

차체 소재 다변화에 따른 체결 및 접합기술

김 용*[†] · 박 기 영* · 곽 성 복**

*고등기술연구원 로봇/생산기술센터

** (주)덕양산업 기술연구소

Mechanical fastening and joining technologies to using multi mixed materials of car body

Yong Kim*[†], Ki-Young Park* and Sung-Bok Kwak**

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Eng., Yongin 449-863, Korea

**R&D Center, Duckyang Ind. Co., Ltd., Suwon 443-766, Korea

[†]Corresponding author : welding@iae.re.kr

(Received May 15, 2015 ; Accepted June 17, 2015)

Abstract

The ultimate goal of developing body is revealed the "lightweight" at latest EuroCarBody conference 2012 and the most core technology is joining process to make lightweight car body design. Accordingly, in this study, the car body assembly line for the assembly process applies to any introduction, particularly in the assembly of aluminum alloy and composite materials applied by the process for the introductory approached. Process were largely classified by welding (laser, arc, resistance, and friction stir welding), bonding (epoxy bonding) and mechanical fastening (FDS, SPR, Bolting and clinching). Applications for each process issues in the case and the applicable award was presented, based on the absolute strength of the test specimens and joining characteristics for comparative analysis were summarized. Finally, through this paper, we would tried to establish the characteristics of the joint for lightweight structure.

Key Words : Lightweight, Joining technology, Mechanical fastening, Adhesive bonding, Euro car body, Tensile shear strength

1. 서 론

자동차산업에서는 국가 간 FTA 체결로 인한 시장이 글로벌화 되었으며, 경쟁력 확보를 위한 경량화 및 CO₂ 가스 저감기술에 대한 개발 경쟁이 치열하다. 미래형 자동차 등장에 따른 자동차산업 패러다임 변화로 인해 경량 고안전 차체 및 제조기술의 개발이 끊임없이 요구되고 있으며, 특히 재료의 고강도화, 비철금속화 및 고분자 소재로의 대체를 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 특히 기존 스틸 차체에서는 고전적인 용접법인 저항용접 및 아크용접이 주를 이루었지만, 소재가 비철 또는 고분자 소재로 변해감에 따라 그에 따른 공정 또한 필수불가결하게 개발되어야 한다. 스틸 소재는

점점 고강도 박육화되고 있어 박판 용접기술에 대한 공정 확보가 중요하며 알루미늄의 경우 저항용접을 대체할만한 강력한 접합/체결기술이 개발 중이다. 특히 기존 스틸부품에서 알루미늄으로 대체 시 기존 스틸부위와의 연결부(이종소재 연결부)에 대한 접합/체결기술을 적절히 선정하는 것은 차체의 생산성 및 안전성 측면에서 매우 중요하게 고려되어야 한다.

한편 기존 스틸 재료와 고분자 소재 부품을 연결해야 되는 경우에는 더 이상 원자 간의 금속결합을 유도하여 접합하는 전통적인 용접방식으로는 접근이 불가하다. 이 경우에는 체결 및 접착기술이 사용되어야 하며, 본 논문에서는 이에 따른 적용 가능한 공정기술에 대한 방법론적인 검토가 이루어졌다.

2. 자동차산업에서의 접합기술 동향

최근 유로카바디(EuroCarBody Conference 2012) 전시회에서 참석자들을 상대로 설문 조사를 진행한 결과, 차체 부품 개발의 최대 목표는 Fig. 1과 같이 “경량화”로 나타났으며, 이에 대한 핵심 기술로는 Fig. 2와 같이 “접합기술”이 가장 중요한 것으로 밝혀졌다. 또한 앞으로의 소재개발 동향에 대한 조사 결과를 살펴보면, Fig. 3과 같이 향후 5년 내 소재 사용 전망 부분에서 기존 스틸 소재보다는 알루미늄 및 고분자소재의 사용이 늘어날 것으로 예측되고 있다¹⁾. 이러한 결과를 종합하여 판단해 보면, 향후 다양한 소재에 대한 용접 접합 및 체결기술에 대한 중요도는 매우 높고 이에 대한 기술 확보가 곧 제품의 경쟁력과 직결될 것이라고 판단된다.

