

알킬렌디아미노알킬-비스-포스폰산과 비스-디메틸아미노메틸 포스핀산으로 처리된 중질섬유판의 연소가스 발생

박명호[†] · 정영진^{*}

강원대학교 기계공학과, *강원대학교 소방방재공학과
(2016년 12월 13일 접수, 2016년 12월 30일 심사, 2016년 12월 31일 채택)

Combustion Gas-emission of Medium Density Fibreboard (MDF) Treated with Alkylenediaminialkyl-bis-phosphonic Acids and Bis-(dimethylaminomethyl) Phosphinic Acid

Myung-Ho Park[†] and Yeong-Jin Chung^{*}

Dept. of Mechanical Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do 24913, Korea
^{*}Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do 25949, Korea
(Received December 13, 2016; Revised December 30, 2016; Accepted December 31, 2016)

초 록

이 연구에서는 피페라지노메틸-비스-포스폰산(PIPEABP), 메틸피페라지노메틸-비스-포스폰산(MPIPEABP), N,N-디메틸렌디아미노메틸-비스-포스폰산(MDEDAP) 그리고 비스-디메틸아미노메틸 포스핀산(DMDAP)의 화학 첨가제로 처리된 중질섬유판(MDF)의 연소가스 발생을 시험하였다. 15 wt%의 인-질소산류 첨가제 수용액으로 중질섬유판에 붓으로 3회 칠하여 실온에서 건조시킨 후, 콘칼로리미터(Conecalorimeter, ISO 5660-1, 2)를 이용하여 연소가스의 발생을 시험하였다. 그 결과, 인-질소산류 첨가제로 처리한 시험편의 최대연기발생률(SPR_{peak})은 무처리 시험편에 비교하여 18.5~41.5%로 낮게 나타내었다. 그러나 인-질소산류 첨가제로 처리한 시험편에 대한 최대일산화탄소 생성(CO_{peak}), (6.7~24.2)%은 공시험편보다 높게 나타났다. 또한 최대일산화탄소 발생(CO_{2peak}), (4.2~24.4)%은 공시험편보다 낮게 나타났다. 반면에 O₂의 최대결핍률은 사람에게 치명적일 수 있는 수준인 15%보다 훨씬 높으므로 그로 인한 위험성은 피할 수 있었다. 결론적으로 MDF에 인-질소산류로 처리한 시험편은 부분적으로 연소성이 억제되었다. 그러나 일산화탄소의 감소에는 부정적인 영향을 미쳤다.

Abstract

This study demonstrated the emission of combustion gases of medium density fibreboard (MDF)s coated with piperazinomethyl-bis-phosphonic acid (PIPEABP), methylpiperazinomethyl-bis-phosphonic acid (MPIPEABP), N,N-dimethylethylenediaminomethyl-bis-phosphonic acid (MDEDAP), or bis-(dimethylaminomethyl) phosphinic acid (DMDAP). Each MDFs were coated in three times with a brush with 15 wt% aqueous solution of the phosphorus-nitrogen acid additives. After the specimens were dried at room temperature, the emission of combustion gases was tested using a cone calorimeter (ISO 5660-1, 2). The peak smoke production rate (SPR_{peak}) of the specimens coated with phosphorus-nitrogen acids was 18.5 to 41.5%, which is lower than that of using the virgin plate. However, the production of peak carbon monoxide (CO_{peak}) was 6.7 to 24.2% higher than that of using the virgin plate. Also, the peak carbon dioxide (CO_{2peak}) was 4.2 to 24.4% lower than that of using virgin plate. While the peak oxygen depletion rate was much higher than the level of 15%, which can be fatal to humans and the resulting risk could thus be eliminated. Overall, the combustibility of coated specimens was partially suppressed, but showed a negative effect on the reduction of carbon monoxide.

