

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(12), 967-974(2013)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.12.967>

## 요철 형상의 스테인레스강 Z-핀으로 보강된 복합재 접합 구조물의 피로강도

최익현\*, 임철호\*\*

## Fatigue Strength of Composite Joint Structures Reinforced by Jagged Shaped Stainless Steel Z-pins

Ik-Hyeon Choi\* and Cheol-Ho Lim\*\*

Advanced Materials & Structures Research Team of Korea Aerospace Research institute\*  
Vice President of Korea Aerospace Research institute\*\*

### ABSTRACT

Recently the authors had proposed the z-pinning patch concept to simply manufacture z-pinned composite structures at industrial production site and manufactured composite single-lap shear joint specimens using the concept. Through static tensile test on the specimens they had obtained 54~68% improvement of the joint strength. As a sequential study of it, in this study, fatigue test has performed to measure an improvement of joint strength under cyclic loading. The z-pin's material is stainless steel and its surface was specially machined into zagged shapes and chemically corroded to increase the connection force with composite materials. Approximately 98~125% improvement of the joint strength under cyclic loading was obtained.

### 초 록

저자는 최근 산업체 생산 현장에서 Z-피닝 복합재 구조물을 간편하게 제작할 수 있는 Z-피닝 패치 개념을 제안하였고, 이를 적용하여 복합재 단일-겹침 전단 접합시편을 제작하였으며, 정적시험을 통하여 54~68%의 접합강도의 향상을 발표하였다. 본 연구는 상기 연구의 후속으로서, 반복하중에 대한 접합강도의 향상을 측정하기 위하여 피로시험을 수행하였다. 사용된 Z-핀은 스테인레스강 핀이며, 복합재료와의 결합력을 증가시키기 위하여 표면을 요철 형상으로 가공하였으며, 화학적으로 부식시켰다. 반복하중 조건에서 접합강도는 약 98~125% 향상되었다.

**Key Words** : Composite(복합재), Z-pinning Patch(Z-피닝 패치), Singl-Lap Shear Joint(단일-겹침 전단 접합), Zagged Shape(요철 형상), Fatigue Strength(피로강도)

### 1. 서 론

복합재 구조물을 제작하는 다양한 방법 중에

서, 중량대비 고강도 고강성이 요구되는 항공우주 분야의 고성능 경량화 구조물을 제작하는 방법으로는, 복합재 프리프레그를 적층하여 성형하

† Received: October 21, 2013 Accepted: November 27, 2013

\* Corresponding author, E-mail : ihchoi@kari.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

는 방법을 많이 사용하고 있다. 적층 제작된 복합재 구조물은 두께 방향으로 특별한 보강재가 없으므로 면의 방향의 하중에 의하여 층간분리가 발생할 가능성이 있다. 또한 일체성형을 통하여 여러 부품을 한 번에 성형 제작하는 복합재 일체성형 조립체의 경우에 구조 부품간의 결합력은 일차적으로 수지의 접합력에만 의존하게 되므로 수지의 접합강도 이상의 큰 결합력이 요구되는 조립 부위에는 성형 후 볼트나 리벳 등 별도의 체결재를 추가로 사용하여야 한다.

따라서 적층복합재의 층간강도나 일체성형 접합부의 접합강도 향상을 위하여 Z-피닝 기술에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다[1, 2]. Z-피닝 기술은 적층복합재의 두께 방향으로 가나 다란 다수의 핀을 박아 두께 방향으로 취약한 층간 분리 특성을 보강하거나, 일체성형된 두 구조물의 접합강도를 향상시키는 기술이다.

복합재 구조물에 다수의 핀을 박는 Z-피닝 기술에 있어서, 해외에서는 미국에서 특허 등록된 방법으로, 핀이 박혀있는 일회용 프리폼을 사용하여 초음파 건으로 프리폼을 압축 붕괴시키면서 적층된 프리프레그에 핀을 박고, 핀이 박힌 후 압축 붕괴된 프리폼 및 프리프레그 밖으로 돌출된 여분의 핀을 제거한 후에 프리프레그를 오토클레이브에서 성형하는 방법을 많이 사용하여 왔다[3, 4]. 이 방법은 핀을 삽입하는 과정에서 부수적인 작업들이 추가로 필요하여 생산성이 낮은 것으로 평가되고 있지만, Mouritz A. P. 등을 비롯한 많은 연구자들이 이 방법을 사용하여 복합재 Z-피닝 구조물을 제작하고 그 역학적 특성을 연구하여왔다[5-10].

