

수치해석을 이용한 하이브리드 용접부의 열분포 및 용접잔류응력 분포에 관한 연구

A Study on the Heat Distribution and Welding Residual Stress of Hybrid Laser-MIG Weld by Numerical Simulation

오종인**, 방한서***, 김영표**, 이진욱**

** 조선대학교 일반대학원 선박해양공학과

*** 조선대학교 공과대학 항공·조선공학부

ABSTRACT : Recently many research works are going on in the field of application of Laser-Arc hybrid welding for superstructures such as shipstructures. 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 by using previous numerical analysis which was used to calculate the heat source for hybrid welding has been analyzed.

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 아크 용접의 저렴한 가격과 고출력, 핏업(fit-up)정도를 완화시키는 장점을 이용한 용접법이다. 특히 출력대비 비용이 너무 높고 자동화에 있어서 정확한 핏업을 요구하는 레이저의 단점과 용접속도가 느리고 용접변수에 따라 용접부 표면에 언더컷(Undercut)이나 오버랩(Overlap)등이 발생하며 용접내부에 기공이나 균열이 발생하는 아크 용접의 단점을 상호 보완함으로써 용접부의 품질 및 생산성을 향상시킬 수 있는 이상적인 용접방법이다.

최근 선박과 같은 대형 구조물 제조 공정에 하이브리드 용접법을 적용하려는 노력이 이루어지고 있고 이에 대한 지속적인 연구를 하고 있으나 현재까지 하이브리드 용접부에 대하여 수치해석에 의한 열분포 및 역학적 특성의 연구가 아크용접에 비해 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 수치해석을 통해 선정된 용접열원모델을 이용하여 열적 특성 및 용접잔류응력을 수치해석 함으로써 하이브리드 용접부의 최적의 용접조건을 제시하고 용접성 및 재현성을 확보하고자 하였다.

2. 해석이론 및 조건

2.1 해석 이론

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

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

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

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

또한, 열탄소성 해석을 위해서는 식 (3)에 보인 것과 같이 전변형률(ϵ)에 탄성변형률(ϵ^e)과 소성 변형률(ϵ^p) 그리고 열응력에 의한 변형률(ϵ^t)이 포함되도록 하였다.

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

2.2 해석 조건

본 연구에서는 용접열원을 순간열원으로 가정하였으며 4절점 Isoparametric 요소를 사용하여 수치 해석하였고 이때 사용된 용접조건은 실제 시험편을 제작하기 위해 사용되었던 조건을 고려하였으며 이는 Table1에 나타낸 것과 같다.

해석시 사용된 재질로는 기계구조용 연강을 사용하였고 용융지의 유동, 킥홀 내부의 증발현상, 잠열 및 금속상변태는 고려하지 않았으며 고려된 재료의 실제 온도 의존성 물리정수 및 기계적 물성치를 Fig.1에 나타내었다. 또한, 모델의 열 및 열탄소성 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소 프로그램을 사용하였고 기존 열 해석을 통해 가장 좋은 결과를 보여준 분리형(Split Type) Volume-Volume heat source를 용접열원모델로 선정하였으며 Fig.2 이다.

Table1 Hybrid Welding Condition

| | | | | |
|-----------------------|---------|------------|-------|-------|
| CO ₂ Laser | Power | 8 kW | | |
| GMAW | Voltage | 30 V | | |
| | Current | 340 A | 360 A | 400 A |
| Welding speed | | 1.5 m/min | | |
| Material | | Mild steel | | |
| Joint type | | Butt | | |
| Gas | | He 100% | | |

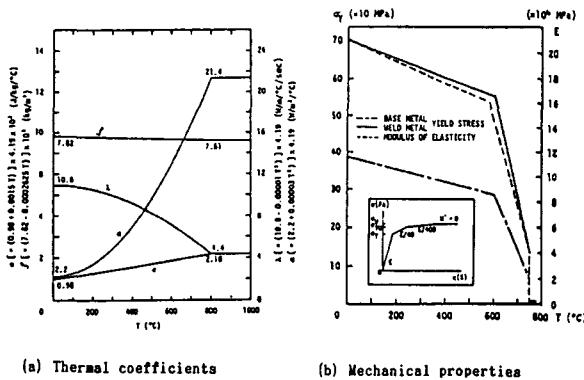
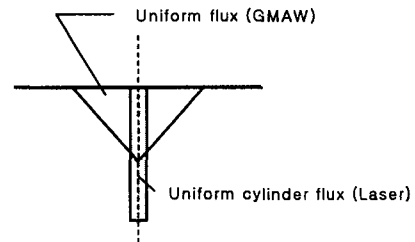


Fig.1 Temperature dependency of material property



Volume-Volume heat source
Fig.2 Schematic diagram of heat source

용접열원모델에 대한 입열량을 계산하기 위해 다음의 식 (4)와 식 (5)를 사용하였으며, 각 용접법에 따른 용접효율은 CO₂레이저의 경우 60%, GMAW의 경우 80%로 하였다.

