 보존방정식을 통해 계산된 유량 값을 사용한다. 또한 각각의 엔탈피에 사용된 아래첨자의 의미는 질량유량에서 사용된 방법과 동일하게 사용되며, 엔탈피 전달은 질량보존방정식을 통해 계산된 공기의 유동방향과 동일하다.

2.3 공기유동과 에너지 전달의 연계

질량보존방정식 및 엔탈피 보존방정식을 통해 계산된 건물내부의 압력과 온도를 통해 각 노드 간의 보정 유동상수(Adjusted Flow Coefficient)를 계산한다. 이를 통해 건물 내부의 압력 및 노드 간 공기의 유동 계산시, 엔탈피 보존 방정식을 통해 계산된 건물 내부의 에너지 전달의 영향과 연계하여 계산될 수 있도록 하였다. 이 때 노드 간 보정유동상수는 아래의 다음과 같이 정의된다.

$$C = CA \sqrt{\frac{2P_{atm}}{RT}} \tag{5}$$

여기서 A는 각 노드간의 유동면적을, R은 이상기체상수를, T는 해당노드의 온도를, P_{atm}은 외기압력을 나타낸다.

또한 개발된 프로그램에서는 건물 내 압력장 및 유동, 에너지 전달은 반복계산을 통해 계산되어지며, 각 값의 오차를 계산을 통해 반복계산의 수렴도를 판단한다. 오차율을 일반적으로 상대오차를 통해 계산되어지며,¹⁰⁾ 개발된 프로그램에서는 오차허용치를 10⁻³으로 설정하였다. 이 때 상대오차는 아래의 식을 통해 계산되어진다.

$$\epsilon_a = \frac{X^{i+1} - X^i}{X^{i+1}} \tag{6}$$

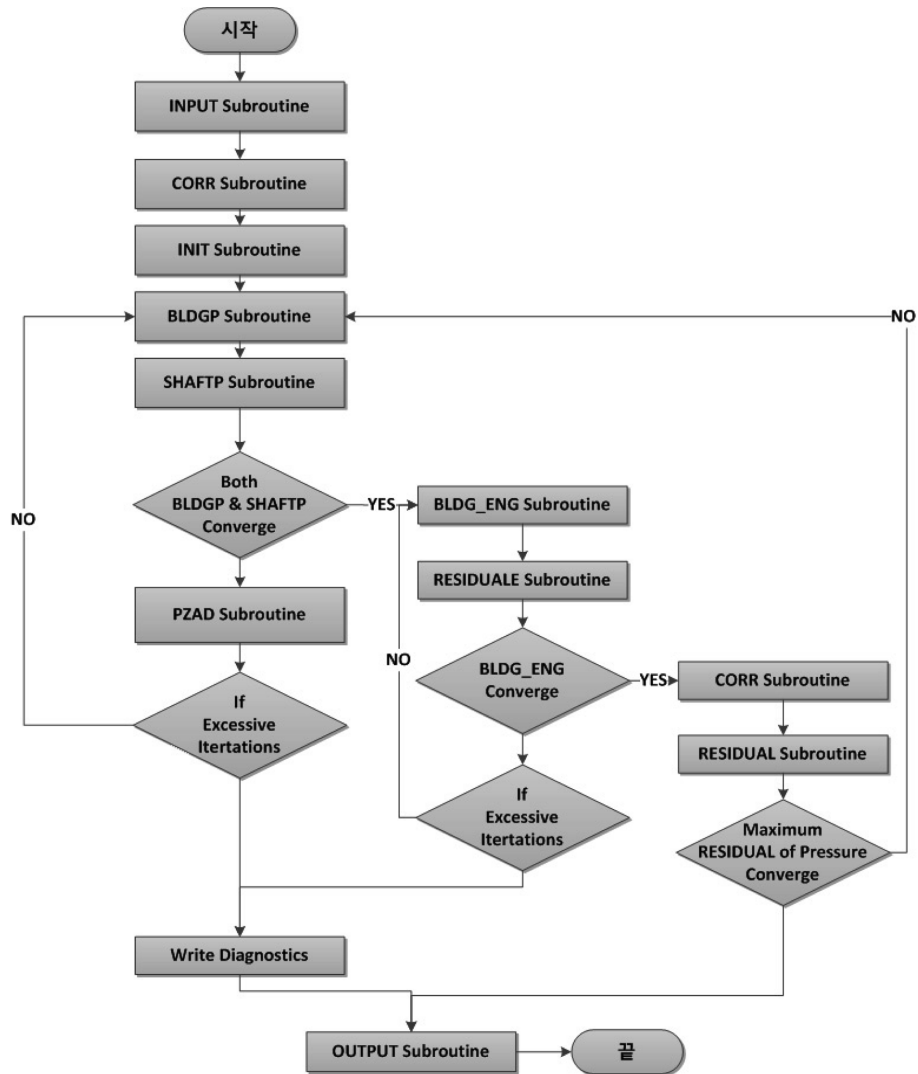


Figure 2. Flow chart of CAU_ESCAP program.

