

친환경 액상 난연제를 이용한 대나무섬유의 난연화 연구

이동우* · 리막심* · 송정일*[†]

Study on the Improvement of Flame Retardancy of Bamboo Fiber Using Eco-Friendly Liquid Flame Retardant

Dong-Woo Lee*, Maksym Li*, Jung-il Song*[†]

ABSTRACT: Since natural fibers are highly flammable, it is not easy to make them flame retardant. In this study, a liquid flame retardant based on phytic acid, APTES, and Thiourea, which are flame retardant candidates derived from nature, was prepared and its performance was verified through flame retardant treatment and flame retardancy evaluation of bamboo fibers. When a liquid flame retardant is used, it is possible to treat a large amount of natural fibers with flame retardant treatment. Nine types of flame-retardant treated bamboo fibers were prepared according to the Taguchi design of experiment method. Thereafter, vertical burning test and microcalorimeter test were performed for flame retardancy evaluation, and the surface of natural fibers before and after flame-retardant treatment was compared using scanning electron microscope. The results show that phytic acid has a significant effect on improving the flame retardancy of natural fibers. Through microstructure analysis, it was assumed that the phytic acid helps flame retardant to uniformly adhere to the surface of natural fibers. If such research results are utilized, it is possible to make a large amount of natural fibers high flammability in an eco-friendly way, which is expected to be advantageous for the application of prototypes.

초 록: 천연섬유는 가연성이 높아 난연화가 쉽지 않으며, 친환경적인 특성을 활용하기 위해서는 친환경적으로 난연화시키는 것이 필요하다. 본 연구에서는 자연으로부터 유래한 난연 후보물질인 Phytic acid, APTES, Thiourea를 기반으로 하는 액상 난연제를 제조하고 대나무 섬유의 난연처리 및 난연성 평가를 통하여 그 성능을 입증하고자 하였다. 액상 난연제를 사용할 경우 대량의 천연섬유에 대한 난연처리가 가능하다. 다구찌 시험계획법에 따라 9종류의 난연처리된 대나무 섬유를 준비하였다. 그후 난연성 평가를 위하여 수직 연소시험 및 마이크로칼로리미터 시험을 수행하였으며, SEM을 이용하여 난연처리 전후의 천연섬유 표면을 비교하였다. 시험결과 Phytic acid가 천연섬유의 난연성 향상에 매우 큰 효과가 있음을 알 수 있었으며 미세구조 분석을 통하여 난연제가 천연섬유 표면에 균일하게 부착되는데 도움을 주는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 연구성과를 활용할 경우 대량의 천연섬유를 친환경적인 방법으로 고난연화 하는 것이 가능하여 시제품 적용에 유리할 것으로 기대된다.

Key Words: 액상 난연제(Liquid flame retardant), 난연성(Retardancy), 친환경(Eco-friendly), 대나무 섬유(Bamboo fiber), 천연섬유(Natural fiber)

1. 서 론

2015년, 기후위기에 대응하기 위하여 195개국에서 참여한 파리협정이 파리에서 체결되었으며, 우리나라도 2020년에 가입하고 이산화탄소 순 배출량을 0으로 만들기 위한 2050 탄소중립을 선언하였다. 이러한 목표 달성을 위해 최근 섬유 및 복합재료 산업에서도 합성섬유에 비하여 탄소중립성이 우수한 천연섬유에 대한 관심이 높아지는 추세지만 천연섬유는 난연성이 떨어진다는 단점이 있다. 또한 매년 신축 호텔, 스포츠 센터, 병원 등에서 가연물(침구류 등)로 인해 불길이 확산되어 인명 및 재산피해를 일으키는 대형 화재가 지속적으로 발생하고 있어 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 그에 따라 다중이용시설에서는 특정 소방대상물 현행법상 난연성 재료를 의무화하고 있지만 대형화재를 막기에는 역부족인 실정이다. 따라서 커튼, 침구류와 같은 가연물이 우수한 난연성을 가질 수 있다면 화재예방 및 지연효과가 있을 뿐만 아니라 천연섬유를 활용할 경우 탄소중립 달성에도 기여할 수 있다.

