

〈논 문〉 SAE NO. 97370032

단면 겹치기 이음 시험에 의한 경량구조물용 접착 이음강도의 평가

Strength Evaluation of Adhesive Bonded Joint for Light Weight Structure by Single-Lap Joint Test

이 강 용*, 김 준 범*, 최 흥 섭**, 우 형 표***
K. Y. Lee, J. B. Kim, H. S. Choi, H. P. Woo

ABSTRACT

The bonding strength evaluation of light weight materials for electrical vehicle applications has been performed through single lap joint tests in which the design parameters such as fillet, joint style, adherend, bonding overlap length, bonding thickness, and environmental condition(soaking time in 25°C water) are considered. It is experimentally observed that lap shear strength of joint increases for higher fillet height, longer overlap length, and thinner bonding layer thickness. Al-Al adherend combination shows much higher lap shear strength than Al-FRP and FRP-FRP adherend combinations. Riveting at adhesive bonded joint of Al-Al adherend combination makes lap shear strength decrease. Effect of soaking time on lap shear strength is negligible.

주요기술용어 : Single-Lap Joint(단면 겹치기 이음), Shear Strength(전단강도), Fillet(필렛), Bonding(접착), Rivet(리벳)

1. 서 론

자동차 공업에 있어서 최근의 주된 현안은 차량의 경량화이다. 특히 전기 에너지를 동력으로 하는 전기 자동차는 과도한 축전지 중량으로 인하여 차체의 경량화가 필수적인 요소이다. 경량

화 기술은 일체화로 인한 부품 감소와 이미 설계된 제품에 대한 응력 평가를 기준으로 형상을 최적화시키는¹⁾ 소형 경량 설계화 기술과, 알루미늄 및 마그네슘, 플라스틱 및 복합 재료 등의 경량 재료를 대체 재료로 적용하는^{2,3)} 소재 기술로 구분된다. 본 연구는 후자에 해당한다. 선진국에서는 전기 자동차 개발과 실용화를 위하여 차체의 경량화 연구가 활발히 진행되고 있으며⁴⁾, 국내에서도 정부 관련 부서와 자동차 회사들이 유기적으로 협조하여 이에 대한 연구 개발에 체계

* 정회원, 연세대학교 기계공학과

** 한국항공기술연구원

*** 대우자동차

적이고 지속적인 투자를 하고 있다. 이들 경량 재료를 전기가동차에 적용하는데 있어서는 접합부의 설계 및 접합방법이 매우 중요한 연구 분야로 대두되고 있다. 왜냐하면 이들 재료로 이루어진 구조물의 효율성은 약간의 예외적인 경우를 제외하고는 구조 자체보다는 경량 재료간의 접합 즉 알루미늄과 알루미늄의 접합, 알루미늄과 복합재료의 접합, 복합재료와 복합재료의 접합등 접합 조건에 의해서 결정되기 때문이다^{5,6)}. 본 연구와 관련한 연구로는 Tsai와 Morton^{7,8)}의 연구가 있는데 실험과 수치해석을 통해 피착재와 필렛을 포함한 접착제의 변형을 자세히 측정하고 접착층 내부 전체에 걸친 변형률을 제시하였다. 또한 필렛을 포함하므로써 접착층 양끝의 응력 집중을 상당히 감소시킬 수 있다고 주장하였고 이러한 응력집중은 접착부의 비선형적인 변형형태에 기인한 것이라고 보고하였다. Mori와 Shiratori⁹⁾는 접착 이음의 구조 설계를 행하는데 있어 필요한 여러 요인들을 선정환위, 이들이 응력 분포에 미치는 영향을 FEM에 의해 알아보았다. 그러나 다양한 피 접착재와 설계변수에 대해 체계적인 실험을 보인 연구 결과는 조사된 바에 의하면 없는 것 같다. 따라서 본 논문에서는 경량소재 접합에 있어서 필수적인 요소인 접합의 설계근거 마련을 위한 기초 연구로서 단면 겹치기 이음(single-lap joint; 이하 'SLJ'라 칭함)시편과 리벳으로 보강된 SLJ시편을 대상으로 접착 이음의 강도에 대한 fillet, 피착재의 종류, 접착 길이, 접착 두께, 환경 변수의 영향을 평가하고자 한다. 본 연구의 후속 연구로써 피로강도 평가와 관련한 연구¹⁰⁾가 있다.

