

콘 칼로리미터를 이용한 자동차 구성 요소별 연소 특성 분석

Combustion Characteristics of Car Components Using Cone-Calorimeter

박은영·박덕신^{1)*}

한국과학기술연합대학원대학교, ¹⁾한국철도기술연구원
(2009년 2월 9일 접수, 2009년 6월 10일 채택)

Eun-Young Park and Duckshin Park^{1)*}

University of Science and Technology, ¹⁾Korea Railroad Research Institute

(Received 9 February 2009, accepted 10 June 2009)

Abstract

The combustion characteristics of car components have been investigated. The combustion parameters like heat release rate, smoke production, yield of carbon dioxide and carbon monoxide and mass loss rate were analyzed by cone-calorimeter for representative samples (seat, carpet, headrest, rubber mat, dash board and electric wire) collected from a used car. The results from sample combustion showed that cover and sponge in seat more quickly ignited and flamed than other parts. The heat released from the combustion of dash board sample was 144.29 kw/m² and the smoke produced by the wire combustion was 6896.4 m²/m². The yields of carbon dioxide and carbon monoxide were in the ranges of 1.09~2.76 kg/kg and 0.0262~0.1008 kg/kg, respectively.

Key words : Vehicle, Fire, Combustion, Emission, Cone-calorimeter

1. 서 론

국토해양부의 통계자료에 따르면 2007년 기준으로 국내에 등록된 자동차는 총 1,643만대로서 이중 승용차가 1,201만대, 승합차가 110만대, 화물차가 317만대를 차지하여 (국토해양부, 2007) 이제는 자동차가 필수품이라고 할 만큼 널리 보급되어 운행되고 있다.

자동차 보급대수와 함께 차량의 화재로 인한 인명 및 재산상의 피해도 증가하여 2007년 한 해 동안 전

국에서 발생한 47,882건의 화재 중 차량에서 발생한 화재는 6,217건으로 전체의 약 13%를 차지하였으며, 이로 인해 50명이 사망하고, 104명이 부상을 입는 인명피해와 약 19.6억 원의 재산상 손실을 기록했다 (소방방재청, 2007).

자동차 화재의 원인은 전기장치가 28.8%, 담뱃불이 8.7%, 방화가 1.6%를 차지했으며, 화재발생 위치는 엔진룸이 62.8%, 실내가 9.6%, 차량 외부가 5.8%로서 자동차 화재의 대부분은 엔진룸에서 기기의 결함이나 전기장치에 의해서 발생한 것으로 나타났다 (소방방재청, 2007).

자동차에 포함된 가연분의 양은 차종이나 차량 제

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-460-5367, E-mail : dspark@krii.re.kr

작사에 따라 큰 차이를 보이지만 일반적으로 150~200 kg 정도라고 보고된 바 있으며 (Lönnermark and Blomqvist, 2006), 가연분의 종류별 함유량은 염화비닐 (PVC: Polyvinyl Chloride)이 10 kg, 폴리우레탄 (PUR: Poly Urethane Reactive)이 20 kg, 폴리에틸렌 (polyethylene)이 10 kg, 폴리메틸메타크릴레이트 (PMMA: Poly Methyl Methacrylate)가 60 kg, 고무 (rubber)가 15 kg 그리고 기름 (petrol, oil)이 50 kg 정도인 것으로 분석되기도 하였다 (Persson and Simonson, 1998).

차량 제작사나 운전자는 차량의 안전장치나 인테리어에 대해서만 관심을 보이고 정작 위험성이 높은 차량화재에 대해서는 소홀한 것으로 나타났다. 실제 차량에서 화재가 발생할 경우 차량용 소화기만 있어도 화재를 쉽게 제압할 수 있는 경우가 많지만 현재는 7인승 이상 차량에만 비치하도록 규정되어 있어 모든 자동차에 소화기를 비치해야 한다는 내용으로의 법 개정이 필요한 실정이다 (국토해양부, 2008).

자동차에 사고나 방화로 인해 화재가 발생하면 가연성 물질이 연소하여 고온의 열이 발생하고 다량의 유독가스가 생성된다. 유독가스는 짧은 시간에 주변으로 확산되어 차량 탑승자나 주변의 차량에 영향을 미치게 된다. 특히 자동차 화재가 주차장이나 터널과 같이 폐쇄된 공간에서 발생하게 되면 피해와 영향이 더 커질 수 있다.

1.1 연구 사례

자동차 화재는 연료탱크가 파열되는 경우를 제외하면 짧은 시간에 폭발이 발생하는 경우는 드물다. 열린 공간에 있는 차량의 엔진에서 발생한 화재가 실내로 옮겨지기까지는 상당시간이 소요되므로 화염으로부터 운전자가 대피할 수 있는 시간은 충분하다. 차량 화재와 관련된 연구는 실제 차량을 연구 대상으로 다양한 규모에서 수행하는 화재 시험과 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션으로 나눌 수 있다. 화재 시험은 주로 발열량이나 연기 거동 등에 대한 시뮬레이션을 통해 대피시간을 산출하는 것이며, 대표적인 연구 사례는 다음과 같다.

Lönnermark and Blomqvist (2006)는 소규모 화재 시험에서 자동차의 구성성분 중 많은 부분을 차지하는 물질을 대상으로 어떤 성분에서 유해가스를 발생시키는지에 대한 연구를 수행한 바 있다. 시험에서는

차량 연소에 의한 이산화탄소, 일산화탄소, 시안화수소, 일산화질소, 암모니아, 염화수소 및 이산화황 등의 발생량을 분석하였다. Lönnermark and Blomqvist (2006)는 시험에서 0.5 m³ 규모의 챔버와 75×75 (mm) 크기의 시편을 각각 25 kW/m², 50 kW/m²에 노출시켜 열분해 조건과 불꽃연소 조건에서 화재시험을 수행하였다. FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy)을 이용하여 분석한 가스상 물질의 시험 결과를 보면 자동차 성분으로부터 질소가 포함된 많은 물질들이 발생하였고, HCN과 다른 질소 화합물들이 발생할 가능성이 있는 것이 분석되었다고 한다. FTIR을 이용하여 분석한 결과, 시편에서 질소가 함유된 물질이 다량 발생하였고, HCN과 다른 질소 화합물들의 발생 가능성이 높다는 결론을 내렸다. 유해 화합물의 발생 가능성이 가장 높은 물질은 폴리우레탄 성분으로 추정되는 덩게가 있는 의자로서 질소 성분을 비롯해서 HCl, SO₂ 등을 방출한다고 하였다. 또한 다량의 HCl을 방출하는 성분은 차량 문과 전선 등에 많이 포함되어 있다고 하였다.

