



경량 철강 차체

강수영, 이원범, 김홍기, 최한호, 김성주, 박성호 | 포스코 기술연구소

1. 서 론

현재 전세계적으로 약 7억대 이상의 자동차가 운용되고 있는데, 이는 지구상의 인구 10명당 1대 이상에 해당되는 막대한 숫자이다. 이에 따라 막대한 양의 화석원료를 사용하게 되고, 그 결과 발생하는 배기가스가 지구온난화의 주범으로 지목되고 있다. 따라서 자동차의 연비향상이 매우 중요한 과제가 되었다. 자동차의 연비향상을 위해서는 엔진·구동계의 효율향상, 주행저항 감소 및 경량화 등의 기술이 요구된다. 이중 소재측면에서 자동차 경량화를 위한 방안은 고강도화에 의한 차체 경량화인데, 차체는 탑승자의 안전과 직결되는 부품으로서, 차체경량화를 위해서는 탑승자의 안전을 어떻게 확보하는가가 우선적으로 고려되어야 할 사항이다. 이러한 안전성 확보 및 차체 경량화의 두 가지 문제를 동시에 해결하기 위해 경량재료로의 치환이 활발하게 진행되고 있다. 이중 철강재외의 경량재료에 의한 치환은 경제성의 문제로 인하여 아직까지는 상업화가 급속도로 이루어지지 못하고 있으나, 최근 심각해지는 지구환경에 대한 대응을 위하여 점차 차체용 소재가 비철강 경량소재로 치환이 증가되고 있고, 따라서 미래에도 차체에 있어서 철강소재의 장점을 살리기 위해서는 경합소재에 대응할 수 있는 차체용 고강도강재의 개발과 철강을 기반으로 하는 경량 자동차 제작기술의 개발이 필요하게 되었다. 이에 따라 1994년 이후 여러 철강사들이 주체가 되어 철강소재를 기본으로 하는 경량차체를 제조하는 기술개발을 추진하게 되었고, 그 결과가 자동차 사들에 의해 큰 관심을 모으게 되었다.

이후 차체를 위주로 하던 ULSAB(Ultra Light Steel Auto Body) 기술은 closure에 대한 경량화를 추진하는 ULSAC(Ultra Light Steel Auto Closure), 그리고 suspension에 대한 경량화를 추진하는 ULSAS(Ultra Light Steel Auto Suspension)로 분기하여 발전하여 왔다. ULSAB 기술은 2단계로 추진되어 1998년 완료되었는데, 그 결과 철강재료를 사용하더라도 약 25% 정도의 경량화가 가능함을 입증하였다.

또한 ULSAC과 ULSAS도 최대 각각 46% 및 34%까지의 경량화를 이룰 수 있는 기술적 가능성을 제시하고 2000년에 완료되었다. 1998년-2002년 사이에 수행된 ULSAB-AVC (Advanced Vehicle Concept)는 철강소재를 기본으로 한 경량차량 제조기술에 대한 개발로서, ULSAB, ULSAC 및 ULSAS의 기술을 종합적으로 차량제조에 활용하고, 또한 새로운 철강차량 제조개념을 개발함으로써 철강소재를 기본으로 한 종합적인 경량차량을 설계하는 과제이다. 본 논문에서는 ULSAB의 간단한 소개¹⁻⁷⁾와 관련기술인 고강도강, TWB(Tailor Welded Blank)과

H/F(Hydroforming) 등과 최근 철강관련 신 가공기술로 부각되고 있는 P/H(Press Hardening)에 대해 기술하려고 한다.

2. 본 론

2.1 ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body)

ULSAB 기술은 자동차용 소재로서의 철강소재의 경쟁력확보를 위하여 1994년 7월 국제철강협회(IISI, International Iron & Steel Institute)의 주도로 시작되었으며, 연구기관으로는 PES(Porsche Engineering Services)가 선정되어 추진되었다. 최초의 목적은 철강소재를 활용한 차체의 경량화를 개념적으로 조사하는 것으로서 1995년 8월까지 Phase 1이 수행되었다. 이 기간동안 ULSAB program은 경량차체를 위한 design concept를 개발하고 충돌특성을 조사하는 것에 중점을 두었다. Benchmarking data를 기본으로 하여, 비교대상 차량의 미래 성능이 예측되고 ULSAB 구조의 구조특성 목표가 설정되었다. 또한 독립적으로 수행한 cost study에서 Phase 1의 개념은 그 당시의 차체를 제조하는 비용 이하로 생산이 가능함을 밝혀내었다. 이 결과 i) 고장력강의 적극적인 채용, ii) tailor welded blank, iii) assembly 조립시 laser welding의 적극 채용 그리고 iv) hydroforming의 적극적인 활용에 의해 철강소재를 사용하여 차체의 대폭적인 경량화가 가능함을 알 수 있었다. (표1)

표 1. Phase 1에서 얻어진 경량화 가능 무게 및 차체구조 특성

Performance	Phase 1 Results
Mass (kg)	205
Static torsional rigidity (Nm/deg)	19,056
Static bending rigidity (N/mm)	12,529
First body structure mode (Hz)	51

Phase 1의 개념설계가 성공적으로 끝나자 ULSAB Consortium은 Phase 2의 연구진행을 결의하여 1995년 11월부터 PES가 다시 연구를 진행하게 되었다. Phase 2의 전체적인 목표는 Phase 1의 결과를 실물제작에 의하여 입증하는 것으로서 ULSAB의 결과를 실증할 수 있는 차체제작을 포함하여 추진되었다. Phase 2에서 개발된 DH(Demonstration Hardware)를 사용하여 얻어진 실기 구조특성은 아래와 같다. 강성의 큰 향상을 이루면서 무게를 benchmarking된 동급의 차량 271kg에 비해 약 25% 감소시키는 것이 가능함을 입증하였다. 또한 경량화를 이루면서 cost 증가를 억제하는 것이 가능함을 입증하였는데, 즉, 미래에 가능한 철강차체의 가격에 비해서도 약 US\$32/차체 정도의 가격저하가 가능함을 보인바 있다.

표 2. ULSAB 결과와 benchmarking 결과의 비교

Performance	ULSAB Results	Benchmarking
Mass (kg)	203	271
Static torsional rigidity (Nm/deg)	20,800	11,531
Static bending rigidity (N/mm)	18,100	11,900
First body structure mode (Hz)	60	38

최근에는 철강사가 독자적으로 차체를 설계해서 강판시장을 확대하려는 노력들이 있는데, 그 대표적인 것이 TKS의 NSB(New Steel Body)이다. NSB는 TKS가 독자적으로 개발한 철강 경량화 차체로, 기존 생산차량인 Opel사의 Zafira 모델을 벤치 마킹한 프로젝트이다. 이 프로젝트는 ULSAB 프로젝트와 유사한 것으로, TKS의 재료, 가공, 용접 등 자동차 기술을 최대로 활용하여 차체개발을 하였다.

