

SPR 과 접착제를 이용한 이종재료 접합의 피로평가

Fatigue Assessment Using SPR and Adhesive on Dissimilar Materials

김태현^{1,✉}, 서정², 강희신², 이영신³, 박춘달¹
Tae Hyun Kim^{1,✉}, Jeong Suh², Hee Shin Kang², Young Shin Lee³ and Chun Dal Park¹

1 대구기계부품연구원 차세대금형기술혁신센터 (Die & Mold Technology Center, DMI)

2 한국기계연구원 광응용기계연구실 (Department of High Density Energy Beam Processing & System, KIMM)

3 충남대학교 기계설계공학과 (Mechanical Design Engineering, Chungnam National Univ.)

✉ Corresponding author: taehyun@dmi.re.kr, Tel: 053-608-2164

Manuscript received: 2011.5.12 / Accepted: 2011.7.4

In this study, fatigue life is evaluated by comparing with lighter car body through the experiment on SPR joints. An experimental activity on sheet metal samples of Aluminum 5J32 and Steel SPRC440 has been conducted to achieve better understanding of the process. In addition, SPR joint used less than the existing Spot Welding improves joint strength and fatigue life is evaluated by using SPR and adhesive joining Hybrid. Joining(bonding) strength and fatigue life on SPR and Hybrid (SPR + adhesive) are evaluated throughout the experiment. With joining strength than 20 % of the aluminum material, dissimilar materials has improved over 2 times as large as the strength In case of dissimilar materials, the fatigue life of aluminum is increased by 1.6 to 2.5 times as large as the life.

Key Words: Self-Piercing Rivet (셀프 피어싱 리벳), Adhesive (접착제), Fatigue Life (피로수명)

1. 서론

최근 자동차산업은 무공해자동차, 전기자동차에 대한 연구와 함께 연비향상, 안전성, 편의성, 수명, 성능 등 폭 넓은 연구가 진행되고 있으며, 이를 위해 엔진성능향상, 차체재설계, 자동차 재료 경량화를 필요로 한다. 특히 소재의 경량화에 대한 많은 연구가 이루어 지고 있으며, 차량무게는 연비에 직접적인 영향을 미치게 되는데, 일반적으로 차량 무게가 1 % 감소될 때마다 연비는 1 % 씩 향상되는 것으로 알려져 있다. 또한 연료 소비 절감으로 인해 CO₂ 배출가스를 절감시킬 수 있다.

경량화 소재로서 많이 사용되는 재료는 알루미늄, 마그네슘, 고장력강판 등의 금속재료와 플라스

틱, 세라믹 등이 많이 사용되고 있다. 이 중에서 알루미늄은 경량화뿐만 아니라 비강도, 내식성, 열전도도 등이 우수하여 자동차 무게의 20 ~ 30 % 를 차지하는 차체부분에 사용시 최고 40 % 가량 경량화를 이룰 수 있다. 이처럼 차량경량화 및 연비향상 등을 위해서는 차체 전체를 알루미늄으로 변경하는 것이 가장 좋은 방법 이지만 알루미늄의 성형문제, 강도(차체 재설계), 접합기술 등 관련 응용기술이 부족하므로 차체에 부분적인 경량화 적용이 필요한 실정이다. 또한, 자동차 차체의 멤버(Member)와 멤버가 연결되는 곳에는 더 큰 강성이 요구되기 때문에 기존의 철강재나 높은 강도를 가지고 있는 재료의 사용이 요구되므로 알루미늄 접합과 더불어 알루미늄과 스틸의 이종재료 결합이 가능한 접합기술 개발이 필요하다.

기존 용접이 어려운 알루미늄 및 이종재료 접합에 사용되는 방법으로는 볼트체결, 클린칭(Clinching), SPR(Self Piercing Rivet), 접착제 등이 있으며 이외에도 다양한 접합방법들이 개발되고 있다.¹ 이 중에서 SPR 접합의 경우 해외 선진 자동차 업체에서 알루미늄 차체 결합방법으로 사용되고 있으며, 기존의 스틸 재료에 사용하는 점용접 공법을 대체하여 알루미늄 및 이종재료 차체 구조물에 결합기술로도 각광받고 있다.

