

제연해석 프로그램의 질량 및 엔탈피 보존식의 연계알고리즘 개선연구

배승용 · 고권현* · 홍기배** · 유홍선†

중앙대학교 기계공학부 · *동양대학교 건축소방행정학과 · **충주대학교 에너지시스템공학과
(2011. 3. 10. 접수 / 2011. 8. 5. 채택)

Modification of Coupling Algorithm between Mass and Enthalpy Conservation for Modified CAU_ESCAP

Sungryong Bae · Gwon-Hyun Ko* · Ki Bae Hong** · Hong Sun Ryou†

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*Department of Architecture and Fire Administration, Dongyang University

**Department of Energy System Engineering, Chungju University

(Received March 10, 2011 / Accepted August 5, 2011)

Abstract : For decreasing of the casualties and designing of the smoke control systems in the ultra high-rise building, the programs for analysis of smoke control were developed for prediction of smoke spread and distributions of pressure and temperature in building fire situation. In this study, coupling algorithm between mass and enthalpy conservations was modified for improving the applicability of the CAU_ESCAP which program can consider the energy transfer. The fire situation in ultra high-rise building was applied by using the modified CAU_ESCAP. Results of pressure difference predicted by modified CAU_ESCAP are higher than results of ASCOS as stack effect is generated due to the increasing of stairway temperature. Moreover, theoretically, the result of the neutral plane is more accurate than the result of ASCOS, in fire situation of ultra high-rise building.

Key Words : analysis for smoke control, coupling between mass and enthalpy conservation, modified CAU_ESCAP, ultra high-rise building

1. 서론

도시 중심의 산업화가 진행되면서 도시 내 인구 밀도가 증가함에 따라 대도시 내 생활환경이 고밀화, 집적화가 이루어지고 있다. 제한된 공간을 효과적으로 활용하기 위하여, 도시에서는 다수의 인원을 수용할 수 있는 초고층 건축물의 축조가 증가하고 있다¹⁾. 이러한 건축물의 고층화는 수직적 공간의 활용을 통해 공간의 효율성을 높인다는 장점을 가지는 반면, 화재 등의 재난에 취약하다는 단점을 가지고 있다. 또한 초고층 건축물의 경우, 외기와의 압력차에 의해 발생하는 연돌효과에 의해 엘리베이터실, 계단실 등의 수직적 통로를 통한 연기확산속도가 증가하게 되어 높은 인명피해를 야기한다²⁾.

북미지역에서 발생한 대표적인 고층건물 화재 사례로는 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. 이와 같은 화재에서는 화재발생 후 계단실, 엘리베이터실, HVAC(Heating, Ventilation and Air Conditioning) 시스템 등의 수직적 통로를 통해 건축물 전층으로 연기확산이 이루어지게 되어 높은 인명피해를 야기하였다³⁾. 최근 한국에서 발생한 대표적 고층건물 사례로는 부산의 우신골드스위트 화재(2010)가 있다. 이 화재의 경우 화염전파는 인화성이 강한 외벽체를 통해 이루어 졌다. 하지만, 외부에서 발생한 유독가스가 공조시스템의 덕트를 통해 건축물 전체로 전파됨에 따라 원활한 피난 활동이 이루어지지 못하였다. 또한, 건축물 내부로 유입된 유독가스에 의해 질식에 의한 사상이 발생할 수 있는 상황으로 발전하였다⁴⁾.

* To whom correspondence should be addressed.
efdmecc@cau.ac.kr

그러므로 초고층건축물 화재시 유독가스에 의한 인명피해를 저감하기 위하여 연기의 발생과 이동경로, 연층 강하시간 등을 분석하고, 제연방법 및 가압방식에 대한 연구가 요구되어 진다. 최근 초고층 건축물 내 화재 발생특성을 이해하고 적절한 제연 및 가압방식을 적용하기 위하여 고층 화재에 대한 실험 및 수치해석 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 건축물 내 제연 및 가압에 대한 수치해석 연구의 경우 매우 복잡하여 시스템의 특성에 대한 이해가 부족할 경우 높은 오차율을 보이는 해석결과를 도출하게 된다. 그러므로 송풍기, 댐퍼 등 제연 시스템에 대한 정확한 이해를 통한 수치해석 및 모델 개발이 필수적이다. Klote와 Fothergill⁵⁾은 제연시스템에 의한 정상상태 압력분포 및 건물 내부의 공기 유동을 계산할 수 있는 ASCOS를 개발하였다. 이후 Klote와 Bodart⁶⁾는 Champs Sur Marne(France)에서 실시한 실간 유동실험 결과와 비교하여 프로그램을 지속적으로 검증 및 발전시켰다. Walton^{7,8)}은 건물 내 압력분포 및 공기유동의 계산 속도를 개선하는 알고리즘을 개발하였으며, 해석대상건물의 모델링 방법을 개선하여 프로그램(CONTAM93)을 효과적으로 사용할 수 있도록 하였다.

