

레이저 용접 테일러드 블랭크의 기본 성형특성 I : 인장변형 특성

박기철* · 한수식* · 김광선* · 권오준*

(1997년 8월 4일 접수)

Forming Characteristics of Laser Welded Tailored Blanks I : Tensile Deformation Characteristics.

K.C.Park, S.S.Han, K.S.Kim and O.Kwon

Abstract

In order to analyze the tensile deformation characteristics of laser welded tailored blanks, laser welded blanks of different thickness and strength combinations were prepared and tensile tests were done. The tensile elongation along the direction perpendicular to weld line of laser welded blanks was reduced as increasing the deformation restraining force (strength \times thickness) ratio between two welded sheets and fracture occurred at weaker side of base sheets if void ratio of weld section was less than 45%. The tensile elongation along weld line reached above 90% of the elongation of base material, if welding was done perfectly. Total elongation along the direction perpendicular to weld line was able to be predicted by force equilibrium and power law behavior of base sheets, and it was related with the deformation of stronger sheet and formability of weaker side.

Key Words : Tailored blank, Tension, Elongation, Formability

1. 서 론

테일러드 블랭크 (tailored blank) 란 복수의 강판을 목적에 맞게 용접 등에 의하여 조립한 프레스 가공용 소재를 말하며 '80년대 후반부터 사용되고 있는 용어로서, 최근 자동차 차체(body)에 일반적으로 사용되게 되었다.⁽¹⁾ 테일러드 블랭크의 발전 경위는 먼저 1960년대 초기에 나온 개념특허에서 비롯되었다. 1985년경에 동일강판 레이저 용접에 의한 테일러드 블랭크 사용이 이루어졌으며 본격적인 의미에서의 사용인 이중강판의 테일러드

블랭크 사용은 1989년 이후에 나타났다. 현재는 약 20사 이상의 자동차회사에서 사용하고 있으며, 도입을 검토하고 있는 회사는 다수이다.^(1,2)

자동차 차체의 요구특성은 강도, 내구성, 방청, 충돌에너지 흡수성, 경량화, 폭면 디자인 효율성 등이며 이러한 자동차 차체를 구성하는 판넬의 수는 수백개에 이르므로 테일러드 블랭크를 이용한 구성 판넬수 감소가 중요하다. 이외에도 주요한 테일러드 블랭크의 특성으로는 판두께와 재질의 최적 배치가 가능하고 연속적인 용접선을 이루므로 결합강도가 높으며 스팟(spot) 용접용의 겹침부를 없

* 포항제철 기술연구소 박판연구팀

앨 수 있어 경량화가 가능하고 소재형상의 자유도가 크다는 점을 들 수 있다.

이러한 특성으로 인하여 테일러드 블랭크는 부품 수의 감소, 재료구성의 최적화, 실수를 향상(성능, 품질, 비용)을 이룰 수 있다. 그러나 불균일재의 프레스 성형, 박판의 맞대기 용접등 생산기술상의 많은 문제점들을 극복하여야 한다. 용접기술에는 레이저(laser) 용접과 매시심(mash seam) 용접이 실용화 되었다. 레이저용접은 비접촉가공이어서 열원의 위치제어가 용이하며 결합의 자유도(배수, 형상)도 높다. 그리고 아연도금강판도 특별한 대처없이 용접이 가능하다. 매시심 용접은 고속 용접이 가능하여 생산성이 높다. 그러나 저항용접이므로 아연도금 강판은 엄격한 조건관리가 필요하다. Prange⁽⁵⁾는 레이저 용접의 경우가 매시심용접에 비하여 성형성 및 피로강도 특성에서 유리하다고 보고하였다.

테일러드 블랭크의 성형성은 단일 강판의 경우와는 달리 용접선의 특성 변화, 용접선 양쪽의 재질, 두께 불연속에 따른 거동변화를 모두 고려하여야 한다.^(3,4,5,6) 테일러드 블랭크 가공시의 전형적인 문제를 Fig.1 에 개략적으로 나타내었다. 용접선과 주변형 방향에 따른 파단발생 문제와 금형의 단차와 용접부의 위치 이동에 따른 파단 및 주름

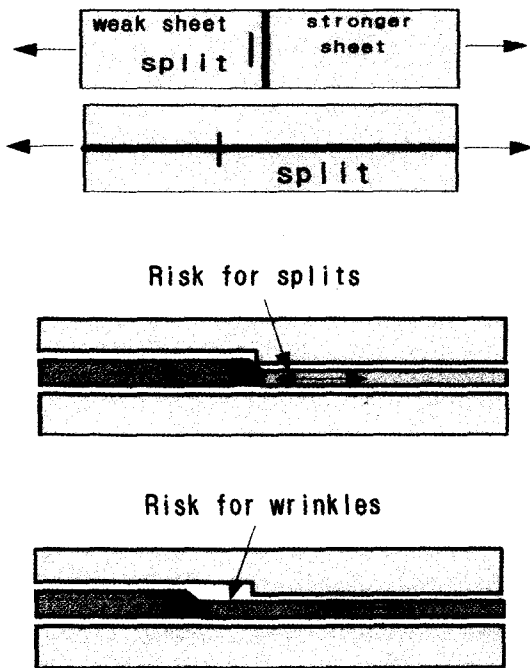


Fig. 1 Typical forming problems of tailored blank

발생 문제이다. 성형기술은 소재의 두께와 재료특성의 불균일을 성형조건으로 보상하여야 하므로 새로운 성형 방법과 수치해석 등에 의한 예측 평가기술이 중요하다.

본 연구는 국내 자동차사에서 조만간에 적용이 시작되어 급속하게 사용량이 증가할 것으로 예상되는 테일러드 블랭크의 기본 성형특성을 알아내는 데 목적이 있다. 테일러드 블랭크의 성형성에 대한 연구는 Prange,^(2,3) Shi,⁽⁵⁾ Azuma,⁽⁶⁾ Yamasaki,⁽⁷⁾ Lee,⁽⁸⁾ 김형목⁽⁹⁾ 등에 의하여 이미 상당히 되어 있으나 대부분 각 연구자의 관점에 따라서 단편적으로 되어 있으며 시험결과도 아직은 그대로 믿기 보다는 검증을 해보아야 하는 점들이 있다.

Fig.2의 예와 같이 간단한 부품을 테일러드 블랭크로 성형하는 경우에도 각 변형 모드가 나타나며 특정한 용도와 적용부분에 따라서 가장 중요한 성형 모드가 결정된다. 저자들은 자동차사의 차체제작자들이 테일러드 블랭크 설계와 적용에서 기본 성형특성에 대한 이해를 돕고 설계에 도움이 되도록하는 것을 목적으로 각 성형 모드에서의 성형특성을 연구하고 있다. 본 논문에서는 두께와 강도가 서로 다른 시편을 준비하여 가장 기초적인 성형성인 인장변형 특성에 대하여 논하였다. 그리고 시험결과를 분석하기 위하여 인장시험을 유한요소 시뮬레이션으로 수행하고 실험결과를 보완하였다.

