

## 대나무 분말의 함량 및 입자 크기에 따른 바이오복합재의 물성 평가\*1

이 세 나\*2 · 이 병 호\*2 · 김 현 중\*2,3 · 김 수 민\*3,4 · 엄 영 근\*5†

### Properties Evaluation of Bio-Composite by Content and Particle Size of Bamboo Flour\*1

Sena Lee\*2 · Byoung-Ho Lee\*2 · Hyun-Joong Kim\*2,3 ·  
Sumin Kim\*3,4 · Young Geun Eom\*5†

#### 요 약

대표적인 친환경 소재인 바이오복합재(bio-composite)의 제조를 위해 기질 고분자로는 생분해성 고분자인 polybutylene succinate (PBS)를 그리고 충전제(filler)로는 대나무 분말(bamboo flour, BF)을 사용하였다. 본 연구에서는 BF의 함량 및 입자 크기가 바이오복합재의 기계적·점탄성적 특성 및 열적 특성에 미치는 영향을 평가하였는데 천연충전제인 BF의 첨가에 따라 인장강도는 감소하였지만 점탄성적 및 열적 특성은 고분자와의 상호작용을 통해 보다 안정적인 결과를 보였다. 또한, 소수성을 나타내는 PBS와 친수성인 BF 사이의 낮은 계면 결합이 바이오복합재의 물성 저하에 영향을 미친다는 사실이 확인되었다.

\* 1 접수 2009년 3월 18일, 채택 2009년 4월 29일

\* 2 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 바이오복합재료 및 접착과학 연구실. Lab. of Adhesion & Bio-Composites, Program in Environmental Materials Science, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

\* 3 서울대학교 농업생명과학연구원 바이오매스 기반 바이오소재 연구팀. Research Team for Biomass based Bio-Materials, Research Institute for Agriculture & Life Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

\* 4 숭실대학교 건축학부 건축환경재료연구실. Green Building Materials Lab, School of Architecture, Soongsil University, Seoul 156-741, Korea

\* 5 국민대학교 산림과학대학 임산공학과 목재해부 및 공학목재 연구실. Department of Forest Products, College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

† 주저자(corresponding author) : 엄영근(e-mail: eom@kookmin.ac.kr)

## ABSTRACT

The representative eco-friendly materials, or bio-composites, were made by incorporating biodegradable polymer of polybutylene succinate (PBS) as the matrix and bamboo flour (BF) as the natural filler. In present study, the effects of content and particle size of natural filler on the bio-composites were carried out around their mechanical, visco-elastic, and thermal properties. By the incorporation of BF, the tensile properties decreased but the viscoelastic and thermal properties revealed positive effect through interaction between the polymer and natural filler. Also, the vulnerability of interfacial adhesion between hydrophobic PBS and hydrophilic BF appeared to adversely affect the properties of bio-composites.

**Keywords:** bio-composite, properties, polybutylene succinate, bamboo flour

## 1. 서 론

최근 불안정한 오일달러와 온실가스 배출 및 지구 온난화 등과 같은 환경부하에 대한 저감노력의 일환으로 생분해성 소재의 연구가 활발히 진행 중이다(Liu *et al.*, 2009; Teramoto *et al.*, 2004; Mohanty *et al.*, 2000). 또한 국제기구의 환경규제 강화에 따라 green life시대에 부합하는 지속·재생 가능한 소재들이 큰 화두로 부각되고 있다. 이러한 움직임은 범용수지로 널리 사용되고 있는 polypropylene, polystyrene 등과 같은 난분해성 합성수지를 바이오매스 기반 소재인 바이오플라스틱 또는 바이오복합재로 대체하기 위함이라고 할 수 있다.

바이오복합재에 사용되는 생분해성 고분자는 범용수지와는 달리 일정 조건에서 수분 및 자연계에 존재하는 미생물이나 분해효소 등에 의해 물과 이산화탄소로 분해되는 소재이다. 이러한 바이오플라스틱은 사용면에서는 일반 플라스틱 제품과 동일하나 사용 후에는 폐기물을 땅 속에 매립할 수 있을 뿐만 아니라 연소시켜도 발생열량이 낮아 유해물질이 방출되지 않는 장점을 가진 친환경 플라스틱이라고 할 수 있다(Lee *et al.*, 2006; Mitsuhiro *et al.*, 2003).

본 연구에서는 생분해성 고분자의 일종인 polybutylene succinate (PBS)를 사용하였는데, 이는 다른 종류의 생분해성 고분자에 비해 탄성이 우수할 뿐만 아니라 분해성이 월등하다고 알려져 있다. 반면,

이러한 높은 분해성은 대기 중 미생물과 수분흡수로 인해 급격한 물성저하가 발생한다는 점에서 단점이 되기도 하는데, 이를 극복하기 위해 가수분해방지제를 첨가하는 등 이에 대한 활발한 연구도 진행 중이다(Kim *et al.*, 2006; Kim, 2008). 이에 따라, PBS의 물성향상 및 그 외의 단점들을 보완하기 위하여 기계적 강도 면에서 보다 우수한 또 다른 고분자와의 혼합(blending) 기술도 각 분야에서 개발되고 있다(Amita *et al.*, 2007).

