

22MnB5 / 탄소섬유 강화 플라스틱으로 제작된 단면 보강 하이브리드 적층판의 강도 보강에 관한 연구

이환주¹ · 전용준¹ · 김동언[†]

한국생산기술연구원 금형성형연구부문^{1,†}

A study on strength reinforcement of one-sided reinforced hybrid laminates made of 22MnB5 and carbon fiber reinforced plastics

Hwan-Ju Lee¹ · Young-Jun Jeon¹ · Dong-Earn Kim^{1,†}

Molding & Metal Forming R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^{1,†}

(Received June 13, 2022 / Revised June 28, 2022 / Accepted June 30, 2022)

Abstract: As environmental regulations are strengthened, automobile manufacturers continuously research lightweight structures based on carbon fiber reinforced plastic (CFRP). However, it is difficult to see the effect of strength reinforcement when using a single CFRP material. To improve this, a hybrid laminate in which CFRP is mixed with the existing body structural steel was proposed. In this paper, CFRP patch reinforcement is applied to each compression/tensile action surface of a 22MnB5 metal sheet, and it was evaluated through a 3-point bending experiment. Progressive failure was observed in similar deflection on bending deformation to each one-sided reinforced specimen. After progressive failure, the tensile reinforced specimen was confirmed to separate the damaged CFRP patch and 22MnB5 sheet from the center of the flexure. The compression reinforced specimen didn't separate that CFRP patch and 22MnB5, and the strength reinforcement behavior was confirmed. In the compression reinforced specimen, damaged CFRP patches were observed at the center of flexure during bending deformation. As a result of checking the specimen of the compression reinforcement specimen with an optical microscope, It is confirmed that the damaged CFRP patch and the reinforced CFRP patch overlapped, resulting in a concentrated load. Through the experimental results, the 22MnB5 strength reinforcement characteristics according to the reinforcement position of the CFRP patch were confirmed.

Key Words: 22MnB5, CFRP, CFRP patch, Reinforcement, Hybrid laminate

1. 서 론

배기가스 규제와 향상된 연비 기준에 대응하기 위해 차량 제조업체는 경량화 기술 개발이 필수적이다¹⁾. 그러나 차량의 안전 기준 강화 및 편의성 향상을 위한 부가 장비로 인해 지속적으로 차량 중량이 증가하고 있다. 이를 극복하기 위해 기존 강재 소재를 비철금속으로 대체하거나 고성능 플라스틱을 사용한 경량화 연구가 지속적으로 수행되고 있다²⁾.

높은 경량화 잠재력을 갖춘 섬유 강화 복합소재는 높은 비강도와 더불어 내화학성, 내부식성 및 우

수한 피로 저항으로 인해 종래의 합금을 대체하기 위한 신소재로 주목받고 있다. 그러나 복합소재의 비강도, 비강성 특성은 금속 소재 대비 굴곡 파손에 취약하여 부재 강성, 내구 강도 등 재료 특성 요건의 한계가 명확하다. 이러한 복합소재의 특성을 보완하기 위해 금속 소재와 결합된 경량 하이브리드 부품에 대한 연구가 진행되고 있다.

금속 판재와 섬유 강화 복합소재가 교차 적층된 Fiber Metal Laminates(FMLs)는 성능과 비용의 균형을 맞출 수 있는 대표적인 하이브리드 소재이다³⁾. 유리 섬유 프리프레그 층이 여러 개의 매우 얇은 알루미늄 금속층과 교차 적층된 Glass Laminated Aluminum Reinforced Epoxy(GLARE)는 항공기 동체

1,† 교신저자: 한국생산기술연구원 금형성형연구부문
E-mail: kdy0517@kitech.re.kr

패널에 적용되었으며 경량화 그리고 금속 피로에 대해 높은 손상 내성을 갖는다⁴⁾.