대규모 화재시험의 대표적인 예는 Allianz 기술연구소에서 실제 차량을 이용해서 실시한 화재시험으로서 시험을 통해 엔진룸에서 화재가 발생할 경우 화염과 연기가 어떻게 전파되고 화재 진행과정에서 실제 승객에게 위험을 주는 단계는 언제부터인지를 파악하고자 하였다. 실제시험에서는 먼저 가연성 액체를 용기에 담아 엔진룸 밑에 위치한 후 발화시켜 화재를 발생시켰으며, 차량의 여러 지점에 온도센서를 장착하고 산소, 이산화탄소 및 일산화탄소 등의 농도를 지속적으로 측정하였다. 그 결과, 화재는 발화 후 천천히 전파되어 5분이 경과할 때까지는 자동차의 전면부에서만 진행되다가 그 이후에 HVAC 시스템을 통해 차량 내부로 전파되었다. 그리고 8분가량이 경과한 후 차량의 내장재에서 화염이 발생하여 시험을 종료하였다. 이 시험을 통해 최근 생산되는 자동차가 과거에 비해서 훨씬 많은 양의 플라스틱을 사용하지만 화재 전파속도에는 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 내렸다 (보험개발원, 2007). 화재 전파 과정을 보면, 화염이 발생하기 전에 연기가 먼저 차량 내부로 전파되었으나 화염이 차량 내부에 도달하기 전까지 승객은 생명이 위협받지 않았다. 그러나 6분이 경과한 후 머리 받침대 부근에서 실내온도가 급격히 상승하면서 산소농도는 떨어졌으며 실내온도

와 마찬가지로 일산화탄소의 농도 역시 급격하게 상승하였다. 발화 후 6분 30초가 경과하면 온도와 유해가스의 농도가 높아져서 승객의 생명을 위협할 수준까지 상승하는 것으로 나타났다.

Ingason and Lönnemark (2005)는 실물크기의 모형 화물차를 이용한 터널 연소시험에서 화물차에 각기 다른 종류의 화물을 탑재한 후 화물의 종류에 따른 발열 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Wichmann *et al.* (1995)은 터널에서 화물차가 연소되는 동안 PCDD/F (Polychlorinated-dibenzo-p-dioxin/furan), PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons)의 발생여부와 농도수준을 파악하기 위한 연구를 수행한 바 있다.

차량의 연소에 따른 발열, 발연 및 유독가스 발생 등에 관한 시뮬레이션 연구는 실제 화재시험을 통한 연구보다 많이 수행되고 있다. 시뮬레이션 연구에서는 연기나 유독 가스의 거동을 모사하거나, 실제 화재시의 연소 특성과 모델식의 비교를 통해 예측식을 검증하는 형태의 연구(Nilsen and Log, 2009)가 주로 진행되고 있다.

Bari and Naser (2005)는 시뮬레이션을 이용한 모의 실험에서 Fluent 6.0을 이용하여 도로터널에서 차량 연소시 유속, 온도 및 배출가스에 대한 예측을 통해 연기의 거동을 파악하여 터널에서 화재가 발생할 경우 차량의 엔진을 정지시키고, 승객을 신속하게 대피시키는 것이 중요하다고 강조하였다.

이 외에도 터널에서 화재가 발생한 경우 환기 속도가 화염의 확대는 제어에 미치는 영향에 대한 연구(Roh *et al.*, 2008)와 강제 환기가 화물차 및 승용차 화재시 발열량에 미치는 영향(Carvel *et al.*, 2001) 등에 대한 연구들도 수행된 바 있다. 그리고 본 연구에서 사용한 콘칼로리미터는 다양한 재료의 연소 특성을 파악할 수 있는 장비로, 박병현 등(2005)은 바이오매스 연소특성 분석에 활용하였으며, 이철규 등(2004)은 내장판용 복합재료의 화재특성 분석에 이용하는 등 광범위하게 활용되고 있다.

1.2 연구 목적

도로터널에서 화재가 발생할 경우 차량에 탑승한 승객이 안전한 곳으로 탈출하기 위해서는 환기를 통해 유독가스를 신속하게 배출해야 한다. 환기시스템을 적절한 수준으로 설계하기 위해서는 터널에서 발생한 화재의 규모를 정확하게 산정해야 한다. 이를

위해서는 차량의 구성요소별 연소특성 자료를 확보해야 한다. 전 세계적으로 차량의 구성요소별 연소특성 자료를 제공한 예는 거의 없으므로 본 연구를 통해 차량 화재시 유독가스를 배출할 가능성이 많은 요소를 중심으로 시편을 만들어서 콘 칼로리미터를 이용해서 실험을 실시하였다. 실험을 통해 차량 구성 요소에 대한 연소특성 자료를 확보했으며, 차량의 구성요소별 연소가스 총 배출량 산정, 차량 한 대나 1/2 대를 이용한 대규모 화재시험 등에 대한 연구는 추후에 별도로 진행하고자 한다.