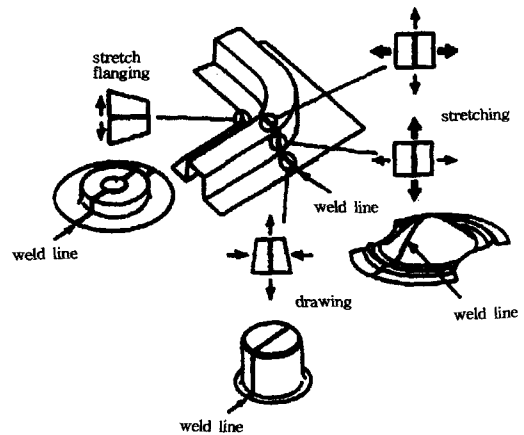


Fig. 2 Major sheet deformation modes at a model part

2. 실험방법

2.1 시편준비

테일러드 블랭크의 성형특성 시험을 실시하기 위하여 레이저 용접강판 시편으로 두께와 강도가 서로 다른 시편

을 Table 1과 같이 준비하여 용접하고 성형시험을 실시하였다. Table 1에 준비한 시편의 화학성분을 나타내었다. 시편표시로 사용한 CQ는 일반 가공용 소재를 지칭하는 일반 용어로 Commercial Quality의 약자이다. 그리고 고장력강판에 대하여 사용한 CHSP는 포항제철에서 사내규격으로 사용하는 용어이며 일반용, 가공용, 심가공용

의 의미로 각각 C, R, E를 사용하며 숫자는 인장강도(kgf/mm²단위)를 의미한다. 본 논문에서 사용한 용어가 다른 재질기호보다 소재를 세부적으로 구분하며 이것이 소재의 성격을 특정 규격의 용어보다 잘 표현하기 때문에 사용하였다. 용접면은 밀링(milling)가공을 하였으며 용접조건은 Table 2와 같다. 용접부의 특성을 알아보기 위

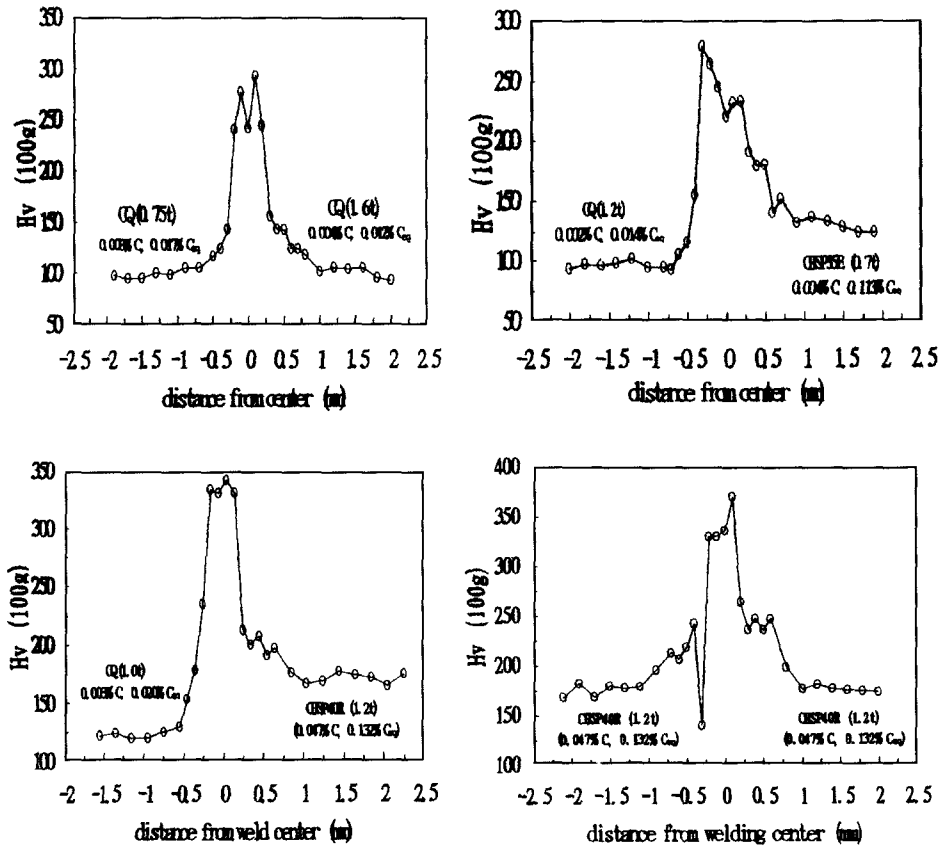


Fig. 3 Micro-Vickers hardness distribution of laser welded tailored blanks

Table 1 Specimens for laser welding and their chemical components

Grade	t (mm)	composition (wt%)					C _{eq} * (wt%)	
		C	Si	Mn	P	S		
General sheet for drawing	CQ	0.75	0.003	0.01	0.08	0.014	0.013	0.017
		1.00	0.003	0	0.10	0.014	0.012	0.020
		1.20	0.002	0	0.07	0.015	0.009	0.014
		1.60	0.004	0	0.05	0.012	0.011	0.012
High strength steel	CHSP35E	0.71	0.004	0.01	0.65	0.042	0.006	0.113
	CHSP40R	1.01	0.047	0.01	0.51	0.082	0.013	0.132
	CHSP60C	1.20	0.084	0.46	1.50	0.018	0.008	0.353

* C_{eq}(wt%) = C + Si/24 + Mn/6

Table 2 Laser-welding conditions

Beam Power	3.0 kW
Welding Speed	2.5 ~ 3.0 m/min
Shielding Gas	Ar 20 l/min

하여 용접부의 경도를 측정하여 Fig.3에 나타내었다. 용접부의 경도는 고장력강판의 경우는 모재강판의 약 2배 그리고 극저탄소강의 경우는 모재의 약 2.5-3배 정도 되는 것을 알 수 있다. CHSP40R-CHSP40R의 경도분포에서 갑자기 경도값이 떨어지는 것은 경도 측정점 부분에 미소한 용접 결함이 존재하였기 때문이다. Fig.3에서 용접부의 폭은 대략 0.5~1.0 mm 정도임을 경도 분포를 통하여 알 수 있다.

2.2 인장시험

인장변형은 소재 성형성 분석의 기본 시험법으로 인장 변형특성으로 부터 중요한 성형특성을 추정할 수 있다. 인장시험은 Fig.4와 같이 시편의 폭이 12.5 mm인 시편을 사용하여 10 mm/min의 인장속도로 (a) 용접선 수직방향과 (b) 용접선 평행방향으로 시험하였다.

2.3 인장 시험의 시뮬레이션

인장특성은 PAM-STAMP⁽¹⁰⁾를 사용하여 시뮬레이션 하고 실험결과와 비교하여 테일러드 블랭크 성형에서 성형시뮬레이션 기술의 활용 정도를 분석하였다. 시뮬레이션은 Fig.4의 인장시편을 모델링하여 수행하였다. Fig.5의 (a)는 용접부 수직방향 인장인 경우의 해석 모델이며 (b)는 용접선에 평행한 방향의 인장에 대한 해석 모델이다. 용접부의 폭은 0.5 mm이며 한 요소로 용접부 전체 폭을 모델링하였다. 요소는 사용 소프트웨어에서 제공하는 4절점 쉘요소이다. 용접선 수직방향 인장에서는 대칭조건을 사용하여 시편폭의 절반만을 그리고 용접선 평행방향 인장은 시편 전체를 모델링하였다.

