

고분자재료의 연소가스 독성평가에 관한 연구 A Study on Combustion Gases Toxicity Evaluation of Polymeric Material

박 영 근

Young Keun Park

(사)한국화재보험협회 중부지부
(2001. 04. 24 접수/2001. 08. 24 채택)

요 약

본 연구는 고분자재료 중 방염미처리된 합판, 방염처리된 합판, 경질PVC, 경질우레탄폼의 연소가스 독성평가를 위하여 열분해 온도 600°C, 800°C, 1000°C에 따라 발생하는 연소가스를 가스텍(GASTEC) 가스검지관(Colorimetric gas detector tubes)을 이용하여 조사하였다. 연구결과 고분자재료의 연소시 발생되는 연소가스에 인간이 30분 동안 노출될 경우 사망에 이르는 독성지수를 갖고 있었으며, 열분해 온도 800°C에서 독성지수는 경질 PVC가 31.94로 가장 높았다. 또한 열분해 온도에 관계없이 공통적으로 발생되는 연소가스는 이산화탄소(CO₂)와 일산화탄소(CO)로 나타났으며, 동일재료라도 열분해 온도에 따라 독성지수(T.I)는 차이가 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we had analyzed combustion gases according to pyrolysis 600°C, 800°C and 1000°C for polymeric material using a GASTEC colorimetric gas detector tube in order to combustion gases toxicity evaluation for flame retardant untreated ply wood, flame retardant treated ply wood, flexible polyvinyl chloride and flexible polyurethane foam of polymeric material. As a result, combustion gases produced from small specimens of polymeric material had reached fatal to man at a 30 minute exposure time that had possessed toxicity index. Toxicity index at pyrolysis 800°C of flexible polyvinyl chloride was 31.74. Flexible polyvinyl chloride was the highest toxicity index of flame retardant untreated ply wood, flame retardant treated ply wood, flexible polyvinyl chloride and flexible polyurethane foam. The combustion gases produced commonly no concern with pyrolysis temperature had analyzed carbon dioxide(CO₂) and carbon monoxide(CO). Toxicity index had investigated differently according to pyrolysis temperature even a similar material.

Keywords : Combustion gases toxicity, Pyrolysis, Polymeric material, Toxicity index

1. 서 론

건축물의 대형화, 구조의 전문화·세분화 및 용도가 다양화되면서 새로운 재료들이 많이 개발되고 있다. 그러나 목재, 섬유, 종이, 플라스틱 등의 고분자재료로 이루어진 새로운 재료들이 기존의 재료들에 비해 뛰어난 장점들이 많지만 대부분 가연성인 경우가 많다. 이 재료들의 연소시 위험성을 결정하는데 고려해야 할 요소들로서는 재료의 착화성, 연소성, 재료가

타면서 발생하는 열, 열발생속도, 연기발생, 연소가스 발생 등이 있다.¹⁾

화재로 인한 사망 원인중 우리나라의 경우 '95년에 질식사(48.6%),²⁾ 일본의 경우 최근5년(93~97년)에 CO가스 중독 또는 질식사(약 37.4%),³⁾ 미국의 경우 '92년에 유독성연기가 72.2%⁴⁾를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 이와 같이 화재시에 인명피해를 야기시키는 주된 요인이 유독성가스의 발생원인을 알 수 있다.

본 연구에서는 재료의 위험성을 결정하는 요소 중 화재시에 인명피해를 야기시키는 주된 요인인 연소가스 독성에 관하여 고분자재료 중 방염미처리된 합판, 발

† E-mail: yeffort@unitel.co.kr

포성수성도료로 방염처리된 합판, 경질 PVC, 경질우레탄폼에 대하여 열분해 온도 600°C, 800°C, 1000°C에 따라 발생하는 연소가스독성 중 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 염화수소(HCl), 시안화수소(HCN), 이산화황(SO₂), 브롬화수소(HBr), 아크릴로니트릴(CH₂CHCN) 가스를 NF(Norme Francaise) X 70 - 100⁵⁾ 및 NES (Naval Engineering Standard) 713⁶⁾의 가스텍(GASTEC) 가스검지관(Colorimetric gas detector tubes)⁷⁾을 이용하여 평가하였다.

