

열중량 분석기와 질량가속기를 이용한 목재 · 플라스틱 복합재의 목질섬유함량 분석¹

권재경² · 이단비² · 조혜정² · 전상진² · 최돈하² · 이선영^{2,†}

Determination of Wood Flour Content in WPC Through Thermogravimetric Analysis and Accelerator Mass Spectrometry¹

Jae-Gyoung Gwon² · Dan-Bee Lee² · Hye-Jung Cho² ·
Sang-Jin Chun² · Don-Ha Choi² · Sun-Young Lee^{2,†}

요약

WPC 내 목질섬유 함량 분석은 신뢰도 높은 목재 플라스틱 복합재(WPC) 소비시장 형성을 위해 상당히 중요하다. 본 연구에서는 polypropylene과 목질섬유를 복합화한 단순 WPC 배합 조건에서 WPC 내 목질섬유 함량에 대한 분석을 TGA를 이용한 열분석 방법과 AMS를 이용한 바이오 탄소 함량 분석 방법을 통해 진행하였다. TGA를 통한 열분해 분석법은 5℃/min의 승온속도로 고분자 PP의 최대 미분 온도를 이용하여 신뢰도 높은 WPC 내 목질섬유 함량에 관한 검량선을 얻을 수 있었다. TGA와 AMS의 분석 방법 비교에 있어서는, 바이오 탄소를 이용하는 AMS 분석법이 더 높은 신뢰성을 보여주었다.

ABSTRACT

Determination of the wood content in wood plastic composite (WPC) is crucial to form reliable WPC market. WPC with simple formulation consisting of only two components (wood flour and polypropylene) was examined using thermogravimetric analysis (TGA) and accelerator mass spectrometry (AMS) for determining wood content in the WPC. TGA method using derivative peak temperature (DTp) of polypropylene under low heating rate (5℃/min) showed more reliable calibration curve and lower error factor compared to method of using the percentage of weight loss of wood flour. In addition, AMS using bio-based carbon content showed greater reliability for the determination of wood content in the WPC in comparison with the TGA method.

Keywords: wood plastic composites, wood content, polypropylene, thermogravimetric analysis, accelerator mass spectrometry

¹ Date Received July 28, 2017, Date Accepted August 20, 2017

² 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 이선영(e-mail: nararawood@korea.kr)

1. 서 론

전 세계적으로 환경문제가 대두되면서 재사용이 가능하고 가격 경쟁력을 갖춘 친환경 제품에 대한 소비자들의 관심이 높아지고 있다. 목분은 가격이 저렴하고, 밀도가 낮으며, 화학적 개질이 용이하고, 가공장비의 마모성이 적은 점 등 많은 장점을 가지고 있으며, 이러한 장점을 가진 목질섬유와 플라스틱을 혼합한 목재·플라스틱 복합재(Wood Plastic Composites: WPC)가 순수 플라스틱을 대체하는 재료로 많은 소비자들에게 관심을 받고 있다(Chun and Lee, 2014; Lee *et al.*, 2013; Kang *et al.*, 2010; Kang *et al.*, 2009; Klyosov, 2007; Lee *et al.*, 2006). WPC는 내구성, 가공성 및 미생물에 대한 저항성이 우수한 건축 재료로서 치수안정성, 열적 특성, 수분 안정성, 재활용, 압축·인장·전단 강도 및 높은 충격강도를 가지고 있어 데크, 울타리, 창틀, 외벽, 보드워크, 가드레일 및 방음벽 등으로 사용되고 있다(Kang *et al.*, 2009). 또한, WPC는 현대사회의 요구인 환경 친화성을 충족하는 목질원료로 폐기물, 미이용 재료 등을 이용할 수 있고, 플라스틱의 경우에도 산업적으로 폐기된 폐플라스틱을 사용할 수 있다(Lee *et al.*, 2007). 이러한 WPC의 높은 활용성은 오늘날 요구되고 있는 지속적인 물질 순환사회의 구축에 큰 기여를 기대할 수 있다(Lee *et al.*, 2007).

