접착부 형상이 알루미늄/폴리카보네이트 접합재의 강도에 미치는 영향

서도원* · 김효진** · 최준용* · Vu Cong Hoa* · 임재규†

Effect of Adhesive Shape on the Strength of Aluminum/Polycarbonate Joint

Do Won Seo, Hyo Jin Kim, Jun Yong Choi, Vu Cong Hoa and Jae Kyoo Lim

Key Words : Adhesive Joint(접착제 접합재), Adhesive Strength(접착강도), Load speed(하중속도), Surface Treatment(표면처리), Lap Joint(겹침결합), Aluminum(알루미늄)

Abstract

Adhesive-bonded joints are widely used in the industry. Recently aircraft applications of adhesive bonding joints have been increased extensively in automobile and air industry. Because adhesives which are available for structural applications have been developed a lot and understanding of adhesive bonding has been improved so much. In this study, as the fundamental research of design of adhesive bonding joints, this study considers specimen shape are affect strength and durability of Al/Polymer lap joints. In this research, cross head speed difference were concerned to evaluate their effects on the adhesive strength. Cross head speed makes a change 0.05mm/min, 0.5mm/min, 5mm/min. The result is load-displacement diagram showed brittleness fracture tendency. Fracture tendency that is shown enough on stress distribution of trigonal single lap joint and trigonal edged single lap joint occur the inside of adhesive.

1. 서 론

접착제 접합방법(adhesive bonding method)은 항공산업과 자동차 산업 및 기술 집약형 산업에 널리 적용되고 있으며, 제조업의 다른 분야에서도 성장가능성이 높은 기술로 적용 범위가 확대되고 있는 기술이다[1~5]. 접착제의 접합은 표면의 부착에 의해 물질간의 상호결합을 유지할 수 있는 방법으로서 용도에 따라 크게 구조접합과 비구조 접합으로 나뉜다[6]. 구조접합에서 접착제는 결합 모재의 항복점까지 부하되는 충분한 강도를 가지며, 구조물의 주요한 하중을 감당해야 한다[6]. 최근에는 복합 폴리머 및 열가소성 강화 폴리머, 전기적 및 구조적 세라믹, 반도체, 유리, 박형 금속, 다양한 복합재 등의 분야에서 접착제 방법이 독특하고 진보된 결합 방법으로 떠 오르고 있다[7]. 더욱이 최근엔 접착제 접합이 구조적 용도에 자주 적용되고 있으며, 실링(sealing), 절연(insulation), 진동 감쇄(damping) 등과 같은 특정화된 비구조적 응용에서도 널리 사용된다[8]. 그러나 구조용 접착제 접합 방식의 본격적인 사용은 용접이나 기계적 결합방법에 비해 역사가 짧고, 강도 및 내구성에 대한 평가가 완전히 정립되지 못한 상태이며, 환경강도 및 내구성에 관한 연구도 많지 않은 실정이다. 접착제 접합은 다른 기계적인 결합이나 용접 방식에 비하여 더 균일하게 응력을 분포시키는 결합 방식이다[4]. 이는 접착제가 결합부의 어느 한 집중부위가 아닌 결합부의 전 부분에 접착력을 생성하기 때문이다. 또한 이것은 가벼운 구조물의 생산을 가능하게 한다. 즉, 접착제 접합법은 접착면의 응력을 분산시켜 복잡한 접합 형상을 가지고 있거나 서로 성질이 다른 이종재료, 경량화가 요구되는 구조물 등에서 기존의 용접결합 방식을 대체하는 기술로 채택되고 있다[3].

접착제 접합부의 설계에는 크게 접착제의 선택, 모재의 표면처리 방법, 접합부 형상, 접착제의 경화 등이 고려된다, 접착제는 용도 및 구조물 의 제작공정 등에 따라 선택되며, 경화방법은 접착제

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부, 공학연구원, 공업기술연구센터
E-mail : jklim@moak.chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-2321 FAX : (063)270-2452
* 전북대학교 공과대학 기계설계학과
** 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

의 의해 결정된다[9]. 따라서 접착제가 선택된후 접합부의 설계는 주로 접합부의 형상, 치수 및 표면처리에 귀결된다. 흔히 보는 결합형식을 살펴보면 단일 겹침 결합(single-lap joint), 양면 겹침 접합(double-lap joint), 맞대기 접합(butt joint) 등이 있으며, 그 중 단일 겹침 접합 형식이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 단일 겹침 접합부의 설계에서는 겹침 길이, 접착제의 두께, 피착재의 표면처리 방법 등이 결정되어야 하며, 이러한 요소들과 강도 및 내구성과의 관계를 규명하는 것은 접착제 접합부 설계에 있어서 아주 중요하다[10].