국내에서는 프리폼의 역할을 담당하는 상하부 치구 세트를 제작하고, 오토클레이브 내부의 고압과 고온을 이용하여 복합재 성형과정에서 핀을 단번에 박는 방법이 저자에 의하여 시도되었고 [11], 상기 미국의 특허방법을 변경하여 일회용 프리폼 대신 핀 삽입 가이드 역할을 하는 많은 수의 구멍이 뚫린 여러 장의 얇은 아크릴 가이드 판을 쌓고, 가이드 판의 구멍에 삽입될 핀을 꽂은 후에, 아크릴 가이드 판의 높이를 줄여가며 초음파 건으로 적층된 프리프레그에 핀을 박는 방법도 사용되고 있다[12].

최근 저자는 복합재 구조물의 생산 현장에서 Z-피닝 구조물의 제작을 더욱 쉽고 간편하게 할 수 있는 Fig. 1과 같은 'Z-피닝 패치' 및 Fig. 2와 같은 'Z-피닝 패치를 사용한 복합재 Z-피닝 구조물 제작 개념'을 제안하였고, 이 개념을 적용하여 단일-겹침 전단 접합(single-lap shear joint) 시편

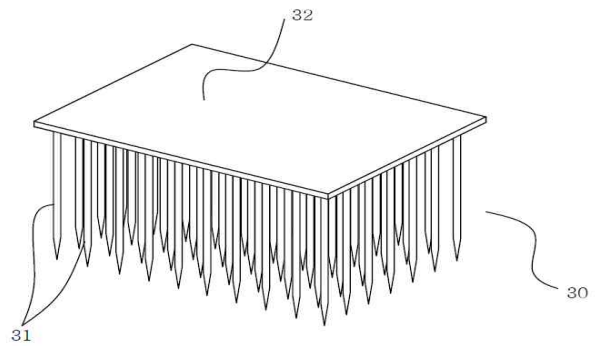


Fig. 1. Conceptual drawing of 'z-pinning patch'

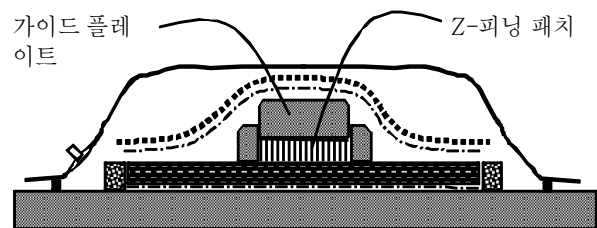


Fig. 2. New z-pinning concept using the z-pinning patch

을 제작하고 인장 정적시험을 수행하여 접합강도의 향상을 점검하였다[13]. 1차 시험 연구에서는 0.3mm 직경의 스테인레스강 핀을 사용하였으며, 2차 시험 연구에서는 0.5mm 직경의 스테인레스강 핀을 사용하였는데, 복합재와의 결합력을 향상시키기 위하여 핀의 표면을 요철형상으로 가공하였고, 화학적으로 부식처리를 하였다. (스테인레스강 핀을 요철형상으로 가공하면, 복합재와의 결합력이 수직 방향의 인발 시험의 경우에 약 10 배로 향상되었으며, 화학적 부식 처리의 효과는 약 20% 향상으로 나타났다. 이에 대한 자세한 연구 결과는 전단 방향 인발 시험 등의 결과가 추가로 정리되는 대로 발표 예정이다.) 상기 단일-겹침 전단 접합 시편에 대한 정적시험 수행 결과, 최종적으로 약 54~68%의 접합강도의 향상을 확인하였다.

저자에 의한 이 결과는 카본/비스말레이미드 복합재 핀을 사용한 기존의 연구 결과[9]보다 더 큰 접합강도의 향상을 보인 것이다. 또한 카본/비스말레이미드 Z-핀을 사용하는 경우에, 고온 다습 환경에서 오랜 기간 노출되면 Z-핀과 복합재와의 결합력이 약 절반 정도까지 감소한다는 보고[14]가 있었다. 이는 복합재 Z-피닝 기술 연구에서 최근의 중요한 이슈중의 하나로서 이에 대한 해결책이 요구되고 있다.

하지만 상기 저자의 연구[13]에서와 같이 요철

형상으로 가공된 스테인레스강 Z-핀을 사용하는 경우에는, Z-핀과 복합재와의 결합력이 수지에 의한 접합력에 의해서만 결정되는 것이 아니고, 요철형상에 따른 마찰 저항력에 의하여 결정되기 때문에 고온 다습 환경에 의한 결합력 감소의 영향이 크지 않을 것으로 기대된다. 또한 스테인레스강 핀의 전단 강도가 카본/비스말레이미드 재질의 핀의 전단 강도에 비하여 상대적으로 크고, 스테인레스강은 소성영역으로 인하여 파단이 지연되는 특성을 가지고 있기 때문에, 이를 잘 활용하면 약간의 중량 증가를 감수할 수 있는 경우에는 스테인레스강 핀을 사용하는 것이 더 유리하다고 생각된다.