인장시편의 기계적 특성은 각 방향인장에서의 인장 커브의 회귀식 (1)과 평면내의 평균 이방성계수를 사용하였으며 시뮬레이션에서 사용한 인장 속도는 박기철⁽¹¹⁾ 등의 결과를 이용하여 계산시간을 줄이기 위하여 해에는 영향이 없는 정도인 10 m/sec로 하였다.

$$\sigma = K(\epsilon_o + \epsilon_p)^n \tag{1}$$

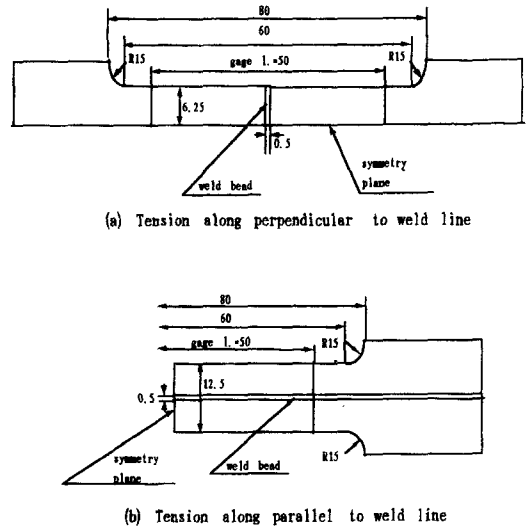


Fig. 4 Geometry of tensile test specimen

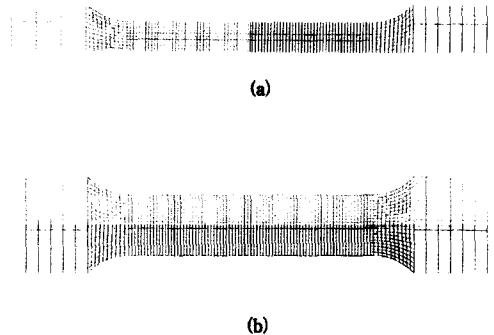


Fig. 5 Modelling of tensile test specimen for (a) perpendicular to weld and (b) parallel to weld case. Weld width is 0.5mm

그리고 용접부는 모재의 응력-변형률곡선 회귀식 (1)에서 강도계수 (K)를 Fig.3의 용접부 경도 측정결과로부터 유추하여 극저탄소강의 용접부와 모재의 대략적인 경도 (Vickers hardness) 비인 3을 곱하여 사용하였다. 이 충호⁽¹²⁾에 의하면 Vickers 경도는 시험하중이 충분히 클 경우 측정 결과가 시험하중에 거의 의존하지 않으며 완전 소성재료의 경우는 유동응력과 Vickers 경도값의 비가 일정한 값에 도달하며 탄-소성재료의 경우에는 압자 접촉면에서의 평균 상단변형률이 0.3 이상인 경우 완전소성재료

와 같은 특성을 나타내고 평균 상당응력이 0.3 이하인 경우에는 유동응력과 Vickers 경도값의 비가 일정 값에 접근한다고 보고하였다. 용접부 재료특성을 측정할 최적의 방법이 없는 상황에서 가장 타당성 있는 데이터가 Vickers 경도이므로 이를 이용한 유동응력의 결정이 타당하며 전체 변형범위에서의 유동응력과 관계는 이충호의 연구결과를 활용하여 용접부의 응력-변형률선도를 구성할 수 있을 것이나 이는 앞으로 연구가 필요한 부분이다. 본 연구에서는 간단히 변형이 커지는 경우 유동응력과 Vickers 경도값의 비가 일정하며 변형이 작은 경우에도 이값과 큰 차이가 없는 점을 이용하여 모재강판의 강도계수 K 를 경도비로 곱하여 용접부의 유동응력으로 근사화한 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

모재의 인장시험 결과는 Table 3에 정리하였다. 그리고 이 시편들로 제작한 용접강판으로 시험한 결과를 Table 4에 정리하였으며 파단발생 인장시편의 몇가지 예를 Fig.6에 나타내었다.

(1) 용접선 수직방향 인장시험 결과

용접선 수직방향 인장의 경우는 용접부에 문제가 없는 경우 항상 용접부가 아닌 변형저항이 작은 소재에서 파단이 발생하였다. 같은 강도, 다른 두께 용접시편(CQ-CQ)과 모재 강판의 연신율을 Fig.7에 그리고 CHSP35E

Table 3 Mechanical properties of sheets used for test samples

specimen	sheet Dir.	YS	TS	EI	$r_{15\%}$	$n_{10-20\%}$	fitting curve		
		(kgf/mm^2)	(kgf/mm^2)	(%)			$\sigma(\text{kgf/mm}^2) = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$		
							K	ϵ_0	n
CQ 0.75t	RD	15.9	29.6	44.6	1.66	0.238	54.90	0.00724	0.2652
	45°	17.6	30.7	43.7	1.51	0.232	57.50	0.00981	0.2699
	90°	17.2	30.1	45.3	2.03	0.234	56.19	0.01025	0.2681
	mean	17.1	30.3	44.3	1.68	0.234	56.52	0.00928	0.2683
CQ 1.00t	RD	18.7	31.6	42.0	1.36	0.219	56.89	0.00892	0.2450
	45°	20.2	31.8	39.0	1.29	0.209	56.95	0.01158	0.2418
	90°	20.2	31.6	40.8	1.66	0.208	57.14	0.01239	0.2464
	mean	19.8	31.7	40.2	1.40	0.211	56.98	0.01112	0.2437
CQ 1.20t	RD	17.6	29.4	45.8	1.73	0.228	53.75	0.01228	0.2582
	45°	19.3	30.3	43.2	1.33	0.218	55.86	0.01550	0.2620
	90°	18.7	29.0	44.7	2.00	0.223	54.16	0.01957	0.2736
	mean	18.7	29.8	44.2	1.60	0.222	54.90	0.01571	0.2640
CQ 1.60t	RD	17.1	28.9	47.9	1.24	0.223	53.39	0.00941	0.2594
	45°	18.2	29.4	47.9	1.28	0.227	54.76	0.01405	0.2695
	90°	18.1	29.5	46.3	1.57	0.226	55.36	0.01607	0.2746
	mean	17.9	29.3	47.5	1.34	0.226	54.57	0.01339	0.2682
CHSP 35E 0.7t	RD	21.9	36.5	38.7	1.58	0.224	66.63	0.01097	0.2545
	45°	23.4	36.8	38.2	1.64	0.218	67.31	0.01378	0.2555
	90°	22.8	36.2	38.0	2.13	0.217	66.14	0.01417	0.2543
	mean	22.9	36.6	38.3	1.75	0.219	66.85	0.01317	0.2549
CHSP 40R 1.0t	RD	32.3	42.6	30.5	1.01	0.179	75.23	0.01686	0.2285
	45°	33.5	43.5	29.5	0.88	0.169	74.14	0.01497	0.2086
	90°	33.0	42.9	30.7	1.35	0.172	75.01	0.01972	0.2248
	mean	33.1	43.1	30.1	1.03	0.172	74.63	0.01663	0.2176
CHSP 60C 1.2t	RD	46.3	58.8	23.1	0.65	0.168	108.92	0.02488	0.2492
	45°	44.8	56.5	25.7	1.13	0.168	99.39	0.02042	0.2224
	90°	46.8	59.2	21.1	0.95	0.163	106.66	0.02212	0.2308
	mean	45.7	57.8	23.9	0.97	0.167	103.59	0.02196	0.2312

