

조선용 후판 AH32 강에 대한 SAW 및 Hybrid(CO₂ Laser+MIG) 맞대기 용접부의 열 및 역학적 특성 비교

방한서* · 오종인** · 방희선* · 노찬승*** · 이윤기*** · 봉현수** · 이정수**

*조선대학교 공과대학 선박해양공학과

** (주)한진중공업 기술본부 산업기술연구팀

***조선이공대학

The Comparison of the Thermal and Mechanical Characteristic in Butt Joint for Ship Structure Thick Plate AH32 Steel by SAW & Hybrid(CO₂ Laser+MIG)Welding

Han-Sur Bang*, Chong-In Oh**, Hee-Seon Bang*, Chan-Seung Ro***, Yoon-Ki Lee***, Hyun-Soo Bong** and Jeong-Soo Lee**

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

**Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd., KORDI, Busan, Korea

***Chosun College of Science & Technology, Gwangju 501-744, Korea

*Corresponding author : cioh74@hanjinsc.com

(Received June 25, 2008 ; Revised August 6, 2008 ; Accepted October 16, ; 2008)

Abstract

In this paper concentrate on the comparison of the thermal and mechanical characteristics in Butt joint of ship structure AH32 steel by using hybrid welding and conventional SAW. For this purpose, fundamental welding phenomena of hybrid process using CO₂ Laser and MIG is investigated by the experiments and characteristics of thermal and welding residual stress distribution of welded joint in SAW and hybrid welding are understood from the result of FE numerical simulation and experimental values. From the result of this study, it is understood that Laser-MIG hybrid welding have high potential, make substantial saving of time and manufacturing cost and may proves its self robust in the butt joining of thick AH32 steel ship structural plate in the near future.

Key Words : Hybrid Welding(CO₂ Laser+MIG) Process, Submerged Arc Welding, Ship Structure AH32 steel, Automated Production Line, Thermal and Mechanical Characteristic, Welding Residual Stress, FE Numerical Simulation

1. 서 론

최근 중공업 및 조선 산업과 같은 대형 구조물 제조 공정에서는 경량화, 단위 용접공정의 생산성 향상, 품질 향상 및 정도관리 (열변형 방지)를 통한 공수절감 등을 목적으로 새로운 용접방법에 대한 연구를 하고 있다. 이러한 용접방법으로 레이저 용접의 깊은 용입과 빠른 용접속도 등의 장점과 아크용접의 저렴한 가격과

고출력, 가공허용오차(fit-up) 정도를 완화시키는 장점 등을 승화시킨 신기술로써 레이저-아크 하이브리드 용접을 개발하고 유럽, 미국, 일본 등의 선진국에서는 그에 대한 많은 연구를 수행하고 있다. 대표적으로 독일의 Meyer Werft사의 경우 90년대부터 하이브리드 자동 용접 시스템을 도입하여 여객선 등의 외판용접에 활용하고 있다. 이에 국내에서도 하이브리드 용접의 산업 현장 적용 가능성을 검토하여 실용화를 하고자 한국생산기술연구원, 포항산업과학연구원, 현대중공업, 한양대

학교, 조선대학교, 항공대학교 등 산학연에서 하이브리드 자동화 용접 시스템에 대한 연구를 꾸준히 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 중공업에서 하이브리드 용접의 현장 적용에 대한 연구의 일환으로 기존에 사용하고 있는 SAW 용접법과 신기술로 연구되고 있는 하이브리드(CO₂ Laser+MIG) 용접법을 이용하여 조선용 AH32강(15t)에 대한 최적 용접 조건 선정 후 맞대기 용접을 수행하였으며 시험편 제작시 사용된 각각의 용접법에 따른 용접 조건과 용접 특성 등에 의해 선정된 용접 열원모델을 이용하여 유한요소 수치 해석을 하였다. 또한 용접잔류응력 수치해석 결과와 X-ray 잔류응력 측정기를 통한 용접잔류응력 측정 결과를 비교 검토함으로써 아크 및 하이브리드 맞대기 용접부의 역학적 특성을 파악하고자 하였다. 아울러 각 용접법에 따른 용접부의 기계적 특성(경도, 인장, 굽힘, 충격 등) 평가를 통하여 하이브리드 용접부의 용접성 및 적용 가능성을 입증하고자 하였다.