차량의 각 요소에 따른 유해성 분석을 통해 향후 실제 차량의 화재시 발생할 수 있는 열이나 연기 혹은 연소가스의 발생량을 파악하고, 주차장이나 터널의 환기설비 용량 및 탑승자의 대피 시간 산출 등에 대한 추후 연구의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 대상 차량 선정 및 전처리

본 연구에서는 H사에서 1992년에 제작한 2,000 cc 급의 승용차를 실험 대상으로 선정하고, 경기도 파주시에 위치한 폐차장에서 연소시험용 시편을 샘플링 하였다. 승용차가 폐차장에 도착하면 해체작업을 통해 재활용이 가능한 부품을 분류한 후 차체를 파쇄하고 재활용이 불가능한 부품은 폐기한다. 해체작업 과정에서 차량의 내장재와 구성요소를 몇 가지로 분류하여 시편으로 사용하였다.

자동차 구성품은 재질에 따라 의자 내부 스펀지(sponge)와 시트(seat), 머리 받침대(headrest), 바닥 카펫(carpet), 차량 도어, 바닥의 고무(rubber mat), 계기판(dash board) 그리고 엔진룸의 전선(electric mat) 등으로 나누었다. 차량시트는 재질에 따라 가죽과 천으로 나누고, 가죽 시트와 얇은 스펀지가 붙어있는 부분을 하나의 샘플로 추가하여 차량의 구성요소를 총 10가지로 분류하였다. 시편은 연소실험의 분석 장비로 사용된 콘 칼로리미터의 샘플 홀더(100×100 (mm))에 맞추기 위해 절단기로 전처리를 하였다(그림 1).

2.2 콘 칼로리미터 (cone-calorimeter)

본 연구에서는 듀얼타입 콘 칼로리미터(dual type

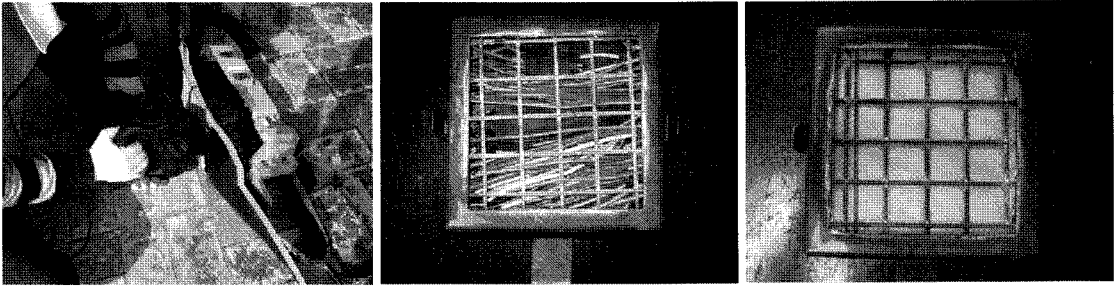


Fig. 1. Pre-treatment of car component samples.

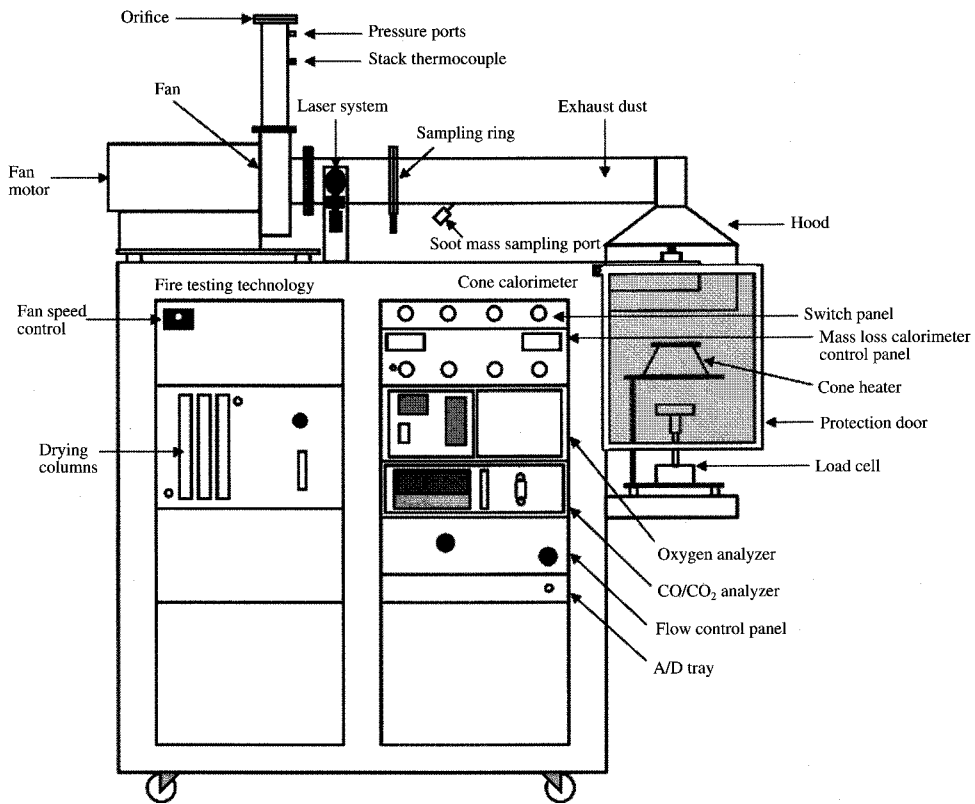


Fig. 2. Detail view of Dual type Cone Calorimeter.

cone calorimeter; 영국 FTT사)를 연소실험 장비로 사용했다. 이 장비는 그림 2에 나타낸 바와 같이 큰 형태의 복사전기히터, 산소분석 장치, 유량측정용 레이저가 부착된 배기 시스템, 시료의 질량을 측정하기 위한 질량측정 장치, 시료 홀더, 스파크 점화회로, 열

량 측정을 위한 열량계 (heat flux meter), 메탄열량 측정을 위한 버너, 데이터 수집·분석시스템, CO와 CO₂ 측정을 위한 NDIR 분석기 등으로 구성되어 있다. 잘려진 원뿔 형상의 복사전기히터는 100 kW/m²까지 수평 및 수직 방향으로 복사열을 방출하도록 설계되

Table 1. Key parameters of combustion characteristics deduced from the test.