여기서 X 는 i 번째 반복 계산에서의 계산 결과 값을 나타낸다.

2.4 에너지전달을 고려한 제연해석 프로그램의 개요

Figure 2는 개발된 프로그램(CAU_ESCAP)의 구성도를 나타내는 것으로써, 건물 내부의 압력장 및 공기유동을 계산하는 BLDGP, SHAFTP와 화재에 의해 발생하는 건물 내부의 온도변화를 계산하는 BLDG_ENG, 각 노드간의 보정유동상수를 계산하는 CORR 서브프로그램으로 구성되어있다.

제연해석 프로그램은 건물 내 압력장 및 유동을 계산하고, 계산된 유량을 이용하여 각 노드간의 엔탈피 전달을 계산하도록 하였다. 또한 각 서브프로그램을 통해 계산된 각 노드의 압력 및 온도를 이용하여 각 노드 간의 보정유동상수를 계산하도록 하여 건물 내부의 유동 계산이 각 노드간의 에너지 전달과 연계되도록 하였다.

3. 프로그램의 적용 및 결과 고찰

3.1 제연해석(CAU_ESCAP) 프로그램 검증

본 연구에서는 ASCOS 프로그램을 기반으로 화재에 의한 에너지 전달을 고려한 제연량 도출 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램(CAU_ESCAP)의 검증은

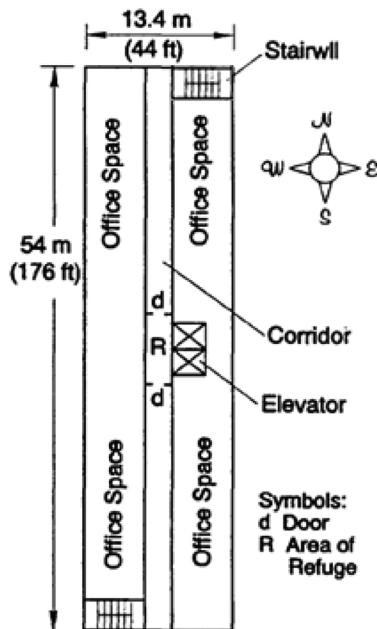


Figure 3. The floor plan of the building.

Table 1. Leakage Areas for Each Nodes

Location	Leakage Area (m ²)
1st Floor (Door Open, East)	0.975
1st Floor (Door Open, West)	0.975
Others (Closed Windows, East)	0.0204
Others (Opened Windows, East)	1.86
Others (Closed Windows, West)	0.0204
Others (Opened Windows, West)	1.86
Stair to Building (Closed Door)	0.0251
Building Floor	0.0204
Building to AOR (Closed Door)	0.0390
AOR to Hoistway (Closed Door)	0.149

Table 2. Conditions for Analysis

Property	Value
Building Temperature	21°C
Fire Floor Temperature	900°C
Outside Temperature	21°C
Wind Velocity	0 m/s
Height of Floor	3.05 m
Total Floors	11 story

Klote¹¹⁾가 ASCOS 프로그램을 통한 피난안전구역(Area of Refuge) 내 제연설비의 해석 조건을 이용하여 수행하였다. 프로그램 검증은 11층 건물을 이용하여 적용하였으며, 건물의 도면은 Figure 3에 나타나있다. 건물 내 복도와 사무실 사이의 문은 모두 개방되어있다고 가정하였다. 이 경우, 복도와 사무실의 압력은 같다고 볼 수 있으며, 이를 통해 복잡한 구조의 건물을 하나의 노드로 간주하여 계산이 가능하다. 또한 피난안전구역은 복도와 사무실로 설정된 노드와는 별개의 노드로 설정하였으며, Table 1과 2는 개발 프로그램의 검증에 적용된 각 노드 간의 유동단면적 및 계산 조건을 나타낸다. 특히 건물 내·외부의 온도 조건은 건물 내부의 각 노드 간, 또는 건물 내부의 노드와 외기와의 열전달이 이루어지지 않도록 등온으로 설정하여 개발된 프로그램의 검증을 실시하였다.

