

탄소섬유의 최신 개발 동향 분석

서울대학교 재료공학부 김용, 유웅열

1. 서론

1) 탄소섬유란

- 탄소섬유란 ISO(국제표준화기구)에 의하면 유기물의 열분해로 제조된 탄소 원소의 질량 함유율이 90% 이상인 섬유로 정의되며, 5-15 μ m의 직경을 갖는 섬유상의 탄소 재료임
- 주요 특성으로는 저밀도, 고탄성, 고강도, 낮은 열팽창계수, 높은 전기전도도 등이 있으며 이외에도 부식성, 피로 특성, 화학적 안정성, 마모 특성, 크리프 저항성 등도 우수한 고성능과 기능을 갖춘 섬유임
- 탄소섬유는 주로 섬유 강화 복합재료로 사용되며 항공/우주, 건축/토목, 전자/기계, 스포츠/레저 산업부터 자동차, 군수, 의학/기타 의료기기 산업 등 다양한 분야에서 널리 활용됨

2) 탄소섬유의 종류

- 탄소섬유는 전 단계 물질인 전구체의 종류에 따라 PAN계, Pitch계, 그리고 Rayon 계 탄소섬유로 구분할 수 있으며, 그 종류와 열처리 온도에 따라 최종 물성이 크게 달라짐

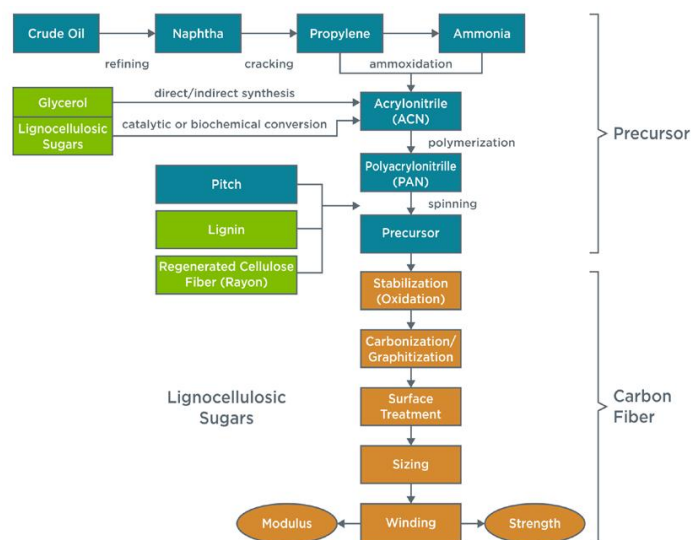


Fig.1 원료별 탄소섬유 제조 과정 [1]

(1) PAN계 탄소섬유 (PAN based carbon fibers)

- 석유화학제품에서 추출된 아크릴로니트릴을 중합, 방사하여 얻은 PAN 섬유를 공기 중에서 온도 200~300°C에서 내열화, 불활성 가스에서 온도 1000~1500°C 에서 탄화 처리 및 2500~3000°C에서 흑연화 처리 후 탄소 섬유를 제조함
- 다른 전구체 대비 높은 기계적 특성을 가져 상업용 탄소섬유 전체 생산량의 90% 이상을 차지하고 있음

(2) Pitch계 탄소섬유 (Pitch based carbon fibers)

- 석탄계 콜타르와 석유 유분을 증류한 결과로 얻은 방향족 탄화수소와 헤테로고리의 pitch를 용융방사, 안정화 및 탄화공정을 통하여 탄소섬유를 제조함
- Pitch의 물성에 따라 등방성과 이방성 섬유로 구분되며 이방성 탄소섬유는 높은 인장 탄성률과 높은 축 방향 열전도도의 독특한 물성으로 특수 시장에서 판매됨

(3) Rayon계 탄소섬유 (Rayon based carbon fibers)