2016년에 시행된 WPC에 관한 ‘목재제품의 규격과 품질기준’(국립산림과학원고시 제2016-6호)에 따르면 복합재의 전체 중량 대비 목분 함량이 50% 이상인 제품을 목재제품의 기준으로 정하고 있다. 또한, 미국재료시험협회(American Society for Testing and Materials, ASTM)에서는 WPC를 WPC 내의 플라스틱 함유량이 50% 미만으로 규정하고 있고 50% 이상일 경우 ‘plastic lumber’로 규정하며, WPC와 구별하고 있다(Lao *et al.*, 2014). 플라스틱 대비 바이오매스 함량 비율은 최종 제품인 WPC의 치수 안정성, 유기 분해 안정성, 기계적 강도 및 탄성계수와 같은 물성 변화에 중요한 요인으로 작용하며, 비율에 따라 WPC의 활용 분야가 달라진다(Mankowski and Morrell, 2000; Balasuriya *et al.*, 2001; Lin *et al.*,

2002; Sombatsompop *et al.*, 2003; Nuñez *et al.*, 2003). 또한, 업체에서 생산한 제품이 WPC 범주 속에 포함유무를 판단하기 위해서는 플라스틱과 목질섬유의 비율이 핵심요인으로 작용하기 때문에 목질섬유와 같은 바이오매스의 함량 분석은 상당히 중요하다(Li *et al.*, 2016). WPC 소비 시장은 지속적 성장이 예상됨에 따라 시장경제의 주연인 소비자로부터, 생산된 WPC 제품에 대한 신뢰성 확보를 위해 WPC 내의 목질섬유 함량에 대한 정확한 정보를 제공할 필요가 있다. 현재까지 국내 WPC 내의 목질섬유 함량에 대한 정확한 분석법 기준이 마련되어 있지 않아, 본 논문은 분석법 기준 마련에 대한 기초 자료 제공에 그 목적이 있다.

현재까지, WPC 내의 목질섬유의 함량 분석은 속슬렛(Soxhlet)을 이용한 유기 용매 추출법, 푸리에 변환 적외선 분광기(Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR), 시차 주사 열량계(Differential scanning calorimetry, DSC), 열중량 분석기(Thermogravimetric analysis, TGA), 분석적 열분해(analytical pyrolysis, Py) 등을 통해 이루어질 수 있으며(Jeske *et al.*, 2012), 가속기 질량분석 장치(Accelerator mass spectrometry, AMS)와 같이 방사성 탄소 ^{14}C 를 이용하여 목질섬유 함유량을 예측하는 방식도 존재한다. 속슬렛을 이용한 분석법은 유기 용매를 쓴다는 점에서 까다롭고, 폴리프로필렌(polypropylene, PP)과 폴리에틸렌(polyethylene, PE)과 같은 폴리올레핀(polyolefin) 계열의 고분자를 사용한 WPC로부터 상온에서 목질섬유만 추출하기 위해서는 물리화학적으로 상당한 에너지가 소비되는 단점이 있다. FTIR의 경우 단순하며, 분석 비용이 저가이고, 빠른 분석이 가능한 장점이 있으나 복합소재에 사용되는 재료의 종류에 따라 특정 파수(wave number)가 겹치는 부분이 많고 그 차이를 구별하기 어렵다(Lao *et al.*, 2014). 분석적 열분해, 특히 기체 크로마토그래피-질량분석기가 결합된 분석적 열분해 방법(Py-GC/MS)의 경우, 정확하고 신뢰도 높은 예측 가능성을 보여주는 분석 장비이지만 반복실험을 해야 하는 함량분석을 고려했을 때, 분석비용이 고가이며, 상당히 복잡하고 분석에 장시간이 소요되는 점을 단점으로 꼽을 수 있다(Li *et al.*, 2016). DSC

