

제지 슬러지-폴리프로필렌수지 복합재의 기계적 성질^{*1}

이 필 우^{*2} · 손 정 일^{*2}

Mechanical Properties of Paper Sludge-Polypropylene Composites^{*1}

Phil-Woo Lee^{*2} · Jung-Il Son^{*2}

ABSTRACT

The objective of this research is to develop paper sludge reinforced thermoplastic composites which incorporate the advantages of each component materials. The effects of paper sludge content(0, 10, 20, 30, 40%), mesh size(20~40, 60~80, less than 100mesh), and coupling agent(Epolene E-43 and Epolene G-3003) on the mechanical properties of paper sludge-polypropylene composites were investigated. Composite density increased with an increase in the paper sludge content. When paper sludge is incorporated into a polypropylene matrix, the flexural properties of the composite increase significantly with an increase in the paper sludge mixing ratio. Especially, flexural modulus was improved with increasing paper sludge content. The flexural strength of composites was improved, but flexural modulus reduced somewhat with decreasing paper sludge particle size. The flexural properties of paper sludge-polypropylene composites were improved by using coupling agents to enhance the bonding between reinforcing filler and matrix. Use of the epolene E-43 and G-3003 resulted in considerable improvement in the flexural strength over control specimens. The flexural strength of the G-3003 composite system is higher than that of the E-43 system. Generally, izod notched impact strength of paper sludge-polypropylene composite decreased slightly, whereas izod unnotched impact strength decreased significantly with increasing paper sludge contents. There was no effects of paper sludge particle size on impact strength of paper sludge-polypropylene composites. And izod unnotched impact strength of epolene E-43 composite system sharply decreased but that of G-3003 composite system was no tendency with increasing additive content.

Keywords : paper sludge, coupling agent, flexural properties, reinforcing filler, matrix, izod notched impact strength, izod unnotched impact strength

*1 접수 1999년 4월 1일, Received April, 1, 1999

*2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

- 요약 -

본 연구는 자원환경적인 측면에서 산업폐기물이자 환경오염원인 제지 슬러지를 이용함에 있어 용융형 목질-플라스틱 복합재의 강화충전제로 적용하여 그 사용가능성을 알아보고 또한 복합재의 물성에 대한 기초적인 자료를 제시하는데 그 목적이 있다. 그 결과 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 밀도는 증가하였으며 제지 슬러지의 입자 크기와 결합제 종류 및 함량은 복합재의 밀도에 크게 영향을 미치지 않았다. 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 휨강도적 성질은 향상되었으며, 제지 슬러지의 입자 크기가 작을수록 복합재의 휨강도는 증가하였으나 휨탄성계수는 증가하였다. 또한 복합재의 휨강도적 성질은 결합제의 종류에 관계없이 그 함량이 증가할수록 향상됨을 알 수 있었으며, 결합제의 분자량이 더 큰 Epolene G-3003의 경우 그 효과가 더 큼을 알 수 있었다. 대체로 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 충격강도는 다소 감소하는 경향을 볼 수 있지만, 전체적으로 notched impact strength는 크게 감소하지는 않았다. unnotched impact strength의 경우 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 그 감소폭이 컸다. 제지 슬러지의 입자크기가 복합재의 충격강도에 미치는 영향을 보면 notched impact strength의 경우 제지 슬러지의 입자 크기에 따라 충격강도에 미치는 영향은 거의 없었으며, unnotched impact strength의 경우 입자 크기가 가장 작은 100mesh 이하일 때 가장 우수하였고 그 다음으로 20~40mesh, 60~80mesh 순이었다. 복합재의 notched impact strength는 결합제의 종류와 함량에 따라 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있었으나 unnotched impact strength는 Epolene E-43의 경우 첨가량이 증가할수록 충격강도가 감소하였고, Epolene G-3003의 경우는 첨가량이 증가할수록 충격강도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다.

1. 서 론

최근 생활용품의 생산기술 고도화로 원료가 다변화되고, 제조공법이 다양화됨에 따라 폐기물의 질에 있어서도 자연계의 분해 생물의 정화 능력이 미치지 못하는 난분해성 폐기물의 발생이 많아지고 있다. 특히 1983년 이후 석유화학산업이 호황을 이루면서 국내 석유화학제품의 수요가 크게 신장되었다. 플라스틱 제품 수요 증가에 따라 폐플라스틱의 발생량도 크게 늘어나 현재 약 170만톤이 발생한 것으로 추정된다. 이에 따라 1980년대 이후 각종 폐플라스틱에 의한 환경피해에 대해 많은 관심을 가지게 되었으며, 정부도 폐플라스틱의 적정 관리와 처리 문제를 해결하기 위한 대책을 수립하기에 이르렀다.