따라서, 본 연구에서는 2 액형 에폭시(epoxy) 접착제로 알루미늄(aluminum) 판재와 폴리카보네이트(polycarbonate) 판재를 접합한 피착재의 접착부를 몇 가지 형상으로 달리 설계하여 피착재 접합형상과 접합부의 강도와의 관계를 규명하고자 한다. 또한 인장-전단 시험시 하중속도를 변화시켜 접합강도에 미치는 하중속도의 영향을 고찰하였다.

3. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 실험재료는 100×25×4mm 의 폴리카보네이트(Polycarbonate; PC)와 100×25×1mm 의 알루미늄(Aluminum; Al) 6061 을 사용하였다. 접착제는 열경화성 에폭시(thermosetting epoxy) 계열인 Technicoll 8266/8267(H.B Fuller, Germany)을 사용하였다. Technicoll 8266 component A 는 Epoxy resin 이며 Technicoll 8267 component B 는 Amine setting agent(thixotropic, pasty)이다. 8266 과 8267 의 혼합 비율은 제조사에 의해 규정된 비율인 100:100(vol/vol)으로 하였으며, 125℃에서 30 분간 분위기 전기로에서 접합을 행하였다. 모든 시편에 균일한 접합력을 가지도록 0.24 ㎏ f/㎠의 가압력으로 접합하였다. 접합 후 실온(20℃)에서 5 일(120hr)간 보관 후 시험을 시행하였다.

본 연구에서는 ASTM D3163 을 기초로 접착제 접합 시험편을 설계·제작하였다 [11]. 접합형태는 single lap joint 형상을 기준으로 하여 총 6 가지로 접합형상을 달리하여 제작하였다. Fig.1 은 시험편의 접합형상을 도식화한 그림으로서, Plain Single Lap(PSL), Trigonal Single Lap(TSL), Trigonal Edged Single Lap(TESL), Bevelled Lap(BL), Joggled Lap(JL), Double Lap(DL)을 각각 보여주고 있다. 접착제 접합길이(overlap-length)는 예비실험을 통하여 얻은 사용재료의 강도와 시험편의 두께 등을 고려하여 10mm 로 설정하였다[6]. 접합부의 형상에 굴곡이 있는 경우에는 폴리카보네이트의 접합길이를 10mm 로 일정하게 하였다.

접합부의 표면처리는 아세톤으로 깨끗이 세척한 후, #42 입자로 sand blasting 처리하였다. 이로 인해 폴리카보네이트의 평균 조도는 Ry=16.18μm(12.3-28.6μm) 이고, 알루미늄의 평균조도는 Ry=21.90μm(16.6-25.6μm) 이었다. 접합부의 겹침 길이와 접착층의 두께를 일정하게 제작하기 위해 고정기구(Curing jig)를 사용하여 접합하였다. 접착층의 두께는 시험편에 작용하는 응력의 형태와 접합강도에 영향을 주기 때문에 각 시험편의 접착제 접합부에 일정 가압력을 작용시켜 접착층의 두께가 일정하도록 제작하였다. 접착층이 너무 얇거