하지만 일반적으로 사용되는 제연해석 프로그램은 고온의 화재에 의해 발생하는 건물 내부의 에너지전달을 무시하고 임의로 설정된 각 실의 온도 및 압력을 이용하여 공기의 유동을 계산한다. 이러한 경우 화재실은 높은 온도 및 발생유량에 의해 비현실적으로 높게 예측하고, 연기전파가 이루어지는 수직적 통로 내의 연돌효과의 예측결과는 부정확하다. 배송용 등⁹⁾은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 엔탈피보존방정식을 이용하여 건물 내 에너지전달을 고려할 수 있는 제연해석프로그램(CAU_ESCAP)을 개발하였다. 하지만 CAU_ESCAP은 보정유동상수를 이용해 질량보존 및 엔탈피보존의 연계함에 따라 수직통로(shaft) 내의 압력변화가 전체 계산에 영향을 미치게 되어 원활한 연계가 이루어지지 않는 단점을 가지고 있다. 이로 인하여 복잡한 구조를 갖는 초고층건축물에 화재를 적용하는 경우 수직통로(shaft) 내부에서 비현상학적인 온도분포 결과를 도출한다. 그러므로 본 연구에서는 온도와 밀도의 관계식을 이용하여 연계알고리즘을 개선하였으며, 초고층건축물 내의 화재현상을 모사하여 기존 제연해석프로그램과 비교하여 프로그램의 우수성을 검증하였다.

2. Modified CAU_ESCAP의 개발

2.1. 이론적 배경

본 연구에서 개발된 제연해석 프로그램은 각각의 공간을 하나의 노드로 설정하고, 각각의 노드는 동일한 압력과 온도를 갖는다고 가정하였다. 또한 노드 간의 유동은 공간의 중간높이에서 발생한다고 가정하여 질량유량을 계산하며, 모든 노드는 식(1)로 정의되는 질량보존방정식을 만족할 때까지 반복계산을 한다⁹⁾.

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

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

본 연구에서는 화재에 의해 발생하는 건물 내 온도변화 및 에너지전달은 정압준평형(constant pressure quasi-equilibrium) 과정으로 이루어진다고 가정하였다¹⁰⁾. 정압준평형과정의 열전달은 엔탈피 변화량과 같으며, 엔탈피 변화량에는 내부에너지의 변화량과 과정중 시스템이 한일을 포함한다¹⁰⁾. 정압준평형 과정의 엔탈피 보존식은 아래의 식으로 정의하며, 이를 통해 해당 노드의 엔탈피 및 온도를 보정한다.

$$\sum_{j=1}^{N_i} \dot{m}_{(i,j)} h_i + \sum_{k=1}^{N_i} \dot{m}_{O(i,k)} h_i + \dot{m}_{f(i)} h_{f(i)} \quad (2)$$

여기서 $\dot{m}_{(i,j)}$ 는 i 노드와 j 노드간의 질량유량을 나타내며, 질량 보존방정식을 통해 계산된 유량 값을 사용한다. 또한 h_i 는 i 노드로 유입/유출되는 엔탈피를 나타내며, 질량유량의 방향에 의해 i 노드의

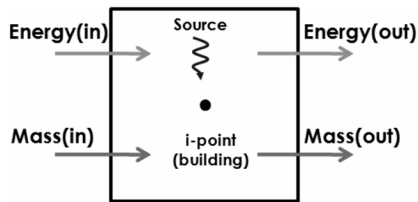


Fig. 1. Applied types for flow calculation.

값 또는 i 노드와 인접한 노드의 값이 적용된다. 또한 $h_{f(i)}$ 는 i 노드에서 발생하는 엔탈피를 나타낸다.

2.2. 해석알고리즘

Fig. 2는 개선된 프로그램(Modified CAU_ESCAP)의 구성도를 나타내는 것으로서, 각 노드의 압력 및 공기유동 계산 후 에너지전달을 계산한다. 또한 각 노드의 밀도를 계산함으로써 압력과 온도가 연계되어 계산되도록 알고리즘을 구성하였다.

Fig. 2의 part I은 각 노드의 압력 및 질량유량을 계산하는 루프로서 각각의 실과 수직통로(shaft)로 나누어 계산을 한다. 각 실의 압력 및 공기유동은 모든 노드에서 유입/유출되는 질량유량을 합한 값이 수렴한계(convergence limit) 이하가 되도록 계산하며, 본 연구에서는 수렴한계를 0.00002 kg/s로 설정하였다. 미지수인 압력을 구하기 위하여 구간반복법 중 하나인 가위치법(정규거짓, regular false)을 이용하였으며, 이는 미지의 해를 찾는 해석방법 중 연산속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다¹¹⁾.