총 개발기간은 2년, 개발비는 250만EURO로, 최적의 경량화와 충돌에너지 만족을 위한 Steel Space Frame 설계개념을 도입하였다. 이 차체에는 하이드로 포밍이 17% 채용되었고, 고장력강이 84% 채용된 것이 특징이다. 또한 차량의 생산에서 고객 이송까지의 시간을 최소화 하기위해 포드, 혼다, TKS 등의 21개사가 모여 만든 3 DAY CAR 프로젝트 등도 있다.

2.2 고강도강

최근 환경규제와 승객의 안전에 대한 관심이 증가되면서 차체에 고강도강의 사용비율이 급격히 증가하고 있다. 현재 차체의 고강도강 적용비율이 30~40% 수준이지만 2005년 이후에는 70% 이상 증가할 것으로 예측하고 있다.^[8,9] 철강재의 사용을 촉진하기 위한 초경량철강차체(ULSAB-AVC) 프로젝트의 연구결과에서도 고강도강의 채용비율이 100% 이며, 특히 인장강도 590 MPa급 이상의 초고강도강(Advanced high strength steel)의 사용량이 85% 이상 차지하고 있다.^[10]

자동차의 차체에 적용되는 강판은 각각의 부품이 요구하는 특성에 맞게 설계되어지고, 개발 및 적용되고 있다. 그림 1에서 부품별로 자동차용 강판의 현재수준과 향후 적용추이를 표시하였다. 현재 자동차의 외판재는 차체의 외판의 설계에 만족하는 가공성이 요구되고, 외부의 약한 충격으로부터 손상이 일어나지 않아 자동차의 상품성을 높이는 역할을 한다. 따라서 외판을 결정짓는 가공성과 충분한 내 dent성을 갖는 고강도 강판이 주로 사용되고 있다. 기존에는 표면결함 발생이 적은 IF(Interstitial Free)형 고강도강이 주로 사용되어 왔으나, 가공 후 도장, 건조 과정에서 강도가 증가하는 BH(Bake Hardening)강의 개발로 현재 대부분의 외판재는 BH강으로 적용되고 있다.

최근에 경량화에 대한 요구가 더욱 거세지면서 일부 자동차사에서서는 항복강도가 낮고 BH성이 우수한 490 MPa급 DP(Dual-Phase)강을 적용하기 시작하였다.^[4] 내판재는 차량의 운행에 필요한 구동부품이나 다양한 내장재를 설치할 공간을 확보해야 하기 때문에 상당히 복잡한 형상으로 가공될 수 있도록 가공성이 우수해야 한다. 주로 심가공성이 우수한 IF형 고강도강이 지속적으로 개발, 적용되고 있다.

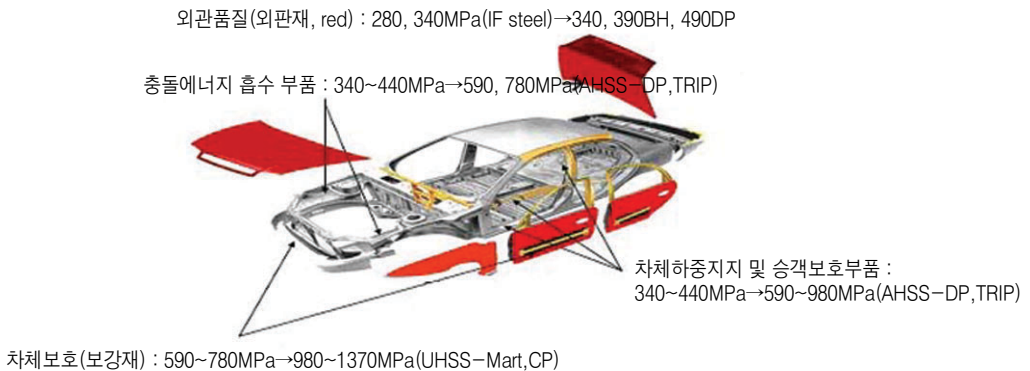


그림 1. The application trends of automotive steel sheets

한편 멤버, 필라 및 범퍼 보강재와 같은 차체의 구조부재는 차체의 골격을 이루고 있고, 차체하중을 지지하는 역할을 한다. 특히 멤버는 차량이 정면 충돌할 때 변형을 받아 충돌에너지를 흡수하고, 필라와 같은 구조부재는 측면 충돌하거나 차량이 전복되었을 때 승차공간 내의 사람을 보호해야 하기 때문에 변형에 대한 큰 저항성을 갖고 있어야 한다. 그리고 범퍼 보강재는 저속충돌에서 차체를 보호해야 하기 때문에 역시 변형에 대한 저항성이 커야 한다. 멤버와 필라와 같은 구조부재는 중간 정도의 강도를 갖는 고강도강을 주로 적용하여 왔는데, 최근에 차체경량화의 요구와 함께 더 높은 급의 고강도강이 적용되기 시작하였으며, 특히 고속변형에서 에너지 흡수능이 우수한 TRIP(Transformation Induced Plasticity)강 및 DP(Dual Phase)강에 대한 관심이 크게 증대되고 있다.^[8-10] 범퍼 보강재는 그 동안 석출경화능을 이용한 590 MPa급 저합금강(HSLA)을 이용하여 왔으나, 현재는 일부 차종에 대해서 변태조직강화에 석출강화를 더한 780 MPa급 이상의 초고강도강을 주로 사용하고 있다. 대형차를 선호하는 해외에서는 980~1370 MPa급 강을 적용하기도 한다.

2.3 TWB (Tailor Welded Blank)

TWB 기술은 최근 자동차 공업에서 가장 중요한 생산 기술의 하나로 인식되고 있다. 그러한 이유는 TWB 기술을 적용함으로써 차체 경량화와 구조적 강성을 동시에 향상시킬 수 있다는 특징이 있기 때문이다. 따라서 ULSAB에서도 여러 가지 신기술 가운데 TWB 기술을 핵심 기술로 다루고 있다. 일반적인 TWB에 대한 정의는 서로 다른 두께 또는 조성을 가진 각각의 블랭크를 접합하여 만든, 복합된 특징을 가진 하나의 강판을 의미한다. 이와 같이 제조된 TWB를 최종적으로 성형하여 3차원 형상의 부품을 만든다. 그림 2에서 보는 바와 같이 일반 공정은 블랭킹 강판을 성형 후 용접하는 프로세스를 가진다. 그러나, TWB는 차체의 강성이 요구되는 부위에만 두꺼운 소재 또는 고강도강재를 사용할 수 있도록 설계를 하여 중간 공정으로 두 강판을 용접하게 된다.

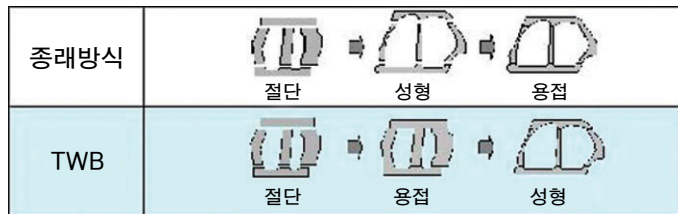


그림 2. TWB 방식의 특징

TWB의 개념은 1985년 Audi에서 실제로 적용한 시기부터 현재에 이르기까지 다소 변화하였다.

