

목분-폴리프로필렌 복합재의 수분흡수율 : 목재수종, 충전제 입자크기 및 상용화제의 영향*1

강인애*2 · 이선영*2† · 도금현*2 · 전상진*2 · 윤승락*3

Water Absorption of Wood Flour-Polypropylene Composites: Effects of Wood Species, Filler Particle Size and Coupling Agent*1

In-Aeh Kang*2 · Sun-Young Lee*2† · Geum-Hyun Doh*2 ·
Sang-Jin Chun*2 · Seung-Lak Yoon*3

요 약

본 연구에서는 목분 첨가된 폴리프로필렌 복합재의 수분흡수 특성에 목재수종, 화학조성분, 충전제 함량, 입자크기 및 상용화제의 첨가가 미치는 영향에 관해서 알아보았다. 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000 시간 동안 물에 침지시킨 후, 상수리나무(*Quercus acutisima* Carr.)와 다릅나무(*Maackia amurensis* Rupr. et Maxim)는 낙엽송(*Larix kaempferi* Lamb.)에 비하여 훨씬 낮은 물흡수도를 보였다. 모든 수종에서 목분의 함량이 10 wt%로부터 50 wt%까지 증가할수록, 주어진 시간동안 물에 침지시켰을 때 복합재의 수분흡수율이 증가하였다. 목분의 입자크기는 복합재의 수분흡수율에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 상용화제의 첨가는 복합재의 수분흡수율을 낮추는데 아주 효과적이다. 가장 낮은 수분흡수율은 다릅나무 목분을 이용하고, 목분의 함량이 낮을수록, 목분의 입자크기가 작을수록, 그리고 상용화제를 첨가했을 때 얻을 수 있다. 복합재의 두께팽창은 수분흡수율과 아주 높은 상관관계를 가지고 있다.

ABSTRACT

The effects of wood species, chemical components, filler loading level, filler particle size, and

* 1 접수 2010년 1월 15일, 채택 2010년 5월 24일

* 2 국립산림과학원 녹색자원이용부, Forest Resources Utilization Division, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

* 3 진주산업대학교 인테리어재료공학과, Forest Products Engineering, Jinju National University, JinJu 660-758, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 이선영(email: nararawood@forest.go.kr)

coupling agent on the water absorption property of the wood flour filled polypropylene (PP) composites were investigated in this study. After 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 and 3,000 hr water immersion, *Quercus* (*Quercus accutissima* Carr.) and *Maackia* (*Maackia amurensis* Rupr. et Maxim) showed significantly lower water absorption properties compared to *Larix* (*Larix kaempferi* Lamb.). As wood flour loading increases from 10 to 50 wt%, most wood species showed increased water absorption after a given immersion period. Particle size of wood flour proved to have very significant effects on water absorption of the composites. The effect of coupling agent was positive in terms of lowering water absorption of the composites. As the treatment level of coupling agent increases, the water absorption of the composites decreases. The lowest water absorption was obtained at the lower wood flour loading (*Maackia*), smaller particle size and by the addition of coupling agent. Thickness swelling of the composites shows close dependency on water absorption.

Keywords: biocomposites, wood species, water absorption, particle size, coupling agent, thickness swelling

1. 서 론

목재·플라스틱 복합재(Wood Plastic Composites)는 일반적으로 목재에 비하여 상당히 적은 양의 수분을 흡수하지만, 상업적으로 사용되는 복합재는 50% 이상의 목분을 포함하고 있어서 적지 않은 양의 수분을 흡수한다. 상업용 복합재는 24시간 동안 물에 침지되었을 때 대체적으로 중량의 0.7~3%의 수분을 흡수하지만, 가압 처리된 방부목재는 중량의 약 24%를 흡수한다. 또한 장기간 물에 침지되었을 때 상업용 복합재는 중량의 20~30%의 물을 흡수하지만, 목재는 중량의 100% 이상의 수분을 흡수한다(Klyosov, 2007).

