

언더컷 형상의 판재 성형품에 보강용 CFRP 패치의 접합을 위한 공정기술 개발

이환주¹ · 전용준² · 조훈² · 김동언[†]

국민대학교 자동차공학과¹
한국생산기술연구원 형상제조연구부^{2,†}

Development of a process to apply uniform pressure to bond CFRP patches to the inner surface of undercut-shaped sheet metal parts

Hwan-Ju Lee¹ · Yong-Jun Jeon² · Hoon Cho² · Dong-Earn Kim[†]

Department of Automotive Engineering, Kookmin University¹

Shape Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^{2,†}

(Received December 19, 2020 / Revised December 28, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: Partial reinforcement of sheet metal parts with CFRP patch is a technology that can realize ultra-lightweight body parts while overcoming the high material cost of carbon fiber. Performing these patchworks with highly productive press equipment solves another issue of CFRP: high process costs. The A-pillar is the main body part and has an undercut shape for fastening with other parts such as roof panels and doors. Therefore, it is difficult to bond CFRP patches to the A-pillar with a general press forming tool. In this paper, a flexible system that applies uniform pressure to complex shapes using ceramic particles and silicone rubber is proposed. By benchmarking various A-pillars, a reference model with an undercut shape was designed, and the system was configured to realize a uniform pressure distribution in the model. The ceramic spherical particles failed to realize the uniform distribution of high pressure due to their high hardness and point contact characteristics, which caused damage to the CFRP patch. Compression equipment made of silicone rubber was able to achieve the required pressure level for curing the epoxy. Non-adhesion defects between the metal and the CFRP patch were confirmed in the area where the bending deformation occurred. This defect could be eliminated by optimizing the process conditions suitable for the newly developed flexible system.

Key Words: CFRP patchwork, Flexible mold, Undercut, Multi-material, Sheet metal forming, Bonding

1. 서 론

차량의 연비 및 배기가스 규제가 강화됨에 따라 주요 자동차 제조사는 탄소섬유 복합소재 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)를 이용한 경량차체 개발 관련 연구를 진행하고 있다. 그러나 양산형 차량에 적용하기 위해서는 탄소섬유의 높은 소재 단가와 공정 비용 절감이 요구된다. 이를 위해 기존 금속 부품의 특정 영역을 CFRP 패치로 강화하는 다

중소재 성형기술이 관심을 받고 있다.

자체 구조물 중 필러는 전면-측면 충돌 및 전복 사고에서 운전자의 생존 공간을 확보하는 주요 부품이다. 글로벌 완성차 업체를 중심으로 다중소재 부품 성형공법의 기술 실증을 위해 A필러와 B필러를 선택하고 있다. 독일의 B社は 금형 표면의 온도 제어가 가능한 프레스 공정기술을 이용하여 핫스탬핑 성형품에 CFRP 패치를 접합하는 공정을 B필러에 적용하였다. A필러 내부에는 브레이딩 공정으로 제작된 CFRP 보강재를 삽입하여 가격 경쟁력과 경량화를 구현하였다¹⁾.

일반적으로 필러는 충돌 관련 규제 대응을 위해

1. 국민대학교 자동차공학과

† 교신저자: 한국생산기술연구원 형상제조연구부
E-mail: kdu0517@kitech.re.kr

내·외측 패널의 중심부에 고강도 보강재가 배치되는 3층 구조로 제작된다. A필러의 경우 충돌 안정성과 더불어 사고 예방을 위해 운전자의 측면부 시야 개선 목적으로 작은 단면 구조가 요구된다. A필러는 전면의 윈드실드, 상부의 루프 패널 및 측면의 도어와 체결을 위해 언더컷 형상을 갖는 단면구조로 되어있다.

금속 성형품에 CFRP 패치가 접합된 하이브리드 부품의 경우 계면 품질 향상 및 CFRP 패치의 내부 결합 저감 등을 위해 경화 공정 중 온도와 압력의 정밀 제어가 요구된다. 기존 오토클레이브 공정의 낮은 성형성을 극복하기 위해 완성차 업체는 프레스를 활용한 복합소재 고속 성형기술을 개발하고 있다. 그러나 A필러는 내부의 언더컷 구조로 인해 일반적인 프레스 장비와 금형으로 프리프레그의 경화 공정에서 요구되는 압력 제어가 어렵다^{2,4)}.