또한, 기존의 복합재는 자연 환경 내에서 쉽게 분해되지 않고, 재활용도 어려운 유리섬유 등과 같은 일반 보강재를 사용하고 있기 때문에 이러한 소재의 활용이 점차 제한을 받고 있다(Corbière-Nicollier *et al.*, 2001; Schartel *et al.*, 2003). 이와 달리 바이오복합재는 기질 고분자 및 충전제 모두 생분해성이기 때문에 환경 친화성이 매우 높은 재료로 각광받고 있으며, 최근에는 합성고분자의 충전제로도 천연섬유를 활용하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 합성고분자의 적용으로 완전한 생분해가 이루어지지 않더라도 충전제로 사용될 천연섬유는 생분해되기 때문에 폐기물 매립 시의 문제점을 완화시켜줄 수 있어, 이렇게 제조된 복합재에도 환경 친화적 소재로써 적용이 가능하다(Paul *et al.*, 2003; Joshi *et al.*, 2004; Mohanty *et al.*, 2002; 심 등, 2008; 조 등, 2002).

현재 동남아시아, 미국 등에서 복합재료의 제조에 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 천연섬유 중 기계적

Table 1. Properties of polybutylene succinate (PBS)

	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	Specific gravity	MFI (g/10 min)	Elongation (%)
PBS	-34.4	113.1	1.26	20	150

\* T<sub>g</sub>: glass transition temperature, T<sub>m</sub>: melting temperature.

Table 2. Ratio of polybutylene succinate (PBS) to bamboo flour (BF) in manufacturing bio-composites (unit: wt%)

	Control	Type I	Type II	Type III	Type IV
PBS	100	90	80	70	60
BF	0	10	20	30	40

강도가 높은 대나무 분말을 선정하였다. 대나무는 자란지 4~5년부터 활용이 가능하며, 성장이 매우 빠르기 때문에 원료 수급에도 용이하여 섬유업계에서도 대표적인 재료로 손꼽히고 있다(이, 2003). 그러나 이러한 친수성을 나타내는 충전제는 소수성을 띠는 기질 고분자와 혼합시킬 경우 낮은 계면결합이 발생하며, 이는 곧 바이오복합재의 치명적인 단점이 된다. 일반적으로 천연충전제의 함수율, 순도, 입자 크기 및 종류는 바이오복합재의 물성에 영향을 주는 인자이다(Nicole, 1997). 또한, 입자가 작은 충전제로 구성된 바이오복합재의 성질은 충전제의 배향, 입자 크기, 분산뿐만 아니라 충전제와 기질 고분자 사이의 계면결합에 의해 크게 좌우된다(Cheung *et al.*, 2008). 이에 본 연구에서는 천연충전제의 입자크기 및 함량에 따른 바이오복합재의 물성에 미치는 영향을 알아보기 위해 기계적, 점탄성적 및 열적 특성을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

#### 2.1.1. 열가소성 고분자

본 연구에서는 기질 고분자로 (주)이래화학에서 구입한 생분해성 고분자의 일종인 polybutylene succinate (PBS)를 사용하였다. PBS의 용융온도와 유리전이온도는 각각 약 120°C, -40°C이고, 용융지수는 20 g/10 min, 비중은 1.26이다(Table 1).

#### 2.1.2. 천연충전제

본 연구에서는 천연충전제로 (주)한양소재에서 공급받은 대나무 분말을 사용하였다. 크기에 따른 강도의 영향을 평가하고자, 독일 Retsch사의 sieve shaker AS 300을 이용해 대나무 분말의 입자크기를 (1) 40 mesh 이상, (2) 60~140 mesh, (3) 200 mesh 이하의 것으로 분류해 첨가하였다. 또한, 수분에 의한 영향을 최소화하기 위하여 80°C 오븐에서 약 24 시간 동안 건조시킨 후 사용하였다.

### 2.2. 재료 혼합 및 바이오복합재 제조공정

본 연구에서의 바이오복합재 혼합비율은 Table 2와 같다. 바이오복합재의 제조공정은 실험실용 twin-screw extruder의 hopper 내로 먼저 1차 공급되고, 다시 이는 hopper 내의 single-screw 회전체에 의해 2차 hopper를 거쳐 최종적으로는 barrel로 운반된다. barrel의 온도는 PBS의 용융온도보다 높은 약 145°C로 조정하였으며, 이 과정을 통해 혼합된 재료들을 용융혼합(melt blending) 시켰다. 그리고 barrel의 nozzle로부터 사출된 긴 막대상의 물질(strand)을 냉각장치(water bath)에 통과시켜 냉각시킨 다음 pelletizer를 이용해 pellet 형태로 절단하였다. 이 pellet을 60°C 오븐에서 4시간 이상 건조시킨 후, 수분의 침투를 방지하기 위해 polyethylene bag에 넣고 보관하였다.

