

새로운 개념의 Tailored Blank 레이저 용접성 평가 방법에 관한 연구

New Concept in Evaluation of Laser Tailored Blank Weldability

정봉근, 고광문*, 정경훈*, 이창희
B. G. Chung, G. M. Ko*, K. H. Chung*, C. H. Lee
한양대학교 금속공학과 철강공정 및 응용연구소
*대우자동차 생산기술연구소
('98.9.4십사시작-'98.12.23십사완료)

ABSTRACT

This study introduces the new concept in the evaluation criteria of the CO₂ laser Tailored Blank weldability. The materials used are 0.7mm, 1.5mm thick low carbon automotive galvanized steels. Welding tests were conducted for both similar thickness(0.7mm-0.7mm, 1.5mm-1.5mm) and dissimilar thickness(0.7mm-1.5mm) cases. The criteria developed for optimum welding conditions were based on relationship between results of die press forming test, weld transverse tensile test, Erichsen test and weld penetration measurements. Application of the developed criteria(fracture ratio, strength ratio and D/To) in obtaining optimum welding condition revealed that a weld which satisfied any of the criteria did not fracture during actual die press test.

Key words : criteria, weld penetration, strength ratio, Erichsen test, fracture ratio

1. 서론

조성과 두께가 다른 둘 이상의 part를 재단사가 재단하듯 만들 수 있다는 의미인 Tailored Blank(TB)는 1985년 Thyssen Stahl AG에 의해서 Audi 100의 floor pan에 처음으로 적용되었다. TB는 자동차 panel의 프레스 성형에 있어서 절단한 판재를 용접하여 하나의 결합소재로 일체화(integration)시켜 프레스 성형하는 기술로^{1,3)}, 기존의 자동차 design은 판재를 절단하고 성형한 후에 spot 용접을 했는데 반해, TB는 판재를 절단하고 용접한 후에 성형을 하는 새로운 기술이다.^{4,5)} TB는 Spot용접, 레이저 용접, Mash Seam용접, Induction 용접, Electron Beam용접으로도 가능하지

만 주로 Mash Seam용접과 레이저 용접을 사용한다. 자동차 차체용 프레스 소재는 용접부가 좁고 깊어야 하며, 열영향부(HAZ)가 작아 재료의 비틀림이 작아야 하고 외관이 양호하고 강도 및 성형성이 모재와 비슷하며 자동화가 가능하여 생산성이 향상되는 등의 조건을 만족하는 레이저로 용접을 하는 것이 바람직하여 근래에는 Mash Seam용접 보다는 레이저 용접을 TB 제조에 있어 많이 사용하고 있는 실정이다.^{6,7)} TB는 일체화된 형태로 작업을 하므로 강도와 내식성이 좋아지고, 생산성 및 정밀도가 향상되며, 부품수가 감소되고, scrap를 재활용할 수 있으며, 두께가 다른 판재를 용접할 수 있어 기존 spot 용접에서 필요한 보강

재(reinforcement)를 제거시키므로 생산 공정이 단순해지고 또한 최근 자동차 제조업체에서 가장 issue가 되는 차체를 경량화시킬 수 있어 1980년대 후반부터 국내는 물론 세계 유수의 자동차 회사들이 개발에 박차를 가하고 있다.^{8,9)} 이러한 특성을 지닌 TB는 전 세계 선진 자동차 업체의 경우 차체 여러 부위에 이미 적용되어 생산되고 있으며 그 적용부위도 더욱 다양화되고 있는 추세인 반면, 국내 자동차 업체의 경우 개발의 필요성은 인정하고 있으나 아직 차체에 실용화되지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 실제 자동차 차체 강판에 사용되는 0.7mm, 1.5mm 아연도금강판을 용접속도, 초점, 간격(gap), 빔 입사각 등의 레이저 공정변수를 변화시켜 동종두께와 이종두께에서 레이저 용접을 행하였다. 또한 이상적인 적정 용접조건 선정 기준은 용접후 다이 프레스(Die press)를 이용한 실적용 실험에서 판파단이 일어나지 않을 조건이 된다. 하지만 이러한 실 제품의 프레스 실험을 모든 용접조건에 실시하는 것은 시간적, 경제적으로 많은 손실이 따르게 된다. 그러므로 본 연구에서는 작은 시편의 프레스 실험에서 용접부에서의 판파단이 일어나지 않을 경우의 용입비(D/To), 인장실험에서의 인장 강도비 (Strength Ratio) 그리고 성형성을 평가하는 Erichsen 실험으로부터 파단비율 (Fracture Ratio)를 구하고 이들의 상관관계에 의해 동종두께와 이종두께에서 적정 용접조건 선정 임계치 (Criteria)를 결정하므로써 고효율 레이저 용접성을 평가하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 양면에 45g/m²의 아연이 용융도금된 0.7mm, 1.5mm 두께의 자동차용 저탄소 아연도금강판이다. 이들 재료의 화학성분은 습식분석을 통하여 얻었으며 table 1과 같다. 절단기를 이용하여 틈이 발생하지 않도록 절단한 500mm×100mm 시편을 지그에 물린후 맞대기 하

