

## 복합재 스카프 조인트에서의 마이크로 볼트 보강에 대한 타당성 연구

이광은\* · 성정원\* · 권진희\*<sup>†</sup>

### Effect of Micro-bolt Reinforcement for Composite Scarf Joint

Gwang-Eun Lee\*, Jung-Won Sung\*, Jin-Hwe Kweon\*<sup>†</sup>

**ABSTRACT:** The reinforcement effect of micro-bolt for a bonded scarf joint was investigated. Three scarf ratios of 1/10, 1/20, and 1/30 were considered to examine the effect of scarf patch configuration on joint strength. To maintain the same density of micro-bolt, 16, 32, and 48 bolts were installed in the scarf joint specimens with scarf ratios of 1/10, 1/20, and 1/30, respectively. Tests were also carried out on the joints that are bonded with only adhesive and that are fastened with only micro-bolts to obtain reference values. The average failure loads of the adhesive joints with scarf ratios of 1/10, 1/20, and 1/30 were 29.7, 39.6, and 44.8 kN, respectively. In case of micro-bolt reinforcement, the failure loads at the same scarf ratios were 28.4, 37.2, and 40.1 kN, respectively, which corresponds to 96, 94, and 90% of the pure adhesive joint failure loads. In the case of using only micro-bolts, the failure loads were only 13-25% of the average failure loads of pure adhesive joints. Fatigue test was also conducted for the joints with scarf ratio of 1/10. The results show that the fatigue strength of hybrid joints using both adhesive and micro-bolts together slightly increased compared to the fatigue strength of adhesive joint, but the rate of increase was small to 2-3%. Through this study, it was confirmed that the reinforcement effect of micro-bolt is negligible in the scarf joints where shear stress is dominating the failure, unlike in the structure where peel stress is dominant.

**초 록:** 스카프 접착 조인트를 마이크로 볼트로 보강하였을 때, 볼트의 보강효과를 얻을 수 있는지를 시험으로 연구하였다. 스카프 형상에 따른 조인트 보강효과를 확인하기 위해 3가지 스카프비(1/10, 1/20, 1/30)를 고려하였다. 접착면적에 따른 핀의 밀도를 동일하게 유지하기 위해, 1/10, 1/20, 1/30 스카프비를 가지는 조인트에 각각 16, 32, 48개의 볼트를 보강하였다. 기준값을 획득하기 위해 접착제만으로 체결된 조인트와 마이크로 볼트만 사용한 조인트에 대한 시험도 수행하였다. 시험 결과 접착제만 적용한 경우, 각 스카프비(1/10, 1/20, 1/30)에 따른 파손하중은 29.7, 39.6, 44.8 kN로 나타났다. 마이크로 볼트로 보강한 경우 파손하중은 스카프비에 따라 각각 28.4, 37.2, 40.1 kN으로 나타났는데, 순수 접착 조인트 파손하중의 96, 94, 90%에 해당한다. 마이크로 볼트만 사용한 경우, 파손하중은 접착 조인트 인장강도의 13-25%에 불과하였다. 스카프비 1/10 조인트의 피로시험 결과 접착제와 볼트를 동시에 사용한 하이브리드 조인트의 피로강도가 접착제만 사용한 경우의 피로강도보다 증가하였지만, 증가율은 2-3%로 미미하였다. 본 연구를 통해 박리응력이 파손의 주원인이 되는 구조물에서와 달리, 전단응력이 파손의 주원인이 되는 스카프 조인트의 경우 마이크로 볼트의 보강효과는 나타나지 않는 것을 확인하였다.

**Key Words:** 복합재 수리(Composite repair), 스카프 수리법(Scarf repair), 마이크로 볼트(Micro-bolt)

## 1. 서 론

기계적 특성과 중량절감 효과가 우수한 섬유강화 복합재료는 외피, 스파(Spar), 스트링거(Stringer) 등과 같은 항공기의 주구조물에까지 적용 범위가 확대되고 있다. 최신 민항기인 Boeing 787과 Airbus A350의 경우 중량 기준 복합재의 적용비율이 50%를 초과하는 것으로 알려져 있다[1,2]. 항공기용 복합재 구조물은 대부분 적층판 형태로 사용되는데, 두께방향 보강재가 없는 적층 복합재 구조물의 특성상 공구의 낙하나 외부충격에 의해 층간분리, 기지균열 등과 같은 내부 손상이 쉽게 발생한다. 이러한 이유로 복합재 구조물의 손상수리와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있고, 항공기 MRO(Maintenance, Repair & Overhaul) 산업에 대한 관심도 높아지고 있다[3-5].