그림 3은 이러한 TWB의 개념변화를 3단계로 구분하여 나타낸 것이다. 적용 초기인 1 단계는 스크랩을 최소화하고 재활용함으로써, 재료의 실수율을 높이는 것이 주된 목적이었으며, 점차로 mold die를 줄이는 방식으로 발전하였다. 그 후 보강재의 감소 또는 생략이 주요한 TWB의 적용에 대한 주류가 되었다. 보강재를 사용할 때 필요한 프레스, 용접 등의 공정이 생략되기 때문에 가장 큰 경제적인 이점이 있다. 1 또는 2 단계는 진정한 의미에서 TWB라 볼 수 없으며 다른 자동차사의 관심을 크게 끌지 못한 반면, 3 단계에 접어들면서 많은 관심을 끌게 되었으며 현재 테일러드 블랭크의 가장 큰 주류를 형성하게 되었다. 1 또는 2 단계와 비교하여 3 단계는 용접기술 측면에서 기술적인 경계가 존재한다. 1 또는 2 단계에서는 동강종/동두께 재료를 용접하였으나 3 단계부터 이강종 또는 이두께 용접이 적용되었다. 또한 1 또는 2 단계에서는 용접부 품질이 크게 중요하지 않았으나 3 단계에서 이강종/이

두께가 사용됨에 따라 프레스 성형할 때 용접부 형상 등 용접부 신뢰도가 중요하게 되었다.

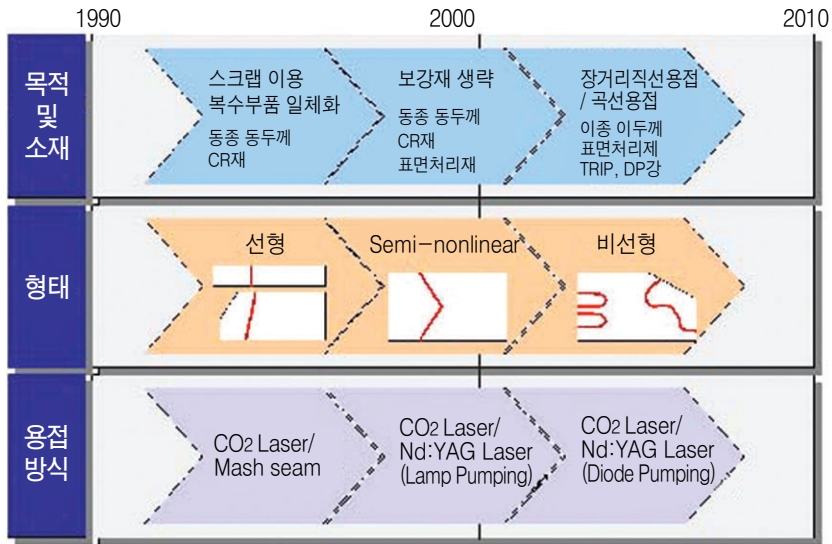


그림 3. TWB 기술 동향

TWB 생산에 이용된 용접 기술은 차체의 무게감소 및 생산단가를 낮추는 효과를 극대화하기 위해 많은 발전을 하였다. 먼저 사용된 용접 열원을 살펴보면 크게 레이저, 매쉬 심(Mash Seam), 전자 빔(Electron Beam) 및 고주파 유도가열(High Frequency Induction, HF) 용접을 들 수 있는데, 현재 대부분의 TWB는 레이저와 매쉬 심 용접으로 생산된다. 유럽의 경우, 1990년 초기에는 TWB 생산량도 미미하였으며 대부분의 TWB를 매쉬 심 방법으로 용접하였다. 그러나 90년대 중반에 접어들면서 레이저 용접이 적용되기 시작하여 새로 적용되는 TWB 부품 생산에는 대부분 레이저를 이용하고 있다. 레이저 용접은 그림4에서 보는 바와 같이 매쉬 심 용접에 비해 용접부의 크기가 작고 용접 품질이 우수하다는 장점을 가지고 있다. TWB는 용접 후 성형이 이루어지기 때문에 엄격한 용접부 품질이 요구된다. 한편, TWB에 적용되는 강관이 일반 냉연강관에서 점차 고강도강관, 표면처리강관의 사용이 증대되면서 새로운 TWB 설비는 레이저 용접 설비 사용이 일반화되었다. 매쉬 심 용접과 달리 레이저 용접에서는 강관 간의 간격을 0.1~0.2mm 이하로 유지해야 하는 것이 가장 큰 문제였다. 이에 따라 주요 용접기기회사인 Nothelfer나 Soudronic은 모두 이러한 gap의 허용 및 품질에 각각의 고유 기술을 적용하여 품질의 안정화에 연구를 힘 쏟고 있는 실정이다. 그 예로, Nothelfer는 연속적인 용접이 가능한 Conti-line의 설계로 생산성에 강점을 가지고 있으며, Soudronic은 자체 Souka system을 도입하여 gap 허용치에 대한 보완으로 품질 및 장거리 용접에 유리한 특징을 갖고 있다.

주로 사용되는 레이저 발전기는 8kW-CO₂ 레이저가 대부분이었으나, 급속히 YAG 레이저가 사용이 증대되는 추세이다. 즉, CO₂ 레이저는 레이저 가스 및 보호가스의 지속적인 소모로 초기 투자비는 적지만 고정적 가동비가 증대되는 단점을 갖고 있다. 그러나, YAG 레이저는 초기 투자비는 CO₂에 비해 높더라도 그 후 가동에 따른 비용효과가 적다는 장점이 있다. 또한 YAG 레이저는 광섬유를 통해 빔의 전송할 수 있으며 직경 약 0.6mm의 비교적 큰 초점 크기를 가지기 때문에, 정밀한 절단이 아니어도 용접이 가능하여 곡선 용접 및 multi-blank용 용접은 대부분 YAG 레이저를 적용하는 추세이다. 이와 같이 레이저 용접에 의한 TWB 생산 시스템은 생산단가의 저감 및 품질

안정화에 주안점을 두고 있다. 즉, 용접부 seam tracking, 용접 현상 monitoring 등의 기술개발을 통해 용접 불량률을 최소화하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 아울러 적용 부품을 확대하고, 디자인 측면에서 자유도를 높이기 위한 비선형 용접이 증가하고 있다. 따라서 앞으로 대량 생산 또는 유연성을 갖춘 TWB의 생산 시스템을 개발하기 위한 경쟁이 더욱 치열해 질 것이 전망된다.

