

CO₂ 레이저 합체 박판 용접부의 기계적 물성평가

구본영*, 금영탁**

Evaluation of Mechanical Properties of Welded Metal in Tailored Steel Sheet Welded by CO₂ Laser

Bon Young Ghoo* and Young Tag Keum**

ABSTRACT

Automotive manufacturers have taken more interests in tailored sheet metals for improving the rigidity, weight reduction, crash durability, and cost savings so that their application to auto-bodies has been increased. However, since the tailored sheet metals do not behave like un-welded sheet metals in press forming operations, the stamping engineers no longer rely only on conventional forming techniques. Furthermore, there is no clear understanding of the characteristics of welded metal which influence the overall press formability of tailored sheet metals. Recently, the computer simulations are prevailing for the evaluation of the formability. Unfortunately, the mechanical property of tailored sheet metal has to be quantitatively defined in the simulation. In this study, the analytical equations are formulated in order to find the mechanical properties of the welded metal in the tailored sheet metal welded by CO₂ laser. Based on force distribution assumption, the constitutive behavior of the welded metal is investigated using uniaxial tensile test results of base metals and tailored sheet metal. Then, the strength coefficient, work-hardening exponent, and plastic strain ratio of laser-welded metal are calculated from those of base metals and tailored sheet metal. In addition, the existence of weld defects in the welded metal is indirectly detected by examining the slope of strength coefficient of the welded metal.

Key Words : Laser-welded/unwelded sheet metal (레이저용접/비용접박판), Force distribution (힘배분), Strength coefficient slope (강도계수변화율), CO₂ laser (이산화탄소 레이저), Welded metal (용접부)

기호설명

A = cross sectional area of specimen
DT = tailored specimen with different thickness

K = strength coefficient
L = length of specimen

* 한양대학교 대학원
** 한양대학교 기계공학부

n = work-hardening exponent
 r = plastic strain ratio
 P = axial force
 ST = tailored specimen with same thickness
 W = width of specimen
 WM = welded metal

1. 서론

최근에 전기저항을 이용한 메쉬시임 용접기와 고출력 레이저 용접기가 산업현장에 사용되면서, 과거에 TIG용접 등으로 불가능했던 다양한 합체박판(tailored blank) 생산이 가능하게 되었고 이를 소재로 한 합체박판 성형공법이 각광을 받고 있다. 이러한 합체박판 성형법은 차체가 필요로 하는 두께 및 재질의 판재를 미리 용접한 후 한번의 스텝핑 공정을 통해 제품을 생산하는 방식으로서 차체의 판재를 여러 개의 금형에서 별도로 스텝핑 한 후 용접하여 생산하던 기존방식에 비해 큰 장점을 갖고 있기 때문에 하이드로포밍 공법과 더불어 차체경량화를 위한 신기술로 각광받고 있다. 그 중에서도 레이저 용접 합체박판 기술은 외관이 좋은 차체 제작이 가능하기 때문에 경량화 및 고품질의 확보에 대한 자동차 업계의 요구 조건을 충족시켜줄 뿐만 아니라 가격 경쟁력이 높아 미국, 일본, 유럽 등 선진 자동차 회사를 중심으로 활발하게 적용되고 있다. 우리나라의 자동차 회사나 철강 업체에서도 합체박판 성형에 대한 연구를 활발히 진행하고 있지만 아직까지는 연구 시작 단계로서 적용 가능한 부품 수가 제한적이며 충분한 데이터를 확보하고 있지 못한 실정이다. 그러나, 까다로운 소비자 요구와 접충하는 선진국의 규제 조건을 충족시키기 위해서는 반드시 빠른 시일내에 다양한 부품에 대한 레이저 합체박판 양산 체제 구축이 필요하며 이를 위해서는 선진 외국에 비해 크게 뒤쳐져 있는 레이저 합체박판의 물성 및 성형성, 그리고 적용가능성에 대한 활발한 연구가 필요할 것으로 생각된다. Badylamyr와 Szinyur⁽¹⁾는 용접 파라미터와 용접상태의 연관성을 살펴보기 위하여 gap, 보호가스, 레이저빔 위치, 그리고 판재 표면 상태 등의 4가지 용접파라미터 변화에 따른 용접성을 관찰하였다. Bhatt 등^(2,3,4)은 메쉬시임 용접과 레이저 용접으로 제작되는 합체박판의 최적 용접조건을 도출하여 합체박판의 성형성을 높이기 위한 연구를 수행하였

다. Wang 등⁽⁵⁾은 레이저 용접 과정이 용접부의 미세구조에 영향을 주어 기계적 성질을 변화시킨다는 사실에 주목하여 유한요소 프로그램으로 열 사이클을 해석하였다. Saunders⁽⁶⁾는 1.8t-AKDQ와 2.1t-HSLA를 접합한 용접선을 포함하는 인장 시편의 실험에서 모재에 부가되는 하중을 전체 하중에서 감해 용접부가 지지하는 하중을 계산하는 방법으로 용접비드의 경화곡선을 구할 수 있음을 보였다. 국내에서는 서정 등⁽⁷⁾이 자동차에 널리 쓰이는 아연 도금 강판과 자동차 본네트용 알루미늄 합금의 CO₂ 레이저 용접에 대해 연구를 수행하였으며, 이희석 등⁽⁸⁾은 이중두께의 CO₂ 레이저 용접성을 연구하였다.