CO₂ Laser(Uniform cylinder flux)

$$Q = \eta_L \frac{P}{1000 \cdot W_s} \tag{4}$$

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

GMAW(Uniform flux)

$$Q = \eta_A \frac{V \cdot I}{1000 \cdot W_s} \tag{5}$$

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

해석을 위해 사용된 모델은 Fig.3에 나타낸 것과 같이 실제 시험편 중앙부 단면에서 2차원 1/2모델(100mm×10mm)에 대하여 해석하였고 전체 요소수는 2980개 절점수는 3150개로 하였으며, 열탄소성 해석을 위한 경계조건은 Fig.4와 같다.

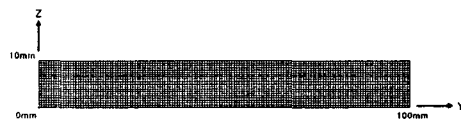


Fig.3 Schematic mesh division

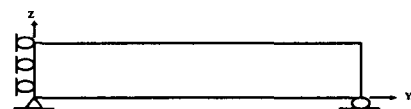


Fig.4 Boundary condition for thermal elasto-plastic analysis

3. 해석결과 및 고찰

3.1 용접열분포 특성

본 연구에서는 시험편 제작시 용접속도, 전압, 보호가스 및 레이저출력은 동일하게 하고 MIG 용접에 대한 전류를 340A, 360A, 400A로 변화를 주어 Butt 용접 시험편을 제작한 조건에 대한 Hybrid 용접부의 열분포 해석을 수행하여 Fig.5에 나타내었다. 이 그림을 살펴보면 용접 열원을 중심으로 폭방향으로 열전달이 되는 것을 알 수 있으며 전류의 크기가 커질수록 용융부의 최고온도가 더 높고 용착금속부 및 열영향부의 영역이 훨씬 넓게 형성됨을 볼 수 있다.

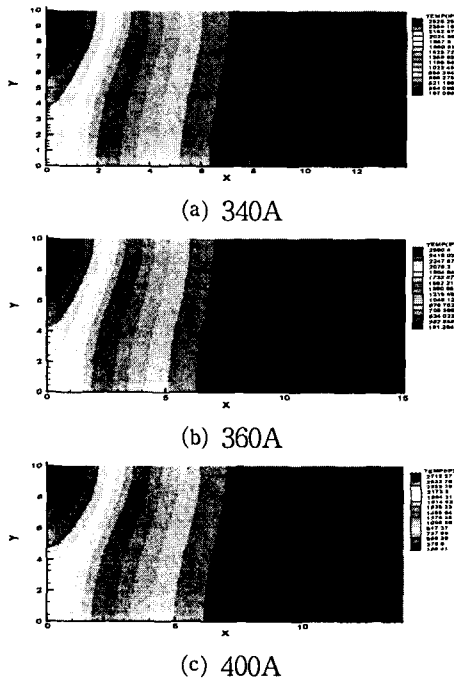


Fig.5 Contour of Heat Distribution

3.2 용접잔류응력 분포 특성

Fig.6은 각 용접법에 의한 열탄소성 해석 후 표면으로부터 0.5mm 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. 또한 전류가 400A인 경우 나머지 두 경우보다 용접부의 잔류응력이 크게 나

타났는데 이는 입열량의 크기에 기인한 결과로 사료된다.

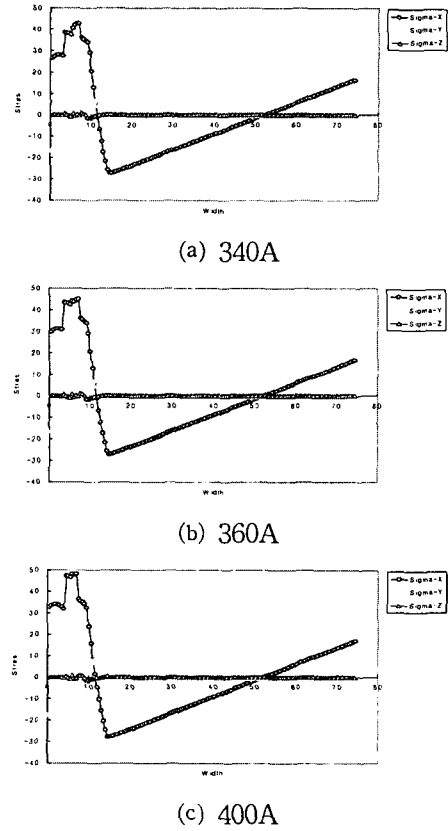


Fig.6 Welding Residual Stress(Z=9.5mm)

4. 결 론

본 연구에서는 Hybrid 용접부의 최적 용접 조건을 제시하기 위하여 우선 3가지 조건의 시험편을 제작하여 수치해석을 수행함으로써 역학적 특성을 예측할 수 있었다. 향후 본 결과를 기초로 제작된 시험편의 실험(잔류응력 측정, 인장, 압축, 굽힘등)을 통하여 Hybrid 용접부의 최적 용접조건을 선정해 나아가고자 한다.

참고문헌

1. William M steen : Arc augmented laser processing of materials, J. Appl. Phys. Vol 51, No11(1980), 5636-5641
2. K.W.Carlson : The role of heat input in deep penetration laser welding, ICALEO (1985), 49-57
3. 방한서, 김영표 : 유한요소해석을 위한 하이브리드 용접 입열모델 선정에 관한 기초적 연구, 대한용접학회 Vol 41 (2003), 36-38