

## 초내열합금 IN713LC와 SCM440의 마찰용접 및 레이저용접에 대한 특성 비교

황형철\*·염종택\*·박노광\*·이종욱\*\*·박진형\*\*

### Comparison of the weld quality of friction welding and laser welding for IN713LC and SCM440 steel

H.C. Hwang, J.T. Yeom, N.K. Park, J.W. Lee and J.H. Park

#### Abstract

The purpose of this work is to find an appropriate welding approach for rotor assembly of a marine turbocharger. The friction welding and laser welding of dissimilar materials, IN713LC and SCM440 were investigated. The quality of the welded joints obtained from two welding processes was evaluated by microstructure observation, micro-hardness and tensile tests. The friction welded joint indicated a good bonding structure in the weld interface. On the other hand, the laser welded joint showed the weld defects and non-welded area in the weld interface.

**Key Words** : Dissimilar materials welding, Friction Welding, Laser Welding, IN713LC, SCM440

#### 1. 서 론

선박용 디젤엔진의 과급기에 사용되는 로터 접합체 (Rotor assembly)는 크게 로터 샤프터와 터빈휠로 구성되어 있으며, 과급기의 터빈휠 부품은 블레이드 부위와 디스크 부위가 일체형으로 구성되어 있다. 이러한 일체형 터빈휠의 소재는 고온·고압하에서 작동하기 때문에 IN713C, IN713LC 등의 니켈기 초내열합금이 사용되며, 진공 정밀주조 공정을 통해 제조된다. 그러나, 니켈기 초내열합금은 일반 내열강에 비해서 가격이 비싸고 생산되는 부품의 제품단가가 높다. 이로 인해 로터 접합체 구성부분 중 직접적으로 고온·고압의 가스에 노출되는 부분 즉, 터빈휠은 니켈기 초내열합금으로 사용하고, 로터 샤프터를 포함한 여타 부분은 내열강으로 대체함으로써 초내열합금의 내구성을 가지면서 제조단가가 낮은 제품

을 제작할 수 있다.

선진 엔진제작사 등에서 주로 이용되고 있는 중대형 로터 접합체의 접합방법은 마찰용접기술로서 이 기술은 금속을 용해하지 않고 마찰에 의해 형성되는 마찰열과 고온에서의 소성변형을 동시에 이용하는 접합기술이다. 마찰용접과 함께 초내열합금의 이종재 접합에 사용가능한 기술로 선진국에서 주목을 받고 있는 레이저 용접은 접합부의 열영향부가 상대적으로 적어 마찰용접의 대응으로 사용가능성이 제기됐다. 로터 접합체 부품에 관련기술을 적용하기 위해서는 접합부에 대한 적절한 평가를 통해 마찰용접 대응으로서 사용가능성에 대한 평가가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 터빈휠 소재인 IN713LC와 로터 샤프트 소재인 SCM440간 이종재 접합에 있어, 마찰용접과 레이저 용접기술을 통한 접합율, 조직, 경도 및 인장특성 등

\* 한국기계연구원

\*\* (주) 엔파코

을 상호 비교·분석하여 로터 접합체 부품의 적합 접합 공정을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 마찰용접과 레이저용접에 사용된 IN713LC와 SCM440 원소제의 조성분석결과는 Table 1에 나타내었고, 미세조직은 Fig. 1과 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of IN713LC and SCM440

	C	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	Zr	Mn	Bal.
IN713LC	0.05	12.2	4.41	2.15	5.93	0.73	0.12	<0.005	Ni
SCM440	0.36	0.2	0.16	-	-	-	-	0.70	Fe

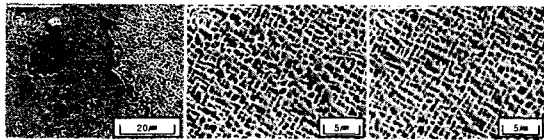


Fig. 1 Microstructures of IN713LC with SEM (a)×3,000 (b)dendrite boundary (c) dendrite core

