

레이저 용접판재를 이용한 성형기술의 동향

이원평*, 전병희**

A Tendency of Forming Technique using Tailor-Welded Blanks



이 원 평

1941년생. 절삭가공을 전공하였으며, 용접기술과 특성평가에 관심을 가지고 있다.



전 병 희

1959년생. 소성가공을 전공하였으며, 용접판재의 성형기술과 최적 설계에 관심을 가지고 있다.

1. 국제 동향과 국내수준

최근 일본 및 구미의 자동차 업계에서는 국제 경쟁력 강화를 위하여 구조개편이 급속도로 진행되고 있는 추세이다. 즉 구미의 완성차 업체는 일본과의 경쟁력에 있어서 격차를 보이고 수익성에서는 악화일로에 직면하고 있어 이를 개선하기 위하여 부품 조달체계를 개선함으로써 비용을 절감하고 개발의 효율화를 달성하기 위하여 노력하고 있다. 이에 대응하는 일본의 완성차 업체의 전략은 생산의 현지화, 일본 내의 부품업체의 재배치, 계열의 업체로부터의 부품조달 확대, 부품산업의 중층 구조화에 만전을 기하고 있다.

이상과 같은 구미 및 일본의 자동차 업계의 변화에 대응하여야 하는 국내의 부품업체가 현재 직면하고 있는 환경은 매우 어려운 편으로 이에 대응하여 갖추어야 할 점은 다음과 같이 요약된다.

- 첫째, 국제적 수준의 품질유지 및 관리,
- 둘째, 신제품 개발 및 생산성 향상으로 가격인하 요구에 부응,
- 셋째, 부품의 통합화, 시스템에 따른 자체 설계능력 확보,
- 넷째, 모듈화 납품능력 확보.

따라서, 급속도로 진행되고 있는 부품업체의 구조개편 과정에서 우위를 점하기 위하여는 독자적인 부품의 설계

* 인덕전문대학 기계과

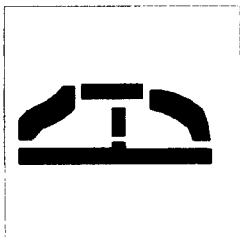
** 인덕전문대학 기계설계과

기술 및 금형설계 능력을 확보하여야 한다. 그러나 국내에서는 자동차 부품의 역사가 일천하여 기술제후에 의한 기존제품을 생산하기에 급급하며, 특히 고안전성이 요구되어 설계하기가 어려운 부분은 많은 기술료를 지불하고 있고, 선진국으로부터 제품도면을 공급받아 제작하고 있는 상태이므로 최적설계[1-5] 및 정밀 금형설계 기술의 확보를 하여야 한다.

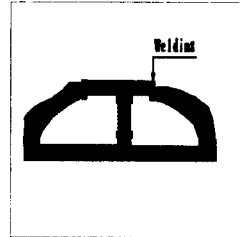
특히, 판재성형에 대한 공정설계, 스프링백을 고려한 정밀 금형설계[6,7], 가공공정을 최적화하여 생산성이 향상될 수 있도록 가공보장설계(design for manufacturing) 및 생산된 제품의 평가기술 확보가 중요하다.

이러한 국제환경을 고려해 볼 때 우리 나라에서도 레이저 용접으로 두께 및 특성이 서로 다른 판재를 용접한 후 스탬핑하여 보다 강하고 가벼운 제품을 제작하는 기술에 많은 관심을 가져야 할 것이다. 이 기술은 차체 내·외판의 성형에 있어서 그림1과 같이 두께와 특성이 서로 다른 판재를 레이저 용접한 결합소재를 일체로 하여, 프레스 성형을 함으로써 판넬의 경량화 및 생산가격의 절감 등의 효과가 있다. 뿐만 아니라 기존의 판재를 이용하여 제작된 자동차 부품의 성형방법에서는 동일한 소재의 두께를 가진 재료를 성형하고, 응력이 집중되는 부분에는 보강재를 이용하여 강성을 높여 안정성을 확보하여 왔다. 레이저 용접성형에서는 두께가 서로 다른 이형질 재료를 사용하여 용접 후 성형을 하게 됨으로써 안전성 향상을 기하고 있다. 이 기술은 현재 자동차 업계가 직면하고 있는 경량화 및 고품질(안전성 및 내식성) 확보에 대한 사회적 욕구를 충족시키면서 가격 경쟁력이 있는 자동차를 생산하기 위한 기본기술로서 일본, 미국, 유럽을 중심으로 최근에 널리 사용되기 시작하고 있다.