SPR 은 일반적으로 점 용접에 비하여 접합강도는 약 10~20 % 떨어지지만, 피로강도는 더 우수한 것으로 알려져 있다.^{2,4} 또한, 기존 점 용접의 강도를 만족시키면서 피로강도를 더 우수하게 하기 위해서는 접착제와 리벳을 조합하여 쓰는 방법이 있다. 접착제 사용으로 SPR 접합의 부족한 박리 하중이나 오랫동안 지속되는 정적 하중을 보완할 수 있다.^{5,6}

따라서 본 연구에서는 자동차 차체 경량화에 대비하여 알루미늄간의 접합 및 알루미늄과 스틸 구조의 이종재료에 대하여 실험적 방법을 이용하여 SPR 접합판재의 피로 수명을 평가하였다. 또한, SPR 사용시 기존 점용접 접합에 비하여 떨어지는 접합강도의 만족과 피로강도의 향상을 위하여 SPR 과 접착제를 병행한 Hybrid 접합의 피로수명을 평가하였다.

2. 접합방법

2.1 셀프-피어싱 리벳(Self-piercing rivet)

기계적인 결합방법의 하나인 SPR 접합은 일반 리벳 공정과는 달리 별도의 리벳용 홀(hole)이 필요없기 때문에 자동화에 용이하며 작업 시간이 빠르다. 리벳 압입 방식으로 판재의 열 변형이 거의 없고 친환경적인 공법으로 사용되고 있다. 또한 소음이 적고, 용접이 불가능한 이종재료의 결합이 가능하다. 특히 자동차 양산용 장비 적용이 용이하기 때문에 기존의 점 용접을 대체하기 편리하다. Fig. 1 은 SPR 접합공정의 순서를 나타내었다. 첫 번째 공정은 피딩 장치에 의해 리벳이 자동공급이 되며, 두 번째 공정은 유압 혹은 서보 모터의 힘으로 리벳을 판재에 압입을 시키며, 세 번째 공정은 상부 판재를 관통하고, 하부 판재는 관통하지 않으며 마지막 공정은 하부 언빌(Anvil) 의 형상에 의해 성형되어 리벳팅이 완료된다.

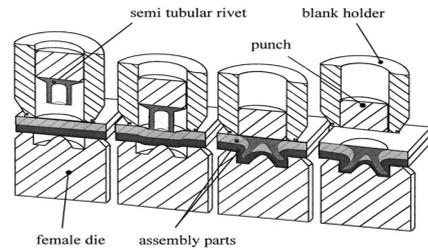


Fig. 1 Process of self-piercing rivet joining

2.2 접착제(adhesive bonding)

접착제를 이용한 결합은 이종재료의 결합이 가능하며, 결합 설계 및 결합 과정이 단순하다. 또한 접착제 차체가 습기에 대한 차폐막 역할을 하게 되어 부가적인 실링(Sealing)의 필요성이 없어진다. 그러나 결합 시간이 길고, 환경적 문제가 발생된다. 일반적인 접착제를 이용한 결합 과정은 시편이 준비된 상태에서 준비된 시편을 전처리 작업을 수행한다. 그 다음 접착제를 일정 두께로 도포하고 마지막으로 시편을 겹친 후에 일정압력을 가하여 접착제를 경화시킨다. 이와 같은 과정을 Fig. 2 에 나타내었다.

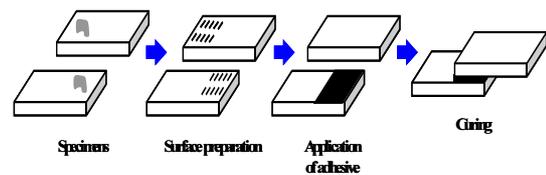


Fig. 2 Procedure of adhesive bonding

3. 실험방법 및 결과

3.1 실험재료 및 실험방법

본 실험에 사용한 소재는 자동차 차체 부품재료인 스틸 SPRC440, Al 5J32 와 리벳으로 화학적 조성을 Table 1 에 나타내었다. SPRC440, Al 5J32 재료의 기계적인 물성은 Table 2 와 같다.

