

경량전철 차량화재의 화염거동에 대한 연구

A Study on the flame behaviors of light railway vehicle

목재균* , 김연수* , 이우동* , 허남전**

Mok, Jai-Kyun Kim, Youn-Su Lee, Woo-Dong Hur, Nahm-Keon

Abstract

This paper is described for the flame behaviors in light railway cabin by numerical simulation code, which can be interpreted the design parameters in terms of suppression the fire propagation and excavation the passengers safely. The results shows that the flame intensity(fire temperature, smoke density) depends on the firing points in cabin and propagates rapidly whole cabin space rather than modern subway cabin due to smaller inner space. The data will be used to how can be get the safety case, which is described on the operating principles for all facilities and logistics against to the light railway firing accidents.

1. 서론

최근 국내의 선진 산업화에 따라 국가 기반시설인 경량전철시스템의 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 경량전철시스템 기술개발사업에 있어서 시스템의 안전프로그램을 계획하는 것이 아주 중요하다. 시스템의 안전과 관련하여 가장 먼저 확보해야 할 프로그램은 화재에 대한 안전 프로그램이다. 따라서 개발차량 내부공간의 형태와 내장재 특성에 따른 화재 하중을 고려하여 화재발생 모드를 분석하는 것이 반드시 필요하다. 분석된 화재 발생 모드에 따라 대피 시나리오 등을 검토하고, 효율적인 제연을 위한 차량 환기 시스템에 대한 설계가 가능할 것이다.

화재에 의한 연기확산/열분포에 대한 연구는 대부분 실험에 의존하여 왔으나, 최근 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)의 발전으로, 복잡한 유동현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템을 해석하고 설계를 개선하는 사례들이 많이 보고되고 있다. 특히 외국에서는 지하철 등을 설계할 때, 대피 시나리오를 작성하고 환기시스템을 설계하기 위하여 차량 화재 시뮬레이션을 수행한 예가 많이 있다. 특히 차량의 화재는 지하 역사나 터널에 차량이 정차한 경우 심각한 결과를 초래할 수 있으므로, 역사나 터널과 함께 시뮬레이션 하여 안전한 역사와 터널의 설계가 되도록 하고 있다.

화재시 연기의 확산 및 열 분포는 차량의 구조 및 내장재별 화재 하중에 따라 모두 다르므로 향후 설계의 기본 자료 확보가 시급히 요구되며, 이는 경비와 시간이 많이 드는 실험을 대체하여

* 한국철도기술연구원, 정회원

** 서강대학교 기계공학과, 비회원

수치해석적으로 쉽게 확보할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구는 경량전철시스템의 화재에 대한 안전성 확보를 위한 기본 자료를 확보하고, 또한 연구결과를 이용하여 대피 시나리오와 함께 제연 대책을 수립하기 위한 것이다.

따라서 본 연구에서는 경량전철시스템의 화재에 대한 안전성을 검토하기 위하여, 경량전철 차량의 내부에서 화재가 발생하였을 때 내장재의 특성 및 화재 발생 위치에 따른 화재 양상을 수치시뮬레이션 하여 승객의 대피 시나리오를 검토하여 화재에 대한 안전 프로그램 작성을 위한 기초 자료를 제공하고자 한 것이다.

2. 화재 시뮬레이션

2.1 수치해석 Code

다중 몸체로 연결된 복잡한 형상에서의 유동 및 열 현상을 해석하기 위해서는 경계밀착 좌표계를 사용하는 3차원 유동해석 코드가 필요하다. 이러한 코드는 복잡한 형상의 공간에서의 계산격자의 생성을 용이하게 하고 국부적으로 계산격자를 밀집(Local Refinement)시켜 효율적인 계산격자를 생성할 수 있기 위해서 대체로 비조각 격자계를 사용한다. 이러한 프로그램으로는 PHOENICS, FLUENT, FLOW3D, STAR-CD등이 있으며 본 연구에서는 이중 STAR-CD를 이용하여 연구를 수행하였다.

