

레이저 용접 속도가 테일러드 블랭크의 인장 특성 및 성형성에 미치는 영향

표 창 룰

인덕대학 기계계열

(2000. 2. 19. 접수 / 2000. 6. 29. 채택)

Effects of Laser Welding Speed on the Tensile and Forming Characteristics of Tailored Blanks

Chang-Ryul Pyo

Induk Institute of Technology

(Received February 19, 2000 / Accepted June 29, 2000)

Abstract : Forming characteristics of tailored blank are mostly effected by the welding method. Recently, laser welding is widely used for the tailored blank. However, tensile and forming characteristics vary due to welding conditions such as welding speed, heat flux etc. The objective of this paper is to evaluate the effect of welding speed on the tensile and forming characteristics of laser welded tailored blank. For this purpose, tailored blank specimens with different welding speed were prepared and tensile tests were performed. Also forming tests such as LDH and OSU test, were performed to evaluate the effect of welding speed on the forming characteristics. Finally, forming limit diagrams were obtained for different welding speed.

Key Words : tailored blanks, laser welding speed, tensile and forming characteristics

1. 서 론

테일러드 블랭크(Tailored Blank)는 두께와 소재가 서로 다른 다수의 강판을 목적에 적합하게 절단, 용접한 후, 성형 가공하여 기계 부품으로 사용하는 프레스 소재이다¹⁾. 최근 국내 자동차 산업에서 많이 활용되기 시작한 테일러드 블랭크는 1980년대 후반부터 레이저 용접 기술의 발전으로 인하여 기술 발전이 급속하게 이루어지고 있다. 자동차 부품 및 차체 제작에 테일러드 블랭크를 사용하는 장점으로는 부품의 강성 향상, 에너지 흡수율 증대, 공정의 단축, 재료 이용률의 증대 및 원가 절감 등을 들 수 있다²⁾.

테일러드 블랭크로 제작된 판재의 성형성(forming characteristics)은 판재의 접합 방법에 가장 큰 영향을 받는다. 현재 널리 사용되는 접합

방법은 레이저 빔 맞대기 용접(laser beam butt welding)으로 용접 흔적이 없고 열영향부가 작으며, 전자기장의 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 또한 연속적인 용접선을 이룸에 따라서 결합 강도가 높으며 스팟(spot) 용접시에 나타나는 결침부가 없으므로 경량화가 가능하고 강성의 증가와 함께 재료 형상의 자유도가 크다는 장점도 있다. 그러나 이와 같은 장점을 지닌 레이저 용접도 방법만 다를 뿐 국부적인 고온 가열에 의한 두 재질 자체의 급속학적 변화를 동반하므로 각 용접 조건에 따라서 기계적 성질이 크게 변화한다. 이러한 기계적 성질의 변화는 레이저 용접된 테일러드 블랭크의 성형성과 매우 밀접한 관계가 있다. 따라서 레이저 용접된 테일러드 블랭크의 기계적 성질과 성형성에 미치는 용접 조건의 영향 평가는 필수적이다.

Saunders 등³⁾은 두께가 서로 다른 판재를 접합한 용접선을 포함하는 시편에 대한 인장 실험과

성형성 평가 등을 통해 용접부의 물성을 비교, 고찰한 바 있으며, 山口克彦^{4,5)}은 레이저 용접 판재의 소성 변형 특성과 판재의 성형성에 대한 기초 실험을 수행하여 성형한계선도(forming limit diagram)를 작성한 바 있다. 또한 박기철 등^{6,7)}은 레이저 용접 판재의 성형성을 평가하기 위해 인장 변형 특성 및 신장 플랜지 성형 특성을 평가한 바 있으며, 최근에는 레이저 용접된 테일러드 블랭크의 성형성 평가를 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다^{8~11)}. 그러나 용접 속도 등의 용접 조건에 따라 용접선의 특성, 용접선 양쪽의 재질, 판재의 성형성 등이 크게 변화함에도 불구하고 이에 대한 영향 평가 연구는 수행되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 논문의 목적은 레이저 용접된 테일러드 블랭크에 대한 인장 및 경도 실험, 그리고 성형성 평가 실험을 수행하여 용접 속도 등의 용접 조건이 두께가 서로 다른 판재에 대한 테일러드 블랭크의 인장 특성과 성형성에 미치는 영향을 평가하는 데 있다.