본 연구에서는 세라믹 입자와 실리콘 고무를 기반으로 하는 가변형상 가압장치를 고안하였다. 이를 활용하여 언더컷 형상을 갖는 부품의 내측에 배치된 CFRP 패치를 접합하였다. 에폭시 프리프레그의 경화 공정에서 요구되는 압력 수준의 확보와 더불어 균일한 압력이 작용하는지 확인하였다. 금속과 CFRP 패치의 접합 품질의 분석을 통해 다중소재 하이브리드 부품 성형에 프레스 공정기술의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실험모델 및 공정설계

2.1. 언더컷 포함 기준모델 설계

기존 차량에 적용된 A필러의 단면을 Fig.1(a)에서 살펴보면 내·외측 패널과 보강재로 구성된 3층 구조임을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 언더컷 형상을 갖는 외측 패널에 기계적 물성을 보강하는 CFRP 패치를 프레스 공정으로 접합하는 시스템을 제안하고 있다. 개발 시스템을 검증하기 위해 기존 A필러의 단면 형상을 대상으로 벤치마킹을 진행하여 실험에 필요한 기준모델 형상을 Fig.1(b)와 같이 도출하였다.

본 논문에서 기준모델은 차체 구조와 외장품에 많이 사용되는 440MPa 냉연강판(SPRC440)으로 제작하였다. 보강을 위한 CFRP 패치는 SK 케미칼社의 직조형 프리프레그를 적층하여 라미네이트 형태로 활용하였다. 강판재로 제작된 내·외측 패널의 체결 성능과 A필러의 강성을 확보하기 위하여 보강용 CFRP 패치는 Fig. 1(b)에 표시된 단면 영역에만 배치하였

다. CFRP 패치를 기준 모델의 하측 면과 양쪽 굽힘 성형 영역에 한정하여 CFRP 성형품이 용접 또는 기계적 체결 과정에서 파손되지 않도록 설계하였다.

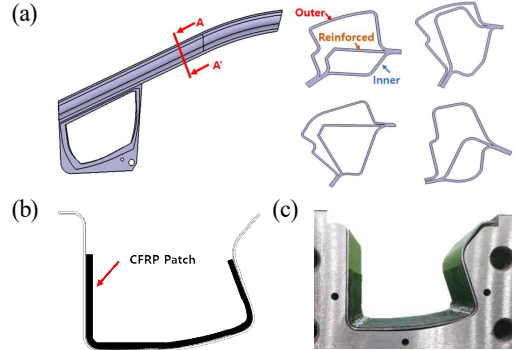


Fig. 1 Test model of metal-CFRP hybrid A-pillar; (a) cross-section view of A-pillar; (b) the position of CFRP patch on the inner surface of undercut-shaped sheet metal part; (c) Lower mold with cartridge heaters installed for temperature control

2.2. 보강용 CFRP 패치 접합공정 설계

다중소재로 구성된 기준모델에서 강판재 부품의 언더컷 형상은 프로그래시브 공정을 이용하여 제작하였다. 강판재 성형품의 내측에 탄소섬유 라미네이트를 수동으로 적층하였다. 이종 소재의 접합 품질은 계면 조건에 따라 상이하다⁵⁾. 본 논문에서는 접합 강도 향상 기술을 포함하지 않아 금속과 라미네이트 사이의 계면에는 별도의 표면 개질을 수행하지 않았다. 프리프레그에 포함된 에폭시를 이용하여 경화 과정에서 접합되는 동시 접합(co-bonding) 공정을 적용하여 별도의 접합용 필름 없이 일체화하였다. 강판재 성형품 하부 금형에 카트리지 히터를 설치하여 표면 온도를 프리프레그 경화 조건에 맞춰 Fig.2와 같이 다단으로 제어하였다⁶⁾.