Steel/FRP 하이브리드 구조가 자동차 산업에 점차 적용되고 있으며 주로 크럼플 존의 에너지 흡수능, 하중 전달 능력 향상에 활용된다. 프론트 범퍼 시스템은 GFRP로 보강된 하이브리드 범퍼를 통해 충돌 내구성 및 에너지 흡수능 향상을 위한 연구를 수행하였다. 서브 프레임은 로어 암에 탄소섬유 프리프레그를 접합하여 NVH 안정화 및 에너지 흡수 성능 향상에 관한 연구를 수행하였다⁵⁾. 그러나 프론트/센터 필러 같은 높은 강도가 요구되는 구조물의 경우 경량 및 안전이 동시에 고려된 연구가 부족한 실정이다.

최근 미국 고속도로 안전보험협회 IIHS는 증가하는 차량 중량 대응을 위해 충돌 카트의 무게를 1900kg으로 증가시켰다. Side impact 2.0 테스트 결과 로커 패널의 변형이 탑승 영역의 많은 침투를 발생시켰다. 이로 인해 더미의 골반에 큰 치명상을 초래하는 결과가 확인되었다⁶⁾. 센터 필러는 다층구조로 구성되어 있으나 로커 패널의 경우 전환 영역(Transition zone)을 포함하는 연신 소재로 이루어져 있다. 이러한 구조적 특징은 충돌 시 에너지 분산을 통해 탑승객에게 전달되는 충격을 완화한다. 최근 완성차 업체는 완충 구조물의 구조 변경이 어려운 만큼 CFRP를 보강재로 적용한 강성 보강에 관한 연구가 이루어지고 있다. 하이브리드 적층판 기반의 구조물은 CFRP 패치의 두께 및 보강 위치에 따라 상이한 기계적 물성 특성을 갖는다. 다중 역학적 거동을 갖는 프레임 구조의 CFRP 패치 보강은 충돌 흡수능, 굴곡 특성에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

본 논문에서 보강재용 초고강도 판재와 CFRP를 보강재로 적용한 하이브리드 적층판을 제안하였다. 제안된 하이브리드 적층판은 구조용 경량 구조물의 강도 보강을 위한 선행 연구로 수행되었다. 22MnB5 시트의 압축 작용면과 인장 작용면에 CFRP 패치를 각각 보강하였으며 이를 상부 보강, 하부 보강 시편으로 구분하였다. 실험은 3점 굽힘 실험을 통해 평가하였다. 두 시편의 상이한 굴곡 변형 및 파단 거동을 분석하였으며 이를 통해 CFRP 패치 적용, 강도 보강 특성을 갖는 하이브리드 적층판을 제안하였다.

2. 단면 보강 하이브리드 적층판

2.1. 하이브리드 적층판 디자인 및 제작

본 연구에서는 차체 부품에 높은 비강도를 특징으

로 하는 복합소재를 보강재로 적용한 단면 보강 하이브리드 적층판을 제안하였다. 제안된 적층판은 CFRP 패치의 보강 위치와 두께에 따른 굴곡 성능 및 거동 특성을 분석하였다. 하이브리드 적층판 시편은 3점 굽힘 실험을 통해 파단 거동 및 거동 특성을 분석하였으며 압축 인장 작용면에 각각 CFRP 패치를 적용한 두 타입의 단면 보강을 통해 제작되었다.