그러나, 지금까지의 합체박판 연구의 대부분이 용접부 물성을 정량적으로 평가 또는 고찰하기 보다는 일반박판의 실험방법과 평가방법 등을 이용하여 합체박판의 물성 및 성형성을 정성적으로 관찰하는데 그치고 있다. 특히, 레이저 용접부의 기본적인 물성에 관한 측정 실험 및 평가 방법은 전무한 실정이다. 따라서, 성형특성이 모재와 크게 다른 용접부 물성을 정량적으로 평가할 수 있는 체계적인 기술 및 방법을 개발하는 기초연구가 무엇보다 시급한 실정이다. 특히, 크게 증가하고 있는 판재 유한요소 성형해석에서 테일러드 블랭크의 용접부 파단 및 스프링백 등을 관찰하기 위해서는 용접부를 해석에 포함해야 하며 이를 위해서는 정량적으로 평가된 용접부 물성이 필요하다. 이는 일직선 용접 테일러드 블랭크 뿐만 아니라 적용이 크게 증가할 것으로 예상되는 곡선 용접 테일러드 블랭크에서도 마찬가지로 적용될 것으로 생각된다.

합체박판 성형에서 용접상태의 양부는 성형의 성패에 큰 영향을 미치기 때문에 성형 전에 용접상태를 감별하는 것은 매우 중요하다. 현재까지 용접상태를 감별하는 방법은 육안 관찰, 인장시험을 통한 연신을 비교, 용접비드 및 열영향부의 경도 비교, 현미경을 통한 미세 조직 관찰, 에릭슨 실험을 통한 겹높이 비교 등이 널리 쓰이고 있으나 육안 관찰 및 인장시험을 제외하면 실험 자체가 쉽지 않은 실정이다. 합체박판의 안정적인 생산을 위해서는 양산 전에 또는 양산 중에 합체박판의 용접상태를 빠르고 편리하게 감별할 수 있는 방법이 필요하며 이에 대한 연구가 반드시 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 레이저 합체박판 용접부의 물성을 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하고 용

접부 물성으로부터 합체박판의 용접상태를 감별할 수 있는 방법을 제안하였다. 시편의 용접선이 인장축과 일치하는 인장시험 결과에 하중배분 가정을 도입하여 용접부 가공경화 곡선을 산출할 수 있는 해석적 수식을 정식화하였다. 또한, 용접부 소성변형률비를 구하는 수식을 정식화하고 모재와 합체박판의 인장시험 결과로부터 용접부 소성변형률비를 계산하였다. 도입된 하중배분 가정의 타당성을 증명하기 위하여 폭이 다른 인장시편과 용접선이 편심되어 있는 인장시편의 용접부 강도계수를 비교하였다. 또한, 용접부 폭과 용접부 강도계수의 관계로부터 용접부 강도계수 변화율을 계산하여 용접상태를 간접적으로 평가하였다.

2. 실험

본 연구는 동종두께(ST: same thickness)와 이종두께(DT: different thickness)로 용접된 레이저 합체박판에 대해 실험을 실시하였다. 합체박판 제작에 사용된 모재는 표면처리 및 등급 (e.g. SPCC, EZI, GA), 두께 (e.g. 0.7t, 0.8t, 0.9t, 1t, 1.4t, 1.5t, 2t), 그리고 생산회사 (e.g. D, P, Y)에 따라 다양하게 준비하였고, 이들을 자동차 패널에 적절한 조합으로 CO₂ 레이저 용접하였다.

Table 1은 용접속도, 용접기 출력, gap, 빔각도, 레이저 초점 등의 용접파라미터를 정리한 것이다. 이종두께 합체박판의 경우에는 두꺼운 모재의 상부 표면을 레이저 초점의 기준면으로 삼았다. gap은 용접할 두 모재 사이의 간격이며, 두 모재의 용접면이 정도를 유지할 수 있도록 밀링가공하였다. 단, B조의 경우에는 두 모재의 용접면을 밀링가공하지 않았다. 용접 파라미터에 따라 용접부의 금속 조직학적 특성 및 용접부 폭이 변화하지만, 본 연구는 좋은 용접상태를 얻기 위해 레이저 용접 공정에서 결정된 용접 파라미터를 사용하였다.

합체박판 및 이를 구성하는 모재가 Hollomon 가 가공경화법칙($\sigma = K \epsilon^n$)을 따른다는 가정하에 구성방정식을 결정하기 위하여 합체박판과 합체박판을 구성하는 모재에 대한 인장시험을 실시하였다. 합체박판의 경우에는 용접선이 주인장축에 일치하도록 하였다. 인장속도는 5mm/min로 하였으며, 이종두께인 경우에 얇은 쪽 모재에 두께 차이만큼 보강재를 덧대어 실험을 수행하였다. 인장시험에 사용

Table 1 Weld parameters for tailored sheet specimen groups

Specimen Group	Velocity (m/min)	Power (kW)	Gap (mm)	Shield Gas	Beam Angle (degree)	Focus
A	7	6	0~0.075	He	7~8	neutral
B	6	2	0~0.12	N ₂	0	above -2mm
C	6~7	6	0~0.075	He	3	below
D	4	4	0~0.075	He	3°	above -0.6mm
E	7.5	7	0~0.075	He	3°	below
F	6.5	7	0~0.075	He	0	below
G	7.5	7	0~0.075	He	3°	below

* : 0 degree in the same thickness combination

된 합체박판 시편은 용접 파라미터, 용접 위탁 기관, 그리고 시편 제작 순서대로 A조, B조, C조, D조, E조, F조, 그리고, G조로 분류하였으며, 이들 시편을 구성하는 모재의 물성치와 조합형태 및 인장시험 결과를 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties of base metal specimens

Base Metal Specimen	Work Hardening Exponent	Strength Coefficient (MPa)	Elongation (%)	Plastic Strain Ratio
SPCC-1t(P)	0.244	511	39.6	N/M
SPCC-2t(P)	0.215	489	31.2	N/M
EZI-0.8t(P)	0.235	494	28.5	N/M
SPCC-1.5t(P)	0.230	488	31.7	N/M
SPCC-0.7t(P)	0.264	496	38.3	N/M
SPCC-0.9t(P)	0.265	500	37.6	N/M
SPCC-1.4t(P)	0.237	478	34.8	N/M
SPCC-0.8t(D)	0.222	546	32.6	1.402
SPCC-0.8t(Y)	0.224	529	34.7	1.758
SPCC-1.5t(D)	0.221	543	32.8	1.462
SPCC-0.8t(P)	0.206	473	35.5	2.017
GA-0.8t(P)	0.242	519	29.6	1.536

D,Y,P : manufacture companies

N/M : not measured

Table 3 Mechanical Properties of tiled sheet specimen groups

Tailored Sheet Specimen Group		Work-Hardening Exponent	Strength Coefficient (MPa)	Elongation (%)	Plastic Strain Ratio	
A	AST	SPCC-1t(P):SPCC-1t(P)	0.213	528	35.5	N/M
	ADT	SPCC-1t(P):SPCC-2t(P)	0.204	508	40.3	N/M
B	BST1	EZI-0.8t(P):EZI-0.8t(P)	0.198	507	10.5	N/M
	BST2	SPCC-1.5t(P):SPCC-1.5t(P)	0.210	485	27.0	N/M
	BDT	EZI-0.8t(P):SPCC-1.5t(P)	0.185	488	16.1	N/M
C	CDT1	SPCC-0.7t(P):SPCC-0.9t(P)	0.235	520	29.3	N/M
	CDT2	SPCC-0.9t(P):SPCC-1.4t(P)	0.224	523	35.5	N/M
	CDT3	SPCC-0.7t(P):SPCC-1.4t(P)	0.228	528	36.3	N/M
D	DST	SPCC-0.8t(D):SPCC-0.8t(Y)	0.188	585	25.0	1.607
	DDT	SPCC-0.8t(Y):SPCC-1.5t(D)	0.186	564	27.6	1.615
E	EST	SPCC-0.8t(P):SPCC-0.8t(P)	0.186	541	18.1	1.880
	EDT	SPCC-0.8t(P):SPCC-1.5t(P)	0.195	532	24.1	1.769
F	FST	GA-0.8t(P):GA-0.8t(P)	0.174	527	18.8	1.976
G	GST	GA-0.8t(P):SPCC-0.8t(P)	0.193	530	22.3	1.890
	GDT	GA-0.8t(P):SPCC-1.5t(P)	0.222	543	26.2	1.598

이들 데이터는 같은 조건하에서 4회 실험한 결과에 대한 평균값을 취한 것이다.

A조-G조의 합체박판 가공경화지수는 합체박판을 구성하는 모재의 가공경화지수 평균값보다 낮은 값을 나타내지만, 강도계수와 소성변형률비의 경우에는 모재 평균값보다 높은 값을 보임을 알 수 있다. 이것은 합체박판이 모재에 비해 경도 및 강도가 높고 연신율이 떨어질 것으로 예상되는 용접부를 포함하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 용접부 물성이 모재 물성과 얼마나 차이가 나는지 알 수 없기 때문에 용접부로 인한 합체박판 물성 변화를 평가하기 위해서는 용접부 물성 평가가 필요함을 알 수 있다.

3. 용접부 기계적 물성

레이저 용접후 생성된 용접부(WM: welded metal)는 국부적으로 매우 높은 열에 의해 생성된 것이므로 모재와 다른 금속 조직 및 특성을 갖게 된다(Fig.1 참조). Fig.1에서 용접비드부와 열영향부로 구성된 용접부 크기는 시각적 구분을 편리하게 하기 위해 과장해서 표현한 것이며, 실제 용접부

폭은 미세 조직 관찰 및 경도 실험 등으로부터 약 1~2mm 정도인 것으로 알려져 있다⁹⁾. 본 연구는 용접비드부와 열영향부를 합친 영역을 용접부로 정의하였으며, 일정 용접부폭(WM width)에 대해 동일한 성질을 가지며 균일한 응력분포를 갖는 것으로 가정하였다.

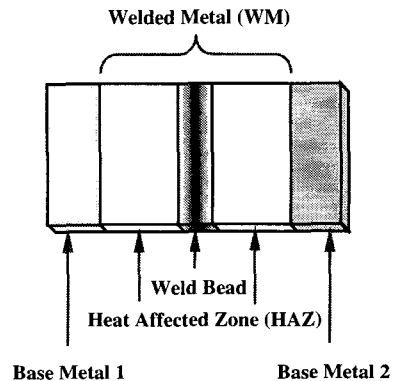


Fig. 1 Schematic view of a tailored sheet metal

본 연구는 합체박판 용접부 물성을 정량적으로 평가하기 위하여 해석적 수식을 정식화하였다. 인장시험결과와 해석적 수식으로부터 용접부 강도계수, 가공경화지수, 소성변형률비를 각각 계산하였으며 용접부 폭에 따른 용접부 강도계수 변화율로부터 합체박판의 용접상태를 간접적으로 평가하였다.

3.1 강도계수 및 가공경화지수

시편 전체 걸리는 하중을 모재와 용접부가 각각 지지한다는 하중배분 가정을 기초로 수식을 정식화하였다. 즉, 합체박판을 구성하는 두 모재가 지지하는 하중을 P_1 과 P_2 , 용접부가 지지하는 하중을 P_W 라고 하면, 시편 전체에 걸리는 하중 P_T 로부터 용접부가 지지하는 힘 P_W 를 다음과 같은 수식으로부터 계산할 수 있다.

$$P_W = P_T - (P_1 + P_2) \quad (1)$$

시편 전체에 걸리는 힘 P_T 는 실험장치로부터 측정된 값이며, 두 모재의 물성치는 이미 알고 있는 값이기 때문에 두 모재가 지지하는 힘 P_1 과 P_2 는 기지의 값이 된다. 즉, 합체박판, 두 모재, 그리고 용접부가 각각 Hollomon 가공경화법칙을 따른다고 가정하면 용접부와 두 모재가 지지하는 힘은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$P_W = \sigma_W \times A^1_W = \frac{A^0_W \cdot K_W \epsilon_x^{n_W}}{\exp(\epsilon_x)} \quad (2)$$

$$P_1 = \sigma_1 \times A^1_1 = \frac{A^0_1 \cdot K_1 \epsilon_x^{n_1}}{\exp(\epsilon_x)} \quad (3)$$

$$P_2 = \sigma_2 \times A^1_2 = \frac{A^0_2 \cdot K_2 \epsilon_x^{n_2}}{\exp(\epsilon_x)} \quad (4)$$

여기서, A^0_i , A^1_i , K_i , n_i 는 각각 모재1($i=1$), 모재2($i=2$), 그리고 용접부($i=W$)의 초기 단면적, 현재 단면적, 강도계수, 가공경화지수를 각각 나타낸다. ϵ_x 는 측정된 시편의 길이방향 변형률로서 두 모재와 용접부가 모두 시편과 동일한 값을 갖는다. 두 모재의 강도계수와 가공경화지수는 기지의 값이기 때문에 식(2)로부터 용접부 강도계수 및 가공경화지수를 계산할 수 있다. 예를 들어, A조의 ADT

시편의 경우에, 용접부 폭이 2mm라고 가정한다면 두 모재와 용접부의 강도계수와 가공경화지수는 511MPa, 489MPa, 579MPa, 0.244, 0.215, 그리고 0.131의 값을 각각 갖는다. 이를 이용하여 응력-변형률 곡선으로 나타내면 두 모재인 SPCC-1t, SPCC-2t, 그리고 용접부의 가공경화곡선은 Fig.2와 같다.

A조, B조, C조의 인장시험결과와 식(1)-식(4)로부터 용접부 강도계수와 가공경화지수를 계산하고 두 모재의 평균값을 기준(100%)으로 용접부 강도계수 및 가공경화지수를 Fig.3에 나타내었다. 백분율값으로 환산한 이유는 모재 물성에 대한 용접부 물성의 상대적인 크기를 비교하기 위함이며, 용접부 강도계수와 가공경화지수의 대표적인 값(average)은 다음과 같다.

- 용접부폭 = 1mm, $K_W = 162\%$, $n_W = 34\%$
- 용접부폭 = 2mm, $K_W = 131\%$, $n_W = 56\%$
- 용접부폭 = 3mm, $K_W = 120\%$, $n_W = 67\%$
- 용접부폭 = 4mm, $K_W = 115\%$, $n_W = 75\%$

용접부 폭을 좁게 가정할수록 용접부가 지지하는 힘이 상대적으로 커지게 되므로 용접부 강도계수가 급격히 상승함을 볼 수 있다. 용접부 가공경화지수는 강도계수와는 반대로 모재 평균값(100%)보다 매우 낮음을 볼 수 있다. 이는 용접부가 급냉

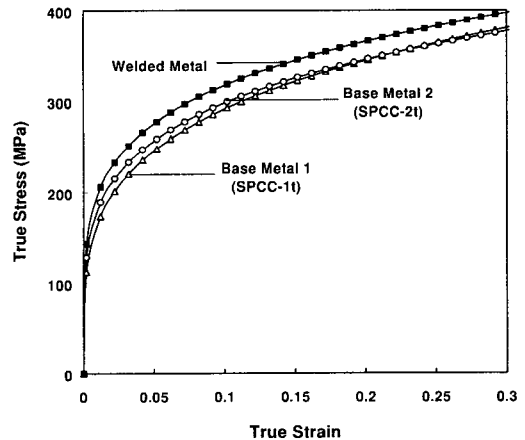


Fig. 2 True stress-strain curves of base metal 1, 2, and welded metal in ADT tailored sheet specimen (2mm of WM width is assumed)

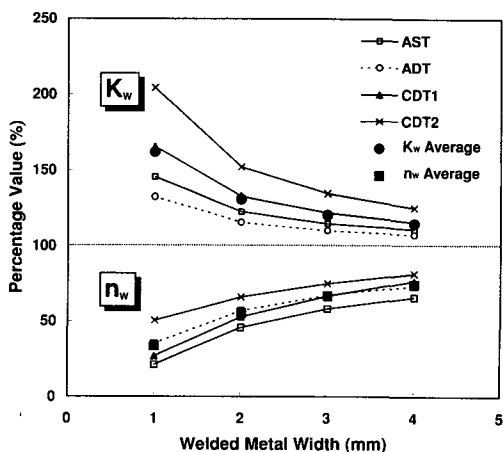


Fig. 3 Normalized strength coefficients (K_w) and work-hardening exponents (n_w) of WM associated with assumed WM widths in terms of percentage values

에 의해 이미 경화가 되어 있으므로 가공경화가 될 여지가 작기 때문이다. 이로부터 모재에 비해 강도가 높고 균일 변형 한계가 낮은 용접부는 합체박판 성형성 저하의 주원인임을 알 수 있다⁽¹⁰⁾. 실제로 용접부가 주인장축에 놓인 경우에 용접부 성형성이 합체박판의 성형성을 좌우하기 때문에 용접부가 주인장축에 놓이지 않는 경우에 비해 합체박판의 성형성은 크게 저하된다.

본 연구에서 정식화된 수식의 타당성을 증명하기 위하여 두 가지 비교를 수행하였다. 첫째로, 12.5mm 폭의 normal 인장시편에서 6.7mm를 차지하는 부분의 가공경화곡선(CASE-I)과 6.7mm 폭의 subsized 인장시편의 가공경화곡선(CASE-II)을 비교하였다(Fig.4 참조). Fig.5는 가공경화곡선의 차이를 나타낸 것으로서 변형률이 0.3인 경우에 최대 약 2.7% 정도 차이를 보이지만 경화곡선이 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. Sanders⁽⁶⁾의 인장시험결과를 살펴보면, CO₂ 레이저 합체박판의 인장시편 폭이 약 2.5배 차이가 나는 경우에 연신율이 약 3% 정도 차이를 보이기 때문에 본 연구에서 발생한 약 2.7%의 오차는 인장시편의 사이즈 효과와 실험 시의 오차를 생각할 때 매우 미소한 양으로서 공학적인 의미에서 무시할 수 있는 차이임을 알 수 있다. 둘째로, 용접부가 중앙에 위치하지 않는 경우에도 하중 배분 가정이 정당성을 가짐을 보이기 위하여 CDT

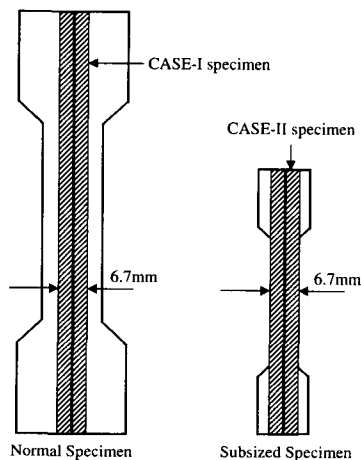


Fig. 4 CASE-I and CASE-II specimens obtained from normal and subsized tensile specimens

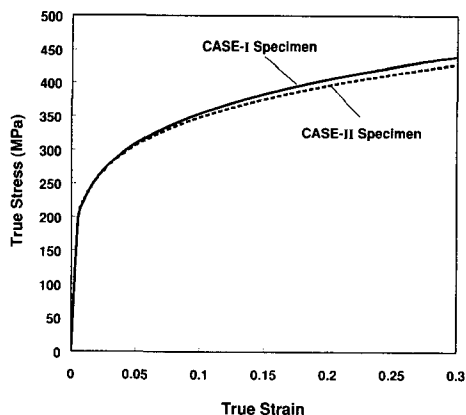


Fig. 5 Comparison of true stress-strain curve between CASE-I specimen and CASE-II specimen

조 인장시편에서 용접부가 시편의 중앙에 위치한 경우와 중앙으로부터 각각 2mm, 4mm 편심된 경우 (Fig.6 참조)의 가정된 용접부 폭에 따른 강도계수를 Fig.7에 나타내었다. Fig.7에서 용접부가 편심이 되어 있는 경우에도 용접부 폭에 대응하는 강도계수가 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 이러한 두 가지 비교로부터 단축 인장 상태의 합체박판 시편 내부에서 모재와 용접부가 개별적으로 인장력을 지지하고, 모재와 용접부가 단축 인장 상태로 인장된다는 하중배분 가정이 타당함을 알 수 있다.

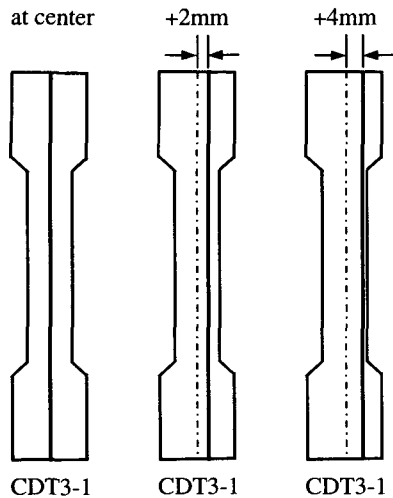


Fig. 6 Position of welded metals in CDT3-1, CDT3-2, and CDT3-3 specimens (Center line and weld line are marked with dotted and solid ones, respectively)

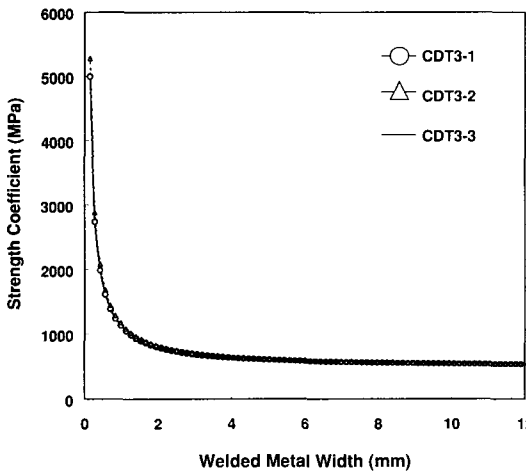


Fig. 7 Strength coefficients of welded metals of CDT3-1, CDT3-2, and CDT3-3 specimens

합체박판의 용접상태를 정확하게 평가하기 위해서는 현미경을 이용한 미세 조직학적 관찰 및 경도실험이 필요하지만, 실험이 번거로울 뿐만 아니라 실험장치를 구하는 것도 쉬운 일은 아니다. 따

라서, 본 연구에서는 실험이 간편한 인장시험으로부터 합체박판의 용접상태를 간접적으로 판별하기 위하여 용접부 강도계수 변화율(K_w slope)을 도입하였다. 용접부 강도계수 변화율은 용접부 중심으로부터 모재쪽으로 강도계수가 어떻게 변화해 가는지를 정성적으로 나타내며, 이는 용접비드와 모재간에 분포하는 열영향 정도를 반영한다. 용접부 강도계수 변화율은 용접상태에 따라 그 값이 일정한 형상을 갖는 것을 알 수 있었으며 동일한 용접 조건에서는 그 형상이 거의 유사하였다. 따라서, 용접상태가 좋은 시편의 용접부 강도계수 변화율을 기준으로 정하고 용접상태를 판별하고자 하는 시편의 용접부 강도계수 변화율을 이와 비교하여 용접상태를 간접적으로 평가하였다.

용접 상태가 매우 양호한 A조의 용접부 강도계수 변화율(STANDARD)을 기준으로 용접상태가 좋지 않은 B조와 용접상태가 양호한 C조의 강도계수 변화율을 Fig.8과 Fig.9에 각각 나타내었다. 용접이 불량한 B조의 경우는 용접부 강도계수의 변화율 곡선이 STANDARD보다 낮은 쪽에 위치한 것을 볼 수 있지만, C조의 경우에는 STANDARD보다 위쪽에 위치하는 것을 볼 수 있다. B조는 두 모재의 용접면을 밀링가공 하지 않았기 때문에 용접상태가 매우 불량하였으며, 성형성 실험 시 용접부 불량으로 사료되는 파단 등이 관찰되었다. 반면에 C조의 경우에는 용접상태가 양호하여 성형성 실험 시 용접불량으로 인한 성형결함은 발생하지 않았다. 즉, 용접상태가 양호한 기준 시편의 용접부 강도계수 변화율보다 높은 쪽에 위치하면 용접상태가 양호한 것으로 판별할 수 있으며 반대의 경우는 용접상태가 양호하지 않은 것으로 평가할 수 있다. 따라서, 이를 이용하면 빠르고 편리하게 합체박판의 용접상태를 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 소성변형률비

시편이 축방향으로 인장 변형되어 길이가 L^1 이 되면, 시편 전체가 폭방향으로 변화한 양 W^1_T 는 두 모재가 폭방향으로 변화한 양 W^1_1 과 W^1_2 에 용접부가 폭방향으로 변화한 양 W^1_w 를 더한 것과 같다. 따라서, 변형 후 용접부 폭은 시편전체의 폭에서 두 모재의 폭을 빼주면 다음과 같이 계산될 수 있다.

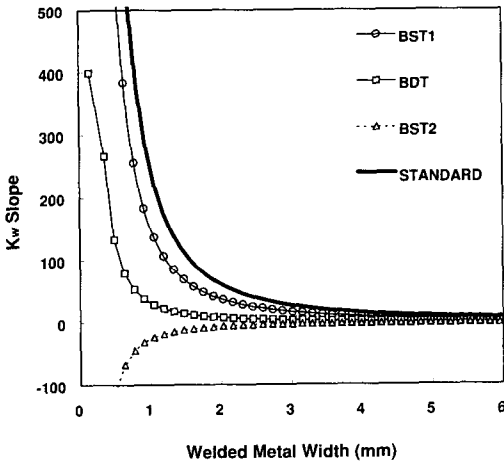


Fig. 8 Comparison of K_w slope between A group (STANDARD) and B group specimens

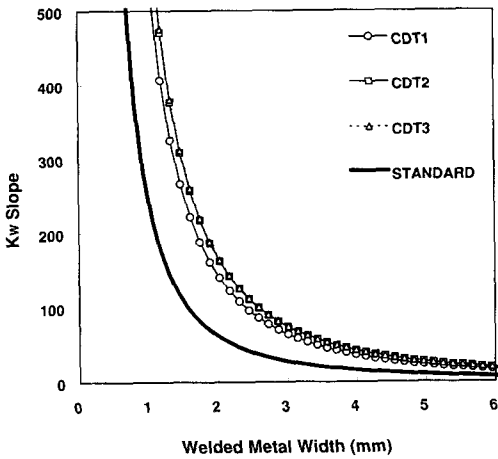


Fig. 9 Comparison of K_w slope between A group (STANDARD) and C group specimens

$$\begin{aligned}
 W^1_w &= W^1_T - [W^1_i + W^1_2] \\
 &= W^1_T - [W^0_1 \exp\left(\frac{-r_1}{1+r_1}\right) + W^0_2 \exp\left(\frac{-r_2}{1+r_2}\right)]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서, W^0_i 는 모재1($i=1$), 모재2($i=2$), 그리고 용접부($i=W$)의 초기 폭을 각각 나타낸다. r_1 과 r_2 는 각각 모재1과 모재2의 소성변형률비로서 이미 알

고 있는 값이기 때문에 식(5)로부터 변형 후 용접부 폭을 계산할 수 있다. 식(5)로부터 구한 변형 후 용접부 폭을 이용하여 용접부의 소성변형률비 r_w 는 다음과 같은 식으로부터 결정된다.

$$\begin{aligned}
 r_w &= \frac{\epsilon_{yW}}{\epsilon_{zW}} = - \frac{\epsilon_{yW}}{\epsilon_{xW} + \epsilon_{yW}} \\
 &= \frac{\ln \frac{W^1_w}{W^0_w}}{\ln \frac{W^1_w}{W^0_w} - \ln \frac{L^1}{L^0}}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

여기서, ϵ_{yW} , ϵ_{zW} , L^0 , L^1 은 용접부의 폭방향 변형률과 두께변형률, 초기 시편의 길이, 변형 후 시편의 길이를 각각 나타낸다.

