자기강화복합소재(SRC, self-reinforced composites): 지속 가능한 고성능 복합소재의 새로운 패러다임

김재우

- 1996-2000. 서울대학교 응용화학 학사
- 2000-2004. 서울대학교 화학공학 석사
- 2004-2008. GS칼텍스 신에너지연구센터 연구원
- 2008-2013. Purdue Univ. Chem E. 박사
- 2013-2015. Cornell Univ. Mechanical E. 포닥연구원
- 2015-현재. 한국과학기술연구원, 선/책임연구원

1. 서론: 복합소재의 진화와 SRC의 등장

현대 산업은 경량화, 고강도, 내구성, 그리고 재활용성을 동시에 요구하는 방향으로 나아가고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 복합소재가 널리 활용되고 있지만, 이질적인 구성 요소로 인한 계면 불안정성과 재활용의 어려움은 여전히 중요한 과제로 남아 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 자기강화복합소재(self-reinforced composites, SRC)가 등장하였다. SRC는 보강재와 매트릭스가 동일한 고분자 물질로 이루어져 있어 계면 접착력이 뛰어나며, 재활용 또한 용이하다는 장점을 가진다. 이러한 특성은 복합소재의 기계적 성능을 향상시키는 동시에 환경적 지속 가능성을 확보하는 데 기여하며, SRC는 지속 가능한 고성능 복합재의 새로운 패러다임으로 주목 받고 있다.

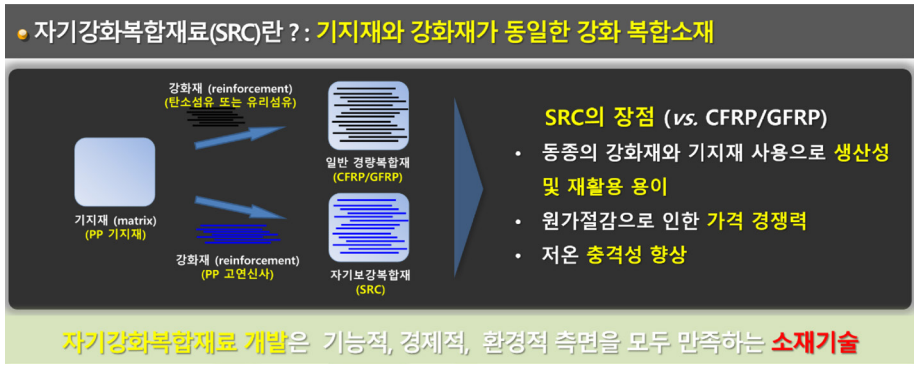

Figure 1. 폴리프로필렌(PP) 자기강화복합재료의 정의 및 장점.

2. SRC의 구조적 특성과 장점

SRC의 가장 두드러진 특징은 보강재와 매트릭스가 동일한 고분자 물질로 구성되어 있다는 점이다. 이로 인해 다음과 같은 여러 가지 장점이 나타난다. 첫째, 재료 간의 분자 상호작용이 뛰어나 우수한 계면 접착력을 확보할 수 있으며, 이는 기계적 강도의 향상으로 이어진다. 둘째, 이질적인 구성 요소를 분리하는 과정이 필요 없어 재활용이 간편하고 공정 비용이 절감된다. 셋째, 동일한 고분자 재료를 사용함으로써 복합소재의 밀도가 낮아져 경량화에 유리하다. 마지막으로, 이러한 특성들은 환경 친화성에도 기여하며, 재활용 용이성과 낮은 에너지 소비를 통해 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있게 된다.

3. 주요 소재: 폴리프로필렌(PP) 기반 SRC

SRC에 사용되는 다양한 고분자 중에서도 폴리프로필렌(PP)은 저밀도, 우수한 기계적 성질, 열가소성, 경제성 등 여러 면에서 특히 주목 받고 있다. PP는 밀도가 낮아 경량화에 유리하고, 충격 저항성이 높으며 인장 강도와 탄성률이 우수하여 다양한 기계적 요구를 충족할 수 있다. 또한, 열가소성 소재로서 가공이 용이하며 다양한 형태로 성형이 가능하고, 원료 비용이 저렴해 대량 생산에 적합하다는 이점도 갖고 있다. 이러한 특성으로 인해 PP 기반 SRC는 자동차 부품, 스포츠 용품, 보호 장비 등 다양한 산업 분야에서 활발히 활용되고 있다.

