



Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2019.23.2.111>

무인기용 레큐퍼레이터 소재의 용접부에 대한 고온 피로수명 예측

이상래^a · 김재환^b · 김재훈^{c,*}

High Temperature Fatigue Life Prediction for Welded Joints of Recuperator Material for UAV

Sang-rae Lee^a · Jae-hwan Kim^b · Jae-hoon Kim^{c,*}

^aInnowill Corp., Korea

^bKorea Aerospace Research Institute, Korea

^cSchool of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

ABSTRACT

An experimental study on the welding part of a heat transfer plate that constitutes the lightweight and high efficiency recuperator is presented in this paper. In particular, to find out the service life of the welded part, fatigue characteristics were determined through experiments. Experiments were carried out on two materials (STS347, AL20-25 + nb), which are selected as the material of the recuperator; further, the specimens were manufactured through the methods used for actual fabrication and the standards recommended by ASTM. To evaluate the mechanical properties of the specimens at room and high temperature, MTS-810 was used in a high-temperature furnace. The tensile test was carried out at room and high temperatures for each specimen. The fatigue test was carried out by setting the load ratio corresponding to 50%, 40%, 30%, 20%, and 10% of the tensile strength at the stress ratio of 0.1. Finally, the fatigue life characteristics obtained by the experiment were compared with the stresses owing to the load generated in the operating conditions of the recuperator, and the lifetime of the welds was evaluated to prepare for the operation time required by the UAV.

초 록

본 논문은 경량 및 고효율 레큐퍼레이터를 구성하는 0.1 mm 이하의 두께를 지닌 전열판의 용접부에 대한 실험적 연구이다. 특히 해당 용접부에 대한 수명을 알아내기 위해 고온환경에서 피로특성을 실험을 통하여 알아내기로 하였다. 실험은 레큐퍼레이터의 소재로 주로 선정되는 두가지 재질에 대해 (STS347, AL20-25+nb) 실시하였으며, 시편은 실제 제작에 사용되는 방법과 ASTM에서 권고하는 규격을 준용하여 제작하였다. 그리고 상온과 고온에서 해당 시료의 기계적 특성을 평가하고자, 기계적 물성치를 시험하는 MTS-810 과 고온환경을 부여하기 위한 고온로를 이용하였다. 시험은 각 시편에 대해 상온 및 고온 환경에서 인장시험을 실시하였으며, 나타난 인장강도의 50%, 40%, 30%, 20% 그리고 10% 에 해당하는 하중을 응력비 0.1로 설정하여 피로시험을 시행하였다. 마지막으로 실험을 통해 나타난 피로수명 특성을 레큐퍼레이터의 운전조건에서 발생하는 하중에 따르는 응력과 비교하여 무인기 시스템이 요구하는 운전시간에 대비하여 해당 용접부들의 수명을 평가하였다.

Key Words: Recuperator(재열기), UAV(무인기, Unmanned Aerial Vehicles), Fatigue Life(피로수명), High Temperature(고온), Mechanical Property(기계적 특성)

Received 12 June 2018 / Revised 5 March 2019 / Accepted 6 March 2019

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2018년도 춘계학술대회(2018. 5. 30- 6. 1,

라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 개 요

무인기에게 요구되는 항목은 가볍고 높은 엔

진효율을 지녀서, 보다 오랜 시간동안 비행임무를 시행하는 것이다. 이러한 가장 기본적인 요구사항은 결국 무인기의 엔진에 대해 높은 효율을 요구하는 것이다.

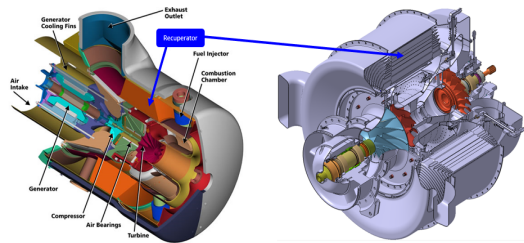
이 무인기의 엔진시스템은 엔진의 효율상승을 꾀하는 목적으로 레큐퍼레이터를 장착하고 있으며, 이는 Fig. 1(a)와 같은 Recuperator 를 Fig. 1(b)와 같이 소형가스터빈 혹은 무인기의 엔진에 장착되어 사용된다. 이러한 가스터빈의 효율을 증가시키려는 목적으로 다양한 열교환기들이 연구되었으며, 특히 지상의 발전시스템에서 주로 사용되었다.