2. 고분자재료의 연소이론⁷⁾

2.1 고분자재료의 연소과정

고분자재료의 타는 과정은 Fig. 1과 같이 연소과정이 이루어진다. 재료가 가열되면 수분이 발생하고 재료에 따라서 용융된다. 그후 재료의 온도가 상승하고 열분해가 시작된다. 열분해에 있어서는 해중합에 따라 불연성가스, 가연성가스가 발생하고 고체잔유물을 남긴다. 발생한 불연성가스는 냉각되고 발생된 연기는 대기 중으로 방출되며, 가연성가스는 일부 냉각된 액체 미립자와 함께 연기로 방출된다.

또한 가연성가스는 일부 공기와 혼합하고 가연성 혼합기체를 발생한다. 이때 발화원이 있으면 화재를 발생, 연기가 발생되는데 그것을 관찰하면 연기 이외에 열, 연소가스가 발생된다. 열, 연소가스, 연기는 대기중

으로 방출되지만 일부 열에너지는 재료에 피드백(feedback)되어 그 재료가 더욱더 열분해한다.

한편, 고체 잔유물 표면에서는 무염연소하여 열, 연소가스, 연기를 발생, 발생된 열, 연소가스, 연기는 대기중으로 방출된다. 열에너지중 일부원의 재료에 피드백(feedback)된 재료는 먼저 열분해한다. 이러한 연소 사이클(cycle)과정을 반복하여 연소가 이루어진다.

2.2 고분자재료의 연소가스

Fig. 1에서와 같이 재료의 연소 사이클(cycle)과정에서 발생한 연기와 연소가스는 대기중으로 방출된다. 이 연소의 과정중에서 발생하는 연소가스의 종류 및 발생량에 있어서는 많은 서로 다른 차이가 있다.

연소조건에 따라 다르지만 일반적 현상으로 불완전 연소시에 발생하는 연소가스가 많고, 공기가 주위 사방에서 공급되는 상태에서의 연소는 완전연소시 발생하는 연소가스가 대부분이다.

2.3 연소가스독성

연소가스의 종류에 따라 인간 생리작용의 상태에도 차이가 있다. 그 분류는 Table 1과 같다.

연소가스에 따른 생리적 증상은 다음과 같다.

(1) 산소(O₂)

인체로의 산소공급이 저하되면 전신 근육활동의 저하, 호흡곤란, 질식을 일으킨다. 단시간 노출시 사망할

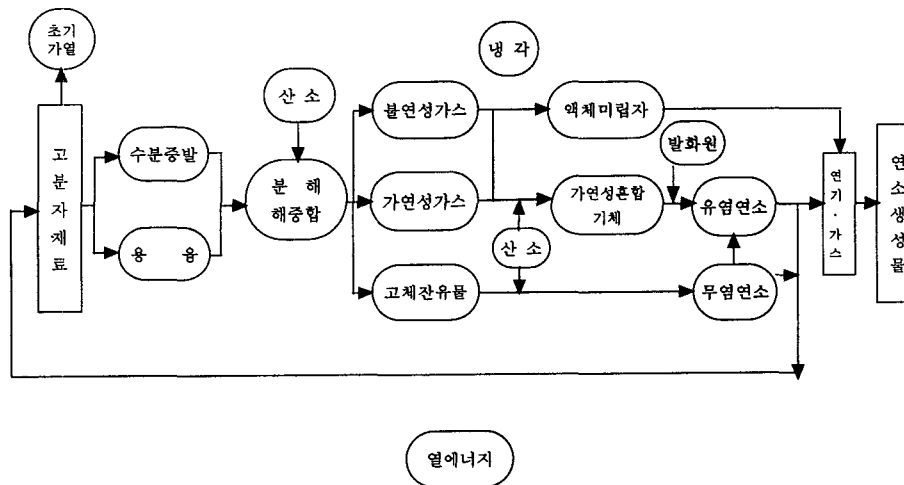


Fig. 1. Combustion flow of polymeric material.