품목별 폐플라스틱 발생량을 살펴보면 폴리프로필렌(PP)의 폐플라스틱 발생이 1996년 현재 약 63만톤으로 가장 많은 발생량을 보이고 있으며, 그 다음 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)이 약 45만톤에 이르고 있다. 향후 폴리프로필렌(PP)과 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)의 발생량이 각각 50만톤에서 80만톤을 넘어 가장 많은 양을 나타낼 것으로 보이는데 이는 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)과 폴리프로필렌(PP) 제품의 수명이 매우 짧고 10년 이상 사용되는 제품이 거의 없어 소비량의 증가에 따라 폐플라스틱의 발생이 빨리 나타

나기 때문이다.

그밖에 폴리염화비닐(PVC)이 약 35만톤, 폴리스티렌(PS)이 약 23만톤의 발생량을 나타내고 있어 다른 폐플라스틱보다 낮은 증가 추세를 보일 것으로 예상되는데 이는 폴리염화비닐(PVC)이나 폴리스티렌(PS) 제품이 소비구조가 내구연한이 긴 건축재나 전자제품 등에 많이 사용되기 때문이라 할 수 있다.

이와같은 현 시점에 발맞추어 근래에 폐자원 재활용의 일환으로 각종 폐자원을 활용한 복합재의 개발이 이루어지고 있는데 그 중 가장 환경친화적인 목질원료와 환경과파괴적인 각종 폐기물을 결합한 목질-비목질 복합재를 개발하는데 그 초점을 맞추고 있다. 이는 이들 복합재가 환경 문제를 해소하는데 일조를 할 뿐만 아니라 목질만으로는 기대하기 어려운 다양한 물성과 각종 성능을 지닌 제품의 생산이 가능하다는데 그 의미를 두고 있다.

목질-비목질 복합재는 가공 방법과 재료에 따라 여러가지 제조 방법이 있으며 이들 제조 방법으로 제조할 수 있는 복합재 또한 여러가지가 있다. 그 중 목질·플라스틱 복합재의 개발은 미국 입산물연구소(FPL)를 중심으로 1980년대 후반부터 지금까지 이 분야에 관한 연구를 계속 진행하여 오고 있는데 그 기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 부직포식 웹법(nonwoven web process)이고 또 다른 하나는 용융형 혼련법(melt blending process)이다. 이

두 가지 공정 중 특히 용융형 혼련법으로 제조된 melt-blended composite에 관한 연구가 가장 활발하게 진행되고 있으며 기존 플라스틱 산업에서 이용되고 있는 가공 기술을 그대로 접목하면서 강화 충전제(reinforcing filler)의 대체 가능성을 규명하기 위해 많은 노력들을 기울이고 있다. 특히 강화 충전제(reinforcing filler)로 목섬유나 목분을 사용하여 기존의 플라스틱에 첨가되는 첨가제인 탄산칼슘(CaCO₃), 활석(Talc), 백토(Clay) 등의 대체가능성을 보인 바 있으며(Myers *et al.*, 1991; English *et al.*, 1991; Jacobson *et al.*, 1995; Park & Balatincez, 1996)^{1,2,3,4,5,6)} 이러한 목질원료가 합성수지의 강화 충전제로 사용되므로써 환경적인 측면에서 볼 때도 상당한 가능성을 보여 주고 있다. 그밖에 강화충전제로 목질원료를 사용하므로써 얻어지는 장점으로 최종제품의 밀도를 낮출 수 있고 기계의 마모성을 줄일 수 있으며 가격이 저렴하다는 것을 들고 있다. 반면에 단점으로는 극성을 지닌 목질원료와 비극성을 지닌 열가소성 고분자간의 비상용화성(incompatibility) 및 수분에 민감하고 내부후성이 약하다는 것을 들었다(Sanadi *et al.*, 1994)⁷⁾.

또한 강화 충전제의 형상이 섬유상이나 분말상이냐에 따라 그 물성의 차이를 보이기 때문에 단순히 가격 저하를 위한 첨가제 역할 뿐만 아니라 복합재의 물성을 향상시킬 수 있는 새로운 형태의 강화 충전제를 개발할 필요성을 가지고 있다.