Colin R. McDonald[1]는 마이크로터빈 시스템의 높은 효율을 위하여 레큐퍼레이터의 선택에 있어 다양한 레큐퍼레이터의 형식, 열교환 방식 그리고 선택하게될 재료의 기계적 특성에 대해 총괄적 연구를 하였으며, P.J Maziasz 등[2]은 열교환기의 고효율을 목적으로 하면서 보다 콤팩트하고 고온에서 사용할 목적의 재료로서 선정이 가능한 후보군인 AL20-25+nb, STS347 및 Haynes 230 등의 소재에 대해 고온 환경에서 creep-rupture 특성을 연구하였다. 이는 일반적인 재료시험에서 사용하는 두께가 아닌 열교환기의 전열판으로서 사용하는 얇은 박판의 소재를 시험에 적용하여, 박판이 가지게 되는 creep-rupture 특성을 연구하였다. O.O.Omatete 등[3]은 마이크로터빈에 사용하는 레큐퍼레이터의 재료로 사용하는 STS347, AL20-25+nb 및 Inconel 등에 대해 고온에서 발생하는 부식에 의한 creep 변형률을 연구하였다. 이러한 연구에 활용된 열교환기들은 R.K Shah [4]의 마이크로터빈용 콤팩트 열교환기의 형상, 전열판의 단면 그리고 그들이 가지는 효율과 엔진의 효율에 기여하는 연구를 기반으로 하였으며, D. Aquaro 등[5]은 이러한 연구로서 나타나는 열교환기, 즉 고온에서 사용하는 레큐퍼레이터를 발전플랜트, 즉 원자력발전에도 적용할 수 있는지의 여부를 검토하는 연구를 실시하였다.

이렇게 다소 작거나 혹은 큰 터빈시스템의 엔진 효율을 상승시키기 위한 레큐퍼레이터로서의 연구는 지난 10년간 특별히 연구되었으며, 특히



(a)



(b)

Fig. 1 Recuperator (a) and Micro gas turbine(left) and UAV engine(right) with recuperator.

그 레큐퍼레이터를 구성하는 전열판은 고온에 장시간 노출되어야 함에 따라 박판 소재의 특성을 분석하는 연구를 실시하였다. 그러나 해당 소재들은 용접으로 접합되어 제작되어야 하는 특성이 있으나, 용접된 소재를 직접 평가하는 연구 사례는 거의 없다.

이에 본 연구는 기존에 레큐퍼레이터에 적용 가능하고 비교적 사용이 원활한 Stainless Steel 계열의 소재인 STS347 및 AL20-25+nb 소재를 분석하기로 하였다. 시편의 제작을 위해 실제 제작에 적용하는 기법인 용접용 파이버레이저를 로봇을 이용하여 시편을 제작하고 시험이 가능한 규격으로 성형을 ASTM에서 권고하는 형상으로 제작하였다. 또한 접합된 부위에 응력이 발생하도록 상온 및 고온환경(630 °C)에서 기계적 물성치를 분석하였다. 특히 용접부의 피로시험을 통하여 기대할 수 있는 피로수명을 얻을 수 있었다. 이 시험은 Fig. 2와 같이 MTS-810 장비와 스트레인 측정기, 그리고 고온로를 사용하여 실행 하였다. Fig. 2의 (a) 는 상온환경에서 시험하는 모습이며, (b)는 다양한 고온환경을 부여하기

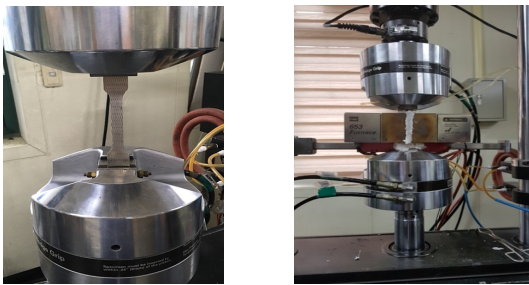


Fig. 2 Experimental configuration of room temperature (a) and high temperature with hot chamber(b).