이에 따라 실제 유로카바디에 출품된 대표차종 중 2012년도에 랭킹 1위를 차지한 차량에 대한 소재 적용 현황 및 접합체결기술에 대해 조사하였다¹⁾. 대상 차량은 독일 Benz社의 SL231 차량으로 차체 구성소재 조사 결과 Fig. 4와 같이 차체 소재 중 스틸의 비중은 겨

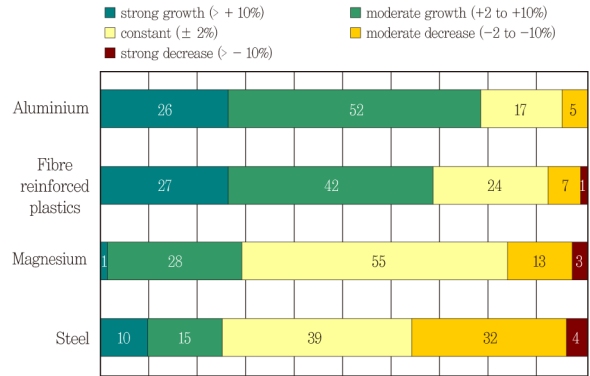


Fig. 3 Survey forecast for the main material used within the next five years¹⁾

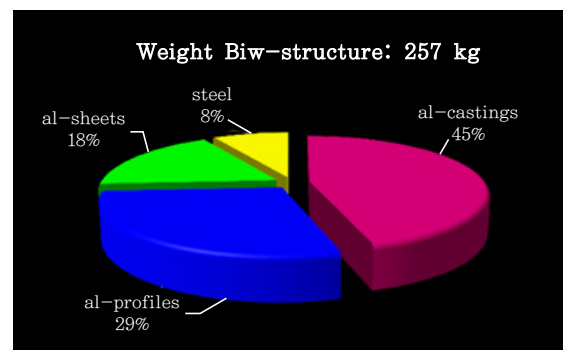


Fig. 4 Material ratio to construct for Benz SL231 vehicle¹⁾

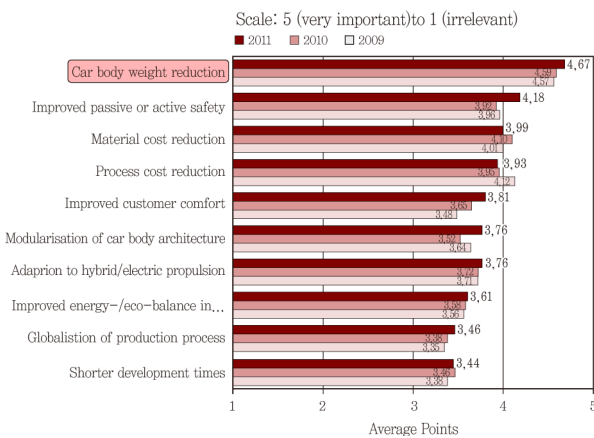


Fig. 1 Survey results for the main objective to develop the car body¹⁾

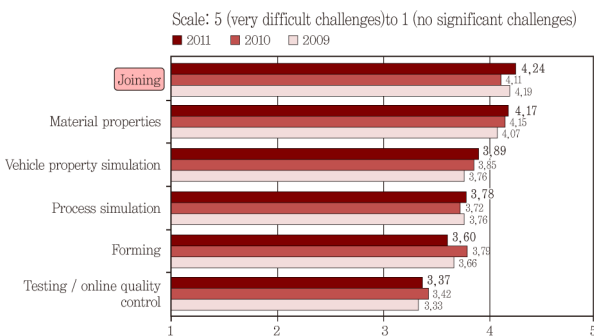


Fig. 2 Survey results for the most difficult challenges to develop the car body¹⁾

우 12%에 불과했으며 알루미늄 베이스의 차량을 출품하여 그 기술력을 인정받았다.

한편 본 차량의 제작을 위해 적용된 조립공정 기술을 살펴보면, 기존 스틸 강판에 주로 적용되어 오던 점용접 대신 Table 1과 같이 아크용접 및 본딩, 그리고 리벳, 클린칭, 스크류 체결과 같은 기계적 체결방식이 적용되었다. 이러한 본딩 및 기계적 체결기술의 경우 금속간의 용융접합이 아니기 때문에 비단 알루미늄뿐만 아니라 플라스틱이나 기타 비철소재, 이종소재 등의 조립에도 매우 유용한 공정이다. 특히 조립기술의 경우

Table 1 Joining processes to make BIW for Benz SL231¹⁾

Joining technique	Number of joints or length of seams
Spot welds	135
Arc welding	59.8m
FSW	8.1m
Adhesive bonding	76.2m
Rivets	1,235
Clinch-spots	213
Screw & flow drills	152
Impact tacks	14

소재의 변경 및 다변화에 따라 기존의 고전적인(conventional) 용접기술에서 벗어난 전혀 다른 패러다임을 적용하여 향후에는 기계적 체결(mechanical joining) 및 접착기술(adhesive bonding)에 대한 많은 수요가 예상되기 때문에 글로벌 시장사회에서 경쟁력을 갖기 위해서는 이들 기술에 대한 선행검토 및 노하우의 확보가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