- 자연계에서 가장 풍부한 바이오매스이며 오래된 탄소섬유의 전구체인 셀룰로오스는 1950~1970년대에 활발히 연구가 진행되었으나 낮은 탄소함유량으로 인한 낮은 수율, 높은 공정비용으로 인하여 셀룰로오스 기반의 탄소섬유 생산량은 pitch계와 PAN계에 비해 매우 낮음

(4) 기상 성장 탄소섬유 (Gas phase grown carbon fibers)

- 탄화수소/수소 혼합 기체의 기상 탄소화에 의해 제조되며 우수한 전도성과 높은 표면적 대 부피비로 인해 리튬이온 배터리의 음극 물질로써 주로 사용됨

3) 탄소섬유의 특성

- 탄소섬유는 탄소 원자가 육각의 격자를 이루며 형성된 평면들이 층으로 겹친 흑연과 비슷한 결정구조를 지니고 있으며, 이에 따라 흑연의 역학적 성질이 반영되어 있음
- 탄소섬유의 경우에는 탄소층이 규칙적으로 적층되는 것이 아닌 규칙성을 찾기 어려운 난층 구조를 가지고 있어, 탄소층이 최대한 섬유 축 방향으로 배열되도록 배향시키는 공정이 필요함
- 탄소섬유의 밀도는 1.8 g/cm^3 며, 인장강도와 탄성계수는 각 5.6GPa, 500GPa 이상으로 가볍고 강함
- 탄소섬유의 열적 특성으로는 우수한 선팽창계수로 $-0.7 \sim -1.2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 로서 음의 값을 보이면서 온도 상승에 따라 수축하며, 섬유 직경 방향으로는 $5.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 로 보고됨

- 탄소섬유의 전기전도도는 결정성에 의존하기 때문에 소성온도에 따라 달라지며, 흑연화 섬유가 $0.5 \sim 0.8 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$, 탄소섬유의 경우 $1.5 \sim 3.0 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ 의 전기저항값을 가짐

2. 국내외 기술 동향

- 탄소섬유는 일반적으로 방사 공정, 안정화 및 탄화공정을 통하여 제조되며 각 공정의 조건이나 전구체의 종류에 따라 물리·화학적 구조가 달라지며 이에 따라 물성 또한 달라짐
- 탄소섬유는 인장강도와 탄성계수에 따라 범용 탄소섬유와 고성능 탄소섬유로 구분될 수 있는데, 범용 탄소섬유는 인장강도 1GPa, 탄성계수 100GPa전후의 기계적 성질을 가지며 저탄성률형 탄소섬유라고 불리며 저렴하고, 고성능 탄소섬유는 고강도, 중탄성률 고강도, 고탄성률형 탄소섬유를 통칭함
- 탄소섬유 제조 기술 관련 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행되고 있으며, 초고성능 탄소섬유 개발과 저가 탄소섬유 개발로 나눌 수 있음

(1) 초고성능 탄소섬유 기술개발 동향

- 탄소섬유는 금속이나 세라믹을 대체할 수 있는 경량 구조부품을 제공할 수 있어 오래전부터 항공/방산 산업에서 핵심 소재로 활용됨
- 최근에는 항공/방산 산업에 적용되는 탄소섬유의 사양이 강화됨에 따라 이를 만족시킬 수 있는 초고강도 및 초고탄성 섬유에 관한 연구들이 활발히 진행됨
- 탄소섬유의 우수한 기계적 물성은 탄소섬유의 미세구조에 기인하고, 미세구조는 제조공정과 밀접한 연관이 있음

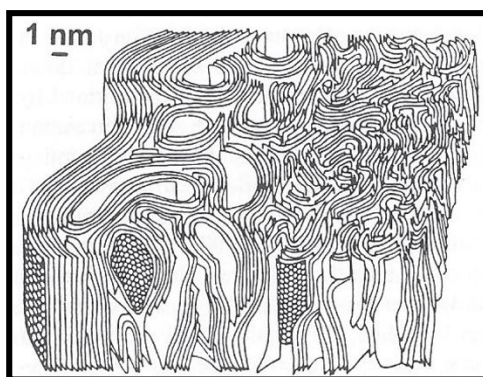


Fig.2 탄소섬유 기본구조단위 [2]