2. 실험 방법

2.1. 인장 및 경도 실험

레이저 용접 속도가 테일러드 블랭크의 기계적 성질에 미치는 영향을 평가하고 단일 판재와 테일러드 블랭크의 특성을 비교하기 위해서 인장 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 재료는 자동차용 판재로 많이 사용되는 SPCEN으로서 용접 속도와 용접기의 출력에 따른 5가지의 시편을 제작하였다. 용접 속도는 용접기(제조회사:독일 스텐스)의 사양에서 변화를 줄 수 있는 범위내에서 조절하였다. Table 1은 실험을 위해 제작한 시편의 종류와 용접 조건을 나타낸 것이다. 여기서 TB A~TB E는 두께가 0.8t와 1.4t로 서로 다른 판재를 레이저 용접한 테일러드 블랭크를 의미하고, 단일 판재는 용접을 수행하지 않은 각각 0.8t와 1.4t의 일정 두께의 모재를 의미한다. 특히 테일러드 블랭크 시편은 용접선이 시편의 정중앙에 위치하도록 가공하였다. Fig. 1은 인장 시편을 나타낸 것으로 ASTM E8¹²⁾에 준하여 제작하였다.

실험에는 유압식 MTS가 사용되었으며 데이터 처리를 위하여 신장계(extensometer), A/D 변

환기, 랩뷰(Lab view) 및 자체 개발 소프트웨어를 사용하였다. 실험시 하중부하속도는 10m/min이다. Fig. 2는 인장 실험기의 주요 부분을 나타낸 것이다.

또한 용접부의 특성 및 열영향부의 크기 등을 파악하기 위해 테일러드 블랭크에 대한 경도 실험을 수행하였다. 정확한 경도 측정을 위해 용접 단면에 대해 폴리싱(polishing)을 수행하였으며, 용접 중심선을 기준으로 0.2mm간격으로 경도를 측정하였다. 경도 측정에는 비커스 경도계가 사용되었다.

Table 1. Test specimen with the various welding condition

| Index | Tailored Blank | | | | | Base Metal | |
|-----------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|------------|------|
| | TB A | TB B | TB C | TB D | TB E | 0.8t | 1.4t |
| Welding Speed (m/min) | 6 | 5.5 | 4.5 | 5 | 4.5 | | |
| Power (kW) | 6,800 | 6,800 | 6,800 | 6,600 | 6,500 | | |

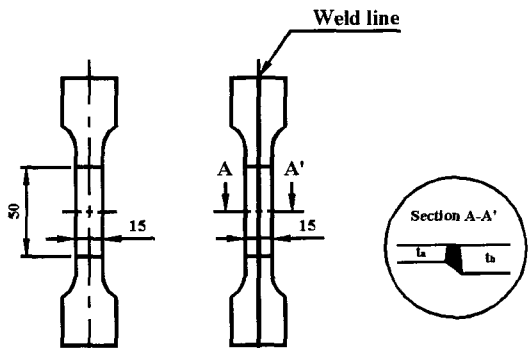


Fig. 1. Specimen geometry for tensile test



Fig. 2. Main part of tensile test system

2.2. 성형성 평가 실험

테일러드 블랭크는 일반 판재와 기계적 성질이 다르기 때문에 판재를 이용한 부품 가공을 위해서는 성형성 평가가 반드시 수행되어야 한다. 본 연구에서는 가장 일반적인 성형성 평가 실험인 한계 돔 높이(Limit Dome Height; LDH) 실험과 오하이오 대학(Ohio State University; OSU) 실험을 수행하여 레이저 용접된 테일러드 블랭크의 성형성을 평가하였다.

