

조선용 A-grade 강재에 대한 하이브리드 및 레이저 용접부의 용접성 비교

오종인* · 박호경* · 정은영* · Rajesh S.R* · 방한서**

*조선대학교 일반대학원 선박해양공학과

**조선대학교 공과대학 항공조선공학부

The Comparison of Weldability in Hybrid & Laser Welded Ship Structure A-grade Steel

CHONG-IN OH*, HO-KYUNG PARK*, EUN-YOUNG JEONG*, RAJESH S.R* AND HAN-SUR BANG**

*Department of Ocean & Naval Architecture Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

**Department of Aerospace & Naval Architecture Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

KEY WORDS: Ship structure A-grade steel 선박구조용 A-grade 강재, Hybrid welding 하이브리드 용접, Finite element method 유한요소법, Welding residual stress 용접 잔류응력, Heat source model 열원 모델, Optimized welding condition 최적화된 용접 조건

ABSTRACT: Recently many research are going on in the field of application of Laser and Laser-Arc hybrid welding for superstructures such as ship-structures, transport vehicles etc. Therefore in this study an optimized welding condition and numerical simulation for hybrid welding by using previous numerical analysis which is used to calculate the heat source for Laser and Laser-Arc hybrid welding has been analyzed. For this purpose, fundamental welding phenomena of hybrid process(Laser+MIG) are determined based on the experiments. In order to calculate temperature and residual stress distribution in Laser and Laser-Arc hybrid welds, finite element heat source model is developed on the basis of experiment results and characteristics of temperature and residual stress distribution in Laser and Laser-Arc hybrid welds are understood from the result of simulation and found comparable to the experimental values.

1. 서 론

일반적으로 CO₂ 레이저 또는 Nd:YAG 레이저에 MIG, MAG, TIG 및 Plasma 용접법을 복합하여 사용하는 하이브리드 용접법은 레이저 용접의 깊은 용입과 빠른 용접속도의 장점과 아크용접의 저렴한 가격과 고출력, 핏업(fit-up)정도를 완화시키는 장점을 이용한 용접법이다.

최근 선박과 같은 대형 구조물 제조 공정에 레이저에 의한 절단을 사용함과 동시에 그 레이저를 이용한 용접법까지 확대 연구하고 있다. 이러한 추세에 맞추어 레이저 용접의 단점을 보완하기 위한 하이브리드 용접법을 적용하려는 노력이 이루어지고 있고 이에 대한 지속적인 연구를 하고 있으나 현재까지 하이브리드 용접부에 대한 용접성을 파악할 수 있는 수치 해석 연구가 레이저 및 아크용접에 비해 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 선박 제조시 사용되고 있는 조선용 강재 A-grade 강판에 대하여 레이저와 하이브리드(Laser+MIG) 용접 시험편을 제작하고 시험편 제작시 사용된 용접조건과 용접 특성을 고려하여 선정된 용접열원모델을 이용하여 열적 특성 및 용접잔류응력을 수치 해석하였으며 용접 시험편에 잔류

응력 및 기계적 강도 특성(인장, 충격 등)을 측정하여 각 용접법에 대한 결과를 비교 검토함으로써 레이저와 하이브리드 용접부의 용접성 및 재현성을 확보하고자 하였다.

2. 유한요소해석 및 실험 방법

2.1 해석이론 및 조건

온도의 시간 및 공간의 분포는 식 (1)과 같이 2차원 비정상 열전도 지배방정식을 만족하며 경계조건으로서는 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중으로의 열전달이 있는 것으로 하였으며, 고체에서의 열전도 문제를 갈라킨법을 이용하여 식 (2)와 같이 유한요소 정식화를 하였다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad (1)$$

$$[K]\phi + [C] \frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad (2)$$

여기서, [K]: 열전도 매트릭스, [C]: 열용량 매트릭스
[F]: 절점에서의 열유속 벡터

교신저자 오종인: 광주광역시 동구 서석동 375번지

062-230-7137 chong1015@hotmail.com

또한, 열탄소성 해석을 위해서는 식 (3)에 보인 것과 같이 전변

형률(ϵ)에 탄성변형률(ϵ^e)과 소성변형률(ϵ^p) 그리고 열응력에 의한 변형률(ϵ^t)이 포함되도록 하였다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^t \quad (3)$$

