

건축물의 화재성상 시뮬레이션을 위한 연소 확대 모델 조사

이랑 · 김동은 · 이재원 · 홍해리 · 김동준 · 권영진

호서대학교 소방방재학과

An Investigation Study on the Fire Propagation model for Fire Simulation of building.

Lee Rang · Kim Dong Eun · Lee Jae Won ·

Hong Hae Ri · Kim Dong Jun · Kwon Young Jin

Dept. Fire & Disaster Prevention of Hoseo Univ.

요 약

본 연구는 건축구조물의 내장재 및 실내장식물 등의 연소 성상 DB를 바탕으로 화재 성상을 예측할 수 있는 기존 모델인 칼슨모델(B.Karlsson,) 및 쿼티어리모델(J.G.Quintiere,)을 비교, 분석하여 그 절차 및 차이점 등을 분석한 후 국내 가연물 연소성상 DB를 토대로 개구조건 및 건물구조 등을 고려한 화재성상 시뮬레이터 개발을 위한 기초 조사 자료이다. 조사 결과 칼슨모델과 쿼티어리모델의 차이점은 우선 초기 착화영역 과 착화의 판단 및 연소면적 등에서 차이가 있었으며 향후 이를 기초로 실험 결과와 대비를 통한 분석을 수행 할 예정이다.

1. 서 론

최근 한국의 경우 소방법에서 성능설계가 법제화됨에 따라 가연물과 환기인자 등을 고려한 화재성상예측이 매우 중요한 과제로 대두되고 있으나 국내의 경우 주로 미국 NIST에서 개발된 FDS프로그램을 이용하여 화재성상을 예측하는 방법이 주로 수행되고 있다. 그러나 FDS의 기술적 한계점 등에 대한 검증과 화재성상을 예측할 수 있는 이론적 모델의 확립 등에 대한 절차 없이 평가하는 것은 다양한 건축재료 및 실내장식물과 더불어 초고층 초대형화 됨에 따른 바람의 영향 등 실제적인 화재성상을 구현하는 중요한 인자에 대한 대책이 강구되지 못한 상태에서는 실제 화재 성상과는 상이한 예측이 될 가능성이 매우 높다.

따라서 본 연구에서는 물리적 연소모델을 구축한 칼슨 및 쿼티어리의 모델을 조사, 분석한 후 그 차이점을 기존의 FDS의 결과와를 비교할 목적으로 수행하는 것으로 본보는 칼슨(B.Karlsson) 및 쿼티어리(J.G.Quintiere,)의 연소모델을 조사, 정리 하여 그 차이점을 분석한 것이다.

2. 칼슨 및 쿼티어리 연소모델

2.1 칼슨모델

칼슨모델이란 내경 2.4m *3.6m *2.4m 천정에 재료를 부착시키고 개구부는 0.8m*2.0m의

크기를 갖고있으며 우각부의 버너를 설치한 ISO 9705 룸코너의 시험의 화재 확대 성상을 연기층 온도, 재료의 표면온도, 열분해 3단속도, 열분해 영역 면적 및 발열 속도에 대하여 예측하는 모델로서 그 입력 데이터로서는 ISO 5660 콘 칼로리미터 시험 및 리프트 시험의 결과를 사용하고 있다. 또한 이 모델에는 벽 및 천정에 표면재가 부착된 경우 화재 확대 모델 A와 벽만 표면재의 부착이 되어있는 화재 확대 모델 B가 있고 또한 각각에는 룸코너 시험 폴스킬 모델과 1/3 모델이 있다. 본 연구에서는 보다 현실적인 것을 고려하여 A 타입의 폴스킬 모델에 관하여 정리한다.

