플라스틱의 연소특성 데이터베이스 구축

Database Construction for Combustibility of Plastic Materials

박원희*

Park, Won-Hee*

Abstract

In this study, the combustion characteristics of various synthetic polymers (plastics) are investigated using a cone calorimeter. Twenty-four types of plastics, such as general plastic and foamed plastic, are considered. The combustion characteristics of plastics can be expressed using a simple pyrolysis model, in which the material generates heat at a given heat release rate upon reaching the pyrolysis temperature. Ignition temperature is obtained by using the ignition times and maximum heat release rates obtained for various incident heat fluxes to the specimens. The database constructed herein provide information on the linearized heat release rate, effective heat of combustion, maximum heat release rate of plastics, and can be used for predicting flame propagation in solid materials of fire phenomena analysis tools and for analyzing flame propagation characteristics and predicting risk in various spaces, as well as buildings and railway vehicles.

Key words : Plastics, Cone Calorimeter, Combustibility, Heat Release Rate, Ignition Temperature

요 지

본 논문에서는 다양한 플라스틱에 대하여 콘칼로리미터를 이용하여 연소특성을 알아보았다. 고려된 플라스틱은 일반적인 플라스틱과 발포폼형태의 플라스틱 등 24종의 플라스틱이다. 플라스틱의 연소특성은 재료가 발화온도 도달시 주어진 열분해율을 발생하는 간단한 열분해 모델을 이용하여 나타낼 수 있으며, 발화온도를 산출하기 위하여 다양한 입사열유속별 발화시간, 최대열방출률 등을 활용하였다. 구축된 데이터베이스는 플라스틱의 선형화된 열방출률, 유효연소열, 최대 열방출률 등이다. 본 논문에서 제시된 데이터베이스는 화재현상 해석도구의 고체재료의 화염전파 예측을 위한 자료로 활용 가능하며, 건축물 및 철도차량뿐만 아니라 다양한 공간에서의 화염전파 특성 해석 및 위험도 예측 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 플라스틱, 콘 칼로리미터, 연소 특성, 열방출률, 발화온도

1. 서 론

일상생활에서 사용되는 재료 중 금속, 세라믹 및 나무와 같은 천연재료 일부를 제외하면 모든 것이 고분자물질(플라스틱)로 구성되어 있다고 해도 과언이 아니다. 또한 플라스틱은 포장분야, 자동차 분야, 건설산업분야, 전기/전자/통신 등 거의 모든 분야에서 활용된다. EUROMAP (2016)에서는 63개국에서의 플라스틱 레진의 생산량과 소비량을 조사 및 예측을 하였는데 전 세계적으로 소비량은 증가했으며 또한 계속 증가 추세이며 Fig. 1에서 지역별 플라스틱 생산량을 보여주고 있다.

Fig. 1. Regional Data for Plastics Consumption (EUROMAP, 2016)

*교신저자, 정회원, ¹ 한국철도기술연구원 책임연구원

² 한국과학기술연합대학원대학교 교수(Tel: +82-31-460-5358, Fax: +82-31-460-5279, E-mail: whpark@krii.re.kr)

Corresponding Author, Member, ¹ Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute

² Professor, University of Science & Technology

이러한 고분자 물질은 발화온도가 상대적으로 낮으며 발화시 화염이 잘 전파되며 발열량이 높으며, 가스성 고분자 물질의 경우 액체 형태로 바뀌고 불뚱 등의 형태로 화재가 전파되기 쉬운 등 화재위험성이 높으며 독성가스도 많이 발생하는 등 화재안전적으로 취약한 재료이다. 고분자 물질의 화재위험성과 관련된 연구들이 다수 존재한다. You and Chung (2018)는 5종의 플라스틱 제품의 화재 위험성을 콘칼로리미터(ISO 5660-1, 2015)를 이용하여 측정한 바 있다. Shi and Chew (2013)은 화재시 일산화탄소와 이산화탄소의 발생량은 탄소의 질량과 상관없는 것을 밝힌바 있다. Lee and Kim (2003)은 다양한 플라스틱 단열재에 대한 열방출을 제시한 바 있으며, 플라스틱으로 이루어진 자동차 내장재의 연소특성이 제시된 바 있다(Lee and Kim, 2010). 플라스틱 이외의 목재의 화재 특성과 관련된 데이터베이스에 관련된 연구도 다양하게 진행되었다(Brenden, 1977; Chamberlain, 1983; Janssens, 1991; Kim and Lilley, 2002; Chow et al., 2004; DiNenno et al., 2008). 또한 Park et al. (2018)은 건축물의 성능위주 소방설계 및 철도분야 안전성 분석 등에 활용 가능한 간단한 열분해 모델을 이용하여 이를 위해 필요한 물성을 선정하여 목재에 대하여 데이터베이스를 제시한바 있다. Park et al. (2016)은 이러한 형태의 데이터베이스를 이용하여 철도차량의 화재전파 예측 등에 활용한 바 있다.

