



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

PLA 기반 필터 부직포와 Spunbond 및  
Polypropylene 부직포의 조합에 따른  
효율 및 차압 특성 연구



2025년 8월

국립부경대학교 산업대학원

응용화학공학과

전혜민

공학석사학위논문

PLA 기반 필터 부직포와 Spond 및  
Polypropylene 부직포의 조합에 따른  
효율 및 차압 특성 연구

지도교수 이원기

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2025년 8월

국립부경대학교 산업대학원

응용화학공학과

전혜민

# 전혜민의 공학석사 학위논문으로 인준함

2025년 8월 22일



주 심 이학박사 진 영 읊 (인)

위 원 공학박사 권 성 현 (인)

위 원 공학박사 이 원 기 (인)

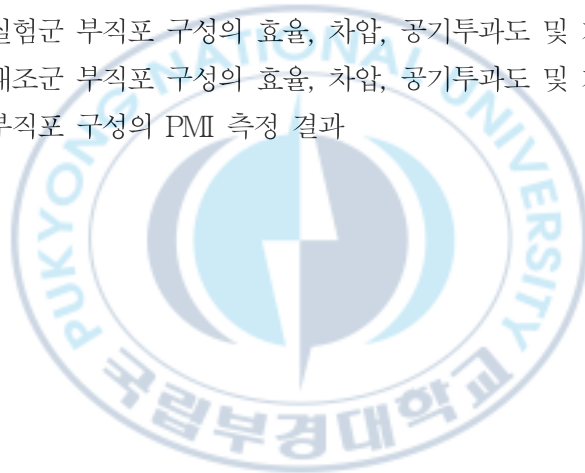
# 목 차

목 차 .....	i
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이론적 배경 .....	5
2-1. Melt-blown 부직포의 제조 방법 .....	5
2-2. Poly(lactic acid) 의 특징 .....	8
2-3. 필터의 여과 메커니즘 .....	1
2-4. 효율과 차압 간의 상관관계 .....	3
제 3 장 실험 .....	15
3-1. 실험 재료 .....	5
3-2. 각 부직포의 성능 측정 .....	6
3-2-1. 여과 효율 및 차압 측정 .....	6
3-2-2. 통기성(공기투과도) 및 물성 .....	9
3-2-3. 전자주사현미경 .....	9
3-2-4. 기공 측정기 .....	10
3-2-5. 시차주사열량 .....	12

제 4 장 결과 및 고찰 .....	23
4-1. 각 부직포의 성능 분석 .....	2
4-1-1. 여과 효율 및 차압 측정 .....	2
4-1-2. 통기성 및 물리적 특성 분석 .....	2
4-1-3. 모폴로지 분석 .....	2
4-1-4. 기공 특성 측정 .....	3
4-1-5. 시차주사열량 분석 .....	6
4-2. 섬유 구성에 따른 필터 성능 분석 .....	4
4-3. 섬유 구성별 성능 분석 .....	4
4-3-1. 효율, 차압 및 통기도 성능 비교 .....	4
4-3-2. PMI 성능 비교 .....	6
4-4. 최적 조합 고찰 및 성능 분석 .....	4
제 5장 결 론 .....	56
참고문헌 .....	58

## List of Tables

- Table 1. 각 소재 1파운드 (약 0.45 kg) 합성 시 발생하는 재원
- Table 2. 산업/보건용 마스크의 등급 및 기준(출처:산업안전보건인증원)
- Table 3. 각 부직포의 여과 효율과 차압 특성
- Table 4. 각 부직포의 통기성(공기투과도) 및 물성 측정 결과
- Table 5. 각 부직포 SEM 섬도 분석 결과 (전체)
- Table 6. 각 부직포 PMI (Capillary Flow Porometer) 분석 결과
- Table 7. 각 부직포 DSC 분석 결과
- Table 8. 샘플 구성 및 명칭
- Table 9. 각 실험군 부직포 구성의 효율, 차압, 공기투과도 및 기본 물성 결과
- Table 10. 각 대조군 부직포 구성의 효율, 차압, 공기투과도 및 기본 물성 결과
- Table 11. 각 부직포 구성의 PMI 측정 결과



## List of Figures

- Figure 1. 생분해성 플라스틱 시장 규모 (2023-2033).
- Figure 2. Melt-blown 부직포 제조 공정 모식도.
- Figure 3. 부직포의 Corona Charging 공정 모식도.
- Figure 4. PLA의 직접 축합 중합 (Direct Polycondensation).
- Figure 5. PLA의 개환 중합 (Ring-Opening Polymerization).
- Figure 6. PLA 개환중합(ROP) 합성 메커니즘.
- Figure 7. 마스크와 에어 필터의 내부 구조.
- Figure 8. PLA Melt-blown 부직포의 생분해도 시험 결과 (FITI시험연구원)
- Figure 9. 입자 투과율(여과 효율, %) 및 차압 테스트기, TSI8130.
- Figure 10. 측정 원리 모식도 (출처 : TSI 8130 매뉴얼).
- Figure 11. 시차주사열량기(DSC).
- Figure 12. PLA Melt-blown 부직포의 섬도 분포도 (SEM).
- Figure 13. PP Melt-blown 부직포의 섬도 분포도 (SEM).
- Figure 14. PP SB 부직포의 섬도 분포도 (SEM).
- Figure 15. PLA Melt-blown의 SEM 사진.
- Figure 16. PP Melt-blown의 SEM 사진.
- Figure 17. PP SB의 SEM 사진.
- Figure 18. PP MB H13, E11 PMI 기공 분포도.
- Figure 19. PLA 부직포의 DSC 그래프.
- Figure 20. PP SB, MB부직포의 DSC 그래프.
- Figure 21. 3겹 구성 샘플 (S1과 R1)의 효율 및 차압 특성.
- Figure 22. 4겹 구성 샘플 (S2, S3, S4, R2 및 R3)의 효율 및 차압 특성.
- Figure 23. 샘플에 따른 통기도.
- Figure 24. 3겹 구성 샘플 (S1과 R1)의 각 PMI 기공 분포도.
- Figure 25. 4겹 구성 샘플 (S2, S3, S4, R2 및 R3)의 각 PMI 기공 분포도.

# Study on Filtration Efficiency and Pressure Drop Characteristics of PLA-based Filter Fabrics Combined with Spunbond and PP Nonwovens

Hye-min Jun

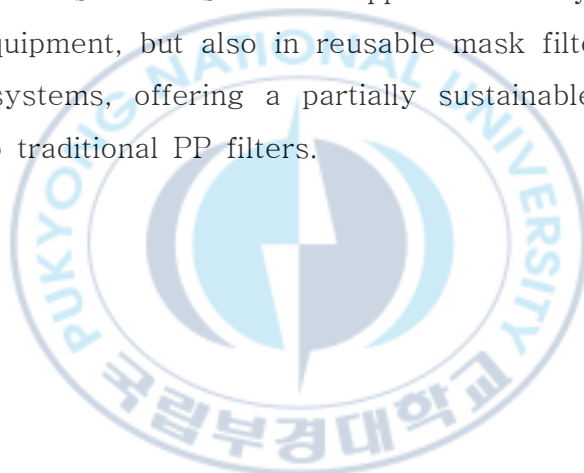
Department of Applied Chemistry and Engineering  
Graduate School of Industry, Pukyong National University

## Abstract

As the demand for masks explodes due to the COVID-19, a huge amount of discarded undegradable masks are being generated. In particular, conventional polypropylene (PP)-based filters are not biodegradable and studies have shown that their several washings significantly reduce the filtration performance due to the loss of electrostatic charge. This increases the demand for sustainable alternatives such as environmentally friendly material. This study investigated that the potential of eco-friendly and biodegradable poly(lactic acid) (PLA) as a core material for filter media filter fabrics were evaluated by combining PLA melt-blown nonwoven fabric with two types of polypropylene (PP) melt-blown filters (H13-grade and E11-grade) and spunbond (SB) layers, SB-PLA-MB(E11)-SB and SB-PLA-MB(H13)-SB. The physical and filtering properties, including filtration efficiency, pressure drop, and air permeability, were analyzed. Structural characteristics were further examined using scanning electron microscopy and particle

measurement analysis.

From the results, the SB-PLA-MB(E11)-SB structure demonstrated the most balanced performance, achieving high filtration efficiency with a low pressure drop of 56.7 Pa. The SB-PLA-MB(H13)-SB showed the highest filtration efficiency with good air permeability, which is suitable for high-performance filtration applications. Although PLA has relatively low electrostatic retention due to its hydrophilic nature, it showed good performance by an optimized multilayer design. These results suggest that PLA-based filter structures can be applied not only in respiratory protective equipment, but also in reusable mask filters, pre-filters, and HVAC systems, offering a partially sustainable and practical alternative to traditional PP filters.





## 제 1 장 서 론

코로나19 팬데믹과 지속적인 환경 오염 문제로 인해 깨끗한 공기와 수질에 대한 필요성이 그 어느 때보다 중요해지고 있다. 특히 의학 및 생물학 분야에서는 살균된 공기가 필수적이며, 여과 기술은 사무실, 가정뿐만 아니라 다양한 운송 수단에서도 공기 질을 개선하는 데 중요한 역할을 한다.[1]

여과 필터용 주요 여과재인 부직포를 제작하는 방사 공정 중 하나인 Melt-blown (MB) 방식은 초극세 섬유를 활용한 에어필터 제조 연구로 시작되었으며, 이후 Polypropylene (PP) 기반의 산업용 제조 기술로 발전하여 널리 활용되고 있다. MB 공정을 통해 제조된 부직포는 마스크 필터, 공기 및 액체 필터, 위생용품과 같은 고기능성 제품에 활용 되고 있다. MB 공정은 용융 점도가 매우 낮은 열가소성 고분자 수지를 미세한 노즐을 통해 방사한 후, 고온·고압의 공기 제트로 연신 및 냉각하여 웹 형성 장치에 적층함으로써 부직포 형태를 형성하는 제조 방법이며, 약 0.8~10  $\mu\text{m}$  직경의 섬유로 구성된다.[2,3]

PP 기반의 MB 섬유는 높은 내구성과 우수한 성능, 가공성을 가지고 있다. 하지만 PP를 포함한 올레핀 고분자는 에틸렌과 프로필렌을 중합하여 만든 고분자로, 높은 안정성이 있으나, 분해되지 않는 특성을 가지고 있다. 코로나19 팬데믹 기간 동안 전 세계적으로 매월 약 3.5억 개의 일회용 마스크가 사용되었으며, 제대로 처리되지 않은 마스크 쓰레기는 미세플라스틱 오염의 주요 원인으로 부각되고 있다. 사용된 마스크는 강한 마모와 노화 과정을 통해 수조 개 이상의 미세 플라스틱을 방출할 수 있으며, 이는 해양 및 토양 생태계에 축적되어 생물군집과 인간 건강에 심각한 위협이 되는 것으로 알려져 있다.[4] 따라서, 지속 가능한 자원 순환을 위해 생분해성 플라스틱에 대한 관심과 기술적·산업적 요구가 급증하고 있다.[5,6]

최근 ESG 경영의 확산과 함께, 이산화탄소 저감형, 생분해성 및 친환경 소재의 수요가 급격히 증가하고 있다. 특히, 2024년 이후 주요 글로벌 블랜드와 정부 기관들은 일회용 플라스틱 규제를 강화하고 있으며, 소비자들 역시 환경 영향을 고려한 제품 소비를 선호하는 경향이 뚜렷해지고 있다. Figure 1과 같이 전 세계

생분해성 플라스틱 시장은 2023년 39억 달러에서 2033년 91억 달러로 성장할 것으로

예상되며, 연평균 성장률(CAGR)은 8.8%에 달할 것으로 예상하고 있다. 또한, 미세먼지와 감염병의 상시화로 인해 고효율 마스크 및 공기정화용 필터에 대한 수요도 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 시장 수요는 단순한 친환경성뿐 아니라, 높은 여과 효율과 낮은 압력 강하라는 필수적인 기능적 요건을 충족하는 제품을 요구한다.[7-9]

최근에는 마스크를 반복적으로 사용하는 소비 트렌드도 증가하고 있으며, 세탁 가능한 마스크에 대한 연구도 다수 이루어지고 있다. 일부 연구에서는 세탁 후에도 먼 섬유의 여과 효율에는 큰 변화가 없었다는 보고가 있으나, N95 마스크의 경우에는 세탁이나 재사용 과정에서 정전기 특성이 손실되어, 미세 입자 (약  $0.3 \mu\text{m}$ ) 에 대한 여과 효율이 98%에서 50% 수준으로 감소한 연구 결과도 확인할 수 있었다.[10-12] 여과 효율은 마스크 성능을 결정짓는 핵심 요소이며, 이를 유지하기 위해서는 정전기 기능의 지속성이 매우 중요하다. 세척 후 재사용 시 여과 성능이 저하되는 현상은 입자 포집 능력의 감소를 의미하며, 이에 따라 제품의 재활용보다는 생분해성 등 친환경 소재 개발에 초점을 맞출 필요가 있다.

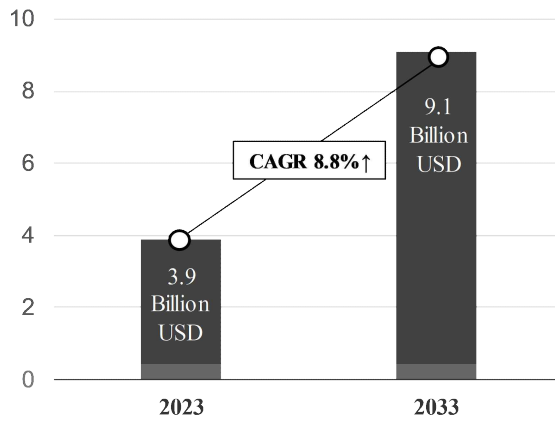
기존 마스크에는 주로 PP 기반의 부직포가 사용되었으나, 환경적 지속 가능성과 친환경 요구가 증가함에 따라 Poly(lactic acid) (PLA) 기반 MB 부직포로의 전환이 부분적으로 이루어지고 있다. PLA는 재생 가능한 자원에서 유래하여 석유화학 기반의 플라스틱에 비해 이산화탄소 발생량이 적고 생분해가 가능해, 석유 기반 플라스틱의 대안으로 주목받고 있다. 이에 따라 국내외에서도 PLA 부직포에 대한 연구와 적용이 활발히 진행되고 있다.[13,14]

일반적으로 사용되는 비분해성 MB 부직포와 달리 PLA MB 부직포는 원료가 재생가능하고 생분해성이 있어 수명이 다한 후에도 매우 환경친화적이다. 그러나 PLA MB 부직포의 성능과 물리적 특성은 일반적으로 상업적 응용 분야에 충분하지 않다. 따라서, 이를 보완하지 않으면 PLA

기반 부직포가 상업적으로 경쟁력을 갖추기 어렵다.[15-17]

따라서 본 연구의 목적은 PLA 부직포와 기존 PP 기반 부직포를 다층 구조로 결합하여, 여과 효율과 차압 성능을 비교하고 최적의 조합을 도출하는 데 있다. 이를 통해 부분적 친환경성과 성능을 동시에 만족시키는 필터 구조를 연구하고자 한다. 특히, PLA 부직포가 갖는 구조적 특성과 이를 보완하기 위한 다층 조합의 영향을 분석함으로써 PLA의 실질적 적용 가능성을 분석하였다.