4. 제조 공정과 기술

PP 기반 SRC의 제조에는 다양한 공정이 사용되며, 이들 공정은 최종 복합소재의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 연신 공정은 PP 테이프 또는 섬유를 고배율로 연신하여 분자 사슬을 정렬시킴으로써 기계적 성능을 향상시키며, 이때 연신비, 온도, 속도 등의 조건이 중요한 변수로 작용한다. 핫 콤팩션(hot compaction)은 연신된 PP 테이프의 외층만 선택적으로 용융시켜 매트릭스를 형성하고 내부는 보강재로 유지하는 방식으로, 정밀한 온도 제어를 통해 균일한 구조를 얻을 수 있다. 공압출(co-extrusion) 방식은 테이프 양면에 낮은 온도에서 용융되는 코폴리머 층을 부착해 성형 시 매트릭스를 형성하게 하며, 에너지 효율성이 높은 특징을 가진다. 더블벨트 프레스(double-belt press)는 연속적인 압력과 온도 제어를 통해 대량 생산이 가능하며, 에너지 소비가 적고 산업적으로도 실용성이 높은 공정으로 평가받고 있다. 마지막으로, 적층 공정(lamination)은 연신된 PP 테이프와 저융점 코폴리머 필름을 번갈아 적층하여 구조를 형성하는 방식으로, 매트릭스와 보강재 비율 조절이 용이해 다양한 설계가 가능하다.

5. 응용 분야와 산업적 활용

PP 기반 SRC는 경량성과 내구성을 동시에 요구하는 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 자동차 산업에서는 내부 패널, 범퍼, 트렁크 라이너와 같은 경량화가 필요한 부품에 적용되고 있으며, 항공우주 산업에서도 드론이나 항공기 부품 등 고강도 경량 소재가 필요한 부위에 사용된다. 스포츠 용품 분야에서는 헬멧, 보호대, 자전거 프레임 등 충격 저항성이 중요한 제품에 SRC가 적용되고 있으며, 건축 자재로는 단열재나 벽체 패널 등에 활용되어 경량성과 내구성 측면에서 큰 장점을 발휘한다.

Figure 2. 폴리프로필렌(PP) 자기강화복합재료의 다양한 응용분야 예시.

6. 연구 동향과 미래 전망

자기강화복합소재, 특히 PP 기반 SRC에 대한 연구는 그동안 공정 변수, 재료 구조, 기계적 물성 간의 상관관계를 중심으로 활발하게 진행되어 왔다. 우선, 고분자 연신 테이프의 구조와 물성에 관한 연구에서는 Abraham et al.이 연신비 8과 12의 PP 테이프를 사용하여 제조한 SRC의 동적 기계적 특성, 굽힘, 충격 특성을 비교하였고, 연신비가 클수록 체인 정렬도와 결정화도가 향상되어 물성이 향상된다는 결과를 보고하였다. 또한, Foster et al.은 단축 방향으로 열압축 된 시트의 인장 특성을 다양한 연신비 조건에서 분석한 결과, 연신 공정이 PP 테이프의 인장 강도, 치수 안정성, 밀도, 결정 구조에 중요한 영향을 미친다는 사실을 밝혔다. 이러한 연구는 연신 공정 조건, 특히 고온 조건에서의 롤러 속도 차이와 온도가 최종 제품의 결정화도 및 강도를 좌우한다는 점을 강조한다.

직조 구조 및 보강재 배열에 관한 연구도 활발히 진행되었다.

Alcock et al.은 다양한 배열 각도(0°, 10°, 60°, 90°)로 PP-SRC를 제작하여 배열에 따른 인장 및 파괴 거동을 분석하였고, Hine et al.은 테이프의 분자량, 단면 형상, 직조 형태 등이 기계적 성능에 미치는 영향을 연구하여 테이프 및 구조 설계의 중요성을 강조하였다. 한편, 공정 온도와 성형 방식에 대한 연구에서는 Bárány et al.이 핫 콤팩션 온도가 PP-SRC의 성능에 민감하게 작용함을 보였으며, Swolfs et al.은 성형 온도, 유지 시간, 인터리브 필름 유무 등이 인장 및 충격 특성에 영향을 미친다는 사실을 규명하였다.