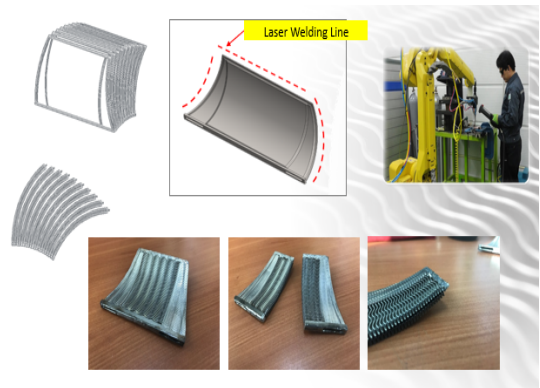


Fig. 4 Process of ready to make specimens.

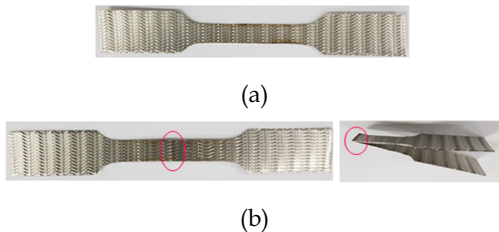


Fig. 3 The shape of general plate specimen (base metal, a) and actual specimen (welded, b) for test mode 1.

위해 고온챔버를 부착하여 시험하는 모습이다.

그리고 마지막으로 용접으로 제작될 레큐퍼레이터가 운전되는 엔진조건하에서 해당 용접부가 충분한 수명을 지닐지 비교하여 판단하였다.

2. 실험

2.1 실험준비

시험에 사용되는 모든 재료의 두께는 실제 레큐퍼레이터에 적용되는 0.1 mm 이하의 두께를 지니고 있다. Fig. 3의 (a)는 용접이 되지 않은 순수한 소재의 시편으로서 (b)와 같은 용접된 시편의 재질특성과 비교하기 위해 준비되었다. 그 (b)의 왼쪽 사진은 시편의 중심부를 레이저를 이용해 용접으로 용융 접합된 시편이며, 시험하중 모드를 I으로 실시하기 위해 준비한 시편은 오른쪽 사진과 같이 용접하여 준비하였다. 이는 Fig. 4와 같은 순서로 실제 제작되는 레큐퍼레이

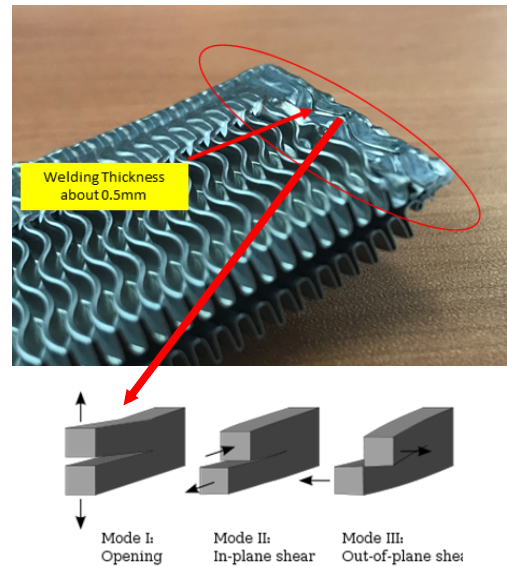


Fig. 5 Explanation of load mode and detail view of heat transfer sheet.

터의 용접된 부분을 선택하여 제작하였다. 그리고 Fig. 5와 같이 레큐퍼레이터 내부에서 압력에 의한 하중방향측 Opening Mode I의 시험이 가능하도록 시편을 준비하였으며, 다른 시편은 인장 및 피로시험이 가능한 형상으로 준비하였다. 이 시편들의 두께는 0.1 mm 이하로, 매우 빠른 용융 및 열전달이 이루어 짐에, 용접 후 잔류응력을 제거하기 위해 비교적 짧은 시간(20~30분 사이)에서 130~150℃ 사이의 분위기 온도로 오븐에서 열처리하였다.

