

터널 화재시 연기발생량 및 온도 예측 프로그램 개발

Development of a Computer Program to Evaluate Smoke Volume Flow rate and Temperature for Tunnel Fires

박원희†

Won-Hee Park

Abstract Smoke temperature and volume flow rate in a tunnel fire are calculated. To obtain realistic results, enthalpy of smoke which composites combustion gases and entrainment air is calculated from curvefit polynomials by temperature. A user-friendly computer program for them is also developed. This program might be used for a good engineering tool in design of fire safety and mock/reduced-scale fire tests in a tunnel.

Keywords : Tunnel Fire, Smoke

요 지 터널화재시에 발생하는 연기의 온도 및 발생량을 계산하였으며 연소 가스 및 동반 공기의 엔탈피를 구하기 위하여 온도로 커브피팅된 다항식을 이용하였다. 연기 온도 및 발생량을 계산하기 위한 사용자 중심의 계산 프로그램을 제작하였으며, 이 프로그램은 터널에서의 화재안전 설계를 위한 엔지니어링 도구 및 터널에서의 화재 모의시험 및 축소 시험에 사용될 수 있다.

주 요 어 : 터널화재, 연기

1. 서 론

최근 철도의 고속화와 국내의 지형적인 특성에 의해 철도 터널의 수요가 급증하고 있는 실정이다. 이러한 이유로 철도 터널화재의 가능성이 증가하고 있고, 터널에서 화재가 발생할 경우에 많은 사람이 이용하는 관계로 대형 인명피해의 아주 심각한 결과를 초래할 수 있다. 고립된 공간으로 간주될 수 있는 터널내에서 화재가 발생하면 터널내 외부와의 통로가 한정되어 있기 때문에 화재로 인행 발생한 연기와 열로 인하여 안전에 심각한 문제를 야기하여 대형사고로 이어지게 된다. 이러한 이유로 터널내에서의 화재에 관련된 연구가 많이 진행되고 있다. 국내에서는 장대터널 구난역에서의 화재안전에 대한 축소모형 실험이 수행된바 있다[1,2]. 철도터널의 경우에는 철도차량 및 지하시설물 등이 화원이 될 수 있는데, 특히 철도차량을 구성하는 단품들은 매우 많으며, 주

요한 화원으로 고려될 수 있는 것은 내장판(외장판과의 접착제, 흡음재로 쓰이는 목판 등), 단열재(천장부의 환기덕트 단열재 및 내외장판 사이의 단열재), 의자(커버지, 쿠션, 몸체), 바닥재(고무, PVC), 통로연결막 등이며, 동기구의전선 및 철도차량 내의 광고판 등이 화염이 전파될 수 있는 구성품이다. 이러한 구성품에 대한 연소특성(발화점, 유독가스 발생) 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 터널과 같은 시설물의 관점에서 환기 및 화재안전에 대하여 접근할 경우에는 이러한 단품 및 재료의 화재원에 대한 연소특성을 개별적으로 고려하기가 현실적으로 어렵다. 터널 내에서 철도차량에서 화재가 발생하였을 경우에 철도차량을 이루고 있는 단품들이 연소하면서 발생하는 열, 가스, 슈트(soot) 등의 총괄적인 효과를 고려하는 것이 터널의 환기 및 화재안전에 대하여 접근하기에 수월하다. 터널에서 화재가 발생하였을 경우에는 화원이 되는 연료는 여러 물질이 될 수 있다. 최근의 도로 터널 실험에서는 HGV (heavy goods vehicle) 등의 대형 화원을 고려하여 대형 물질을 적재하여 터널화재를 모사한 바 있다[3]. 그러나 실물 화원을 이용하여 실물실험을 수행하

† 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 선임연구원
E-mail : whpark@krii.re.kr
TEL : (031)460-5358 FAX : (031)460-5319

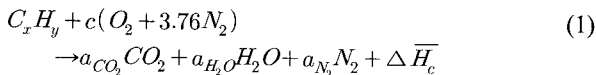
는 것이 비용이 많이 드며, 화재의 규모를 제어하기도 쉽지 않다. 실험 및 시뮬레이션에서 터널 내부에 풀(pool)을 위치하여 연료를 발화하는 방법으로 원하는 화재 규모를 구현하여 터널 화재특성을 파악하는 것이 수월하다[4].