하이브리드 적층판 제작에 사용된 판재는 22MnB5 판재로 정보는 Table 1을 통해 확인할 수 있다. 22MnB5 판재는 950°C로 가열 후 냉각 체널을 연결한 평판 프레스에서 퀴칭 공정을 진행하였다. Fig. 1(a)는 퀴칭 공정이 적용된 20mm x 70mm x 1.2T 두께의 22MnB5의 3점 굽힘 실험 결과로 최대하중 및 파단 발생 위치를 확인할 수 있다. Fig 1(b)를 살펴보면 22MnB5 판재를 기반으로 제작된 하이브리드 적층판을 확인할 수 있다. 하이브리드 적층판은 3점 굽힘 실험은 인텐터와 판재가 맞닿는 압축 작용면과 서포트가 맞닿는 인장 작용면에 각각 CFRP 패치를 보강하였다. 보강에 사용된 CFRP 패치는 SK chemical 사의 평직형 프리프레그로 구성된 적층판이다. 본 공정에서 제작된 하이브리드 적층판은 별도의 접착제를 사용하지 않고 프리프레그에 함침되어 있는 에폭시 레진을 이용하여 일체화 공정을 수행하였다.

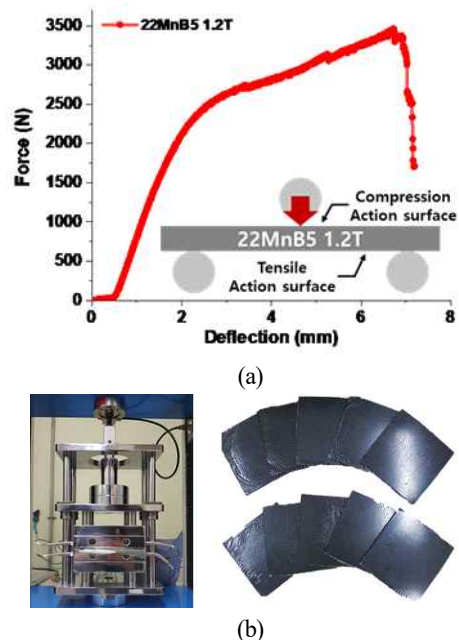


Fig. 1 Hybrid Laminate Fabrication; (a) 22MnB5 1.2 T 3-point bending test result (b) 22MnB5 plate-based hybrid laminate manufacturing

Table 1 Material properties of Press hardened steel – 22MnB5

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Weight (g)
1010	1506	5	91.9

3. 단면 보강 하이브리드 적층판 평가

3.1. 단면 보강 하이브리드 적층판 평가

Steel-CFRP 하이브리드 적층판의 굴곡 특성 보강 검증을 위해 파단 패턴 분석을 수행하였다. Fig. 2를 살펴보면 상부 보강과 하부 보강을 구분하여 적용하였다. 실험은 Universal Test Machine(UTM) 장비를 이용, ISO 7438 규격 기반의 3점 굽힘 실험을 수행하였으며 실험 조건은 압축 모드 1mm/min 변위 제어 조건을 적용하였다.

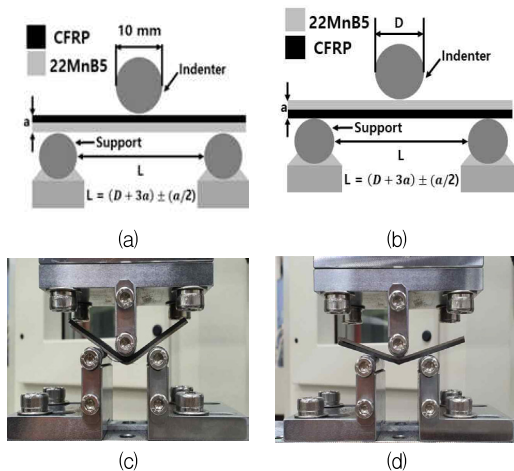


Fig. 2 Hybrid materials three-point bending experiment of two proposed designs: (a) Compression action surface reinforcement (b) Tensile action surface reinforcement (c) Compression action surface reinforcement specimen (d) Tensile action surface reinforcement specimen

3.2. 상부 보강 하이브리드 적층판 평가

22MnB5 압축 작용면에 2-6 ply의 CFRP 패치를 보강한 시편을 제작하였다. ply는 CFRP 프리프레그의 단위로서 적층된 상부 보강 하이브리드 적층판 시편의 정보는 Table 2를 통해 알 수 있다.