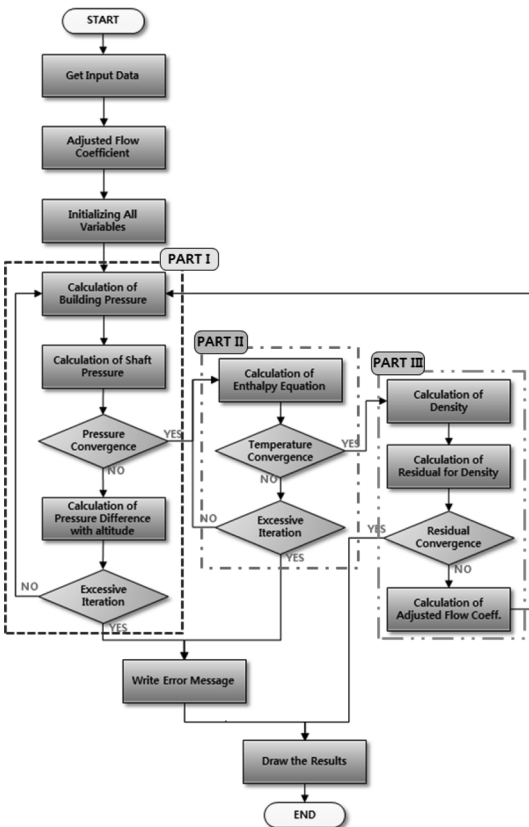


Fig. 2. Flow chart of modified CAU_ESCAP program.

수직통로의 압력 및 공기유동의 계산은 각 실의 계산방법과 유사하게 계산되어진다. 하나의 수직통로로 유입/유출되는 질량유량의 합이 수렴한계 이하가 되는 수직통로 내부의 압력을 계산한다. 또한 수직통로 내 높이에 따른 압력은 아래의 식으로 정의된다.

$$P_i = P_{i-1} - P_z - P_f \tag{3}$$

여기서 P_z 는 정수압력차, P_f 는 마찰손실을 나타낸다. 또한 높이에 따른 압력차와 마찰손실은 아래의 식으로 정의된다.

$$P_z = \frac{g\bar{P}}{RT}(z_i - z_{i-1}) \tag{4}$$

$$P_f = S \left(\frac{\dot{m}_u}{C_s} \right)^2 \tag{5}$$

여기서 z_i 는 i 노드의 높이, g 는 중력가속도, R 은 기체상수, \bar{P} , \bar{T} 는 각각 두 노드간의 평균압력, 온도를 나타낸다. 또한 S 는 질량유량의 방향, \dot{m}_u 는 수직통로 내에서 상승하는 공기의 질량유량, C_s 는 수직통로의 유동상수(shaft flow coefficient)를 나타낸다¹²⁾.

Fig. 2의 part II는 각 노드간의 에너지 전달을 계산하는 루프로서 압력 및 질량유량의 계산과는 달리 각 실과 수직통로로 나누지 않고 각각 개별적인 노드를 설정하여 각 노드에 대하여 식 (2)를 적용한다. 이 때 하나의 수직통로를 단일노드로 설정하지 않고, 층별로 노드를 나누어 계산한다. 또한 모든 노드의 유입/유출 에너지의 총합이 수렴한계 이하가 되는 엔탈피 및 온도를 계산하며, 수렴한계는 10 J/sec로 설정하였다. 에너지 전달 역시 압력 및 공기유동 계산과 동일하게 가위치법을 이용하여 해를 계산한다.

Fig. 2의 part III는 질량보존방정식 및 엔탈피보존방정식에 의해 계산된 각 노드의 압력 및 온도, 노드 간 질량유량의 수렴을 판단하는 루프로서 에너지전달 계산을 통해 도출된 온도를 이용하여 밀도를 계산한다. 본 연구에서는 실내의 압력변화가 크지 않으며 밀도는 오직 온도에만 의존하여 변한다고 가정하였으며, 압력이 일정할 경우 온도와 밀도는 다음의 관계를 갖는다¹³⁾.

$$\rho = 360.77819 T^{-1.00336} \quad (6)$$

여기서 T 는 각 노드의 온도를 나타내며, 켈빈온도를 이용하여 계산되어진다.

본 연구를 통해 개선된 프로그램(modified CAU_ESCAP)은 Fig. 2의 part I과 part II 두 루프의 반복 계산을 통해 각 노드의 압력 및 온도, 노드간의 질량유량을 계산한다. 이 때 반복계산의 수렴여부의 판단은 에너지전달 계산 전후의 밀도 값에 대한 오차율을 통해 이루어진다. 오차율은 일반적으로 상대오차를 통해 계산되어지며¹⁴⁾, 본 연구에서는 오차허용치를 10^{-3} 으로 설정하였다. 이 때 상대오차는 아래의 식과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_a = \frac{X^{i+1} - X^i}{X^{i+1}} \quad (7)$$

여기서 X^i 는 에너지전달 계산전의 결과 값을 나타내며, X^{i+1} 은 에너지전달 계산 후의 결과 값을 나타낸다.

각 노드의 밀도를 이용해 계산된 상대오차의 크기가 오차허용치보다 클 경우, 각 노드의 압력 및 질량유량을 다시 계산한다. 이 때 질량유량의 계산을 간단히 하기 위해 설정된 보정유동상수를 갱신함으로써 엔탈피보존방정식을 통해 계산된 각 노드간 에너지전달의 영향을 질량보존방정식과 연계되도록 설정하였다. 이 때 질량유량의 계산을 간단히 하기위한 보정유동상수는 아래의 식으로 정의된다.

$$C' = \rho_i CA_{i,j} \quad (8)$$

여기서 C 는 유동상수를 나타내며 일반적으로 0.6에서 0.7사이의 값을 갖는다¹²⁾. ρ 는 공기의 밀도를 나타내며 엔탈피보존식 및 밀도-온도 관계식을 통해 도출된 값을 사용한다. 또한 $A_{i,j}$ 는 i 노드와 j 노드 사이의 유동면적을 나타낸다.