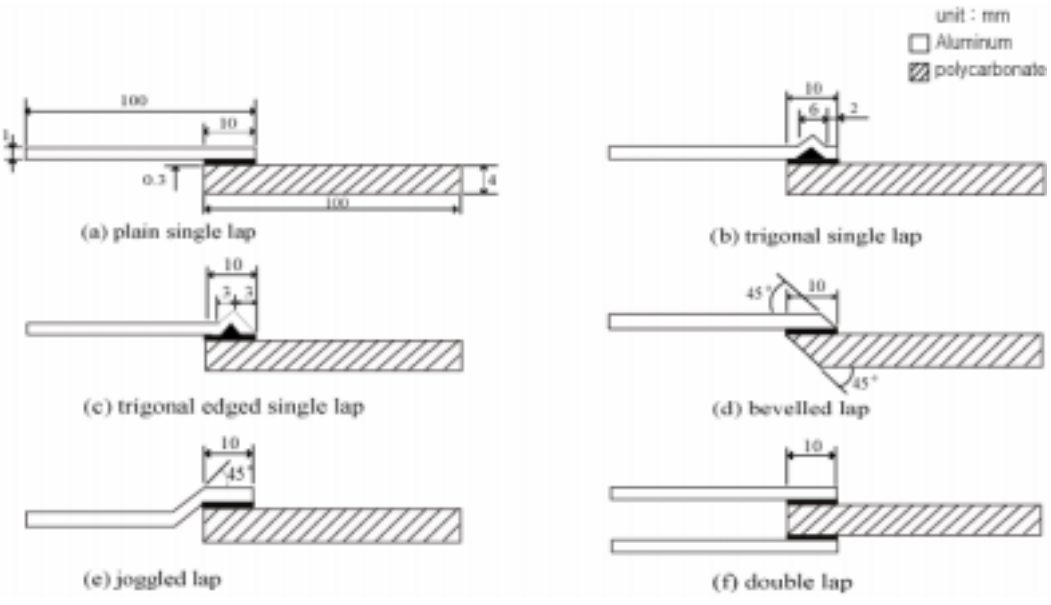


Fig.1 Schematic diagram of various lap joint specimen

나 두꺼우면 접합강도를 감소시키므로 기존에 수행한 실험 결과를 참고하여 적당한 가압력을 택하였다[4]. 접착층에 작용하는 가압력은 0.24kgf/㎠로 일정하게 하였다. 이는 0.65kgf 의 추를 접착제 접합부(10×25mm)에 올려놓음으로써 얻어진 가압력이다. 또한 접착제 두께를 일정하게 하기 위하여 접합부에 지름 0.3mm 의 동(Cu)선을 두 가닥씩 삽입하여 접합하였다.

접합강도 평가를 위해 시험에 사용된 장치는 유압식 만능시험기인 Instron 8516 을 사용하였으며, 1 ton 의 로드셀(load cell)로 인장전단시험을 행하였다. 시험중 시편에 작용하는 모멘트의 영향을 제거하기위해 그립부에 1mm 와 4mm 의 보강판을 사용하였다. 접합부의 형상변화에 따른 접합강도의 변화와 더불어, 접합강도에 미치는 하중속도의 영향을 평가하기 위하여, CHS(crosshead speed)를 각각 0.05, 0.5, 5mm/min 조건으로 나누어 시험하였다. 하중값은 CHS 조건에 맞춰 5-40Hz 로 획득하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 접합부 형상변화에 따른 하중-변위 경향

Fig. 2 는 CHS=0.5mm/min 인 경우의 하중-변위 경향을 접합형상에 따라 분류한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 모든 접합형상조건에 대해 취성적인 경향을 보여주고 있으며, PSL, TSL, TESL, BL 시험편의 경우에는 최고하중값이 1.2-1.4kN 범위에 분포하고 있으며, JL 시험편의 경우에는 약 0.5kN, DL 시험편의 경우에는 1.7-2.5kN 을 나타냈다. DL 시험편의 파괴하중값이 최고값을 보여주는 것은 PC 의 양면에 Al 이 접착된 형태, 즉 접착면적이 다른 시험편에 비해 넓기 때문이다. 그러나 하중을 접착면적으로 나눠준 응력값은 PSL 과 유사한 분포를 보여주었다. 시험편의 연신을 나타내주는 변위값의 분포는 모든 시험편에서 대개 0.6-1.0mm 이내였으나, JL 시험편의 경우에는 0.4-0.5mm 값을 보였다. 이는 Al 판의 굽어진 형상으로 인해 하중을 받으면서 굴곡형상이 펴지기 시작하면서 접착부위에 더 많은 응력이 가해지기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 하중-변위의 경향은 모든 하중속도 조건에서 유사한 경향을 보여주고 있었다. 단지 하중속도가 0.05, 0.5, 5mm/min 으로 증가하면서 전체적으로 약 0.3kN 의 하중이 증가하였다. 이처럼 하중속도가 증가함에 따라 파괴하중값이 증가하는 것은 구조재료에서 쉽게 관찰될 수 있는 일반적인 경향이다[12]. Fig. 3 의 CHS=5mm/min 의 경우인 TSL 과 TESL 시험편의 경우에서는 두