Parameters	Unit	Comments
HRR	kW/m ²	Heat release rate per unit area
SPR	m ³ /s	Smoke production rate per unit time (sec.)
The percentage of CO, CO ₂	%	The concentration of carbon monoxide, carbon dioxide in emission gas
OCR	g/s	Oxygen consumption rate per unit time (sec.)
Mass	g	Mass of remained sample during combustion
TTI	s	Time to ignition
TTF	s	Time to flameout
THR	MJ/m ²	Total heat released per unit area
t _{fp}	s	Time to peak heat release rate after ignition
TSR	m ³ /m ²	Total smoke released at the end of the test
CO yield	kg/kg	The mass of CO produced relative to the mass loss rate of the specimen
CO ₂ yield	kg/kg	The mass of CO ₂ produced relative to the mass loss rate of the specimen

어 있다. 온도는 3개의 K타입 온도계와 30개의 PID (proportional-plus-integrate-plus-derivative) 온도 조절기로 조절된다. 배기시스템은 스텐리스 강으로 제작되었으며, 후드, 가스 샘플링 ring probe, 배기 팬(최소 0.1 g/s의 분해능, 0~50 g/s의 유량조절), orifice plate 유량계 (thermocouple 및 differential pressure transducer)로 구성되어 있다. 이 장비는 ISO 5660, ASTM E 1354, ASTM E 1474, ASTM E 1740, ASTM F 1550, ASTM D 5485, ASTM D 6113, NFPA 264, CAN ULC 135, BS 476 Part 15를 포함한 국내외 규격의 시험이 가능하다(박병현 등, 2005).

자동차의 구성요소별 연소특성을 파악하기 위해서 큰 칼로리미터를 이용해서 표 1에 나타낸 것과 같이 발열량(HRR: heat release rate), 발연량(SPR: smoke production rate), 일산화탄소와 이산화탄소 농도, 산소 소모율(OCR: oxygen consumption rate), 질량 변화, 착화(TTI: time to ignition) 및 소화시간(TTF: time to flameout), 총 발열량(THR: total heat release rate), 총 발연량(TSR: total smoke release rate), 최대 발열량에 이르는 시간, 일산화탄소와 이산화탄소의 총 배출량 등 인자를 구하였다.

2.3 실험 방법

체적이 100 (W) × 100 (L) × 36 (T) mm, 표면적이 88.4 cm²로 고정되어 있는 시료홀더를 이용하여 연소실험을 수행하였다. 전선은 지름이 20mm로서 두 개의 조절이 어려워 표면적만 다른 시료와 동일하게 하였다. 연소 중 시료가 열에 의해 부풀거나 시료

홀더 밖으로 빠져나가는 것을 막기 위해 그리드를 사용하였고, 시료와 발열판 사이의 거리는 25 mm, 배기 팬의 용량은 24 L/s로 고정하였다. 시험 전에 N₂, CO, CO₂는 표준가스를 이용하여, O₂는 외기를 이용하여 보정하였다. 그리고 저울과 연기감지기를 보정한 후에 실험을 수행하였다. 실험을 하는 동안 가스의 유량이나 농도를 계속 확인하여 초기 조건이 유지되도록 하였다. 실험은 큰 칼로리미터의 온도를 높여 heat flux가 50kW/m²에 도달한 후에 시작했으며, 원하는 heat flux에 도달했을 때 큰 형태의 복사장비 히터 발열판 내의 온도는 771°C이었다.

연소 실험은 점화 후 20분 동안 진행하고, 불꽃연소 시간이 길어지는 시료는 훈소(smoldering combustion)가 시작될 때부터 연소시간을 10분 더 연장하였다. 실험의 종료는 시료의 질량 변화나 연소특성에 변화가 없는지를 관찰하여 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

자동차를 대상으로 가연성 내장재, 전선 등을 10가지로 분류한 후 연소특성을 파악하기 위해 각 요소별로 연소 실험을 한 결과를 표 2에 나타냈다. 실험 결과 착화시간은 시트 내부의 스펀지가 3초로 가장 짧았으며, 가죽 시트가 5초, 천 시트가 6초로서 만약 차량 내부에서 화재가 발생할 경우 시트에서 가장 먼저 연소가 시작될 것으로 예상된다. 반면 차량 바닥의 고무와 전선, 그리고 카펫은 착화까지 20초 이

Table 2. Combustion characteristics of the tested car components.

	Thick (mm)	Weight (g)	Mass lost (g)	Time (s)			Heat release (kW/m ²)	CO ₂ yield (kg/kg)	CO yield (kg/kg)	CO yield/CO ₂ yield	Total smoke production (m ² /m ²)	
				Ignition	Flame out	End test						
Seat	Cover (blanket)	3	7.1	6.39	6	98	855	20.45	2.76	0.0441	0.0160	570.0
	Leather	0.5	5.8	5.59	5	115	620	23.74	2.52	0.0320	0.0127	463.9
	Sponge	35	24.7	23.68	7	436	1200	66.54	2.37	0.0650	0.0274	1002.6
	Cover with thin sponge	11	13.8	13.8	3	189	775	36.52	1.70	0.1046	0.0615	713.5
	Carpet	14	15.5	14.96	22	253	510	77.65	2.08	0.0610	0.0293	431.0
	Headrest	7	21.0	20.97	13	754	1080	54.29	2.08	0.0879	0.0423	451.4
Rubber	Door	21	55.8	35.83	10	1530	1810	85.68	2.63	0.0445	0.0109	2386.6
	Flat	4	48.0	24.43	29	435	1225	75.19	2.43	0.0548	0.0226	2602.4
	Dash board	10	63.1	60.99	13	1245	1835	144.29	1.96	0.0513	0.0262	5685.4
	Wire	20	226.2	57.40	30	849	1495	105.94	1.09	0.1008	0.0925	6896.4

상이 소요되어 연소가 되기 위해서 필요한 초기 열량이 높은 것을 알 수 있었다.

