

Self-Piercing Rivet과 Hybrid Joining을 이용한 자동차용 선도장 칼라강판과 용융아연도금강판의 접합부 기계적 성질 평가

배진희* · 김재원** · 최일동*** · 남대근**** · 김준기***** · 박영도*,*****,†

*동의대학교 공과대학 신소재산업경영공학과

**부산대학교 공과대학 재료공학과

***한국해양대학교 재료공학과

****한국생산기술연구원 수송기계시스템센터

*****한국생산기술연구원 용접접합연구실용화그룹/마이크로조이닝센터

*****동의대학교 공과대학 신소재공학과

A Study on Tensile Shear Characteristics of Dissimilar Joining Between Pre-coated Automotive Metal Sheets and Galvanized Steels with the Self-Piercing Rivet and Hybrid Joining

Jin-Hee Bae*, Jae-Won Kim**, Ildong Choi***, Dae-Geun Nam****,
Jun-Ki Kim***** and Yeong-Do Park*,*****,†

*Dept. of Advanced Materials & Industrial and Management Engineering, Dong-Eui University,
Busan 614-714, Korea

**Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

***Dept. of Materials Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

****Transportation & Machinery System Center, KITECH, Busan 618-270, Korea

*****Advanced Welding & Joining R&BD Group, KITECH, Incheon 406-840, Korea

*****Dept. of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

†Corresponding author : ypark@deu.ac.kr

(Received January 14, 2016 ; Revised January 20, 2016 ; Accepted January 21, 2016)

Abstract

The automotive manufactures increase their use of lightweight materials to improve fuel economy and energy usage has a significant influence on the choice of developing materials. To meet this requirements manufacturers are replacing individual body parts with lightweight metals, for these the process treating and painting surfaces is changing. The pre-coated steels are newly developed to avoid the conventional complex and non-environmental painting process in the body-in-white car manufacturing. The development of new joining techniques is critically needed for pre-coated steel sheets, which are electrically non-conductive materials. In the present study, dissimilar combination of pre-coated steel and galvanized steel sheets were joined by the self-piercing rivet, adhesive bonding and hybrid joining techniques. The tensile shear test and free falling high speed crash test were conducted to evaluate the mechanical properties of the joints. The highest tensile peak load with large deformation was observed for the hybrid joining process which has attained 48% higher than the self-piercing rivet. Moreover, the hybrid and adhesive joints were observed better strain energy compared to self-piercing rivet. The fractography analyses were revealed that the mixed mode of cohesive and interfacial fracture for both the hybrid and adhesive bonding joints.

Key Words : Tensile shear characteristics, Pre-coated metal, Self-piercing rivet, Hybrid joining, Adhesive bonding

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 CO₂ 배출량과 같은 환경 규제가 강화됨에 따라 환경친화적인 도장공정을 구현하는 기술의 개발이 진행되고 있다. 기존의 자동차 도장공정은 세척 및 인산염 전처리 공정(Pre-treatment), 전착도장(Electronic coat), 중도(Primer), 상도베이스코트(Base coat), 상도클리어코트(Clear coat) 등의 복잡하고 연속적인 공정을 통해 최종 도장을 구현하였으나, 이러한 단계별 도장공정은 다양한 설비 및 많은 인력 등이 필요하여 비친환경적이고 비효율적인 공정으로 지적되어 왔다¹⁻³⁾. 이러한 기존의 자동차 도장공정의 문제점을 해결하고자 새롭게 개발되고 있는 도장공정 기술은 roll coating process를 적용한 선도장 강판 도장방법이다. 선도장 강판은 강판 제조시 도료가 강판에 직접 도장되는 방법으로 미리 도장된 metal sheet이라는 뜻에서 Pre-coated metal(PCM) 혹은 coil coating이라 지칭한다. 자동차용 선도장 강판은 차체 용접 후 도장하는 방법과 달리 강판을 가공하여야 하기 때문에, 차체 도막 표면에 손상을 줄 수 있는 용접 공정을 적용할 수가 없다⁴⁾. 이에 따라 접착제를 이용한 접착 방법이나, 용접이 아닌 기계적 체결에 의한 방법, 또는 이 두 방법을 이용한 하이브리드 접합 기술을 적용해야 한다⁵⁾. 다양한 기계적 체결 중 SPR(Self-piercing Rivet)이란 상부 펀치와 하부 다이 사이에 홀가공되지 않은 두 개 이상의 판재를 리벳을 이용하여 고속으로 기계적 체결을 할 수 있는 공정이다. SPR은 저항 점용접 공정만큼 짧은 시간의 접합이 가능하며, 리벳 압입 방식으로 판재의 열 변형이 발생하지 않아 도장된 소재와 코팅된 소재 조합뿐만 아니라 저항 점용접으로 접합하지 못하는 이종조합의 접합에 적용할 수가 있다⁶⁾. Choi⁷⁾ 등은 접착제에 클린칭 접합을 적용한 하이브리드 접합의 접합강도 평가 및 접착제 경화시점이 접합부 강도 및 파단형상에 미치는 영향에 대한 연구를 진

행하였으며, 인장전단시험 결과 하이브리드 접합부 파단하중이 클린칭 접합에 비해 우수하다고 보고하였다. Abe⁸⁾ 등은 SPR을 이용하여 알루미늄 합금 및 연강의 접합을 위한 유한요소 해석에 대한 연구를 진행하였으며, 또한 Han⁹⁾ 등은 SPR을 이용한 부식저항이 뛰어난 전기이동피복 코팅한 고강도 저합금강(HSLA) 및 아연도금된 알루미늄과의 코팅층 효과에 대한 연구를 진행하였다. 그러나 PCM강판과 기존 철강 소재의 이종조합에 대한 SPR 접합부 기계적 특성 평가 및 접착제와 기계적 체결 공정이 접목된 하이브리드 접합부 기계적 특성 평가 및 파단 원인에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 자동차용 PCM 강판과 용융아연도금강판의 이종조합에 대하여 접합방법(기계적 접합, 접착제 접합 및 하이브리드 접합)에 따른 접합부의 전단인장특성을 비교 고찰하고, 각 파단모드의 특성을 분석하여 접합 건전성을 평가하는데 있다. 특히 차체 충돌안전성 평가인 고속충돌테스트를 통해 모사 부품 단위의 접합성능 또한 비교 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에는 두께가 0.8mm인 340MPa급 자동차용 PCM 강판과 두께가 0.7mm인 용융아연도금강판(SGACUD)으로 이종조합 접합실험을 실시하였다. 연구에 사용된 PCM강판의 경우 각 표면은 Primer coat와 Clear coat로 구분되어 있어(Fig. 1) 각각의 면과 용융아연도금강판의 이종조합 실험을 개별적으로 진행하였다. 인장전단강도 시험편의 길이는 100mm × 25.4mm 로 절단하였으며, 겹침 간격은 25mm 동일하게 적용하였다. 접착제 접합(Adhesive bonding) 및 하이브리드 접합(Hybrid joining)에 사용된 접착제는 Henkel사의 Terokal 5016 구조용 접착제이며, SPR