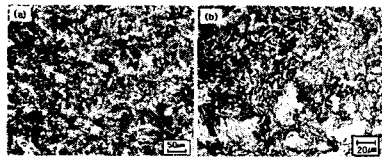


Fig. 2 Microstructures of SCM440 (a)×200 (b)×500

Table 1에 나타낸 조성분석결과에서 두 합금 모두 일반적인 합금조성범위를 만족하는 것으로 분석되었다. IN713LC의 원소제조직은 1060℃에서 7시간 유지후 550℃까지 노냉한 후 550℃부터 공냉한 annealing된 조직으로 주 강화상인 1μm이하의 미세  $\gamma'$  (Ni<sub>3</sub>(Al, Ti))상과 공정( $\gamma+\gamma'$ )상, 탄화물(주로 MC형) 등이 관찰되며, SCM440합금의 경우 전형적인 조질처리(QT) 조직으로 강도와 연신율이 모두 우수한 sorbite조직으로 나타났다. 한편, 마찰용접과 레이저용접은 여러 시험조건에 따라 수행한 후 비파괴 결함검사를 통해 결함이 없거나 최소화된 조건에 대해 조직, 인장, 경도 등을 분석하였으며, 최적 용접조건들을 table 2에 나타내었다. Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 마찰용접은 Ni기 초내열합금 IN713LC의 고온 유동응력이 SCM440에 비해 상당히 높음을 감안하여 IN713LC의 지름을 54mm로 줄여 수행하였고, 레이저용접의 경우 Inconel 용접봉을 이용하여 용접을 수행하였다.

Table 2 Friction welding and laser welding conditions

Friction welding							
Dia.(mm)		1st friction		2nd friction		Upsetting	
IN713LC	SCM440	P(bar)	t(sec)	P(bar)	t(sec)	P(bar)	t(sec)
54	58	56	5	65	85	136	7
Laser welding							
IN713LC	SCM440	Wire speed (mm/min)	weld speed (mm/min)	Freq. (Hz)	Power (W)		
58	58	200	100	30	500		

## 3. 실험 결과

### 3.1 마찰용접품과 레이저 용접품의 조직분석

먼저 마찰용접 및 레이저 용접된 시험편의 용접상태, 접합면 및 열영향부(heat affected zone-HAZ) 등을 평가하기 위해서 macro 및 micro 조직을 관찰하였다.

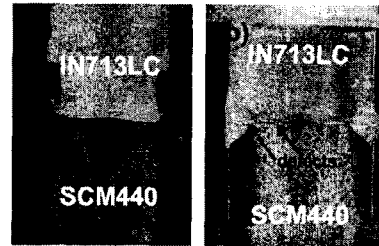


Fig. 3 Cross section shape of welded metals (a) Friction welding (b) laser welding

Fig. 3은 마찰용접 및 레이저용접 후 길이방향으로 절단된 단면사진을 나타낸 것이다. 마찰용접의 경우 용접시 형성되는 burr가 고온에서 유동응력이 높은 IN713LC 쪽에서 상대적으로 작게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 접합면이 양호한 상태를 관찰할 수 있다. 반면, 레이저 용접의 경우 용접부 바깥에 용접비드(bead)가 생성되어 있음을 알 수 있으며, 비드는 한쪽에 치우치지 않고 중간에 생성되지만, 비드가 존재하지 않는 내부의 경우 미접합면이 넓게 존재하였다. 이를 통해 레이저용접의 경우 접합상태가 좋지 않음을 육안으로도 판단할 수 있다. Fig. 4와 5는 각각 마찰용접 및 레이저용접된 시험편에 대한 접합면 및 열영향부(HAZ)의 미세조직을 관찰한 것이다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 마찰용접의 경우 IN713LC에서 접합부 쪽으로 접근할수록 즉, ①→②→③으로 갈수록  $\gamma'$  석출상의 양이 적어져 접합면 부근(③번 조직)에서는 거의 존재하지 않음을 알 수 있으며, 이는 마찰용접시 마찰열에 의해  $\gamma'$  석출상온도 이상

으로 온도가 상승하였기 때문에 판단된다. SCM440의 경우 접합부 부근(④번 위치)에서 원소재 조직인 sorbite 조직과 다른 일부 martensite와 ferrite가 공존하는 영역이 나타나며, burr가 형성된 위치에서 약간 떨어진 ⑤번 위치에서 미세 pearlite와 ferrite가 공존하는 영역이 관찰된다. 이는 마찰열에 의한 austenite( $\gamma$ )변태점 이상의 온도상승과 함께 접합부로부터 거리에 따라 다른 냉각속도로 인한 조직변화로써 이러한 영역들은 SCM440쪽의 HAZ부에 해당한다. 또한 ⑥번 위치와 같이 접합부에서 상당히 떨어진 부위에서는 원소재 sorbite조직을 유지하고 있음을 알 수 있다. 한편, 레이저용접품의 접합면은 용접비드에 많은 기공과 균열의 발생과 함께 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 레이저용접 후 최대 100 $\mu$ m를 넘는 미접합면이 존재하고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 용접 균열 및 결함 등은 경도 및 인장특성에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

