

레이저 용접 합체박판의 성형한계도와 스탬핑 금형 성형해석에 적용

김영탁* · 구본영** · 박승우** · 유석종*** · 이경남***

(1999년 3월 16일 접수)

Forming Limit Diagram of Laser Welded Blank and Its Application to Forming Analysis of Stamping Dies

Y.T. Keum, B.Y. Ghoo, S.W. Park, S.J. Yoo and K.N. Lee

Abstract

The new FLD of the laser welded blank, which includes FLCs of welded zone and base metals, is introduced. For the forming limits of welded zone, the hemispherical dome punch tests were performed with various widths of asymmetric specimen. The FLC_0 as well as the dome height at fracture associated with various specimen widths in the same and different thickness combinations were found to see the formability depending on thickness combinations. In order to show the application of the new FLD, the measured strains of squared cup drawing and simulated strains of door inner panel stamping were compared with those of FLCs. The successful prediction of fracture in the applications reveals that the forming limits of welded zone and base metals should be separately found for more accurate evaluation of the formability and workability of the laser welded blank.

Key Words : Tailored Blank : TB, Welded Zone : WZ, Laser Welding, Forming Limit Diagram : FLD, Sheet Metal Forming Process

1. 서론

둘 이상의 박판재를 일체화하여 프레스 공정 단계를 줄이는 합체박판(tailored blank) 기술은 생산비 절감 및 정밀도 향상에 있어 매우 유효한 생산방법이다. 합체박

판 기술은 두께 및 재질이 서로 다른 박판을 용도에 따라 레이저 용접 또는 메쉬시임 용접하여 성형하는 것으로서, 금형 개수, 노동력, 생산 시간 등을 감소시켜 생산성 향상을 이룰 수 있기 때문에 이미 선진 자동차 업계에서는 차량 경량화, 안전성, 내식성 등의 까다로운 요구

* 한양대학교 CPAC

** 한양대학교 대학원

*** 대우자동차 재료시험실

조건에 대처하기 위한 새로운 생산기술로서 많이 적용되고 있으며, 국내에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다.

Bhatt 등^(1~3)은 용접조건과 합체박판의 성형성이 밀접한 관련이 있음을 밝히고 합체박판의 성형성을 높일 수 있는 최적 용접 조건을 구하였다. 또한, 이중두께 합체박판에서, 약한 판재에 소성변형이 집중되는 것을 막을 수 있는 안정된 판재의 조합 범위를 제안하고 한계 두께비와 한계 강도비를 구하였다. Saunders⁽⁴⁾는 AKDQ-1.8t와 HSLA-2.1t를 용접한 합체박판에 대해 용접비드가 주인장축과 나란한 인장실험을 수행하고, 전체 하중에서 모재에 부가되는 하중을 감해 용접부가 지지하는 하중을 계산하였다. 상업용 코드인 ABAQUS에 계산된 용접비드 물성치를 도입하여 축대칭 돔 장출 실험, OSU 성형성 테스트, 그리고 팬더의 축소모형 성형실험 등을 시뮬레이션하고 용접부 성형성을 관찰하였다.

합체박판의 물성 및 성형성에 관한 실험적 또는 해석적 연구는 활발히 진행되고 있지만, 합체박판 성형한계도에 관한 연구는 아직 시작단계에 머물러 있다. Siegert 등⁽⁵⁾은 일반박판의 성형한계도를 구하는 방법을 이용하여 동종두께 매쉬시임 합체박판의 돔 장출 실험을 수행하고 성형한계를 구하였다. 서대교 등⁽⁶⁾은 매쉬시임 합체박판의 성형 한계를 구하기 위하여 시편 폭을 달리하는 돔 장출 실험을 수행하고, 동종 및 이중두께 합체박판의 성형한계를 비교하였으며, 금영탁 등⁽⁷⁾은 레이저 합체박판의 성형한계도를 작성하기 위하여 비대칭 시편을 이용한 돔 장출 실험을 수행하고, 모재와 용접부를 분리하여 파단 시 변형률을 측정하였다.

본 연구는 동종두께-이종재질과 이중두께-이종재질의 레이저 합체박판을 각각 제작하고, 시편 폭을 달리하며 돔 장출실험을 실시하였다. 또한, 용접비드와 용접 열영향부를 포함하는 용접부(welded zone 혹은 WZ)의 성형한계를 구하고, 용접부와 모재의 성형한계선(FLC)을 하나의 성형한계도에 나타내는 새로운 합체박판 성형한계도를 제안하였다. 측정된 사각굽 드로우 시편의 변형률과 유한요소 해석으로 예측된 자동차 도어 인너 패널의 변형률을 성형한계도에 도시하고 합체박판의 파단을 예측하여 제안된 합체박판 성형한계도의 타당성 및 유용성을 검증하였다.

2. 성형한계도(FLD)

합체박판의 성형한계를 평가하기 위해 두께가 동일한 판재를 레이저 용접한 DST조와 두께가 다른 판재를 레이저 용접한 DDT조의 2종류 합체박판을 제작하였다.

DST조는 D-0.8t 냉연강판과 Y-0.8t 냉연강판을 용접한 것이며, DDT조는 D-1.5t 냉연강판과 Y-0.8t 냉연강판을 용접한 것이다. 이 때 D-0.8t와 Y-0.8t는 두께는 같지만 제작회사가 다른 냉연강판이다. 최적의 성형성과 용접성을 얻기 위하여 Table 1과 같은 레이저 용접조건으로 합체박판을 제작하였으며, DST조와 DDT조의 용접조건은 범의 투사 각도를 제외하면 동일하다.

먼저, 모재 및 합체박판의 기계적 물성을 파악하기 위한 인장실험을 수행하였다. 이를 위하여 용접비드가 시편의 중앙에 위치하고 주인장축과 나란한 시편을 제작하여 인장실험을 수행하였다. 인장실험 결과는 Table 2에 나타내었다. DST조와 DDT조 합체박판의 가공경화지수(n) 값은 모재 가공경화지수 평균값보다 약 20% 낮은 값이다. 그러나, DST조와 DDT조 합체박판의 강도계수 값은 모재 강도계수 평균값 보다 각각 10%와 5% 정도 높은 값이다. 이것은 높은 레이저 열에 의해 용접부 미세구조가 변화하여 용접부 강도는 상승되지만, 용접부가 모재보다 더 빨리 넥킹에 이르게 된다는 것을 의미한다.

Table 1 Welding conditions for tailored blank specimens

Specimen Group	Velocity (m/min)	Power (kW)	Gap (mm)	Shield Gas	Beam Angle (degree)	Focus from Upper Surface (mm)
DST	4	4	0~0.075	He	*	0.6
DDT	4	4	0~0.075	He	3	0.6

Table 2 Mechanical properties of tailored blank and base metal blank

Specimen	Thickness [mm]	Strain Hardening Exponent	Strength Coefficient [MPa]	Plastic Anisotropic Parameter	Remarks
DST	0.8:0.8	0.188	585	1.61	TB
DDT	0.8:1.5	0.186	564	1.62	TB
D-0.8t	0.8	0.222	546	1.40	SPCC
Y-0.8t	0.8	0.224	529	1.76	SPCC
D-1.5t	1.5	0.221	543	1.46	SPCC

성형한계도(FLD)는 일반박판의 성형성 평가척도 및 스탬핑 공정진단 수단으로 널리 사용되고 있으며, 박판 면내에 존재하는 주변형률과 부변형률의 조합으로 재료가 견딜 수 있는 한계변형률을 나타낸다. 따라서, 판재의 주변형률과 부변형률을 구하면 성형한계도를 이용하여 간편하게 판재의 파단을 예측할 수 있다. 지금까지는 합체박판의 성형한계를 평가하는 방법이 정립되지 않았기 때문에, 일반박판의 경우와 마찬가지로 시편 폭을 달리 하는 돔 장출 실험을 실시하고 파단시 변형률을 측정하여 합체박판의 성형한계를 나타내었다. 그러나, 합체박판의 성형한계를 일반박판의 경우와 마찬가지로 측정한다면 합체박판의 파단 예측시 정확도를 유지할 수 없다. 왜냐하면 합체박판은 국부적으로 매우 높은 열에 의해 변형되어 재질 및 금속 조직이 모재와 크게 다른 용접부(welded zone 혹은 WZ)와 두 모재로 구성되기 때문이다. 따라서, 합체박판의 성형한계를 정확하게 평가하기 위해서는 용접부와 모재의 성형한계를 개별적으로 구해야만 한다. 즉, 두 모재의 성형한계 2개와 용접부 성형한계 1개를 각각 따로 구해야 한다.

본 연구는 합체박판 성형한계도를 작성하기 위하여 3단계로 연구를 수행하였다. 첫째, 용접비드와 열영향부를 포함하고 변형률 측정이 가능한 2.54mm 크기의 정사각형 그리드를 시편표면에 에칭한다. 둘째, 돔 장출 실험을 수행하고 용접부 변형률을 측정하여 용접부 성형한계를 구한다. 마지막으로 용접부와 두 모재의 성형한계선(FLC)을 합체박판의 성형한계도에 각각 도시한다.

돔 장출 실험을 위한 시편의 폭은 각각 10mm, 20mm, 40mm, 70mm, 100mm, 그리고 180mm이며, 시편의 길이는 180mm로 모든 시편이 동일하다. 시편에서 용접비드 위치는 시편 중앙이며 용접비드 방향은 주인장 방향과 나란하다. 용접비드를 중심으로 2.54mm 폭으로 에칭된 그리드를 용접부라 정의하고, 이 부분의 성형한계를 구하기 위해 파단 주변부의 변형률을 안전(safe), 넥킹(necking), 파단(fracture)의 3가지로 구분하여 측정하였다. 보다 정확한 변형률 측정을 위해 자동 변형률 측정 시스템인 ASAME(Automated Strain Analysis and Measurement Environment)와 GPA(Grid Pattern Analyser)를 사용하였다.

DST조 합체박판의 경우, 대부분의 실험은 무운환 상태로 수행하였다. 그러나, DST조 합체박판은 일반 박판과 달리 폭이 180mm인 시편에서도 용접부 부변형률이 양인 상태가 관찰되지 않았기 때문에, 성형한계 우측부($\epsilon_2 > 0$)에서 용접부 성형한계에 대한 정보를 얻기

위하여 180mm 시편을 운환한 상태에서 추가실험을 수행하였다. 이러한 추가실험으로부터 파단 시 용접부의 부변형률이 5~8%인 상태를 얻을 수 있었다.

DDT조 합체박판의 경우, 폭이 180mm인 시편에서 용접부 파단이 발생하지 않고 얇은 모재(Y-0.8t)에 소성변형이 집중되어 얇은 모재에서 용접부에 나란하게 파단이 발생하였다. 따라서, 얇은 모재의 파단을 막고 용접부 파단을 유도하기 위하여, 두꺼운 모재의 자유로운 드로인을 허용하는 Fig.1과 같은 비대칭 시편을 제작하고 두꺼운 모재의 폭(W)을 변화시키며, 용접부 파단이 생길 때까지 추가실험을 실시하였다. DDT조의 경우에는 W=60mm에서 용접부 파단이 발생하였다. Fig.2는 비대칭 시편과 폭이 180mm인 대칭 시편의 성형 후 파단상을 보여주고 있다.

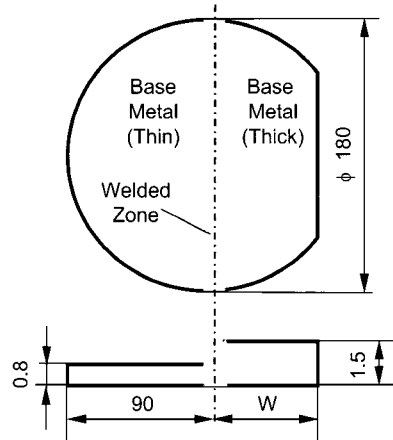


Fig. 1 Schematic view of asymmetric specimen

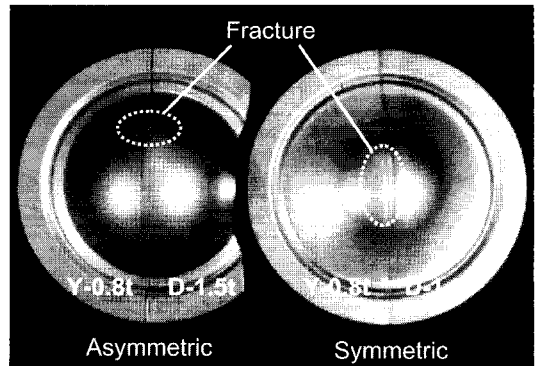


Fig. 2 Formed shapes of symmetric and asymmetric specimens in DDT specimen

대칭 시편의 경우에는 얇은 모재에서 파단이 발생하지만 비대칭 시편의 경우에는 용접부에서 파단이 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig.3과 Fig.4는 각각 DST조와 DDT조 용접부의 성형한계선(FLC)이다. 점선(10% Safety Line)은 시간에 따른 윤활유의 점도변화, 금형 마모, 대기온도 및 금형 온도 변화 등의 다양한 공정변수에 대응하기 위해 성형한계선에서 10%의 안전을 고려한 것이다. 용접부의 성형한계점(FLC₀)은 DST조의 경우에 약 26%, DDT조의 경우 약 32%로 각각 측정되었다. 이들 합체박판을 구성하는 모재들의 성형한계점은 각각 D-0.8t의 경우 36%, Y-0.8t의 경우 36%, 그리고 D-1.5t의 경우 45%로서, DST조의 성형한계점은 두 모재의 성형한계점 평균값보다 약 28% 낮은 값을 가지며, DDT조의 성형한계점은 두 모재의 성형한계점 평균값보다 약 21% 낮은 값을 갖는다. 따라서, 두 합체박판의 용접부 성형성이 모재에 비해 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한, DDT조 용접부가 DST조 용접부보다 성형한계점이 더 높아 성형성이 더 좋다는 것을 알 수 있다.

Fig.5는 시편 폭에 따른 파단 시 돔높이이다. 시편 폭이 10~100mm인 경우에 두 합체박판의 파단 시 돔높이는 동일한 경향을 가지며, DDT조의 돔높이가 DST조의 돔높이보다 높다. 또한, DDT조의 경우에는 시편 폭이 40~100mm인 경우에 돔높이가 거의 동일한 것을 볼 수 있다. 시편 폭이 180mm인 경우에는 두 합체박판에서 모두 최소 돔높이가 측정되었고, 시편 폭이 10~100mm의 경우와는 반대로 DST조의 돔높이가 DDT조 보다 높은 것을 볼 수 있다. 특히, DST조의 경우에는 폭이 180mm인 시편에서 FLC₀ 값을 갖는다. 이것은 용접부가 폭방향 소성변형에 대한 저항력이 커서 부변형률이 거의 영(zero)에 가까운 평면변형을 상태로 성형되기 때문이다. 일반 박판의 경우, 시편 폭이 120~130mm에서 평면변형률 모드가 관찰되고, 이 때 FLC₀ 값을 갖는 것과는 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

3. 적용

본 연구에서 제안된 합체박판 성형한계도의 유용성 및 타당성을 검증하기 위하여 사각컵 드로잉 시편의 변형률 측정결과와 도어 인너 패널의 성형해석 결과를 새로운 성형한계도에 도시하고 합체박판의 파단가능성을 평가하였다.

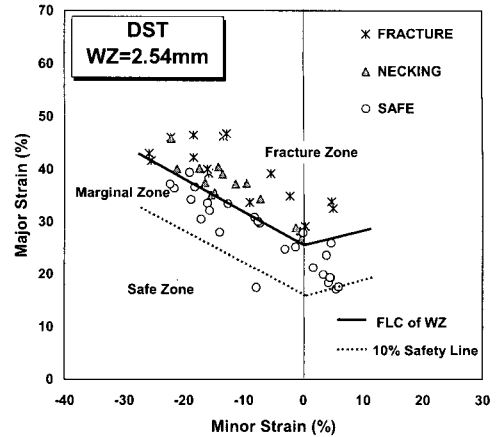


Fig. 3 Forming Limit Curve (FLC) of WZ in DST specimen

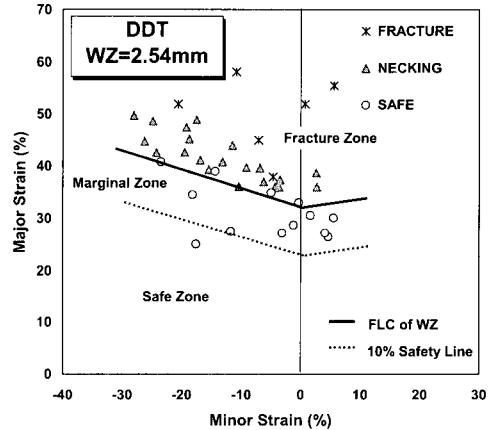


Fig. 4 Forming Limit Curve (FLC) of WZ in DDT specimen

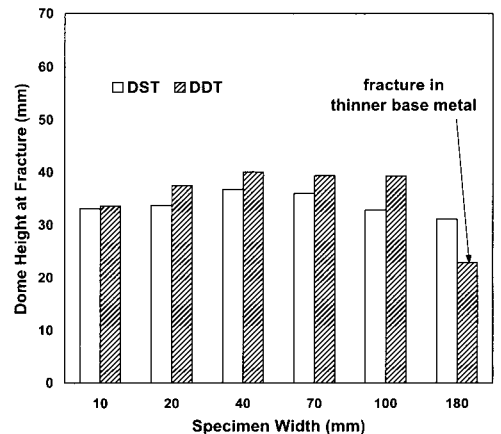


Fig. 5 Dome height of DST and DDT tailored blanks at fracture associated with various specimen widths

3.1 사각컵 드로잉

사각컵 드로잉 실험으로 성형된 DST조 및 DDT조 시편의 용접부 주변 변형률을 측정하고 이를 각각의 성형한계도에 도시하여 Fig.6과 Fig.7에 나타내었다. Fig.6에서 보듯이, DST조의 경우, 두 모재의 변형률은 각각의 성형한계도보다 모두 아래쪽에 위치하기 때문에 파단이 발생하지 않지만, 용접부 변형률 중 하나는 용접부 성형한계 위쪽, 즉 파단영역에 위치하기 때문에 파단 발생을 예측할 수 있다. 실제 실험에서도 용접부에서 파단이 발생한 것을 관찰할 수 있다. Fig.7은 DDT조의 경우로서, 두 모재와 용접부의 변형률이 모두 각각의 성형한계선 아래쪽에 위치하기 때문에 파단이 발생하지 않음을 예측할 수 있다. 실제 실험에서도 DST조와는 달리 파단을 관찰할 수 없다.

이로부터 용접부와 모재의 성형한계를 각각 도시한 DST조와 DDT조의 성형한계도가 파단을 예측하는데 효과적임을 알 수 있다.