본 연구에서는 국내에서 활용도가 높은 고분자물질(플라스틱)를 선정하여 콘칼로리미터 하에서 다양한 입사열유속에 대하여 열방출율, 유효열방출율 등을 측정하고 발화온도 등을 계산하였다. 본 연구에서 제시한 데이터베이스를 이용하여 플라스틱 재료의 화염 전파 및 발화 현상 등을 수치적으로 예측하는데 유용한 자료로 활용될 수 있다.

2. 본 문

2.1 대상 플라스틱

Fig. 2는 국내에서 사용되는 플라스틱에 대하여 종류별 플라스틱의 비율을 나타내고 있다(FEPIC, 2014). 여기서 LDPE는 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene)이며, HDPE (high density polyethylene)는 고밀도 폴리에틸렌이다. 폴리에틸렌이 국내 사용량의 32 %를 차지하며 가장 많이 사용되는 고분자 물질이며 그 뒤를 폴리프로필렌과 폴리염화비닐(poly vinyl chloride, PVC)가 잇고 있다.

또한 Fig. 3에서 국내에서 실시되는 성능위주설계시 활용되는 가연물 재료에 대하여 활용 빈도를 그래프로 표시하고 있다. 성능설계분석시 활용되는 가연물로는 Fig. 2의 국내 플라스틱 사용량과 같이 폴리에틸렌이 가장 빈번한 것을 알 수 있다. 본 연구에서 고려한 플라스틱은 총 24종류이며, Table 1에 나열되어 있다. Table 1은 채택된 플라스틱 이름과 시편두께 및 활용용도에 대하여 정리되어 있다.

Fig. 2. Domestic Plastic Consumption by Type (FEPIC, 2014)

Fig. 3. Major Combustibles used in Domestic Performance Based Design (An et al., 2017)

고려된 플라스틱은 총 24종이다. 일반적인 플라스틱대상 플라스틱으로는 15종으로 에이비에스(Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS), 아크릴(Arcylic), 에폭시(Epoxy), 고밀도 폴리에틸렌(High Density Polyethylene, HDPE), 엠씨 나일론(Mono Cast Nylon, MC Nylon), 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC) 3종, 폴리에틸렌 테레프타레이트(Polyethylene terephthalate, PET), 아세탈(Polyoxymethylene, POM), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP), 폴리테트라 플루오로에틸렌(Polytetrafluoroethylene, PTFE), 폴리우레탄(Polyurethane, PU), 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride, PVC), 초고분자량 폴리에틸렌(Ultrahigh molecular weight polyethylene, UHMW PE)이다. 발포폼 형태의 재료는 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam, PU foam) 2종, 폴리우레탄 메모리 폼(Polyurethane memory foam, PU memory foam), 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride, PVC), 루버 보드(Rubber board), 가교 폴리에틸렌 폼(Crosslinked PE foam), 무가교 폴리에틸렌 폼(Uncrossed PE foam), 6종이다. 철도차량의 내장재로 활용되는 Flame retardant melamine foam, Flame retardant rubber foam의 2종류와 복합재인 놀이방매트(playroom mat)를 고려하였다.

