

이종재료 레이저 용접 판재의 저주기 피로 특성

김석환*, 곽대순, 김웅찬(경희대 대학원 기계공학과), 오택열(경희대 테크노공학대학)

The Low Cycle Fatigue Behavior of Laser Welded Sheet Metal for Different Materials

Seog Hwan Kim*, Dai-Soon Kwak, Woong-Chan Kim, Taek Yul Oh

ABSTRACT

In this study, low fatigue behavior of laser welded sheet metal were investigated. Before welding, the cross section of butt joint was prepared only by fine shearing without milling process. Specimens were same sheet metal and welding condition that using automobile manufacturing company at present. Butt joint of cold rolled sheet metal was welded by CO₂ laser. It is used that welding condition such as laser welding speed was 5.5m/sec and laser output power was 5kW for 0.8mm and 1.2mm sheet metal. The laser weldments were machined same or different thickness and same or different material. In order to mechanical properties of around welding zone, hardness test was performed. Hardness of welding bead is about 2 times greater than base material. We performed the low cycle fatigue tests for obtaining fatigue properties about thickness and the weld line direction of specimen. The results of strain controlled low cycle fatigue test indicate that all specimens occur cyclic softening, as indicated by the decrease in stress to reach a prescribed strain.

Key Words : low cycle fatigue(저주기피로), laser weld(레이저 용접), cyclic softening(반복 연화), fatigue ductility coefficient and exponent(피로 연성 계수와 지수), fatigue strength coefficient and exponent(피로강도 계수와 지수), total strain amplitude control mode(총변형률 진폭 제어)

1. 서론

레이저 용접은 용접위치에서 가열부가 좁고 대단히 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 용접속도가 빠르고 용입이 깊으며, 열변형이 적고 비접촉식이어서 박판용접시 기계적 변형이 적게 나타난다. 또한 고강도 열원이므로 물리적이 성질이 상이한 금속의 접합이 가능하다.

여러가지 장점으로 인하여 항공기, 선박, 자동차 등 여러 산업 분야에서 각광을 받고 있다. 특히, 자동차 분야에서 레이저 용접에 관한 많은 연구가 행해지고 있는데, 응용분야에서 최근에 가장 각광받는 기술은 레이저 용접된 소재를 목적에 맞추어 프레스 성형하는 Tailored blank 용접을 들 수 있다. 특히 자동차 차체(body panel) 제조 공정에 있어서 둘 이상의 부품을 일체화하여 프레스 작업을 하는 것으로 경량화, 생산성 및 정밀도 향상에 유효한 방법으로 알려져 있다. 또한 일체화된 형태로서 용접할 경우,

강도, 강성, 내부식성 등의 차체 각 부의 요구성능에 따라 판 두께, 재질 등의 변경요구 조건에 대응할 수 있으므로 원료에 대한 제품의 생산 비율이 증가되고 생산공정을 줄일 수 있다. 현재 이 분야에서의 연구 활동을 살펴보면 레이저 용접 조건에 따른 금속조직의 변화나¹, 용접조건에 따른 스트레인의 한계 그리고 용접되는 강판의 두께 한계 등을 규명한 것², 이종의 얇은 판을 용접했을 때의 성형성을 고찰한 것³ 그리고 성형성을 극대화하기 위한 용접 조건중 판과 판 사이의 간격을 변수로 고찰한 것⁴ 등 주로 성형성을 개선하기 위한 용접조건에 대한 연구가 주종을 이루고 있다. 용접 성형성에 관한 연구는 활발히 이루어지는데 이에 반해 아직까지 구조적 안정성에 관한 연구는 미약하게 이루어지고 있는 실정이다. 현재 연구되어진 구조적 안정성 관련 연구들도 정하중(monotonic) 또는 일정진폭하중에서의 용접부의 거동을 관찰했을 뿐이다.⁵ 현재 산업현장에서 다양하고 실용적으로 사용되고 있는 레이저 용접제에

대한 일정 변형률에서의 레이저 용접재의 수명평가에 대한 연구는 극히 미미한 상태이며, 금속재료에 대한 저주기 피로 평가에 대한 연구 결과들은 극한 상황에서 사용되고 있는 초내열 합금강, 고응력 스프링강⁶, 고강도 공구강이나 알루미늄 합금강⁷ 등에 것들이 알려져 있다.