Method		Initial cost	Running cost	Welding speed	Performance (forming, fatigue)	Weldability of HSS and coated steel
Laser	CO ₂	○+	○+	◎	◎	◎
	YAG(Lamp)	○+	○	◎	◎	◎
	YAG(Diode)	○	○+	◎	◎	◎
Mash seam welding		◎	◎	○~◎	○	○

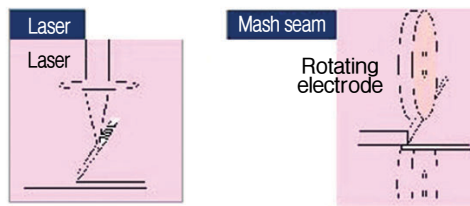


그림 4. TWB 용접에 사용되는 용접 프로세스의 비교

TWB 적용은 유럽, 미국 및 일본을 중심으로 성장하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 유럽의 생산량이 가장 많으며 그 다음으로 북미지역의 생산이 이루어지고 있었다. 한편 아시아는 2000년도 초기까지 그 적용량이 적었으나, 일본을 중심으로 한국, 중국의 자동차에 TWB의 적용이 늘어나고 있는 실정이다. 유럽에서는 1985년 Thyssen에서 floor panel용 테일러드 블랭크를 제조한 것이 시초였다. Thyssen사의 레이저는 1.5kW급으로 gap clearance가 좋아야 했는데, 정밀 절단 기술을 보유하고 있었기 때문에 용접이 가능하였다. 그러나 레이저 용접은 shearing 공정이 추가되어 제작단가가 매쉬 심에 비하여 비쌌기 때문에 그 후의 테일러드 블랭크는 주로 매쉬 심 용접이 적용되었다. 그 후, TWB 시장이 크게 성장하여 유럽에서는 Sidmar, Solac, Europlatinen 등의 테일러드 블랭크 전문업체가 생기기 시작하여 자동차사에 공급하는 추세이며 앞으로도 이 같은 추세는 지속될 것으로 전망된다. 미국에서는 G.M.이 1990년에 가장 먼저 테일러드 블랭크를 적용하기 시작하였다. 그러나 본격적으로는 1995년에 레이저를 이용하여 빅3(G.M., 포드, 크라이슬러)가 일제히 시작하였다. 미국에서는 레이저 용접이 주로 적용되었는데 이것은 레이저 용접부의 물성, 특히 자동차 수명과 관련되는 피로강도가 매쉬 심 용접에 비하여 월등히 우수하였기 때문이다. 미국 자동차사는 TWB, Utilaser 등 테일러드 블랭크 전문 공급회사로부터 공급을 받는 체제이다. 1995~96년에 들어 미국 자동차사가 호황을 맞게 되면서 테일러드 블랭크 시장이 크게 확대 되었다. 그러나 대형 테일러드 블랭크 업체만의 공급으로는 부족하여 신규 업체가 계속 증가하는 추세이다. 일본에서는 Toyota가 Thyssen과 비슷한 시기에 개발에 착수하여 1986년에 적용하기 시작하였다. 일본의 자동차사는 용접 시스템을 자체 제작하였으며, 자체 생산된 테일러드 블랭크를 적용하고 있다. 일본에서 이와 같이 in-house로 테일러드 블랭크를 생산하는 것은 일본 자동차사는 전통적으로 just in time 생산 방식으로 창고를 사용하지 않는 특성과 일본의 물류이동 비용이 비싸 공급지가 따로 있으면 생산 단가가 상승하기 때문이었다. 일본은 이와 같은 이유로 유럽과 미국과는 다르게 테일러드 블랭크 전문회사가 생기지 않고 자급자족 방식으로 성장을 하였으나, 점차

로 NSC, JFE, Sumitomo 등 철강사의 TWB에 대한 관심의 집중으로 TWB 시장의 전문화가 이루어지고 있다. 이와 같이 테일러드 블랭크의 생산 주체 및 접합 방법의 선택 기준은 기술적인 문제 뿐만 아니라, 지역적, 역사적 특성이 고려되고 있었으나, 점차로 global한 경쟁속에 규모화된 시장으로 발전하고 있음을 알 수 있다.

TB 생산량 (2001~2004)

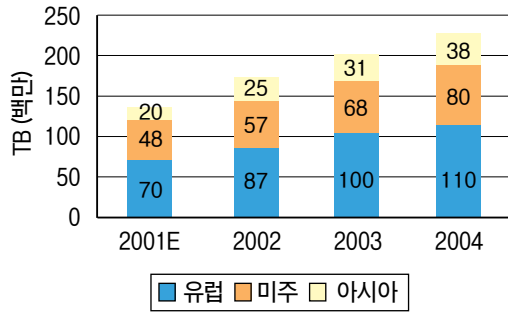


그림 5. TWB 적용 현황

국내 자동차사는 1990년대 중반부터 테일러드 블랭크에 관심을 보이며 적용을 검토하기 시작하였다. 그러나 IMF 한파 및 구조조정으로 인해 적용이 크게 늦어졌다. 이와 같은 상황에서 철강사에서 테일러드 블랭크를 공급하는 방식도 일부 검토되었으나 현재는 자동차사 및 협력업체에서 생산하는 형태로 추진되고 있다. 국내 자동차 업계의 생산라인 구축은 대우 자동차의 VIL Basic 라인이 국내 최초이지만 도입초기에는 여러 가지 사정으로 주로 연구용으로 사용되다가 2000년 이후에 양산라인으로 적용되었다. 한편 실제 양산라인으로는 현대자동차의 1998년 Nothelfer사의 6kW-CO2 레이저를 사용하는 Conti-line이 최초며, 그 이후 2호기 라인이 1999년에 바로 증설되었다. 한편 2000년까지는 자동차사의 자체 생산라인 구축과 더불어 협력업체의 움직임도 활발하였다. 성우하이텍은 mesh seam 방식의 용접기 2기를 가동함과 동시에 KIMM과의 공동 연구로 자체 레이저 용접기를 개발하여 2기의 레이저 용접기를 가동중이다. 또한, 세원정공은 일본 Oyabe Seiki사의 Nd:YAG 레이저를 이용한 JIG type의 용접기 2기를 보유하고 있다. 국내 TWB 업계의 큰 변화는 현대 HYSCO와 POSCO의 TWB 사업 진출에 있다. 그전까지는 주로 현대자동차와 관련된 업체의 내수용 TWB 생산이 주를 이루었으나, 두 회사의 참여를 통해 유럽/북미 방식의 TWB 생산의 outsourcing이 이루어졌다. 즉 이를 통해 자동차사 및 부품사를 중심으로 한 생산과 철강업체 중심의 TWB 생산이 동시에 이루어지고 있다. 그림 6는 현재 국내의 라인 현황을 보여주고 있다.