복합재가 수분을 흡수하는 문제는 실질적으로 데크와 같은 건축재료에 적용될 때 여러 가지 문제를 야기시킬 수 있다. 첫 번째 문제점은 복합재의 뒤틀림 및 만곡현상이다. 또한 복합재가 수분에 포화되었을 때 종종 굴곡탄성계수가 감소하거나 하중이 적용될 때 높은 변형을 초래할 수 있다. 다른 문제점은 곰팡이의 증식이다.

복합재 소재들은 주로 내부의 공극(porosity) 때문에 수분을 흡수한다. 복합재의 플라스틱 원료인 폴리프로필렌(polypropylene)과 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene)은 일반적으로 24시간 물에 침

지시킬 때 0.01%보다 적은 수분을 흡수한다. 셀룰로오스 섬유, 무기염류 및 안료첨가제로 충전되거나 고온에서 용융·압출되면서 플라스틱은 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOC)를 형성하는 해중합반응이 일어난다. 그리고 셀룰로오스 섬유 속에 있는 수분은 용융온도에서 증기로 전환되어 핫멜트 속에서 마이크로 크기의 기포가 만들어진다.

복합재 제조에 이용되는 목분 크기를 평가하는 방법은 메시 크기(mesh size)인데, 보통 40~120 메시(425~125 μm)의 범위에서 선별기로 분리된 목분을 사용한다. 40 메시보다 큰 목분은 너무 입자가 커서 잘 사용하지 않으며, 120 메시보다 작은 목분은 너무 미세하다. 목분의 표면적은 미세한 무기염류에 비하여 크지 않다. 대체적으로 입자의 크기가 클수록 표면적이 작게 된다(Schlechter, 2005).

복합재의 가장 두드러진 장점들 중의 하나가 목재에 비하여 비교적 낮은 수분흡수율을 보인다. 이 우수한 특성은 직접적으로 치수안정성과 미생물열화에 대한 저항성이라고 할 수 있다. 일반적으로 복합재료 속에 목분이 플라스틱에 의해 쌓여져 있다는 주장은 완전히 옳다고 볼 수는 없다. 특히 복합재 중량의 40 wt% 이상의 목분을 함유하는 경우에는 그러하다. 상업용 복합재의 경우는 종종 50~65 wt%의 목분을 함유하는

경우도 있다. 물이 복합재 속으로 침투할 때 만나게 되는 많은 셀룰로오스 파티클이 있다. 수분흡수는 WPC의 바깥층에서 주로 일어나며, 내부층으로 갈수록 점차적으로 감소한다(Wang과 Morrell, 2004).

목분이 플라스틱에 완벽하게 코팅이 되어 수분흡수가 불가능하다면, low density polyethylene (LDPE) 수지를 이용한 WPC 보드에 목분의 함량이 10~50 wt%로 증가시킬 때, 20~30일 동안 물에 침지 후에 수분흡수율은 1~12%의 수준을 보였다. 수분흡수율은 WPC의 목분 함량의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 보인다(Kajaks와 Reihmane, 1999). Polypropylene (PP)와 목분(aspen-fiber)으로 만든 복합재 보드에서 목분의 함량이 0, 30, 40, 50, 60 wt%로 증가할 때, 70일 동안 물에 침지시킨 후 수분흡수율은 0, 2, 5, 7, 9와 11% 증가하였다(Rowell *et al.*, 2002). 이는 목분의 주성분인 셀룰로오스가 수산기(-OH)를 가지고 있어서 친수성을 나타내기 때문이다.