천연섬유는 성장과정에서 광합성을 통하여 지속적으로 탄소를 흡수하고, 사용 후에는 탄소를 배출하는 탄소중립 소재이지만 뒤틀림으로도 쓸 수 있을 정도로 가연성이 높은 소재이다. 특히 면(cotton) 소재의 경우 침구류, 옷감 등에 광범위하게 사용되고 있으며 화재시 화염을 확산시키는 원인이 되기도 한다[1,2]. 천연섬유는 식물섬유와 동물섬유로 구분되며 그 종류가 다양하다. Table 1은 천연섬유의 종류와 기계적 물성을 나타낸 것으로, 지금까지 천연섬유와 관련된 연구는 기계적 물성향상이 주를 이루었지만[3] 실용화를 위해서는 난연화 및 난연성을 오랫동안 유지하기 위한 내구성 향상 연구도 병행되어야 한다. 기존 천연섬유의 난연화 연구에서는 합성섬유에 비하여 현저히 부족한 난

Table 1. Mechanical properties of natural fibers

Fiber	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Jute	393-773	13-26.5
Hemp	690	
Kenaf		
Flax	345-1100	27.6
Ramie	400-938	61.4-128
Sunn	1.17-1.9	
Sisal	468-640	9.4-22.0
Cotton	287-800	5.5-12.6
Kapok	-	
Coir	131-175	4-6
Banana	1.7-7.9	
PALF	413-1627	34.5-82.5

Table 2. Phosphorus Flame retardant for polymer matrix

Retardant	Target polymer
Phosphate	PC, PP, PA66
Red phosphorus	PA6, 66, 610, Epoxies
Phosphonate	PET, PC, ABS, PU foam, PA6
Phosphinate	PA, PBT, PA6
Phosphazene	PA, PBT, epoxies

연성을 지니거나, 비가울 때 난연제가 모두 씻겨나가는 문제가 있어 실제 응용에는 한계가 있었다[4]. 뿐만 아니라 천연섬유를 탄소중립을 위하여 사용하지만 난연화 공정은 환경을 오염시키는 방법이 사용되어 천연섬유의 활용가능성에 대한 근본적인 문제가 제기되기도 하였다[5].

한편, 난연제의 경우 과거에는 매우 우수한 난연성으로 인하여 브롬과 같은 할로젠(halogen)계 난연제가 널리 사용되어 왔으나, 유독성과 환경오염으로 인하여 유럽에서는 사용이 금지되는 등 갈수록 규제가 강화되고 있다. 특히 할로젠계 난연제는 화염 전파를 예방하는 효과가 매우 우수하지만 독성연기에 의한 인명피해가 빈번하게 일어났다. 할로젠계 난연제의 대안으로써 인계(Phosphorus) 난연제가 개발되어 점차 응용분야가 확대되고 있다. Table 2는 현재 널리 사용되고 있는 인계 난연제의 종류 및 특징이다[6-9]. 그러나 인계 난연제는 할로젠계 난연제에 비하여 부족한 난연성으로 인하여 응용분야가 제한되고 있다[3].

대나무 섬유의 난연화를 위한 연구도 다수 수행되어 왔으나, APP와 같이 널리 알려져 있는 인계 난연제를 적용하거나 난연화된 수지를 사용하여 복합재료를 제조하는 연구에 그쳐 대나무 섬유 자체는 제한된 난연성을 보였다[10,11].

본 연구에서는 친환경 소재만을 이용하여 천연섬유의 한 종류인 대나무 섬유(Bamboo fiber)의 고 난연화를 달성하고자 하였으며, 액상의 난연제를 개발함으로써 대량의 천연섬유를 빠르고 쉽게 난연화 하는 방안을 제시하고자 하였다. 또한 난연성을 극대화하기 위하여 다구체 시험계획법을 통하여 공정변수를 최적화 하기위한 연구를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 사용재료

2.1.1 천연섬유

천연섬유는 부직포 형태로 가공된 대나무 섬유(Bamboo fiber)를 사용하였다. 대나무를 습식 방사하여 추출한 섬유인 대나무 섬유는 친환경적이며, 주원료인 대나무가 싹이 트면 4~5년 만에 평균 20m로 전부 성장을 할 정도로 성장속도가 매우 빨라 이미 섬유산업에서 많이 사용되고 있으며, 복합재료의 제조를 위한 보강재(reinforcement)로도 활용이 가능하다.



Fig. 1. Bamboo felt fiber

2.1.2 난연제

본 연구에서는 전분(Starch), 멜라민(Melamine, MEL), 피트산(Phytic acid, PA), 3-아미노프로필트리에톡시실란((3-Aminopropyl)triethoxysilane, APTES) 및 싸이오요소(Thiourea, TH)를 친환경 및 저독성 난연제로써 선정하여 천연섬유의 난연화를 위하여 사용하였다. 선정된 재료를 조합할 경우 난연의 3요소인 숯 형성, 팽창, 불활성가스 발생을 모두 달성할 수 있기 때문이다. 소재별로 살펴보면 다음과 같다.