카본/에폭시 복합재료에 금속재 Z-핀을 사용하는 경우에는, 금속재 Z-핀과 탄소섬유와의 사이에서 발생할 수 있는 갈바닉 부식의 가능성을 고려하여야 하는데, 스테인레스강 304 또는 316, 317 계열은 구조용 금속재료 중에서 갈바닉 부식에 대하여 티타늄 다음으로 상대적으로 안전한 것으로 알려져 있다.

본 연구는 기존 연구[13]의 연속으로, Z-피닝 패치를 사용하여 제작된 단일-겹침 전단 접합 시편에 대하여 반복하중에 의한 피로시험을 수행하고 반복하중에 대한 접합강도의 향상을 점검한 것이다.

## II. 단일-겹침 전단 접합 시편 제작

이전 연구[13]에서와 같은 방법으로 Z-피닝 패치를 제작하였다. 사용된 Z-핀은 직경이 0.5mm 이며 재질은 스테인레스 강선으로 규격 번호는 STS304-H3/4이다. 앞 장에서 언급한 바와 같이 복합재와의 결합력을 향상시키기 위하여 핀의 표면을 요철형상으로 가공하였으며, 이전 연구에서와 같은 방법으로 화학적으로 부식처리를 하였다.

Z-피닝 패치는 삽입될 핀의 길이(6mm와 8mm) 및 핀과 핀 사이의 간격(2mm와 3mm)에 따라 4 종류가 제작되었다. Fig. 3은 본 연구에서

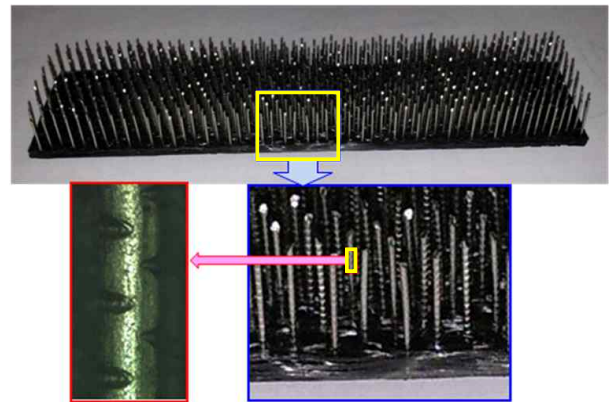


Fig. 3. Z-pinning patch manufactured using stainless pin machined into jagged shapes

제작된 Z-피닝 패치의 한 예를 보여주고 있는데, 핀의 길이는 8mm이고, 핀 사이의 간격은 2mm 인 경우이다. 핀의 확대된 사진에서 핀의 표면이 요철 형상으로 가공되었음을 볼 수 있다.

Figure 4는 제작된 단일-겹침 전단 접합 시편의 크기를 보여주고 있다. 시편의 제작에 사용된 복합재 프리프레그는 SK케미칼(주)의 USN-125B 이며, 시편의 겹쳐진 부위의 두께가 6mm, 8mm 인 경우에 대하여 적층순서는 각각  $[[0/-45/90/45/0_2/-45/0_2/90/0_2/45/0]_s]_s$ 와  $[[0/-45/90/45/0_2/-45/0_2/45/0_2/90/0/-45/0/45/0]_s]_s$ 이다. 이 적층순서는 시편 자체의 인장강도를 최대한 높이기 위하여 고안되었다.

Figure 5는 본 연구에서 시편의 제작에 적용한 성형 사이클이다. 성형 초기부터 진공과 고압을 부가하는 통상적인 복합재료 성형 사이클과는 달리, 성형 온도가 100°C에 도달하였을 때부터 진공과 고압을 부가하였다. 이는 수지의 점도가 최저로 되었을 때 Z-핀을 삽입함으로써 핀의 삽입 과정에서 강화섬유의 파손 가능성을 최소화하기 위함이다.