3.2 도어 인너 패널 스탬핑

도어 인너 패널은 자동차 패널 중에서 레이저 용접 합체박판이 사용되는 대표적인 패널로서, 기존의 까다로운 성형조건 뿐만 아니라 두 모재의 두께 차이 때문에 성형결합이 예측되는 패널이다. 유한요소 해석에 사용된 절점과 선형 삼각형 요소의 개수는 각각 1617개와 3072개이다. 용접부의 물성 및 성형특성을 해석에 반영하기 위하여 용접부를 32개의 용접요소⁽⁸⁾로 모델링 하였다. 1개의 용접요소는 10개의 절점과 8개의 선형 사각형 요소로 구성되어 있다. Fig.8은 해석에 사용된 금형 형상으로서, Fig.8(a)에서 Y-0.8t, D-1.5t, 그리고 Welded Zone(WZ)이라고 표시된 부분은 금형이 합체박판과 초기에 접촉하는 부분을 각각 표시한 것이다. 즉 Welded Zone(WZ)이라고 표시된 부분은 실제 금형에서 단차가 있는 부분이며, Y-0.8t 및 D-1.5t라고 표시된 부분은 각각 합체박판의 얇은 모재와 두꺼운 모재가 위치하는 부분이다. 수치해석에 사용된 합체박판 모재의 물성치는 Table 3과 같다.

Fig.9는 펀치높이 150mm에서 성형된 메쉬 형상이며, Fig.10은 DDT조 성형한계도에 해석된 변형률을 표시한 것이다. 용접부와 D-1.5t는 10%의 안전영역을 고려해도 변형률이 각각의 성형한계선 하부에 존재하지만, Y-0.8t의 경우에는 변형률이 Y-0.8t의 성형한계선 상부에 존재하는 것을 볼 수 있다. 즉, 용접부와 D-1.5t는 안전하게 성형되지만 Y-0.8t는 파단이 발생할 수 있음을 예측할

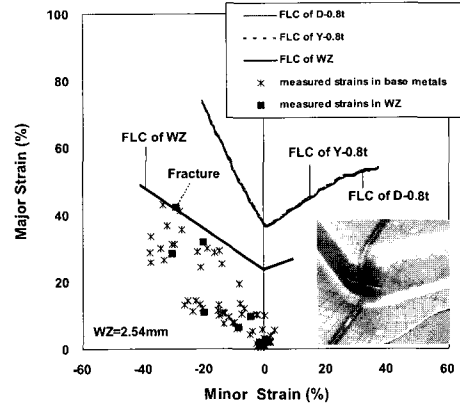


Fig. 6 Verification of Forming Limit Diagram (FLD) in DST tailored blank

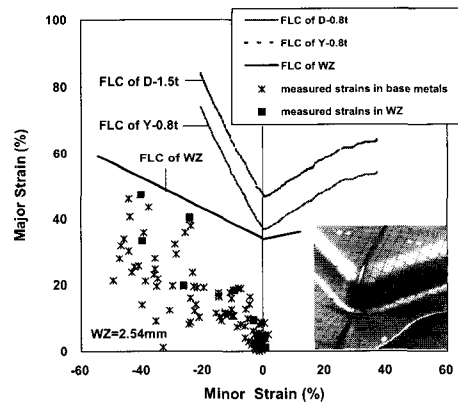


Fig. 7 Verification of Forming Limit Diagram (FLD) in DDT tailored blank

수 있다.

일반적으로 합체박판의 성형에서는 용접부 성형성이 모재보다 낮기 때문에 용접부에서 파단이 발생하거나 또는 용접부 이동이 과도하여 용접부 주변에 있는 얇은 모재에 소성변형이 집중되면서 파단이 발생할 확률이 높지만, 도어 인너 패널과 같은 대형 패널인 경우에는 이러한 파단뿐만 아니라 용접부에서 멀리 떨어진 성형조건이 취약한 모재에서도 파단이 발생할 수 있다. 도어 인너 패널을 성형한 경우에, Fig.9의 Region A 부분은 금형의 곡률이 작고 형상변화가 심하기 때문에 판재의 드로인이 원활하지 않아 성형조건이 매우 취약한 부위로서 실제로 파단이 발생하였으며, 수치해석 결과를 성형한계도에 비교하여 파단을 예측한 결과와 잘 일치하였다.

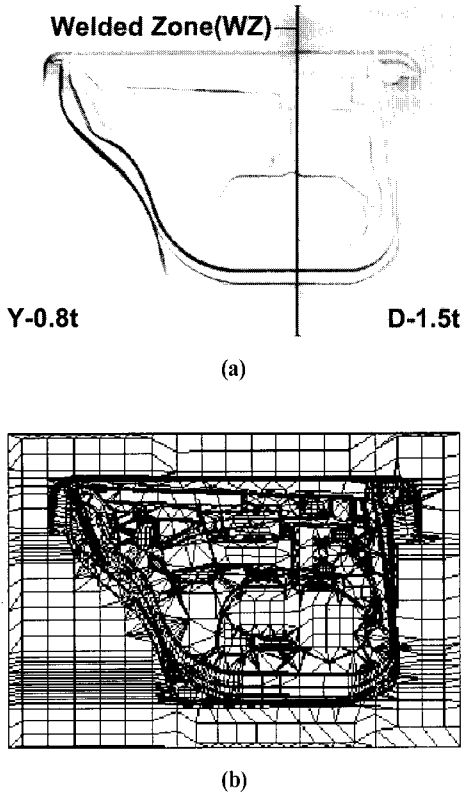


Fig. 8 (a) Surface and (b) FE mesh models of the tool for door inner panel

Table 3 Mechanical properties of base metal blanks for simulating the forming process of door inner panel

Mechanical Properties	Base Metal	Base Metal
	Blank Y-0.8t	Blank D-1.5t
Plastic Anisotropic Parameter, r	1.76	1.46
Hill's Yield Function Parameter, M	2.0	2.0
Strength Coefficient, K [MPa]	529	543
Work-Hardening Exponent, n	0.224	0.221
Sheet Thickness, t [mm]	0.8	1.5

합체박판은 용접부와 모재로 구성되며 각 부분의 금속 조직 및 물성이 매우 다르기 때문에, 본 연구와 같이 용접부와 모재의 성형한계를 독립적으로 구하여 성형한계도를 작성하는 것이 일반 박판과 동일한 방법으로 성형한계도를 작성하는 방법보다 합체박판의 파단 예측에

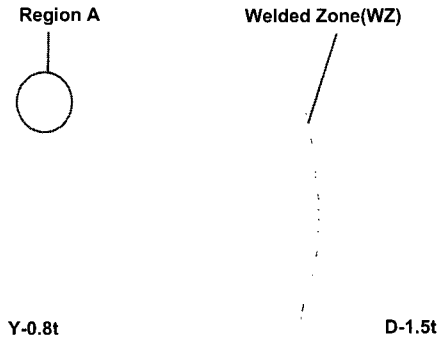


Fig. 9 Formed mesh shape of door inner panel at the punch height of 150mm

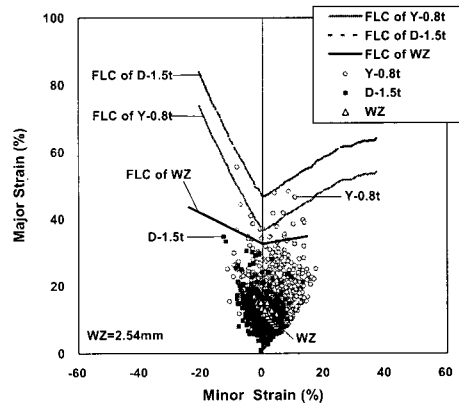


Fig. 10 Predicted strains marked on the FLD of DDT tailored blank

보다 효과적이고 타당성이 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 레이저 합체박판 용접부의 성형한계를 측정하고 용접부와 모재의 성형한계를 개별적으로 도출한 새로운 합체박판 성형한계도를 제안하였다. 또한 본 연구에서 제안된 합체박판 성형한계도의 유용성 및 타당성을 검증하기 위하여 사각컵 드로잉 시편의 변형률 측정결과와 도어 인너 패널의 성형해석 결과를 새로운 성형한계도에 도시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접비드를 중심으로 좌우 폭이 각각 1.27mm되는 용접부를 가정하고, 용접부의 파단 시 변형률을 측정하여 레이저 합체박판 용접부의 성형한계를 도출하고 레이저 합체박판 성형한계도를 구하였다.
- (2) 이중두께 합체박판(DDT)에서 강도가 큰 모재의

폭을 감소시켜 만든 비대칭 시편으로 용접부 파단을 유도하고 용접부가 폭방향으로 인장 되는 파단변형률을 측정하였다.