상부 보강 하이브리드 시편의 3점 굽힘 실험 결과는 Fig. 3(a)를 통해 확인되며 파손 거동을 살펴보면 점진적 파손(Progressive failure)이 확인되며 보강

된 판재의 거동이 확인된다. 점진적 파손은 굽힘 변형 시 연신율이 거의 없는 CFRP 패치와 인텐더 간의 접촉으로 굴곡부 중심에서 보강재의 손상이 발생하는 것으로 판단되며 이는 Fig. 4(a)를 통해 확인할 수 있다. 상부 보강 시편의 경우 섬유의 손상은 확인되나 시트와 CFRP 패치 보강재의 분리 없이 하나의 소재로 거동하였다.

상부 보강 시편의 최대 하중은 Fig. 3(b)를 통해 확인할 수 있다. 각각의 실험 결과를 살펴보면 2 ply의 CFRP 패치가 보강된 시편에서 약 3.2 KN의 하중이 확인되는 반면 6 ply에서 약 4 KN의 하중이 확인되며 이는 2 ply 보강 시편 대비 약 125% 증가한 수치를 확인할 수 있다.

2-5 ply가 보강된 시편의 최대 하중 편차는 점진적인 증가가 확인되나 5-6 ply 시편에서 급작스러운 하중 증가가 확인되며 이에 대한 추가적인 조사가 요구된다.

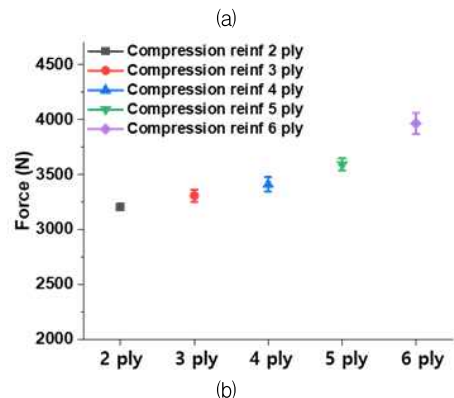
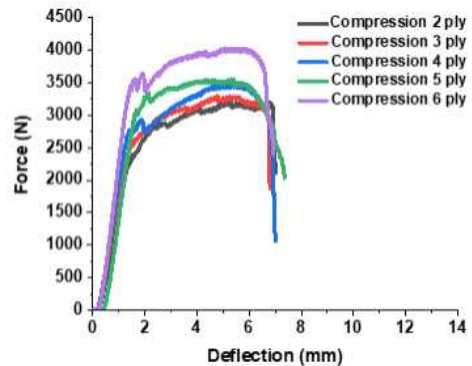


Fig. 3 Result of 3-point bending test of hybrid laminate reinforced with CFRP patch – compression action surface: (a) Hybrid laminate with 2-6 plies reinforced on the compression action surface (b) Maximum load of hybrid laminate



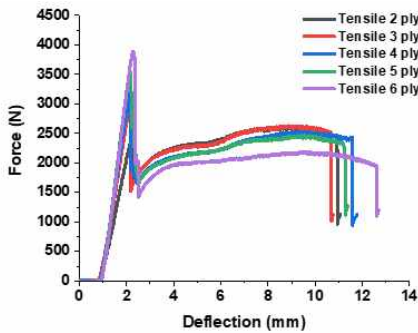
Fig. 4 Image of the tested specimen with reinforced compression action surface

Table 2 Specimen information with reinforced compression action surface

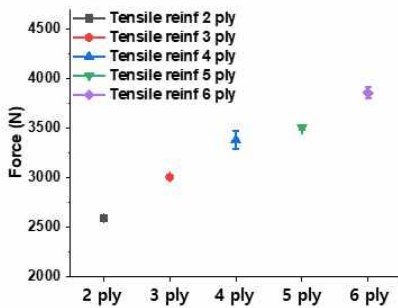
	2 ply	3 ply	4 ply	5 ply	6 ply
Thickness (mm)	1.82	2.05	2.29	2.62	2.92
Weight (g)	101	102	107	112	116
Bending properties (N)	3181.73	3309.13	3410.4	3593.33	3965.57