2.1.1 칼슨모델의 화재 시나리오

실 규모에서의 내장 재료의 화재확대성상을 시뮬레이션을 하는 데에 있어서 그 대상 실은 화재시나리오를 구축하고 있다. 그것은 주로 ① 버너화재로부터 가열에 의한 재료의 착화 ② 내장재의 화염전파 ③ 연소부분의 발열 이상의 3가지 현상 모델로부터 구성된다. 우선 ①에 있어서 초기착화 영역은 버너의 폭과 천정높이로 하고 그 영역 내에는 재료 표면의 온도와 착화온도에 의하여 산출되는 착화시간에 현재시각이 달하면 동시에 착화된다. 여기에서 초기착화 영역의 높이를 천정높이로 하여 칼슨모델은 룸코너 시험의 시뮬레이션의 특화되어있는 것을 알 수 있다. 다음으로 ②에서는 벽에 있어서 초기착화시간 이외에는 연소의 수평방향으로의 확대는 없는 것으로 하고 천정으로만 확대하는 것으로 하고 있다. 천정으로의 초기착화영역은 버너+벽면의 연소에 따른 화염이 미치는 범위로 하여 그 착화의 유무는 재료의 착화 온도와 표면온도로부터 착화온도에 도달하는 시간을 산출하여 현재시각과 비교하는 것으로 판정한다. 또한 거기로부터 화염전파는 연소영역으로부터 나타나는 화재가 영향을 미치는 범위가 연기 층으로부터의 가열에 의해 착화온도에 달하게 되면 그것이 착화영역으로 된다. 최종적으로 ③에서는 콘칼로리미터 실험에서 얻어진 발열 시간 곡선을 사용한다. 이때 콘칼로리미터 실험에서 착화시간은 0초로하고 각자 설정한 시험 종료 시간을 각 부분의 연소 종료 시간으로 한다. 그때 스스로 진화된 경우는 그 시간을 갖는 연소 종료로 한다. 전체적으로 10MW에 발열속도가 달하거나 각자가 설정된 계산 종료 스텝 수에 달한 경우를 시뮬레이션 종료로 하고 있다. 통상은 룸코너시험의 버너의 발열속도를 시작하는 10분 100kW 그 후의 10분의 300kW로 행하여지고 있기 때문에 1초를 1스텝으로 하여 1200스텝으로 설정한다.

2.1.2 칼슨모델의 계산 방법

칼슨 모델에 있어서 시뮬레이션은 연기층 온도와 그것의 폭로된 재료 표면온도로부터 착화시간 열분해 3단속도 열분해 영역범위를 구하여 총 발열 속도를 계산한다. 이때의 계산 결과는 아래와 같다. 우선 버너 점화원의 그 이면에 있는 벽면에 우선 착화의 유무를 판단하는 것이나 이때 사용되는 것은 다음의 식이다.

<p>(a) 버너 이면 벽면 착화시간</p> $\tau_w = \frac{\pi k \rho c (T_{ig} - T_0)^2}{4 \dot{q}_e''^2}$	<p>τ_w 벽면의 착화시간 $k\rho c$ 표면재의 열 관성 T_{ig} 표면재의 착화온도 T_0 재료 및 공기의 초기온도 \dot{q}_e'' 버너 화염에 따른 일사열</p> <p style="text-align: right;">식(2.1)</p>
<p>(b) 고온가스층 온도</p> $T_{gc} = T_0 + T_0 C \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g} c_p \rho_0 T_0 A_o \sqrt{H_o}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_{kt} A_{tot}}{\sqrt{g} c_p \rho_0 A_o \sqrt{H_o}} \right)$ <p style="text-align: right;">식(2.2)</p>	

