

폴리인산염 첨가에 의한 폴리프로필렌 기반의 Wood Plastic Composites 열안정성¹

전 상 진² · 이 선 영^{2,†}

Thermal Stability of Polypropylene-Based Wood Plastic Composites by The Addition of Ammonium Polyphosphate¹

Sang-Jin Chun² · Sun-Young Lee^{2,†}

요 약

본 연구에서는 WPC의 열안정성을 향상시키기 위해 폴리프로필렌 매트릭스에 목분과 폴리인산염(ammonium polyphosphate, APP)의 삼중혼합 후, 목분과 난연제 첨가에 따른 목재플라스틱 복합재(wood plastic composites, WPC)의 열분해 거동이 조사되었다. 모든 배합비의 WPC 열분해 거동은 질소의 환경에서 분당 10°C 상승속도로 제어하여 열중량분석기(Thermogravimetric analyzer)를 통해 분석하였다. 목분의 열분해온도가 PP의 열분해온도 보다 낮기 때문에 목분에 의해 생성된 char막은 PP로의 열전달 속도를 낮추며, 2차 열분해온도 증가 및 열분해속도를 늦춘다. APP를 첨가한 WPC의 경우 1차 열분해온도 감소 및 2차 열분해온도의 증가를 보여준다. 목분의 함량이 높은 WPC의 경우, APP 첨가 시 1차 열분해온도 감소 및 2차 열분해속도가 증가하였고, 고온에서 잔여물의 양은 APP 함량이 증가할수록 크게 증가하였다. APP가 첨가된 WPC 경우, 목분의 함량이 10 wt%에서 50 wt%로 증가 시 고온에서 잔여물 양이 증가하였는데, 이는 APP 및 목질섬유의 char화가 동시에 발생되기 때문으로 보이며 결과적으로 목분 함량이 증가할수록 APP의 효과가 높게 나타나 열안정 효과를 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT

In order to improve the thermal stability of wood plastic composites (WPC), thermal degradation behavior of WPC in this study was investigated by the addition of wood flour and fire retardant after hybridization of wood flour and ammonium polyphosphate (APP) into polypropylene (PP) matrix. Thermal degradation behavior of all formulations was analyzed with thermogravimetric analyzer under nitrogen environment at heating rate of 10°C/min. As the thermal degradation temperature of wood flour is lower than that of PP, char layer formed by the wood flour decreases the speed of heat transfer to PP. In addition, the char layer increases the 2nd thermal degradation temperature and decreases the 2nd thermal degradation speed. The WPC treated with APP increases the 1st and 2nd degradation temperatures. In the

¹ Date Received May 7, 2014, Date Accepted June 18, 2014

² 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute

[†] 교신저자(corresponding author): 이선영(e-mail: nararawood@forest.go.kr)

case of WPC with high loading level of wood flour, the 1st thermal degradation temperature and 2nd thermal degradation rate were increased by the addition of APP, and then the amount of remnants at high temperature was increased by the increase of the APP loading level. In the case of WPC treated with APP, the amount of the remnants at high temperature was increased with the increase of wood flour content from 10 wt% to 50 wt%, indicating that char formation of the APP and wood flour occurred at the same time, resulting in high thermal stability effect by the increase of wood flour content.

Keywords : polypropylene, wood flour, light stabilizer, UV absorber, weathering

1. 서 론

지난 20년 동안 목분(wood flour)과 같은 천연 원료를 사용하여 목재·플라스틱 복합재(Wood Plastic Composite, WPC)의 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되어왔다. 목분은 가격이 저렴하고, 밀도가 낮으며, 화학적 개질이 쉽고, 가공장비에 마모성이 적은 점 등의 많은 장점을 가지고 있어 WPC의 원료로 널리 이용되고 있다(Lee *et al.* 2004; Lee *et al.* 2009; Lee *et al.* 2009; Kang *et al.* 2009; Kang *et al.* 2010). 폴리프로필렌(polypropylene, PP)은 상온에서 이용될 때 우수한 기계적, 물리적 및 열적 특성 때문에 WPC 원료시장에서 큰 비중을 차지하고 있다(Karian 2004). WPC는 치수안정성, 열적 특성, 수분에 대한 안정성, 재활용, 압축·인장·전단 강도 및 높은 충격강도와 같은 장점을 가지고 있어서 데크재, 사이딩, 루바, 방음벽 및 울타리 등 다양한 용도로 이용되고 있다(Schlechter 2004; Klyosov 2007).

