論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(8), 613-618(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.8.613>

Z-피닝 패치를 사용한 복합재 단일-겹침 전단 접합 시편의 정적강도

최익현*, 임철호**

Static Strength of Composite Single-Lap Shear Joint Specimen Using Z-pinning Patch

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

In this paper a new concept on z-pinning technology named by authors as 'z-pinning patch' will be introduced, which advantage is easy application at manufacturing site of composite structures. Using the trial manufactured z-pinning patch, the z-pinned composite single-lap shear joint specimens were successfully manufactured and tested to check the improvement of joint strengths. The z-pin's material is stainless steel and its surface was machined as zagged shape and chemically corroded to improve joint force with composite materials.

초 록

본 논문에서는 복합재 구조물의 제작 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 장점을 갖는, 저자에 의하여 'Z-피닝 패치'로 명명된 새로운 Z-피닝 기술에 대하여 소개하였다. 시제작된 'Z-피닝 패치'를 사용하여 Z-핀이 박힌 복합재 단일-겹침 전단 접합시편을 성공적으로 제작하였고, 접합강도의 향상을 점검하기 위하여 시험을 수행하였다. Z-핀의 재질은 스테인레스강이며, 복합재료와의 접합력을 향상시키기 위하여 Z-핀의 표면은 요철 형상으로 가공하였으며, 화학적으로 부식시켰다.

Key Words : Composite Materials(복합재료), Z-pinning(Z-피닝), Z-pinning Patch(Z-피닝 패치), Singl-Lap Shear Joint(단일-겹침 전단 접합), Zagged Shape(요철 형상)

1. 서 론

다양한 복합재 구조물 제작방법 중에서 중량 대비 고강도 고강성이 요구되는 항공우주 분야의 고성능 경량화 구조물에는 복합재 프리프레그를 적층하여 성형 제작하는 방법을 많이 사용하고

있다. 적층 제작된 복합재 구조물은 두께 방향으로 특별한 보강재가 없으므로 면외 방향의 하중에 의하여 층간분리가 발생할 가능성이 커진다. 또한 일체성형을 통하여 여러 부품을 한 번에 성형 제작하는 일체성형 조립 구조물의 경우에 부품간의 결합력은 일차적으로 수지의 접합력에만

† Received: May 8, 2013 Accepted: July 15, 2013

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

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

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

의존하게 되므로 수지의 접합강도 이상의 큰 결합력이 요구되는 조립 부위에는 성형 후 볼트나 리벳 등의 별도의 체결재를 추가로 사용하여야 하는 번거로움이 있다.

따라서 적층복합재의 층간강도나 일체성형 접합부의 접합강도 향상을 위한 Z-피닝 기술에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다[1, 2]. Z-피닝 기술은 적층복합재의 두께 방향으로 핀을 삽입하여 두께 방향으로 취약한 층간분리 특성을 보장하거나, 일체성형된 두 구조물의 접합강도를 향상시키는 기술이다.

복합재 구조물에 다수의 핀을 삽입하기 위한 Z-피닝 기술에 있어서, 해외에서는, 1990년대 미국에서 특허출원된, 핀이 삽입된 일회용 프리폼을 사용하여 초음파 건으로 프리폼을 압축 붕괴시키면서 적층된 프리프레그에 핀을 박고, 핀 삽입 후 압축 붕괴되고 남은 잔류 프리폼 및 프리프레그 밖으로 돌출된 핀을 제거한 후에, 프리프레그를 성형하는 방법이 많이 사용되어 왔다[3]. 국내에서는, 저자 등에 의하여 제안된, 반복사용 가능한 치구를 사용하여 복합재 구조물의 성형과정에서 오토클레이브의 성형 압력과 고온을 이용하여 핀을 삽입하는 방법이 시도되었고[4], 상기 미국의 특허방법을 변경하여 일회용 프리폼 대신 핀 삽입 가이드 역할을 하는 많은 수의 구멍이 뚫린 얇은 여러 장의 아크릴 가이드 판을 쌓고, 가이드 판의 구멍에 삽입될 핀을 꽂은 후에, 초

음파 건으로 핀을 박으면서 아크릴 가이드 판의 높이를 조절하여 적층된 프리프레그에 핀을 삽입하는 방법도 사용되고 있다[5].