$h_k = \sqrt{\frac{k\rho c}{t}} \quad \text{식(2.3)}$	$h_k = \frac{\left(\sqrt{\frac{(k\rho c)_{in}}{t} A_{in}} + \sqrt{\frac{(k\rho c)_{luc}}{t} A_{luc}} \right)}{A_{tot}} \quad \text{식(2.4)}$
<p>T_{gc} 고온가스층의 온도 C 실험정수 Q 구획내의 총 발열속도 g 중력가속도 C_p 공기의 정압비열 ρ_0 공기의 밀도 A_o 거리의 개구면적 H_o 개구높이 A_{tot} 구획내 표면적 A_{in} 구획내의 마감면적 A_{luc} 구획내의 무마감 면적 $(k\rho c)_{in}$ 표면재의 열용량 (cal/°C) $(k\rho c)_{luc}$ 경량 콘크리트 열용량(cal/°C) t 점화후 경과시간</p>	
<p>(c) 고온가스층에 접하는 천정표면 또는 벽면의 온도</p> $T_s(n) - T_0 = \sum_{i=1}^n [T_g(i) - T_g(i-1)] \exp\left(\frac{h^2(n-i)dt}{k\rho c}\right) \operatorname{erfc}\left(h\sqrt{\frac{(n-i)dt}{k\rho c}}\right) \quad \text{식(2.5)}$ <p>T_s 천정표면 또는 벽체의 온도 h 대류 및 복사의 합성 열 전달율 n 시간 스텝 $T_g(t)$ 시간 T 의 고온가스층 온도</p>	
<p>(d) 천정 착화 시간</p> $\tau = \frac{\pi k\rho c (T_{ig} - T_s)^2}{4q_f''^2} \quad \tau \text{ 천정면의 착화시간 } T_s \text{ 천정의 표면온도} \quad \text{식(2.6)}$ <p>q_f'' 화염으로부터 천정 면에의 복사열에 따른 입사열</p>	
<p>(e) 천정면 화염 전파 속도</p> $V_A(t) = \frac{1u}{\tau} \left[A_o + K \left(A_o \dot{Q}_c''(t) + \int_0^t \dot{Q}_c''(t-t_p) V_A(t_p) dt_p \right) - \left(A_o + \int_0^t V_A(t_p) dt_p \right) \right] \quad \text{식(2.7)}$ $A_0 = K \times [\dot{Q}_b + \dot{Q}'_{max} \cdot A_w \cdot e^{-\lambda\tau} - 150] \quad \text{식(2.8)}$ <p>$V_A(t)$ 시간 T에 있어서 길이의 방향의 화염 전파 면적 속도 A_o 초기치의 분해영역 K 화재 길이 개수 $\dot{Q}_c''(t)$ 콘칼로미터 시험으로부터 얻어진 재료의 발열 정수 \dot{Q}_b 버너의 연소 발열속도 \dot{Q}'_{max} 콘칼로미터로 측정된 최고 발열속도 A_w 버너 이면의 벽면 연소 영역 범위</p>	
<p>(f) 구획으로부터 발생하는 총 발열속도</p> $\dot{Q}_{tot}(t) = \dot{Q}_b + A_w \dot{Q}_c''(t - \tau_w) \quad \text{식(2.9)}$ $\dot{Q}_{tot}(t) = \dot{Q}_b + A_w \dot{Q}_c''(t - \tau_w) + A_o \dot{Q}_c''(t_1) + \int_0^{t_1} \dot{Q}_c''(t_1 - t_p) V_A(t_p) dt_p \quad \text{식(2.10)}$ $t_1 = t - (\tau_w + \tau) \quad \text{식(2.11)}$	

2.2 쿼터러리의 모델의 개요

쿼터러리 모델은 ISO 9705 룸코너 시험에 있어서 벽 및 천정재의 화재확대를 시뮬레이션 하는 수학적모델이다. 이 모델에서는 화염 전파 및 진화 속도를 계산하여 연소 면적, 상부층 연 기 온도 및 발열속도의 경시 변화를 예측할 수 있다. 열분해 부분 및 진화되는 화염 전파의 두 개 모두에 관하여 계산하며 첫째로는 상층부로서의 화염전파, 천정의 이른 화염전파 및 반 자 부분의 화염 전파 등으로 구성된다. 이때의 모델은 형태의 구별은 없고 모두 상부층으로 화염 전파로 간주한다. 둘째로는 수평 방향으로의 화염전파 및 천정 분출에 의해 나타나는 하 부 방향으로의 화염전파 등으로서 이 경우도 동일하게 취급한다. 이 두 가지 모두를 사용하여 열분해와 진화되는 각 면적을 산출한다.

2.2.1 쿼터러리 모델의 화재 시나리오

이 모델에서 사용하는 화재시나리오는 다음과 같다. 실내의 방 및 천정에 재료를 부착시키고 개구부를 갖는 실의 우각부에 버너를 설치하고 벽재는 이 버너로부터 화염에 의해 착화한다. 착화 후 10분간은 버너의 발열속도는 100kW로 하고 그 후 300kW로 증가된다. 시뮬레이션에 있어서 계산은 1200s 또는 총 발열속도가 2MW 로 달할 때 까지 행해진다. 이와 같은

조건에서 각 재료에 대하여 플래시오버 시간 등을 조사한다. 또한 플래시오버는 실증적으로 총 발열속도가 1MW를 넘는 시점으로 간주한다. 착화 후 버너의 100kW, 300kW 의 각 화원 강도에 대한 화재의 높이는 각자가 설정가능하며 본 연구에서는 1.3m, 3.6m로 하고 그 화원 높이 및 화원 폭에 대하여 균일하게 벽면에 열 유속을 받는 것으로 한다. 버너화염의 열 유속은 일반적으로 버너의 크기, 화염높이, 발열속도, 공급되는 연료의 종류에 따라 상이하나 이 모델에 있어서는 그 값을 600kW/m²로 한다. 재료의 연소에 의해 확대된 화염에 의한 열 유속은 30kW/m²로 이것은 상측방향으로의 화염전파를 지배하는 것으로 간주한다.