Keywords: peak smoke production rate, peak carbon monoxide, peak oxygen depletion rate

1. 서 론

다양한 목질재료 중 중질섬유판(medium density fibreboard, MDF)은 가볍고 작업성이 수월하다. 그러나 이들은 화재에 취약하며, 화재에 의한 희생자 중에서 약 75~80%는 직접적인 화염노출에 의한 것이 아니라 연기, 유독가스 등의 흡입과, 또는 산소 결핍에 의한 것이다

[†] Corresponding Author: Kangwon National University,
Dept. of Mechanical Engineering, Gangwon-do 24913, Korea
Tel: +82-33-570-6326 e-mail: parkmh@kangwon.ac.kr

Table 1. Specification of MDFs Coated with 15 wt% Solution of the Alkylendiaminoalkyl-Bis-Phosphonic Acids and Bis-(Dimethylaminomethyl) Phosphonic Acid at 25 kW/m² External Heat Flux, Respectively

Samples	MC (%)	Mass (g)
Untreated	10.6	49.8
PIPEABP, MPIPEABP,	1	50.9
MDEDAP,	2	50.9
DMDAP,	3	51.5
	4	51.8

Table 2. Combustion Gas-emission of MDFs Coated with 15 wt% Solution of the Alkylendiaminoalkyl-Bis-Phosphonic Acids and Bis-(Dimethylaminomethyl) Phosphonic Acid at 25 kW/m² External Heat Flux, Respectively

Samples	^a O _{2peak} Consump. (g/s) / at time (s)	^b SPR _{peak} (m ² /s) at time (s)	CO _{peak} (%) / at time (s)	CO _{peak} (ppm) / at time (s)
Untreated	0.1191 / 390	0.0092 / 385	0.0165 / 566	165 / 566
PIPEABP 1	0.0980 / 485	0.0074 / 475	0.0184 / 902	184 / 902
MPIPEABP 2	0.1138 / 490	0.0065 / 465	0.0176 / 910	176 / 910
DMEDAP 3	0.1014 / 455	0.0072 / 460	0.0182 / 798	182 / 798
DMDAP 4	0.1244 / 480	0.0075 / 500	0.0205 / 792	205 / 792

Samples	CO _{2peak} (%) / at time (s)	CO _{2peak} (ppm) / at time (s)	CO/CO ₂	O _{2peak} Depletion (%) / at time (s)
Untreated	0.4998 / 384	4998 / 384	0.0330	20.467 / 404
PIPEABP 1	0.3778 / 473	3778 / 473	0.0487	20.556 / 486
MPIPEABP 2	0.4214 / 488	4214 / 488	0.0417	20.494 / 499
DMEDAP 3	0.4015 / 460	4015 / 469	0.0453	20.523 / 467
DMDAP 4	0.4789 / 476	4789 / 476	0.0428	20.429 / 491

^aO₂ peak consumption rate; ^bPeak Smoke Production rate

2.3. 콘칼로리미터에 의한 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법에 의해 dual cone calorimeter (Fire Testing Technology)를 이용하여 열 유속(heat flux) 25 kW/m² 조건에서 수행하였다[14,15]. 사용한 시험편의 두께는 18.3 mm으로서 크기는 100 mm × 100 mm (±9)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 5%에서 향량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감싼다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 ± 2% 이내, 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m³/s로 설정하였다.

시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하고, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위해 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

본 연구에서 선정된 시험편은 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부 접화장치를 부착한 상태로 25 kW/m² 외부 열 유속에 수직 분 동안 노출시켜 착화된 시료로부터 연소가스 관련 지수를 구하였다.

2.4. 함수율 측정

순수 MDF의 함수율은 일정량의 시료를 105 °C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시료의 중량을 4 h 간격으로 하여 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식을 이용하여 계산하였다[16].

$$MC (\%) = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

W_m : 함수율을 구하고자 하는 시험편의 중량
W_d : 건조시킨 후의 절대건조 중량

건조된 MDF의 함수율은 10.6 wt%이었으며, 알킬렌디아미노알킬-비스-포스폰산 처리 후의 함수율은 별도로 측정하지 않고 MDF를 건조시킨 후 3회 붓으로 칠한 것을 사용하였다. MDF에 Table 1에 나타낸 바와 같이 PIPEABP 1, MPIPEABP 2, MDEDAP 3, DMDAP 4를 처리한 시험편의 무게는 각각 50.9, 50.9, 51.5, 51.8 g으로 나타났다[13].

3. 결과 및 고찰

3.1. 콘칼로리미터 시험

산소소모율(oxygen (O₂) consumption rate)에 대하여 대부분의 가연성 재료들은 연소 시 소비되는 산소에 의해 열량을 방출한다[7]. Figure 1은 시간에 따른 산소소모율을 나타내었다.