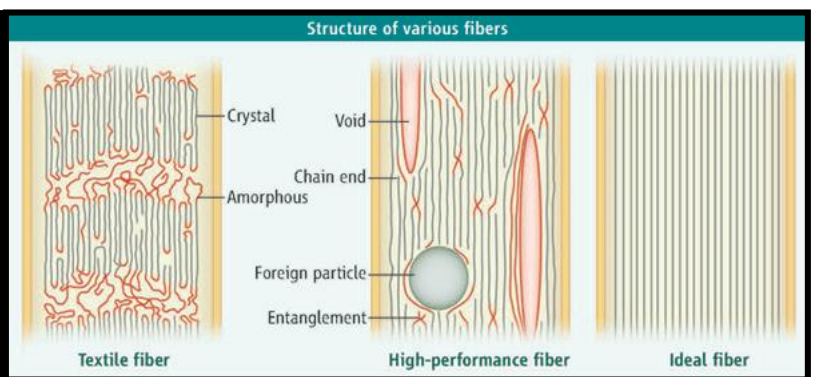


Fig.3 고분자 섬유의 내부구조 [3]

- 안정화 및 탄화 공정 후 수율은 약 50% 수준이며, 이는 PAN 사슬이 열에 의해 분해됨에 따라 HCN, CO₂, CO, N₂, H₂O 등의 가스 상태로 배출되기 때문임

- 따라서 제조된 탄소섬유는 가스가 배출된 자리에 미세 기공이 필연적으로 생기는 구조적 한계를 가지고 있으며, 인장 시 파괴가 시작되는 지점이 되어 물성의 저하의 큰 원인이 됨
- 탄소섬유의 물성은 전구체 섬유의 물성과 직접적인 관련이 있으므로 기계적 강도를 증가시키기 위하여 전구체인 PAN 섬유의 구조를 보다 치밀하며 잘 배향되어 있도록 하는 연구가 진행됨
- 국내 서울대학교 유웅열 교수 연구팀은 습식방사 공정 중 전기장을 인가하여 PAN 사슬의 배향도, 결정화도를 증가시킴과 동시에 기공의 크기를 줄여 인장강도와 탄성계수를 약 23%가량 증가시킴 [4]
- 테네시의 오크리지 연구소에서는 초고분자량 PAN 섬유를 합성하여 탄화시킨 결과로 표면 결함이 적고 기공의 부피와 직경이 감소되어 강도는 Toray사의 T700과 유사한 4.3GPa를 가지며 탄성계수는 T1000보다 높은 345GPa 갖는 탄소섬유를 제조함 [5]
- 미국 조지아 공과대학 Satish Kumar 교수팀은 PAN 고분자와 열 수축 성능을 향상시킬 수 있는 탄소나노튜브를 복합화하여 탄소나노튜브 통한 PAN 사슬의 고배향, 결정 크기의 증가를 유도하였고 그 결과 4.5GPa의 인장강도와 463GPa의 탄성계수를 갖는 탄소섬유를 제조함 [6]
- 글로벌 시장의 대부분을 차지하는 일본, 미국, 중국의 탄소섬유는 이미 초고강도(6.4GPa) 섬유와 초고탄성률(295GPa) 섬유의 생산기술을 확보하여 항공분야와 위성, 방위산업 및 특수 산업용 분야 등의 수요에 대응하고 있으며, 현재 초고성능 라지 토우 탄소섬유 (40k 이상) 개발과 생산량을 늘리는 기술개발에 초점을 두고 있음
- 한국은 뒤늦게 탄소섬유 시장에 참여하여 T1000급 12K 탄소섬유의 개발에 성공하였고, 생산능력을 증가시키기 위하여 탄소섬유 생산라인을 증설하는 중임