2. 시편 제작 및 실험 방법

겹치기 이음 시편과 리벳으로 보강된 겹치기 이음 시편을 대상으로 실험을 행하였다. 실험은 피착재의 종류에 따라 알루미늄+알루미늄 접착의 경우는 ASTM D 1002-72¹¹⁾에 준하여 시행하였고, 알루미늄+복합재, 복합재+복합재 접착의 경우는 ASTM D 3165-73¹²⁾에 준하여 시행하였다. 인장 시험기는 INSTRON Co.의 EUTM-

10 ton(model No. 1350)을 사용하였으며 실험은 상온에서 인장속도 1.3mm/min로 하였다. 피착재로 사용된 알루미늄은 Al 6061-T6이고, 복합재는 에폭시 수지를 유리섬유를 함침시켜 만든 120°C 경화용 DMS 2288(Type 3, class 4, Grade E)를 사용하였고, 접착재는 에폭시계열의 120°C 경화용 DMS 2169(Type 2)를 사용하였다. 사용된 피착재와 접착재에 대하여 Table 1에 나타내었다. 알루미늄 시편은 표면을 인산염(phosphoric acid)으로 처리한 후, 접착재와 함께 경화하여 제작하였다. 복합재의 적층 형식은 [0_n]이고, 복합재 판을 먼저 경화한 후, 접착재와 함께 다시 경화하는 방법으로 시편을 제작하였다. 이때 복합재 적층판은 접착대상에 peel ply 1장을 사용하여 경화 시킨 후 peel ply를 제거하고 MEK(Methyl Ethyl Ketone)으로 불순물을 제거한 상태에서 2차 접합하였다. 복합재 경화와 접착재 경화는 모두 120°C 경화 조건에서 행하여 졌다. 경화는 최소 22inch 수온압으로 진공백(vacuum bag)안의 공기를 뽑고, 45psi 압력하의 autoclave안에서 2.8°C/min의 온도변화율을 유지하며 120°C까지 온도를 높인다. 이 상태에서 120분간 유지시킨다. 이때 진공 백(vacuum bag)안의 압력은 0~5psi를 유지해야

Table 1 Material specifications of adherends and adhesive

Al 6061-T6	Young's modulus	73.1 GPa
	Poisson's ratio	0.33
DMS 2288	Material reinforcement	Woven glass cloth reinforced
	Nominal resin content	45% by weight
	Standard thickness per ply	0.1143 mm
	Tensile modulus	19.3 GPa(at 25°C)
	Tensile strength	303.4 MPa(at 25°C)
	Compressive strength	413.7 MPa(at 25°C)
	Poisson's ratio	0.25(at 25°C)
DMS 2169	Weight	0.060±0.005 lbs/ft ²
	Curing temperature	120°C
	Young's modulus	1.15 GPa(at 25°C)
	Poisson's ratio	0.37 (at 25°C)

한다. 시간이 경과한 후, 2.8°C/min의 온도변화율을 유지하며 60°C이하로 온도를 낮춘다. 리벳은 JISB 4627¹³⁾ 규격에 준한 1D B-40048리벳(직경 4mm)으로 알루미늄 합금 JIS A5154¹⁴⁾로 되어있다. 시편의 형상을 Fig.1에 나타내었다. 시편의 폭은 25.4mm이다. 시험결과의 신뢰성을 확보하기 위해 동일 실험을 세번 반복하였으며 그 평균값을 결과 데이터로 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시편의 파손양상

SLJ 시편은 하중을 받을 때 접착층 파손(adhesive failure)과 판 파손(sheet failure)의 두가지 파손 양상을 보였다. 리벳으로 보강된 SLJ 시편은 접착층 파손과 리벳 파손이 함께 일어나는 경우, 판 파손이 일어나는 경우, 접착층 파손이 일어나면서 리벳이 복합재 판에 주는 편 하중(pin loading)에 의하여 복합재 판이 전단 파손(shearout)을 일으키는 경우의 세가지 파손 양상을 보였다. Fig.2에 파손 양상에 대하여 나타내었다. 3.1절 접착이음의 강도평가에서 알 수 있듯이 판 파손은 접착 강도가 높을때 발생하였으며 접착 강도가 낮을 때는 접착층 파손이 발생하거나 접착층 파손과 동시에 리벳이 복합재판에 주는 편하중에 의한 복합재 판의 전단 파손이 함께 일어났다.