주1) 측정원리는 내경 2~4 mm의 유리관속 검지제에 진공펌프를 이용하여 검지제 관내에 연소가스를 흡입시켰을 때 흡입 연소가스와 검지제와의 반응에 따라 나타나는 착색층의 길이를 정량적으로 측정

Table 1. Acted on classification according to combustion gases

구분	연소가스	생리작용
단순성 질식가스	이산화탄소(CO ₂), 메탄(CH ₄), 에탄(C ₂ H ₆), 아세틸렌(C ₂ H ₂), 질소(N ₂)가스 등	공기중의 산소함량 이하이면 질식 일으킴
화학적 질식가스	일산화탄소(CO), 시안화수소(HCN), 황화수소(H ₂ S) 등	화학적작용에 의해 헤모그로빈(Hb)의 산소 운반의 장애 및 조직 호흡효소 저해 및 질식을 일으킴
자극성 가스	염화수소(HCl), 암모니아(NH ₃), 아크롤레인(CH ₂ CHCHO), 포름알데히드(HCHO), 황화수소(HF), 이산화황(SO ₂), 포스겐(COCl ₂) 등	호흡에 의한 전신 장애 작용을 일으키고 그 작용 주체는 국소자극 작용으로 눈, 기관점막, 폐 등에 상해를 줌

수 있는 농도는 6%이다.

(2) 이산화탄소(CO₂)

호흡중에 산소의 분압이 저하되면 산소 결핍 증상을 일으키며, 호흡속도를 빠르게 하여 호흡곤란, 질식을 일으킨다.

(3) 일산화탄소(CO)

혈액중 헤모그로빈(Hb)과 결합력이 강하여 체내 산소공급 능력을 방해하여 두통, 현기증, 이명, 맥박증가, 구토 등이 일어나고 나중에는 마비상태로 의식불명을 일으킨다.

(4) 시안화수소(HCN)

독성이 강하며, 세포호흡을 정지시키고 현기증, 허탈, 의식불명을 일으킨다.

(5) 염화수소(HCl)

눈, 상부 기도의 점막을 자극하고 상부기도를 손상시켜 질식을 일으킨다.

(6) 암모니아(NH₃)

코, 목을 자극하고 눈과 접촉시에는 결막 및 각막에 염증이 발생되며 장기 노출시는 폐렴 또는 기관지염 증을 일으키며, 신경을 자극하여 혈관 수축, 혈압 상승을 일으키며, 만성중독시 위장장애, 기관지염, 편도선염이 발생되며 고농도로 흡입시 두통, 경련 및 호흡곤란을 일으킨다.

(7) 황화수소(H₂S)

눈, 코, 목 등의 점막을 자극하여 두통, 현기증, 호흡장애, 신경계통에 장애가 일어나 감지능력 마비를 일으킨다.

(8) 불화수소(HF)

피부, 눈, 코, 목 등의 점막을 손상시키며 부식작용을 일으킨다.

(9) 이산화황(SO₂)

피부, 눈, 코, 목 등의 점막을 자극하여 염증을 일으키며 심할 경우 질식을 일으킨다.

(10) 포스겐(COCl₂)

피로, 두통, 현기증, 흥분, 의식상실, 경련을 일으키

며 피부로도 흡수된다.

만성 노출시는 백혈구가 감소되어 백혈병을 초래할 가능성이 있으며 급성중독, 만성중독 모두 위험하다.

(11) 염소(Cl₂)

눈과 기관에 심한 자극을 주며 폐수중에 의한 호흡곤란, 질식을 일으키며 고농도에서는 피부자극과 화상을 일으킨다.

연소시에 발생하는 연소가스량에 따른 위험성은 Table 2와 같다.

Table 2에서와 같이 재료의 연소시 발생하는 연소가스 등이 인체에 미치는 영향은 아무리 양호한 조건을 가정한다 하여도 인체 허용노출기준을 대부분 초과하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 화재시 인명피해는 직접 화열에 의한 것을 제외하고는 거의 대부분이 연소가스 등의 영향에 의하여 발생된다고 볼 수 있다.