Table 1 Chemical composition of SPRC440, Al 5J32, Rivet

Materials	Chemical composition (%)				
	C	Si	Mn	P	Mg
SPRC 440	0.08	0.02	1.38	0.017	-
Al 5J32	-	0.11	0.005	-	5.68
Rivet	0.46	0.045	0.446	0.013	-

Table 2 Mechanical properties of SPRC440, Al5J32

Materials	Mechanical properties		
	Tensile strength(MPa)	Yielding strength(MPa)	Elongation (%)
SPRC 440	457	314	34
Al 5J32	285	130	33

시편의 규격은 Fig. 3 과 같이 일반적으로 사용되는 겹치기 이음시편으로 가로 100 mm, 세로 30 mm 이고 두께는 1 mm 인 I 형 겹치기 시편이다. 실험에 사용한 리벳은 내경, 외경은 각각 4.8, 8.7mm 이고, 높이는 5.5mm 인 아큐먼트사 Ø 4.8 이다. 재료는 아연(zinc) 코팅된 카본 스틸(carbon steel)로서 경도(vickers hardness)는 450~500Hv 이다.

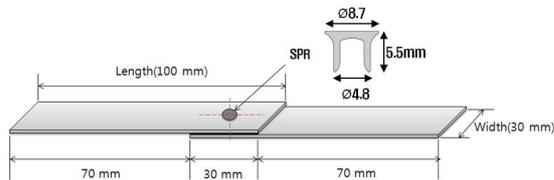


Fig. 3 Specimen geometry and dimensions for lap shear tests

실험방법은 접합방법 및 판재 조합종류에 따라 Table 3 과 같다. SPR 접합방법은 Class A 의 알루미늄 동종재료와 Class B 의 알루미늄과 스틸의 이종재료로 구분하였고, Hybrid 접합은 Class C 의 알루미늄 동종재료와 Class D 의 알루미늄과 스틸의 이종재료로 구분하였다.

Table 3 Experimental process of SPR joint specimens

Class	Joining methods	Material		Thickness(mm)	
		Upper	Lower	Upper	Lower
A	SPR	Al 5J32	Al 5J32	1.0	1.0
B	SPR	SPRC440	Al 5J32	1.0	1.0
C	Hybrid (SPR+ bonding)	Al 5J32	Al 5J32	1.0	1.0
D	Hybrid (SPR+ bonding)	SPRC440	Al 5J32	1.0	1.0

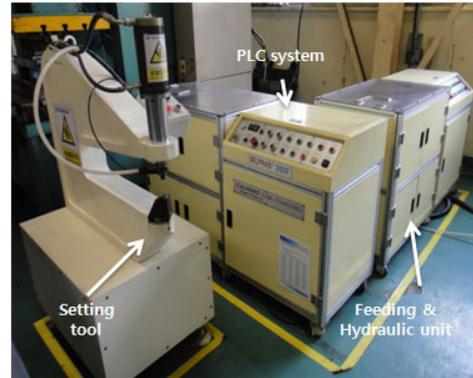


Fig. 4 Configuration of SPR system

SPR 장비는 사용목적에 따라 정치식과 로봇건식 등의 종류가 있으며, 본 실험에 사용한 장비는 정치식 장비이다. 실험장치의 구성은 Fig. 4 처럼 크게 C-Frame 으로 구성된 Setting tool 부분과 리벳을 Setting tool 에 공급해 주는 Feeding 장치, 마지막으로 모재에 기계적 힘을 공급해주는 유압장치로 크게 3 부분으로 구성되어 있다. 실험조건은 가압력 5kN 를 가하여 접합을 수행하였다.

일반적으로 자동차산업에서 접착제를 이용한 접합방법은 에폭시(epoxy) 계열의 접착제와 혐기성(anaerobic) 계열의 접착제가 많이 쓰인다. 에폭시 계열의 접착제는 고 점도이며 열경화 방식으로 판재의 결합에 사용되며, 상대적으로 상온경화 방식인 혐기성 계열의 접착제는 에폭시 계열보다 저 점도이며 판재의 결합에 주로 사용된다. 일반적으로 접착두께는 0.1 ~ 0.2 mm 접착 두께가 최적의 두께로 추천되고 있다.^{7,8} 접착 두께가 증가하면 접착제에서 발생하는 전단응력이 증가와 접착 계면에 많은 기공을 내포할 수 있으며, 경화 후 잠재적인 결함의 원인이 될 수 있다. Class C 와 Class D 의 Hybrid 판재접합 실험에서는 Henkel 사 구조용 에폭시 계열의 접착제를 이용하여 0.1 mm 도포 후 180 °C에서 30 분간 경화작업을 한 후 SPR 접합을 수행하였다.

