

접착제 접합 이음부 접합강도 평가에 대한 실험적 연구

강기엽* · 이재명*[†]

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

Experimental Study on Evaluation of Bonding Strength of Adhesively Bonded Joints by Adhesive

Ki-Yeob Kang* and Jae-Myung Lee*[†]

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

[†]Corresponding author : jaemlee@pusan.ac.kr

(Received October 25, 2012 ; Revised November 30, 2012 ; Accepted December 31, 2012)

Abstract

In this study, the bonding strengths of adhesively bonded joints are experimentally investigated. A series of lap-shear tests are conducted using single lap type adhesive joints. In order to analyse the joint fabrication factors that affected the bonding strength, the parametric tests are conducted with various thickness of adhesive, surface roughness and fillet of adhesive. In addition, for the comparative study with the welded joint, lap-shear tests using specimens with 2 welded sides and 4 welded sides are also carried out. The quantitative results of the strength analysis are summarized, and some proposals are made on setting up testing standards for adhesively bonded joints.

Key Words : Lap shear joint, Adhesive thickness, Surface roughness of adherends, Tensile-shear strength

1. 서 론

산업용 구조물의 설계·제작에는 부품 간의 결합이 필수적으로 요구된다. 이러한 결합에는 수많은 종류의 재료 및 구조단위 결합이 존재하며 이들이 합쳐져서 특정 목적을 달성하기 위한 구조물이 완성된다. 최근 산업의 발달로 인하여 구조물의 규모는 점점 커지고 있으며, 그로 인해 구조물의 중량 또한 점점 증가하고 있다.

하지만 접합으로 인해 발생하는 중량 증가 또는 비정상적 이음부는, 경제적 손실만이 아니라 피로파괴 등을 포함하는 각종 사고 사례들의 직·간접적인 원인이 될 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때, 구조물의 중량을 줄이고 구조 안전성을 보장하기 위해서는 부품 및 하부구조물 간에 최적의 결합이 수행되어야 한다.

일반적으로 금속계 재료의 접합에 가장 손쉽게 사용되는 방법으로 용접이나 볼트이음 등을 들 수 있다. 용접의 경우는 수밀이나 기밀이 요구되는 부분의 접합에

매우 효율적인 기법이며, 최근에는 이종재료 간의 접합까지 가능한 수준에 이르고 있다. 하지만 최적의 용접량 산정 등은, 접합부위의 기하학적 형태 또는 피접합 구조의 재질 특성에 따라 일괄적으로 정의하기가 어렵다. 이러한 이유로, 가끔 불필요한 중량 증가의 원인이 되기도 하며, 경우에 따라서는 최적의 용접구조가 형성되지 못하는 이유로 구조건전성에 악영향을 미치는 응력집중현상 발생 원인이 되기도 한다. 최근, 구조접합 기법으로서의 용접이 가지는 장점에도 불구하고, 구조경량화에 대한 중요성이 부각됨에 따라 접착제를 이용한 구조접합 방법이 적극 검토되고 있다¹⁾. 예를 들어, 용접을 통한 접합이 가장 많이 적용되는 대표적 강구조 산업인 조선산업에서는, 요트 또는 보트용 선체 제작에서 접착제를 사용하여 수밀과 접합을 이루고 나아가 선박의 부유성능을 높이면서 중량은 경량화 시키려는 시도가 이루어지고 있다²⁾.

하지만, 접착제를 이용한 이음구조 제작은 강도적인 면에서 강구조에 비하여 취약성을 많이 가지므로 실구

조물 적용 시 많은 제약 조건이 따를 수 밖에 없다.

따라서, 구조경량화를 목적으로 하는 접착제를 이용한 결합구조를 산업구조물에 적극적으로 적용하기 위해서는, 강도 특성에 대한 기본적인 연구가 필수적이다. 이러한 노력의 일환으로 접착제를 이용한 접합구조의 강도에 미치는 요인들에 대한 연구가 진행된 바 있다³⁻⁵⁾. 이 연구들은 접착제 접합부의 강도 성능을 보완하기 위한 아이디어 및 강도 특성 분석에 대한 정량적인 결과의 제시라는 선구적인 내용이지만, 실제 구조 단위의 적합성 여부에 관한 검토는 이루어지지 않은 단점도 동시에 보유하고 있다.

