

TB용 레이저 용접부의 피로 특성

오 종 철* · 한 문 식** · 서 정*** · 이 재 훈***

Fatigue Characteristics of Laser Welding Part for TB

J. C. Oh, M. S. Han, J. Seo, J. H. Lee

*경창산업(주), **계명대학교 기계·자동차공학부

***한국기계연구원 레이저가공연구그룹

ABSTRACT

As automotive manufacturers have taken a growing more interest in tailored sheet metals for improving the rigidity, weight reduction, crash durability, and cost saving application of the tailored sheet metals to automotive bodies has been resently increased greatly. In this study, we investigated the characteristics of fatigue crack initiation behavior of laser welded sheet use for vehicle body panel. We experimented three types of specimens which were machined of the same base metal : one is 1.4mm thick, another is 1.6mm thick , the others is laser welded of the 1.4mm thick specimen and 1.6mm thick specimen. The results indicated that laser welded metal (1.4+1.6mm) is the best one for fatigue strength and fatigue life.

Key words : Fatigue Behavior, Laser Welding, Tailored Welded Blank, Different Thickness

1. 서 론

자동차의 안전성, 주행편의성, 안락성 등의 이유로 전장부품, 안전 및 편의 장비의 장착으로 인해 자동차 중량이 증가하는 추세이다.

반면에 전세계적인 환경규제와 각국 정부의 연비규제로 차량 경량화에 의한 연비개선이 중요한 과제로 부각되고 있다.⁽¹⁾

최근 자동차 업계는 신(新) 엔진개발, 최적 제어에 의한 연비향상, 천연가스차량 개발 그

리고 전기자동차의 개발 등을 통해 대응하고 있다. 이런 환경대응 기술은 '엔진관련 기술'과 차량의 무게를 감량시켜 엔진의 단위용량에 걸리는 부하를 줄이는 '차체관련 경량화 기술'로 양분된다. 특히, TB(Tailored Blank) 기술의 적용은 차체경량화와 구조적 강성을 동시에 향상시킬 수 있는 좋은 예이다.⁽²⁾

TB(Tailored Blank)는 소요 부품의 요구 특성과 용도에 따라 동종 또는 이종의 판재를 2매 이상 조합하여 레이저 또는 매쉬 심(mash seam) 용접 등을 통해 하나의 판재로 만든 다음 블랭킹(blanking) 또는 드로잉(drawing)과 같은 성형 공정을 말한다. 최근 원가절감, 경량화, 강성향상 등을 위해 미국, 유럽, 일본 등의 자동차회사들은 일찍이 TB의 적용을 활발히 추진하고 있다. 한편, 국내에서는 현대자동차가 1999년 베르나의 door inner에 처음 적용하기 시작했다. 현재 자동차에 적용하고 있는 저항 점용접을 기초로한 설계 및 생산방식을 Tailored Blank (TB) 적용 방식으로 대체하게 되면 자동차 경량화에 의한 연비향상(중량 1% 감소는 연비 1%개선)과 공정단축 및 생산라인 단순화로 에너지 절약 효과를 달성할 수 있다.⁽³⁻⁴⁾

차량의 구조체 및 부품은 정적 하중과 충격 하중을 반복적으로 받게 되고, 특히, 용접부의 피로강도 설계는 설계 능력과 수명 예측 능력을 독자적으로 개발하는데 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 피로강도에 대한 최적 용접조건 예측은 차량의 운행 조건의 향상과 안전운행은 물론 기술 자립을 통해 경제적 이득이 파생될 것으로 예상된다. 특히, 현재 차량 소재로 사용되고 있는 고강도 강판재에 대한 Laser 용접부의 피로강도 데이터는 국내 완성차 및 부품회사에서 보유하고 있지 못하므로, 앞으로 고강도 차량의 국산화를 위해서는 고강도 강판재의 용접 설계 조건의 설정 연구는 매우 중요하며 최적의 용

접 설계 조건을 설정하기 위해서는 기계적인 정하중 강도와 피로하중 강도 시험이 필수적이라고 하겠다.