한편, 현재 산업체에서 폐기되는 각종 폐기물 중 제지 공장에서 발생하는 제지 슬러지는 통상적으로 전건으로 환산해서 제지 생산량의 약 5%를 차지한다고 한다. 따라서 연간 전체 제지 생산량은 임업통계연보(1998)에 의하면 1997년 현재 8,364,500M/T에 달하며 이 값을 토대로 전건 제지 슬러지 발생량을 환산하면 418,225M/T이 계산된다. 배출되는 제지 슬러지는 다량의 수분이 포함된 상태이며 여기서 함수율을 약 70% 정도로 적용하면 실제 배출되는 제지 슬러지의 유량은 1,394,083M/T이 된다. 이와 같이 제지 슬러지의 건조전 수분함량은 60~80%에 달하고 있어 현재로서는 대부분 재활용되지 못하고 오히려 별도의 비용 지급과 함께 단순히 매립 처리되고 있는 실정이며 따라서 이러한 고수분의 취약한 제지 슬러지를 효과적으로 활용하기 위해서는 제지 슬러지 특성에 맞는 새로운 대체원료개발이 절실한 과제가 되고 있다.

따라서 본 연구는 자원 환경적인 측면에서 산업폐

기물이자 환경오염원인 제지 슬러지를 이용한 복합재를 개발하여 새로운 개념의 활용방안을 모색하고 이를 통해 국내 제지업계에는 폐기물 처리문제를 해소시키며 아울러 복합재 제조산업에 있어서는 보다 새로운 원료의 전환점을 제시하여 주는 것이 주목적이다. 또한 용융형 목질-플라스틱 복합재를 연구함에 있어 강화 충전제로 제지 슬러지를 적용하여 그 사용 가능성을 규명하고 마지막으로 이 복합재의 물성에 대한 성질과 기초적인 자료를 제시하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

2.1.1 제지 슬러지

본 연구에서 복합재의 강화 충전제로 제지 슬러지를 사용하였으며, 이 제지 슬러지는 국내 모 제지회사의 신문용지 생산공정에서 발생한 것을 분양받아 사용하였다. 제지 슬러지는 제지 공장에서 탈수기를 통과한 것을 분양받아 사용하였고 수일동안 천연 건조하여 파쇄기로 파쇄한 후 입자 크기를 일정하게 선별하고 완전 건조하여 사용하였다.

2.1.2 폴리프로필렌

폴리프로필렌(PP, Homopolymer)은 국내 기업에서 분양받은 것으로 비중은 0.90~0.92 정도이며 용융지수(melt flow index)는 12.5g/10min인 것을 사용하였다.

2.1.3 결합제(coupling agent)

본 연구에서 사용한 결합제는 maleic anhydride polypropylene으로서 분자량에 따라 2가지 종류를 사용하였다.

2.2 복합재 제조 및 방법

2.2.1 복합재 제조 공정

용융형 제지 슬러지-열가소성 고분자 복합재의 제조 공정은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

먼저 복합재의 강화 충전제로 첨가된 제지 슬러지를 103℃에서 약 6시간 동안 건조하여 함수율을 2% 미만으로 조절하였다. 함수율을 조절한 다음 제지 슬러지, 폴리프로필렌수지, 결합제를 함께 넣고

Table 1. Typical properties of two maleated polypropylene

Property	Epolene E-43	Epolene G-3003
* Acid number	45	8
** Mn	3,900	41,500
*** Mw	9,100	103,500
Softening Point(°C)	157	157
Viscosity, cP(mPa · s)	400(190 °C)	70,000(190 °C)

* Acid number is the number of miligrams of KOH to neutralize one gram of Epolene sample

** Number average molecular weight

*** Weight average molecular weight

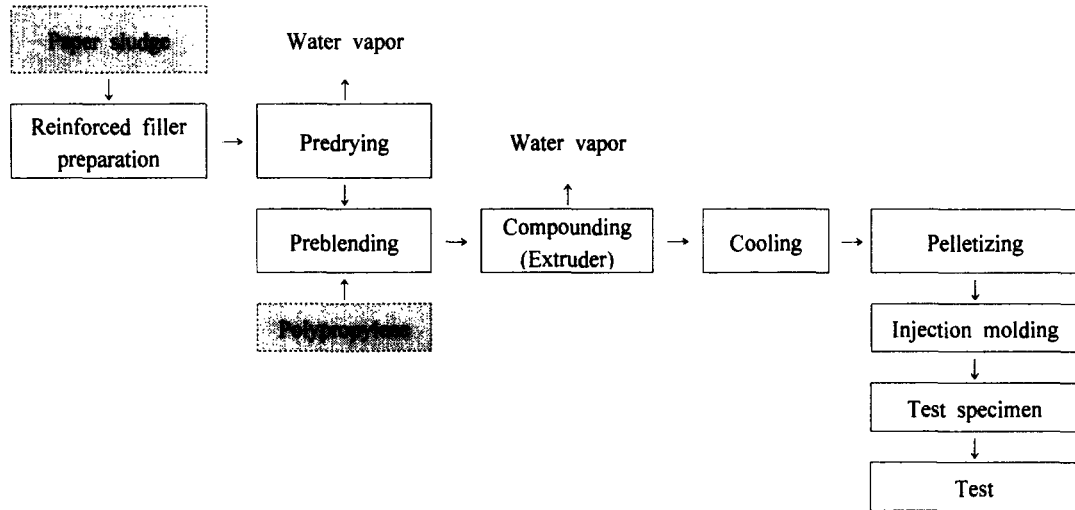


Fig. 1. Manufacturing process of paper sludge-polypropylene composites.