본 연구에서는 조선용 강재 A-grade 100mm×200mm×8mm 시험편 2장을 하이브리드 용접 및 레이저 용접을 이용하여 시험편을 제작하였으며 그 그림, 단면 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

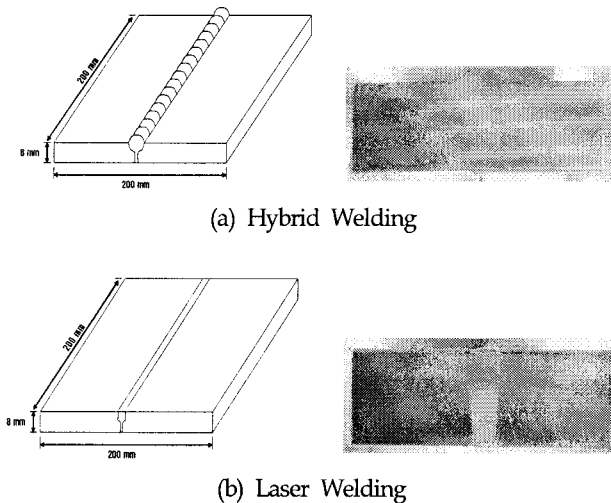


Fig. 1 Nominal dimension of weldments

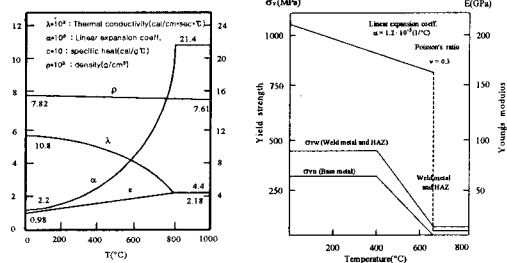
하이브리드 용접 시험편 제작시 2가지 조건 즉 Laser Power 및 용접속도는 각 각 고정하고 GMAW의 전류, 전압 및 Wire Feeding Speed를 조절하여 시험편을 제작하였으며, 레이저 용접 시험편 제작시 하이브리드 용접과 같은 조건 8KW에서는 완전 용입이 되지 않아 Laser Power 10KW에서 용접을 실시하였다. 본 연구의 수치 해석시 4절점 Isoparametric 요소를 사용하여 용접열원을 순간열원으로 가정하여 수치 해석하였고 이때 사용된 용접조건은 실제 시험편을 제작하기 위해 사용되었던 조건을 고려하였으며 이는 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 또한, 용융지의 유동, 키홀 내부의 증발현상, 잠열 및 금속 상변태는 고려하지 않았으며 고려된 재료의 실제 온도 의존성 물리정수 및 기계적 물성치를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Hybrid welding condition

| Specimen Number | 1 | 2 | |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|-----|
| GMAW | Voltage(V) | 20.5 | 30 |
| | Current(A) | 221 | 408 |
| CO ₂ Laser | Power(KW) | 8 | |
| | Welding speed(m/min) | 1.5 | |
| | Wire feeding speed | 6 | 14 |
| | Material | 조선용 강재 A-grad | |
| | Joint type | Butt | |
| | Gas | He50%, Ar28%, CO ₂ 12% | |

Table 2 Laser welding condition

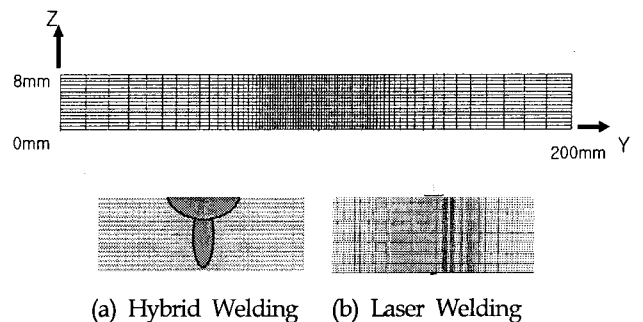
| Specimen | Welding Condition | |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| CO ₂ Laser | Power(KW) | 10 |
| | Welding speed(m/min) | 1.5 |
| | Material | 조선용 강재 A-grad |
| | Joint type | Butt |
| | Gas | He50%, Ar28%, CO ₂ 12% |



