

건축물 제배연시나리오 작성을 위한 구획실 발열특성 연구

김 정 엽[†], 신 현 준

한국건설기술연구원 건설품질정책본부

Study on Characteristics of Heat Release Rate in Compartment of Building for Scenario of Smoke Management

Jung-Yup Kim, Hyun-Joon Shin

Construction Quality Policy Dep., Korea Institute of Construction Technology, Koyang, 411-712, Korea

ABSTRACT: The theoretical bases on characteristics of heat release rate in compartment of building for scenario of smoke management are introduced and the numerical applications to simple compartment model are carried out. The growth stage which is important for smoke management design is modelled as t-squared fire curve including fire growth coefficient with related to growth rate. The conditions for the happening of flashover is presented such as 600°C of temperature or 20kW/m² of radiation heat flux. After the flashover happen, the fire in compartment changes to fully developed fire having the characteristics of ventilation-controlled fire. As the result of numerical analysis to simple compartment model, the time to reach 900K under ceiling for condition of medium growth is twice for condition of fast growth.

Key words: Heat release rate(발열량), Building fire(건축물 화재), Compartment(구획실), 제배연시나리오(Smoke management scenario)

1. 서 론

도시가 고도화·집적화되면서 건축물의 대형화, 고층화 및 복합화가 급격히 진행됨에 따라 화재에 취약한 건축물이 증가되고 있어, 인명안전을 위한 효과적인 화재대책의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 특히 화재시 피난 및 소화활동에 큰 지장을 초래하고, 인명안전에 가장 큰 위협이 되고 있는 연기의 제어를 위한 제연시스템의 중요성이 강조되고 있다. 화재사고시 인명손실의 50%이상이 연기에 의한 것으로 조사되고 있고,

초고층건물, 대공간, 멀티플렉스 및 대규모 지하공간 등의 증가세가 매우 가파를 것으로 예상되면서 실효성 있는 연기대응 기술의 확립이 요구되고 있으며, 이를 위해서는 각 건축물의 구조와 제연설비의 특성이 함께 고려되는 접근방안이 필요하다.

선진외국에서는 과거 대형화재사고인 MGM Grand 호텔, Roosevelt 호텔 및 Johnson City Retirement Center 화재에서와 같이 연기확산에 의한 질식사 사망의 주요원인이며, 이에 대처하기 위한 신뢰성 있는 제연시스템의 필요성을 오래전부터 인식하여, 연기생성·확산·제어분야의 이론적 기반 확립과 다양한 실험을 통하여 제연시스템 설계기술을 개발하여 왔으며[1,2], 효율성과 적용성을 확보한 제기준정립에 지속적인 투자를 하고 있다. 특히 실험 건축물

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-369-0506; fax: +82-31-369-0540

E-mail address: jykim1@kict.re.kr

을 대상으로 실제적인 제연시스템의 설계인자 연구와 성능실험을 수행하여 왔다[3,4].

국내 건축물의 피난안전확보를 위하여 국내 화재안전기준 NFSC501 (제연설비의 화재안전기준), NFSC501A (특별피난계단의 계단실 및 부속실 제연설비의 화재안전기준)에서는 제연구획에서의 연기배출 기준과 제연구역의 가압을 통한 연기침투 방지기준을 제시하고 있다.[5,6] 그러나 이러한 국내 제배연시스템 기준은 사양적인 지침 제시에 머무르고 있고, 관련기술은 외국의 연구결과와 경험에 크게 의존하고 있어 첨단 건축물 등에서 요구되는 화재안전을 위한 소요기술의 확보에 한계가 있는 것으로 파악되고 있다.

한편 사양적 설계개념과 다르게 건축물의 형태·용도·구조등의 차이에 따른 화재안전 대책을 제시하는 성능기반 설계개념이 국내외에서 활발히 연구되고 있다. 성능기반 화재안전 설계에서는 각 프로젝트별로 설계목적과 화재시나리오, 판정기준, 건축물 특성등을 설정하고 첨단기법의 해석틀을 사용하여 화재안전대책의 성능을 판단하게 된다. 따라서 건축물이 대형화, 고층화 및 복합화되어 가는 추세에서 이들 건축물의 화재안전을 효과적으로 담보하기 위해서는 신뢰성있는 성능기반 설계기법이 개발되어 설계에 적용되어야 한다.