rheomixer로 먼저 혼합한 후(200°C, 20rpm, 15분), 혼합한 물질을 압출기의 호퍼내로 공급을 하게 되며 이때 배럴과 다이(die)의 온도를 일정하게 조절하였다. 다이의 노즐로부터 빠져 나오는 긴 막대상의 물질(strand)을 냉각장치에 통과시켜 냉각한 다음 pelletizer에 의해 펠릿형태로 절단하였다. 이러한 펠릿형태의 입자를 다시 오븐에서 2~3시간 건조하였다. 건조된 재료는 사출기에서 시험용 시편을 사출(사출온도 200°C, injection pressure 1,200psi, device pressure 1,500psi)한 다음 온도 20°C, 상대 습도 65% 조건에서 조습처리하였다.

본 연구에서 사용한 압출기는 단축 압출기(single screw extruder)로 실험실용으로 그 용량이 적으나 디자인이 단순하며 견고성 및 신뢰성이 높고 가격에 비해 성능이 양호한 장점을 지니고 있다.

2.2.2 제조조건 실험

2.2.2.1 혼합비율

제조하고자 하는 복합재의 혼합비율은 제지 슬러지 : 폴리프로필렌 수지 = 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60으로 실험하였다.

제지 슬러지-폴리프로필렌수지 복합재의 기계적 성질

2.2.2.2 입자크기

복합재의 강화 충전제로 제지 슬러지를 사용하며 그 입자크기는 다음과 같이 3가지 유형으로 혼합한다. 20~40mesh, 60~80mesh, 100mesh 이하

2.2.2.3 결합재의 종류와 첨가량

사용한 결합재는 미국 Eastman사에서 분양받은 Epolene E-43과 G-3003으로 그 혼합비율은 제지 슬러지의 전건 중량에 대하여 0%, 1%, 3%, 5%를 첨가하였다.

2.2.3 복합재의 기계적 성질 평가

복합재의 휨강도적 성질은 ASTM D 790에 의거하여 측정하였고, 충격강도는 ASTM D 256에 의거하여 측정하였다.

2.2.4 자료분석

제조한 복합재의 결과 분석은 SAS 통계 분석 프로그램을 이용하여 Tukey's method를 사용하였다. 처리한 평균들의 차이는 5% 신뢰수준으로 검정하여

처리수준에 대한 영향을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 밀도

제지 슬러지-폴리프로필렌수지 복합재의 밀도는 Table 3과 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 예상대로 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 밀도가 증가함을 알 수 있었다. 이는 폴리프로필렌 수지의 밀도(약 0.9g/cm³)보다 제지 슬러지의 밀도(약 1.6g/cm³)가 더 높기 때문이라 생각한다.

또한 복합재의 밀도가 제지 슬러지 혼합비율에 따라 0.87~1.08g/cm³로 나타난 바 실제 예상밀도보다 다소 낮은 값을 나타내었는데 이는 압출(extrusion) 과정 중 미세섬유가 분해되었거나 잔류 수분의 증발로 인한 공극의 발생 때문이라 생각된다.

그밖에 제지 슬러지의 입자크기와 결합재 종류 및 함량은 복합재의 밀도에 크게 영향을 미치지 않는다고

Table 2. Experimental design for manufacture of paper sludge-polypropylene composites by process variables

Process Variables	Serial No.	Manufacturing Conditions							
		Resin Type	Mixing Ratio (PS:PP)	Particle Size (mesh)	Extrusion Temp.(°C)	Premix			
						PP	Temp.(°C)	Time (min)	Speed (rpm)
Mixing Ratio (PS:PP)	1	0:100	-	-	-	-	-	-	
	2	10:90	-	20~40	230	200	15	20	
	3	20:80	-	20~40	230	200	15	20	
	4	30:70	-	20~40	230	200	15	20	
	5	40:60	-	20~40	230	200	15	20	
Particle Size (mesh)	1	20~40	20:80	-	230	200	15	20	
	2	60~80	20:80	-	230	200	15	20	
	3	-100	20:80	-	230	200	15	20	
Coupling Agent (%)	Epolene E-43	1	1	20:80	20~40	230	200	15	20
		2	3	20:80	20~40	230	200	15	20
		3	5	20:80	20~40	230	200	15	20
	Epolene G-3003	1	1	20:80	20~40	230	200	15	20
		2	3	20:80	20~40	230	200	15	20
		3	5	20:80	20~40	230	200	15	20