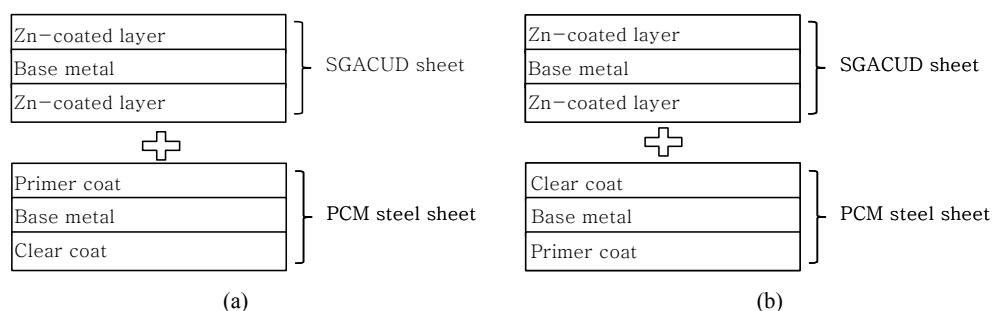


Fig. 1 Schematic view of joint combination (a) SGACUD steel and PCM steel sheet with primer coat face (b) SGACUD steel and PCM steel sheet with clear coat face

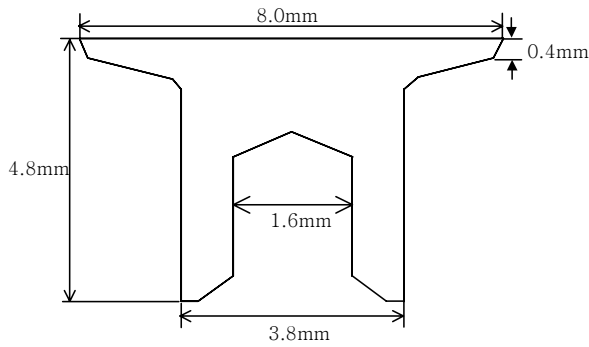
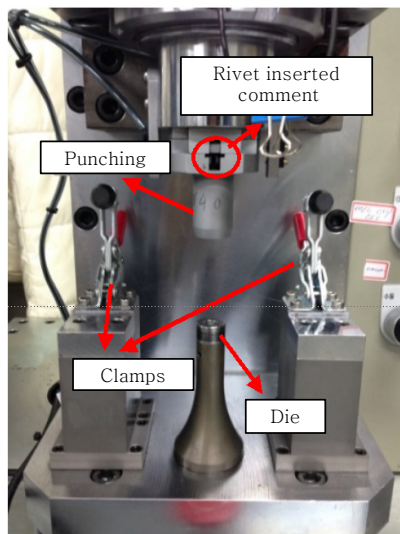
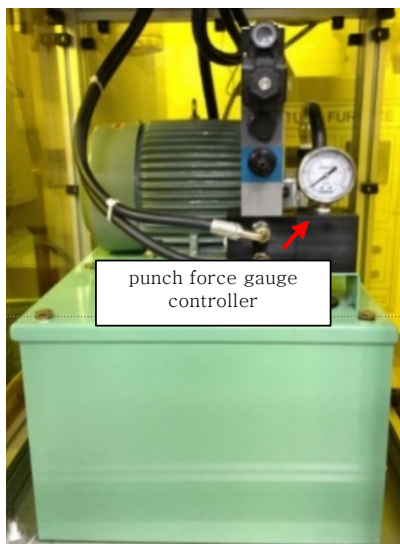


Fig. 2 Schematic illustration and dimensions of rivet



(a) Mechanical joint



(b) Hydraulic pressure control

Fig. 3 Self-piercing rivet system for this experiments

에 사용된 리벳은 스틸 재질 타입을 사용하였고, 리벳 헤드부 등 주요 치수는 Fig. 2에 나타내었다.