Fig. 3은 LDH 실험에 사용된 표준 시편의 형상을 나타낸 것이다. 시편은 가로, 세로 각각 180mm의 정사각형 형태이며, Table 1에 나타낸 바와 같은 단일 판재와 테일러드 블랭크에 대해 모두 7가지로 제작하였다. Fig. 4는 OSU 실험에

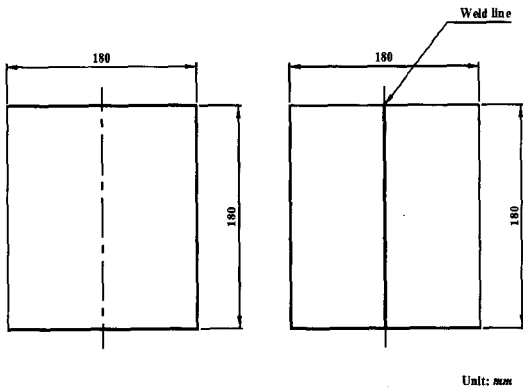


Fig. 3. Specimen geometry for LDH formability test

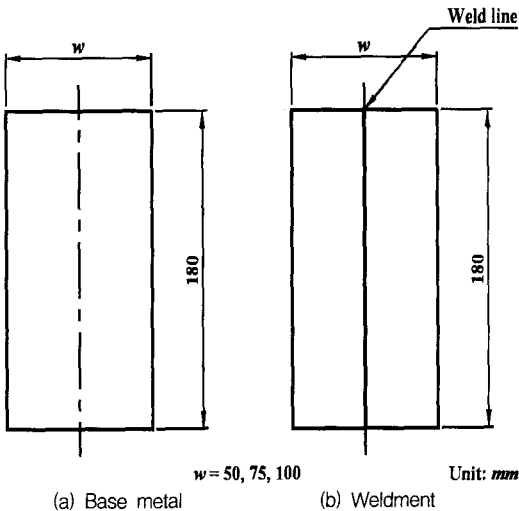


Fig. 4. Specimen geometry for OSU formability test

사용된 표준 시편의 형상을 나타낸 것이다. 시편은 주인장 방향의 길이를 180mm로 고정시키고 폭(w)을 각각 50mm, 75mm, 100mm로 변화시켜 제작하였으며 LDH 실험과 동일하게 용접 조건에 따라 7가지의 시편을 제작하였다. 이 경우도 인장 시편과 마찬가지로 용접선이 테일러드 블랭크 시편의 중앙에 위치하도록 가공하였다.

Fig. 5는 실험에 사용된 성형성 평가 실험기를 나타낸 것이다. 실험기는 자체 개발된 소프트웨어에 의해서 클램핑(clamping) 압력과 펀치의 하중 및 이동량의 정밀한 조절이 가능하다. Fig. 6

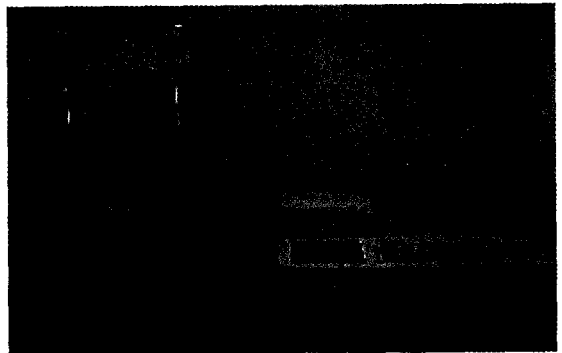
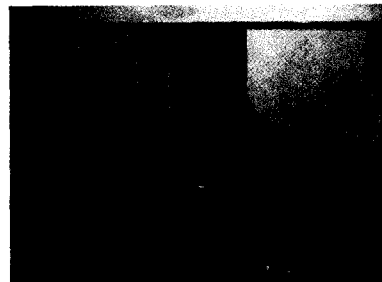