는 사용되는 고분자의 용융점에 근거하여 사용되는 고분자의 종류를 판별할 수 있는 반면, TGA의 경우 단일 고분자 및 복합소재의 열분해 거동을 결정하는데 유리한 분석 장비이다(Ehrenstein *et al.*, 2003). DSC에 비해 TGA는 WPC의 배합 조성에 대한 정보만 주어진다면 혼합된 목질섬유와 고분자의 함량을 보정 없이 정량 분석이 가능하다. DSC의 경우 고분자의 용융점에서의 피크 면적 계산을 통해 고분자의 함량을 분석할 수 있으나 WPC에 사용된 고분자와 첨가제의 용융점이 비슷할 경우 함량에 대한 정량 분석이 어려운 점이 있다(Jeske *et al.*, 2012). 또한, 개별적인 WPC 재료들에 대한 TGA 평가는 혼합된 성분들의 열분해 거동에 관한 정보를 제공해 주기 때문에 TGA 분석은 개별적인 WPC 배합비 분석에 적합할 것으로 기대된다(Jeske *et al.*, 2012). 바이오 탄소 함량을 이용하는 AMS는 시료의 원자를 이온화시켜 가속시키고, 에너지와 운동량 그리고 전하상태를 분석하여 최종 얻고자 하는 원자핵의 동위원소인 ^{14}C 의 수를 정확하게 측정하는 분광기술이다. 이는 안정동위원소인 ^{12}C 와 ^{13}C , 나머지 동위원소로 자연계 대기와 상호작용이 증기되면 시간에 따라 존재비가 변하는 ^{14}C 의 원리를 적용하여 복합재의 바이오 매스량을 산정 방식으로 폴리부틸석시네이트(poly (butylene succinate), PBS)와 셀룰로오스 및 목질섬유 복합소재에 관한 바이오매스 함량 분석이 이루어진 바가 있지만(Funabashi *et al.*, 2008) 다른 분석 장비에 비해 상대적으로 적은 연구가 행해졌다.

본 연구에서는 폴리올레핀의 대표적인 고분자 수지인 PP와 목질섬유를 충전재로 한 WPC를 제조하고 이에 대한 TGA와 AMS 분석법 소개하는데 목적이 있으며, 각 분석법으로부터 검량선을 도출하고, 실험값과 비교하여 오차율 계산법을 소개하고자 한다.

2. 실험

2.1. 공시재료

폴리프로필렌(PP, HJ-700, 삼성 토탈)이 고분자 수지로 사용되었으며, 용융흐름지수(melt flow index)

Table 1. Compositions of the WPCs

Wood (wt%)	PP (wt%)
30	70
40	60
50	50
60	40
70	30

는 230℃에서 22 g/10 min이고, 밀도는 0.93 g/cm³이다. 충전재로 사용된 목질섬유(ABOCEL™ C100, J. RETTENMAIER & SOHNE GmbH + Co KG)는 가문비나무로(*Picea abies* (L.) H. Karst.)부터 파쇄된 파우더 형태이며, 입자크기는 31~100 μm이며, 밀도는 172 g/l이다.

2.2. 복합소재 제조

오븐에서 80℃, 24시간 동안 건조된 목질섬유와 PP가 혼합된 복합소재를 제조하기 위해서 동회전 이중-스크류 압출기(corotating twin-screw extruder, 19 mm diameter, 40 L/D ratio, (주)Bautek)가 사용되었으며, 압출시 배럴온도는 170~185℃, 스크류 속도는 약 150 rpm였다. 압출기로부터 압출된 실 형태의 WPC가닥은 (strand) 펠릿 제조기(pelletizer, (주)Bautek)를 통해 펠릿화 되었고, 제조된 WPC로부터 목질섬유 함량 분석을 위해 24시간 동안 80℃에서 건조되었다. 복합소재 제조에 대한 배합비는 Table 1에 표시 되었다.

2.3. 섬유 함량 분석

TGA에 의한 열분석 법은 질소 환경의 두 가지 일정한 승온속도(5℃ 및 10℃/min)에서 진행되었으며, 열중량 감소 그래프에서 최대미분온도(DTp, Derivative peak temperature)를 이용한 분석법과 열분해 중량 감소율(%)을 이용한 분석 방법을 수행하였다. 이에 대한 자세한 분석 방법을 Fig. 1에 나타내었다. 최대 미분 온도를 이용한 목질 함량 분석법은 PP 분해 온도 범위인 276~465℃ (Gwon *et al.*, 2014) 사이의

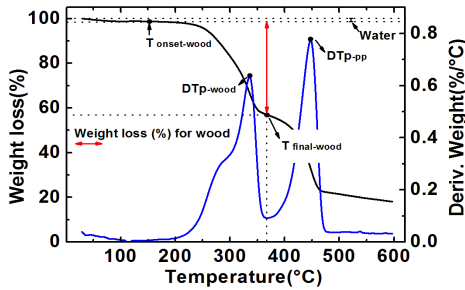


Fig. 1. TGA curves of WPC at 50 wt% wood content.