2.2 수치해석

지배방정식

질량 보존법칙(Continuity Equation)과 운동량 보존법칙(Navier-Stokes Equation)을 지배방정식으로 하며 이동하는 좌표계에서의 텐서 형태로 표기하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{(g)}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

$$\frac{1}{\sqrt{(g)}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g}\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j u_i + \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial t} + S_i$$

여기서 사용된 변수는 다음과 같다.

t = Time

x_i = Cartesian Coordinate (i=1,2,3)

u_i = Absolute fluid velocity in direction x_i

$u_j = x_j - u_{cj}$, relative velocity between fluid and local (moving) coordinate frame which moves with velocity u_{cj}

p = piezometric pressure = $p_s + \rho_0 g_m x_m$, where p_s is static pressure, ρ_0 is reference density and g_m are gravitational field components.

ρ = density

τ_{ij} = stress tensor components

S_{ij} = momentum source components

\sqrt{g} = determinant of metric tensor

경계조건

STAR-CD에서 사용할 수 있는 경계조건은 매우 다양하며, 각각의 경계조건들을 다음과 같다.

- (1) 입구 : 유동에 관한 모든 정보를 알고 있는 영역으로, 사용자가 유속이나 난류강도, 특성길이, 온도 등을 정의할 수 있다.
- (2) 출구 : 유동의 방향이 모두 바깥을 향할 때 사용할 수 있으며 유동에 관한 정보를 필요하지 않으나, 재순환 영역 등에서는 사용이 불가능하므로 이 경계의 적용지역 설정에는 주의할 하여야 한다.
- (3) 벽 : 층류의 경우는 속도벡터의 성분을 모두 0으로 하는 조건이 되나, 난류의 경우에는 특수한 수학적 처리를 요한다. (자세한 내용은 난류모델에서 기술함) 또한 벽에서 속도로 주어지는 경우도 가능하다.

난류모델

STAR-CD에서 사용할 수 있는 모델은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-l$ 등이며 본 연구에서는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. $k-\epsilon$ 2방정식 모델은 레이놀즈 응력이, Boussinesque Eddy Diffusivity의 난류점성계수의 개념을 도입하여, 가상적인 응력-변형률(Stress-Strain) 관계식에 의해 표시될 수 있다고 가정하여 난류점성계수를 난류운동에너지 k 와 그 소산율 ϵ 으로 부터 다음 식에 의해 구하며 층류 점성계수 μ_l 에 난류점성계수 μ_t 를 더한 유효점성계수 μ_{eff} 를 사용하여 층류방정식과 같은 형태의 방정식을 해석한다.

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}$$

여기서, 난류 운동에너지 k 와 그 소산율 ϵ 은 각각 그 자체의 전달방정식으로부터 구해지며 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) &= \mu_t (P + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \\ \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) &= C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[u_t (P + C_{\epsilon 3} P_B) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned}$$

여기서 사용된 변수는 다음과 같다.

$$P = S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad P_B = \frac{g_i}{\sigma_{h,i}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

또한, 계수의 값으로는 격자난류(Grid Turbulent) 및 채널난류 등의 기초실험 데이터에 의거해서

추천되고 가장 널리 사용되고있는 아래의 값을 사용하였다.

$$C_{\mu} = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_{\epsilon} = 1.22,$$

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_{\epsilon 3} = 0.0 \text{ or } 1.0, \quad C_{\epsilon 4} = -0.33$$

2.3 해석모델

본 연구에서는 경량전철 설계 자료로부터 경량전철의 3차원 모델링을 하고, 화재 발생 위치와 화재 강도에 대하여 수치해석을 수행하였다. 화재 발생 위치를 제외한 나머지 해석 대상의 경우 화재 발생 위치는 경량전철 중간 의자 위에서 발생하는 경우로 한정하였다. 각각의 해석 대상은 화재 위치별 시뮬레이션의 경우 경량전철 중간 의자 위, 뒷 부분 좌측 구석, 앞쪽 좌측 문에서 화재가 발생할 때이며, 그림 1, 화재 강도별 시뮬레이션의 경우 발열량 1 MW, 200 KW에 대하여 해석하였다. 각각의 해석대상은 저기온에서 시뮬레이션이 된다.