건축물의 제배연시스템 설계 및 적용에 있어서도 효과적인 성능기반 설계기법의 개발이 이루어져야 하며, 이를 위해서는 우선 제배연 시나리오의 작성이 우선되어야 한다. 건축물에서 연기의 발생과 확산, 연기제어 및 배출의 과정은 발화, 화재성장, 발열량, 연기발생량, 건축물 구조·형태, 실간 압력차 형성, 제배연설비 등 다양한 인자에 의해 영향을 받으며 이러한 인자들을 적절히 반영해야 제배연시스템이 그 성능을 발휘할 수 있다. 제배연시스템의 설계와 운영에 관련된 인자들은 제배연시나리오로 정리될 수 있으며, 제배연시나리오는 크게 Fire/Smoke Development 시나리오, Building Characteristic 시나리오, 제배연시스템 시나리오로 구분될 수 있다.

본 논문에서는 건축물 제배연시나리오 작성을 위한 Fire/Smoke Development 시나리오 중에서 구획실내 화재에 의한 발열특성에 대한 이론적 기반과 간단한 수치해석 적용내용을 소개하고자 한다.

2. 이론분석

2.1 화재성장

건축물내 구획실에서의 화재는 일반적으로 Fig. 1과 같은 성장특성을 보여준다[7]. 초기 점화후 발달단계(Growth)에서는 구획조건이 화재 성장에 큰 영향을 미치지 않으며 구획실내 연소물질의 특징에 의해 화재성장 특성이 결정된다. 따라서 이 단계에서의 화재는 연료지배형 화재(Fuel-controlled fire)의 특징을 갖는다. 화재가 계속 발달하면 Flashover가 일어나게 되는데 Flashover 발생하면 화재가 구획실내 국한된 지역에서 전체 영역으로 급작스럽게 확산된다. 이는 연소화염과 구획실 천장 밑의 고온의 연기부터 발생하는 복사열에 의해 바닥의 물질들이 점화되는 것이다. 일반적으로 Flashover가 발생되기 위한 조건으로 연기온도가 600℃에 이르거나 바닥에서의 복사열이 20kW/m²로 제시된다. Flashover 후에 구획실내 화재는 완전발달단계(Fully Developed Fire)가 되며 이 때 구획실의 온도가 가장 높게 형성된다. 완전발달단계에서 화재의 발열량은 공급되는 공기량에 의해 결정되며 환기지배형 화재(Ventilation-controlled fire)의 특징을 갖는다. 즉 완전발달단계에서는 공급되는 산소와 반응하는 휘발성 연료보다 더 많은 연료가 기화되므로 산소공급측면에서 구획실내 개구부의 크기 등이 발열량에 영향을 끼치게 된다. 연료가 모두 소모되면서 화재는 소멸(Decay) 단계에 진입하고 열방출율과 구획실내 온도가 떨어지게 된다.

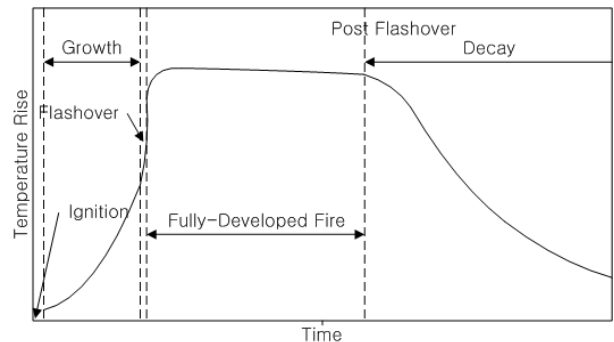


Fig. 1 The stages of fire development.