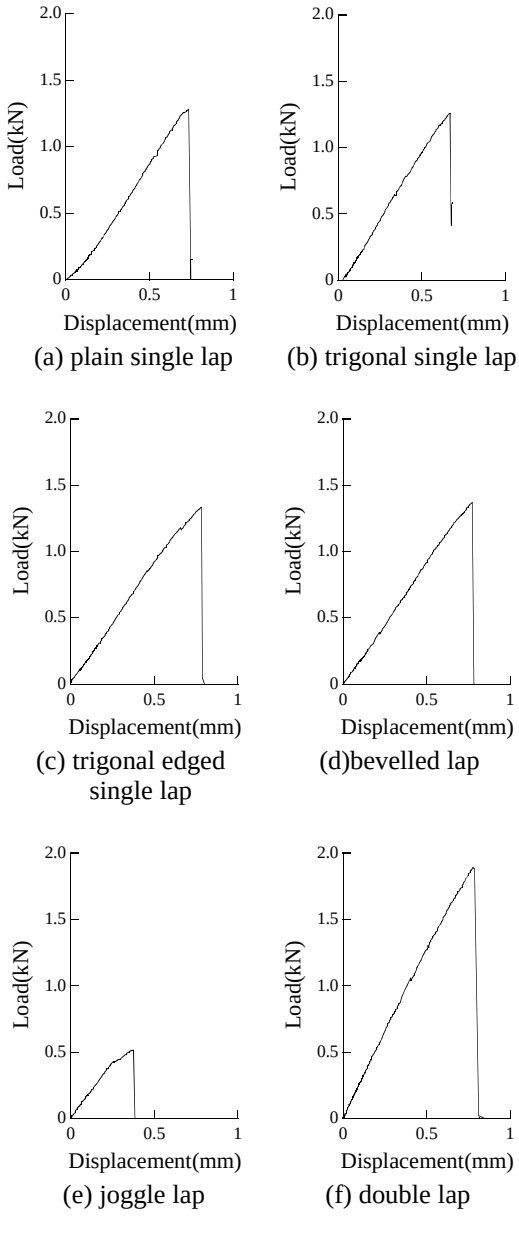


Fig. 2 Load-displacement diagrams at CHS = 0.5mm/min

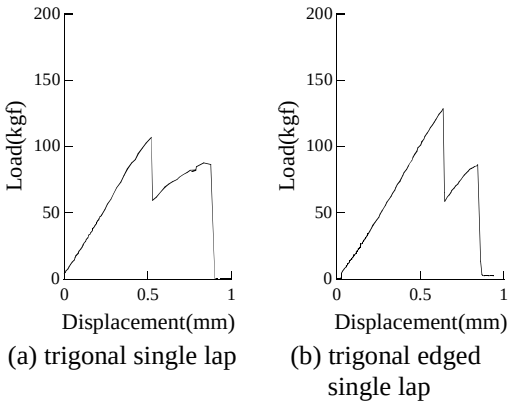


Fig. 3 Load-displacement diagrams at CHS = 5mm/min

단계의 최고하중값을 관찰할 수 있는데, 이는 접착부에 삼각형 굴곡부내의 본드층 내부로 2 차 균열이 진전되기 때문이다. 대부분의 시험편에서는 PC 와 접착제 계면사이에서 파단되었으나, TSL 과 TESL 시험편의 경우에는 접착제 내부 균열이 발견되었다. 이로 인해 높은 접착 강도가 측정되었으며, 이에 따른 연신도 다른 조건의 시험편에 비해 약 0.2mm 정도 더 신장되었다.