2. 최적 용접조건 선정

2.1 SAW 용접 시험편 제작

조선용 AH32 15t 강재에 대하여 SAW 용접을 이용하여 맞대기 용접을 수행하였다. 용접부의 시험편 크기와 단면 형상을 Fig. 1에 나타내었으며 용접 시험편 제작시 중공업 현장에서 사용되고 있는 조건을 고려하여 Turn over 2pass 용접을 수행하였다. Table 1은 시험편 제작시 사용된 최적의 용접 조건을 보여 주고 있다.

2.2 Hybrid 용접 시험편 제작

하이브리드 맞대기 용접 시험편을 제작하기 위해 한국생산기술연구원에 구축되어 있는 12kW급 CO₂ laser-MIG 하이브리드 시스템을 이용하여 용접을 수행하였다. Fig. 2는 그 시스템과 하이브리드 용접부의 단면형상을 보여주고 있다. 시험편 제작시 AH32 두께 15t 강에 대하여 레이저의 플라즈마 영향, 보호가스의 영향, 레이저-아크간의 거리, 레이저 Power에 따른 용접속도 등 여러 변수들을 고려하여 최적의 용접조건을

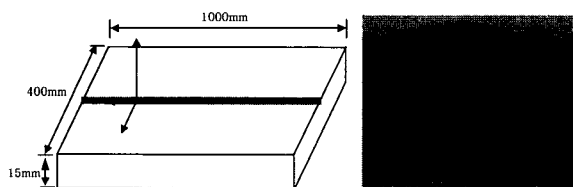


Fig. 1 Specimen size & cross section for SAW

Table 1 Welding condition for SAW

| Item | Welding condition | |
|------------------------|--------------------|-------------|
| | Top Side | Bottom Side |
| Welding rod | L-8(4.8mm) + S-707 | |
| Pass | 2pass | |
| Current (A) | 840 | 900 |
| Voltage (V) | 38 | 38 |
| Welding speed (mm/min) | 610 | 610 |

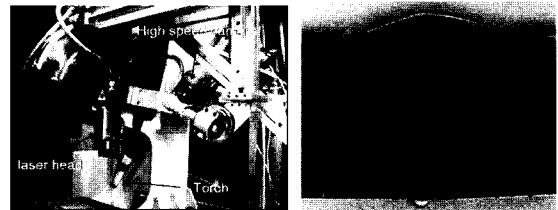


Fig. 2 Welding system & cross section for hybrid welding

Table 2 Hybrid welding condition

| Item | Welding condition | |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| CO ₂ Laser power (KW) | 12 | |
| MIG | Wire Type | AWS A5.18 ER70S-G |
| | Voltage (V) | 29 |
| | Current (A) | 300 |
| | CTWD (mm) | 20 |
| | Wire feeding speed (mm/min) | 9.9 |
| Welding speed (mm/min) | 800 | |
| Interspacing (mm) | 4 | |
| Gap (mm) | 0 | |
| Shielding gas | He80%, Ar8%, CO ₂ 12% | |

선정하였으며 Table 2에 나타내었다.

3. 유한요소 수치해석 및 실험 방법

3.1 수치해석 이론 및 방법

3.1.1 이론적 배경

온도의 시간 및 공간의 분포는 식 (1)과 같이 2차원 비정상 열전도 지배방정식을 만족하며 경계조건으로서는 해석대상인 모델 내부로의 열전도와 대기 중으로의 열전달이 있는 것으로 하였다. 고체에서의 열전도 문제