손상된 복합재 구조를 수리하는 대표적인 방법으로는 기계적 체결법과 접착법이 있다. 기계적 체결 수리법은 전통적인 수리기술로서 따로 제작한 적층판을 손상영역에 덧댄 후 홀을 가공하여 볼트 또는 리벳을 통해 체결하는 기술이다. 이 방법은 수리 과정이 간단하고 공정시간이 짧다는 장점을 가지고 있어서 지금도 많이 사용되고 있다. Her 등[6]은 볼트를 사용한 복합재 수리과정에서 볼트의 수와 배치, 외부접침 패치의 종류를 달리하여 유한요소해석을 통해 각 변수에 따른 구조물의 무게증가율과 강도회복률을 연구하였다. Agarwal[7]은 복합재 구조물을 볼트 조인트로 연결하였을 때, 구조물의 두께, 적층순서, 볼트가 설치된 위치 등을 달리하여 응력분포, 파손강도 등을 유한요소해석으로 예측하였다. 하지만 기계적 체결방법을 사용할 경우 금속 체결재 및 복합재 패치로 인한 중량 증가와 수리 후 외형(Outer Mold-Line) 변화로 인한 공력특성 저하 등의 단점이 있다. 또한 복합재 구조물에 반드시 홀을 가공해야 하는데 가공된 홀은 적층판의 면내강도를 저하시킬 뿐만 아니라, 홀을 가공하는 과정에서 미세균열 및 층간분리 등과 같은 국부적인 손상을 유발할 가능성이 높다.

따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 스카프 패치 접착 수리법이 사용되고 있다. 스카프 패치 접착 수리법은 손상이 발생한 복합재 구조물을 스카프 형태로 제거하고, 접착제를 사용하여, 따로 제작된 스카프 형태의 복합재 적층판으로 대체하는 방법이다. 본 수리법에서는 제거된 복합재 적층판과 동일한 형상의 적층판을 접착제를 통해 체결하기 때문에 구조물의 무게증가가 없다는 장점이 있다. 또한, 기계적 체결법과 비교하여 구조물의 형상 변화가 거의 없기 때문에 공력특성의 저하가 크지 않다[8-10]. Andrew 등[11]은 다양한 스카프각(Scarf Angle), 접착제 및 구조물의 두께, 적층순서에 따른 스카프 조인트의 응력분포를 계산하기 위한 유한요소 해석기법을 연구하였다. Yoo 등[12]은 복합재 적층판에 발생한 국부적인 손상을 스카프 패치 수리방법을 사용하여 수리한 후, 정적 및 피로 인장시

험을 통하여 스카프비(Scarf Ratio)와 외부접침 길이에 따른 하중회복률을 연구하였다. 연구 결과, 스카프 길이가 충분히 길어질 경우 온전한 적층판의 정적강도 대비 약 80%의 강도회복률을 나타낸다는 것을 확인하였다. Campilho 등[13]은 스카프 패치 복합재 적층판의 스카프각(2-45도)에 따른 인장 특성을 시험 및 유한요소해석으로 연구하고 스카프각에 따른 변위, 파손하중, 강도, 강성 등을 예측하였다. Odi 등[14]은 스카프각을 3.0, 6.2, 9.2도로 달리한 2차원 스카프 패치 모델을 사용하여 각 스카프각에 따른 응력분포를 유한요소해석으로 연구하였다. Kim 등[15]은 단일 접침 체결부에 발생한 손상을 스카프 패치로 수리한 후 시험 및 유한요소해석을 통하여 강도회복률을 연구하였다. 이상의 연구 결과를 종합해보면 스카프 패치 접착 수리법은 기계적 체결 수리법에 비해 더 높은 강도회복률을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 스카프각을 작게 해야만 강도회복률이 높아지게 되는데 이 과정에서 재료의 손실이 많고 작업시간이 오래 걸리는 문제점이 있다.

최근 들어 복합재의 두께방향 강도를 향상시키는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 적층 복합재는 두께방향 보강섬유가 없기 때문에 약한 충격에도 층간분리가 쉽게 발생한다는 태생적 단점을 가지고 있다. 내부에서 층간분리가 발생하게 되면 외부에서는 관찰하기가 어렵기 때문에, 손상부위를 사전에 파악하기 어렵다. 이러한 내부 층간분리는 국부좌굴과 이로 인한 균열성장의 원인이 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 국부적으로 보강섬유를 두께방향으로 설치하는 Stitching 공법이나 3차원 직조공법(Weaving, Knitting, Braiding), 금속이나 탄소섬유 필을 두께방향으로 보강하는 Z-핀 공법 등이 사용되고 있다[16-18].

최근에 Park 등[19]은 층간분리를 효과적으로 수리할 수 있는 새로운 수리공법을 제시하였다. 이 수리법은 층간분리가 발생한 복합재 구조물에 1 mm 내외의 직경을 가지는 마이크로 볼트를 체결하여 층간분리를 수리하는 기술이다. 볼트의 직경이 매우 작기 때문에 볼트 홀에 의한 면내 물성 저하를 방지할 수 있고 볼트로 인한 구조물의 전체 무게증가를 최소화할 수 있다. 수리과정 또한 볼트와 너트만 체결하면 되기 때문에 간단하며, 성형된 복합재 구조물에도 적용할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 Park 등[19]의 연구에 착안하여 마이크로 볼트 수리법을 스카프 패치 접착 수리법에 접목하였을 때 스카프 조인트의 강도에 어떤 영향을 미치는지를 시험으로 연구하였다. 선행연구 결과에서도 알 수 있듯이, 스카프비에 따른 효과를 보기 위해 스카프비를 1/10, 1/20, 1/30 총 3가지로 달리하였다. 각 스카프비에 대해, 접착 체결, 마이크로 볼트와 접착제를 같이 사용한 하이브리드 체결, 마이크로 볼트만 사용한 기계적 체결 등 총 3가지 형태의 조인트 시편을 제작하였다.