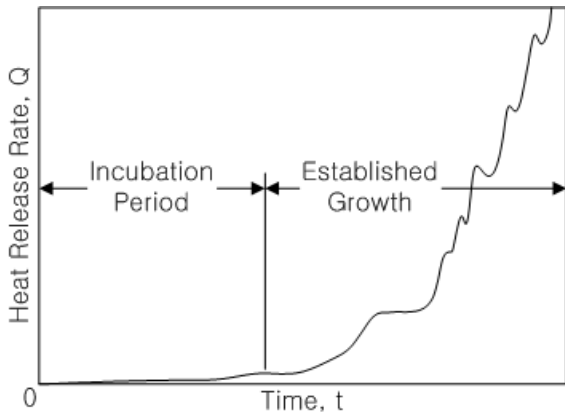
2.2 T-Squared 화재

제배연시나리오 작성을 위해서는 앞장의 언급한 화재성장 단계에서 초기 점화후 발달단계의 특성이 특히 중요하다. 즉 화재발생 후 초기상황에 재실자의 안전한 피난과 효과적인 제배연설비의 작동을 위해서는 발달단계의 화재특성을 파악하여야 한다.

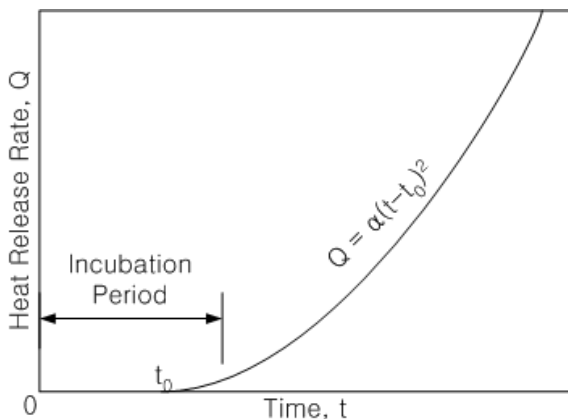
많은 경우에 발달단계의 화재성장을 Fig. 2 및 다음식과 같은 2차함수 곡선으로 표현할 수 있다.

$$\dot{Q} = \alpha(t - t_0)^2 \quad (1)$$

여기서 \dot{Q} 는 발달단계 화재의 열방출율, α 는 화재성장계수, t 는 점화후 시간, t_0 는 유효점화시간이다.



(a) Typical heat release rate curve



(b) Idealized parabolic curve

Fig. 2 Fire growth curves.

유효점화시간은 화재가 일어난 후 본격적으로 화재가 성장하기 전까지의 시간으로 제배연시스템의 설계시 생략할 수 있으며 식(1)의 t 을 유효점화시간이후의 시간으로 대체한다면 식(1) 다음과 같이 변경될 수 있으며 이를 t-squared 화재 곡선으로 명칭한다.

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (2)$$

NFPA 92B와 같은 선진외국의 제배연시스템 설계지침에서는 t-squared 화재의 발달특성을 slow, medium, fast, ultra fast로 분류하여 Table 1과 같이 각 발달특성에 대한 화재성장계수와 이를 적용할 수 있는 건축물 용도를 설정하고 있다.

Table 1 Fire growth coefficient for t-squared fire.

Case	α (kW/s ²)	Building use
Slow	0.002931	Gallery
Medium	0.01127	Dwelling, Office, Hotel
Fast	0.04689	Shop
Ultra Fast	0.1878	Industrial storage

2.3 Ventilation-Controlled 화재

구획실내 화재가 발달하여 Flashover가 일어나면 구획실내 화재는 완전발달단계가 되며 이 때에는 앞장에서 설명한 바와 같이 환기 지배형 화재의 특성을 가진다. 환기 지배형 화재에서의 열방출율은 화재에 공급되는 공기량이 주요한 인자가 되며 구획실에서의 완전발달단계 화재의 경우 다음식과 같이 개구부의 특성이 열방출율을 결정하는 요소가 된다.

$$\dot{Q} = C_{vc} A_w H_w^{1/2} \quad (3)$$

여기서 \dot{Q} 는 완전발달단계 화재의 열방출율, C_{vc} 는 계수, A_w 는 개구부 면적, H_w 는 개구부의 높

이다.