전분은 곡물 등으로부터 얻을 수 있는 친환경 소재이며, 연소시 숯을 형성하여 재료와 산소의 접촉을 차단하는 역할을 한다. 멜라민은 저독성의 난연제로 널리 사용되고 있으며, 약 66%가 질소이기 때문에 연소시 불활성 가스막을 재료 표면에 생성하여 난연효과를 기대할 수 있다. PA는 콩이나 열매로부터 얻을 수 있는 친환경 소재이며 난연제로 주로 사용되는 성분인 인(P)을 약 28% 함유하고 있다. PA 또한 연소시 탈수반응과 함께 숯을 형성한다. APTES는 실리콘(Si)과 질소(N)를 함유하고 있어 연소단계에서 실리카층 및 불활성 가스를 형성하며, 싸이오요소는 황(S)과 질소(N)를 함유하고 있어 연소과정에서 가연성 가스를 희석시키고 동시에 숯을 형성한다. 또한 멜라민과 PA는 함께 사용되었을 때 Fig. 3과 같이 결합하여 숯(char)을 잘 형성하고, 잔여물이 45% 이상 남으며 PP에 혼합하여 복합재료를 제조하였을 때 CO 및 연기의 방출량이 현저히 줄어들어 더

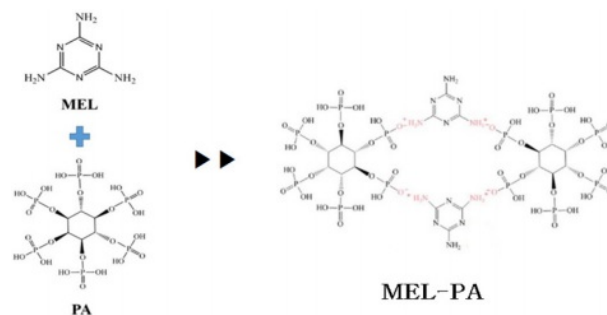


Fig. 3. Chemical bonding of melamine and phytic acid [4]

욱 효과적인 난연성을 보이는 것으로 실험을 통하여 알려져 있다[12].

앞서 소개한 다섯가지의 난연제로부터 주요 난연 메커니즘인 숯 형성, 불활성 가스층 생성, 탈수반응을 모두 얻을 수 있을 뿐만 아니라 수산기를 가진 천연섬유의 표면에 쉽게 결합할 수 있어 난연성이 극대화될 수 있을 것으로 예상하였다. 이를 달성하기 위하여 증류수에 전분과 멜라민을 혼합한 용액(이하 Solution A)과 PA, APTES, TH를 혼합한 용액(이하 Solution B)을 조합 후 천연섬유를 용액에 담그는 방법으로 대나무 섬유의 난연화를 수행하였다. 이때 난연제의 비율을 최적화하기 위하여 다구찌 시험계획법을 사용하였다.

2.2 다구찌 시험계획법

다구찌(Taguchi) 시험계획법은 적은수의 시험과 통계적인 기법을 사용하여 효율적으로 최적화를 달성할 수 있는 강건설계(Robust design) 방법 중 하나이다[13]. 다구찌 기법을 사용하지 않을 경우, 경우의 수가 27가지이지만, 다구찌 기법을 사용함으로써 9번의 시험을 통하여 최적화를 달성할 수 있다. 기존의 실험계획법은 반응변수의 평균값에 초점을 맞추기 때문에 반응변수에 작용하는 잡음 인자의 영향을 많이 받아 최적 조건이 확실하지 않다. 그에 반해 다구찌 기법은 산포에 초점을 맞추어 잡음 인자에 의한 변동을 줄여주고 시간과 비용을 절감하면서 실험 인자와 수준의 최적 조건을 찾을 수 있다.

본 연구에서는 전분과 멜라민 비율은 2 wt.% 및 4 wt.%로 고정하고, 나머지 세 난연제의 비율만을 조절하였다. 조절하는 성분이 세 종류이 때문에 3 인자(3 factor)이며, 각각의 인자는 세 가지 비율(수준)을 사용하였다(3 level). 여기서 3 수준의 예는 PA를 0, 3, 6 wt.%이 세가지 중량비만을 사용했다는 의미이다. 3 인자, 3 수준을 사용하였을 때 얻을 수 있는 다구찌 테이블은 Table 3에서와 같이 L9과 L27이며, 시험횟수를 최소화하기 위해서는 L9을 선택해야 한다. Table 4는 L9을 선택하였을 때 얻을 수 있는 다구찌 테이블이며 이 조합으로 액상 난연제를 제조해야 한다.