식(5)와 식(6)을 이용하여 D조, E조, F조, 그리고 G조의 인장시험 결과를 분석하고 용접부 소성변형률비를 계산하여 백분율값으로 환산하였다. Fig.10은 가정된 용접부 폭에 따른 용접부 소성변형률비이다. Fig.10에서 볼 수 있는 것처럼 용접부의 소성변형률비는 용접부 폭을 작게 가정할수록 커지며 용접부 폭을 크게 가정할수록 점점 작아져 시편 전체 폭으로 가정하면 용접부 소성변형률비는 시편 전체에 대한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

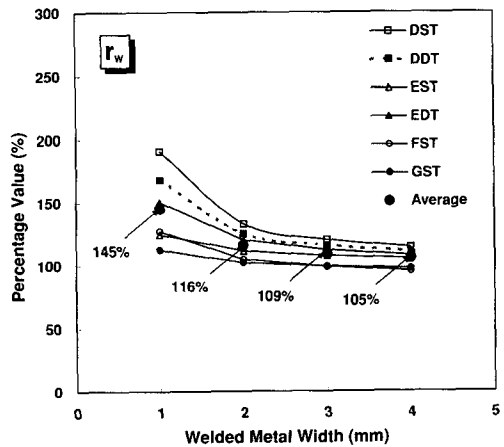


Fig. 10 Normalized plastic strain ratios (r_w) of WM associated with assumed WM widths in terms of percentage values

용접부 소성변형률비는 모재 평균값보다 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있으며 용접부 소성변형률비의 대표적인값(average)은 다음과 같다.

용접부폭 = 1mm, $r_w = 145\%$

용접부폭 = 2mm, $r_w = 116\%$

용접부폭 = 3mm, $r_w = 109\%$

용접부폭 = 4mm, $r_w = 105\%$

4. 결론

본 연구에서는 레이저 합체박판 용접부의 기계적 물성을 계산할 수 있는 해석적 수식을 정식화하고, 합체박판의 용접상태를 판별할 수 있는 효율적인 방법을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하중배분 가정을 도입하여 레이저 합체박판 용접부의 물성을 정량적으로 계산할 수 있는 수식을 정식화하였다.

2) 단축 인장 상태인 시편 내의 용접부와 모재가 하중을 개별적으로 지지하고 용접부와 모재도 단축 인장 상태로 변형한다는 하중배분 가정의 타당성을 입증하여 본 연구에서 정식화한 수식의 정당성을 보였다.

3) 용접부 강도계수, 가공경화지수 및 소성변형률비를 정량적으로 계산하여 지금까지 알려진 합체박판과 모재 물성의 정성적 특성 차이를 정량적으로 비교하였다.

4) 용접부 강도계수 변화율은 용접부와 모재의 열영향 정도를 정성적으로 반영하기 때문에 용접상태가 양호한 시편의 용접부 강도계수 변화율을 기준값으로 합체박판의 용접상태를 간접적으로 평가할 수 있음을 보였다.

5) 본 연구에서 정량적으로 구한 용접부 기계적 물성을 합체박판의 유한요소 성형해석 시 용접부 기계적 물성값으로 사용하면 용접부 과단 및 스프링백 해석에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 부산 대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구 센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. K. M. Radlmayr and J. Szinyur, "Laser Welded Sheet Panels for the Body in White," Presented in IDDRG Working Groups Meeting, PISA, Italy Palazzo dei Congressi, 1991.
2. M. F. Shi, K. M. Pickett, and K. K. Bhatt, "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheet," SAE Technical Paper No. 930278, 1993.
3. 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," SAE Technical Paper No. 950922, 1995.
4. K. K. Bhatt, M. Eisenmenger, and M. F. Shi, "Formability of Mash Seam Welded Blanks: Effect of Welding Set-up Conditions," SAE Technical Paper No. 950923, 1995.
5. B. Y. Wang, M. F. Shi, H. Sadrina and F. Lin, "Structural Performance of Tailor Welded Sheet Steels," SAE Technical Paper No. 950376, 1995.
6. F. I. Saunders, "Forming of Tailor-Welded Blanks," Ph. D. Dissertation, Ohio State Univ., 1995.
7. 서정, 한유희, 김정오, 이영신, "이종두께 강판의 CO₂ 레이저 용접 및 성형성," 대한용접학회지, 제14권, 제1호, pp. 45-54, 1995.
8. 이희석, 배동호, "이종강판의 CO₂ 레이저 용접성 평가에 관한 연구," 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집(A), pp. 13-18, 1996.
9. 박기철, 한수식, 김광선, 권오준, "레이저 용접 테일러드 블랭크의 기본 성형특성 I: 인장변형특성," 한국소성가공학회지, 제7권, 제1호, pp. 23-35, 1998.
10. 김영탁, 구본영, 박승우, 유석중, 이경남, "레이저 용접 합체박판의 성형한계도와 스탬핑 금형 성형해석에 적용," 한국소성가공학회지, 제9권, 제1호, pp. 3-9, 2000.