본 연구에서는 복합재 구조물의 생산 현장에서 Z-피닝 구조물의 제작을 더욱 쉽고 간편하게 하기 위하여 Fig. 1과 같은, 'Z-피닝 패치'를 고안하였다. Fig. 2는 Z-피닝 패치를 적용하여 복합재 구조물을 성형하는 개념을 보여주고 있다. 본 연구에서는 이 개념을 적용하여 2차에 걸쳐 단일-겹침 전단 접합(single-lap shear joint)시편을 제작하고, 인장시험을 수행하여 Z-피닝에 의한 전단 접합강도의 향상을 점검하였다. 1차 제작에서는 0.3mm 직경의 스테인레스 핀을 사용하였고, 2차 제작에서는 0.5mm 직경의 스테인레스 핀을 사용하였으며, 2차 제작에서는 복합재와의 접합력을 향상시키기 위하여 핀의 표면을 요철형상으로 가공하고, 화학적으로 부식처리를 하였다.

II. 1차 제작 및 시험 결과

2.1 Z-피닝 패치 1차 제작

Figure 1의 개념과 같은 Z-피닝 패치를 제작하는 방법에는 여러 가지 방법들이 가능하겠지만, 본 연구에서는 상부 판(Fig. 1의 32)의 소재를, 제작된 Z-피닝 패치가 사용될 복합소재와 동일한 소재를 사용하여 제작하는 방법을 개발하였다. 즉, 본 연구에서는 Z-피닝 패치를 제작하여 먼저 카본/에폭시 복합재 단일-겹침 전단 접합시편에 적용하여 성능을 시험할 예정이기 때문에 이와 동일한 특성을 갖는 카본/에폭시 복합소재를 사용하여 제작하는 방법을 개발하였다. 단일-겹침 접합시편 제작에 사용된 복합 소재는 SK케미칼의 USN-125B 프리프레그이며, 패치의 상부 판 제작에 사용된 복합 소재는 SK케미칼의 WSN3K 프리프레그이다.

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

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

Fig. 3. Apparatus for manufacturing of z-pinning patch.

Fig. 4. Sample of manufactured z-pinning patch using 0.3mm diameter stainless pin.

Figure 3은 본 연구에서 개발된 Z-피닝 패치의 성형 제작 장치를 보여준다. 패치 제작에 사용된 Z-핀은 0.3mm 직경의 스테인레스 강선이다. 핀의 끝단부는 원활한 삽입을 위하여 뾰족하게 가공하였고, 패치의 상부 판은 상기 프리프레그를 약 1.0mm 두께로 적층하여 제작하였다. 적층된 프리프레그를 내부에 열선이 설치된 가열장치에 위치시키고, 80℃ 이상으로 가열하여 프리프레그에 함침된 수지의 점성을 낮춘 상태에서, 장치의 상부에 조립된 핀 삽입 가이드의 구멍을 통하여 핀들을 프리프레그에 삽입하고, 이후 120℃로 온도를 상승시켜 프리프레그를 성형함으로써 상부 판에 핀이 견고하게 고정되게 하였다.

제작된 Z-피닝 패치는 삽입된 핀의 길이(6mm와 8mm) 및 핀과 핀 사이의 간격(2mm와 3mm)에 따라 4 종류가 제작되었다. Fig. 4는 제작된 Z-피닝 패치의 한 예를 보여주고 있는데, 핀의 길이는 8mm이고, 핀 사이의 간격은 3mm인 경우이다.