Source : Future Market Insights (FMI)

Figure 1. 생분해성 플라스틱 시장 규모 (2023-2033).



## 제 2 장 이론적 배경

### 2-1. Melt-blown 부직포의 제조 방법

MB 기법은 폴리머를 용융상태에서 초미세 섬유로 변환해 부직포를 생산하는 데 최적화된 기술로서, 기기는 Hopper, Extruder, Die, Collector와 같은 구성으로 이루어져 있다. 그리고 최종 제품의 여과 효율 성능을 높이는 Charging 기술을 적용하는데, Hydro Charging 또는 Corona Charging 기술 등이 있다. 아래 Figure 2에 MB 부직포 제조 공정의 모식도를 나타내었다.

첫 번째로, Hopper는 폴리머 원료(PLA, PP 등)를 저장하고, 중력이나 스크류 피더를 통해 Extruder로 공급한다. 원료는 주로 펠렛 형태로 투입된다. Hopper를 통한 안정적인 원료 공급은 부직포 성능의 생산 품질을 결정하는 중요한 요소이다.

두 번째로, Extruder는 열가소성 폴리머를 용융하고, 압력을 가해 노즐(Die)로 보내는 역할을 한다. 히터로 폴리머를 녹이는 데 필요한 열을 공급한다. PLA의 경우 약 150 - 190 °C의 온도가 사용된다. 폴리머가 균일한 상태로 용융되지 않으면, 노즐을 막거나, 균일하지 못한 성능의 부직포가 제조될 수 있다.

세 번째로, Die (노즐)은 용융된 폴리머를 초미세 섬유 형태로 방사하는 역할을 한다. Die는 다수의 작은 구멍(보통 0.2 ~ 0.5 mm)을 포함하며, 이를 통해 용융 폴리머가 방출된다. 압축 공기가 Die와 함께 사용되어 폴리머를 길게 늘리면서 연신에 의해 섬유 직경을 줄이고 배향성을 높이는 역할을 한다.

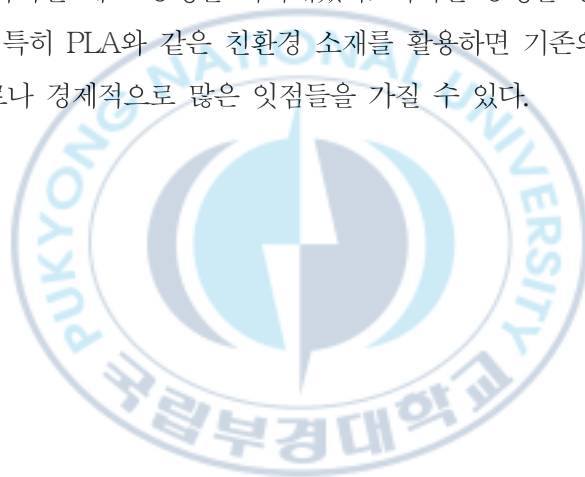
네 번째로, Collector는 Die를 통해 방사된 초미세 섬유를 회전식 드럼 또는 고정된 컨베이어 벨트 위에 쌓아 부직포를 형성하는 구간이다. 섬유 적층은 무작위로 이루어지며, 이를 통해 공극률이 높은 부직포가 형성된다. 컨베이어 벨트 가동 속도와 Die와 컨베이어 벨트 간격을 조절해 부직포의 두께와 밀도를 제어할 수 있다.

마지막으로, 부직포의 여과 효율에 큰 영향을 주는 Charging 단계 중,

Hydro Charging은 고압의 물을 부직포 표면에 분사하여 전기적 하전을 생성하는 방식이다. 섬유에 정전기를 부여하여 미세 입자를 포집하는 능력을 높일 수 있다. 이 방식은 친환경적이며 화학 물질을 사용하지 않는다. 이 방식은 콜렉터 이후 공정에 배치된다.

Corona Charging의 경우, 고전압 전기를 부직포에 방전시켜 섬유에 정전기를 부여한다. 전기장에 의해 섬유가 하전 되어 미세 입자를 잡아내는 성능이 향상시킬 수 있다.[18]

본 연구에 사용된 PLA MB 부직포의 경우, 특별한 Charging을 하지 않은 상태로 생산한 이후, Corona Charging을 통해 정전기 성능을 부여하였으며, Figure 3에 대략적인 제조 공정을 나타내었다. 이러한 공정을 통해 고성능의 부직포가 생산되며, 특히 PLA와 같은 친환경 소재를 활용하면 기존의 비분해성 제품에 비해 환경적으로나 경제적으로 많은 잇점들을 가질 수 있다.



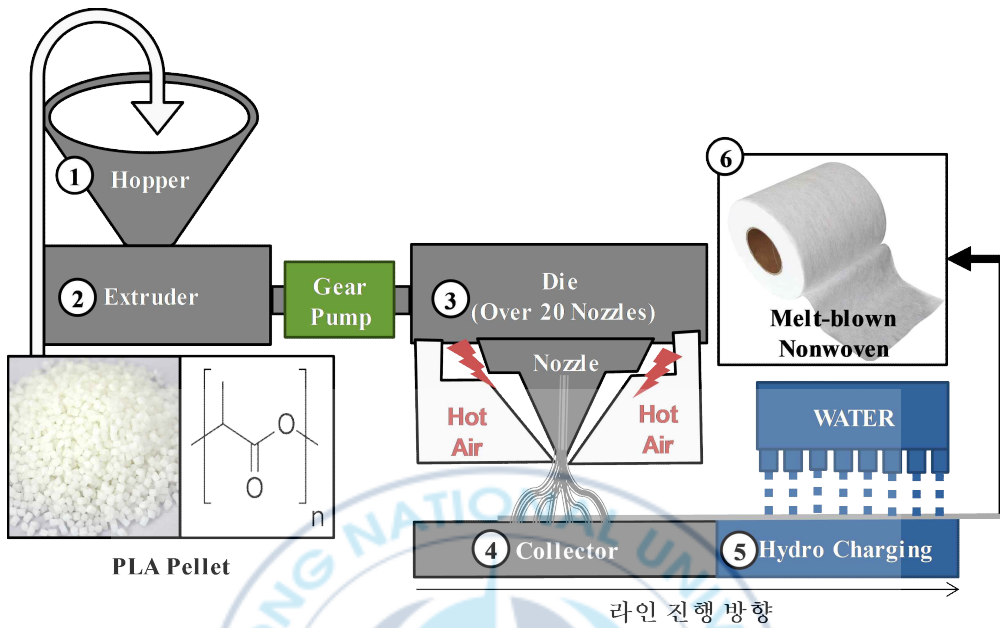


Figure 2. Melt-blown 부직포 제조 공정 모식도.

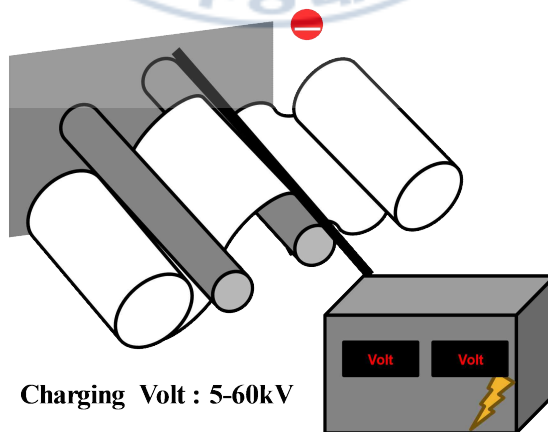


Figure 3. 부직포 Corona Charging 공정 모식도.

## 2-2. Poly(lactic acid)의 특징

Poly(lactic acid) (PLA)는 옥수수, 사탕수수 등에서 얻은 젖산 (lactic acid,  $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$ )의 카복실기(-COOH)와 하이드록시기(-OH)가 축합중합하여 에스터 결합(-CO-O-)을 가진 고분자를 생성하거나 젖산을 2량화한 고리형 락타이드(Lactide)를 개환중합(Ring-Opening Polymerization, ROP)하여 중합하는 열가소성 고분자이다. 100% 재생 가능한 자원에서 유래하여, 최종 고분자 생성이 발생하는 이산화탄소 배출량이 낮고 생분해가 가능하기 때문에 환경 친화적인 소재로 평가받는다.[19,20]

범용 고분자와 비교하여 PLA는 제조 공정에서 요구되는 에너지 및 환경적인 측면에서도 우수한 특성을 나타낸다. Table 1의 비교 데이터에 따르면, PLA 생산하는데 소요되는 에너지와 이산화탄소 배출량을 고려할 때 범용고분자 대비 30-70% 탄소저감 효과를 나타낸다고 알려져 있다.[21,22]

PLA의 합성은 주로 다음 두 가지 방법으로 이루어진다. 첫 번째로, 젖산 분자들이 축합 반응을 통해 에스터 결합을 형성하면서 고분자가 생성되는 것을 직접축합중합(Direct Polycondensation)이라 하며, Figure 3에 나타내었다. 두 번째로, 락타이드 개환 중합(ROP)은 젖산이 먼저 락타이드(Lactide)라는 고리형 이량체로 전환된 후, 금속 촉매(Lewis Acid) 하에 개환 중합된다. 이 과정은 높은 분자량의 PLA를 생산하는 데 적합하며, 주로 산업적으로 사용된다. Figure 4와 5에 중합 과정들을 나타내었다.[23,24]

Table 1. 각 소재 1파운드 (약 0.45kg) 제작 시 사용되는 원료

Resin	Energy (kWh)	Emissions (lbs of CO <sub>2</sub> )	Water (L)
PLA	7.39	0.27	31.38
PP	9.25	1.7	19.53
PET	10.17	2.8	28.16
EPS	11.17	2.5	77.71

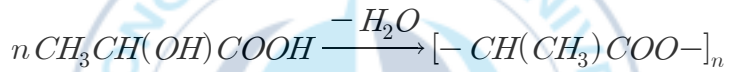


Figure 4. PLA의 직접 축합 중합 (Direct polycondensation).

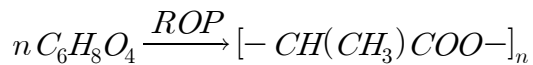


Figure 5. PLA의 개환 중합 (Ring-opening polymerization).

따라서, 전체 과정을 다시 설명하면, 옥수수에서 추출된 전분(Starch)을 원료로 사용한다. 가수분해(Hydrolysis)를 통해 전분을 단당류인 포도당(D-glucose, dextrose)으로 변환한 후, 발효(Fermentation) 과정을 거쳐 포도당이 젖산으로 전환된다. 이후, 젖산 분자들이 탈수 축합 반응을 통해 고리화(Cyclization)되어 락타이드를 형성한다. 마지막으로, 락타이드가 개환중합을 통해 고분자인 PLA로 중합된다. 얻어진 PLA는 칩 형태로 가공되며, Melt-blown 공정을 이용해 PLA 부직포 부직포를 제작한다.

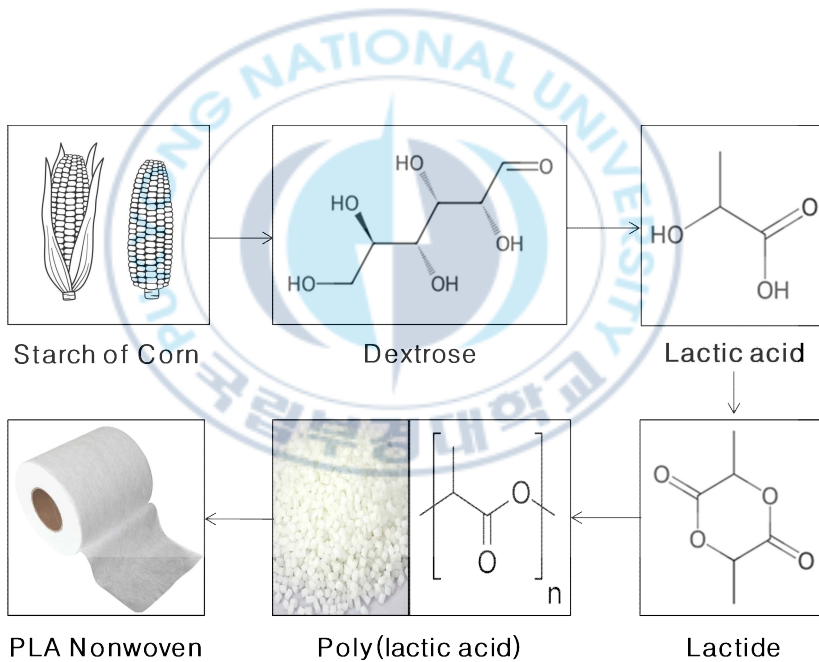


Figure 6. PLA 개환중합(ROP) 합성 메커니즘.

## 2-3. 필터의 여과 메커니즘

현재 필터와 마스크 제조에 가장 많이 사용되는 조합은, PP 부직포 부직포(Melt-blown, MB 또는 M)과 Spunbond(SB 또는 S)계열의 부직포를 Laminating 한 것이다. 이러한 조합은 여과 효율, 통기성, 차압(Pressure drop) 등의 성능을 고려하여 설계되었으며 각각의 구성부직포들은 특정한 역할을 수행한다.

SB 부직포는 섬유가 비교적 굵고 강도가 높아, 필터 및 마스크의 구조적 안정성(강도 및 내구성)을 확보하는 역할을 한다. SB 부직포 자체는 기공이 크고 섬유 간 간격이 넓어, 여과 효율(Filtration Efficiency) 및 차압(Pressure Drop)에 직접적인 영향을 미치지 않는 경우가 많다. 따라서 주로 필터나 마스크의 겉면과 안쪽 면(내피 및 외피)으로 사용되며, 물리적인 보호막 역할을 수행한다. 이렇게 조합한 구조를 SMS (Spunbond / Melt-blown / Spunbond) 라고 하며, 외피 SB가 기계적 강도와 내구성을 제공하고, 내부 MB는 높은 밀도와 미세 섬유로 미세먼지 포집을 담당하기도 한다.[25]

반면, MB 부직포 부직포는 제품의 여과 성능을 결정하는 가장 핵심적인 요소이다. 이 부직포는 직경이 0.8 ~ 10  $\mu\text{m}$  수준의 미세한 섬유들로 구성되어 있으며, 고밀도의 섬유 배열을 통해 미세 입자를 포집하는 기능을 한다. 또한 후가공으로 정전기 충전(Electrostatic Charging) 공정을 거쳐, 미세먼지를 효과적으로 포집할 수 있는 특성을 가지게 된다. 이러한 차징 공정의 다른 장점으로는 필터 질량이나 밀도를 증가시키지 않고도 여과 효율을 향상시키고, 차압이나 공기 투과도 성능을 유지하고 여과 효율을 향상시킬 수 있다.[26]

따라서, 마스크 및 필터의 전체 성능은 MB 부직포의 물성에 의해 결정되며, SB 부직포는 이를 보완하는 보조적 역할을 수행한다. 따라서, 고성능 필터를 개발하기 위해서는 부직포의 물성을 최적화하는 것이 가장 중요하다.