여 CO₂ 레이저 용접을 행하였다.

Table 1. Chemical compositions of automotive low carbon steels.

composition material	C (wt%)	Si (wt%)	Mn (wt%)	P (wt%)	S (wt%)	Fe (wt%)	Zn (g/m ²)
0.7mm galvanized steel	0.0024	0.005	0.125	0.011	0.005	bal.	45/45
1.5mm galvanized steel	0.0032	0.0020	0.0650	0.0090	0.0080	bal.	45/45

본 레이저 장비의 초점 깊이는 3.67mm이며, 출력은 6kW로 하고 헬륨(He)을 보호가스로 사용하여 용접진행 방향의 전방에서 표면과 20°의 각도로 85 SCFH (40 l/min)로 불어주면서 용접속도, 초점, 간격 등의 공정변수를 변화시켜 레이저 용접을 행하였다. 용접속도는 4~10m/min, 초점은 시편표면을 기준으로 0~±4mm, 간격은 0~2mm으로 공정변수를 변화시켰다. 그리고 Fig. 1처럼 용접부의 단면을 통하여 용입비(D/To)를 측정하였는데, D/To는 모재의 두께에 대한 용입깊이로 측정하였다.



Fig. 1 Schematic of the D/To measurement according to thickness.

용접부의 인장강도와 연신을 그리고 용접부의 인장강도를 모재의 인장강도로 나눈 값인 인장강도비를 알아보기 위하여 인장시험을 행하였고, 인장시편은 ASTM E8M-93에 따라 소형판상으로 제작하였으며, 용접부를 인장방향과 수직하게 놓아 실험을 하였다. 기존 차체 디자인과는 다르게 TB 공정에서는 용접된 시편의 성형성이 가장 중요하게 작용하는데, 용접부의 성형성을 평가하기 위하여 실험실 및 현장에서 시행하기 쉬운 방법의 하나인 Erichsen 실험을 실시하였다. Erichsen 실험은 Fig. 2처럼 Roell Arnsler 사양을 사용하여 용접 중심부와 용접시작과 끝부위에서 50mm 떨어진 부위에서 시편을 80mm×80mm로 제작한 후 용접부의 중심선을 지름이 25.4mm인 볼(ball)위에

올려놓고 20mm/min의 속도로 올려서 시편 표면에 파단이 일어날때까지 시행하였다.

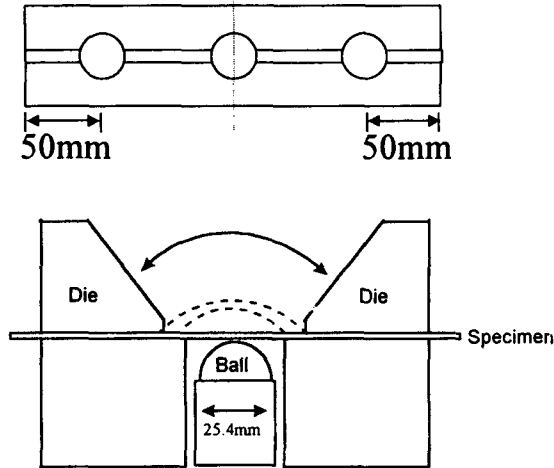


Fig. 2 Ball positions and schematics of the Erichsen test.