PCM 강판과 SGACUD와의 접합을 위해 접착제 접합, 기계적 체결(SPR) 및 접착제 접합과 기계적 체결을 결합한 하이브리드 접합 공정을 수행하였다. 본 연구에 사용한 SPR 장비는 랩스케일용으로 제작된 장비로써 함께 부착된 유압 조절 장치를 통하여 펀치압력을 변화시킬 수 있으며, 최대 가압력은 60kN까지 가능하다. 기계적 체결 실험장비는 Fig. 3에 나타내었다. 접착제 접합 및 하이브리드 접합 공정은 접착제를 하부판재인 PCM 시험편에 먼저 도포한 후 0.2mm 크기의 글래스비드(glass bead)를 사용하여 접착층의 두께가 0.2mm로 균일하게 유지할 수 있도록 하였다. 접착제 경화를 위하여 160°C로 유지된 오븐에서 30분 간 경화시켜 시험편을 제작하였다. 접합방법에 따른 인장전단특성을 비교하기 위하여 소재 조합 2종 (1st: PCM 강판의 Primer coat face와 SGACUD, 2nd: PCM 강판의 Clear coat face와 SGACUD)과 접합방법 3종(Adhesive bonding, SPR, Hybrid joining)으로 총 6종의 인장전단특성을 평가하였다. Fig. 4는 인장전단시험을 위한 시험편의 치수와 접합방법을 나타내었다. 인장전단시험은 만능인장시험기를 사용하였으며 크로스헤드 속도는 3mm/min으로 적용하였다. 시험은 각 시험편당 3회씩 반복시험을 진행하였다. 겹치기 접합 시 접합부 체적을 측정하는 것이 불가능하기 때문에 인장전단시험 결과는 인장전단강도(MPa)가 아닌 인장전단하중(kN)으로 나타내었다. 인장전단하중 시험 후 파단모드 비교를 위하여 접합조합 별 파단된 시험편을 관찰하였다. Fig. 5는 고속 충돌테스트를 위한 시험편 모식도를 나타내었고, 충돌시험은 낙중 시험(drop weight) 방식으로 진행하였다. 고속충돌테스트용 시험편 제작 순서는 먼저 PCM강을 HAT타입으로 절곡한 후, 평판형 SGACUD와 접합하였다. 체결순서는 체결 후 변형을 최소화하고자 각 외각부 모서리부터 회전하면서 순서대로 진행하였다. 접합이 완료된 HAT시험편 상, 하부에 두께가 3.5mm인 길이 300mm × 300mm의 정사각형 판재를 부착하여 Gas Tungsten Arc 용접으로 고정시켜 시험편을 제작하였다. 자유낙하용 고속충돌에 사용된 낙하 추의 무게는 350kg이고 낙하높이는 0.4m에서 진행되었으며, 낙하속도는 약 2.8m/s(10.1km/h)로 하여 충돌 실험을 수행하였다. 자유낙하 고속충돌 후 변형길이를 측정하여 흡수에너지 크기를 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SPR 접합 최적 펀치압력

SPR 체결공정의 경우 접합 품질 판단 기준은 판재와

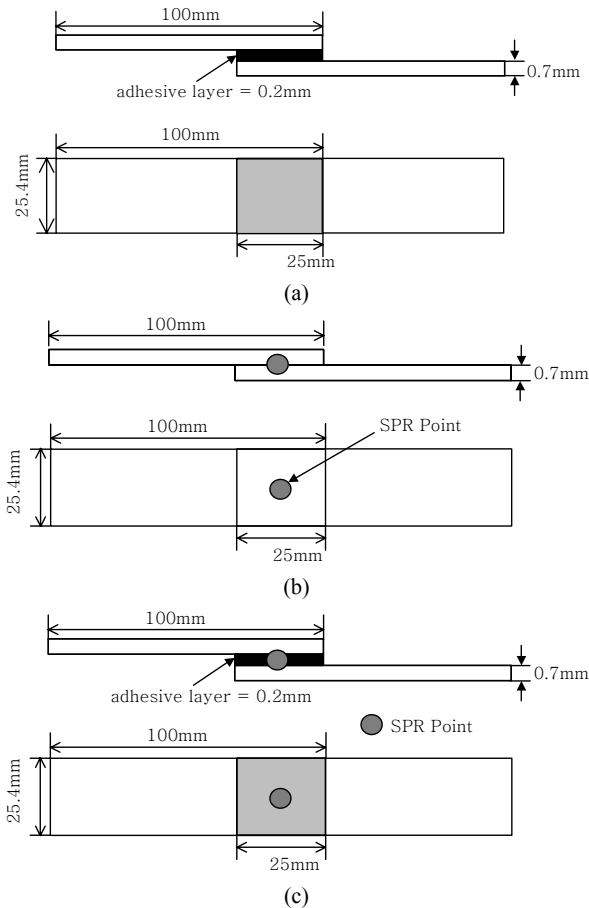


Fig. 4 Schematic diagram showing the joining methods of (a) Adhesive bonding (b) Self-piercing Riveting (SPR) (c) Hybrid joining

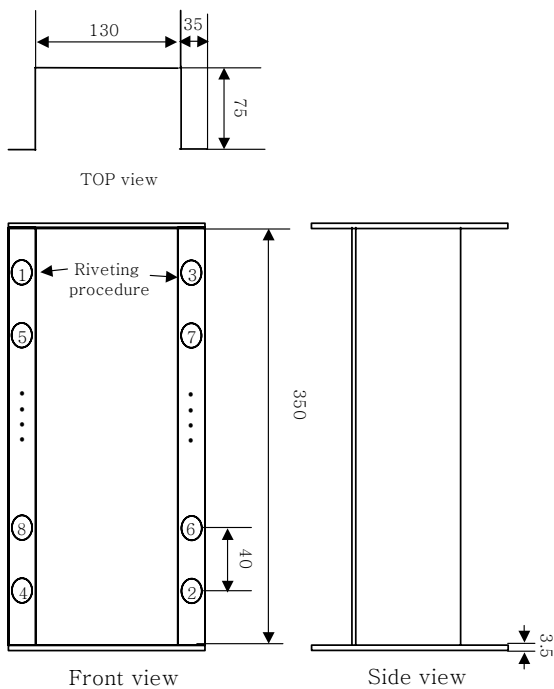


Fig. 5 Dimensions of the SPR and Hybrid joining of hat type sample for high speed crash test

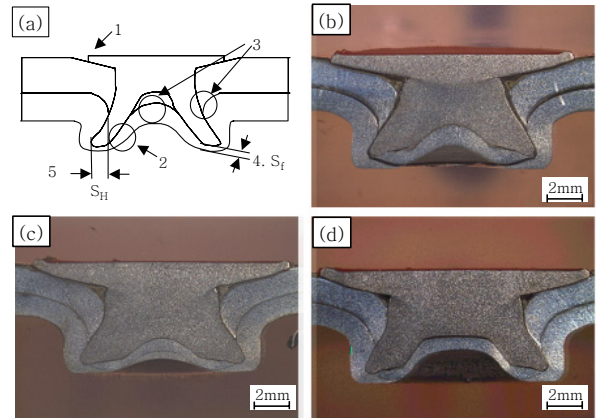


Fig. 6 Schematic of SPR quality criteria (a) and cross-section image of SPR according to various punch force (b) 452 kgf, (c) 502 kgf, (d) 552 kgf

리벳사이의 체결력으로 결정되며, 이를 결정하는 변수는 각각 리벳의 형상과 체결 펀치압력이다. 최적 SPR의 체결력은 접합 시험편의 인장강도에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 따라서 최적 체결 펀치압력의 도출을 통해 SPR 체결 강도 최적화 도출을 시도하였다. Fig. 6는 기계적 체결의 품질 판단 기준과 각 펀치압력에 따른 시험편 단면을 관찰한 것으로, 펀치압력은 452에서 552kgf로 50kgf 씩 증가시켰다. 이때 접합 품질 판단 기준은 대략 5가지 요소로 구성되어 있으며, 각각 (1) 리벳 헤드부와 상부판재 사이의 갭 유무, (2) 하부 판재 혹은 리벳 체결부 크랙 발생 유무, (3) 상부판재와 하부판재 경계면 및 리벳 중앙부와 판재 사이의 갭 유무, (4) 리벳 발과 하부판재 사이 거리(S_f)가 최소 0.2mm 이상 그리고 (5) Interlock 값의 크기(S_H)로 보고되고 있다⁶⁾.