Z-피닝 복합재 구조물의 성능을 분석하는 기준으로 일반적으로 핀의 체적 밀도를 많이 사용

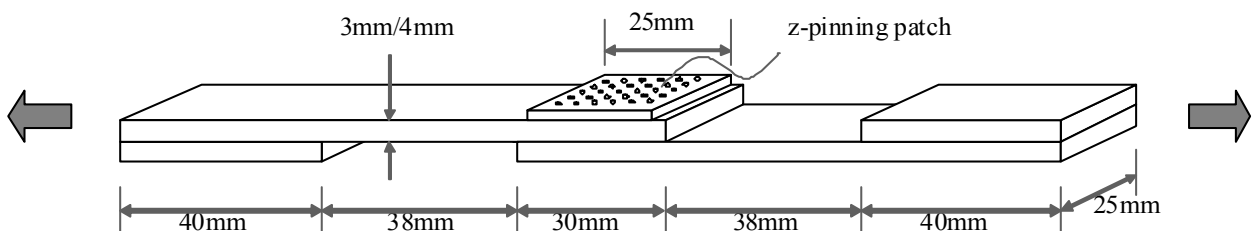


Fig. 4. Schematic diagram of the manufactured single-lap shear joint specimen

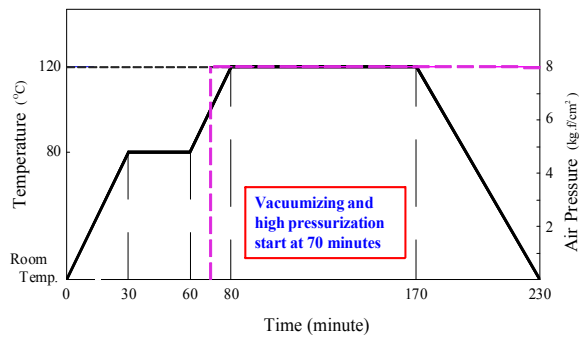


Fig. 5. Curing cycle to manufacture z-pinned structure using the z-pinning patch

한다. 즉, 복합재 구조물의 단위 체적 내에 삽입된 Z-핀이 차지하는 체적비가 얼마인가 하는 것이 Z-피닝 구조물의 성능을 평가하는 기준 변수로 주로 활용되고 있다. 본 연구에서 0.5mm 직경의 핀이 3mm 간격으로 배열된 경우에는 핀의 체적 밀도가 2.2%이고, 2mm로 배열된 경우에는 4.9%인 것으로 계산되었다. 단, 핀의 표면의 요철 형상으로 인한 작은 차이는 무시하였다.

핀의 체적 밀도가 4.9%인 Z-피닝 구조물의 경우에는 핀 삽입시 핀 주변의 강화섬유의 밀도가 매우 높아지기 때문에 성형압력만으로는 핀의 삽입이 원활하지 않았다. 본 연구에서는 성형시 패치 상부에 패치보다 약 3배 정도 넓은 판을 둠으로써, 성형압력보다 약 3배 정도 큰 하중이 패치에 작용하도록 하여 패치의 Z-핀들이 쉽게 삽입될 수 있도록 조치하였다.

### III. 피로시험 수행 및 결과

항공기 구조의 경우에 피로강도를 규정하기 위하여 통상적으로  $10^6$  사이클 수를 기준으로 피로시험을 수행한다. 그런데 어떤 크기의 반복하중을 부가하여야  $10^6$  사이클에 도달하게 되는지 시험 수행 전에는 알 수가 없다. 본 연구에서는 우선 평균 정적강도의 48%, 36%, 24%의 크기로 반복하중 값을 설정하고 피로시험을 수행하였다.

저자의 이전 연구[13]에서 수행된 정적시험 결과, 핀의 배열이 2mm 간격이고 접합부 두께가 6mm 및 8mm인 경우에 평균 파손하중은 각각 2,027kg 및 2,505kg이었다. 이 값들에 48%, 36%, 24%를 적용하여 Table 1에서 보는 바와 같이 반복하중의 크기를 결정하였다. 반복하중의 응력비는 0이다. 접합부 두께, 핀의 배열 및 하중 조건 별로 각 4개의 시험에 대하여 시험을 수행하였으

Table 1. Classification of fatigue test specimens.

joint thickness	spacing of z-pin	pin volume density	cyclic loading	no. of specimens
6mm	no pin	0%	0~973kg	3x4=12
	3mm	2.2%	0~730kg	3x4=12
	2mm	4.9%	0~487kg	3x4=12
8mm	no pin	0%	0~1,203kg	3x4=12
	3mm	2.2%	0~902kg	3x4=12
	2mm	4.9%	0~601kg	3x4=12
total number of specimens				72

며, 시험이 수행된 전체 시험의 수는 72개이다. 시험 수행 일정을 단축하기 위하여 최대  $10^6$  사이클까지 반복하중을 부가하고, 파손이 발생하지 않더라도 시험을 종료하였다.

접합부의 두께가 6mm인 경우에 대한 피로시험 수행 결과를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 실선은 시험결과의 평균값을 그대로 연결한 것이고, 점선은 시험데이터가 부족한 부분에 대하여 시험결과의 전체적인 경향을 바탕으로 추정하여 그린 것이다. 먼저, Z-핀이 없는 경우에, 정적강도의 48%, 36%, 24%의 크기로 반복하중을 부가하였을 때 12개 모든 시험이  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손이 발생하였다. 이 결과들은 실선으로 도시되었으며, 이 실선의 경향을 바탕으로  $10^6$  사이클 수를 넘어가는 선을 점선으로 추정하여 도시하였다. 이 때  $10^6$  사이클 수에 해당하는 반복하중의 크기는 약 320kgf 정도인 것으로 추정되었다.

