Composites Research

Vol. 39, No. 5, 483-490 (2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2026.39.5.483
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

복합소재 적용을 위한 폴리에틸렌 기반 저가 탄소섬유 제조

임병우*,** · 양덕주*** · 홍순혁**† · 김서균*† · 구본철*,****,*****†

Polyethylene-Based Low-Cost Carbon Fiber Manufacturing for Composites

Byeongwoo Im*,, Duck-Joo Yang***, Soon Hyeok Hong**†, Seo Gyun Kim*†, Bon-Cheol Ku*,****,*****†**

ABSTRACT: Polyethylene (PE) is a promising low-cost precursor for carbon fibers because of its high carbon content, low raw-material cost, broad availability, and melt processability. Compared with conventional polyacrylonitrile (PAN) precursors, PE enables melt spinning and can eliminate polymer dissolution, coagulation, washing, drying, and solvent-recovery steps. The major technical challenge is that PE is thermoplastic and therefore requires artificial stabilization before carbonization. This review summarizes PE-based carbon fiber research by integrating the precursor polymer design, melt spinning and drawing, stabilization, carbonization/graphitization, and scale-up from a process–structure–property perspective. In this review, particular emphasis is placed on the trade-off between high molecular orientation/crystallinity, which is favorable for precursor strength and graphitic alignment, and the reduced diffusion of stabilizing agents, which can increase stabilization time. Sulfonation remains the most established stabilization route, whereas electron-beam (EB), ultraviolet (UV), and hybrid approaches are being investigated to reduce stabilization severity and residence time. Recent scale-up work has demonstrated a 10,000-filament PE precursor route and continuous conversion to carbon fibers with tensile strength up to about 2.0 GPa and modulus up to about 170 GPa. These results indicate that PE-based CF research is moving from laboratory material screening toward integrated fiber-processing and industrial-scale manufacturing. Future progress will require simultaneous optimization of molecular architecture, fine/highly oriented melt-spun precursors, rapid and uniform stabilization, tension-controlled carbonization, catalytic graphitization, and multi-filament tow production for low-cost composites.

초 록: 폴리에틸렌(polyethylene, PE)은 높은 탄소함량, 저렴한 원료가격, 높은 공급 안정성 및 우수한 열가소성 때문에 저가 탄소섬유 전구체로 주목받고 있다. 특히 용융방사가 가능하여 기존 폴리아크릴로니트릴(polyacrylonitrile, PAN) 전구체의 용액방사에서 요구되는 고분자 용해, 응고, 세척, 건조 및 용매 회수 공정을 단순화할 수 있다는 장점이 있다. 반면 PE는 열가소성 고분자이므로 탄화 전에 인공적인 안정화가 필요하며, 안정화 과정이 PE 기반 탄소섬유 제조의 가장 중요한 기술적·경제적 병목으로 평가된다. 본 총설에서는 특히 높은 분자배향과 결정성은 전구체 강도와 탄소층 배향에 유리하지만 안정화제의 확산을 제한하여 안정화 시간을 증가시킬 수 있다는 상충관계에 주목하였다. 설폰화는 현재 가장 확립된 안정화 방법이나, 전자선(EB), 자외선(UV) 및 복합화 기술은 안정화 시간과 화학적 부담을 감소시키기 위한 대안으로 연구되고 있다. 최근에는 10,000-filament PE 전구체 제조와 연속식 전환공정이 보고되었으며, 최대 약 2.0 GPa의 인장강도와 170 GPa의 탄성률을 갖는 PE 기반 탄소섬유가 제조되어 연구의 중심이 실험실 수준에서 산업적 scale-up으로 이동하고 있음을 보여준다. 향후에는 분자구조 설

Received 23 August 2026, received in revised form 25 August 2026, accepted 14 September 2026

*Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Jeonbuk 55324, Republic of Korea
**Department of Chemistry, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea
***Department of Chemistry & Biochemistry, The University of Texas at Dallas, Richardson, Texas 75080, USA
****Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Dallas, Richardson, Texas 75080, USA
*****Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research, Graduate School, Jeonbuk National University, 54896, Republic of Korea
†Corresponding authors (E-mail: soonhyeok.hong@kaist.ac.kr, seogyun.kim@kist.re.kr, and cnt@kist.re.kr)

계, 고배향·미세직경 용융방사, 고속·균일 안정화, 장력제어 탄화, 촉매 흑연화 및 multi-filament tow 제조를 통합한 연속공정 개발이 저가 탄소섬유 개발을 위해 필요할 것이다.

Key Words: 폴리에틸렌(Polyethylene), 탄소섬유(Carbon fiber), 전구체(Precursor), 용융방사(Melt spinning), 안정화(Stabilization), 설폰화(Sulfonation), 탄화(Carbonization)

1. 서 론

탄소섬유(carbon fiber, CF)는 높은 비강도와 비탄성률, 우수한 열적·화학적 안정성을 바탕으로 항공우주, 자동차, 풍력발전, 압력용기, 수소저장용기 및 스포츠·레저 분야에서 활용되고 있다. 그러나 높은 제조비용은 자동차와 일반 산업용 구조재료로의 대량 적용을 제한하는 주요 요인이다. 특히 현재 상업용 탄소섬유의 대부분을 차지하는PAN 기반 탄소섬유에서는 전구체 제조가 전체 비용의 중요한 부분을 차지하므로, 저가 전구체와 고생산성 공정의 개발이 핵심적인 연구과제이다[1-7].