정하중 시험을 기본으로 수행하고 스카프비 1/10에 대해서는 반복하중 시험을 수행하였다.

## 2. 시험

### 2.1 시편제작

제작한 시편의 스카프비는 1/10, 1/20, 1/30 등 총 3가지이다. 시편의 치수 및 형상은 ASTM D3039[20] 규격을 참고하여 결정하였고 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 각각의 스카프비에 대한 접착면의 스카프 길이를 나타내며, Fig. 1(b)(i)는 접착제만 사용한 접착 조인트, Fig. 1(b)(ii)는 접착제와 마이크로 볼트를 같이 사용한 하이브리드 조인트, Fig. 1(b)(iii)는 마이크로 볼트만 사용한 기계적 조인트의 형상을 나타낸다. 접착 조인트와 하이브리드 조인트는 이차접착법을 사용하여 제작하였다. 시편에 대한 자세한 정보는 Table 1과 같다. 각 스카프비와 접착 방법에 따른 정적시험 9 종류, 스카프비 1/10에 대한 피로시험 2 종류를 포함하여 총 11 종류에 대한 시험을 수행하였다. 적층판의 적층순서는 [45/90/-45/0]2S로 총 16장이며, 모재는 SK chemical 사의 일방향 카본/에폭시 프리프레그 USN-200A를 사용하였다. 성형 후 한 장의 공칭두께는 0.207 mm이고, 시편의 총 두께는 약 3.31 mm이다. 스카프 및 탭 접착에 사용된 접착제는 Cytec 사의 필름형 접착제 FM300-2M이며, 성형 후 공칭두께는 0.2 mm이다.

스카프 형상으로 시편을 제작하기 위하여 프리프레그를

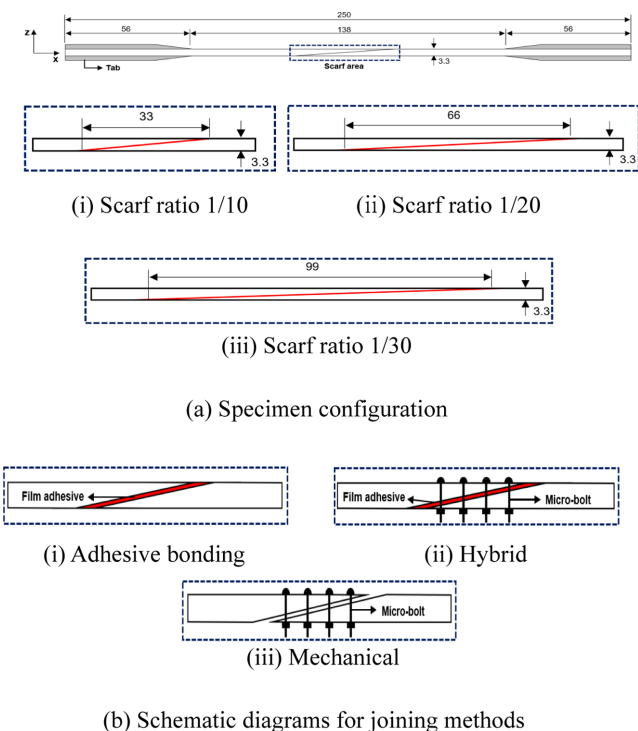


Fig. 1. Configurations of scarf joint specimens (unit: mm)

Table 1. Test matrix

Test method	Scarf ratio	Joining method	Material
Static tensile test	1/10	Adhesive	FM300-2M*
		Hybrid	FM300-2M + 16 Micro-bolts + EA 9396*
		Mechanical	16 Micro-bolts
	1/20	Adhesive	FM300-2M
		Hybrid	FM300-2M + 32 Micro-bolts + EA 9396
		Mechanical	32 Micro-bolts
	1/30	Adhesive	FM300-2M
		Hybrid	FM300-2M + 48 Micro-bolts + EA 9396
		Mechanical	48 Micro-bolts
Fatigue tensile test	1/10	Adhesive	FM300-2M
		Hybrid	FM300-2M + 16 Micro-bolts + EA 9396
Total			11 cases

\*FM300-2M: Film adhesive, EA9396: Low viscosity adhesive

계단형식으로 적층하여 주어진 사이클에 따라 경화한 후, #320 사포를 사용하여 접착부를 스카프 형상으로 가공하였다. 그 후 다시 #400 사포로 후처리를 수행한 후 접착제를 적용하였고 주어진 사이클 내에서 경화하였다.