다음으로, 3mm 간격으로 Z-피닝된 시험의 경우에는 정적강도의 48%, 36%의 크기로 반복하중이 부가된 경우에는 8개 모든 시험이  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손이 발생하였지만, 정적강도의 24%의 크기로 반복하중이 부가된 경우에는 4개 모든 시험이  $10^6$  사이클 수에 도달하여도 파손되지 않았다. 따라서 다른 실선들의 경향을 참고하여 점선과 같이  $10^6$  사이클 수를 통과하는 선도를 추정하였고, 이 때의 하중의 크기는 550kgf 정도인 것으로 추정되었다.

다음으로, 2mm 간격으로 Z-피닝된 시험의 경우에는 정적강도의 48%의 크기로 반복하중이 부가된 경우에는 4개 모든 시험이  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손이 발생하였지만, 정적강도의 36%인 경우에는 3개의 시험만이 파손되었고, 한 개의 시험은  $10^6$  사이클 수를 상당히 초과한 상

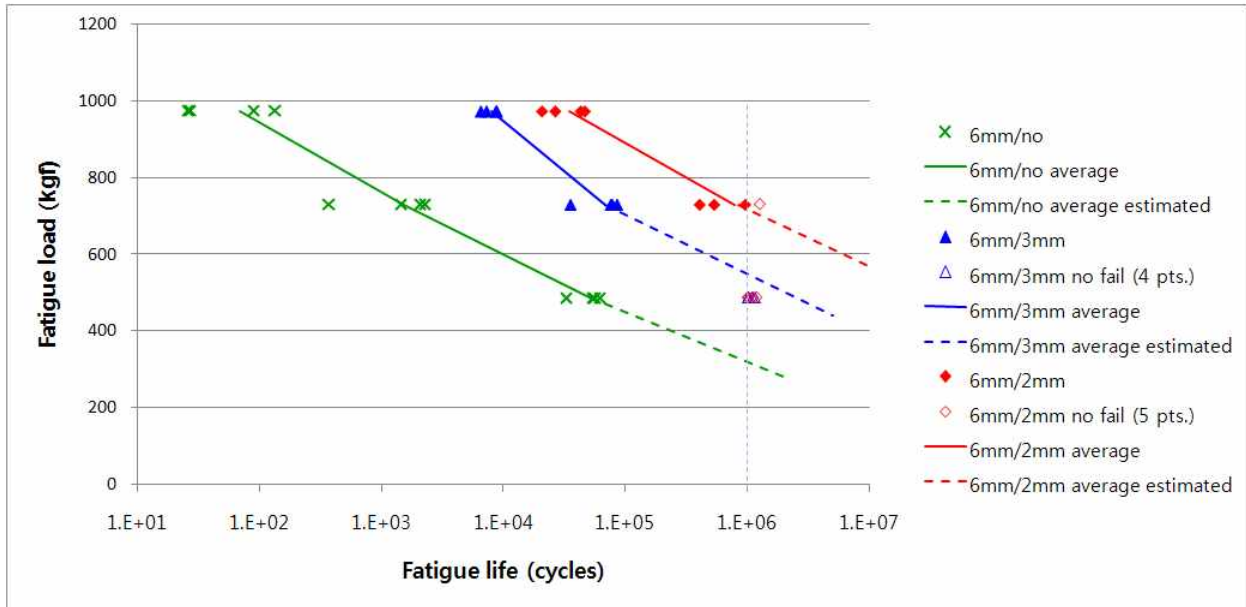


Fig. 6. Estimated curves for relation of fatigue load and number of cycles when joint thickness is 6mm