2.2 시험

시험은 2가지 소재, 즉 STS347 및 AL20-25+nb에 대하여 시행하였다. 본격적인 인장 및 피로시험에 앞서 최적의 시험을 위하여 용접의 조건을 명확히 해야 했다. 이를 위해 레이저용접의 출력을 다양하게 하고 실제 용접을 로봇을 이용하여 시편을 제작하였다. 이렇게 다양한 용접출력으로 제작된 시편은 상온부터 고온까지 다양한 온도에서 인장시험을 실시하였으며, 이 실험으로부터 본 시료들이 가지는 최적의 용융조건은 모든 온도 구간에서 다소 높은 인장하중을 가지는 것으로 가정하였다. 이 실험으로 선택된 용접을 위한 출력을 선정하고 그 출력으로 시편을 제작하였다.

그렇게 선정된 용접방법(레이저 출력의 최적화)으로 제작된 시편들은 모두 상온과 고온에서 다수의 인장시험을 시행하였으며, 그에서 얻은 인장하중의 50%에 해당하는 하중을 응력비 0.1로 설정하여 상온과 고온에서 각각 피로시험을 시행하였다. 그리고 계속해서 해당 피로하중을 얻어진 인장하중의 40%, 30%, 20%, 그리고 10%까지 다양하게 설정하여 많은 구간에서 피로수명을 실험하여 얻게 되었다.

2.3.1 용접출력 선정시험

이는 두 재질 모두 유사한 용융특성을 가지고 있으며[1], 용접출력에 따르는 인장강도의 경향을 판단하기 위함이기 시험은 STS347에 대해서 실시하였다.

그 결과 Fig. 6과 같이 다양한 온도구간에서 용접을 하지 않는 모재대비, 3가지 용접출력으로 실시한 시편들의 인장하중을 확인하였다. 그림에서 보이듯 전반적으로 대부분의 용접시편들은 모재보다 낮은 인장하중을 보이고 있다. 상온에서는 큰 차이를 보이지 않으나 고온으로 갈수록 용접한 시편들의 인장하중은 비례해서 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 특히 700℃에서 모든 시편들이 비슷한 인장하중을 가지게 되는 경향을 관찰 할 수 있다. 단, 400 W로 용접된 시편의 500℃에서 인장하중은 용접상태가 다소 균일하지 못해 낮은 인장하중을 나타내었으나, 전반적

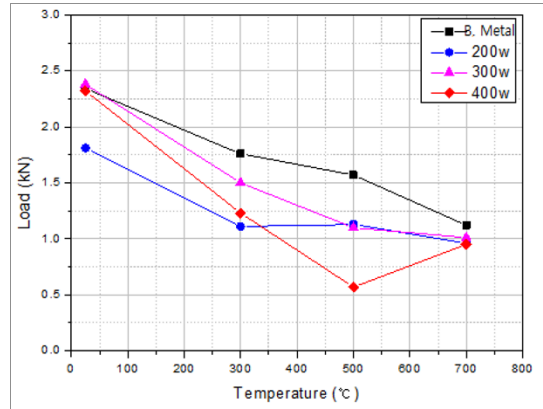
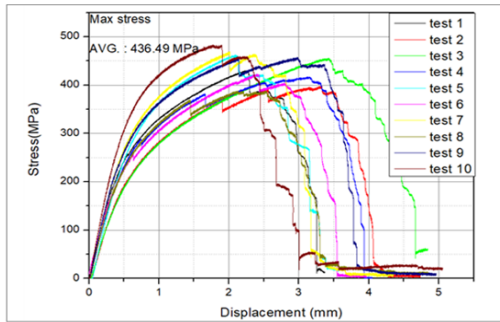


Fig. 6 Mechanical tensile load by welding condition at various temperature.