(2) 저가 탄소섬유 기술 개발 동향

- 탄소섬유에 대한 수요가 증가함에도 불구하고 탄소섬유의 광범위한 분야로의 적용은 고가의 화석 기반 원료인 PAN의 사용으로 인해 많은 제약을 받고 있으며, 실질적으로 자동차, 항공기 및 고급 스포츠 분야에만 주로 사용됨
- 이에 저가 탄소섬유에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으며, 자동차산업에서 요구하는 인장강도와 탄성계수인 1.72GPa, 172GPa를 지니며 낮은 제조원가를 만족시키는 탄소섬유 제조 기술을 개발 중임
- 탄소섬유의 가격이 높은 이유는 복잡한 생산 공정과 전체 공정비용의 절반에 기여하는 화석 기반의 PAN 전구체의 사용이 크며, 비용 측면에서 저렴한 탄소섬유를 제조할 수 있는 저가의 전구체 개발과 활용, 공정비용을 줄일 수

있는 새로운 공정에 관한 연구가 필요함

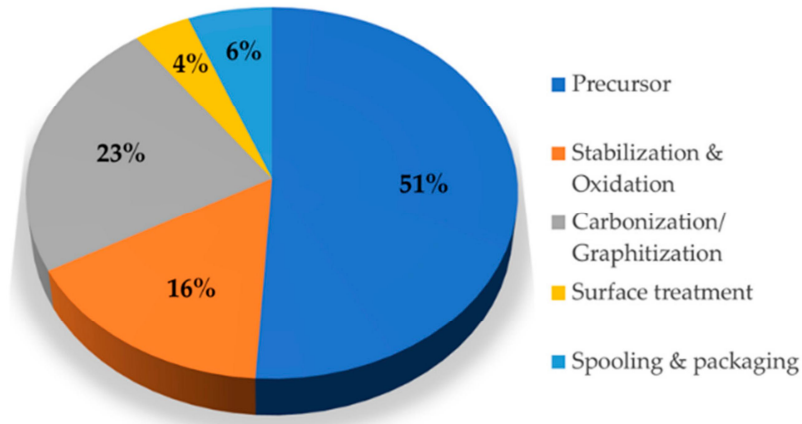


Fig.4 PAN 기반의 탄소섬유 가격 구조 [7]

- 저렴한 전구체 고분자는 주로 폴리에틸렌, 리그닌, 그리고 재생 셀룰로오스를 활용하여 탄소섬유를 제조하는 연구들이 보고됨
- 독일 슈투트가르트 대학의 Michael Buchmeiser 교수 연구팀은 상용화된 재생 셀룰로오스 섬유를 새로운 황 기반의 탄화제인 암모늄 토실레이트를 적용하여 2000°C보다 매우 낮은 1400°C에서 셀룰로오스를 탄화하였으며 37% 이상의 높은 탄소 수율과 인장강도와 탄성계수가 2.0GPa, 85GPa의 탄소섬유를 제조함 [8]
- 국내 영남대학교 이준석 교수 연구팀은 저렴한 고밀도 폴리에틸렌 섬유와 선형 저밀도 폴리에틸렌 섬유를 술폰화 후 1000도에서 탄화 과정을 거쳐 인장강도와 탄성계수가 각각 2.03 GPa, 143.63 GPa인 탄소섬유 제조함 [9]
- 미국 아이오와 주립 대학의 Xianglan Bai 교수 연구팀은 리그닌 바이오 오일을 아크릴화, 아세틸화 후 라디칼 중합을 통하여 선형 분자 배향을 가진 새로운 전구체 폴리머를 개발하였고, 이를 통해 1.7 GPa, 182 GPa의 인장강도와 탄성계수를 갖는 탄소섬유를 개발함 [10]