본 연구에서는 열가소성 고분자인 PP와 다른 목재 수종으로부터 제조된 목분을 강화충진제로 첨가한 복합재의 수분흡수율과 치수안정성에 대해 조사하였다. 제조된 복합재의 이러한 특성들에 목재의 수종, 화학조성분, 입자의 크기 및 상용화제가 미치는 영향에 관해서 알아보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

다른 입자크기의 목분(40~60 mesh와 80~100 mesh)은 국립산림과학원에서 낙엽송(*Larix kaempferi* Lamb.), 상수리(*Quercus acutissima* Carr.) 및 다릅나무(*Maackia amurensis* Rupr. et Maxim)로부터 제조되었다. 폴리프로필렌(PP, 분자량 = 180,000 g/mol, 용융지수 = 3.2 g/10 min, 밀도 = 0.9 g/cm³)은 (주) 대한유화공업에서 제공받았다. 상용화제로 사용된 maleated polypropylene (MAPP, 분자량 = 40,000 g/mol)은 (주)호남석유화학으로부터 제공받았다.

2.2. 목재의 화학조성분 분석

목재의 화학조성분 분석은 한국목재공학회지 37권 6호에 발표되었던 방법과 동일하다. 홀로셀룰로오스(holocellulose)의 함량은 ASTM Standard D 1104-56 (1978) 방법, 알파-셀룰로오스(α -cellulose)는 Tappi T203cm-99 (2009) 방법에 의해 얻어졌다. 헤미셀룰로오스(Hemicellulose)의 함량은 홀로셀룰로오스로부터 알파-셀룰로오스를 감하여 얻었다. 리그닌(lignin)과 추출물(extractives)의 함량은 ASTM Standard D 1106-96 (2007)과 D 1107-96 (2007) 방법을 이용하였다. 회분(Ash)의 함량은 ASTM Standard D 1102-84 (2007) 방법에 의하여 얻어졌다. 각 화학조성분의 평균값은 각 실험을 세 번 반복하여 얻어진 수치이다.

2.3. 혼련 및 시편제조

기질고분자 PP에 세 가지 수종으로부터 얻어진 목분(40~60 mesh와 80~100 mesh)을 첨가하여 복합재를 제조하였다. PP와 목분의 배합비율은 중량퍼센트를 기준으로 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40 및 50 : 50로 혼합하였다. 또한 상용화제 1, 3, 5 wt%를 복합재의 중량에 따라 첨가시켰다. 혼합된 재료는 이축 압출기(Bautek Co., Korea)를 통과시켜 용융·혼합시켰다. 압출기의 배럴의 온도는 180~190°C로 조절하였고 스크루 속도는 100~150 rpm이었다. 압출기의 노즐을 통과한 후 스트랜드 모양의 혼합물은 공랭되어 펠레타이저를 이용하여 펠렛을 제조되었다. 80°C에서 24시간 동안 펠렛을 건조시킨 후 사출기(injection molder, Dr. Boy GmbH & Co. KG, Germany)에 주입하여 190°C의 내부온도와 5.5 MPa 압력조건에서 수분흡수율 측정을 위해 시편(115 × 11.3 × 5 mm)을 제조하였다.

2.4. 수분 흡수도 시험

증류수에 침지시키기에 앞서 시편은 80°C에서 24시간 동안 오븐에서 건조시켰다. 시편은 물속에서 다른 침지시간(500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000

Table 1. Chemical components of different wood species

	Larix	Quercus	Maackia
Specific gravity	0.56	0.80	0.57
Ash (%)	0.1	19	0.4
Holocellulose (%)	65.5	67.8	69.6
<i>alpha</i> cellulose	36.2	43.6	41.3
Hemicellulose	29.3	24.2	28.3
Lignin (%)	31.6	24.4	24.7
Extractives (%)	85	39	4.4

시간)에 따라 유지되었다. 주어진 시간 후에 표면의 수분을 제거하기 위하여 마른 수건으로 제거시키고 시편의 무게와 두께를 측정 한 후 다시 물 속에 보관 하였다. 수분흡수율 측정을 위하여 각 시편 당 세 번 반복실험을 하였다.

