

선체구조용 A급 강재의 하이브리드 용접에 대한 열 및 역학적 특성에 관한 연구

오종인* · 김영표* · 박호경* · 방한서**

*조선대학교 일반대학원 선박해양공학과

**조선대학교 공과대학 항공조선공학부

A Study on the Thermal and Mechanical Characteristic of Hybrid Welded Ship Structure A-grade Steel

CHONG-IN OH*, YOUNG-PYO KIM*, HO-KYUNG PARK* 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, there has been considerable research in the field of application of Laser-Arc hybrid welding for superstructures, such as ship-structures, transport vehicles etc. However, the study on heat distribution and welding residual stress of hybrid weld by numerical simulation leaves much to be desired. Therefore, in this study, an optimized welding condition and numerical simulation for hybrid welding, using previous numerical analysis to calculate the heat source for hybrid welding, has been analyzed. For this purpose, fundamental welding phenomena of the hybrid process, using Laser and, is investigated. In order to calculate temperature and residual stress distribution in hybrid welds, a finite element heat source model is developed on the basis of experimental results and characteristics of temperature. Residual stress distribution in hybrid welds are understood from the result of simulation, and compared with 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, 가공 허용오차(Fit-up)정도를 완회시키는 장점을 가진 용접법이다 (방한서와 김영표 등, 2003).

최근 선박과 같은 대형 구조물 제조 공정에 하이브리드 용접법을 적용하려는 노력이 이루어지고 있고 이에 대한 지속적인 연구를 하고 있으나 현재까지 하이브리드 용접부에 대한 용접성을 파악할 수 있는 수치해석 연구가 아크용접에 비해 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 선박 제조시 사용되고 있는 조선용 강재 A급(A-grade) 강판에 대하여 하이브리드 용접 시험편을 제작하고 시험편 제작시 사용된 용접조건과 하이브리드 용접 특성을 고려하여 선정한 용접열원모델을 이용하여 열적 특성 및 용접잔류응력을 수치 해석하였으며 용접 시험편에 잔류응력 및 기계적 강도 특성(인장, 충격 등)을 측정하여 비교 검토함으로써 하이브리드 용접부의 최적의 용

접조건을 제시하고 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 (방한서와 이진욱 등, 2005).

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

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

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

또한, 열탄소성 해석을 위해서는 식 (3)에 보인 것과 같이 전변형률(ϵ)에 탄성변형률(ϵ^e)과 소성변형률(ϵ^p) 그리고 열응력에

교신저자 오종인: 광주광역시 동구 서석동 375번지

062-230-7137 chong1015@hotmail.com

Table 1 Hybrid welding condition

Specimen number	1	2	3	
GMAW	Voltage(V)	20	25.2	30
	Current(A)	198	292	378
CO ₂ Laser	Power(KW)		8	
	Welding speed(m/min)		1.5	
	Wire feeding speed	6	9.9	14.1
	Material	A-grade steel		
	Joint type	Butt		
	Gas	He 50%, Ar 28%, CO ₂ 12%		

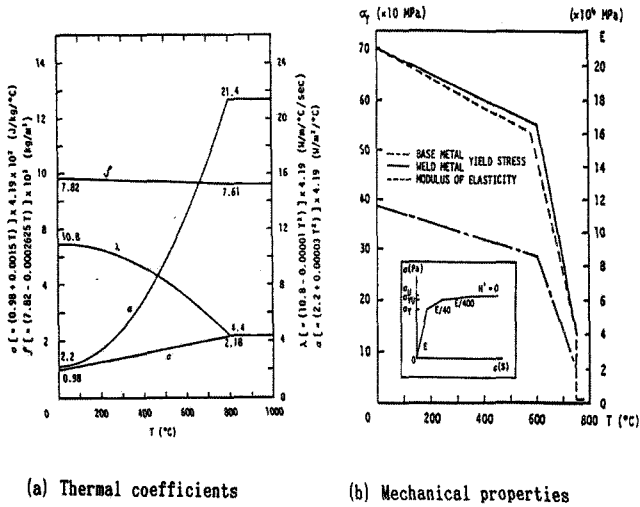


Fig. 1 Temperature dependency of material property

의한 변형률(ϵ^t)이 포함되도록 하였다.