연소단계 중 착화 후 불꽃이 소멸될 때까지 즉, 불꽃연소는 발열량이 높은 연소 단계로서 차량 도어의 고무 부분이 차량 구성요소 중 가장 긴 1,520초로 나타났다. 반면 차량 시트커버를 구성하는 천이나 가죽은 상대적으로 불꽃연소 시간이 짧았다. 연소실험의 종료는 큰 칼로리미터에서 연소특성을 파악하여 자동으로 결정된다. 연소시간은 카펫이 510초로 가장 짧았으며, 도어의 고무 부분과 계기판이 1,800초 이상으로 가장 길었다.

총 발열량은 계기판과 전선이 각각 144.29kW/m²와 105.94kW/m²로 나타났으며, 시트커버 부분인 천과 가죽이 20.45kW/m²와 23.74kW/m²로 다른 부분에 비해 상당히 낮은 수준의 발열량을 보였다. 연기 발생량은 전선이 6,896.4m²/m²로 가장 높았으며, 그 다음이 계기판으로 5,685.4m²/m²이었다. 연소시 발생하는 이산화탄소와 일산화탄소의 발생량을 연소되는 시료의 무게의 비로 환산해 보면 각각 1.09~2.76kg/kg, 0.0262~0.1008kg/kg의 범위로 나타났다. 이산화탄소의 경우 천 시트에서 가장 많이 발생하였으며, 일산화탄소의 경우 전선에서 가장 많은 양이 발생하는 것으로 나타났다. 자동차 구성요소에 대한 열분해와 불꽃연소를 실시한 Lönnemark and Blomqvist (2006)의 결과를 보면 불꽃연소 상태에서 이산화탄소의 발생량이 0.61kg/kg~2.4kg/kg의 범위로 나타

나 본 실험결과와 유사한 수준임을 알 수 있었다.

착화 후 불꽃연소 과정과 소화 후 진행되는 혼소 과정에서의 연소 특성은 연소 온도 및 가연분의 양에 따라 상당히 다른 경향을 보였다. 표 3은 불꽃연소와 혼소시 각 요소별로 발열량, 질량감소율, 이산화탄소 발생량 및 일산화탄소 발생량에 어떤 차이가 나는지를 보여준다. 발열량의 경우 혼소시에 비해 불꽃연소시 약 2배에서 10배까지 높게 나타났으며, 질량 감소율도 불꽃연소시가 훨씬 높은 것을 알 수 있었다. 반면 이산화탄소의 경우 혼소시 발생량이 더 많았으며, 일산화탄소는 시트커버 부분을 제외한 모든 요소에서 이산화탄소와 동일하게 혼소시 더 높은 양을 발생시키는 것으로 나타났다. 이는 불꽃 연소시에 비해 혼소시 연소되는 시료의 무게가 매우 적어서 연소 무게 대비 연소 기체의 발생량이 높기 때문으로 판단된다.

3.1 발열량

그림 3(a), 3(b)에 각 요소들의 연소시 열량 특성을 나타냈다. 그림 3(a)는 연소시 단위면적당 발생하는 발열량이며, 그림 3(b)는 시간에 따른 총 발열량의 변화를 의미한다. 연소시 발열특성은 불꽃 연소가 일어나는 초기 단계에서는 카펫이 순간 최대 발열량을 보였으나 가연분의 양이 급격히 줄어들어 200초 이후에는 발생하는 열이 매우 낮은 것으로 나타났다. 시트커버 천과 가죽도 카펫과 유사한 발열 특성을

Table 3. Comparison of combustion characteristics between flaming phase and smoldering phase (HRR: heat release rate, MLS: mass loss rate, COY: carbon monoxide yield, CO₂Y: carbon dioxide yield).

	Flaming				Smoldering			
	HRR	MLR	COY	CO ₂ Y	HRR	MLR	COY	CO ₂ Y
Cover	106.66	0.054	0.0502	1.25	10.17	0.0017	0.0202	8.60
Leather	69.00	0.041	0.0461	1.25	13.88	0.0022	0.0000	7.72
Sponge	146.19	0.049	0.0202	1.87	21.47	0.0030	0.4926	7.08
Cover+thin sponge	105.98	0.060	0.0405	1.29	14.04	0.0040	0.2452	3.45
Carpet	153.52	0.058	0.0289	1.86	9.21	0.0065	0.3218	3.87
Headrest	62.35	0.026	0.0653	1.87	35.92	0.0059	0.3110	4.21
Door rubber	96.54	0.022	0.0371	2.58	26.75	0.0083	0.1526	3.29
Flat rubber	167.49	0.048	0.0464	2.02	27.87	0.0061	0.0888	4.10
Dash board	174.16	0.046	0.0350	1.85	79.65	0.0076	0.2639	3.33
Wire	133.08	0.067	0.1031	0.85	71.43	0.0038	0.0490	6.25

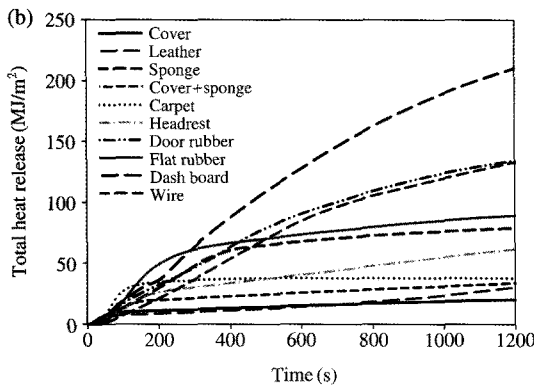
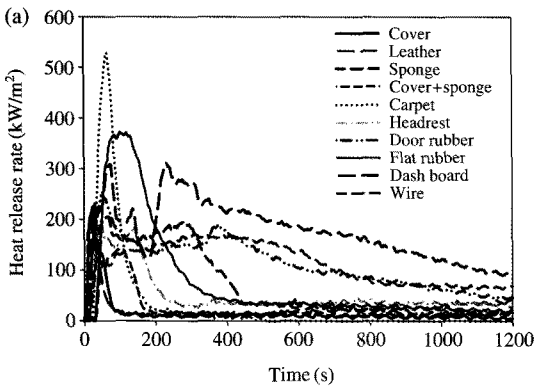


Fig. 3. Heat release rate (a) and total heat released (b) during whole combustion process of car components.