파단이 일어났을때 cup의 높이를 기록하여 각 용접조건당 세 부위의 Erichsen 값의 평균치를 구하고, 이를 모재 파단시 cup 높이와의 비율로 나타내었다. 이 값을 "파단비율" 이라고 정의하였다. 즉,

$$\text{파단비율 (Fracture ratio (\%))} = \frac{\text{용접부의 파단높이}}{\text{모재의 파단높이}} \times 100 (\%)$$

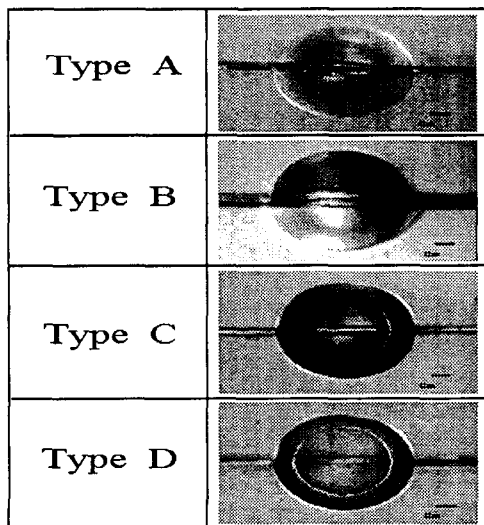


Fig. 3 Classification of fracture morphologies in the Erichsen test.

또한, 파단의 위치와 형태를 각 조건마다 기록하였으며, 파단의 형태에 따라 Fig. 3과 Table 2처럼 A, B, C, D의 4가지로 분류하였다.

Table 2. Classification of fracture morphology.

Type	Fracture Morphology
A	Interface separation
B	HAZ Crack in the thinner sheets
C	Crack across the weld metal
D	Crack following the ball mark

또한, 용접후 Erichsen 실험에서 얻은 0%에서 100%까지의 파단비율을 나타내는 조건으로 용접한 시편(300mm×300mm)을 다이 프레스(Die press)실험을 하여 용접부의 판파단(즉, A 파단형태)이 일어나지 않는 경우를 적정 용접조건 선정의 기준으로 삼았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 동종두께

Fig. 4는 파단형태에 따른 파단비율을 보여주는데, 0.7mm와 1.5mm 동종두께 용접의 경우 A, C, D 세 가지의 파단형태를 가지게 된다. A 파단형태는 파단비율이 70%보다 현저히 작아 용접부의 판파단이 일어나는 불량한 용접성을 보이는데 이는 빠른 용접속도와 시편 표면위를 기준으로 ±2mm이상으로 초점이 잡힌 경우 그리고 부적절한 간격이 있는 경우에 해당된다. C 파단형태는 70%-90%의 파단비율을 가지며, 박판의 0.7mm 동종두께 용접에서 주로 발생하였다. 그리고 90%-100%의 파단비율을 가지는 D 파단형태는 모재의 파단형태와 동일한 경우로 가장 이상적인 파단형태이며, 주로 두꺼운 1.5mm 동종두께 용접에서 나타나게 되었다. 이러한 다양한 파단면을 가지는 조건을 사용하여 용접한 작은 시편을 다이 프레스 실험을 한 결과 Erichsen 실험에서 A 파단형태(즉, weld metal 파단)의 경우를 제외한 C, D 파단형태에서는 용접부와 수직방향 및 용접부 + 모재

에서 파단이 발생하였다.

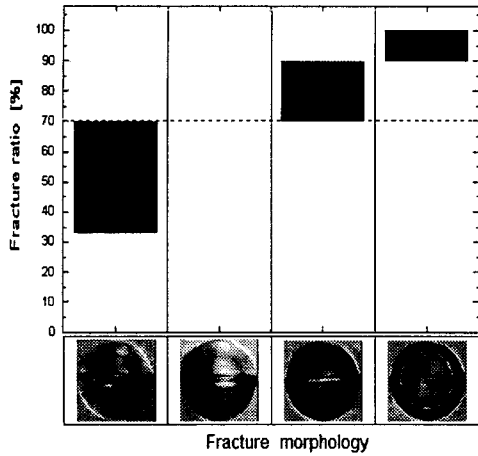


Fig. 4 Relationship between fracture ratio and fracture morphology in similar thickness weld.