본 연구에서 고려된 연소특성으로는 콘칼로리미터 입사열유속별 열방출율, 유효연소열, 발화온도이다. 여기서 열방출율은 Fire Dynamics Simulator (FDS; McGrattan et al., 2017)과

Table 1. Selected Plastics in this Study

Plastics	Thickness [mm]	Usage
ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene)	10	general plastics, electrical and electronic products, furniture, musical instruments, miscellaneous goods, interior and exterior materials, etc.
Arcylic	5	covers, paints, containers, lenses, water tanks, etc.
Epoxy	10	laminated materials, packing, electronic products, promotional materials, maintenance reinforcement materials, etc.
HDPE (High Density Polyethylene)	10	general plastics, various containers, packaging paper, pipes, shopping bags, film, kitchen utensils, toys, etc.
MC Nylon (Mono Cast Nylon)	10	synthetic fibers, automobile parts, etc.
PC I (Polycarbonate)	10	universal engineering plastics
PC II (transparent polycarbonate)	1	interior material for railway cabin (billboard cover)
PC III (light diffusion polycarbonate)	1	
PET (Polyethylene terephthalate)	10	liquid containers, fibers, sheets, household appliances, etc.
POM (Polyoxymethylene)	10	universal engineering plastics
PP (Polypropylene)	10	general-purpose plastic, cabinet, rope, bag, automobile interior and exterior materials, home appliance parts, film, packaging paper, etc.
Teflon, PTFE (Polytetrafluoroethylene)	10	coatings, kitchenware, bearings, gaskets, etc.
PU (Polyurethane)	10	general plastics, covers, clothing, artificial leather, paints, elastic materials, etc.
PVC (Polyvinyl chloride)	10	general plastic, pipes, window frames, large containers, wire tubes, furniture, clothing, profiles, etc.
UHMW PE (Ultrahigh molecular weight polyethylene)	10	mechanical parts, automobile parts, bearings, etc.
PU foam I (Polyurethane foam)	10	Foam plastic (cushioning material, bed, sofa, chair, bedding)
PU foam II (Polyurethane foam)	40	
PU memory foam (Polyurethane memory foam)	10	
Rubber board	10	
Crosslinked PE foam (Crosslinked polyethylene foam)	10	
Uncrossed PE foam (Uncrossed polyethylene foam)	10	
Playroom mat (thickness 40 mm)	40	
Flame retardant melamine foam	10	
Flame retardant rubber foam	10	interior material for railway cabin

같은 화재 전산유체해석 도구에서 활용하기 쉽도록 선형화를 수행하여 정리하였다.

2.2 콘칼로리미터 실험 수행

실험 진행은 Fig. 4와 같이 ISO 5660-1 (2015) 규격의 콘칼로리미터 장비와 시험방법에 준하여 진행하였다. 콘칼로리미터 실험은 Table 2에 정리하였다. 콘 히터의 열 유속은 25, 35, 50 kW/m²로 설정하여 실험하였으며 발포플라스틱류는 낮은 열유속에서도 발화가 된다고 판단하여 추가로 콘히

터의 열유속 15kW/m²를 고려하였다. 놀이방매트, 가교/무가교 폴리에틸렌 폼, 폴리우레탄폼, 폴리우레탄 메모리폼 및 루버 보드 등의 폼형태의 고분자재료에 대해서는 콘히터의 열유속 50 kW/m²에서 실험을 진행하지 않았다. 콘 히터와 시편과의 거리는 25 mm로 모든 실험에서 일정하며 시편은 수평을 유지하여 배치되었다. 모든 시편은 동일한 열유속에서 2회 반복실험을 진행하였고, 데이터의 평균값을 계산하였다.

Fig. 4. Cone Calorimeter

Table 2. Incident Heat Flux for Specimens

Specimen	Incident heat flux (kW/m ²)
ABS, Arcylic, Epoxy, HDPE, UHMW, PE, MC Nylon. PC I/II/III, PET, POM, PP, PTFE, PU, PVC, Flame retardant melamine foam, Flame retardant rubber foam	25, 35, 50
PU foam I, PU memory foam, Rubber board, Crosslinked PE foam, Uncrossed PE foam, Playroom mat	25, 35
PU foam II	15, 25, 35

2.3 열방출율 선형화 및 발화온도 산출 이론

Park et al. (2018)은 나무의 열방출율을 선형화한 데이터베이스를 구축한바 있는데, 선형화시에 굴곡점의 최대값(또는 최소값)은 사용자가 임의로 정하여 선형화가 진행되었다. 본 연구에서는 선형화시 최대값(또는 최소값)을 모든 영역에 걸쳐 최적화 하는 방법을 이용하였다. 이를 위하여 부분구간 최적화기법(Tomé et al., 2005)을 도입하였다. n 개의 성분을 가지고 있는 데이터를 에 대하여 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 y 는 열방출율이며, t 는 시간을 나타낸다.