는 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

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

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

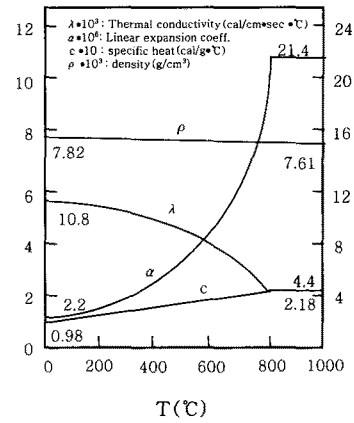
3.1.2 수치해석 방법

본 연구에서 수치 해석시 4절점 Isoparametric 요소를 사용하여 용접열원을 순간열원으로 가정하여 수치 해석하였다. 이때 사용된 용접조건은 Table 1과 2에 나타낸 바와 같이 실제 시험편을 제작하기 위해 사용되었던 조건을 고려하였으며 용융지의 유동, 키홀 내부의 증발현상, 잠열 및 금속 상변태는 고려하지 않았다. 해석시 고려된 재료의 실제 온도 의존성 물리정수 및 기계적 물성치를 Fig. 3에 나타내었으며 모델의 열 및 열탄소성 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소 프로그램을 사용하였다. Fig. 4에 보인 것과 같이 SAW 용접열원 모델로는 실제 용접현상을 고려하여 수치해석 하였으며 하이브리드 용접 열원 모델은 레이저와 아크의 실제 용접현상과 특성을 고려한 분리형 Volume-Volume heat source를 용접열원 모델로 선정하였다. 또한 모델 형상은 전체모델(총 절점수 2224개, 총 요소수 2070개, 최소 요소크기 0.5mm×0.5mm)을 이용하여 수치해석 하였고 열탄소성 해석시의 경계 조건은 Fig. 5에 나타내었다.

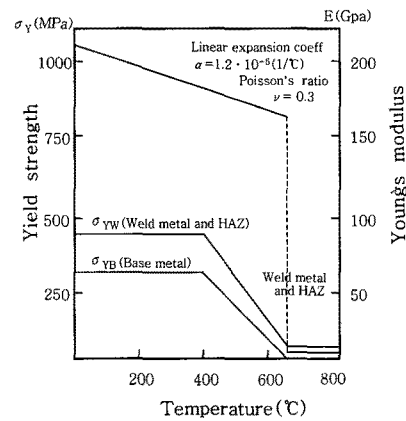
용접열원모델에 대한 입열량을 계산하기 위해 다음에 보여주고 있는 식 (4)와 식 (5)를 사용하였으며, 각 용접법에 따른 용접효율은 CO₂레이저의 경우 35%, GMAW의 경우 80%로 하였다.

CO₂ Laser (Uniform cylinder flux)

$$Q_{net} = \eta_L \frac{P}{v} \quad (4)$$

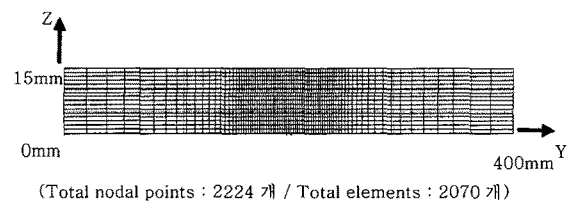


(a) Thermal coefficient



(b) Mechanical properties

Fig. 3 Temperature dependency of material property



(a) Hybrid welding (b) SAW

Fig. 4 Schematic mesh division & heat source

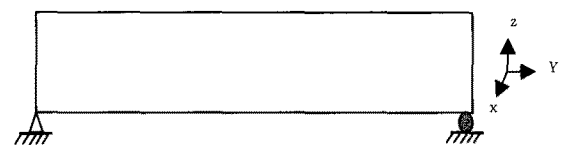


Fig. 5 Boundary condition for thermal elasto-plastic analysis

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

GMAW (Uniform flux)

$$Q_{net} = \eta_{arc} \frac{EI}{v} \tag{5}$$

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

3.2 실험 방법 및 조건

3.2.1 용접잔류응력 측정

SAW 및 하이브리드 용접시험편에 대하여 X-Ray 잔류응력 측정기를 이용하여 용접선 길이 방향에 대한 용접잔류응력을 측정하였으며 그 값을 수치해석 결과와 비교해 보았다. Fig. 6은 용접잔류응력 측정 장비와 측정된 위치를 보여주고 있다.