이와 같이 제배연시스템의 설계와 운영을 위한 구획실내 초기화재의 열방출율은 t-squared fire 와 ventilation-controlled fire로 간단히 모델링할 수 있다.

3. 모델적용

전장에서 설명한 구획실내 화재에 의한 발열특성의 이론적 내용을 수치해석적 방법을 이용하여 간단한 구획실 모델에 대해 적용하였다. 구획실의 모델은 Fig. 3와 같으며 구획실내 화재의 성장은 t-squared 화재곡선을 사용하였다. 구획실내 화재가 발생시 실내 열환경에 크게 영향을 미치는 인자중 하나가 구획실의 개구부 조건이다. 발화초기에 개구부가 열려있거나 닫혀있을 수 있으며, 두가지 모두에 대한 고려가 필요하다. 개구부가 닫혀있을 경우 화재초기에 개구부가 닫혀있는 상태로 발달하다가 Flashover 상태가 되면 구획실의 창문 등이 깨지면서 개구부가 열려지는 시나리오를 적용할 수 있다. 본 연구에서는 우선 구획실의 개구부가 닫혀있는 상태에서의 구획실내 열적 변화를 고찰하였다. 즉, 구획실내 개구부가 없는 조건에서 화재성장계수와 구획실 면적을 2가지 경우로 선정하여 수치해석을 수행하였다. 구체적인 수치해석 적용조건을 Table 2에 제시하였다.

한편 구획실내 화재는 바닥에 단위면적당 일정한 발열량을 가지도록 하였으며 초기에 중앙에서 점화되어 t-squared 화재곡선의 성장에 따라 화재면적이 점차 증가하도록 설계하였다.

Table 2 Conditions of simulation.

CASE	α (kW/s ²)	Dimension (L×W×H, m)
CASE 1	0.04689	3×3×3
CASE 2	0.01127	3×3×3
CASE 3	0.04689	4.24×4.24×3
CASE 4	0.01127	4.24×4.24×3

Fig. 4에서 Fig. 7는 CASE 1에 대한 해석결과를 보여주고 있다. Fig. 4는 화재발생 후 25초에서의 해석결과이다. 그림에서와 같이 구획실 중앙바닥에 화원이 존재하고 화재에 의한 발열에 의해 중앙부 온도가 상승하고 있음을 알 수 있다. 화재에 의한 열기류가 구획실 천장에 도달하고 있다. Fig. 5는 화재발생 후 50초에서의 해석결과이다. 25초에서의 결과에 비해 화재면적과 열기류 영향범위가 증가함을 알 수 있다. 고온의 열기류가 천장을 따라 벽면으로 이동하고 일부는 벽면주위에서 하강하고 있다. Fig. 6는 화재발생 후 75초에서의 해석결과이다. 화염원 위의 중앙천장부근 온도가 800K에 다다르고 있다. Fig. 7은 화재발생 후 100초에서의 결과로서 전체 천장부근의 온도가 900K에 도달하고 있는 것을 알 수 있으며, 구획실에 Flashover가 발생하는 단계로 해석할 수 있다.

Fig. 8은 각 CASE에서 벽면부근 천장밑에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 바닥면적과 화재성장조건이 천장밑 온도상승에 영향을 끼치고 있으며 벽면부근 천장밑의 온도가 900K에 이르기까지의 시간을 비교해보면 동일한 바닥면적에 대해서 Medium growth 조건이 Fast growth 조건에 비해 900K에 도달하는 시간이 2배정도 걸리는 것을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 천장에서의 온도상승 특성을 바탕으로 비정상 화재시나리오의 작성시 Flashover의 발생시기를 예측할 수 있다.