2.4 연소가스 독성 평가방법

재료를 열분해시키면 연소시 발생하는 연소가스의 독성평가로는 2가지 종류의 평가방법이 있다.

한가지 방법으로는 마우스, 토끼 등의 동물을 연소과정에서 발생한 연소가스에 직접 노출시켜서 동물의 행동을 조사하는 방법이며, 또 다른 방법은 연소가스를 화학분석에 의하여 발생량을 정량적으로 구하여 발생한 연소가스의 독성에 관련된 문헌 자료로부터 평가하는 방법이 있다.

이들 2가지 평가방법의 장·단점은 연소가스에 동물을 직접 노출시키는 방법에 있어서는 직접적인 연소가스의 종합적인 평가가 가능하다는 장점이 있지만 동물의 개체차원에서 인간과 동물간의 관계가 불명확하다는 것과 동물보호의 관점에서 그다지 바람직스럽지 못하다는 단점이 있다.

화학분석에 의한 방법은 독성평가를 정량적인 수치로서 표현하는 것으로 재료 상호간의 독성평가가 용이하다는 등의 장점이 있다. 그러나 기본적인 독성자료가 없다는 것, 화학분석으로 검출 불가능한 미량의 독

Table 2. Hazard according to Combustion gases masses^{6, 8-11)}

위험성 연소가스	미국 OSHA의 허용노출 기준 (PEL) ^{주2)} (ppm) ⁸⁾	30분 LC ₅₀ ^{주3)} (ppm) ⁹⁾	약간 냄새를 느낀다 (ppm) ¹⁰⁾	목, 코 등에 손상을 준다 (ppm) ¹⁰⁾	목, 코 등에 강한 손상을 준다 (ppm) ¹⁰⁾	기침이 나온다 (ppm) ¹⁰⁾	수시간 노출시 에도 큰 위험성이 없다 (ppm) ¹⁰⁾	1시간 노출시 큰 위험성은 없다 (ppm) ¹⁰⁾	30분~1시간 노출시 생명에 위험을 준다 (ppm) ¹⁰⁾	30분 노출시 사망한다 (ppm) ^{6),11)}	수분내의 짧은 시간내에 사망한다 (ppm) ¹⁰⁾
이산화탄소 (CO ₂)	5000 (0.5%)			4%	4%		1.1~1.7%	3~4%	5~10%	6~10%	7~15%
일산화탄소 (CO)	35						100	400~500	500~3,000	4,000	12,500~16,000
시아니화수소 (HCN)	3			18~36	18~36		20	45~54	50~100	50~100	150~300
황화수소 (H ₂ S)	10		10	100		100	20	170~300	400~700	700~1,000	1,000~2,000
염화수소 (HCl)	5	1,600~6,000	0.5~1	5~10	5~10		5~10	50	100~200	200~500	1,000
불화수소 (HF)	3	1,600~6,000					1.5~30	10	50~100	100	400
이산화황 (SO ₂)	2	300~500	2~3	8~12	20	20	10		50~100	400	400~500
암모니아 (NH ₃)	25	1,400~8,000	53	408	498	1,420	100	300~500	2,500~3,500	3,500~4,500	5,000~10,000
염소 (Cl ₂)	0.5	100	0.1~0.2	3~6	3~6		0.35~1.0	4	14~40	40~60	100~900
포스젠 (COCl ₂)	0.1		0.5	3~4	3~4	4.8	1.0		25	25~50	50이상
이산화질소 (NO ₂)	3	60~250	5	10~25	10~25	50	10~40	117~150	250	250~780	

^{주2)}OHSA(Occupational Safety and Health Administration : 미국산업안전보건법), PEL(Permission Exposure Limit : 허용노출기준) : 작업자가 PEL이상 독성 물질에 노출되어지지 않도록 하는 농도를 말한다.

^{주3)}30분 LC₅₀ : 가스 및 공기중에서 증발하는 화합물에 30분동안 실험쥐 10마리를 노출시 50%를 치사시키는 농도를 말한다.

성이 있는 가스의 경우에는 평가가 불가능하다는 것 등의 단점이 있다.