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

본 연구에서는 4절점 아이소파라메트릭(Isoparametric) 요소를 사용하고 용접열원을 순간열원으로 가정하여 수치 해석하였고 이 때 사용된 용접조건은 실제 시험편을 제작하기 위해 사용되었던 조건을 고려하였으며 이는 Table 1에 나타내었다.

또한, 해석시 사용된 강의 재질로는 조선용 A급 강재를 사용하였고 용융지의 유동, 키홀 내부의 증발현상, 잠열 및 금속상변태는 고려하지 않았으며 고려된 재료의 실제 온도 의존성 물리정수 및 기계적 물성치를 Fig. 1에 나타내었다. 모델의 열 및 열탄소성 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소 프로그램을 사용하였으며 실제 용접현상을 고려한 분리형 Volume-volume heat source를 용접열원 모델로 선정하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 시험편의 해석을 위하여 사용되어진 모델 형상은 Fig. 3에 보인 것과 같이 전체모델(총 절점수 1965개, 총 요소수 1820개, 최소 요소크기 0.2mm×0.5mm)을 이용하였으며 열탄소성 해석의 경계 조건은 Fig. 4에 나타내었다.

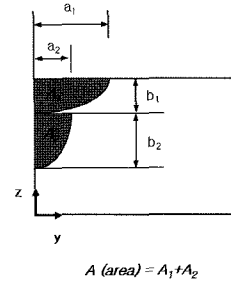


Fig. 2 Schematic diagram of heat source

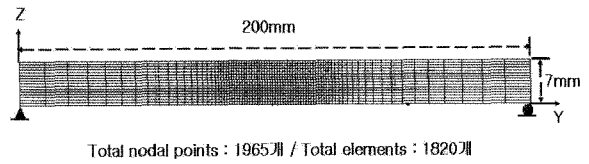


Fig. 3 Schematic mesh division

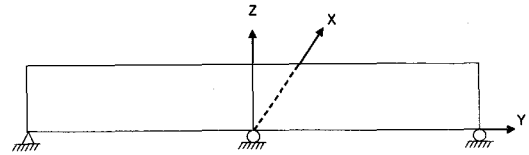


Fig. 4 Boundary condition for thermal elasto-plastic analysis

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.(Kaplan et al., 1997)

CO₂ Laser (Uniform cylinder flux)

$$Q = \eta_L \frac{P}{1000 \cdot W_s} \quad (4)$$

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

GMAW (Uniform flux)

$$Q = \eta_A \frac{V \cdot I}{1000 \cdot W_s} \quad (5)$$

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

2.2 실험조건 및 방법

하이브리드 용접시험편에 대하여 스트레인게이지를 이용 X축에 대한 잔류응력을 측정하였으며 그 값을 수치해석 결과와 비교해 보았다. Fig. 5는 잔류응력측정을 위한 스트레인게이지

를 부착한 사진을 보여주고 있다. 또한 하이브리드 용접부에 대한 기계적 강도특성을 알아보기 위해 각종 성능시험(인장, 샤르피 충격 테스트 등)을 실시하였으며 그 시험편 제작시 고려된 규격을 Fig. 6에 나타내었다. (Nielsen et al, 2002)

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 3가지 Hybrid 용접부에 대한 열 분포 해석을 수행하여 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과를 살펴보면 용접열원을 중심으로 폭 방향으로 열전달이 되는 것을 알 수 있으며 전류의 크기가 커질수록 용융부의 최고온도