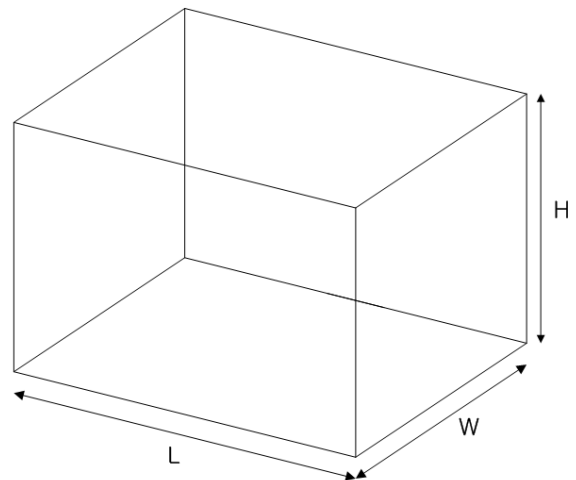


Fig. 3 Schematic diagram of analysis.

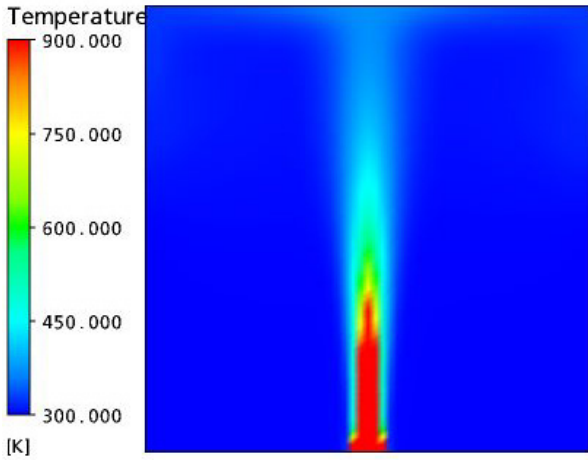


Fig. 4 Temperature contour at 25 sec. after ignition for CASE 1.

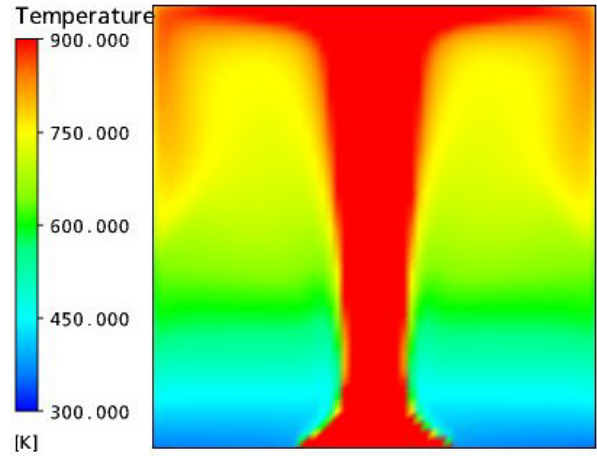


Fig. 7 Temperature contour at 100 sec. after ignition for CASE 1.

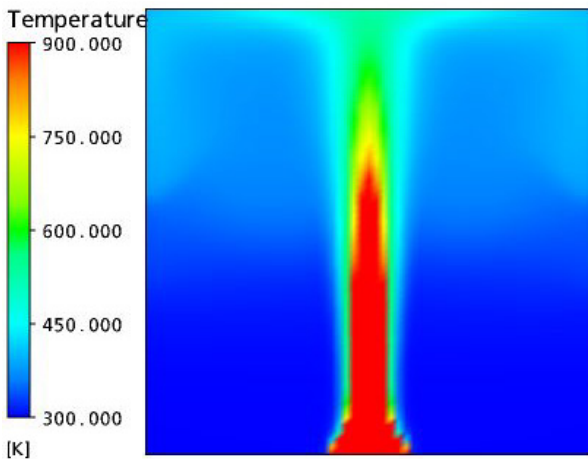


Fig. 5 Temperature contour at 50 sec. after ignition for CASE 1.