그러므로 본 연구에서는 차량 소재로 사용되고 있는 고강도 강판의 Laser 용접에 대한 내구설계 근거를 마련하기 위한 기초 연구로서 서로 두께가 다른 시편을 맞대기 용접하여 레이저 용접부의 기계적 특성 변화를 검토하기 위해 용접부의 조직 변화 관찰 및 모재부와 열영향부 그리고 비드부의 경도측정을 하고 또한, 각각 정하중 실험 및 피로하중 실험을 실시하여 정적 및 피로 특성을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 시편재료

본 실험에 사용된 재료는 자동차에 사용되는 고강도 강판이며, 제품명은 SPFC 590(이하 SPFC라고 한다) 강판이다. 재료의 화학적 조성은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of SPFC 590 (wt.%)

| Material | C | Si | Mn | P | S |
|----------|-----------|---------|---------|-------|-------|
| SPFC 590 | 0.09~0.12 | 0.5~1.8 | 1.5~1.8 | ~0.04 | ~0.04 |

2.2 시편제작

시편은 SPFC 두께 1.4mm, 1.6mm, 그리고 1.4mm와 1.6mm를 레이저 용접(이하 TB시편)한 3종의 시편으로 실험하였다. TB시편을 제작하기 위한 CO₂ 레이저 발전기는 연속 출력파이며 정격출력 4Kw의 횡여기 방식(transverse flow type)으로서 빔모드는 multi-mode 이고, 빔 조사 속도는 4m/min으로 하였다.

기초실험을 통하여 빔의 초점은 시편 표면으로부터 1mm아래로 설정하고, 레이저 출력은 5.5kw로 고정하였으며, 보조가스로 Ar을 사용하였다. Fig.1과 Fig.2는 각각 TB시편의 형상과 용접실험에 사용된 레이저 용접장치의 헤드(head)와 용접블랭크용 용접치구(jig)를 보여주고 있다.

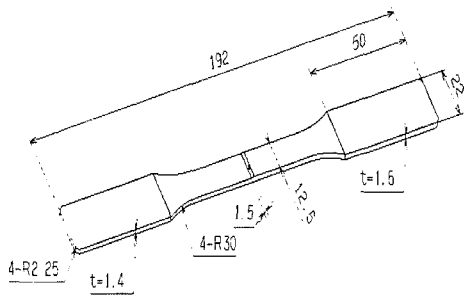


Fig.1 Geometry of TB specimen

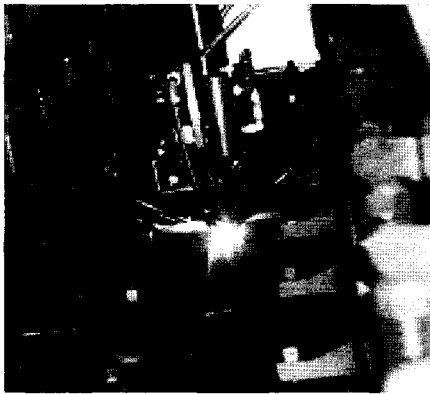


Fig.2 Photograph of laser welding head and jig

레이저 용접시 맞대기 용접부 허용 간격은 $<0.1t$, (t : 가장 얇은 판재의 두께)로 되어야 하므로 판재의 샐린한 면의 절단 상태가 레이저 용접불량의 중요한 원인이 된다. 일반적으로 샐린한 면의 양호한 절단상태를 위하여

정밀절단 또는 밀링작업이 요구되고 있으나, 샐린한 상태로 레이저 용접이 가능하도록 용접조건을 선택하는 것이 비용절감 및 공정 단축을 위해 가장 적절한 방법이다. 따라서, 용접실험에서는 샐린한 상태에서의 판재를 사용하였다. Fig.3은 SPFC 강판의 두께 1.6mm와 1.4mm의 판재를 레이저 용접하여 제작한 TB 용접부의 단면을 나타내고 있다. 양호한 용접부 형상을 가짐을 알 수 있다.



Fig.3 Bead cross sections under welding speed 4m/min and laser power of 3.5kW with combination of SPFC ($t=1.4\text{mm}$) and SPFC ($t=1.6\text{mm}$)

2.3. 인장실험

인장 실험은 10ton 용량의 전기유압식 MTS 810 Material Testing System으로 ASTM E 8에 준하여 상온에서 시험을 수행하였다. 부속장치로서 변위측정장치인 Extensometer (Gage Length 20mm)를 부착하여 Stroke Control 방식으로 인장속도는 3mm/min 로 하여 실험하였다.⁽⁵⁾ Fig. 4는 인장시편에 Extensometer가 부착된 MTS810 장치를 보여주고 있다.