4.2 접합강도에 미치는 접합형상의 영향

Fig. 2 의 하중-변위 선도에서 볼 수 있듯이, JL 시험편의 경우에는 0.4kN 의 하중과 0.35mm 정도의 연신을 보이고 있어 가장 낮은 하중값을 보여주고 있다. 이는 접합 굴곡부의 응력집중에 기인한 것으로 보인다. 다른 조건의 시험편인 PSL, TSL, TESL 등의 접합 강도는 약 0.9-1.0kN 의 최고하중과 0.62-0.75mm 의 연신을 보여 서로 비슷한 경향을 보여주었다. 그러나, BL 시험편의 경우는 약 1.3kN 의 최고하중값과 약 0.78mm 의 연신을 보여 약간의 하중과 연신이 증가하였다. 이는 접합부의 선단이 가늘게 경사진 구조적인 특성으로 인해 화학적 반응과 연신이 증가한 것으로 판단된다. DL 시험편의 경우 1.8kN 의 최고하중값과 0.86mm 의 연신을 보여 여타 접합형상에 비해 가장 큰 하중값과 연신을 보였다. 이는 접촉면적의 증가로 인한 것으로 단위면적당 하중값으로 환산한 응력값은 접합형태가 동일한 PSL 의 수치와 거의 동일함을 알 수 있다.

Fig. 4 는 지금까지의 모든 하중속도 조건(CHS=0.05,0.5,5mm/min)에 대해 평균 강도값을 접합형상에 따라 분류한 그래프이다. Fig. 2 와 3 의 그래프에서도 나타났듯이 JL 시험편의 강도가 가장 낮은 값을 보여주고 있다. 가장 큰 강도값을

