

합체 박판(Tailored Blank) 성형 기술의 개발 현황과 전망

Present Status and Future Prospect of Tailored Blank Forming Technology

백 승 준, 구 본 영, 금 영 탁, 강 수 영, 이 호 기
S. J. Back, B. Y. Ghoo, Y. T. Keum, S. Y. Kang, H. K. Lee



백 승 준
· 1971년 9월생
· 한양대학교 대학원
· 박판 성형해석과 tailored blank



구 본 영
· 1969년 5월생
· 한양대학교 대학원
· tailored blank의 성형해석



금 영 탁
· 1952년 10월생
· 정회원
· 한양대학교 기계공학부
· 기계공학 전공, 박판성형해석



강 수 영
· 1966년 6월생
· 대우 자동차 기술연구소 재료시험실
· 금속 재료 전공, tailored blank의 용접부 특성



이 호 기
· 1962년 4월생
· 대우자동차 기술연구소 재료 시험실
· 재료 공학 전공, tailored blank의 용접부 특성

1. 머릿말

현 자동차 생산 방식으로 자동차 차체는 300개 이상의 크고 작은 스템핑 패널을 소비하고, 차체 모델 하나가 350여개에 달하는 스템핑다이를 갖어 많은 경영자들은 생산비용 측면이나 공정 최적화 측면에서 스템핑다이의 개수를 줄이려는 노력을 한다. 이렇게 비경제적으로 많은 차체패널을 생산하게 하는 기존의 분할법(division type)을 개선하려는 방법으로 제안된 것이 단일박판을 사용하여 스템핑하는 일체법(one-sheet type)이었다. 이 방법은 여러 종류의 다른 재료를 사용해야 하는 경우에 이 모든 재료의 특성을 만족하는 일체(一體)의 강판을 사용하는 것으로, 이 방법의 생산 방식은 재료수율이 나쁠 뿐만 아니라 필요한 재료를 선택할 수 없다는 단점이 있다. 또한 무엇보다도 중량이 커지게 되어 차체 경량화에 역행하게 된다.

이후 전기저항을 이용한 메쉬시임 용접기와 고출력 레이저 용접기가 현장에서 사용되어, 이전의 TIG용접 등으로 불가능했던 합체 박판(tailored blank sheet metal, 약어로 tailored blank)의 생산이 가능하게 되어

차체의 여러 부분을 여러 개의 금형에서 별도로 스탬핑한 후 최종적으로 용접하여 차체를 생산하던 방식을 지양하고, 차체가 필요로 하는 두께 및 재질의 판재들을 미리 용접한 후 한 번의 스탬핑 공정을 통해 제품을 생산할 수 있게 되었다.

그림 1은 차체 측면 패널의 생산 방식, 즉 분할법, 일체법 그리고 합체법을 비교한 것이고, 표 1에서 이들 3가지 패널 생산 방식의 특징을 비교하였다.

합체 박판을 사용한 생산 방식은 소수의 스탬핑 금형 공정으로 인해 전반적으로 공기가 짧아지고, 보다 견고하며 외관상 우수한 차체를 생산할 수 있다. 또한 재료의 수율을 극대화할 수 있을 뿐만 아니라 차체 각부에서 요구되는 성질과 조건에 따라 판 두께나 재질을 대응할 수 있다는 등의 장점을 가지고 있어 초기의 설비비는 다른 생산 방식에 비해 고가이지만 전체 공정과 장기적인 관점에서 생산비가 절감된다.

본 기고에서는 합체 박판의 생산 및 활용 정도와 각 기업체나 연구소들에서의 연구 진척 상황, 그리고 앞으로의 전망에 대해 논한다.

2. 합체 박판의 생산 방법

합체 박판을 생산하기 위해 메쉬시임 용접과 레이저 용접이 이용되고 있다. 두 가지 용접 방법은 기존의 용접들과는 비교할 수 없이 속도가 빠르며 공정 자동화도 용이한 장점이 있다. 예를 들어 단일 두께 1mm인 박판의 용접시 분당 7~10m 정도를 용접할 수 있고 이중 두께 2mm와 1.5mm를 용접하는 경우에는 분당 4.5~5m 정도로 생산성이 매우 높다. 다음에 이들 2가지의 용접법에 의한 합체 박판 생산의 장단점을 비교, 검토하고자 한다.