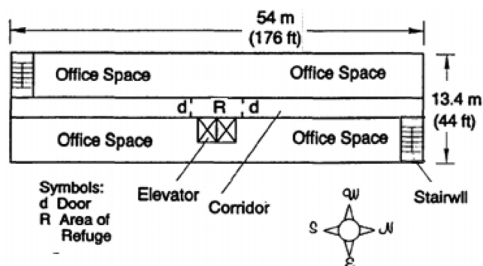


Fig. 3. The floor plane of the building for validation.

3. Modified CAU_ESCAP의 검증

본 연구에서는 질량보존방정식 및 엔탈피보존방정식의 연계알고리즘을 개선한 제연해석프로그램(Modified CAU_ESCAP)의 검증을 위하여 배송용 등⁹⁾이 적용한 Klote¹⁵⁾의 피난안전구역 내 제연설비의 해석조건을 이용하였다. Fig. 3은 적용된 건물의 도면을 나타내고 있으며, 건물 내 복도와 사무실 사이의 문은 개방되어 있다고 가정하였다¹⁵⁾. 개선된 프로그램 검증을 위한 대상건물은 총 11층으로서, 각 실 간 유동단면적 및 계산조건은 Table 1에 나타내었다^{9,15)}. 화재는 11층에서 3 MW의 크기를 갖고 완전발달하였다고 가정하였으며, 완전발달 한 화재는 플래시오버(flash-over) 발생 이후서 화재실의 창문은 모두 개방되었다고 가정하였다¹⁶⁾. 이 때 화재실의 온도는 일반적으로 800~1,000°C로 나타나고 있으며 본 연구에서는 화재실 및 화원의 온도를 900°C로 설정하였다⁹⁾. 또한 피난안전구역(Area of Refuge)의 연기유입을 차단하기 위한 제연시스템은 엘리베이터실 가압을 선택하였으며, 제연시스템의 발생유량은 5.4 kg/sec로 설정하였다¹⁵⁾.

Table 2는 대상건물 내 화재발생 시 2층부터 11층까지 피난안전구역과 사무실 사이의 차압결과를 나타낸 것으로서, 에너지전달을 고려한 제연해석 프로그램(CAU_ESCAP)과 이를 개선한 프로그램

Table 1. Leakage areas of each nodes and initial conditions for analysis

Leakage Areas for Each Node		Initial Conditions	
Location	Leakage [m ²]	Property	Value
1st Floor (Door Open, East)	0.975	Initial Temperature	21 °C
1st Floor (Door Open, West)	0.975		
Others (Closed Windows, East)	0.0204	Smoke Control System	Pressurizing Elevator (5.4 kg/s)
Others (Opened Windows, East)	1.86		
Others (Closed Windows, West)	0.0204	Mass Loss Rate of Fire	631.6 g/s
Others (Opened Windows, West)	1.86		
Stair to building (Closed Door)	0.0251	Fire Temperature	900 °C
Building Floor	0.0204		
Building to AOR (Closed Door)	0.0390	Fire Floor	11th
AOR to Hoistway (Closed Door)	0.149	Wind Velocity	0 m/s

Table 2. Pressure difference between AOR and office from 2nd to 11th floor [Pa]

	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	33.2	31.2	30.8	30.8	30.7	30.7	30.8	31.2	33.3	80.2
Modified CAU_ESCAP	33.2	31.2	30.9	30.8	30.8	30.8	30.8	31.2	33.2	81.9

(modified CAU_ESCAP) 모두 기존 제연해석프로그램(ASCOS)의 결과와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 건물 내 압력분포를 나타낸 Fig. 4를 통해 확인할 수 있듯이 엘리베이터실의 가압에 의해 건물 전체의 압력이 외기압력보다 높아지고, 화재실로부터 건물 내 타 공간으로의 공기유동이 발생하지 않게 된다. 이로 인하여 화재실에서는 화재에 의해 발생하는 에너지가 모두 외기로 방출되고 건물 내 에너지전달이 발생하지 않게 되어 CAU_ESCAP 및 Modified CAU_ESCAP이 피난안전구역과 사무실 사이의 차압결과를 ASCOS와 유사하게 예측하는 것이다. 이를 통해 에너지전달의 계산이 없는 경우 modified CAU_ESCAP의 엔탈피보존방정식 및 온도-밀도 관계식을 계산하는 루프가 전체 제연해석에 영향을 주지 않음을 확인하였으며 개선된 프로그램을 이용한 건물 내 화재 시 제연해석의 타당성을 검증하였다.