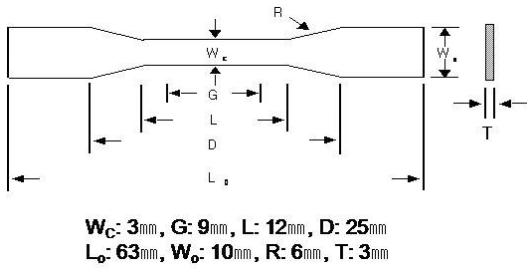


Fig. 1. Dimensions of tensile test specimen (ASTM D 638-08).

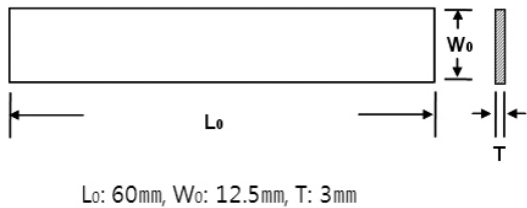


Fig. 2. Dimensions of dynamic mechanical analysis specimen.

### 2.3. 시편제작

제조된 pellet은 사출성형기(injection molder)를 이용하여 시험용 시편으로 제작하였다. 이때 온도는 용융혼합 시 사용한 온도조건과 동일한 145°C로 하여 시편을 제작하였다.

### 2.4. 실험방법

#### 2.4.1. 인장강도 시험

제조된 바이오복합재의 인장시험을 위해 ASTM D 638-08에 의거하여 만능시험기(universal testing machine, Zwick Co.)를 이용하여 인장강도를 측정하였다. 이때의 crosshead 속도는 5 mm/min이며 상온에서 실시하였다. 인장강도 시편의 크기는 Fig. 1과 같다.

#### 2.4.2. 점탄성적 특성 시험

바이오복합재의 점탄성적 특성은 TA Instrument Co.의 동적기계분석기(DMA, dynamic mechanical

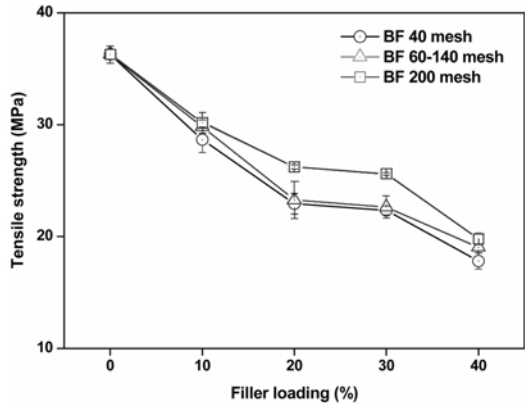


Fig. 3. Tensile strength of bio-composites by content and particle size of BF.

analysis, Q800)를 이용하여 dual cantilever방법으로 측정하였다. 사용된 시편의 크기는 Fig. 2와 같으며, 시험조건은 온도 범위 -80~100°C, 승온속도 2 °C/min, frequency는 1 Hz, strain rate는 0.1%로 하였다.

#### 2.4.3. 열적 성질 시험

바이오복합재의 유리전이온도 및 용융온도를 측정하기 위하여 TA Instrument Co.의 시차주사열량계(DSC, differential scanning calorimetry, Q1000)를 이용하였다. 시험 조건은 온도범위 -80~200°C, 승온속도 10°C/min로 하였고, 샘플의 무게는 약 8~10 mg으로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 인장강도

Fig. 3은 바이오복합재의 인장강도 시험 결과로써 충전제 역할을 하는 BF의 입자 크기 및 함량에 따른 변화가 나타나 있다. BF의 입자 크기가 200 mesh일 때의 인장강도 값이 가장 크게 나타났고, 60~140 mesh, 40 mesh 순으로 입자 크기가 증가함에 따라 인장강도는 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 입자 크기의 감소에 따라 PBS와 BF가 접촉하는 비표