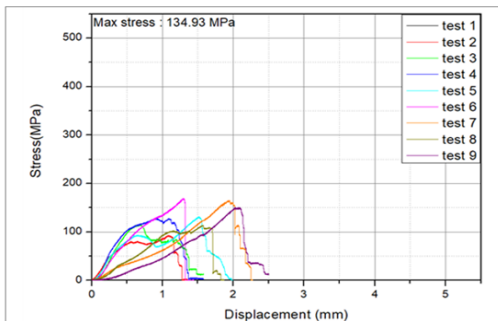
인 경향의 평가에는 무리가 없는 수준으로 판단하였다. 이에 대체로 300 W의 레이저 출력으로 용접한 것이 타 용접출력보다 높은 인장하중을 가지고 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 후속되는 모든 인장 및 피로시험에 사용된 시편의 용접은 이렇게 선정한 용접출력(300 W)으로 제작된 것을 사용하였다.

2.3.2. 모재 인장시험

용접되지 않은, 순수히 형상만 가지고 있는 모재에 대해 상온 및 고온에서 다양한 수량의 시편을 이용하여 인장시험을 하였다. 사용된 재질은 STS347 및 AL20-25+nb 각각 시행하였으며, 특히 AL20-25+nb의 상온 및 고온에서의 기계적 특성인 인장강도의 경향은 Fig. 7과 같이 나타났었다. Fig. 7의 (a)는 AL20-25+nb의 모재에 대한 상온(25℃)에서의 인장특성을 보여주고 있으며, (b)는 동일한 모재의 고온(630℃)에서의 특성을 보여주고 있다. 이 결과 상온 및 고온환경에서 인장강도는 각 온도조건에서 약간의 차이를 보이거나 평균값과 큰 편차를 보이지 않는다. 이로 인한 인장강도의 편차가 발생하는 이유는 모재의 표면을 가공할 시 모두 균일하지 않아서, 시험을 위한 하중을 전달 할 시, 응력이 집중되는 부분의 면적이 시편마다 미소한 차이를 지니고 있었기에 이러한 차이점을 발생된 것으로 추정하며, 각 온도에서의 인장강도를 판단하는데 무리는



(a)



(b)

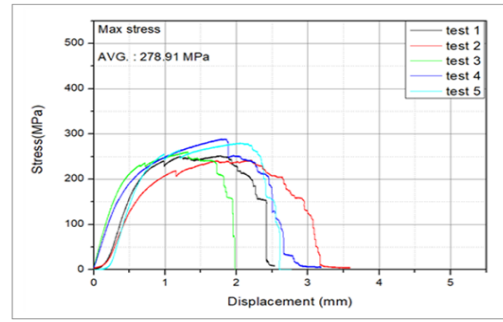
Fig. 7 Mechanical properties of base material (Al20-25+nb) at room (a) and high temperature (b).

없다고 판단된다. 참고로 고온의 환경을 630℃로 선정한 이유는 해당 재질이 사용되는 환경, 즉 무인기의 엔진에 장착되는 연소기의 가스연소후 최대온도를 반영한 것이다.

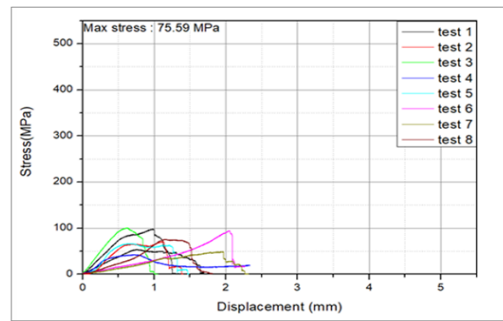
이 시험결과 Al20-25+nb 재질의 고온인장강도는 110MPa 수준인 것을 알 수 있었다. 이 인장강도는 일반적인 오스테나이트계열의 재료가 600℃에서 가지는 수준[6]이다.