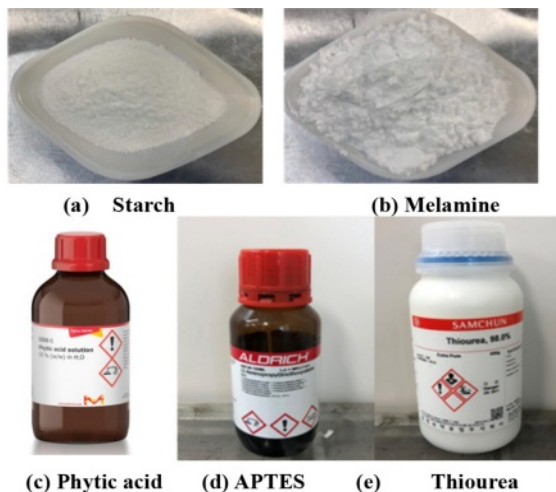
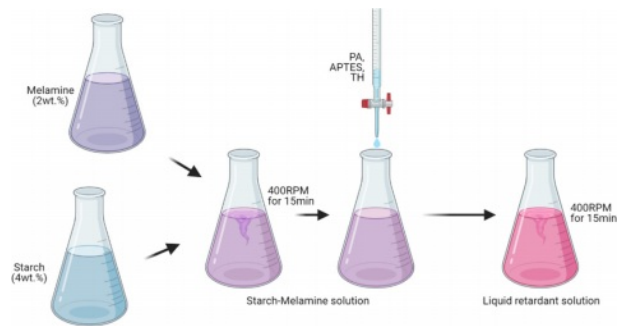


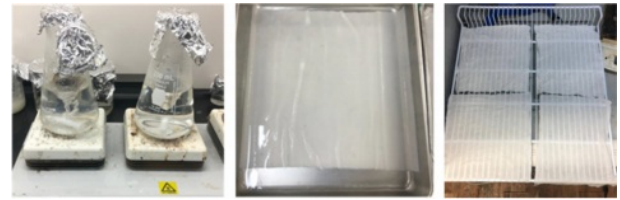
Fig. 2. Flame retardant for this study

Table 3. Available Taguchi designs

Available Taguchi Designs (with Number of Factors)				
Designs	2 level	3 level	4 level	5 level
L4	2-3			
L8	2-7			
L9		2-4		
L12	2-11			
L16	2-15			
L16			2-5	
L25				2-6
L27		2-13		
L32	2-31			

**Fig. 4.** Preparation of liquid retardant solution**Table 4.** Taguchi L9 table

	PA (%)	APTES (%)	Thiourea (%)
L1	0	0	0
L2	0	3	3
L3	0	6	6
L4	3	0	3
L5	3	3	6
L6	3	6	0
L7	6	0	6
L8	6	3	0
L9	6	6	3

**Fig. 5.** Surface treatment of bamboo fiber using liquid retardant

2.3 액상 난연제의 제조 및 천연섬유의 난연처리

다구찌 테이블에 따라 다섯종류의 난연제를 배합하여 액상 난연제를 준비하였으며, 구체적인 제조공정은 Fig. 4와 같다. 먼저 2 wt.% 전분과 4 wt.% 멜라민을 각각 증류수와 400 RPM으로 교반한 후 다시 두 용액을 400 RPM으로 교반하여 전분-멜라민 용액을 준비한다. 여기에 나머지 세 종류의 난연제를 다구찌 테이블에 따라 배합하였다. 즉 전분-멜라민 용액의 농도는 일정하게 유지하고, PA, APTES 및 TH의 농도만 달리하면서 9종류의 액상 난연제를 제조하였다. 예를 들어 Table 4의 L1은 세 난연제가 모두 0이므로 전분과 멜라민만 혼합된 용액이며, L9은 모든 난연제가 최대 비율로 혼합되어 있는 용액이다. 전분-멜라민 용액에 세 난연제를 혼합할 때는 400 RPM의 속도로 15분간 교반하였으며, 두 종류 이상의 난연제를 교반해야 할 경우에는 하나의 난연제가 완전히 교반된 후 다음 난연제를 투입 후 교반하는 방식으로 진행하였다.

앞의 방법으로 제조한 액상 난연제를 이용하여 대나무 섬유를 난연화한 방법은 다음과 같다. 먼저 준비된 액상 난연제에 천연섬유를 담그고 1시간동안 유지시킨다. 그 후 적셔진 대나무 섬유의 수분을 짜내고 섬유의 변형을 최소화하기 위하여 상온에서 5시간 건조시킨 후 오븐을 이용하여 다시 24시간 건조시켰다. 다구찌 테이블에 따라 다양한 액상 난연제를 이용하여 대나무 섬유가 난연처리 되었으나,

액상난연제의 농도를 최대한 테이블에 맞게 제조하고 난연처리 및 건조 절차도 모두 동일하게 유지함으로써 처리 조건을 비교하는 것이 가능하도록 준비하였다. 난연처리 후 건조된 섬유는 처리조건별로 5개씩 시편을 준비하여 수직연소시험 및 마이크로칼로리미터 시험을 수행하였다. 동일한 공정을 이용하여 처리하였을 때 난연효과를 비교하는 것이 응용측면에 실용적인 것으로 판단하였으며, 처리 방법에 따른 코팅층 두께의 변화나 차이에 대해서는 고려하지 않았다.