PP : Polypropylene, PS : Paper sludge

Table 3. Density of paper sludge-polypropylene composites

Process Variables		Density(g/cm ³)	
Mixing Ratio (PS:PP)	0:100	0.87 ^a ± 0.01 ^b	
	10:90	0.90 ± 0.01	
	20:80	0.94 ± 0.01	
	30:70	1.00 ± 0.01	
	40:60	1.08 ± 0.02	
Particle Size (mesh)	20~40	0.94 ± 0.01	
	60~80	0.99 ± 0.03	
	-100	0.96 ± 0.01	
Coupling Agent (%)	Epolene E-43	1	0.95 ± 0.01
		3	0.96 ± 0.04
		5	0.94 ± 0.02
	Epolene G-3003	1	0.94 ± 0.02
		3	0.96 ± 0.01
		5	0.94 ± 0.01

^a Each value is an average of 5 replications
^b Each value is a standard deviation of 5 replications
 PP : Polypropylene, PS : Paper sludge.

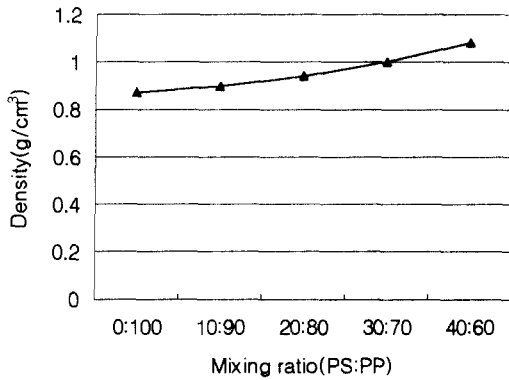


Fig. 2. Density of paper sludge-polypropylene composites.

3.2 휨강도적 성질

3.2.1 혼합비율

제지 슬러지의 혼합비율에 따른 복합재의 휨강도적 성질은 Table 4와 Fig. 3, 4에 나타낸 바와 같다.

Fig. 3. Flexural strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of mixing ratio.

Fig. 4. Flexural modulus of paper sludge-polypropylene composites as a function of mixing ratio.

표와 그림에서 보는 바와 같이 제지 슬러지를 10%에서 40%로 혼합할 경우 휨강도는 474.2 ~ 545.5 kgf/cm²의 범위를 보였으며 휨탄성계수는 13,293 ~ 25,294 kgf/cm²의 범위를 보이고 있다.

제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 휨강도적 성질 또한 향상됨을 알 수 있었다. 이 결과는 목분을 폴리프로필렌 수지에 첨가하여 복합재를 제조한 Myers 등⁴⁵⁾이 발표한 자료와 비교해 볼 때 유사한 경향을 보였으며 그 수치 또한 비슷함을 알

Table 4. Flexural properties of paper sludge-polypropylene composites

Process Variables		Flexural strength (kgf/cm ²)	Flexural Modulus (kgf/cm ²)		
Mixing Ratio (PS:PP)	0:100	478.8 ^a ± 11.17 ^b C*	11180 ± 214.3 E		
	10:90	474.2 ± 16.47 C	13293 ± 811.7 D		
	20:80	512.5 ± 18.08 B	18685 ± 477.5 C		
	30:70	542.2 ± 7.02 A	22312 ± 1372 B		
	40:60	545.5 ± 6.91 A	25294 ± 5481 A		
Particle Size (mesh)	20 ~ 40	512.5 ± 18.08 B	18685 ± 477.5 A		
	60 ~ 80	520.2 ± 9.71 AB	17982 ± 555.4 B		
	-100	527.0 ± 11.65 A	17474 ± 208.9 C		
Coupling Agent (%)	0	512.5 ± 18.08 C	18685 ± 477.5 AB		
	Epolene	1	528.2 ± 5.54 B	18387 ± 375.5 B	
		E-43	3	542.1 ± 7.51 A	18886 ± 177.0 A
		5	527.1 ± 8.24 B	18922 ± 387.4 A	
	Epolene	0	512.5 ± 18.08 C	18685 ± 477.5 B	
		1	540.4 ± 7.07 B	19960 ± 751.8 A	
		G-3003	3	568.6 ± 6.24 A	20333 ± 219.1 A
			5	579.1 ± 10.62 A	20389 ± 286.0 A

^a Each value is an average of 8 replications

^b Each value is a standard deviation of 8 replications

* mean with the same letter is not significantly different at the 5 percent significant level from Tukey's test
PP : Polypropylene, PS : Paper sludge.