하이브리드 및 기계적 조인트에 사용된 마이크로 볼트의 수는 접착면적 대비 동일한 면적비율을 갖도록 결정하였다. 마이크로 볼트를 설치하기 위한 홀은 CM-3525 CNC 장비에서 직경 1 mm의 초경드릴을 사용하여 가공하였다. 스카프비가 커질수록 접착면적이 증가하기 때문에, 총 접착면적에서 마이크로 볼트가 차지하는 비율이 1.5%가 되도록 하였다. 1.5%의 면적비율은 홀에 의한 내면물성 저하를 최소화 하기 위해 선정하였으며, 시편의 폭 방향으로 4개, 각 스카프 길이에 따라 간격을 조정하여 홀을 가공하였다. 따라서 스카프비(1/10, 1/20, 1/30)에 따라 사용된 볼트의 수가 달라지게 된다. 마이크로 볼트의 재질은 스텔(SUS304)이다. 보강에 사용된 마이크로 볼트를 Fig. 2에 나타내었다. 볼트를 체결할 때 토크 드라이버로 7 N-cm의 토크를 가해 두께방향으로 압축력(Clamping Force)이 가해지도록 하였다. 이때, 토크가 7 N-cm를 초과하게 되면 볼트가 파손되는 현상이 발생하여, 더 큰 값의 토크를 가하는데 제한이 발생하였다. 그리고, 볼트 헤드에 의한 압축력을 분산시키기 위한 방법으로 볼트 헤드 방향에 너트를 추가적으로 설치하여 와셔의 역할을 구현하였다. 마지막으로, 볼트와 홀 사이의 틈을 메우기 위하여 저점도 접착제(EA9396)를 볼트에 바르고 홀에 삽입한 후 반대쪽에서 너트를 설치하였다. 저점도 접착제가 홀과 볼트 사이의 빈공간에 충분

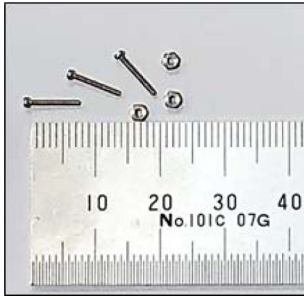


Fig. 2. M 1.0 Micro-bolts and nuts (unit: mm)

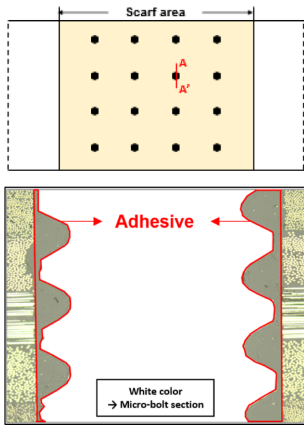


Fig. 3. Microscope image for the adhesive between threads

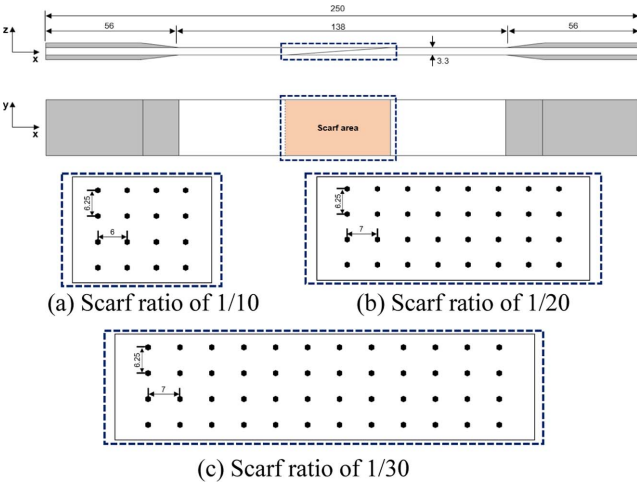


Fig. 4. Bolt-layouts for different scarf ratios (unit: mm)

히 스며들었는지 확인하기 위하여 수리된 시편을 절단한 후, 폴리싱을 수행하였다. 폴리싱이 완료된 볼트의 단면 현미경 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

각 스킨비에 따라 접착면에 설치된 볼트의 위치를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 스킨비 1/10 시편을 나타내며, 4×4 로 총 16개의 볼트를 설치하였다. Fig. 4(b), 4(c)는 1/20, 1/30의 스킨 비에 대한 볼트의 배치를 나타내며, 각각의 스킨비에 따라 4×8, 4×12 배치로 총 수는 각각 32, 48

개이다.

2.2 시험절차

정적시험은 ASTM D3039[20]의 절차에 따라 수행하였으며 변위제어 방식으로 Instron 5582 사용하여 2 mm/min의 속도로 하중을 가하였다. 스킨비 1/10 시편에 대한 피로 인장시험은 Instron 8801을 사용하였다. ASTM D3479[21]의 절차를 참고하였으며, 하중제어 방식을 적용하여 5 Hz의 진동수로 반복하중을 가하였다. 진동수를 5 Hz로 설정한 이유는 빠른 시험결과를 도출하여 결과를 분석하기 위함이다. 이때 정적인장시험의 평균 파손하중을 기준으로 피로시험의 최대하중을 결정하였고 응력비는 0.1로 설정하였다.

3. 시험 결과

본 연구에서 수행한 정적시험에 대한 결과를 Table 2에 나타내었다. 각 파손하중 및 파손모드에 대한 내용은 뒤에서 상세히 설명하였다.