3. 접합 및 체결기술

3.1 기계적 체결

스틸과 알루미늄 또는 스틸과 고분자 플라스틱 이종 소재 연결부를 효율적으로 체결하는 방법 및 사례 조사를 위해 우선적으로 기계적 체결방식에 따른 공정들을 해외논문^{2,3)} 및 기술자료⁴⁾ 등을 통해 확인하였으며, 그 결과를 종합하면 Fig. 5와 같다. 기계적 체결은 우선적으로 대상 소재 연결부에 미리 홀 가공 여부에 따라 분류할 수 있으며, 또한 체결 방향에 따라서도 분류가 가능하여 총 4가지 방식의 공정으로 분류할 수 있다.

첫째로 구멍을 미리 뚫어놓은 다음 체결하는 방식은 널리 알려진 바와 같이 대표적으로 리벳 공정과 볼트너트 공정으로 나눌 수 있다. 이 중 리벳의 경우 한쪽 면만을 사용하여 체결하게 되며 볼트 공정의 경우 너트와 함께 연결되므로 양쪽 면을 모두 이용하게 된다. 그러나 본 공정은 사전 홀 가공에 따른 추가 공수가 필요한

단점이 있다.

이에 반해 두 번째로 홀의 사전가공 없이 직접적으로 체결하는 방식이 있는데, 대표적으로는 윈 사이드 드릴(flow drill screw, FDS) 및 셀프 피어싱 리벳(SCR), 클린칭 등의 공정이 적용된다. 이들 방식은 사전 홀 가공의 공수는 없으나 체결을 위한 일정 이상의 압력이 필요하게 되어 변형 또는 손상 등의 문제점을 유발할 수 있다. 뒤에 각각의 공정기술에 대해 간략히 설명하도록 한다.

3.1.1 볼팅(Bolting)

볼트는 너트와 한 쌍으로 사용되며 일정한 나사산을 가지고 체결되는 가장 대표적인 기계적 체결방법이다. 볼트의 종류 및 크기, 형상 등은 매우 다양하며 그에 따른 규격도 KS B 0233 : 강제볼트, 작은 나사의 기계적 성질, KS B 1010 : 마찰 접합용 고장력 6각 볼트 너트 및 평 와셔의 세트, KS B 1002 : 6각 볼트 등 매우 세세하게 구분되어 있다.

이와 같은 볼트 체결공정은 제약 없이 다양한 소재에 대한 접합이 가능하다. 체결 강도는 모재 및 볼트의 고유 강도에 의해 결정되며, 강도 평가 시 인장전단강도 특성이 매우 중요한 인자로 작용할 뿐만 아니라 강도 및 소재에 따라 파손 모드 또한 틀려지게 된다. 대표적인 파손모드를 조사한 결과는 Fig. 6과 같으며, ASTM D5961에서는 파손모드에 대해 보다 세부적으로 구분하고 있다.