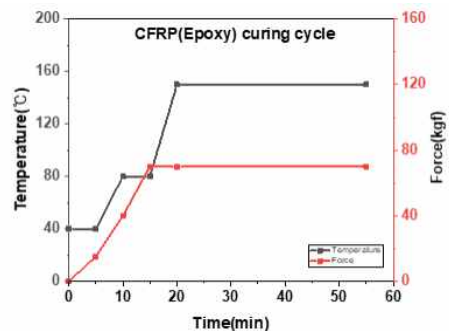


Fig. 2 Process conditions of epoxy prepreg

3. 균일 가압구조 제작 및 성능비교

3.1. 가변형상 기반 언더컷 내부 가압

CFRP 패치가 설계된 기계적 성능을 구현하기 위해서는 수지 중량비 및 내부 결합 등 성형품의 품질 제어가 중요하다. 이를 위해 에폭시 경화 공정 중 라미네이트의 표면에 균일한 압력 및 온도 조건과 조율된 정밀한 압력 제어가 요구된다. 본 논문에서는 세라믹 구형 입자와 실리콘 고무를 이용하여 언더컷 형상 내부의 이중 소재 접합면에 균일한 압력을 부여하는 형상 가변형 압축 시스템을 Fig.3과 같이 제작하고 성능을 평가하였다.

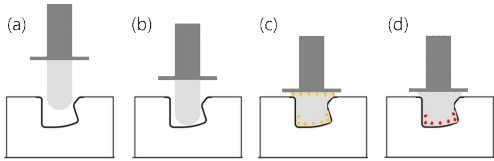


Fig. 3 Schematic diagram of the operation of the surface pressure control system using a shape variable punch

3.2. 세라믹 입자 기반 균일 가압 시스템

임의형상 부품의 표면에 균일한 압력을 부가하기 위해 세라믹 구형 입자로 구성된 가압시스템을 제작하였다. 세라믹 입자는 실리콘 대비 고온 안정성이 높고, 미세입자의 충진을 통해 복잡 형상 부품에도 적용이 가능하다. 이와 더불어 구형 입자 사이에 생성되는 개방형 기공은 프리프레그의 경화를 위해 가열된 성형품을 취출 가능한 온도까지 냉각하는 채널로 활용이 가능하다.

2~20mm 지름의 세라믹 구형 입자를 사용하여 입자 크기별 언더컷 금형 형상부의 충진 특성을 Fig.4와 같이 비교 분석하였다. 조건별 단면의 영상 분석을 통해 금형 표면과 구형 입자 사이의 영역을 비교해 보면 2mm의 입자에서도 약 3,000mm²의 미충진이 확인된다. 작은 입자를 사용하여도 점 접촉 특성 및 형상에서 기인하는 최대 충진율로 인해 균일한 압력 부여가 어려운 것을 확인하였다.

3.3. 실리콘 고무 기반 균일 가압 시스템

실리콘 고무 가압 펀치는 Shinetsu社의 상온 경화형 room-temperature-vulcanizing(RTV) 실리콘으로 제작되었다. 실리콘 고무 펀치는 유연한 재질로 구성된 가압 구조물로 치수 안정성 및 표면 이형성이 높