Table 4 Mechanical properties of tailored blanks

Tension	Tailored Blank							
	Sheet Material				(area of fracture occurred sheet was used as reference area)			
	Specimen	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EI (%)	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EI (%)	fracture
V	CQ(1.0)	18.7	31.6	42.0	18.7	31.7	33.3	CQ(1.0)
	CQ(1.0)							
V	CQ(0.75)	15.9	29.6	44.6	18.5	31.3	26.4	CQ(0.75)
	CQ(1.0)	18.7	31.6	42.0				
V	CQ(0.75)	15.9	29.6	44.6	19.0	31.4	24.1	CQ(0.75)
	CQ(1.2)	17.6	29.4	45.8				
V	CQ(0.75)	15.9	29.6	44.6	18.6	30.8	23.3	CQ(0.75)
	CQ(1.6)	17.1	28.9	47.9				
V	CQ(0.75)	15.9	29.6	44.6	17.3	31.4	29.1	CQ(0.75)
	CHSP35E(0.7)	21.9	36.5	38.7				
V	CQ(1.0)	18.7	31.6	42.0	22.7	36.7	23.6	CHSP35E(0.7)
	CHSP35E(0.7)	21.9	36.5	38.7				
V	CQ(1.2)	17.6	29.4	45.8	23.4	37.2	21.7	CHSP35E(0.7)
	CHSP35E(0.7)	21.9	36.5	38.7				
V	CQ(1.6)	17.1	28.9	47.9	23.6	37.4	20.5	CHSP35E(0.7)
	CHSP35E(0.7)	21.9	36.5	38.7				
V	CQ(1.0)	18.7	31.6	42.0	20.4	32.2	21.9	CQ(1.0)
	CHSP40R(1.0)	32.3	42.6	30.5				
V	CQ(1.2)	17.6	29.4	45.8	19.4	30.0	26.6	CQ(1.0)
	CHSP60C(1.2)	46.3	58.8	23.1				
P	CQ(1.0)	20.2	31.6	40.8	23.2	31.8	12.5	Blow hole 부 파단 시작
	CQ(1.0)				21.1	32.8	39.5	파산 및 local necking 발생

V means perpendicular to welding line, P means parallel to welding line

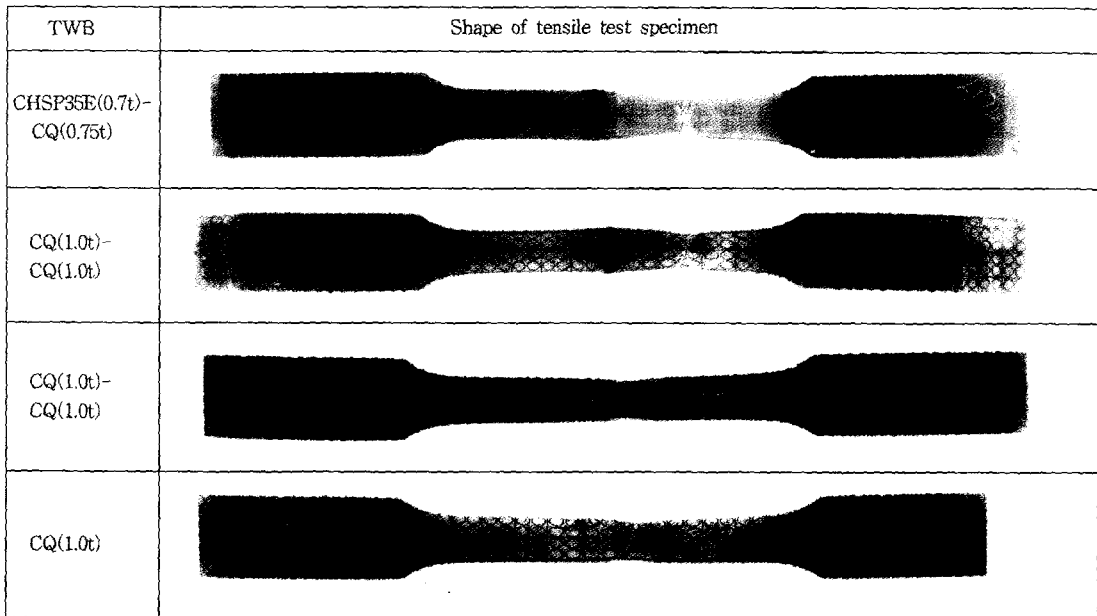


Fig. 6 Some examples of tensile test specimens

(0.7t) 시편과 CQ 강판 0.75 mm~1.6 mm 두께의 시편으로 용접된 테일러드 블랭크와 모재강판의 연신율을 Fig.8에 나타내었다. 용접선 양측의 변형저항차가 커질수록 연신율이 작아지는 것을 알 수 있으며 같은 두께 강판의 경우에도 연신율이 저하하였다. 이렇게 연신율이 격감되는 근본적인 이유는 용접부 좌우에서 인장 시편의 변형 집중은 비록 같은 두께의 강판일지라도 파단은 한 쪽에서만 발생하며 다른 쪽은 균일 연신까지만 변형하게 되기 때문이다. 그리고 두께가 달라지면 두꺼운 쪽은 거의 변형이 없어진다. 따라서 표점거리(gage length)안에서의 평균적인 연신율은 모재 강판에 비하여 어느 경우에도 작아지게 된다. 그리고 이러한 현상은 용접부의 기계적 특성에 관계없이 나타나는 특성이다. 이러한 사실은 Fig.6의 시험편 사진이나 Fig.9와 Fig.10의 변형을 분포에서 알 수 있

다. 용접부 양측의 변형저항이 같은 경우 (CQ(1.0t)-CQ(1.0t)) 에 인장시험후 시편 각 위치의 변형을 분포인 Fig.9 에서는 용접부를 경계로 파단이 발생하지 않은 쪽 시편에서도 25% 정도로 균일 연신부까지 변형한 것을 알 수 있다. 그리고 두께가 다른 (즉, 용접부 양측의 변형저항이 다른) 경우 (CQ(1.0t)-CQ(0.75t)) 에 인장시험 후 파단후의 시편내 변형 분포인 Fig.10에서 두꺼운 쪽에서는 5%도 변형되지 않는 것을 알 수 있다.

용접부 수직방향 인장시에 용접부의 두께에 대한 용접 단면에 위치한 공극(void) 비율과 인장시 용접부 파단과의 관계를 정량적으로 알아보기 위하여, 시편 준비과정에서 용접상태가 점점 불량해지는 부분에서 시편을 채취하여 Fig.11 과 같이 측정된 용접부 단면의 공극(void)률과 인장시 파단부 위치의 관계를 Fig.12 에 나타내었다. 용

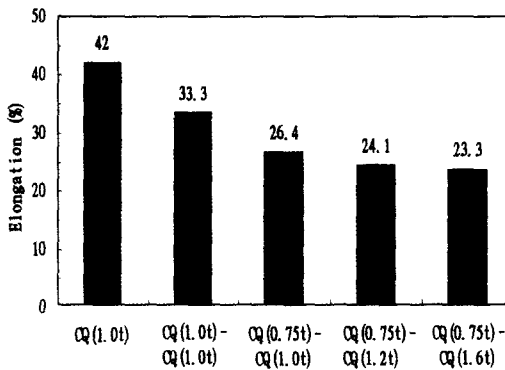


Fig. 7 Total elongation of CQ(1.0t) and CQ-CQ tailored blanks with different thickness combination at perpendicular to weld tension