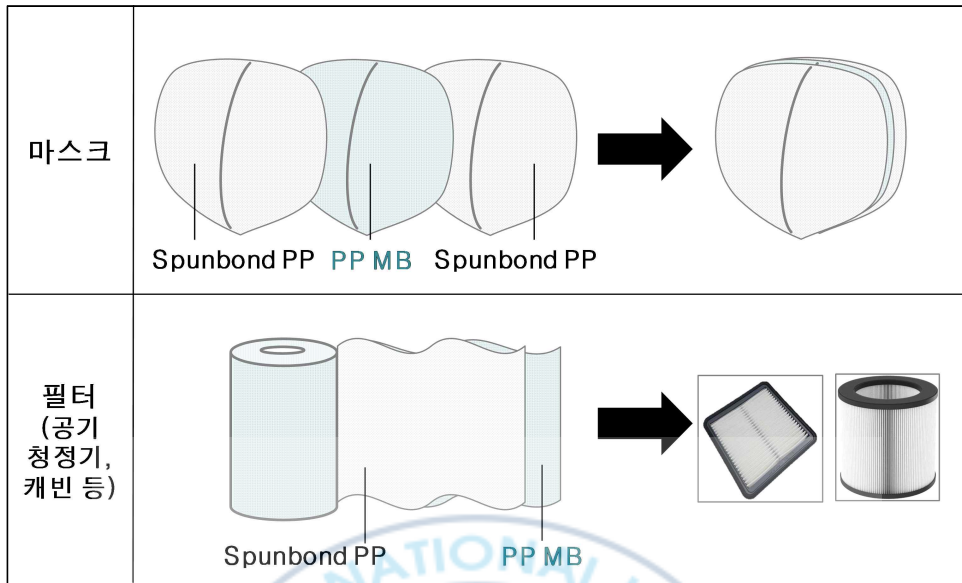
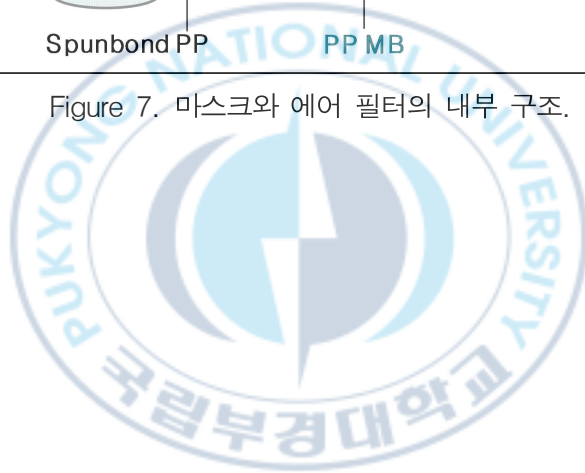


Figure 7. 마스크와 에어 필터의 내부 구조.



## 2-4. 효율과 차압 간의 상관 관계

마스크, 필터 등에 사용되는 부직포의 성능은 주로 여과 효율과 차압이 중요한 판단 기준으로 사용된다. 여과 효율은 공기나 액체가 부직포를 통과할 때 불순물이나 입자가 얼마나 효과적으로 차단되는지를 나타내는 지표이며, 차압은 유체가 필터를 통과할 때 발생하는 압력 강하를 의미한다. 이 두 요소는 서로 밀접하게 연관되어 있으며, 부직포의 구조나 제조 조건에 따라 상호 영향을 미친다.

MB 형태로 부직포를 제조할 때, 방사 조건, 공정 조건, 첨가제 부가 등 다양한 방법으로 성능을 조절할 수 있다. 또한, 제조가 완료된 부직포의 구성을 조절하는 것만으로도 여과 효율과 차압을 개선할 수 있다. 예를 들어, 부직포의 두께나 미세구조를 변경하거나, 여러 층을 겹쳐서 사용할 경우 여과 효율은 향상될 수 있다. 이는 여과면적이 넓어지고, 더 많은 입자가 걸러지기 때문이다. 그러나 이러한 구조 변화는 차압을 증가시킬 수 있는 단점도 있다. 부직포의 두께가 증가하거나 여러 층으로 구성될 경우, 유체가 필터를 통과할 때 더 많은 저항을 받게 되어 차압이 상승한다.[27] 차압이 너무 높으면, 마스크를 착용한 사람이 호흡하기 어려워지거나, 필터가 사용하는 시스템에서 에너지 소비가 증가하고 소음이 유발될 수 있다. 예를 들어, 필터의 차압이 너무 높으면 공기 흐름이 저하되어 팬이나 모터에 부담을 주어 소음이 발생하고, 장기적으로는 장비의 수명이 단축될 수 있다. 또한, 마스크의 경우 차압이 높아지면 착용자의 호흡이 어려워져 불편함을 초래할 수 있다. 따라서, 여과 효율을 높이면서 차압을 최소화하는 균형을 맞추는 것이 중요하다. 이를 위해서는 부직포의 구조나 다층 구조의 최적화를 통해 여과 성능을 극대화하면서도 차압을 낮게 유지할 수 있는 설계가 필요하다. 예를 들어, 미세한 입자를 필터링할 수 있는 고효율 층을 사용하되, 공기 흐름을 방해하지 않도록 필터의 전반적인 두께나 구멍 크기 등을 조절할 수 있다. 또한, 첨가제를 사용하여 특수한 제조 기술을 통해 더 높은 효율과 낮은 차압을 동시에 달성할 수 있다.

여과 효율과 차압 간의 관계를 최적화하는 것은 마스크나 필터의 성능을 극대화하고, 실용적인 제품을 만드는 데 핵심적인 역할을 한다. 따라서, 이 두 요소 간의 상충되는 특성을 이해하고, 이를 조화롭게 조정하는 것이 중요하다. 보건용 마스크와 산업용 마스크의 효율 및 차압의 기준치는 아래의 Table 2에 나타내었다.

Table 2. 산업/보건용 마스크의 등급 및 기준 (출처:식품의약품안전처)[28]

형태 및 등급		유량 (L/min)	여과효율(%) [분진 포집 효율]	차압(Pa) [안면부 흡기저항]
산업용(안면부)	특급	30	99.0 이상	100 이하
	1급		94.0 이상	70 이하
	2급		80.0 이상	60 이하
산업용(분리식)	특/1/2급		-	50 이하
보건용	KF99		99.0 이상	100 이하
	KF94		94.0 이상	70 이하
	KF80		80.0 이상	60 이하



## 제 3 장 실험

### 3-1. 실험 재료

본 연구에서는 친환경성 부직포인 PLA 부직포 부직포를 베이스로, 다양한 부직포를 조합하여 성능을 분석하고자 한다. 사용된 PLA 부직포는 KS M ISO 14855-1 생분해성 평가 기준에 따라 6개월 이내에 90% 이상의 생분해도를 나타낸 소재를 사용하였다. 이외에 PP 부직포 2종류와 Spunbond (SB) 부직포를 함께 사용하였다. PP 부직포는 H13 등급(효율 99.95%)과 E11 등급(효율 95%)의 2종류를 사용하였다. 먼저, 각 부직포의 개별 성능을 분석한 후, 조합된 구조의 성능을 분석할 것이다. 본 연구에 사용된 모든 부직포는 MB 부직포 제조사로부터 공급받아 실험에 사용하였다.



## 3-2. 각 부직포의 성능 측정

### 3-2-1. 여과 효율 및 차압 측정

에어 필터의 성능을 판단하는 가장 중요한 인자인 부직포 입자 투과율(%) 과 차압(Pa) 성능을 파악하기 위하여 Automated Filter Tester (TSI 8130 (TSI Inc., U.S.A)을 이용하였다. 유량(Flow rate)은 32 L/min으로 설정하여 측정하였다. 측정 단면적은 100.25 cm<sup>2</sup>이고 면속도는 5.3 cm/s 이다. 측정 기기의 사진과 측정 범위 모식도를 Figure 9와 Figure 10에 나타내었다.

국제 표준 ISO 29463-3:2011은 EPA, HEPA 및 ULPA 필터의 시험 방법을 규정하며, 필터 매체의 성능 평가 시 면적당 유속(face velocity)을 5.3 cm/s(0.053 m/s)로 설정하도록 명시하고 있다. 또한, 유럽 표준인 EN 1822-3:2019: 은 고효율 필터의 시험 방법을 다루며, 필터 매체의 시험 시 면적당 유속을 5.3 cm/s로 설정하였다. 따라서 본 시험은 측정 단면적 대비 유량은 32 L/min로 측정하였다.

$$Q = V \times A$$

Q: 유량 (Flow rate, L/min 또는 m<sup>3</sup>/s)

V: 유속 (Face velocity, m/s)

A: 필터 면적 (Filter area, m<sup>2</sup>)

측정 원리는 에어로졸의 분진 입자인 Oil 입자 (mass 평균 입경 0.33 μm) 또는 NaCl 입자 (mass 평균 입경 0.26 μm)를 상층부에서 하층부로 흘러보내 Filter 통과 전, 통과 후의 에어로졸 입자 수를 측정하여 포집 능력과 차압을 평가한다. 에어 필터의 입자 제거 성능을 평가할 때 NaCl 또는 Paraffin Oil 에어로졸을 사용하는데, Paraffin Oil은 유성(기름성)입

자료, 산업용 필터 혹은 ULPA 필터 (Ultra Low Penetration Air, 0.1  $\mu$  m 이상의 미립자를 99.9995% 이상 제거하는 초고성능 공기 필터) 성능을 평가할 때 주로 사용하고, NaCl은 수용성 입자로, 주로 미세먼지 필터 평가에 사용한다.

본 연구에서는 EN1822 / ISO29463 시험 규정은 MPPS(Most Penetrating Particle Size, 가장 잘 통과하는 입자 크기) 기준으로 평가하므로, NaCl 입자에 대한 성능을 평가하였다. 사용한 기기는 측정 효율성은 최대 99.999%, 침투율은 최대 0.001% 단위까지 측정이 가능하며, 아래의 식을 기반으로 계산된다.

$$P(\%) = \frac{C_1 - C_2}{C_2} \times 100$$

P: 필터의 투과율(%)

C1: 필터 통과 전의 NaCl 농도( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

C2: 필터 통과 후의 NaCl 농도( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

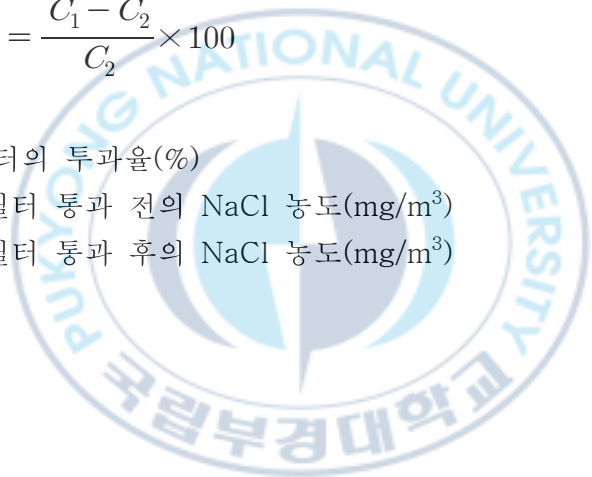




Figure 9. 입자 투과율(여과효율,%) 및 차압 테스트기 (TSI8130).

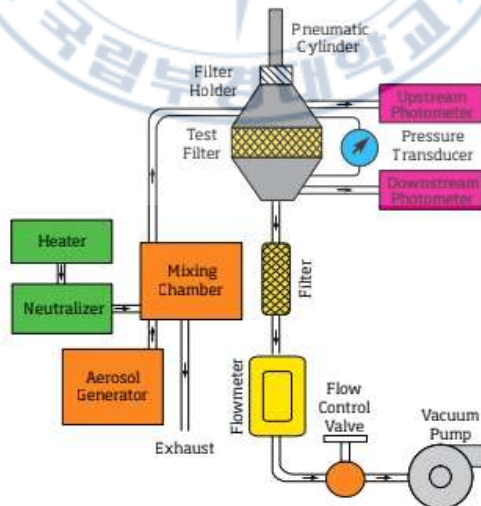


Figure 10. 측정 원리 모식도 (출처 : TSI 8130 매뉴얼).

### 3-2-2. 통기성(공기투과도) 및 물성 측정

공기투과도 시험은 부직포의 일정 면적에 수직으로 공기를 통과시켜 일정 시간 동안 일정 면적에 대하여 투과된 공기량과 공기 흐름 속도를 측정하는 방법이다. 실험 장비는 FX-3000 (TEXTTEST Instruments, Switzerland)를 사용하였으며, 시험 면적은 38 cm<sup>2</sup>, 시험 압력은 125 Pa이며 측정 단위는 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>/s이다. 시험 방법은 시료를 표준 상태에서 컨디셔닝 한 후, 시험편이 뒤틀어지지 않도록 과시한다. 한가지 시편을 동일 조건 하에서 다른 위치를 여러 번 측정하여 평균값을 나타내었다.

평량은 단위 면적당 부직포 중량(단위 : g/m<sup>2</sup>)을 의미하며, 시험 규격 : KSK ISO 9073-1에 따라 유효 숫자 1자리까지 표기한다. 시편은 10 cm X 10 cm 사이즈로 절취한 뒤, 평량을 측정한 뒤 단위(g/m<sup>2</sup>)에 맞추어 계산한다. 부직포의 두께(단위: mm)는 시험규격 KSK ISO 9073-2에 따라 10번 측정값의 평균값을 계산하여 유효 숫자 2자리까지 표기하였다.

### 3-2-3. Scanning Electron Microscope 측정

주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM), (FE-SEM, JSM-7800F, JEOL Ltd., Japan)은 가느다란 전자빔을 시료 표면에 주사시켜 2차 전자를 발생하게 하여 입체감 있는 시료의 표면상을 얻기 위한 장치이다. 이러한 표면상을 관찰하면 시료의 고체 상태에서 작은 크기의 미세 조직과 형상 등을 평가할 수 있다. SEM을 통해 필요한 정보인 이미지나 섬도의 측정을 위해서 SEM의 전자빔이 시료에 영향을 미치지 않도록 전처리 과정이 필요하다.

전처리를 위하여, 백금 코팅기 (Gressington Scientific Inc., U.K.)를 이용하여 20 mA, 90초 동안 부직포 표면을 백금 코팅 후, 주사전자현미경을 통해 섬유 형태를 관찰하였다.

### 3-2-4. 기공 측정기 (PMI, Capillary Flow Porometer)

여과 필터 및 부직포 소재의 성능을 평가하는 중요한 요소 중 하나는 기공 크기와 분포이다. 기공 크기는 필터의 여과 효율, 공기 및 유체의 투과성, 오염 물질 제거 성능 등에 직접적인 영향을 미친다. PMI Capillary Flow Porometer를 이용하여 부직포 및 필터 소재의 기공 구조를 분석하고, 기공 크기 및 분포가 필터 성능에 미치는 영향을 평가하였다. Capillary Flow Porometer는 기공 내부에 액체를 충전한 후, 점진적으로 가스를 주입하여 기공을 비우는 방식으로 기공 크기를 측정한다. 이는 Laplace 방정식을 기반으로 하며 기공 크기를 계산할 수 있다, 측정 과정은 아래의 두가지 과정을 거친다.