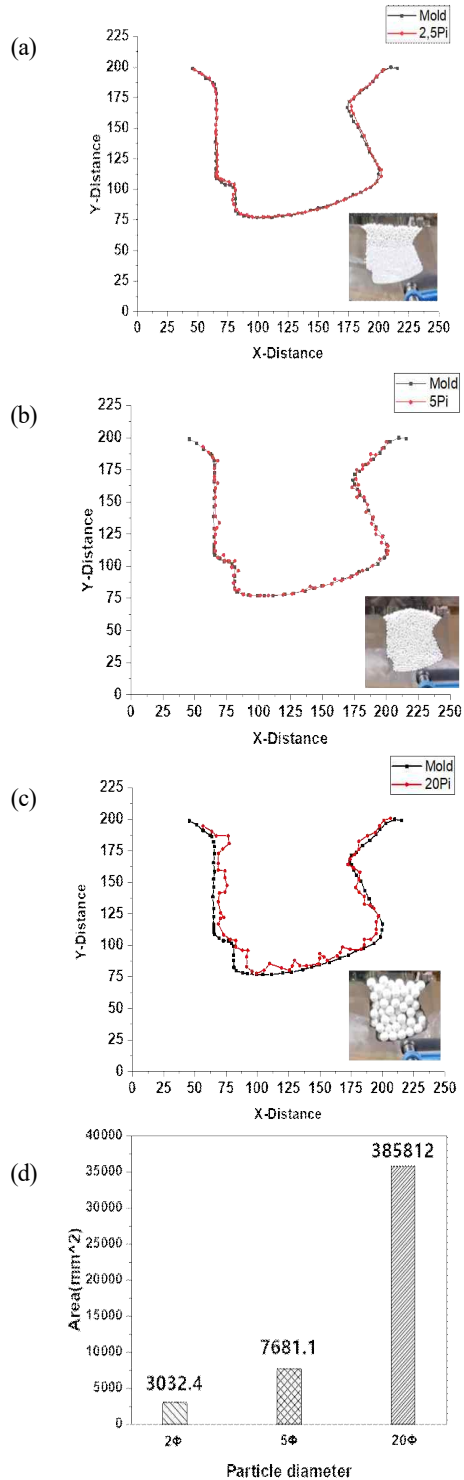


Fig. 4 Analysis of unfilled area according to particle size: (a) Filled using a 2mm diameter particles; (b) 5mm; (c) 20mm

아 별도의 패키징 없이도 CFRP 패치의 가압 성형이 가능하다. 실리콘 고무는 세라믹 입자와 달리 금형과의 접촉면에서 완전 충진을 Fig.5(b)에서 확인할 수 있다.

실리콘 고무에 경화제와 오일의 혼합비율을 조절하여 변위에 따른 가압력 수준을 확인하였다. 2절에서 설계된 기준모델 금형을 사용하여 실리콘 펀치 상부의 가압 깊이에 따른 하중 변화를 Fig.5(c)와 같이 점검하였다. 실리콘 오일 첨가량이 증가할수록 가압체의 유연성이 증가하며, 변위에 따른 가압력 변화의 비선형 특성도 감소 되어 압력 제어에 유리하다고 판단된다. 그러나 실리콘 오일이 많이 사용될수록 내구성 저하와 더불어 고온 작동에서 소재의 유연성 저하 등 고온 물성의 분석이 필요하다.

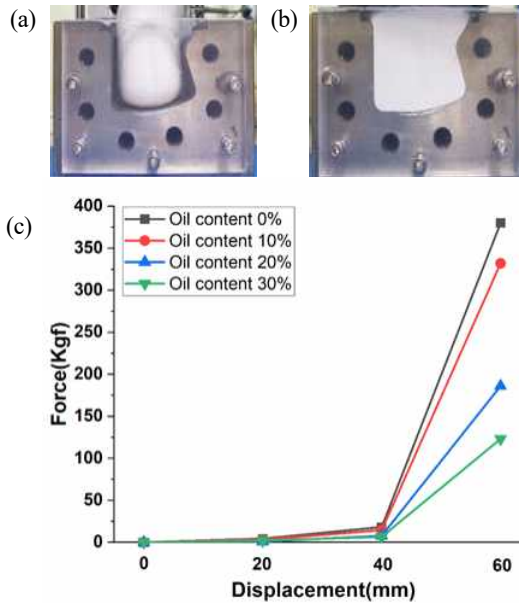


Fig. 5 Changes in load-displacement characteristics of silicone punch according to the amount of silicone oil.

3.4. 시스템 별 가압 수준 성능 비교

본 논문에서 제안된 세라믹 입자와 실리콘 고무를 이용한 압축 시스템의 압력 수준 및 균일도를 점검하였다. 에폭시 프리프레그의 경화에서 요구되는 압력 수준을 고려하여 0.2~10MPa 범위의 압력 감지가 가능한 감압지를 이용하여 분석을 진행했다. 2장에서 설계된 기준모델의 단면을 5개 영역으로 분할하고 위치별 압력을 확인하였다.