2.1 메쉬시임 용접

메쉬시임 용접은 두 박판을 3mm 정도 겹쳐 놓은 부분을 위와 아래에 전류가 통하게 되어 있는 전극 로울러 사이로 통과시키면서 전기저항에 의해 발생하는 열을 이용하여 두 재료를 눌러 접합하는 용접 방법이다. 메쉬시임 용접에 의해 제작된 박판의 경우 약

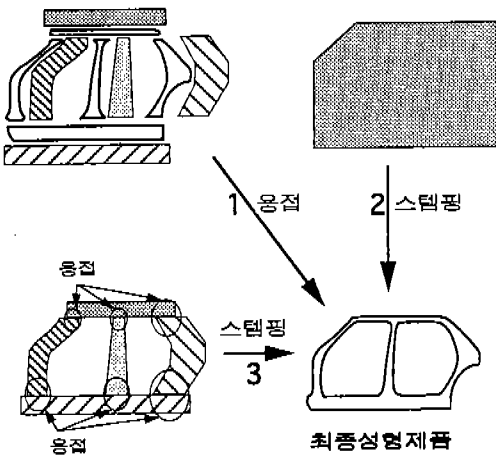


그림 1 차체 생산 방식의 비교
(1 : 분할법, 2 : 일체법, 3 : 합체법)

표 1 패널 생산 방식 비교

항목 \ 생산방법	분할법	일체법	합체법
외관	열세	좋음	좋음
필요한 다이개수	20개	4개	4개
치수 정밀도	열세	좋음	좋음
재료 수율	높다(60%)	낮다(40%)	높다(60%)
재료 선택	선별 사용 가능	선별 사용 불가능	선별 사용 가능
중량	가볍다	무겁다	가볍다
강도	열세	좋음	좋음
특징	대량생산 적합	소량생산 적합	소량, 대량생산 적합

110Hv의 경도를 가지는 연강(mild steel)의 경우 용접부의 경도가 일반적으로 160~180Hv 사이로 레이저 용접시(200Hv이상) 보다 낮아 용접부의 성형측면에서 메쉬시임 용접이 레이저 용접의 경우 보다는 좋다는 것을 알 수 있다. 용접비드의 폭은 겹쳐 놓은 부분의 넓이와 같다고 할 수 있고 열영향부는 4~8mm 정도이다. 용접후 용접부의 두께가 모재에 비해 10~40%정도 두꺼워지게 되어 적용하기 힘든 일부 차체 부품에는 이를 레이저 용접으로 대체해 나가고 있으며 이 두꺼워진 용접부의 영향으로 약 10만개의 스탬핑 제품을 생산한 후에는 다이와 용접부가 닿는 부분이 마모가 되는 경우도 있다.

2.2 레이저 용접

레이저 용접은 집중된 빔 에너지에 의해 재료가 용융 및 기화되면서 키이홀(key hole)을 형성하고 이 키이홀이 용접 진행 방향으로 움직이면서 비드가 형성되는 용접방법이다.

대부분의 자동차용 강판은 아연도금이 되어있어 맞대기 용접시 아연의 용점이 낮은 탓에 매우 강한 플라즈마가 형성되어 용접부에 기공이 형성되는 등 나쁜 영향을 줄 수 있기 때문에 보호 가스의 조절과 재료들 사이에 갭(gap)을 조절하여 이를 해결하는 분야에 대한 연구가 필요하다.

레이저 용접에 의해 합체 박판을 제작하는 방식은 무인화 로봇에 의한 공정 자동화가 매우 용이하다는 장점을 가지고 있으므로 이를 현장에 적용하기 위하여 가벼운 레이저 용접기를 개발하려는 노력이 활발히 진행되고 있다.

2.3 메쉬시임 용접과 레이저 용접의 비교

메쉬시임 용접과 레이저 용접은 빠른 용접

속도, 용접 결함과 열영향부의 최소화 등 과거의 아크 용접 등에서 얻을 수 없던 여러가지 장점을 가지고 있어 합체 박판의 생산과 활용을 가능하게 하였다. 특히 레이저 용접은 메쉬시임 용접에 비해 비드폭이 좁고 비드부가 두꺼워지는 현상이 없기 때문에 실제의 합체 박판 활용에 있어 우월하다고 볼 수 있다. 메쉬시임 용접은 용접부의 경화가 레이저 용접의 경우보다 적기 때문에 성형성은 향상되지만 비드부가 넓어지고, 두꺼워지는 현상 때문에 일부 사용에 제한을 받게 되고 금형의 마모를 더 많이 유발하는 단점을 가지고 있어 레이저 용접에 대한 관심이 고조되어 가고 있는 추세이다.