수 있었다. 반면에 Park과 Balatinecz⁶⁾의 자료와 비교해 보면 미세섬유가 휨강도적 성질에는 다소 떨어진다的事实을 알 수 있었다. 그러나 제지 슬러지의 혼합비율을 높임으로써 복합재의 휨강도적 성질이 향상됨은 제지 슬러지의 구성성분 중 미세섬유의 역할과 더불어 무기질 성분들이 복합재의 공극을 메워주는 충전제 역할을 하였으리라 추측된다.

3.2.2 입자크기

제지 슬러지의 입자크기에 따른 복합재의 휨강도적 성질은 Table 4와 Fig. 5, 6에 나타난 바와 같이 입자크기에 따라 각각 휨강도는 512.5 ~ 527.0kgf/cm², 휨탄성계수는 17,474 ~ 18,685kgf/cm²의 범위를 보여주고 있다.

먼저 휨강도의 경우 입자크기가 작을수록 복합재의 휨강도가 증가함을 알 수 있었다. 반면에 휨탄성

계수는 입자크기가 클수록 복합재의 휨탄성계수가 증가함을 알 수 있었다. 그 이유는 입자크기가 클 경우(20~40mesh) 무기질 성분보다 미세섬유의 함량이 상대적으로 많이 포함되어 있기 때문에 미세섬유가 복합재의 휨탄성계수에 보다 크게 작용하였으리라 생각된다. 반면에 입자크기가 작을 경우(100mesh 이하) 무기질 성분이 입자가 작기 때문에 상대적으로 그 함량이 많아짐을 알 수 있다. 결국 제지 슬러지는 입자크기를 조절함으로써 미세섬유의 함량과 무기질 섬유의 함량을 자유자재로 모두 적용할 수 있어 우수한 재료로 사용 가능하리라 기대된다.

3.2.3 결합제(coupling agent)의 종류와 함량

결합제의 종류와 함량이 제지 슬러지-폴리프로필렌수지 복합재의 휨강도적 성질에 미치는 영향을 Table 4와 Fig. 7, 8에 나타내었다.

Fig. 5. Flexural strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of particle size.

Fig. 6. Flexural modulus of paper sludge-polypropylene composites as a function of particle size.

Epolene E-43을 첨가한 경우 복합재의 휨강도는 $512.5 \sim 542.1 \text{ kgf/cm}^2$ 를 보였으며 휨탄성계수는 $18,685 \sim 20,389 \text{ kgf/cm}^2$ 를 보였다. 위 수치를 비교해 볼 때 결합제의 종류에 관계없이 그 함량이 증가할수록 복합재의 휨강도적 성질은 향상됨을 알 수 있으며 결합제의 분자량이 더 큰 Epolene G-3003의 경우 그 효과가 더 큼을 알 수 있었다. 결국 결합제의 역할은 소수성인 폴리프로필렌 수지와 친수성인 미세섬유간의 상호이중성을 보완해 주는 작용을 하는데 이는 미세섬유의 친수성기인 -OH기를 소수성을 띠

Fig. 7. Flexural strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of coupling agent.

Fig. 8. Flexural modulus of paper sludge-polypropylene composites as a function of coupling agent.

는 ester 결합을 유도하여 그 상용성(compatibility)을 향상시키는 역할을 하게 된다. 따라서 휨강도적 성질에 크게 영향을 하게 되고 또한 결합제의 분자량이 클수록 그 효과는 더 증가한다고 볼 수 있다.

제지 슬러지를 열가소성 수지와 혼합할 경우 결합제의 효과는 제지 슬러지 성분 중 미세섬유의 함량이 많을 때 그 효과가 크게 작용되리라 생각된다.