본 연구에서는, 접착제 구조이음부의 강도평가 및 분석을 위하여 Lap-shear test을 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 접착제를 이용한 구조이음부에 대한 검토를 수행 할 경우, 해당 이음구조에 대한 가장 기본적인 형태, 즉 용접이음과 비교를 통한 분석이 이루어져야만 하므로, 용접이음 시험편의 시험 결과와도 비교를 수행하였다.

2. 실험 재료

2.1 시험편

본 연구에서 사용한 구조이음용 접착제로는 3M사의 DP-460을 사용하였다. DP-460은 에폭시 계열의 접착제로서 다양한 산업현장에서 사용되고 있다⁶⁾. 시험편 (Fig. 1, 2 참조)은 ASTM, GTT 에 근거한 단일접침 형식이며 이는 제작과정이 비교적 단순하고 비용 또한 저렴하여 접착제 실험 시 자주 사용된다⁷⁻⁹⁾. 피접합재는 구조경량화 재료로 많이 사용되는 알루미늄 6061이다.

관련 선행연구에서 지적하고 있듯이^{10,11)} 접합강도에 가장 큰 영향을 미치는 영향인자로서 표면조도와 접착제 두께를 설정하여 시리즈 시험을 통한 분석을 수행하였다.

표면거칠기를 조절하기 위한 방법으로는 금속재료의 표면처리에 가장 많이 사용되는 슛 블라스팅방법을 이용하였다. 즉, 서로 다른 직경의 연마재를 사용하여 표

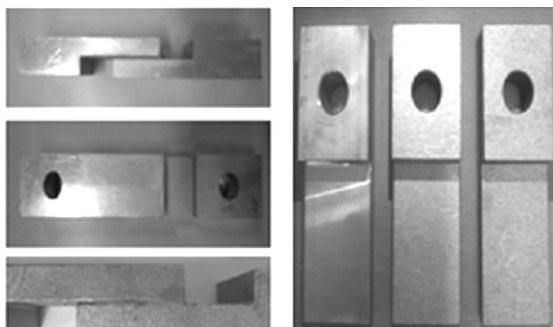


Fig. 1 Shape of the tensile-shear specimen

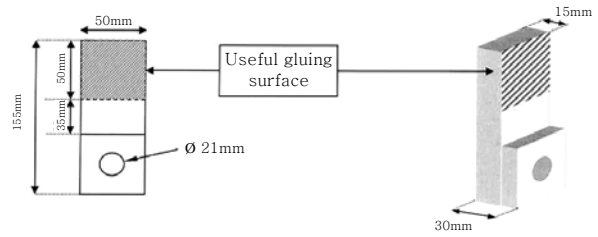


Fig. 2 GTT standard for the tensile-shear specimen

면거칠기를 조절하였고, 접합강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 무처리 시험편의 접합강도와도 비교하였다.

또 다른 영향인자로서, 접착제를 이용한 구조 이음부에 적용된 접착제 도포두께를 설정하였고, 시나리오에 따라 각각 0.5, 1.0, 2.0mm로 다르게 설정하였다. Arenas에 따르면 구조용 접착제를 이용한 구조이음부의 제작에서 0.5mm 도포가 가장 최적이라는 것이 보고된 바 있다¹²⁾. 본 연구에서 사용한 접착제 및 시험편은 Arenas의 연구에서 사용된 접착제와 비슷한 성분인 이유로 기본 두께를 0.5mm로 설정하였으며 접합강도에 미치는 영향의 분석을 위해 도포 두께를 변화시키는 시나리오를 설정하였다.

접착제를 이용하여 이음부를 접합하는 경우 일반적으로 접착제가 가장자리로 밀려나와 필릿을 형성하게 되는데, 이는 접착부 가장자리의 응력집중을 줄이고 접합강도향상에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다¹³⁾.

본 연구에서는 접착제 필릿(spew fillet)이 있는 경우와 접착제 필릿이 없을 경우로 나누어 전술한 각각의 시나리오를 적용하였다. 필릿의 크기는 5mm로 설정하였다. Table 1에 실험시나리오를 정리한다.

3. 실험 방법

3.1 접착제 접합 시험편 전단시험

접착제 도포두께, 접합표면 거칠기, 필릿효과를 변수로 둔 전단 시나리오시험을 수행하였다. 하중제어는 변위제어(5.0mm/min) 방식으로 수행하였다. 실험에서의 재현성 확보를 위하여 하나의 시나리오 당 5회씩 반복실험을 수행하였고 결과는 평균값으로 정리하였다. Fig. 3에 lap-shear 시험을 위한 전용 지그 및 시험편 설치 장면을 보인다.

3.2 용접 접합 시험편 전단시험

접착제 접합을 이용한 구조이음부의 성능을 비교분석하기 위한 기준을 설정하는 목적으로, 동일한 치수의 피접합재를 MIG용접으로 접합한 후 전단시험을 수행

Table 1 Scenarios for the tensile-shear test

Group	Roughness	Fillet	Layer thickness	Case No.
A	0	With Fillet	0.5 mm	A-1
			1 mm	A-2
			2 mm	A-3
B	0.4		0.5 mm	B-1
			1 mm	B-2
			2 mm	B-3
C	0.8		0.5 mm	C-1
			1 mm	C-2
			2 mm	C-3
D	0	Without Fillet	0.5 mm	D-1
			1 mm	D-2
			2 mm	D-3
E	0.4		0.5 mm	E-1
			1 mm	E-2
			2 mm	E-3
F	0.8		0.5 mm	F-1
			1 mm	F-2
			2 mm	F-3

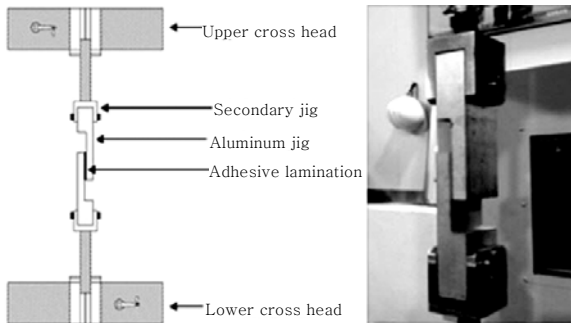


Fig. 3 Photograph of test specimen of adhesively bonded joints

하였다. 접착제 접합은 피접합재 표면에 접착제가 전체적으로 도포되므로 두께 외에는 달라지는 변수가 없다. 하지만 용접에 의한 접합에서는 피접합재의 구조적 특성 상 표면 상의 맞대기용접이 수행되므로, 용접횟수의 영향이 존재하게 된다. 본 연구에서는 두 면, 네 면 두 가지 경우로 나누어 용접 접합 시험편을 제작하고 각각 전단시험을 수행하였다.

Fig. 4에 용접접합 시험편의 대표적 사진을 보인다. Table 2에 본 연구에서 접합 시 사용한 아르곤 용접의 조건을 정리하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 접착제 접합부 전단 시험

접착제 접합부에 대한 전단시험 결과를 하중-변위 관

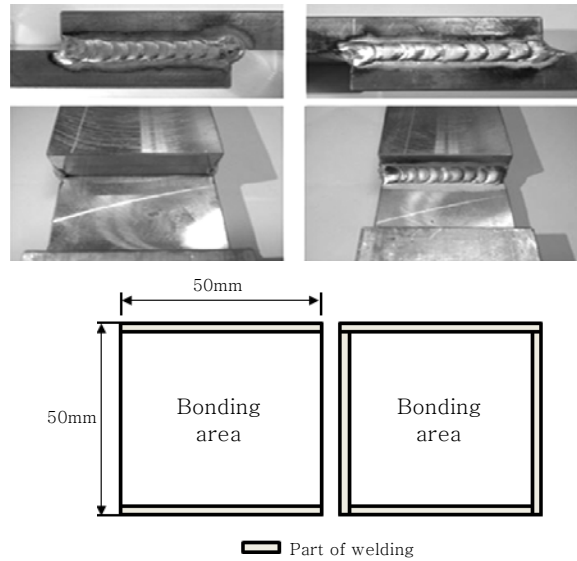


Fig. 4 Schematic of the two-sides and four-sides welding specimens

Table 2 Conditions for MIG welding

Test No.	Number of sides	Size of welding rod and material	Welding current (A)	Arc welding (V)
1	Two-sides	3.2Φ 5356	250	220
2	Four-sides			

계를 이용하여 Fig. 6에 나타내었다. 각 실험에서 획득한 파단하중과 파단변위의 평균값을 표3에 정리하였다. 실험오차는 ±10% 미만으로 발생하였으며 이는 시험편 제작 시 발생한 오차로 판단된다.

시험결과, 0.5mm의 접착제 두께와 0.4mm 직경의 연마재를 이용해 모재 표면 처리를 하고 접착제 필릿형상의 시험편이 가장 높은 평균 파단하중 및 파단 변위 값을 나타냈다.

4.1.1 접착제 층 두께에 따른 강도 평가

시험편의 접합강도와 접착제 층 두께의 상호관계를 분석한 결과, 접착제 도포두께가 두꺼워 질수록 최대 전단강도는 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 접착제 층의 두께가 두꺼울수록 두께방향으로 내부 기공이나 미세결함이 존재할 가능성이 높고 결국 이러한 것들이 접착력에 영향을 미칠 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 접착제 구조이음부의 접착력에 미치는 접착제 내부 기공들의 영향이 유사한 내용으로 보고된 바 있다¹⁴⁾. 본 연구에서 진행된 실험에서는 접착제 층의 두께가 0.5mm일 때, 전단강도의 값이 가장 컸으며 1mm, 2mm로 두께가 증가함에 따라 전단강도는 각각 7~8%정도 수준으로 감소하였다.

4.1.2 모재 표면 거칠기에 따른 강도 평가

피접합재 표면의 거칠기에 따른 접합강도의 차이에 대해 고찰한다. 연마재를 이용하여 표면처리를 한 시험편에서 무처리 시험편보다 접합강도가 높게 얻어졌다. 즉, 표면 처리를 통하여 접합강도가 향상될 수 있음을 확인하였다.

또한, 연마재 직경이 작을수록, 즉 표면이 매끄러울수록 접합강도가 좋아짐을 확인하였다. 본 연구에서는 연마재 사용의 한계가 있어 다양한 시나리오에 대한 분석이 불가능하였지만 표면거칠기 수준과 접합강도의 연관관계가 존재하며 이에 대한 정량적인 제시가 필요할 것으로 판단된다.

4.1.3 접착제 필릿 효과에 따른 강도 평가

필릿이란, 면과 면 사이에 접착제가 도포되고 두 면이 서로 겹치게 되면서 접착면 외부로 접착제가 자연스럽게 흘러나와 굳어진 부위로 정의한다. 접착제를 이용한 구조이음부 제작에 있어 필릿이 존재하는 경우가 필릿을 제거한 경우에 비하여 파단하중이 크게 얻어졌다. 이는 접착제 필릿이 시험편의 가장자리에서 응력집중을 완화시키며, 이로 인해 접착강도가 증가하기 때문이다¹³⁾. Fig. 5에는 각 표면 거칠기에서 필릿이 있을 때와 없을 때의 접합강도 차이를 종합적으로 비교하여 나타낸 것이다. 필릿이 있는 경우(A, B, C 그룹)가 필릿이 없는 경우에 비하여 접합강도가 최대 약 40%까지 높게 얻어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 접착제를 이용하여 구조이음부를 제작할 경우에 미관상 문제가 되지 않는다면, 자연스럽게 형성되는 필릿부위를 제거하지 않는 것이 구조 강도 측면에서는 좋은 효과를 줄 수 있을 것이라 사료된다.