O. Mégret와 O. Vauquelin[5]는 헵탄풀의 크기에 따라 연기 온도 및 연기발생량을 계산한 바 있는데 본 연구에서는 이를 개량하여 화원의 총열방출률이 정해진 경우에 풀화재 연료의 종류에 따른 연기의 온도 및 연기발생량을 계산하였다. 보다 정확한 예측을 위하여 연기(화재 생성물 및 동반 상승하는 공기)의 커브피팅된 엔탈피와 총열방출율과의 에너지 보존법칙을 이용하여 연기의 평균온도를 예측하였다. 또한 사용자편의인터페이스(GUI)를 사용하여 사용자가 쉽게 프로그램을 이용할 수 있도록 하였다.

2. 이론

2.1 터널 풀화재 화학반응식 및 동반 공기(Air entrainment)

탄소계 연료의 화학반응은 매우 복잡한 다단계반응으로 표현될 수 있으나, 공기가 79%의 질소와 21%의 산소로 구성되어 있음을 고려하여 다음과 같이 간략하게 전체 반응식을 표현할 수 있다.



여기서, 식 (1)은 탄화수소 연료의 이론 화학반응식이며, 이때 $c = x + y/4$ 이며, a_{CO_2} , a_{H_2O} , a_{N_2} 는 C_xH_y 의 화학반응식의 계수를 나타낸다.

주요 탄화수소 연료에 대한 식 (1)에서 사용된 값 a_{CO_2} , a_{O_2} , a_{N_2} 및 c 는 Table 1과 같다[6].

상승하는 연기플룸에서 연소생성물은 전체 혼합가스(연기) 중 상대적으로 적은 양이다. 그래서 화재로 인하여 생성되는 연기는 상승하는 플룸으로 끌어당겨지거나 동반하는 공기의 양으로 근사화 할 수 있다[7]. 공기의 동반(entrainment)은 아

래와 같은 식을 따르며,

$$n(O_2 + 3.76N_2)_{T_0} \rightarrow n(O_2 + 3.76N_2)_T \quad (2)$$

여기서 n 은 동반되는 공기의 비율을 나타내는 상수이다. Koseki와 Yumoto[8]는 헵탄 화재 풀에 대하여 아래와 같이 상수 n 을 실험적으로 구하였다.

$$n = 11(2.13(z/R)^{0.53} - 1), \quad z/R < 0.5 \quad (3)$$

여기서 z 는 화염높이이며, R 은 풀의 반지름을 나타낸다. 프로그램 제작시 헵탄을 제외한 다른 탄화수소 연료에 대한 값 n 은 식(3)을 준용하였다. 이러한 가정으로 인하여 헵탄을 제외한 다른 연료에 대한 계산을 수행할 때는 오차가 발생하는 것을 명시하는 바이다. n 값에 따라 산소와 질소의 화학반응식의 계수가 결정된다. 즉 a_{O_2} , a_{N_2} 는 아래와 같이 결정된다.

$$a_{O_2} = n \quad (4.1)$$

$$a_{N_2} = 3.76(c + n) \quad (4.2)$$

Heskested[9]은 축대칭인 화염에서의 평균 화염 높이를 다음과 같이 근사화하였다.

$$H_f = 0.23Q^{2/5} - 1.02D \quad (5)$$

여기서 \dot{Q} 는 총열방출율이며, D 는 풀화재의 지름이다. 화재의 규모가 클 경우 터널 벽까지 화염이 성장할 수 있으며, 화염높이는 터널높이로 제한될 수 있다. 이럴 경우에 화염높이 z 는 터널 높이 H 와 같게 된다. 즉 다음의 식이 만족한다.

$$z = H_f \quad H > H_f \quad (6.1)$$

$$z = H \quad H < H_f \quad (6.2)$$

즉, 식 (6.2)가 만족할 경우 식 (5)의 화염높이는 H 이다.