이에 대하여 \dot{Q} (kW)은 다음과 같은 식 (3)으로 주어진다[17].

$$\dot{Q} (HRR) = \dot{m} \cdot \Delta h_c \quad (2)$$

여기서, \dot{Q} (kW) = HRR, \dot{m} (kg/s) = MLR, Δh_c (kJ/kg) = EHC로 표

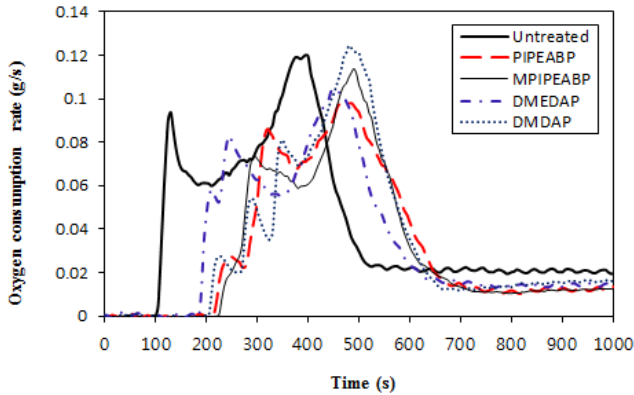


Figure 1. Oxygen (O₂) consumption rate curves of MDFs coated with 15 wt% solution of the alkylendiaminoalkyl-bis-phosphonic acids and bis-(dimethylaminomethyl) phosphinic acid at 25 kW/m² external heat flux, respectively.

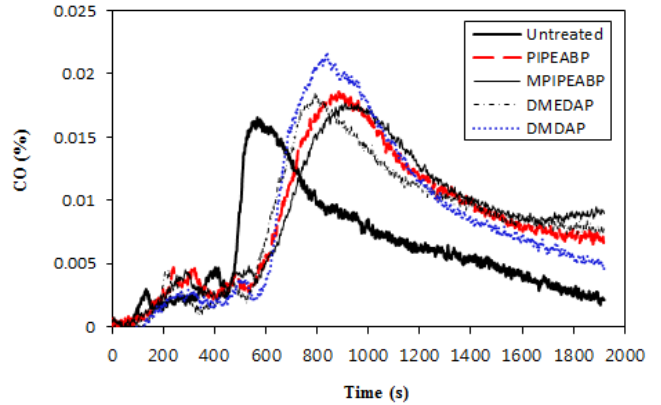


Figure 3. CO concentration (%) curves of MDFs coated with 15 wt% solution of the alkylendiaminoalkyl-bis-phosphonic acids and bis-(dimethylaminomethyl) phosphinic acid at 25 kW/m² external heat flux, respectively.

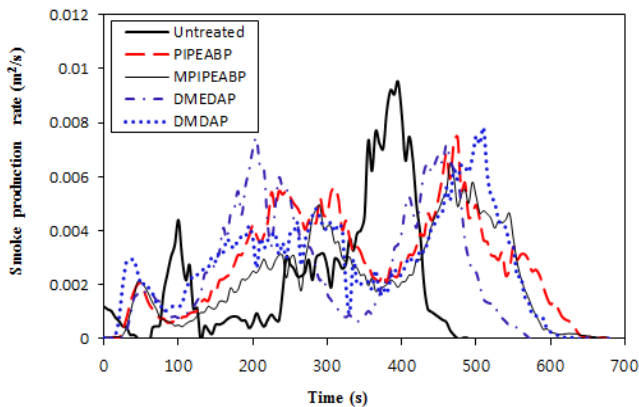


Figure 2. SPR curves of MDFs coated with 15 wt% solution of the alkylendiaminoalkyl-bis-phosphonic acids and bis-(dimethylaminomethyl) phosphinic acid at 25 kW/m² external heat flux, respectively.

시되며, MLR은 HRR을 유효연소열(effective heat of combustion, EHC)로 나눈 것을 의미한다.

Table 2 및 Figure 1에 보여준 바와 같이 MDF에 인-질소산 첨가제로 처리한 시험편의 최대산소소모율 도달 시간은 455~490 s로서 무처리 시험편의 390 s보다 16.7~25.6% 증가했다. 이것은 산소가 작용하여 질량감소가 이루어지는 것으로서, 연소가 불리한 조건일 때는 산소소모 시간이 지연되는 것을 의미한다.