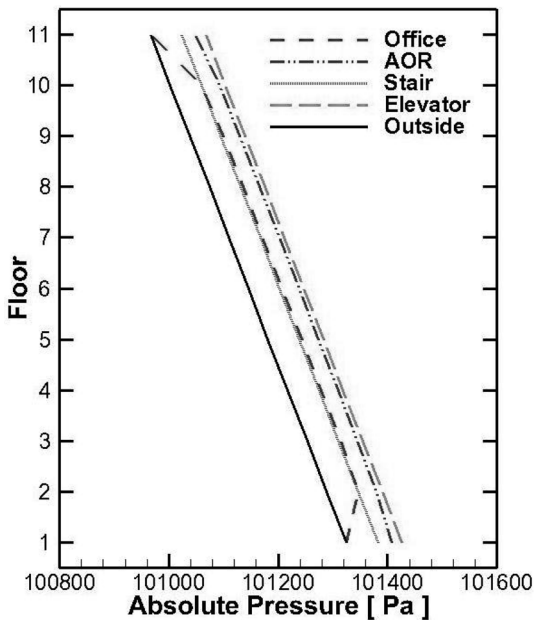


Fig. 4. Pressure distributions of building calculated by modified CAU_ESCAP.

Table 3. Temperature result in building from 1st to 11th floor [°C]

Floor	CAU_ESCAP				Modified CAU_ESCAP			
	Office	AOR	STAIR	Elevator	Office	AOR	STAIR	Elevator
1	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	128.5 (21.0)	20.9 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
2	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	128.6 (21.0)	20.8 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
3	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	128.7 (21.0)	20.7 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
4	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	51.0 (21.0)	20.6 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
5	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	35.8 (21.0)	20.5 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
6	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	20.4 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
7	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	20.9 (21.0)	20.3 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
8	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	20.8 (21.0)	20.2 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
9	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	20.7 (20.9)	20.1 (20.8)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
10	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	20.6 (20.8)	20.0 (20.8)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)
11	129.5 (899.7)	19.9 (20.7)	20.6 (20.7)	19.9 (20.7)	229.3 (229.3)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)	21.0 (21.0)

Table 3은 화재실의 초기온도를 21°C로 설정한 경우 CAU_ESCAP과 modified CAU_ESCAP의 온도결과를 나타낸 것으로서, CAU_ESCAP의 결과는 화재실의 초기온도를 900°C로 설정한 배승용 등⁹⁾의 결과(팔호 내 결과)에 비해 화재실 및 화재실과 직접 연결된 공간의 온도분포 결과에 차이를 보이고 있다. 이와 같이 기존 CAU_ESCAP의 경우 질량보존과 엔탈피보존의 불안정한 연계에 의해 복잡한 구조의 건물을 적용하였을 때 초기조건에 따라 다른 결과를 예측하는 오류가 발생하였다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 온도-밀도 관계식을 이용하여 질량보존과 엔탈피보존을 연계하는 알고리즘을 개발하였으며, 개선된 프로그램은 기존 CAU_ESCAP에 비해 현실적인 결과를 예측하고 있다. 이때 화재실의 온도는 약 230°C로 화재온도보다 낮게 예측하고 있으나, 이는 화재에 의해 발생한 에너지가 외기로 방출되어 이와 같은 결과를 예측하는 것이다. 이와 같이 modified CAU_ESCAP을 이

Table 4. Initial conditions of each simulation cases

	내부 온도	계단실 온도	외기 온도	화재위치
CASE1	-10°C	-10°C	-10°C	-
CASE2	-10°C	-10°C	-10°C	0.45 kg/s, 263 K (2층)
CASE3	-10°C	-10°C	-10°C	0.45 kg/s, 1173 K (2층)

용하여 화재상황에 적용한 차압 및 온도분포결과를 기존제연해석프로그램(ASCOS) 및 에너지 전달을 고려한 제연해석프로그램(CAU_ESCAP)과 비교함으로써 제연해석의 타당성 및 우수성을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구를 통해 개선된 제연해석프로그램을 이용해 초고층 건축물의 화재를 적용하였으며 제연해석에 일반적으로 사용된 ASCOS 프로그램의 해석결과와 비교하였다. Fig. 5는 해석대상건물의 개략도와 각각의 실에 대하여 이론식을 적용하는 방법을 나타내고 있다. 해석은 총 55층의 초고층 건축물을 대상으로 하였으며, 해석조건은 서보열 등¹⁷⁾의 연구 중 대조군으로 설정된 경우를 기반으로 하였다. Table 4는 해석에 적용된 경우에 따른 온도 초기조건을 나타내고 있으며, 모든 해석에서 각 실 간 문 및 창문을 통한 유동면적은 0.01 m²로 동일하게 설정하였다. case 1과 case 2는 건축물 내 에너지전달이 없도록 전체 조건을 -10℃로 설정하였으며, case 2와 case 3은 화재가 발생한 경우를 나타내고 있다. 특히 case 3은 고온의 열원을 설정함으로써 에너지전달 계산이 건물내부의 압력분포에 미치는 영향을 분석하였다. 이 때 화재는 10 MW의 크기로 건물의 최저층(2층)에서 발생한 것으로 가정하였다. 또한 화원의 연료는 전자제품에서 광범위하게 사용되고 있는 PMMA로 설정하여 연소가스의 발생유량을 계산하였다. 이때 연료의 질량감소율(Mass Loss Rate)은 아래의 식을 이용하여 계산된다¹⁸⁾.