최근 들어 WPC에 기능성을 부여하여 장기내구성을 향상시키기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 예를 들어 UV 안정제와 UV 흡수제와 같은 첨가제를 이용하여 WPC의 변색을 막기 위한 기술개발(Lee 2009; Stark and Matuana 2006), 발포제를 첨가하여 미세한 크기의 기포를 생성시켜 WPC의 밀도를 낮추어 경량화를 부여하는 연구(Gwon *et al.* 2012; Faruk *et al.* 2007), shell과 core층의 새로운 형태를 만들어서 수분 침투를 낮추고 치수안정성과 기계적 강도를 높이기 위한 공압출(co-extrusion) WPC 제조기술 개발(Huang *et al.* 2012; Huang *et al.* 2013) 등 많은 연구가 이루어지고 있다.

그러나 이들 연구에 비하여 상대적으로 WPC 난연성 향상에 관한 연구가 미진한 실정이다. 고분자의 난연성능에 관한 연구는 WPC가 다양한 용도로 활용하기 위하여 난연성능을 향상시키는데 매우 중요한 요소이다. 팽창성(intumescent) 난연제, 무기계(inorganic) 난연제 및 할로겐화(halogenated) 난연제가 고분자의 난연성을 개선하기 위해서 사용되어 왔다(Baker *et al.* 2010, Feng *et al.* 2012). 할로겐화 난연제는 불꽃이 퍼지는 속도를 효과적으로 늦추는 작용을 하나 열분해 시 많은 연기와 유독가스를 방출하여 환경적 규제 때문에 사용이 제한되어 왔다(Feng *et al.* 2012). 그러므로 무기계와 팽창성 난연제가 다양한 고분자에 널리 사용되고 있다. 산, char 또는 가스로 구성된 전통적인 팽창성 난연제는 WPC 시스템에 이용하지 않고 있다(Liu *et al.* 2013; Dai *et al.* 2013). 일반적으로, 목분은 char를 형성시키는 물질이고, char 형성 메카니즘은 팽창성 난연제 속에 존재하는 산으로 활성화될 수 있다(Li and He 2004; Qu *et al.* 2011; Seefeldt and Braun 2012). WPC를 제조할 때 고온에서 발생하는 목분의 빠른 열분해는 용융된 혼합물이 압출되기 어렵도록 점도가 높아지는 경우가 있으며, WPC의 기계적 성질을 감소시킨다. 따라서 WPC 시스템에 인산암모늄과 같은 무기계 난연제의 첨가는 WPC의 난연성능을 향상시킬 수 있는 좋은 해결책이 될 수 있다.

난연제에 따라 난연 기작을 하는 분해 온도 범위가 다양하고 난연 기작 또한 다양하기 때문에 WPC에 난연제 첨가 시 효율적으로 연소를 지연시키는 난연제를 찾는 연구는 매우 중요하다. 본 연구에서는 WPC의 난연성을 향상시키기 위해 폴리인산염과 목

Table 1. Compositions of the composites

Wood (wt%)	PP (wt%)	Additives (wt%)
10	90, 88, 86, 84, 82, 80	0, 2, 4, 6, 8, 10
30	70, 68, 66, 64, 62, 60	0, 2, 4, 6, 8, 10
50	50, 48, 46, 44, 42, 40	0, 2, 4, 6, 8, 10

분의 이종혼합에 초점을 두고 있다. 따라서 본 연구는 목질 섬유 함량에 따른 WPC의 열분해 거동 및 난연제 함량에 따른 열분해 거동과 분해 메카니즘(mechanism)을 살펴보는데 목적이 있다.

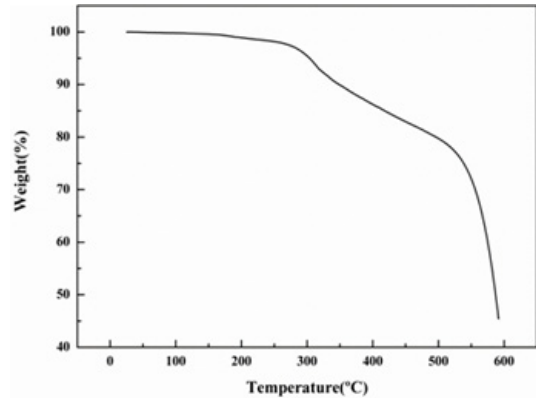
2. 실험

2.1. 공시재료

폴리프로필렌(PP, HJ 700, 삼성토탈)이 고분자 수지로 사용되었으며, PP의 용융흐름지수(melt flow index)는 230℃에서 22 g/10 min이고, 밀도는 0.91 g/cm³이다. 목분(ABOCEL™ C100, JRS, 독일)이 WPC의 원료로 사용되었는데, 수종은 독일가문비나무이며, 목분의 입자크기는 약 31~100 μm의 범위이고, 부피밀도는 172 g/L이다. 사용된 인계 난연제인 ammonium polyphosphate (APP)는 (주)ESC로부터 구입하였다.