위의 접합품질 판단 인자 5개의 측정 결과, 접합품질 판단 인자 (1)의 기준에서 리벳 헤드부와 상부판재 사이의 갭은 모든 펀치압력에서 관찰되지 않았다. 또한 품질기준 (2)의 리벳 체결부 크랙 또한 3가지 펀치압력 조건들에서 발생하지 않았으나, 하부판재의 크랙 발생 유무의 경우 502kgf 조건을 제외하고는 모두 크랙이 발생하였다. 품질기준 (3)의 리벳 중앙부와 판재 사이에서도 502kgf 조건을 제외한 모든 펀치압력에서 판재계면의 소성거동 차이에 따른 갭이 존재하였고, 상부판재와 하부판재 경계면에서의 갭은 502kgf에서만 존재하지 않았다. Fig. 7은 기계적 체결부의 접합품질판단기준 (4), (5)에 따른 펀치압력 별 주요 치수의 측정 결과를 도시하였다. 리벳 발과 하부판재 사이 거리(S_f), 즉 품질 판단 기준 (4)의 경우 452kgf에서는 하부판재의 크랙에 따른 판재 사이의 갭이 존재하기 때문에 실측값 측정이 불가능하였으나, 502kgf 펀치압력에서는

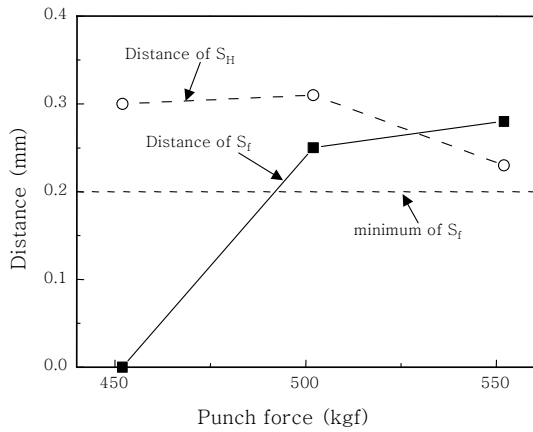


Fig. 7 Distance of S_f and S_H for various punch force

0.3mm로 S_f 의 최소값 0.2mm 이상을 만족하고 있다. 또한 펀치압력 552kgf에서는 하부판재의 크랙 발생을 무시하고 측정 결과, 펀치압력 증가에 따른 S_f 증가는 거의 무시할 수준으로 판단된다. 마지막으로 품질 판단 기준 (5)의 경우 체결 펀치압력 502kgf를 적용한 시험편 Interlock 값이 가장 큰 것으로 관찰된다. 이와 같이 5가지의 품질 판단 기준들을 고려하여 SPR 체결공정을 진행한 결과, 최적 펀치압력은 502kgf로 선정되었다.

3.2 접합방법에 따른 인장전단특성 비교

Fig. 8은 접합방법에 따른 PCM강판의 Primer coat 및 Clear coat와 용융아연도금 강판과의 이중조합 접합부 최대 인장전단하중 결과를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 PCM강판은 Base Metal을 기준으로 상부와 하부에 각각 Clear coat 및 Primer coat로 구성되어 있어 Zn-coating 강판과의 접합에 두 가지 접합경우의 수를 모두 고려하여 인장전단 특성을 비교하였다. Primer coat + SGACUD 조합의 경우 인장전단

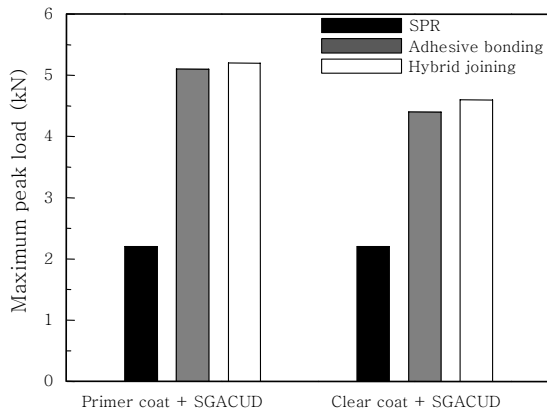


Fig. 8 Maximum load for various bonding method of the sheet combinations

강도는 각각 2.2, 5.1 및 5.2kN이며, Clear coat + SGACUD 조합의 경우 각각 2.2, 4.4 및 4.6kN으로 측정되었다. 접합방법에 따른 최대 인장전단하중은 SPR, Adhesive bonding 그리고 Hybrid joining 순으로 각각 증가하였다. Fig. 8에서 Primer coat + SGACUD 조합과 Clear coat + SGACUD 조합의 인장전단강도를 체결 공정 별로 비교해보면 SPR 체결의 경우 최대 인장전단하중은 동일한 값을 보이고 있다. Clear coat + SGACUD 조합의 경우 Clear coat의 마찰계수가 낮아 SPR 체결 시 접합특성에 차이가 존재할 것으로 예상 되었으나, 인장전단강도에는 큰 영향이 없었다.