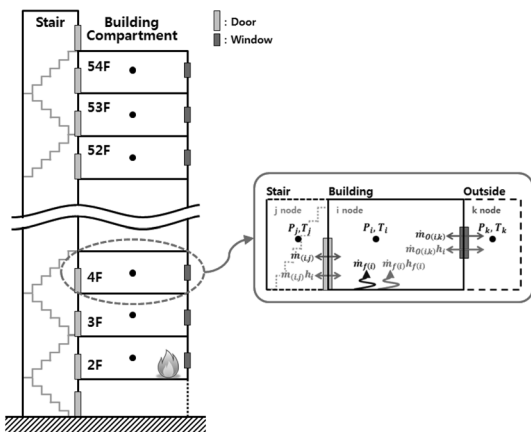


Fig. 5. Side view of the building and method for applying the theoretical base.

$$HRR = \dot{m} \Delta H_c \quad (9)$$

여기서 HRR 은 화재의 크기, \dot{m} 은 연료의 질량감소율, ΔH_c 는 물질의 연소열(heat of combustion)을 나타낸다. 본 연구에서는 화재에 의해 감소되는 연료의 질량이 모두 연소가스로 전환된다고 가정하여 화재실에서 발생하는 연소가스의 발생유량을 산정하였다.

Fig. 6은 case 1에 대한 건물 내 각 실과 계단실, 외기와 계단실 사이의 차압을 ASCOS 프로그램의 결과와 비교한 것을 나타낸다. 일반적으로 건물내부 및 외기의 온도가 모두 같을 경우, 각각의 실 및 수직통로의 압력은 대기압과 동일하게 나타나며 차압이 0이 되어 연돌효과가 발생하지 않는다¹⁹⁾. 그래프를 통해 알 수 있듯이 열전달을 무시하기 위하여 전체온도를 -10℃로 동일하게 설정한 case 1의 경우는 각 노드 간의 최대차압은 0.4 Pa 미만으로 나타나고 있으며, 계단실의 연돌효과가 거의 발생하지 않는 것을 확인하였다. 또한 개선된 프로그램(modified CAU_ESCAP)에서도 에너지 전달을 무시하고 계산하게 되어 ASCOS의 계산결과와 동일하게 예측하고 있다.

Fig. 7은 화재가 발생한 case 2와 case 3에 대한 기존 제연해석프로그램인 ASCOS의 각 실 간의 차

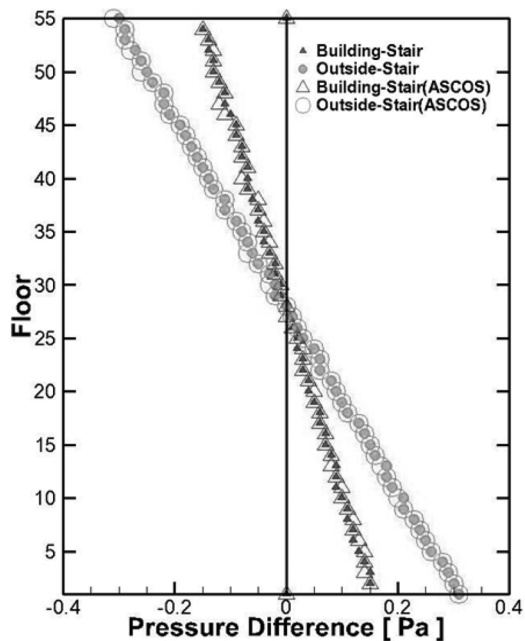


Fig. 6. Pressure difference between building and stair or outside for case1.

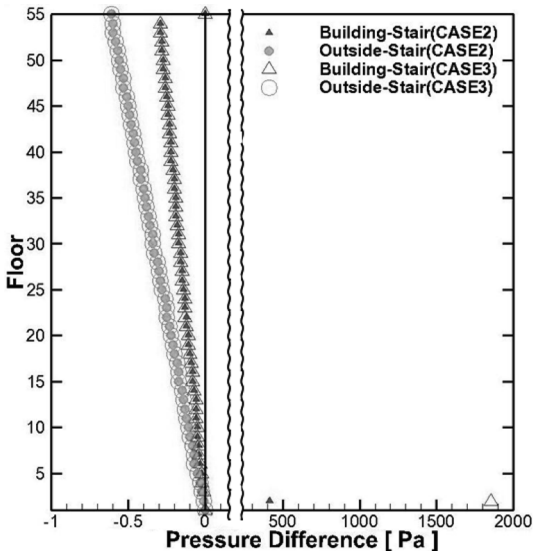


Fig. 7. Pressure difference between building and stair or outside for case2 and case 3 calculated by ASCOS.

압결과를 나타낸다. case 2와 case 3의 두 경우 모두 2층에서 0.45 kg/sec의 질량유량이 발생함에 따라 최상층의 최대 차압이 약 0.6 Pa로 증가하였으며, 차압분포는 화재가 발생한 2층을 제외하고 두 경우 모두 동일하게 예측하고 있다. 화재실로 설정된 2층의 경우 화재실과 계단실 사이의 차압은 각각의 경우에 따라 521 Pa, 1854 Pa로 예측되고 있다. case 3의 경우 화재실의 온도를 고온으로 설정함에 따라 화재실의 압력이 case 2에 비해 높게 예측되었다. 하지만 화재실과 계단실 사이의 높은 차압이 case 1의 계산결과와 비교하여 중성대(neutral pressure plane)의 변화를 제외하고 건축물 내 차압분포에 영향을 미치지 않고 있다. 이를 통해 화재의 영향이 오직 화재실에만 작용되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 건축물의 저층부에 공급(source) 유량이 있음에도 불구하고 중성대는 1층으로 낮게 예측하고 있으며, 이는 건물 저층부에서 화재가 발생한 경우의 일반적인 연돌효과 특성에 적합하지 않는 결과를 보이고 있다²⁰⁾. 이를 통하여 기존 에너지전달을 계산하지 않는 제연해석프로그램을 통해 건축물 내 화재현상을 모사하는 것은 현상학적으로 부적합함을 확인하였다.