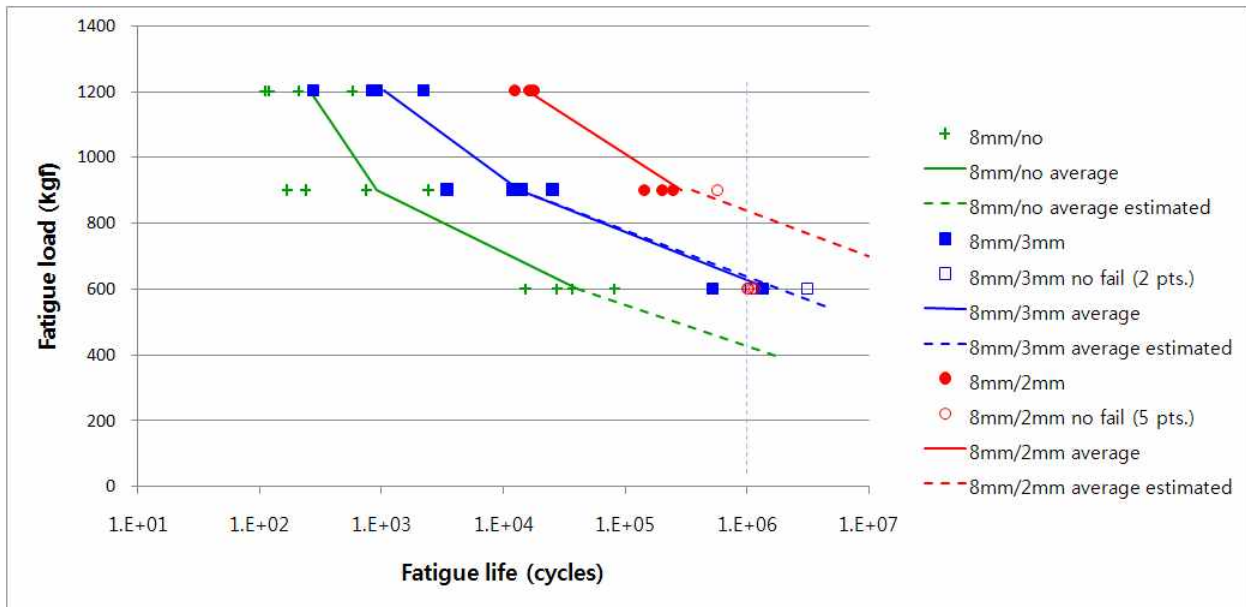


Fig. 7. Estimated curves for relation of fatigue load and number of cycles when joint thickness is 8mm

테에서도 파손이 발생하지 않았다. 그리고 정적 강도의 24%인 경우에는 모든 시편이  $10^6$  사이클 수에 도달하여도 전혀 파손되지 않았다. 따라서 다른 실선들의 경향을 참고하여 점선과 같이  $10^6$  사이클 수를 통과하는 선도를 추정하였고, 이 때의 하중의 크기는 약 720kgf 정도인 것으로 추정되었다.

결과적으로 6mm 접합부 두께를 갖는 Z-피닝 시편의 경우에 3mm 간격으로 Z-피닝을 하면 피

로 강도는 약 72%가 향상되었고, 2mm 간격으로 Z-피닝을 하면 피로강도가 약 125%만큼 향상된다고 추정할 수 있었다.

Figure 7은 동일한 방법으로 8mm 접합부 시편의 경우에 시험 결과를 정리한 것이다. 6mm 시편의 경우와 유사하게, Z-핀이 없는 경우에는 정적강도의 48%, 36%, 24%의 크기로 반복하중을 부가하였을 때 12개 모든 시편이  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손이 발생하였다. 이 결과들



은 실선으로 도시되었으며, 이 실선의 경향을 바탕으로  $10^6$  사이클 수를 넘어가는 선을 점선으로 추정하여 도시하였다. 이 때  $10^6$  사이클 수에 해당하는 반복하중의 크기는 약 425kgf 정도인 것으로 추정되었다.

다음으로, 3mm 간격으로 Z-피닝된 시편의 경우에는 정적강도의 48%, 36%의 크기로 반복하중이 부가된 경우에는 8개 모든 시편이  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손이 발생하였지만, 정적강도의 24%의 크기로 반복하중이 부가된 경우에는, 1개 시편은  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손되었고, 다른 1개 시편은  $10^6$  사이클 수를 초과한 상태에서 파손되었고, 나머지 2개 시편은  $10^6$  사이클 수를 초과한 상태에서도 파손되지 않아 시험을 종료하였다. 즉, 1개 시편만이  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손되었고 3개 시편은  $10^6$  사이클 수를 넘어갔기에 Fig. 6에서와 같이 실선보다 약간 상승된 위치로  $10^6$  사이클 수를 통과하는 점선을 추정하였고, 이때의 하중의 크기는 630kgf 정도인 것으로 추정되었다.

다음으로, 2mm 간격으로 Z-피닝된 시편의 경우에는 정적강도의 48%의 크기로 반복하중이 부가된 경우에는 4개 모든 시편이  $10^6$  사이클 수에 도달하기 전에 파손이 발생하였지만, 정적강도의 36%인 경우에는 3개의 시편만이 파손되었고, 한 개의 시편은 파손되지 않은 상태에서 다른 시편들에 비하여 사이클 수가 너무 커져서 시편이 파손되지 않은 상태에서 시험을 종료하였다. 그리고 정적강도의 24%인 경우에는 모든 시편이  $10^6$  사이클 수에 도달하여도 전혀 파손되지 않았다.