3. 국내외 산업 동향

- 글로벌 PAN계 탄소섬유 시장은 21년 8만 6천톤에서 연평균 약 10% 성장을 할 것으로 전망됨
- 탄소섬유 제조가 가능한 나라는 미국, 일본, 중국, 대만, 벨기에, 한국 정도이며 실질적으로 일본 기업이 시장의 절반을 차지하며 세계 공장을 운영하며 생산하고 있음
- 항공 우주 및 방위 산업은 탄소섬유 최대 수요처로, 상업용 항공기, 상업용/군용 헬리콥터, 군용 제트기, 우주선 제조 등에 사용됨
- 자동차 산업에서 탄소섬유는 개인용/상업용 차량, 철도 관련 차량 제조에 사용

되며 친환경 차 산업의 성장과 경량화 이슈로 인해 자동차 분야는 빠르게 성장 중임

- 2018년 기준으로 일본의 Toray, Mitsubishi Chemical Corporation, 및 Teijin은 세계 탄소섬유 시장에서 약 48.3%의 점유율을 가지고 있으며, 우주/항공, 자동차, 압축 용기, 및 스포츠/레저 산업용 탄소섬유를 생산함
- 독일의 SGL 그룹은 2018년 기준으로 9.7%의 시장을 점유하고 있는 두 번째로 큰 탄소섬유 제조업체로, 독일의 자동차 업체들과의 컨소시엄을 통해 탄소섬유 복합소재 기술 개발에 주력하고 있음
- 미국의 Hexcel은 2018년 기준으로 8.7%의 탄소섬유 시장 점유율을 가지고 있으며, 우주/항공, 자동차, 풍력발전 산업용 탄소섬유 생산에 주력하고 있음
- 중국 업체들은 기술력이 일본, 미국, 독일 등의 기업체들에 비해 미흡하며, 주로 일반 상용제품인 스포츠/레저 시장을 공략하고 있고, 현재 수출보다는 중국 내 자급률을 높이기 위해 추가 증설에 주력하고 있으며, 고품질 제품의 개발을 시작하는 단계에 있음.
- 한국 효성첨단소재는 기존 시판된 T800급 탄소섬유를 넘어서 일본과 미국에 이어 2017년 5년 만에 고부가가치의 제품으로 평가받는 Toray사의 T1000급 초고강도 탄소섬유 개발에 성공하였고, 2018년 기준 전 세계적으로 생산능력은 약 1.6%의 비중을 갖지만 2028년까지 생산라인을 연간 2만 4000톤까지 확보할 예정임

4. 맺음말

- 탄소섬유는 경량화, 강도 향상 및 내구성 등의 우수한 물성으로 인해 다양한 산업 분야에서 꿈의 첨단소재라고 불리고 있음
- 항공/우주, 건축/토목, 전자/기계, 스포츠/레저 산업부터 자동차, 군수, 의학/기타 의료기기 산업 등 많은 분야에서 널리 활용되기 위해서는 각 분야에 적합한 물성을 갖는 탄소섬유를 제조할 수 있는 기술 개발이 필요됨
- 항공/방산 및 건축 산업에는 고부가가치의 초고강도 및 초고탄성 탄소섬유가 요구되며, 자동차 및 스포츠/레저 산업에는 비용 효율적인 범용성 탄소섬유 소재 개발이 요구됨
- 초고성능 탄소섬유를 개발하기 위해서는 탄소섬유의 물성과 직접적으로 연관된 PAN계 전구체 고분자 섬유의 내부 구조를 개선하기 위한 다양한 연구가 보고됨
- 저가의 범용성 탄소섬유를 개발하기 위해 폴리에틸렌을 술폰화하고 탄화과정을 거쳐 탄소섬유를 제조하는 연구가 보고됨
- 또한 환경오염, 석유 자원 부족, 에너지 절감과 탄소중립 등과 같은 글로벌 이