Wet Test(젖은 상태 측정)는 샘플을 습윤성이 높은 액체(일반적으로 Galwick Liquid)로 포화시킨 후, 점진적으로 기체( $N_2$ )를 주입 시킨다. 기체 압력이 증가하면서 기공이 열리기 시작하며, 이때 기공 크기에 따라 열리는 압력이 달라진다.

Dry Test(건조 상태 측정)는 동일한 샘플을 건조한 상태에서 기체를 주입하여 공극을 통한 투과성을 측정한다. Wet Test와 Dry Test의 차이를 분석하여 기공 크기 및 분포를 도출할 수 있다.

Laplace 방정식,

$$D = \frac{4\gamma \cos\theta}{P}$$

$D$  = 기공 직경 ( $\mu\text{m}$ )

$\gamma$  = 액체의 표면 장력 (dyne/cm)

$\theta$  = 액체의 접촉각 (°)

$P$  = 기체 압력 (psi)

### 3-2-5. 시차주사열량(DSC)

PLA 및 PP 부직포의 열적 특성을 비교·분석하기 위해 시차 주사 열량 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 분석을 수행하였다. DSC 분석을 통해 두 소재의 유리 전이 온도( $T_g$ ), 용점( $T_m$ ), 결정화 온도( $T_c$ ) 및 열적 거동을 확인하여 각 소재의 가공성과 응용 가능성을 평가하고자 한다. DSC 분석은 TA Instruments/SDT650을 사용하여 수행하였으며, 온도 범위는  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온 속도로 질소 분위기 하에서 측정하였다.

DSC 분석을 통해 PLA 부직포의  $T_g$ ,  $T_c$ ,  $T_m$ 을 확인함으로써 부직포의 열적 거동 및 결정화 정도를 파악할 수 있으며, Melt-blown 공정에서 형성된 미세 기공 구조의 열적 안정성에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 특히, PLA의 경우  $T_g$  및  $T_c$  영역에서 분자 이동성과 비결정성 구조 형성 여부를 확인하여, 필터 부직포의 기계적 강도 및 차압 특성을 최적화하는 데 중요한 데이터를 제공한다. PP Melt-blown 부직포의 경우, DSC 분석을 통해  $T_m$  및 결정화 거동을 분석하여 부직포의 열적 안정성을 평가할 수 있다. PP는 결정성이 높은 고분자로, Melt-blown 제조 공정에 따라 결정화 정도 및 열적 안정성이 달라진다. 이를 통해 필터의 내열성 및 기계적 강도를 예측하고, 공정 조건 최적화 및 품질 관리에 활용할 수 있다. 따라서, PLA 및 PP 부직포의 DSC 분석은 Melt-blown 필터 소재의 열적 안정성 및 구조적 강도에 대한 정보를 제공할 수 있다.



Figure 11. 시차주사열량기 (DSC).



## 제 4장 실험 결과 및 고찰

### 4-1. 각 부직포의 성능 분석

PLA MB 부직포, H13 등급 PP MB 부직포, E11 등급 PP MB 부직포, PP SB 부직포의 성능을 분석하였다. 각 부직포의 필터 성능 및 물리적 특성 분석 (효율, 차압, 공기투과도, 평량, 두께 등)을 통해 부직포 간 특성 차이를 확인하고, 이를 기반으로 다층 구조 설계 및 최적 조합을 도출하고자 한다. 특히, PLA MB 부직포는 친환경 소재로서 난분해성인 PP부직포의 사용량을 줄여 궁극적으로는 친환경 소재의 활용성을 높이고자 한다. 따라서 다양한 부직포조합의 필터 성능 및 열적 안정성 분석 그리고 기계적 강도 및 내구성을 측정하여 친환경 소재의 활용 가능성을 검토하였다. H13 PP MB 부직포와 E11 PP MB 부직포는 고효율 및 중효율 등급 필터의 미세먼지 제거 성능 및 물리적 특성을 평가하여, 다층 구조 설계 시 최적의 조합을 찾는 기준 데이터로 활용할 수 있다. 마지막으로 PP SB 부직포는 다층 구조의 양측 지지층 역할을 하며, 전체 필터 성능에 미치는 영향 및 구조적 안정성 확보 여부를 평가하는 것을 목적으로 한다.

#### 4-1-1. 여과 효율 및 차압 측정

PLA MB, PP H13 MB, PP E11 MB, PP SB 부직포의 여과 효율 및 차압을 TSI 8130 장비를 이용하여 측정하였다. 각 부직포별로 5회 반복 실험을 통해 평균값을 도출하였으며, 결과는 아래 Table 2에 나타내었다.

PLA MB 부직포는 평균 효율 81.38%, 차압 44.6 Pa로, 비교적 낮은 여과 효율과 높은 차압을 나타냈다. 이는 PLA 소재의 섬유 구조 및 기공 형태에 기인한 것으로 판단된다. 특히 PLA는 친수성(hydrophilic) 고분자로 흡습성이 높아, 표면에 정전기를 부여하는 Charging 공정을 거친 후에도 흡수된 수분에 의해 전하가 빠르게 소실될 수 있다. 이로 인해 NaCl 에어로졸을 이용한 여과 효율 측정에서 정전기적 포집 성능이 감소하고, 결과적으로 PP에 비해 낮은 여과 효율을 보일 수 있다.[29] 이러한 한계는 정전기 하전 안정성을 높이는 기술이나, 다층 구조 설계를 통해 개선할 수 있을 것으로 보인다.

반면, PP는 소수성(hydrophobic)이며 비극성 특성을 지니고 있어 일렉트렛(Electret) 특성 유지력이 높고, 전하를 안정적으로 오랫동안 보유할 수 있어 미세입자 포집에 유리한 구조를 가진다. 이러한 차이는 실험 결과에서 뚜렷하게 드러났으며, PP H13 MB 부직포는 평균 효율 99.99%, 차압 25.3 Pa로 가장 우수한 여과 성능을 나타내었다. 고효율 H13 등급 필터로서 상용화 가능성을 충분히 보여준다.

PP E11 MB 부직포는 평균 효율 95.98%, 차압 9.9 Pa로, 중효율 필터로서의 우수한 성능을 입증하였다. 또한, PP SB 부직포는 여과 성능보다는 구조 지지층 역할로 활용되며, 평균 효율 7.19%, 차압 0.8 Pa로 측정되었다. 비록 여과 효율은 낮으나, 다층 구조 내 안정성과 통기성 확보를 위한 보조 층으로 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

Table 3. 각 부직포의 여과 효율과 차압 특성

품명	구분	TSI 8130	
		여과 효율 (%)	차압 (Pa)
PLA MB	1	80.2602	44.4
	2	80.7477	45.1
	3	81.4776	44.1
	4	83.1606	45.0
	5	81.2554	44.1
	평균	<b>81.3803</b>	<b>44.6</b>
PP H13 MB	1	99.9827	24.1
	2	99.9807	23.7
	3	99.9884	25.9
	4	99.9924	27.8
	5	99.9865	24.9
	평균	<b>99.9861</b>	<b>25.3</b>
PP E11 MB	1	96.0206	9.6
	2	95.6517	9.7
	3	95.9161	10.1
	4	96.1523	9.9
	5	96.1995	10.4
	평균	<b>95.9880</b>	<b>9.9</b>
PP SB	1	8.8489	1.1
	2	12.3936	0.9
	3	2.5484	0.7
	4	6.1695	0.8
	5	6.0253	0.7
	평균	<b>7.1971</b>	<b>0.8</b>

## 4-1-2. 통기성 및 물리적 특성 분석

본 연구에서는 PLA MB, PP H13 MB, PP E11 MB, PP SB의 통기성(공기투과도)을 측정하여 여과 성능 및 차압과의 관계를 분석하였다. 공기투과도는 부직포를 통해 공기가 통과하는 정도를 나타내며, 일반적으로 여과 효율이 높을수록 공기투과도는 낮아지고 차압은 증가하는 경향을 나타내었다.

측정 결과로부터 PLA MB는 평균  $15.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ , PP H13 MB는  $26.9 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ , PP E11 MB는  $67.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$  그리고 PP SB는  $376.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ 로 나타났다. PLA MB는 가장 낮은 공기투과도를 보이며, 이는 상대적으로 미세한 섬유 구조와 균일한 기공 분포로 인해 공기 흐름이 제한되었기 때문으로 판단된다. 반면, PP SB는 가장 높은 공기투과도를 나타내었으며, 이는 섬유가 굵고 기공 크기가 크기 때문으로 보인다. PP H13 MB는 PLA MB보다 높은 공기투과도를 가지며, 필터로 적용될 경우 상대적으로 낮은 차압을 가질 것으로 예상된다. PP E11 MB는 PP H13 MB보다 공기투과도가 높아, 더 낮은 차압을 유지할 수 있으나, 기공 크기에 따라 여과 효율이 영향을 받을 수 있다. 이러한 결과를 통해, 공기투과도는 부직포의 섬유 구조 및 기공 크기와 밀접한 관련이 있으며, 이를 고려하여 원하는 여과 성능과 차압을 조절할 수 있음을 확인하였다. 결과를 참고하여, 적절한 공기투과도를 유지하면서도 높은 여과 성능을 확보할 수 있도록 다층 구조 설계 및 소재 조합이 중요할 것으로 판단된다.

Table 4. 각 부직포의 통기성(공기투과도) 및 물성 측정 결과

품명	구분	기본물성		
		통기도 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ )	중량 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	두께 (mm)
PLA MB	1	15.5	34.3	0.200
	2	15.7	33.8	0.180
	3	15.6	34.8	0.200
	4	15.5	33.4	0.200
	5	15.4	34.4	0.200
	평균	15.5	34.1	0.196
PP H13 MB	1	27.0	38.3	0.300
	2	27.6	39.2	0.310
	3	26.9	40.4	0.320
	4	26.4	40.6	0.320
	5	27.6	38.3	0.300
	평균	26.9	39.4	0.310
PP E11 MB	1	68.2	39.6	0.430
	2	70.8	38.0	0.420
	3	67.6	40.5	0.400
	4	65.7	39.4	0.410
	5	65.0	39.0	0.420
	평균	67.5	39.3	0.416
PP SB	1	358.0	49.1	0.230
	2	400.0	45.5	0.220
	3	327.0	48.2	0.240
	4	360.0	42.2	0.230
	5	438.0	49.1	0.230
	평균	376.6	46.8	0.230

### 4-1-3. 모폴로지 분석

PLA MB, PP MB, 및 PP SB 샘플의 섬도를 분석하기 위해 전자주사현미경(SEM)을 사용하여 각 샘플의 섬도를 100회씩 측정하였다. PP MB는 표준으로 H13 Grade의 MB 부직포를 측정하였다.

PLA의 경우, 측정된 평균 섬도는 2.02  $\mu\text{m}$ , 최대 섬도는 7.98  $\mu\text{m}$ , 최소 섬도는 0.28  $\mu\text{m}$ 으로 나타났다. Figure 12 에 나타난 분포도를 확인하면, PLA 부직포의 섬유가 PP MB에 비하여 상대적으로 미세하며, 섬도의 분포가 균일한 것으로 보인다.

PP의 경우, 평균 섬도는 2.41  $\mu\text{m}$ , 최대 섬도는 13.73  $\mu\text{m}$ , 최소 섬도는 0.58  $\mu\text{m}$ 으로 나타났으며, PLA보다 약간 큰 섬도를 가졌으나 여전히 미세한 섬유 구조를 보였다. 최대 섬도의 차이는 PP 부직포의 섬유 구조가 일부 더 두꺼운 부분을 포함하고 있음을 시사한다.

SB 부직포는 평균 섬도가 38.58  $\mu\text{m}$ 로, PLA와 PP에 비해 상당히 큰 섬도를 보였으며, 주로 7 $\mu\text{m}$  이상의 섬도 만으로 구성되어 있었으며, 원사 간의 큰 기공이 관찰되었다. 이러한 점이 높은 공기 투과도를 나타낸 것으로 보인다. 최대 섬도는 91.65  $\mu\text{m}$ , 최소 섬도는 35.88  $\mu\text{m}$ 으로 나타났다.

Table 4. 각 부직포 SEM 섬도 분석 결과 (전체)

샘플명	평균 섬도 ( $\mu\text{m}$ )	최대 섬도 ( $\mu\text{m}$ )	최소 섬도 ( $\mu\text{m}$ )
PLA MB	2.02	7.98	0.28
PP MB	2.41	13.73	0.58
PP SB	38.58	91.65	31.88

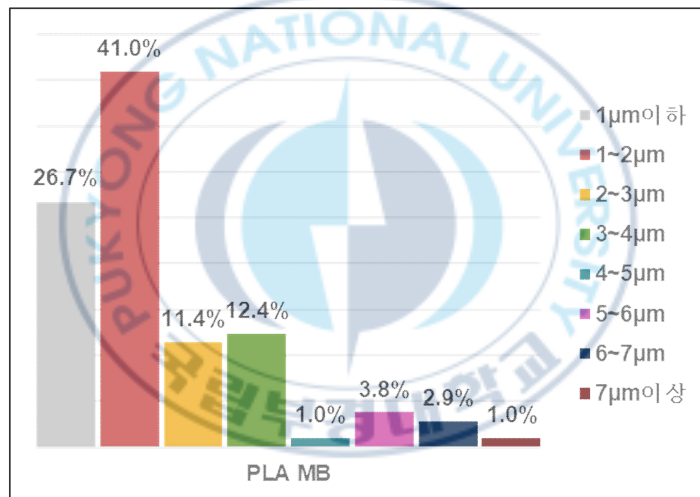


Figure 12. PLA Melt-blown 부직포의 섬도 분포도 (SEM).

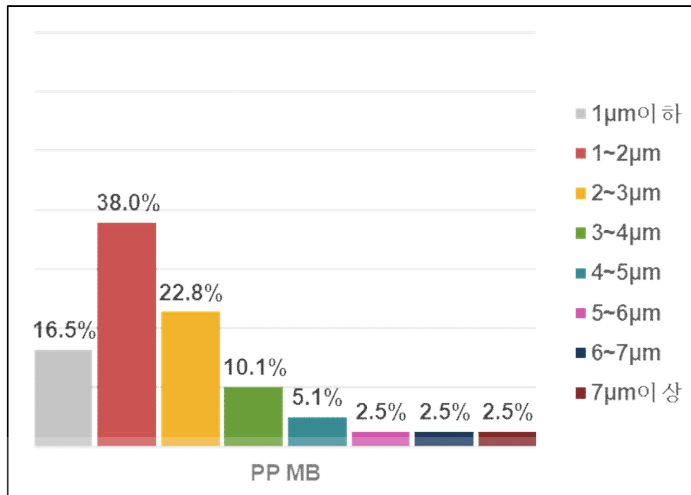


Figure 13. PP Melt-blown 부직포의 섬도 분포도 (SEM).