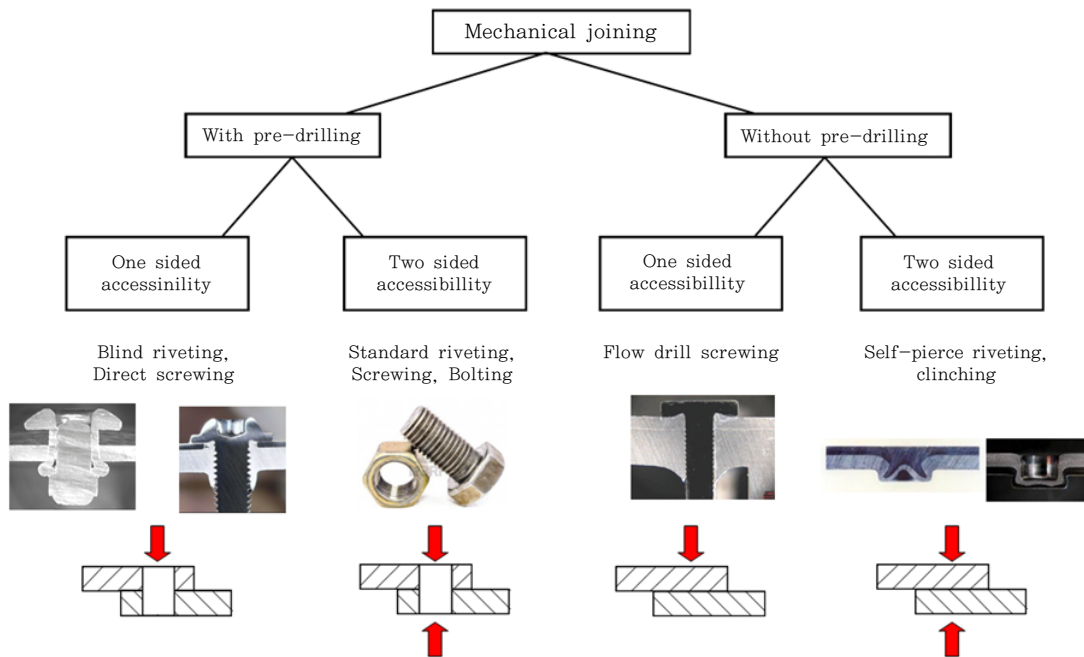


Fig. 5 Classification of mechanical fastening process

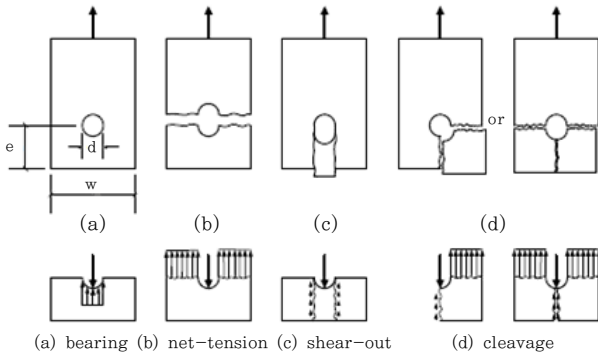


Fig. 6 Various fracture mode in bolting process

3.1.2 원사이드 드릴(Flow drill screw, FDS)

본 공정은 리벳 피스를 리벳 건에 장착 후 일정 이상의 압력으로 체결부를 순간적으로 펀칭하는 방식으로 접근성이 매우 좋을 뿐 아니라 Pre-drilling 공정이 필요 없어 생산성 및 작업 효율이 매우 좋은 장점이 있다. 다양한 소재의 이종접합이 가능할 뿐 아니라 구조용 접착제와의 혼용 사용도 가능하다. 그러나 얇은 판이나 강도가 약한 플라스틱에 적용할 경우에는 체결압에 의한 크랙이 발생할 가능성이 많아 소재에 대한 제약이 일정 존재하는 단점이 있다. Fig. 7에 원사이드 드릴에 대한 개략도 및 자동차산업에서의 응용사례에 대해 나타내었다.

3.1.3 셀프 피어스 리벳(Self-pierce rivet, SPR)

본 공정은 저항 점용접과 같이 양쪽에서 압착하여 리벳을 기계적으로 체결하는 공정으로서 마찬가지로 Pre-drilling 공정이 필요 없어 운용 측면에서 매우 효과적인 공정이다. 구조용 접착제와의 혼용이 가능하며 짧은 공정시간 및 우수한 체결강도를 나타낼 뿐 아니라 다양한 소재의 이종접합이 가능하여 현재 알루미늄 차체의 조립공정으로 가장 널리 사용되고 있다. 본 공정은