2.3.3. 용접재 인장시험

사전에 용접출력을 선정하는 시험을 통해 최적의 용접으로 판단한 레이저 용접출력 300 W로 제작한 시편을 이용하여 상온 및 고온 인장 시험을 실시하였다. 이 결과 Fig. 8의 (a)와 같이 상온(25℃)에서의 용접된 시편은 모재보다 낮은 인장응력을 가지는 것으로 나타났으며, (b)와 같이 고온(630℃)에서도 모재보다 낮은 인장응력을



(a)



(b)

Fig. 8 Mechanical properties of welded material (Al20-25+nb) at room (a) and high temperature (b).

가지는 것으로 결과를 얻었다. 이는 예상대로 상온 및 고온에서 모두 모재보다 낮은 인장응력을 지니는 것으로 확인되었으며, 예상외로 고온에서 용접시편이 가지는 인장응력은 상대적으로 높았다. 이는 해당 재료가 지닌 고온특성으로서 참고 문헌[2]에서 나타난 특성과 유사하였다.

결국 이들은 Table 1에서 보이는 것과 같이 정리할 수 있으며, 용접재들은 모재대비 60% 수준의 인장강도를 가지는 것으로 추정할 수준이었다. 즉 용접재는 모재대비 상온에서 42% 정도 인장응력이 하락했으며, 고온에서 용접재의 시편은 모재대비 31% 정도 하락하였다. 여기서 하락한 비율은 Eq. 1과 같이 모재를 기반으로 용접 시편의 하락률을 선정하였다.

$$Degradation\ Ratio = \frac{Base - Welded}{Base} \times 100 \quad (1)$$

Table 1. Comparison table of tensile stress at various temperature.

Specimens	Average tensile stress (MPa)	
	At 20 °C	At 630 °C
Base	436	110
Welded	250	75
Degradation ratio	42%	31%

2.4. 피로시험 (모재 및 용접재)

위와 같은 사전 실험을 통해 나타난 각 재료들을 다시 모재와 용접재로 나누고, 소재별로 나누며, 온도별로 그룹을 형성하였다. 그리고 그들의 인장응력의 50%에 해당하는 하중으로 응력비 0.1로 설정하여 상온과 고온에서 피로시험을 실시하였다. 또한 그 하중을 40%, 30%, 20%, 그리고 10%에 해당하는 값으로 각각 피로시험을 실시하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 상온과 고온에서 피로시험 결과를 나타낸 것이다.

3. 결 과

모재대비 용접재는 상온 및 고온에서 단순 인장강도는 다소 약하게 나타나고 있다. 하지만, Fig. 9 및 10에서 보이듯 상온보다 고온에서 Al20-25+nb 소재의 피로특성은 낮은 피로수명에서 작은 내구응력을 보이고 있다. 즉 100 사이클 수준에서 Al20-25+nb 소재의 상온에서 모재 대비 용접재의 응력차이는 약 60 MPa 수준을 보이지만, 고온에서는 80 MPa 수준의 응력차이를 보인다.

그러나 높은 반복횟수, 즉 100만 사이클에서는 상온 및 고온 모두 약 10 MPa 수준의 모재와 용접재의 응력을 차이를 가지고 있는 것이 관찰되었다. 즉 이는 고온환경으로 갈수록 피로에 의한 응력감소추세가 낮아짐을 알 수 있다. 이는 해당 재질 자체가 참고문헌[2, 3]에서 연구되었듯 Al20-25+nb의 재질이 고온에서 높은 기계적 성능을 가지고 있음을 재확인되었으며, 특히 용

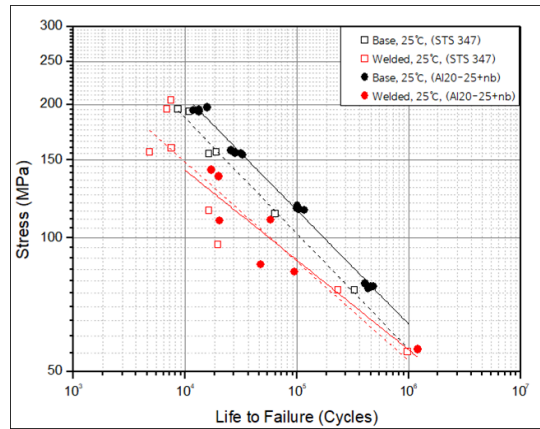


Fig. 9 Result of fatigue test at room temperature.

