

Single Lap Riveted Joint의 베어링 거동 연구

Study on Bearing Response of Single Lap Riveted Joint

허광수*

Heo, Kwang-Su

윤성호**

Yoon, Sung-Ho

정종철***

Jeong, Jong-Cheol

이상진***

Lee, Sang-Jin

김정석****

Kim, Jung-Seok

ABSTRACT

In this study, bearing response in single lap riveted joint is investigated by means of single lap shear specimens with different types of adherend and fastener. Single lap shear specimen consists of adherend of SUS403 and carbon fabric/epoxy composite. Rivet of Avdel 2691 with 9.6mm diameter is used. Two types of fastener in single lap riveted joint are considered. One is a single lap shear specimen with single fastener, and the other is a single lap shear specimen with double fasteners. Especially, in case of single lap shear specimen with single fastener, the width of the specimen is varied as 2D, 3D, 4D, 6D at a fixed edge distance of 3D. Also the edge distance of the specimen is varied as 1.0D, 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D at a fixed width of 4D. In case of single lap shear specimen with double fasteners, two types of specimen are considered. One is a specimen with the width of 6D and edge distance of 3D. The other is a specimen with the width of 4D and edge distance of 2D. Here D designates the hole diameter for riveted joint.

1. 서 론

최근 기존선로를 이용한 고속철도차량 개발이 진행됨과 동시에 차체가 경량화면서 기계적 특성이 우수한 재료가 요구되었다. 이러한 텔팅차량 시스템에서 비강도와 비강성이 높고, 내부식성과 내피로특성이 우수한 복합재료의 사용은 필수적인 요소가 되었다[1,2]. 텔팅차량에 사용되는 복합재는 탄소섬유/에폭시가 사용되며, 특히 8매주자직으로 직조된 탄소섬유직물을 사용하여 고속철도차량의 공기저항 감쇄효과를 위해 차체의 곡선부 성형에 유리한 이점을 지니도록 하였다. 이와같이 복합재로 제작된 차체는 언더프레임인 SUS304와 접합체결이 되어야 한다. 일반적으로 두 재료의 접합체결방법으로 접착체결과 기계적 체결이 있으며, 실제 텔팅차량에는 접착체결과 기계적 체결이 동시에 적용된다[3,4].

본 연구에서는 텔팅차량의 접합부를 모사하기 위해 Single lap riveted joint를 제작하고 탄소섬유/에폭시 복합재와 SUS304 접합부의 기계적체결시 베어링 거동을 조사하였다. 특히 이중재 리벳 체결부의 베어링 거동을 조사하기 위해 한 개의 체결부를 가진 single lap 전단시편의 경우 edge distance e를 3D로 고정한 상태에서 pitch distance w를 2D, 3D, 4D, 6D로 변화시켰으며 pitch distance w를 4D로 고정한 상태에서 edge distance e를 1.0D, 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D로 변화시켰다.

* 금오공과대학교 기계공학부 대학원생, 정회원

** 금오공과대학교 기계공학부 교수, 정회원

*** 철도기술연구원 선임연구원, 정회원

**** (주) 한국화이바 철도차량사업부, 정회원

2. 시편제작 및 실험방법

2.1 시편제작

틸팅차량용 차체와 언더프레임간의 체결부 특성 평가를 위해 사용된 복합 소재는 (주)한국화이바의 탄소섬유직물/에폭시 프리프레그 (CP1263/Epoxy)를 이용하여 제작하였다. 체결부 특성을 평가하기 위해 탄소섬유직물은 T700-12K의 원사로 직조된 8매 주자직으로 다른 직조형태에 비해 매우 유연하고 곡선부 성형이 우수하다. 경사와 위사의 밀도는 각각 11.5count/in, 단위 중량은 790g/m²이며, 프리프레그는 보강섬유를 수지에 함침 시킨 뒤 용매를 증발시킨 용액함침법을 적용하였으며, R/C(Resin Content)가 40%, V/C(Volatile Content)가 최대 2.5%이다. 또한 틸팅차량의 언더프레임으로 사용되는 SUS 재료는 고용학 열처리 된 오스테나이트계 SUS304로 내력이 205N/mm², 인장강도가 520N/mm², 연신율이 40%이며, 두 부재를 접합하기 위해 Avdel® 2691의 직경이 9.6mm, 전단강도가 31.6kN, 인장강도가 37.8kN인 리벳을 적용하였다.