저주기 피로특성은 전체 변형률, 소성 변형률 및 응력 등에 대한 피로 수명으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 전체 변형률 중에 탄성 변형률은 피로 수명에 영향을 미치지 않으며, 소성 변형률만이 피로 수명에 대하여 직선적 반비례 관계를 갖는 것으로 알려져 있는데⁸, 이러한 연구도 피로 수명의 일면적인 평가만을 하였다고 할 수가 있다. 이를 보완하기 위하여 몇몇 연구자들이 손상에너지 개념을 도입한 응력 폭과 소성변형 폭의 에너지를 피로수명에 적용하여 수명평가를 시도한 바 있다.⁹ 그러나 손상에너지-피로수명의 기준은 저주기 피로 특성을 나타냄에 있어서 아직 보편적으로 사용되고 있는 실정이 아니고, 이러한 이유로 자료 축적도 미비하다.

이에 박판형 이종재료 레이저 용접재의 저주기 피로시험을 수행하고, 결과를 기존 연구자들에 의하여 제안된 피로수명 예측 식들에 적용하여 파손에 관한 강도 평가의 안전성을 검토하여 보고, 박판형 레이저 용접재에 대한 보다 정확한 피로 시험 데이터를 확보해야 할 필요성이 제기 된다. 따라서 본 연구에서는 현재 자동차 제작에 사용되고 있는 박판 재료와 용접 조건을 사용하여 일정 변형률에서의 저주기 피로시험을 통하여 실제 사용되는 환경에 적합한 수명 예측이 가능하게 하는 기계적인 특성과 피로 특성치를 관찰하고, 일정 변형률에 의한 레이저 용접재의 피로특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편 및 용접조건

본 연구에 사용된 시험편의 재질은 냉간 압연 강판재(KS D 3512 SPCEN), 용융 아연 도금 강판재(KS D 3506 SGCD3(GA))의 경우는 두께 0.8mm 그리고 냉간 압연 고장력 강판재(KS D 3617 SPFC)는 두께 1.2mm가 사용되었다. 사용된 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

연구에 사용한 용접조건은 현재 자동차 제작사에서 차체 제작에 사용되고 있는 용접조건을 사용하였는데, 시험편 용접에 사용된 장비는 DLW400기종으로 0.8mm 두께의 강판을 4kW의 출력으로 6m/min의 속도로 맞대기 용접하였다. 레이저는 CO₂ 레이저를 사용하였고, 보조가스(assist gas)로는 헬륨(He) 가스를 사용하였다. 용접을 시행한 후 육안검사와 비파

괴 검사를 통하여 상태가 양호한 것을 Fig. 1과 같은 시험편으로 제작하였다.

Table 1 Chemical composition(Weight Percent)

Elements	C	Mn	Si	P	S
SPCEN	0.03	0.19	0.029	0.019	0.006
SGCD3	0.002	0.24	0.02	0.021	0.006
SPFC	0.079	0.94	0.078	0.007	0.003

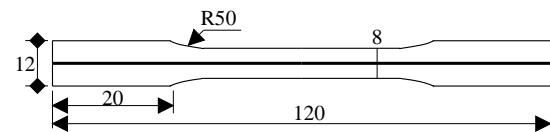


Fig. 1 Schematic diagram of test sample

2.2 경도실험

모재의 기계적 성질과 레이저 용접된 후 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다. SPCEN 모재의 경우는 인장강도가 약 290MPa이었고, 용접재의 경우는 약 296MPa로 레이저 용접을 행한 후 기계적 성질은 모재와 비교하여 2%의 인장강도가 증가 하였다. SPCEN과 SGCD3의 이종 용접재의 경우에는 모재의 평균인장강도보다 용접재의 인장강도가 약 6% 증가 하였다.

Table 2 Mechanical properties of specimens

Specimen		Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation [%]
Base Metal	SPCEN	157.6	290.1	49
	SGCD3	171.8	295.4	38
	SPFC	321.3	472.5	33
Laser* Weld	SPCEN + SPCEN	194.9	295.5	40
	SPCEN + SGCD3	238.2	310.8	29
	SPCEN + SPFC	327.9	487.9	23

* Loading direction was parallel to the weld line

레이저 용접 비드 부분이 인장강도 증가에 역할을 한 것으로 판단되어 비드 부분의 물성 변화를 측정하기 위해 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 모재, 열영향부 및 용접 비드부를 관통하는 방향으로 서로 영향을 미치지 않게 경도 값을 측정하였다.