수분 흡수율(water absorption, WA)과 두께 팽창(thickness swelling, TS)은 다음과 같은 식을 이용하여 얻어졌다.

$$WA (\%) = (W_e - W_0) / W_0 \times 100 \quad (1)$$

; W_e = 침지 후 시편의 무게(g),

W_0 = 침지 전 시편의 무게(g)이다.

$$TS (\%) = (T_e - T_0) / t_0 \times 100 \quad (2)$$

; T_e = 침지 후 시편의 두께(mm),

T_0 = 침지 전 시편의 두께(mm)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 목분의 화학조성분

Table 1은 다른 목재수종으로 얻은 목분의 화학조성분 분석결과를 나타낸다. 낙엽송과 다릅나무의 비중은 비슷하여 각각 0.56과 0.57이고, 참나무속인 상수리나무는 0.80이다. 회분의 함량은 상수리나무가 1.9%로 가장 높았으며, 낙엽송이 0.1%로 가장 낮았다. 홀로셀룰로오스의 함량은 다릅나무가 69.6%로 가장 높았으며, 상수리나무가 67.8%, 낙엽송이 65.5% 순이었다. 알파-셀룰로오스의 함량은 상수리나무가 43.6%, 다릅나무가 41.3%, 낙엽송이 36.2%였다. 여기에서 상수리나무와 다릅나무가 셀룰로오스 함량이 낙엽송보다 훨씬 높음을 알 수 있다. 헤미셀룰로오스의

함량은 낙엽송이 29.3%로 가장 높았고, 다릅나무가 28.3%, 상수리나무가 24.2%로 가장 낮았다. 리그닌 함량은 낙엽송이 31.6%로 가장 높았으며, 상수리나무가 24.4%로 가장 낮았다. 추출물의 함량은 낙엽송이 8.5%로 가장 높았고, 다릅나무와 상수리나무는 각각 4.4%와 3.9%였다(강 *et al.*, 2009).

3.2. 목재수종과 목분함량의 영향

Fig. 1(a)~(c)는 80~100 메시의 상수리나무, 낙엽송, 다릅나무 목분(10, 20, 30, 40 및 50 wt%) 침지 시간의 변화(500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, 3,000 시간) 따른 수분흡수율을 나타낸다. 상수리나무와 다릅나무는 침지시간을 늘려감에 따라 낙엽송에 비하여 낮은 수분흡수율을 보였다. 50 wt%의 목분 수준에서, 상수리나무 PP/WF 복합재는 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000시간 후 수분흡수율은 2.0, 3.1, 4.1, 5.2, 6.7 및 7.4%였다. 다릅나무 PP/WF 복합재는 같은 침지시간 후, 2.0, 3.2, 4.3, 5.4, 6.3 및 8.3%의 수분흡수율을 보였다. 그러나 같은 목분 함량이 첨가된 낙엽송 PP/WF 복합재는 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000시간 후 수분흡수율은 2.5, 4.3, 6.1, 7.8, 9.1 및 10.0%였다. 각각의 목재수종으로 만든 PP/WF 복합재의 수분흡수율은 화학조성분 중에 알파-셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 함량에 크게 영향을 받을 것으로 예상했으나, 홀로셀룰로오스의 함량이 가장 적은 낙엽송이 가장 높은 수분흡수율을 보였다. 이 결과는 기질수지와 목분 입자와의 계면에서 낙엽송이 다른 수종에 비해 더 큰 공극을 형성하기 때문으로 사료된다.

한편 목분의 함량을 10 wt%로부터 50 wt%까지 증가 시킬수록, 모든 수종에서 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000시간 침지 후 수분흡수율은 크게 증가하는 경향을 보였다. 10 wt%와 20 wt% 목분 함량에서 모든 수종의 PP/WF 복합재의 수분흡수율은 각각의 침지시간 후에 0.3~1.0%의 범위로 작게 나타났지만, 30과 40 wt% 목분 함량에서는 복합재의 수분흡수율의 증가의 폭이 컸다. 이 결과는 목분의 주성분인 셀룰로오스가 수산기(-OH)를 가지고 있어서 친수성을 나타내기 때문이다. 목분의 함량이 증가할수록 물을