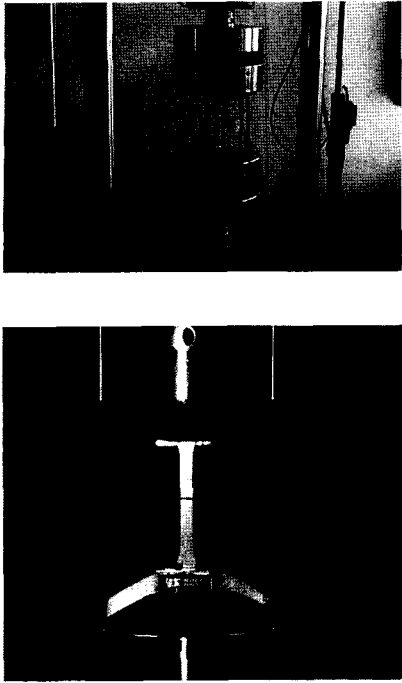


Fig. 4 View of Tensile & Fatigue Test

2.4 경도실험

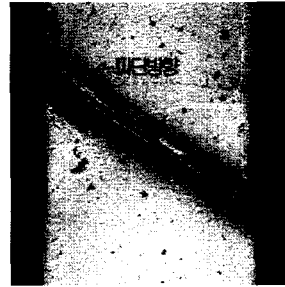
용접부 주위의 기계적 물성의 변화를 고찰하기 위하여 Mitutoyo社의 Mvk-HI인 Micro-Vickers 경도기를 이용하여 용접부의 경도 변화를 고찰하였으며, 용접부 주위의 금속학적 고찰과 파단면에 대한 분석은 금속현미경(ZEISS 社)과 CCD MICRO SCOPE(inf-500)을 사용하였다.

2.5 피로실험

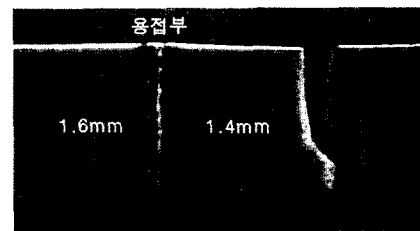
피로실험은 ASTM E 466-96 에 의하여 인장 실험에 사용된 같은 시험기로 수행하였다. 응력비 $R(\sigma_{min}/\sigma_{max})$ 은 0.1로 하였으며 파형은 정현파(sine wave), 시험 주파수는 20 Hz로 하여 고주기 피로시험(high-cycle fatigue test)을 하였다.⁽⁶⁾

3. 결과 및 고찰

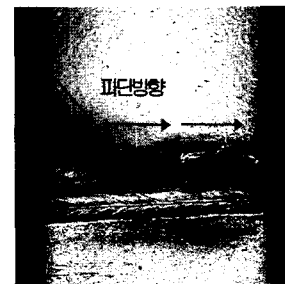
3.1 시편의 파단형상



(a) t=1.4mm, 1.6mm(tensile)



(b) TB specimen(tensile)



(c) TB specimen(fatigue)

Fig. 5 Specimen Fracture Shape of Tensile & Fatigue Test

Fig. 5는 인장 및 피로실험시 시편의 파손 형상을 나타낸 그림이다. (a)는 각각 두께가 1.4mm, 1.6mm인 모재의 파단 형상을 나타내는데 파단부는 국부전단 (localized shear) 변

형에 의한 연성파괴를 보여주고 있다. 연성파괴는 주로 미끄럼변형(slide deformation)에 의해 파단되는데 본 실험에서도 그 특징을 잘 보여주고 있다.⁽⁷⁾ 또한, (b)는 TB시편의 인장실험시 파단 형상을 나타내는데 용접부가 모재에 비해 비교적 강도가 크기 때문에 용접부와 모재가 동일한 힘을 받을 시에 용접부는 탄성범위에 있는데 반해 모재는 이미 소성변형을 일으키므로 모재에서 파단이 일어난 것을 알 수 있다.⁽¹⁾ 피로강도 실험시 TB시편의 파단형상은 (c)에서 처럼 모재부에서 초기 파손이 발생하여 용접부에서 최종 파단이 일어나는 것을 알 수 있다.