적정 용접조건 선정은 다이 프레스를 이용하여 성형성 실험을 하였을 때 용접부의 판파단이 일어나지 않을 조건으로 0.7mm와 1.5mm 동종두께

용접의 경우 파단비율이 70%이상이면 다이 프레스 실험에서도 판파단이 일어나지 않게 되었다. 그러므로 판파단이 발생하지 않는 70%의 파단비율을 기준으로 0.7mm와 1.5mm 동종두께 용접에서의 적정 용접조건 선정 임계치를 구하였다. Fig. 5는 0.7mm와 1.5mm 동종두께에서 적정 용접조건 선정 임계치를 구하기 위해 모든 용접조건별 D/To와 인장강도비 그리고 파단비율과의 상관관계를 도시하였는데 0.7mm와 1.5mm 동종두께 용접의 경우 두 강판 모두 판파단이 발생하지 않는 파단비율이 70%인 경우 D/To는 용접부의 용입이 모재 두께의 80%가 되는 0.8이 되었고, 이때의 인장강도비는 1이 되었다. 그러므로 인장강도비가 1이 되면 용접부가 모재의 인장강도와 연신율을 지니게 되어 성형성이 좋아지게 되었다. Fig. 5에 의하면 D/To가 0.8미만이면 용접부의 파단이 발생하는데 이와 같은 경우 Erichsen 실험을 했을 때 A

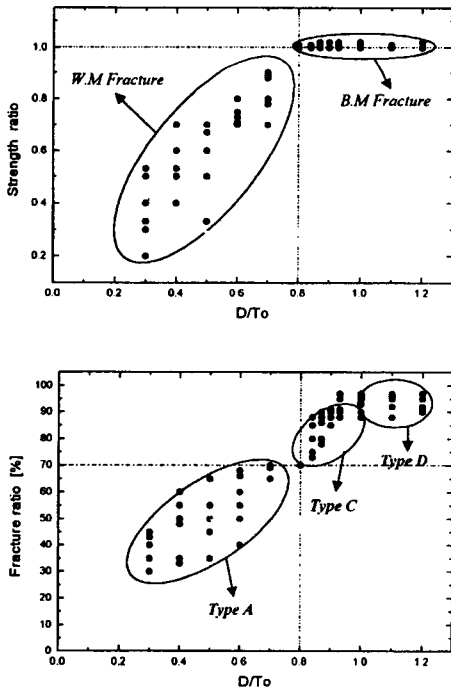


Fig. 5 Relationship between strength ratio, fracture ratio and D/To in the 0.7mm, 1.5mm similar thickness welds.

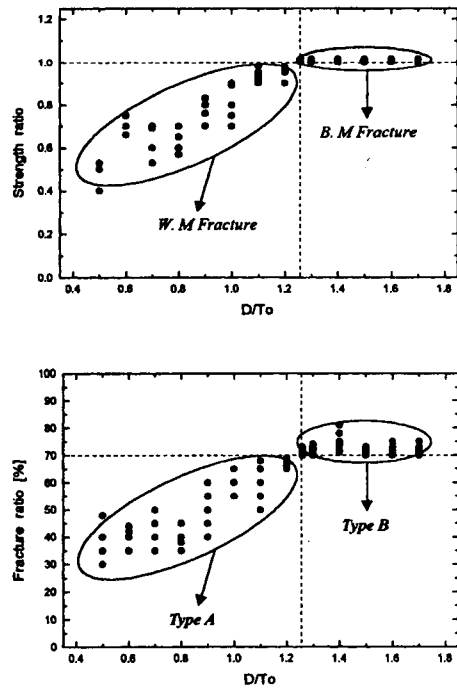


Fig. 6 Relationship among D/To, strength ratio and fracture ratio in dissimilar thickness (0.7mm~1.5mm) welds.

파단형태가 되었으며, D/To가 0.8이상이면 모재가 대부분 파단되므로 70% 이상의 파단비율을 가지는 C와 D 파단형태를 보이게 되었다.

3.2. 이중두께

Fig. 6은 0.7mm-1.5mm 이중두께 용접에서 본 연구자가 연구한 모든 용접조건의 D/To와 인장강도비 그리고 파단비율을 도시하였다. 0.7mm-1.5mm 이중두께 용접에서 용접후 다이 프레스 실험을 하면 동종두께 용접에서와 동일하게 70%이상의 파단비율에서 용접부의 판파단이 일어나지 않았다. 이를 기준으로 0.7mm-1.5mm 이중두께에서의 적정 용접조건 선정 기준을 구할 수 있었는데, 강도비가 1이고 D/To가 0.8인 동종두께 선정 임계치와 비교할때 이중두께 용접에서의 선정 임계치와 상당한 차이가 있었음을 관찰할 수 있었

다. Fig. 6에 의하면 0.7mm-1.5mm 이중두께 용접의 경우 파단비율이 70%이면 D/To(이중두께의 경우 D/To는 얇은 모재를 기준으로 하여 용입과의 비율을 나타냄)가 1.25가 되고, 인장강도비가 1이 되므로 용접부와 모재의 강도 및 연신율이 동일하여 모재에서 파단이 일어나게 되고 파단형태는 B 형태가 되었다. 또한 D/To가 1.25보다 작으면 파단비율은 70%미만이 되어 인장강도비가 1보다 작게 되므로 용접부에서 파단이 일어나는 A 형태를 보이게 되었다.

이러한 임계치를 이용하여 0.7mm-1.5mm의 이중두께 강판을 4m/min에서 10m/min으로 용접속도를 변화시켜가며 고출력 레이저 맞대기 용접성을 평가하였다. Fig. 7에 의하면 8m/min까지는 적정 강도, 용입 및 가공성 조건을 만족하였으나, 용접속도가 8m/min를 초과하면 용입이 적어 용접성

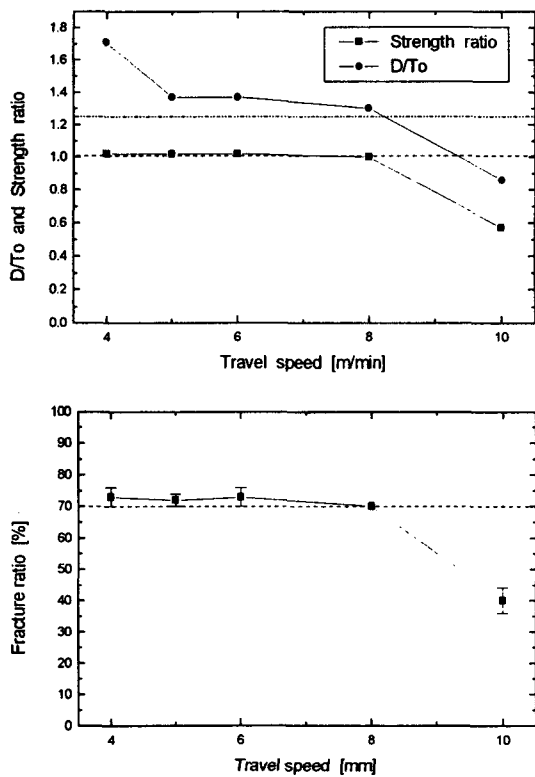


Fig. 7 Effect of travel speed on D/To, strength ratio and fracture ratio.

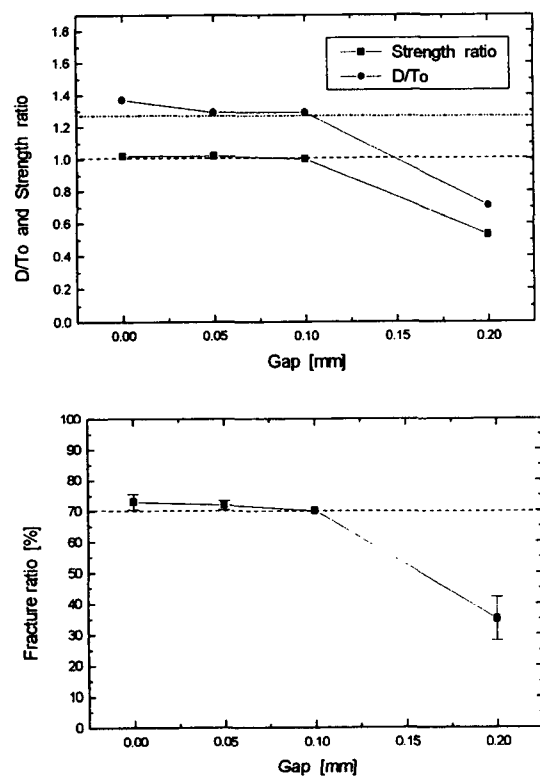


Fig. 8 Effect of gap on D/To, strength ratio and fracture ratio.

이 급격히 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7에서 보여주는 불연속점은 D/To의 임계치를 나타내며, 연속점은 인장강도비의 기준을 보여준다.

레이저 용접에서 간격(gap)의 영향은 사용된 레이저의 focus spot size에 의하여 상당히 크게 영향을 받는데, Fig. 8은 0mm, 0.05mm, 0.1mm, 0.2mm의 4가지 형태로 간격을 변화시켜가며 레이저 용접성을 평가하였다. 0.7mm-1.5mm 이중두께 용접의 경우 0.1mm 간격까지는 양호한 용접성을 보였으나, 그 이상의 경우에는 용접성이 현저히 떨어지므로 A 파단형태를 보이게 되었다. 그리하여 두꺼운 모재 두께의 15% 간격이 있는 경우까지는 적정 용접조건 선정 임계치를 만족하여 좋은 용접성이 나타나게 되었다.

Fig. 9는 0.7mm-1.5mm 이중두께 용접에서 초점 변화에 따른 레이저 용접성을 보여준다. 초점에

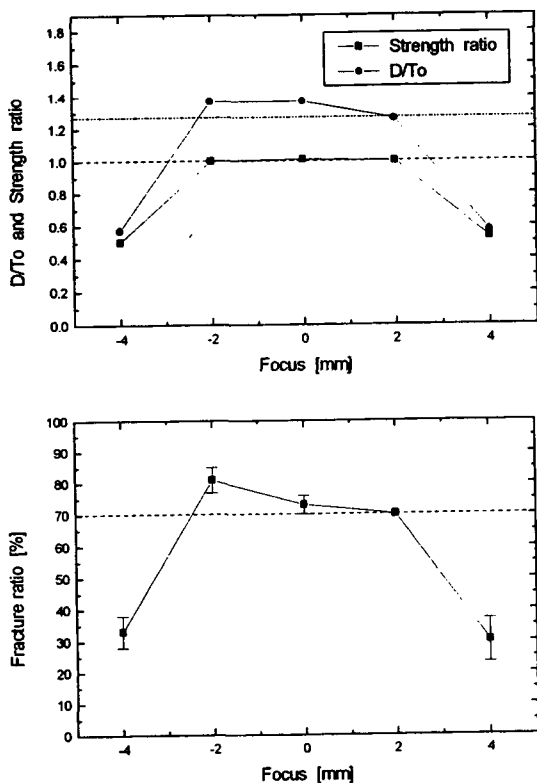


Fig. 9 Effect of focus position on D/To, strength ratio and fracture ratio.

가장 크게 영향을 미치는 인자는 초점깊이로서 초점깊이가 크면 초점에 따른 레이저 용접성의 변화가 민감하지 않지만, 초점깊이가 작으면 약간의 초점변화로도 레이저 용접성의 변화가 매우 심하였다. 본 실험의 경우, 시편 표면을 기준으로 $\pm 2\text{mm}$ 까지는 용접성에 아무 문제가 없었으나, $\pm 2\text{mm}$ 이상으로 초점이 잡히면 용접성이 급격히 떨어져 A 파단형태를 가지게 되었다. 상기의 용접 속도, 초점 및 간격 변화실험 결과로부터, 본 연구에서 설정한 파단비율, 인장강도비 그리고 D/To 중 어떠한 임계치를 사용하더라도 적정 용접조건 범위에는 차이가 없음을 알 수 있다. 두께의 차이가 10%이상인 이중두께간 용접부의 경우 용접조건이 적절한 경우 항상 얇은쪽 열영향부에서 파단이 되는 B의 파단형태를 나타내었고 C, D 형태는 보이지 않았다. 그러므로 현장에서 실용접 조건 설정시 3가지 임계치를 모두 만족하는 조건이 가장 적합하지만, 시간이 부족할 경우 1가지 임계치 사용하여도 무방할 것으로 사료된다.

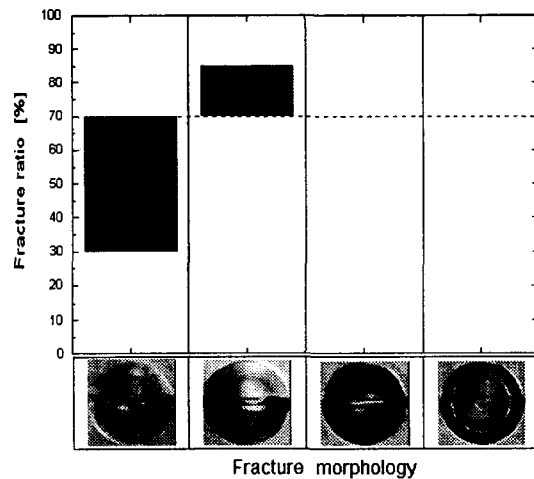


Fig. 10 Relationship between fracture ratio and fracture morphology in dissimilar thickness welds.