$$y(t_i), i = 1, \dots, n \quad (1)$$

구간 최적화를 위하여 구간의 수와 해당되는 데이터를 고려하기 위하여 $m+1$ 을 구간의 수, m 을 구간을 나누는 중단점의 수라고 정의한다. 그러면 구간에 대한 Eq. (2)는 최적화를 통해 부분구간 최적화가 가능하다.

$$y(t_i) = c + \sum_{k=0}^{mm} (b_k - b_{k+1}) T_k + b_{mm+1} t_i \quad (2)$$

여기서 b 는 해당 구간의 기울기이다. 구간 최적화는 참고 문헌(Tomé et al., 2005)에 자세히 소개되어 있다.

이를 계산하기 위한 프로그램이 인터넷에 게시(Non Linear trend Fit, <http://www.dfisica.ubi.pt/~artome/linearstep.html>) 되어 있으며, 실행화면은 Fig. 5와 같다. 발화온도는 콘칼로리미터 실험에서 바로 측정할 수 없다. Park et al. (2017)은 콘 히터 열유속, 콘히터 열유속별 발화시간 및 최대 열방출률 측정 결과를 입력값으로 하여 발화온도를 산출하는 프로그램을 제시하였는데 본 연구에서는 이를 이용하였다.

Fig. 5. Example of Nonlinear Trends Fitting

2.4 측정결과

Fig. 6에서는 고려된 24종의 플라스틱 중 일부의 콘칼로리미터 시험 전후의 시편을 보여주고 있다. 콘히터 가열시 시편이 부풀어 오르거나 녹아 흘러내리는 등의 변형이 나타나 모든 시편에 그리드를 시편 위에 장착하여 실험을 진행하였다. 아크릴, 폴리에틸렌, 엠씨 나일론, 아세탈, 폴리프로필렌 등의 열가소성 재료들은 시험 수행 중 모두 열분해가 되어 차(char)가 거의 생성되지 않는 것을 볼 수 있다. 다른 열경화성 수지계열은 열분해 후 차가 남는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. Tables 3~7은 본 연구에서 고려된 24종의 재료들 중 일부인 에이비에스, 아크릴, 폴리에틸렌 테레프타레이트, 아세탈, 폴리프로필렌 등 5 종에 대하여 (a) 열방출율 측정결과, (b) 선형화된 열방출율 측정결과, (c) 선형화된 측정결과를 활용하기 용이하도록 수치화를 시킨 데이터 등을 나타내었다. 이러한 결과들은 콘히터의 입사열유속 25, 35, 50 kW/m² 조건 하에서 측정된 결과이다. 콘히터에서 입사되는 열유속이 클수록 발화시간이 빨라지며, 입사열유속이 클수록 대부분의 경우 최대열방출율이 큰 것을 알 수 있다. 또한 재료가 빨리 타므로 연소 종료시간이 앞당겨지는 것을 알 수 있다. 열방출율이 감소하는 시점도 콘히터에서부터 입사되는 열유속이 클수록 빨라지는데 이는 재료가 더 빨리 열분해되어 열분해될 수 있는 원재료가 빨리 소진되기 때문이다. Tables 3~7의 (c)에 제시된 선형화된 측정결과 데이터는 FDS와 같은 화염전파를 예측할 수 있는 도구에

Plastics	Before test	After test	Plastics	Before test	After test
ABS (Acrylonitrile- butadiene- styrene)			Teflon, PTFE (Polytetrafluoroethy- lene)
Arcylic			PU (Polyurethane)
Epoxy			PVC (Polyvinyl chloride)
HDPE (High Density Polyethylene)			UHMW PE (Ultrahigh molecular weight polyethylene)
MC Nylon (Mono Cast Nylon)			PU foam I (Polyurethane foam)
PC I (Polycarbonate)			PU memory foam (Polyurethane memory foam)
PET (Polyethylene terephthalate)			Rubber board
POM (Polyoxymethylene)			Crosslinked PE foam (Crosslinked polyethylene foam)
PP (Polypropylene)			Flame retardant melamine foam

Fig. 6. Specimen Before/after Test

Table 3. Graph and Data for Measured HRR and Linearized HRR Over Time for ABS

Table 4. Graph and Data for Measured HRR and Linearized HRR Over Time for Arcylic