2.2.2 켈터리 모델의 계산 방법

<p>a) 연기층 온도</p> $T = T_{\infty} \left\{ 1 + C \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_P \sqrt{g} T_{\infty} A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{2/3} \left(\frac{\sqrt{k \rho c / t} A_S}{\rho_{\infty} c_P \sqrt{g} A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{-1/3} \right\}$	<p>식(2.12)</p> <p>T_{∞} 주변 온도 \dot{Q} 총 발열속도 $\frac{A_S}{t}$ 실 표면적 / 버너 착화후 경과시간 A_0 계구면적 / 버너 위치 H_0 계구높이 / 버너 위치에 관한 개수 $k \rho c$ 실 내강의 열 관성</p>
<p>b) 재료표면 온도</p> $T_s = T_{\infty} + \frac{1}{\sqrt{\pi k \rho c}} \int_0^t \frac{\dot{q}''(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad \dot{q}''(\tau) = \dot{q}''_{ig} + \sigma(T^4 - T_s^4) + h_c(T - T_s)$	<p>식(2.13)</p> <p>$\dot{q}''(\tau)$ 재료 표면이 받는 총 열 유속 \dot{q}''_{ig} 버너화염으로부터의 열 유속 σ 스테판볼츠만 정수 h_c 열전달율 계수</p>
<p>c) 재료 착화시간</p> $t_{ig} = \frac{\pi \cdot k \rho c (T_{ig} - T_s)^2}{4 \cdot \dot{q}''_f}$	<p>식(2.14)</p> <p>T_{ig} 재료 착화 온도</p>
<p>d) 재료로부터 발열</p> $\dot{Q} = \frac{\Delta H}{L} (\dot{q}''_f - \sigma T_{ig}^4 + \sigma T^4)$	<p>식(2.15)</p> <p>ΔH 연소 발열량 L 증발잠열</p>
<p>e) 열분해 영역 면적</p> $A_P = A_{P1} - A_{P2} + A_{Pn} + A_{PC1}$	<p>식(2.16)</p>
<p>1) $A_{P1} = 2 \{ H x_{P0} + (x_P - x_{P0}) y_{P0} + (H - y_{P0})(x_P - x_{P0}) / 2 \}$</p>	<p>식(2.17)</p>
<p>2) $A_{P2} = 2 \{ y_P x_{P0} + (x_b - x_{P0}) y_{P0} + (y_b - y_{P0})(x_b - x_{P0}) / 2 \}$</p>	<p>식(2.18)</p>
<p>3) $A_{Pn} = 2 \{ (y_P - H)(0.08H) + (y_P - H) / 2 - (0.08H + z_P)^2 (x_P - x_{P0}) / 2 (H - y_{P0}) \}$</p>	<p>식(2.19)</p>
<p>4) $A_{PC1} = \min [(\pi/4)(y_P - H)^2, wd]$</p>	<p>식(2.20)</p>
<p>f) 화염 전파</p> <p>① 상측방향으로의 화염전파</p>	
<p>$\frac{dy_P}{dt} = \frac{y_f - y_P}{t_{ig}}$ 식(2.21)</p>	<p>$y_f = y_b + \begin{cases} k_f [\dot{Q}'_{ig} + \dot{Q}'(y_P - y_b)]^n, & y_b \leq k_f \dot{Q}'_{ig} \\ k_f [\dot{Q}'(y_P - y_b)]^n, & y_b \geq k_f \dot{Q}'_{ig} \end{cases}$ 식(2.22)</p> <p>\dot{Q}'_{ig} 선 화원의 능량화된 버너발열속도 k_f 화염길이 개수 n 승수</p>
<p>$\frac{dy_b}{dt} \approx \frac{y_b(t+t_b) - y_b(t)}{t_b}$ 식(2.23)</p>	<p>$\frac{dy_b}{dt} \approx \frac{y_b(t) - y_b(t)}{t_b}$ 식(2.24)</p>
<p>② 수평 방향 및 아랫방향으로의 화염전파</p>	
<p>$\frac{dx_P}{dt} = \frac{\Phi}{k \rho c (T_{ig} - T_s)^2}$ for $T_s \geq T_{Smin}$</p>	<p>식(2.25)</p> <p>Φ 수평전파 파라미터 T_{Smin} 수평전파에 필요한 재료표면 최저온도</p>
<p>$z_P = x_P(t) - x_P(t_H)$ 식(2.26)</p>	<p>$\frac{dx_b}{dt} = \frac{x_P - x_b}{t_b}, z_b = x_b(t) - x_b(t_H)$ 식(2.27)</p>
<p>g) 총 발열속도</p>	<p>$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{ig} + \dot{Q}' \cdot A_P(t)$ 식(2.28)</p>