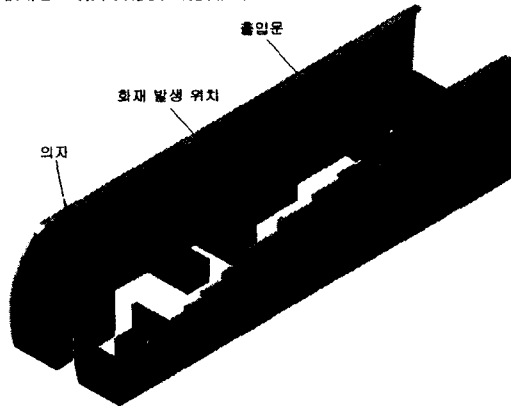


그림 1 해석을 위한 경량전철 모델링

표 1 화재해석 조건

	Cell 수	화재강도	화재위치	출입문
Case 1	350000	1MW	중앙의자 위	닫힘
Case 2	140000	1MW	중앙의자 위	닫힘
Case 3	140000	200KW	중앙의자 위	닫힘
Case 4	140000	1MW	뒷부분 좌측구석	닫힘
Case 5	140000	1MW	앞쪽 좌측문	닫힘
Case 6	230000	1MW	중앙의자 위	닫힘

2.4 해석방법

질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식을 이용하여 비정상 상태 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하여 수치 해석을 수행하였으며, 압력 계산을 위해 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators)방법을 적용하였다. PISO 알고리즘은 우선적으로 압력 및 속도등의 초기값을 가정하여 이산화된 운동량 방정식을 푼 다음 압력보정식을 풀어서 압력 및 속도를 보정한다. 그리고 반복하여 압력보정식을 계산하여 압력 및 속도를 보정한다. PISO방법의 경우 일반적으로 사용하는 SIMPLE방법에 비해 압력보정을 한번더 해주기 때문에 그에 따르는 추가적인 계산공간의 확보와 많은 계산량을 요구하지만 좀더 안정적인 계산 결과를 예상할 수 있다. 각 상태량은 경량전철내부에서는 상온의 공기를 화재 연기의 농도 영향을 알아보기 위하여 일산화탄소를 사용하였다. 본 연구에서는 화재 시 물레이션을 재현하기 위해 경량전철 내부에 Heat Source가 되는 Fire 셀을 설정하였으며, 화재 발생에 의한 경량전철내의 화재 연기 농도를 구하기 위하여 일산화탄소(CO)의 양을 계산하였다. 일반적으로 Fire 셀에서 발생하는 열은 시간 제곱에 비례하며 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$q_{heat} = \alpha \times t^2 / V$$

여기서 각각의 변수는 다음과 같다.

- q_{heat} : 발열량
- α : 단위 시간당 화재 강도
- t : 경과 시간
- V : Fire 셀의 부피

계산에 사용된 기종은 Silicon Graphic Inc.의 Origin 2000과 Indigo 2 Solid Impact R10k이다.

2.5 해석 격자

우선적으로 경량전철 내부 유동 계산에 대한 효율적인 계산을 수행하기 위해 해석격자가 적절히 생성되었는지 확인하기 위하여 그림 2과 같은 격자시험을 수행하였다. 해석 계산 격자가 너무 성기게 되면 계산 결과의 신뢰성이 저하되며, 너무 조밀한 경우 계산 시간이 많이 걸리게 되므로 계산의 효율성이 떨어지게 되기 때문이다. 경량전철 해석 격자 약 350000개와 140000개 2가지를 비교하여, 경량전철 중앙위치, 높이 1.51m 에서의 온도 분포를 비교하여 그림 3과 같이 나타내었다. 고정된 한 위치에서 시간에 따른 온도 분포를 나타내었지만 경량전철의 모든 위치에서 두 해석격자를 이용한 계산 결과는 서로 동일하다. 해석 격자 시험에서 두 계산이 거의 동일한 결과를 보이므로 모든 계산 경우에 대하여 140000개의 셀을 이용하여 계산을 수행하였다.