3.3 충격강도

3.3.1 혼합비율

제지 슬러지의 혼합비율에 따른 복합재의 충격강

Table 5. Impact strength of paper sludge-polypropylene composites

Process Variables		Notched impact strength (kgf · cm/cm ²)	Unnotched impact strength (kgf · cm/cm ²)	
Mixing Ratio (PS:PP)	0:100	5.61 ^a ± 0.23 ^b A	41.68 ± 2.75 A	
	10:90	4.93 ± 0.46 B	19.50 ± 3.49 B	
	20:80	5.17 ± 0.48 AB	16.75 ± 0.55 BC	
	30:70	5.07 ± 0.28 AB	12.75 ± 1.68 CD	
	40:60	4.88 ± 0.21 B	10.84 ± 1.13 D	
Particle Size (mesh)	20~40	5.17 ± 0.48 A	16.75 ± 0.55 A	
	60~80	5.57 ± 0.55 A	13.59 ± 2.69 B	
	-100	5.52 ± 0.31 A	19.42 ± 1.47 A	
Coupling Agent (%)	0	5.17 ± 0.48 A	16.75 ± 0.55 A	
	Epolene E-43	1	4.88 ± 0.05 A	17.45 ± 1.60 A
		3	5.00 ± 0.43 A	16.75 ± 0.48 A
		5	4.98 ± 0.10 A	14.24 ± 1.82 B
	Epolene G-3003	0	5.17 ± 0.48 A	16.75 ± 0.55 B
		1	5.12 ± 0.42 A	16.37 ± 0.83 B
		3	4.98 ± 0.31 A	13.81 ± 0.98 C
5		5.32 ± 0.21 A	19.26 ± 1.64 A	

^a Each value is an average of 5 replications

^b Each value is a standard deviation of 5 replications

* mean with the same letter is not significantly different at the 5 percent significant level from Tukey's test, PP : Polypropylene, PS : Paper sludge.

Fig. 9. Notched impact strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of mixing ratio.

Fig. 10. Unnotched impact strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of mixing ratio.

도는 Table 5와 Fig. 9, 10에 나타낸 바와 같이 제지 슬러지를 10%에서 40%까지 혼합하였을 때 복합재의 notched impact strength는 $4.93 \sim 5.17 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 의 범위를 보였고, unnotched impact strength는 $10.84 \sim 19.50 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 의 범위를 보이고 있다.

제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 충격강도는 다소 감소하는 경향을 볼 수 있지만 목분을 혼합하였을 때의 충격강도(Myers 등 ; 1991)⁴⁵⁾ 보다는 그 감소율이 낮음을 알 수 있었다.

따라서 제지 슬러지를 혼합함으로써 복합재의 notched impact strength를 크게 감소시키지는 않는다고 볼 수 있다. unnotched impact strength의 경우 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 그 감소 폭이 조금 더 큰데 그 이유는 notched impact strength에 비해 충격시 발생하는 할렬의 형성 초기 과정 뿐만 아니라 진행과정까지 충격강도에 크게 영향을 미치기 때문이라 생각된다. 그리고, 제지 슬러지의 미세섬유의 함량이 높아짐으로 인해 복합재의 강도와 강성(stiffness)이 증가하여 상대적으로 충격강도는 감소할 수 있다고 본다.

3.3.2 입자크기

제지 슬러지의 입자크기에 따른 복합재의 충격강도는 Table 5와 Fig. 11, 12에 나타낸 바와 같다. 입자크기에 따라 각각 notched impact strength는 $5.17 \sim 5.57 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$, unnotched impact strength는 $13.59 \sim 19.42 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 의 범위를 나타내고 있다.

Fig. 11. Notched impact strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of particle size.

먼저 notched impact strength의 경우 제지 슬러지의 입자크기에 따라 충격강도에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있었다. 95% 신뢰수준 내에서 처리 평균간 유의성이 없음을 통계적으로 분석하였다. 또한, unnotched impact strength의 경우 입자크기가 가장 작은 -100mesh일 때 충격강도가 가장 우수하였고 그 다음으로 20~40mesh, 60~80mesh 순이었다.

대체로 제지 슬러지의 입자크기에 따른 복합재의 충격강도는 크게 영향을 미친다고는 볼 수 없으나 unnotched impact strength에는 구성성분에 따라 약간의 영향을 미친다고 볼 수 있겠다.

3.3.3 결합제(coupling agen)의 종류와 함량

결합제의 종류와 함량이 제지 슬러지-폴리프로필렌 수지 복합재의 충격강도에 미치는 영향을 Table 5와 Fig. 13, 14에 나타내었다.

Epolene E-43을 혼합한 경우 복합재의 notched impact strength는 $4.88 \sim 5.00 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 를 보였으며 unnotched impact strength는)의 종류와 함량 결합제의 종류와 함량 $14.24 \sim 17.45 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 의 범위를 보여 주고 있다. 또한, Epolene G-3003을 혼합하였을 경우 복합재의 notched impact strength는 $4.88 \sim 5.00 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 를 보였으며 unnotched impact strength는 $13.81 \sim 19.26 \text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 의 범위를 보였다.

복합재의 notched impact strength는 결합제의 종류와 함량에 따라 미치는 영향이 통계적으로 유의성

Fig. 12. Unnotched impact strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of particle size.