2.2 1차 시편 제작 및 시험 결과

단일-겹침 전단 접합시편의 제작에는 Fig. 2의 개념이 적용되었으며, 일반 접합시편의 제작과정과 거의 동일하고, 단지 접합부의 상부에 패치와 패치를 수직으로 삽입하기 위한 가이드를 설치하는 과정이 추가되었다. 또한 복합재 내부의 강화

섬유의 파손을 최소화하기 위하여, 진공과 성형압력을 부가하는 시간을 성형온도가 100℃에 도달되어 수지의 점성이 최소화되는 시점으로 조정하였다. 제작된 단일-겹침 전단 접합시편의 형상은 Fig. 5와 같다. 시편의 중앙 부위에 Z-피닝 패치의 상부 판이 약간 돌출되어 있음을 볼 수 있다. 제작된 시편은 Instron 4467 시험기를 사용하여 인장하중을 부가하고 접합 강도를 측정하였다.

Table 1과 Fig. 6은 단일-겹침 접합시편의 인장 시험 결과를 정리한 것이다. Table 1과 Fig. 6에서 6mm와 8mm는 삽입되는 핀의 길이이며, 이는 곧 시편의 접합부의 두께를 의미한다. 표의 목록에서 No와 3mm, 2mm는 각각 Z-핀이 삽입되지 않은 경우와 Z-핀이 3mm, 2mm 간격으로 삽입된 경우를 의미한다.

한편, 많은 Z-피닝 연구에 있어서 삽입된 Z-핀의 양에 따라 Z-피닝의 성능이 좌우되고 있음을 보여주고 있다[1]. 즉, 복합재 모재에 대하여 Z-핀이 차지하는 부피의 비율이 중요한 기준이 되고 있다. 참고로 직경 0.3mm 핀을 3mm와 2mm 간격으로 삽입한 경우에, 핀의 부피 비율은 약 0.8%와 1.8%가 된다. 1차 시험에서는 6가지 경우

Table 1. Tensile failure load of 1st trial single-lap shear joints.

Index	no. of specimen	average failure load (kgf)	standard dev. (kgf)
6mm/No	10 (=6+4)	1820	211
6mm/3mm	6	1598	51
6mm/2mm	6	1247	44
8mm/No	11 (=5+6)	1238	207
8mm/3mm	6	1764	182
8mm/2mm	6	1443	121

Fig. 5. Manufactured single-lap shear joint specimens.

Fig. 6. Failure loads of tensile test of 1st trial single-lap shear joint specimens.

에 대하여 각 6개의 시편을 제작하고 시험을 수행하였다. Z-피닝을 하지 않은 6mm/no와 8mm/no의 시험결과에서 파단강도의 차이가 매우 크게 나타났으며, 이에 추가적으로 4개 및 6개의 시편을 더 제작하여 시험을 수행하였으며, 파단강도의 차이가 약간 감소하였으나, 그래도 그 차이가 상당히 크게 나타나고 있었다. 이와 같이 Z-피닝을 하지 않은 시편의 강도에서 차이가 매우 크게 나타났기 때문에, Z-피닝의 효과에 대하여 일관성있는 해석이 곤란하였지만, Z-핀의 밀도가 증가할수록 연결부의 접합강도가 감소하는 경향은 접합부의 두께 6mm 시편과 8mm 시편에서 공통으로 나타났다. 이는 Z-피닝으로 인하여 연결부의 접합성능이 오히려 저하된다는 것을 의미하는 것이다. 참고문헌[6]에서도 Z-핀의 밀도가 증가할수록 압축강도가 감소한다는 연구결과를 발표하고 있다. 이는 Z-핀의 주위에 미세균열이 발생하기 때문이며, 이는 열팽창률의 차이 때문에 발생한다고 설명하는 연구결과가 발표되고 있다[7].

1차 시편 제작 및 시험을 통하여 Z-피닝의 성능 향상 효과는 확인하지 못하였지만, Z-피닝 패치의 개념을 적용하여 복합재 Z-피닝 구조물의 제작이 가능함을 확인할 수 있었다.