2.2 실험방법

Single lab riveted joint 특성 평가를 위해 표준화된 시험규격인 ASTM D5961/D5961M[5]에 의하여 single-shear, single-fastener를 이용하였다. 본 연구에서는 각각의 시편에 대하여 edge distance와 pitch distance의 변화를 이용하여 베어링 특성을 평가하였다. Fig. 1에는 본 연구에서 적용된 시편의 형상이 나타나 있으며 Table 1에는 각각의 경우에 대해 edge distance와 pitch distance의 따라 제작된 8가지 시험조건이 나타나있다. 모든 조건에 대해 각각 8개의 시편을 적용하여 베어링 특성을 평가하였다. 여기서 e는 edge distance이고, w는 pitch distance이며, D는 원공직경, d는 fastener 직경이다.

3. Single Lap Riveted Joint 베어링 거동 평가

Fig. 2에는 Single lap riveted joint의 특성을 평가하기 위한 시험장치가 나타나 있다. 이때 하중시험기는 Zwick/Z100(최대용량 : 10ton)을 사용하였으며 하중은 2mm/min의 변위제어상태로 가하였다. 작용하중에 대한 시편의 변형은 Zwick extensometer를 리벳 체결된 부위를 기준으로 상부와 하단부에 장착하여 측정한 다음 후처리하였다. 또한 실체현미경을 이용하여 베어링 과손 형상을 관찰하였다.

베어링 강성 E^{br} 는 응력-변형률 선도에서의 초기의 변형률 조정구간을 지나 선형성을 나타내는 구간을 이용하여 식 (1)에 의해 평가하였으며, 이때 초기의 변형률 조정구간은 리벳의 지름과 원공 지름간의 차이로 발생하는 체결부의 마찰, 체결부 이동현상으로 나타난다. 베어링 강도 F^{bru} 는 식 (2)에 의해 평가하였으며 베어링 변형률 ϵ_i^{br} 은 식 (3)에 의해 평가하였다.

$$E^{br} = \frac{\Delta \sigma^{br}}{\Delta \epsilon^{br}} \quad (1)$$

$$F^{bru} = \frac{P_{max}}{k \times D \times h} \quad (2)$$

$$\epsilon_i^{br} = \frac{(\delta_{1,i} + \delta_{2,i})/2}{K \times D} \quad (3)$$

여기에서 $\Delta\sigma^{tr}$ 는 베어링 응력 충분, $\Delta\varepsilon^{tr}$ 은 하중 방향의 변형률 충분, P_{max}^* 는 파단이 발생하기 전의 하중, k 는 원공에 대한 하중 상수로 single-fastener 또는 Pin 실험인 경우 1을 적용하며, double-fastener 시험인 경우 2를 적용한다. D 는 홀의 지름, n 는 시편의 둑께, δ_1, δ_2 는 Zwick extensometer 변위의 i번째 데이터, K 는 상수값으로 double shear 시험인 경우 1을 적용하며, single shear 시험인 경우 2를 적용한다.