2.2. 복합재 제조

PP 목분과 APP를 포함하는 복합재 제조를 위한 배합비는 Table 1에서 보여진다. Corotating twin-screw extruder (19 mm diameter, 40 L/D ratio, (주)Bautek)와 pelletizer (Bautek, Korea)가 WPC를 제조하기 위해서 사용되었다. 목분과 APP는 사용에 앞서서 수분을 제거하기 위해 건조오븐을 이용하여 80℃에서 24시간 동안 건조시켰다. 이때 목분의 수분 함유율은 1% 미만이다. 압출(compounding)은 Corotating twin-screw extruder의 배럴의 온도를 170-185℃의 범위에서 150 rpm의 압출속도로 시간당 1 kg의 복합재 펠릿을 제조하였고, 상용화제는 사용하지 않았다.

**Fig. 1.** Thermal degradation behavior of APP.

2.3. 열분석

모든 배합비의 WPC 열분해 곡선은 질소의 환경에서 분당 10℃ 승온속도를 적용하여 열중량분석기(Thermogravimetric analyzer, TA instruments Inc.)를 사용하였다. TGA 분석을 위한 온도의 범위는 30℃에서 600℃까지 스캔되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. APP와 PP의 열분해 거동

Fig. 1은 ammonium polyphosphate (APP)의 TGA 분석으로 APP의 열분해 거동을 보여준다. APP의 1차 분해 거동은 500℃ 이하(보통 270~500℃)에서 발생하며 약 18%의 중량감소를 보였다. 이 단계에서는 APP로부터 물과 암모니아가 발생되어 높게 가교된 다중 인산(polyphosphoric acid)이 형성되며, 500℃와 600℃ 사이에서 최대 중량 감소율을 보인다(Klyosov 2007).

Fig. 2는 순수한 PP 및 PP와 APP를 1 : 1의 배합비(APP+PP)로 혼합 후의 열분해 거동을 보여준다. PP는 약 430℃에서 1.90 wt%/℃의 최대 질량 변화율을 보이며 전체 중량의 70%가 감소하였다. 약 600℃에서 최종적으로 잔유물이 거의 없으며 대부분의 PP가 분해되는 것을 확인할 수 있었다. 한편 APP+PP의

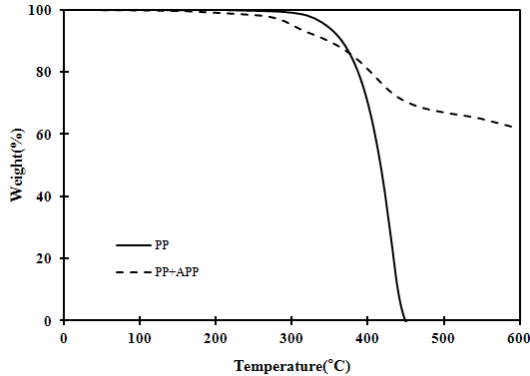


Fig. 2. Thermal degradation behavior of PP:APP (1 : 1) blends.

열분해 거동을 살펴보면, 두 단계의 열분해 거동이 나타나며 약 300°C와 410°C에서 각각 0.13 wt%/°C 및 0.25 wt%/°C의 중량감소 속도를 보였다. 중량변화는 300°C와 410°C에서 각각 5% 및 22%가 감소하였으며, 최종적으로 약 590°C에서 전체 질량 중 38%만이 감소하였다. PP와 APP 혼합 시, 약 300°C에서 1차분해 거동을 보이는데, 이는 Fig. 1에서 살펴본 바와 같이 APP의 열분해가 발생하는 것으로 판단된다. PP 단독 사용 및 PP와 APP 혼합사용 시 400°C~500°C에서 발생하는 열분해 거동을 보면 PP의 경우 약 1.90 wt%/°C의 중량감소 속도를 보이며 APP+PP의 경우 0.25 wt%/°C의 중량감소 속도를 나타낸다. 결과적으로 APP+PP는 약 300°C에서 APP분해를 통한 다중인산 생성 및 PP의 back bone과 분해 및 반응을 통한 char막 형성이 발생하는 것으로 사료된다. 일반적으로 APP를 포함하는 플라스틱이 화재나 고온에 노출되었을 때, 난연제는 polyphosphoric acid와 ammonia로 분해되기 시작한다. Polyphosphoric acid는 수산기와 결합하여 불안정한 phosphate ester로 분해되고, 다음단계에서 phosphate ester의 탈수화 반응이 일어난다. 플라스틱의 표면에서 char막이 발생되며, 이러한 char막은 절연층 역할을 하여 플라스틱의 열분해를 막아준다(Klyosov 2007). 따라서 이러한 char막 형성은 PP의 분해속도를 1.90 wt%/°C에서 0.25 wt%/°C로 중량감소 속도를 감소시켜 열적으로 더 안정되게 만든다.