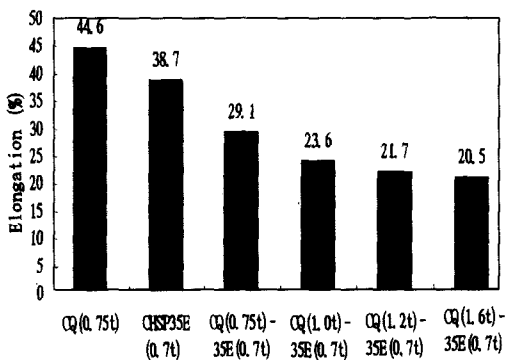


Fig. 8 Total elongation of CQ(0.75t), CHSP35E(0.7t) and CQ(0.75t)-CHSP35E(0.7t) tailored blanks at perpendicular to weld tension

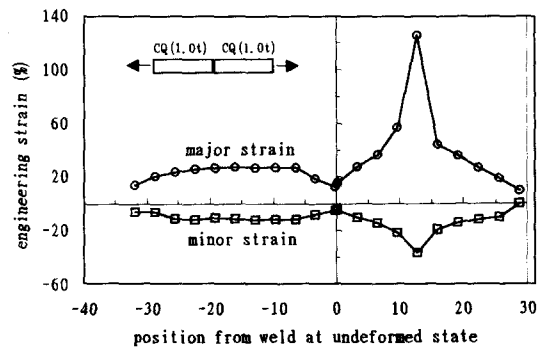


Fig. 9 Strain distribution of a specimen tested in the direction of perpendicular to weld line with the same thickness and grade

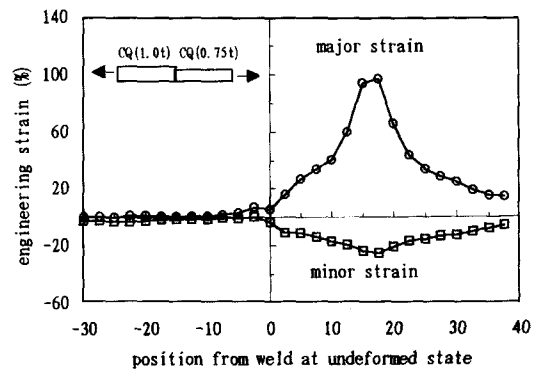


Fig. 10 Strain distribution of a specimen tested in the direction of perpendicular to weld line with different thickness sheets

접단면의 45% 이상이 공극인 경우에 용접부에서 파단이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 용접부 수직방향의 인장으로 용접부의 건전성을 평가하는 것은 의미가 없다고 생각된다.

(2) 용접선 평행방향 인장 특성

용접선에 평행한 인장의 경우에 소재의 연신율은 모재와 용접부의 연신율에 영향을 받으며 이들의 연신율은 용접부와 모재 각각의 경도에 의하여 결정된다고 한다.⁽⁷⁾ 그리고 용접선의 연성과 모재의 연성은 거의 같은 정도로 용접선 방향 인장에서의 연신율에 영향을 미친다고 알려져 있으며, 이들은 향후에 용접선의 성형한계와 관련하여 좀 더 연구되어야 할 부분으로 생각된다.

Fig.13은 용접부 평행방향 인장에서의 응력-변형률 곡선의 예를 나타내었다. 용접이 잘된 경우는 모재 연신율인 40.8%에 거의 도달한 39.5% 정도가 되나 용접상태가 나쁜 경우는 12.5% 정도의 변형률에서 파단이 발생하였다. 용접이 잘된 소재와 불량한 소재의 조직사진과 인장시편 모양은 Fig.14와 Fig.15에 비교하였다. 용접방향 인장시에는 용접부에 존재하는 약간의 공극(void)에 의해서도 용접부가 완전한 경우에 비하여 매우 작은 변형률에서 파단이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 용접부 수직방향 인장의 경우에 용접부는 하중을 전달하는 역할이 중요하고 변형은 작아도 관계없지만 용접방향 인장에서는 용접부도 모재와 같이 변형하여야 하므로 용접불량부분의 파단이 용이하게 나타나는 때문으로 볼 수 있다. 따라서 용접선 방향의 인장시험이 용접부의 건전성을 적극적으로 평가할 수 있는 방법으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

(3) 인장변형의 시뮬레이션

Fig.16은 CQ(1.0t)-CQ(0.75t) 시편을 용접부 수직방향으로 인장하는 경우의 실험에서 구한 파단 시편의 형상이며 이를 시뮬레이션에서 구한 변형의 형상과 비교하였다. 실제 시험편의 응력-변형률 곡선과 시뮬레이션에서 구한 응력-변형률 곡선도 같이 나타내었다. 시뮬레이션으로 실제 응력-변형률곡선을 거의 예측 가능함을 알 수 있다. Fig.17은 CQ(1.0t)-CQ(0.75t) 소재에 넥(neck)이 발생하기 전의 변형상태와 국부넥이 발생한 후의 변형상태를 나타낸 것이다. 약한 쪽 소재에 작용하는 최대인장력에 해당하는 만큼 강한쪽에서 변형하는 것을 알 수 있다.

동일소재 (CQ(1.0t))로 용접된 용접부 수직 및 용접방향 인장시편의 변형해석 시뮬레이션 결과를 Fig.18과 Fig.19에 나타내었다. 이 역시 실험결과와 거의 같은 결

$$\text{Void Ratio} = \frac{w_1 + w_2}{W} \times 100$$

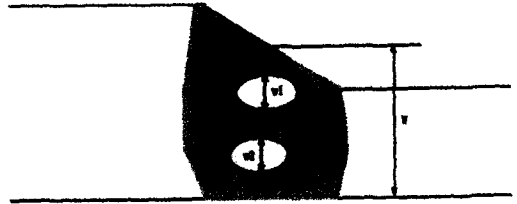


Fig. 11 Definition of void ratio

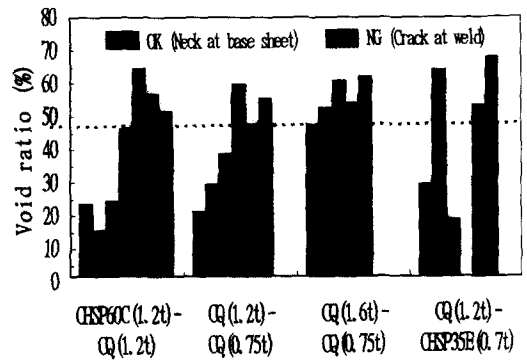


Fig. 12 Results of tensile test for the change of void ratio

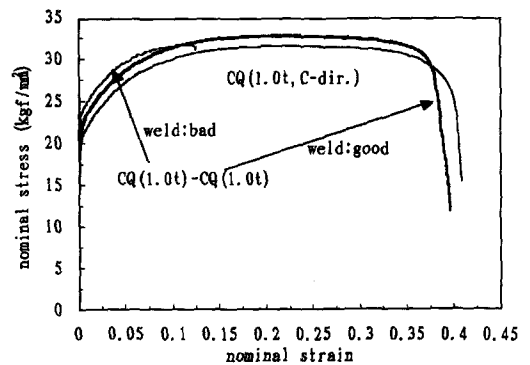


Fig. 13 Comparison of stress-strain curves of base sheet and tailored blanks according to weld quality in the direction of parallel to weld line

과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 용접부의 강도를 용접부의 경도 측정결과로부터 추정된 모재의 3배로 하여 시뮬레이션하는 것으로 테일러드 블랭크 성형에서의 변형특성을 분석할 수 있을 것으로 생각된다.