4. 결과 및 분석

Single lap riveted joint의 베어링 거동평가에서 베어링 강성은 초기 변형률 조정구간으로 인해 강성값을 정의하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 베어링 강도를 정의하는데 있어서 시편이 원공 주위에서 파단이 발생하는 시점과 작용하중이 최대가 되는 시점 즉 시편이 파단되는 시점 중 어느 시점을 정의하느냐는 어려움이 있다. 이때 응력-변형률 선도에서 초기 변형률 조정구간을 지나 선형성을 나타내는 구간의 기울기로 베어링 강성을 평가하며 응력-변형률 선도에서 변형률 측을 따라 베어링 강성을 나타내는 기울기의 2% offset 선도와 응력-변형률 선도와의 교차점을 offset 강도, 시편이 파단될 때의 응력을 파단강도라 정의하고 베어링 특성을 평가하였다. Fig. 3과 Fig. 6에는 베어링 특성을 평가하기 위한 이종재료 리벳 체결부에서의 응력-변형률 선도와 실험 전 후의 시편의 형상이 나타나 있다. 여기에서 보면 베어링 변형률이 약 2%까지의 응력-변형률 선도는 초기 변형률 조정구간이며 그 이후 응력-변형률 선도가 선형성이 나타나는 것을 알 수 있다. 선형성 구간이 끝나면서 응력에 대한 변형률은 응력에 대해 점차 비선형으로 나타나다가 최대하중에 도달하면 하중이 급격히 감소한다. 이와 같이 응력에 대한 변위의 비선형성은 원공 주위에서 파단이 일어나기 시작하기 때문에 비선형성을 나타내다 최대하중에서 시편이 파단되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에는 edge distance와 pitch distance의 변화에 따른 offset 강도, 베어링 강도가 나타나 있다. edge distance 변화의 경우, pitch distance는 4D로 고정이 되어 있고 edge distance는 1D, 1.5D, 2D, 2.5D, 3D까지 나타나 있다. 또한 pitch distance 변화의 경우, edge distance는 3D로 고정이 되어 있고 pitch distance는 2D, 3D, 4D, 6D의 변화로 실험을 하였다. 여기에서 보면 pitch distance가 고정이 되어 있는 경우 edge distance가 커질수록 즉 시편의 끝단에서 원공 중심까지 거리가 멀어질수록 베어링 강도가 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 edge distance가 고정이 되어 있는 경우 width가 커질수록 즉 시편의 폭이 커질수록 베어링 강도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 베어링 강성은 edge distance 변화에 따라 거의 차이가 없으나, pitch distance 가 증가함에 따라 점차 높아짐을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에는 edge distance와 pitch distance의 변화에 따른 파손 모드가 나타나 있으며 Table 1에 파손 모드 결과를 정리하였다.

5. 결론

베어링 특성 평가 중 파손 모드 또한 중요한 요소 중의 하나이다. 베어링 파손 모드에는 시편의 폭 방향으로 파손이 되는 Net tension mode, 원공이 밀려 찌그려 지는 형상을 타나내는 Bearing mode, 원공이 밀려 전단으로 파손 되는 Shearout mode, Net tension mode와 Shearout mode가 함께 나타나는 Cleavage mode 등이 있다. Table 1에서 보면 시편의 폭이 줄어들수록 Net tension mode가 발생을 하며 시편의 끝에서 원공 중심까지의 거리가 줄어들수록 Shearout mode가 발생하는 것을 알 수 있다. 베어링 특성 평가에서 Bearing mode나 초기에 Bearing mode에서 마지막에 Shearout mode가 가장 바람직한 파손 양상으로 판단하였을 때 시편의 끝단에서 원공 중심까지의 거리는 최소 30mm 이상이 되어야 안전할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업에 의해 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 신광복, 유원희, 문형석(2002), "철도차량 시스템에서의 복합재료 응용," 한국복합재료학회지, 제15권, 제5호, pp. 66-71.
2. 신광복, 구동희, 한성호(2004), "200km/h급의 한국형 고속털링열차(TTX) 개발사업 소개," 한국복합재료학회지, 제17권, 제3호, pp.62-65.
3. 전영준, 최진호, 권진희, "파괴면적지수법을 이용한 복합재료 기계적 결부의 강도평가에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제16권, 제5호, pp. 1-6(2003).
4. 윤성호, 이은동, 김용구, 남정표, "철도차량의 FRP 전두부와 알루미늄 차체와의 접합방안 연구," 한국철도기술연구원, 연구보고서, 2003.
5. ASTM D5961/D5961M-01e1, "Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates". Annual Book of ASTM Standards, 15.03, American Society for Testing and Materials.
6. H. Huang and C. Yang, "Elastic-Plastic Model of Adhesive-Bonded Composite Joints," ICCM 18th Proceeding, International Conference on Composite Materials, 2001.
7. M.A. McCarthy, V.P. Lawlor, W.F. Stanley, and C.T. McCarthy, "Bolt-Hole Clearance Effects and Strength Criteria in Single-Bolt, Single-Lap, Composite Bolted Joints, Composites Science and Technology, Vol. 62, No. 10/11, pp. 1415-1431(2002).
8. G. Kelly and S. Hallstrom, "Bearing Strength of Carbon Fibre/Epoxy Laminates: Effects of Bolt-Hole Clearance," Composites Part B: Engineering, Vol. 35, Issue 4, pp. 331-343(2004).
9. L. Tong, "Bearing Failure of Composite Bolted Joints with Non-Uniform Bolt-to-Washer Clearance," Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing, Vol. 31, No. 6, pp. 609-615(2000).
10. P.P. Camanho and F.L. Matthews, "Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP: a Review," Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing, Vol. 28, No. 6, pp. 529-547(1997).