두께 · 재질 · 형상이
다른 판재의 절단



레이저 용접



프레스 성형

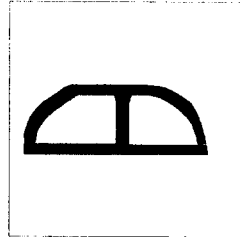


그림 1. 레이저 용접 성형기술

표 1. 국내 · 외 기술개발의 동향

국가	연구개발 착수 년도 및 주요 내용
일본	<ul style="list-style-type: none"> • 1970년대 : 동경 공업대 기초연구 시작 • 1985년 : Toyota 자동차에서 본격 개발 착수 • 1993년 : Toyota 자동차에서 레이저용접 Process 개발 (9,10) • 1995년 : 4개 공장 (Takaoka, Tsutsumi, Motomachi, Tahara) 에서 생산판넬의 35%에 적용중(8)
미국	<ul style="list-style-type: none"> • 1989년 : Ohio 주립대, USS Technical Center, GM에서 기초연구 시작 (11) • 1992년 : ISI, AISI에서 향후 자동차업계의 주요 생산기술로 소개(12,13,14) • 1993년 : Michigan 대학에서 Tailored-Blanks 기술소개 (15) • 1995년 : Ohio 주립대 연구결과(16,17) Cadillac Deville/Conse 의 차체에 적용중
유럽	<ul style="list-style-type: none"> • 1987년 : Thyssen Stahl AG에서 개발 착수 • 1992년 : Thyssen Stahl AG에서 개발(18) • 1995년 : AUDI, BMW 에서 일부 판넬에 적용 중
한국	<ul style="list-style-type: none"> • 1989년 : RIST 레이저 용접 기초연구 시작 • 1993년 : HMC 에서 기초연구 착수 • 1995년 : 자동차 회사, 학교 등에서 기초연구 착수(8)

국내에서는 레이저 용접을 하기 위하여 1990년 산업과학 기술연구소(RIST)에서 CO₂ 레이저 용접기를 도입하여 기초연구를 수행하여 왔고, 1993년부터 레이저 용접 후 성형기술에 대한 기초연구를 자동차 업계에서 추진 중에 있으나 두께, 성질 및 형상이 서로 다른 판

재를 용접하여 성형을 하기에는 실질적으로는 많은 어려움이 있다. 최근에 “레이저 용접 적합설계 및 생산요소 기술개발”(8) 을 위하여 산업체 및 대학이 연계하여 기술개발을 위한 준비가 진행 중에 있는 실정이며, 선진 외국(일본, 미국, 유럽)의 자동차 회사들과 국내의 기술개발 동향은 표1과 같다.

이상의 국내·외 연구 환경을 고찰해 본 바와 같이 레이저를 이용한 판재의 용접기술에 대한 국내의 연구는 기초연구 단계에 있으며 두께, 형상 및 재질이 서로 다른 경우에 대한 성형해석 및 공정해석을 수행한 경우가 전무한 실정이다. 이러한 상황에서 레이저를 이용한 판재의 용접 후 성형을 위한 탄소성 유한요소 해석 및 공정설계 기술의 확보를 위한 노력이 활발히 진행되고 있으나 기본적인 공학적 데이터가 부족하고 기본기술이 낙후되어 있어 이들 기술을 확보하는데는 상당히 어려운 처지에 있다.

2. 산업적인 필요성

현대의 자동차 산업의 발전추세는 에너지, 지구의 환경보호 및 품질(안전성, 내구성, 안락성) 향상을 위한 노력이 필요하다. 또한, 우리 나라의 자동차 산업의 산업은 개방화의 요구에 직면하고 있어 기술자립을 위한 각 업계의 신속한 대응이 요구되고 있으며, 이를 위한 철강업체와 자동차 업계의 대응으로는 표2와 같다.

표2. 철강 및 자동차업계의 기술자립을 위한 연구과제

	철강 업체의 대응	자동차 업체의 대응
1	고강도, 고내식성, 재진 강판 개발	새로운 생산기술 개발-레이저 용접판재의 성형기술
2	레이저 용접기술 개발	소형 경량화를 위한 경량 신 소재의 사용
3	유압성형을 위한 최적 가공기술 개발	생산성 향상
4	재활용 기술개발	부품의 자체 설계능력 확보

국내의 자동차 업계에서 기술개발을 하여야 할 과제가 산적하여 있으나 중량감소, 생산비용의 절감, 고품질 및 재활용 등의 표3과 같은 산업적 효과가 기대되는 레이저 용접판재의 설계기술 및 가공기술에 관한 연구가 조속히 이루어져야 한다.

표 3. 레이저 용접 후 성형기술의 산업적 효과[13]

레이저 용접 후 성형기술의 산업적인 효과			
중량	가격	품질	재활용
<ul style="list-style-type: none"> 경량화 	<ul style="list-style-type: none"> 금형비 절감 조립비 절감 재료비 절감 스리비 절감 	<ul style="list-style-type: none"> 수정밀도 정특성 특성 수상도 피연속 유수 도유스 의조유 	<ul style="list-style-type: none"> sealant 사용지 활용 재활용
<ul style="list-style-type: none"> (18Kg/1대폭가성) 	<ul style="list-style-type: none"> 152\$ 가 격절감/1대 	<ul style="list-style-type: none"> 정밀도 특성 수상도 피연속 유수 도유스 의조유 	<ul style="list-style-type: none"> sealant 사용지 활용 재활용

이상의 기대효과 이외에도 신 소재의 사용, 중량감소, 금형의 평가 기술, 가공비 절감, 조립기술의 확립, 조립비용 절감, 중량 감소, 설계기술의 편리성 및 치수의 고정도화 등의 기술적인 효과가 발생된다.

레이저 용접 후 성형을 필요로 하는 승용차의 부품은 그림2와 같고, 이들 이외에도 자동차 부품중 특정한 부분을 보강하여 강도를 증가시킬 필요가 있는 경우와 고안전성이 요구되며 공정을 줄일 필요가 있는 부분에 대하여 레이저 용접판재를 이용한 성형을 한다.

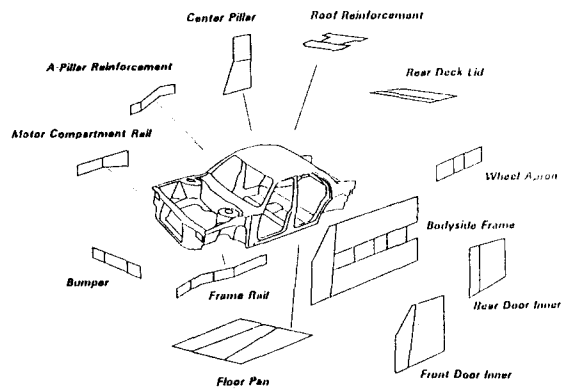


그림 2. 레이저 용접 후 성형을 하는 승용차의 주요 부품

토요타 자동차는 소형·경량화, 생산비 절감, 고품질, 재활용 등의 산업적인 효과를 달성한 바가 있고 여러 부품중 특히 소재 사용률에 많은 영향을 주는 floor pan

panel, body side aperture, door inner panel, center pillar, front shock absorber tower 등에 적용하고 있으며, 레이저 용접판재를 이용한 성형기술의 적용범위를 점차 확대해 가는 추세로서 그 현황은 표4와 같다.

표4. 토요다 자동차의 적용현황

년도	종형			적용사례
	소형 레이저라인	중형 레이저라인	대형 레이저라인	
1985	5 만대			• sun roof reinforcement에 적용
1986	10 만대			• 라카오 공장도입
1987	25 만대			
1988	80 만대			• 일본 4개 전 공장에 도입 • 세레지오 side outer panel에 적용
1989	80 만대	30 만대		• 중형 레이저라인 도입
1990	80 만대	50 만대		
1991	80 만대	100 만대	30 만대	• 자동차 생산량의 35%에 적용

국내에서 레이저 용접판재의 성형기술을 습득하여 승용차의 body side panel에 응용하였을 경우와 종래의 생산기술을 비교하면 표5와 같고, 재료 실수율, 품질관리, 생산성 향상에 기여하는 정도가 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 산업적인 효과를 달성하기 위하여는 부품의 최적설계 조건도출, 레이저 용접된 판재의 성형공정 해석 및 성형성 평가, 금형 설계기술, 변형을 측정기법 등의 판재성형 전반적인 내용이 체계적으로 연구가 되어야 한다.

표 5. 종래 기술과 신 기술과의 비교{10}

구분	종래 기술		레이저용접 성형기술	
	분할 방식	입체화 방식		
비교	재료 실수율	65 %	40 %	65 % 이상
	재료의 두께	동 일	동 일	서로 다른 두께
	재료선택 자유도	가 능	불가능	가 능
	판넬수, 금형수	5판넬, 20개 금형	1판넬, 4개 금형	5 판넬, 4개 금형
	외 관	열 세	좋 음	좋 음
	치수 정밀도	열 세	좋 음	좋 음
고	판넬강성, 강도	열 세	좋 음	좋 음
	특 정	대량생산 적합	소량생산 적합	소량/대량생산에 적합

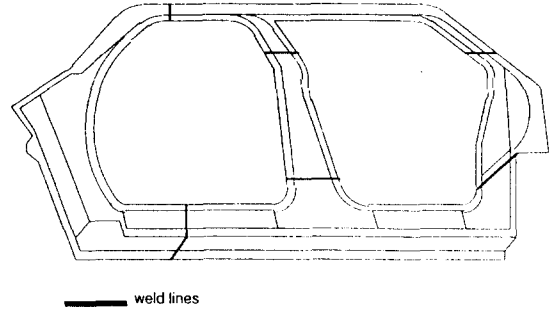


그림 3. 승용차용 body side panel

이 기술이 정착되면 승용차 부품의 설계기술[19]이 확보될 수 있고, 자동차의 성능 및 안전도, 승차감을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 가공보장설계로 인한 공정 개선에도 직접적인 영향을 주게 되어 생산 원가절감이 될 것이다.

우리 나라에서도 이 기술에 대한 연구가 완료되면 고부가가치 기술에 대한 선진국의 기술이전 기피로 인한 국내 자동차 업계의 설계 및 생산기술 자립에도 기여할 수 있고 자동차 부품업체들의 실질적인 부가가치를 높일 수 있어 대외 경쟁력이 강화될 뿐 아니라 외국에 지불되는 기술료(총 부가가치의 80%)[20,21,22]를 지불하지 않아 외화낭비를 방지할 수 있을 것이다.

3. 응용기술

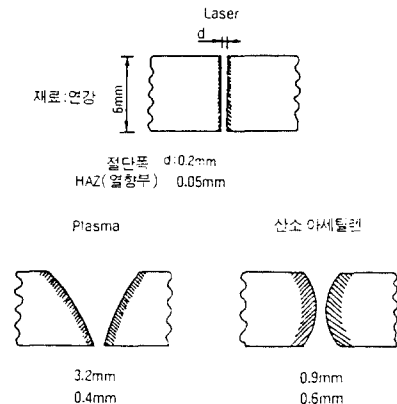
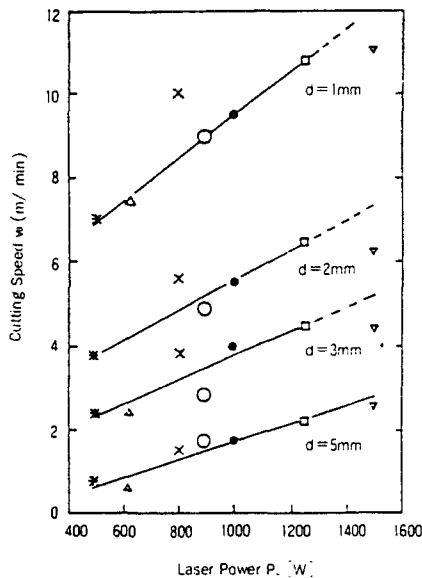


그림4. 각종의 절단폭

레이저 용접판재는 그림4와 같이 비드가 좁지만 용입이 깊고, 열영향부가 적어 열변형이 작다. 그리하여 서로 다른 이종재료를 용접하여 성형을 하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나 가공 도중 가공한계를 초과하거나 스프링백으로 인하여 용접부에서 결함이 발생되고 있으며 이는 용접결함과 제품결함으로 나타날 수 있다. 그러나, 레이저 용접된 판재의 성형공정은 종래의 성형법에서 생산된 제품보다 품질(치수의 정밀도, 피로 특성, 충돌특성 및 뒤틀림)이 우수하다.

4.1 Monitoring Process

레이저 용접기는 가공될 물질특성에 따라 다르므로 최적의 레이저 시스템을 설정하여야 하고 monitoring process를 통하여 용접부의 특성파악 및 결함추적에 대한 연구가 이루어 지고 있다. 특히 레이저의 출력에 따라 그 가공속도가 그림5와 같이 다르므로 적합한 가공속도를 미리파악을 하여야하고, 용접판재가 용융되어 기화하지 않도록 레이저 펄스폭을 조절하며, 사용레이저



- *ROFIN SINAR RS500 □ COHERENT EFA 51
- △ COHERENT EFA × COHERENT SUPER 48
- MESSER GRIESHEIM EUROLAS 1000 ▽ SPECTRA PHYSICS 820
- ROFIN SINAR RS 1000

그림5. 광출력에 따른 가공속도

파장에서 흡수가 크도록 용접물질에서 표면반사를 제어한다.

이들 외에도 정밀한 절단 및 용접을하기 위하여는 spot size가 작고, 초점심도(depth of focus)가 크야 하며, 렌즈 및 용접물간의 초점거리에 따라 절단 및 용접특성이 달라지므로 이를 제어하여야 한다. 공정변수를 정형화하여 양질의 레이저 용접을 할 수 있도록 하기 위하여는 다음과 같은 변수들을 사용한다.

$$Q = f(G, F, L, P)$$

표6. 레이저 공정변수

공정 변수	관 련 인 자
Q(Quality)	G, F, L, P
G(Cutting Gas)	Nozzle 형상, Nozzle과 가공면과의 거리, 가스의 압력 및 종류
F(Forcussing)	Intensity, Spot Size, Focal Length
L(Laser)	Power, Beam Mode, Polarization, Divergence
P(Process)	Speed, Material Thickness, 재료의 화학적 조성

선진 외국에서는 레이저 절단 및 용접기술에 대한 데이터 베이스를 구축하여 On-line closed loop control을 구성하며 모양이 복잡한 피가공물에 대하여도 그림6과 같이 구성한다.

그러나 레이저 용접판재를 이용한 성형을 하기 위한 레이저 절단 및 용접에서는 피가공소재가 평면에 위치하고 있으므로 레이저 공정변수를 찾아내는 것이 용이하다. 특히, 공정변수들은 용접부의 기계적인 특성에 영향을 줄 수 있으므로 이를 고려하여 설정을 한다.

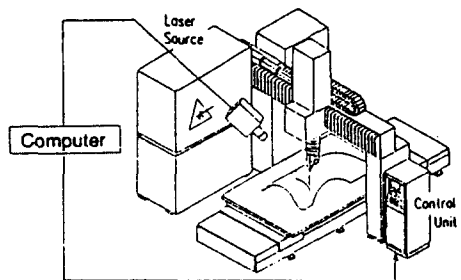


그림6. Closed loop control

4.2 자동차 부품의 경량화 및 강성향상

기존의 자동차 부품을 유한요소 프로그램을 이용하여 구조해석(23,24,25)을 하고 이를 이용하여 두께, 재료 및 표면이 서로다른 판재를 레이저 용접한 재료로 가정하여 재구조해석을 한다. 이 결과를 이용하여 성형공정을 설계(26-29)하기 위한 판재의 성형성, 강성, 충돌특성, 피로저항, 레이저 커팅, 용접표면, 판재의 분할갯수 등(30-36)을 결정한다. 특히, 탄소성 유한요소법을 이용한 성형 공정해석을 하기 위하여는 판재의 용접된 부분에 대한 그림7과같은 용접특성(35)과 표면상태를 미리 파악하여 정확한 계산이 이루어지도록 하여야 할 것이다. 가공공정과 일체성형 범위를 결정하는 변수가 되는 여러 가지의 두께와 형상 및 재질로 된 각 재료와 용접재의 성형성 한계 파악은 금형 설계시에 많은 영향을 끼치게 되므로 정확한 데이터를 확보(36)하여 유한요소 해석 시에 사용할수 있도록 한다.

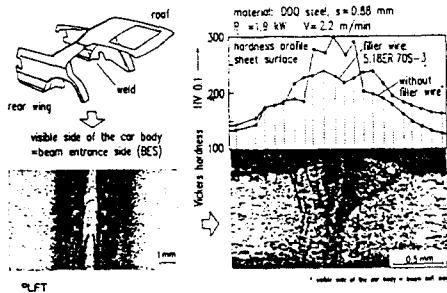


그림 7. 레이저 용접면의 기계적 특성

4.3 금형 공정설계

공정설계에서는 서로 다른 두께, 형상, 재질을 가진 판재를 성형하게 되므로 변형이 특정한 위치에만 집중될 수 있으므로 이를 보정하기 위하여는 다이의 위치마다 서로 다른 블랭크 압력이 유지(16) 되도록 조절할 필요가 있다. Tailored-blanks 일반적으로 두께가 서로 다르기 때문에 상하 다이의 접촉상태가 일정하게 유지시키는 것이 어려우므로, 상하 다이의 bead 형상과 위치를 조절(29,37,38) 하여 성형시 고르게 변형이 발생되도록 하는 금형설계 연구를 한다. 이를 위하여는 많은 수치실험(유한요소 해석)을 하여야 하고, 계산된 결과를

이용하여 실험금형을 제작한다.

특히, 실험금형을 제작할 경우 고려되어야 할 사항은 공급된 재료 두께가 다르므로 blank holder와 소재 혹은 금형과 소재가 모두 접촉하는 경우가 아니기 때문에 변형도중 bending 및 stretching을 받는 부분이 발생된다. 그러므로 blank holder 와 금형사이의 소재에서 특정한 부분에만 변형이 집중되지 않도록 하기 위하여는 금형의 bead 위치와 크기를 조절할 수 있도록 제작되어야 한다. 이를 위하여는 bead의 형상과 위치를 임의로 조절할 수 있도록 실험금형의 가장자리에 요구되는 형상의 bead를 삽입이 가능하도록 분할 삽입금형을 제작하는 것이 바람직하다.

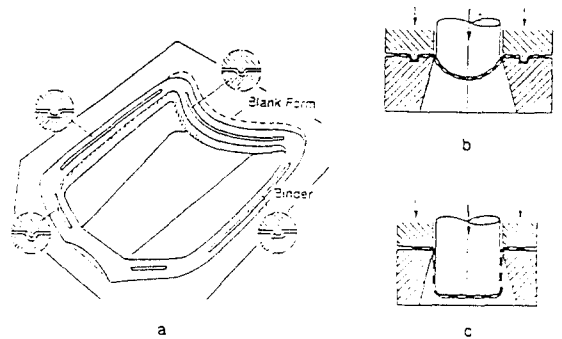


그림 8. 위치에 따른 bead의 형상 변화(35)

소성가공에서의 금형 공정 수의 생산성과 밀접한 관계를 가질 수 있고, 성형 도중 그 전단계의 형상은 다음 단계의 금형형상을 결정하는 주요한 인자가 되므로 블랭크 설계를 위한 세심한 주의가 요망된다. 금형 공정설계는 여러 단계의 과정을 거치게 되므로 각 공정별로 성형해석을 하고, 그 결과(응력, 변형률, 변위)는 다음 단계의 계산에서 초기치로 사용되도록 설정하며, 이들 일련의 연구 체계도는 그림9와 같다.

4.4 스프링백 및 잔류응력을 고려한 정밀 금형설계 기법

스프링백 현상(6,7,37)은 각 공정의 완료 후 공구 세트로부터 소재가 분리될 때 제하중(unloading)에 의하여 필연적으로 발생되며, 이로 말미암아 치수의 불안정이 나타난다. 치수 정밀도가 높은 제품을 생산하기 위

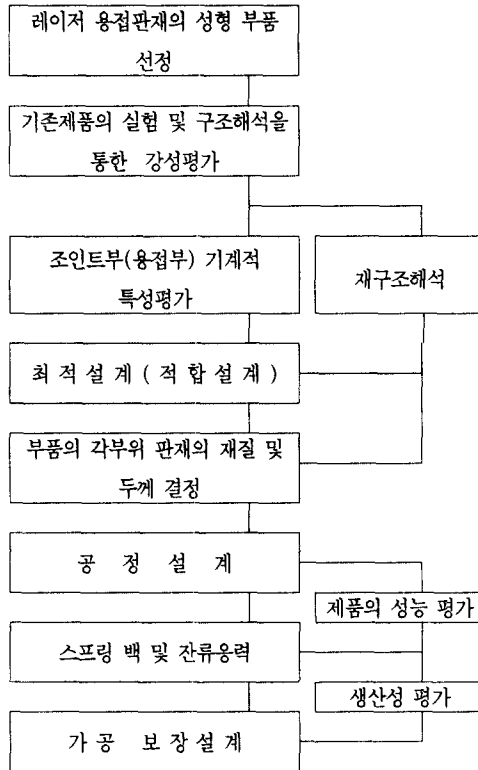


그림 9. 레이저 용접 판재의 공정설계를 위한 연구 체계도

하여는 가공후의 스프링백 량을 적절히 예측하여 이를 보정하여 금형설계를 하는 것이 바람직하지만 재질과 형상이 서로 다른 판재를 소재로 사용하였기 때문에 그 양을 예측하기가 까다롭다. 그러나 레이저 용접 판재를 이용한 성형법에서는 비교적 제품의 크기가 크므로 스프링백 현상으로 인한 치수 정밀도를 저해할 우려가 높기 때문에 이를 방지하기 위한 연구를 수행한다. 성형 후 생산된 제품의 스프링백이 완전히 일어난 후 잔류응력을 예측할 수 있다. 이 잔류응력은 응력의 크기와 방향에 따라 제품의 수명에 영향[39,40]을 줄 수 있으므로 이를 미리 파악하여 작동 중에 발생될 지도 모를 문제점을 미연에 방지할 수도 있을 것이다.