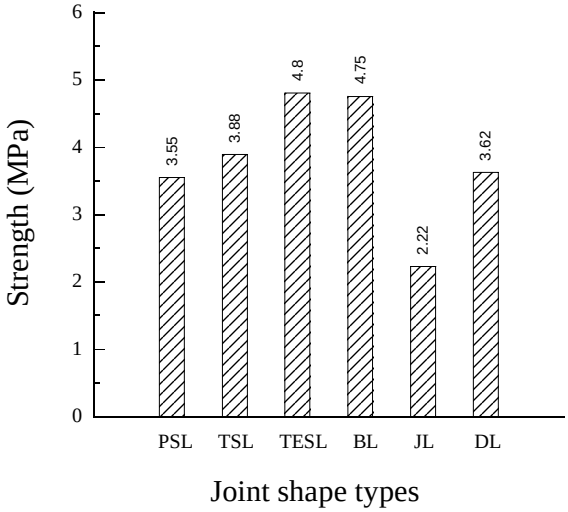


Fig. 4 Strength distributions according to joint shape

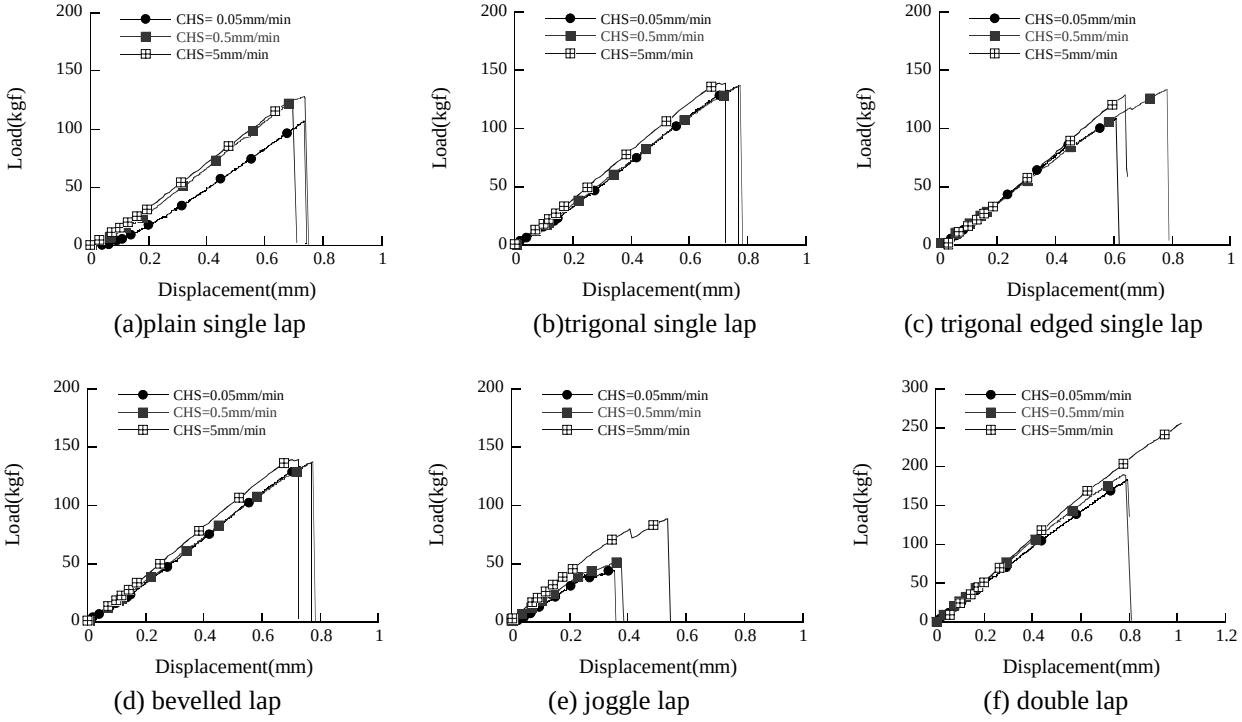


Fig. 5 Load-displacement distributions according to various loading speeds

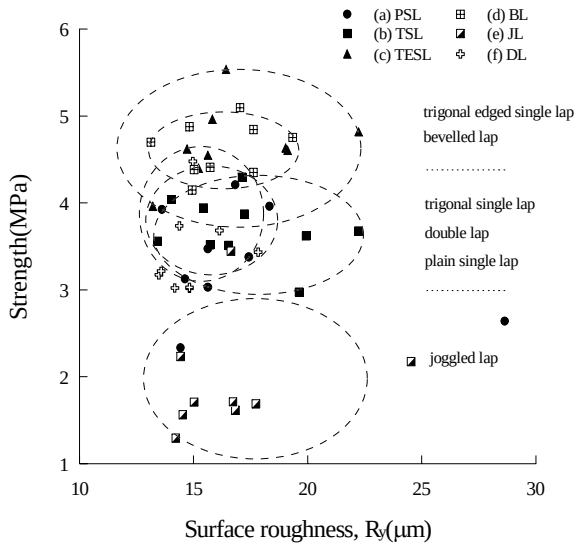


Fig. 6 Strength distributions according to surface roughness with joint shape types

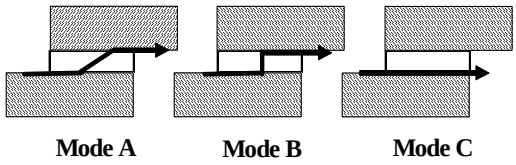


Fig. 7 Failure modes of the adhesively bonded joint

보인 접합형상은 TESL 시험편으로서 4.8MPa 의 값을 보여주고 있다. BL 시험편도 4.75MPa 값을 보여 TESL 과 거의 유사한 강도값을 보여주고 있다. DL 시험편의 하중값은 크게 나왔으나 접착면적이 2 배이므로 강도값은 PSL 과 유사한 3.62MPa 을 나타냈다. 시험편의 접합형상에 따른 강도의 분포는 JL, PSL, DL, TSL, BL, TESL 순으로 강도가 증가하였다.

4.3 접합강도에 미치는 하중속도의 영향

Fig. 5 는 동일 접합형태에 따라 하중-변위 경향을 하중속도에 따라 분류한 그래프이다. 전체적으로 취성적인 파괴경향을 보여주고 있다. 하중속도가 증가함에 따라 강도값이 증가하는 것은 일반적인 경향이지만, (a) PSL, (b) TSL, (c) TESL, (d) BL 시험편의 경우에서는 그 차이가 크지 않았다. 그러나, (e) JL, (f) DL 시험편의 경우, CHS=5mm/min 의 조건에서는 그 증가량이 두드러졌다. 하중과 연신량 모두에서 약 30% 이상의 증가를 보였다