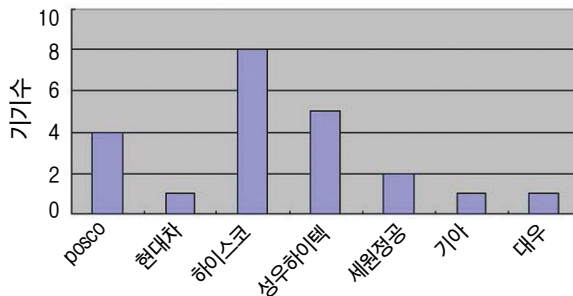


그림 6. 국내 TWB 라인의 현황

국내 TWB 용접 방식은 초기 CO₂ 레이저 방식과 mesh seam 방식이 혼재하는 상황에서 YAG 레이저 방식이 도입되었으나, 점차로 용접부 품질에 대한 엄격한 요구와 생산성을 고려하여 YAG 레이저 방식이 도입되고 있는 추세이다. 그 결과 그림 7에서 보듯이 CO₂ 레이저 방식은 답보 상태에 있으나 새로운 기기는 YAG 레이저 방식을 채용하고 있다. 특히 활발한 기기 증설이 이루어지고 있는 POSCO 및 HYSCO는 계속해서 TWB 라인을 추가할 계획을 가지고 있으며, 새로운 기기에는 YAG 레이저를 계속해서 채용할 예정이다. 한편 이 두 회사는 단일 직선 용접 방식에서 Multi-blank 용접 및 Non-linear blank 용접이 가능한 기기를 도입하여 다양한 고객의 요구에 발맞추고 있는 상황이다. 국내에서 TWB는 현대자동차가 1999년부터 베르나 차종에 door inner에 적용한 이래로 그 적용율도 급증하여 현재 현대자동차는 14개 차종에 걸쳐 TWB를 적용하고 있으며, 기아 7개 차종, 대우 6개 차종, 쌍용 1개 차종 등 대부분 자동차사에서 신차종에 TWB의 채용을 적극 시도하고 있다. 또한 차종당 적용되는 부품수의 수도 증가를 하고 있어, 현대자동차의 투스카니의 경우에는 9개 파트의 부품에 TWB를 적용하는 등 TWB에 대한 자동차사의 관심은 날로 증대되고 있다.

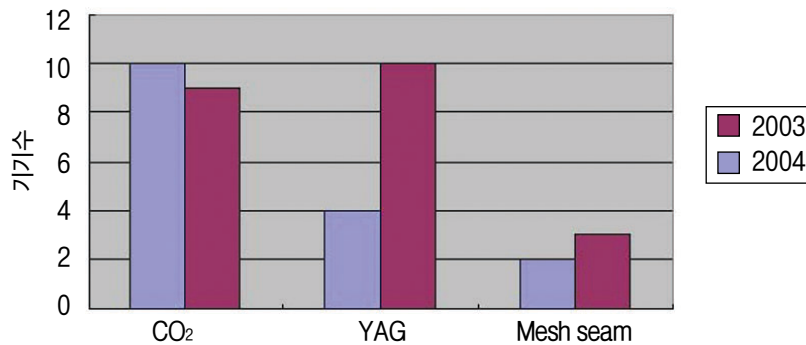


그림 7. 국내 TWB 라인의 용접 방식

2.4 H/F (Hydroforming)^[11-13]

하이드로포밍은 원하는 부품의 형상을 만들기 위해 블랭크에 수압을 가하여 성형하는 방법으로 초기 블랭크의 종류에 따라 판재 블랭크를 사용하는 판재 하이드로포밍(sheet metal hydroforming)과 튜브 블랭크를 사용하는 튜브 하이드로포밍(tube hydroforming)으로 나누어 진다. 판재 하이드로포밍은 기존 스탬핑과 비교해서 높은 드로잉성을 가지며, 판재 전체에 균일한 변형을 갖게 하는 장점을 가지고 있다. 그러나 형상이 큰 부품에 대해서는 대용량의 프레스가 필요하며, 사이클 타임(cycle times) 또한 길기 때문에 자동차 부품에서는 많이 적용되지 않고 있다. 반면 튜브 하이드로포밍은 기존 스탬핑의 용접 어셈블리 부품에 비해 공정단축, 부품중량 감소, 부품 강도와 강성의 향상, 부품수의 감소를 통한 공구비용의 감소, 치수정밀도의 향상 등의 장점으로 현재 자동차부품에 많이 적용되고 있는 실정이다. 수압을 이용한 성형 방법은 1900년대초 스팀 보일러의 부품에 적용된 이후로 1980년대까지 악기, 예술품, 수도 배관용 부품, 자전거의 프레임에 적용되어 왔다. 1980년대 후반부터 1990년대초에는 튜브 하이드로포밍 기술에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며, 북미지역에서의 대표적인 회사로는 Vari-Form, General Motors Corp., Hydrodynamic Technologies Inc. 등을 꼽을 수 있다. 그와 동시에 독일에서는 Schuler, SPS, Anton Bauer, Hydrap와 같은 하이드로포밍 장비업체와 일부 대학에서도 적극적인 연구가 진행되기 시작했

다. 이러한 경쟁적인 연구는 하이드로포밍 성형법과 장비의 발달을 촉진시키는 계기가 되었다. 또한 이러한 노력은 자동차 산업에서의 경량화 및 저비용 부품의 요구와 결합하여 자동차부품의 대량생산에 적용되기 시작하였다. 북미 시장에서는 1990년 Chrysler사의 미니벤 아피빔(IP beam)에 Vari-Form사에 의해서 대량생산으로 처음 적용되었으며, 1994년에는 새시부품으로 Ford Contour와 Mystique사의 엔진크래들(Engine Cradle)에 적용되었다. 그 이후 GM을 비롯한 많은 자동차사에서 적용을 확대하기 시작하였다.

국내 자동차사의 튜브 하이드로포밍 적용은 대우자동차와 운영에서 공동연구로 1999년 12월 매그너스의 아피빔을 만들었으며, 2000년에는 레조에 아피빔과 엔진크래들을 적용하였다. 그러나 주로 1000 bar 이하의 저압식 장비를 사용하여 다양하고 복잡한 형상의 부품에는 적용하지 못하였다.

2003년부터 포스코(POSCO)와 현대 HYSCO에서 고압식 장비를 사용한 하이드로포밍 부품 개발의 시작으로 국내 자동차사에도 다양한 부품의 적용이 시도되고 있다. 2005년 초부터 르노삼성의 리어 서스펜션(rear suspension), 쌍용자동차의 크로스멤버(cross member), GM대우의 엔진크래들의 대량생산이 포스코에서 이루어진다. 그와 동시에 현대 HYSCO에서도 현대 및 기아자동차의 개발차종에 엔진크래들을 공급하게 된다. 국내 하이드로포밍 업체의 경쟁적인 투자로 국내에서는 2007년까지 연간 470만 부품 이상의 생산 능력을 확보할 것으로 기대 된다.

튜브 하이드로포밍은 공정에 따라 다음과 같이 다섯 형태로 분류할 수 있다. 저압식(low-pressure), 고압식(high-pressure), 멀티압력방식(multipressure), 하이드로벌지(hydrobulge), 주름관성형(bellows forming) 방법이 있다. 저압식 하이드로포밍(low-pressure hydroforming)은 내부의 성형압력이 12,000 psi (83 MPa) 이하에서 성형되는 방식으로 단면의 확관률이 3%를 넘지 않는다. 금형이 닫히는 과정에서는 내부 압력이 작용하지 않으므로 금형의 닫는 과정에서 깊은 주름이 발생할 수 있다. 그러나 이러한 주름이 저압식 하이드로포밍 성형시에는 퍼지지 않기 때문에 복잡한 형상의 설계가 어렵다.

튜브의 단면 길이와 부품의 단면 길이가 거의 변하지 않으며 단면의 코너 곡률의 설계에 제한이 많아 설계의 다양성이 부족하다. 그러나 장비가격과 생산 사이클타임(cycle times)이 고압식보다는 작다는 장점이 있다.