최대미분온도(DTp)를 이용하였다. 목질섬유의 주성분인 hemicellulose, cellulose, ligin의 경우 주로 150 ~ 500°C 사이에서 분해가 이루어지며(Lee and Kim, 2015), 100°C 부근에서 수분의 증발이 이루어지고, 400°C 부근에서 목질섬유에 형성된 탄화막의 라디칼 분해가 이루어진다(Jeske *et al.*, 2012; Gwon *et al.*, 2014). 따라서 본 연구에서는 수분의 증발이 이루어진 후 150°C 근처의 목질 섬유 분해 온도를 시작점(*Tonset_wood*)으로, 400°C 이하의 온도를 목질 섬유의 분해 온도 종결점(*Tfinal_wood*)으로 선정하고, 목질섬유에 대한 열분해 중량 감소율(%)을 계산하였다.

AMS 분석은 베타 연구소(Beta Analytic, Inc., 마이애미, 미국)에 의뢰하여 분석을 진행했으며, WPC 내 바이오매스 탄소 함량비율은 ASTM D6866-12 Method B에 따라 수행되었다. AMS는 시료의 원자를 이온화 시켜 가속시키고, 에너지와 운동량 그리고 전하상태를 분석하여 최종 얻고자 하는 원자핵의 동위원소 ^{14}C 의 수를 정확하게 측정하는 분광기술이다. 이 기술은 동위원소 분석에 있어서 현재 최고 수준의 분해능을 가지고 있으며, 측정할 수 있는 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율의 분해능은 10-12~10-15이다(Park *et al.*, 2008; Tachibana *et al.*, 2010). 일반적인 AMS의 작동 구조를 Fig. 2에 나타내었으며(Tachibana *et al.*, 2010), WPC 내 바이오매스 탄소 함량비율은 아래 식 (1)과 같이 계산되었다.

$$\% \text{ biobased carbon} = \text{pMC} \times 0.98 \dots\dots\dots (1)$$

이 식에서 pMC (percentage of modern carbon)는

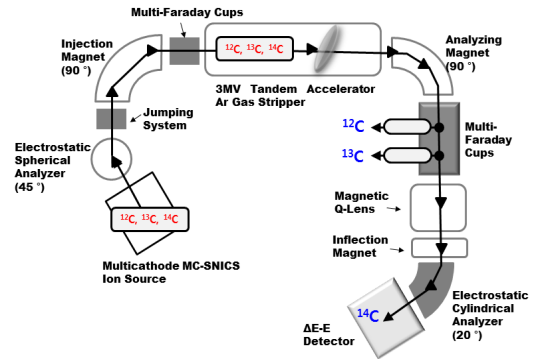


Fig. 2. Schematic illustration of AMS apparatus for pMC.

AMS로부터 측정된 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율로 계산되며, 0.98은 대기 중에 과잉으로 존재하는 ^{14}C 의 지속적인 감소에 따른 보정값(correction factor)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열분석을 통한 WPC의 함량 분석_TGA

Fig. 3와 4는 각각 승온속도 5°C와 10°C에서 측정된 PP에 대한 최대미분온도(DTp) 및 이를 바탕으로 계산된 검량선(regression curve)을 보여주고 있으며, 이에 대한 오차율 계산 값을 Table 2와 3에 나타내었다. 승온속도 5°C/min에서 구한 결정계수(coefficient of determination, R2)는 0.9977이며, WPC 제조 시 실제 투입된 목질 섬유의 함량(experimental)과 검량선으로부터 구한 목질섬유 함량(calculated)을 통해 구한 오차율의 범위는 0.4~3.3%이고, 이에 대한 평균은 1.8%였다. 승온속도 10°C/min의 경우, 결정계수는 0.9738이며, 오차율 범위는 1.3~9.0%이고, 이에 대한 평균은 3.9%였다. 상기 데이터로부터 승온속도 5°C/min의 조건으로 TGA를 통한 목질섬유 함량 분석시 승온속도 10°C/min 조건의 분석에 비해 보다 정확한 WPC 내 목질섬유 함량에 대한 검량선을 구할 수 있는 것으로 판단된다.