2.4 난연성 평가

2.4.1 수직연소시험

수직연소시험은 난연 처리가 끝난 대나무 섬유를 UL94 규격에 따라 300 mm × 65 mm의 크기로 자른 후 수직으로 고정시키고 하단에 불을 붙여 진행하였다. 섬유 하단에 10초 동안 화염을 가하고, 불이 붙지 않았을 경우에는 다시 10초를 가한 후 자가소화 되었을 때의 숯의 길이를 측정한다. 숯의 길이가 짧을수록 화염이 덜 전파되었다는 뜻이므로 난연성이 우수하다고 할 수 있다.

2.4.2 마이크로칼로리미터 시험

마이크로칼로리미터(Micro-Calorimeter)는 미소량의 재료를 연소시켰을 때 발생하는 가스를 분석함으로써 난연성을 평가할 수 있다. 열방출율(Heat Release Rate, HRR)을 난연성을 나타내는 지표로써 사용하며, HRR 값이 작을수록 반응열이 낮다는 의미이므로 난연성이 좋다고 할 수 있다. 본 시험에서는 약 15 mg의 서로 다른 조건으로 표면처리된 대나무 섬유를 장비에 장착하고, 90°C에서 700°C 온

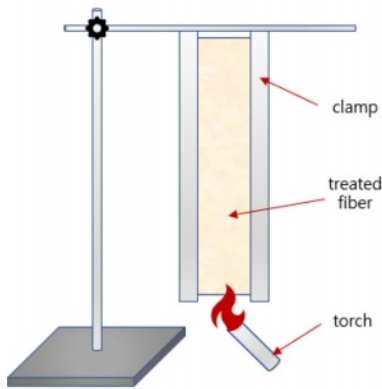


Fig. 6. Schematic diagram of vertical burning test

도를 상승시키면서 이때의 HRR 값을 측정하였다.

2.4.3 신호대 잡음비 분석

신호대 잡음비(Signal to noise ratio, SNR) 분석은 통계적인 방법을 이용하여 유효인자 및 수준을 평가하는 방법이다. 시험을 통하여 측정되는 숯의 길이와 HRR 값은 작을수록 좋은 값이기 때문에 다구찌 시험계획법의 망소특성(smaller is better)을 적용하여 결과값들을 분석하였다.

2.4.4 미세구조분석

주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 난연 처리 전과 후의 섬유표면을 촬영하고 난연 처리에 의한 차이점을 비교 분석하였다.

3. 연구 결과

3.1 수직연소시험 후 숯의 길이

다구찌 기법에 따라 준비된 9 종류의 난연처리 섬유에 대한 수직연소시험 결과는 Fig. 7과 같다. L1 시험편은 완전히 연소되었기 때문에 없으며, 나머지는 왼쪽부터 순서대로 L2~L9 시험편이다.

전분-멜라민 용액으로만 처리된 L1의 경우 불이 붙은 후 26초 만에 작은 불씨까지 모두 연소되었다. 미처리 섬유의 경우 10초 이내에 완전히 연소되는것에 비해서는 난연효과가 있으나 자가소화되지 않고 화염이 지속적으로 확산되면서 완전히 연소하였기 때문에 L1은 천연섬유의 난연제로써 적합하지 않다.

L2부터 L9까지는 모두 숯을 형성하면서 자가소화되어 유의미한 수준의 난연성을 지닌다고 할 수 있다. 시험편 별로 형성된 숯의 길이를 측정한 결과는 Table 5와 같다.

PA가 포함된 L4, L5, L6, L7, L8, L9의 경우 토치로 12초간 화염을 가한 후 제거한 직후부터 더 이상 화염이 번지지 않았다. 또한, PA가 3%일 때보다 6%일 때 자가소화 시점이 약간 더 빠른 것을 확인할 수 있었으며 이는 PA의 함량이 높