Table 5. Graph and Data for Measured HRR and Linearized HRR Over Time for PET

Table 6. Graph and Data for Measured HRR and Linearized HRR Over Time for POM

Table 7. Graph and Data for Measured HRR and Linearized HRR Over Time for PP

활용할 수 있다. 화재를 해석하기 위하여 재료에 제시된 데이터를 입력하고 발화온도 도달시에 주어진 열량을 배출할 수 있는 연료를 표면에서 생성하거나 주어진 열량과 연소로 인하여 발생하는 연소생성물을 생성시킴으로써 고체재료의 화재현상을 모사할 수 있는 것이다. Table 8은 고려된 24개의 플라스틱에 대하여 측정된 결과를 보여주고 있다. 발화온도는 Park et al. (2017)이 제시한 프로그램을 이용하여 산출하였는데, 이를 위하여서는 25, 35, 50 kW/m²에서의 발화시간과 각 콘히터 열유속 별 발화하기까지 소요된 시간 및 해당 실험에서의 최대 열방출율을 입력값으로 구해진 값이다. 발화온도는 약 200 ~ 650 °C까지의 넓은 분포를 보였다. 일반적으로 원재료보다 폼형태로 제작된 재료의 경우 발화온도가 낮았다. 예를 들어 폴리우레탄의 경우 폼재료가 아닌 경우에는 396.5 °C였지만 폼형태인 PU foam I과 PU foam II의 경우에는 발화온도가 203.1, 293.7로 낮았다. 같은 재료의 경우에도 난연성을 지닌 제품의 경우 발화온도가 높았다. 철도차량에 활용되는 고난연제품인 난연 멜라닌폼과 난연 고무폼의 경우는 콘히터의 입사열유속 25, 35 kW/m²에서 발화가 안되었으며 콘히터의 입사열유속 50 kW/m²의 경우만 발화되어 발화온도가 산출되지 않았다. Table 7에서의 유효연소열은 콘칼로리미터 실험에서 측정

된 열방출율을 시간에 대하여 적분하여 구하여진 값으로 재료의 실제 연소된 양 대비 연소로 인하여 발생된 총 에너지를 나타낸 값이다. 에폭시와 테프론, PVC의 경우 유효연소열이 2.56, 3.38, 3.29 MJ/kg으로 고려된 플라스틱 중 작은 유효연소열 결과를 보인다. 고밀도 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 초고분자량 폴리에틸렌, 구가교 폴리에틸렌폼 등이 각각 42.08, 42.91, 42.26, 42.27 MJ/kg으로 상대적으로 큰 유효연소열을 보인다. 또한 유효연소열이 낮은 에폭시, 테프론, 폴리우레탄폼 I, 폴리염화비닐 등이 비교적 낮은 최대열방출율을 보였다.

Table 8. Data for Considered Plastics

	Ignition temperature [°C]	Effective heat of combustion [MJ/kg]	Peak HRR [kW/m²]
ABS	419.7	30.59	620.81
Arcylic	420.2	26.73	564.26
Epoxy	429.3	2.56	101.94
HDPE	434.3	42.08	655.47
MC Nylon	470.7	32.29	451.61
PC I	471.7	22.16	254.05

Table 8. (Continued)

	Ignition temperature [°C]	Effective heat of combustion [MJ/kg]	Peak HRR [kW/m ²]
PC II	518.5	23.10	257.14
PC III	187.2	23.15	283.85
PET	462.4	17.57	363.36
POM	397.5	15.74	234.48
PP	433.4	42.91	673.81
Teflon	647.8	3.38	45.62
PU	396.5	24.34	811.29
PVC	468.6	3.29	121.12
UHMW PE	438.8	42.26	665.56
PU foam I	203.1	24.5	166.95
PU foam II	293.7	27.04	265.22
PU memory foam	444.7	27.89	229.21
Rubber board	279.3	15.68	244.94
Crosslinked PE foam	413.5	32.98	147.08
Uncrossed PE foam	462.3	42.27	109.46
Playroom mat	366	33.45	230.4
Flame retardant melamine foam	-	12.77	85.5
Flame retardant rubber foam	-	12.16	69.92