Primer coat + SGACUD 조합의 최대 인장전단하중 값이 Adhesive bonding과 Hybrid joining 모두에서 Clear coat + SGACUD 조합의 값보다 약 0.5kN 높은 것으로 관찰되었다. 이러한 결과의 원인으로는 Adhesive bonding과 Hybrid joining에 적용된 접착제와 PCM 강판의 Primer coat 및 Clear coat 각각에서 SGACUD 강판의 Zn-coating 층과의 결합력에 있어 큰 차이가 존재하기 때문으로 생각해 볼 수 있다. Adams¹⁰⁾ 등의 결과에 따르면 접착제 접합의 경우 접합부 강도는 접착제 물성뿐만 아니라 피착재 물성에도 영향을 받으며, 특히 피착재의 탄성계수, 그리고 피착재의 두께 및 물성과도 큰 영향이 있는 것으로 보고하였다. 본 연구에 사용된 PCM강판의 Clear coat는 딥드로잉 성형성을 고려한 linear polyester 수지로 구성되어 있으며, Primer coat는 내식성을 확보하기 위하여 polyester polyol resin이 적용되어 있다. 따라서 Clear coat에 접착제 도포 후 경화공정을 적용할 경우 Clear coat의 주성분인 수지와 접착제와의 반응에 따른 결합력이 약한 반면, Primer coat는 접착제와 유사한 resin으로 구성되어 있어 경화 후 결합력이 높을 것으로 예상된다. 이러한 접착제와 coating층간의 결합력의 차이가 최종 인장전단강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 위의 결과를 확인하기 위하여 PCM 강판의 Clear coat + Clear coat 조합과 Primer coat + Primer coat 그리고 SGACUD + SGACUD 각각의 동종 coating 부 접착제 접합 시험편들에 대하여 인장전단 시험을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Clear coat 조합의 경우 가장 낮은 인장전단강도를 보이며, SGACUD 조합 그리고 Primer coat 조합 순으로 증가하였다. 따라서 접착제와 각 coating layer 간의 결합력의 경우 Primer coat가 가장 높은 것으로 판단되며, SGACUD 강판과 Primer coat 또는 Clear coat PCM 강판과의 이중접합의 경우 Fig. 8에서 확인된 바와 같이, Primer coat + SGACUD 조합에서

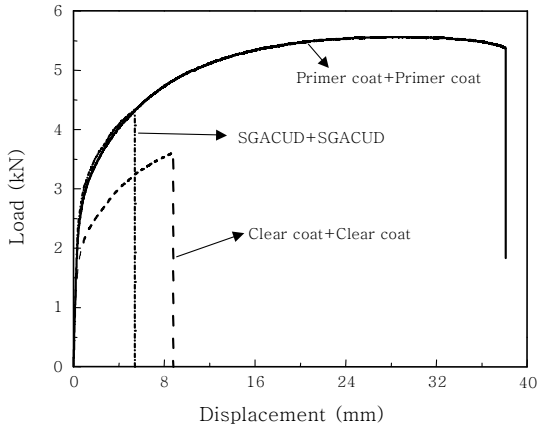


Fig. 9 Load-displacement curves for adhesive bonding of the similar sheet combinations

Clear coat + SGACUD 조합 보다 높은 인장전단강도 확보가 가능하였다.

Primer coat + SGACUD 조합에 Adhesive bonding 또는 Hybrid joining이 적용된 모두의 경우에서 최대 인장전단하중은 큰 차이가 없으며, 이러한 경향은 Clear coat + SGACUD 조합에서도 동일하였다. 이러한 결과는 Fig. 8의 비교 그래프 결과 중 SPR 체결과 Adhesive bonding의 인장전단하중 값의 차이에서 유추가 가능하다. Adhesive bonding의 최대인장하중 (약 5kN)이 SPR 체결의 최대 인장하중 (약 2kN)보다 2배 이상 크기 때문에 파단직전까지 접합부에 부가되는 하중의 대부분은 접착제 접합부에서 지탱을 하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 최대인장강도 측면에서는 Hybrid joining의 경우 SPR 체결의 접합특성이 상쇄되기 때문인 것으로 판단되나, 추가적인 변형에너지 또는 흡수에너지의 측면은 아래에서 개별적으로 고찰하였다.

Fig. 10(a)는 Primer coat+ SGACUD 조합에 대하여 접합방법에 따른 하중-변위 곡선 그래프를 나타낸 것이다. SPR 접합방법의 경우는 Adhesive bonding과 Hybrid joining보다 Peak load 및 최대변위 값이 크게 낮다. Adhesive bonding의 경우 약 2mm 변위까지 하중이 급격히 증가하다가 이후 변위의 증가에 따라 완만한 하중 증가 추세를 보이고 있다. 이는 SGACUD 소재의 변형에 따른 가공경화가 발생한 것에 기인한다. 지속적인 가공경화가 Peak load에 도달하는 약 14mm의 변위에서 파단이 시작되고 네킹과 소성변형 없이 전형적인 취성파단, 즉 접착제의 interfacial fracture 곡선 유형을 보이고 있다. Hybrid joining의 하중-변위 곡선 그래프는 Adhesive bonding 대비 최대하중이 미세하게나마 높은 값을 보이고 있다. 따라서 이러한 결과는 SPR 체결부에서도 일부 하중 지탱능력을 보유하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 특히 Hybrid join-

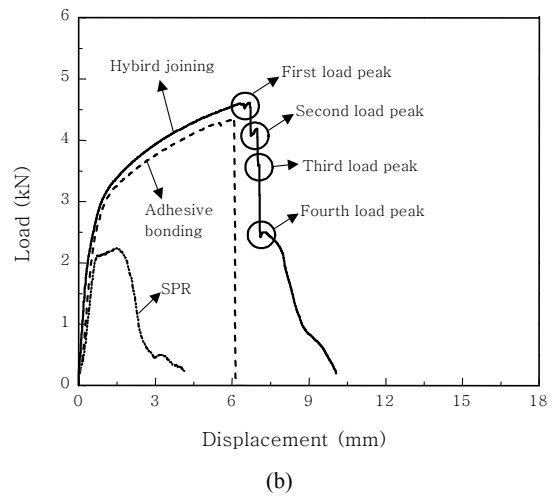
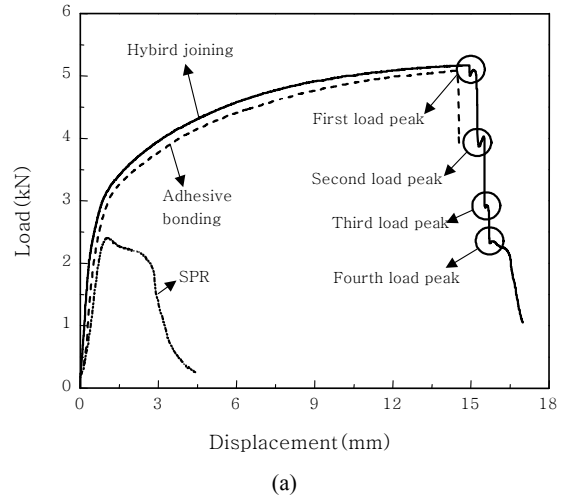