III. 2차 제작 및 시험 결과

3.1 Z-피닝 패치 2차 제작

1차 시편 제작을 통하여 Z-피닝의 효과를 확인할 수 없었기에, 2차 시험에서는 1차 시험에 사용된 스테인레스 핀의 재질보다 더 강성이 강한 SUS304-H3/4 재질의 0.5mm 직경의 핀을 사용하였다. 또한 핀의 표면을 가공하여 요철 형상을 갖도록 Z-피닝 패치를 제작하였다. 이후 핀의 표면을 화학적으로 부식시켜 복합재와의 접합력이 향상되도록 하였다. Fig. 7은 0.5mm 직경의 핀을 사용하여 핀의 길이 8mm이며 2mm 간격으로 제작된 Z-피닝 패치를 보여주고 있다.

제작된 Z-피닝 패치를 사용하여 1차 시편 제작에서와 마찬가지로 단일-겹침 전단 접합 시편을 제작하였으며, 접합부의 두께는 6mm와 8mm 두 가지 경우이며, 핀의 간격은 2mm와 3mm 간격이며, 이 경우에 있어서 핀의 밀도는 각각 2.2%와 4.9%에 해당된다. 핀의 밀도가 4.9%인 경우에, Z-핀 주위의 국부적인 섬유부피비(fiber volume fraction ratio)를 계산해보면 거의 이론적인 최대값에 가까운 것으로 계산된다. 따라서

Fig. 7. Z-pinning patch manufactured using 0.5mm diameter stainless pin with zagged shape.

Fig. 2의 가이드 플레이트에 작용하는 성형압력만으로 Z-피닝 패치를 복합재 내부로 삽입시키는 것이 용이하지 않게 된다. 본 연구에서는 가이드 플레이트의 상부에 약 3배 정도 더 넓은 플레이트를 위치시켜 패치의 삽입에 더 큰 하중이 부가되도록 함으로써 패치의 삽입이 가능하도록 조치하였다.

3.2 2차 시편 제작 및 시험 결과

Table 2와 Fig. 8은 2차로 제작된 시편들에 대한 시험결과를 보여준다. 각 경우에 대하여 8개씩 시편을 제작하고 시험을 수행하였다.

1차 시험결과와는 달리 Z-피닝을 하지 않은 6mm/no의 파단강도와 8mm/no의 파단강도 사이에서 그 차이가 상당히 축소되었다. 접합부의 두께 6mm 시편들에 대하여 Z-피닝의 효과를 구체적으로 살펴보면, 6mm/3mm의 경우에는 6mm/no에 비하여 약 19%의 접합 강도의 향상이 있었고, 6mm/2mm의 경우에는 6mm/no에 비하여 약 54%의 강도 향상을 보였다. 접합부의 두께 8mm 시편들에 대해서는, 8mm/3mm의 경우에는 8mm/no에 비하여 약 2%의 접합 강도의

Table 2. Tensile failure load of 2nd trial single-lap shear joints.

index	no. of specimen	average failure load (kgf)	standard dev. (kgf)
6mm/No	8	1316	275
6mm/3mm	8	1563	152
6mm/2mm	8	2027	295
8mm/No	8	1492	200
8mm/3mm	8	1462	117
8mm/2mm	8	2505	164

Fig. 8. Failure loads of tensile test of 2nd trial single-lap shear joint specimens.

감소가 나타났고, 8mm/2mm의 경우에는 8mm/no에 비하여 약 68%의 접합강도 향상을 보였다.

결과를 요약하면, 2mm 간격으로 핀을 삽입한 경우는 핀 밀도 4.9%에 해당하는데 Z-피닝의 효과가 확실하게 나타났으며, 3mm 간격으로 삽입한 경우는 핀 밀도 2.2%에 해당하는데 상대적으로 Z-피닝의 효과가 확실하지 않았다.