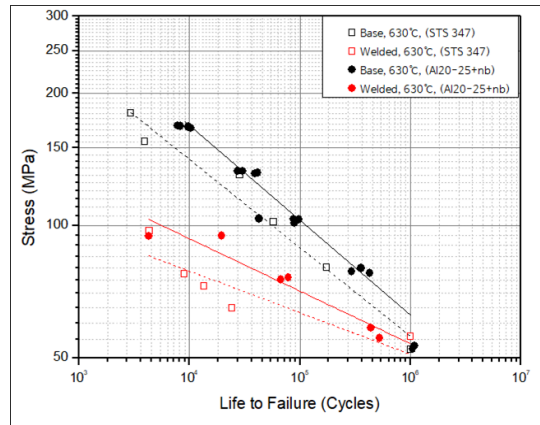


Fig. 10 Result of fatigue test at high temperature.

접된 상태에서 고온 기계적 특성을 확인할 수 있었다.

4. 고 찰

실제 레큐퍼레이터의 제작에 적용되는 소재 및 제작방법을 이용한 시편의 적용에 따라 보다 실제적 실험을 하였다.

Fig. 10에서 보이는 최소의 피로하중은 그 어떤 소재를 사용하더라도 50 MPa 이하 수준의 응력이 발생하는 엔진시스템의 경우, 피로시험의 기준에서 무한수명으로 예측하거나 충분히 안전한 설계응력점에 도달하는 것으로 판단할 수 있다.

Table 2. Operation condition of recuperator.

Part	Temperature (°C)	Pressure (kPa.abs)	Inner stress (MPa)
Gas side (Hot side)	595 → 342	76 → 72	0.2 ↓
Compressed air side (Cold side)	233 → 496	432 → 426	0.9 ↓

Table 2는 레큐퍼레이터의 운전조건을 보여주고 있으며, 이의 요구운전 cycle 은 2000회 이다. 이는 설계요구 조건이자 실제 운전 시 내부의 환경에 따라 반영된 값이며, 2000회는 기동과 정지를 반복하는 개념의 횟수이다. 즉 2000회의 시동과 정지를 반복하여도 이상이 없는 설계의 요구조건이다. 이 표에서 보이듯 내부의 응력은 최대 0.9 MPa이며, 이 값은 레큐퍼레이터의 내부 유동장이 지나가는 모든 전열면에 압력이 고르게 분포한다는 가정하에서 용접부에 최대로 작용하는 하중을 용접부의 면적으로 환산하여 얻게된 응력값이다. 즉, 내부 용접부에 최대로 발생하는 응력은 0.9 MPa 수준이며, 실험에서 보인 Al20-25+nb의 고온에서의 용접시편의 수명이 약 50 MPa에서 100만 cycle을 보이는 것을 볼 수 있다. 이에 본 실험은 해당 소재는 설계의 피로수명 대비 충분히 안전함을 보이는 실험의 결과를 보였으며, 요구되는 수명은 만족할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 지원으로 시행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Colin F. McDonald, "Recuperator considerations for future higher efficiency microturbines", *Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 1463 - 1487, 2003.
2. P.J. Maziasz and B.A. Pint, "Advanced alloys for compact, high - efficiency, high-temperature", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 3622 - 3630, 2007.
3. O.O. Omatete and P.J. Maziasz, "Assessment of recuperator materials for microturbines", U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy, ORNL TM-2000 304, 2000.
4. R.K. Shah, "Compact Heat Exchangers for Microturbines", NATO OTAN, RTO - EN - AVT-131, 2005.
5. D. Aquaro and M. Pieve, "High temperature heat exchangers for power plants: Performance of advanced metallic recuperators", *Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 389 - 400, 2007.
6. Hong, J.H., "Nuclear Materials," 1st, Hanshouse(Korea), Chapter 3, 2012.