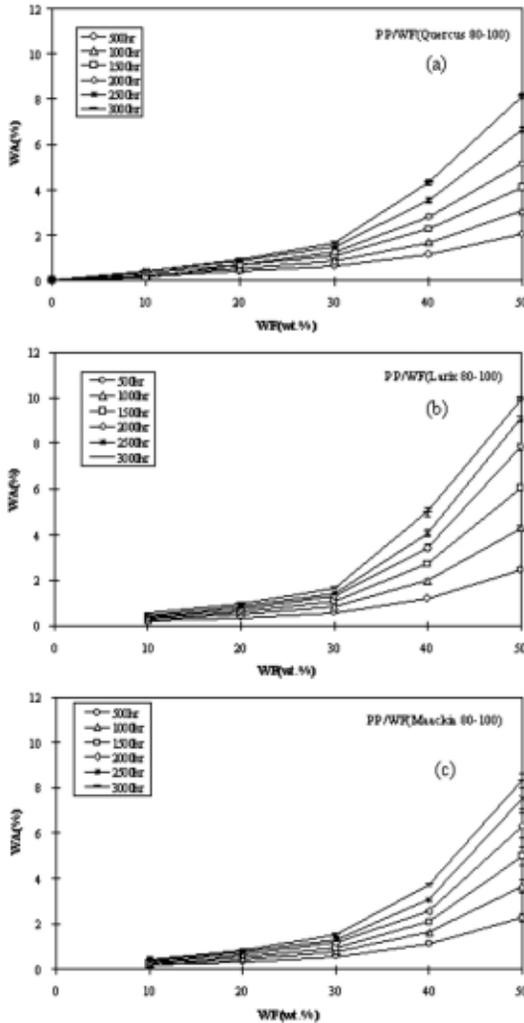


Fig. 1. Water absorption of PP/WF (80~100 mesh) composites.

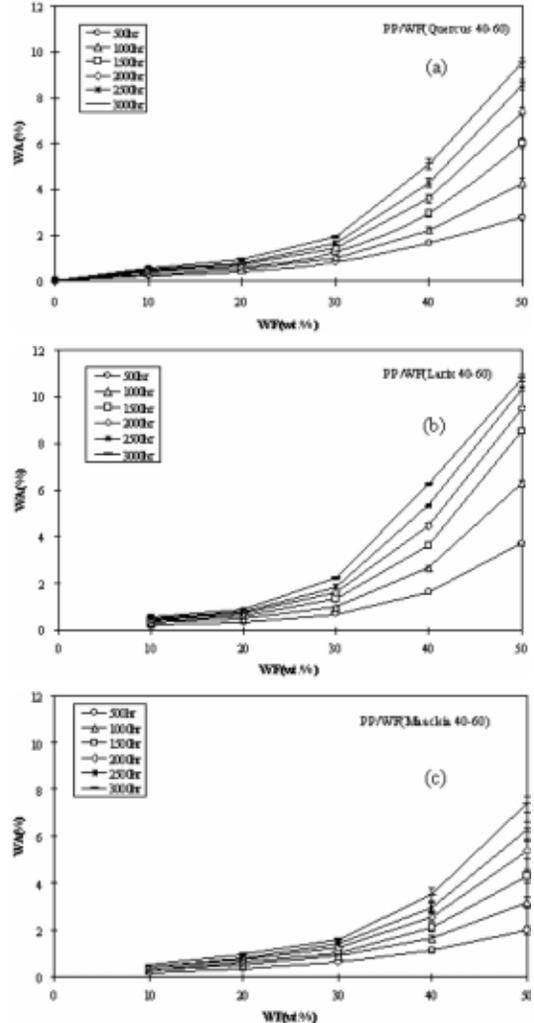


Fig. 2. Water absorption of PP/WF (40~60 mesh) composites.