목질섬유의 열분해 중량 감소율(%)을 이용한 분석법은 승온속도 5°C/min에서 수행하였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 5와 Table 4에 나타내었다. 결정계수

Table 2. Wood content (experimental & calculated) and error factor using DTp obtained from DTG curves with the heating rate of 5°C/min

Wood content (%) (experimental)	^a Wood content (%) (calculated)	[*] Error factor (%)
30.0	30.7	2.3
40.0	38.7	3.3
50.0	49.8	0.4
60.0	61.4	2.3
70.0	69.4	0.9

a: calculated value from the regression curve in Fig. 2.

*: [(calculated value-experimental value)/ experimental value] × 100.

Table 3. Wood content (experimental & calculated) and error factor using DTp obtained from DTG curves with the heating rate of 10°C/min

Wood content (%) (experimental)	^a Wood content (%) (calculated)	[*] Error factor (%)
30.0	31.7	5.6
40.0	40.6	1.5
50.0	45.5	9.0
60.0	60.8	1.3
70.0	71.5	2.1

a: calculated value from the regression curve in Fig. 3.

*: [(calculated value-experimental value)/ experimental value] × 100.

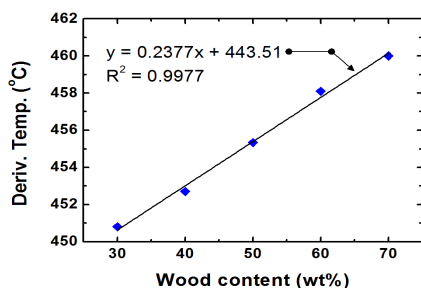


Fig. 3. Maximum derivative temperature (DTp) of PP as a function of experimental wood content (the heating rate of 5°C/min).

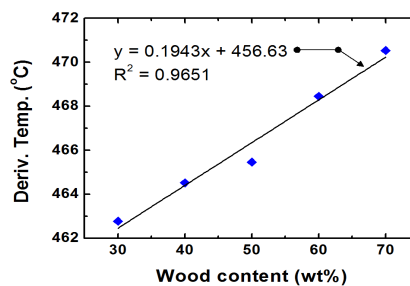


Fig. 4. Maximum derivative temperature (DTp) of PP as a function of experimental wood content (the heating rate of 10°C/min).

는 0.9824이고, 오차율 범위는 0.3 ~ 7.5%, 오차율 평균은 3.24%였다. PP와 목질 섬유가 혼합된 WPC 내의 TGA를 이용한 목질 함량 분석은 DTp에 의한 분석방법이 열분해 중량 감소율에 의한 방법에 비해 적은 오차율과 실제로 적용된 목질섬유 함량에 잘 맞는 검량선을 보여 주었다. 하지만 재료선택의 넓은 변수를 갖는 WPC 제조 조건을 고려했을 때, WPC 내

최대 열분해온도를 이용한 분석법은 고분자 수지 측면을 고려한 분석법으로 상업적으로 이용되는 WPC 제품의 경우 원 재료(고분자 종류)를 수거하여 다양한 변수를 고려한 검량선을 찾아야 하는 단점이 있다. 그러나 열분해 중량 감소율을 이용한 분석법은 목재 성분이 먼저 분해되어 중량 감소를 나타내므로 고분자 수지에 상관없이 적용할 수 있는 장점이 있다.

Table 4. Wood content (experimental & calculated) and error factor using the percentage of weigh loss obtained from TGA curves with the heating rate of 5 °C/min

Wood content (%) (experimental)	^a Wood content (%) (calculated)	*Error factor (%)
30.0	28.3	5.7
40.0	43.0	7.5
50.0	49.3	1.4
60.0	59.2	1.3
70.0	70.2	0.3

a: calculated value from the regression curve in Fig. 4.