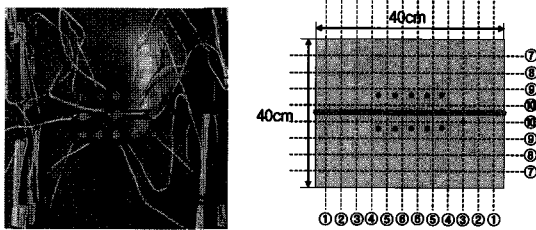
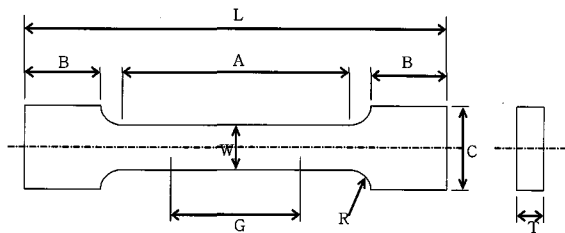
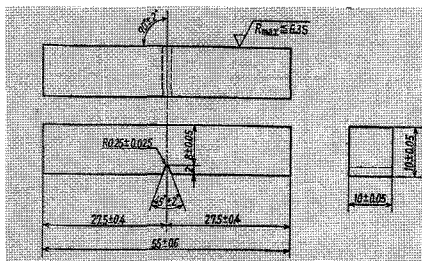


Fig. 5 Measurement of residual stress by strain gauge



- G - Gage length : 25.0±0.08mm
 - W - Width : 6.25±0.05mm
 - T - Thickness : 6mm
 - R - Radius of fillet, min : 6mm
 - L - Over-all length, min : 100mm
 - A - Length of reduced section, min : 32mm
 - B - Length of grip section, min : 32mm
 - C - Width of grip section, approximate : 10mm
- (a) Specimen of tensile test (ASTM A370)



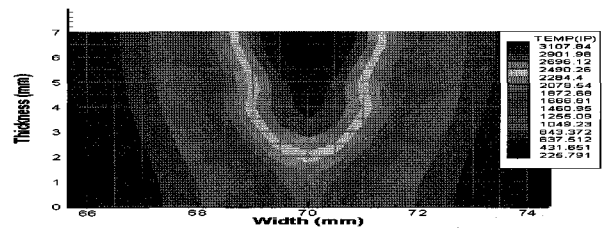
(b) Specimen of impact test(KSB0821)

Fig. 6 Schematic specimen for experiments

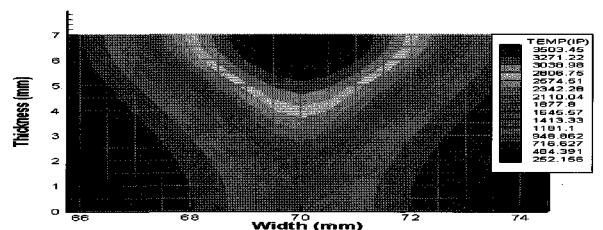
가 더 높고 용착금속부 및 열영향부의 영역이 훨씬 넓게 형성됨을 볼 수 있다. 또한, 용접 상층부에서는 아크의 영향이 하부에서는 레이저 키홀에 대한 영향을 보여주고 있으며 중공업에서 사용되고 있는 FCAW 용접부보다 열영향부의 영역이 작게 나타나고 냉각 구배가 큰 현상을 보였다.

Fig. 8은 각 용접법에 의한 열탄소성 해석 후 표면으로부터 0.5mm 지점에 대한 용접잔류응력 분포를 나타낸 그림이다. 이때 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. 또한 전압이 커질 경우 나머지 경우보다 용접부의 잔류응력의 분포 영역 및 값이 크게 나타났는데 이는 입열량의 크기에 기인한 결과로 사료된다. 또한 기존의 FCAW 용접부 보다 잔류응력의 분포 영역 및 크기가 작게 나타남을 알 수 있었는데 이는 FCAW 용접부에 비해 좁은 열영향부의 생성과 보다 큰 냉각 구배 때문으로 사료된다.