2.2 연기온도 및 연기생성률 산출

총열방출율 \dot{Q} [kW]이 정해지면 풀화재의 연료의 연소 질량반응율 \dot{m} [kg/s]를 알 수 있다. 연료의 연소 질량반응율은 아래와 같이 총열방출율을 연료의 연소열 ΔH_c [kW/kg]으로 나누어 구할 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_c} \quad (7)$$

연료의 연소 질량반응율의 플러스는 아래와 같이 풀의 지

Table 1. Coefficients for various fuels in Eq. (1)

	c	a_{CO_2}	a_{H_2O}	a_{N_2}
LNG(mostly CH_4)	2	1	2	7.52
LPG(mostly CH_4)	5	3	4	18.8
부탄 (C_4H_{10})	6.5	4	5	24.44
헥산 (C_6H_{14})	9.5	6	7	35.72
헵탄 (C_7H_{16})	11	7	8	41.36
벤젠 (C_6H_6)	7.5	6	3	28.2

름에 따른 함수로 표현할 수 있다.

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D}) \tag{8}$$

Table 2에 본 연구에서 고려한 여러 연료에 대한 발열량과 상수 \dot{m}''_{∞} , $k\beta$ 의 값을 표기하고 있다[10]. 주어진 총열방출율에 대하여 식 (7)과 (8)을 이용하여 풀화재의 지름 D 을 구할 수 있다. 이 비선형 방정식을 해석하기 위하여 globally convergent multi-dimensional Newton법[11]을 사용하였다. 연료의 연소로 인하여 발생된 총열방출율 \dot{Q} 는 상승하는 화재 플룸의 온도를 높이는 대류 열방출율과 복사열전달로 인하여 외부로 방출되거나 재흡수되는 에너지로 분류될 수 있다. 연기온도를 상승시키는데 할당되는 대류 열방출율은 복사분율 X_R 을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{conv} = (1 - X_R) \dot{Q} \tag{9}$$

화재가 발생하면 연료에서의 발열반응으로 인하여 발생한 대류열방출율만큼 연기의 온도가 상승한다. 화재가 발생하기 전의 공기의 초기온도가 298K(약 25°C)라고 하면 화재 발생 전후의 엔탈피차이와 대류열방출율과 같으므로 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{\dot{m}}{M_{fuel}} \sum_j^{smoke} a_j [\bar{h}^0(T_s) - \bar{h}^0(298)]_j \tag{10}$$

여기서 T_s 는 연기의 온도이며 M_{fuel} 은 연료의 물질량으로 \dot{m}/M_{fuel} 은 연료의 몰연소분율이다. 식 (1)의 화학반응식에서 연료 소멸과 연소생성물 및 공기의 생성물의 비는 화학반응식의 계수 a_j 이며, 여기서 j 는 가스종을 나타낸다. 각 연소생성물 및 공기(산소 및 질소)의 엔탈피 \bar{h}^0 를 구하기 위하여 아래와 온도에 대하여 보간된 식을 이용하였다.

Table 2. Heat of combustion, \dot{m}''_{∞} , $k\beta$ for various fuels

	ΔH_c (MJ/kg)	\dot{m}''_{∞} (kg/m ² s)	$k\beta$ (m ⁻¹)
메탄 (CH ₄)	50	0.078	1.1
프로판 (C ₃ H ₈)	46	0.099	1.4
부탄 (C ₄ H ₁₀)	45.7	0.078	2.7
헵산 (C ₆ H ₁₄)	44.7	0.074	1.9
헵탄 (C ₇ H ₁₆)	44.6	0.101	1.1
벤젠 (C ₆ H ₆)	40.1	0.085	2.7

$$\begin{aligned} \bar{h}^0/R_u T \\ = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{2} T^4 + \frac{a_6}{T} \end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)에서의 보간계수는 Table 3, 4와 같다[12]. 식 (9)의 비선형방정식을 해석하여 연기의 온도 T_s 를 구하기 위하여 풀화재의 지름을 구하였을 때와 동일한 알고리즘[11]을 사용하였다. 연기의 온도가 정해지면 연기생성율 \dot{V} [m³/s]은 다음과 같다.

$$\dot{V} = 22.4 \frac{\dot{m}}{M_{fuel}} \left[\sum_j^{smoke} a_j \right] \frac{T_{smoke}}{273} \tag{12}$$

주어진 연료에 대한 열방출율에 대한 연기온도 및 발생량을 구하기 위한 계산 흐름도는 Fig. 1과 같다.