3.1 스킨비 1/10 조인트

Fig. 5는 스킨비 1/10에 대한 접착, 하이브리드, 기계적 체결 조인트의 전형적인 하중-변위 곡선을 나타낸다. 접착, 하이브리드, 기계적 조인트의 파손하중은 각각 29.7, 28.4,

Table 2. Static test results for scarf joints

Specimen		No. of bolts	Avg. failure load [kN]	Failure mode
Scarf ratio	Joining method			
1/10	Adhesive	-	29.7	Adhesive failure* + intralaminar failure
	Hybrid	16	28.4	Adhesive failure* + intralaminar failure + bolt failure
	Mechanical	16	3.97	Bolt shear failure
1/20	Adhesive	-	39.6	Adhesive failure + intra/interlaminar failure*
	Hybrid	32	37.2	Adhesive failure + bolt failure intra/interlaminar failure* + net-tension failure*
	Mechanical	32	7.41	Bolt shear failure
1/30	Adhesive	-	44.8	Adhesive failure + intra/interlaminar failure*
	Hybrid	48	40.1	Intra/interlaminar failure + bolt failure + net-tension failure*
	Mechanical	48	11.0	Bolt tensile/shear/failure

\*Dominant mode



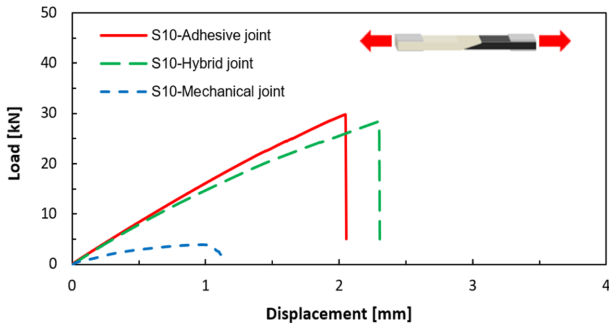


Fig. 5. Typical load-displacement curves for scarf ratio 1/10

3.97 kN이며, 기준시편(접착 조인트)의 파손하중 대비 하이브리드 조인트의 파손하중은 약 96%로 4% 감소하였다. 볼트만을 사용한 기계적 조인트의 파손하중은 기준시편 대비 13%에 불과하였다. 마이크로 볼트 자체만으로도 접착 조인트 강도의 13% 가량의 강도를 보이지만 접착 조인트에 마이크로 볼트를 추가하면 오히려 강도가 29.7 kN에서 28.4 kN으로 감소한다.

스카프 조인트의 경우 스카프각(Scarf Angle) 혹은 스카프비가 커질수록 박리응력(Peel Stress)이 증가하기 때문에 마이크로 볼트가 접착부의 분리를 막는 역할을 할 것으로 기대할 수 있다. 그러나 실제로는 볼트가 접착부의 분리에 저항하는 긍정적인 영향보다는 부정적인 영향이 더 크게 작용한 것을 알 수 있다. 볼트를 보강하기 위해 뚫은 홀에 의해 접착부 면적이 줄어들고, 홀을 뚫는 과정에서 섬유절단과 국부적 손상이 발생하게 되는데 이러한 요인들이 볼트 보강효과를 상쇄시킨 것으로 판단된다.

각 시편의 접착부 및 볼트의 대표적인 파손모드를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 접착 조인트의 파손모드를 나타

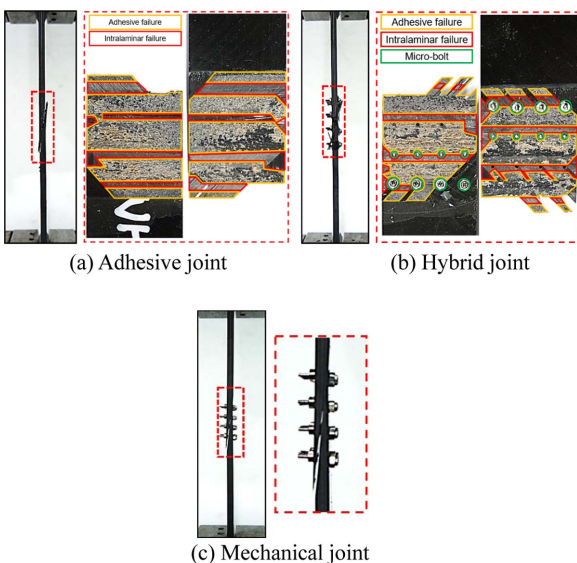


Fig. 6. Failure modes of scarf ratio 1/10

낸다. 파손모드 분석 결과 접착제 파손이 지배적으로 나타났으며, 층내파손이 일부 관찰되었다. Fig. 6(b)는 하이브리드 조인트의 파손모드를 나타낸다. 전체적으로는 접착제 파손이 지배적인 접착 조인트의 파손모드와 큰 차이를 보이지 않았고 시편의 접착제 파손이 발생함과 동시에 상/하부 모재가 분리되며 시편의 중앙부에 설치된 8개의 볼트에는 전단파손이 나타났으며, 양쪽 끝에 설치된 8개의 볼트에는 전단에 위한 휘어짐이 관찰되었다. Fig. 6(c)는 기계적 조인트의 파손모드를 나타낸다. 대부분의 볼트에서 상/하부 모재의 분리에 의해 발생한 전단력에 의해 끊어짐과 휘어짐이 관찰되었다.

상대적으로 취약한 피로특성을 나타내는 스카프비 1/10의 경우에 대해서는 추가로 피로시험을 수행하여 마이크로 볼트가 피로특성에 미치는 영향을 분석하였다.

체결 방법에 따른 피로시험 결과를 Fig. 7에 S-N 선도로 나타내었다. x-축은 사이클을 로그스케일로 나타낸 것이며, y-축은 피로시험에 사용한 최대하중을 나타낸다. 최종적으로 시편의 파손이 발생한 하중을 그래프에 도형(Mark)으로 표시하였으며, 백만 사이클을 초과하면 무한수명으로 간주하고 시험을 종료하였다. 피로시험 결과 접착 조인트의 경우 11.9 kN에서 무한수명을 나타내었고, 하이브리드 조인트의 경우 11.4 kN에서 무한수명을 나타내었다. 두 종류의 조인트 모두 정적강도 대비 40%의 피로강도를 나타내었으며, 하중이 낮아질수록 하이브리드 조인트의 피로강도가 접착 조인트에 비해 약 2~3%의 높은 피로강도회복률을 보였다.