Fig. 5. Main part of metal formability test system



(a) LDH formability test



(b) OSU formability test

Fig. 6. Tool set for LDH and OSU formability test

은 LDH 실험과 OSU 실험을 위한 실험 지그(jig)를 나타낸 것이다. 또한 성형한계선도의 작성을 위한 변형률 측정을 위해서 직경이 5mm인 원형 그리드(grid)를 스텐실(stencil)과 에칭기를 이용하여 전기 화학적 방법으로 에칭을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 인장 특성에 미치는 용접 속도의 영향

Fig. 7은 테일러드 블랭크에 대한 경도 실험 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 용접부 중심에서의 경도값이 가장 크게 나타났다. 두께가 1.4t인 방향으로는 용접 중심선과 0.4mm 떨어진 부분에서 경도값이 급격하게 감소하였으며 두께가 0.8t인 방향으로는 0.7mm 떨어진 부분에서 경도값이 급격하게 감소하였으므로 두께가 얇은 0.8t 쪽이 1.4t 쪽에 비해 열영향부가 컸다. 이는 두께가 얇기 때문에 상대적으로 용접 열량이 빨리 전파되었기 때문이다. TB A~TB E를 비교한 결과, 본 연구에서 사용한 용접 속도의 범위는 테일러드 블랭크의 경도값 분포에 큰 영향을 미치지 못했다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 본 실험에서 사용된 테일러드 블랭크의 용접부의 폭은 약 1mm 정도이다.