3.2 경도실험

마이크로 비커스 경도기를 이용하여 200g의 하중을 0.25mm 간격으로 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

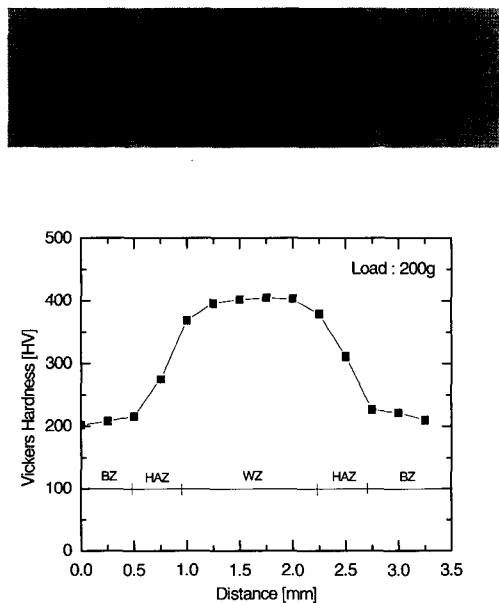


Fig. 6 Microhardness (200g load) distribution across the laser weld.

레이저 용접부는 매우 급격한 가열 및 냉각 과정을 받고 있기 때문에 열 영향부를 포함한 비드부의 경도값은 매우 높다. 모재의 마이크로 비커스 경도 값은 Hv=210 전후였는데 반해 비드부의 경도는 모재보다 약 1.8 배 높은 Hv=390을 나타낸다. 그리고, 일반용접 등에서 명확히 나타나는 열 영향부(HAZ)가 레이저 용접시 경도측정에서는 극소화됨을 나타내고 있다. 이러한 현상은 Fig. 7에서 확인할 수 있는데 레이저 용접은 기존의 용접과 같이 열전도에 의존하는 것이 아니라 접합 부위에 직접 고밀도의 열에너지를 가하기 때문이다.

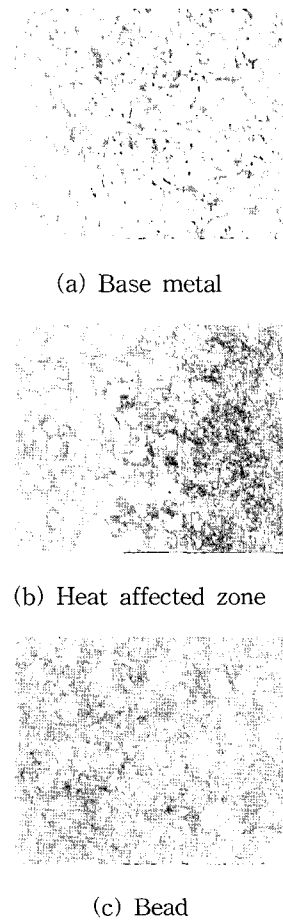


Fig. 7 The micro-structures of weldment (x500)

3.3 인장실험

SPFC 강의 두께에 따른 인장실험 결과를 Table. 2에 나타내었다. Table 2에서 알 수 있듯이 항복강도는 두께가 1.4+1.6mm 일 때가 가장 크게 나타났으며, 인장강도는 두께가 1.4mm 일 때, 연신률은 두께가 1.6mm 일 때가 가장 큰 것으로 나타났다. 항복강도는 0.2% offset 방법을 이용하여 각각 구하였다. 두께가 1.4mm와 1.6mm일 때의 강도가 차이가 나는 것은 가공경화의 영향으로 두께가 1.4mm인 시편이 1.6mm의 시편보다 강도가 증가했기 때문이라 사료된다.

Table 2 Tensile Properties of SPFC

| Thickness(mm) | Y.S(MPa) | U.T.S(MPa) | Elong.(%) |
|---------------|----------|------------|-----------|
| 1.4 | 461.06 | 584.89 | 16.7 |
| 1.6 | 439.50 | 566.67 | 24.6 |
| 1.4+1.6(TB) | 465.03 | 562.45 | 14.0 |

3.4 피로실험

Fig.8 은 두께에 따른 각 시편의 응력-수명 선도를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 수명이 10^6 cycles 이전에서 각 시편에 대한 피로강도(fatigue strength)와 피로수명(fatigue life)을 비교해 보면, TB시편이 가장 크게 나타났으며, 다음으로 두께가 1.4mm, 1.6mm 순으로 나타났다. 또한, 피로한도는 TB시편과 두께가 1.4mm인 시편은 약 260 N/mm^2 로 거의 유사하게 나타나지만, 두께가 1.6mm 시편은 약 200 N/mm^2 로 다른 두 시편보다 낮게 나타났다.