3.2 인장시험

인장 시험에는 최대용량 150kN 인 Instron 사의 UTM (Universal Testing Machine) 장비를 사용하였으며, 하판을 고정시키고 상판을 2 mm/min 의 속도로 인장시켰다. 총 3 회 실험을 수행하여 평균 인장강도를 산출 하였다. 인장실험 결과 상판에서 굽힘 현상이 나타나면서 리벳 주위에서 파단이 시작되었다.

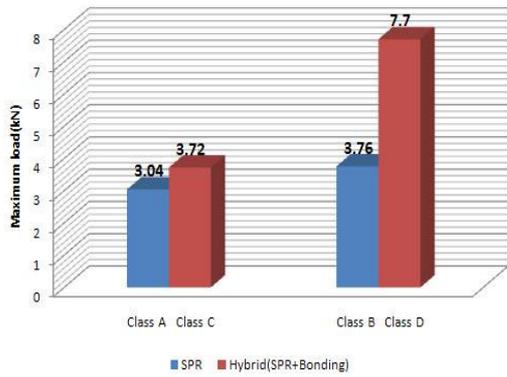


Fig. 5 Lapped joint specimens results after tensile test

실험결과 Fig. 5 처럼 Class A 와 Class C 의 알루미늄 재료의 경우 Hybrid 접합을 수행하였을 때 SPR 접합보다 20%이상 접합강도가 향상되었다. 또한 Class B 와 Class D 의 알루미늄과 스틸의 이종 재료 접합의 경우 Hybrid 접합을 수행하였을 때 SPR 접합보다 2 배 이상 접합강도가 향상되었다.

3.3 피로시험

피로 시험은 Fig. 6 과 같이 10ton 용량의 Instron 회사의 전기유압식 MTS 810 모델을 사용하여 ASTM E 466-96 규격에 의하여 시험을 수행하였다. 피로 하중의 응력비 $R(\sigma_{min}/\sigma_{max})$ 은 0.1 로 설정 하였으며, 파형은 정현파(sine wave), 시험 주파수 (Frequency)는 20Hz 로 하여 피로시험을 하였다. 피로실험기의 제어모드(Control mode)는 하중제어 방식으로 HCF(High Cycle Fatigue) Test 로 실험하였다. HCF 는 매 Cycle 마다 가해지는 load 가 작은 조건에서 이루어지는 시험이다.

SPR 결합의 파단형상은 Fig. 7 에서 보이듯이 리벳 꼬리 분리(rivet tail pull-out), 리벳 머리 분리 (rivet head pull-out), 모재 파단(substrate failure)으로 세가지로 분류된다.⁹ 피로시험 후 SPR 결합의 파단은 형상은 모재에서 파단이 일어나 전파되는 전

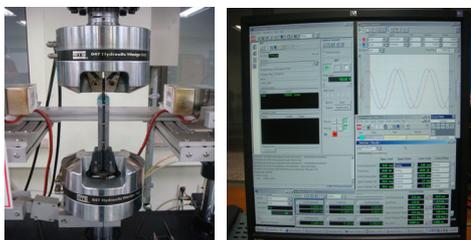


Fig. 6 View of Fatigue test

형적인 Pull-Out Fracture 가 발생하였는데 이는 고상접합법인 SPR 공정 특성상 HAZ(열영향부)가 존재하지 않고 우수한 접합강도를 확보하기 때문이라고 판단된다.

접착제 결합의 파단형상은 Fig. 8 처럼 벌크파괴 (bulk failure), 전이파괴 (transition failure), 계면파괴 (interfacial failure), 모재파단(substrate failure)으로 분류된다. Hybrid 접합의 접착제 결합의 파단은 상부 부재와 하부 부재가 떨어지면서 박리 하중이 작용된 접착제의 벌크파괴 및 모재파단이 발생되었다. 벌크파괴는 접착제에 작용되는 전단력보다 상하부재의 변형에 의해 발생하는 인장력에 의해 발생된다.