Fig. 10 Load-displacement curves for various bonding method of the sheet combinations ; (a) Primer coat + SGACUD and (b) Clear coat + SGACUD

ing에서는 최대 하중값에 도달 후 최종파단이 될 때까지 불연속적인 파단이 발생하며, 이에 따른 총 4번의 peak 값 변화를 보이고 있다. 이러한 불연속 파단의 결과는 접착제파단이 interfacial fracture 유형으로 진행되는 과정에서 리벳과 판재 계면의 결합력이 파단 진행을 지연하는 효과임을 알 수 있다. 따라서 Hybrid joining의 경우 파단지연효과에 따른 충격에너지 흡수능이 약 10% 증가하는 것으로 판단된다.

Clear coat + SGACUD 조합에 각 접합방법 별 하중-변위 곡선 그래프를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 각 접합방법 모두 Primer coat+ SGACUD 조합과 유사한 하중변화 거동을 보이고 있으나, 약 0.5kN 낮은 최대 하중값을 가진다. Adhesive bonding과 Hybrid joining 모두 최대 변위는 약 1/2 수준으로 감소되었다. 즉 지속적인 변위증가 시 접착제와 Clear coat간의 계면결합력이 충분하지 못한 것에 기인하며, 약 6mm 변위에서 급격한 interfacial fracture의 거동을 보이

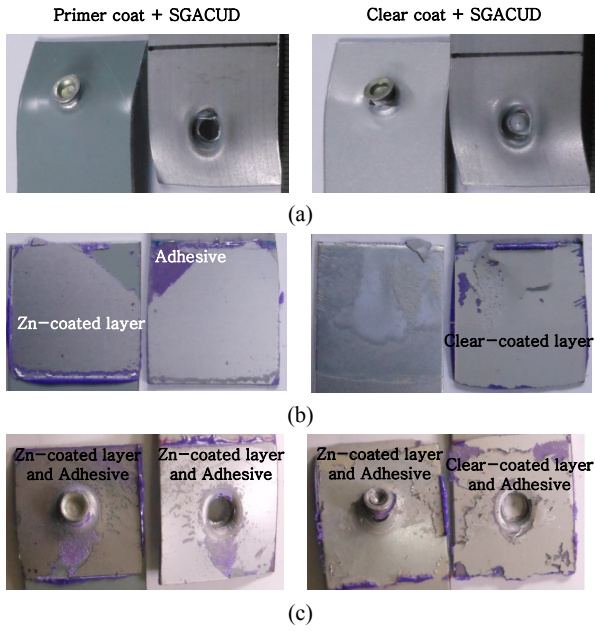


Fig. 11 Fracture mode images of (a) SPR (b) Adhesive bonding and (c) Hybrid joining

고 있다. 그러나 Hybrid joining의 경우는 Primer coat + SGACUD 조합과 유사하게 불연속 파단의 양상이 관찰된다.

Fig. 11은 각 판재 조합별 접합방법에 따른 인장전단시험 후의 파단면을 나타낸 것이다. Fig. 11(a)의 SPR 접합 인장전단 후 파단면을 관찰해보면 두 판재 조합에서 버튼 파단(button failure)으로 이행되는 것이 관찰되고 있다. 접착제 접합의 경우는 파단 모드에 따라 크게 3가지의 파단모드로 구분되는데, 접착층 내에서 접착제가 양분되는 응집파괴(cohesive fracture), 모재와 접착제 계면을 따라 발생하는 계면파단(interfacial fracture), 마지막으로 응집파괴와 계면파단이 함께 발생하는 혼합파괴(interfacial + cohesive fracture)가

있다¹¹⁾. 그러나 본 연구에서 사용된 PCM 강판의 경우는 각각 Primer coat 및 Clear coat 가 존재하고 SGACUD 강판은 Zn-coated layer가 존재하기 때문에 파단모드를 좀 더 세분화할 필요가 있으며, 각각의 파단모드 명칭 및 모식도를 Fig. 12에 나타내었다¹²⁾. Fig. 13은 Primer coat + SGACUD 조합의 인장전단 파단 시험편에 대하여 파단 단면을 광학현미경으로 관찰한 것으로, SGACUD의 Zn-coated layer가 일부 접착제에 잔존해있으며, 나머지 파단면은 Primer coat 내에서 파단이 이행되는 것으로 보아 응집파괴 및 계면파괴가 동시에 존재하는 혼합파괴가 발생한 것으로 판단된다. 또한 Fig. 14는 Clear coat + SGACUD 조합의 파단모드로 SGACUD의 Zn-coated layer 층에 접착제와 Clear coated layer가 부착되어 있는 것과 동시에 접착제와 Clear-coated layer 사이에서 계면파단이 발생한 것을 관찰하였다. 또한 Clear coat 내에서도 파단이 발생한 것으로 보아 혼합파괴가 발생한 것으로 판단된다. 마지막으로 Fig. 11(c)에서 보여지는 하이브리드 접합에서는 Primer coat + SGACUD 조합의 경우 SPR 은 버튼 파단이 발생하였으며, 일부 잔존해 있는 접착제와 Primer coat에 Zn-coated layer가 불규칙적으로 부착되어 있기 때문에 접착제 접합과 동일한 혼합파괴가 발생한 것을 관찰하였다. Clear coat + SGACUD 조합의 경우는 일부 잔존해 있는 Clear-coated layer 및 Zn-coated layer와 접착제가 관찰되는 것으로 보아, Clear coated layer 및 Zn-coated layer와 접착제간의 혼합파괴가 발생한 것으로 판단된다. 하이브리드 접합에서 파단모드와 하중-변위그래프간의 상관관계를 분석해보면 second와 third peak load는 파단이 진행되는 과정에서 접착제와의 계면 사이에서 파단모드가 복합적으로 발생한 것과 SPR 체결부의 파단이