(a) Thermal coefficient (b) mechanical properties

Fig. 2 Temperature dependent material property of A-grade

모델의 열 및 열탄소성 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소 프로그램을 사용하였으며 하이브리드 용접 열원모델로는 실제 용접현상을 고려한 분리형 Volume-Volume heat source를 용접열원 모델로 선정하였으며 각 용접법에 대한 모델 및 시험편의 해석을 위하여 사용되어진 모델 형상은 Fig. 3에 나타내었다. 보인 것과 같이 전체모델(총 절점수 2525개, 총 요소수 2400개, 최소 요소크기 0.2mm×0.5mm)을 이용하였으며 열탄소성 해석의 경계 조건은 Fig. 4에 나타내었다.



(a) Hybrid Welding (b) Laser Welding

Fig. 3 FE Mesh and heat input element details

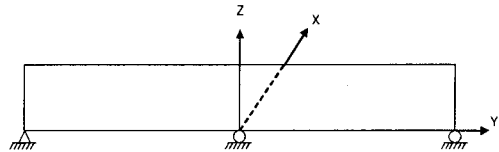


Fig. 4 Boundary condition for thermal elasto-plastic analysis

용접열원모델에 대한 입열량을 계산하기 위해 다음의 식 (4)와 식 (5)를 사용하였으며, 각 용접법에 따른 용접효율은 CO₂ 레이저의 경우 35%, GMAW의 경우 80%로 하였다.

CO₂ Laser (Uniform cylinder flux)

$$Q = \eta_L \frac{P}{W_s} \quad (4)$$

여기서, Q: 용접입열(KJ/cm), η_L : 레이저 용접효율
P: 레이저 출력(kW), W_s : 용접속도(cm/sec)

GMAW (Uniform flux)

$$Q = \eta_A \frac{V \cdot I}{W_s} \quad (5)$$

여기서, η_A : 아크용접효율, V: 용접전압(V)
I: 용접전류(A)

2.2 실험조건 및 방법

레이저 및 하이브리드 용접시험편에 대하여 기계적 강도 특성을 알아보기 위해 인장, 충격, 경도시험을 실시하였으며 인장, 충격 시험편 제작시 고려된 규격을 Fig. 5에 나타내었다.

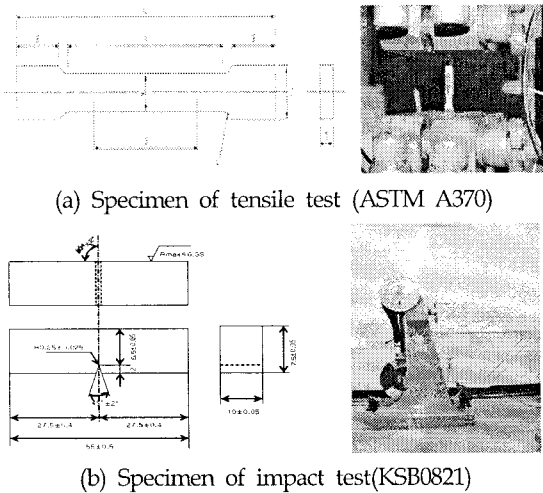
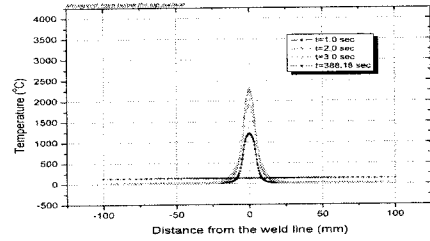