Fig. 8은 단일 판재와 테일러드 블랭크의 인장

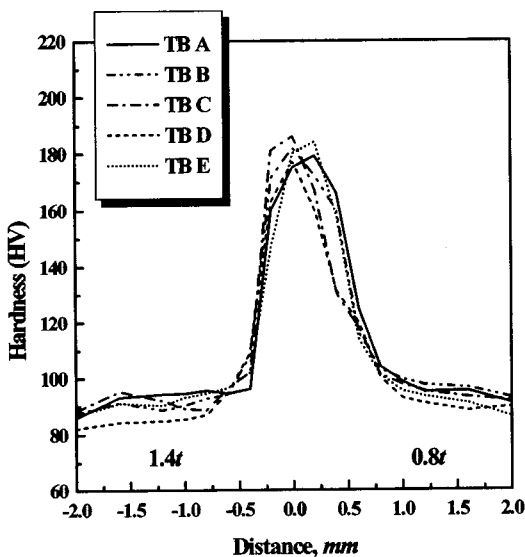


Fig. 7. Hardness test results for tailored blank with various welding speed

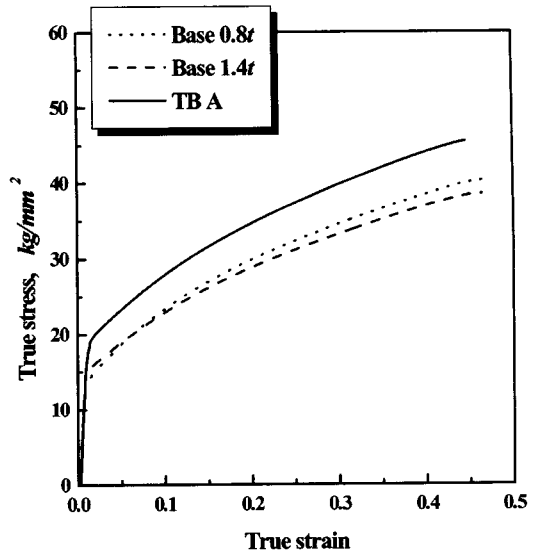


Fig. 8. Comparison of tensile test results between base metal and tailored blank

특성을 비교하기 위해 단일 판재의 진응력-진변형률 곡선과 TB A의 진응력-진변형률 곡선을 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 테일러드 블랭크의 인장 강도가 단일 판재에 비해 약 15% 정도 증가하였으며 연신율은 단일 판재에 비해 약 5%~10% 정도 감소하였다. 이는 용접에 의해 강도가 증가하였기 때문이다. 즉 레이저 용접된 테일러드 블랭크는 단일 판재에 비해 강도가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 9는 용접 출력은 같고 용접 속도가 서로 다른 테일러드 블랭크(TB A, B, C)의 진응력-진변형률 곡선을 비교하여 나타낸 것이고, Fig. 10은 용접 속도는 같고 용접 출력이 서로 다른 테일러드 블랭크(TB C, E)의 진응력-진변형률 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보면 용접 속도가 가장 빠른 TB A의 인장 강도가 가장 낮았으며, 중간 속도로 가공된 TB B의 인장 강도가 가장 높게 나타났다. 그러나 용접 속도 변화의 폭이 작아 각각의 테일러드 블랭크 간의 결과값의 차이는 적었다. 또한 Fig. 10에서 용접 속도가 같고 출력이 다른 경우는 출력이 높은 쪽의 인장 강도가 높게 나타났다. 이 경우에도 동일한 출력 하에서 1m/min 이내의 용접 속도 범위에서는 그 차이가 적은 것으로 나타나 테일러드 블랭크의 생산성 향상을 위한 용접 속도의 증가도 가능할 것으로 판단된다.

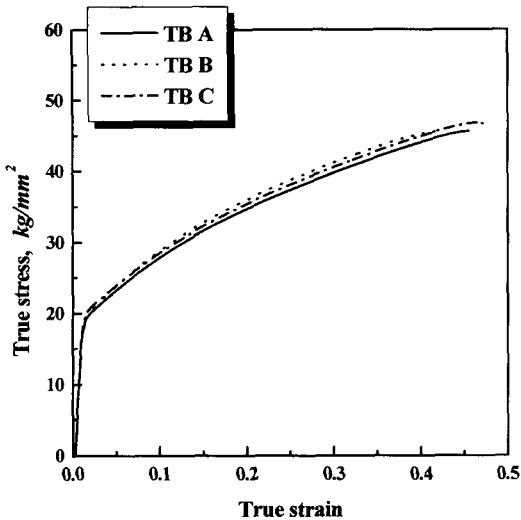


Fig. 9. Comparison of tensile test results for various welding speed

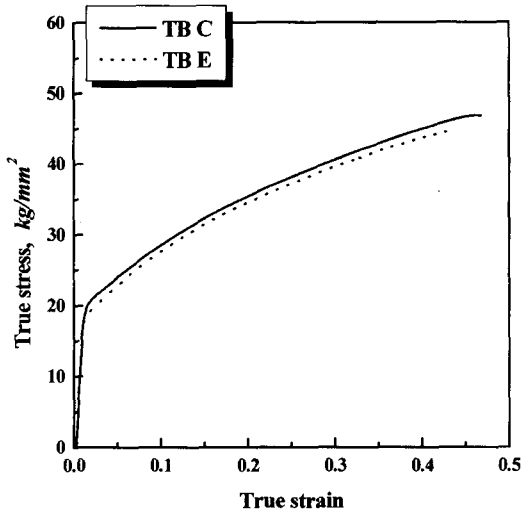


Fig. 10. Comparison of tensile test results for various welding power

3.2. 성형성에 미치는 용접 속도의 영향

Fig. 11은 LDH 실험으로 구한 판재의 최고 높이를 비교하여 나타낸 것이다. 단일 판재의 경우는 변형 후 최고 높이를 측정하였으며, 테일러드 블랭크는 파단 부위 가운데 최고점에서의 높이를 측정하였다. 변형된 시편의 정확한 높이 측정을 위해서는 3차원 정밀 측정기가 사용되었다. 그림에서 보면 단일 판재의 성형성이 테일러드 블랭크보다 좋은 것으로 나타났다. 용접 출력이

같고 용접 속도가 다른 경우(TB A, B, C)를 비교해보면 용접 속도가 가장 빠른 TB A의 경우가 가장 낮은 성형 높이를 나타냈다. 그리고 용접 속도가 중간인 TB B가 가장 높은 성형 높이를 나타냈다.