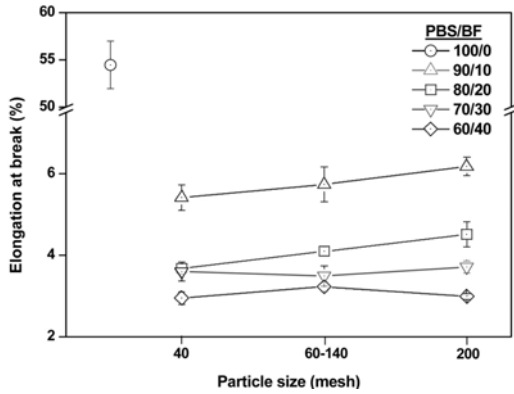
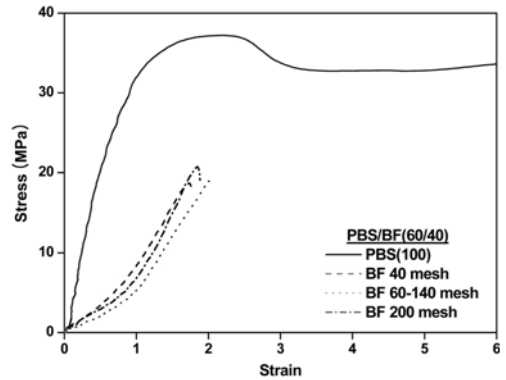


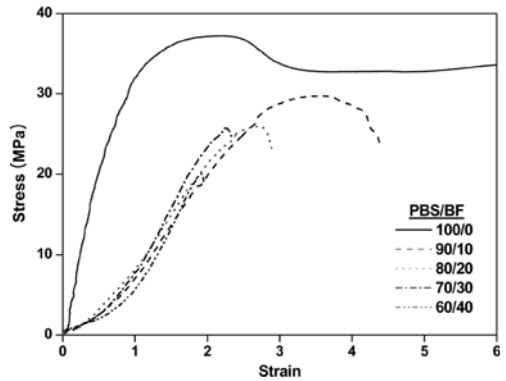
Fig. 4. Elongation at break of bio-composites by content and particle size of BF.

면적이 보다 증가됨으로써 인장강도가 개선된 것으로 여겨졌다. 또한, BF의 함량이 증가할수록 PBS-BF 바이오복합체의 인장강도가 점차 감소되는 경향을 보였는데 이는 소수성인 PBS와 친수성인 BF 사이의 낮은 계면결합 때문인 것으로 판단되었다(Lee *et al.*, 2006).

Figs. 4와 5는 제조된 PBS-BF 바이오복합체의 인장강도 시험에 따른 과단 시의 연신율(elongation at break)과 변형-응력(strain-stress)에 대한 그래프이다. BF가 첨가되지 않은 PBS의 연신율은 약 54.5%로써 BF가 첨가된 바이오복합체에 비해 매우 높다는 것을 세 그래프에서 모두 확인할 수 있었다. Figs. 4와 5에서 BF의 입자 크기에 따른 바이오복합체의 연신율은 뚜렷한 차이를 보이지 않지만 Fig. 4의 PBS : BF = 90 : 10 비율에서 과단 시의 연신율이 40mesh 이하에서 약 5.4%, 200 mesh 이상에서 약 6.2%로 소폭 증가된 것으로 보아 BF와 PBS 사이의 비표면적의 증가에 따른 결과로 여겨졌다. 또한 Figs. 4와 5에서 BF의 함량에 따른 결과를 보면, 유연성(flexibility)을 지니는 PBS에 BF가 10, 20, 30, 40 wt%로 첨가되면서 두 물질 사이의 약한 계면결합이 발생하는데 이는 Fig. 5의 탄성율(modulus)의 급격한 감소에서도 확인할 수 있었다. 또한, 바이오복합체 내의 BF 함량이 증가함에 따라 발생하는 기계적 성질의 저하는 앞서 언급한 낮은 계면결합뿐만 아니라 기질 고분자인 PBS 내에서의 BF 입자들 간



(a) By particle size of BF at 60/40 ratio of PBS/BF



(b) By content of BF

Fig. 5. Strain-stress curves of PBS/BF bio-composites by particle size (a) and content (b) of BF.

마찰도 영향을 준 것으로 사료되었다.

위의 결과를 종합해 보았을 때, 충전제의 함량 및 입자 크기가 바이오복합체의 인장 특성에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었고, 이로 인한 물성의 저하를 최소화하기 위해서는 적절한 충전제의 함량 및 입자 크기가 필요하다고 판단되었다.

### 3.2. 점탄성적 특성

BF의 입자 크기 및 함량을 달리하여 바이오복합체를 제조하였을 때 점탄성적 특성에 미치는 영향을 동적기계분석기(DMA)를 이용하여 온도 변화에 따