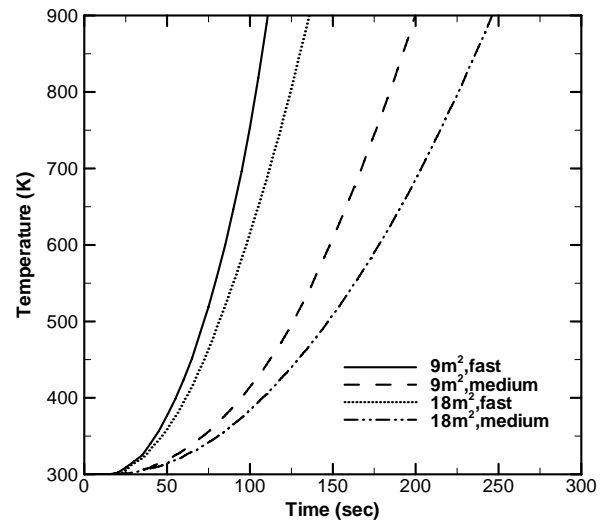


Fig. 8 Temperature variations under ceiling, near wall for each CASE.

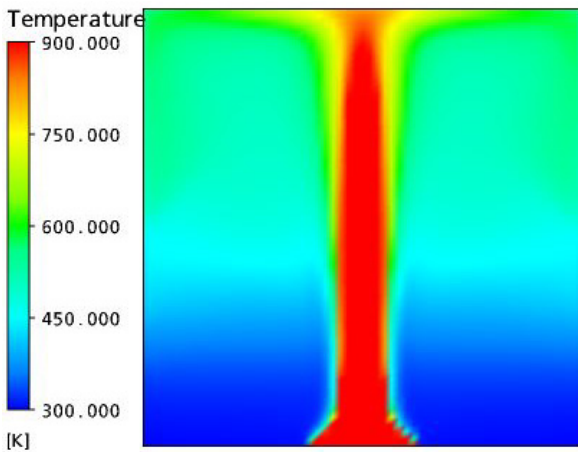


Fig. 6 Temperature contour at 75 sec. after ignition for CASE 1.

4. 결론

본 논문에서는 건축물 제배연시나리오 작성을 위한 Fire/Smoke Development 시나리오 중에서 구획실내 화재에 의한 발열특성에 대한 이론적 기반을 소개하고 간단한 구획실 모델에 대해 수치해석적 방법으로 발열특성을 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제배연시나리오 작성을 위해서는 화재성장 단계에서 초기 점화후 발달단계의 특성이 특히 중요하며, t-squared 화재곡선으로 모델링할 수 있다. 선진외국의 제배연시스템 설계지침에서는

t-squared 화재의 발달특성을 slow, medium, fast, ultra fast로 분류하여 각 발달특성에 대한 화재성장계수와 이를 적용할 수 있는 건축물 용도를 설정하고 있다.

(2) 구획실내 Flashover가 발생되기 위한 조건으로 연기온도가 600℃에 이르거나 바닥에서의 복사열이 20kW/m²로 제시된다. Flashover가 일어나면 구획실내 화재는 완전발달단계가 되며 이때에는 환기 지배형 화재의 특성을 가진다.

(3) 간단한 구획실 모델에 대해 발열특성을 적용한 결과, 벽면부근 천장밑의 온도가 900K에 이르기까지의 시간을 비교해보면 동일한 바닥면적에 대해서 Medium growth 조건이 Fast growth 조건에 비해 900K에 도달하는 시간이 2배정도 걸리는 것을 알 수 있다. 천장에서의 온도상승 특성을 바탕으로 비정상 화재시나리오의 작성시 Flashover의 발생시기를 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

1. BS 12101-6, 2005, Smoke and heat control systems - Part6 : Specification for pressure differential systems.
2. NFPA 92A, 2006, Standard for Smoke-Control Systems Utilizing Barriers and Pressure Differences.
3. Tamura, G.T., 1990, "Fire Tower Tests of Stair Pressurization Systems with Overpressure Relief", ASHRAE Trans. Vol.96.
4. Tamura, G.T., 1992, "Assessment of Stair Pressurization System for Smoke Control", ASHRAE Trans. Vol.98.
5. NFSC501, 2008, 제연설비의 화재안전기준.
6. NFSC501A, 2008, 특별피난계단의 계단실 및 부속실 제연설비의 화재안전기준.
7. Klote, J.H and Mike, J.A., 2002, Principle of Smoke Management, ASHRAE.