Fig. 12는 OSU 실험으로 구한 테일러드 블랭크의 최고 높이를 나타낸 것이다. OSU 실험 결과도 LDH 실험 결과와 동일하게 용접 속도가 빨라질수록 성형 높이는 낮아졌다. 그러나 시편의 폭이 100mm인 경우에는 용접 속도 및 용접기

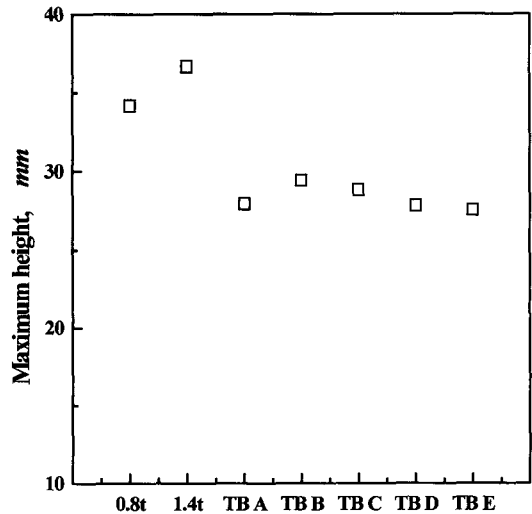


Fig. 11. Comparison of LDH formability test results

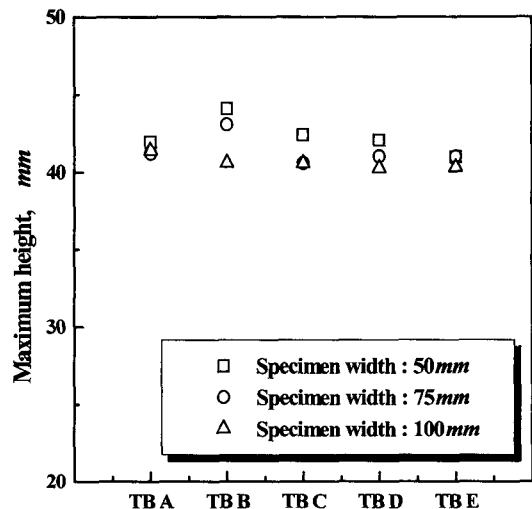
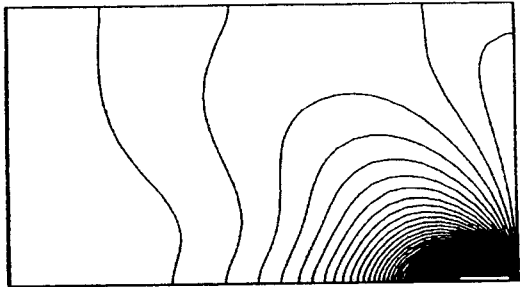
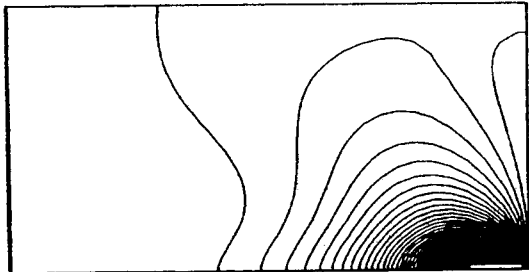


Fig. 12. Comparison of OSU formability test results



(a) LDH formability test



(b) OSU formability test

Fig. 13. Deformed shape of formability test specimens

의 출력에 관계없이 성형 높이가 일정하였다. 또한 용접 조건이 동일한 경우에는 시편의 폭이 증가할수록 성형성이 저하되었다.