4.4 접합강도에 미치는 표면조도의 영향

Fig. 6 은 접착면의 표면조도에 따른 강도의 분포를 접합형태에 따라 분류한 그래프이다. 표면조도값은 파괴가 이뤄진 계면에서의 조도로서, 대개 PC 와 접착제 사이에서 파괴가 이뤄졌기 대문에 PC 의 조도값이다. 그래프에서 보여지듯이 모든 시험편에 동일한 조건으로 sand blasting 처리 하였기에 표면조도의 분포는 13-23μm 이내에 이루어져 있었고, 강도에 대한 표면조도의 영향은 거의 나타나지 않았다. 표면조도에 대한 영향보다는 접착부위의 형상에 대한 조건이 강도에 더욱 큰 영향을 미치고 있었다. 강도분포에 따라 3 가지 그룹으로 나눌 수 있는데, 강도가 큰 그룹은 BL, TESL 시험편이었으며, PSL, TSL, DL 시험편이 중간 그룹, JL 시험편이 강도가 가장 낮은 그룹으로 분류되었다.

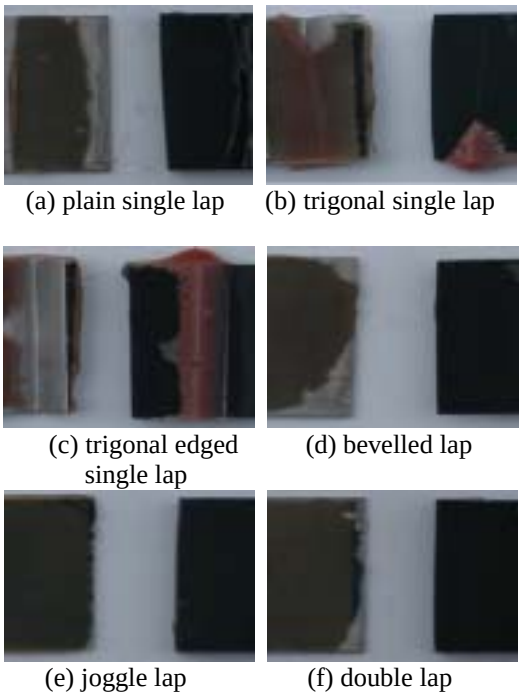
4.5 접합부의 파단양상 및 파면사진

Fig. 7 은 본 연구에서 관찰된 접착제 접합부의 파단양상을 도식화 한것이다. Mode-A 는 Cohesive 와 Adhesive-failure 가 동시에 나타나는 양상을 말한다. 접착제 접합부의 하중방향 끝단에서 계면파괴(Interfacial-failure)가 발생하여 접착제 층을 통과하는 Cohesive-failure 단계를 거쳐서 다시 반대편 끝단에서 Interfacial-failure 형태로 파단이 진행하는 양상이다. Mode-A 는 Cohesive-failure 부분의 폭이 전체 겹침부-길이의 20%이상일 경우로 정의하였다.

Mode-B 역시 Cohesive 와 Adhesive-failure 가 동시에 나타나는 양상을 말한다. 파단 단계는 Mode-A 와 동일하다. 하지만, Mode-B 는 A 에 비하여 Cohesive-failure 부분이 적다. Cohesive-failure 부분이 폭이 전체 겹침부-길이(Overlap-length)의 20% 미만일 경우로 정의하였다.

Mode-C 는 단지 Adhesive-failure 만을 보이는 양상이다. 접착제 접합 겹침부 전면에 걸쳐서 Interfacial-failure 가 나타나는 양상을 말한다.

Fig. 8 는 시험후의 파단양상을 접합형태 조건에 따라 분류한 것이다. (a) PSL 의 경우에는 모든 시험편에서 Mode-A 의 파괴양상을 보였으며, (b) TSL 와 (c) TESL 의 경우에는 90%의 시험편에서 Mode-B 의 양상을 보였고, 일부에서 Mode-C 가 관찰되었다. (d) BL 의 경우에는 70%의 시험편에서 Mode-A 양상을 보였으며, 일부에서 Mode-C 가 관찰되었다. (e) JL 의 경우에는 50%씩 Mode-A 와 Mode-C 가 혼재해서 관찰되었다. (f)의 경우에는 90%의 시험편에서 Mode-A 의 양상을 보였으며, 일부에서 Mode-C 가 관찰되었다.