3. 고분자재료의 연소가스 독성평가

3.1 실험체

실험체는 고분자재료 중 소방법 특수장소 등의 방염처리 대상물품으로 사용되는 합판에 대하여 방염처리된 합판과 발포성수성도료로 방염처리된 합판 및 경질 PVC, 경질우레탄폼을 선정하였으며 실험체 현황은 Table 3과 같다.

3.2 실험방법

3.2.1 실험장치

석영관의 길이는 600 mm 내경 60 mm이고, 연소

Table 3. Specimens of experiment

재 료 명	밀도 (kg/cm ²)	방염도료의 종류	도료두께 (mm)
방염미처리된 합판	500	-	-
방염처리된 합판	600	수성도료	0.5~0.6
경질 PVC	1,500	-	-
경질우레탄폼	50	-	-

애자접시(45×25×8 mm) 1000°C까지 온도 조절이 가능한 열분해전기로, 공기, 연소가스포집백(40 L), 열분해 연소가스를 분석하는 가스택 가스검지관을 사용하였다.

3.2.2 실험체 전처리

실험체로부터 2~10 g 크기의 시편을 3개씩 절취하

여 23±2°C, 50±5%의 조건에서 48시간 보존하였다.

3.2.3 실험절차

NF X 70-100(연소 및 열분해가스의 분석 - Tube furnace법) 실험방법에 의한 연소애자접시에 시편을 올려 놓은 후 석영관로에 공급되는 공기유량을 120 L/h로 조정하여 공급하며 실험 열분해 온도 600°C, 800°C, 1000°C로 안정시킨다. 시편을 놓은 연소애자접시를 금속제 봉을 사용하여 석영관로의 중앙에 위치시킨 후 실험온도에서 열분해를 시작, 연소가스포집백에 연소가스를 시료의 완전연소를 고려하여 20분 동안 포집하였다. 그 후 NES 713의 가스택 가스검지관을 이용하여 연소가스의 농도를 측정하였다.

각각의 연소가스농도는 시편재료 100 g이 연소하여 발생된 각 연소가스와 체적 1 m³의 중에 확산된 량을 계산식 (1)을 사용하여 연소가스농도를 계산하였다.

$$C\theta = \frac{C \cdot 100 \cdot V}{m} \text{ (ppm)} \quad (1)$$

여기서 Cθ: 각각의 분석된 연소가스농도(ppm)

C: 연소가스포집백내의 연소가스농도(ppm)

m: 시편 질량(g)

V: 연소가스포집백 및 석영관의 체적(m³)

독성지수(T.I)는 계산식 (1)에 의해 계산된 연소가스 농도와 Table 4를 이용하여 계산식 (2)에 의해 계산하였다.

Table 4. Concentration fatal to man at a 30 minute exposure time of NES 713(Cf)

가스명	농도(ppm)
이산화탄소(CO ₂)	100,000
일산화탄소(CO)	4,000
염화수소(HCl)	500
이산화황(SO ₂)	400
아크로니트릴(CH ₂ CHCN)	400
이산화질소(NO ₂)	250
시아니화수소(HCN)	150
브롬화수소(HBr)	150

$$\text{독성지수(T.I)} = \sum_{i=1}^n \frac{C\theta i}{Cf i} + \frac{C\theta 2}{Cf 2} + \frac{C\theta 3}{Cf 3} + \dots + \frac{C\theta n}{Cf n} \quad (2)^6$$

여기서 1, 2, 3 ... n: 각 연소가스

Cf: 30분간 노출시의 치사농도(ppm)

3.3 실험결과 및 분석

3.3.1 실험결과

방염미처리된 합판과 발포성수성도료로 방염처리된 합판 및 경질 PVC, 경질 우레탄폼의 실험체에 대하여 NF X 70-100 및 NES 713의 가스택 가스검지관을 이용하여 연소가스농도 및 독성지수(T.I)를 분석하였으

Table 5. Combustion gases concentration of 20 minute during conducted with pyrolysis(furnace) 600°C, 800°C and 1000°C for polymeric material(flame retardant untreated ply wood, flame retardant treated ply wood, flexible polyvinyl chloride, flexible polyurethane foam)(ppm/100 g)