Fig. 13은 LDH 실험과 OSU 실험을 수행한 후 시편의 변형된 모습을 나타낸 것이다.

3.3. 성형한계선도에 미치는 용접 속도의 영향

본 연구에서는 판재의 성형성을 예측할 수 있는 성형한계선도를 LDH 실험과 OSU 실험 결과를 이용하여 작성하였다. 성형한계선도 작성을 위한 변형률 값 산출을 위해 실험 후, 시편의 원형 그리드의 변형량을 측정할 수 있도록 고안된 자를 이용하였으며, 각각의 원형 그리드에서 측정된 최대 변형률(major strain)과 최소 변형률(minor strain)을 사용하여 성형한계선도를 작성하였다.

Fig. 14는 두께가 1.4인 단일 판재의 성형한계선도를 나타낸 것이고, Fig. 15와 Fig. 16은 각각 TB A와 TB B의 성형한계선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 단일 판재의 성형 한계값이 테일러드 블랭크의 성형 한계값보다 높게 나타났다. 이는 인장 실험 결과에서 나타난 바와 같이 테일러드 블랭크의 강도는 증가하지만 연신율은 감소하기 때문이며, 용접부의 물성치 변화 등에 의해서도 성형성이 감소한 것으로 생각된다. 용

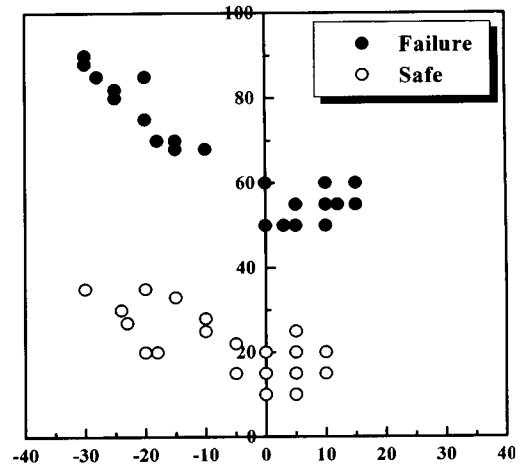


Fig. 14. Formability limit diagram for 1.4t base metal

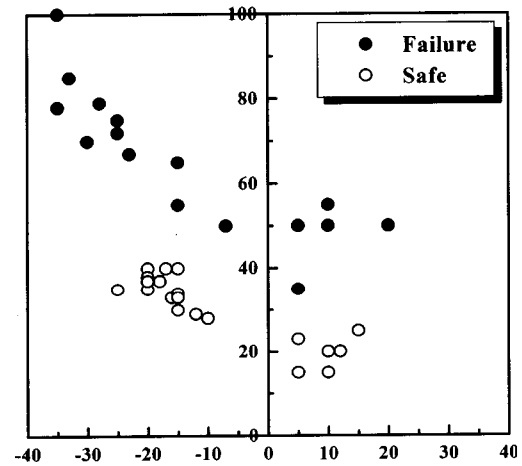


Fig. 15. Formability limit diagram for TB A

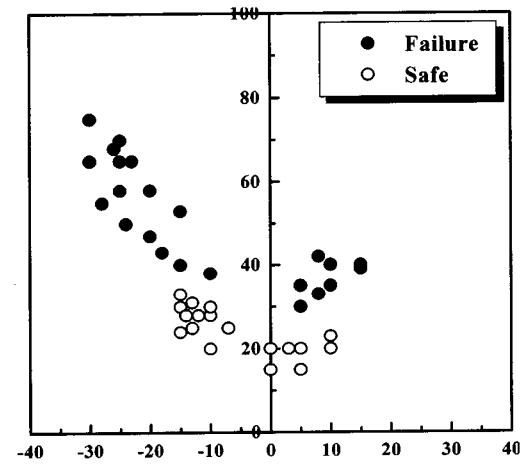


Fig. 16. Formability limit diagram for TB B

접 속도가 서로 다른 TB A와 TB B의 성형한계 선도를 비교해 본 결과, 거의 유사한 성형 한계 값의 범위를 나타내었다.