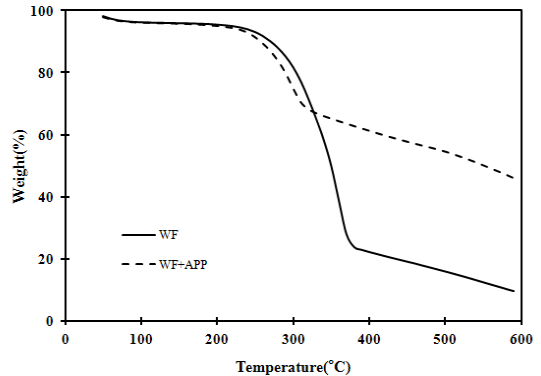


Fig. 3. Thermal degradation behavior of WF:APP (1 : 1) blend.

3.2. 목분과 APP의 열분해 거동

Fig. 3은 목분 및 목분+APP 혼합물의 열분해 거동을 보여주는데, Fig. 2에서 살펴본 PP 및 APP+PP의 열분해 거동과 비슷하다. 그러나 목분의 경우 APP+PP와 다르게 2차 열분해 거동이 발견되지 않는다. 이는 APP의 열분해 초기에 발생하는 다중 인산과의 반응을 통해 빠르게 목분 전체에 char화가 발생하는 것으로 판단된다. 최대 중량감소 속도는 목분의 경우 약 360°C에서 1.20 wt%/°C, 300°C에서 목분+APP의 경우 0.50 wt%/°C이다. 목분 및 PP의 열분해 거동에서 APP 첨가 시 초기 열분해온도(5% 중량감소 시점의 온도)는 목질섬유의 경우 약 272°C에서 258°C로 감소하였고, PP의 경우 340°C에서 300°C로 감소하였다. 이는 APP 첨가 시 목질섬유 및 PP 모두 분해를 촉진시켜 char를 만들지만, 결국 Figs. 2와 3에서 살펴본 바와 같이 char층의 형성으로 인한 열전달속도를 감소시켜 높은 온도에서 열적으로 안정한 상태를 만든다는 것을 의미한다.

3.3. 목분, PP와 APP 첨가된 WPC의 열분해 거동

Fig. 4와 Table 2는 목분과 PP 수지만으로 구성된 WPC의 TGA와 DTG (TGA 미분 그래프) 결과를 보여준다. PP의 경우 열분해가 주로 400°C 이상에서

Table 2. Thermal degradation results of constituents for WPCs

Sample	T _{DTGmax} at 1 _{st} step (°C)	Mass loss at 1 _{st} step (%)	R _{max} at 1 _{st} step (%/°C)	T _{DTGmax} at 2 _{nd} step (°C)	Mass loss at 2 _{nd} step (%)	R _{max} at 2 _{nd} step (%/°C)	Char residue at 600°C (%)
1	432.1	77.0	1.89	-	-	-	0
2	360.8	62.2	1.21	-	-	-	9.4
3	356.4	8.7	0.17	437.2	68.4	1.97	0
4	355.6	17.3	0.34	449.5	71.6	1.57	1.8
5	354.8	27.6	0.54	453.1	73.0	1.16	7.1

T_{DTGmax} and R_{max} indicate the Maximum peak temperature and maximum degradation speed, respectively. Sample: 1 = PP, 2 = WF, 3 = 10 wt% WF filled PP, 4 = 30 wt% WF filled PP, 5 = 50 wt% WF filled PP.