따라서 다른 실선들의 경향을 참고하여 점선과 같이  $10^6$  사이클 수를 통과하는 선도를 추정하였고, 이때의 하중의 크기는 약 840kgf 정도인 것으로 추정되었다.

결과적으로 상기의 추정 선도를 바탕으로 8mm 접합부 두께를 갖는 Z-피닝 시편의 경우에 3mm 간격으로 Z-피닝을 하면 피로 강도는 약 48%가 향상되고, 2mm 간격으로 Z-피닝을 하면 피로강도가 약 98% 향상된다고 추정할 수 있었다.

한편, 단일-겹침 전단 접합시편은 인장하중이 부가될 때, 이론적으로 파손 모드 II의 영향만을 받아야 하지만, 실제로 시편에 인장하중이 부가되면 시편의 굽힘 변형으로 인하여 모드 I의 영향이 약간 작용하게 된다. 이 때 시편의 두께가 얇은 6mm 시편이 8mm 시편에 비하여 상대적으로 모드 I의 영향을 더욱 크게 받게 되며, 이것이 전체적으로 6mm 접합부 두께 시편의 파손하중이 8mm 시편에 비하여 작게 나타나는 이유인 것으로 판단하고 있다.

Figure 8에서 보는 바와 같이, 정적하중에 의한 파손 양태는, Z-핀이 없는 경우에는 중립면에서 층간분리가 발생하면서 파단 되었고, 3mm 간격(핀 밀도 2.2%)의 경우에는 중립면에서 핀이 이탈되면서 파단 되었고, 2mm 간격(핀 밀도 4.9%)의 경우에는 중립면 아래쪽에서 층간분리가 발생한 이후 중립면과 층간분리 면 사이의 복합재가 파손되면서 시편이 파단 되었다[13].

피로하중에 의한 파손 양태를 살펴보면, Z-핀

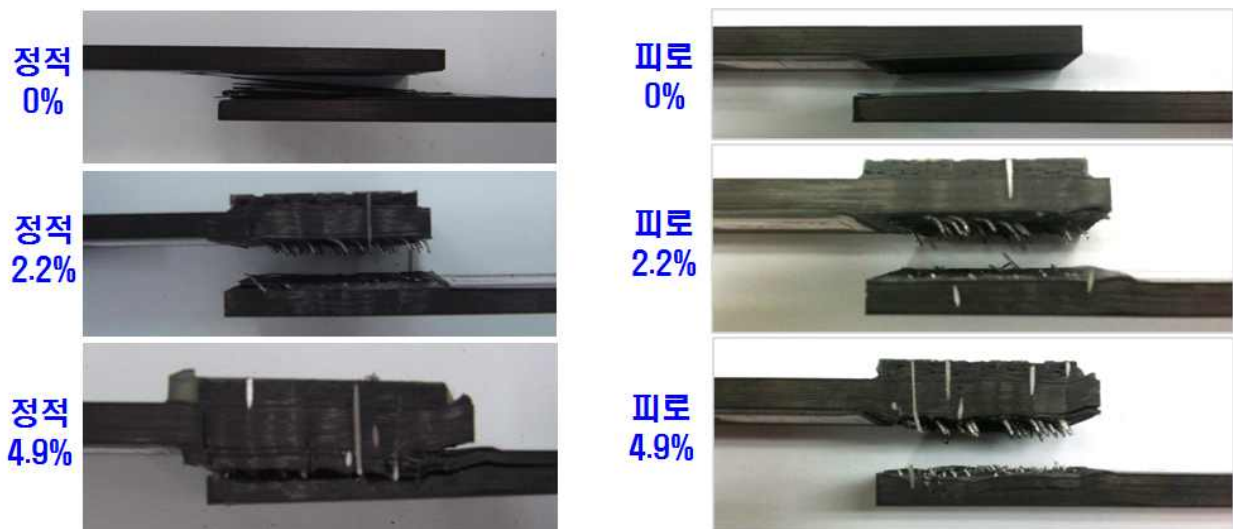


Fig. 8. Failure shapes of single-lap shear joint specimens under static loading and cyclic loading

이 없는 경우에는 정적시험과 동일하게 중립면에서 층간분리가 발생하면서 파단 되었고, 3mm 간격(핀 밀도 2.2%)의 경우에는 중립면에서 층간분리가 발생하면서 반복하중으로 인하여 핀이 이탈 또는 파손되면서 시편의 분리 파단이 발생하였다. 2mm 간격(핀 밀도 4.9%)의 경우에는 중립면 아래쪽에서 층간분리가 일부 발생하기도 하였지만, 결국은 중립면에서 층간분리가 발생하면서 반복하중으로 인하여 핀이 이탈 또는 파손되면서 시편의 분리 파단이 발생하였다.