Table 3. Curvefit coefficients for enthalpy of combustion products and air (300-1000K)

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
a ₁	0.02275724E002	0.03386842E002	0.03298677E002	0.03212936E002
a ₂	0.09922072E-01	0.03474982E-01	0.14082404E-02	0.11274864E-02
a ₃	-1.0409113E-04	-.06354696E-04	-.03963222E-04	-.05756150E-05
a ₄	0.06866686E-07	0.06968581E-07	0.05641515E-07	0.13138773E-08
a ₅	-.02117280E-10	-.02506588E-10	-.02444854E-10	-.08768554E-11
a ₆	-.04837314E006	-.03020811E006	-.10208999E004	-.10052490E004

Table 4. Curvefit coefficients for enthalpy of combustion products and air (1000-5000K)

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
a ₁	0.04453623E002	0.02672145E002	0.02926640E002	0.03697578E002
a ₂	0.03140168E-01	0.03056293E-01	0.14879768E-02	0.06135197E-02
a ₃	-.12784105E-05	-.08730260E-05	-.05684760E-05	-.12588420E-06
a ₄	0.02393996E-08	0.12009964E-09	0.10097038E-09	0.01775281E-09
a ₅	-.16690333E-13	-.06391618E-13	-.06753351E-13	-.11364354E-14
a ₆	-.04896696E006	-.02989921E006	-.09227977E004	-.12339301E004

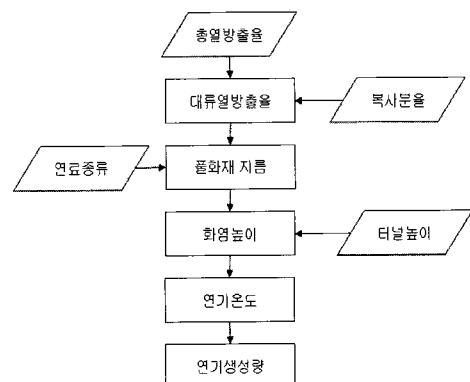


Fig. 1. Calculational flow chart for smoke temperature and flow rate

3. 연기 온도 및 발생량 산출 프로그램

3.1 개발 프로그램

이론에서 언급한 식 및 데이터를 이용하여 그래픽 사용자 환경(GUI)으로 프로그램을 작성하였다. 아래는 프로그램의 실행 화면을 나타낸다. 풀다운 메뉴중 READ를 선택하여 입력파일을 선택할 수 있다. 그 옆에 위치한 Tunnel Fire Data를 선택하면 Fig. 2와 같은 대화창이 나타난다.

본문에서 제시한 6가지의 연료를 선택할 수 있도록 프로그램을 작성하였다.