대나무 분말의 함량 및 입자 크기에 따른 바이오복합재의 물성 평가

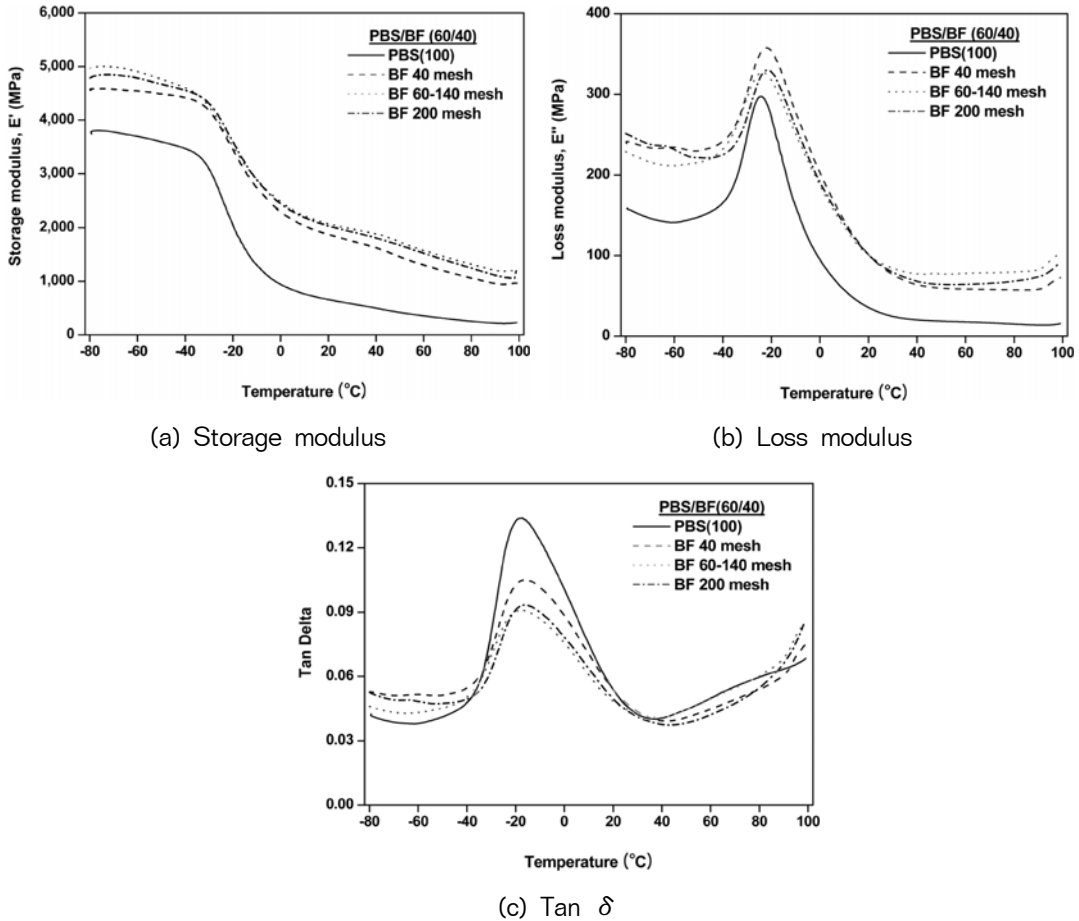


Fig. 6. Storage modulus (a), loss modulus (b), and  $\tan \delta$  (c) of bio-composites at 60/40 ratio of PBS/BF by particle size of BF.

라 측정된 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 기질 고분자인 PBS는 충전제인 BF 주변을 둘러싸고 있으며, 이러한 두 물질간의 결합이 저장 탄성율(storage modulus,  $E'$ ) 개선에 영향을 준 것으로 여겨졌다. 또한, BF의 함량이 증가함에 따라 BF의 입자 및 PBS의 유동이 모두 제한되고, 이 때 외부로부터 가해진 응력은 PBS와 BF가 결합된 형태에서 내부로의 응력 전이가 이루어진 것으로 생각되었다(Rana *et al.*, 1999). BF를 포함하지 않은 순수한 PBS와 비교했을 때, BF를 포함한 바이오복합재는 약  $-30 \sim 0^\circ\text{C}$  온도 영역에서 저장 탄성율이 급격히 감소되는데 이 구간

을 바이오복합재의 유리전이영역( $T_g$ )으로 판단하였다. 일반적으로 입자가 작은 충전제를 지니는 바이오복합재의 성질은 충전제의 배향, 크기, 분포, 분산뿐만 아니라 충전제와 기질 고분자 사이의 계면결합에 의해 좌우된다고 보고되어 있다(Cheung *et al.*, 2008). 본 연구에서는 BF의 입자 크기에 따른 변화를 알아보았는데 그 결과는 다음과 같다. 60~140 mesh와 200 mesh의 BF를 지니는 복합재의 저장 탄성율은 40 mesh를 지니는 것에 비해 다소 높게 나타났다. 이는 작은 입자로 구성된 기질 고분자인 PBS와 BF 분말이 접촉할 수 있는 비표면적이 넓게

Table 3. Thermal properties of bio-composites at 100/0 and 60/40 ratios of PBS/BF through DSC

	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH <sub>c</sub> (J/g)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	X <sub>c</sub> (%)
PBS (100/0)	-34.4	100.1	113.1	56.5	76.4	69.3
BF 40 mesh (60/40)	-28.8	97.0	113.9	41.0	64.2	58.2
BF 60~140 mesh (60/40)	-28.9	95.0	113.5	43.7	68.8	62.4
BF 200 mesh (60/40)	-30.2	90.4	113.7	43.3	65.0	58.9

\*T<sub>g</sub>: glass transition temperature, T<sub>c</sub>: crystalline temperature, T<sub>m</sub>: melting temperature, ΔH<sub>c</sub>: experimental melting enthalpy, ΔH<sub>m</sub>: melting enthalpy, X<sub>c</sub>: crystallinity.