Figure 9는 시편의 파단된 모습을 보여준다. 첫 번째 사진은 Z-피닝을 하지 않은 6mm/no의 경우이고, 두 번째와 세 번째는 각각 6mm/3mm와 8mm/2mm의 경우이다. 첫 번째 사진의, Z-핀이 없는 경우에는, 접합부의 중간에 위치한 접합면에서 층간분리가 발생하였다. 삽입되는 핀의 밀도가 상대적으로 낮은, 두 번째 사진의 3mm 간격의 경우에는, 접합면을 중심으로 핀의 이탈이 발생하였다. 삽입되는 핀의 밀도가 상대적으로 높은, 세 번째 사진의 2mm 간격의 경우에는 Z-핀들과 복합재와의 결합력이 매우 강하여, 접합부의 중간에 위치한 접합면에서 시편의 분리 파단이 발생하지 않았다. 반면에, 접합부의 아래쪽, 즉 핀의 끝부분 근처에서 층간분리 및 핀의 끝부분의 이탈이 발생하였으며, 이후 접합면과 층간분리 면 사이의 복합재 구조물이 인장하중에 의하여 파단이 발생할 때까지 시편의 접합력이 증가하였다. 즉, 복합재 내부로 삽입된 핀의 대부분은 시편이 파단될 때까지 핀이 빠지지 않고 삽입된 상태를 유지하고 있었다. 이는 접합부의 두께가 더 두꺼워 핀의 삽입되는 부분이 충분히 더 큰 경우에는 두 구조물의 접합 강도가 현재 수준보다 한층 더 향상될 수 있음을 의미하는 것으로, Z-피닝 접합 기술에 있어서 향후 더욱 큰 성능 개선이 가능함을 보여주는 결과로 판단된다.

2차 시편 제작과 시험을 통하여, 요철 형상 및

Fig. 9. Failure shape of single-lap shear joints. (from top, the case of 6mm/no, 6mm/3mm, 8mm/2mm)

화학적 부식 처리된 0.5mm 직경의 스테인레스 핀을 사용하여 Z-피닝을 시행하였을 때, 약 54~68%의 접합강도의 향상을 확인할 수 있었다. 또한 시편들의 파단 양태에 대한 관찰을 통하여, 향후 Z-핀을 접합부 시편의 바닥면까지 더 정확히 삽입하는 경우에는 Z-피닝의 효과가 더욱 크게 나타날 것으로 판단할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 복합재 구조물 제작 현장에서 Z-피닝 기술을 쉽고 간편하게 적용할 수 있도록, 저자에 의하여 고안된 'Z-피닝 패치'의 개념을 소개하고, 시제품을 제작하여 단일-겹침 전단 접합 시편에 적용하고, 인장시험을 수행하여 Z-피닝 패치의 성능을 점검하였다. Z-핀과 복합재와의 결합력을 증가시키기 위하여 Z-핀의 표면을 요철 형상으로 가공하고 화학적으로 부식 처리하

였으며, 결과적으로 본 연구를 수행한 두 가지 단일-겹침 접합 시편의 경우에 접합 강도를 54% 및 68% 증가시킬 수 있었다. 이 결과는 접합부의 두께가 6mm, 8mm인 경우이며, 만일 접합부의 두께가 이보다 더 두꺼운 경우에는 Z-피닝에 의한 접합 강도의 향상이 더욱 크게 나타날 것으로 기대되었다.

후 기

본 연구에서 시편 제작과 시험 수행은 서울과 학기기술대학교 기계공학과 정성균 교수님과 정중설 대학원생을 비롯한 많은 연구실원들께서 수고 하셨습니다. 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 Hinder 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. Patent*, No. 5,589,015, Foster-Miller Inc, Waltham, MA, 31 Dec. 1996

- 4) 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.

- 5) 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.

- 6) Huang H. and Waas A.M., "Compressive Response of Z-pinned Woven Glass Fiber Textile Composite Laminates: Experiments," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, 2009, pp. 2331-2337.

- 7) Sweeting R.D. and Thomson R.S., "The Effect of Thermal Mismatch on Z-pinned Laminated Composite Structures," *Composite Structures*, Vol. 66, 2004, pp. 189-195.