이것은 인-질소산류 첨가제가 연소 시 열분해되어 H₃PO₄를 생성하여 탈수탄화 작용에 의하여 고체 숯을 생성한다. 이 숯은 산소와 열의 확산 차단 및 화염전단으로부터 또는 화염전단에 연소성 분해생성물의 확산을 차단하기 때문으로 이해된다[10]. 또한 H₃PO₄는 열분해되어 PO·를 생성하며 연소 중 연쇄반응을 일으키는 H· 또는 ·OH을 안정화시키는 것[11,12]으로 설명된다.

연기는 액체입자(타르), 무기입자, 증기, 탄소를 포함한 입자들로 구성되고, 연소열과 더불어 건물화재에 있어서 심각한 위험 요인이 된다. 목재에서의 연기는 불꽃 연소에서 형성되고 열분해로부터 생성된 가연성 가스는 불꽃 영역 내에 숯을 생성하는 다환성 방향족 탄화수소로 구성된다. 그리고 타지 않은 숯은 불꽃 영역으로부터 불완전연소를 만드는 연기로 방출된다.

Figure 2는 인-질소산류 첨가제로 처리한 MDF의 연소시간에 따른

연기발생 속도(smoke production rate, SPR)를 나타내었다. SPR은 감쇠계수와 배기덕트에서 연기의 체적유량의 곱으로 계산된다. SPR 커브는 2개의 피크를 나타낸다. 첫 번째 피크는 목재의 가열로부터 착화기간 동안에 일어난다. 그리고 두 번째 피크는 시험편의 모든 표면에 열파(thermal wave)가 시험편의 뒤쪽에서 반사됨으로써 시험편의 연소속도가 증가하는 후면효과(back effect)[18]에 의하여 발생한다. 두 피크 사이의 연기발생 속도 및 연기 농도는 탄화과정 동안에 낮아진다. Ishihara는 목재 또는 합판이 연소하는 동안에 가열온도가 상승되면 증가하는 질량감소속도에 따라 연기발생 및 연기농도가 증가한다고 보고하였다[19].

최대연기발생속도에 대하여 Table 2 및 Figure 2에 나타난 바와 같이 인-질소산류 첨가제로 처리한 시험편의 최대 연기발생속도 0.0065~0.075 m²/s으로 무처리한 시험편의 최대연기발생속도에 비하여 18.5~41.5% 낮았다. 이것은 연소 시 감연작용을 하는 것으로 이해된다[20,21]. 또한 최대연기발생속도에 도달하는 시간은 460~500 s로서 무처리 시험편의 395 s보다 16.5~26.6% 지연되었다. 이것은 연소 중 최대산소소모속도에 이르는 시간이 지연되는 것과 유사한 경향을 나타낸다. 또한 무처리 시험편과 비교하면 인-질소산류 처리에 의한 연기 억제성이 향상되는 것으로 판단된다.

가연성 물질들은 화재 시 불이 꺼질 때까지 다양한 연소유독가스들을 발생시킨다. 본 연구에서는 발생하는 다양한 유독가스들 중에서 CO, CO₂, O₂ 중심으로 검토하였다.

Kimmerle의 연구[22]에 따르면 15% 미만의 O₂ 농도는 사람에게 치명적인 영향을 미칠 수 있으며, 또 매우 높은 농도의 CO₂와 낮은 농도 CO일지라도 사람을 질식(asphyxiant effect)시킬 수 있기 때문이다.

CO는 화염과 목재사이에서 휘발성물질의 불완전연소 생성물이다. 따라서 휘발성 물질의 분해속도의 한 측정법인 열방출속도가 증가하는 것은 동반된 CO가스 발생이 증가하는 것으로 설명된다[23].

Table 2에 나타난 바와 같이 MDF에 인-질소산류 첨가제를 처리한 시험편에서 CO_{peak} 수율은 0.0176~0.0205% at 792~910 s로서 공시험편의 CO_{peak} 수율(0.0165% at 566 s)에 비교하여 6.7~24.2% 높게 나타났다.