따라서 판재를 예열한 후 용접을 하는 방법등 용접부의 경도를 낮출 수 있는 용접 방법이 개발될 경우 레이저 용접으로 합체 박판을 생산하는 것이 금형수명등 여러가지 측면에서 유리하다고 전망된다.

3. 합체 박판의 적용 사례

일본의 토요다 자동차는 그림 1처럼 luxury모델에 사용되는 측면 부재를 각기 다른 방식으로 표면 처리(방청성능 요구에 따라 아연 코팅의 양이 20~60g/m²)되고 두 가지의 두께(0.8mm, 1.0mm)로 이루어진 다섯 종류의 판재를 바깥 면이 매끄럽도록 단일 박판으로 용접하여 생산하고 썬루프의 보강재, 엔진 덮개의 내부 부품에도 이 방식을 적용하였다. 이 적용례에서 얻은 효과는 보다 미려한 외관과, 높은 생산성 확보, 높은 치수 정밀도, 재료비의 감소, 생산품의 경량화, 그리고 무엇보다도 기존의 방식에서 20개의 스탬핑 다이가 필요하던 것이 단지 4개로 줄었다는 데 있다.

표 2는 이 모델에 적용한 방식에서 얻은

표 2 합체 박판 사용에 의한 재료수율 향상

합체 박판 적용부분	재료수율 향상 정도
썬루프의 보강재	40%→70%
엔진 덮개 안쪽부분	60%→70%
측면 부재	40%→60%

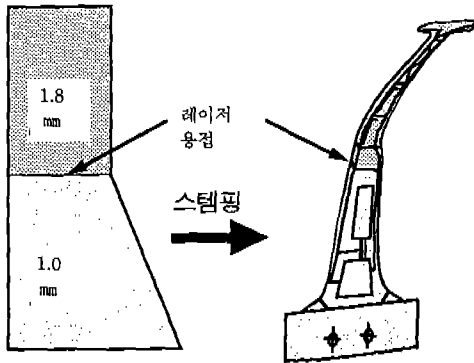


그림 2 GM사의 Cadillac Seville 모델의 center pillar

재료수율의 향상을 나타낸 것이다.

GM사는 차체의 견고성을 확보하기 위하여 1992년 Cadillac Seville 모델의 center pillar에 여러 두께의 조합으로 이루어진 합체 박판을 채택하였다.(그림 2참조)

기존에는 이 부분을 1.0mm의 강판으로 설계하고 윗부분에 따로 보강재를 스텝핑 생산하여 점용접으로 접합하는 방식으로 안전벨트 고정 부분을 강화하였다. 이러한 방식에서는 판재들 각각에 대한 여러번의 스텝핑 공정이 필요하다는 것 이외도 판재들의 용접시 용접 자체의 문제와 정확하게 재료를 접합하는 것 또한 문제가 되었다. 그러나 새로운 방식인 레이저 용접을 이용한 방식에서는 1.8mm 두께의 보강재가 필요 없어 졌으며 이로 인해 여러 스텝핑 공정과 조립 과정을 생략할 수 있었다. 이렇게 여러 다이와 조립 과정을 생략함으로써 얻어지는 전체 생산비용

의 감소는 대략 수십만 불에 이르렀으며 차체 한대당 0.70kg의 경량화를 이루었다.

또한, 판재 제조업체인 medina사는 일반 판재와 더불어 합체 박판을 GM사에 납품하고 있는데 이 회사의 경우는 Newcor사로부터 메쉬시임 용접 시스템을 구입하여 합체 박판을 생산하고 있다.

유럽의 많은 자동차 회사들은 레이저 용접과 메쉬시임 용접을 병용하여 몇 해전부터 합체 박판을 사용해 왔고 그 예로는 Volvo, Fiat, Volkswagen, Mercedes Benz, BMW, Audi등이(표 3참조)있다.

독일의 Duisberg에 있는 Thyssen 철강회사는 1980년대말 부터 레이저 용접에 의한 합체 박판을 생산, Audi에 공급하기 시작하여 이후 또 하나의 레이저 용접 생산 라인과 두 개의 자동화된 메쉬시임용접 생산라인을 확장하였다.

10년 이상 합체 판재를 사용하고 있는 Volvo의 경우에는 자체에서 Soudronic사의 용접시스템을 사용하여 Volvo 850 turbo의 11 가지 부품에 적용하고 있다.