2.3 저주기피로실험

Fig. 1의 판형 시험편을 사용하는 저주기 피로 시

시험편은 동일재료의 용접재(SPCEN+SPCEN)와 이종 재료의 용접재(SPCEN+SGCD3, SPCEN+SPFC)로 용접된 모재에 따라 3가지로 구성되며 비록 wire cutting된 시험편이지만 표면의 거칠기의 영향을 최소로 하기 위하여 실험전 시험편을 연마지 #1500까지 표면 연마를 실시하였다. 저주기 피로 실험은 서보 유압식 피로실험기인 Instron 8516을 사용하여 상온에서 총변형률 진폭 제어(total strain amplitude control mode) 하에서 sine 파형을 사용하였다. 이때 총변형률 진폭은 0.44%, 0.88%, 1.33%, 1.78% 및 2.2% 범위에서 완전편진 인장하중(응력비 R=0)을 0.1Hz의 하중 주파수로 시험편(Fig. 1)에 부하하여 실험을 수행하였다. 실험의 종료 조건은 각 총변형률 진폭에 대하여 시험편이 완전히 분리 파단 될 때를 기준으로 하였으며, 파단 되지 않는 경우는 10^4 cycle에서 실험을 종료하고 데이터 범주에는 포함시키지 않았다. 총변형률 진폭 제어 하에서 시험편이 반복 연화(cyclic softening), 반복 경화(cyclic hardening) 또는 안정(stable) 등과 같이 어떠한 상태를 나타내는지를 알아보기 위하여 반복 변형 시험이 진행되는 동안에 응력 진폭의 변화를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 경도분포

용접 모재에 따라 세가지 유형의 용접재가 만들어 지는데, 이를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2의 좌측은 SPCEN으로 된 모재의 경도 값이고 우측은 낮은 값부터 SPCEN, SGCD3 그리고 SPFC로 된 모재의 경도 값을 겹쳐서 도식화하였다.

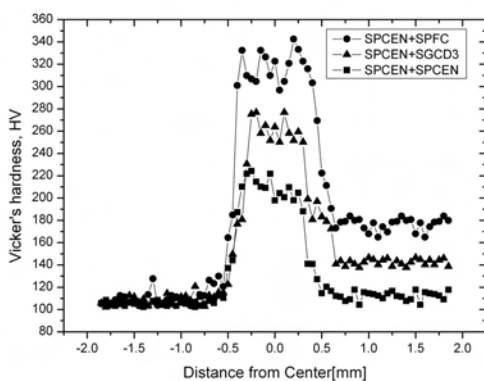


Fig. 2 Variation of micro Vicker's Hardness

SPCEN과 SPCEN으로 된 용접재 모재의 비커스 경도는 SPCEN에서 110, 용접 비드는 207로 측정되었고, SPCEN과 SGCD3로 용접된 이종재의 경우에 대한 결과는 SPCEN에서 110, SGCD3에서는 136 그

리고 용접 비드는 259로 나타났다. 또한 SPCEN과 SPFC로 용접된 이종재의 경우도 SPCEN에서 110, SPFC에서는 177이며 용접 비드가 314로 측정되어 이종 용접재의 비드부는 모재 평균 값보다 약 2.2배 정도 향상된 경도 값을 나타내어 동종 용접재의 경우보다는 조금 더 큰 값을 갖는다.

3.2 응력진폭의 변화

시험편의 거동을 알아보기 위하여 반복 변형동안에 응력진폭의 변화를 관찰하였는데, 동종의 재료로 용접된 경우에 대한 저주기 피로실험 결과가 Fig. 3에 나타냈다. 총변형률 진폭 0.44%, 0.88%, 1.33%, 1.78% 및 2.2% 5가지 조건 모두에서 첫 cycle부터 급격한 반복 연화거동이 일어났다. 부하된 변형률 진폭 하에서 반복 변형이 진행됨에 따라 응력의 진폭은 감소하며, 변형 초기인 10 cycle 내외에서 감소하는 경향이 뚜렷하고, 5 ~ 20 cycle에서 안정화되다가 20 cycle 이후로 일정하게 유지되는 경향을 보인다.