Fig. 5 Schematic specimen for experiments

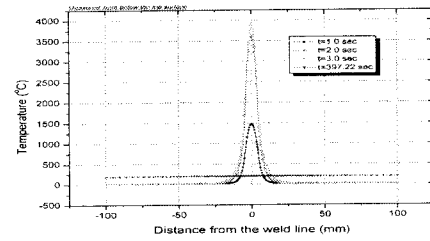
3. 수치해석 및 실험 결과

3.1 용접열분포 및 용접잔류응력 결과

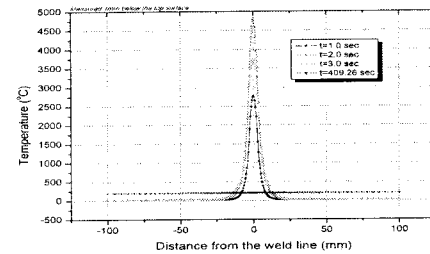
본 연구에서는 시험편 제작시 용접속도, 보호가스 및 레이저 출력은 동일하게 하고 MIG 용접에 대한 전압과 전류, Wire feeding speed에 변화를 주어 제작한 2가지 Hybrid 시험편 및 레이저 단독 용접에 의해 제작한 시험편에 대하여 열분포 해석을 수행하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과를 살펴보면 두 용접법 모두 용접열원을 중심으로 폭 방향으로 열전달이 되는 것을 알 수 있으며 하이브리드 용접의 경우 전류의 크기가 커질수록 용융부의 최고온도가 더 높고 용착금속부 및 열영향부의 영역이 다소 넓게 형성되나 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. 레이저 용접의 경우와 열이력을 비교해 보면 레이저 용접의 경우 용착금속부와 열영향부가 하이브리드 용접의 경우보다 다소 작게 형성되나 냉각구배가 훨씬 크게 나타나고 있다. 이는 용접잔류응력의 형성에 큰 영향을 줄 것으로 사료된다.



(a) Hybrid welding(specimen 1)



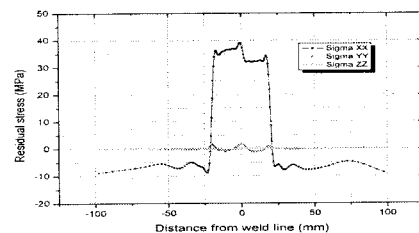
(b) Hybrid welding(specimen 2)



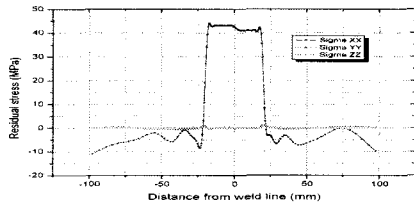
(c) CO₂ laser welding

Fig. 6 Result of thermal history

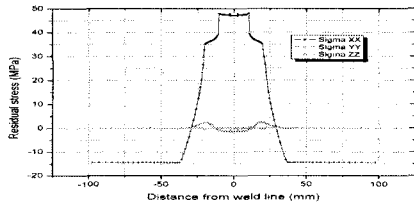
Fig. 7은 각 용접법에 의한 열탄소성 해석 후 표면으로부터 0.5 mm 지점에 대한 용접잔류응력 분포를 나타낸 그림이다. 이 때 용접잔류응력 분포 특성을 보면 용접선 길이방향 성분인 σ_x 는 시편의 두께 방향에 걸쳐 용접부에서 큰 인장값을 보이고 폭 방향 성분 σ_y 는 압축응력 상태를 보이며 두께방향 응력 성분 σ_z 는 그 크기가 아주 작게 분포하였다. 하이브리드 용접시 전압이 커질 경우 용접부의 잔류응력 분포 영역 및 값이 크다. 또한 레이저 용접의 경우와 비교해 보면 레이저 용접부에서 용접잔류응력의 값이 커짐을 알 수 있는데 이는 레이저 용접이 하이브리드 용접보다 용접 후 냉각속도가 빠르는데 그 요인이 있다고 사료된다.



(a) Hybrid welding(specimen 1)



(b) Hybrid welding(specimen 2)



(c) CO₂ laser welding

Fig. 7 Result of welding residual stress

3.2 인장, 샤르피 충격 및 경도시험 결과

인장시험의 경우 모든 시험편에서 파단이 용접부가 아닌 모재부에서 발생하였고 모재의 경우보다 더 높은 600-700Mpa 사이의 파단강도를 갖는 것으로 보아 용접부는 건전하다고 판단되어지며 Table 3에 그 결과를 나타내었다.