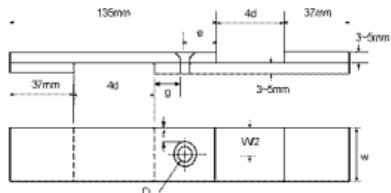


Fig. 1 Configuration of single-shear, single-fastener test specimen

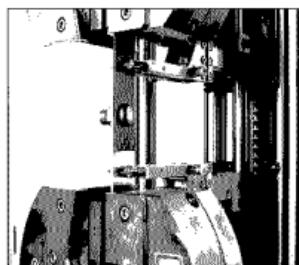


Fig. 2 Test set-up for bearing response test

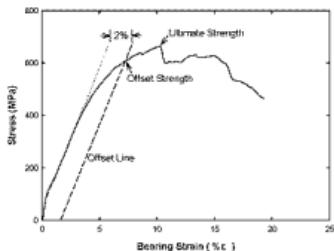


Fig. 3 Bearing stress-bearing strain curve for bearing response test

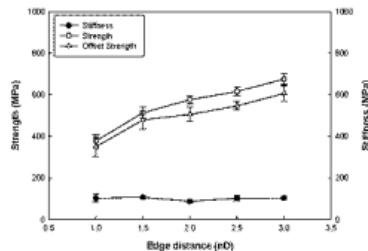


Fig. 4 Bearing strength and stiffness for various edge distance

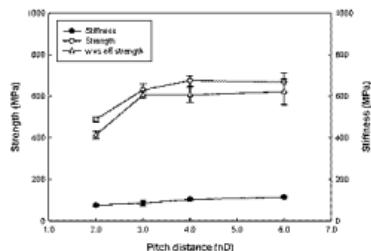


Fig. 5 Bearing strength and stiffness for various pitch distance

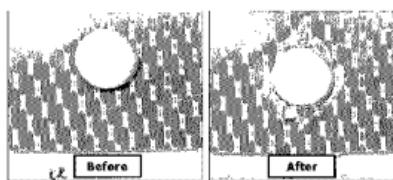


Fig. 6 Photographs of before and after bearing response test

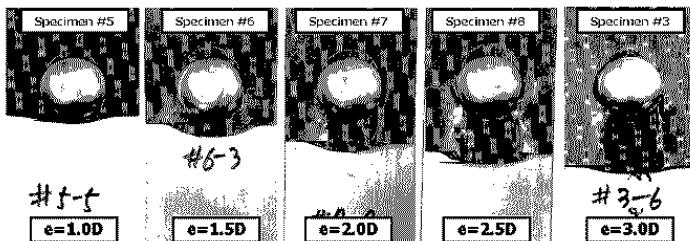


Fig. 7 Failure mode for various edge distance

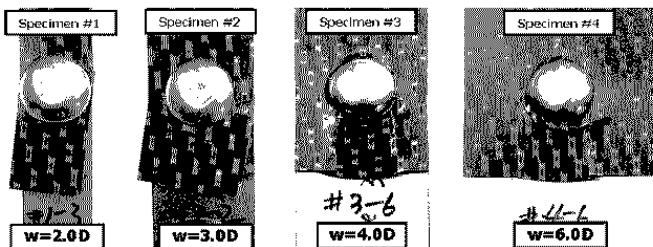


Fig. 8 Failure mode for various pitch distance

Table 1. Failure mode for variable types of specimens

Type	width (w)	edge distance (e)	Failure mode
Single-shear single-fastener	4D	3.0D	Bearing → Shearout
		2.5D	
		2.0D	
		1.5D	Shearout
		1.0D	
	6.0D		Bearing → Shearout
	3.0D		Bearing → Net tension
	2.0D		Net tension