제조 공정 측면에서는 핫프레스 및 진공백 몰딩 방식이 주로 사용되어 왔지만, 반복적인 온도와 압력 인가로 인해 시간 소모가 크고 대량 생산에는 부적합하다는 한계가 지적되고 있다. 이를 보완하기 위해 더블벨트 프레스 공정이 제안되었으며, 이는 연속 공정으로 일정한 온도와 압력 유지가 가능해 에너지 소비가 적고 대량 생산에 적합하다. 그러나 아직 이 공정을 활용한 연구는 제한적이며, 산업 적용성을 확보하기 위한 체계적인 연구가 요구된다.

현재까지의 연구는 개별 변수의 영향에 초점을 맞추는 경향이 강해 연신 테이프의 구조와 SRC 물성 간의 인과관계를 명확히 설명하는 데 한계가 존재한다. 특히 연신비, 테이프 배열, 성형 온도, 계면 특성 등이 복합적으로 작용하는 다변수 조건 하에서의 메커니즘은 아직 충분히 규명되지 않았다. 향후에는 다변량 분석 기반 통합 모델링, 실시간 공정 모니터링 기술, 바이오 기반 소재 적용, AI 기반 최적 설계 등 예측 가능성과 정량성을 높인 연구가 필요하다.

7. 결 론

자기강화복합소재는 기존 복합소재가 갖는 계면 불안정성과 재활용 한계를 극복할 수 있는 잠재력을 지니고 있으며, 경량화, 고강도, 재활용성 등의 요구를 충족시키는 차세대 소재로 부상하고 있다. 특히 PP 기반 SRC는 성능과 경제성을 동시에 만족시키며, 다양한 산업 분야에서의 활용 가능성을 입증하고 있다. 앞으로는 바이오 기반 원료의 적용과 고기능성 부여를 통해 SRC 기술이 더욱 진화할 것이며, 이는 지속가능 한 미래를 위한 핵심 기술로 자리매김할 것이다.

참고문헌

1. D. W. Kim, Y. S. Kim, Y. C. Jung, S. Y. Kim, J. M. Song, M. K. Kim, and J. W. Kim, “Development of a continuous manufacturing process for self-reinforced composites using multi-step highly drawn polypropylene tapes”, *Polym*., 2020, **191**, 122267.
2. T. Siwowski, D. Kaleta, and M. Rajchel, “Structural behaviour of an all-composite road bridge”, *Compos. Struct*., 2018, **192**, 555-567.
3. C. Gao, L. Yu, H. Liu, and L. Chen, “Development of self-reinforced polymer composites”, *Prog. Polym*., 2012, 37(6), 767-780.
4. H. S. Lee, Y. S. Kim, W. H. Choi, D. W. Yun, J. Y. Lee, J. M. Song, S. G. Kim, J. W. Kim, and S. Y. Kim, “Processing temperature window design via controlling matrix composition for polypropylene-based self-reinforced composites”, *Compos. - A: Appl. Sci*., 2021, **143**, 106301.
5. N. M. Barkoula, A. A. J. M. Peijs, T. Schimanski, and J. Loos, “Processing of single polymer composite using the concept of constrained fibers”, *Polym. Compos.*, 2004, **26**(1), 114-120.
6. P. J. Hine, R. H. Olley, and I. M. Ward, “The use of interleaved films for optimising the production and properties of hot compacted, self reinforced polymer composites”, *Compos. Sci. Technol*., 2008, **68**(6), 1413-1421.
7. H. S. Lee, J. U. Jang, J. W. Kim, Y. S. Kim, J. H. Cho, M. N. Kim, J. T. Lee, W. H. Choi, J. M. Song, W. J. Song, D. H. Won, D. W. Yun, S. H. Kim, M. K. Kim, and S. Y. Kim, “True self-reinforced composites enabled by tuning of molecular structure for lightweight structural materials in future mobility”, *J. Chem. Eng*., 2023, **465**, 142996.
8. Y. S. Kim, J. Y. Jo, W. H. Choi, J. M. Song, Y. C. Jung, S. W. Choi, and J. W. Kim, “Effect of draw ratio on the mechanical properties of polypropylene self-reinforced composite”, *Compos. Struct.*, 2021, **275**, 114398.