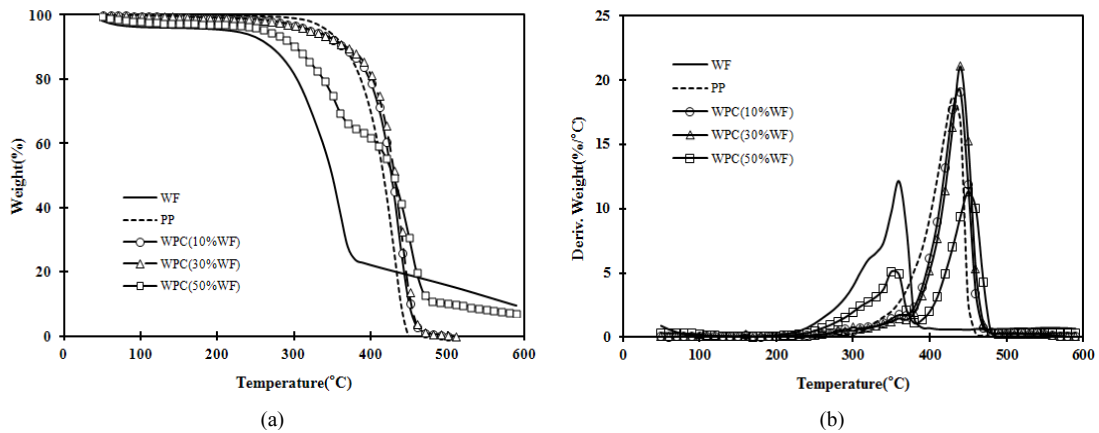


Fig. 4. Thermal degradation behavior of WPCs without APP. (a) TGA, (b) DTG.

발생되고 목분의 경우 400°C 이하에서 발생됨을 알 수 있다(Fig. 4 (a)). 목분은 일반적으로 약 200°C ~ 350°C에서 탄화가 이루어지며, 이 구간에서 목분의 조성분인 hemicellulose와 cellulose가 대부분 분해되어 char 잔여물을 생성시키고, CO₂, CO, CH₄, CH₃OH, 및 CH₃COOH를 생성시킨다(Qu *et al.* 2011). 또한 370°C ~ 550°C의 구간에서 lignin이 분해된다. 따라서 WPC의 열분해 거동은 크게 두 단계로 볼 수 있으며 첫 번째 단계는 대부분이 목질 섬유유의 구성 성분이 분해되는 단계이며, 두 번째 단계는 PP의 분해 단계로 볼 수 있다(Fig. 4 (b)). 목질 섬유유와 PP 혼합 시 목질 섬유유의 열분해 및 char의 형성 온도가 미약하게 감소함을 알 수 있다. 이와 동시에 PP의 최대 열분해 속도 온도 또한 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 목분으로부터 char의 형성이 일찍 발생할수록

열전달속도가 감소하기 때문에 PP의 열분해온도를 증가시키는 것으로 판단된다. Table 2에서 보듯이 목분의 함량이 증가할수록 1차 열분해온도가 감소하고 2차 열분해온도가 증가함을 알 수 있다. 그리고 1차 열분해속도 또한 목분의 함량이 증가할수록 증가하였고 2차 열분해속도는 감소하였다. 목분의 열분해온도가 PP의 열분해온도 보다 낮은 것을 고려하였을 때, 목분에 의해 생성된 char막은 PP로의 열전달 속도를 낮추기 때문에 2차 열분해온도 증가 및 열분해속도를 늦추게 만드는 것으로 보인다.

Fig. 5와 Table 3은 10 wt%의 목분과 0~10 wt% APP가 첨가된 WPC의 TGA와 DTG를 비교한 결과이다. APP 함량(2~10 wt%)과 열분해온도 및 열분해속도, 잔여물의 양 사이에 일정한 경향성은 보이지 않지만 대부분의 난연제를 처리한 WPC의 경우 1차

Table 3. Thermal degradation results of WPCs (10 wt% WF) with 0-10 wt% APP

APP contents (wt%)	T _{DTGmax} at 1 st step (°C)	Mass loss at 1 st step (%)	R _{max} at 1 st step (%/°C)	T _{DTGmax} at 2 nd step (°C)	Mass loss at 2 nd step (%)	R _{max} at 2 nd step (%/°C)	Char residue at 600°C (%)
0	356.4	8.7	0.17	437.2	68.4	1.97	0
2	262.2	5	0.14	446.4	74.6	1.33	3.2
4	301.6	4	0.11	450.3	76.2	1.33	4.2
6	311.7	4.8	0.11	453.4	76.7	1.39	0
8	317.7	7.2	0.12	456.3	79.4	1.64	0
10	317.0	4.6	0.11	452.0	76.2	1.24	8.8