Table 3는 ASCOS 및 CAU_ESCAP를 이용하여 계산된 결과를 나타낸 것으로써, 2층으로부터 11층까지 피난안전구역과 건물 사이의 압력차를 나타내었다. 결과를 통해 알 수 있듯이 정압준평형 과정의 열전달을 고려한 프로그램을 이용하여 건물 내 압력 및 공기의

Table 3. Pressure Difference between AOR and Building from 2nd to 11th Floor (Pa)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ASCOS	34.9	33.7	33.6	33.6	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5
CAU_ESCAP	34.9	33.7	33.6	33.6	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5

Table 4. Pressure Difference between AOR and Building from 2nd to 11th Floor (Pa, Fire Situation)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ASCOS	33.2	31.2	30.8	30.8	30.7	30.7	30.8	31.1	33.3	80.9
CAU_ESCAP (Close Case)	33.2 (43.2)	31.1 (41.2)	30.8 (41.2)	30.7 (41.2)	30.7 (41.1)	30.7 (41.1)	30.8 (41.1)	31.1 (41.1)	33.3 (41.0)	80.9 (-6.4)

유동을 계산할 경우, 기존 프로그램과 동일한 결과를 보인다. 이를 통해 CAU_ESCAP 프로그램 내의 에너지 전달 계산이 전체 제연해석에 영향을 주지 않으며, 고층 건물 제연해석의 타당성을 검증하였다.

3.2 건물 내 화재상황에 대한 제연해석

고층건물 내 화재 시 에너지전달을 고려한 제연해석을 위하여 프로그램 검증에서 사용된 건물을 선정하였다. 각 노드설정 및 노드간의 유동 면적, 해석 조건은 프로그램 검증에서 적용된 값과 동일하게 적용하였다. 또한 화재는 11층의 소파에서 발생한 것으로 설정하였으며, 소파에 의해 발생하는 발열량은 3MW이다.¹²⁾ 화재가 완전발달 된 경우 해당실의 온도는 800~1000°C로써¹²⁾ 본 연구에서는 900°C 설정하였으며, 화재층에서는 화재에 의해 창문이 파괴된 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 해석을 수행하였다. 또한 (7) 식을 이용하여 화재층에서 발생하는 연소가스의 발생유량을 계산하였다.

$$HRR = \dot{m}\Delta H_c \tag{7}$$

여기서 HRR은 발열량을 나타내며, \dot{m} 은 질량감소량을, ΔH_c 는 연료의 연소열을 나타낸다. 본 연구에서

는 화재에 의해 감소되는 연료의 질량이 모두 연소가스로 발생된다고 가정하여 화재층에서 발생하는 연소가스의 발생유량을 산정하였다. 또한 소파의 연소열은 폴리우레탄의 값을 이용하였다.

Table 4는 ASCOS 및 개발된 프로그램을 이용하여 11층에서 화재가 발생할 경우의 피난안전구역과 건물 사이의 압력차를 나타낸 것으로써, 건물과 외기 사이의 창이 개방된 경우 화재실의 압력이 감소하게 되어 화재실과 피난안전구역간의 압력차가 증가하였다. 또한 Table 5는 화재실의 창문의 조건에 따른 건물 내부의 엔탈피 및 온도를 나타낸 것으로써, 화재실의 창문이 열려있는 경우 내부 온도가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 피난안전구역 및 계단실로부터 저온의 공기가 화재실로 유입되고, 화재실의 에너지가 외기와 열전달을 통해 에너지를 잃게 되어 이와 같은 결과를 예측하는 것이다. 또한 Table 6은 화재실과 타 구역 간의 공기의 유동량을 나타내고 있으며, 화재층과 외기 및 피난안전구역과의 유동을 제외한 부분에서는 10Pa 미만의 차압에 의해 발생한 유량으로써 이 부분을 통한 유동량의 매우 작음을 알 수 있다. 이를 통해 층간, 화재실-계단실 간의 에너지전달 역시 타 구간간의 에너

Table 5. Temperature Result in Building from 8th to 11th Floor (°C)

	ASCOS					CAU_ESCAP				
	Building	AOR	STAIR1	STAIR2	Elevator	Building	AOR	STAIR1	STAIR2	Eleavtor
8	21	21	21	21	21	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.1)	21.0 (21.1)	21.0 (20.9)
9	21	21	21	21	21	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	20.9 (21.2)	20.9 (21.2)	20.9 (20.8)
10	21	21	21	21	21	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	20.8 (21.3)	20.8 (21.3)	20.8 (21.1)
11	600	21	21	21	21	899.7 (900.0)	20.7 (21.4)	20.7 (21.4)	20.7 (21.4)	20.7 (20.6)