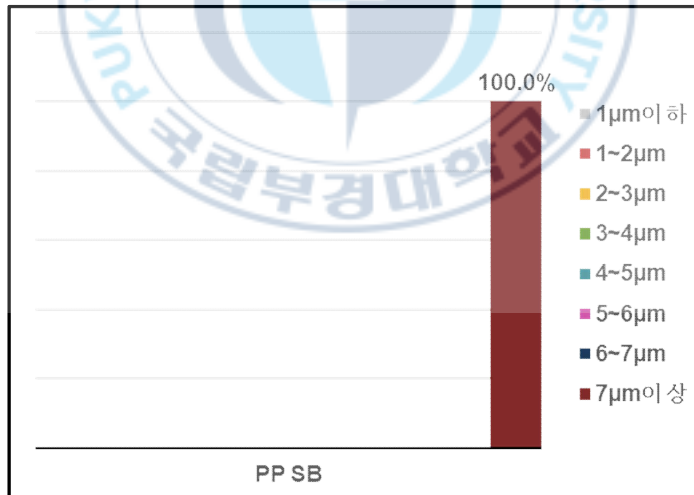


Figure 14. PP SB 부직포의 섬도 분포도 (SEM).

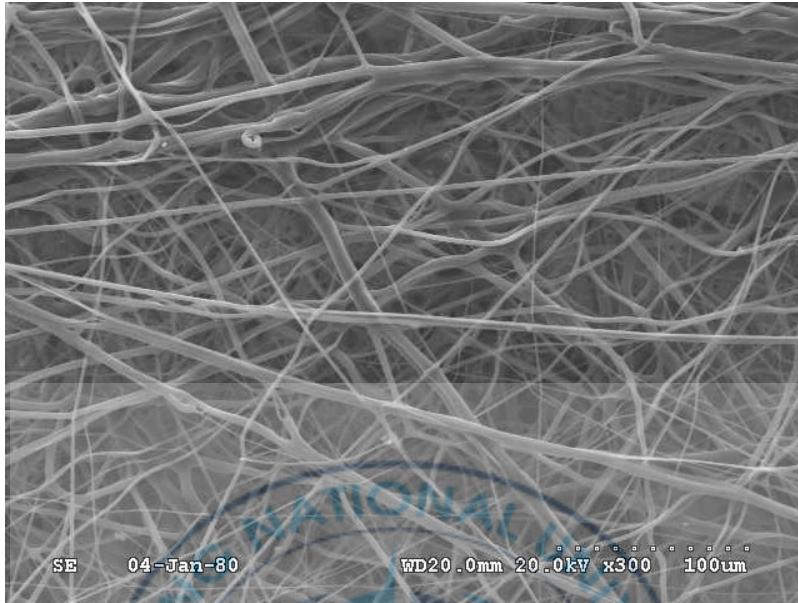


Figure 15. Melt-blown PLA 부직포의 SEM 사진.

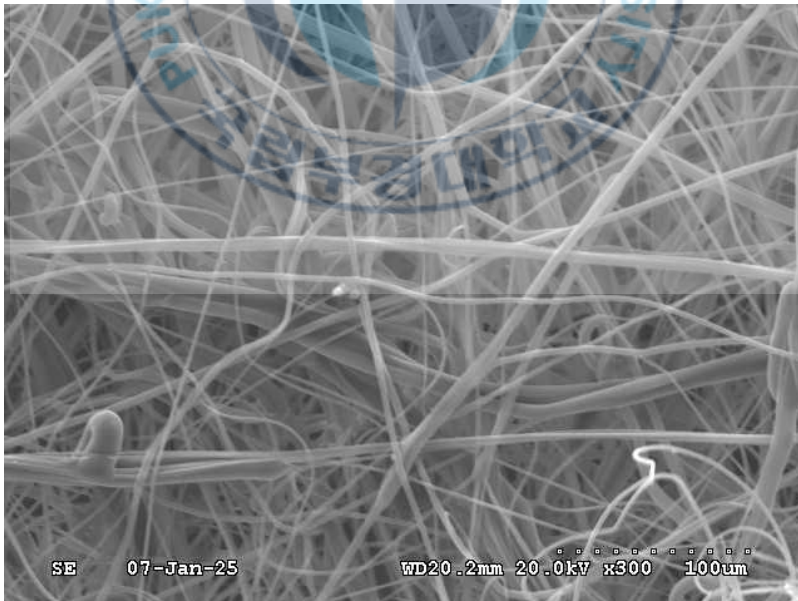


Figure 16. Melt-blown PP 부직포의 SEM 사진.

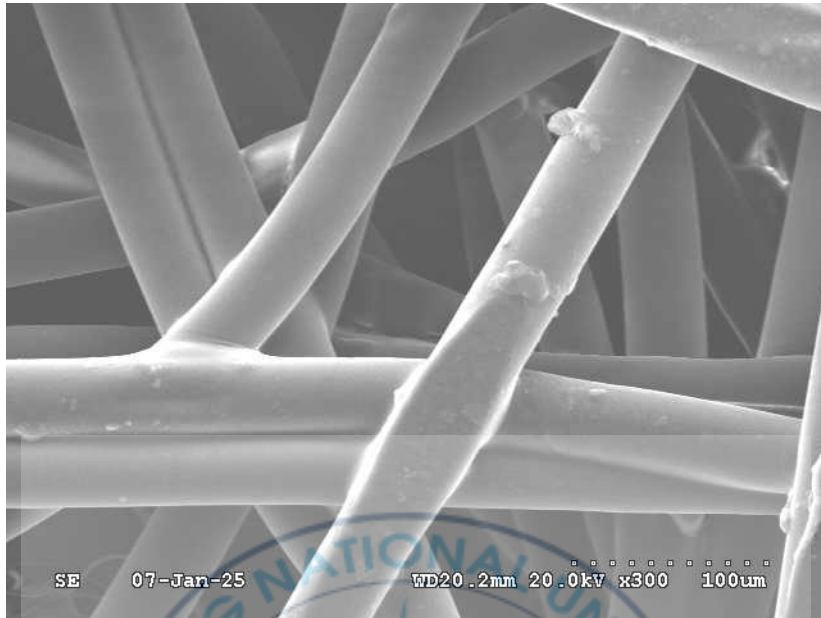


Figure 17. PP SB의 SEM 사진.

#### 4-1-4. 기공 특성 분석

기공 크기 및 분포를 평가하기 위해 PMI Capillary Flow Porometer를 이용하여 PLA MB, PP H13 MB, PP E11 MB, PP SB 부직포의 기공 특성을 측정하였다. 측정 값 중 Mean Pore Size (MP, 평균 기공 크기) 및 Bubble Point Size (BP, 최대 기공 크기)를 분석하였으며, 각 부직포의 결과는 Table 5에 나타내었다.

PLA MB 부직포는 MP 7.7961  $\mu\text{m}$ , BP 16.9971  $\mu\text{m}$ 로, 상대적으로 작은 기공 크기를 나타냈다. 이는 PLA MB 부직포가 섬유 직경이 미세하고 조밀한 구조를 가짐을 의미하며, 일정 수준의 여과 성능을 확보할 수 있음을 의미한다. PP H13 MB 부직포는 MP 12.3074  $\mu\text{m}$ , BP 26.6601  $\mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 이는 고효율 필터(H13 등급)로서의 역할을 고려했을 때 적절한 기공 크기 분포를 보이는 것으로 판단된다. PP E11 MB 부직포의 기공 크기는 MP 24.1910  $\mu\text{m}$ , BP 54.4836  $\mu\text{m}$ 로, H13 MB 부직포보다 더 큰 기공을 가지며, 중효율(E11 등급)의 특성을 반영하고 있다. PP SB 부직포는 MP 152.1890  $\mu\text{m}$ , BP 1581.1909  $\mu\text{m}$ 로, 매우 큰 기공 크기를 나타냈다. 이는 여과보다는 지지층으로서의 역할을 수행하는 데 적합한 것으로 판단된다.

Figure 18에 나타난 Capillary Flow Porometer를 통해, 소재별 여과 메커니즘의 차이를 유추할 수 있었다. 먼저, PLA MB 부직포는 곡선이 매우 뾰족한 형태로 나타났으며, 피크가 급격히 상승한 후 빠르게 감소하는 분포를 보였다. 이는 PLA1 소재의 기공 분포가 매우 좁고 일정함을 의미한다. 대부분의 기공이 약 8~10  $\mu\text{m}$  내외의 특정 범위에 집중되어 있어, 매우 균일한 기공 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 균일한 기공 분포는 정밀 여과가 필요한 응용 분야에 적합한 특성으로, 일관된 입자 포집이 가능하다는 장점이 있다. 다만, 기공 분포가 좁고 밀도가 높을수록 공기의 흐름에 대한 저항이 증가하여, 상대적으로 통기성은 낮을 수 있다. 따라서 PLA MB 부직포는 미세 입자 여과에는 효과적이거나, 장시간 사용 시 호흡 저항이나 압력 손실 등의 문제가 발생할 수 있어 구조 설계의 보완이 필요하다.

다음으로, H13 MB 부직포는 PLA과 비교할 때 곡선의 형태가 상대적으로 완만하고, 분포 폭도 더 넓게 나타났다. 이는 H13 MB 부직포가 다양한 기공 크기를 일부 포함하고 있긴 하나, 여전히 고르게 분포되어 있다는 것을 의미한다. 주요 기공 범위는 약 5 ~ 25  $\mu\text{m}$ 에 분포하며, 이와 같은 중간 수준의 분포 폭은 높은 여과 효율과 함께 비교적 양호한 통기성을 제공하는 구조로 볼 수 있다.

반면, E11 시료는 곡선의 형태가 가장 완만하고 넓은 폭의 분포를 나타냈다. 전체적으로 고르게 퍼진 곡선은 E11 MB 부직포의 기공 크기 분포가 매우 넓고 다양한 크기의 기공이 존재함을 보여준다. 주요 기공은 5  $\mu\text{m}$ 에서 50  $\mu\text{m}$ 까지 분포하며, 일부 기공은 30  $\mu\text{m}$  이상의 비교적 큰 사이즈까지 포함되어 있다. 이러한 특성은 공기가 통과하기에 유리한 구조로, 매우 높은 통기성을 확보할 수 있다. 그러나 그만큼 미세 입자 차단 능력은 제한될 수 있으며, 특히 정밀 여과가 요구되는 용도에서는 상대적으로 성능 저하가 우려된다.

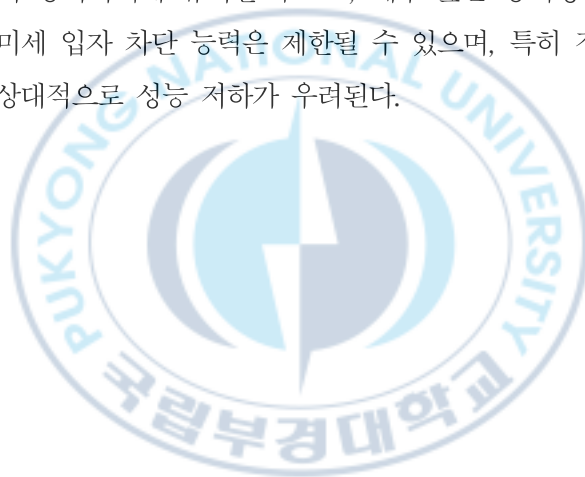


Table 6. 각 부직포 PMI (Capillary Flow Porometer) 분석 결과

샘플명	Mean Pore Size (μm)	Bubble Point (μm)
PLA MB	7.7961	16.9971
PP H13 MB	12.3074	26.6610
PP E11 MB	24.1910	54.4836
PP SB	152.1890	1581.1909

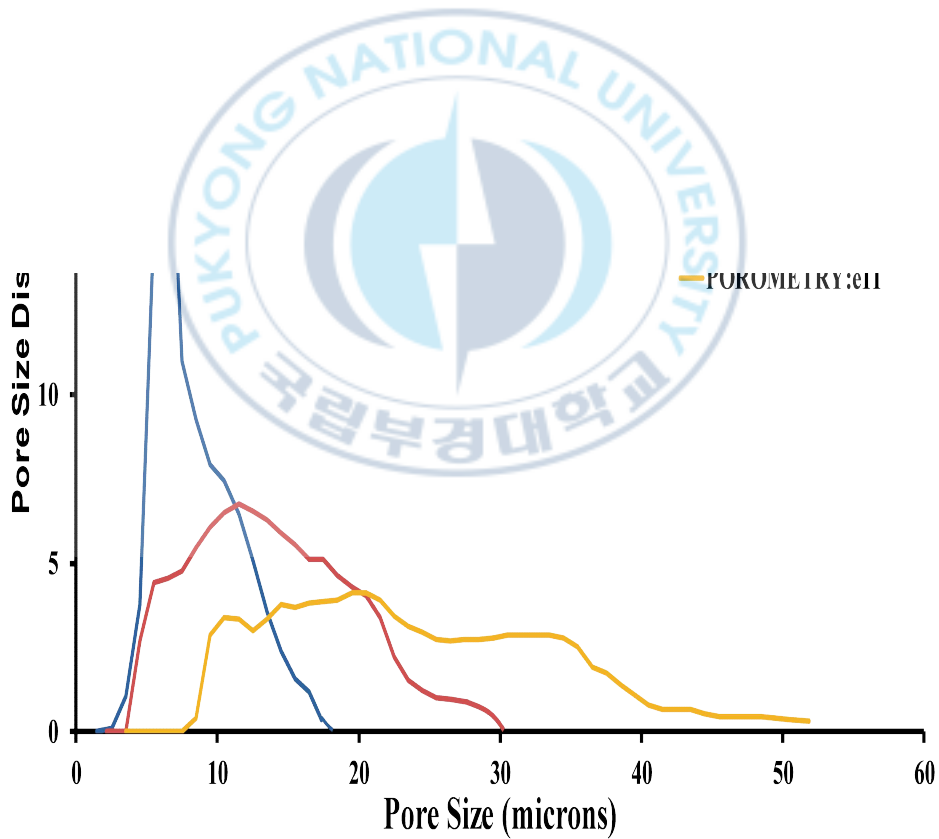


Figure 18. PLA MB, PP MB H13 및 E11 PMI 기공 분포도.

#### 4-1-5. 시차주사열량 분석

PLA MB 부직포, PP MB 부직포, PP SB 부직포 총 3종류의 부직포에 대해 DSC 분석을 진행하였으며, PP MB 부직포는 H13 등급 제품을 대표로 측정하였다. PP MB의 H13 등급과 E11 등급은 동일한 PP 원료를 사용하였으며, 제조공정의 차이만으로 등급이 구분된 제품이므로, H13 등급 부직포의 분석 결과는 E11 등급 부직포에도 동일하게 적용될 수 있다. 전체 분석 결과는 Table 6에 나타내었다.