### 3.2 스카프비 1/20 조인트

Fig. 8은 스카프비 1/20 조인트에 대한 전형적인 하중-변위 곡선을 나타낸다. 접착, 하이브리드, 기계적 조인트의 파손하중은 각각 39.6, 37.2, 7.41 kN이며, 기준시편(접착 체결)의 파손하중 대비 하이브리드 조인트의 파손하중은 약 94%로 파손하중은 6% 감소하였다. 볼트만 사용한 기계적

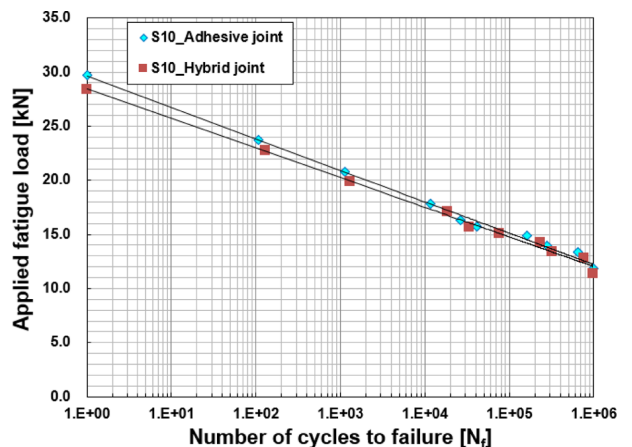


Fig. 7. S-N curves of adhesive and hybrid joints

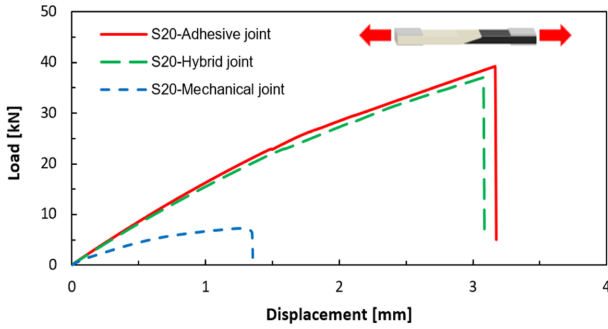


Fig. 8. Typical load-displacement curves for scarf ratio 1/20

조인트의 파손하중은 기준시편의 19%를 보였다. 스카프비가 1/20으로 변함에 따라 스카프각이 작아지게 되고 파손하중이 증가하지만, 스카프 비 1/10의 경우보다 마이크로 볼트로 인한 보강 효과는 더 부정적으로 나타난 것을 알 수 있다. 마이크로 볼트를 추가한 경우 파손하중은 오히려 2.4% 가량 더 감소한다. 감소의 원인은 앞에서 논한 바와 동일한 것으로 판단된다.

특히 스카프각이 더 작아질수록 접착부에는 주로 전단 응력이 작용하게 되는데 단면적이 작은 마이크로 볼트는 전단응력을 지지하기에 적절하지 않기 때문에 보강효과가 더 낮게 나타난 것으로 볼 수 있다.

각 경우에 대한 전형적인 파손모드를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 접착 조인트의 파손모드를 나타낸다. 파손모드 분석 결과 접착제 파손과 층내/층간파손이 혼재되어 나타났지만, 적층판의 층내/층간파손 발생 면적이 접착제 파손 발생 면적보다 상대적으로 더 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 하이브리드 조인트의 파손 모드를 나타낸다. 전체적으로 층내/층간파손이 접착제 파손에 비해 지배적

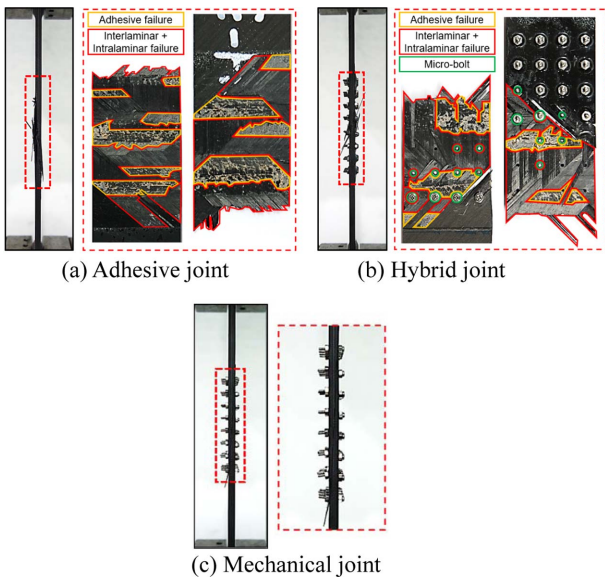


Fig. 9. Failure modes of scarf ratio 1/20

로 나타났으며, 최종파손이 발생할 때 볼트의 전단/인장파손이 혼재되어 나타났다. 하지만 접착 조인트와 비교해 볼 때 하이브리드 조인트의 접착부 파손면적이 상대적으로 더 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 층내/층간 파손과 접착제 파손과 동시에 시편 중앙부에서의 순수인장(Net Tension) 파손이 함께 발생하였기 때문으로 판단된다. 스카프각이 작아지고 파손하중이 올라가면서 적층판의 순수인장 파손과 접착제 파손이 혼재되는 상황이 발생한 것이다. Fig. 9(c)는 기계적 조인트의 파손모드를 나타내며, 대부분의 볼트에서 전단파손이 관찰되었다.