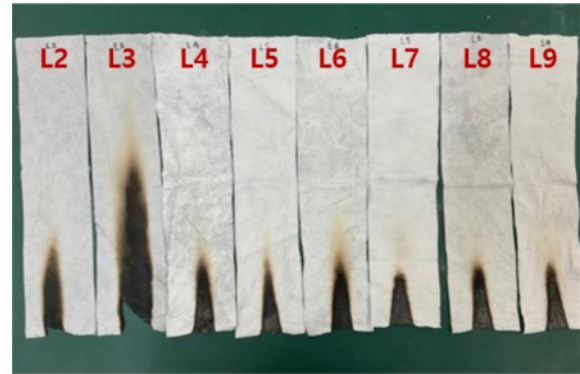


Fig. 7. The results of vertical burning test

Table 5. Measured char length after vertical burning test

Level	PA, APTES, TH (wt.%)	Char length (cm)
L1	(0,0,0)	X
L2	(0,3,3)	18 ± 2.2
L3	(0,6,6)	18 ± 1.6
L4	(3,0,3)	7.5 ± 0.7
L5	(3,3,6)	8 ± 0.6
L6	(3,6,0)	7.5 ± 0.5
L7	(6,0,6)	6.5 ± 0.3
L8	(6,3,0)	7 ± 0.8
L9	(6,6,3)	7 ± 0.4

을수록 난연성이 향상됨을 의미한다. 반면에 PA를 포함하지 않은 L2와 L3의 경우 자가소화를 달성하기는 하였지만, 다른 조합들과 비교하였을 때 상대적으로 난연성이 부족함을 알 수 있었다. PA가 없는 경우만 비교하였을 때 APTES, Thiourea의 함량이 과도한 L3의 경우 12초 화염을 가한 직후에 화염이 23초에 걸쳐 조금씩 확산하다가 자가소화 되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 결과가 APTES와 Thiourea는 전혀 난연화에 기여하지 못한다는 뜻은 아니며, 다른 시험을 통하여 그 영향을 알아보려고 하였다.

3.2 마이크로칼로리미터 시험

Fig. 8은 전체 시험편에 대한 마이크로칼로리미터 시험 결과와 시험결과의 일부를 확대하여 나타낸 것이며, Table 6는 열방출율(HRR) 및 최대열방출율(Peak Heat Release Rate, pHRR)을 나타낸 것이다. 일반적으로 HRR 그래프는 peak 값이 낮고 그래프가 좌우로 넓게 퍼져있을 때 열을 서서히 방출한다는 의미이므로 난연성이 좋다고 할 수 있다.

PA를 포함하지 않아 Peak 값이 매우 높은 L1, L2, L3는 제외하고, L4~L9를 중점적으로 비교하였다. L4~L9의 pHRR은 40(W/g) 이하의 반응열을 보여 전반적으로 난연성이 크게 향상되었으며, 특히 PA가 6% 포함된 L7, L9의 경우 16(W/

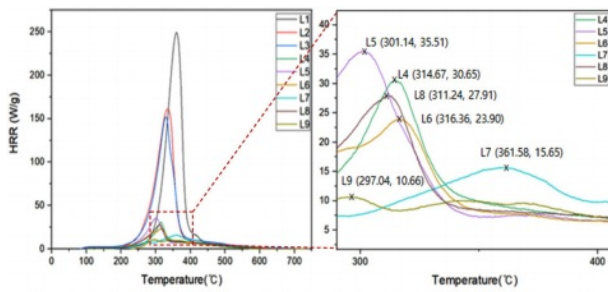


Fig. 8. The results of micro-calorimeter test

Table 6. Load-Displacement graph of tensile test result

Level	PA, APTES, TH (wt.%)	T _{PHRR} (°C)	PHRR (W/g)
L1	(0,0,0)	359.17	249.17
L2	(0,3,3)	334.47	161.33
L3	(0,6,6)	329.62	151.99
L4	(3,0,3)	314.67	30.65
L5	(3,3,6)	301.14	35.51
L6	(3,6,0)	316.36	23.90
L7	(6,0,6)	361.58	15.65
L8	(6,3,0)	311.24	27.91
L9	(6,6,3)	297.04	10.66

g) 이하의 낮은 반응열을 보여 난연성이 매우 우수함을 알 수 있었으며 L9, 즉, PA가 6%, APTES 6%, Thiourea 3%로 난연 처리를 하였을 때 가장 우수한 난연성을 달성할 수 있다.

3.3 미세구조분석

난연성 평가 결과를 바탕으로 난연성이 상대적으로 미흡하였던 L3과 난연성이 가장 우수하였던 L9의 미세구조를 1000 배율로 관찰한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a~c)를 비교해 보면, 전분-멜라민 처리만 된 섬유에 비하여 나머지 두 섬유의 거칠기가 더욱 증가하였음을 알 수 있으며, 특히 Fig. 9(c)의 거칠기가 더욱 거칠고 섬유 전체에서 균일하여 PA가 난연제와 천연섬유간의 표면 결합력 향상에 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 9(d, e)도 이를 뒷받침 한다. 섬유 표면에 부착된 난연제가 적은 Fig. 9(d)는 연소 후에도 표면 변화가 크지 않으나 난연제가 균일하게 분포된 Fig. 9(e)에서는 숯이 균일하게 형성되어 있음을 알 수 있다.