3.2.2 기계적 강도 특성 평가 시험

SAW 및 하이브리드 용접부에 대한 기계적 강도특성을 알아보기 위해 각종 성능시험(인장, 굽힘, 충격 시험)을 실시하였으며 그 시험편 제작시 고려된 규격을 Fig. 7에 나타내었다.

4. 수치해석 및 실험 결과

4.1 용접 열 분포 해석 결과

SAW와 하이브리드 용접을 이용한 맞대기 이음부의 열적특성을 규명하기 위해 개발된 열 분포 수치해석 프로그램을 이용하여 해석한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8은 용접 수행 후 상표면에서 1mm 떨어진 부분의 시간에 따른 온도분포와 용접 수행 2초 후 최고 온도분포를 나타낸 그림이다. 결과를 살펴보면 SAW 용접부에 비해 용착금속부와 열영향부의 크기가 하이브리드 용접부에서 훨씬 작게 나타났으며 열원 분포 형태가 SAW 용접에서는 반원형 등온분포 형상이

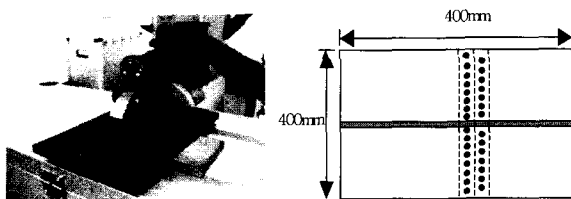
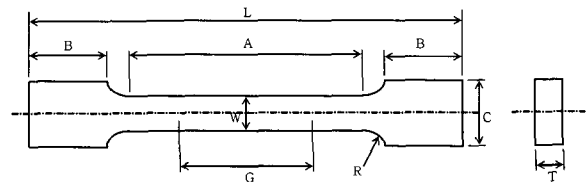
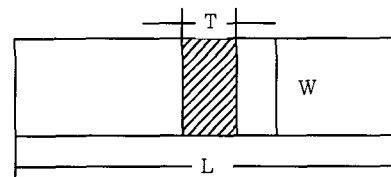


Fig. 6 Measurement of residual stress by X-ray



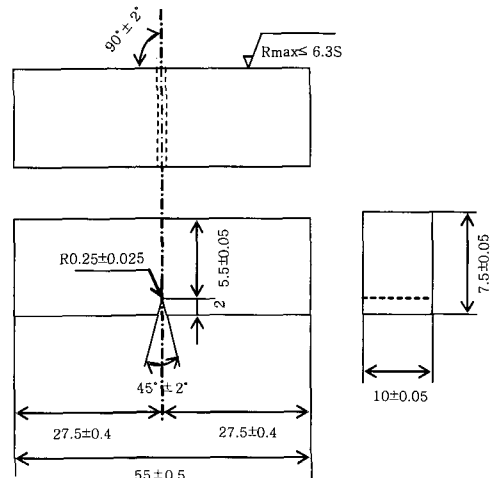
- G - Gauge length : 25.0±0.08mm
- W - Width : 6.25±0.05mm
- T - Thickness : 6mm
- R - Radius of fillet, min : 6mm
- L - Over-all length, min : 100mm
- A - Length of reduced section, min : 32mm
- B - Length of grip section, min : 32mm
- C - Width of grip section, approximate : 10mm

(a) Specimen of tensile test (ASTM A370)



- T : Original thickness of specimen
- W : 35mm over
- L : 250mm over

(b) Specimen of bending test (KSB0803)



(c) Specimen of impact test (KSB0821)

Fig. 7 Schematic specimen for experiments

하이브리드 용접에서는 선 열원 분포 형상이 나타났다. 또한 아크 용접보다 하이브리드 용접에서 최고 온도를 보이고 있다. 이는 용접 열이 발생하면서 이동하는 속도가 하이브리드 용접부에서 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 용착금속, 열영향부, 모재부의 열이력 곡선이다. 그 결과를 보면 하이브리드 용접이 용착금속부와 열영향부가 SAW의 경우에 비해 작게 형성되고 냉각구배가 크게 나타나 급격한 온도차를 보이고 있다. 이는 하이브리드 용접시 사용된 레이저 용접의 특성에 의한 것으로 사료된다.