4. 국내·외 연구 동향

4.1 Laser 용접에 대한 연구

GM사의 Bhatt와 NS사의 Shi^{1, 2, 3)}는 mash seam용접과 레이저 용접으로 각각 제작되는 합체 박판의 성형성을 높이기 위한 용접조건에 대한 연구에서 여러 용접과라메타들 각각의 적정 범위와 이들의 최적의 조합을 도출해 내었고 레이저 용접시 두 재료간의 갭(gap)과 용접 도중의 misalignment가 합체 박판의 성형성에 가장 큰 영향을 주는 것으로 결론을 내렸다.

Radlmayr와 Szinyur⁴⁾는 네 가지 용접과라미터 즉 갭(gap), 보호가스, 초점위치, 그

표 3 유럽 자동차 회사들의 합체 박판 사용 현황

비교항목 회사	용접방법	주요효과	비 고
Volvo	메쉬시임 용접 사용	견고성 확보, 차체중량감소	1997년 이후로 계속사용
Renault	메쉬시임 용접과 레이저 용접을 병용	견고성 확보, 재료수율상승	일체화된 박판재의 자체 제작과 구매를 병행
Fiat	메쉬시임 용접사용	견고성 확보, 차체중량감소	일체화된 박판재를 자체 제작
Volkswagen	메쉬시임 용접사용	견고성 확보, 차체중량감소	Thyssen에서 판재 구매
Van	메쉬시임 용접사용		Thyssen에서 판재 구매
Ford	메쉬시임 용접사용	견고성 확보, 차체중량감소	Soudronics사에서 메쉬시임 용접시스템을 구입, 자체생산
Mercedes Benz	레이저 용접사용	폭이 넓은 아연 도금강판의 제작	Thyssen에서 레이저용접 판재 구매
GM	메쉬시임 용접과 레이저 용접을 병용		
BMW	레이저 용접사용	견고성 확보, 차체중량감소	
Seat	메쉬시임 용접사용		
Audi	레이저 용접사용	폭이 넓은 아연 도금강판의 제작	

리고 판재의 표면상태가 레이저 용접에 미치는 영향을 관찰하였다. 좁은 갭(gap)과 느린 용접속도는 sag를 가지게 되고 넓은 갭(gap)과 빠른 용접속도는 불완전 용입이 일어났다. 또한 보호가스로는 고순도의 아르곤과 헬륨이 좋은 것으로 결론을 내렸다.

서정과 그의 공동 연구자들^{5,6,7)}은 자동차에 널리 쓰이는 아연도금 강판과, 자동차 본넷용 알루미늄 합금의 CO₂ 레이저 용접에 대해 연구를 진행했다. 이 연구에서 그들은 아르곤 가스량과 빔초점의 위치를 일정하게 결정하고 레이저 빔 출력, 용접속도, 갭(gap)의 3가지 주요 변수의 변화에 따른 겹치기 용접 조건의 실험 및 기계적 특성 평가를 통하여 최적 용접조건을 조사하였다.

4.2 블랭크 홀더의 설계에 대한 연구

Siegert⁸⁾는 합체 박판의 딥드로우잉 실험을 수행하고, 이 실험에 의해 드로우다이 설계시 두께 차이에 따라 단차를 주는 방법을 이용하여 요구되는 블랭크홀더 압력이 flange 영역에 고르게 부가될 수 있게 하는 연구를 하였다.

4.3 합체 박판의 성형에 대한 연구

Toyota Motor Company^{9,10)}의 연구원들은 합체 박판의 성형 거동을 실험실용의 작은 시험금형에서부터 실제금형에 이르기까지의 실험을 통해 관찰하였으며 이 자료를 통해 유한 요소 시뮬레이션의 해석 결과의 타당성을 입증하였다. 이들은 합체 박판의 제작에

레이저 용접을 이용하였는데 이것은 다음과 같은 이유 때문이었다. 1) 용접비드부의 열변형이 작아야 한다. 2) 용접후에도 용접비드부의 특성은 모재에 가까워야 한다. 3) 용접비드가 좁아야 한다. 4) 용접 생산성이 높아야 한다.