또한 Table 2 및 Figure 3에 나타난 바와 같이 CO_{peak} 발생량은 176~205 ppm으로서 OSHA의 허용기준(PEL)[24] 50 ppm의 3.52~4.1배의 치명적인 독성을 발생하는 것으로 계산되었다. 이것은 시험편의

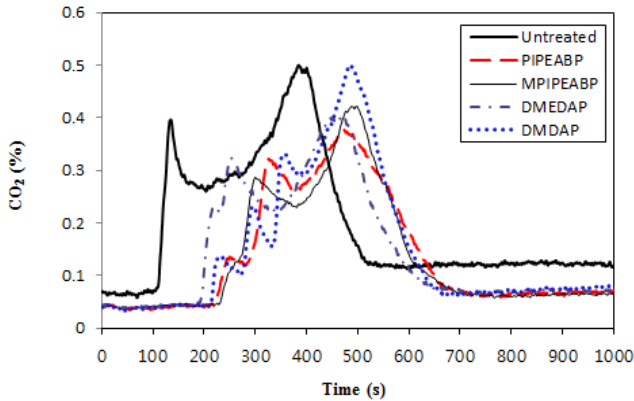


Figure 4. CO₂ concentration (%) curves of MDFs coated with 15 wt% solution of the alkylendiaminoalkyl-bis-phosphonic acids and bis-(dimethylaminomethyl) phosphinic acid at 25 kW/m² external heat flux, respectively.

첨가제 함량에 의한 불완전 연소효과로 인해 연기발생이 증가되는 것으로 판단된다.

CO_{2peak} 수율은 Table 2 및 Figure 4에 인-질소산류 첨가제를 처리한 시험편에 대하여 0.3778~0.4789% (at 460~488 s)으로서 무처리 시험편의 CO_{2peak} 수율(0.4998% at 384 s)에 비교하여 4.2~24.4% 낮게 나타났다. CO₂ 수율 커브는 2개의 피크를 갖는다. 첫 번째 피크는 목재의 가열로부터 착화기간 동안에 일어난다. 그리고 두 번째 피크는 시험편의 모든 표면에 열파(thermal wave)가 시험편의 뒤쪽으로부터 반사됨으로써 시험편의 연소율이 증가하는 후면효과[18]에 의하여 발생한다. 두 피크 사이의 CO₂ 수율은 탄화과정 동안에 걸쳐서 낮아진다. 목재가 연소하는 동안 가열온도가 상승되면 증가하는 질량감소 속도에 따라 CO₂ 수율도 증가한다. 이것은 셀룰로오스로 구성된 목재 조직 자체의 산소에 의하여 초기에 CO_{2peak} 수율(0.3768% at 181 s)이 높았으나, 시간이 경과함에 따라 시험편의 질량이 감소하므로 CO_{2peak} 수율은 낮아진다.

CO_{2peak} 농도는 Figure 4에 보여준 바와준 바와 같이 3778~4789 ppm으로 나타났다. 이것은 OSHA의 허용기준(PEL)[25] 5000 ppm에는 도달하지 못하였다. 그러나 CO₂ 자체의 유독성 보다는 호흡을 자극하여 과호흡을 일으킬 소지가 있다. MSHA[26]에 의하면, 이산화탄소는 잠재적 흡입 독성 물질과 단순한 질식을 가져다 준다. 그것은 폐를 통해 대기로부터 인체에 들어가서 혈액에 분배한 다음에 산-염기 불균형 또는 산성 혈액증을 일으킬 수 있다. 산성 혈액증은 이산화탄소의 과잉에 의해 발생, 과량의 CO₂가 더 생성쪽으로 평형을 이동하며, 수소 이온은 이와 같이 산성 환경을 조성하며 호흡 시 산성 혈액증은 혈액의 pH는 7.35 미만인 된다. 정상적인 생리학적 환경 하에서, CO₂의 높은 농도가 폐보다는 혈액 내로 확산하여, CO₂ 농도 구배의 형성에서 식 (3)와 같이 이산화탄소와 물의 반응에서 탄산(H₂CO₃)을 형성하고 그 다음 수소 이온 [H⁺]과 탄산수소 이온 [HCO₃⁻]로 해리된다.