나타내었다. 그러나 전선의 경우 점화가 일어난 이후부터 700초 이상 연소되는 동안 150 kW 수준의 높은 발열량을 지속적으로 발생시켰다. 고무 요소 중

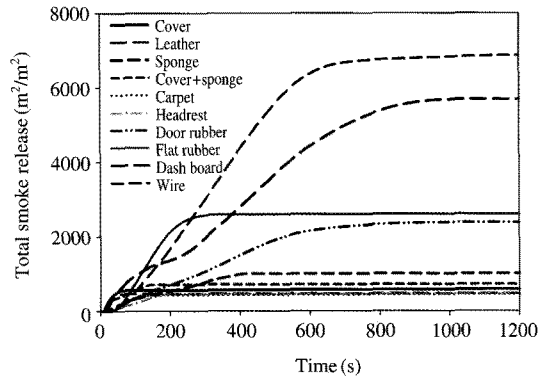


Fig. 4. Total smoke released during whole combustion process of car components.

차량 도어의 고무는 전선과 유사하게 일정 수준의 발열량을 보이다가 서서히 감소하였지만, 차량 바닥의 고무는 불꽃 연소 단계에서 높은 발열량을 보였다. 계기판은 이중구조로 되어 있어서 발열 특성도 다른 요소와 다르게 두 개의 첨두를 보였다.

총 발열량은 계기판이 가장 높은 값을 보였으며, 전선과 도어의 고무 순으로 나타났다. 전선과 도어 고무에서의 발열은 시험이 종료되는 시점까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 만약 실제 차량에서 화재가 발생할 경우 완전히 소화가 될 때까지 꾸준히 연소되면서 열을 발생시킬 것으로 예측된다. 머리 받침대와 가죽 시트 부분도 그 양이 크진 않으나 연소 종료시까지 발열량이 증가하는 경향을 보여 시료의 양이 충분하다면 발열량이 더 클 것으로 판단된

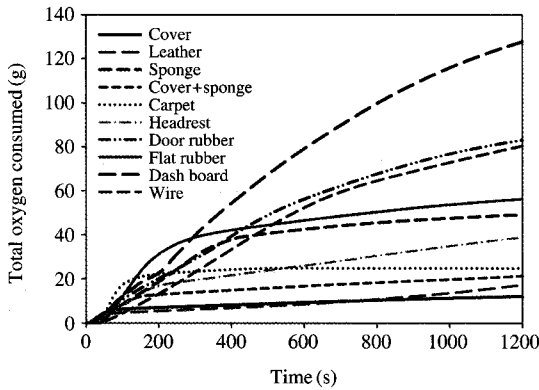


Fig. 5. Total oxygen consumed during whole combustion process of car components.

다.

3.2 발연량

시료가 연소되면서 발생시키는 연기의 총량인 발연량은 전선이 6,867 m²/m²으로 가장 높은 값을 나타내었으며, 계기판이 5,685 m²/m²로서 다소 높은 값을, 고무요소가 2,500 m²/m² 정도의 발연량을 보였으며, 기타 요소는 1,000 m²/m²의 값을 보였다. 발연량의 경우 대부분의 요소들이 불꽃연소 단계에서 지속적으로 많은 양의 연기를 발생시켰으며, 혼소 단계에서는 발열 수준이 매우 낮았다. 계기판의 경우 두개의 요소가 붙어있는 이중구조를 지니고 있어 그림 4에 나타난 바와 같이 변곡점을 보이고 있다. 발연량이 높은 전선과 계기판의 경우 발연량도 가장 높은 것으로 나타나 차량 화재시 가장 유해할 것으로 예상된다.

3.3 총 산소소모량

연소가 진행되는 동안 사용된 산소의 양은 연소 정도에 대한 지표로 사용된다. 그림 5의 총 산소소모량은 그림 3(b)의 총 발열량과 유사한 경향을 보여서 연소 과정에서 소모되는 산소의 양에 의해 발열량과 화재의 규모가 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 이산화탄소 및 일산화탄소 발생량

그림 6(a)에 단위 시간당 이산화탄소의 발생량을 나타내었다. 이산화탄소의 발생 특성은 그림 3(a)에

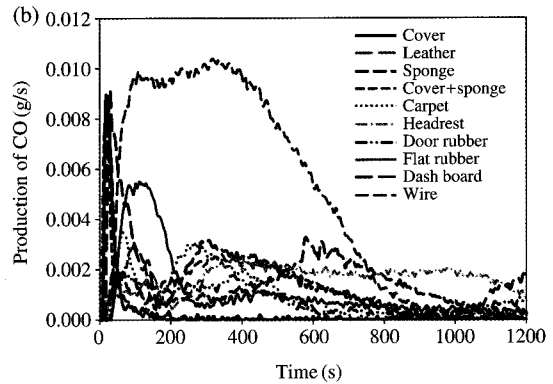
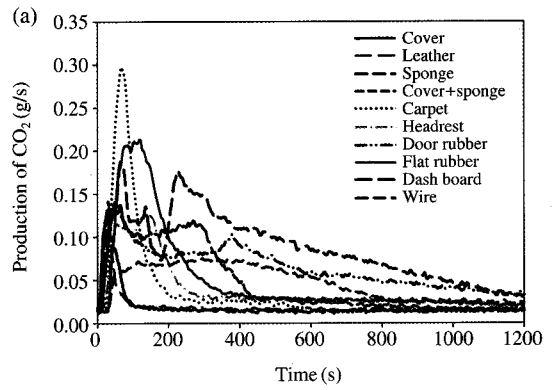


Fig. 6. Carbon dioxide production (a) and carbon monoxide production (b) during the whole process of car components combustion.