Azuma와 그의 연구자들¹¹⁾은 기본적인 성형 공정 세 가지 즉, projection, stretch flangeability, deep drawability 등에 대한 여러 실험들을 통하여 연구를 진행하였다. projection에 관해서는 다양한 폭의 합체 박판에 대하여 용접선이 1) 주변형 방향과 일치하게 2) 수직으로 교차하게 하여 Erichsen punch stretch test를 수행하였다. 이 시험에서는 용접선이 주변형 방향과 일치한 때에는 그 판단 높이가 base material의 시험때 보다 30%가 감소하고 용접선과 주변형 방향이 수직으로 교차할 때에는 판단높이가 10% 정도 감소 하였다. stretch flange flangeability에 대해서는 실제 생산에 쓰이고 있는 것과 유사한 stretch flange die 모형을 설계하여 용접선을 코너부에서 얼마만큼의 거리에 위치하게 선정할 것인가를 알아내기 위한 실험을 수행하고 설계의 한도를 이에 맞추도록 하였다.

deep drawability에 대해서는 swift cup test를 적용하였으며 LDR(Limit Drawing Ratio)값이 용접의 유무에 크게 영향을 받지 않으며 동종 재료의 용접에서는 LDR이 base material과 완전히 같고 이종 재료일 경우에는 두 재료의 LDR값의 평균값을 가진다고 결론을 내렸다.

Shi와 그의 공동 연구자들¹²⁾은 레이저 용접과 mash seam 용접에 대해 각각 표준 인장 시편과 절반폭을 갖는 subsized 인장시편을 취하여 인장시험을 실시하였다. 이 시험에서 subsized 인장시편의 가공경화지수(n)와 한

계 신장율이 표준 시편에서보다 작게 나타나고 항복응력은 더 크게 나타나는 것을 관찰하였다. 그들은 또한 용접부의 강도가 대단히 높아 용접선에 수직인 방향의 하중에 따른 변형은 모재에서 모두 발생하고 용접부에서 변형이 일어나지 않는다고 밝혔다.

Saunders¹²⁾는 1.8mm AKDQ와 2.1mm HSLA를 접합한 합체 박판의 인장시험을 통해서 용접비드의 물성치를 구해 상업용 코드인 ABAQUS에 용접부 물성치로 입력하였고, full-dome test와 OSU formability test 그리고 scaled fender forming 등의 실험을 통해 용접부의 거동을 관찰하였다.

Siegert⁸⁾등도 용접부의 가공경화를 증명했고, 레이저 용접에 의한 박판이 한계변형율은 mash seam 용접보다 낮아 비드는 좁지만 열영향부가 더욱 크다고 결론을 내렸다.

Bhatt와 공동연구자들^{1,2)}도 인장시험시 용접부가 시편에서 차지하는 부분이 많을수록 항복응력이 커지는 것을 관찰했으며, 한쪽 재료에서만 많은 변형이 일어나는 것을 막기 위해 한계 두께비(LTR)와 한계 강도비(LSR)를 도출해 안전한 재료 두께 및 강도의 조합 범위를 제안했다.

4.4 FEM해석에 대한 연구

Saunders¹³⁾는 OUS의 코드인 SHEET-3와 상업용코드인 ABAQUS에 의한 해석을 수행하였으며 시뮬레이션에 의한 해석에 있어서는 용접선의 기계적 성질이나 용접비드의 폭 등은 중요한 변수가 아니고 적절한 경계조건의 설정으로써 SHEET-3의 해석 결과가 용접선의 거동에 있어서 실험치와 거의 일치한다는 것을 고찰하였다.

Toyota의 Iwata⁹⁾는 탄소성 유한 요소법의 상업용 코드 'JNIKE3D'의 개선으로 test die를 만들지 않고도 합체 박판의 성형성을

예측할 수 있다고 제안하였다. Iwata는 이 연구에서 사각캡 드로우잉의 실험 결과와 해석 결과의 차이를 비교하였으며 쉘 요소의 더욱 세분화된 분할로 보다 정도높은 해를 구할 수 있다고 고찰하였다.

5. 향후 전망

합체 박판의 사용은 자동차 업계에서 차체 중량의 감소와 생산성 향상, 차체 안정성 확보와, 생산 공정의 자동화 및 생산비 절감 등 많은 잇점을 가지고 있는 만큼 우리 나라의 산업계와 학계에서도 외국의 성공적인 적용 사례를 적극 연구, 검토하여 높은 설비투자 이상의 효과를 볼 수 있는 생산 시스템을 구축하는데 주력해야 할 것이다.

레이저 용접을 이용하는 합체 박판의 생산 과정을 최적화 하는 데에는 일정한 레이저 빔의 강도 조절과 정밀한 갭(gap)의 유지, 그리고 초점 위치의 제어등 많은 연구분야가 남아 있다. 갭(gap)의 정밀한 설정과 제어는 합체 박판의 성형성과 매우 밀접한 관계를 가지기 때문에 여러 자동차 회사나 학계, 연구소 등에서 가장 관심을 가지는 분야이다. 합체 박판을 생산하는 자동화 공정을 구축할 때 로봇의 관절을 매우 정밀하게 설계하여 초점이 표면에 일정하게, 그리고 정확하게 이동하게해야 한다.