3.4 SNR 분석을 통한 유효인자의 선정

통계 소프트웨어인 Minitab을 이용한 SNR 분석 결과는 Fig. 10과 같다. 여기서 그래프의 상하 진폭이 클수록 난연성에 영향을 많이 주는 인자이며, 절대값 클수록 사용하였을 때 난연성이 우수하다는 뜻이다. 따라서 상하 진폭이 가

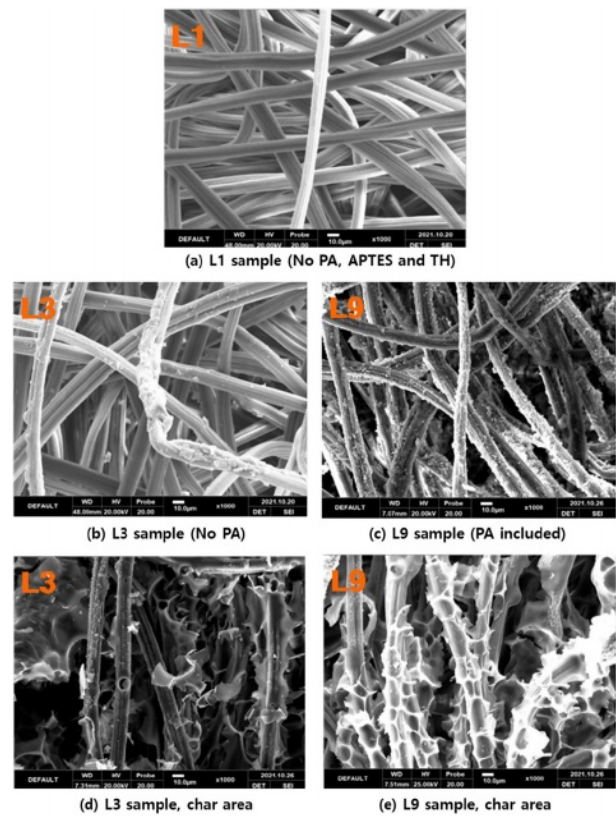


Fig. 9. SEM analysis of the char part of L3 and L9 samples

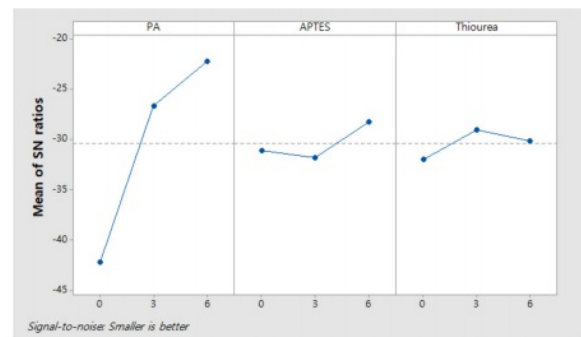


Fig. 10. Main effects plot for SN ratios

장 큰 PA가 난연성을 향상시키는데 가장 큰 영향을 준 주요 인자이며, 첨가량이 증가할수록 난연성이 좋아진다는 것을 알 수 있다. 반면에 APTES와 Thiourea(TH)는 상하 폭이 작아서 난연성 향상에 큰 기여를 하지 못하였음을 알 수 있다. APTES도 PA와 같이 첨가량이 가장 많을 때 난연성이 우수하지만, TH는 3 wt.%만 첨가하였을 때 난연성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 정리하면 PA 6 wt.%, APTES 6 wt.%, TH 3 wt.%를 첨가하여 액상 난연제를 제조하였을 때 천연 섬유의 난연성 향상에 가장 효과적일 것으로 예상된다. 그러나 본 결과는 어디까지나 통계적인 분석 결과이기 때문에 분산분석을 통하여 유효성을 검증하였으며, Lawley-

Hotelling 검정기준에 의해 $P < 0.05$ 로 계산되어, 시험을 통하여 도출된 최적 난연제 비율이 유의한 결과임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 천연섬유의 난연성을 크게 향상시킬 수 있을것으로 예상되는 세 종류의 난연제 PA, APTES, Thiourea를 선정 후 액상 난연제를 제조하고 천연섬유인 대나무 섬유의 난연처리 및 난연성 평가를 수행하였다. 결론은 다음과 같다.