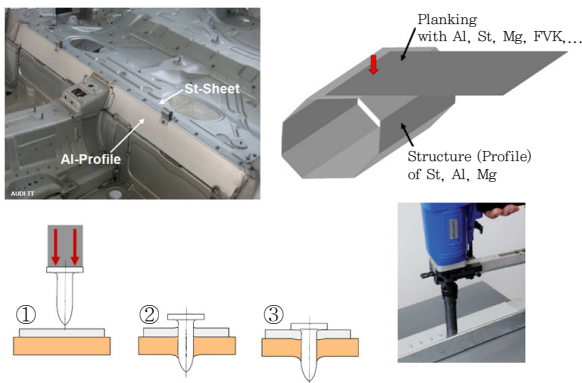


Fig. 7 Principle and application of flow drill screw process⁴⁾

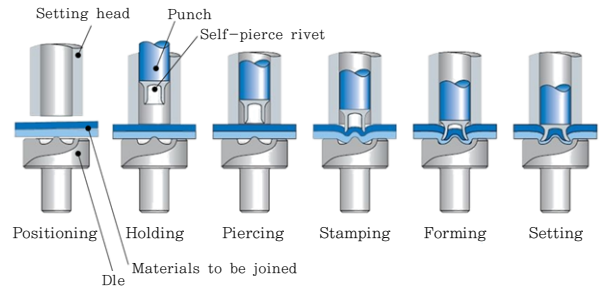


Fig. 8 Principle of Self-pierce rivet process⁴⁾

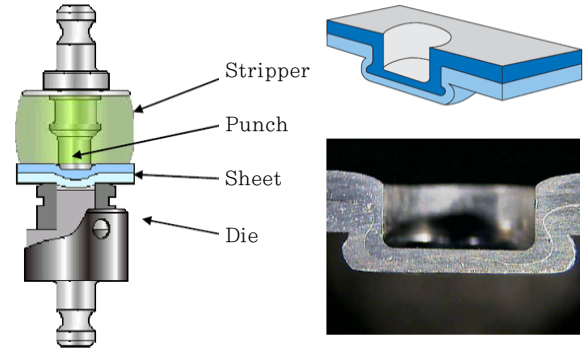


Fig. 9 Principle of clinching process⁴⁾

2000년도 후반에 국내에 급속히 보급되어 현재는 보편화된 공정으로서 향후에도 경량소재로 변경됨에 따라 상당 부분 적용점을 대체할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 8에 그 원리에 대해 나타내었다.

3.1.4 클린칭(Clinching)

마찬가지로 Pre-drilling 공정이 삭제되며 별도의 소모재없이 판재의 소성가공을 통해 기계적으로 체결되는 방식이다. 일정 이상의 신율이 확보된 소재의 경우 적용이 가능하며 다양한 소재의 이종접합이 가능하다. 본 공정은 점용접과 마찬가지로 양쪽 동시 가압을 통해 소성변형을 일으킴으로서 제작되는 원리로 타 공정과 비교해서 강도는 약간 낮다. 그러나 본 공정은 제품의 손상없이 육안만으로도 접합 품질의 확인이 가능한 장점이 있어 가전조립 분야 등 적용분야가 점차 확대되고 있는 추세이다. Fig. 9에 그 원리에 대해 나타내었다.

3.2 본딩 접합 (Adhesive bonding)

고분자 소재로 구성된 차체는 대부분 섬유강화플라스틱(Fiber Reinforcement Plastic, FRP)으로 제작된다. 이를 복합재료라고 하는데 이렇게 복합재료로 이루어진 구조물 또는 부품의 효율성은 약간의 예외적인 경우를 제외하고는 구조물 자체보다 접합부에 의해서 결정되는 경우가 대부분이기 때문에 복합재료 접합부의

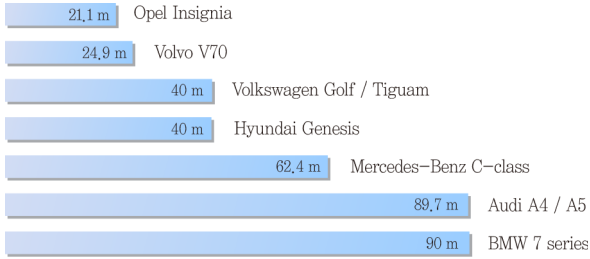


Fig. 10 The amount of the structural adhesive bonding in each car⁵⁾

설계는 매우 중요한 이슈가 된다. 이러한 복합재료의 접합방법은 크게 기계적 체결과 접착제에 의한 체결로 크게 분류할 수 있다. 여기서 접착제에 의한 체결 시 기계적 체결법에 비하여 넓은 면적에 하중을 분포시킬 수 있으며, 구멍가공이 필요 없다. 또한 구조물의 무게를 거의 증가시키지 않으며, 얇은 피접합물을 접합시킬 수 있을 뿐 아니라 밀봉효과(sealing) 및 열과 전기의 부도체 역할을 할 수 있다. 또한 기계적 접합법에 비해 뛰어난 피로저항을 가지고 있으며 감쇠나 소음을 줄이는 효과도 우수하여 이음부 설계 및 공정 적용 시 접착제에 의한 이음부 제작에 대해서도 고려되어야 한다. 그러나 일반적으로 접착제를 이용 시에는 피접합물을 부수거나 손상을 입히지 않고는 분해가 어려우며, 사용 온도, 습도 및 다른 주위 환경에 의하여 영향을 받을 수도 있어 사용에 신중을 요한다.

Fig. 10은 해외에서의 차종에 따른 구조용 접착제의 적용현황에 대해 벤치마킹 조사한 결과이다⁵⁾. 조사 결과와 같이 차종 및 공정, 적용부위에 따라 자동차 한 대 당 최대 90 m 이상을 접착하게 되며 이에 따라 충돌성, 소음성, 재진성, 내식성, 설계 유연성 등의 많은 장점을 갖게 된다. 특히 자동차용 소재가 고분자 플라스틱으로 대체될수록 조립공정의 유연성 확보에 어려움이 있을 수 있는데 적절한 접착제의 사용을 통해 이를 충분히 극복할 수 있을 것으로 사료된다.