지름 2mm의 세라믹 입자를 사용한 가압시스템은 전체 영역에서 압력 수준이 불충분하였다. CFRP 패치의 성형 및 접합에 필요한 수준의 면압을 구현하기 위하여 시스템의 하중을 증가하면 구형 형상에서 기인되는 점 접촉 특성으로 인해 하중이 집중되면서 CFRP 패치의 파손이 발생하였다. 해당 불량은 고온 내구성이 확보된 두꺼운 유리섬유 패브릭으로 압력을 분산하여 해결이 가능하다. 그러나 표면의 패브릭 추가로 인해 날카로운 모서리 등을 갖는 복잡형상 부품에 균일한 가압이 불가하였다.

감압지 이미지 분석을 이용한 실리콘 시스템의 압력 분포는 Fig.6(b)에서 확인할 수 있다. 고굴곡 영역에 가해지는 최소 압력은 3MPa로 다른 영역 대비 상대적으로 낮으나 에폭시 경화에 사용 가능한 수준이다. 실리콘 고무가 언더컷 영역을 완전 충진한 것으로 Fig.5(b)에서 확인되나, 감압지 분석에서는 언더컷 외곽부에 압력이 집중되는 결과를 보인다. 복잡형상에 능동적으로 대응하여 균일한 압력을 구현하기 위해서는 실리콘 조성의 추가적인 최적화가 필요하다.

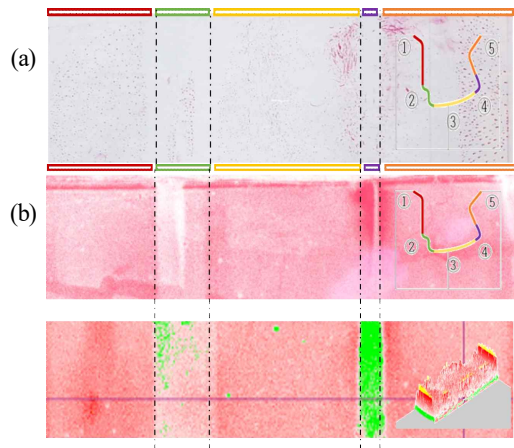


Fig. 6 Analysis of pressure distribution by location using prescale film; (a) result using 2mm diameter ceramic particles; (b) results using silicone rubber

4. 성형품 분석

3절에서 CFRP 패치의 성형과 접합 공정에 적용 가능하다고 판단되는 실리콘 가압 펀치를 이용하여 기준모델 형상의 하이브리드 부품을 제조하고 접합면을 분석하였다.

실리콘 고무 시스템을 이용하여 CFRP 패치를 접합한 부품의 단면을 Fig.7에 표시하고 있다. 모서리의 다중소재 접합면에서 층간 박리와 유사한 불량이 확인된다. 일반적으로 굽힘 성형된 CFRP 부품에서는 주름, 수지 과잉과 같은 불량이 쉽게 확인되며, 이는 두꺼운 라미네이트 내부에 적층된 플라이 상호 간의 층간 이동성이 낮아서 발생한다⁷⁾.

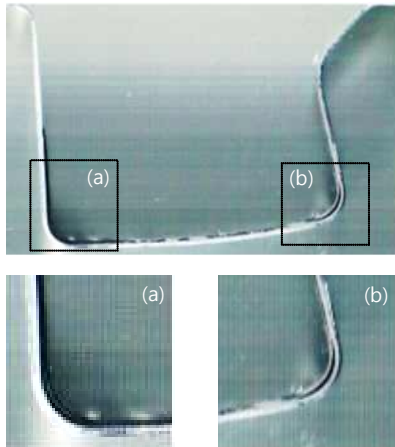


Fig. 7 Non-adhesion defects in the bent corner of Metal-CFRP hybrid parts

	25°C	35°C	45°C
2 plies	1982.56mm ²	836.91mm ²	831.18mm ²
3 plies	3228.36mm ²	2816.9mm ²	874.49mm ²
4 plies	3369.19mm ²	1513.71mm ²	439mm ²

Fig. 8 Analysis of the area of non-adhesion defects at the metal-CFRP interface according to the stacking temperature and the number of stacked plies.