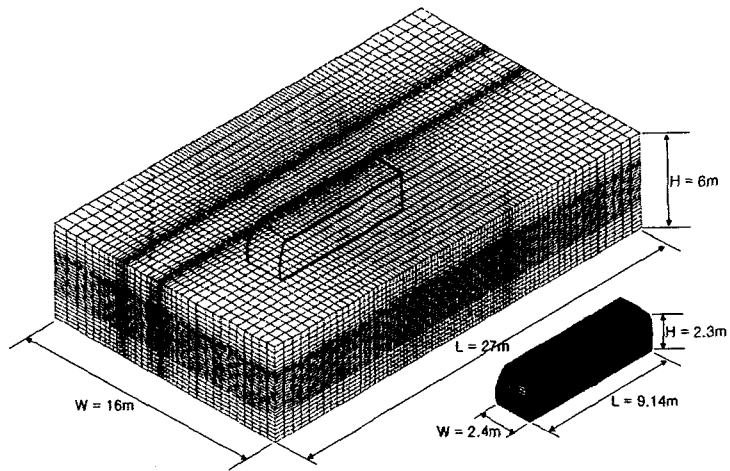


그림 2 화재 시뮬레이션 셀 구조

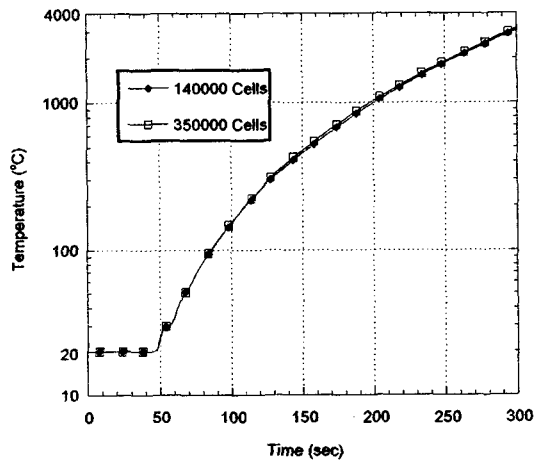


그림 3 셀 개수의 해석 의존성(시간에 따른 온도 변화)
(중앙의자 화재 발생, 1.5m 높이, 화재강도 1MW)

3. 해석결과

3.1 화재 위치별 시뮬레이션

중간 의자 위, 경량전철 뒷 부분 좌측 구석, 경량전철 앞쪽 좌측 문의 위치에서 화재가 발생한 경우에 대하여 계산을 수행하였으며 그 결과를 다음 그림에 나타내었다.

그림 4, 5는 시간에 따른 온도 및 농도 그래프이며, 경량전철중앙 약 1.5m정도에서의 분포이다. 중

양 의자에서 발생한 화재가 약간 높은 온도, 농도를 분포를 나타내고 있으나 화재 위치에 상관없이 약 50초후 온도와 농도가 크게 증가하며 거의 비슷하게 승객에게 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

그림 6, 7은 화재 발생 2분이 경과한 후 경량전철 길이 방향에 따른 온도 분포이다. 그래프에서 길이 0은 경량전철의 뒷부분을 나타낸다. 이 그래프에서 보면 Fire 셀이 경량전철 중간에 위치하는

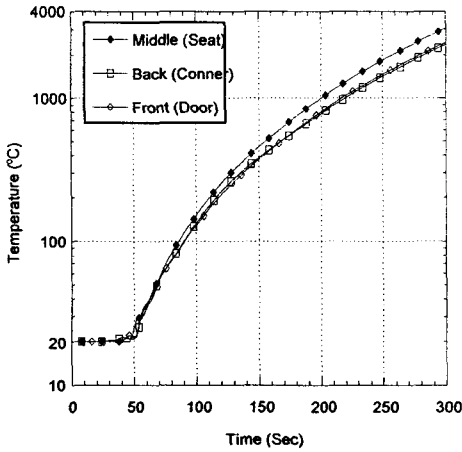


그림 4 시간에 따른 온도변화
(1.5m 높이, 화재 강도 1MW)

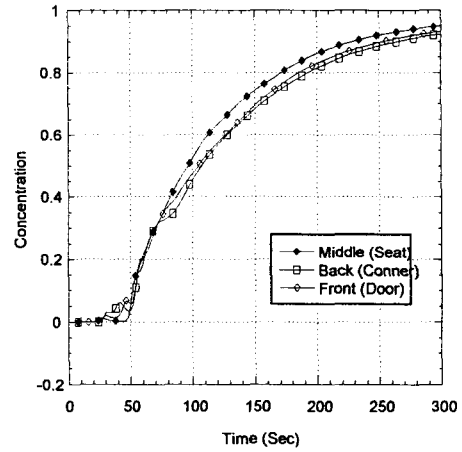


그림 5 시간에 따른 농도변화
(1.5m 높이, 화재 강도 1MW)