한편 Fig. 11은 기존의 접합방법과 함께 구조용 접착제 사용 시 응력분포에 대해 설명하고 있다. 접착제에 의한 응력의 분산은 결국 충돌성 향상과 함께 다양한 장점이 있다. 이러한 특징을 갖는 구조용 접착제의 적용에 따른 물성 평가는 접착강도 측면에서 크게 인장전단강도 및 박리시험 평가를 통해 그 강도를 비교평가하게 되며, 이는 전반적으로 ASTM 규격을 따른다.

접착제를 사용한 접합에서는 접착제와 피접착제 사이의 계면 친화력에 따라 접합강도가 결정되며, 강도의 확보를 위해서는 표면처리가 무엇보다 중요한 것으로 알려져 있다. 양호한 접착부를 얻기 위해서는 시중에 나와 있는 2만여 종의 접착제 중 가장 용도에 맞는 접

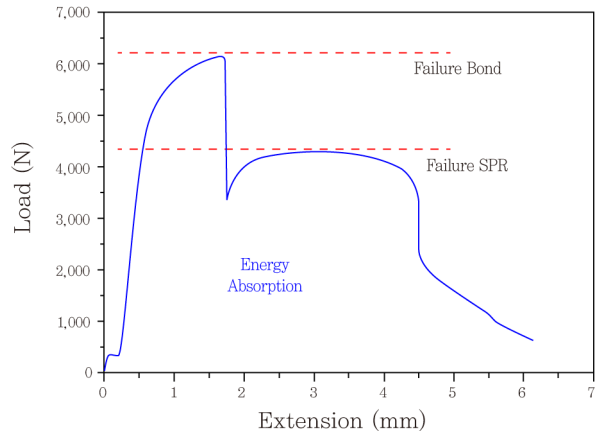
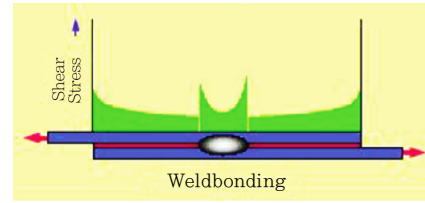


Fig. 11 Stress distribution of hybrid joining specimen

착제를 선정하는 것도 중요하지만 표면 상태도 대단히 중요한 요인이 된다. 일반적인 금속이나 플라스틱의 표면에는 이형제, 광택제, 기름뿐만 아니라 산화피막이 존재하고 있기 때문에 이것들이 효과적으로 제거되어야 하며, 여기에는 사포 등에 의한 기계적 제거 및 용제에 의한 화학적 제거법이 이용되고 있다^{6,7)}. Fig. 12는 접착제의 젖음성(wet-ability)과 표면처리 효과에 대해 나타낸다. 즉, Fig. 12에서는 알루미늄 시편에 대해 사포로 사전 처리하여 산화피막을 제거한 것과 그렇지 않은 시편에 대해 에폭시 본드를 이용한 접착 및 인장전단 시험 후 파단 형상을 볼 수 있다. 표면처리 시편에서는 접착제의 양호한 젖음성으로 인해 계면결합력이 에폭시 분자 간 결합력보다 높으므로 최종적으로 혼합 파괴모드(mixed failure)가 발생하며, 그렇지 않은 경우는 계면결합력이 보다 낮으므로 접착계면파괴모드(adhesive failure)가 나타나게 된다. 이에 따른 인장전단하중에 대한 차이는 Fig. 13에 나타내었다.

표면처리는 알루미늄 시편에 대해 각각 #100, #400 및 #800의 입도를 갖는 연마재를 사용한 것과 표면처리를 전혀 하지 않고 바로 접합한 시편, 총 4종류에 대해 이루어졌다. 그 결과, 표면처리를 한 시편에서는 입도에 의한 신율 차이는 있으나, 파단하중에 대한 차이는 입도와 연관성을 찾지 못하였다. 그러나 표면처리를 전혀 하지 않은 시편의 경우 1,000 N 이하의 하중에서 쉽게 파단되며 그 강도 차이는 50배 이상으로 나타났다. 이상의 결과에서도 알 수 있듯이 접착공정에서의 표면처리는 매우 중요할 뿐만 아니라 표면처리 정도와