### 3.3 스카프비 1/30 조인트

Fig. 10은 스카프비 1/30에 대한 전형적인 하중-변위곡선을 나타낸다. 접착, 하이브리드, 기계적 조인트의 파손하중은 각각 44.8, 40.1, 11.0 kN이며, 기준시편(접착 체결)의 파손하중 대비 하이브리드 조인트의 파손하중은 약 90%로 파손하중이 10% 가량 낮아졌다. 볼트만 사용한 기계적 조인트의 파손하중은 기준시편 대비 25%로 나타났는데 이것은 볼트 수의 증가에 따른 자연스러운 현상이다. 또한 스카프

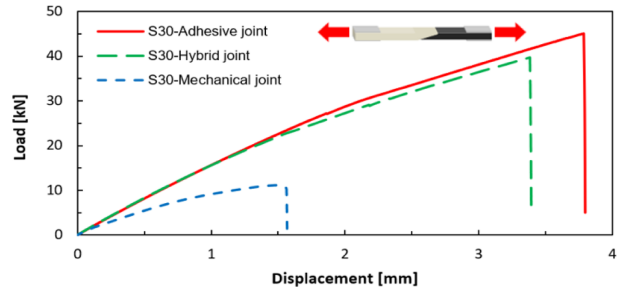


Fig. 10. Typical load-displacement curves of scarf ratio 1/30

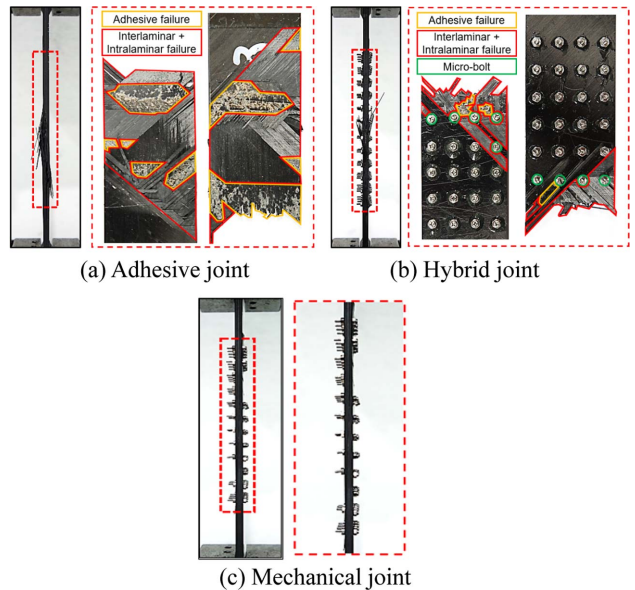


Fig. 11. Failure modes of scarf ratio 1/30

각이 작아짐에 따라 파손하중이 증가하는 것은 쉽게 예상할 수 있는 당연한 결과이다. 그러나 순수 접착 조인트와 마이크로 볼트를 보강한 하이브리드 조인트의 강도 차이는 상대적으로 더 커진 것을 볼 수 있다.

이는 뒤에서 설명하겠지만, 파손하중이 올라감에 따라 조인트의 파손모드가 단순 적층판의 인장파손모드에 가까워지기 때문이다. 인장파손에서는 구조물의 유효단면적이 미치는 영향이 더 커지게 된다.

각 시편의 접착부 및 볼트의 대표적인 파손모드를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)는 접착 조인트의 파손모드를 나타낸다. 층내/층간 파손이 지배적으로 나타났으며 접착부 파손도 일부 관찰되었다. Fig. 11(b)는 하이브리드 조인트의 파손모드를 나타낸다. 전체적인 파손모드는 층내/층간 파손이 지배적이고, 시편의 중앙부에 체결된 볼트에서는 볼트의 전단/인장 파손이 발생하였다. 또한 접착 조인트의 접착부 파손면적과 비교해 볼 때, 하이브리드 조인트의 접착부 파손면적이 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 하중이 높아질수록 볼트를 설치하기 위해 가공한 홀로 인한 유효단면적의 감소와 홀 주위에서의 응력집중이 큰 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. Fig. 11(c)는 기계적 조인트의 파손모드를 나타내며, 대부분의 볼트에서 전단/인장 파손이 관찰되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스카프 접착 조인트에 추가적으로 마이크로 볼트로 보강하였을 때 파손강도 변화를 시험으로 연구하였다. 스카프비를 1/10, 1/20, 1/30으로 변경하면서 조인트의 파손하중을 구하였는데 단순접착 조인트의 파손하중 대비 볼트 보강 하이브리드 조인트의 파손하중은 각각의 스카프비에서 96%, 94%, 90%로 나타났다. 또한, 스카프비가 커짐에 따라, 하이브리드 조인트의 파손하중은 상대적으로 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타내었다. 강으로 된 볼트를 사용하였기 때문에 접착부의 박리 현상을 억제하는데 도움이 될 것으로 예상하였으나 볼트 홀로 인한 접착면적의 감소와 홀 가공과정에서의 적층판과 접착부의 국부적 손상으로 인한 파손하중 저하 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 특히 스카프의 경사각이 작아질수록 파손하중이 증가하게 되는데 이 경우 볼트 홀 주위에서의 순수인장파손이 발생하는 것을 확인하였다. 스카프비 1/10 조인트의 경우 피로시험을 수행하였으나 피로강도 측면에서도 의미 있게 향상된 결과를 얻을 수 없었다. 홀을 가공하는 방법을 개선할 경우 결과의 개선을 기대할 수 있겠으나 제한적일 것으로 예상된다. 따라서 본 연구의 결과는 충분히 완만한 경사각을 가진 스카프 조인트의 경우 별도의 기계적 보강이 필요 없으며 성형 후 볼트를 설치할 경우 긍정적인 효과보다 부정적 영향이 더 큰 것을 보여준다.