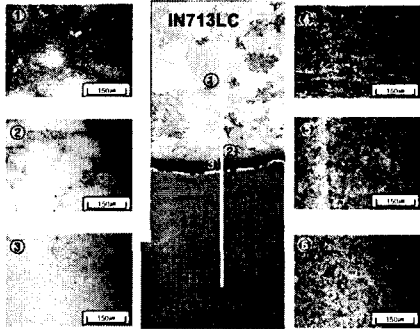


Fig. 4 Microstructures of friction welding with parts(① and ⑥:rawstructure, ② - ⑤:HAZ, ③ and ④: near weld joints)

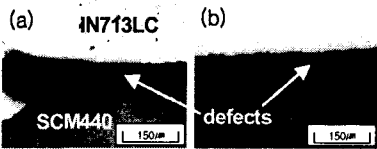


Fig. 5 Microstructures of laser welding at joints (a) near to welding pool (b) center of joints

### 3.2 마찰용접품과 레이저용접품의 특성분석

조직분석을 통해 마찰용접품의 접합면은 양호한 반면, 레이저용접품의 용접비드에 용접균열 및 기공과 함께 접합부위에서 상당면이 미접합된 상태를 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 조직분석결과가 실제 용접품의 특성에 미치는 영향을 알아 보기 위해서 접합강도, 미세 경도, 인장특성 등을 조사하였다.

먼저, 용접품의 접합율을 측정하기 위해서 접합면에

notch를 주어 파단시험을 수행하였다. Fig. 6은 마찰용접품에 대하여 파단시험을 수행한 후 파단면 사진을 나타낸 것이다. 접합률은 결함이 발생하지 않은 최대원의 반지름을 a라 하고, 원재료의 반지름을 b라 하여  $a^2/b^2 \times 100(\%)$ 의 값으로 구한 것이다. 마찰용접된 시험편의 접합률은 90%이상의 우수한 접합율을 나타낸 반면, 레이저용접품의 경우 내부의 넓은 미접합면의 존재로 접합율이 상당히 떨어지는 것으로 나타났다.

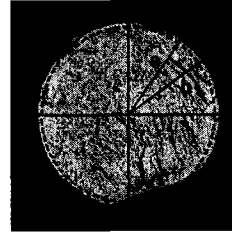


Fig. 6 Fractured Cross-section of friction welding (bonding rate>90%, a-no defect dia., b-specimen dia.)

Fig. 7과 8은 각각 마찰용접과 레이저용접에 대한 거리별 경도값을 측정한 것이다.

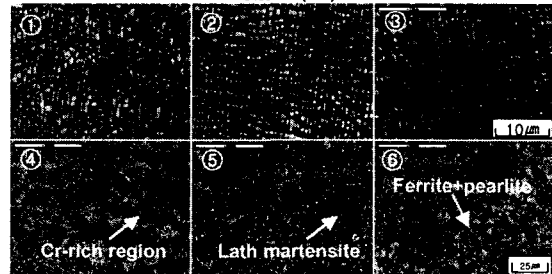
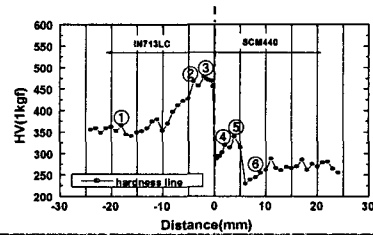


Fig. 7 Compare microstructures with hardness in friction welding

마찰용접품의 경우(Fig. 7) 접합부에서 IN713LC쪽으로 약 5mm까지 경도값이 크게 상승함을 보이고 있다. 이들 부위의 SEM분석결과에서 경계면 쪽으로 가까이 갈수록  $\gamma'$ 상이 미세화되는 것을 알 수 있으며, 경계면 주위에 상당히 미세한  $\gamma'$ 상이 관찰된다. 미세한  $\gamma'$ 상은 마찰용접시 일부 또는 완전 고용되어 마찰용접후 냉각될 때 생성된 것으로 잘 발달된 미세  $\gamma'$ 상이 계면에서의 기공