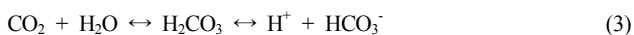


Table 2에 CO/CO₂ 비를 나타내었다. 각 시험편의 특성에 따라 특별한 차별성은 없으나, 인-질소산류로 처리한 시험편은 0.0417~0.0487의 높은 값을 가지므로 상대적으로 독성이 높은 것으로 예상된다.

시험편의 최대산소결핍농도는 Table 2 및 Figure 5에 나타내었다.

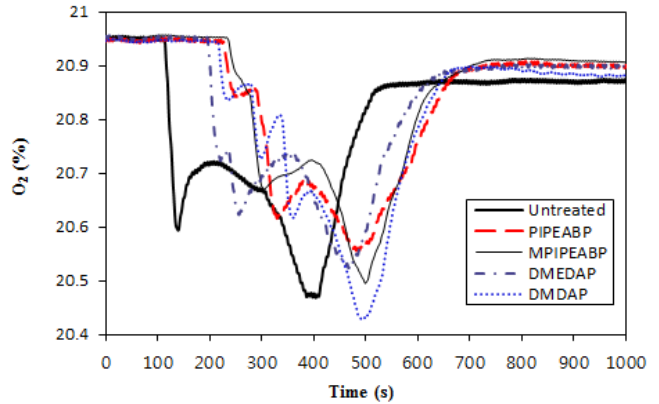


Figure 5. O₂ depletion (%) curves of MDFs coated with 15 wt% solution of the alkylendiaminoalkyl-bis-phosphonic acids and bis-(dimethylaminomethyl) phosphinic acid at 25 kW/m² external heat flux, respectively.

여기에서 인-질소산류 첨가제로 처리한 시험편의 최대산소결핍률은 20.429~20.556%으로 비교적 높은 수치를 나타내었다. 이것은 무처리한 시험편과 비교하여 특별한 차별성이 없는 것으로서, O₂의 농도는 사람에게 치명적일 수 있는 수준인 15%[5]보다는 훨씬 높게 측정되었으므로 그로 인한 위험성은 피할 수 있었다. 결론적으로 MDF에 인-질소산류로 처리된 시험편은 부분적으로 연소성이 억제되었다. 그러나 일산화탄소 감소에는 부정적인 영향을 미쳤다.

4. 결 론

PIPEABP, MPIPEABP, MDEAP, DMDAP의 인-질소산류 첨가제로 처리한 MDF의 연소가스 발생에 관한 실험을 ISO 5660-1, 2 표준에 의한 콘칼로리미터를 이용하여 시험하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) MDF에 인-질소산류 첨가제로 처리한 시험편의 최대산소소모율 도달 시간은 455~490 s로서 무처리 시험편의 390 s보다 16.7~25.6% 증가했다. 이것은 연소가 불리한 조건일 때는 산소소모 시간이 지연되는 것으로 판단된다.

2) 인-질소산류 첨가제로 처리한 시험편의 최대연기발생속도는 0.0065~0.075 m²/s로서 무처리한 시험편의 최대연기발생속도에 비하여 18.5~41.5% 낮았다. 이것은 연소 시 감연작용을 하는 것으로 이해된다.

3) MDF에 첨가제를 처리한 시험편에서 CO_{peak} 수율은 0.0176~0.0205% (at 792~910 s)으로서 무처리 시험편의 CO_{peak} 수율(0.0165% at 566 s)에 비교하여 6.7~24.2% 높게 측정되었다.

4) 인-질소산류 첨가제를 처리한 시험편에 대하여 CO_{2peak} 수율은 0.3778~0.4789% (at 460~488 s)으로서 무처리 시험편의 CO_{2peak} 수율(0.4998% at 384 s)에 비교하여 4.2~24.4% 낮게 나타났다.

5) O₂의 최대결핍률은 인-질소산류 첨가제로 처리한 시험편에 대하여 20.4335~20.5009% (at 405~515 s)으로서 사람에게 치명적일 수 있는 수준인 15%보다 훨씬 높기 때문에 그로 인한 위험성은 피할 수 있었다.

따라서 MDF에 인-질소산류로 처리된 시험편은 부분적으로 연소성이 억제되었다. 그러나 일산화탄소 감소에는 부정적인 영향을 미쳤다.

감 사

본 연구는 2014년도 강원대학교 전임교원 기본연구비에 의해 수행되었습니다.