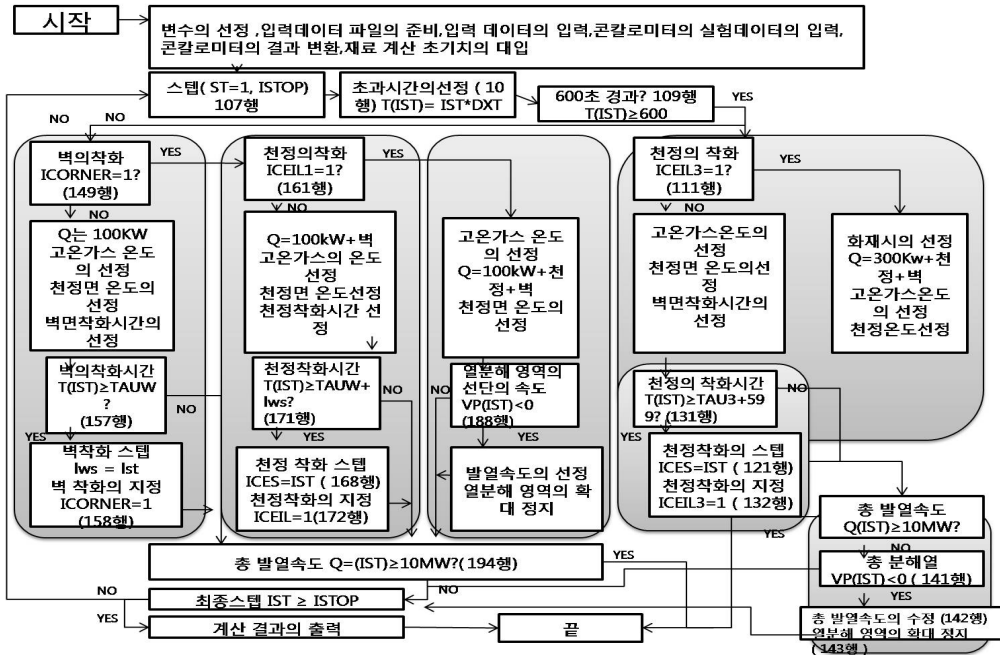


그림 1. 칼슨 모델 프로그램 흐름도

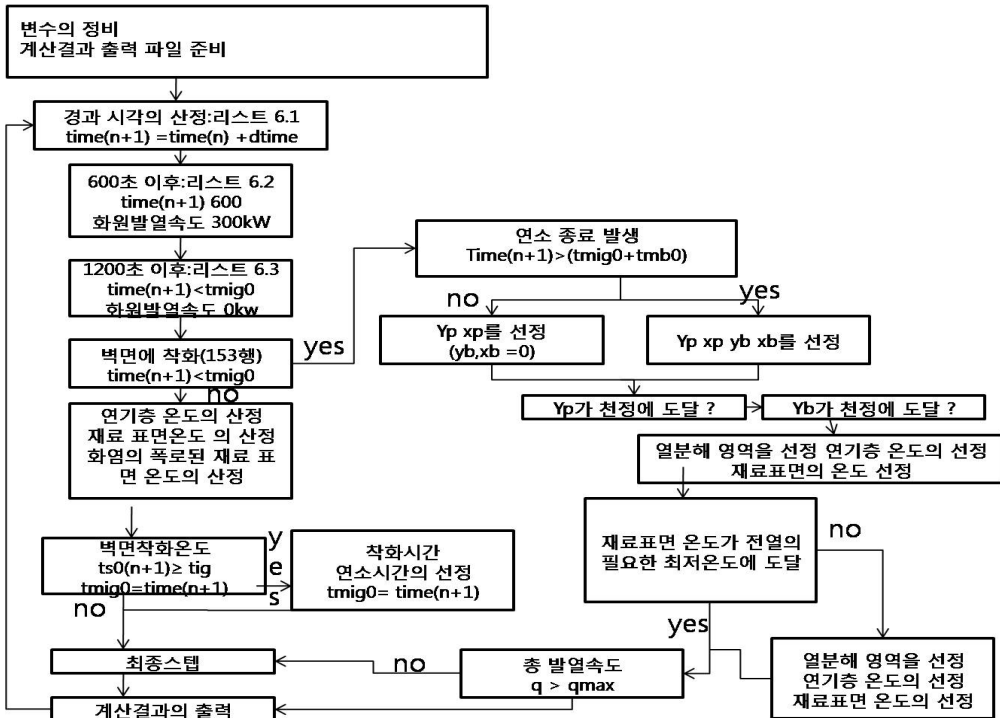


그림 2. 퀴티어리 모델 프로그램 흐름도

3. 비교결과 및 고찰

칼슨모델은 버너화재 가열에 의한 착화의 경우 초기착화 영역은 버너의 폭과 천정높이로 하였으며 내장재의 화염전파의 경우 천정으로의 초기착화영역은 버너+벽면의 연소에 따른 화염이 미치는 범위로 하고, 그 착화 유무는 재료의 착화 온도와 표면온도로부터 착화온도에 도달하는 시간을 산출하여 현재시각과 비교하는 것으로 판정된다. 또한 연소부분의 발열 이상인 경우 화재가 영향을 미치는 범위가 연기 층으로 부터의 가열에 의해 착화온도가 달하게 되는 점을 착화 영역이라고 정의한다.

퀀티어리모델은 열 분해 부분 및 진화되는 화염 전파의 두 개 모두에 관하여 계산하여 첫째로는 상층부으로의 화염전파, 천정의 이른 화염전파 및 반자 부분의 화염전파 등으로 구성되며 이때의 모델은 형태의 구별은 없고 모두 상부측으로 화염 전파로 간주한다. 둘째로는 수평 방향으로의 화염전파 및 천정 분출에 의해 나타나는 하부 방향으로의 화염전파 등으로서 이 경우도 동일하게 취급하며 이 두가지 모두를 사용하여 열 분해와 진화되는 각 면적을 산출한다.

따라서 칼슨모델과 퀀티어리모델의 차이점은 초기 착화 영역과 착화의 판단 및 연소 면적 등에서 차이가 있다.

4. 결론