고압식 하이드로포밍(high-pressure hydroforming)은 내부의 성형압력이 12,000 psi (83MPa)에서 60,000 psi (414 Mpa)로 성형되는 방식으로 이러한 고압은 소재의 연신률의 한계까지 단면의 확관이 가능하다. 즉 복잡한 형상의 부품설계가 가능하다는 것이다. 많은 소성변형으로 스프링백(springback)을 줄일 수 있으며 형상동결성이 우수하여 보다 정밀한 성형이 가능하다. 반면 장비가 고가이며 튜브의 소재, 조관 및 용접의 상태에 따라 성형성에 많은 영향을 받는다. 또한 단면의 코너부에서 국부적인 두께감소가 크기 때문에 이 점을 고려한 설계가 필요하다. 멀티압력식 하이드로포밍(multipressure hydroforming)은 다이가 닫히는 중에 튜브의 내부에 적은 압력이 작용하여 깊은 주름을 방지하고 하이드로포밍 성형시에는 10,000~25,000 psi (69~173 MPa) 정도의 압력을 사용한다. 금형이 닫힐 때 깊은 주름과 상금형과 하금형사이에 튜브가 핀칭(pinching)되는 것을 방지할 수 있다. 단면의 확관률은 저압식과 동일하게 1~3% 정도이나, 피어싱홀의 형상정도는 저압식보다 우수하다.

그림 8은 저압식의 경우와 멀티압력식의 경우 금형이 닫히는 과정에서의 튜브형상을 비교한 것으로, 저압식의 경우 왼쪽아래의 그림처럼 깊은 주름이 발생하나 오른쪽 아래의 그림은 멀티압력방식으로 금형이 닫히는 중에 튜브의 내부에 압력이 작용하여 깊은 주름이 발생하지 않는 것을 보여주고 있다. 그림 9는 저압식, 고압식, 멀티압력방식의 내부압력 곡선을 정리한 것이다.

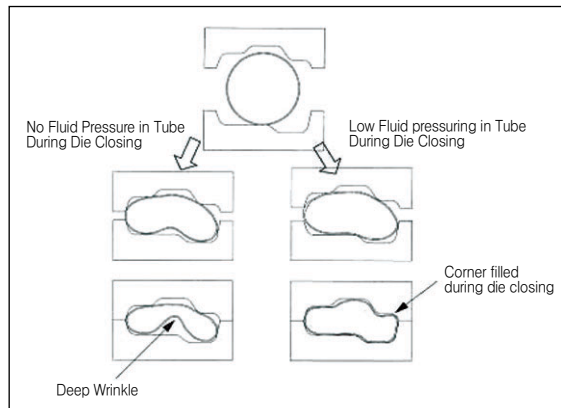


그림 8. 저압식(좌)과 멀티압력방식(우)에 의한 하이드로포밍의 비교

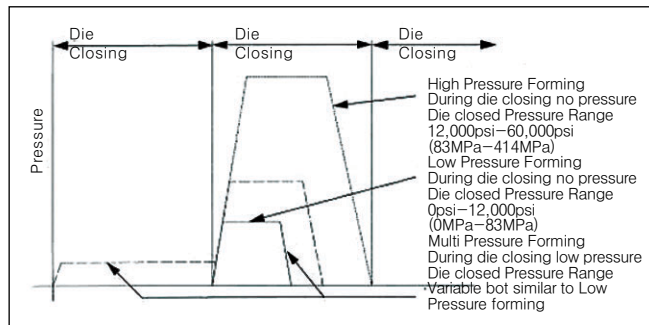


그림 9. 저압식, 고압식, 멀티압력 방식에 의한 하이드로포밍 성형시 내부압력의 비교

하이드로벌지(hydrobulge)는 튜브 끝단의 피딩(feeding)량과 내부압력의 조절로 T자형과 같은 다지관 성형에 사용하는 방식이다. 내부압력을 이용하여 튜브의 원주방향으로는 확관을 시키고 길이 방향으로 두께가 일정하게 유지되도록 피딩을 가하는 방식으로 두 변수의 적절한 값을 찾아내는 것이 중요한 설계요소이며, 엔진의 배기관 제작에 많이 이용된다.

주름관 성형(bellows forming)은 그림 10과 같은 주름을 가진 형태의 관을 만드는데 사용하는 방식이며, 자동차의 연료 필터부품의 제작에 많이 적용된다. 재료로는 얇은 스테인레스 튜브가 많이 사용된다. 금형이 길이 방향으로 움직인다는 특징을 가지고 있으며 그 제작 방법은 그림 11에 나타나 있다.

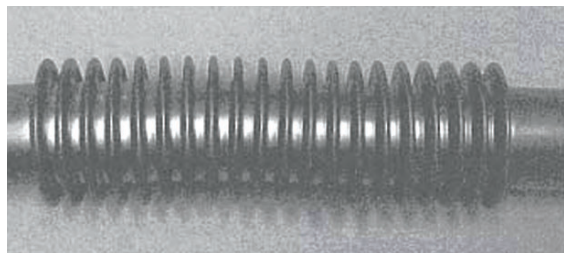


그림 10. 하이드로포밍에 의해서 만들어진 주름관의 형상

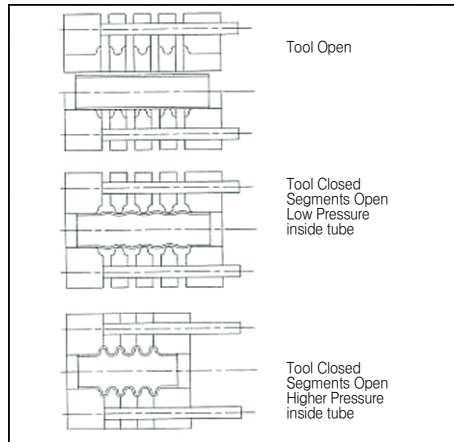
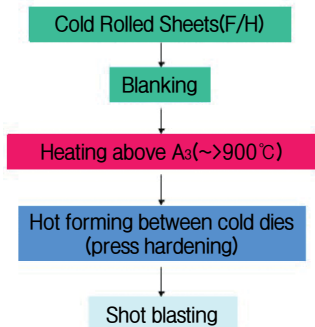


그림 11. 주름관 성형 방법

2.5 P/H (Press Hardening)

프레스 경화(Press Hardening) 공정은 보론강과 같이 경화능이 큰 재료의 판재를 고온상태로 가열 후 상온의 금형을 이용하여 성형하는 새로운 판재성형법으로서, 1973년에 스웨덴의 철강사인 SSAB 프라냐에서 개발한 이후 현재 수십 종의 자동차 부품에 대하여 유럽과 미국의 차종을 중심으로 개발·적용되고 있으나 국내에서는 아직 초보적인 연구 단계에 머물고 있다.^[14,15] 프레스 경화법은 B, Mo, Cr 등을 첨가하여 경화능을 향상시킨 강재를 A_{c3} 변태점 이상인 900°C 정도의 고온으로 가열한 다음 프레스 다이에서 한번에 제품을 열간성형하면서 급속 냉각하여 고강도 제품을 제조하는 공법이다. 그림 12는 프레스경화 공정을 도식적으로 표현한 것이다.