3.3. 하부 보강 하이브리드 적층판 평가

하부 보강 시편의 경우 인장 작용면에 CFRP 패치가 보강된 시편으로 상부 보강 시편과 동일하게 2-6 ply의 CFRP 패치가 보강된 시편이다. 시편의 정보는 Table 3을 통해 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Result of 3-point bending test of hybrid laminate reinforced with CFRP patch - tensile action surface: a) Hybrid laminate with 2-6 plies reinforced on the tensile action surface b) Maximum load of hybrid laminate

Fig. 5(a)의 3점 굽힘 실험 결과를 살펴보면 최초 점진적 파손 이후 굴곡부 중심에서 CFRP 패치의 완전한 파단이 확인된다. 실험 시편 Fig. 6을 살펴보면 하부 보강 시편 보강재의 완전 파손을 확인할 수 있다. 또한 CFRP 패치의 점진적 파손은 모두 유사한 2-2.5mm 사이에서 발생하는 것이 관측되었으며 이는 CFRP의 낮은 연신율로 인한 결과로 판단된다. 이후 분리된 시편은 22MnB5 판재의 거동이 확인된다.

Fig. 5(b)를 살펴보면 2 ply 하부 보강 시편의 경우 약 2.4 KN, 6 ply 시편의 경우 약 3.9 KN이 확인되며 이는 약 158% 증가한 수치로 확인된다. 하부 보강 시편의 경우 CFRP 패치 박리 시 발생하는 최대 하중의 증가로 CFRP의 강성을 보강하는 것으로 판단된다.

Table 3 Specimen information with reinforced tensile action surface

	2 ply	3 ply	4 ply	5 ply	6 ply
Thickness (mm)	1.84	2.07	2.34	2.7	2.95
Weight (g)	99.4	103	106	111	115
Bending properties (N)	2446.5	3008.6	3381	3505.13	3854.67

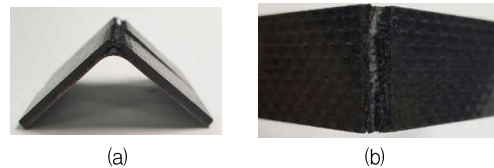


Fig. 6 Image of the tested specimen with reinforced tensile action surface

하부 보강 시편의 특이사항으로 Fig. 7의 2 Ply 보강된 시편의 파손 거동을 살펴보면 박리 이전의 보강재는 22MnB5 판재의 최대 하중보다 낮은 수치가 확인된다. 특히 판재의 거동이 기존 22MnB5 시트의 파단신율이 기존 7mm 수준에서 약 12mm 수준까지 증가한 것을 통해 연화(softening) 상태임을 유추할 수 있다. 이는 CFRP 패치 보강재 박리 시 높은 항복강도로 인해 판재의 표면에 크랙 발생 유무로 판단된다.

상부 보강 및 하부 보강 시편의 파단 거동을 비교하였다. 두 보강 시편은 상이한 파손 모드가 확인되었다. 상부 보강 시편의 경우 판재의 강도를 보강하는 형태의 보강 결과가 확인되는 반면 하부 보강의 경우 CFRP의 강성을 보강하는 형태의 강성 보강 효과를 확인하였다.