나타낸 발열 특성과 매우 유사한 것으로 나타났다. 이산화탄소의 경우 카펫에서 0.2963 g/s로 순간 최대 발생량을 보였으며, 차체 바닥의 고무와 계기판에서 각각 0.2099 g/s와 0.1879 g/s로 나타났다.

그림 6(b)에 나타난 일산화탄소의 발생특성은 이산화탄소와는 상당한 차이를 보였다. 전선의 일산화탄소의 발생량이 가장 많았으며, 착화 후 불꽃 연소 기간 동안 많은 양의 일산화탄소가 지속적으로 발생되었다. 카펫, 스펀지의 경우 혼소가 진행되는 동안 일산화탄소의 발생량이 불꽃 연소시에 비해 더 많은 것으로 나타났다. 얇은 스펀지가 붙어있는 가죽 시트 커버와 계기판은 가죽 시트가 연소된 후 스펀지가 연소되어 두 개의 첨두를 나타내었다. 계기판의 경우 혼소의 뒷부분에서 일산화탄소 발생률이 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 머리 받침대는 어느 정도 연소가 진행된 이후부터 연소 종료시까지 지속적으로

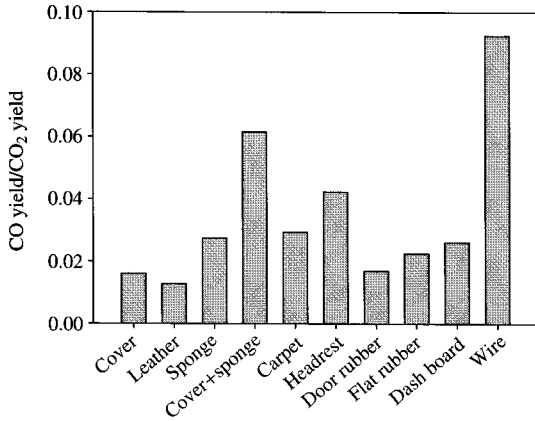


Fig. 7. Combustion completeness (ratio of carbon monoxide yield and carbon dioxide yield) of car components.

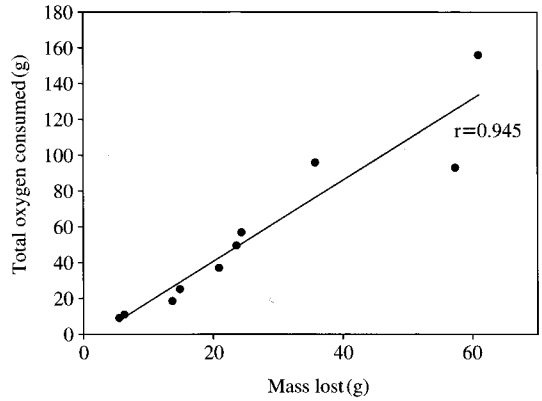


Fig. 9. Total oxygen consumed (TOC) for each component in relation to mass lost.

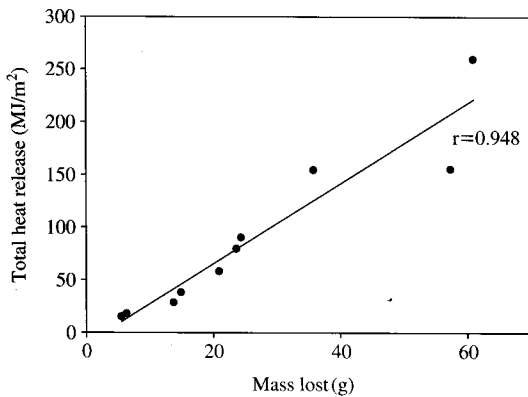


Fig. 8. Total heat release (THR) for each component in relation to mass lost.

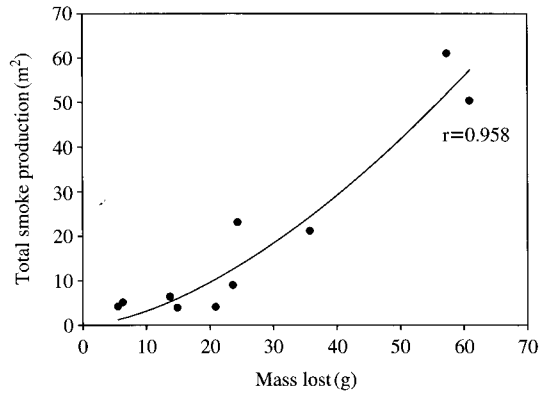


Fig. 10. Total smoke production (TSP) for each component in relation to mass lost.

로 일산화탄소가 발생되었다.

이산화탄소 발생량에 대한 일산화탄소 발생량의 비율은 시료의 완전연소 정도를 나타내며, 독성의 지수로 사용된다(Kotresh *et al.*, 2006). 본 연구에서도 큰 칼로리미터로부터 산출되는 값인 이산화탄소 및 일산화탄소의 발생량을 바탕으로 이들 사이의 비율 산출적으로 나타내었다. 표 2와 그림 7에 나타난 차량 구성요소별 이산화탄소 발생량에 대한 일산화탄소 발생량의 비율은 전선이 0.0925로 가장 높은 값을 보여 차량 연소 시 전선에서 유해물질의 발생이 가장 높은 것으로 판단된다.