형성되었을 뿐 아니라 기질 고분자 내에 비교적 고르게 분포하여 물질 간의 응력전이가 적절히 이루어졌기 때문인 것으로 사료되었다. 따라서 BF의 입자 크기에 따른 저장 탄성률 값은 본 연구의 인장강도 시험 결과와도 유사한 경향을 나타내었다.

손실 탄성률(loss modulus, E'')의 경우, -40°C~0°C 구간의 peak가 BF의 첨가에 따라 고온 방향으로 약간 이동되는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 손실 탄성률은 고분자 내부의 분자운동에 따라 많이 좌우되는데, 본 연구에서 사용된 고분자 사슬이 충전제의 첨가에 따라 그 운동이 제한되었고 이러한 원인에 의해 바이오복합체의 T<sub>g</sub>상승이 유도된 것으로 여겨졌다(Cheung *et al.*, 2008).

온도에 따른 tan δ 결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있는데 이는 저장 탄성률(E')과 손실 탄성률(E'')을 이용하여 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\tan \delta = E''/E'$$

Fig. 6에서처럼 고분자 내에 BF가 첨가되면서 peak 높이가 점차 감소되는 것이 확인되었다. 이는 충전제인 BF에 의해 고분자인 PBS 사슬의 유동이 제한되면서 복합체 자체의 탄성이 증가되었으며, 이로 인해 peak 높이 및 sharpness의 감소현상이 나타난 것으로 사료되었다. 또한, 유리전이영역에서의 급격한 peak 상승은 온도 증가에 따라 바이오복합체의 손실 탄성률이 증가한 반면 저장 탄성률은 감소했기 때문에 일어나게 된다. 따라서 분자 간 사슬의 마찰에 의한 바이오복합체 자체의 기계적 성질의 저하는 BF의 첨가를 통해 어느 정도 극복할 수 있다

(Bleach *et al.*, 2002; Pothan *et al.*, 2003). 그러나 BF 함량 및 입자 크기 증가는 BF 입자 사이의 마찰 또는 입자들끼리의 뭉침 현상을 발생시킬 가능성이 있기 때문에 이러한 요인들도 배제할 수 없다. 기존의 다른 연구에서도 내부 마찰의 감소 및 이력현상의 증가와 tan δ의 상관관계에 관하여 이와 비슷한 보고도 있었다(Fay *et al.*, 1991).

### 3.3. 열적 성질

PBS의 용해열(melting enthalpy, ΔH<sub>m</sub><sup>0</sup>)은 약 110.3 J/g (Zhao *et al.*, 2005)이며, 바이오복합체의 결정화도(crystallinity, X<sub>c</sub> %)는 다음의 식으로부터 얻어진다.

$$X_c (\%) = \Delta H_m / \Delta H_m^0 \times 100$$

여기에서 ΔH<sub>m</sub>는 제조된 바이오복합체의 용해열, ΔH<sub>m</sub><sup>0</sup>는 PBS의 용해열을 나타낸다. 본 연구에서 시차주사열량계(DSC)를 통해 얻어진 측정 결과는 Table 3과 Fig. 7와 같다. PBS의 T<sub>g</sub>는 약 -34.4°C이었고, 제조된 바이오복합체의 T<sub>g</sub>는 충전제의 첨가에 따라 -28.8°C, -28.9°C, -30.2°C로 PBS에 비해 약 4~6°C 증가하였으나 충전제의 입자 크기에 따른 차이는 보이지 않았다. 또한, T<sub>m</sub>은 모두 약 113°C로 큰 변화가 없는 반면 용해열(ΔH<sub>m</sub>)은 BF가 첨가되면서 약 10 J/g이 감소되었다. 이는 BF를 지니는 바이오복합체가 PBS만에 의한 것에 비하여 PBS의 구성 비율이 적기 때문에 이를 용융하는데 필요한 열효율이 그만큼 저하된 것으로 보이며, 압출 및 사출 시 PBS