(3) 동중두께 합체박판(DST)의 뒀 장출 실험에서 용접부가 모재에 비해 강성이 크기 때문에 시편 폭이 180mm인 경우에도 용접 열영향부는 거의 평면변형률 상태로 성형되었다.

(4) 용접부와 모재의 성형한계를 하나의 성형한계도에 각각 표시한 합체박판 성형한계도에 변형률을 도시한 결과, 제안된 합체박판 성형한계도는 합체박판의 파단 예측에 효과적이었다.

참 고 문 헌

- (1) M. F. Shi, K. M. Pickett and K. K. Bhatt, 1993 "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheet", SHEET METAL AND STAMPING SYMPOSIUM, pp.27~35.
- (2) M. Eisenmenger, K. K. Bhatt and M. F. Shi, 1995 "Influence of Laser Welding Parameters on Formability and Robustness of Blank Manufacturing: An Application to a Body Side Frame", SAE Technical Paper No.950922, pp.171~182.
- (3) K. K. Bhatt, M. Eisenmenger and M. F. Shi, 1995 "Formability of Mash Seam Welded Blanks: Effect of Welding Set-up Conditions", SAE Technical Paper No.950923, pp.183~189.
- (4) F. I. Saunders, Forming of tailor-welded blanks, Ph. D. Dissertation, 1995, Ohio State University.
- (5) K. Siegert and E. Knabe, 1995 "Fundamental Research and Draw Die Concepts for Deep Drawing of Tailored Blanks", SAE Technical Paper No.950921, pp.159~169.
- (6) 허영무, 김형목, 서대교, 1998 "용접판재의 성형한계에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회 '98 추계학술대회 논문집, pp.173~176.
- (7) 박승우, 구본영, 금영탁, 강수영, 유석중, 1997, "레이저 용접 합체박판의 성형한계평가 실험에 관한 연구", 한국소성가공학회 '97 추계학술대회 논문집, pp.72~75.
- (8) B. Y. Ghoo, S. J. Back, Y. T. Keum and S. Y. Kang, 1998 "Finite Element Analysis of Tailored Sheet Forming Processes Considering Laser Welding Zone", Metals and Materials, Vol.4, No.4, pp.862~870.
- (9) N. Nakagawa, S. Ikura, F. Natumi, and N. Iwata, 1993, "Finite Element Simulation of a Laser-Welded Blank", SHEET METAL AND STAMPING SYMPOSIUM, pp.189~197.
- (10) 박기철, 한수식, 김광선, 권오준, 1998, "레이저 용접 테일러드 블랭크 성형특성", 한국소성가공학회 제2회 박판성형 심포지엄 논문집, pp.121~130.
- (11) 박승우, 구본영, 백승준, 금영탁, 강수영, 1998, "레이저 용접 합체박판의 물성 및 성형성에 관한 연구", 한국소성가공학회 '98 추계학술대회 논문집, pp.32~35.
- (12) J. M. Van der Hoeven, K. Rubben, F. Lambert, I. De Rycke, and J. Scheers, 1996 "Formability Issues for Tailored Blanks", 19th IDDRG Biennial Congress, pp.347~356.
- (13) E. Doege, H. Dohrmann, and R. Kösters, 1996, "Simulation and Optimization of the Forming Process of Tailored Blanks", Numisheet '96, pp.199~203.
- (14) 히훈, 이충호, 정재웅, 1998, "비대칭 시편의 딥드로잉 실험에 의한 박판급속의 성형한계도", 한국소성가공학회지, 제7권, 제1호, pp.81~93.