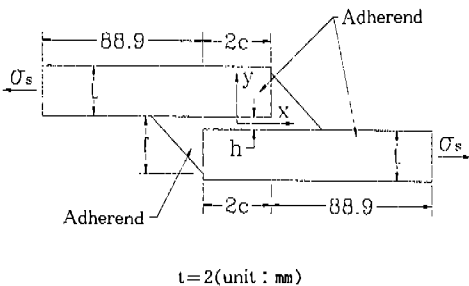


Fig.1 Configuration of adhesive bonded single-lap joint specimen

3.2 접착 이음의 강도 평가

알루미늄-알루미늄 시편(2c/t=6.35, h/t=0.0127)의 접착 강도에 대한 필렛(fillet)의 영향을 평가하기 위하여 필렛 비(fillet ratio) Fr(=f/(t+h))에 따른 전단 강도(lap shear strength)를 구하였다. 여기서 2c는 접착 길이, t는 피착재의 두께, h는 접착층의 두께이고 f는 필렛의 높이이다. 실험의 결과를 Fig.3에 나타내었다. 전단 강도 Lss는 파손이 일어날 때의 σ_s 로서 Fr이 증가함에 따라 증가하였는데 이는 필렛으로

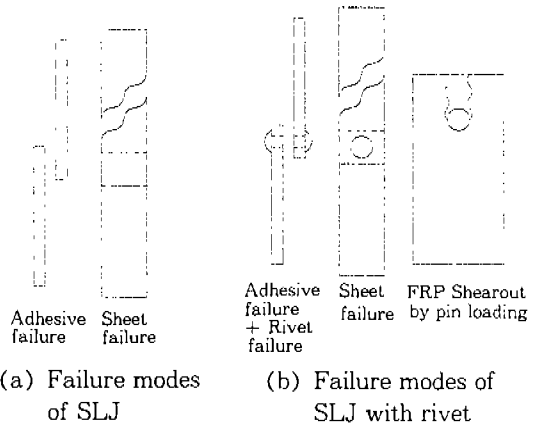


Fig.2 Failure modes single-lap joint

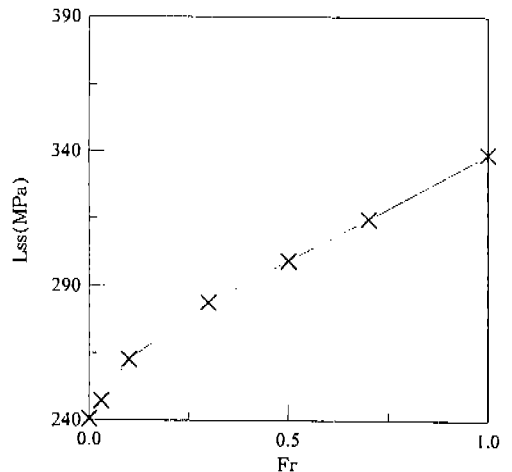


Fig.3 Effect of fillet ratio on the lap shear strength of Al-Al single-lap joint

하여금 필렛위치에서 응력 집중을 감소시킨 결과이다. 이때 파손은 접착층에서 일어남을 관찰할 수 있었다.

접착 강도에 대한 피착재의 종류, 접착 길이, 접착 두께의 영향을 평가하기 위하여, 알루미늄-알루미늄 시편, 알루미늄-복합재 시편, 복합재-복합재 시편에 대하여 접착 길이가 다른 시편 ($h/t=0.0127$)과 접착 두께가 다른 시편 ($2c/t=6.35$)을 대상으로 실험을 하여 전단 강도를 구하였다. 접착 길이에 따른 실험의 결과를 Fig.4에 나타내었고, 접착 두께에 따른 실험의 결과는 Fig.5에 나타내었다. Fig.4와 Fig.5에서 A-A(0)과 A-A(1)은 각각 $Fr=0$ 인 경우와 $Fr=1$ 인 경우의 알루미늄-알루미늄 시편을 나타내고, A-F(0)과 A-F(1)은 각각 $Fr=0$ 인 경우와 $Fr=1$ 인 경우의 알루미늄-복합재 시편을 나타내고, F-F(0)과 F-F(1)은 각각 $Fr=0$ 인 경우와 $Fr=1$ 인 경우의 복합재-복합재 시편을 나타낸다. Sf는 판 파손을 나타낸다. Fig.4와 Fig.5에서 보면 전반적으로 알루미늄-알루미늄 시편이 알루미늄-복합재 시편이나 복합재-복합재 시편보다 강도면에서 우수하고, $Fr=1$ 인 경우가 $Fr=0$ 인 경우보다 강도면에서 우수하며, 접착 길이가 길수록, 접착 두께가 얇을수록 접착 강도가

우수함을 알 수 있다. 접착 두께가 두꺼워지면 그만큼 접합부에 모멘트에 의한 응력 발생을 유발하기 때문에 접착 강도면에서 불리하다. 알루미늄-알루미늄 시편, 알루미늄-복합재 시편, 복합재-복합재 시편 모두 $Fr=1, 2c/t=12.7, h/t=0.0127$ 인 경우에 판 파손이 발생하였고, 나머지 경우에는 접착층 파손이 일어났다. 알루미늄-복합재 시편의 경우 복합재판에서 파손이 발생하였다.

$2c/t=6.35, h/t=0.0127$ 인 알루미늄-알루미늄 시편, 알루미늄-복합재 시편, 복합재-복합재 시편에 대하여 전단 강도에 대한 상온($25^{\circ}C$)의 물속에서 침수 시간(t_w)의 영향을 실험에 의한 방법으로 평가하여 실험의 결과를 Fig.6에 나타내었다. 전반적으로 전단 강도는 침수 시간에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 접착층 두께가 매우 얇기 때문이다.

리벳으로 보강된 알루미늄-알루미늄 시편, 알루미늄-복합재 시편, 복합재-복합재 시편에 대하여, 접착 길이가 다른 시편 ($h/t=0.0127$)과 접착 두께가 다른 시편 ($2c/t=6.35$)을 대상으로 실험을 하였다. 실험은 $Fr=0$ 인 경우와 $Fr=1$ 인 경우에 대하여 수행하였고, 리벳 보강이 없는 시편에 대한 실험 결과와 비교하였다. 알루미늄-

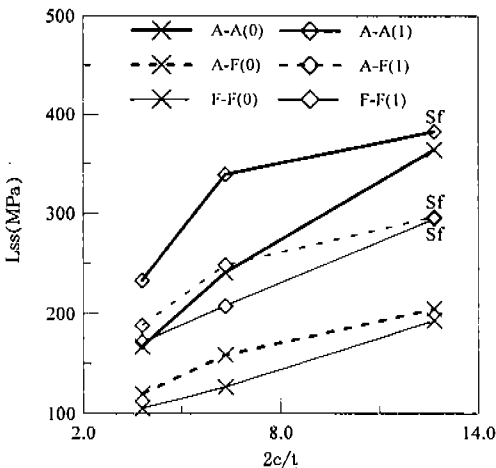


Fig.4 Effect of overlap length on lap shear strength according to type of adherend

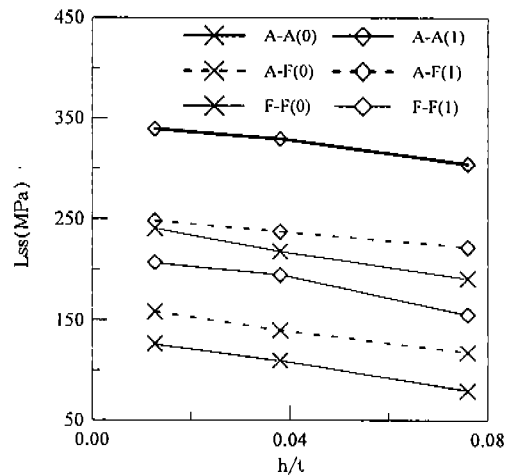


Fig.5 Effect of bonding thickness on lap shear strength according to type of adherend

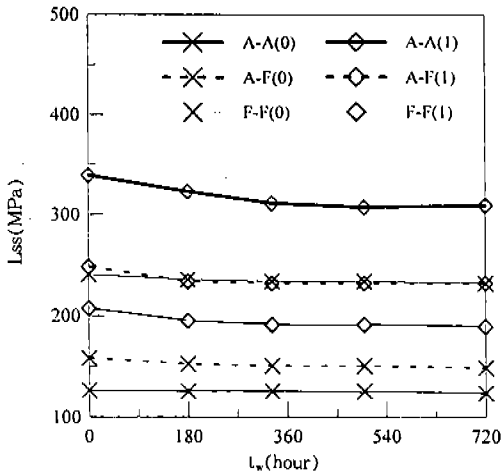


Fig.6 Effect of soaking time on lap shear strength according to type of adherend

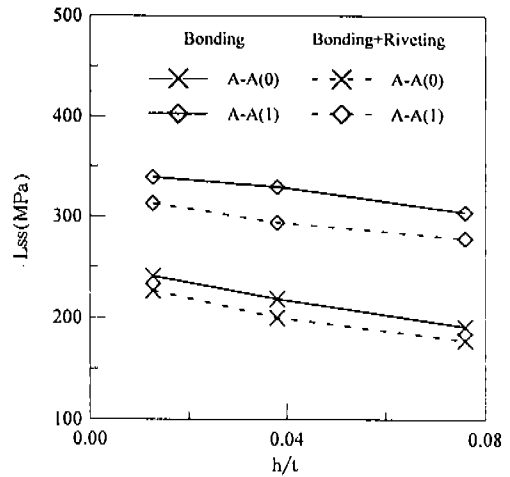


Fig.8 Effect of riveting on Al-Al single-lap joint in lap shear strength vs. bonding thickness

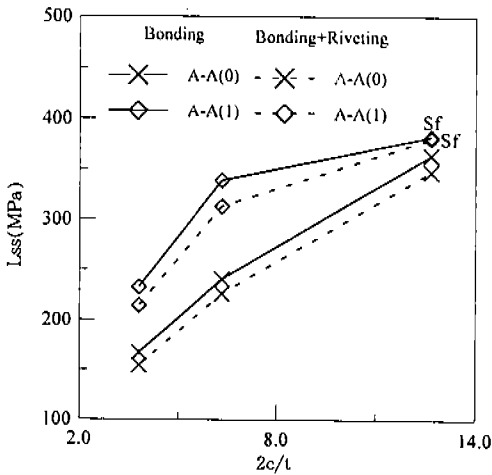


Fig.7 Effect of riveting on Al-Al single-lap joint in lap shear strength vs. overlap length

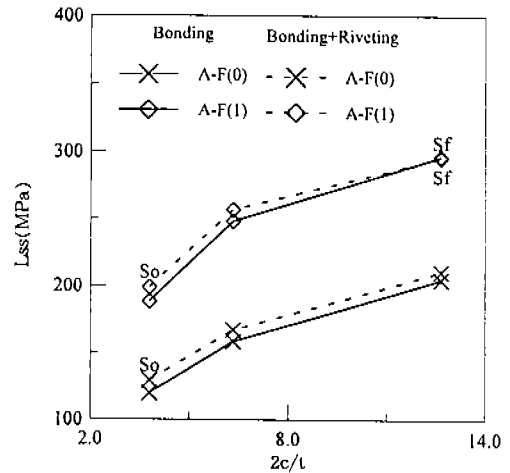


Fig.9 Effect of riveting on Al-FRP single-lap joint in lap shear strength vs. overlap length

알루미늄 시험편의 접착 길이에 따른 결과를 Fig.7에 나타내었고, 접착 두께에 따른 결과를 Fig.8에 나타내었다. 알루미늄-복합재 시험편의 접착 길이에 따른 결과를 Fig.9에 나타내었고, 접착 두께에 따른 결과를 Fig.10에 나타내었다. 복합재-복합재 시험편의 접착 길이에 따른 결과를 Fig.

11에 나타내었고, 접착 두께에 따른 결과를 Fig.12에 나타내었다. Sf는 판 파손을 나타내고, So는 접착층 파손과 리벳의 편하중에 의한 복합재 판의 전단 파손이 함께 일어남을 나타낸다. 알루미늄-알루미늄 시험편의 경우 Fig.7과 Fig.8을 보면 리벳으로 보강한 시험편이 전반적으로 전단 강

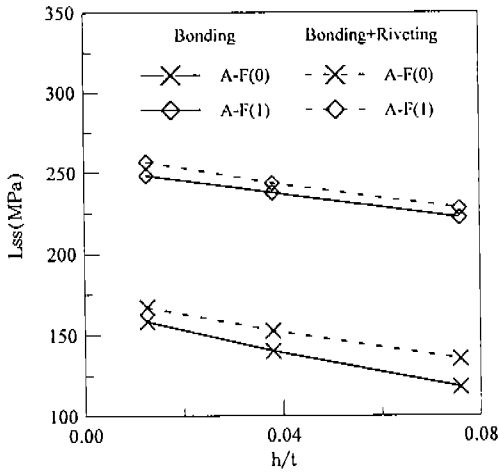


Fig.10 Effect of riveting on Al-FRP single-lap joint in lap shear strength vs. bonding thickness

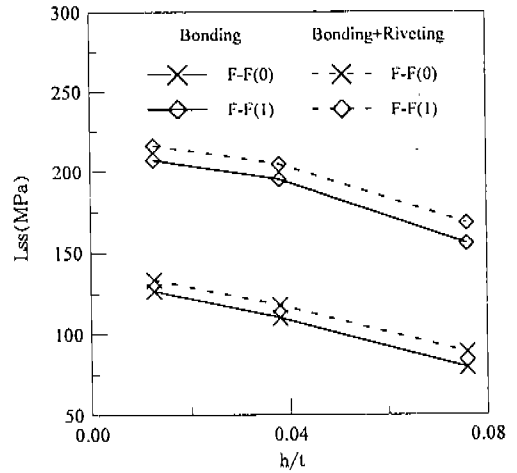


Fig.12 Effect of riveting on FRP-FR single-lap joint in lap shear strength vs. bonding thickness

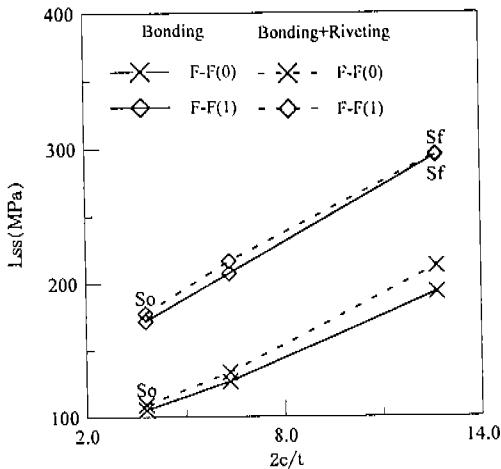


Fig.11 Effect of riveting on FRP-FRP single-lap joint in lap shear strength vs. overlap length

도가 더 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 접착만으로 충분한 접착 강도를 주는데 반하여 오히려 리벳 구멍을 내므로써 그만큼 접착면을 감소시키므로써 접착강도를 감소 시켰는데 사용한 리벳으로는 이를 충분히 보충하지 못하였기 때문이다. 만약 사용한 리벳보다 강도가 높은 리벳을

사용하였다면 리벳 보강폭이 높은 전단강도를 보였을 것이다. 전단 강도는 접착 길이가 증가함에 따라 증가하였고, 접착 두께가 증가함에 따라 감소하였다. $Fr=1, 2c/t=12.7, h/t=0.0127$ 인 시편의 경우는 판 파손이 일어났고, 다른 시편들의 경우는 접착층 파손과 리벳 파손이 함께 일어났다. 알루미늄-복합재 시편의 경우 Fig.9와 Fig.10을 보면 리벳으로 보강한 시편이 전반적으로 전단 강도가 더 우수하게 나타남을 알 수 있다. 전단 강도는 접착 길이가 증가함에 따라 증가하였고, 접착 두께가 증가함에 따라 감소하였다. $Fr=1, 2c/t=12.7, h/t=0.0127$ 인 시편의 경우는 복합재 판에서 파손이 일어났다. $2c/t=3.81, h/t=0.0127$ 인 리벳 보강 시편은 $Fr=0$ 인 경우와 $Fr=1$ 인 경우 모두 접착층 파손과 판 하중에 의한 복합재의 전단 파손이 함께 일어났으나 다른 시편들의 경우는 접착층 파손과 리벳 파손이 함께 일어났다. 복합재-복합재 시편의 경우 Fig.11과 Fig.12를 보면 리벳으로 보강한 시편이 전반적으로 전단 강도가 더 우수하게 나타남을 알 수 있으며 전단 강도는 접착 길이가 증가함에 따라 증가하였고, 접착 두께가 증가함에 따라 감소하였다. $Fr=1, 2c/t=12.7, h/t=0.0127$ 인 시편의 경우는 판 파손이 일어났다. $2c/t=3.81, h/t$

=0.0127인 리벳 보강 시편은 $Fr=0$ 인 경우와 $Fr=1$ 인 경우 모두 접착층 파손과 핀 하중에 의한 복합재의 전단 파손이 함께 일어났고 다른 시편들의 경우는 접착층 파손과 리벳 파손이 함께 일어났다.

4. 결 론

경량 소재 접착 이음에 대한 강도 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 필렛은 접합면의 접착 강도에 영향을 주며 필렛비가 증가함에 따라 접착면의 전단강도가 증가한다.
- 2) 접착 길이가 길수록, 접착 두께가 얇을수록 접착 강도가 증가하고, 피착재는 알루미늄-알루미늄의 경우가 알루미늄-복합재, 복합재-복합재의 경우보다 접착 강도면에서 우수하다.
- 3) 리벳으로 보강된 접착 시편의 경우, 알루미늄-알루미늄 시편은 강도가 감소하고, 알루미늄-복합재, 복합재-복합재 시편은 강도가 증가한다.
- 4) 접착부의 침수시간에 따른 접착 강도 저하는 무시할 수 있다.

후 기

본 연구의 내용 일부는 통산산업부 G7 과제(차세대 자동차 기술) 개발 사업으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 방원준, 김현영, 김중재, "자동차 샤시 부품의 용력 해석 및 경량화", 제2회 기아그룹 슈퍼컴 사용자 발표대회-CAE 심포지움, pp. 68~74, 1992
2. 김진, 유용문, 이민주, "자동차 경량 부품 개발", 자기연정보, 제2권, 제4호, pp. 51~59, 1994.
3. 심길보, 박철희, "차체 외판의 수지화 현황과 급후의 동향", 기아기보, 제17호, pp.170

- ~180, 1992..
4. C. C. Chan, "An Overview of Electric Vehicle Technology", Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 9, pp. 1202~1213, 1993.
5. T. J. Reinhart, "Composite", ASTM International, pp. 479~495, 1987.
6. Toshiaki Sakurai and Yoshinobu Kamada, "Structural Joint Stiffness of Automotive Body", SAE paper 880550, 1988.
7. M. Y. Tsai and J. Morton, "Experimental and numerical studies of a laminated composite single-lap adhesive joint" Journal of Composite Materials, Vol. 29, No. 9, pp. 1254~1275, 1995.
8. M. Y. Tsai and J. Morton, "Effect of a spew fillet on adhesive stress distribution in laminated composite single-lap joints", Composite Structures, Vol. 32, No. 1~4, pp. 123~131, 1995.
9. Takao Mori and Masaki Shiratori, "Stress Analysis and Design of a Metal-FRP Bonded Joints(1st report, single lap joints)", 日本機械學會論文集(A), Vol. 54, No. 498, pp. 251~258, 1988.
10. 이강용, 김종성, 공병석, 우형표, "차체 접합과 관련한 접합 강도 평가", 한국 자동차 공학회 추계 학술 대회 논문집, 제1권 pp. 189~194, 1996
11. ASTM D 1002-72(Reapproved 1983), "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading(Metal-to Metal)."
12. ASTM D 3165-73(Reapproved 1979), "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Laminated Assemblies."
13. JIS B 4627, "Hand riveter", 1994.
14. JIS H 4000, "Aluminum and Aluminum Alloy sheets and Plates, Strips and Coiled Sheets", 1988.