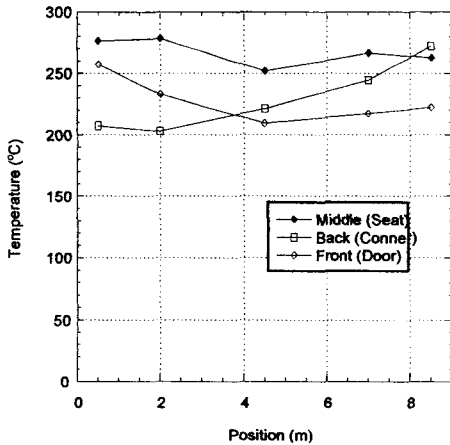


그림 6 경량전철 위치에 따른 온도변화
(중앙통로 1.5m 높이, 화재 강도 1MW,
0m=경량전철 끝 부분)

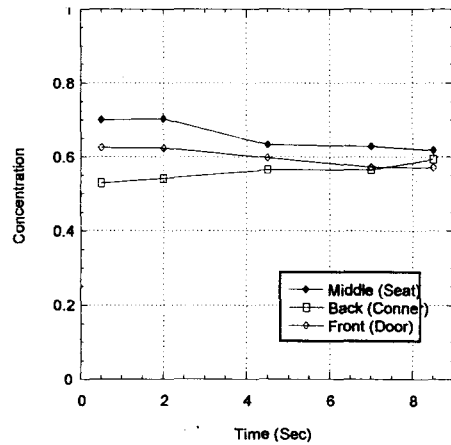


그림 7 경량전철 위치에 따른 농도변화
(중앙통로 1.5m 높이, 화재 강도 1MW,
0m=경량전철 끝 부분)

는 경우에는 경량전철 길이 방향에 대하여 온도, 농도가 고르게 분포함을 확인할 수 있다. Fire 셀이 경량전철의 뒤쪽이나 앞쪽에 위치한 경우에는 오히려 Fire 셀의 반대 부분의 온도가 올라감을 확인할 수가 있다. 이는 뜨거운 공기가 지붕면을 타고 순환하다가 반대측 벽에 부딪히며 가라앉기 때문이다. 화재 위치별 시뮬레이션에서 볼 수 있듯이 온도 농도 분포는 발생 초기에는 화재 위치에 따라 지배적인 영향을 받지만 시간이 지나면 화재 위치의 영향에 상관없이 경량전철 전체에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 따르는 적절한 승객 안전 대책이 강구되어야 할 것이다.

3.2 화재 강도별 시뮬레이션

화재 강도가 200KW인 경우에 대하여 계산을 수행하여 그 결과를 그림 8, 9에 나타내었다. 화재는 경량전철 중앙 의자에서 발생하는 경우를 설정하였으며, 결과는 발열량 1MW의 경우와 비교하였다. 발열량이 1 MW인 경우에는 화재 발생 1분 후부터 온도가 크게 증가하는 반면 상대적으로 200 KW의 경우 천천히 온도가 증가하게 된다. 100℃를 기준으로 했을 때 승객이 위치하는 경량전철 중앙 통로 1.5m 지점에서 발열량 1MW의 경우 약 80초 정도의 시간이 지나야 100℃에 도달하게 되고 200KW 일때는 140초 정도의 시간이 걸린다. 농도에 있어서 확산되는 양상은 온도와 비슷하다. 그러나 결과 그림을 보면 200KW 일때는 온도의 영향보다는 연기 농도의 영향을 많이 받을 수 있으므로 작은 화재에도 빠른 승객의 대피가 있어야 한다. 농도는 0.4를 기준으로 했을 때 발열량 1MW는 80초 발열량 200KW는 120초 정도의 시간이 지나야 기준으로 잡은 0.4의 값을 갖는데 이는 온도가 증가하는 것보다 빠르게 농도량이 증가함을 보여준다.