조사 결과 칼슨모델(B.Karlsson)과 퀀티어리모델(J.G.Quintiere)의 차이점은 초기 착화 영역 등등에서 차이가 있었으며 향후 이를 기초로 실험결과와 대비를 통해 분석할 예정이며 또한 FDS와의 관계도 검토할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2009년 한국 중소기업청 “건축 구조물의 가연물 및 개구부 조건에 의한 화재 성상 예측 시뮬레이션 개발”에 의한 것으로 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. B.Karlsson, "Modeling Fire Growth on Combustible Lining Materials in Enclosures", Department of Fire safety Engineering Report TVBB-1009, 1992
2. J.G.Quintiere, "A Simulation Model for Fire Growth on Materials Subject to A Room-Corner Test", Fire Safety Journal 20, pp313~339, 1993
3. 중소기업청 “건축 구조물의 가연물 및 개구부 조건에 의한 화재 성상 예측 시뮬레이션 개발”
4. 김동은 외4인 “Furniture Calorimeter를 이용한共同住宅의可燃物の燃焼特性”, 日本火災学会研究発表会, 2010.5
5. 표근태 외 3인, “Cone Calorimeter를 활용한 주거시설의 고정가연물 연소특성에 관한 실험”, 한국화재소방학회 추계학술발표회 자료집 pp.275~278, 2010