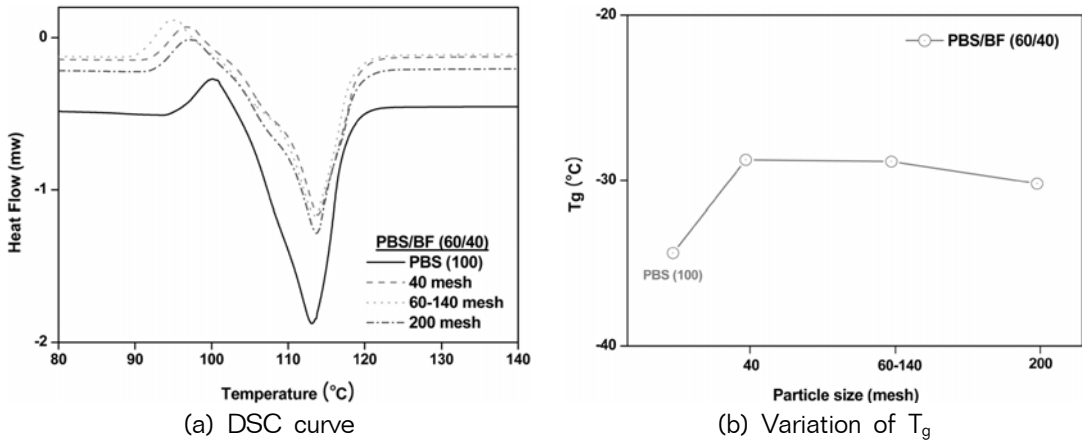


Fig. 7. DSC curves (a) and variation of  $T_g$  (b) of bio-composites at 60/40 ratio of PBS/BF by particle size of BF.

의 결정화를 BF의 입자들이 방해했다는 것을 의미한다. 또한 온도에 따른 변화를 보면 초반에는 BF가 PBS의 고분자 사슬과 어느 정도 결합이 이루어지다가 온도가 점차 상승됨에 따라 초반보다 결합이 약해지면서 이러한 결과가 초래된 것으로 여겨졌는데 (Lee *et al.*, 2006) 입자 크기에 따른 변화는 거의 없었다. 그리고 결정화온도( $T_c$ ),  $\Delta H_c$ ,  $X_c$ 도 역시 BF가 첨가됨에 따라 약간 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 고분자로 이루어진 복합재의 결정화도는 다음과 같은 두 가지 현상에 의해 영향을 받을 수 있다: (1) 첨가된 충전제는 제조된 복합재 내부에서의 고분자 사슬의 확산 및 이동을 저지함으로써 결과적으로 고분자 복합재의 결정화에 부정적인 영향을 미쳐  $T_c$ 가 감소된다; (2) 충전제는 nucleating effect로 고분자 결정화에 긍정적 효과와 동시에  $T_c$ 의 증가를 유도한다(Cheung *et al.*, 2008). 한편, 본 연구에서 제조된 바이오복합재의 경우, BF의 첨가에 따라  $T_c$ 가 약 3~10°C정도 감소된 것으로 보아 BF는 온도 상승과 동시에 고분자 사슬의 이동 및 확산을 방해하는 역할을 한 것으로 여겨졌다. 위와 같은 결과를 통해, 바이오복합재에 충전제를 첨가함에 따라  $T_g$  증가와 같은 열적 성질은 비교적 효과적으로 개선되었으나 충전제의 입자 크기에 따른 영향은 나타나지 않았다.

## 4. 결 론

PBS와 BF의 첨가에 의해 제조된 바이오복합재의 인장강도시험 결과 BF의 입자 크기의 감소에 따라 PBS와 BF가 접촉하는 비표면적이 상대적으로 증가하여 인장강도 상승에 영향을 주었다. 그러나 BF의 첨가 및 BF 함량 증가에 따라 인장강도, 파단 시의 연신율, 탄성율(modulus)은 점차 감소되는 경향을 보였는데 이는 소수성의 PBS와 친수성의 BF 특성 차이로 인한 두 물질 간의 낮은 계면결합이 주요 원인인 것으로 여겨졌다. 또한 BF의 함량이 증가함에 따라 입자들 간의 갭은 충돌로 인하여 바이오복합재의 기계적 성질의 저하에 영향을 준 것으로 판단되었다.

제조된 바이오복합재는 BF 입자들이 PBS 고분자에 의해 둘러싸여 결합되어 있는 형태로, 초기 저장 탄성율에 있어서는 증가 현상을 나타냈다. 그 중 작은 입자들로 구성된 복합재는 큰 입자로 이루어진 것보다 기질 고분자와의 접촉 면적이 넓게 형성되고 입자들이 비교적 고르게 분포되어 있기 때문에 보다 높은 저장 탄성율을 나타낸 것으로 보였다. 따라서 충전제의 입자크기에 따른 저장 탄성율은 본 연구의 인장시험 결과와도 유사한 경향을 보였다. 또한, 손실 탄성율은 충전제인 BF가 첨가됨에 따라 바이오복합재의  $T_g$ 는 약간 증가하였고 온도 상승에 따른  $\tan \delta$



결과를 통해 다량의 충전제를 지니는 바이오복합재의 에너지 손실이 그 외의 조건에 비해 큰 것을 알 수 있었다.