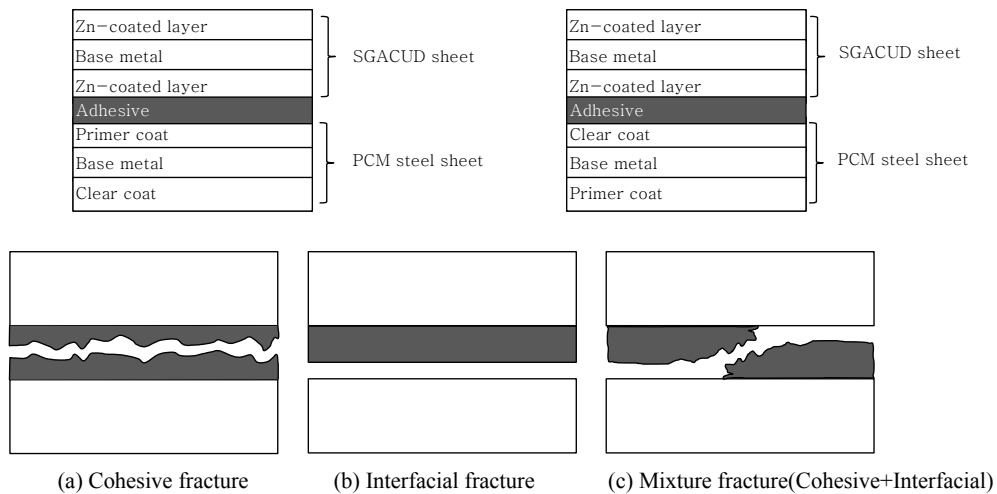


Fig. 12 Schematic diagrams for fracture mode of adhesive bonding and hybrid bonding

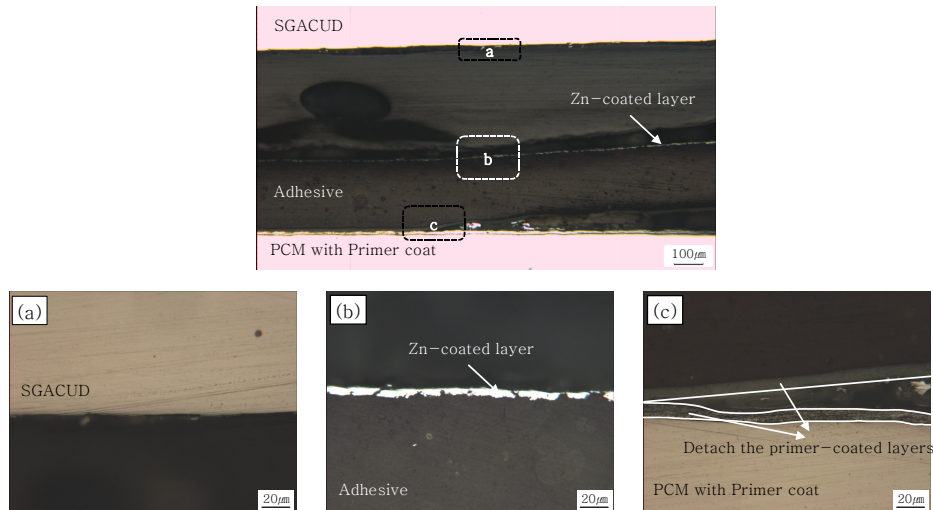


Fig. 13 Fractography images showing the adhesive bonding of tensile failure joints of SGACUD+Primer coat

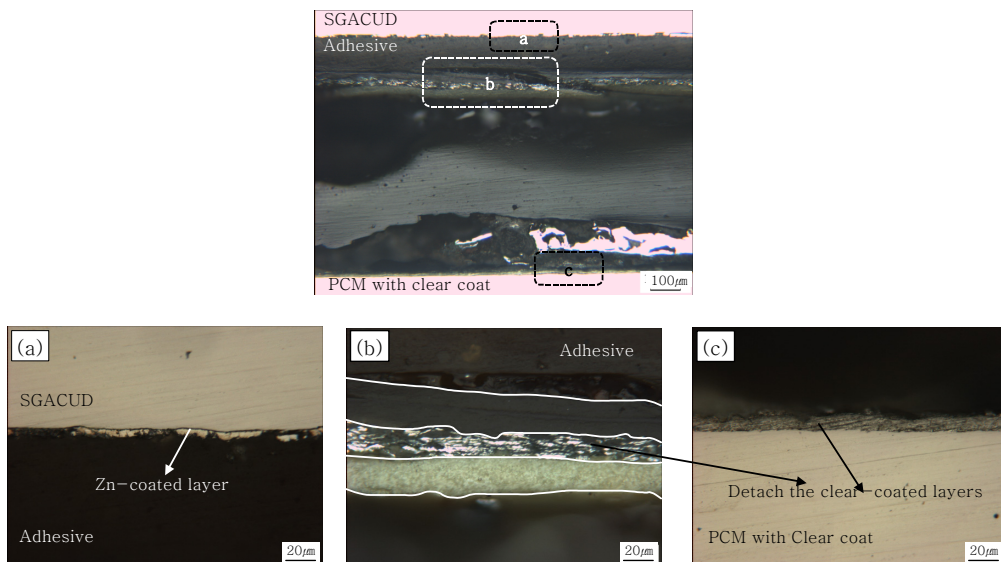


Fig. 14 Fractography images showing the adhesive bonding of tensile failure joints of SGACUD+Clear coat

최종적으로 발생하고 있기 때문이고, fourth load peak 는 판재가 분리되는 과정에서 마지막으로 SPR 에 의해 불연속 하중이 발생한 것으로 사료된다.