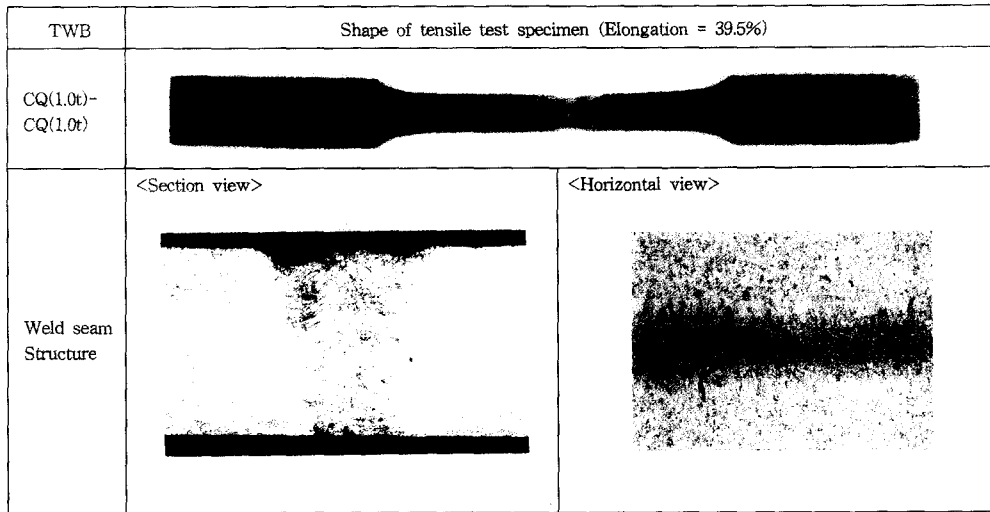


Fig. 14 Parallel to weld tensile test specimen and its seam structure for perfectly welded case

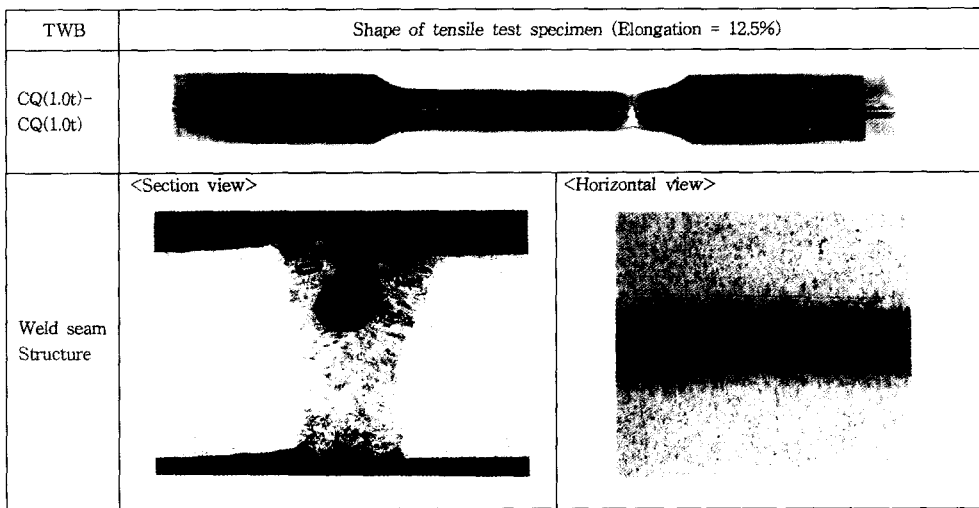


Fig. 15 Parallel to weld tensile test specimen and its seam structure for imperfectly welded case

(4) 용접부 수직방향 인장시의 연신율에 대한 고찰
 용접부 양쪽의 변형저항 (인장강도×두께) 이 서로 다른 소재를 사용한 경우 용접에 수직방향으로 인장하면 변형저항이 작은 쪽에서 파단이 발생하고, 변형저항이 큰 쪽에서는 변형 저항이 작은 쪽에 작용하는 최대하중에 대응하는 만큼의 소성변형을 하게된다. 따라서 변형저항이 큰 쪽의 소성변형량이 많아지면 전반적인 성형성이 상승하게 된다. 이러한 용접부 양쪽의 변형저항 차이에 따른 연신율의 변화를 아래와 같이 예측할 수 있다.

Fig.20과 같이 변형저항이 다른 1 및 2 소재에 대하여

변형저항이 작은 쪽에 작용하는 최대인장하중은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{최대 인장하중} = \text{인장강도} \times \text{시편 단면적} \quad (2)$$

그리고 1 및 2 소재를 (3) 과 (4) 식으로 나타내는 경우

$$\sigma_1 = K_1 \epsilon_1^{n_1} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = K_2 \epsilon_2^{n_2} \quad (4)$$

변형저항이 작은 1 소재가 최대하중점 도달시에 강도가

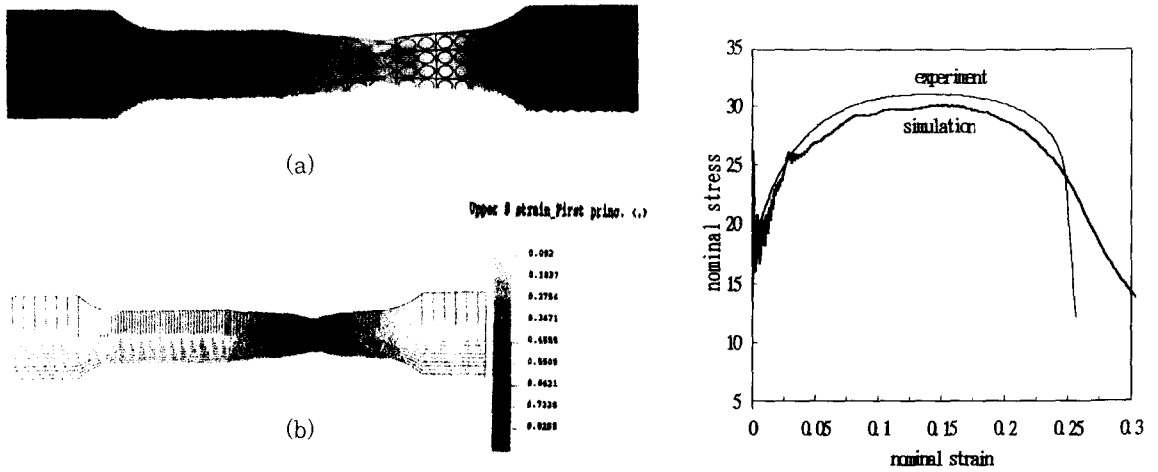


Fig. 16 Perpendicular to weld tensile test specimen shape, (a) experiment and (b) simulation, and experimental and simulated tensile curve for CQ(1.0t)-CQ(0.75t) tailored blank