슈와 관련하여 재생 가능한 바이오 기반 폴리머의 가치를 높이는 실질적인 연구가 진행되고 있으며, 많은 연구에서 리그닌과 셀룰로오스를 활용하여 범용성 탄소섬유로서 사용 가능한 물성을 갖는 것이 보고됨

- 탄소섬유 산업은 매우 노하우가 필요하기 때문에, 양산을 위해 대규모 투자와 지속적인 연구가 필요하며, 대기업군에서 주로 사업을 수행하고 있고, 현재 국내 효성 첨단소재는 PAN계 탄소섬유 생산라인을 증설중하고 있으며, 탄소섬유 분야 글로벌 톱3에 진입하는 것을 목표로 하고 있음
- 현재 중국과 경쟁이 치열한 스포츠/레저용, 일반 산업용 분야를 기반으로 제품 개발과 생산을 확대하여, 시장 규모가 크고 성장성이 높은 우주/항공, 자동차, 에너지 분야로의 진출이 필요함

References

- [1] Milbrandt, A., & Booth, S. (2016). Carbon fiber from biomass (No. NREL/TP-6A20-66386). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [2] Minus, M., & Kumar, S. (2005). The processing, properties, and structure of carbon fibers. *Jom*, 57, 52-58.
- [3] Chae, H. G., & Kumar, S. (2008). Making strong fibers. *Science*, 319(5865), 908-909.
- [4] Yang, H. S., Kim, Y. M., Choi, H., Jang, J., Youk, J. H., Lee, B. S., & Yu, W. R. (2020). Electrochemical wet-spinning process for fabricating strong PAN fibers via an in situ induced plasticizing effect. *Polymer*, 202, 122641.
- [5] Morris, E. A., Weisenberger, M. C., Abdallah, M. G., Vautard, F., Grappe, H., Ozcan, S., ... & Naskar, A. K. (2016). High performance carbon fibers from very high molecular weight polyacrylonitrile precursors. *Carbon*, 101, 245-252.
- [6] Chae, H. G., Choi, Y. H., Minus, M. L., & Kumar, S. (2009). Carbon nanotube reinforced small diameter polyacrylonitrile based carbon fiber. *Composites Science and Technology*, 69(3-4), 406-413.
- [7] Warren, C. D. (2011). Low cost carbon fiber overview. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- [8] Spörl, J. M., Beyer, R., Abels, F., Cwik, T., Müller, A., Hermanutz, F., & Buchmeiser, M. R. (2017). Cellulose-derived carbon fibers with improved carbon yield and mechanical properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 302(10), 1700195.

- [9] Eun, J.H., Lee, J.S. Study on polyethylene-based carbon fibers obtained by sulfonation under hydrostatic pressure. *Sci Rep* 11, 18028 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97529-4>
- [10] Luo, Y., Qu, W., Cochran, E., & Bai, X. (2021). Enabling high-quality carbon fiber through transforming lignin into an orientable and melt-spinnable polymer. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127252.
- [11] 서민강, & 박수진. (2010). 탄소섬유 제조방법 및 응용분야. *고분자 과학과 기술*, 21(2), 130-140.
- [12] 채한기, 이성호, 구본철, 박민, & 김준경. (2010). 탄소복합섬유 개발동향. *Polymer Science and Technology*, 21(2), 157-166.
- [13] Seo, M. K., Choi, K. E., Min, B. G., & Park, S. J. (2008). Carbon Fibers (I): General Understanding and Manufacturing Techniques of Carbon Fibers. *Carbon Letters (Carbon Lett.)*, 9(3), 218-231.
- [14] 강진균. (2018). 탄소섬유 기술을 이용한 시장동향 조사보고서, ECO융합섬유연구원
- [15] 이성호, 조세연, 최영철. (2020). 탄소섬유 소재산업 및 기술개발 동향, KEIT 이슈리포트