일반적인 경우 화재 발생시 약 1MW 정도의 발열량이 생성되는 것으로 알려져 있다.[3] 그 예로 그림 8은 승객이 가지고 다니는 가방에서 불이 난 경우 시간에 따른 발열량 실험 결과를 나타낸 것이다. 가방은 총 10Kg으로 8Kg의 섬유와 2Kg의 플라스틱으로 구성되어있다. 그래프에서 볼 수

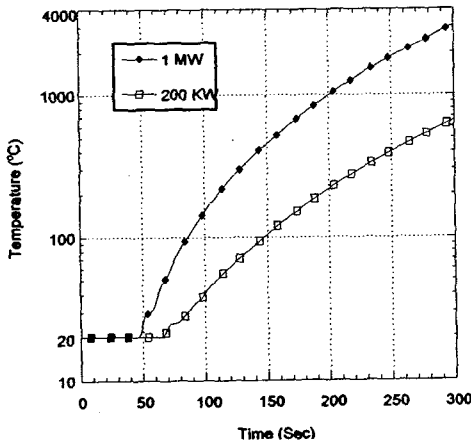


그림 8 시간에 따른 온도변화
(중앙의자 화재 발생, 1.5m 높이)

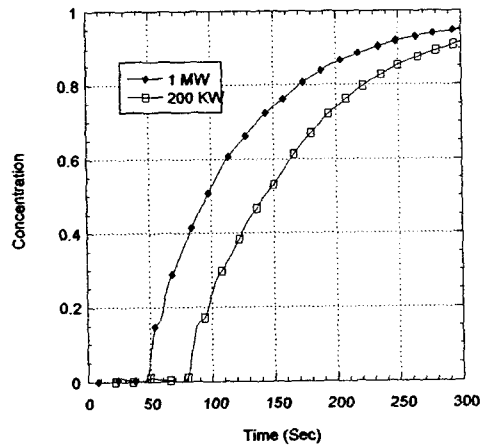


그림 9 시간에 따른 농도변화
(중앙의자 화재 발생, 1.5m 높이)

있듯이 약 5분 정도의 시간이 지나면 1MW 정도까지 발달된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 경향성을 고려하여 모든 경우에 있어 5분까지 1MW로 발달하는 화재에 대하여 계산을 수행하였으며, 경량전철의 경우에도 이와 같은 상황에 대하여 안전 대책을 세워야 할 것으로 생각된다.

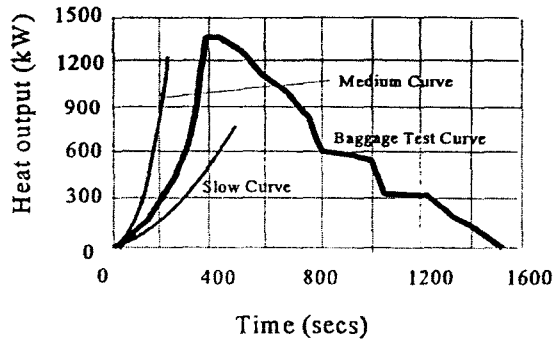


그림 10 Baggage Fire Test Curves[2]

5. 결론

경량전철에서 화재가 발생하는 경우 승객의 안전성을 확보하기 위하여 화재위치와 화재 강도에 따른 화재 상황 시뮬레이션을 수행하였다. 화재가 발생하는 경우 화재 감지, 통지 시스템 및 소화기 설치, 자동소화장치 설치로 초기 진화 대책을 세울 수 있으며, 아울러 본 연구에서 수행한 시뮬레이션을 토대로 안전한 승객 대피 시나리오를 수립할 수 있다.

먼저 화재위치가 다를 경우 화재 초기에는 화재 위치에 지배적으로 온도 및 농도가 분포하기 때문에 승객들을 발화지의 반대 방향으로 신속히 대피 시켜야 할 것이다. 그러나 약 1~2분의 시간이 지난후에는 화재 위치에 상관없이 경량전철 전 위치에 걸쳐 상당히 위험한 상황이 되므로 화재 발생 초기에 신속한 조치가 취해져야 할 것이다. 화재 강도 1MW를 기준으로 이보다 작은 화재가 발생했을때는 온도의 영향 보다 연기에 의한 승객의 피해가 예상되므로 이에 대한 방재 대책이 수립되어야 한다.

참고문헌

1. STAR-CD Methodology, Computational Dynamics Limited, version 3.10, 1999
2. 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구 결과 보고서(경량전철 차량시스템개발), 건설교통부, 2000
3. "CFD Simulation of Underground Station Fires a Hong Kong Example", R Uau and D Tang, Tunnel and Underground Station Fires, pp.45-54, 2000

감사의 글

본 연구는 건설교통부 "경량전철시스템 기술개발사업"의 일부로서 수행되었습니다.