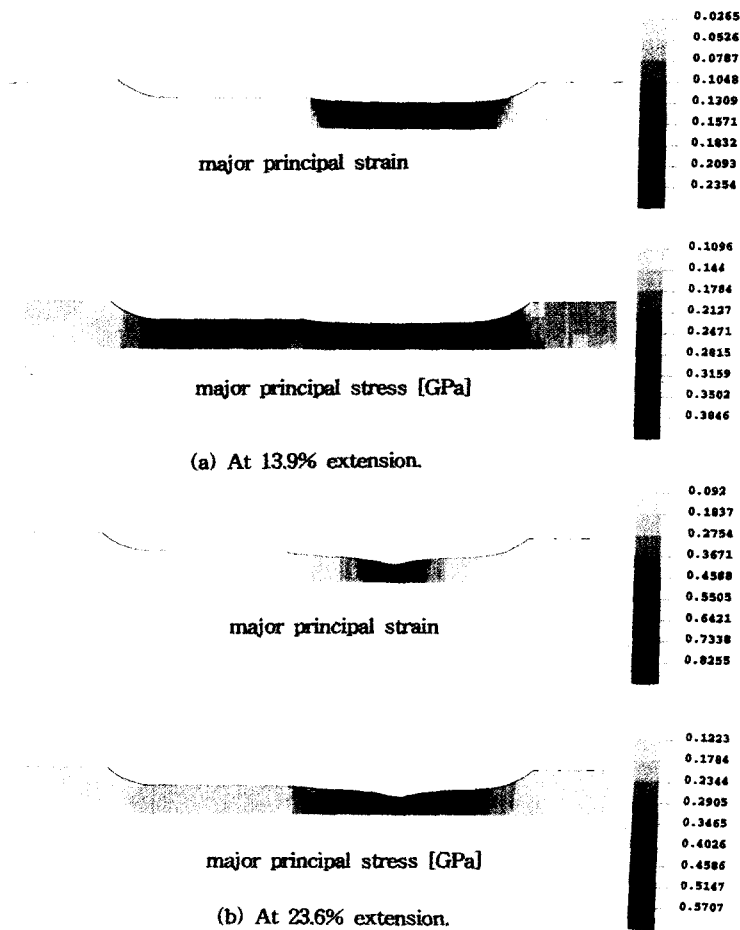


Fig. 17 Strain and stress distribution at uniform and local necking occurred CQ(1.0t)-CQ(0.75t) specimen

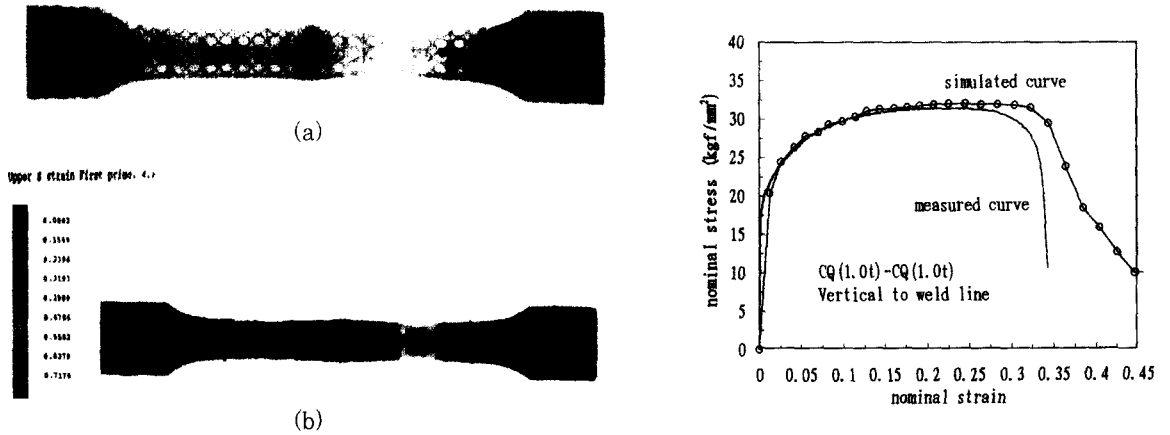


Fig. 18 Perpendicular to weld tensile test specimen shape, (a) experiment and (b) simulation, and experimental and simulated tensile curve for CQ(1.0t)-CQ(1.0t) tailored blank

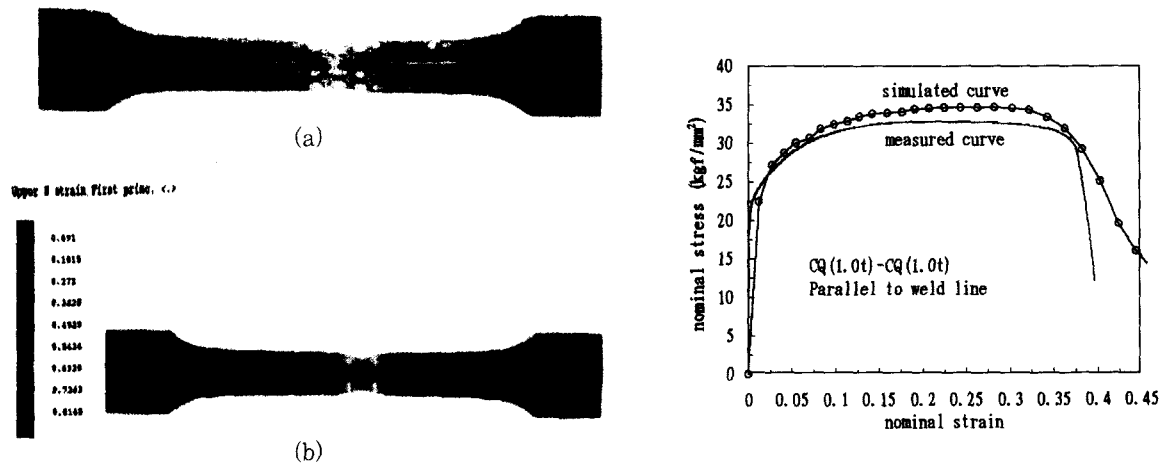


Fig. 19 Parallel to weld tensile test specimen shape, (a) experiment and (b) simulation, and experimental and simulated tensile curve for CQ(1.0t)-CQ(1.0t) tailored blank

큰 2 소재에서의 변형률은 다음 (5) 식과 같이 구해진다.

$$\frac{\epsilon_2^{n_2}}{\exp(\epsilon_2)} = \frac{TS_1 t_1 n_2^{n_2}}{TS_2 t_2 \exp(n_2)} \quad (5)$$

위 식에서 TS_1 과 TS_2 는 각 소재의 인장강도이며 t_1 과 t_2 는 각 소재의 두께이다.

그리고 변형저항이 작은 1 소재의 전 연신율과 변형저항이 큰 2 소재의 (5) 식에서 계산된 연신율을 (6) 식과 같이 평균하면 용접부 수직방향 인장시의 전체 연신율(El_c)을 예측할 수 있다.

$$El_c = \frac{1}{2} [TEI_1 + (\exp(\epsilon_2) - 1 \times 100)] \quad (6)$$

위 식에서 TEI_1 은 변형저항이 작은 1 소재의 연신율이며, ϵ_2 는 변형저항이 작은 소재에서 최대하중이 작용할 때 발생하는 변형저항이 큰 소재의 변형률로 (5)식에서 구한 값이다.