Table 4. Thermal degradation results of WPCs (30 wt% WF) with 0-10 wt% APP

APP contents (wt%)	T _{DTGmax} at 1 st step (°C)	Mass loss at 1 st step (%)	R _{max} at 1 st step (%/°C)	T _{DTGmax} at 2 nd step (°C)	Mass loss at 2 nd step (%)	R _{max} at 2 nd step (%/°C)	Char residue at 600°C (%)
0	355.6	17.3	0.34	449.5	71.6	1.57	1.8
2	274.9	10.2	0.28	457.6	71.3	0.85	8.5
4	262.9	8.9	0.20	457.1	68.8	1.31	11.6
6	279.1	10.7	0.25	457.4	64.7	1.33	14.7
8	283.5	11.2	0.25	454.5	62.2	1.18	17.4
10	288.9	10.9	0.23	455.6	63.2	1.26	17.1

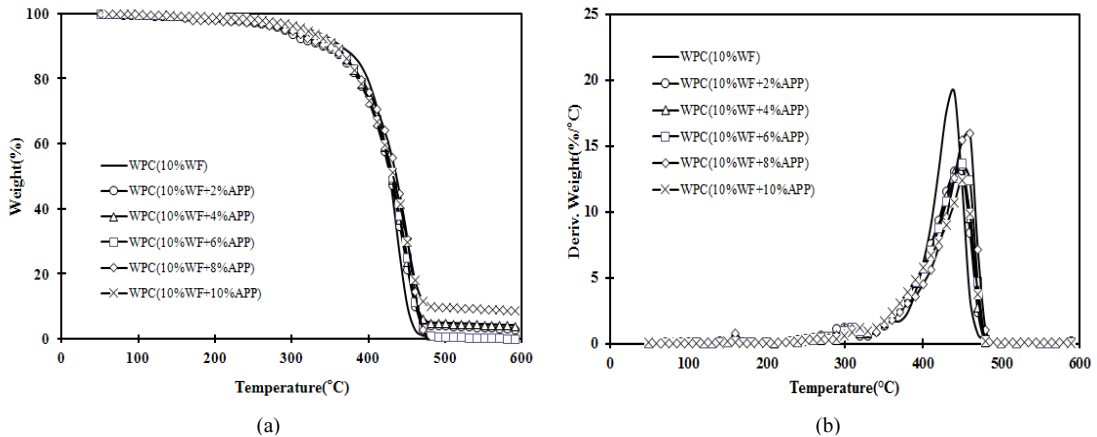


Fig. 5. Thermal degradation behavior of WPCs with 10 wt% WF and APP. (a) TGA, (b) DTG.

열분해온도 감소 및 2차 분해온도의 증가를 보여준다. Fig. 6과 Table 4는 30 wt%의 목분과 0~10 wt% APP가 첨가된 WPC의 TGA와 DTG를 비교한 결과이다. 10 wt%의 목분이 첨가된 WPC와는 다르게 APP를 첨가 시 1차 열분해온도의 감소와 2차 열

분해속도가 상승하는 DTG 그래프의 변화가 나타났으며(Fig. 6 (b)), 약 600°C에서 잔여물 또한 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 50 wt%의 목분이 첨가된 WPC의 경우에서도 APP 첨가 시 1차 열분해온도 감소 및 2차 열분해속도가 증가하는 DTG 그래프

Table 5. Thermal degradation results of WPCs (50 wt% WF) with 0-10 wt% APP

APP contents (wt%)	T _{DTGmax} at 1 st step (°C)	Mass loss at 1 st step (%)	R _{max} at 1 st step (%/°C)	T _{DTGmax} at 2 nd step (°C)	Mass loss at 2 nd step (%)	R _{max} at 2 nd step (%/°C)	Char residue at 600°C (%)
0	355.6	17.3	0.34	449.5	71.6	1.57	1.8
2	274.9	10.2	0.28	457.6	71.3	0.85	8.5
4	262.9	8.9	0.20	457.1	68.8	1.31	11.6
6	279.1	10.7	0.25	457.4	64.7	1.33	14.7
8	283.5	11.2	0.25	454.5	62.2	1.18	17.4
10	288.9	10.9	0.23	455.6	63.2	1.26	17.1