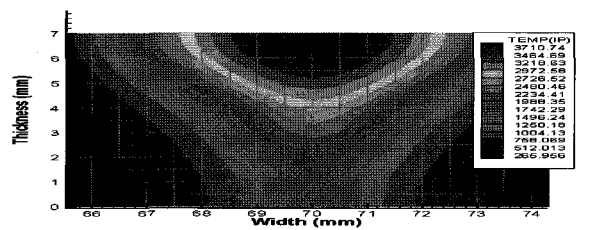
스트레인 게이지를 이용 X축에 대한 잔류응력을 측정하였으며 그 측정값을 수치해석 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다. 수치해석 결과와 비교해 보면 측정된 각 포인트의 값들이 유사함을 보임으로서 열탄소성 수치해석의 재현성에 좋은 결과라 할 수 있겠다.



(a) Specimen 1

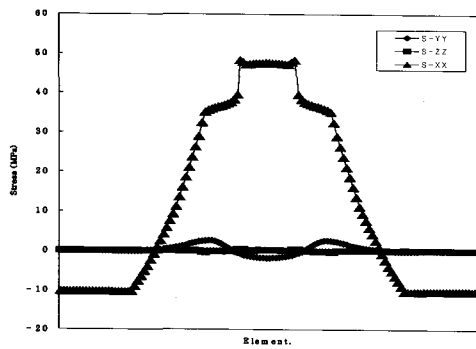


(b) Specimen 2

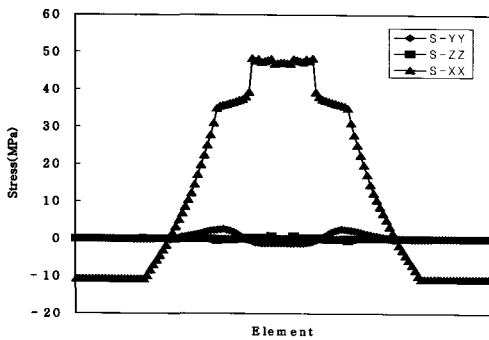


(c) Specimen 3

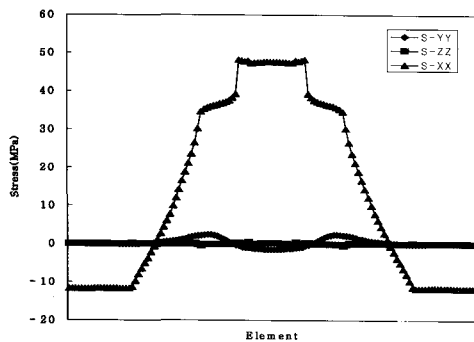
Fig. 7 Contour of heat distribution



(a) Specimen 1



(b) Specimen 2



(c) Specimen 3

Fig. 8 Welding residual stress

Table 2 Residual stress results (unit: MPa)

Point	Specimen 1		Specimen 2		Specimen 3	
	Sim. value	Exp. value	Sim. value	Exp. value	Sim. value	Exp. value
La-1	-10.3	-8.34	-10.7	-9.25	-11.7	-10.4
L-3	21.1	20.85	22.4	21.71	23.6	25.75
C-1	47.6	48.73	46.9	47.8	47.6	48.48
R-3	21.1	28.61	22.4	27.53	23.6	29.45
Ra-1	-10.3	-8.07	-10.7	-8.19	-11.7	-10.35

3.2 인장 및 샤르피 충격시험 결과

인장시험의 경우 모든 시험편에서 파단이 용접부가 아닌 모재부에서 발생하였고 하이브리드 용접 시험편은 600~700MPa 사이의 파단강도를 갖는 것으로 보아 용접부는 건전하다고 판단되어지며 Fig. 9와 Table 3에 그 결과를 나타내었다.