Fig. 2. Initial screen

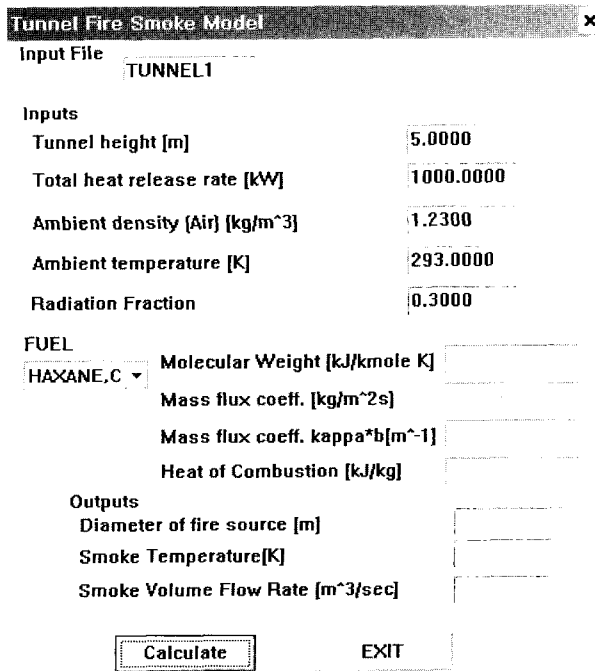


Fig. 3. Dialog box of input/output

3.2 계산 결과 예

Fig. 4는 총열방출율이 10MW일 경우(연료는 헵탄)의 터널 높이에 따른 연기 온도 및 발생량을 보여주고 있다. 터널 높이가 증가함에 따라 화염높이도 증가하여 화재로 유입되는 공기의 양이 증가하게 된다. 그러므로 주어진 화재의 열방출을 하에서 터널의 높이에 따라 터널화재에서 발생하는 연기의 온도가 감소한다. 주어진 열방출을 하에서는 7.4m 이상의 터널 높이에서 터널내 발생된 화염이 터널 천장보다 낮게 되어 연기 온도 및 발생량의 변화가 없다. Fig. 5 및 6는 터널의 높이가 5m 및 9.5m의 경우(경부고속철도)에 화재열방출율이 10MW일 경우(연료는 헵탄)에 총열방출율에 따른 연기 온도/

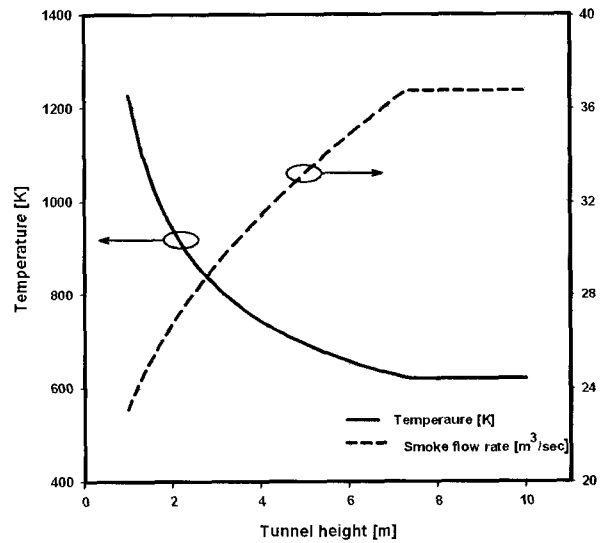


Fig. 4. Smoke temperature/flow rate for tunnel height (heptane, 10MW)

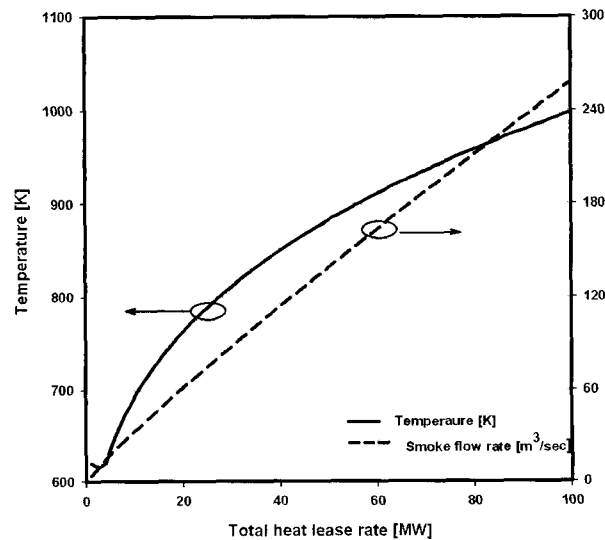


Fig. 5. moke temperature/flow rate for total heat release rate {heptane, 5m of tunnel height)