PLA 부직포의 DSC 분석 결과, 유리 전이 온도( $T_g$ )는  $57.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 결정화 온도( $T_c$ )는  $95.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  용점( $T_m$ )은  $163.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. PP 계열의 MB 및 SB 부직포에 대한 DSC 분석 결과,  $T_g$ 와  $T_c$ 의 경우,  $T_g$  등이 낮아 측정 조건에서는 검출되지 않았으며, PP MB는 용점( $T_m$ )이  $162.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , PP SB는  $169.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 먼저,  $T_g$ 는 PLA의 비결정성(Amorphous)에서 유리상에서 고무상으로 전이가 일어나는 온도가  $57.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 임을 의미한다. 일반적으로 PLA의  $T_g$ 는  $55\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  범위에서 나타나며, 본 실험 결과는 PLA 부직포의 구조가 정상적으로 형성되었음을 확인시켜준다. PLA는  $T_g$  이하의 온도에서는 분자 운동이 제한되기 때문에, 필터 부직포로 사용 시 기계적 안정성이 유지된다. 하지만  $57.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  이상의 온도에서는 PLA 섬유가 연화되면서 기공 구조의 안정성이 저하될 가능성이 있다. 다음으로, 결정화 온도( $T_c$ )인  $95.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 는 PLA가 빠른 냉각 과정에서 미처 결정화가 일어나지 않은 사슬들이 승온과정에서 부분 결정성 구조로 전환되는 온도이다. PLA는 결정화 속도가 느린 고분자이므로, 냉각 속도에 따라 비결정성 또는 부분 결정성 구조를 형성하게 된다.  $T_m\ 163.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 는 PLA의 결정 영역이 녹는 온도를 나타내며, 일반적인 PLA의 용점 범위인  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서도 물리적 변형 없이 구조적 안정성을 유지할 수 있다.

결론적으로, PLA 부직포의 열적 특성은 Melt-blown 방식으로 방사된 후 필터 부직포의 기계적 안정성과 차압 성능을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다.  $T_g(57.3\text{ }^{\circ}\text{C})$  이하에서는 필터 구조 안정성이 유지되며,  $T_m(163.8\text{ }^{\circ}\text{C})$  이상의 고온

에서는 완전 용융이 발생하지만, 일반적인 고온 열균 공정에서도 안정성을 유지할 수 있음을 나타낸다. 고온 열균 공정에서도 안정성을 유지할 수 있다. 또한, PP MB 및 SB 부직포의 용점 차이는 제조 방식에 따른 결정화도 차이를 반영하며, 필터 성능 향상 및 고온 안정성에 기여한다.



Table 7. 각 부직포 DSC 분석 결과 (전체)

샘플명	Tg (°C)	Tc (°C)	Tm (°C)
PLA MB	57.3	95.9	163.8
PP MB	-	-	162.6
PP SB	-	-	169.1



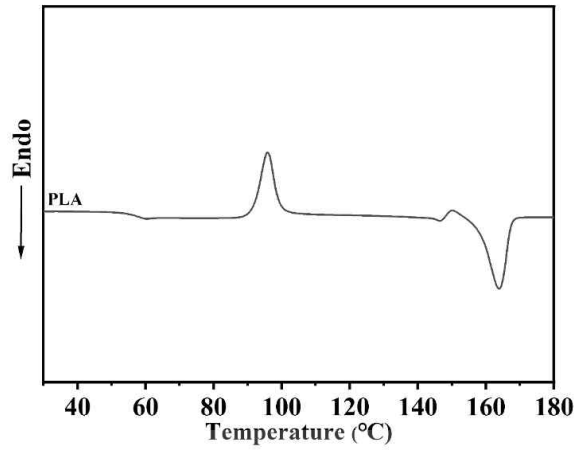


Figure 19. PLA 부직포의 DSC 그래프.

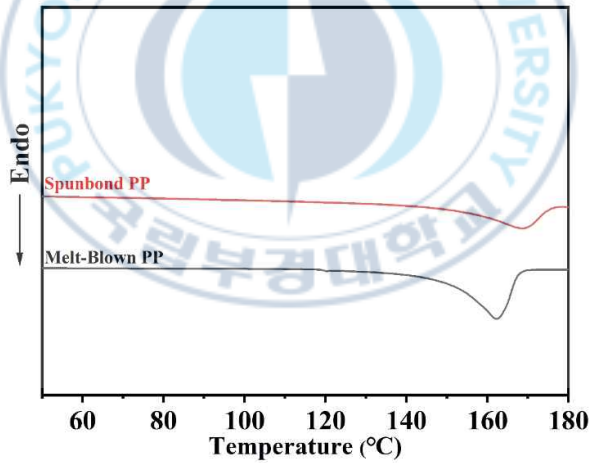


Figure 20. PP MB 및 SB 부직포의 DSC 그래프.

## 4-2. 섬유 구성에 따른 필터 성능 분석

본 연구에서는 다양한 섬유 조합이 필터 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 먼저 PLA, PP H13 MB, PP E11 MB, 그리고 SB 섬유의 성능을 여러 측면에서 평가하였다. 섬유의 구조적 특성은 DSC, SEM, 효율, 차압, 통기도, 중량, 두께 등의 실험적 데이터를 통해 비교되었으며, 이를 통해 각 섬유의 특성이 필터 성능에 어떻게 영향을 미치는지를 분석하였다.

각 섬유의 열적 특성을 분석한 결과, PLA 섬유는 상대적으로 낮은 용점과 좋은 열 안정성을 보였으며, 이는 필터가 고온 환경에서 장기간 사용될 때 성능 유지에 유리할 수 있음을 시사한다. 반면, PP 기반 섬유들은 더 높은 용점과 우수한 내열성을 보였으며, 열적 안정성이 중요한 응용에서 우수한 성능을 발휘할 수 있다. PLA 섬유는 SEM 이미지를 통해 각 섬유의 미세구조를 분석한 결과, 다소 미세한 기공을 갖고 있으나, 상대적으로 필터링 효율은 다소 낮은 경향을 보였다. 차압 실험에서 PLA MB 섬유와 PP E11 MB 섬유의 조합이 상대적으로 낮은 차압을 보였으며, 이는 공기 흐름이 원활하게 유지되면서도 필터링 효율을 유지할 수 있음을 의미한다. 차압은 필터의 통기성과 밀접하게 관련이 있어, 효율과 통기성 간의 균형이 중요한 지표가 된다. 또한, PLA와 PP H13 MB 조합은 매우 높은 미세입자 제거 성능을 나타냈다. 이는 PLA의 미세한 기공 구조와 PP H13 MB의 높은 효율성 덕분으로, 두 섬유가 결합되었을 때 우수한 필터링 성능을 발휘할 수 있을 것을 알 수 있었다. 반면, PP MB 섬유들은 단독으로 사용하기 적절한 여과 효율 성능과 안정성을 가졌으나, 친환경성이 떨어져 본 연구에서 같이 구성하여 친환경성을 높이고자 한다. 종합적으로,

본 연구에서 사용된 다양한 섬유 부직포의 조합을 통해 친환경 소재의 부직포 적용 가능성을 확인하고자 총 8가지 구성으로 필터 샘플을 제작하였다. 각 구성은 여과 효율, 차압, 공기 투과성 등 필터의 핵심 성능을 고려하여 설계되었으며, 특히 PLA 섬유를 활용한 조합을 통해 친환경성과 기능성을 동시에 확보하고자 하였다. 첫 번째부터 네 번째 구성은 PLA 섬유를 포함한 친환경성을 부여한 제품 구성이며, 다섯 번째부터 일곱 번째 구성은 비교용(non-PLA) 필터 조합으로 설정

하여 성능 차이를 검증하였다. T1 ~ T4는 PLA 섬유를 포함한 실험군(Test Group)이며, R1 ~ R3는 성능 비교를 위한 비-PLA 대조군(Reference Group)으로 설정되었다. 각 조합은 다음과 같다:

첫 번째 구성은 PP SB 섬유와 친환경적인 특성을 지닌 PLA 섬유를 조합한 형태로, 두 종류의 섬유가 교차하여 필터의 기계적 강도와 여과 성능을 발휘하도록 설계되었다. (조합 1 : PP SB / PLA / PP SB) PLA는 생분해 가능하고, 환경에 미치는 영향이 적은 친환경 재료로, 미세 입자 차단에 뛰어난 성능을 보인다. PP SB 섬유는 구조적 안정성과 공기 투과성을 제공하며, PLA 섬유는 필터링 성능을 더욱 강화한다.

두 번째 구성은 PP SB 섬유와 두 층의 PLA 섬유로 구성된 형태로, 필터링 성능을 더욱 향상시키기 위한 조합이다. (조합 2 : PP SB / PLA / PLA / PP SB) PLA 섬유를 두 번 배치하여 미세입자 차단 능력을 강화하고자 조합하였다. PLA의 친환경적인 특성은 유지하고, 환경에 대한 영향을 최소화하면서 고효율 여과를 실현할 수 있다.

세 번째 구성은 PP SB 섬유와 PLA 섬유에 E11 등급의 PP MB 섬유를 결합한 형태이다. (조합 3 : PP SB / PLA / MB(E11) / PP SB) PP E11 MB 섬유는 고효율 필터링을 제공하며, PLA 섬유는 친환경적인 특성을 유지하면서도 미세 입자를 차단하는 성능을 발휘한다. 이 조합은 효율성과 공기 투과성의 균형을 맞추며, 다양한 입자 크기에 대한 필터링 성능을 향상시킬 것으로 기대된다.

네 번째 구성은 PP SB 섬유와 PLA 섬유에 H13 등급의 PP MB 섬유를 결합한 형태로, (조합 4 : PP SB / PLA / MB(H13) / PP SB) 세 번째 구성과 유사하나, MB 층을 H13 등급으로 대체하여 보다 높은 등급의 필터링 성능을 구현한 고성능 친환경 필터 조합이다.

다섯 번째 구성은 SB 섬유에 H13 등급의 PP MB 섬유를 배치한 3중 구조이며, PLA를 사용하지 않은 비교용 구조이다. (대조군 1 : PP SB / MB(H13) / PP SB) 높은 여과 효율과 적정 수준의 차압을 확보한 대표적인 비-PLA 고성능 필터 구조로 설정되었다.

여섯 번째 구성은 SB 섬유에 E12 등급의 PP MB를 두 겹 적층

한 4중 구조로, 중간 수준의 MB 성능을 이중으로 강화하여 효율을 높이고자 하였다. (대조군 2 : PP SB / MB(E11) / MB(E11) / PP SB) PLA 구조와 비교하여 효율 및 통기성에서의 상대적 성능 차이를 파악하기 위한 조합이다.

일곱 번째 구성은 PP SB 섬유와 E11 및 H13 등급의 PP MB 섬유를 결합한 형태로, 두 가지 등급의 Meltblown 섬유를 배치하여 필터링 성능을 최적화한다. (대조군 3 : PP SB / MB(E11) / MB(H13) / PP SB) E11과 H13 섬유는 각기 다른 효율을 제공하며, 다양한 입자 크기에 대해 높은 여과 성능을 발휘한다. 이 조합은 특히 고효율 여과가 요구되는 응용 분야에 적합하며, 특히, 방진 또는 방독 마스크 제작 시 이러한 구성으로 제작하기도 한다.

각 섬유 구성은 필터 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 효율성, 차압, 통기도 등의 지표를 기준으로 평가될 것이다. 이를 통해 각 구성의 특성과 필터 성능을 비교하고, 최적의 조합을 도출할 예정이다.

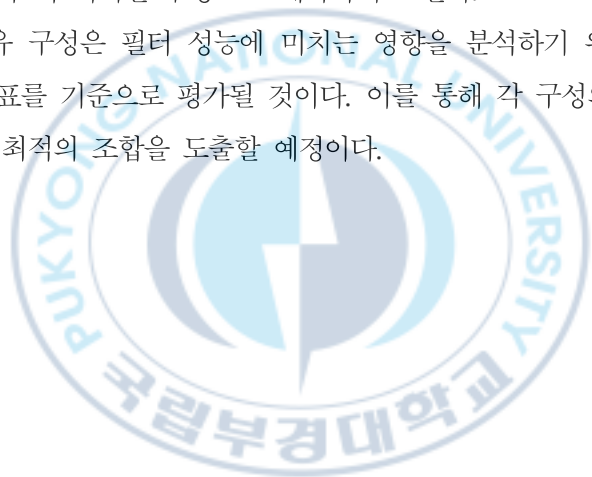


Table 8. 샘플 구성 및 명칭

샘플명	세부 구성	총 수	구분
T1	SB / PLA / SB	3	실험군
T2	SB / PLA / PLA / SB	4	실험군
T3	SB / PLA / MB(E11) / SB	4	실험군
T4	SB / PLA / MB(H13) / SB	4	실험군
R1	SB / MB(H13) / SB	3	대조군(비-PLA)
R2	SB / MB(E11) / MB(E11) / SB	4	대조군(비-PLA)
R3	SB / MB(E11) / MB(H13) / SB	4	대조군(비-PLA)

SB : 겹, 안감용 PP 부직포  
 PLA : 생분해성 MB 부직포  
 MB(E11) : E11 grade(효율 95% 이상)의 MB 부직포  
 MB(H13) : H13 grade(효율 99.95% 이상)의 MB 부직포



### 4-3. 섬유 구성별 성능

#### 4-3-1. 효율, 차압 및 통기도 성능 비교

섬유 구성에 따른 필터의 여과 성능 및 기본 물성(공기 투과도, 중량, 두께)을 평가한 결과는 다음과 같다. TSI 8130 장비를 이용하여 측정된 여과 효율과 차압은 구성에 따라 뚜렷한 차이를 보였으며, 특히 PLA 섬유를 포함한 실험군(T1~T4)은 친환경성 확보와 동시에 일정 수준 이상의 성능 구현이 가능함을 확인할 수 있었다.

T1 (SB / PLA / SB) 구성은 가장 단순한 3중 구조로, 평균 여과 효율은 80.32%, 평균 차압은 46.1 Pa, 통기도는  $16.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ 로 측정되었다. 중량과 두께는 각각  $124.2 \text{ g/m}^2$ , 0.57 mm로 가장 낮은 수치를 보였다. 효율 면에서는 다소 낮은 수준이지만, 낮은 차압과 우수한 통기성을 바탕으로 호흡 저항이 적은 생활용 마스크나 프리필터용 구조로 적합할 가능성이 있다.

T2 (SB / PLA / PLA / SB)는 PLA 층을 이중으로 구성한 형태로, 평균 효율은 95.63%로 향상되었으나 차압은 88.1 Pa, 통기도는  $7.9 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ 로 감소하였다. 중량은  $159.4 \text{ g/m}^2$ , 두께는 0.80 mm로 증가하였다. 여과 효율은 개선되었지만, 상대적으로 높은 차압과 낮은 통기성은 사용 환경에 따른 적절한 조정이 필요함을 시사한다.

T3 (SB / PLA / MB(E11) / SB)는 PLA 섬유와 중간 등급 MB(E11)를 조합한 4중 구조로, 평균 효율은 99.41%, 차압은 56.7 Pa, 통기도는  $12.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ 로 측정되었다. 중량과 두께는 각각  $165.4 \text{ g/m}^2$ , 1.03 mm로 나타났으며, 효율과 차압의 균형이 우수한 조합으로 평가된다. PLA의 친환경성과 MB의 필터 성능을 효과적으로 결합한 구조로, 실용화 가능성이 높다.

T4 (SB / PLA / MB(H13) / SB)는 H13 등급의 고성능 MB를 도입한 조합으로, 평균 여과 효율은 99.93%, 차압은 72.2 Pa, 통기도는  $10.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ 로 측정되었다. 중량은  $167.0 \text{ g/m}^2$ , 두께는 0.95 mm로, 높은 여과 성능과 적절한 통기성을 유지하며 고성능 친환경 필터용으로 활용 가능성이 높다.