흡수할 수 있는 셀룰로오스의 수산기가 많아지기 때문으로 생각된다. 또한 압출기 속에서 혼련과정 동안 목분과 상용수지의 계면의 수와 마이크로 크기의 공간이 많아서 더 많은 물을 흡수할 수 있기 때문으로 사료된다(Taividi와 Azad, 2009).

3.3. 목분 크기의 영향

Fig. 2(a)~(c)는 큰 목분입자(40~60 메시)의 상

수리나무, 낙엽송, 다릅나무 목분(10, 20, 30, 40 및 50 wt%) 침지시간의 변화(500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, 3,000시간) 따른 PP/WF 복합체의 수분흡수율을 나타낸다. Fig. 1(a)~(c)에서 작은 입자(80~100 메시)의 같은 수종들과 비교할 때, 목분의 크기가 클수록 만들어진 복합체의 수분흡수율이 높다. 예를 들어 50 wt%의 목분 함량에서, 상수리나무 PP/WF 복합체는 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000시간 후 수분흡수율은 2.8, 4.3, 6.0, 7.4, 8.6 및 9.5%였

다. 다릅나무 PP/WF 복합재는 같은 침지시간 후, 2.2, 3.6, 5.0, 6.3, 7.5 및 8.3%의 수분흡수율을 보였다. 그러나 같은 목분 함량이 첨가된 낙엽송 PP/WF 복합재는 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000 시간 후 수분흡수율은 2.5, 4.3, 6.1, 7.8, 9.1 및 10.0%였다. 이 결과는 물과 접촉하는 목분(40~60 메시)의 표면적이 작은 목분보다 복합재의 표면에서 더 크므로, 입자가 큰 목분의 경우에는 복합재 내부로 침투하는 물의 통로가 더 많기 때문일 수 있다. 또한 입자가 작은 목분은 혼련과정 동안 쉽게 뭉쳐져서 상용수지 속에서 목분의 분산이 나빠진다. 결과적으로 계면에서 마이크로 크기의 공간이 많이 생기기 때문이다(Lin *et al.*, 2002).

3.4. 상용화제의 영향

Fig. 3(a)~(c)는 PP/목분 복합재의 수분흡수율에 상용화제(1, 3 및 5 wt%)가 미치는 영향을 보여준다. 각각의 수종으로부터 만들어진 PP/WF 복합재에서 MAPP를 첨가했을 때, 첨가하지 않은 복합재에 비해서 낮은 수분흡수율을 보였다. 이는 상용화제를 첨가하지 않은 경우, 친수성인 목분과 소수성의 사용수지 사이의 비친화성 때문에 많은 마이크로 크기의 공간과 약한 계면접착력의 원인이다. 따라서 적절한 화학적 개질에 의해서 목분에 소수성을 부여할 필요가 있다. 상용화제의 첨가에 의해 친수성인 목분의 표면이 소수성으로 전환되어 물이 복합재의 표면으로부터 내부로 침투할 수 있는 경로를 차단하기 때문이라 생각된다(Yang *et al.*, 2006; Taividi와 Azad, 2009; Lee *et al.*, 2009). 상용화제의 함량을 1 wt%에서 5 wt%로 증가시킬수록 대체적으로 복합재의 수분흡수율이 감소하는 경향을 보였다.

3.5. 수분흡수도와 두께팽창

복합재의 두께팽창은 여러 인자에 의해서 영향을 받을 수 있다. 목분은 친수성이므로 섬유포화점에 도달할 때까지 팽창한다. 따라서 각각 목분 섬유는 팽창은 복합재 전체의 팽창에 영향을 준다. 목분의 함량이 증가할수록 두께팽창은 더 커진다. Fig. 4(a)~