1) 수직연소시험 및 마이크로칼로리미터 시험을 통하여 PA를 함유한 액상 난연제가 천연섬유의 난연성 향상에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

2) 미세구조분석을 통하여 PA가 난연성을 크게 향상시킬 수 있었던 원인은 성분 자체의 난연성 보다는 난연제가 천연섬유의 표면에 고르게 결합할 수 있도록 도와주기 때문임을 알 수 있었다.

3) PA가 천연섬유의 난연성을 향상시키는 주요 인자이기 는 하지만 APTES와 TH도 난연성 향상에 기여하였으며, 최적화된 난연제의 비율은 각각 6 wt.%, 6 wt.%, 3 wt.%이다.

기존연구에서는 천연섬유의 난연성이 부족하거나 난연제가 친환경적이지 않았으나, 본 연구에서는 친환경 난연제를 이용하여 천연섬유의 고난연화를 달성할 수 있었다. 또한 액상 난연제이기 때문에 대량의 천연섬유를 빠르게 난연처리할 수 있어 상용화 측면에서도 유리할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

REFERENCES

1. Lee, D.W., Prabhakar, M.N., and Song, J.I., "A Study on Flame Retardant Treatment on Bamboo Nonwoven Fabric and Manufacturing of Sandwich Structure Composites," *Composites Research*, Vol. 33, No. 6, 2020, pp. 408-414.
2. Kim, J.C., Lee, D.W., Prabhakar, M.N., and Song, J.I., "A Study on the Fabrication and Mechanical Properties Evaluation of Natural Fiber Composites added Eco-friendly Materials," *Composites Research*, Vol. 33, No. 4, 2020, pp. 213-219.
3. Kim, N.K., Dutta, S., and Bhattacharyya, D., "A Review of Flammability of Natural Fibre Reinforced Polymeric Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 162, No. 7, 2018, pp. 64-78.
4. Prabhakar, M.N., Naga Kumar, C., Lee, D.W., and Song, J.-I., "Hybrid Approach to Improve the Flame-retardant and Thermal Properties of Sustainable Biocomposites Used in Outdoor Engineering Applications," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 152, 2022, pp. 106674.
5. Hong, C.S., and Jun, W.J., "Impact and Fire Retardant Properties of Flax Fiber Reinforced Nanoclay Composites by Taguchi Method," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 172, No. 10, 2022, pp. 44-54.
6. Gao, J., Wu, Y., Li, J., Peng, X., Yin, D., Jin, H., Wang, S., Wang, J., Wang, X., Jin, M., and Yao Z., "A Review of the Recent Developments in Flame-retardant Nylon Composites," *Composites Part C: Open Access*, Vol. 9, 2022, pp. 100297.
7. Özer, M.S., and Gaan, S., "Recent Developments in Phosphorus Based Flame Retardant Coatings for Textiles: Synthesis, Applications and Performance," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 171, 2022, pp. 107027.
8. Mensah, R.A., Shanmugam, V., Narayanan, S., Renner, J.S., Babu, K., Neisiany, R.E., Försth M., Sas, G., and Das, O., "A Review of Sustainable and Environment-friendly Flame Retardants Used in Plastics," *Polymer Testing*, Vol. 108, 2022, pp. 107511.
9. Naiker, V.E., Mestry, S., Nirgude, T., Gadageel, A., and Mhaske, S.T., "Recent Developments in Phosphorous-containing Bio-based Flame-retardant (FR) Materials for Coatings: An Attentive Review," *Journal of Coatings Technology*, Vol. 134, 2022.
10. Niu, Q., Yue, X., Guo, Z., Yan, H., Fang, Z., and Li, J., "Flame Retardant Bamboo Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites Regulated by Interfacial Phosphorus-silicon Aerogel," *Polymer*, Vol. 252, No. 14, 2022, pp. 124961.
11. Lods, L., Richmond, T., Dandurand, J., Dantras, E., Lacabanne, C., Durand, J.M., Sherwood, E., Hochstetter, G., and Pontains, P., "Continuous Bamboo Fibers/Fire-Retardant Polyamide 11: Dynamic Mechanical Behavior of the Biobased Composite," *Polymers*, Vol. 14, No. 2, 2022, pp. 299.
12. Chermoshentseva, A.S., Pokrovskiy, A.M., and Bokhoeva, L.A., "Facile Preparation of Layered Melamine-phytate Flame Retardant via Supramolecular Self-assembly Technology," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 553, No. 1, 2019, pp. 364-371.
13. Won, C., Kim, J.W., Lee, D.W., Kim, B.S., and Song, J.I., "Impact and Fire Retardant Properties of Flax Fiber Reinforced Nanoclay Composites by Taguchi Method," *Composites Research*, Vol. 26, No. 3, 2013, pp. 188-194.