R1 (SB / MB(H13) / SB)는 PLA가 포함되지 않은 대조군으로, 평균 효율은 98.85%, 차압은 63.0 Pa, 통기도는 13.1 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>/s였다. 중량과 두께는 각각 145.2 g/m<sup>2</sup>, 0.75 mm로 비교적 낮은 수준이며, PLA를 제외한 조합 중에서도 우수한 성능을 보였다.

R2 (SB / MB(E11) / MB(E11) / SB)는 E12 등급 MB를 이중 적층한 구조로, 평균 효율은 97.30%, 차압은 60.5 Pa, 통기도는 14.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>/s, 중량은 152.0 g/m<sup>2</sup>, 두께는 0.78 mm였다. 비교적 높은 통기성과 안정적인 차압을 나타내며, PLA 기반 구조 대비 성능 기준을 제시하는 중간 대조군으로 활용되었다.

R3 (SB / MB(E11) / MB(H13) / SB)는 PLA가 포함되지 않은 조합 중 가장 높은 성능을 보인 구조로, 평균 효율은 99.99%, 차압은 38.9 Pa, 통기도는 19.0 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>/s였다. 중량은 170.3 g/m<sup>2</sup>, 두께는 1.15 mm로 가장 두꺼운 구조이며, 최고 성능의 대조군으로 설정되어 전체 조합의 성능 비교 기준점으로 활용되었다.

이와 같은 결과를 통해, PLA 기반 조합도 적절한 섬유 구조 설계를 통해 상용 수준의 성능을 구현할 수 있음을 확인하였다. 또한 비-PLA 조합과의 성능 차이를 분석함으로써, 친환경성과 기능성 간의 최적 균형점을 도출하고자 하였다.

Table 9. 각 실험군 부직포 구성의 효율, 차압, 공기투과도 및 기본 물성 결과

구성	구분	효율 (%)	차압 (Pa)	통기도 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /s)	중량 (g/m <sup>2</sup> )	두께 (mm)
T1	1	81.9634	46.6	15.9	124.0	0.57
	2	79.8187	45.8	16.0	124.2	0.58
	3	81.9842	45.8	16.7	124.0	0.57
	4	80.6517	45.9	16.5	124.2	0.57
	5	79.6857	46.5	15.5	124.5	0.57
	평균	<b>80.8207</b>	<b>46.1</b>	<b>16.1</b>	<b>124.2</b>	<b>0.57</b>
T2	1	95.7247	90.6	7.9	159.0	0.80
	2	95.0895	90.0	8.3	163.0	0.81
	3	95.9845	85.6	8.0	160.0	0.80
	4	95.5684	86.6	7.5	155.0	0.79
	5	95.7848	87.6	7.7	160.0	0.80
	평균	<b>95.6304</b>	<b>88.1</b>	<b>7.9</b>	<b>159.4</b>	<b>0.80</b>
T3	1	99.2077	57.1	12.4	167.0	1.04
	2	99.2898	55.5	13.2	165.0	1.03
	3	99.2659	58.0	12.5	160.0	1.03
	4	99.6584	57.0	13.0	168.0	1.04
	5	99.6321	56.0	12.0	167.0	1.03
	평균	<b>99.4108</b>	<b>56.7</b>	<b>12.6</b>	<b>165.4</b>	<b>1.03</b>
T4	1	99.9926	70.8	10.4	164.0	0.92
	2	99.9943	73.9	10.4	170.0	0.98
	3	99.9943	72.0	10.1	167.0	0.95
	4	99.9938	73.0	10.4	164.0	0.98
	5	99.9935	71.5	10.5	170.0	0.95
	평균	<b>99.9937</b>	<b>72.2</b>	<b>10.4</b>	<b>167.0</b>	<b>0.95</b>

Table 10. 각 대조군 부직포 구성의 효율, 차압, 공기투과도 및 기본 물성 결과

구성	구분	효율 (%)	차압 (Pa)	통기도 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /s)	중량 (g/m <sup>2</sup> )	두께 (mm)
R1	1	98.9542	62.3	13.2	144.3	0.74
	2	98.7695	64.1	13.0	145.2	0.75
	3	99.0128	63.2	13.3	145.6	0.76
	4	98.6487	62.9	12.9	146.1	0.75
	5	98.8594	62.5	13.1	144.8	0.74
	평균	<b>98.8489</b>	<b>63.0</b>	<b>13.1</b>	<b>145.2</b>	<b>0.75</b>
R2	1	97.3975	60.2	14.4	151.1	0.78
	2	97.2158	61	14.6	152.3	0.77
	3	97.1169	60.7	14.5	151.9	0.78
	4	97.5543	60.3	14.7	152.8	0.78
	5	97.1967	60.4	14.3	151.9	0.79
	평균	<b>97.2962</b>	<b>60.5</b>	<b>14.5</b>	<b>152</b>	<b>0.78</b>
R3	1	99.9956	37.1	19.9	169.5	1.11
	2	99.9958	40.5	18.2	171.9	1.20
	3	99.9964	38.6	19.1	170.0	1.20
	4	99.9964	37.7	19.5	171.0	1.12
	5	99.9968	40.5	18.5	169.0	1.12
	평균	<b>99.9962</b>	<b>38.9</b>	<b>19.0</b>	<b>170.3</b>	<b>1.15</b>

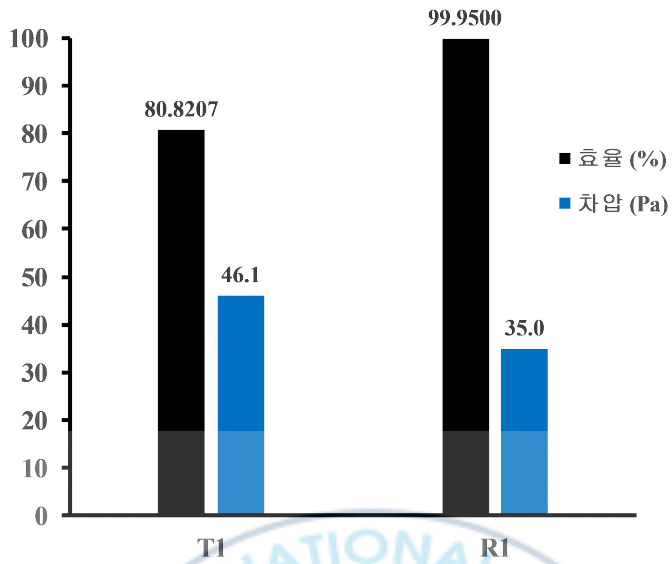


Figure 21. 3겹 구성 샘플(T1과 R1)의 효율 및 차압 비교 그래프.

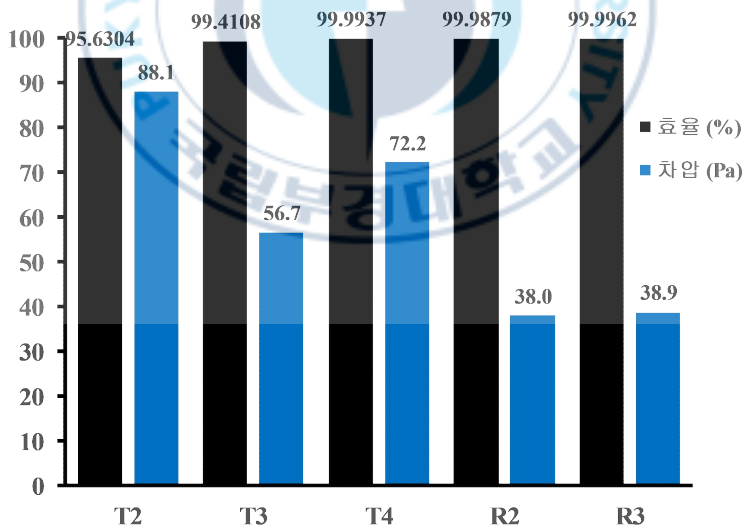


Figure 22. 4겹 구성 샘플(T2, T3, T4, R2 및 R3)의 효율 및 차압 비교 그래프.

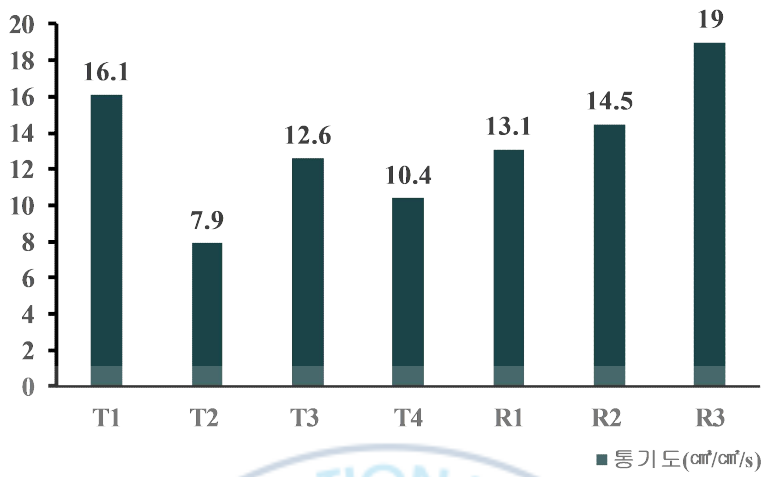
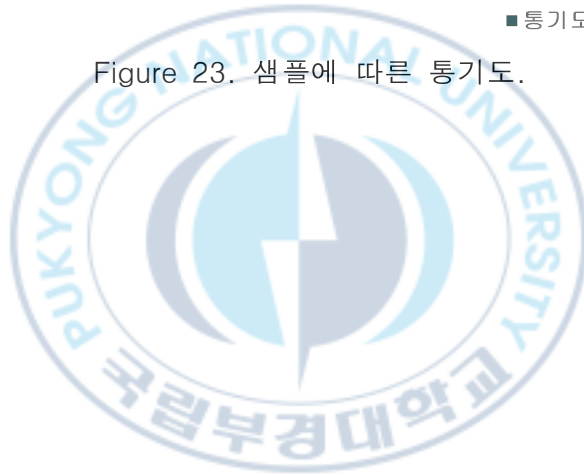


Figure 23. 샘플에 따른 통기도.



## 4-3-2. PMI 성능 비교

본 절에서는 다양한 필터 조합의 기공 분포 특성을 평가하기 위해 PMI를 사용하여 각 시료의 평균 기공 크기(Mean Pore Size) 및 기공 한계(Bubble Point)를 측정하였다. 총 7종의 시료(T1~T4, R1~R3)를 대상으로 분석을 실시하였으며, Table 11, Figure 24 및 25에 나타내었다. 결과는 다음과 같다.

우선, T2(SB / PLA / PLA / SB), T4(SB / PLA / MB(H13) / SB) 등의 PLA 기반 조합들은 Figure 25에 나타난 4겹 구성의 샘플 5종 중, 상대적으로 날카롭고 좁은 범위의 분포 곡선을 보이며 기공 크기의 균일성이 높은 것으로 확인되었다. 이는 동일 구조 내에서 기공의 편차가 적고 일정한 분포를 유지함을 시사하며, 안정적인 필터링 성능 확보에 유리하다. 특히 T2의 경우 평균 기공 크기가 9.3513  $\mu\text{m}$ 로 가장 작고, Bubble Point도 23.8024  $\mu\text{m}$ 로 작아, 비교적 미세한 입자 차단에 유리할 것으로 판단된다.

반면, R2(SB / PP(E11) / PP(E11) / SB)는 분포 폭이 넓고 완만한 곡선 형태를 보였으며, 평균 기공 크기(17.1014  $\mu\text{m}$ ) 및 Bubble Point(44.4823  $\mu\text{m}$ )가 가장 큰 조합으로 나타났다. 이는 해당 조합이 상대적으로 넓은 기공을 가지며, 기공 분포의 불균일성이 높아 미세입자 포집에는 다소 불리할 수 있음을 의미한다.

T3(SB / PLA / MB(E11) / SB)와 R3(SB / MB(E11) / MB(H13) / SB)의 경우는 비교적 평탄한 곡선 형태를 유지하였으며, 평균 기공 크기는 각각 10.3758  $\mu\text{m}$ , 11.4616  $\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 두 시료 모두 중간 수준의 기공 크기 분포를 가지고 있으며, T3는 PLA가 포함되어 있음에도 불구하고 MB(E11) 섬유와의 결합을 통해 균일한 기공 형성을 보였다.

또한, T1(SB / PLA / SB)와 R1(SB / PP(H13) / SB)의 곡선을 비교하면, 전자는 평균 기공 크기가 12.2829  $\mu\text{m}$ 로 더 크고, Figure 24

에 나타난 형태를 확인하면, 분포 곡선이 더 뾰족한 형태를 가지는 반면, R1은 약간 더 완만하고 넓은 분포를 보여줬다. 이는 T1이 단순한 3층 구조이지만 PLA의 영향으로 기공이 비교적 고르게 형성된 결과로 해석할 수 있으며, R1은 H13 섬유가 포함되어 있으나 통기성과의 균형을 위해 섬유 간 배열의 불균일성이 다소 존재함을 시사한다.

정리하면, PLA가 포함된 T2 ~ T4는 비교적 좁은 기공 분포를 가지며 미세입자 차단에 유리하고, 특히 T2는 가장 작은 평균 기공 크기를 나타내었다. 반면, R2는 넓은 기공 분포와 큰 기공 크기를 나타내며, 상대적으로 입자 차단 성능은 낮을 수 있으나 통기성 면에서 유리할 수 있다. 이러한 결과는 각 필터 조합이 여과 효율, 차압, 통기성뿐 아니라 구조적 기공 특성에서도 확연한 차이를 가지며, 사용 목적에 따라 최적 구조를 선택해야 함을 시사한다.



Table 11. 각 부직포 구성의 PMI 측정 결과

샘플명	Mean Pore Size ( $\mu\text{m}$ )	Bubble Point ( $\mu\text{m}$ )
T1	12.2829	26.7514
T2	9.3513	23.8024
T3	10.3758	24.4389
T4	9.4606	23.1526
R1	11.4744	25.6532
R2	17.1014	44.4823
R3	11.4616	23.8024



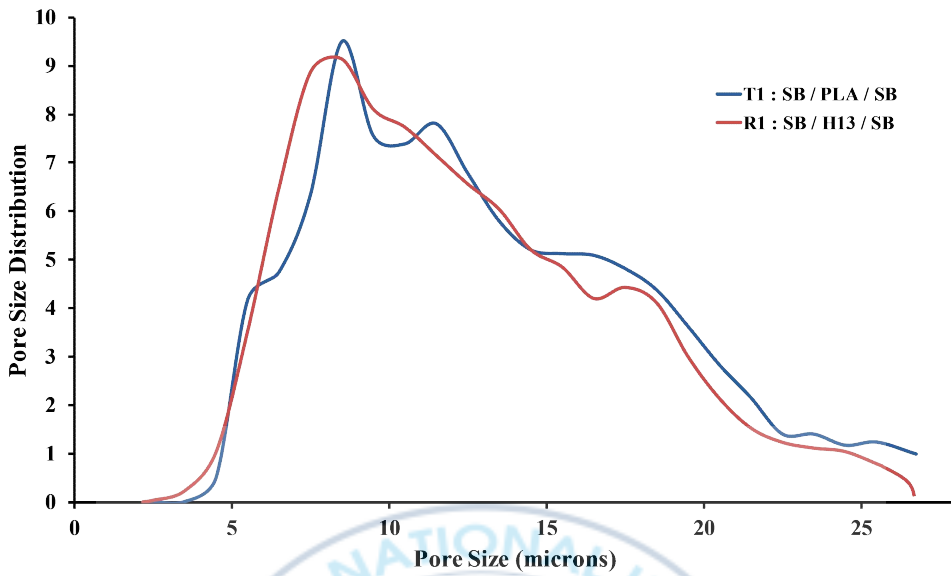


Figure 24. 3겹 구성 샘플 (T1 과 R1)의 각 PMI 기공 분포도.