0℃와 -20℃에서 longitudinal 방향으로 샤르피 충격 시험한 결과치를 Table 4에 나타내었다. 결과를 살펴보면 ASTM 기준인 25J이상의 충격치를 얻었으며 레이저 용접과 비교해 보면 레이저 용접부는 -20℃에서 하이브리드 용접부 보다 충격치가 작음을 알 수 있었다. 이는 레이저 용접의 경우 하이브리드 용접보다 냉각구배가 크기 때문으로 사료된다. 또한, 두 용접부의 충격 부위가 완전히 파괴되지 않은 이유는 파괴 경로가 용착금속부에서 모재로 그 경로가 변화하는 현상(FPD: Fracture Path Deviation)이 나타났기 때문이며 이는 하이브리드 및 레이저 용접부에서의 용착금속부와 열영향부의 폭이 좁은데 기인하는 레이저 용접의 특성으로 사료된다.

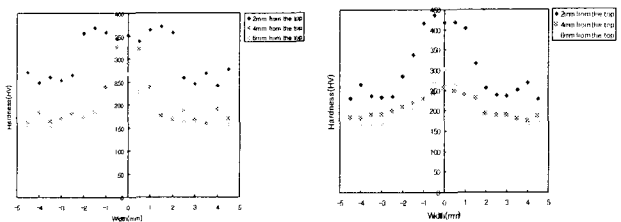
Table 3 Result of tensile test

| 시험편 종류 | 항복강도(Mpa) | 파단강도(Mpa) |
|-----------------------|-----------|-----------|
| Base Metal | 300 | 565 |
| Hybrid(Specimen 1) | 495 | 657 |
| Hybrid(Specimen 2) | 530 | 700 |
| CO ₂ laser | 515 | 690 |

Table 4 Results of charpy impact test

| 시험편 종류 | 충격 흡수 에너지(J) | |
|-----------------------|--------------|------|
| | 0℃ | -20℃ |
| Hybrid(Specimen 1) | 38.4 | 28.7 |
| Hybrid(Specimen 2) | 43.6 | 30.4 |
| CO ₂ laser | 40.6 | 23.2 |

비커스 경도측정을 각각의 용접부 단면에서 0.5mm 간격으로 실시한 결과를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 그 결과 하이브리드 용접의 경우 아크의 영향을 받은 용접부 윗부분에서 레이저의 영향을 받은 아래 부분보다 경도값이 크게 나타났으며 용착금속 보다 열영향부에서 경도값이 다소 크게 나타났다. 이는 상하부의 냉각구배 차이에 의해 조직성장의 차이를 보여 경도에 영향을 주는 것으로 사료된다. 또한 하이브리드 용접부의 열영향부에서 최고 368Hv의 값이 나타나고 레이저 용접부의 열영향부에서 430Hv의 최고값을 보임으로써 하이브리드 용접부에서 레이저 용접부 보다는 경도값이 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 수치해석 결과에서 본 것처럼 레이저 용접의 경우 하이브리드 용접보다 냉각구배가 훨씬 크기 때문으로 사료된다.



(a) Hybrid welding (b) CO₂ laser welding
Fig. 8 Result of hardness test

5. 결 론

유한요소 수치해석을 통하여 하이브리드 및 레이저 용접부의 용접 열 분포 및 용접잔류응력 분포 특성 결과와 기계적강도(인장, 충격시험)시험 결과에 대하여 비교 검토한 결과 하이브리드 용접이 레이저 용접에 비해 양호한 특성을 가짐을 알 수 있었으며 향후 보다 세밀한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

방한서, 이진욱 (2005). "A Study on the Reliability Evaluation of Hybrid(CW Nd:YAG Laser + MIG) Welding of Butt Joints in Al -Mg Alloy", 한국해양공학회 추계학술대회, pp 575.
 방한서, 김영표 (2003) "유한요소해석을 위한 하이브리드 용접 입열모델 선정에 관한 기초적 연구", 대한용접학회 Vol 41, pp. 36-38
 Steen Erik Nielsen, M. Myrup Andersen, Jens Klastrup Kristensen (2002) "Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminium," IIW-DOC. X II, pp. 258-272.