Fig.21 은 인장시험후의 변형저항이 강한 쪽 소재의 변형률을 예측한 결과와 실험 결과를 비교하여 나타내었다. n 값이 0.218~0.238 범위에서 소재의 변형저항 (인장

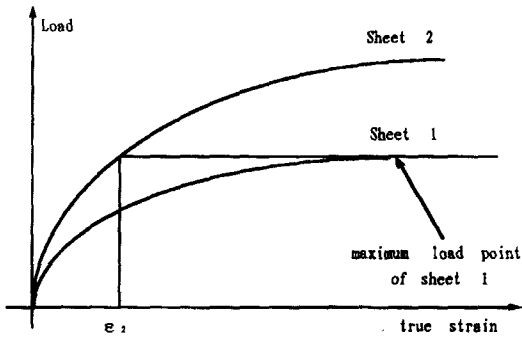


Fig. 20 Tensile strain-load (flow stress × t) curve of two base sheets of tailored blank

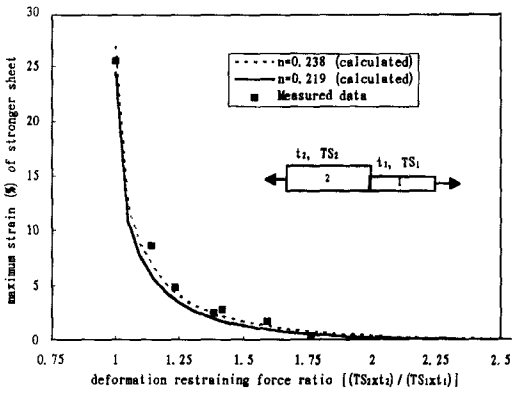


Fig. 21 Relation between deformation restraining force (TS × t) ratio and maximum strain of stronger sheet

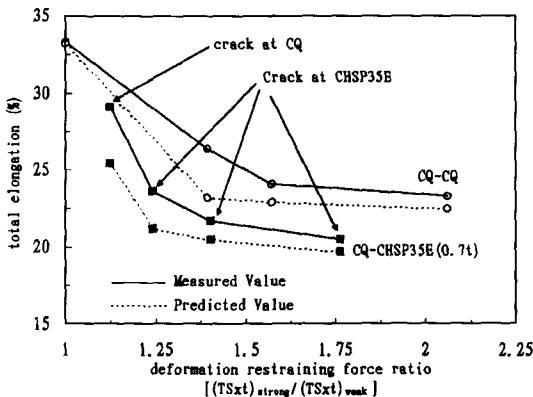


Fig. 22 Relation between deformation restraining force (TS × t) ratio of two base sheets and total elongation of tensile test

강도와 두께의 곱)의 비에 따른 강한쪽의 연신량이 충분히 예측 가능함을 알 수 있다. 그리고 가공경화지수가 가공성에 미치는 영향도 바로 나타나고 있다.

Fig.22는 CQ(0.75-1.6t)-CQ(0.75t)와 CQ(0.75-1.6t)-35E(0.7t)에 대하여 변형저항비와 연신율과의 실험결과와 (6) 식으로 예측된 연신율을 정리한 것이다. 예측변형률은 용접선 양측의 변형저항이 같은 경우는 실측값과 거의 일치하나 변형저항이 다른 경우는 실측값이 약간 작다. 그러나 대체로 예측치는 실측치와 경향이 일치하는 것을 알 수 있다. 예측치가 실측치보다 작은 것은 예측치는 (6)식에서 변형저항이 작은 단일 인장시편으로 구한 연신율을 사용하나 테일러드 블랭크 인장시편에서는 변형저항이 용접선 양측에서 다른 경우 변형저항이 큰 부분은 거의 변형을 앓고 변형저항이 작은 소재 부분이 단일강판 시편에 비하여 절반의 표점거리에서 집중적으로 변형하므로 표점거리 내의 변형 집중의 정도가 단일강판 시험에서 보다 심하여 전체 연신율에 기여하는 정도가 크기 때문으로 생각된다.

용접선 수직방향 인장에서는 (5) 식에 나타나는 변형저항비(TS_2t_2 / TS_1t_1)에 따라서 소재의 성형성이 결정되며 변형저항비가 커질수록 성형성이 나빠졌다. 그리고 Fig.22에서 CQ 소재에 파단이 발생하는 경우가 고장력 강판인 CHSP35E 강판에 파단이 발생하는 경우에 비하여 같은 강도비에서 연신율이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 파단발생 부분의 연신율이 큰 소재가 작은 소재에 비하여 성형성이 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

테일러드 블랭크의 인장특성을 평가하기 위하여 강도와 두께가 서로 다른 시편으로 레이저 용접강판을 제작하고 인장시험을 실시하였으며, 인장실험결과와 인장 시뮬레이션 시험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 테일러드 블랭크의 인장시험에서 용접선을 경계로 한 소재의 변형저항비가 클수록 용접선 수직방향 인장의 연신율은 저하하였으며 용접부의 공극률이 전체 용접부 단면의 45% 이상이 되어야만 용접부 파단 발생이 가능함을 알 수 있었다.
- (2) 용접선 방향 인장에서는 용접상태가 양호한 경우 모재 연신율의 90% 이상에 도달하였다.
- (3) 용접부 수직 인장의 경우 접합강판의 연신율을 모재의 기계적특성과 힘의 평형조건으로 예측하고 시험결과

와 비교하여 일치함을 알 수 있었다. 그리고 테일러드블랭크의 연신율은 강한쪽 소재의 변형량이 커질수록 그리고 파단발생하는 약한 쪽 소재의 연신율이 클수록 커짐을 알 수 있었다.

(4) 인장시험의 시뮬레이션을 위하여 용접부의 특성을 모재와 용접부의 경도비를 참고로하여 모재 인장곡선 화귀석에서 강도계수에 경도비를 곱한 값을 사용하여 실험에서 구한 인장곡선과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) 夏見文章, 1996, "テ-ラ-ト"フ"ラックの魅力", フォレス技術, Vol.34, No.8
- (2) W.Prange, 1997, "Tailored Blanks - Production Procedures and the Behavior of the Welded Parts -", ULSAB Seminar (Seoul Motor Show '97).
- (3) W.Prange, C.Schneider, 1992, "A New Material for New Ways of Design", SAE 920429.
- (4) 夏見文章, 小原昌弘, 1997, "テ-ラ-ト"フ"ラックのプレス成形", Journal of the JSTP, Vol.38, no.432, pp.45~51.
- (5) M.F.Shi, K.M.Pickett and K.K.Bhatt, 1993, "Formability Issues in the Applications of Tailor Welded Blank Sheets", SAE930278.
- (6) K.Azuma, K.Ikemoto, K.Arima, H.Sugiura and T.Takasago, 1990, "Press formability of Laser Welded Blanks", Sheet Metal in Forming Process (16th Biennial Congress IDDRG), pp.305~311.
- (7) Y.Yamasaki, M.Yoshida, M.Kabasawa and M.Ono, 1996, "Effect of chemical composition, mechanical properties and thickness of base steels on formability of laser welded blanks", Sheet Metal in Forming Process (19th Biennial Congress IDDRG), pp.357~366.
- (8) A.P.Lee, E.Feltham and J.V.Deventer, 1996, "Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications", SAE 960817.
- (9) 김형목, 허영무, 양대호, 서대교, 1997, "매쉬-심 용접 판재의 성형한계", 한국소성가공학회 '97 춘계학술대회 논문집, pp.222~225.
- (10) PAM System International, 1996, PAM-STAMP Version 1996 User's Manual.
- (11) 박기철, 한수식, 1996, "삼차원 프레스가공 시뮬레이션 기술을 활용한 수요가 가공공정 분석과 최적재질 선정", 자동차 부품 제작기술의 진보 (이동녕, 양동열, 김용환 편), 한국소성가공학회, pp.111~131.
- (12) 이충호, 1997, "유동응력과 비커스경도의 이론적 관계연구", 한국소성가공학회 '97 춘계학술대회 논문집, pp.69~72.