본 논문의 결과를 바탕으로 수치해석을 수행하면 판재의 두께, 용접으로 인한 재료의 특성 변화 등에 따른 테일러드 블랭크의 성형성 예측 및 평가 기술 개발이 효율적으로 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 레이저 용접 속도가 테일러드 블랭크의 인장 특성과 성형성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 단일 판재와 테일러드 블랭크에 대한 인장 및 경도 실험, 그리고 성형성 평가 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장 실험을 수행한 결과, 레이저 용접된 테일러드 블랭크의 인장 강도는 단일 판재에 비해 약 15% 정도 증가하였으나 연신율은 5%~10% 정도 감소하였다.

(2) 레이저 용접 속도가 증가하고, 용접기의 출력이 감소할수록 테일러드 블랭크의 인장 강도는 감소하였다. 그러나 동일한 출력 하에서 1m/min 이내의 용접 속도 변화로 인한 인장 강도는 그 값의 차이가 적은 것으로 나타나 이 범위에서는 생산성 향상을 위한 용접 속도의 증가도 가능할 것으로 판단된다.

(3) 성형성 평가 실험을 수행한 결과, 단일 판재의 성형성이 테일러드 블랭크의 성형성에 비해 우수한 것으로 나타났으며 이는 인장 실험 결과와 일치한다.

(4) 레이저 용접 속도가 증가하면 판재의 성형 높이는 감소하였으나 성형한계선도의 경향은 거의 유사하였다. 따라서 용접 속도의 범위를 보다 광범위하게 변화시키며 추가적인 실험을 수행할 필요가 있을 것으로 생각된다.

감사의 글 : 본 연구는 인덕대학에서 연구비 일부를 지원받아 수행된 것으로서 이에 관계자

여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 표창률, 전병희, 조명래, "레이저 용접을 위한 박판재의 정밀 전단 메카니즘 개발-유한요소법을 이용한 정밀 전단 공정해석," 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 4, pp. 53~59, 1999.
- 2) 이충호, 허훈, 한수식, "유한요소 역해석을 이용한 Tailored Welded Blank의 용접선 설계," 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 89~92, 1997.
- 3) F. I. Saunders, "Forming of Tailor-Welded Blanks," Ph. D. Dissertation, Ohio State University, 1994.
- 4) 山口克彦, "板材成形における最近の動向," 塑性と加工, Vol. 38, No. 432, pp. 23~27, 1997.
- 5) 山口克彦, "金屬薄板材料の材料特性と成形性試験法," 塑性と加工, Vol. 38, No. 432, pp. 64~70, 1997.
- 6) 박기철, 한수식, 김광선, 권오준, "레이저 용접 테일러드 블랭크의 기본 성형특성(1)," 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 1, pp. 23~35, 1998.
- 7) 박기철, 한수식, 김광선, 권오준, "레이저 용접 테일러드 블랭크의 기본 성형특성(2)," 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 1, pp. 36~48, 1998.
- 8) B. Y. Wang and M. F. Shi, "Structural Performance of Tailor Welded Sheet Steels," SAE Congress, 1995.
- 9) N. Nakagawa, S. Ikura, F. Natsumi and N. Iwata, "Finite Element Simulation of a Laser-Welded Blank," Sheet Metal and Stamping Symposium, pp. 189~197, 1993.
- 10) 김현영, 최광용, 김관희, 조원석, "레이저 용접 차체의 유한 요소 모델링과 성형해석," 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 31~36, 1997.
- 11) J. P. Hong, H. Y. Kim and S. I. Oh, "Formability Study on Weld Line Location and Movement of Laser-Tailor Welded Blanks," 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 19~24, 1997.
- 12) "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM Standard E8-95, 1995.