효과와 함께 경도값을 상승시킨 주요인인 것으로 판단된다. SCM440의 경우 접합부 근방인 ④번 위치에서는 계면에서 Cr의 확산으로 인한 Cr-rich 상의 생성으로 인해 ⑤번 위치에 비해 다소 경도값이 떨어지며 ⑤번 위치에서의 경도상승은 lath형의 martensite 존재와 함께 소성 가공에 의한 가공경화효과가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 한편, 접합부에서 SCM440쪽으로 6~8mm정도 떨어진 곳에서 경도값이 하락하는 것을 알 수 있으며, 이것은 마찰용접시 냉각속도가 상대적으로 느려 형성된 ferrite+pearlite조직에 기인한 것임을 알 수 있다.

한편, 레이저 용접품의 경도측정결과(Fig. 8)는 중심부에 미접합면이 존재하기 때문에 부득이 용접 비드를 거쳐 측정하였다. 용접비드에서는 많은 기공들로 인해 경도가 HV200이하로 떨어지는 곳이 나타나고 있으며, 용접비드 주위에서 IN713LC와 SCM440 모두 경도값이 상승함을 알 수 있다. 이는 IN713LC의 경우 미세  $v'$  상의 생성과 SCM440의 경우 martensite형성에 기인한 것으로 판단된다.

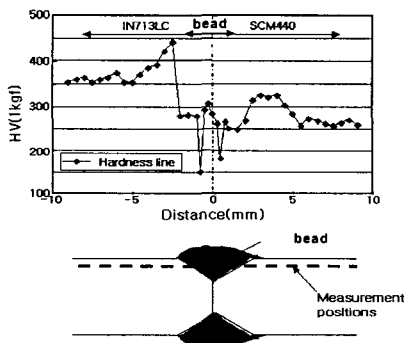


Fig. 8 Hardness in laser welding

Table 3 Mechanical properties of applied specimen

Material	YS (MPa)	UTS (MPa)	El (%)	R.A (%)	Fracture location
friction welding	565	759	7.8	30	IN713LC
laser welding	49.2	49.8	3.0	-	bonded joints

Table 3은 용접후의 인장시험결과를 나타낸 것으로 마찰용접의 경우 파단면이 용접계면이 아닌 IN713LC에서 발생되었으며, 인장강도 또한 용접전 IN713LC 원소재의 강도와 비슷하게 나타났다. 반면, 레이저용접의 경우 용접비드가 형성된 계면에서 파단이 발생하였으며, 강도 또한 마찰용접품의 1/10정도에도 못 미치는 것으로

나타났다. 이는 레이저 용접품의 비드부에서 많은 기공과 균열들이 원인인 것으로 판단된다.

이상의 두 용접방식에 의해 얻어진 용접품의 파단, 경도, 인장특성 등을 비교한 결과, 로터 접합체의 용접방식으로 마찰용접이 레이저 용접에 비해 더 적합한 것임을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

IN713LC와 SCM440 이종재 마찰용접과 레이저용접품의 조직과 접합특성 등을 비교 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마찰용접품과 레이저용접품의 접합계면에서의 조직을 분석한 결과, 마찰용접품은 접합계면이 양호하였으나, 레이저 용접의 경우 용접비드에서 많은 기공과 균열이 관찰되었고, 특히 넓은 영역에서 미접합면을 형성하고 있었다.

(2) 마찰용접과 레이저용접의 접합면을 기준으로 거리별 미세경도변화를 측정된 결과, 용접시 발생하는 열로 인한 조직의 변화가 경도에 상당한 영향을 미쳤으며, 레이저용접의 경우 용접비드에서의 경도하락이 심하게 나타났다.

(3) 마찰용접품의 인장특성은 원소재대비 우수한 특성을 나타냈으나, 레이저 용접의 경우 용접비드에서의 여러 결함들이 특성을 크게 저하시켜 로터 접합체의 용접방법으로 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

#### 후 기

본 연구는 경남신지식 기계설비사업의 일환으로 추진된 것입니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) S.S. Manson, Aerospace Structural Materials Handbook, Vol. 4. Code 4108, Battelle's Columbus Laboratories, Columbus, USA (1985)
- (2) W.H. Keams, Friction Welding, Welding Handbook 7th Ed., AWS, 3 (1980) p239-
- (3) E. W. Ross and C. T. Sims, Nickel-base alloys, in Superalloys, C.T. Sims, N.S. Stoloff and W. C. Hagel (ed.), (1987), p97-