3. 결 언

본 연구에서는 국내에서 많이 활용되고 성능위주설계에 많이 적용되고 있는 대표적인 플라스틱을 선정하여 일반적인 화재해석 도구에서 고체재료의 화염전파를 예측하는데 필요한 발화온도, 열분해율 등을 측정하여 데이터베이스로 정리하였다. 24종의 플라스틱에 대하여 실험을 수행하였는데, 이를 위하여 콘칼로리미터를 이용하여 다양한 입사 열유속에 대한 시편의 발화 및 연소 특성을 측정하였다. 지면이 부족하여 고려된 시편 중 일부에 대하여서 열방출을 측정결과 및 선형화결과 그래프 및 데이터만 제시되어 있다. 모든 실험결과 및 데이터는 Fire Technology Solution DB (<http://www.kfiredb.com/>)에 제시되어 있다. 본 논문에서 제시된 플라스틱별 화재데이터 베이스는 플라스틱 재료가 사용된 건축물 및 철도 등 다양한 공간에서의 화염전파 특성 해석 및 위험도 예측 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발 사업(“MPSS-소방안전-2015-66”) 및 철도연 주요사업(위험도 기반 안전관리체계 평가기술 개발)의 지원을 받아 게재되었습니다. 실험 수행 및 자료 정리에 도움을 준 김홍현 학생에게 감사드립니다.

References

- An, S., Mun S., Ryu, I., Choi J., and Hwang, C. (2017). Analysis on the implementation status of domestic PBD (Performance Based Design): Focusing on the fire scenario and simulation. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 5, pp. 32-40.
- Brenden, J.J. (1977). *Measurements of heat release rates on wood products and an assembly*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Chamberlain, D.L. (1983). *Heat release rate properties of wood-based materials*. NBSIR 82-2597. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- Chow, W.K., Han, S.S., Dong, H., Gao, Y., and Zou, G.W. (2004). Full-scale burning tests on heat release rates of furniture. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Vol. 6, No. 3, pp. 168-180.
- DiNunno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Walton, W.D., and Cluster, R.L.P. (2008). *SFPE handbook of fire protection engineering* (4th ed.). Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- EUROMAP. (2016). *Plastics resin production and consumption in 63 countries worldwide 2009-2020*. European Plastics and Rubber Machinery.
- FEPIC. (2014). One paper for plastic consumption in Korea. *The 40th Far East Plastics Industry Conference*.
- Fire Technology Solution DB. Retrieved from <http://www.kfiredb.com/>
- ISO 5660-1. (2015). *Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)*.
- Janssens, M. (1991). Rate of heat release of wood products. *Fire Safety Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 217-238.
- Kim, H.J., and Lilley, D.G. (2002). Heat release rates of burning items in fires. *Journal of Propulsion and*

- Power, Vol. 18, No. 4, pp. 866-870.
- Lee, K.W., and Kim, K.E. (2003). Fire characteristics of plastic insulating materials from cone calorimeter test. *Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 76-83.
- Lee, H.P., and Kim, Y.T. (2010). A study on the fire risk of car interior materials. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 82-88.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., and Overholt, K. (2017). *Fire dynamics simulator user's guide* (6th ed.). NIST Special Publication 1019, FDS Version 6.5.3, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Non Linear trend Fit. Retrieved from <http://www.dfisica.ubi.pt/~artome/linearstep.html>
- Park, W.H., Cho, Y., and Kwon, T.S. (2017). Development of program for ignition temperature and its applications. *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, Vol. 7, No. 4, pp. 243-250.
- Park, W.H., Cho, Y., Kim, C.Y., Na, S., and Lee, D. (2018). Study on comparison and database for combustibility of various wood materials. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 207-214.
- Park, W.H., Kim, C.Y., and Yang, S.J. (2016). Numerical analysis of a railway passenger car sensor using a simple pyrolysis model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 119-127.
- Shi, L., and Chew, M.Y.L. (2013). Fire behaviors of polymers under autoignition conditions in a cone calorimeter. *Fire Safety Journal*, Vol. 61, pp. 243-253.
- Tomé, A.R., and Miranda, P.M.A. (2005). Continuous partial trends and low-frequency oscillations of time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 12, pp. 451-460.
- You, J., and Chung, Y.J. (2018). Flammable evaluation of plastics for living by cone calorimeter test. *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 8-13.

Received	January 16, 2019
Revised	January 17, 2019
Accepted	January 31, 2019