#### 후 기

본 연구는 2017년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2017R1A5A1015311).

#### REFERENCES

1. Ning, Q.G., "Airbus A350 XWB Update," *Reinforced Plastics*, Vol. 54, No. 6, 2010, pp. 20-24.
2. Staszewski, W.J., Mahzan, S., and Traynor, R., "Health Monitoring of Aerospace Composite Structures-Active and Passive Approach," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, 2009, pp. 1678-1685.
3. Ivan, G., "Bonded Composite Solution to Ship Reinforcement," *Composites: Part A*, Vol. 34, 2003, pp. 847-854.
4. Stewart, R., "Carbon Fibre Composites Poised for Dramatic Growth," *Reinforced Plastics*, Vol. 53, No. 4, 2009, pp. 16-21.
5. Ham, M.R., Choi, H.S., and Choi, W.J., "A Review on the Advent of Composite Aircraft and the Relevant Technical Problems," *Journal of the Korean Association of Defense Industry Studies*, Vol. 16, No. 2, 2009, pp. 259-281.
6. Her, S.C., and Shie, D.L., "The Failure Analysis of Bolted Repair on Composite Laminate," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35, No. 15, 1998, pp. 1679-1693.
7. Agarwal, B.L., "Static Strength Prediction of Bolted Joint in Composite Material," *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 11, 1980, pp. 1371-1375.
8. Davies, C.R., and Ilcewicz, L., *CMH-17, Vol. 3 Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design and Analysis*, SAE international, Warrendale, PA, USA, 2012.
9. Okafor, A.C., Singh, N., Enemuoh, U.E., and Rao, S.V., "Design, Analysis and Performance of Adhesively Bonded Composite Patch Repair of Cracked Aluminum Aircraft Panels," *Composites Structures*, Vol. 71, No. 2, 2005, pp. 258-270.
10. Wang, C.H., and Gunnion, A.J., "Optimum Shapes of Scarf Repairs," *Composites: Part A*, Vol. 40, No. 9, 2009, pp. 1407-1418.
11. Andrew, J., Gunnion, and Israel, H., "Parametric Study of Scarf Joints in Composite Structures," *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1-4, 2006, pp. 364-376.
12. Yoo, J.S., Trung, V.H., Park, M.Y., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Parametric Study on Static and Fatigue Strength Recovery of Scarf-patch-repaired Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 140, 2016, pp. 417-432.
13. Campilho, R.D.S.G., De Moura, M.F.S.F., Pinto, A.M.G., Morais, J.J.L., and Domingues, J.J.M.S., "Modelling the Tensile Fracture Behaviour of CFRP Scarf Repairs," *Composites: Part B*, Vol. 40, No. 2, 2009, pp. 149-157.
14. Odi, R.A., and Friend, C.M., "An Improved 2D Model for Bonded Composite Joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 24, No. 5, 2004, pp. 389-405.
15. Kim, C.H., Yoo, J.S., Byeon, C.S., Park, M.Y., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Failure Characteristics of Scarf Patch-repaired

- Composite Single-lap Joints,” *Composites Research*, Vol. 29, No. 3, 2016, pp. 117-124.
16. Gransfield, K., Baillie, C., and Mai, Y.W., “Improving the Delamination Resistance of CFRP by Stitching-A Review,” *Composite Science and Technology*, Vol. 50, 1994, pp. 305-317.
  17. Moutitz, A.P., Bannister, M.K., Falzon, P.J., and Leong, K.H., “Review of Applications for Advanced Three-dimensional Fibre Textile Composites,” *Composites: Part A*, Vol. 30, No.12, 1999, pp.1455-1461.
  18. Ju, H.W., Nguyen, K.H., Chae, S.S., and Kweon, J.H., “Delamination Strength of Composite Curved Beams Reinforced by Grooved Stainless-steel Z-pins,” *Composite Structures*, Vol. 180, 1999, pp. 497-506.
  19. Park, S.S., Choe, H.S., Kwak, B.S., Choi, J.H., and Kweon, J.H., “Micro-bolt Repair for Delaminated Composite Plate under Compression,” *Composite Structures*, Vol. 192, 2018, pp. 245-254.
  20. ASTM D3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
  21. ASTM D3479. Standard Test Method for Tension-tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials.