

레이저를 이용한 스탬핑 제품의 스프링백 형상교정에 관한 연구

심현보[#] · 김동우¹

A Study on the Shape Correction of Stamped Parts by the Irradiation of Laser

H. B. Shim, D. W. Kim

(Received July 14, 2009 / Revised August 25, 2009 / Accepted August 26, 2009)

Abstract

The study is concerned with shape correction of stamped product using the laser irradiation. As a fundamental study, laser irradiation process has been analyzed through the thermo-mechanical FE analysis. For the purpose of validation, laser scanning experiment has been carried out also. Since the deformation mechanism involved in the laser scanning is extremely complicated due to the highly temperature dependent material properties, the determination of laser scanning pattern is not easy for the application of real stamped parts. A simplified method for the application of springback correction has been suggested with the thermo-mechanical FE analysis.

Key Words : Springback, High Strength Steel, Shape Correction, Laser Irradiation, Thermo-Mechanical FE Analysis

1. 서 론

1.1 고강도강의 스탬핑

자동차는 다음과 같은 서로 상충되는 여러 요구조건들의 적절한 조화를 통해 구성된다. 즉 가벼우면서 튼튼한 것, 충돌안전성이 뛰어나면서 연비가 높은 것, 저렴하면서도 성능이나 디자인이 좋은 것에 덧붙여 경쟁사와의 치열한 경쟁에 따른 개발기간의 단축 등도 포함된다. 특히 가벼우면서도 튼튼한 차체를 만들기 위해서 고강도강판, 알루미늄합금, 마그네슘합금 등과 같은 경량소재의 적용 등이 이루어지고 있다.

차체에 적용되는 고강도강은 용도에 따라 일반용, 가공용, 심가공용, 소부경화형, 저항복비형, 소성유기변태형 등 다양한 종류가 있는데, 대체로 항복점이 높아질수록, 성형성이 나빠지는 경향이 있다.

범퍼를 포함한 대부분의 차체부품은 스탬핑 공정으로 생산되고 있는데, 고강도강판은 일반강에 비해 성형성이 나쁘다는 점, 스프링백이 크게 발생한다는 점 때문에 스탬핑공정 개발이 어려운 편이다.

스탬핑 공정은 크게 드로잉(drawing)과 포밍(forming)으로 분류할 수 있다. 즉 드로잉은 면변형률을 수반하면서 성형을 하는 방법으로 비교적 형상이 복잡한 제품에 적용되며, 포밍은 주로 굽힘작용에 의해 성형이 이루어지기 때문에 면변형이 최소화되는데 비교적 형상이 간단한 제품에 주로 적용되는데 대체로 포밍공정은 드로잉공정에 비해 스프링백이 크게 나타나는 경향이 있다.

스프링백은 일반적으로 항복응력이 높을수록, 소재의 두께가 얇을수록 크게 나타나는 경향이 있다. 고강도강의 스프링백이 특히 문제가 되는

1. ㈜아진산업 선형연구팀
교신저자, 영남대학교 기계공학부, e-mail: hbshim@yu.ac.kr

이유는 항복점이 높다는 점도 있지만 고강도강의 가공공정에도 기인하는 것으로 판단된다. 즉 고강도강관 성형시 해결해야 할 문제점인 성형성과 스프링백 중에서 성형성 문제를 우선적으로 해결하기 위해 포밍공정을 채택하기 때문에 높은 항복점에 의한 원인과 가공공정이 복합적으로 작용하여 스프링백이 크게 나타난다.

스프링백이 발생되면 성형 후 제품의 형상이 금형의 형상과 차이가 나기 때문에 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 스프링백을 미리 예측하여, 금형형상을 제품형상과 다르게 제작할 필요가 있다. 그렇지만 스프링백을 정확하게 예측하기가 쉽지 않다는 문제점이 있다.

이러한 기술적인 문제점뿐만 아니라 완성차 업체간의 치열한 경쟁이 더해지면서 개발기간의 단축까지 요구하고 있다. 따라서 고강도강성형의 제반 문제점, 성형성과 스프링백을 해결하기 위해 열간스탬핑(hot stamping)의 적용이 확대되고 있다.

열간스탬핑은 소재를 오스테나이트영역인 920℃ 정도까지 가열한 후 스탬핑하는 방법으로 고온에서의 높은 성형성과 동시에 성형동안 금형에서 냉각속도의 조절을 통한 열처리효과를 얻을 수 있고, 스프링백이 거의 없다는 점 때문에 고강도강관의 스탬핑에 가장 이상적인 공정으로 인식되고 있다. 그렇지만 열간스탬핑은 스탬핑 소재의 구입의 어려움, 가열로나 고온의 소재 반송장치 등과 같은 대규모 설비투자가 소요되는 문제점이 있다. 또한 열간스탬핑은 성형과 동시에 열처리효과를 얻어야 하기 때문에 열처리를 위한 온도제어, 금형으로의 열전달, 냉각문제, 열처리에 의한 조직변화 등 일반 스탬핑업체가 경험하지 못했던 새로운 기술적인 문제까지 더해진다.

1.2 스프링백 교정법

스탬핑 공정개발은 일반적으로 제품의 형상 데이터를 이용하여 금형형상을 설계하고, 가공된 금형으로 트리아아웃 단계에서 비드의 수정이나 블랭크 형상변경 등의 방법으로 진행된다. 주로 시행착오로 이루어지는 트리아아웃을 거치면서 파단이나 주름 같은 성형불량 뿐만 아니라 스프링백과 같은 형상불량도 대부분 해결된다. 그렇지만 이 방법으로는 일반강 수준에서 발생하는 스프링백은 교정가능하지만, 고강도강과 같이 스프링백이 큰 소재는 시행착오 과정이 길어지는 문제점이 있다.

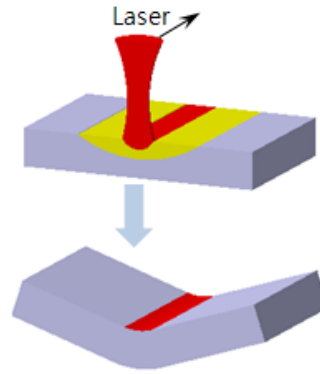


Fig. 1 Deformation due to laser irradiation

이보다 발전된 방법으로는 스프링백의 크기를 미리 예측하여 금형형상을 제품형상과 다르게 설계하는 방법이 있다. 이 방법은 형상이 간단하거나 일반강수준의 스탬핑에는 금형설계 때 축적된 경험을 적용하면 트리아아웃과정이 단축될 수 있으나, 형상이 복잡하거나 고강도강의 경우에는 경험만으로는 예측이 어렵기 때문에 보다 정확한 예측을 위해 스프링백 해석을 수행한다. 그렇지만 스프링백 해석은 성형 해석과는 달리 계산시간이 매우 많이 소요되기 때문에 경우에 따라서는 제한된 개발기간 내에 해석이 불가능할 수도 있으며, 뿐만 아니라 해석의 정확도도 문제가 된다. 즉 스프링백해석은 성형해석과는 달리 해석의 정확도가 해석 기술자의 능력에 관련되어 있고 훈련된 해석 기술자의 채용이 어렵기 때문에 중소 스탬핑 업체에서는 적용하기가 쉽지 않다.

마지막으로 스탬핑 후교정을 통해 스프링백에 의한 형상오차를 수정하는 방법을 들 수 있다. 이 방법에서는 후교정 수단으로 레이저를 사용하며, 적절한 부분에 레이저를 조사함으로써(irradiation) 굽힘변형을 유발하고 굽힘변형의 결과로 형상 변화를 유도하는 방법이다.

즉 Fig. 1 과 같이 레이저빔을 판재의 한쪽 면에만 조사하면 레이저가 조사된 면과 그렇지 않은 면 사이에 온도차이, 즉 두께 방향으로의 온도차이가 유발된다. 두께방향의 온도차이에 따라 두께 방향으로 발생된 열팽창의 크기가 달라지기 때문에 굽힘 변형이 발생하는 방법이다.

이 방법에서는 두께방향으로의 온도편차가 클수록 굽힘변형이 커지기 때문에 열의 집중도가 높은 열원을 사용하는 것이 효율이 좋다. 이 때문에 가열원으로 레이저빔을 사용하고 있다.

열팽창은 소재의 전방향에 걸쳐 발생이 되나, 두께방향으로의 열팽창은 이 방향으로의 소재의 팽창을 방해하는 요인이 없어 자유롭게 팽창하고, 조사후 냉각시에도 자유롭게 수축하기 때문에 두께방향으로의 변형은 비교적 적다. 그렇지만 레이저빔 주사선방향과 주사선의 수직방향으로는 주변부에 의해 구속이 되기 때문에 자유롭게 팽창하지 못하고, 냉각동안에도 자유롭게 수축되지 않는다. 이 때문에 냉각후에도 변형이 잔류, 즉 조사선을 기준으로 굽힘변형이 발생한다.

이 방법은 앞서 설명한 시행착오법이나 스프링백 해석을 통한 금형형상변경법에 비해 금형형상의 변경이 필요 없기 때문에 공정개발이 쉽다는 장점이 있다. 즉 일반적인 스탬핑공정 개발절차에 따라 금형을 개발하고, 해결되지 않는 형상오차는 기존의 생산라인에 후공정의 개념으로 레이저 가공기를 추가하는 것만으로도 적용이 가능하기 때문에 대폭적인 공정변경이 없다는 장점이 있다.

본 연구에서는 이 원리를 이용하여 스프링백 형상오차를 교정하는 방법을 제시코자 한다

1.3 문헌조사

고강도강의 스프링백은 금형개발후 트리아아웃 과정에서 시행착오를 통해 이루어져 왔기 때문에 발표된 연구 논문은 많지 않은 편이다. Liu[1]는 U Channel 의 성형에서 몇 개의 조각으로 분리된 블랭크 홀더에서 각 조각에서의 홀더력을 조절함으로써 스프링백을 줄일 수 있는 방법을 제시하였다. Standers 등[2]과 Pairel[3]는 스프링백 해석 결과를 이용하여 형상오차를 최소화하기 위한 최적 금형 설계방법을 제시하였다. 즉 해석결과를 바탕으로 금형의 설계변수들을 자동적으로 재설정하고 오차가 허용치 이내로 들어올 때까지 반복적인 수행으로 최적조건을 찾는 방법을 제시하였다.

Jernberg[4], Dutton[5], 그리고 Lingbeek[6] 등은 시행착오법으로 스프링백을 교정하는 방법을 사용하였다. 즉 제품형상을 바탕으로 금형을 제작한 뒤, 스프링백에 의해 발생된 형상오차를 고려하여 새로운 금형형상을 생성한다. 이 방법은 기본적으로 시행착오법이기 때문에 금형형상을 새로 설계하고, 가공하는데 많은 시간과 비용이 드는 문제점이 있다.

레이저조사를 통한 형상교정법에 관한 연구결과도 발표되고 있으나[7~15], 이들 연구는 대부분 길이가 짧은 시편을 이용하여 해석과 실험을 통

해 공정변수의 영향을 조사하고 있다. 시편의 길이가 짧기 때문에 길이방향으로 굽힘 각도가 일정한 것으로 가정하고 있으며, 레이저 조사횟수에 따른 굽힘각도의 변화를 조사하였다.

Bao[11]는 굽힘각도에 미치는 단말효과(eye effect)를 조사하였다. 즉 시편의 끝단부위는 비정상상태(transient state)의 온도분포를 가지기 때문에 변형의 모양이 중심부와 다르게 발생하는 점을 인지하였다.

1.4 연구내용

본 연구는 고강도강의 스프링백의 형상교정에 대한 기초연구로 수행되었으며 범퍼레일과 같은 곡률이 있는 U 형상의 채널을 대상으로 해석으로 통해 성형후 형상 오차를 조사하고, 오차교정에 필요한 굽힘 각도를 도출한다. 필요로 하는 굽힘 각도를 얻기 위한 공정조건을 도출하기 위해 평판을 대상으로 한 기초 레이저조사실험과 열기계 연계 열변형해석을 수행한다. 아울러 평판 소재를 대상으로 여러 가지 레이저 조사조건, 즉 출력, 속도, 조사 위치등을 달리 하면서 레이저조사 실험을 수행한다.

해석결과를 바탕으로 스프링백에 의한 형상오차를 보상하기 위한 레이저조사조건을 결정하는 방법을 제시할 예정이다.

2. Laser 조사공정의 열변형해석

2.1 해석모델링

레이저조사를 통해 얻어지는 열변형은 기본적으로 소성변형이다. 상온상태의 소재에 레이저를 조사하면 용융상태까지 도달시킬 수 있다. 즉 레이저조사가 되는 부분에서는 상온에서 용융온도까지 온도가 변화한다. 그런데 소재의 물성치는 온도에 따라 변화하고, 또 소성변형 영역까지 도달하기 때문에 비선형 문제가 되며, 시간의 경과에 따라 온도분포가 달라지기 때문에 과도해석(transient analysis)이 요구되며, 열변형을 해석하기 위해서는 열기계 연계해석이 요구된다.

레이저빔이 조사되는 영역과 그렇지 않은 영역 사이에는 매우 큰 온도편차가 발생하며 또 열해석이 변형해석에 비해 계산시간이 많이 소요되기 때문에 해석의 정확도와 해석시간을 최적화할 필요가 있다. 따라서 유한요소격자계를 설계할 때 레이저빔이 지나가는 부분에는 요소의 크기를 작

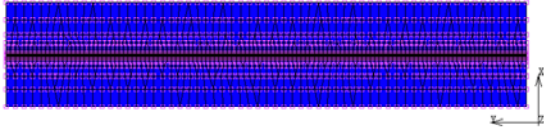


Fig. 2 FE Mesh system(60mm×300mm)

Table 1 Chemical composition

Element	C	S	Si	P	Cr	Mn	Ni	Mo
Weight%	0.080	0.002	1.208	0.028	0.018	1.664	0.19	0.003

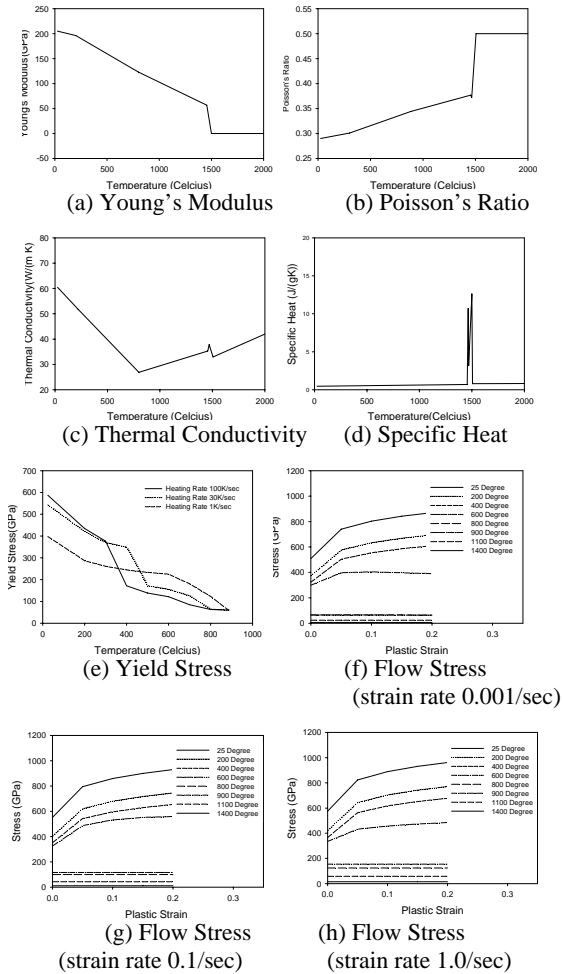


Fig. 3 Temperature dependent material properties predicted by JMatPro

계, 먼 부분에는 요소의 크기를 크게 설정하였고, Fig. 2 와 같이 60mm×300mm 의 경우 총 1947 개의 쉘요소를 사용하는 격자계를 구성하였다.

2.2 온도의존물성치의 설정

본 연구에서 사용한 재료는 고강도강판을 사용하였고, 레이저조사 공정은 열의 집중도가 높기 때문에 레이저빔이 조사되는 곳에서는 용융점부근까지 온도가 올라갈 수 있으므로 상온에서 용융점부근까지 범위에서의 탄성계수, 항복응력, 응력변형률곡선, 열전도도, 열팽창 계수 등 해석에 필요한 온도의존물성치의 설정이 필요하다. 그러나 이러한 물성 값들을 고온에서 실험적으로 결정하기는 상온에서 오는 달리 매우 어려워진다.

뿐만 아니라 레이저가 조사될 때와 그렇지 않을 때의 온도가 급격하게 변화하기 때문에 열변형에 의한 변형률 속도가 매우 높고, 위치에 따른 온도의 구배 또한 매우 높기 때문에 공정특성에 부합하는 물성치 측정은 쉽지 않다.

이러한 문제점 때문에 화학성분, 조직을 근거로 하여 온도의존 물성치를 예측해 주는 JMatPro 를 사용하여 온도의존 물성치를 구하였다[16,17].

JMatPro 의 입력변수는 소재의 성분조성, 결정립 크기, 오스테나이트화 온도, 변형률 속도 범위 등이며, 이를 데이터를 이용하여 물성치를 계산해준다. 입력변수의 준비를 위해 성분분석과 조직관찰을 실시하였다. 현미경을 통하여 측정된 결정립의 평균크기는 $2.2812 \times 10^{-4} \text{mm}^2$ 로 나타났고, 화학성분 조성은 Table 1 에 나타내었다.

Fig. 3 은 JMatPro 에서 예측한 물성치를 나타낸 것으로 응력-변형률 곡선의 경우 온도 25~2000°C, 변형률 0.0~0.2, 변형률 속도 0.001~1.0/sec 의 범위에서 예측한 값이다.

2.3 레이저빔의 열원모델

레이저빔의 열원모델은 Fig. 4 와 같이 3 차원 Gaussian 분포에 기초한 Goldak 모델 [18]을 사용하였다. 이 모델은 레이저빔이 시편에 조사되어 용융지가 형성될 때 용융지의 모양을 묘사할 수 있게 이중타구형으로 표현하고 있다. 즉 이 모델은 용접공정의 해석을 위해 개발되었으며 Marc 나 LS-Dyna 등과 같은 범용 해석 S/W 에 기본명령어로 설정되어 있어 편리하게 사용할 수 있다.

$$q_f^m = \frac{6\sqrt{3}F_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3(z+m)^2}{c_f^2}} \quad (1)$$

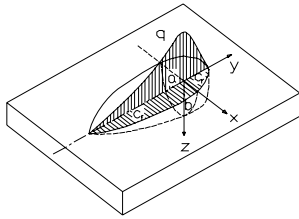


Fig. 4 Goldak heat source model

$$\dot{q}_r^m = \frac{6\sqrt{3}F_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3(z+w)^2}{c_r^2}} \quad (2)$$

여기서 Q 는 출력, a, b, c_f, c_r 은 열원의 형상과 관계하는 상수, v 는 레이저빔의 이송속도, t 는 시간, \dot{q}_f^m 는 레이저빔이동방향에 대한 전진부의 출력밀도분포, \dot{q}_r^m 는 후진부의 밀도분포를 나타내고 있다. F_f 와 F_r 은 각각 전진부분과 후속부분의 출력비율을 나타내며, 여기서 $F_f + F_r = 2$ 가 된다.

2.4 열경계조건

시편의 표면전체에 즉 판재의 윗면과 아랫면, 옆면에 대류경계조건을 부여한다. 시편은 정반 위에 자유롭게 놓아 둔 상태로 가정하였고, 아랫면에서 정반으로의 접촉에 의한 열전도는 없는 것으로 가정하였다. 레이저빔에 의해 열이 전달되면, 판재의 온도를 상승시키게 되고, 온도 상승에 의해 표면과 외기와의 온도차이가 생기게 되고, 이로 말미암아 대류열전도에 의해 열손실이 발생된다. 식 (3)은 자유표면에서의 대류경계 조건을 나타내고 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{free\ surface} = h_{\infty}(T - T_{\infty}) \quad (3)$$

여기서 n 은 면의 방향, h_{∞} 은 대류열전달계수, k 는 열전도도, T_{∞} 는 외기온도를 나타낸다. 해석에서는 외기온도 T_{∞} 를 25°C , 열전달계수 h_{∞} 는 $10\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 를 사용하였으며 복사 열전달은 무시하였다. Fig. 5는 레이저조사 공정을 개념적으로 나타낸 그림이다.

2.5 결과 및 토의

Fig. 6은 폭 60mm, 길이 300mm, 두께 1.4mm의

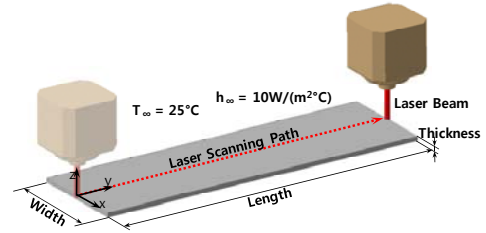


Fig. 5 Schematics of laser scanning(full path)

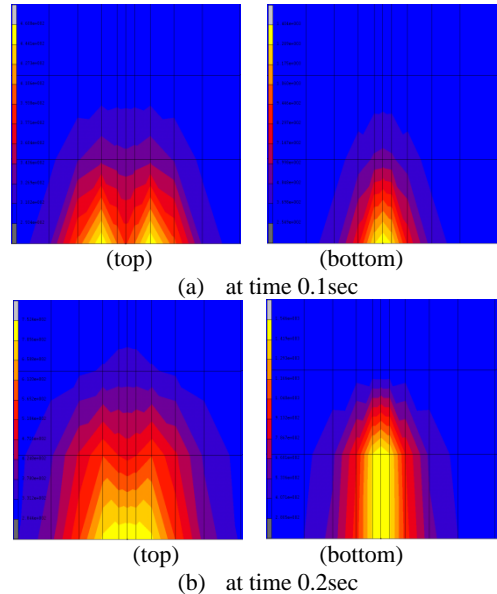


Fig. 6 Temperature distribution(800W, 1m/min)

판재에 출력 800W의 레이저빔이 1m/min의 속도로 움직이는 경우에 대한 해석결과이다. 레이저가 조사되는 윗면은 0.1초 후 약 1400°K 이상까지 온도가 상승하고 있으나 아랫면은 약 400°K 정도로, 상하면의 온도차이가 약 1000°K 까지 나타나 판재 두께인 1.4mm를 사이에 두고 극심한 온도차이를 보여주고 있다.

Fig. 7은 레이저가 조사된 후 충분한 시간이 경과한 후 얻은 열변형해석 결과를 레이저 조사선을 중심으로 발생한 굽힘각으로 표현한 것이다. 즉 폭 60mm, 두께 1.4mm의 시편으로 길이를 100mm, 200mm, 300mm로 달리하면서 전체길이를 출력 800W, 속도 1m/min의 일정한 조건으로 레이저를 조사한 후 발생된 굽힘각을 나타내고 있다. 굽힘각 $1.8^{\circ}\sim 2.8^{\circ}$ 범위에서 증가하는 경향을 보이고 있으며, 레이저빔 시작구간과 끝나는 구간에서는 단말효과(edge effect)가 나타나고 있다. 즉 길이가

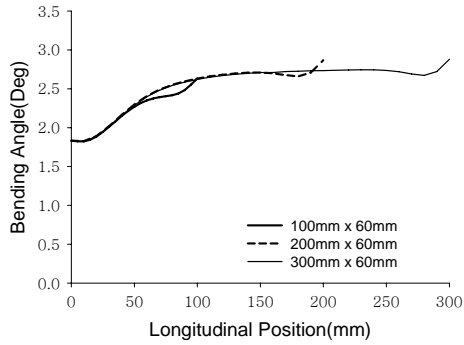


Fig. 7 Effect of specimen length on bending angle

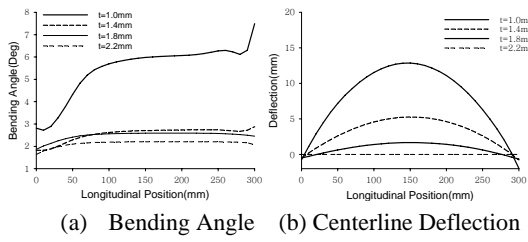


Fig. 8 Effect of thickness(800W, 1m/sec)

100mm인 경우에는 대부분의 영역에 단말효과가 나타나고 있으나, 이보다 긴 경우에는 정상상태 구간이 일부 나타나고 있다.

Fig. 8 은 판재의 두께의 영향을 조사한 것으로 시편의 크기를 300mm×60mm 로 동일하게 두고 시편두께를 달리하면서 해석을 수행하였다. 판재가 얇을수록 굽힘각이 증가하며, 중심선의 수직방향 변위, 즉 처짐량도 증가하고 있다. 즉 판재가 두꺼워 질수록 굽힘각도는 작아지고 처짐량도 감소하고 있음을 보여주고 있는데 Fig. 8(a)의 효과, 즉 레이저 조사선을 중심으로 한 굽힘효과를 얻기 위해 레이저조사를 실시하지만 실제로는 중심선의 수직변위, 즉 처짐도 부수적으로 발생하기 때문에 레이저 조사공정을 채택할 경우 중심선 처짐에 대한 고려도 필요함을 알 수 있다.

이상과 같은 방법으로 길이, 두께, 폭과 같은 기하학적 형상뿐만 아니라 출력, 이동속도 등과 같은 공정조건을 달리하면서 열변형해석을 수행하면 공정기구의 이해와 더불어 기초데이터의 확보가 가능해 진다.

Fig. 9 는 레이저 조사후의 대표적인 열변형후 형상을 나타낸 것으로 조사선을 중심으로 한 수축에 따른 굽힘변형이 발생되며, 부수적으로 조사선도 위로 휘어지는 중심선처짐이 나타난다. 즉

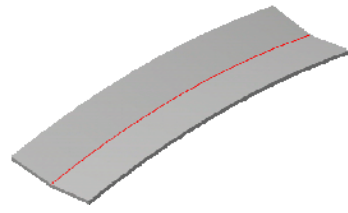
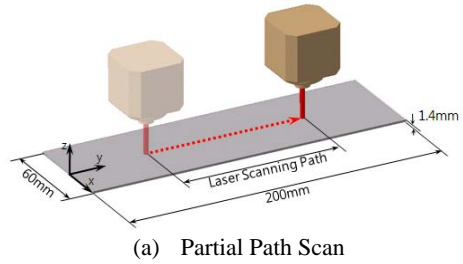


Fig. 9 Typical deformation shape



(a) Partial Path Scan

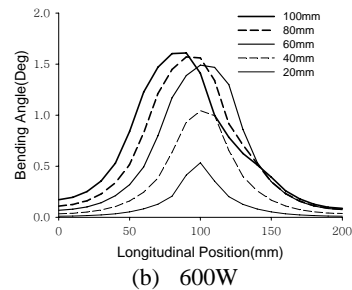


Fig.10 Effect of scanning length(600W, 1m/min)

조사선을 중심으로 한 굽힘은 당초 의도한 변형이지만 중심선 처짐도 수반되기 때문에 주의가 필요하다.

Fig. 10은 지금까지의 전체길이 조사가 아닌 부분조사를 할 경우에 대한 해석결과를 보여준다. 부분조사를 고려한 이유는 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 조사선 전길이를 일정한 조건으로 유지하더라도 위치에 따라 굽힘각도가 달라지며, 중심선 처짐과 같은 예상하지 못했던 변형이 발생된다는 점, 그리고 실제로 스탬핑후 스프링백 교정이 필요한 부분이 국부적인 영역에 그치는 경우가 많기 때문에 부분조사를 고려하게 되었다.

해석에 사용한 시편의 크기는 Fig. 10(a)와 같이 200mm×60mm×1.4mm 이며, 레이저출력을 600W, 레이저속도를 1m/min 으로 고정한 뒤 레이저 조사 영역을 시편 중심부 100mm, 80mm, 60mm, 40mm, 20mm 인 경우에 대한 해석을 수행 하였다. Fig. 10(b)는 굽힘각을 나타내고 있는데 조사길이가 증

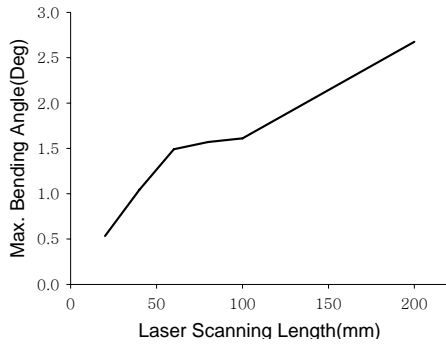


Fig.11 Scanning length vs max. bending angle(length 200mm, 600W, 1m/min)

가함에 따라 굽힘각도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 아울러 최대굽힘각 부분이 반드시 조사선의 중심부에 위치하지 않다는 점과 레이저가 조사되지 않은 곳에서도 조사위치와의 거리에 따라 굽힘이 발생되고 있음을 알 수 있다.

Fig.11 은 Fig.10 의 해석결과로부터 조사길이별 최대굽힘각도를 구하여 이를 조사선의 길이와 최대굽힘각도와와의 관계, 즉 출력 두께 1.4mm 의 판재를 600W, 1m/min 의 속도로 레이저조사로 할 때 얻을 수 있는 최대굽힘 각도를 나타낸 것으로 레이저굽힘 공정조건을 결정할 때 기본자료로 활용할 수 있다.

3 평판의 Laser 조사 실험

3.1 실험준비

시편을 준비할 때 레이저를 이용하여 절단하였는데 그 이유는 전단가공은 전단면 근처에 소성 변형 및 잔류응력을 유발시키기 때문에 잔류응력의 영향을 최대한 배제하기 위함이다. 레이저조사 시 표면조건에 따라 반사정도가 달라지면 소재로 유입되는 에너지가 달라질 수 있다. 따라서 조건을 일정하게 하기 위하여 시편표면의 방청오일, 먼지 등을 아세톤으로 깨끗이 제거하였다.

Fig. 12 는 최대출력 1,000W 인 TrumPF 사의 Nd-Yag 레이저가공기를 사용한 레이저조사실험 모습을 보여주고 있다. 정반으로의 열전달을 방지하여 일관된 실험결과를 얻기 위해 시편과 정반사이에 받침대를 사용하였고 또, 레이저빔이 조사되는 동안 산화를 막기 위해 CO₂ 가스로 레이저조사부위를 보호하였고, 레이저빔의 직경은 6.5mm 로 설정하였다.

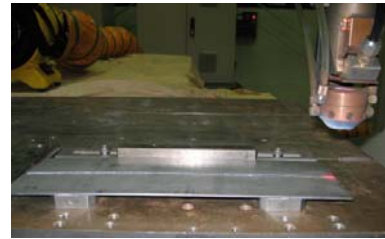


Fig.12 Laser irradiation experiment



Fig.13 Measurement of deformed shapes

3.2 실험 후 형상측정

레이저조사가 끝난 뒤 충분한 시간이 경과한 후 변형후 형상을 3D 스캐너(독일 GOM 사, ATOS II) 를 이용하여 측정하였다. Fig. 13 은 3D 스캐너로 형상을 측정하는 모습을 보여주고 있다. 측정된 형상정보로부터 굽힘각도를 계산하였다.

3.3 미세조직 분석

Fig. 6 의 해석결과를 보면 레이저조사에 의해 표면부는 약 1400°K 정도까지 가열되었다가 다시 냉각되는 것으로 나타난다. 이러한 온도이력 때문에 고온에 의한 조직의 변화가 발생할 수 있다. 온도이력에 따른 조직 변화를 조사하고 해석에 사용된 열원모델의 정확도를 향상시키기 위해 조사선에 수직된 방향으로 절단한 시편을 주사전자현미경(Hitachi 사, Model: S-4200)으로 관찰하였다.

Fig. 14 는 출력 800W 로 조사속도 1m/min 일 때의 미세조직사진으로 밝은 부분과 어두운 부분이 명확하게 구분되고 있다. 어둡게 나타난 부분은 열영향부로 판단되며, 용융은 발생되지 않았다. 열영향부의 폭은 3.5mm 깊이 0.58mm 로 나타났다. 열영향부의 크기는 레이저 조사조건에 따라 민감하게 변화하며, 열변형 해석에서도 열원모델이 해석결과에 크게 영향을 미치기 때문에, 실제로 열원모델의 a, b 값에 이 측정 결과값을 대입하여 해석을 수행하였다.

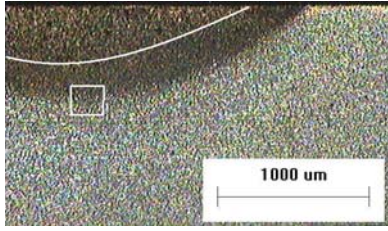


Fig.14 SEM Photograph (800W, 1m/min)

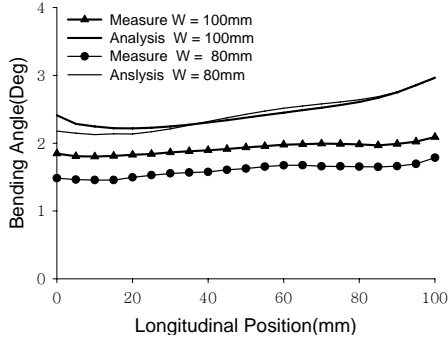


Fig.15 Effect of specimen width(L=100mm, 800W, 1m/min)

3.4 결과 및 토의

Fig. 15 는 길이 100mm 의 시편에 레이저출력을 800W, 조사속도를 1m/min 로 한 뒤 80mm 와 100mm 의 2 가지 폭의 시편으로 전길이 조사를 실험과 해석결과와 비교한 것이다. 길이 방향의 굽힘각의 변화는 실험결과와 해석결과와 경향이 매우 유사하게, 해석이 실험보다 약간 더 크게 예측되고 있어 해석모델과 더불어 온도의존 물성치가 비교적 신뢰할 수 있다고 판단된다.

Fig. 16 은 폭 100mm 의 시편에 레이저출력을 800W, 조사속도를 1m/min 로 한 뒤 100mm 와 200mm 의 2 가지 길이의 시편으로 전체길이에 대하여 레이저로 조사하는 것을 실험결과와 해석결과와 비교한 것이다. 길이방향의 굽힘각의 변화는 실험결과와 해석결과와 경향이 매우 유사하지만 해석이 실험보다 약간 더 크게 예측되고 있다.

Fig.17 은 부분조사를 할 경우에 대한 실험과 해석결과를 비교한 것이다. 즉 시편의 크기가 300mm×100mm 인 경우에 대하여 출력 800W 인 레이저를 2m/min 으로 움직일 경우에 대한 결과를 나타낸 것이다. 조사길이가 길어질수록 굽힘각이 증가하고 있으며, 실험과 해석결과가 굽힘이 일어나는 경향과 크기 모두 유사하게 나타났다.

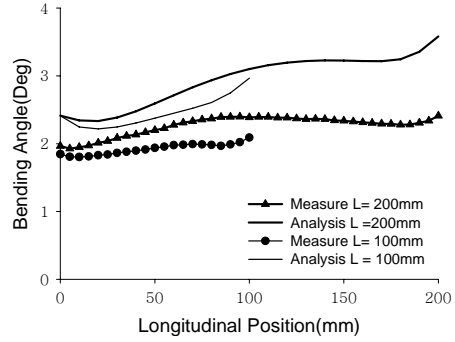


Fig.16 Effect of specimen length(W=100mm, 800W, 1m/min)

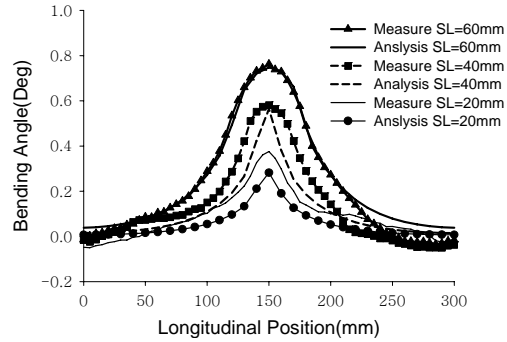


Fig.17 Effect of scanning length(800W, 2m/min)

지금까지 조사된 내용을 살펴보면 레이저조사 공정은 좁은 영역에서 상온에서 용융점 부근까지 극심한 온도변화가 나타나며, 해석에 필요한 물성치도 온도에 따라 매우 크게 변화하며, 아울러 조건에 따라 변형모양이 달라지기 때문에 열변형을 일으키는 변형기구가 매우 복잡하기 때문에 정확한 해석을 위해서는 보다 엄밀한 해석이 필요함을 알 수 있다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 보다 정확한 물성치의 설정이 필요한데 상온에서 용융점 사이의 넓은 범위의 온도의존 물성치의 측정, 아울러 온도의존 물성치를 고려할 수 있는 해석모델링의 어려움 등이 정확한 해석을 어렵게 하고 있다.

4. 스프링백교정의 적용

4.1 성형 해석

해석에 사용된 소재는 레이저 실험에 사용된 재료와 동일한 두께 1.4mm 의 고강도강으로, 성형 해석에 필요한 물성치는 인장시험을 통해 결정하

Table 1 Analysis condition(Stamping, Springback)

Young's Modulus E [GPa]	2.04
Poisson's Ratio ν	0.290
Sheet Thickness (mm)	1.4
Strength Coefficient K [MPa]	922
Yield Stress[MPa]	534.92
Tensile Stress[MPa]	766.47
Work Hardening Exponent n	0.18
Friction Coefficient	$\mu = 0.125$
Binder Holding Force [kN]	30, 50, 100

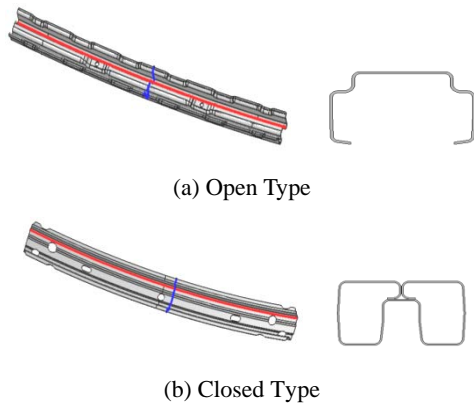


Fig.18 Typical cross sections of real bumper rails

였으며, Table 1 에 해석조건을 나타내었다.

Fig. 18 은 현재 실제로 차량에 적용되고 있는 범퍼레일의 대표적인 단면을 나타낸 것으로 단면 형상이 비교적 복잡한 편이다. 즉 실제 제품은 단면 형상이 복잡하고 길이가 길기 때문에 실제 범퍼를 대상으로 성형해석, 스프링백해석 및 열기계 해석을 수행한다면 해석에 소요되는 시간과 계산 용량이 매우 많이 소요되는 문제점과 함께 해석에 미치는 형상영향인자가 많아지기 때문에 인자의 영향을 조사하기가 어려워지는 문제점이 있다. 뿐만 아니라 과도한 해석시간은 각 인자가 미치는 영향에 대한 충분한 조사를 어렵게 만들고 있다. 따라서 실제 형상을 그대로 해석에 사용함으로써 얻어지는 장점은 크지 않은 편이다. 따라서 계산시간의 단축과 보다 유용한 정보를 얻기 위해 범퍼의 특징적인 형상은 유지하면서도 형상을 단순화시켜 해석을 수행 하였다. 즉 실제 범퍼는 단면형상이 길이방향으로 대체로 균일한 U자 형

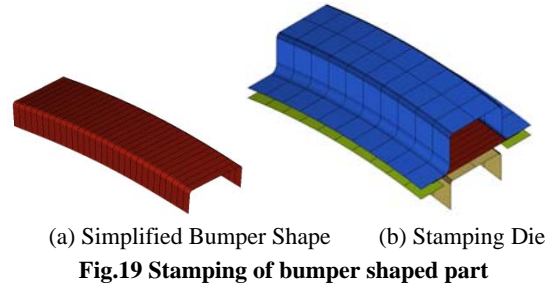


Fig.19 Stamping of bumper shaped part

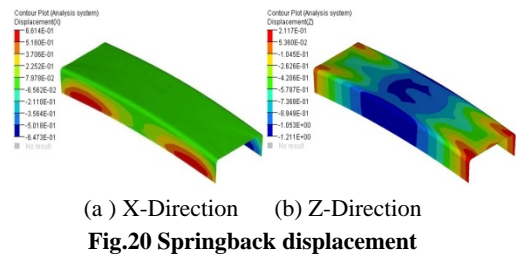


Fig.20 Springback displacement

태의 개단면이며, 자동차 회전반경을 고려하여 약간의 곡률을 지니고 있다.

이를 토대로 하여 성형해석에 사용한 범퍼는 Figure 19(a)와 같이 단면의 형상이 90mm× 35mm 이고, 길이가 300mm 로 길이 방향으로 1,130mm 의 곡률을 지니는 형상으로 채택하였다. Figure 19(b)는 금형의 모양을 나타내고 있으며, 블랭크의 형상은 300mm×90mm 의 직사각형이고 1.5mm 의 크기를 가지는 20000 개의 셀요소와 20301 개의 절점으로 구성하였다.

이제 레이저를 이용하여 스프링백형상오차를 교정하는 방법을 제시함으로써 고강도강의 스탬핑공정을 개발하는 절차를 제시코자 한다.

레이저조사공정은 스탬핑된 제품에서 발생된 형상오차를 레이저로 교정하는 것이기 때문에 발생된 형상오차가 작을수록 레이저교정이 쉬워진다. 따라서 레이저조사의 전공정인 스탬핑에서 파단이 없고, 스프링백 형상오차가 최소화가 되도록 공정 조건을 설정할 필요가 있다.

따라서 형상오차가 최소화되는 스탬핑 조건을 찾는 것이 선결과제가 된다. 이를 위해서 본 연구에서는 바인더력을 30kN, 50kN, 100kN 의 3 단계로 설정하여 성형해석을 실시하였다.

Fig. 20 은 바인더력이 30kN 일 때의 스프링백 해석 결과를 나타내고 있다. Figure 20(a)의 X 변위로부터 단면이 벌어지는 모양, Figure 20(b)의 Z 변위로부터 길이 방향의 곡률의 변화를 추정할 수 있다. 스프링백 해석결과 X 변위, 즉 벌어짐의 정

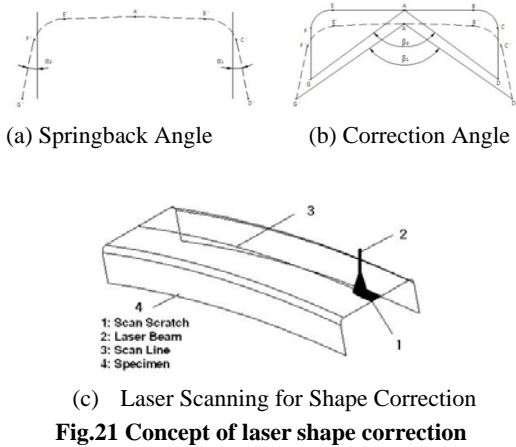


Fig.21 Concept of laser shape correction

도가 위치별로 달라지며, Z 변위, 즉 수직방향으로도 약간의 처짐이 발생되고 있음을 알 수 있다. 바인더력을 50kN, 100kN 으로 달리 하면서 동일한 해석을 수행한다.

4.2 형상교정

Fig. 21(a)는 라운드 부근에서 발생하는 스프링백을 나타내고 있으며 Fig. 21(b)는 라운드에서 발생한 스프링백에 의한 형상오차를 단면중심선에 레이저를 조사함으로써 교정하는 방법을 채택한다. 만약 형상교정을 위해 라운드 부위를 직접 레이저로 조사한다면, 라운드 부위별로 2 회의 레이저 조사가 필요하다. 그런데 이 경우에도 레이저가공기 1 대를 이용하여 한쪽의 라운드부위를 길이방향으로 조사한 후 나머지 라운드부위를 순차적으로 조사하면 길이방향 비틀림이 발생하는 문제점이 있기 때문에 라운드부위를 조사코자 한다면 2 대의 레이저를 사용하여 동시에 조사해야 한다. 따라서 길이방향으로의 중심선, 즉 Fig. 21(b)의 점 A 로 표현된 단면의 대칭선에 레이저를 조사하는 것이 좋다. 이 때 스프링백 교정에 필요한 굽힘각도 β 는 기하학적 형상으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \beta_1 - \beta_2 \tag{4}$$

Fig. 22 는 Fig. 20 의 스프링백해석으로부터 Fig. 21(b)와 같은 형상교정에 필요한 중심선에서의 굽힘각도를 나타내고 있다. 즉 바인더력이 30kN 인 경우는 전체적으로 단면이 벌어지는 형상이며, 50kN 과 100kN 인 경우는 위치에 따라 벌어지는

곳과 오므라드는 곳이 나타난다. 따라서 형상교정에 필요한 굽힘각도는 전체적으로 30kN 인 경우가 가장 작게 나타나기 때문에 바인더력을 30kN 인 경우를 채택한다.

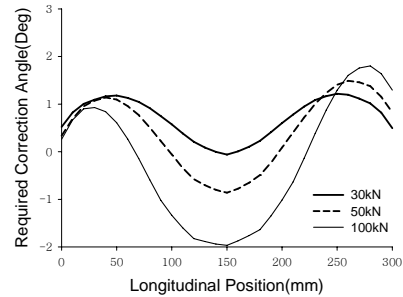
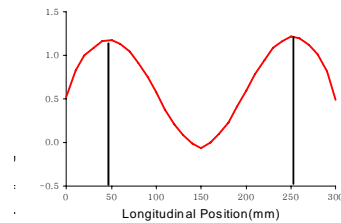
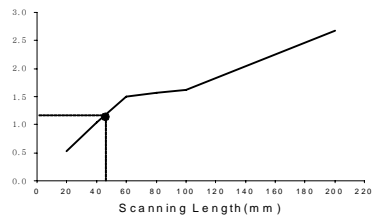


Fig.22 Required bending angle for shape correction

그런데 Fig. 21(c)와 같이 단면의 중심선을 따라 길이방향으로 레이저를 움직여 주면 Fig. 9 와 같이 조사된 면이 수축되면서 오므라든다. 만약 레이저 조사선을 따라 오므라들다가 벌어지도록 형상교정이 요구된다면 레이저 조사면의 방향을 바꾸어야 한다. 실제 산업현장에서 이러한 경우가 발생된다면 제품을 뒤집는 공정이 수반되기 때문에 이에 따른 시간비용과 생산비용의 증대가 우려되어 바람직하지 않다. 따라서 가급적 한쪽 면만 레이저 조사를 하도록 공정조건을 설정하는 것이 좋다. 이러한 관점에서 Fig. 22 에서 레이저 조사면의 변경이 필요 없는 것으로 나타난 바인더력 30kN 을 채택한 것이 좋은 선택이 된다.