Fig. 8은 초고층 건축물 내 화재발생을 고려한 경우인 case 3을 개선된 프로그램(modified CAU_ESCAP)을 이용하여 계산된 각 실 간 차압분포를 에너지전달을 무시한 case 2의 결과와 비교한 것이다. 에너지전달을 고려한 초고층 건축물 화재 모사는 에너

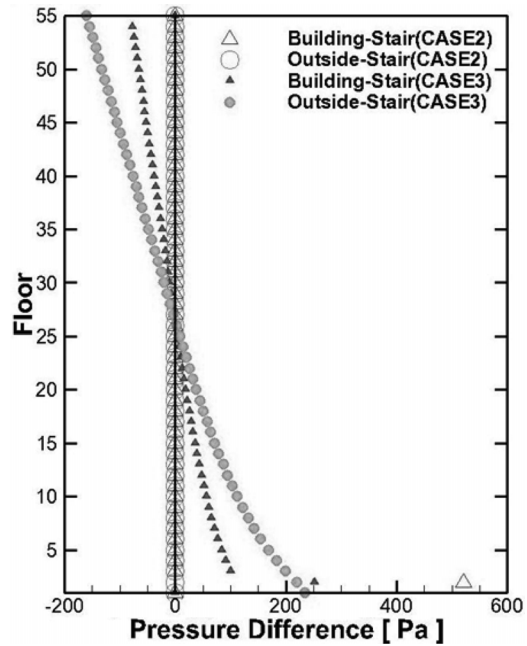


Fig. 8. Pressure difference between building and stair or outside for case 2 & 3 calculated by modified CAU_ESCAP.

지전달을 무시한 해석결과와 많은 차이를 보이고 있으며, 이는 Fig. 9를 통해 알 수 있듯이 고온의 화재로부터 발생하는 에너지전달이 계단실의 온도를 변화시킴에 따라 연돌효과가 발생하게 되어 높은 차압분포를 예측하게 되는 것이다. 실제 건축물 화재 역시 화재로부터 발생하는 고온의 생성물이 타 공간으로 이동하게 되며 복도 및 계단실 등의 타 공간의 온도가 증가하고¹⁶⁾, 이를 통해 계단실과 같은 수직적 통로의 온도가 증가하게 되면 외기온도와의 차이에 의해 차압이 발생하게 된다²¹⁾. 이와 같이 제연해석 시 고온의 화재에 의한 에너지전달을 고려하는 것이 건축물 화재모사에 현상학적으로 타당한 결과를 예측한다.

또한 개발된 프로그램은 저층부의 화재발생에 의한 건물의 중성대를 27층으로 예측하고 있으며, 일반적으로 건물 전체의 환기구의 크기가 동일할 때, 화재가 발생하면 건물의 중성대는 아래의 식으로 계산할 수 있다¹⁶⁾.

$$\frac{Z_N}{Z_B} = \frac{1}{1 + T_a/T} \quad (10)$$

여기서 T_a 는 외기온도, T 는 연기의 평균온도, Z_B

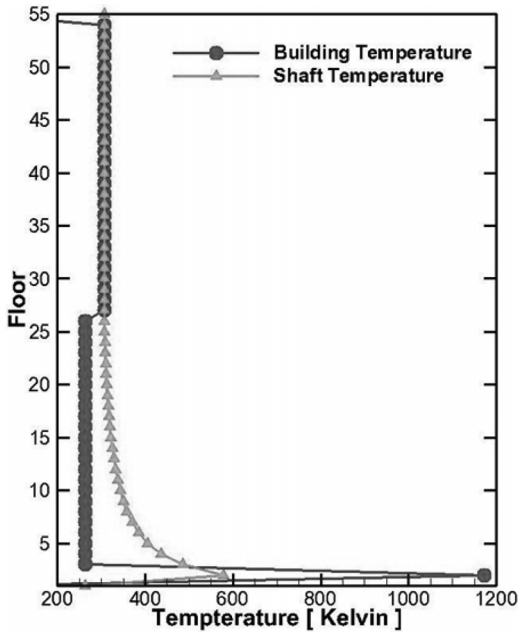


Fig. 9. Temperature distributions for case 3 calculated by modified CAU_ESCAP.

와 Z_n 은 각각 건물의 높이와 중성대의 높이를 나타낸다.

Fig. 9의 결과를 통해 연기의 평균온도를 307 K로 설정하여 식 (10)에 적용하는 경우, 중성대의 높이는 약 29층으로 계산되며 이를 통해 modified CAU_ESCAP의 결과가 중성대를 저층부로 예측하고 있는 ASCOS에 비하여 현상학적으로 정확하게 예측하는 것으로 사료된다.