라미네이트의 적층 조건에 따른 접합면의 비접착 영역의 변화를 Fig.8에서 확인할 수 있다. 성형된 금속 판재 위에 수동으로 적층하는 작업 온도를 증가하면 적층 불량이 감소한다. 온도 상승에 의한 수지의 흐름성이 향상되어 금속과 CFRP의 초기 접착 상태가 개선됨에 따른 효과라고 판단된다. 관련된 불량을 저감하기 위해서는 신규 개발된 가압 시스템에 적합한 온도와 압력을 반영한 공정절차 수립이 필요하다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 언더컷을 갖는 복잡형상 부품 내부에 CFRP 패치를 접합하는 가변형상 가압 장치를 제작하고 이종소재 접착면의 품질을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 세라믹 입자의 강한 경도와 형상 특성으로 인해 CFRP 패치의 표면의 국부적인 파손이 발생하여 프리프레그 성형 및 경화에 필요한 균일 압력 구현은 어렵다.

2) 실리콘 고무를 활용한 형상 가변형 가압장치를 구현하였으며, 경화제 및 실리콘 오일 등의 첨가를 통한 조성 제어로 접합 공정 중 하중 제어가 가능하다.

3) 고굴곡 굽힘 성형에서는 이종 소재 계면에서 비접촉 불량이 발생할 수 있으며, 이를 개선하기 위해서는 CFRP 패치의 적층 공정 온도의 최적화가 필요하다.

4) 유연한 구조를 갖는 가압장치를 적용함으로써 언더컷 형상 부품의 내부에도 기계적 물성의 부분 보강을 위한 CFRP 패치의 접합을 프레스 장비로 구현하였다.

참고문헌

- 1) WANG, Zheng, et al., "Manufacturing and investigation of steel-CFRP hybrid pillar structures for automotive applications by intrinsic resin transfer moulding technology", International Journal of Automotive Composites, 2.3-4: pp. 229-243, 2016.
- 2) FIORE, V.; VALENZA, A.; DI BELLA, G., "Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications", Journal of

- Composite Materials, 46.17: pp. 2089-2096, 2012.
- 3) LÖCHTE, Christian, et al., “Form-flexible handling and joining technology (formhand) for the forming and assembly of limp materials”, Procedia CIRP, 23: pp. 206-211, 2014.
 - 4) SADOWSKI, T., et al., “Gradual degradation of a thin-walled aluminum adhesive joint with omega cross section under bending”, International Journal of Adhesion and Adhesives, 89: pp. 72-81, 2019.
 - 5) ZINN, Carolin, et al., “Shear strength and failure behaviour of laser nano-structured and conventionally pre-treated interfaces in intrinsically manufactured CFRP-steel hybrids”, Composites Part B: Engineering, 151: pp. 173-185, 2018.
 - 6) REINHART, Gunther (ed.). Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
 - 7) Thor, Michael, et al., “Mechanisms of Origin and Classification of Out-of-Plane Fiber Waviness in Composite Materials – A Review”, J. Compos. Sci., 4(3), p. 130, 2020.

저자 소개

이 환 주(Hwan-Ju Lee) [정회원]



- 2017년 3월~현재: 국민대학교
자동차공학 박사과정

< 관심분야 >
복합소재(CFRP) 성형/가공, 구조해석

전 용 준(Yong-Jun Jeon) [정회원]



- 2012년 2월: 대구대학교
기계공학과 (공학석사)
- 2012년 3월~현재: 한국생산기술연
구원 형상제조부문, 연구원

< 관심분야 >
판재성형 및 금형, 판재성형해석

조 훈(hoon Cho)



- 2004년 3월: 성균관대학교 신소재공
학과 (공학박사)
- 1992년 3월~현재: 한국생산기술연
구원, 수석연구원
- 2017년~현재: 한국 주조공학회 기
술이사
- 2008년~현재: 한국 동기술연구조합
이사

< 관심분야 >
고순도화, 합금개발, 연속주조, 압출 및 인발

김 동 연(Dong-Earn Kim) [정회원]



- 2006년 8월: 서울대학교
기계공학과 (공학박사)
- 2008년 9월~2013년 11월: 삼성전자
삼성종합기술원, 전문연구원
- 2013년 12월~현재: 한국생산기술연
구원 형상제조부문, 수석연구원

< 관심분야 >
프레스 금형, 고강도 판재 성형, 복합소재 성형