DSC를 통한 열안정성 평가 결과, BF의 입자 크기에 따른 유리전이온도의 차이는 크지 않았지만 BF의 첨가는 바이오복합재의  $T_g$  상승에 영향을 준 것을 확인할 수 있었다. 그러나 바이오복합재의 결정화도가 PBS만에 의한 것에 비해 감소된 것으로 보아 BF는 온도 상승에 따라 고분자 사슬을 방해하는 역할을 한 것으로 판단되었다.

본 연구를 통해 바이오복합재에 포함된 천연충전제의 입자 크기 및 함량은 바이오복합재 물성의 최적화에 필요한 인자임을 확인할 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 2009년도 국민대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 심재훈, 조동환, 윤진산. 2008. 천연섬유와 바이오복합재료. *고분자과학과 기술*, 19(4): 299~306.
2. 이정인. 2003. 대나무 섬유. *섬유기술과 산업*, 7(3): 359~363.
3. 조동환, 이승구, 박원호, 한성욱. 2002. 바이오 섬유를 이용한 환경친화성 바이오 복합재료. *고분자과학과 기술*, 13(4): 460~476.
4. Amita, B., K. G. Rahul, N. B. Sati, and H. J. Chio. 2007. Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application. *Korea-Australia Rheology Journal* 19: 125~131.
5. Bleach, N. C., S. N. Nazhat, K. E. Tanner, M. Kellomäki, and P. Törmälä. 2002. Effect of filler content on mechanical and dynamic mechanical properties of particulate biphasic calcium phosphate-poly(lactide) composites. *Biomaterials* 23: 1579~1585.
6. Cheung, H. Y., K. T. Lau, X. M. Tao, and H. David. 2008. A potential material for tissue engineering: Silkworm silk/PLA biocomposite. *Composite*

- Part B: *Engineering* 39: 1026~1033.
7. Colom, X., F. Carrasco, P. Pagès, and J. Cañavate. 2003. Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites. *Composites Science and Technology* 63: 161~169.
8. Corbière-Nicollier, T., L. B. Gfeller, L. Lundquist, Y. Letterrier, J. A. E. Manson, and O. Jolliet. 2001. Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics. *Resources, Conservation and Recycling* 33: 267~287.
9. Fay, J. J., C. J. Murphy, D. A. Thomas, and L. H. Sperling. 1991. Effect of morphology, crosslink density, and miscibility on interpenetrating polymer network damping effectiveness. *Polymer Engineering and Science* 31: 1731~1741.
10. Joshi, S. V., L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora. 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35: 371~376.
11. Kim, H. S., H. J. Kim, J. W. Lee, and I. G. Choi. 2006. Biodegradability of bio flour filled biodegradable poly(butylene succinate) bio-composites in natural and compost soil. *Polymer Degradation and Stability*, 91: 1117~1127.
12. Kim, H. S. 2008. Development and characterization of biodegradable bio-composites for automotive interior parts application. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
13. Lee, S. H. and W. Siqun. 2006. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37: 80~91.
14. Liu, L., J. Yu, L. Cheng, and X. Yang. 2009. Biodegradability of poly(butylene succinate) (PBS) composite reinforced with jute fibre. *Polymer Degradation and Stability* 94: 90~94.
15. Mitsuhiko, S., O. Koichi, T. Naoqumi, Y. Ryutoku, and T. Hiroyuku. 2003. Biocomposites made from short abaca fiber and biodegradable polyesters. *Macromolecular Materials and Engineering* 288: 35~43.
16. Mohanty, A. K., M. Misra, and L. T. Drzal. 2002. Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and*

- the Environment 10: 19~26.
17. Naozumi, T., U. Kohei, O. Koichi, and S. Mitsuhiro. 2001. Biodegradation of aliphatic polyester composites reinforced by abaca fiber. *Polymer Degradation and Stability* 86: 401~409.
  18. Nicole, S. 1997. Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites. *Intertech Conferences*, pp. 1~16.
  19. Paul, W., I. Jan, and V. Ignaas. 2003. Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology* 63: 1259~1264.
  20. Pothan, L. A., Z. Oommen, and S. Thomas. 2003. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. *Composite Science and Technology* 63: 283~293.
  21. Rana, A. K., B. C. Mitra, and A. N. Banerjee. 1999. Short jute fiber-reinforced polypropylene composites: Dynamic mechanical study. *Journal of Applied Polymer Science* 71: 531~539.
  22. Schartel, B., U. Braun, U. Schwarz, and S. Reinemann. 2003. Fiber retardancy of polypropylene/flax blends. *Polymer* 44: 6241~6250.
  23. Zhao, J. H., X. Q. Wang, J. Zeng, G. Yang, F. H. Shi, and Q. Yan. 2005. Biodegradation of poly(butylene succinate) in compost. *Journal of Applied Polymer Science* 97: 2273~2278.