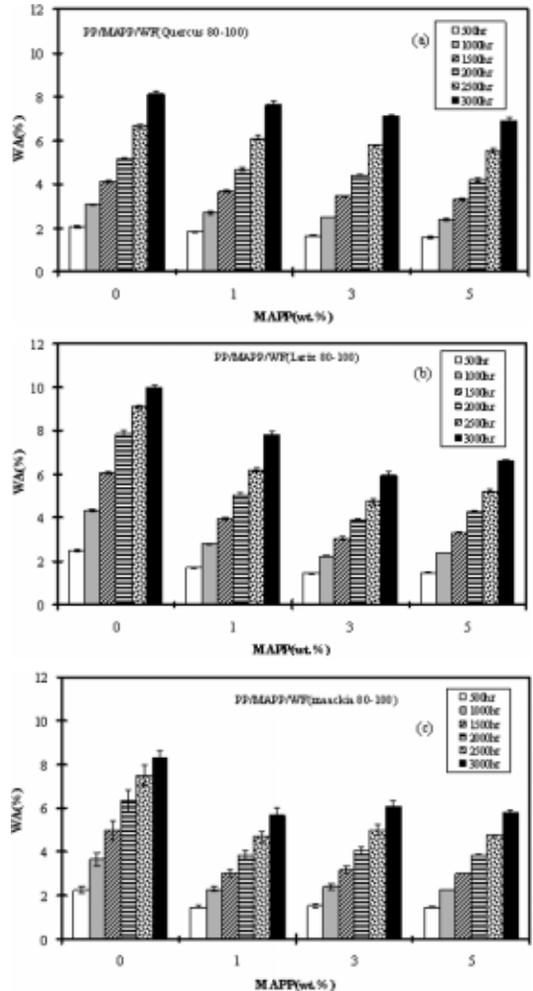


Fig. 3. Water absorption of PP/WF (40~60 mesh) /MAPP composites.

(c)는 복합재의 수분흡수율과 두께팽창과의 상관관계를 보여주는데, 오른쪽 방향과 위의 방향으로 갈수록 수분흡수율과 두께팽창이 증가한다. 물은 목분과 상용수지의 계면에서 마이크로 크기의 공간에 침투하여 계면에서 부분적인 탈착의 결과로써 복합재가 팽창하게 된다. 목분의 입자가 클수록, 초기의 부피가 크므로 복합재는 수분흡수율에 의해서 팽창하게 된다. 각각의 수종에서 복합재의 두께팽창은 수분흡수율이 높을수록 증가한다. 복합재 두께팽창과 수분흡수율은 직선회귀 식에 의해서 온전히 설명이 될 수

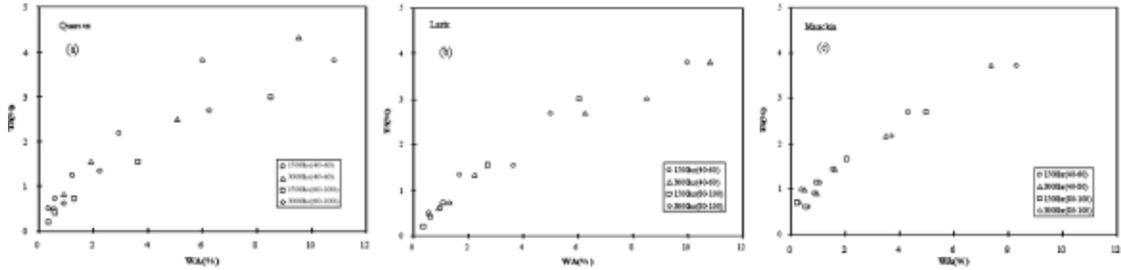


Fig. 4. Correlation between water absorption and thickness swelling of PP/WF (40~60 mesh) composites.

Table 2. Correlation between water absorption and thickness swelling of PP/WF composites

	Particle size (mesh)	Soaking time (h)	R ²	a	b
Quercus	40~60	1500	0.995	0.576	0.439
	80~100	3000	0.986	0.405	0.481
	40~60	1500	0.992	0.334	0.214
	80~100	3000	0.985	0.325	0.447
Larix	40~60	1500	0.992	0.334	0.214
	80~100	3000	0.994	0.481	0.139
	40~60	1500	0.985	0.325	0.447
	80~100	3000	0.955	0.352	0.522
Maackia	40~60	1500	0.980	0.524	0.474
	80~100	3000	0.991	0.413	0.699
	40~60	1500	0.968	0.437	0.591
	80~100	3000	0.991	0.357	0.796

있다(Table 2).