*: [(calculated value-experimental value)/experimental value] × 100.

Table 5. Wood content (experimental & calculated) and error factor from AMS

Wood content (%) (experimental)	^a Wood content (%) (calculated)	*Error factor (%)
30.0	30.6	2.0
40.0	39.6	1.0
50.0	49.6	0.8
60.0	59.6	0.7
70.0	70.6	0.9

a: calculated value from the regression curve in Fig. 5.

*: [(calculated value-experimental value)/experimental value] × 100.

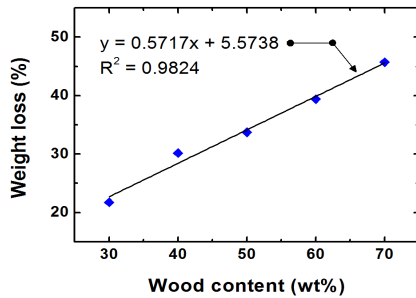


Fig. 5. The percentage of weight loss as a function of experimental wood content (the heating rate of 5 °C/min).

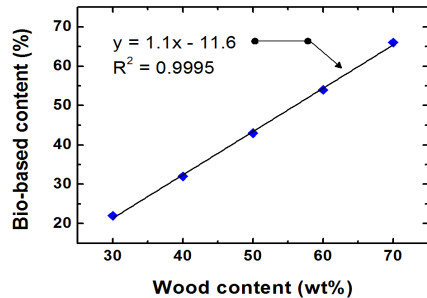


Fig. 6. The percentage of bio-based carbon as a function of experimental wood content from AMS.

3.2. 바이오탄소함량 측정을 이용한 WPC의 함량 분석_AMS

자연계에서 존재하는 탄소동위원소를 이용한 방법으로 AMS 장비를 사용하였다. 이는 안정동위원소인 ¹²C와 ¹³C, 나머지 동위원소로 자연계 대기와 상호작용이 중지되면 시간에 따라 존재비가 변하는 ¹⁴C의 원리를 적용하여 복합재의 바이오매스량을 산정하고

마찬가지로 검량선을 도출한 다음 WPC 내 목질섬유의 함량을 계산하였다.

AMS를 이용한 WPC의 탄소동위원소 측정방법 분석 결과는 Fig. 6과 Table 5에 나타내었다. 결정계수는 0.9995이고, 오차율 범위는 0.7 ~ 2.0%, 오차율 평균은 1.1%로 나타났다. TGA를 이용한 열분석 방법으로 계산된 목질섬유 함량 계산값에 비해 높은 결정계수 값을 보이며, 낮은 오차율을 보이고 있다.