PE는 이러한 저가 전구체 후보 중에서도 높은 탄소함량, 낮은 원료가격, 대량생산에 따른 공급 안정성, 우수한 열가소성 및 용융가공성을 동시에 갖는다는 점에서 유망하다. Röding 등은 PE가 대량생산 가능한 고분자이고 용융방사가 가능하여 PAN의 용액방사에 비해 공정 단순화와 비용절감 가능성이 있다고 보고하였다[1]. 또한 PE 전구체의 제조는 기존 섬유산업의 용융방사 장비와 공정기술을 활용할 수 있다는 장점이 있다.

그러나, PE는 PAN과 달리 가열만으로 안정한 탄소구조를 형성하지 못하고 탄화온도에 도달하기 전에 용융 및 열분해가 발생한다는 단점이 있다. 따라서 탄화 전에 PE 사슬을 불융화하고 열적으로 안정한 구조로 전환하는 별도의 안정화 공정이 필요하다[8,9]. 이 때문에 PE 기반 탄소섬유의 기술적 핵심은 단순한 탄화 수율 향상이 아니라, 용융방사 가능한 전구체의 고배향 구조를 유지하면서 짧은 시간 내 균일하게 안정화하는 데 있다.

본 논문에서는 PE 전구체의 분자구조, 용융방사 및 연신, 안정화, 탄화·흑연화, 경제성 및 scale-up 문제를 재정리하였다. 또한, 최근 보고된 방향족 첨가제, 초극세 전구체, UV 가교 및 고필라멘트 스케일업 연구를 정리하였다. 이를 통해 PE-CF의 연구가 '저가 전구체 탐색'에서 '분자설계–섬유공정–전환공정–산업화'의 통합 최적화 단계로 이동하고 있음을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 PE 기반 탄소섬유 제조공정

PE 기반 탄소섬유의 기본 제조공정은 전구체 고분자 선택 및 설계, 용융방사, 연신, 안정화, 탄화공정 외 흑연화 및 표면처리로 구성된다. PAN 기반 공정과 비교하면 PE의 가장 큰 장점은 용액방사 대신 용융방사를 사용할 수 있다는 점이며, 이로 인해 용매 관련 공정이 크게 단순화된다는 것이다[10].

그러나, 공정 단순화가 곧바로 최종 탄소섬유의 저가화를 의미하지는 않는다. PE-CF의 경제성에서는 안정화가 차지하는 비중이 크며, 특히 황산 설폰화 공정은 산의 가열, 순환 및 회수, 세척, 배기가스 처리와 대형 설비 투자비를 요구한다[1]. 따라서 PE-CF의 제조공정은 전구체 가격뿐 아니라 전체 line speed, 체류시간, 산 재활용, 탄소 수율 및 설비 규모를 함께 고려해야 한다.

Röding 등은 고품질 전구체는 작은 필라멘트 섬유 직경, 높은 분자배향, 낮은 결함 밀도, 충분한 인장강도와 낮은 파단신율을 가져야 한다고 한다[1]. 이러한 요구조건은 용융방사와 안정화 사이에 본질적인 상충관계를 만든다. 즉, 높은 배향과 결정성은 전구체 섬유 강도와 최종 탄소 배향에

Table 1. Major research trends in PE-based carbon fiber manufacturing

Category	Details	Implications
PE precursor	HDPE, LLDPE, UHMWPE, etc	Requires cost, spinnability, and stabilization
Melt spinning	Precursor formation via melt spinning	Eliminates solvent steps (vs. PAN)
Sulfonation & Stabilization	Use of sulfuric acid, CSA, etc	Renders PE infusible
Tension control	Suppression of shrinkage and maintenance of orientation during stabilization	Reduces defects, improves properties
Ultra-thin precursor	INS precursor, reduction of fiber diameter	Shorter diffusion path, uniform stabilization
UV/E-beam crosslinking	UV or E-beam based crosslinking	Supplements or replaces sulfonation
Additives	DPA, etc	Improves carbonization and structure

Table 2. Advantages and disadvantages of PE-based carbon fiber precursors

Precursor	Key advantages	Key limitations	Research direction
LDPE	Low melting point, processability	Low crystallinity and orientation	Cost reduction
LLDPE	Balance of spinnability and orientation	Diffusion/stabilization issues	Representative precursor
HDPE	High crystallinity and orientation	Increased stabilization time	High-strength precursor
UHMWPE	Extremely high precursor strength	High viscosity and cost	High-performance research
Functionalized PE	Potential for improved carbon yield and thermal stability	Synthesis and compounding complexity	Next-generation precursor

유리하지만 안정화제인 산의 확산을 제한한다. 따라서 PE-CF의 핵심은 개별 공정의 최대 성능보다 전체 공정의 최적화가 요구된다(Table 1).

본 총설에서는 PE를 중심으로 논의를 전개하지만, 여기서 다루는 용융방사 기반의 전구체 설계 및 안정화 기술은 폴리프로필렌(PP)과 기능화된 폴리올레핀 등 다른 폴리올레핀계 고분자에도 범용적으로 확장 적용될 수 있는 핵심 플랫폼 기술의 성격을 갖는다.