References

1. R. H. White and M. A. Dietenberger, Fire safety of wood construction. In: R. J. Ross (ed.), *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Ch. 18, USDA (2010).
2. A. Ernst and J. D. Zibrak, Carbon monoxide poisoning, *N. Engl. J. Med.*, **339**, 1603-1608 (1998).
3. R. Von Berg, Toxicology update, *J. Appl. Toxicol.*, **19**, 379-386 (1999).
4. B. G. King, High Concentration-short time exposures and toxicity, *J. Ind. Hyg. Toxicol.*, **31**, 365-375 (1949).
5. U. C. Luft, *Aviation Physiology: The Effects of Altitude in Handbook of Physiology*, 1099-1145, American Physiology Society, Washington DC, USA (1965).
6. V. Babrauskas, Development of the cone calorimeter - a bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption. In: S. J. Grayson and D. A. Smith (eds.) *New Technology to Reduce Fire Losses and Costs*, pp. 78-87, Elsevier Applied Science Publisher, London, UK (1986).
7. M. M. Hirschler, Fire performance of organic polymers, thermal decomposition, and chemical composition, *ACS Symp. Ser.*, **797**, 293-306 (2001).
8. Y. Chung and E. Jin, Synthesis of alkylendiaminoalkyl-bis-phosphonic acid derivatives, *J. Korean Oil Chem. Soc.*, **30**, 1-8 (2013).
9. Y. Chung and E. Jin, Synthesis of dialkylaminoalkyl phosphonic acid and bis-(dialkylaminoalkyl)-phosphonic acid derivatives, *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 383-387 (2012).
10. O. Grexa, E. Horvathova, O. Besinova, and P. Lehocky, Flame retardant treated plywood, *Polym. Degrad. Stab.*, **64**, 529-533 (1999).
11. S. Liodakis, D. Vorisis, and I. P. Agiovlasis, Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of *Pinus halepensis* needles, *Thermochim. Acta*, **444**, 157-165 (2006).
12. F. Samyn, S. Bourbigot, S. Duquesne, and R. Delobel, Effect of zinc borate on the thermal degradation of ammonium polyphosphate, *Thermochim. Acta*, **456**, 134-144 (2007).
13. M. Park and Y. Chung, Combustive properties of *Pinus Rigida* plates painted with alkylendiaminoalkyl-bis-phosphonic acid (M^{2+}), *Fire Sci. Eng.*, **27**, 28-34 (2014).
14. ISO 5660-1, Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method), Geneva (2002).
15. ISO 5660-2, Reaction to fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 2: Smoke production rate (dynamic measurement), Geneva (2002).
16. R. Bergman, Drying and control of moisture content and dimensional changes, In: R. J. Ross (ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Ch. 13, USDA (2010).
17. V. Babrauskas, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 4th Ed., National Fire Protection Association, Massachusetts, U.S.A. (2008).
18. M. J. Spearpoint and G. J. Quintiere, Predicting the burning of wood using an integral model, *Combust. Flame*, **123**, 308-325 (2000).
19. S. Ishihara, Smoke and toxic gases produced during fire, *Wood Res. Tech. Notes*, **16**, 49-62 (1981).
20. M. M. Hirscher, Reduction of smoke formation from and flammability of thermoplastic polymers by metal oxides, *Polymer*, **25**, 405-411 (1984).
21. J. Zhang, D. D. Jiang, and C. A. Wilkie, Thermal and flame properties of polyethylene and polypropylene nanocomposites based on an oligomerically-modified clay, *Polym. Degrad. Stab.*, **91**, 298-304 (2006).
22. G. Kimmerle, Aspects and methodology for the evaluation of toxicological parameters during fire exposure, *J. Combust. Toxicol.*, **1**, 4-51 (1974).
23. A. P. Mourituz, Z. Mathys, and A. G. Gibson, Heat release of polymer composites in fire, *Compos. A*, **38**, 1040-1054 (2005).
24. OSHA, Carbon Monoxide Fact Sheet, U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (2002).
25. OSHA, Carbon Dioxide, Toxicological Review of Selected Chemicals. OSHA's Comments from January 19, 1989. Final Rule on Air Contaminants Project (2005).
26. MSHA, Carbon Monoxide, MSHA's Occupational Illness and Injury Prevention Program Health Topic, U.S. Department of Labor (2015).