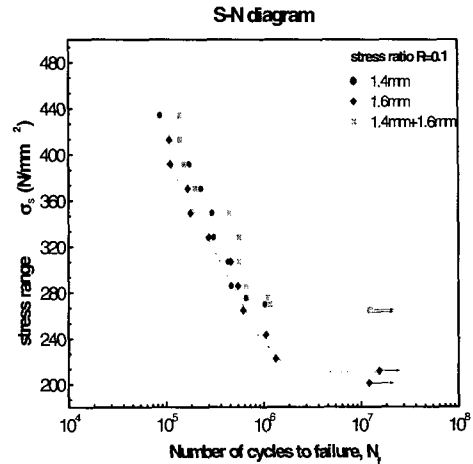


Fig. 8 S-N curve for each specimen

피로한도는 1.4mm+1.6mm의 시험편일 경우 인장강도 562MPa에 약 46% 수준인 260MPa 정도로 두께가 1.4mm인 시험편과 거의 비슷하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한 두께가 1.6mm인 경우의 피로한도는 약 210MPa로 다른 두 시험편보다 약 50MPa 정도의 피로한도의 저하를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 피로한도는 동일 응력수준에서 단면적의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내는데 두께가 1.6mm의 경우도 상대적인 단면적의 증가로 인해 피로한도가 저하된 것으로 판단된다. Table 2의 인장시험의 결과에서도 알 수 있듯이 피로한도는 항복강도의 증가에 따라 커지는 것을 알 수 있다. 두께가 1.4mm와 1.4mm+1.6mm일 때의 항복강도는 거의 유사하게 나타나므로 피로한도에 있어서도 거의 비슷하게 나타나는 반면 두께가 1.6mm일 때는 상대적인 항복강도의 저하로 인해 피로한도가 감소하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 차체제작에 이용되는 냉연 고장력강판 (SPFC 590)에 대한 두께가 1.4mm와 1.6mm를 레이저 용접한 TB 시편과 두께가 1.4mm, 1.6mm인 모재에 대하여 정적강도 및 피로특성을 비교하고, 용접부의 기계적 물성을 고찰하기 위해 정하중 실험, 피로하중 실험 그리고 경도실험을 각각 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 레이저 용접부를 절단하여 현미경으로 관찰한 결과 일반 용접 등에서 명확히 나타나는 열영향부(HAZ)는 극소화되었고, 용접부의 경도를 측정된 결과 비드부의 경도는 모재 보다 약 1.8배 높았다.
- 2) 정하중 실험 결과 레이저 용접한 TB시편이 두께가 1.4mm, 1.6mm인 시편에 비해 항복강도가 가장 크게 나타났다. 실제 설계는 항복강도 이하에서 설계하기 때문에 TB시편은 1.4mm, 1.6mm 시편보다 정적강도 측면에서 우수한 것을 알 수 있다.
- 3) 각 시편의 피로특성은 Fig. 8에서 알 수 있듯이 두께 1.4mm, 1.6mm 모재보다 레이저 용접한 TB시편이 피로강도 및 피로수명에 있어서 우수한 것으로 나타났다. 이러한 이유는 시편 가공시의 가공경화와 레이저 용접으로 인한 용접부의 강도의 증가 때문이라 사료된다.

참고문헌

1. 서 정, 한유희, 김정오, 이문용, 이광현, 김태일 “자동차 범퍼용 경량화를 위한 레이저 용접 블랭크의 적용”, 한국자동차공학

- 회논문집, 제7권, 제2호, pp.217-227, 1999.
2. 이영국, 박인수, 김경익 “레이저 용접을 이용한 Tailored Blanks 시스템의 공리적 설계 I”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집 pp.228-233, 1995.
3. 최이천, 오영근, “Tailored Blank 용접 설비”, 대한용접학회지, 제18권, 제3호, pp.281-285, 2000.
4. “TB(Tailored Blank)용 레이저 용접시스템 국산화 및 시범라인 구축”, 최종보고서, 산업자원부, pp.9-11, 2000.
5. KSRI-87-58-ET, “재료시험법”, 한국표준연구소, pp.1-14, pp.127-158, 1987.
6. Julie A. Bannantine, Jess J. Comer and James L. Handrock, “FUNDAMENTALS OF METAL FATIGUE ANALYSIS”, Prentice-Hall Inc., pp.1-10, 1990.
7. 김상철, “파괴역학”, 민음사, pp.88-89, 1980.