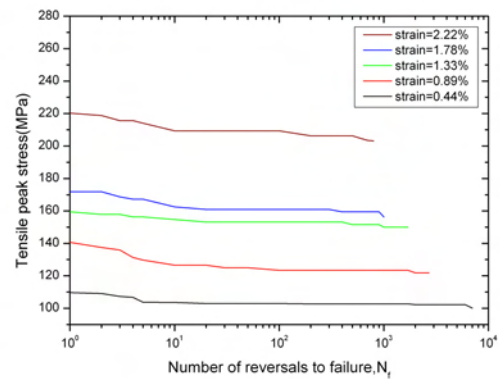


Fig. 3 Tensile peak stress of SPCEN+SPCEN

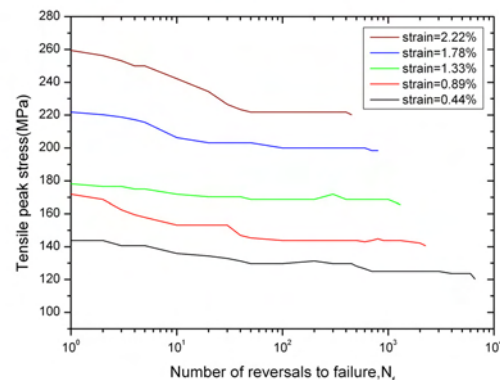


Fig. 4 Tensile peak stress of SPCEN+SGCD3

Fig. 4과 5은 이종 용접재의 저주기 피로실험의 결과를 나타내고 있다. 모든 변형률 진폭에 대한 응력 진폭의 변화에서 알 수 있듯이 첫 cycle부터 급격

한 반복 연화거동이 일어나는 것은 동종 용접재와 유사하지만, 5 ~ 50 cycle에서 안정화되다가 50 cycle 이후로 일정하게 유지되는 경향을 보인다. 또한, 변형률 진폭이 커짐에 따라 급격한 응력 진폭의 변화를 보인다. 동종 용접재와 이종 용접재에서 공통으로 나타난 이러한 경향은 자동차 차체 제작에 사용되는 박판재 강관은 발생하는 정도와 cycle 수의 차이는 있으나 재료의 조직이나 강도의 차이에 상관없이 반복 변형에 의해 반복 연화를 보인다는 것을 알 수 있다.

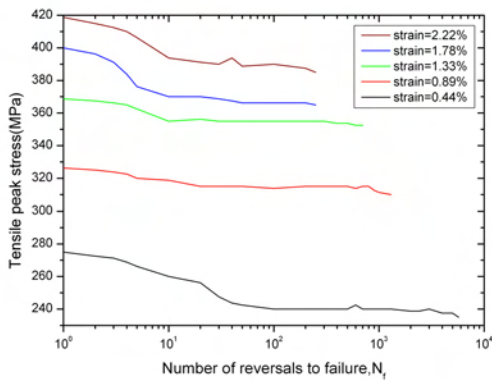


Fig. 5 Tensile peak stress of SPCEN+SPFC

3.3 저주기 피로수명

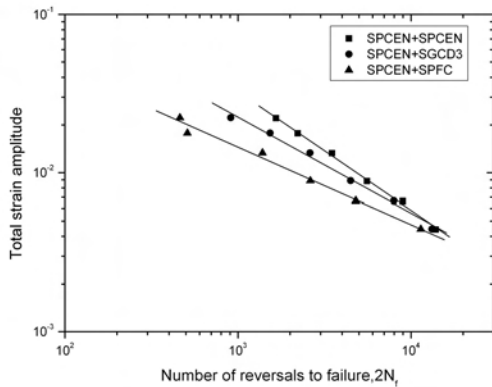


Fig. 6 Total Strain(ϵ) - Number of reversals to failure($2N_f$) curves

본 연구에서는 Fig. 6에 저주기 피로시험에서 얻어진 결과를 총변형률 진폭과 reversals to failure와의 관계를 선형화하였는데, 각 용접재에 대한 reversals to failure 수는 용접되는 재료에 따라 SPFC < SGCD3 < SPCEN의 순으로 증가함을 알 수 있다. 즉, 용접되는 강재의 강도 수준(strength level)에 따라 변하게 되는데, 기울기의 절대값은 강도 수준이 감소

함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 또한, 강도가 높은 판재는 낮은 변형률 진폭에서 상대적으로 높은 피로 수명을 보이는 반면, 연성이 큰 판재는 높은 변형률 진폭 하에서 높은 피로 수명을 보인다.