5. 결론

제연설비의 설계기준을 제시하기위하여 일반적으로 사용되어지는 제연해석프로그램은 에너지전달을 고려하지 않아 실제 화재현상을 모사하는데 부적합하다. 이러한 문제를 해결하기위하여 본 연구에서는 배송용 등⁹⁾이 개발한 에너지전달을 고려한 제연해석프로그램(CAU_ESCAP)의 질량보존 및 에너지보존의 연계알고리즘을 개선하였다. 개선된 프로그램(modified CAU_ESCAP)을 Klote15의 엘리베이터실 가압 및 초고층 건축물의 화재상황에 적용하였으며 본 연구의 결론은 아래와 같다.

1) modified CAU_ESCAP을 이용해 엘리베이터실 가압을 적용한 결과 엔탈피보존방정식 및 온도-밀도 관계식을 계산하는 루프가 전체 제연해석에

영향을 주지 않으며 건물 화재 시 제연해석의 타당성 및 우수성을 검증하였다.

2) 기존의 제연해석프로그램(ASCOS)의 경우 화재의 영향이 화재실에서만 작용하는 반면, modified CAU_ESCAP은 고온의 화재에 의한 에너지전달이 계단실의 온도를 증가시킴에 따라 연돌효과가 발생하게 되어 높은 차압분포를 예측하고 있다.

3) modified CAU_ESCAP을 초고층 건축물의 화재상황에 적용할 경우 화재에 의해 발생하는 연돌효과 및 중성대의 변화를 기존 프로그램(ASCOS)에 비하여 현상학적으로 정확히 예측하는 것을 확인하였다.

감사의 글 : 이 연구는 소방방재청 차세대 핵심 소방안전기술개발사업 중 「초고층 건축물 피난을 위한 제연시스템 개발(KFI-00001)」의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 국토해양부 국토정책실/도시정책관 건축기획과, “건축물통계”, 통계청, 2009.
- 2) 박진철, “초고층 건축물 제연설비기준”, 설비저널, 제38권, 제11호, pp. 10~25, 2009.
- 3) 유민영, 차광석, 박명식, “북미 초고층건물에서 화재시 연기이동경로 사례”, 설비저널, 제36권, 제2호, pp. 33~40, 2007.
- 4) 최영, “해운대 우신골드스위트 화재!”, 소방방재신문, 2010.
- 5) J. H. Klote, J. W. Fothergill, “Design of smoke control systems for buildings”, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 1983.
- 6) J. H. Klote, X. Bodart, “Validation of network models for smoke control analysis”, ASHRAE Transactions, Vol. 91, No. 2B, pp. 1134~1145, 1985.
- 7) G. N. Walton, “AIRNET-A computer program for building airflow network modeling”, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1989.
- 8) G. N. Walton, “CONTAM93 user manual”, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1994.
- 9) 배송용, 노경철, 고권현, 유홍선, “Enthalpy Equation을 이용한 고층건물의 제연해석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 24, No. 4, pp. 27~32, 2010.

- 10) R. E. Sonntag, C. Borgnakke, G. J. Van Wylen,, “Fundamentals of thermodynamics”, Wiley, 6th Edition, 2005.
- 11) Carnahan, B., Luther, H.A. and Wilkes, J.O. “Applied numerical methods”, Wiley & Sons, New York, 1969.
- 12) J. H. Klote, “Design manual for smoke control systems”, Fire Safety Journal, Vol.7, No.1, pp. 93~98, 1984.
- 13) Anna Schwarz, Johannes Janicka, “Combustion noise”, Springer, pp. 114, 2009.
- 14) S. C. Chapra, R. P. Canale, “Numerical methods for engineers”, McGraw-Hill Science/Engineering/ Math, 5th Edition, 2005.
- 15) J. H. Klote, “Design of smoke control systems for areas of refuge”, ASHRAE Transactions, Vol. 99, No. 2, pp. 793~807, 1993.
- 16) J.G. Quintiere, “Principles of fire behavior”, Delmar Publishers, 1998.
- 17) 서보열, 최준호, 홍원화, “초고층 건축물의 개구부 개폐여부에 따른 연기확산 예측 및 연돌효과 저감방안”, 대한건축학회논문집 계획계, 제26권, 제9호, pp. 259~266, 2010.
- 18) J.S. Roh, S.S. Yang, H.S. Ryou, “Tunnel fires: experiments on critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation”, Journal of Fire Sciences, Vol. 25, No. 2, pp. 161~176, 2007.
- 19) J.H. Klote, “An analysis of the influence of piston effect on elevator smoke control”, NBSIR 88~3751, 1988.
- 20) J.Y. Zhang, W.Z. Lu, R. Huo and R. Feng, “A new model for determining neutral-plane position in shaft space of Building under fire situation”, Building and environment, Vol. 43, No. 6, pp. 1101~1108, 2008.
- 21) W.Z. Black, “COSMO-Software for designing smoke control systems in high-rise buildings”, Fire Safety Journal, Vol. 45, No.6-8, pp. 337~348, 2010.