이를 위하여는 정확한 유한요소 해석이 수행되어야 하

며, 이 결과중 최대 주응력의 방향과 크기를 조절하여 제품의 수명을 연장시킬 수도 있다. 특히, 성형된 제품의 내부에는 수많은 micro crack이 존재하고 있으므로 양(+)의 잔류응력 성분은 반복하중을 받게 되면 crack을 성장시키는데 중요한 역할을 하게 되며, 성장속도는 응력의 크기와 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러므로 잔류응력의 크기와 방향을 공정 개선을 통하여 조절할 수 있을 것이므로 공정설계 시 세심한 주의가 요구된다.

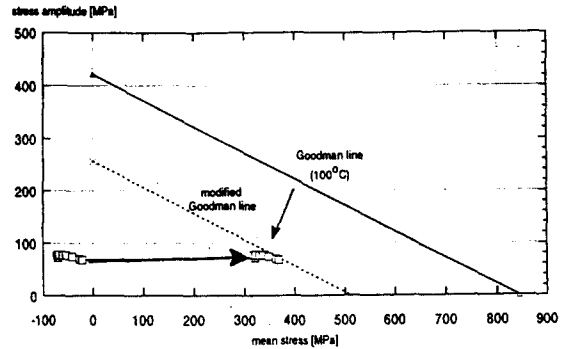


그림 10. 인장 잔류응력이 과다한 경우의 피로파괴[41]

그림 10에서 보이듯이 내구선은 평균응력이 인장강도와 인응력 폭이 피로한도(인장강도의 0.5배)인 두 직선을 연결하는 Goodman line[41,42]을 사용하기로 한다. 내구선도에서 안전 여유도는 재료의 결함을 고려하여 modified Goodman line을 설정하고, 제품이 작동 도중에 발생하는 응력과 잔류응력을 합하여 설정된 line을 초과하지 않으면서 멀리 떨어질수록 수명이 연장될 가능성이 높아진다. 이러한 특성을 이용하여 승용차 부품을 가공 후 과다한 인장 잔류응력이 발생되지 않도록 성형 공정개선을 위한 노력이 요구된다.

참고문헌

1. T.M. Yao and K.K. Choi, "3-D Shape Optimal Design and Automatic Finite Element Regriding", Int. J. Numer. Methods Eng. 28, pp.369-384, 1989.
2. PDA Engineering, Patran Plus User's

- Manuals Vols. I and II. Software Products Division, 1560 Brookhollow Drive, Santa Ana, CA, 1987.
3. R.J. Yang, "A Three-dimensional Shape Optimization System - SHOP3D", *Comput. Struct.* 31 (6), pp.881-890, 1989.
 4. D.A. Tortorelli, "A Geometric Representation Scheme Suitable for Shape Optimization", *Mech. Struct. Machines* 21(1), 1993.
 5. Kyung K. Choi, Kuang - Hua Chang, "A study of Design Velocity Field Computation for Shape Optimal Design", *Finite Elements in Analysis and Design* 15, pp.317-341, 1994.
 6. Hambrecht, "Numerical Analysis of Binder Wrapping Stage and Part Springback in Sheet Metal Forming", *ERC/NSM-23-S*, 1991.
 7. Bhupatiraju, "An Investigation of Bend Angles and Spring Back Control in Straight Line Bending(A Report)", *ERC/NSM-13-S*, 1994.
 8. 서울대학교 부설 정밀기계설계공동연구소, "레이저 용접 적합설계 및 생산요소 기술 개발", 통상산업부 공업기술기반과제 수요조사 보고서, 1995.
 9. Frank A. DiPietro, "Lasers Applied to Body-In-White", L.A.S.E., Inc., 1993.
 10. Kazuhisa Mikame, "Applications of Laser Material Processing in Toyota Motor Corporation", Toyota Motor Corporation, 1993.
 11. Yossifon, "A Servo-Motor Driven Multi-Action Press for Sheet Metal Forming", *OSU ERC/NSM*, 1990 .
 12. Jeffrey A. Moss, "Making Money with Lasers - Economics of Laser Welded Engineered Elanks", Utilase System, Inc., 1993.
 13. John K. Baysore, "Laser Blank Welding: Cost Saving Case Studies", Blank Welding Technologies, 1993 .
 14. Frank A. DiPietro, "Lasers - A Golden Opportunity", L.A.S.E., Inc., 1993.
 15. O.S.A.T., "An Overview of Tailored - Blanks and Their Technology", University of Michigan, 1993.
 16. Blankholder Force Control Using Nitrogen Cylinder in Deep Drawing of Round and Rectangular Parts From Welded Blanks, *OSU ERC/NSM-93-59-s*.
 17. Sweeney, "Multi Gage Laser Welded Blank Technology", *OSU ERC/NSM*, 1995.
 18. Christoph S. Wilfried P., "Tailored Blanks - a Material for New Ways of Design", Thyssen Technische Berichte, 1992.
 19. Automotive Engineering, "Supension Design and DFMA", pp. 33-36, 1, 1993
 20. 화신 기술연구소, "Shell 경량 Suspension System 개발", 통상산업부, 공업기술기반과제 수요조사 보고서, 1994.3.
 21. 김동원, 전병희, 김낙수, 김형종, "유한요소법을 이용한 Brake Master Vac. 의 설계", 통상산업부 공업기술기반과제 연구보고서, 1993.
 22. B. H. Jeon, D. K. Min, H. J. Kim, N. Kim, "A Study on the Process Improvements of the Multi Stage Deep Drawing by the Finite Element Method", *JMPT*, Vol. 54, No. 1-4, pp.230-238, 1995
 23. Fukushima J., Suzuki K., Kikuchi N., "Topology Optimization of a Car Body with Multiple Loading Conditions.", 33rd AIAA/SME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamic and Materials Conf., Dallas, TX, pp2499-2507.
 24. Keisuke K., Satoshi I., "Study of Optimization Method for Structural Parts Using CAE." *自動車技術會 學術講演會*, pp. 277-280, 1994
 25. R.V. Grandhi, S.C. Modukuru, J.C. Malas,