4. 결 론

목분의 함량을 10 wt%로부터 50 wt%까지 증가시키수록, 모든 수종에서 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 및 3,000시간 후 침지시간 후 수분흡수율이 크게 증가하는 경향을 보였다. 그러나 복합재의 수분흡수율은 목재의 화학조성분은 큰 영향을 보이지 않았다. 한편 목분의 크기가 클수록 만들어진 복합재의 수분흡수율은 크기가 작은 목분으로 만들어진 복합재보다 높았다. 각각의 수종으로 만들어진 PP/WF 복합재의 경우 MAPP를 첨가했을 때, 첨가하지 않은 복합재에 비해서 낮은 수분흡수율을 보였다. 상용화제의 함량을 1 wt%에서 5 wt%로 증가시키수록 대체적

으로 복합재의 수분흡수율은 감소하는 경향을 보였다. 각각의 수종에서 복합재의 두께팽창은 수분흡수율이 높을수록 증가한다. 복합재 두께팽창과 수분흡수율의 관계는 직선회귀 식에 의해서 온전히 설명이 될 수 있다.

참 고 문 헌

1. ASTM D1102-84. 2007. Standard Test Method for Ash in Wood. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
2. ASTM D1104-56. 1978. Method of Test for Holocellulose in Wood. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

3. ASTM D1106-96. 2007. Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
4. ASTM D1107-96. 2007. Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
5. Kajaks, K. and S. Reihmane. 1999. Thermal and water sorption properties of polyethylene and linen yarn production waste composites. In: 2nd international wood and natural fibre composites symposium, Universitat Gesamthochschule Kassel, Institut fur Werkstoff-technik, Kassel, Germany.
6. Klyosov, A. A. 2007. Wood-Plastic Composites. A John Wiley & Sons, INC., U.S.A.
7. Lee, S. Y., I. A. Kang, B. S. Park, G. H. Doh, and B. D. Park. 2009. Effect of filler and coupling agent on the fundamental properties of bamboo fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastic and Composites* 28(21): 2589~2604.
8. Lin, Q, X. Zhou, and G. Dai. 2002. Effect of hydrothermal environment on moisture absorption and mechanical properties of wood flour-filled polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science* 85: 2824~2832.
9. Rowell, R. M, S. E. Lange, and R. E. Jacobson. 2002. Effects of moisture on aspen-fiber/polypropylene composites. In: progress in woodfibre-plastic composites, conference proceedings, Canadian Natural Composites Council, University of Toronto, Toronto, Canada.
10. Schlechter, M. 2005. Plastic Wood: Technology, Markets. Business Communications Company, INC. U.S.A.
11. Tajvidi, M. and F. Azad. 2009. Effect of particle size, fiber content and compatibilizer on the long-term water absorption and thickness swelling behavior of reed flour/polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastic and Composites* 28: 2341~2351.
12. Tappi T 203 cm-99. (2009). Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. TAPPI Standard Department. U.S.A.
13. Wang, W. and J. J. Morrell. 2004. Water sorption characteristics of two wood-plastic composites. *Forest Products Journal* 54(12): 209~212.
14. Yang, H. S., H. J. Kim, H. J. Park, B. J. Lee, and T. S. Hwang. 2006. Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler-polyolefin bio-composites. *Composite Structures* 72: 429~437.
15. 강인애, 이선영, 도금현, 전상진. 2009. 목분 첨가 폴리프로필렌 복합재의 기계적 강도: 목재수종, 목분 입자크기 및 상용화제의 영향. *목재공학* 37(6): 505~516.