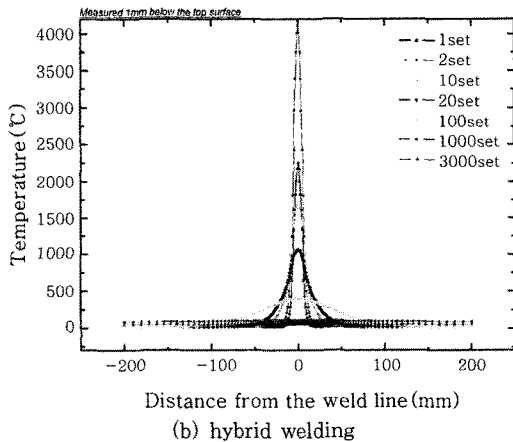
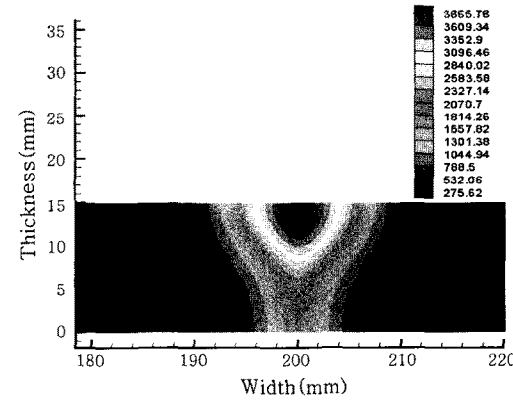
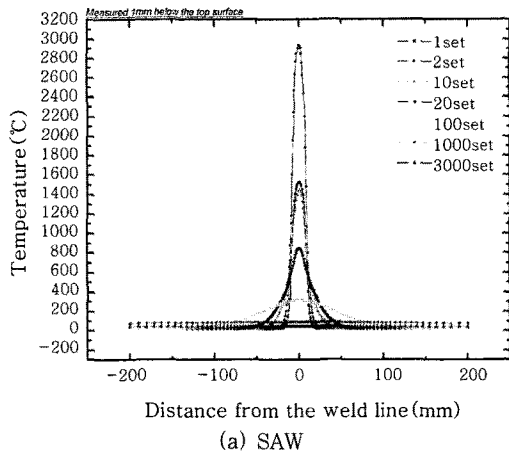
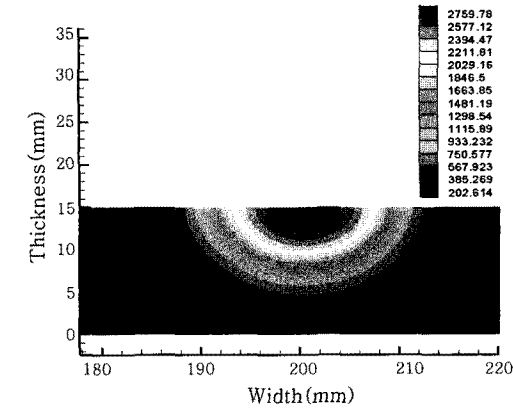
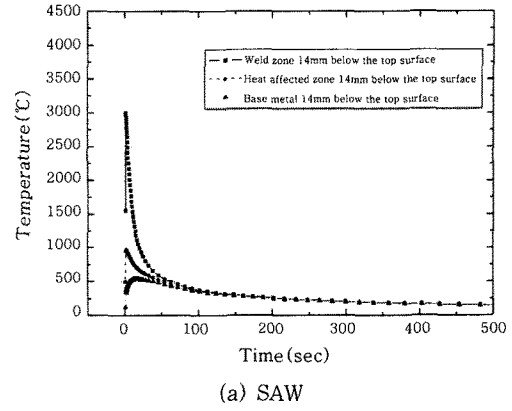
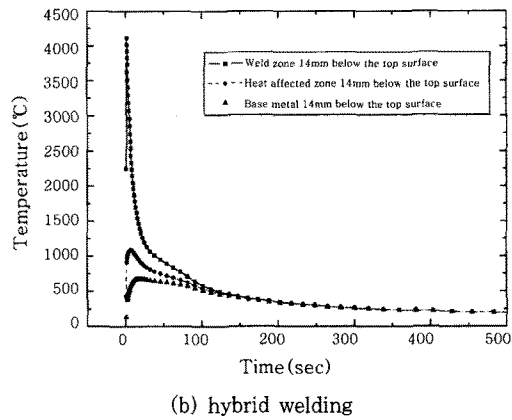


Fig. 8 Heat distribution according to time



(a) SAW



(b) hybrid welding

Fig. 9 Thermal history graph

4.2 용접잔류응력 해석 결과

SAW와 하이브리드 용접 이음부의 역학적 특성을 규명하기 위해 열탄소성 해석 후 표면으로부터 1mm 지점에 대한 용접잔류응력 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 SAW와 하이브리드 용접 모두 용착금속 및 열영향부에서 용접선 길이 방향인 σ_x 에서 큰 인장을 볼 수 있고 σ_y, σ_z 방향에서는 인장과 압축이 교차하는 현상을 볼 수 있다. 그 크기는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순이다. 또한 하이브리드 용접부에서 SAW 용접부 보다 잔류응력의 분포 영역 및 크기가 작게 나타남을 알 수 있었는데 이는 SAW 용접부에 비해 좁은 열영향부의 생성과 적은 입열량 및 보다 큰 냉각 구배 때문으로 사료된다.

4.3 X-Ray 용접잔류응력 측정 결과

X-Ray 잔류응력 측정기를 이용 용접선 길이 방향에 대한 잔류응력을 측정하였으며 그 값을 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 수치해석 결과와 비교해 보면 측정된 결과 값들이 두 용접법 모두 정성적 및 정량적으로 유사함을 보임으로서 열탄소성 수치