(a) plain single lap (b) trigonal single lap

(c) trigonal edged single lap (d) bevelled lap

(e) joggle lap (f) double lap

Fig. 8 Photographs of failure surface of Al/PC specimens with various joint shape types

이상의 관찰로부터 Mode-B 가 주로 발생하는 TSL 와 TESL 에서 가장 높은 강도가 측정되었으며, 가장 많은 Mode-C 가 관찰된 JL 시험편이 가장 낮은 강도분포를 나타내었다.

5 결 론

폴리카보네이트와 알루미늄 사이의 접합강도를 향상시키고자 Lap joint 의 접합부의 형상을 6 가지로 달리하여 기계적 특성을 평가하였고, 하중속도에 대한 영향을 평가하고자 3 가지 속도에 대해 강도의 변화를 평가하였다. 이로 인해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모든 접합형상 조건에서 하중-변위선도는 취성적인 파괴경향을 보였으며, 동일 접합면적에서 trigonal edged single lap 과 bevelled lap joint 가 가장 큰 강도를 보였다.

2) 접합형상이 변화된 Lap joint 의 모든조건에서 강도에 미치는 하중속도의 영향은 미비하였다.

3) 접합강도에 영향을 미치는 인자는 표면조도보다는 접합형상 조건의 영향이 더 컸다.

4) 강도분포가 크게 나타난 trigonal single lap 과 trigonal edged single lap joint 의 파단양상은 대부분 접착제 내부에서 파괴가 발생하는 Mode-B 의 양상을 보였으며, 가장 낮은 강도를 보인 joggled lap joint 는 계면간 파괴인 Mode-C 가 주를 이루었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05–2002-000–00831–0)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) Pirondi, A. and Nicoletto, G., 2002, “Mixed mode Ⅰ/Ⅱ fracture toughness ofbonded joints,” *INT. J. Adhesion & Adhesives*, volume 22, pp.109~117

(2) Higgins, A., 2002, “Adhesive bonding of aircraft structures The effect of moisture on the dimensional stability of adhesively bonded joints,” *INT. J. Adhesion & Adhesive*, volum 20, pp. 367~376

(3) Lunder, O., Olsen, B. and Nisancioglu, K., 2002, “Pre-treatment of AA6060 aluminum alloy for adhesive bonding,” *INT. J. Adhesion & Adhesive.*, volume 22, pp.143~150.

(4) Roy., A., Mabru, C. and Gacougnolle, J. L., 1997, “Damage Mechanisms in composite/Composite Bonded Joints Under Static Tensile Loading,”, *Applied Composite Materials*, volume 4, pp.95-119

(5) Tong, L., Sheppard, A. and Kelly, D., 1995, “Relationship between surface displacement and adhesive peel stress in bonded double lap joints,” *INT. J. Adhesion & Adhesinve*, volume 15, pp.43~48

(6) Messler, R. W., 1993, *“Joining of Advanced Materials,”* Butterworth-Heinemann, Stoneham, MA 02180, pp.108~180

(7) Srivastava, V. K., 2003, “Characterization of adhesive bonded lap joint of C/C-SiC composite and Ti-6Al-4V alloy under varying condition,” *INT. J. Adhesion & Adhesive*. volume 23, pp.59~67

(8) Bistac, S., 1998 “Durability of steel/polymer adhesion in an aqueous environment,” *INT. J. Adhesion & Adhsives*, volume 18, pp. 365~369

(9) Wylde, J. W., 1998, “ Measurement of adhesive joint fracture properties as a function of environmental degradation”, *INT. J. Adhesion & Adhesives*, volume 18, pp.237~246

(10) Belingardi, G., Goglio, L. and Tarditi, A., 2002, “Investingating the Effect of Spew and Camfer Size on the Stresses in Metal/Plastics Adhesive Joints,” *INT. J. Adhesion & Adhesive*, volume 22, pp.273~282

(11) ASTM D3163-96,ASTM, Pensylvania, 1998

(12) Seo, D. W. and Lim, J, K., 2002, “Effect of Strain Rate and Temperature on fracture strength of Ceramic/Metal Joint Brazing with Ti-Ag-Cu Alloy,” *INT. J. KSME*, volume 16, pp.1078~1083