3.5 연소 지수간 상관관계 분석

차량 요소의 연소 특성을 나타내는 지수들 간의 상관관계를 SPSS 13.0 프로그램을 이용해서 산출하고, 이를 그림 8~10에 나타내었다. 그림 8은 연소가 진행되는 동안 시료의 무게 변화와 발열량의 변화 사이의 상관관계를 보여주며, 두 지수 사이의 상관성(r)은 0.948로서 연소되는 시료의 양이 증가 할수록 발열량도 같이 증가하는 것으로 나타났다.

그림 9는 연소가 진행되는 동안의 무게 변화와 연소 과정에서 소모된 총 산소량과의 상관관계를 보여 주고 있으며, 상관성(r)은 0.945로서 그림 9에서와 마찬가지로 시료의 무게 변화와 산소 소모량 간에는

밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 그림 10은 무게 변화와 발연량의 상관관계를 보여주는 것으로서 상관성(r)이 0.937로서 두 지수간의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 상관관계 분석을 통해 연소과정에서 시료의 질량이 줄어들수록 발연량과 발연량이 증가하고 산소소모량 역시 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

큰 칼로리미터를 이용해서 국내에서 생산된 자동차의 가연성 내장재 및 전선 등에 대한 발연량, 발연량, 산소소모량, 이산화탄소 및 일산화탄소 발생량 등 연소특성을 분석하여 차량의 각 구성요소들 간에 서로 다른 연소 경향을 보이는 것을 확인하였다. 총 10가지의 시료에 대한 분석결과, 발연량이 가장 높은 것은 전선으로서 실제 차량에 화재가 발생할 경우 전선이 차량에 탑승한 사람이나 주변지역에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

연소 속도에 의한 영향을 고려하면 차량 내부에서 화재가 발생할 경우 시트가 가장 먼저 연소되고, 그 이후에 차체 바닥과 계기판으로 연소가 진행될 것으로 예상된다. 실제 차량에서의 화재는 외부나 엔진룸에서 발생할 가능성이 높으므로 연소는 전선에서 시작되어 계기판과 차체 바닥을 통해 차량 내부로 화염이 전파될 것으로 판단된다. 전선, 차체 바닥의 고무 및 계기판의 경우 착화 속도가 다른 요소에 비해 느리게 진행되므로 차량에 탑승한 사람이 대피하거나 소화기를 이용해서 화재를 진압하는데 필요한 시간은 충분할 것으로 사료된다. 그러나 차량화재가 터널이나 지하 주차장과 같이 밀폐된 공간에서 여러 대의 차량이 밀집된 상태에서 발생하여 화재가 확산되면 차량에서 발생된 연기나 연소가스로 인해 대피에 어려움을 겪을 수 있으며, 인명피해나 재산상의 피해가 발생할 가능성이 높을 것으로 예상된다.

본 연구는 시편의 크기가 100×100 mm인 시편에 대해서 분석한 것으로서 실제 차량 한 대가 연소되는 경우에는 차량 구성요소들 간의 혼소로 인해 훨씬 더 심각한 결과를 초래할 것으로 판단된다. 따라서 각 요소에 대한 연소특성 분석결과를 바탕으로 차량에서 발생할 수 있는 연소 가스나 연기 등을 산출하고 밀폐된 공간에서의 차량에서 화재가 발생할

경우 승객이 충분히 대피할 수 있는 시간을 확보하기 위한 소화 및 배연 설비의 용량 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 국토해양부 (2007) 자동차 등록 현황, 국토해양부 자동차관리과.
- 국토해양부 (2008) 자동차안전기준에 관한 규칙, 국토해양부령 제87호 제57조(소화설비).
- 박병현, 박덕신, 조영민, 박은영, 이철규 (2005) 큰 칼로리미터를 이용한 바이오매스의 연소특성에 관한 연구 (I) -단풍잎, 은행잎, 덩굴, 솔잎에 대해서-, 한국대기환경학회지, 21(4), 459-469.
- 보험개발원 (2007) 차량승객과 구조자에 대한 차량화재 위험 (Motor Vehicles Fire-What is the risk to Occupants and Rescuers, 『Allianz』, 보험개발원 전문자료.
- 소방방재청 (2007) 2007년도전국화재발생현황분석결과.
- 이철규, 정우성, 이덕희 (2004) 큰칼로리미터를 이용한 내장판용 복합재료의 화재특성, 한국철도학회논문집, 7, 55-59.
- Bari, S. and J. Naser (2005) Simulation of smoke from a burning vehicle and pollution levels caused by traffic jam in a road tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 20, 281-290.
- Carvel, R.O., A.N. Beard, P.W. Jowitt, and D.D. Drysdale (2001) Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels, Fire Safety Journal, 36, 569-596.
- Ingason, H. and A. Lönnemark (2005) Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels, Fire Safety Journal, 40, 646-668.
- Kotresh, T.M., R. Indushekar, M.S. Subbulakshmi, S.N. Vijayalakshmi, A. S.I. Krishna Prasad, V.C. Padaki, and Ashwini K. Agrawal (2006) Effect of heat flux on the burning behaviour of foam and foam/Nomex III fabric combination in the cone calorimeter, Polymer Testing, 25, 744-757.
- Lönnemark, A. and P. Blomqvist (2006) Emissions from an automobile fire, Chemosphere, 62, 1043-1056.
- Nilsen, A.R. and T. Log (2009) Results from three models compared to full-scale tunnel fire tests, Fire Safety Journal, 44, 33-49S.
- Persson, B. and M. Simonson (1998) Fire emissions into the atmosphere, Fire Technology, 34, 266-279.
- Roh, J.S., S.S. Yang, H.S. Ryou, M.O. Yoon, and Y.T. Jeong

(2008) An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires-heptane pool fire case, *Building and Environment*, 43, 1225-1231.

Wichmann, H., W. Lorenz, and M. Bahadir (1995) Release of PCDD/F and PAH during vehicle fires in traffic tunnels, *Chemosphere*, 31, 2755-2766.