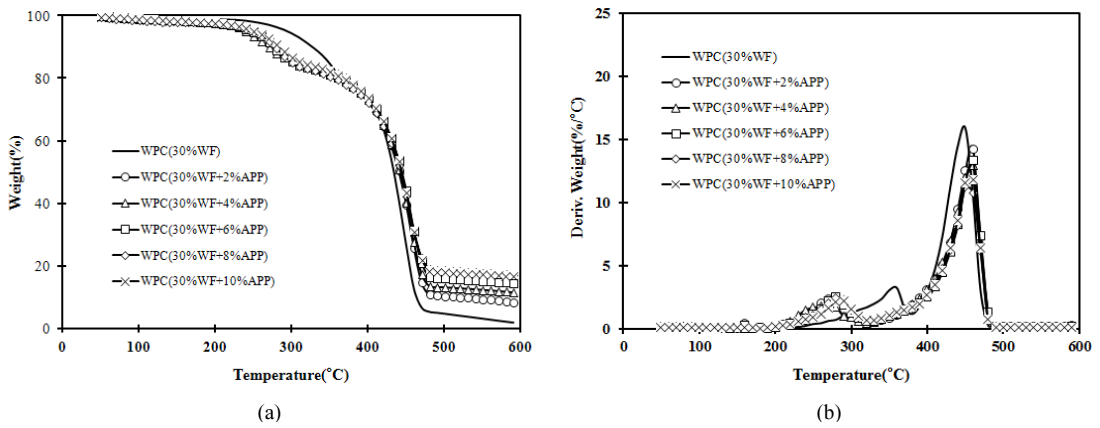


Fig. 6. Thermal degradation behavior of WPCs with 30 wt% WF and APP. (a) TGA, (b) DTG.

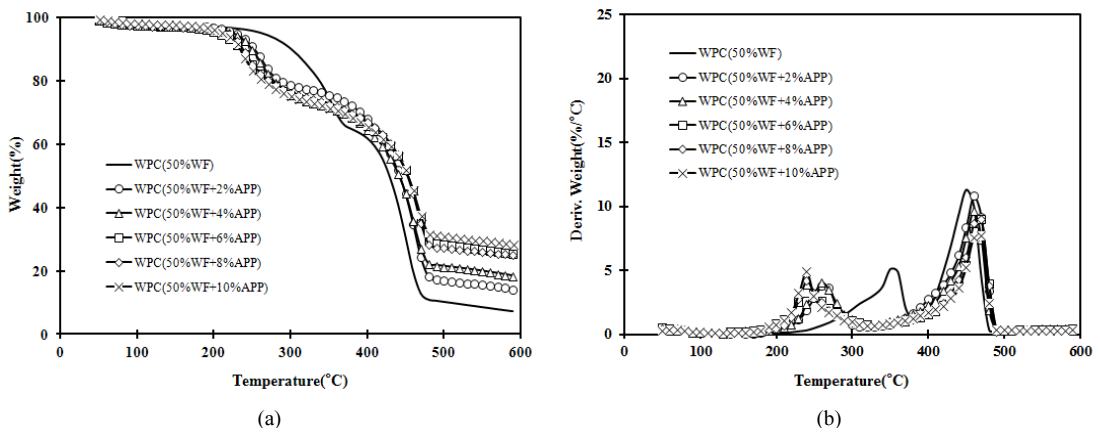


Fig. 7. Thermal degradation behavior of WPCs with 50 wt% WF and APP. (a) TGA, (b) DTG.

변화를 나타냈으며, 잔여물 양 또한 난연제 함량이 증가할수록 눈에 띄는 증가를 보여주고 있다(Fig. 7

과 Table 5). 난연제가 첨가된 WPC 간의 결과를 비교할 때, 목분의 함량이 10 wt%에서 50 wt%로 증가

시 잔여물 양이 증가했다. 이는 난연제 및 목질섬유의 char화가 동시에 발생하기 때문으로 보이며 목분 함량이 증가할수록 이러한 효과가 더욱 상승하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

목분과 PP 수지만으로 제조된 WPC의 열분해 거동을 보면, 목분의 함량이 증가할수록 1차 열분해온도가 감소하고 2차 열분해온도가 증가하였다. 목분의 함량이 증가할수록 1차 열분해속도 또한 증가하였고 2차 열분해속도는 감소하였다. 목분의 열분해온도가 PP의 열분해온도 보다 낮은 것을 고려하였을 때, 목분에 의해 생성된 char막은 PP로의 열전달 속도를 낮추기 때문에 2차 열분해온도 증가 및 열분해속도를 늦추는 것으로 사료된다. APP 함량(2~10 wt%)과 열분해온도 및 열분해속도, 잔여물의 양 사이에 일정한 경향성은 보이지 않지만 APP를 첨가한 WPC는 1차 열분해온도 감소 및 2차 열분해온도의 증가를 보여준다. APP가 첨가된 WPC의 경우 APP 및 목분의 char화가 동시에 발생되어 목분 함량이 증가할수록 높은 열안정 특성을 나타낸다.

REFERENCES

Baker, M.B., Ishak, Z.A., Taib, R.M., Rozman, H.D., Jani, S.M. 2010. Flammability and mechanical properties of wood flour-filled polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 116: 2714-2722.