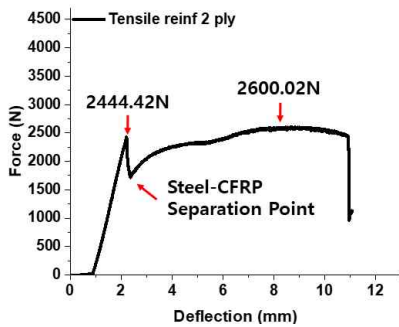


Fig. 7 When reinforcing two plies, the maximum load of the CFRP patch is lower than the 22MnB5 sheet

4. 단면 보강 하이브리드 적층판 분석

4.1. CFRP 보강재 파단 및 중립면 변화

상부, 하부 보강 시편에 따른 중립면의 변화를 Fig. 8을 통해 표현하였다. 상부 보강 시편의 파단 모드는 초기 상태인 Fig. 8(a), 파단 이후 Fig. 8(c)를 통해 보여지며 굽힘 변형 시 두 소재가 분리 없이 거동하며 유사한 수준의 중립면을 갖는다. 그러나 하부 보강 시편의 경우 초기 상태 Fig. 8(b)를 통해 살펴보면 하부 보강재의 파단 이후 Fig. 8(d)와 같이 분리된 판재의 파단이 확인된다. 이러한 파단 거동은 하이브리드 적층판의 최종 두께에서 CFRP 패치 두께가 파단과 함께 사라짐으로써 최종적으로 1.2 mm의 두께를 갖게 된다. 하부 보강 시편의 CFRP 패치 보강재의 파단으로 인해 소재 두께 감소는 중립면의 위치를 급격하게 변화시키고 이러한 파단 거동은 CFRP 패치가 보강재의 역할을 수행하지 못하는 것으로 판단된다.

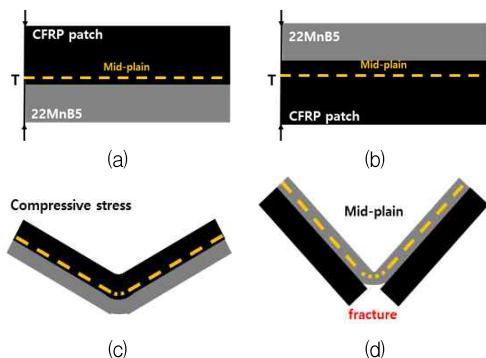


Fig. 8 Change in the mid-plane according to the failure mode between the deformation of the hybrid specimen with top/bottom reinforcement applied:

4.2. 상부 보강 시편의 섬유 중첩 거동

3.2. 절의 5-6 Ply 상부 보강 시편 결과에서 최대 하중이 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 상부 보강 시편은 하부 보강 시편 대비 높은 강도 보강효과를 확인하였으며 하부 보강 시편 대비 낮은 변형을 확인하였다.

이러한 거동 특성을 확인하기 위해 광학현미경 40배율로 손상된 시편의 단면을 측정하였다. 이는 Fig. 9를 통해 확인할 수 있으며 압축 작용면의 손상된 CFRP 패치가 완전히 분리되지 않고 하이브리드 적층판의 굽힘 변형을 제한하는 것으로 판단된다.

손상된 CFRP 패치와 보강된 CFRP 패치의 겹침 현상으로 굽힘 변형 시 시편은 고정되며 굽힘 중심부에서 국부적인 응력 집중 현상을 발생시킨다. 이러한 거동은 소재의 허용 하중 이전까지 높은 하중이 중첩되고 이후 파손되는 것으로 판단된다.

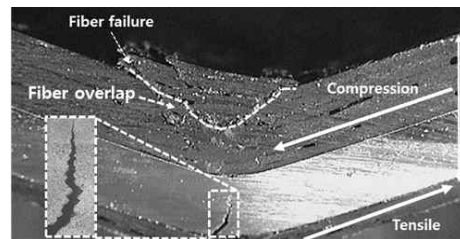


Fig. 9 The phenomenon of overlapping in the case of damage and bending deformation of the CFRP patch

5. 결론 및 토의

본 논문에서는 높은 경량화 포텐셜을 갖는 CFRP를 보강재로 적용하여 판재의 강도 보강에 관한 연구를 수행하였다. CFRP 패치 보강 디자인에 따른 굽힘 특성 및 파단 거동을 확인하기 위해 압축/인장 작용면에 CFRP 패치를 보강하였다. 제작된 시편은 3점 굽힘 실험을 통해 분석하였다.