성형 후 별도의 템퍼링은 실시하지 않고, 고온에서 생성된 산화피막을 제거하기 위해서 샷 블라스팅(shot blasting)을 실시한다. 일반적으로 강판은 고온으로 가열되면 연성이 좋아 지기 때문에 성형이 매우 쉬워진다. 그림 13는 강판의 고온에서의 가공성과 최종 제품에서의 강도를 일반강 및 고강도 냉연강판과 비교해서 도식적으로 나타낸 것이다. 고온에서의 가공성은 상온에서의 일반 가공용 강판의 가공성보다 다소 우수할 뿐만 아니라 고장력 강보다는 훨씬 우수하다. 프레스 경화법으로 제조된 제품은 강도가 아주 높기 때문에 항복강도를 밀도로 나눈 비강도면에서 아주 우수하여 자동차의 무게 감소에 크게 기여할 수 있다.



· Dies remained pressed, being kept cold by special cooling

그림 12. 프레스 경화법의 공정도

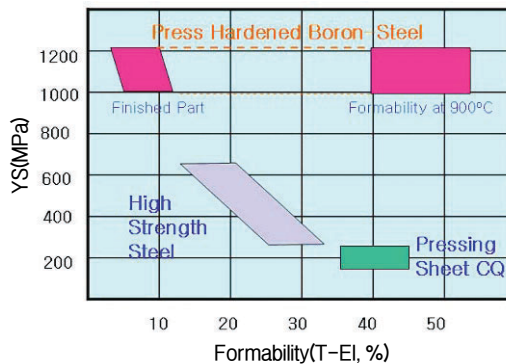
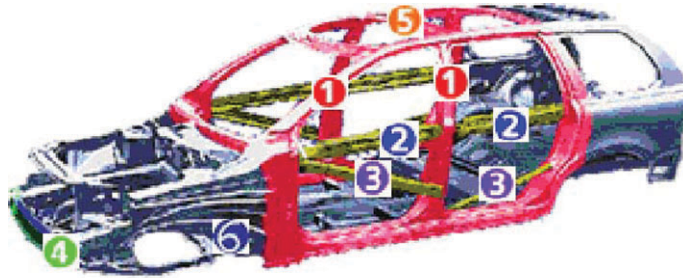


그림 13. 보론첨가 경화강의 강도와 열간에서 가공성 비교

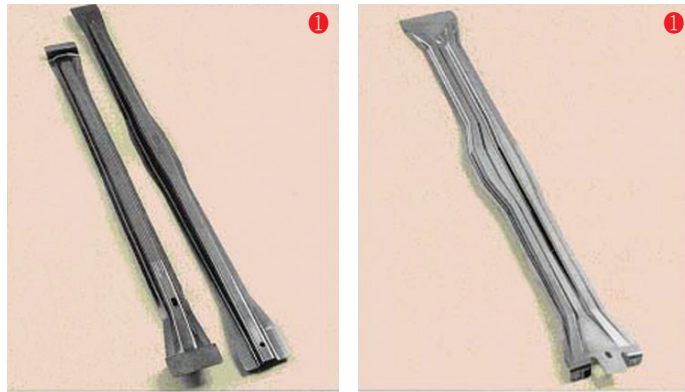
프레스 경화 공법은 자동차의 다양한 부품에 적용되고 있다. 그림 14는 프레스 경화강의 적용현황을 나타낸 것이다. 특히 프레스 경화강 적용의 대표적인 예는 범퍼인데 국내 자동차의 대부분의 범퍼 보강재는 아직도 60kgf/mm²급 고강도 냉연강판에 머물고 있지만, POSCO에서 1998년에 80kgf/mm²급 고강도 냉연강판을 개발, 공급한 이래 80kgf/mm²급 고강도 냉연강판의 사용량이 크게 증가하고 있을 뿐만 아니라, 100kgf/mm²급 고강도 냉연강판의 적용시도도 계속되고 있다.



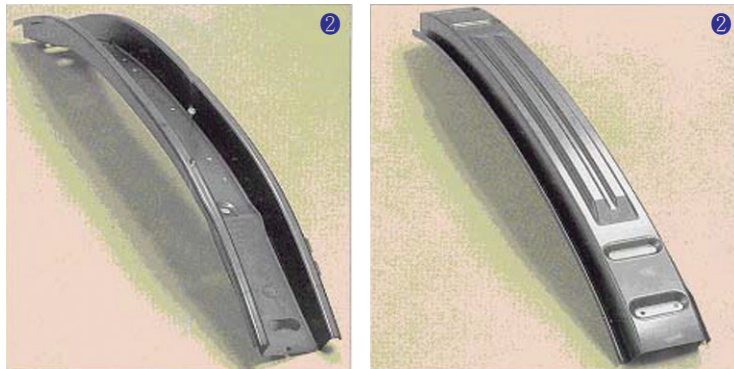
- | | | |
|----------------------------|------------------------|---|
| 1. A/B post reinforcements | 2. Door reinforcement | 3. Side impact beams |
| 4. Bumper systems | 5. Roof reinforcements | 6. Cross-members and longitudinal members |

그림 14. 프레스 경화강 적용 부품에

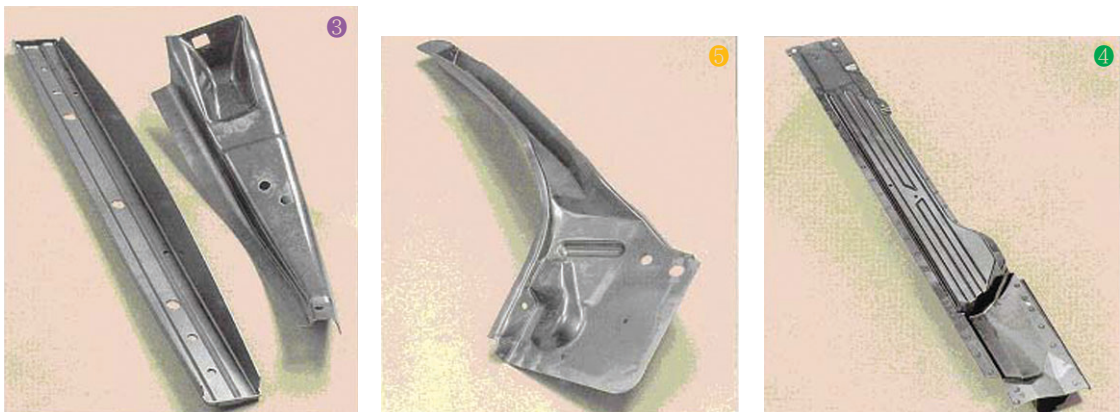
현재 국외의 다수의 자동차사에서 프레스 경화강을 자동차 범퍼에 적용하고 있고, 국내 자동차의 경우 대우자동차에서 누비라의 초기모델에 적용한 경험이 있다. 향후 국내 자동차사에서도 자동차의 대형화에 따른 배기가스 문제와 차체의 안전성을 해결하기 위해서 프레스 경화강에 대한 수요가 있을 것으로 전망된다. 100kgf/mm² 이상의 범퍼 보강재의 적용은 기존의 낮은 인장강도급의 철강수요를 잠식하는 것이 아니고 기존의 중대형 차에 적용하는 플라스틱 또는 알루미늄을 대체하는 신수요이므로 철강 측면에서는 적극적으로 개발할 필요가 있는 것으로 판단된다. 프레스 경화 공정은 스웨덴의 SSAB 자회사인 프라나에서 1973년에 개발된 공법으로 초기에는 높은 경도가 필요한 산업용 설비(톱 등)에 적용되다가 1990년대부터 Bumper와 Door Impact Beam 등의 자동차 부품으로 개발을 하여 적용되기 시작하였으며, 현재 그 적용 영역을 보다 넓혀 나가고 있는 상태이다. 유럽의 경우는 SSAB와 Bentler를 주축으로 적용이 확대되고 있고, 미국의 경우는 SSAB와 Bentler의 자회사가 진출하여 시장을 주도하고 있다. 일본의 경우는 2000년 초에 도요다 1차 벤더를 중심으로 도어 임팩트빔의 적용을 시작하였고, 점차 BIW레인포스 부품으로 확대되고 있다. 국내에서는 누비라의 초기 모델에 프라나에서 범퍼보강재를 수입 적용하면서 국내에 알려지게 되었으며, 범퍼 보강재 외에 필라보강재, 도아보강재 등에 대하여 JAGUAR, FORD(MONDEO, WINDSTAR MPV), ROVER(ROVER800) 등에 적용 중이고 20 여종 이상의 부품에 대하여 유럽, 미국과 일본차종에 적용키 위하여 여러 부품사에서 개발 중인 것으로 알려져 있다. 프레스 경화 부품 생산업체 현황을 보면 유럽 경우 SSAB Hardtech(스웨덴), Benteler(독일), Thyssen(독일), Wagon(영국) 등이며 일본의 경우 아이싱 다카오카, 도요타 뎃코, 후다바 등이 있다. 그림 15는 프레스 경화법에 의해 생산된 부품들의 사진이다.