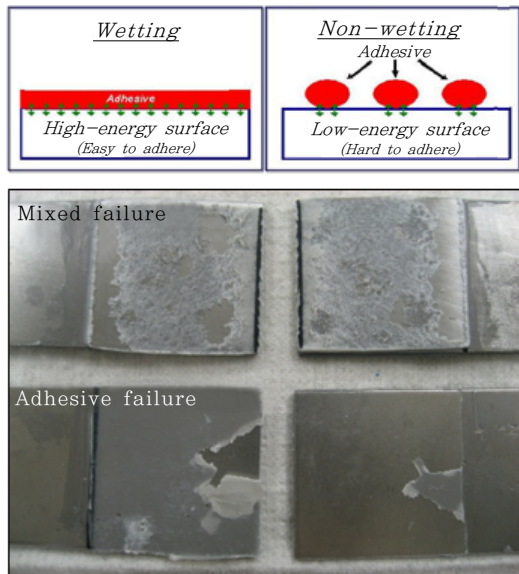


Fig. 12 Importance of the surface treatment in material bonding

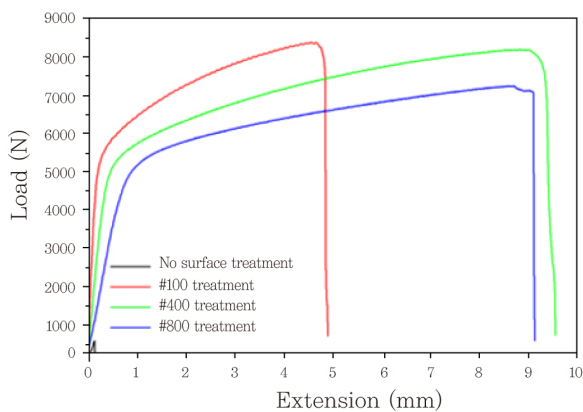


Fig. 13 Results for tensile-shear load depend on surface treatment

접합강도의 상관관계를 도출하는 것도 연구자 입장에서는 매우 중요한 숙제라고 판단된다.

4. 다양한 공정의 적용성 검토

앞서 소개한 다양한 공정에 대한 이종소재의 적용성을 우선 검토하였으며, 우선적으로 알루미늄과 플라스틱 간 조립에서의 기계적 체결공정의 적용 가능성을 검토하였다. 시험에 사용된 소재는 알루미늄의 경우 6000계열 소재로 두께는 1.2 mm를 사용하였다. 한편 플라스틱의 경우 열가소성 장섬유(long glass fiber) 강화 폴리프로필렌 복합재료를 사용하였다. 본 재료의 섬유 함유량은 약 30%, 인장강도는 약 100 MPa이며, 두께는 3 mm를 일괄 적용하였다.

이종소재 체결을 위해 각각의 공정을 적용한 결과, 볼



Fig. 14 Results for each mechanical fastening processes (SPR and FDS) to make aluminum and plastic joining

팅을 제외한 나머지 공정은 적용이 어려운 것으로 확인되었다. 그 이유는 플라스틱의 특성 상 소성 가공력이 금속보다 훨씬 낮은 뿐만 아니라, Pre-drilling이 없는 상태에서 체결을 위해 장비에서 고압의 압력을 인가할 때 발생하는 충격하중을 견디지 못하고 체결 중 파손되기 때문이다. Fig. 14는 체결과정 중 SPR 및 FDS 공정의 실험장치 및 체결결과를 보여주고 있다. 이에 따라 복합재료를 포함한 플라스틱 구조물의 경우는 볼팅(리벳팅) 및 본딩 접착을 혼용한 고전적인 조립방식이 향후에도 계속 중용되어 사용될 것으로 판단된다.

마지막으로 스틸과 알루미늄과 이종재료 체결 및 접합실험을 실시하여 공정별 체결(접합)부 인장전단강도에 대해 단순 비교를 실시하였다. 스틸은 일반 차체에 흔히 사용되는 냉연강판을 사용하였으며 소재 두께는 알루미늄과 동일한 1.2 mm이다. 공정의 단순 비교를 위해 시편의 겹침 면적은 동일하게 25×25 mm로 하였으며, 공정별로 달리 소모성으로 사용되는 체결 부품의 크기(지름)는 가장 일반적으로 사용되는 것으로 선택 사용하였다(ex: M6 볼트). 소재의 조합은 각각 스틸 간, 알루미늄 간 그리고 스틸과 알루미늄의 이종소재로 구성하였고, 적용 공정은 볼트, SPR, FDS, 본딩 및 본딩과 SPR이 동시 적용된 하이브리드 접합부까지 총 5개 공정에 대해 단순 강도를 비교하였다.