Table 3 Low Cycle Fatigue properties of specimens

LCF Properties	SPCEN + SPCEN	SPCEN + SGCD3	SPCEN + SPFC
ϵ'_f	0.31197	1.49216	0.60792
c	-0.95048	-0.75364	-0.68909
σ'_f	560.9474	590.9106	955.0514
b	-0.11998	-0.11996	-0.12449

저주기 피로시험에서 구한 결과를 ASTM E739의 방법을 사용하여 Table 3과 같은 피로 물성치를 계산하였다.¹¹ 위에서 언급한 바와 같이 피로 연성 계수(c)의 절대값은 인장 파단 연신률이 비례하고, 강도 수준에 반비례함을 알 수 있다.

4. 결론

변형률 진폭 제어에 의한 박판형 이종 레이저 용접재의 피로 특성치를 구하기 위하여 저주기 피로 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 용접된 용접재의 비드부분은 급격한 경도 향상을 나타내고 있으며, 모재와 비교하여 약 2.2 배 정도의 경도 값의 향상을 보인다.
2. 총변형률 제어 하에서 실시된 저주기 피로 시험 결과, 용접된 소재에 상관없이 반복 변형이 진행되는 동안 응력진폭이 감소하는 반복 연화 현상이 나타난다.
3. 총변형률 진폭과 reversals of failure의 관계에서 기울기의 절대값은 강도 수준이 감소함에 따라 증가한다.
4. 피로 특성치중에서 피로 연성 계수는 인장 파단 연신률에 비례하고 강도 수준에 반비례한다.
5. 변형률 진폭과 reversals of failure의 곡선에서 피로 수명은 부하되는 변형률 진폭이 증가함에 따라 감소하였으며, 이러한 수명의 감소율은 강도가 높은 시험편의 낮은 변형률 진폭에서 피로 수명이 현저히 감소한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지역대학우수과학자 지원사업의 지원으로 수행되었습니다.

[과제번호 R05-2003-000-11383-0]

참고문헌

- [1] Jiun-Ren Hwang, Ji-Liang Doong, Chee-Chang Chen, "Fatigue Crack Growth in Laser Weldments of Cold Rolled Steel" Materials Transactions, JIM, Vol. 37, No. 8, pp. 1443-1446 1996
- [2] M.F.Shi, "Effects of Strain Gradient and Curvatures on Forming Limits Diagram for Anisotropic Sheets" J. Mat. Shaping Technol., vol 9, 1991
- [3] M.F.Shi, "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheets" SAE 930278.
- [4] Willfried Prange, Christoph Schnelder and Albrecht J. Sellge. "Application of Laser - Beam-Welded Sheet Metal" SAE 890853
- [5] Kyong Y. Rhee, Dai-soon. Kwak and Teak-yul. Oh "Fatigue Behavior Characterization of Laser - welded Cold rolled Sheet Metal(SPCEN)" Journal of materials science Vol. 37 pp.1019-1025 2002
- [6] 김광원, 유선준, 남원종, 이종수, "고응력 스프링강의 저주기 피로특성 연구", 11th Conference on Mechanical Behaviors of materials, Seoul, Korea, August 22, 1997
- [7] 박동석, 박현철, 오영준, 남수우, "Al-Li 합금의 저주기 피로특성", 대한금속학회지, 제30권, 제4호, pp. 394-400
- [8] J. F. Tavernelli and L. F. Coffin, JR., "Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue", Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 84, No. 4, p.533, 1962
- [9] R. V. Miner, J. Grada and R. D. Maier; Matll. Trans. A, 13(1982) 1755
- [10] C. E. Feltner and C. Laird :Acta Metall. 15(1967) 1621
- [11] "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life(S-N) and Strain-Life(e-N) Fatigue Data", ASTM E739, Annual Book of ASTM standards, Vol 03.01, ASTM, West Conshohocken, PA, 1998