Dai, K., Song, L., Jiang, S., Yu, B., Yang, W., Yuen, R., Hu, Y. 2013. Unsaturated polyester resins modified with phosphorous-containing groups: effects on thermal properties and flammability. *Polymer Degradation and Stability*. 98: 2033-2040.

Faruk, O., Bledzki, L.A., Matuana, L.M. 2007. Microcellular foamed Wood-Plastic Composites by different processes: A review. *Macromolecular Materials and Engineering*. 292: 113-127.

Feng, C., Zhang, Y., Liu, S., Chi, Z., Xu, J. 2012. Synthesis of novel triazine charring agent and its effect in intumescent flame-retardant polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 123: 3208-3216.

Gwon, J.G., Lee, S.Y., Kang, H.C., Kim, J.H. 2012. Effects of sizes and contents of exothermic foaming agent on physical properties of injection foamed wood fiber/HDPE composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 13(6): 1003-1007.

Huang, R., Xiong, W., Xu, X., Wu, Q. 2012. Thermal expansion behavior of co-extruded wood plastic composites with glass-fiber reinforced shells. *Bioresources*. 7(4): 5514-5526.

Huang, R., Kim, B.J., Lee, S.Y., Yang, Z., Wu, Q. 2013. Co-extruded wood plastic composites with talc-filled shells: morphology, mechanical and thermal expansion performance. *Bioresources*. 8(2): 2283-2299.

Kang, I.A., Lee, S.Y., Doh, G.H., Chun, S.J., Yoon, S.L. 2009. Mechanical properties of wood flour-polypropylene composites: effects of wood species, filler particle size and coupling agent. *Journal of The Korean Wood Science and Technology*. 37(6): 505-516.

Kang, I.A., Lee, S.Y., Doh, G.H., Chun, S.J., Yoon, S.L. 2010. Water absorption of wood flour-polypropylene composites: effects of wood species, filler particle size and coupling agent. *Journal of The Korean Wood Science and Technology*. 38(4): 298-305.

Karian, H.G. 2004. Handbook of polypropylene and polypropylene composites. Marcel Dekker, Inc, New York. p. 741.

Klyosov, A.A. 2007. Wood Plastic Composites. John Wiley & Sons, Inc. p. 698.

Lee, S.Y. 2009. Color change and tensile properties of wood flour reinforced polypropylene compo-

- sites: influence of photostabilizer. *Journal of Korea Oil Chemist's Society*. 26(2): 171-178.
- Lee, S.Y., Yang, H.S., Kim, H.J., Jeong, C.S., Lim, B.S., Lee, J.N. 2004. Creep behavior and manufacturing parameters of wood flour filled polypropylene composites. *Composite Structures*. 65: 459-469.
- Lee, S.Y., Chun, S.J., Doh, G.H., Kang, I.A., Lee, S., Park, K.H. 2009. Influence of chemical modification of filler loading on fundamental properties of bamboo fibers reinforced polypropylene composites. *Journal of Composite Materials*. 43: 1639-1657.
- Lee, S.Y., Kang, I.A., Park, B.S., Doh, G.H., Park, B.D. 2009. Effect of filler and coupling agent on the properties of bamboo fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 28(21): 2589-2604.
- Li, B., He, J. 2004. Investigation of mechanical property, flame retardancy and thermal degradation of LLDPE-wood fibre composites. *Polymer Degradation and Stability*. 83: 241-246.
- Liu, P., Liu, M., Gao, C., Wang, F., Ding, Y., Wen, B., Zhang, S., Yang, M. 2013. Preparation, characterization and properties of a halogen-free phosphorous flame-retarded poly (butylene terephthalate) composite based on a DOPO derivative. *Journal of Applied Polymer Science*. 30: 1301-1307.
- Schlechter, M. 2004. *Plastic wood: Technologies, Market, Business Communications Co., Inc., U.S.A.* p. 180.
- Seefeldt, H., Braun, U. 2012. Burning behavior of wood plastic composite decking boards in end-use conditions: the effects of geometry, material composition, and moisture. *Journal of Fire Science*. 30: 41-51.
- Stark, N.M., Matuana, L.M. 2006. Influence of photostabilizers on wood flour-HDPE composites exposed to xenon-arc radiation with and without water spray. *Polymer Degradation and Stability*. 91: 3048-3056.
- Qu, H., Wu, W., Wu, H., Jiao, Y., Xu, J. 2011. Thermal degradation and fire performance of wood treated with various inorganic salts. *Journal of Fire and Materials*. 35(8): 569-576.