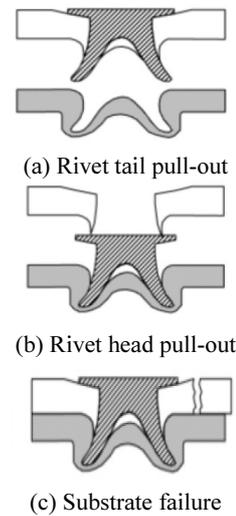


Fig. 7 Typical failure modes of SPR joint

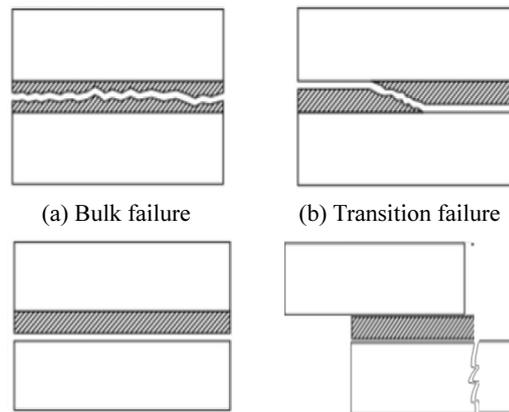


Fig. 8 Fracture modes of adhesive bonded joint

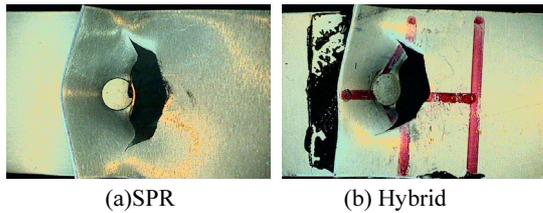
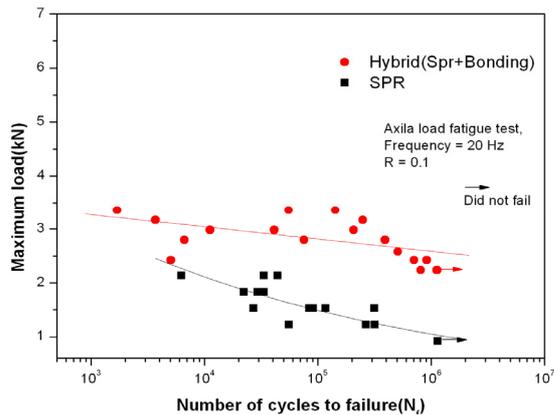
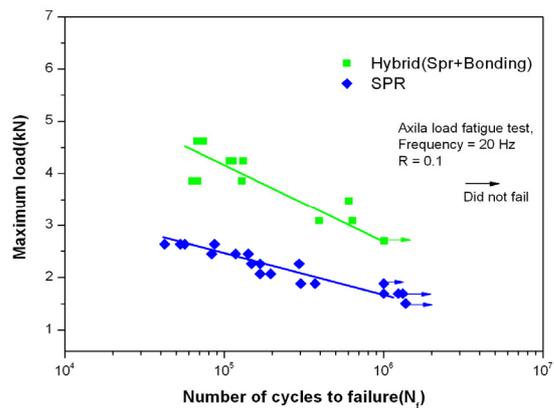


Fig. 9 Fracture shape of SPR and Hybrid



(a) Class A (SPR), Class C (Hybrid)



(b) Class B (SPR), Class D (Hybrid)

Fig. 10 Load-cycle curve of fatigue results

Fig. 9 는 SPR 과 Hybrid 시편의 파단형태를 보여준다. SPR 시편은 접합부에서 모재파단이 발생되었고, Hybrid 시편은 접착제의 벌크파괴와 SPR 접합부의 모재파단이 동시에 발생하였다.

일반적으로 피로한도(fatigue limit)는 주로 $10^5 \sim 10^8$ 사이클에서 꺾임점이 존재하여 수평화 되는 응력수준으로, 꺾임점 이후 수명이 무한하다고 간주한다. 본 실험에서는 피로수명이 10^6 이상을 피로한도로 판단하여 실험을 수행하였다. Fig. 10 은 S-

N Curve 를 보여주며 알루미늄 재료의 접합을 이용한 (a)의 경우는 SPR 접합을 이용한 Class A 는 최대하중의 30 % 수준인 0.9 kN 에서 $1.14E+06$ 수명이었고, Hybrid 접합을 이용한 Class C 는 최대하중의 60 % 수준인 2.2 kN 에서 $1.13E+06$ 수명이었다. 스틸과 알루미늄 재료 접합의 (b)의 경우는 SPR 접합을 이용한 Class B 는 최대하중의 45 % 수준인 1.17 kN 에서 $1.23E+06$ 수명이었고, Hybrid 접합을 이용한 Class D 는 최대하중의 35 % 수준인 2.7 kN 에서 $1.0E+06$ 수명이었다.