(a) Determination of Max. Required Bending Angle



(b) Determination of Scan Length

Fig.23 Determination of laser irradiation pattern

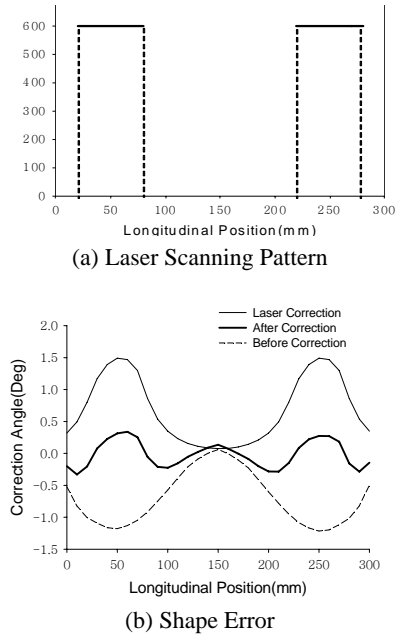


Fig.24 Determined laser scanning pattern & expected shape error

Fig. 23 은 형상교정을 위한 레이저조사패턴을 결정하는 과정을 설명한 것이다. Fig. 23(a)는 Fig. 22 에서 바인더력이 30kN 인 경우에 대하여 형상오차를 제거하기 위해 필요한 굽힘각도인데 먼저 최대굽힘각도와 교정이 필요한 위치를 찾는 과정을 보여주고 있다. Fig. 23(a)를 보면 조사선 길이방향으로 50mm 와 250mm 부근을 집중적으로 교정하는 것이 필요함을 알 수 있고, 이 부위에서 최대 1.2° 정도의 교정을 가하면 될 것으로 판단된다. Fig. 23(b)는 Fig. 11 에서 구한 출력 600W, 조사속도 1m/min 에 대한 최대굽힘각도와 레이저조사길이의 관계를 이용하여 레이저조사 길이를 50mm 로 결정한다.

즉 Fig. 20(a)와 같은 스프링백을 교정하기 위해서는 Fig. 24(a)와 같이 600W, 1m/min 의 속도로 레이저를 조사하면 된다. Figure 24(b)는 조사 후 예상되는 오차보정을 위한 굽힘각도로 레이저조사 이전에 최대 1.2° 였으나 조사후 0.1° 정도로 나타나 형상오차가 대폭 개선될 수 있음을 보여주고 있다.

5. 결론

고강도강판스탬핑의 스프링백문제를 레이저로 열변형을 유도하는 방법으로 교정하는 방법에 대

한 연구를 수행하였다. 먼저 열기계연계해석을 통하여 레이저조사공정의 변형기구와 더불어 각 공정변수들의 영향을 조사하였다. 열기계연계 해석을 위한 온도의존 물성치는 S/W 를 이용하여 구하였다. 해석결과를 확인하기 위해 평판을 대상으로 한 레이저조사 실험결과를 해석결과와 비교하여 크기는 차이가 있으나 전체적인 경향은 해석과 비슷하게 나타나고 있다. 실험결과와 해석결과의 차이는 온도 의존 물성치 측정, 온도의존물성치의 대입, 그리고 경계조건 설정의 어려움 등의 문제점으로 판단된다. 아울러 실제 스탬핑공정에서의 스프링백에 의한 형상오차를 레이저조사를 통해 교정하는 방법도 제시하였다. 즉 간략하게 모델링된 범퍼형상을 대상으로 성형해석과 스프링백해석을 수행한 후 목표 형상과의 차이로부터 교정을 위한 굽힘각도를 도출한 뒤 이를 교정하기 위한 레이저 조사패턴을 결정하는 방법을 제시하였다. 해석적인 방법이지만 형상오차를 감소시킬 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 그렇지만 실제로 고강도강판의 스프링백교정에 적용하기 위해서는 보다 폭넓은 기초연구 뿐만 아니라 레이저가공기의 동작제어, 지그설계 등과 같은 생산공정에 관한 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 2008 학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것임

참 고 문 헌

- [1] G. Liu, Z. Lin, Y. Bao, J. Cao, 2002, Eliminating springback error in U-shape part forming by variable blankholder force, *J. Mater. Eng. and Perf.*, Vol. 11, pp. 64~70.
- [2] N. Stander, et al., Springback compensation in sheet metal forming using successive response surface method, 2002, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- [3] E. Pairel, et al., 2004, Correction of geometrical defects of stamping parts by numerical simulation and design of experiment, *Archive of Civil and Mech. Eng.*, Vol. 4, pp. 79~89.
- [4] A. Jernberg, 2003, A method for modifying the forming tool geometry in order to compensate for

- springback effects, 4th European LS-DYNA Users Conference, pp.45~54.
- [5] T. Dutton, R. Edwards, A. Blowey, 2005, Tool design for a high strength steel side impact beam with springback compensation, 5th European LS-DYNA Users Conference.
- [6] R. Lingbeek, et al. 2005, The development of a finite element based springback compensation tool for sheet metal products, J. Mater. Process Technol., Vol. 169, pp. 115~125.
- [7] G. Yanjin, et al., Influence of material properties on the laser-forming process of sheet metals, J. Mater. Process Technol., 2005, Vol. 167, pp. 124~131.
- [8] Z. Hu, R. Kovacevic, M. Labudovic, 2002, Experiment and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming, J. Machine Tools Manuf., Vol. 42, pp. 1427~1439.
- [9] H. Shen, et al., 2006, An analytical model for estimating deformation in laser forming, Compu. Mater. Sci., Vol. 37, pp. 593~598.
- [10] J. Kim, S. J. Na, 2005, Feedback control for 2D free curve laser forming, Optics and Laser Technol., Vol. 37, pp. 139~146.
- [11] J. Bao, Y. L. Yao, 2001, Analysis and prediction of edge effects in laser bending, J. Manuf. Sci. Eng., Vol.123, pp. 53~61.
- [12] P. Zhang, et al., 2007, FE simulation of laser curve bending of sheet metals, J. Mater. Process. Technol., Vol. 184, pp. 157~162.
- [13] M. Geiger, M. Merklein, M. Pitz, 2004, Laser and forming technology - an idea and the way of implementation, Vol. 151, pp. 3~11.
- [14] N. Bianco, et al., 2006, Transient heat conduction in solids irradiated by a moving heat source, Excerpt from the Proceeding of COMSOL Users Conference Milano.
- [15] D. J. Majumdar, A. K. Nath, I. Manna, 2004, Studies on laser bending of stainless steel, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 385, pp.113~122.
- [16] K. P. Kang, et al., 2008, Prediction of phase transformation of boron steel sheet during hot press forming using material properties modeler and DEFORMTM-HT, Trans. Mater. Process., Vol. 17, pp. 249~256.
- [17] Sente Software, 2007, JMatPro Introductory Manual.
- [18] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, 1983, A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical Trans., Vol. 15B, pp. 299~305.