재료명	가스명(ppm/100 g)								
		CO ₂	CO	SO ₂	HCl	HBr	HCN	NO ₂	CH ₂ CHCN
방염미처리된 합판	600°C	61,000	9,040	-	-	-	-	-	-
	800°C	55,000	12,480	-	-	-	-	-	-
	1000°C	49,000	23,640	-	-	-	-	-	-
방염처리된 합판	600°C	39,000	19,720	-	-	-	-	-	-
	800°C	65,000	3,880	-	-	-	-	185	-
	1000°C	61,000	9,920	-	-	-	-	40	-
경질PVC	600°C	68,000	4,040	590	8,430	450	620	100	110
	800°C	4,200	2,560	670	10,360	690	440	130	160
	1000°C	93,000	5,080	1,200	6,260	450	430	60	50
경질우레탄폼	600°C	35,000	5,040	380	500	-	140	40	220
	800°C	123,000	21,360	610	950	-	270	240	980
	1000°C	44,000	14,880	400	700	-	420	120	860

Table 6. Toxicity index of 20 minute during conducted with pyrolysis(furnace) 600°C, 800°C and 1000°C for polymeric material(flame retardant untreated ply wood, flame retardant treated ply wood, flexible polyvinyl chloride, flexible polyurethane foam)

재료명	가스명	가스명								독성지수 (T.I) ^{주4)}
		CO ₂	CO	SO ₂	HCl	HCN	NO ₂	HBr	CH ₂ CHCN	
방염미처리된 합판	600°C	0.61	0.26	-	-	-	-	-	-	2.87
	800°C	0.55	3.12	-	-	-	-	-	-	3.67
	1000°C	0.49	5.91	-	-	-	-	-	-	6.40
방염처리된 합판	600°C	0.39	4.93	-	-	-	-	-	-	5.32
	800°C	0.65	0.97	-	-	-	0.74	-	-	2.43
	1000°C	0.61	2.46	-	-	-	0.16	-	-	3.23
경질PVC	600°C	0.68	1.01	1.48	16.85	3.04	4.12	0.40	0.28	27.86
	800°C	0.42	0.64	1.68	20.72	4.62	2.96	0.50	0.40	31.94
	1000°C	0.93	1.27	3.00	12.52	3.00	2.87	0.23	0.13	23.98
경질우레탄폼	600°C	0.35	1.26	0.95	0.88	-	0.92	0.16	0.54	5.06
	800°C	1.23	5.34	1.53	1.90	-	1.76	0.96	2.45	14.17
	1000°C	0.44	3.72	1.00	1.40	-	2.80	0.48	2.15	11.99

주4) 독성지수(T.I) : Toxicity Index

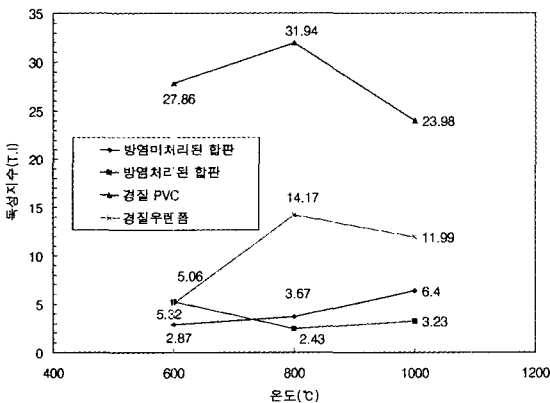


Fig. 2. Toxicity index of 20 minute during conducted with pyrolysis(furnace) 600°C, 800°C and 1000°C for polymeric material(flame retardant untreated ply wood, flame retardant treated ply wood, flexible polyvinyl chloride, flexible polyurethane foam).

며 실험결과는 Table 5, 6에 나타내었다.