Table 6. Flow Rate through the Each Leakage Area from 8th to 11th Floor (liter/s)

	CAU_ESCAP					
	Building - AOR	AOR - Elevator	Building - Stair1	Building - Stair2	Below Building	Building - Outside
8	181.6 (210.0)	368.2 (416.2)	-44.1* (-24.5)	-44.1* (-24.5)	7.1 (-6.0)	-134.0* (-187.4)
9	182.6 (209.9)	375.8 (410.2)	-40.3* (-27.3)	-40.3* (-27.3)	14.4 (-9.9)	-133.2* (-187.6)
10	188.8 (209.6)	405.6 (385.5)	-1.0* (-36.6)	-1.0* (-36.6)	32.8 (-19.9)	-129.1* (-188.6)
11	294.6 (-41.5)	540.2 (-30.3)	157.4 (-81.7)	157.4 (-81.7)	150.5 (-51.1)	-790.4* (-114.5)

지 전달보다 작음을 알 수 있으며, 화재층 아래 구역에서는 소량의 에너지를 잃게 되므로 Table 5와 같은 온도결과를 예측하는 것이다. 화재실의 창문이 닫혀있는 경우 화재실과 외기와의 에너지 전달이 적게 이루어지게 되어 화재에 의해 발생하는 에너지가 건물 내부로 전달되어 건물 내부 온도 및 압력이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 화재실의 창문이 닫혀있는 경우 화재실의 압력이 증가하게 되어 화재실과 피난 안전구역간의 압력차가 -6.4Pa로 나타나고 있으며, 피난안전구역의 출입문에 높은 역압을 가하게 되어 해당층의 피난 안전구역의 역할을 하지 못하게 될 것으로 판단되어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 제연설비의 설계기준을 제시하는데 주로 사용되어지는 제연량 도출 프로그램을 기반으로 하여, 정압준평형 과정의 열전달을 계산할 수 있는 CAU_ESCAP 프로그램을 개발하여

1. 대상건물에 에너지전달이 없는 경우에 대한 피난 안전구역과 건물간의 차압이 ASCOS와 동일하게 예측하는 것을 통해 CAU_ESCAP를 이용한 고층건물 내 화재 시 제연해석의 타당성을 검증하였다.

2. CAU_ESCAP 프로그램을 이용한 고층건물 내 화재 시 제연해석 결과, 외기와의 유동 면적이 충분하지 않을 경우 피난 안전구역으로 연소가스가 유입되어 피난 안전구역의 역할을 하지 못할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 소방방재청 차세대 핵심소방안전기술개발사업 중 초고층 건축물 피난을 위한 제연시스템 개발(KFI-00001)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 관계 제위께 감사드립니다.

한국화재소방학회 논문지, 제24권 제4호, 2010년

참고문헌

1. 국토해양부 국토정책실/도시정책관 건축기획과, “건축물통계”, 통계청(2009).
2. 박진철, “초고층 건물의 제연설비 기준”, 설비저널, Vol.38, No.11, pp.10-25(2009).
3. 유민영, 차광석, 박명식, “북미 초고층건물에서 화재 시 연기이동경로 사례”, 설비저널, Vol.36, No.2, pp.33-40(2007).
4. J.H. Klote and J.W. Fothergill, “Design of Smoke Control Systems for Buildings”, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.(1983).
5. J.H. Klote and X. Bodart, “Validation of Network Models for Smoke Control Analysis”, ASHRAE Transactions, Vol.91, No.2B, pp.1134-1145(1985).
6. G.N. Walton, “AIRNET-A Computer Program for Building Airflow Network Modeling”, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (1989).
7. G.N. Walton, “CONTAM93 User Manual”, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology(1994).
8. J.H. Klote, “Design Manual for Smoke Control Systems”, Fire Safety Journal, Vol.7, No.1, pp.93-98(1984).
9. R.E. Sonntag, C. Borgnakke, and G.J. Van Wylen, “Fundamentals of Thermodynamics”, Wiley, 6th Edition(2005).
10. S.C. Chapra and R.P. Canale, “Numerical Methods for Engineers”, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 5th Edition(2005).
11. J.H. Klote, “Design of Smoke Control Systems for Areas of Refuge”, ASHRAE Transactions, Vol.99, No.2, pp.793-807(1993).
12. J.G. Quintiere, “Principles of Fire Behavior”, Delmar Publishers(1998).