- "Intergrated Strength and Manufacturing Process Design Using a Shape Optimization Approach", Journal of Mechanical Design, pp.125-131, Vol. 3, 1993.
26. Sitaraman, " Process Sequence Design for Multi-stage Forming of Axisymmetric Sheet Metal Parts", OSU ERC/NSM-49-S, 1989
27. Ahmetoglu, " Improvement of Part Quality in Stamping by Controlling Blank Holder Force and Pressure", OSU ERC/NSM-12-S,1992.
28. Saran, " Section Form for Simulation of Sheet Stamping - Verification Testes with Constant Variable Blankholder Forces ", OSU ERC/NSM-12-B-D-S, 1993 .
29. Tufekci , " Drawbead Design and Estimation of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", OSU ERC/NSM-13-S, 1993.
30. M. Geiger, " Synergy of Laser Material Processing and Metal Forming", CIRP, Vol. 43, pp. 563-570, 1994.
31. T. Nikagaya, " Recent Developments in Auto Body-Panel Forming Technology.", CIRP, Vol.42, pp. 717-722, 1993.
32. J. M. Hoven, K. M. Ostyn," Stamping of Tailor Made Blanks", Automotive Body Materials, IBEC, pp.52-59, 1994
33. J. K. Baysore," Laser Blank Welding : It Just Makes Sents", Automotive Body Materials, IBEC, pp.60-61, 1994
34. J. K. Koons," Body Sheet Metal Applications of Laser Welding", Advanced Technologies and Processes, IBEC, pp.97-100,1994
35. M. Geiger, " The Mechanism of Laser Forming", CIRP, Vol. 42, pp. 301-304, 1994.
36. K. Sadamura, "레이저 용접판재의 성형", Journal of the JSTP, Vol. 34, No. 391, pp. 917-924, 1993
37. D. Schmoeckel, " Springback Reduction in Draw-Bending Process of Sheet Metals." ..CIRP, Vol. 42, pp. 339-342, 1993.
38. Drawbead Design and Estimation of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, OSU ERC/NSM-93-13-s
39. 하원필, 임세영, " Explicit Code를 이용한 Lower Control Arm의 스탬핑 해석", 자동차학회 논문집, 제2권 2호, pp. 50-59, 1994.
40. 전병희, 김낙수, 민동균, " 커넥팅 로드 소단부 파단의 해석", 기계학회논문집, 19권 2호, pp. 382-390,1995.
41. ASM Metals Handbook, Failure Analysis and Prevention, Vol. 10(8th ed.),1975.
42. Hayashi M., "Current Trends in Automotive Forging Industry", Proceedings od 26th ICFG Plentary Meeting, Osaka, Japan 1993.