그에 따른 종합적인 결과는 Fig. 16에 나타내었다. 우선 공정에 따른 강도 비교 시, 각각 상이한 체결강도를 보이는데 이는 적용되는 소모재의 크기 및 고유 강

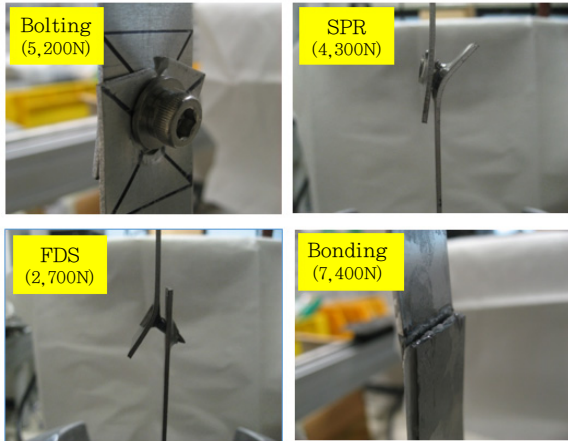


Fig. 15 Tensile-shear test for each process

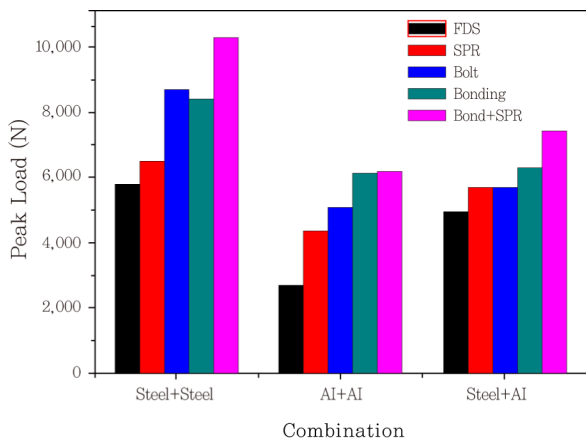


Fig. 16 Comparison of fastening strength depend on the material combination and applied process

도와 관계된다. 또한 체결공정과 본딩에 대한 결과 비교에 대한 해석은 달리 판단해야 되는데 이는 본딩 강도가 결국은 접합부 면적과 비례하여 증가되기 때문이다. 한편 소재 조합의 측면에서 공정 비교 시 기계적 체결의 경우 기본적으로 모재의 고유 물성에 따른 차이가 크게 나타난다. 기본적으로 스틸이 알루미늄 대비 높은 물성을 나타내기 때문에 체결강도에 대한 결과도

이와 비례하여 나타나게 되는 것이다.

이상의 비교는 체결 강도에 대해서만 단순 비교한 것이며 각각의 공정별 특성, 접합부 형상, 적용 소재 등에 따라 적절한 공정을 선택하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 차체 소재 다변화의 흐름 및 이에 따른 체결 및 접합기술에 대한 개론적인 소개와 함께 단순한 강도검증을 통해 공정의 적용성을 비교하였다. 자동차산업 시장은 글로벌 경쟁이 날로 치열해지면서 안전성 및 내구성이 복합되면서도 가벼운 차체 기술의 개발이 계속적으로 요구되고 있으며, 이에 따라 1.0 GPa 이상 급의 초고강도강의 확대와 함께 비철금속과 복합재료 등의 신소재가 꾸준히 출연되고 있다. 이에 따라 향후 차체업계에서도 급변하는 기술에 대비하여 기존의 전통 용접기술에서 벗어난 접합 및 체결에 대한 기술적 대비가 필요할 것이다.

References

1. Automotive Circle Int., EuroCarBody 2012, 14th Global Car Body Benchmarking Conference, (2012)
2. Robert W. Messler, Trends in key joining technologies for the twenty first century, *Assembly Automation*, 20 (2) (2000), 118-128
3. T. A Barnes and I.R Pashby, Joining techniques for aluminium space-frames used in automobiles: adhesive bonding and mechanical fasteners, *Journal of Materials Processing Technology*, 99 (1) (2000), 72-79
4. Audi AG, SSP 383 Audi TT coupe 07-Body, (2006)
5. The Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, (1998), 355-359 (in Korean)
6. Dow Betamate adhesives overview, Dow Chemical, (2010), 12-14
7. W. Brockmann, et. al., Adhesive bonding, WILEY-VCH Verlag GmbH, (2005), 125-137



- 김 용
- 1979년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 용접공정
- e-mail : welding@iae.re.kr



- 곽 성 복
- 1972년생
- 덕양산업(주) 기술연구소 선행연구팀
- 고분자 복합소재/자동차 소재
- e-mail : sbkwak@dyauto.kr



- 박 기 영
- 1962년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 아크 및 레이저
- e-mail : young@iae.re.kr