용접부의 성형성을 개선하기 위해 모재와 동종 또는 이종 재료의 용접 와이어(filler wire)를 사용하는 것에 대한 연구가 필요하며 용접부 가공경화식을 계산하고, 용접부의 성형한계도(FLD)를 산출하여 성형성을 판별하는 것, 그리고 합체박판의 성형에 있어서 용접부의 굽힘의 영향이나 마찰의 영향 등에 대한 연구등이 요구되고 있다.

합체 박판의 성형공정에 대한 컴퓨터 시뮬

레이션 분야에서는 보다 정확도 높은 해석을 위하여 성형시 용접부의 거동에 대한 정확한 실험과 연구가 필요하며 실제 성형실험을 통한 비교, 검토가 요구된다. 특히 컴퓨터 시뮬레이션은 현재 산업계 전반에서 괄목할 만한 발전을 이루어 왔고 최적의 용접조건 산출이나 성형의 양부를 판별하는등 여러 가지 실제 실험을 대체하여 연구, 개발시의 시간과 비용을 최소화할 수 있다.

합체 박판은 현재 자동차 업계에서만 사용되고 있지만 그로 인해 얻을 수 있는 장점은 가전업계등과 같은 다른 산업들에도 똑같이 적용될 수 있다. 때문에 특별한 적용분야에 대해 합체 박판의 생산 라인과 용접 시스템을 설계하여 설계자와 박판 공급자와의 협력으로 기업이나 현장의 경영자인 소비자에게 필요한 생산비 절감의 합체 박판을 보다 저렴한 가격에 제공하여 각 산업 현장에서의 생산 효율을 높일 수 있게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. M. F. Shi, K. M. Pickett and K. K. Bhatt, "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheet", SHEET METAL AND STAMPING SYMPOSIUM, pp. 27~35, 1993.
2. M. Eisenmenger, K. K. Bhatt and M. F. Shi, "Influence of Laser Welding Parameters on Formability and Robustness of Blank Manufacturing, An Application to a Body Side Frame", AUTOMOTIVE STAMPING TECHNOLOGY, pp. 171~182, 1995. SAE Congress.
3. K. K. Bhatt, M. F. Shi, "Formability of Mash Seam Welded Blanks, Effect of

- Welding Set-up Conditions”, AUTOMOTIVE STAMPING TECHNOLOGY, pp. 183~189, 1995. SAE Congress.
4. K. M. Radlmayr, J. Szinyur, “Laser Welded Sheet Panels for the Body In White”, IDDRG Working Groups Meeting, PESA, Italy Palazzo dei Congressi, 1991.
 5. 서정, 한유희, “자동차 산업에서의 레이저 용접”, 대한용접학회지, 제12권, 제2호(1994), pp. 49~63.
 6. 서정, 한유희, 김정오, 이영신, “이종두께 강판의 CO₂ 레이저 용접 및 성형성”, 대한용접학회지, 제14권 제1호(1995), pp.45~54.
 7. 서정, 한유희, 윤충섭, 방세윤, “아연도금강판의 CW CO₂레이저 용접 및 성형성”, 대한용접학회지, 제13권, 제1호(1995), 145~155.
 8. K.Siegert and E. Knabe, “Fundamental Reserch and Draw Die Concepts for Deep Drawing of Tailored Blanks”, AUTOMOTIVE STAMPING TECHNOLOGY, pp. 159~169, 1995. SAW Congress.
 9. N. Nakagawa, S. Ikura, and F Natumi, N Iwata, “Finite Element Simulation of a Laser-Welded Blank”, SHEET METAL AND STAMPING SYMPOSIUM, pp. 189~197, 1993.
 10. T. Nakagawa, “Recent Developments In Auto Body Panel Forming Technology”, 43rd General Assembly of CIRP EDINBURGH, pp. 717~722, 1993.
 11. K. Ikemoto, H. Sugiura, K. Azuma, K. Arima and T. Takasago, “Press Forming of Laser Welded Blank”, Journal of the JSTP, Vol. 32 No. 370, 1991.
 12. F. I. Saunders, Forming of tailor-welded blanks, ph. D. Dissertation, Ohio State Univ.