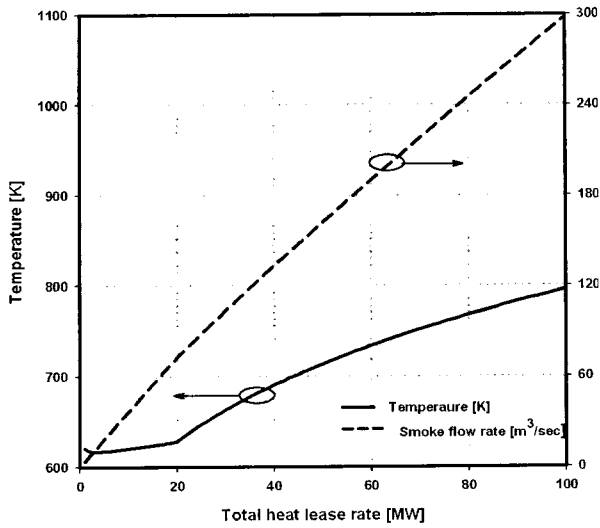


Fig. 6. Smoke temperature/flow rate for total heat release rate (heptane, 9.5m of tunnel height)

발생량을 보여주고 있다. 총열방출율이 증가할수록 터널의 높이가 낮은 경우에 화재 연기가 더 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 터널 높이 5m인 보다 낮은 터널의 경우에 화재연기의 온도가 보다 급격하게 높아지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 터널화재 시에 발생하는 연기의 온도 및 발생량을 계산하였다. 보다 정확한 예측을 위하여 연기를 이루고 있는 화학종의 온도에 따라 커브피팅되어 있는 엔탈피와 총열방출율과의 에너지 보존법칙을 이용하여 연기의 온도를 예측하였다. 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI를 이용하여 프로그램을 제작하였다. 본 프로그램의 적용상의 한계는 아래와 같다.

- 프로그램을 작성하기 위하여 사용된 수식들이 터널화재와 같은 under-ventilated 상황에서 유도된 식이 아니라 well-ventilated 하에서 구하여진 식임.
- 식(5)의 평균화염 높이의 적용에의 한계
- 화재현상(화학반응)의 간소화(이론연소로 가정, 복잡한 복사현상을 복사분율로 고려 등)
- 헵탄 이외 연료의 경우 entrainment ratio, n 값을 헵탄의 값으로 전용한데서 발생하는 오차

그러나 본 프로그램을 이용하여 터널에서 발생하는 화재의 규모에 따라 연기의 특성을 쉽게 파악할 수 있어 터널의 화재 안전설계 및 모의/축소 터널화재시험시에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하고 한국건설교통기술평가원에서 시행하고 있는 “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지기술개발”에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. D. H. Kim, W. H. Park, Experiment by using reduced scale models for the fire safety of a rescue station in very long tunnel in Korea, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp.303. 2006.
2. D. H. Kim, Y. J. Jang, W. H. Park, Emergency Ventilation of a Rescue Station with lateral access in Very Long Rail Tunnel, ITA-AITES WORLD TUNNEL CONGRESS, Prague, Czech, 2007.
3. A. Lönnemark and H. Ingason (2005), Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels, Fire Safety Journal, Vol.40, pp. 506-527.
4. J. S. Roh, H. S. Ryou, D. H. Kim, W. S. Jung and Y. J. Jang (2007) Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.22, pp.262-271
5. O. Mégret and O. Vauquelin (2000) A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire Safety Journal, Vol.34, pp.393-401.
6. S. R. Turn, An Introduction to Combustion, Appendix A, McGraw-Hill, 1996.
7. Fire Protection Handbook, 19th edition Volume II, NFPA, 2003.
8. H. Koseki, T. Yumoto (1988), Air entrainment and thermal radiation from heptane pool fire, Fire Technology, Vol.24, pp.33-47
9. G. Heskestad (1983) Virtual origins of fire plume, Fire Safety Journal, Vol.5, pp.109-114.
10. Initial fires, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 1993.
11. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, Numerical Recipes, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1992.
12. S. R. Turns An Introduction to Combustion : Concepts and Applications, McGraw-Hill, 1999.

(2007년 8월 2일 논문접수, 2007년 9월 17일 심사완료)