3.3.2 실험결과분석

Table 5, 6 및 Fig. 2에서와 같이 고분자재료 중 방염미처리된 합판, 발포성수성 도료로 방염처리된 합판, 경질 PVC, 경질우레탄폼에 대한 독성지수(T.I)는 경질 PVC재료가 800°C에서 가장 높게 나타났으며 열분해 온도 600°C, 800°C, 1000°C 중 800°C에서 독성지수(T.I)가 가장 높았으며 1000°C, 600°C 순으로 높게

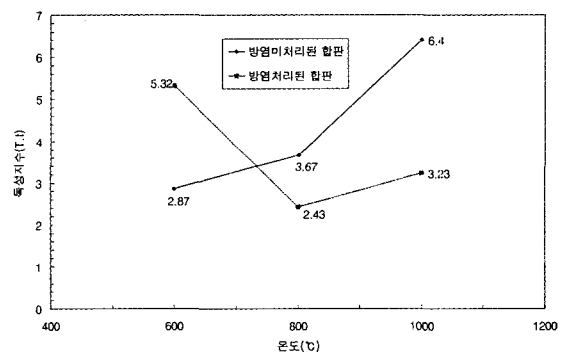


Fig. 3. Toxicity index of 20 minute during conducted with pyrolysis(furnace) 600°C, 800°C and 1000°C for ply wood(flame retardant untreated ply wood, flame retardant treated ply wood).

나타났다. 그러나 합판재료에 있어서는 Fig. 3에서와 같이 독성지수(T.I)는 600°C에서 발포성수성도료로 방염처리된 합판이 방염미처리된 합판보다 높으나 800°C, 1000°C에서는 발포성수성도료로 방염처리된 합판이 방염미처리된 합판보다 낮았으며, 800°C보다 1000°C에서 높은 것으로 나타났다.

4. 결 론

화재로 인한 사망자 발생의 주된 원인인 연소가스독

성의 위험성을 평가하기 위하여 고분자재료 중 방염미처리된 합판, 발포성수성도료로 방염처리된 합판, 경질 PVC, 경질우레탄폼에 대하여 열분해 온도 600°C, 800°C, 1000°C에 따라 NF X 70-100 및 NES 713의 가스택 가스검지관을 이용하여 연소가스농도 및 독성지수(TI)실험을 실시하였으며 실험결과와 결론은 다음과 같다.

1. 고분자재료의 연소시 발생하는 연소가스에 인간이 30분 동안 노출될 경우 사망에 이르는 독성지수(TI)를 갖고 있었으며, 열분해 온도 800°C에서 독성지수(TI)는 경질 PVC가 31.94, 경질우레탄폼이 14.17, 방염미처리된 합판이 3.67, 방염처리된 합판이 2.43이었으며, 경질 PVC는 방염처리된 합판에 비하여 13.1배 높았다.

2. 고분자재료에서 공통적으로 발생하는 연소가스는 이산화탄소(CO₂)와 일산화탄소(CO)로 나타났으며, 동일재료라도 열분해 온도에 따라 독성지수(TI)는 차이가 있었다.

참고문헌

1. Marcelo M. Hirschler, "Fire Hazard and Toxic

- Poxic Potency 0.1 the Smoke from Burning Materials", *Advances in Combustion Toxicology*, Vol. 2, pp229-230(1990).
2. "95화재통계년보", 내무부소방국, p37(1996).
 3. "소방백서", 소방청편, pp46-50(1998).
 4. "NFPA analysis of data from U.S. death certificates coded", NFPA, E890~E899(1995).
 5. NF X 70-100, "Fire Tests - Analysis of Combustion and Pyrolysis Gases - Tube Furnace Method", AFNOR(1986).
 6. NES 713, "Determination of the Toxicity Index of the Products of Combustion from Small Specimens of Materials", Issue 03(1985).
 7. Eiji Yanai, "고분자재료의 연소생성가스 및 그 독성", 火災, Vol. 47, No. 6(1997).
 8. 이영순 등, "화공안전공학", 대명사, pp42-45(1997).
 9. David A. Purser, "Toxicity Assessment of Combustion Products", *Fire Dynamics*, p2-103 (1991).
 10. "화재시 유해가스발생에 관한 연구", 한국화재보험협회, p69(1980).
 11. BSI DD 180, "Draft for Development Guide for the Assessment of Toxic Hazards in Fire Buildings and Transport", BSI(1989).