Fig. 10은 파단형태에 따른 파단비율을 보여주는 데, 0.7mm-1.5mm 이중두께 용접에서는 파단 A와 파단 B형태만이 나타나게 되었다. 파단 A의 경우 적정 용접조건 선정 기준값보다 파단비율의 값이

작아서 불량한 용접성을 보여주는데 이는 용접속도가 8 m/min 이상이거나 초점이 $\pm 2\text{mm}$ 이상으로 잡힌 경우, 0.1mm 이상의 간격이 존재하는 경우에 해당되며 이때의 파단비율은 30-70%를 가지게 되었다. 파단 B의 경우 적정 용접조건 선정 기준을 만족하는 경우로 70-85%의 파단비율을 가져 용접부의 판파단이 발생하지 않게 되었다. 그러므로 0.7mm-1.5mm 이중두께 용접의 경우 적정 용접조건 선정 기준은 D/To가 1.25이고 강도비가 1 그리고 70%의 파단비율을 보이며 B 파단형태를 가지는 경우이었다.

4. 결론

1) 용접후 다이 프레스(Die press) 실험에 의하여 용접부의 판파단이 일어나지 않을 경우의 파단비율 값을 기준으로 하여 동종, 이중두께 용접에서 적정 용접조건 선정 기준을 구하였다.

강 판 조 합	Dimension	Erichsen test		Tensile test
	D/To	Fracture ratio(%)	Fracture morphology	Strength ratio
1.5mm 동종두께 용접	0.8	70	D	1
0.7mm 동종두께 용접			C	
0.7mm~1.5mm 이중두께 용접	1.25		B	

2) Erichsen 실험에서의 적정 파단형태는 시편의 두께와 재질에 따라 다양한 형태를 지니게 되는데 용접불량의 경우는 두께와 재질에 상관없이 A 파단형태를 가지게 된다. 적정 파단형태는 이중두께의 경우 B 파단형태를 보이게 되고, 0.7mm 동종두께의 경우는 C 파단형태, 1.5mm 동종두께의 경우는 D 파단형태를 가지게 되는데, D 파단형태가 모재의 파단형태와 동일하게 나타나 가장 이상적인 파단형태임을 알 수 있었다.

3) 간격변화 결과로부터 간격은 동종두께와 이중두께 용접에서 두꺼운 모재 두께의 15% 간격이 있는 경우까지는 적정 용접조건 선정 기준을 만

족하여 좋은 용접성을 보였다.

4) 레이저 장비에서 초점깊이는 초점위치를 최적화시키는데 크게 영향을 미치는데, 본 논문에서는 장비의 초점깊이크기(3.67mm)만큼 변화한 재료 표면을 기준으로 $\pm 2\text{mm}$ 로 초점이 위치한 경우까지는 적정 용접조건 선정 기준을 만족하였다.

참고문헌

1. 정봉근, 유순영, 박인수, 이창희, "보호가스에 따른 Tailored Blank 레이저 용접성 평가에 관한 연구", 한국레이저가공학회지, vol1 (1998)
2. W Prange, H Schmitz, Tailored Blank : A Material for New Ways Design, SATA, p.342-349
3. Ming F. Shi, Ken M. Pickett, Formability Issues in the Application of Tailor Blank Sheets, SAE 930278, p.27-34
4. Bob Irving, Blank Welding Forces Automakers to Sit Up and Take Notice, Welding J., p.39-45, (1991)
5. J.K. Baysore, M.S. Williamson, Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks, Welding J., p.345-351, (1995)
6. William M. Steen, Laser material processing, Springer-Verlag, p.46-50, 131(1991)
7. D. J. Meuleman, F. L. Cheng, The Effect of Zinc Coatings on the Formability of Automotive Sheet Steels, SAE 840370
8. W. Prange, Application of laser beam welded sheet metal, SAE 890853, p.751-762
9. Christopher Dawes. CEng, Laser welding, McGraw-Hill, p5, 10-14, 87, (1992)