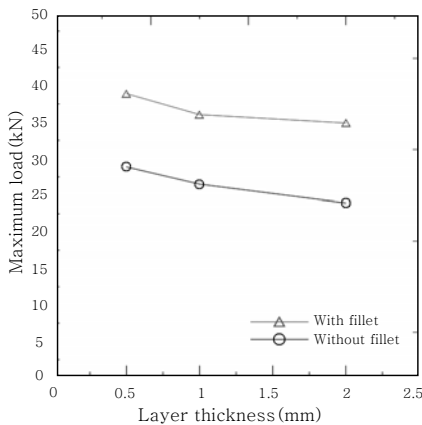


Fig. 5 Difference in maximum load according to presence of fillet

Table 3 Test result from adhesive lap-shear tests

Group	Case No.	Average failure load (kN)	Average failure displacement (mm)
A	A-1	34.45	5.3
	A-2	31.93	4.6
	A-3	28.78	4.5
B	B-1	38.9	5.5
	B-2	36.03	4.8
	B-3	34.38	4.3
C	C-1	36.50	5.2
	C-2	34.70	4.9
	C-3	31.25	4.3
D	D-1	25.88	4.6
	D-2	20.05	3.8
	D-3	18.00	3.9
E	E-1	28.85	4.5
	E-2	26.5	4.0
	E-3	23.95	3.7
F	F-1	27.25	4.4
	F-2	26.08	4.3
	F-3	20.78	3.9

4.2 용접 접합부 접합강도 평가

Fig. 7은 용접으로 접합한 시험편을 이용한 시험결과를, 용접면 수에 따른 하중-변위 관계로 나타낸다. 쉽게 예상할 수 있듯이 4면 용접의 경우가 2면 용접의 경우보다 두배 이상의 강도를 보유하고 있음을 확인할 수 있다. 표 4에는 접착제 접합 시험편 시험결과 중에서 가장 높은 강도를 획득한 B-1시험편과 용접으로 접합한 시험편의 평균 파단하중을 비교 정리하였다. 실험 오차는 각각 ±5% 이내 였으며 상대적으로 정확한 실험이 수행되었다. 접착제 접합의 경우 2면 용접에 비해서는 전단강도가 더 높게 얻어졌지만, 4면 용접과 비교하였을 경우에는 약 50% 이상 낮은 값을 얻었다. 하지만, 변형 측면에서는 접착제로 접합한 시험편이 용접으로 접합한 모든 경우보다 파단 시점까지 더 연성변형을 유지함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조이음부에 사용하는 접착제의 기본 성능을 검증하기 위한 방법을 검토하였다. 접착제 도포시의 특성 (표면 거칠기, 도포 두께, 필릿) 변화에 따른 접합강도를 시리즈 Lap-shear 시험을 이용하여 분석하였다. 기본적인 강도에 대한 비교분석을 목적으로 동일구조에 대한 용접접합시의 강도와 비교하였다. 연구결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