1) 압축/인장 작용면에 보강된 시편은 동일하게 점진적인 파손이 확인되며 상부 보강 시편의 경우 분리되지 않고 거동하였다. 하부 보강 시편의 경우 CFRP 패치 분리 이후 판재와 분리되어 22MnB5의 변형 거동이 확인되었다.

2) 두 시편의 손상 거동 분석 결과 상부 보강 시편의 경우 CFRP 보강재의 두께가 증가할수록 판재의 강도를 보강하는 형태의 거동이 확인되었다. 하

부 보강 시편의 경우 CFRP 패치의 두께 증가는 보강된 강성효과를 확인 하였으나 판재의 강도 보강 효과로 보기 어렵다.

3) 상부 보강 시편의 경우 하부 보강 시편 대비 낮은 변형이 확인된다. 이는 광학 현미경으로 확인 해본 결과 손상된 CFRP 패치와 보강된 CFRP 패치의 겹침 현상이 확인된다.

4) 손상된 CFRP 패치와 보강된 CFRP 패치의 겹침은 변형 시 고정되어 골곡부 중심에서 높은 응력 집중을 발생시킨다. 상부 보강된 CFRP 패치의 거동으로 인해 높은 골곡 하중이 발생하는 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 ‘항공우주부품기술개발사업’ 지원으로 진행하였습니다. (과제번호 : 20007444)

참고문헌

- 1) F. Ohlsson, “Weight reduction by optimized reinforcement structures”, in *Lightweight Composite Structures in Transport*, Elsevier, pp. 191-215, 2016, doi: 10.1016/B978-1-78242-325-6.00008-6.
- 2) J. Fan/J. Njuguna, “An introduction to lightweight composite materials and their use in transport structures”, in *Lightweight Composite Structures in Transport*, Elsevier, pp. 3-34, 2016, doi: 10.1016/B978-1-78242-325-6.00001-3.
- 3) K. Kumar Dama, V. Suresh Babu, R. N. Rao, “State of the Art on Automotive Lightweight Body-in-White Design”, *Materials Today: Proceedings*, vol 10, pp. 20966 - 20971, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.486.
- 4) Wu, Guocai; Yang, J. M., “Overview: Failure in structural materials: The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures”, *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 57 (1): pp. 72-79, January 2005, doi:10.1007/s11837-005-0067-4.
- 5) Z. Wang, M. Käferböck, H. Zhao / H. Chen, “First

- Body-in-White Made from Composites for a Chinese Electric Car”, *ATZ Worldw.*, vol 123, 3, pp. 16-21, 3 2021, doi: 10.1007/s38311-020-0632-z.
- 6) “Side Impact Crashworthiness Evaluation 2.0: Crash Test Protocol (Version I)”, p. 21, 2020.

저자 소개

이 환 주(Hwan-Ju Lee)

[정회원]



- 2022년 2월: 국민대학교 자동차공학과 (공학박사)
- 2022년 3월~ 현재 : 한국생산기술연구원 금형성형 연구부문, 연구원

< 관심분야 >
복합소재 성형 및 가공, 구조해석

전 용 준(Yong-Jun Jeon)

[정회원]



- 2012년 2월 : 대구대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 3월~현재 : 한국생산기술연구원 금형성형 연구부문, 연구원

< 관심분야 >
판재성형 및 금형, 판재성형해석

김 동 언(Dong-Earn Kim)

[정회원]



- 2006년 8월 : 서울대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 9월~2013년 11월 : 삼성전자 삼성종합기술원, 전문연구원
- 2013년 12월~현재: 한국생산기술연구원 금형성형 연구부문, 수석연구원

< 관심분야 >
프레스 금형, 고강도 판재 성형, 복합소재 성형