바이오탄소 함량을 측정하여 목질섬유 함량을 분석하는 방법은 검량선을 이용할 수도 있지만 실제 측정된 데이터, 즉 WPC 포함된 바이오탄소 함량을 복합재에 적용하여 목분의 함량을 측정할 수 있으므로 TGA를 이용한 분석법 보다는 간단한 방법으로 선택할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 PP와 목질섬유를 복합화된 단순 WPC 배합 조건에서 WPC 내 목질섬유 함량에 대한 분석을 TGA를 이용한 열분석 방법과 AMS를 이용한 바이오탄소 함량 분석 방법을 통해 진행했다. TGA를 통한 열분해 분석 방법을 통해 5℃/min의 승온속도로 고분자 PP의 최대미분온도를 이용하는 것이 신뢰도 높은 목질섬유 함량에 관한 검량선을 얻을 수 있었다. TGA와 AMS의 분석 방법 비교에 있어서는, 바이오탄소 함량을 이용하는 AMS 분석 방법이 신뢰성이 더 높은 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 현재 WPC는 기능성(강도, 내구성 및 내후성) 향상을 위해 다양한 고분자와 목질섬유 적용 및 유·무기물 첨가가 시도되고 있으며, 이는 목질섬유 함량에 영향을 줄 것이라고 판단되며, 향후 이에 대한 분석 연구진행이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Balauriya, P.W., Ye, L., Mai, Y.W. 2001. Mechanical properties of wood flake-polyethylene composites. Part I: effects of processing methods and matrix melt flow behavior. *Compos A* 32(5): 619-629.
- Chun, S.J., Lee, S.Y. 2014. Thermal stability of polypropylene-based wood plastic composites by the addition of ammonium polyphosphate. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 42(6): 682-690.
- Ehrenstein, G.W., Riedel, G., Trawiel, P. 2003. *Praxis der thermischen analyse von kunststoffen*, second ed., Carl Hanser Verlag, Munchen.
- Funabashi, M., Listyarini, A., Kunioka, M. 2008. Biomass carbon ratio of biobased polymer composites filled with cellulose fibers measured by accelerator mass spectrometry. *WIT Transactions on The Built Environment* 97: 221-230.
- Gwon, J.G., Lee, S.Y., Kim, J.H. 2014. Thermal degradation behavior of polypropylene base wood plastic composites hybridized with metal (aluminum, magnesium) hydroxides. *Journal of Applied Polymer Science* 131(7): 40120.
- Jeske, H., Schirp, A., Cornelius, F. 2012. Development of a thermogravimetric analysis (TGA) method for quantitative analysis of wood flour and polypropylene in wood plastic composites (WPC). *Thermochimica Acta* 543: 165-171.
- 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.
- Klyosov, A.A. 2007. *Wood-plastic composites*. A John Wiley & Sons, INC., Publication. ISBN 978-0-470-14891-4.
- Lao, W., Li, G., Zhou, Q., Qin, T. 2014. Quantitative analysis of biomass in three types of wood-plastic composites by FTIR spectroscopy. *BioResources* 9(4): 6073-6086.
- Lee, D.B., Kim, B.J. 2016. A Study on the Thermal Properties and Activation Energy of Rapidly Torrefied Oak Wood Powder using Non-isothermal Thermogravimetric Analysis. *Journal of*

- The Korean Wood Science and Technology 44(1): 96-105.
- Lee, S.Y., Chun, S.J., Park, S.B., Choi, D.H., Doh, G.H., Kang, I.A., Kim, J.H., Yoon, H.G. 2013. Manufacturing technology of Wood Plastic Composites. National Institute of Forest Science. Research report.
- Lee, S.Y., Doh, G.H., Kang, I.A. 2006. Thermal behavior of hwangto and wood flour reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. Journal of The Korean Wood Science and Technology 34(5): 59-66.
- Li, G., Lao, W., Zou, X., Han, Y., Fan, D. 2016. Use of near-infrared spectroscopy for prediction of biomass and polypropylene in wood plastic composites. Wood Science and Technology 50: 705-714.
- Lin, Q., Zhou, X., Dai, G. 2002. Effect of hydro-thermal environment on moisture absorption and mechanical properties of wood flour-filled polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science 85(14): 2824-2832.
- Mankowski, M., Morrell, J.J. 2000. Patterns of fungal attack in wood-plastic composites following exposure in soil block test. Wood Fiber Sci 32(3): 340-345.
- National Institute of Forest Science. Wood Engineering. 2016. Standards and Quality standards of wppd products. National Institute of Forest Science. National Institute of Forest Science. Notice 2016-8.
- Núñez, A.J., Sturm, P.C., Kenny, J.M., Aranguren, M.I., Marcovich, N.E., Reboredo, M.M. 2003. Mechanical characterization of polypropylene-wood flour composites. Journal of Applied Polymer Science 88(6): 1420-1428.
- Park, J., Hong, W., Park, J.Y., Sung, K.S., Eum, C.H. 2008. Distribution of CO₂ produced from fossil fuel by accelerator mass spectrometry: in Daejeon. Analytical Science & Technology 21(1): 9-13.
- Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasulk, C., Thongsang, S. 2003. Effect of wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites. Polymer International 52(12): 1847-1855.
- Tachibana, Y., Giang, N.T.T., Ninomiya F., Funabashi, M., Kunioka, M. 2010. Cellulose acetate butyrate as multifunctional additive for poly (butylene succinate) by melt blending: Mechanical properties, biomass carbon ratio, and control of biodegradability. Polymer Degradation and Stability 95: 1406-1413.