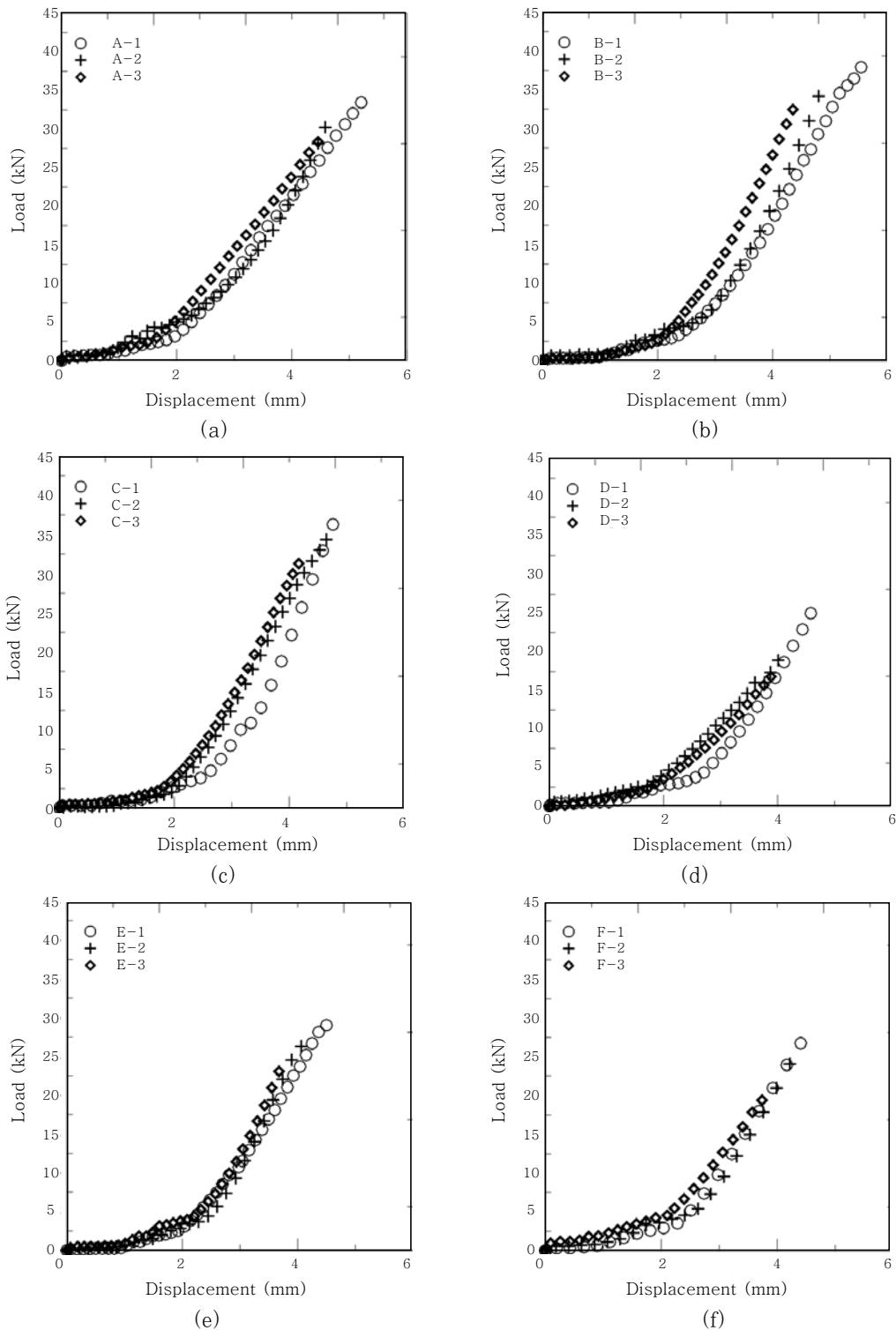


Fig. 6 Relationship between load and displacement, with fillet (a), (b), (c), without fillet (d), (e), (f)

1) 접착제 층의 두께가 증가할수록 접합강도 값은 감소하는 결과를 나타냈다. 이는 접착제 도포층의 두께가 두꺼울수록 내부결함을 많이 포함할 가능성이 있어 잠재적 강도 감소 요인으로 작용하는 것으로 사료되나, 두께 증가에 따른 접합부의 파단 위치의 변화와 굽힘

하중의 영향에 대한 분석 또한 필요하다고 판단된다.

2) 표면처리를 통해 모재 표면을 거칠게 하는 것이 아무런 처리를 하지 않는 것보다는 접합강도가 향상되었다. 이를 통해 표면처리를 하는 것이 접합강도를 향상시킨다고 단정 할 순 없지만 표면 거칠기와 최대 접

Table 4 Comparison for welding tensile-shear tests and adhesive tensile-shear tests

Joint method		Average failure load (kN)	Average failure displacement (mm)
Welding	Two-sides joint	27.85	3.25
	Four-sides joint	79.6	4.2
Adhesive	B-1	38.9	5.5