4. 결론

본 논문에서는 자동차 차체 경량화 대비하여 실험적 방법을 통해 SPR 접합부의 피로수명에 대한 평가를 수행하였다. 또한, SPR 접합 사용시 기존 점 용접에 비하여 떨어지는 접합강도 및 피로수명을 향상시키고자 SPR 과 접착제를 이용한 Hybrid 접합의 피로수명을 평가하였다.

이에 본 연구에서는 실험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 인장시험 결과 알루미늄재료의 경우 Hybrid 접합을 수행하였을 때 SPR 접합보다 20% 이상 접합강도가 향상되었고, 알루미늄과 스틸의 이종재료 접합의 경우 Hybrid 접합을 수행하였을 때 SPR 접합보다 2 배 이상 접합강도가 향상되었다.

2) 피로시험 후 파단형상은 SPR 결합의 경우 모재에서 파단이 일어나 전파되는 전형적인 Pull-Out Fracture 가 발생하였는데 이는 고상접합법인 SPR 공정 특성상 HAZ(열영향부)가 존재하지 않고 우수한 접합강도를 확보하기 때문이라고 판단된다. Hybrid 접합의 파단형상은 상부 부재와 하부 부재가 떨어지면서 접착제의박리 하중이 작용된 접착제의 벌크파괴 및 모재파단이 발생되었다. 벌크파괴는 접착제에 작용되는 전단력보다 상하부재의 변형에 의해 발생하는 인장력에 의해 발생된 것으로 사료된다.

3) 피로수명은 알루미늄 동종재료의 SPR 접합의 경우 Class A 의 내구한도는 0.9 kN 이었고, Hybrid 접합의 Class C 의 경우 2.23 kN 으로 2.5 배 이상 내구한도가 향상되었고, 알루미늄과 스틸의 이종재료 접합의 경우에는 SPR 접합의 경우 Class B 는 1.7 kN 이었고, Hybrid 접합의 Class D 는 2.7 kN 으로 약 1.6 배 이상 내구한도가 향상됨을 알 수 있었다.

4) 본 연구에서는 아연 코팅된 카본 스틸 리벳을 이용하여 실험하여 평가하였다. 향후 최적의 경량화 및 강도, 수명 등을 향상시키기 위해 알루미늄 리벳 및 다양한 코팅층을 사용하여 연구하고자 한다.

참고문헌

1. Kim, J. Y., Lee, C. J., Hwang, B. N., Lee, S. K., Ko, D. C. and Kim, B. M., "The Prediction of Fracture Mode in Clinching Joining," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 395-396, 2009.
2. Iguchi, H. and Ohmi, Y., "Joining Technologies for Aluminum Body-Improvement of Self-piercing Riveting," Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Paper No. 20037065, pp. 301-305, 2003.
3. Kim, T. H., Suh, J., Kang, H. S. and Lee, Y. S., "A Study on the Fatigue life of SPR Joining by Finite Element Method," Proceedings of the KSPE Autumn Conference, pp. 789-790, 2010.
4. Lee, K. Y., Kim, J. B., Choi, H. S. and Woo, H. P., "Strength Evaluation of Adhesive Bonded Joint for Light Weight Structure by Single-Lab Joint Test," Transactions of KSAE, Vol. 5, No. 2, pp. 87-93, 1997.
5. Lee, K. Y., Kim, J. S., Kong, B. S. and Woo, H. P., "Strength Evaluation of Adhesive Bonded Joint for Car Body," Transactions of KSAE, Vol. 6, No. 1, pp. 143-150, 1998.
6. Voelkner, W., "Present and future developments of metal forming: selected example," Journal of Materials Processing Technology, 2000.
7. Hart-Smith, L. J., "Analysis and Design of Advanced Composite Bonded Joints," Technical Report, NASA CR 2218, 1973.
8. Ownes, J. P. F. and Lee-Sullivan, P., "Stiffness Behavior in Adhesively Bonded Composite-to-aluminium Joints. Part I. Theoretical model," Journal of Adhesion and Adhesive, Vol. 20, No. 1, pp. 39-45, 2000.
9. Lee, M. H., Kim, H. Y. and Oh, S. I., "Crushing of Double Hat-shaped Members of Different Materials Joined by Adhesive Bonding and Self-Piercing Rivet," International Journal of Automotive Technology, Vol. 7, No. 5, pp. 565-570, 2006.