2.2 전구체 고분자의 종류와 분자설계

2.2.1 PE 종류 및 전구체 요구조건

PE 기반 탄소섬유 전구체로는 LDPE, LLDPE, HDPE 및 UHMWPE가 연구되어 왔으며, Röding 등은 LLDPE가 가장 폭넓게 검토되었고 HDPE 역시 높은 결정성과 배향도를 이용하여 비교적 높은 전구체 고분자 특성을 확보할 수 있는 것으로 보고하였다[1]. UHMWPE는 매우 높은 분자량 때문에 높은 전구체 섬유 강도를 얻을 수 있지만 높은 점도와 원료비, 가공 난이도 때문에 저가 CF 전구체로의 적용에는 제약이 있다(Table 2).

2.2.2 분자량, 결정성 및 배향도

PE 전구체의 기계적 특성은 분자량, 분자량 분포, 결정성 및 배향도에 크게 영향을 받는다. 용융방사 후 연신을 통해 분자사슬을 섬유축 방향으로 정렬하면 전구체 섬유 강도가 향상되고 탄화 후 흑연층의 선호 배향도를 유지하는 데 유리하다[11-15].

반면 높은 결정성과 배향도는 안정화제의 확산을 제한한다. 특히 필라멘트의 직경이 커지면 내부와 표면의 안정화 정도가 달라져 코어-쉘 구조와 미세기공이 발생할 가능성이 증가한다. Röding 등은 18 μm 이하의 작은 필라멘트에서는 섬유 직경 효과가 결정성보다 커질 수 있음을 정리하였으며, 전구체의 엔트로피 수축을 억제하기 위한 장력 제어도 중요하다고 제시하였다[1].

2.2.3 기능화 및 첨가제 기반 분자설계

최근 연구에서는 PE를 단순한 범용 고분자로 사용하는 것을 넘어, 방향족 구조나 가교 그룹을 도입하여 탄소수율과 안정화 반응성을 향상시키려는 접근이 확대되고 있다. Choi와 Kim은 2022년 작은 분자량의 첨가제를 이용하여 PE의 용융가공성과 탄화 특성을 개선하는 연구를 보고하였다[16]. 이러한 접근은 첨가제가 단순 가소제인지, 또는 탄화 과정에서 방향족 탄소 공급원 또는 가교 촉진제로 작용하는지에 따라 최종 구조가 달라질 수 있다는 점에서 중요하다.

Li 등은 PE chain에 polyaromatic hydrocarbon(PAH) side group을 도입한 PE-g-PAH 계열을 연구하여 PE의 용융방사성 과 PAH의 높은 탄소수율을 결합하는 분자설계 전략을 제시하였다[17]. 이러한 기능화된PE는 향후 '방사 가능한 열가소성'과 '높은 탄소수율을 갖는 전구체'라는 두 요구조건을 동시에 만족시키는 방향으로 발전할 가능성이 있다.

따라서 향후 전구체 개발에서는 분자량과 분지화뿐 아니라 방향족성, 가교 구조, 첨가제 분포 및 탄화 촉진제를 동시에 고려해야 한다. 특히 첨가제의 분산 불균일이 최종 CF의 결함요인이 되지 않도록 용융배합과 방사 중 미세구조 제어가 중요하다.

2.2.4 기타 폴리올레핀계 전구체로의 확장 가능성

PE 외에도 다양한 폴리올레핀 고분자들이 탄소섬유 전구체로 탐색되고 있다. 대표적으로 폴리프로필렌은 PE와 유사한 우수한 용융방사성을 가지나, 측쇄의 메틸기로 인해 설폰화 및 열분해 가교 거동에서 PE와 다른 양상을 보인다[18]. 또한, 탄화 수율과 분자 배향성을 조절하기 위해 폴리부타디엔(polybutadiene)과 같은 다양한 폴리올레핀 기반의 전구체 구조가 시도되고 있다[19]. 이러한 다양한 폴리올레핀계 전구체 연구는 분자 구조가 안정화 및 흑연화에 미치는 영향을 규명하는 데 기여하고 있으며, 그럼에도 불구하고 원료의 범용성과 구조의 단순성 측면에서 PE가 가장 대표적인 모델 시스템으로 활발히 연구되고 있다.

2.3 용융방사 및 연신

PE의 가장 중요한 장점 중 하나는 용융방사 가능성이다. 기존 연구에서는 LDPE, LLDPE 및 HDPE 모두 용융방사를 이용하여 전구체 섬유를 제조할 수 있음이 보고되었다[10,12,13,20,21]. 용융방사에서는 압출온도, 토출량, 방사노즐 직경, 권취속도, 냉각속도 및 연신비가 섬유 직경과 분자 배향도를 결정한다.

높은 연신비는 분자 체인을 섬유 축방향으로 정렬시켜

전구체 섬유 강도를 증가시키지만, 지나치게 높은 연신비는 용융 파괴, 필라멘트 단사 및 내부응력을 증가시킬 수 있다. 따라서 방사온도와 냉각조건을 함께 최적화해야 한다. 특히 고필라멘트 방사에서는 방사노즐 내부의 압력분포와 냉각 균일성이 개별 필라멘트의 품질편차를 좌우한다.