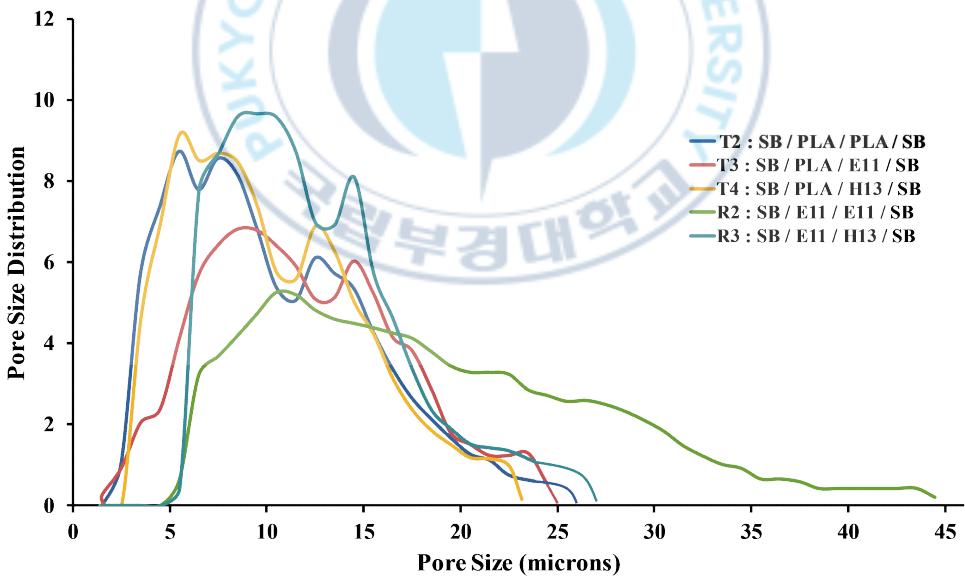


Figure 25. 4겹 구성 샘플 (S2, S3, S4, R2 및 R3)의 각 PMI 기공 분포도.

#### 4-4. 최적 조합 고찰 및 향후 적용 가능성

본 연구에서는 총 일곱 가지 필터 샘플(T1 ~ T4, R1 ~ R3)을 대상으로 여과 효율, 차압, 통기도, 기본 물성(중량, 두께 등)을 분석하고, 이를 기반으로 섬유 조합별 성능을 비교하였다. 특히 PLA 섬유가 포함된 조합과 그렇지 않은 조합 간의 성능 차이를 중심으로 최적 조합을 도출하고, 실제 적용 가능성을 검토하였다.

그 결과, T3 (SB / PLA / MB(E11) / SB) 조합은 여과 효율(99.41%)과 차압(56.7 Pa) 간의 균형이 가장 뛰어나, 실제 적용 가능성이 높은 조합으로 확인되었다. 효율과 통기성의 조화를 바탕으로 마스크 필터나 공기청정기용 필터 등 쾌적한 호흡성과 일정 수준의 효율이 동시에 요구되는 용도에 적합하다.

T4 (SB / PLA / MB(H13) / SB) 조합은 가장 높은 여과 효율(99.93%)과 우수한 통기성( $10.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ )을 보였으나, 차압이 72.2 Pa로 상승하여 장시간 사용 시 착용자 불편 가능성이 있다. 이 조합은 고성능 의료용 마스크나 산업용 고효율 필터 등에서 요구되는 성능 조건을 충족할 수 있는 구조로 판단된다.

반면, PLA 단일 섬유층으로 구성된 T1 (SB / PLA / SB)과 T2 (SB / PLA / PLA / SB)는 Melt-blown층이 포함되지 않아 상대적으로 여과 효율이 낮았다. T1은 평균 효율 80.32%, 차압 46.1 Pa로 통기성( $16.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ )이 매우 우수하였으며, 생활용 마스크의 내외피용 구조 또는 프리필터, 저부하용 필터로의 활용 가능성이 있다. T2는 PLA를 두 겹 적용하여 효율은 개선되었으나, 차압이 상승하고 통기성이 감소하여 효율 대비 부담이 존재하였다. 다만 PLA의 친환경성을 중시하는 분야에서는 포장재나 생분해성 커버재 등의 용도로 활용 가능성이 있다.

R1 (SB / MB(H13) / SB), R2 (SB / MB(E12) / MB(E12) / SB), R3 (SB / MB(E11) / MB(H13) / SB)는 PLA를 포함하지 않은 대조군으로 설정되었으며, 필터 구조의 성능 한계를 평가하기 위한 비교 기준으로 활용되었다.

특히 R3는 평균 효율 99.99%, 차압 38.9 Pa, 통기도  $19.0 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ 로, 전체 조합 중 가장 우수한 성능을 나타냈다. 하지만 PLA 등 친환경 소재가 배제되어 지속가능성 측면에서 한계를 가진다.

이러한 분석 결과는 PLA 소재가 단독으로 사용될 경우 한계가 존재하지

만, MB(E11) 또는 MB(H13) 등 기존 PP 기반 여과재와의 다층 구조를 통해 이를 극복할 수 있음을 시사한다. 특히 PLA의 친환경성을 유지하면서도 실용적인 여과 성능을 확보할 수 있는 구조 조합이 실제 제품화에 활용될 수 있는 가능성을 보여 준다.

향후 연구에서는 PLA 기반 Melt-blown 구조에 나노섬유 보강 또는 기능성 첨가제를 적용하여 여과 효율 향상과 차압 저감을 동시에 달성할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 또한 PLA 외에도 PBS, PBAT 등 다양한 생분해성 고분자와의 복합 구조 설계를 통해 더 넓은 적용 가능성을 모색할 수 있을 것이다.

이러한 연구는 단순한 성능 개선을 넘어, 지속 가능한 여과재 개발과 ESG 시대에 부합하는 친환경 소재 적용이라는 측면에서 산업적, 환경적으로 중요한 의미를 가진다. 앞으로도 생분해성 소재의 실용화를 위한 구조 설계 및 고도화 연구가 지속되어야 할 것이다.



## 제 5장 결 론

본 연구는 Melt-blown 공정을 기반으로 한 생분해성 소재 PLA와 기존 폴리프로필렌(PP) 기반 여과재를 다양한 다층 구조로 조합하여 필터의 여과 성능을 비교·분석함으로써, 친환경성과 여과 성능을 동시에 만족할 수 있는 최적의 구조를 탐색하는 것을 목적으로 수행되었다. 총 일곱 가지 시편(T1 ~ T4, R1 ~ R3)을 설계하고, 여과 효율, 차압, 통기도, 중량, 두께 등 기본 물성뿐만 아니라 SEM 및 DSC 분석을 통해 성능을 다각도로 평가하였다. 분석 결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, PLA 기반 여과재는 적절한 구조 설계를 통해 실용적인 수준의 성능 확보가 가능함을 확인하였다. 특히 T3 (SB / PLA / MB(E11) / SB) 조합은 평균 효율 99.41%, 차압 56.7 Pa로, E12 등급 이상의 여과 성능과 양호한 호흡 저항 특성을 동시에 달성하였으며, 이는 마스크 및 일반 공기청정기용 필터로 적용 가능성이 높다. 또한 T4 (SB / PLA / MB(H13) / SB)는 평균 효율 99.9937%로 가장 높은 성능을 보였으며, 통기도 확보되어 H14 등급에 가까운 고성능 공조용 필터로서의 활용이 기대된다.

둘째, PLA를 단독으로 활용한 T1과 T2 조합은 Melt-blown 층이 포함되지 않아 상대적으로 효율이 낮고 차압은 높았지만, PLA의 높은 비율로 인해 친환경 포장재, 위생용품, 저부하용 필터 등 특정 응용 분야에서의 가능성을 보여주었다. 특히 향후 차압 개선 기술이나 정전기 가공 등의 후처리 기술을 적용한다면 성능 향상을 기대할 수 있다.

셋째, 비교군으로 설정된 조합 (R1 ~ R3)은 PLA를 포함하지 않았음에도 뛰어난 효율과 통기성을 보였지만, 생분해성이 결여되어 친환경 요구에 부합하지 않는 한계를 지닌다. 이에 따라 PLA를 포함한 구조가 비교군 대비 경쟁력 있는 대안이 될 수 있음을 시사한다.

결론적으로, 본 연구는 PLA 소재가 상업용 여과재로 실질적인 적

용 가능성을 가질 수 있으며, 다층 구조 설계를 통해 성능을 충분히 확보할 수 있다는 점을 실험적으로 입증하였다. PLA 기반의 여과재는 환경 문제 대응과 함께 지속 가능한 소재 전환이라는 사회적 요구에 부응할 수 있는 친환경 여과 기술의 핵심 소재로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.



## 참고 문헌

1. Brown, R.C. (1993), *Air Filtration : An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*. Pergamon Press.
2. 이창환 (2008), “복합방사 멜트 블로운 부직포 제조기술”, *Fiber Technology and Industry*, 12(2), 81-87.
3. 최현진 (2020), “최신 에어 필터 기술 - 나노섬유 제조기술”, *Air Cleaning Technology*, 33(1), 23-30.
4. Limin, W., Shengxuan, L., Ibrahim, M.A., Guiying, Z., Yanfeng, S., Yang, W., Congnan, S., Chuan, J., Peng, C. & Dongming, L. (2023), Global face mask pollution: threats to the environment and wildlife, *Science of The Total Environment*, 887.
5. Plastics Europe (2019), *The Circular Economy for Plastics*, Technical Report. *europeanbioplastic*.
6. 신휘철, 임소진, 안소연, 오동엽, 강동구 (2024), 생분해성 플라스틱 분해 조절을 위한 미생물 및 효소 기술, *Polymer*, 48(4), 345-360.
7. McKinsey & Company (2022), *The ESG Premium: New Perspectives on Value and Performance*.
8. European Bioplastics (2024), *Bioplastics Market Data 2020-2025*. 2024 Market Data Report, <https://www.european-bioplastics.org/market/>.
9. Precedence Research (2024), *Biodegradable Plastics Market - Global Forecast 2023 to 2033*.
10. Sankhyan, S., Heinselmann, K.N., Ciesielski, P.N., Barnes, T., Himmel, M.E., Teed, H., Patel, S. & Vance, M.E. (2021), Filtration Performance of Layering Masks and Face Coverings and the Reusability of Cotton Masks after Repeated Washing and Drying. *Aerosol and Air Quality Research*,

21(11), 1-13.

11. Hao, W., Xu, G. & Wang, Y. (2021), Factors Influencing the Filtration Performance of Homemade Face Masks. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 18, 128-138.

12. Thomas, W.B., Ania, M., Rebecca, L., Timothy, A.S., Jocelyn, S., Heidi, A., Devon, O., Hamed, N. & Steven, N.R., (2022), Filtration and Breathability of Nonwoven Fabrics Used in Washable Masks, *Aerosol and Air Quality Research*, 22(9), 7-12

13. Rungiah, S., Ruamsuk, R., Vroman, P., Takarada, W., Appert-Collin, J.C., & Kikutani, T. (2017), Structural characterization of polypropylene/poly(lactic acid) bicomponent meltblown, *Journal of Applied Polymer Science*, 134(14). 1.

14. Yu, B., Han, J., Sun, H., Zhu, F., Zhang, Q., & Kong, J. (2015), The Preparation and property of poly(lactic acid)/tourmaline blends and melt-blown nonwoven, *Polymer Composites*, 36(2), 264-271.

15. Zhang, H., Zhen, Q., Cao, Y., Gan, Y., Yang, Z. & Qian, X. (2022), Large-scale preparation of polylactic acid/polyethylene glycol microfibrinous membranes with improved mechanical properties” *Journal of Polymer Research*, 29, 19-20

16. 유영선, 오유성, 홍승희 & 최성욱 (2015), 국내외 바이오 플라스틱의 연구개발, 제품화 및 시장 동향, *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers*, 21(3), 141-152.

17. Liu, G.H., Guan, J., Wang, X.F., Yu, J.Y., & Ding, B. (2023), Polylactic Acid (PLA) Melt-Blown Nonwovens with Superior Mechanical Properties, *American Chemical Society*, 11(10), 4279-4288.

18. 이재달, 홍영기 & 배기서 (2005), 고성능 멜트블로운 부직포 복합필터 개발, *Journal of the Korean Society of Dyers and Finishers*, 17(2), 40-45.

19. Drumright, R.E., Gruber, P.R., & Henton, D.E. (2000), Polylactic acid

technology, *Advanced Materials*, 12(23), 1841–1846.

20. Avérous, L. (2008), Polylactic acid: synthesis, properties and applications, *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, 21, 433–447.

21. <http://worldcentric.org>.

22. Ana, M., (2019), Francois de Bie, Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand, *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 2523–2539

23. Hartmann, M.H. (1998), High molecular weight polylactic acid polymers, *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer-Verlag, Berlin, 15, 367–411.

24. Doi, Y. & Steinbüchel, A. (2002), Applications and Commercial Products – Polyesters III, *Biopolymers*, Wiley-VCH, Weinheim-Germany, 4, 1–385.

25. Yahya, K. & Kolos, M. (2022), A review of processing strategies to generate melt-blown nano/microfiber mats for high-efficiency filtration applications, *SAGE journals*, 51(1), 137–180.

26. Haifeng, Z. (2020), Design of Polypropylene Electret Melt Blown Nonwovens with Superior Filtration Efficiency Stability through Thermally Stimulated Charging, *polymers*, 12(20).

27. Jiyul, L., Kyeongeun, L., Hanjou, P., & Jooyoun, K. (2022), Environmental storage conditions influencing the filtration behavior of electret filters with repeated use, *SAGE journals*, 55.

28. 식품의약품안전처 (2021),

[https://www.mfds.go.kr/brd/m\\_580/view.do?seq=65&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm\\_seq\\_1=0&itm\\_seq\\_2=0&multi\\_itm\\_seq=0&company\\_cd=&company\\_nm=&page=1](https://www.mfds.go.kr/brd/m_580/view.do?seq=65&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&page=1).

29. Yuanxiang, X., Nazmus, S., Zhonghua, Y., Yan, W., Si, C.,

Jianmin, Y., Jiri, M., Mohanapriya, V. & Guocheng, Z. (2020), Study on the Relationship Between Structure Parameters and Filtration Performance of Polypropylene Meltblown Nonwovens, *Autex Research Journal*, 20(4).