전체적으로 시편의 파단 양태를 요약하면, 정적시험의 경우에는 핀 자체의 파손은 발생하지 않은 상태에서 핀의 이탈 및 복합재의 층간분리 또는 국부적 파손이 발생하면서 시편의 파단이 발생하였지만, 피로하중에 의한 파단은 대부분 중립면에서 복합재의 분리 파단이 발생하였으며, 동시에 핀의 이탈 및 핀 자체의 파손이 발생하였다. 따라서 복합재 Z-피닝 구조물의 피로강도의 향상을 위해서는, Z-핀의 이탈을 방지하기 위하여 요철 형상의 가공 등에 대한 연구뿐만 아니라, Z-핀 자체의 파손 강도를 증가시키기 위한 연구가 중요하다는 것을 파악할 수 있었다.

#### IV. 결 론

Z-피닝 패치 개념을 적용하여 단일-겹침 전단 접합 시편을 제작하고 피로시험을 수행하였다. 일부 부족한 시험 데이터는 전체적인 경향을 바탕으로 추정하였으며,  $10^6$  사이클 수를 기준으로, 2.2% 및 4.9% Z-핀 밀도를 갖는 경우에 피로강도는 각각 약 48~72% 및 98~125% 향상되었다.

Z-피닝 구조물의 피로강도의 향상을 위해서는 Z-핀과 복합재와의 결합력을 증가시켜서 Z-핀이 복합재 모재로부터 쉽게 이탈되지 않도록 하기 위한, 즉, 요철 형상의 가공 등이 매우 중요하며, 또한 이와 더불어 Z-피닝 접합부에 가해지는 전단 하중 등에 대하여 Z-핀이 충분히 버틸 수 있도록, 즉, 핀 자체의 강도가 큰 값을 갖도록 Z-핀을 설계 제작하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구에서 시편 제작과 시험 수행은 서울과학기술대학교 기계공학과 정성균 교수님과 정중설 대학원생 및 최 린 선생님 등 많은 분들께서 수고해주셨으며 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) Mouritz A. P., "Review of Z-pinned Composite Laminates," *Composite Part A*, Vol. 38, 2007, pp. 2383-2397.
- 2) Dickinson L. C., Farley G.L. and Hinders M.K., "Translaminar Reinforced Composites: A Review," *Journal of Composites Technology and Research*, Vol. 21, Issue 1, 1999, pp. 3-15.
- 3) Fusco T. M., Magee C. and Freitas G., "Method and System for Inserting Reinforcing Elements in a Composite Structure," *U.S.A. Patent*, No. 5,589,015, Foster-Miller Inc, Waltham, MA, 31 Dec. 1996.
- 4) Partridge I. K., Cartie D. D. R. and Bonnington T., "Manufacture and Performance of Z-Pinned Composites", *Advanced Polymeric Materials*, edited by G. O. Shonaike and S. G. Advani, CRC Press, 2003, pp. 103-138.
- 5) Chang P., Mouritz A. P. and Cox B. N., "Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension", *Composites: Part A*, Vol. 37, 2006, pp. 1501-1513.
- 6) Mouritz A. P., "Compression properties of z-pinned composite laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 3110-3120.
- 7) Mouritz A. P., "Tensile fatigue properties of 3D composites with through-thickness reinforcement", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 2503-2510.
- 8) Isa M. D., Feih S. and Mouritz A. P., "Compression fatigue properties of z-pinned quasi-isotropic carbon/epoxy laminate with barely visible impact damage", *Composites Structures*, Vol. 93, 2011, pp. 2269-2276.
- 9) Chang P., Mouritz A. P. and Cox B. N., "Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 2163-2176.
- 10) Koh T. M., Feih S. and Mouritz A. P., "Strengthening mechanics of thin and thick composite T-joints reinforced with z-pins", *Composites: Part A*, Vol. 43, 2012, pp.1308-1317.
- 11) Choi I. H., Kim I. G., Ahn S. M., Yeom C. H., Hwang I. H. and Lee D. S., "New Manufacturing Method of Z-Pinned Composite

Laminates," *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 12 - 15 April 2010, Orlando, Florida, AIAA 2010-3133.

12) Park Y. B., Lee B. H., Kweon J. H., Choi J. H. and Choi I. H., "The Strength of Composite Bonded T-Joints Transversely Reinforced by Carbon Pins," *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 625-634.

13) Choi, I. H. and Lim, C. H., "Static Strength of Composite Single-Lap Shear Joint Specimen Using Z-pinning Patch," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 8, 2013, pp. 613~618.

14) Mouritz A. P., "Environmental durability of z-pinned carbon fibre-epoxy laminate exposed to water", *Composites Science and Technology*, Vol. 72, 2012, pp. 1568-1574.