2025년 Langer 등은 PE 전구체의 스케일업에서 기존 연구가 주로 32–100 필라멘트 수준에 머물렀다는 점을 지적하고, 10,000-필라멘트 전구체 제조를 직접 시도 하였다[22]. 직접 10K 용융방사는 압출과 냉각의 불균일성 때문에 목표 전환성을 충족하지 못했지만, 산업용 연신 라인을 이용한 전구체에서는 평균 섬유직경 9.43 μm, 인장 강도 38.42 cN/tex 및 신율 15.91%가 얻어졌다[22]. 이 결과는 고필라멘트 PE 전구체의 핵심이 단순히 방사노즐 홀 수를 증가시키는 것이 아니라, 저토출량에서의 균일한 압출과 다발 단위 냉각을 동시에 구현하는 데 있음을 보여준다.

2.4 안정화 공정

2.4.1 설폰화

PE는 탄화 전에 열가소성을 제거해야 하므로 인공적인 가교 또는 기능화가 필요하다. 현재 가장 널리 연구된 방법은 황산 또는 chlorosulfonic acid를 이용한 설폰화이다[10, 21,23-29]. 설폰화 과정에서는 PE 주사슬에 설폰산기가 도입되고, 이어지는 탈설폰화, 제거반응및 가교를 통해 탄화 가능한 불융화 구조가 형성된다(Fig. 1).

Younker 등은 설폰화된PE의 열분해 및 구조전환을 분석하여 저온 영역에서 라디칼 연쇄 메커니즘과 제거반응이 진행되고, 더 높은 온도에서는 C=C 형성과 가교반응이 증가하면서 탄화 구조가 형성된다고 제안하였다[29]. Röding 등의 보고에서도 설폰화 정도가 부족하면 탄화 중 기공구조가 형성될 수 있고, 과도하면 표면 손상과 결함이 증가할 수 있어 최적 설폰화 정도가 중요하다고 지적하였다[1].

2.4.2 확산 지배적 안정화와 필라멘트 직경

PE 전구체의 안정화는 확산 지배적 공정의 성격이 강하다. Sulfonating agent는 상대적으로 무정형 부분을 통해 빠르게 이동하지만 결정영역에서는 확산이 제한된다. 따라서 높은 결정성과 배향성은 전구체섬유 강도에는 유리하지만 안정화 시간에는 불리하다[1].

섬유 직경을 감소시키면 확산경로가 짧아져 안정화 시간을 줄이고 내부–표면 간 반응차를 감소시킬 수 있다. 이러한 관점에서 2023년에 보고된 'islands-in-the-sea' precursor를 이용한 초극세 PE 기반 CF 연구는 중요한 의미를 갖는다[30]. 그러나 초극세 필라멘트는 방사 안정성과 생산량 측면에서 불리할 수 있으므로, 최종 목표는 최소 직경 자체가 아니라 공정 속도, 강도, 안정화 시간 및 필라멘트 가닥수의 최적 조합이어야 한다.

2.4.3 안정화 중 수축과 장력 제어

설폰화 과정에서 PE 전구체는 화학적 수축과 분자 이완에 의한 엔트로피 수축을 동시에 경험한다. 충분한 장력을 가하지 않으면 용융방사에서 형성된 분자 배향도가 감소하여 최종 CF의 기계적 특성이 저하될 수 있다. 반대로 지나치게 높은 장력은 안정화 과정의 수축을 과도하게 억제하여 필라멘트 절사를 유발할 수 있다[1].

따라서 안정화 장력은 단순한 일정값보다 안정화 진행도에 따라 단계적으로 변화시키는 것이 합리적이다. 초기에는 필라멘트 형태를 유지하는 수준의 낮은 장력을 적용하고, 가교가 진행되어 강도가 증가한 후에는 배향도 보존을 위해 상대적으로 높은 장력을 적용하는 단계별 장력 프로파일이 향후 연구대상이 될 수 있다.

2.5 EB, UV 및 hybrid 안정화

산 기반 설폰화 반응은 높은 안정화 효율을 제공하지만 긴 체류시간과 산 취급,세척 및 SOx 처리 문제를 갖는다. 이러한 문제를 완화하기 위해 전자선(EB) 조사와 자외선 조사를 이용한 가교 또는 전처리가 연구되어 왔다[31-33]. Choi 등은 EB 조사를 설폰화 전처리로 사용하여 요구되는 설폰화 조건을 완화하는 방법을 제시하였다[31].

EB의 장점은 높은 침투력과 빠른 가교화이지만, 높은 장비투자비와 조사량에 따른 고분자 분해 및 설비 안전성 문제가 존재한다. UV는 상대적으로 간단한 장비 구성이 가능하지만 투과 깊이가 제한되어 두꺼운 섬유 다발 내부의 균일한 가교화가 어려울 수 있다.

2024년 Luo 등은 LLDPE에 4-chlorobenzophenone photoinitiator와 1,2-polybutadiene 가교제를 도입하고 UV 조사하여 전구체를 제조하는 방법을 보고 하였다[19]. 이 연구는 UV 조사 시간과 가교함량을 이용해 겔화를 제어할 수 있음을 보여주었다. 다만 현재까지 UV 접근은 탄소섬유화 자체보다는 전구체 안정화의 개념 증명 성격이 강하므로, 최종 탄소섬유의 강도, 탄성률 및 결함 분포까지 연결하는 후속 연구가 필요하다.

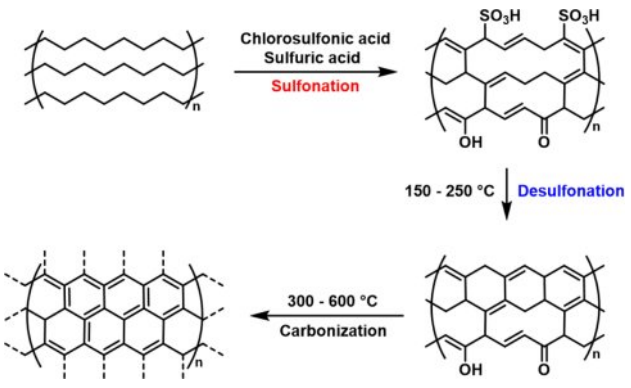


Fig. 1. Conversion mechanism of PE fibers into carbon fibers

따라서 조사는 설폰화를 완전히 대체하는 단일 공정보다는 화학안정성의 요구조건을 낮추는 전처리 또는 하이브리드 안정화로 활용하는 것이 현실적인 방향이다.

2.6 탄화 및 흑연화

안정화된 PE 전구체는 불활성 분위기에서 탄화되어 비탄소 원소가 제거되고 난층 구조 탄소 구조가 형성된다. 탄화온도가 증가하면 흑연 층간 간격이 감소하고 층 배향이 향상되는 경향이 있으며, 이에 따라 인장 탄성률이 증가할 수 있다[20,23,24,34-38]. 그러나 높은 온도는 에너지 소비를 증가시키고 인장강도와 탄성률 사이의 상충 관계를 유발할 수 있다.

Barton 등은 붕소를 흑연화 공정 촉매로 사용하여 PE 기반 CF의 구조적 정렬을 촉진하였다[34]. 붕소는 상대적으로 낮은 온도에서 미세구조 재배열을 촉진할 수 있어 높은 탄성률을 확보하는 데 유리하다. 다만 2000 °C 이상의 흑연화 공정은 PE-CF의 저가화라는 기본 목적과 상충하므로, 향후에는 촉매를 이용한 저온 흑연화 공정 또는 탄화공정 중 구조정렬을 더 잘 유도하는 방법이 중요하다.

2.7 공정–구조–물성 상관관계

PE-CF의 최종 물성은 단일 공정변수보다 전체 공정의 연계에 의해 결정된다. 전구체의 분자량과 분지화는 용융점도와 결정화도를 결정하고, 방사/연신은 분자배향도와 필라멘트 직경을 결정한다. 이후 안정화 공정은 가교밀도와 잔류 배향을 결정하며, 탄화공정은 탄화수율, 결함 밀도및 흑연층 배향을 결정한다.

따라서 PE-CF의 핵심 구조–물성 상관관계는 '높은 전구체 배향 → 높은 흑연층 배향 → 고탄성이라는 단순 관계가 아니라, '높은 배향도 → 낮은 확산 → 긴 안정화 시간 → 수축/결함 위험 증가'라는 상충관계를 함께 포함한다. 이 때문에 향후에는 개별 논문의 최고 물성값을 비교하기보다 전구체 직경, 인장 강도, 안정화 정도, 탄화수율 및 탄화조건을 함께 기록하는 표준화된 데이터셋이 필요하다.

2.8 최근 연구결과의 통합 비교

2022년 이후에는 방향족 낮은 분자량의 첨가제, PAH-기능화된 PE, 초극세 전구체, UV 가교 및 10K 스케일업등 새로운 연구가 이루어졌다(Table 3). 특히 2025년의 10K 전구체와 최대 약 2.0 GPa/170 GPa 수준의 PE-CF 제조 결과는 PE-CF 연구가 실험실 수준을 넘어 산업화 단계로 이동하고 있음을 보여준다[22].

2.9 산업적 Scale-up 및 경제성

PE-CF 분야의 가장 중요한 최근 변화는 연구의 범위가 실험실 규모의 단일 필라멘트 평가에서 상업화를 위한 산업적 토우 스케일업으로 확장되고 있다는 점이다. 최근에는 10,000-필라멘트 전구체의 직접 방사를 시도하거나, 산업용 연신 라인을 활용하여 섬유 간 융합 문제를 제어하려는 연구가 보고되었다[22]. 특히 산업용 연신 공정을 통해 평균 직경 9.43 μm의 균일한 전구체를 제조하고, 이를 연속 설폰화 및 탄화 공정으로 연결하여 최대 약 2.0 GPa의 인장강도와 170 GPa의 탄성률을 달성한 사례는 PE-CF의 상용화 가능성을 실증하는 중요한 결과이다[1]. 이는 연구의 초점이 단순히 단일 필라멘트의 최고 물성 달성에서 벗어나, 대량 생산 시의 공정 안정성과 전환성 확보로 패러다임이 전환되고 있음을 시사한다.

이러한 공정의 스케일업은 PE-CF 상용화의 가장 핵심적인 병목인 '공정 경제성'과 직결된다. 원론적으로 PE는 낮은 원료 가격, 용융 방사 적용에 따른 용매 공정 생략, 그리고 높은 탄화 수율 덕분에 기존 PAN 전구체 대비 상당한 비용 절감 잠재력을 지니고 있다[1]. 그러나 이러한 원가 경쟁력은 안정화 공정에 요구되는 대규모 초기 설비 투자와 까다로운 유지 비용으로 인해 크게 상쇄될 수 있다. 과거 시도되었던 폴리올레핀계 탄소섬유 파일럿 공정이 상용화 단계까지 이어지지 못한 주된 원인 역시 부식성이 강한 산 처리 시설의 높은 투자비와 폐기물 처리 문제에 있었다[1].

결론적으로 PE-CF의 진정한 경제성은 'PE가 PAN보다

Table 3. Summary of recent studies on PE-based carbon fibers

Year (Ref.)	Precursor/Process	Key results	Significance	Key limitations
2022 [16]	PE + DPA	CF strength ≈0.63 GPa, modulus ≈37.9 GPa	Improved melt-spinnability and carbon yield	Lower properties than commercial CF
2023 [17]	PE-g-PAH/pitch	High carbon yield; melt-processable precursor	Potential for molecular structure design	Complexity of synthesis and compounding process
2023 [30]	INS structure	Decreased diffusion path	Potential for rapid stabilization	Scale-up and process complexity
2024 [19]	LLDPE +4-CBP/1,2-PB	Controlled gelation/ crosslinking	Potential for low-temperature irradiation/stabilization	Needs verification of penetration and CF conversion
2025 [22]	LLDPE/industrial yarn route	precursor 9.43 μm, 38.42 cN/tex; CF up to 2.0/170 GPa	Expanded research scope to industrial tow	Non-uniform quench/extrusion in direct 10K spinning

저렴하다'는 단편적인 원료비 수치 비교로 평가할 수 없으며, 연속 공정 전체의 생산 효율과 유지비용을 종합적으로 고려해야 한다. 원가 절감 효과를 실제 상업적 이윤으로 연결하기 위해서는 안정화 공정의 체류 시간 단축은 물론이고, 공정 화학물질의 효율적인 회수와 재활용, 배기가스(SOx 등) 정화 처리, 탄화로 운용 에너지 최적화가 필수적이다. 궁극적으로 설폰화 공정의 화학적 부담을 덜어내고 최종 공정 속도를 극대화할 수 있는 통합 연속 공정의 구축만이 PE-CF의 성공적인 시장 진입을 견인할 것이다.

2.10 향후 연구방향

• 첫째, 전구체 분자설계가 필요하다. HDPE/LLDPE의 단순 선택에서 벗어나 방향족 작용기, 가교그룹, 탄화촉진제 및 첨가제 분포를 조절하여 용융 방사성과 탄화수율을 동시에 확보해야 한다.

• 둘째, 고배향·미세직경 전구체 제조기술이 필요하다. 높은 연신비로 분자 배향도를 확보하면서도 필라멘트 단사와 내부결함을 억제하고, 안정화 확산 거리를 줄일 수 있는 필라멘트 구조가 중요하다.

• 셋째, 고속 안정화가 핵심이다. 설폰화 공정의 체류시간을 줄이는 EB/UV/하이브리드 처리, 초극세 전구체, 촉매적 안정화 및 단계별 장력 제어를 결합할 필요가 있다.

• 넷째, 탄화공정과 흑연화 공정을 통합 최적화해야 한다. 고온 처리만으로 탄성률을 증가시키는 방식은 비용 측면에서 불리하므로 붕소 등 촉매를 이용한 저온 흑연화와 전구체 배향도 보존을 동시에 추구해야 한다.

• 다섯째, 산업용 토우를 기준으로 연구평가 체계를 전환해야 한다. 단일 필라멘트의 최고 강도보다 1K, 3K, 6K, 12K 이상의 토우 에서 필라멘트 간 편차, 탄화 수율, 공정 속도, 안정화 체류 시간 및 결함율을 함께 평가해야 한다.

• 여섯째, techno-economic analysis(TEA)와 life-cycle assessment(LCA)를 병행해야 한다. PE 원료가 화석연료 기반인 경우에 환경부하뿐 아니라 재활용 PE, 바이오 기반PE 및 공정 화학물질 재활용을 포함하여 전체 탄소 발자국을 평가해야 한다.

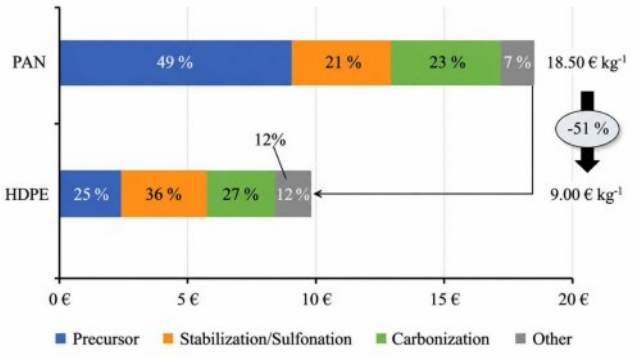


Fig. 2. Comparison of Unit Production Costs for PAN- and PE-Based Carbon fibers. Reprinted with permission [1] Copyright 2022, Wiley

3. 결 론

PE는 높은 탄소함량, 낮은 원료가격, 대량생산 가능성 및 용융방사 가능성 때문에 PAN을 대체할 수 있는 유망한 저가 탄소섬유 전구체이다. 특히 용융방사를 활용함으로써 PAN의 용액방사에서 필요한 용매 관련 공정을 제거할 수 있다는 점은 PE-CF의 가장 중요한 경제적 장점이다(Fig. 2).

그러나 PE의 열가소성 때문에 탄화 전에 안정화가 필요하며, 현재 가장 확립된 설폰화 공정은 긴 처리시간, 산 취급, 세척 및 SOx 처리 문제를 갖는다. 따라서 PE-CF 상용화의 핵심은 전구체 가격 자체보다 고속·균일 안정화와 이를 산업적 토우 생산에 적용하는 능력에 있다.

향후에는 공정-구조-물성 기반의 통합 최적화가 이루어진다면 PE는 단순한 '저가 대체 전구체'를 넘어, PP를 포함한 다양한 폴리올레핀계 탄소섬유 제조를 이끄는 차세대 대량생산형 플랫폼으로 발전할 가능성이 있다.

사 사

This work was supported by grants from the Development Project for High-Performance Carbon Nanotube Composite Fiber Manufacturing Technology (RS-2023-00258521), funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea. The authors also acknowledge financial support from the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (RS-2023-00304729), funded by the Ministry of Science and ICT.

REFERENCES

1. Röding, T., Langer, J., Modenesi Barbosa, T., Bouhrara, M., and Gries, T., "A review of polyethylene-based carbon fiber manufacturing," *Applied Research*, Vol. 1, No. 3, 2022, pp. e202100013.
2. Newcomb, B.A., "Processing, structure, and properties of carbon fibers," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 91, 2016, pp. 262–282.
3. Morris, E.A., Weisenberger, M.C., Abdallah, M.G., Vautard, F., Grappe, H., Ozcan, S., Paulauskas, F.L., Eberle, C., Jackson, D., and Mecham, S.J., "High performance carbon fibers from very high molecular weight polyacrylonitrile precursors," *Carbon*, Vol. 101, 2016, pp. 245–252.
4. Kaur, J., Millington, K., and Smith, S., "Producing high-quality precursor polymer and fibers to achieve theoretical strength in carbon fibers: A review," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, No. 38, 2016.
5. Khayyam, H., Jazar, R.N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii,