지 판재 사이의 거리는 고속충돌 테스트 후 250mm이 고, 변형률은 30%로 SPR의 값보다 약 4%의 변형률 (15mm)이 감소한 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 동

3.3 낙중 시험(drop weight)테스트 결과

Fig. 15는 SPR체결과 Hybrid joining 접합방법에 따른 자유낙하 고속충돌테스트 후의 시험편을 나타낸 것이다. Adhesive bonding의 경우는 Hybrid joining 과 유사한 인장전단하중을 갖기 때문에 진행하지 않았다. 기계적 체결의 경우 고속 충돌 후 상부지지 판재와 하부지지 판재 사이의 거리가 235mm로 고속충돌테스트 수행 전 시험편 전체길이인 357mm에 비해 변형률은 34%인 반면, Hybrid joining의 경우 상, 하부 지

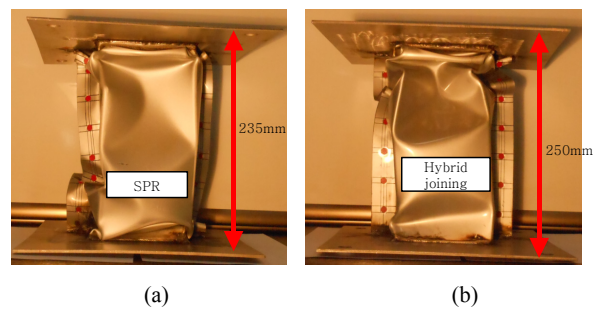


Fig. 15 Deformed shape and dimension after the crush test (a) SPR (b) Hybrid joining

일 충돌 하중 환경 하에서 Hybrid joining의 변형흡수 에너지 성능이 더욱 우수한 것을 확인하였다.

4. 결 론

PCM강과 용융아연도금강판으로 이루어진 이중조합의 접합방법에 따른 인장전단특성 평가와 파단모드에 대한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) SPR 접합의 경우 품질 판단 기준에 따라 최적 펀치압력을 도출하였으며, 리벳 헤드부와 상부판재 사이의 겹, 판재와 판재 사이의 겹, 하부 판재의 크랙 발생 여부와 리벳 발과 하부판재 사이의 거리, Interlock 값을 고려하였을 때, 펀치압력이 502kgf일 때 가장 우수한 체결력을 갖는 결과를 얻었다.

2) 최대 인장전단하중의 경우는 판재조합에 관계없이 SPR, Adhesive bonding, 그리고 Hybrid joining 순으로 증가하였으며, Adhesive bonding과 Hybrid joining의 최대 인장전단하중의 경우는 약 0.1kN으로 차이가 크지 않았으며, 이는 Hybrid joining 시 SPR의 접합특성이 상쇄된 것으로 사료된다.

3) 각 접합방법의 최대하중, 최대변위를 관찰한 결과 Primer coat + SGACUD 조합이 Clear coat + SGACUD 조합보다 2배 이상의 변위가 증가하였으며, Hybrid joining의 경우는 파단 진행 중 4번의 load peak값이 발생하였으며, 이는 파단 시 집착제와 Primer coat layer간의 혼합과피 및 리벳 결합부의 존재에 따른 불연속 파단이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

4) SPR 과 Hybrid 접합의 자유낙하 고속충돌테스트 결과, Hybrid joining이 SPR 보다 약 4% 정도 변형률이 낮아 흡수에너지가 더 우수한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음 (2015AA181)

References

1. Hyeong-Deuk Hwang, Yong-Hee Lee, Hyun-Joong Kim, Seung Man Noh, Joon Hyun Nam, Jong Myung Park and Jong-Hoon Kim, Technology for Innovative Automotive Coating Process - Technological Development Trend of Automotive Pre-coated Metal Sheet -, *KIC News*, 13(6) (2010), 36-52 (in Korean)
2. D. Santos, H. Raminhos, M. R. Costa, T. Diamantino and F. Goodwin, Performance of Finished Coated Galvanized Steel Sheets for Automotive Bodies, *Progress in Organic Coatings*, 62(3) (2008), 265-273
3. Yong-Hee Lee, Je-ik Moon, Hyun-Joong Kim, Jae-Young Lee, Seung Man Noh and Joon Hyun Nam, Effect of Formability of Physical Properties of Polyester/Melamine Cured Coating Using Polycarbonate Diol with Various Molecular Weight, *Journal of Adhesion and Interface*, 12(4) (2011), 105-110 (in Korean)
4. Z. W. Wicks, F. N. Jones, S. P. Pappas and D. A. Wicks, Organic Coatings -Science and Technology-, *John Wiley & Sons, Inc.*, (2007)
5. P. Becher, Challenges Facing Adhesives Technology in Coping with the Conflicting Demands of Robust Production Processes, *Car body Painting*, (2009)
6. Steve Westgate, Fritz Liebrecht and Roger Doo, The effect of Process variables in Self-piercing Riveting, *Sheet Metal Welding Conference*, (2002)
7. Chul Young Choi, Dulal Chandra Saha, Wonho Choi, Jun-Ki Kim, Jong-Hoon Kim and Yeong-Do Park, Evaluation of Failure Mode and Strength on Baking Time of Adhesive for Hybrid Joining, *Journal of KWJS*, 29(6) (2011), 669-675 (in Korean)
8. Y. Abe, T. Kato and K. Mori, Joinability of aluminum alloy and mild steel sheets by self piercing rivet, *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (2006), 417-421
9. L. Han and A. Chrysanthou, Evaluation of quality and behavior of self-piercing riveted aluminum to high strength low alloy sheets with different surface coatings, *Materials and Design*, 29(2) (2008), 458-468
10. R. D. Adams, J. Comyn and W. C. Wake, Structural adhesive joints in engineering. 2nd edition, *Chapman & Hall*, (1997), 17-20
11. Ildong Choi, Jiyoun Park, Jae-Won Kim, Mun-jin Kang, Dong-Cheol Kim, Jun-Ki Kim and Yeong-Do Park, A study on tensile shear characteristics for weld-bonded 1.2GPa grade TRIP steels with changes in nugget diameter for automotive body application, *Journal of KWJS*, 33(2) (2015), 69-77 (in Korean)
12. Tae Hyun Kim, Jeong Suh, Hee Shin Kang, Young Shin Lee and Chun Dal Park, Fatigue Assessment Using SPR and Adhesive on Dissimilar Materials, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 28(10) (2011), 1204-1209 (in Korean)