0°C에서 Longitudinal 방향으로 샤르피 충격 시험한 결과치를 Fig. 10과 Table 4에 나타내었다. 결과를 살펴보면 ASTM 기준인 25J이상의 충격치를 얻었으며 대체적으로 50~60J 사이의 충격치를 얻을 수 있었다. 용접부가 충격량 값이 크게 나타나는 이유는 파괴 경로가 용착금속부에서 모재로 그 경로가 변화하는 현상(FPD: Fracture path deviation)이 나타났기 때문이며 이는 하이브리드 용접부에서의 용착금속부와 열영향부의 폭이 좁은데 기인하는 레이저 용접의 특성으로 사료된다.

따라서 이상의 인장 및 충격 시험 결과를 볼 때 하이브리드 용접부의 용접성이 매우 우수함을 알 수 있었다.

Table 3 Result of tensile test

Type of specimen	Yield stress(MPa)	Fracture strength(MPa)
Base metal	300	565
Specimen 1	495	657
Specimen 2	540	702
Specimen 3	530	700

Table 4 Results of Charpy impact test

Type of specimen	Impact energy(0°C, J)	
Base metal	77.6	
Specimen 1	72.6	45.4
Specimen 2	57.0	53.1
Specimen 3	66.7	48.5

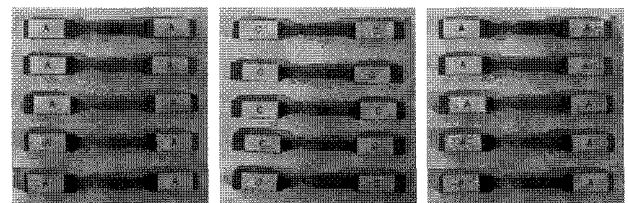


Fig. 9 Specimen of tensile test

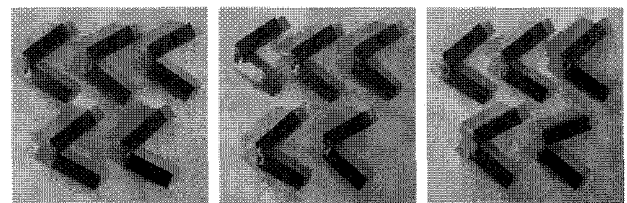


Fig. 10 Specimen of charpy impact test

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 하이브리드 용접부의 열해석을 위한 입열 모델 선정에 있어서 열원 체적 내에서의 입열량 분포를 최적화한 하이브리드 용접열원을 제시할 수 있었다.
- (2) 개발된 유한요소 프로그램을 이용하여 용접 열 분포 및 용접잔류응력 분포 특성에 대한 수치해석 결과 실제 하이브리드 용접부에서의 열거동과 흡사한 형태를 보였으며 중공업에서 사용되고 있는 FCAW 용접부 보다 잔류 응력 분포와 크기가 작게 나타났는데 이는 레이저 영향에 의한 좁은 열영향부의 형성과 냉각 구배가 훨씬 크기 때문으로 사료된다
- (3) 스트레인게이지를 이용 X축에 대한 잔류응력을 측정하여 수치해석치와 비교한 결과 측정된 각 포인트의 값 들이 유사함을 보임으로서 수치해석의 재현성에 좋은 결과라 할 수 있겠다.
- (4) 하이브리드 용접부의 기계적강도(인장, 충격시험)시험 결과 용접성이 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 조선대학교와 한국생산기술연구소(KITECH)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지

원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 방한서, 김영표 (2003) "유한요소해석을 위한 하이브리드 용접 입열모델 선정에 관한 기초적 연구", 대한용접학회 Vol 41, pp 36-38.
- 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.
- Kaplan, A.F.H., Zimmerma, J., Schuocker, D. and Spruzina, W. (1997). "Laser beam welding of aluminium alloys," International Conference Welding Technology, Materials and Materials Testing, Fracture Mechanics and Quality Management, Vienna University of Technology, pp 147-156.
- Nielsen, S.E., Andersen, M.M. and Kristensen, J.K. (2002). "Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminium," IIW-DOC.XII, pp 258-272.

2006년 8월 21일 원고 접수

2007년 12월 19일 최종 수정본 채택