(a) door impact beam



(b) bumper impact beam



(c) BIW reinforce parts

그림 15. 프레스 경화공법에 의해 생산된 부품들

국내에서의 보론강의 사용은 도아 보강재에 대하여 1995년부터 동원금속에서 강관형태로 제작하여 국내 자동차에 납품하고 있으나 프레스 성형이 아닌 조관 후 연속적으로 고주파 처리하여 수냉시킨 후 절단하는 방식을 취함으로 프레스 형태의 성형이 요하는 제품의 생산은 불가능한 실정이다.

3. 결 론

이제 우리가 살고 있는 하나뿐인 지구의 환경문제는 앞으로의 인류번영을 위하여 매우 중요한 과제가 되었다. 자동차는 인류에게 크나큰 편의를 제공하여 왔으나, 막대한 화석연료의 사용으로 인해 CO₂ 발생의 주범으로 인식되게 되었다. 이로 인한 지구온난화 현상과 오존층의 파괴 등은 이미 널리 알려진 환경파괴의 형태이다. 따라서 선진각국을 비롯한 여러 나라에서 자동차의 연비를 높이고자 노력하고 있어, 경량자동차의 개발과 비약적인 연비향상을 위한 기술개발은 회사차원은 물론이고 국가차원에서도 매우 중요한 분야이다.

소재분야가 이러한 자동차 산업의 요구를 만족시키기 위해서는 고강도화에 의한 gauge down을 이루어야 하는데, 아직까지 자동차 무게에 있어 약 65% 이상을 차지하는 철강소재의 경량화는 큰 과제로 인식되고 있다. 이에 따라 Al, Mg 등 경량금속으로 치환함으로써 경량화를 이루고자 하고 있는데, 과연 이 방법이 환경에 친화적인 해결안이 될 수 있는 지에 대해서는 많은 의문이 제기되고 있다. 따라서 전세계의 주요 철강제조사들은 consortium을 구성하고 철강소재를 활용해서도 큰 폭의 경량화가 가능하도록 하는 기술을 개발하여 왔다.

이러한 기술개발은 연비향상이 구체적인 목표를 가지고 추진되는 선진국에서 중점적으로 진행이 되고 있어, project에서 얻어지는 기술개발 내용을 적기에 파악하고 유효하게 활용함으로써 국내 산업의 큰 기둥이 되는 철강제조업과 자동차제조업의 선진화를 이룰 수 있었다. 그 결실로 국내철강사인 포스코 주도로 선진기술인 TWB, H/F 기술이 국내에 보급 양산되었고, 고장력강보다 강한 초고장력강이 개발되고 있다. 최근에는 포스코 주도로 세계 몇 회사만이 가지고 있는 P/H의 양산화하려는 노력을 하고 있어 향후 좋은 결과가 있을 것으로 기대된다.

❁ 참고문헌

- [1] PES, ULSAB Phase 2 Final Report, Mar. (1998)
- [2] PES, ULSAC meeting report, Jun. (1999)
- [3] Lotus Engineering, ULSAS Phase 1, Step 2 Final Report, Jun. (1999)
- [4] PES, ULSAC Engineering Report, Apr. (2000)
- [5] Lotus Engineering, ULSAS Engineering Report, Feb. (2000)
- [6] PES, Technical Transfer Dispatch #5, Sept. (2000)
- [7] PES, Technical Transfer Dispatch #6, May (2000)
- [8] P.J.Belanger, M.Milititsky, The 10th steel symposium proceedings, KIMM (2001) 19
- [9] 山崎一正, 第 228回 塑性加工 symposium, JSTP (2004) 21
- [10] ULSAB-AVC Report, (2002)
- [11] H.Singh, Fundamentals of hydroforming, The Society of Manufacturing Engineers (2003)

- [12] M.Ahmetoglu, T.Altan, Tube hydroforming, state-of-the-art and future trends, J. of Materials Processing Technology, 98 (2003) 25
- [13] N.Asnafi, Analytical modelling of tube hydroforming, Thin-Walled Structures, 34 (1999) 295
- [14] W. J. Bang, J. Y. Nam, S. J. Kim and H. S. Kim, Proceedings of the 7th symposium on steel technology, The Korean Inst. Metal. Mater., Seoul (2000)
- [15] 강수영, 이재성, 김종하, 이호기, 이경남, 한국소성가공학회지, 5 (1996) 263



강 수 영

· 포스코 기술연구소
· 관심분야 : 프레스 하드닝, 물성평가
· E-mail : sykang66@posco.co.kr



이 원 범

· 포스코 기술연구소
· 관심분야 : 자동차 용접
· E-mail : wbeom70@posco.co.kr



김 흥 기

· 포스코 기술연구소
· 관심분야 : 관재성형해석, 프레스하드닝
부품, 성형해석, 분말 성형
· E-mail : hgkim5@posco.co.kr



최 한 호

· 포스코 기술연구소
· 관심분야 : 하이드로 포밍
· E-mail : choihh@posco.co.kr



김 성 주

· 포스코 기술연구소
· 관심분야 : 자동차용 고강도강 개발
· E-mail : sjkim5@posco.co.kr



박 성 호

· 포스코 기술연구소
· 관심분야 : 고온변형, 석출, 소성가공
· E-mail : sunghopark@posco.co.kr