K., Fakhrhoseini, S.M., Kumar, S., and Naebe, M., "PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling," *Progress in Materials Science*, Vol. 107, 2020, pp. 100575.
6. Lee, J.H., Jin, J.-U., Park, S., Choi, D., You, N.-H., Chung, Y., Ku, B.-C., and Yeo, H., "Melt processable polyacrylonitrile copolymer precursors for carbon fibers: Rheological, thermal, and mechanical properties," *Journal of industrial and engineering chemistry*, Vol. 71, 2019, pp. 112–118.
7. Brown, K.R., Harrell, T.M., Skrzypczak, L., Scherschel, A., Wu, H.F., and Li, X., "Carbon fibers derived from commodity polymers: A review," *Carbon*, Vol. 196, 2022, pp. 422–439.
8. Choi, D., Kil, H.-S., and Lee, S., "Fabrication of low-cost carbon fibers using economical precursors and advanced processing technologies," *Carbon*, Vol. 142, 2019, pp. 610–649.
9. Laycock, B., Wang, X., Liu, R.-F., Annamalai, P.K., Cork, J., Derstine, C., Mills, M., and McFarland, E.W., "Pyrolysis of brominated polyethylene as an alternative carbon fibre precursor," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 172, 2020, pp. 109057.
10. Wortberg, G., De Palmenaer, A., Beckers, M., Seide, G., and Gries, T., "Polyethylene-based carbon fibers by the use of sulphonation for stabilization," *Fibers*, Vol. 3, No. 3, 2015, pp. 373–379.
11. Penning, J., Pras, H., and Pennings, A., "Influence of chemical crosslinking on the creep behavior of ultra-high molecular weight polyethylene fibers," *Colloid and Polymer Science*, Vol. 272, No. 6, 1994, pp. 664–676.
12. Postema, A., De Groot, H., and Pennings, A., "Amorphous carbon fibres from linear low density polyethylene," *Journal of Materials Science*, Vol. 25, No. 10, 1990, pp. 4216–4222.
13. Penning, J., Lagcher, R., and Pennings, A., "The effect of diameter on the mechanical properties of amorphous carbon fibres from linear low density polyethylene," *Polymer Bulletin*, Vol. 25, No. 3, 1991, pp. 405–412.
14. Hoogsteen, W., Kormelink, H., Eshuis, G., ten Brinke, G., Pennings, A., "Gel-spun polyethylene fibres," *Journal of Materials Science*, Vol. 23, 1988, pp. 3467–3474.
15. O'Connor, T.C., and Robbins, M.O., "Chain Ends and the Ultimate Strength of Polyethylene Fibers," *ACS Macro Letters*, Vol. 5, No. 3, 2016, pp. 263–267.
16. Choi, D., and Kim, C.B., "Small-Molecule Additive for Improving Polyethylene-Derived Carbon Fiber Fabrication," *Fibers and Polymers*, Vol. 23, No. 6, 2022, pp. 1510–1514.
17. Li, H., Sengeh, J., Agboola, O.D., Seo, J., Colby, R., and Chung, T.M., "Preparation and Characterization of Polyethylene Copolymers with PAH Side Groups as Carbon Fiber Precursors," *ACS Applied Polymer Materials*, Vol. 5, No. 1, 2023, pp. 791–802.
18. y Leon, L., 33 rd International SAMPE Technical Conference, 2001.
19. Luo, G., Li, W., Han, N., Liu, H., and Zhang, X., "Fabrication of UV crosslinked polyethylene fiber for carbon fiber precursors," *Journal of Materials Science*, Vol. 59, No. 31, 2024, pp. 14820–14832.
20. Kim, J.W., and Lee, J.S., "Preparation of carbon fibers from linear low density polyethylene," *Carbon*, Vol. 94, 2015, pp. 524–530.
21. De Palmenaer, A., Wortberg, G., Drissen, F., Seide, G., and Gries, T., "Production of polyethylene based carbon fibres," *Chem Eng Trans*, Vol. 43, 2015, pp. 1699–1704.
22. Langer, J., Marter Diniz, F.A., Röding, T., Mahfouz, R., and Gries, T., "Upscaling the Production of Polyethylene-Based Precursor Fibres for Carbon Fibre Manufacturing: Challenges and Solutions," *Journal of Composites Science*, Vol. 9, No. 12, 2025, pp. 653.
23. Barton, B.E., Patton, J., Hukkanen, E., Behr, M., Lin, J.-C., Beyer, S., Zhang, Y., Brehm, L., Haskins, B., and Bell, B., "The chemical transformation of hydrocarbons to carbon using SO3 sources," *Carbon*, Vol. 94, 2015, pp. 465–471.
24. Hukkanen, E.J., Barton, B.E., Patton, J.T., Schlader, D.R., Zhang, Y., Qiu, X., Brehm, L., Haskins, B., Wang, W., and Horstman, N., "A novel continuous multiphase reactor for chemically processing polymer fibers," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 57, No. 18, 2018, pp. 6123–6130.
25. Barton, B.E., Hukkanen, E.J., Billovits, G.F., Schlader, D., Behr, M.J., Yancey, D., Rickard, M., Qiu, X., Mowery, D.M., and Brehm, L., "Ammoxidation of polyethylene: A new route to carbon," *Carbon*, Vol. 130, 2018, pp. 288–294.
26. Hunt, M.A., Saito, T., Brown, R.H., Kumbhar, A.S., and Naskar, A.K., "Patterned functional carbon fibers from polyethylene," *Advanced Materials*, Vol. 24, No. 18, 2012, pp. 2386–2389.
27. Xie, B., Hong, L., Chen, P., and Zhu, B., "Effect of sulfonation with concentrated sulfuric acid on the composition and carbonizability of LLDPE fibers," *Polymer Bulletin*, Vol. 73, No. 3, 2016, pp. 891–908.
28. Zhang, D., and Bhat, G.S., "Thermal characterization of sulfonated polyethylene fibers," *Thermochimica Acta*, Vol. 226, 1993, pp. 123–132.
29. Younker, J.M., Saito, T., Hunt, M.A., Naskar, A.K., and Beste, A., "Pyrolysis pathways of sulfonated polyethylene, an alternative carbon fiber precursor," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 135, No. 16, 2013, pp. 6130–6141.
30. Marter Diniz, F.A., Röding, T., Bouhrara, M., and Gries, T., "The Production of Ultra-Thin Polyethylene-Based Carbon Fibers out of an "Islands-in-the-Sea"(INS) Precursor," *Fibers*, Vol. 11, No. 9, 2023, pp. 75.
31. Choi, D., Yoo, S.H., and Lee, S., "Safer and more effective route for polyethylene-derived carbon fiber fabrication using electron beam irradiation," *Carbon*, Vol. 146, 2019, pp. 9–16.
32. Frank, E., Muks, E., Ota, A., Herrmann, T., Hunger, M., and Buchmeiser, M.R., "Structure evolution in polyethylene-derived carbon fiber using a combined electron beam-stabilization-sulphurization approach," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 306, No. 10, 2021, pp. 2100280.
33. Kim, K.-W., Lee, H.-M., An, J.-H., Kim, B.-S., Min, B.-G., Kang, S.-J., An, K.-H., and Kim, B.-J., "Effects of cross-linking methods for polyethylene-based carbon fibers," *Carbon Letters*, Vol. 16, No. 3, 2015, pp. 147–170.
34. Barton, B.E., Behr, M.J., Patton, J.T., Hukkanen, E.J., Landes, B.G., Wang, W., Horstman, N., Rix, J.E., Keane, D., and

Weigand, S., "High-modulus low-cost carbon fibers from polyethylene enabled by boron catalyzed graphitization," *Small*, Vol. 13, No. 36, 2017, pp. 1701926.
35. Bahl, O., and Manocha, L., "Effect of preoxidation conditions on mechanical properties of carbon fibres," *Carbon*, Vol. 13, No. 4, 1975, pp. 297–300.
36. Huang, X., "Fabrication and properties of carbon fibers," *Materials*, Vol. 2, No. 4, 2009, pp. 2369–2403.
37. Salim, N.V., Blight, S., Creighton, C., Nunna, S., Atkiss, S., and Razal, J.M., "The role of tension and temperature for efficient carbonization of polyacrylonitrile fibers: toward low cost carbon fibers," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 57, No. 12, 2018, pp. 4268–4276.
38. Behr, M.J., Landes, B.G., Barton, B.E., Bernius, M.T., Billovits, G.F., Hukkanen, E.J., Patton, J.T., Wang, W., Wood, C., and Keane, D.T., "Structure-property model for polyethylene-derived carbon fiber," *Carbon*, Vol. 107, 2016, pp. 525–535.