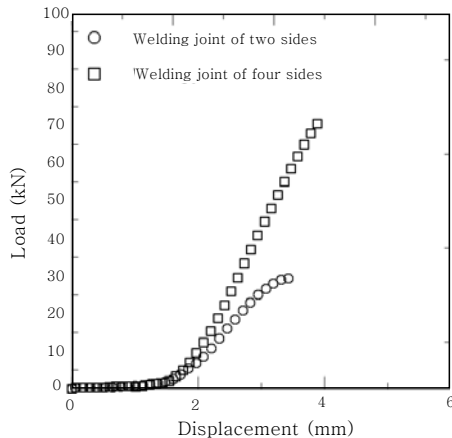


Fig. 7 Relationship between load and displacement of two sides welding joint and four sides welding joint

합강도의 관계에 대한 추가적인 연구를 통하여 최적 표면 거칠기에 대한 분석은 반드시 필요할 것으로 판단된다.

3) 구조형식에 따라서는 용접의 기법이나 용접이음부 형태도 다르게 적용되겠지만, 가장 기본적인 용접이음부와 비교해볼 때, 접착제 접합 구조이음부도 상당한 수준의 강도를 보유할 수 있음을 확인하였다. 따라서 강도에 큰 비중이 취해지지 않는 구조이음부 설계의 경우라면, 경제적으로 더 많은 장점을 취할수 있는 구조 경량화용 접착제 접합기법의 적극적인 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4) 본 연구에서 수행한 다양한 시나리오 시험평가 기법을 이용한다면, 접착제를 이용한 구조이음 제작에 있어 성능검증을 위한 기법 제시 및 정량적인 성능분석이 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 표면거칠기 분석을 위한 표준시험법 제시, 표준 접착제 도포두께 결정법 등 다양한 종류의 체계적 연구가 필수적으로 요구된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. Regal plastic supply company, a division of regal supply company : plastics reference handbook, 2000
2. SIKA Industry. Prontuario de productos. Madrid: 1999
3. A. M. Pereira, J. M. Ferreira, F. V. Antunes and P. J. Bartolo : Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminum adhesive single-lap joints, *Journal of Materials Processing Technology*, **210** (2010), 610-617
4. You M, Zheng Y, Zheng XL, et al., Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joint. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **23** (2003), 365-9
5. Lucas. F. M. da silva, R. J. C. Carbas, G. W. Critchlow, M. A. V. Figueiredo and K. Brown, Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **29** (2009), 621-632
6. Adams RD, Comyn J, Wake WC : *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd edition. Cornwall: Springer: 1997
7. ASTM. Standard Test Method for Lap Shear Strength of Sealants, ASTM C961-06:2011
8. Kahraman R, Sunar M, Yilbas B. Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive. *Journal of Materials Processing Technology*, **205** (2008), 183-9
9. Gaztransport & Technigaz S.A.s 1, Route de Versailles 78470 Saint Remy-les-Chevreuse, Procedure for gluing of supports for shearing samples, 2004
10. Kunio Uehara, Mitsuru Sakurai : Bonding strength of adhesives and surface roughness of joined parts, *Journal of Materials Processing Technology*, **127** (2002), 178-181
11. Jhongsen Li, Jae-Kyoo Lim & Yon-Jin Kim, Stress Distribution and Strength Evaluation of Adhesive Bonded Single-lap Joints, *Journal of KWJS*, **19-3** (2001), 91-96 (in Korean)
12. Arenas, Jose M. Narbon, Julian J. & Alia. C. Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on weibull distribution. *International journal of adhesion & adhesives*, **30** (2010), 160-165
13. Ho-Chel Yoon, Jun-Yong Choi, Yon-Jig Kim & Jae-Kyoo Lim : Effect of Spew Fillet on Failure Strength Properties of Natural Fiber Reinforced Composites Including Adhesive Bonede Joints, *Journal of KWJS*, **23-6** (2005), 67-71 (in Korean)
14. Petrie EM. *Handbook of adhesives and sealants*. 1st ed.. New York: McGraw-Hill: 2000