Fig. 13. Notched impact strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of coupling agent.

이 없음을 알 수 있었다. 반면에 unnotched impact strength는 Epolene E-43의 경우 첨가량이 증가할수록 충격강도가 감소하였고, Epolene G-3003의 경우는 첨가량이 증가할수록 충격강도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 결합제에 의한 미세섬유의 brittleness의 증가로 해석할 수 있거나 압출온도가 높아짐에 따라 미세섬유의 열분해가 일어났을 경우를 생각해 볼 수 있다.

4. 결 론

제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 밀도는 증가하였으며 제지 슬러지의 입자 크기와 결합제 종류 및 함량은 복합재의 밀도에 크게 영향을 미치지 않았다. 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 휨강도적 성질은 향상되었으며 제지 슬러지의 입자 크기가 작을수록 복합재의 휨강도는 증가하였으나 휨탄성계수는 증가하였다. 또한 복합재의 휨강도적 성질은 결합제의 종류에 관계없이 그 함량이 증가할수록 향상됨을 알 수 있었으며 결합제의 분자량이 더 큰 Epolene G-3003의 경우 그 효과가 더 큼을 알 수 있었다. 대체로 제지 슬러지의 혼합비율이 증가할수록 복합재의 충격강도는 다소 감소하는 경향을 볼 수 있지만 전체적으로 notched impact strength는 크게 감소하지는 않았다. unnotched impact strength의 경우 제지 슬러지의 혼합비율이

Fig. 14. Unnotched impact strength of paper sludge-polypropylene composites as a function of coupling agent.

증가할수록 그 감소폭이 컸다. 제지 슬러지의 입자 크기가 복합재의 충격강도에 미치는 영향을 보면 notched impact strength의 경우 제지 슬러지의 입자 크기에 따라 충격강도에 미치는 영향은 거의 없었으며 unnotched impact strength의 경우 입자 크기가 가장 작은 100mesh 이하일 때 가장 우수하였고 그 다음으로 20~40mesh, 60~80mesh 순이었다. 복합재의 notched impact strength는 결합제의 종류와 함량에 따라 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있었으나 unnotched impact strength는 Epolene E-43의 경우 첨가량이 증가할수록 충격강도가 감소하였고, Epolene G-3003의 경우는 첨가량이 증가할수록 충격강도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다.

참 고 문 헌

1. English, E., C. M. Clemons, N. Stark and J. P. Schneider. 1996. Waste-wood-derived fillers for plastics. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-91. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 15p.
2. Jacobson, R.E., D.F. Caulfield, R.M. Rowell and A.R. Sanadi. 1995. Recent developments in annual growth lignocellulosics as reinforcing fillers in thermoplastics. In: Proceedings of 2d

- biomass conference of the Americas: Energy, environment, agriculture, and industry; 1995 August 21-24; Portland, OR. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory: 1171-1180.
3. Jacobson, R.E., R.M. Rowell, D.F. Caulfield and A.R. Sanadi. 1995. United states based agricultural "waste products" as fillers in a polypropylene homopolymer. In: Proceedings of 2d biomass conference of the Americas: Energy, environment, agriculture, and industry; 1995 August 21-24; Portland, OR. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory: 1219-1227.
 4. Myers, G.E., I.S. Chahyadi, C.A. Coberly and D.S. Ermer. 1991. Wood flour/polypropylene composites: Influence of maleated polypropylene and process and composition variables on mechanical properties. Intern. J. Polymeric Mater., Vol. 15, pp.21-44.
 5. Myers, G.E., I.S. Chahyadi, C.A. Coberly and D.S. Ermer. 1991. Wood flour and polypropylene or high density polyethylene composites: Influence of maleated polypropylene concentration and extrusion temperature on properties. Intern. J. Polymeric Mater., Vol. 15, pp.171-186.
 6. Park, B.D. and J.J. Balatinez. 1996. Effects of impact modification on the mechanical properties of wood-fiber thermoplastic composites with high impact polypropylene(HIPP). Journal of Thermoplastic Composite Materials. Vol. 9, pp.342-364.
 7. Sanadi, A.R., D.F. Caulfield and R.M. Rowell. 1994. Reinforcing polypropylene with natural fibers. Plastics Engineering. Vol. 4.
 8. Sanadi, A.R., D.F. Caulfield, R.E. Jacobson and R.M. Rowell. 1995. Renewable agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics : Mechanical properties of kenaf fiber-polypropylene composites. Ind. Eng. Chem. Res. 34(5): 1889-1896.
 9. 산림청. 1998. 임업통계연보.
 10. 중앙환경신문사. 1996. 월간폐기물 8월호.