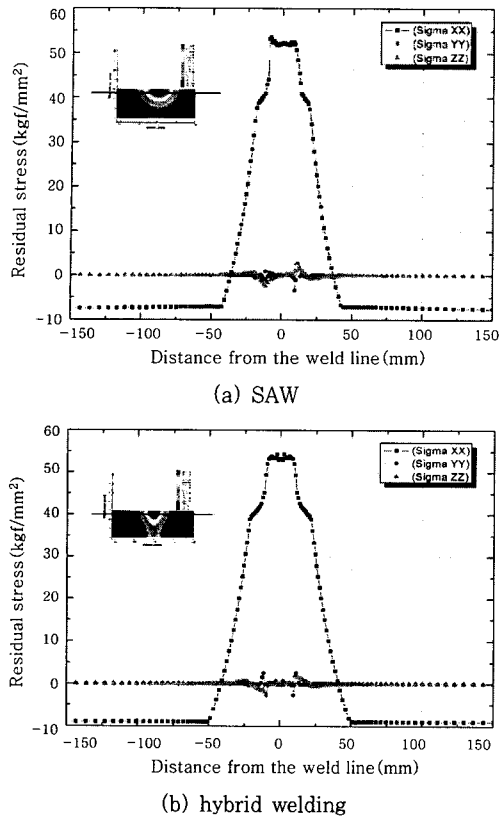


Fig. 10 Welding residual stress

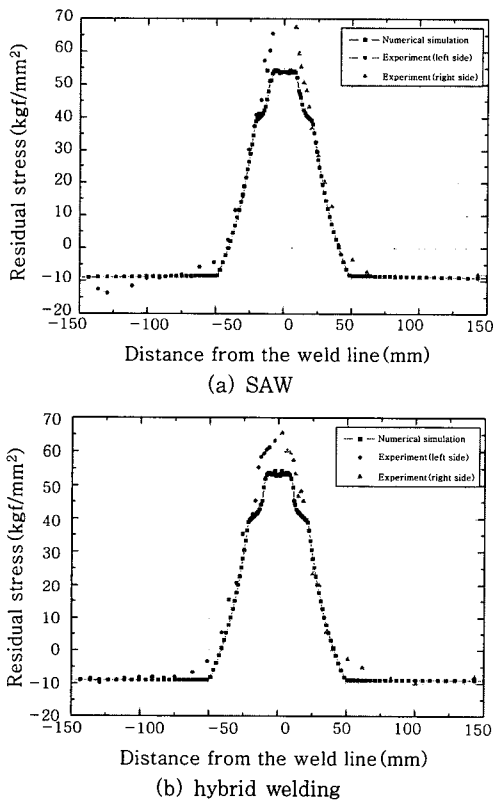


Fig. 11 Comparison of welding residual stress values

해석의 재현성에 좋은 결과라 할 수 있겠다.

4.4 기계적 강도 특성 평가시험 결과

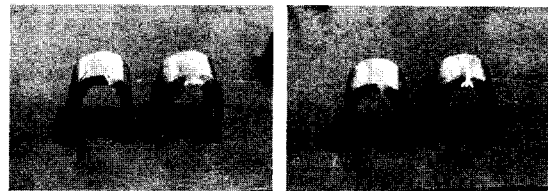
SAW 및 하이브리드 용접 시험편에 대한 인장시험 결과를 Table 3에 나타내었다 그 결과를 살펴보면 모든 시험편에서의 파단은 용접부 및 열영향부(HAZ)를 벗어난 모재에서 발생하였으며, 모재보다 SAW 및 하이브리드 용접 시험편에서 항복강도 및 인장강도가 조금 더 높게 나타났으며 그 크기는 하이브리드 > SAW > 모재 순이나 그 값은 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 SAW 및 하이브리드 용접부가 충분한 강도를 보임으로써 강도적인 측면에서 우수함을 알 수 있었다.

굽힘 시험은 Fig. 12에 나타난 바와 같이 최대 굽힘 (180°)이 되게 시험을 하였으며, 그 결과 모든 시험편에서 터짐이나 찢어짐이 보이지 않는 양호한 굽힘 형태를 보여 주고 있다. 따라서 용입형태 및 용착방법 등이 양호함을 예측하였다.

각 용접법에 따른 용접부에 생성된 역학적 특성의 차가 외부 충격으로부터 보여주는 물리적 현상을 파악하기 위하여 샤르피 충격시험을 수행하였다. 시험편은 용접부가 시험편의 중심에 위치하도록 하고 용착금속부와 열영향부 및 모재부에 노치를 주어서 표준 시험편을 제작하였으며 0°C에서 시험을 수행하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 그 결과를 고찰해보면 0°C에서의 충격

Table 3 Result of tensile test (Unit : MPa)

| | Base metal | | SAW | | Hybrid | |
|------|------------|-----|-----|-----|--------|-----|
| | YS | TS | YS | TS | YS | TS |
| Ave. | 358 | 553 | 379 | 570 | 392 | 601 |



(a) SAW (b) hybrid welding

Fig. 12 Result of bending test

Table 4 Result of charpy impact test (0°C)

| | WM | HAZ | BM | Standard |
|--------|------|------|------|----------|
| SAW | 120J | 95J | 260J | 34J |
| Hybrid | 180J | 120J | 260J | |

흡수 에너지는 두 용접 시험편 모두 선급 표준 규격 34J 이상을 나타내었다. 또한 하이브리드 용접부의 충격흡수에너지 크기가 SAW에 의한 용접부 충격흡수에너지 크기보다 크게 나타난 이유는 SAW 시험편에서는 파괴경로가 용착금속부로 이어진데 반해 하이브리드 용접시험편에서는 레이저 용접부에서의 용착금속부와 열영향부의 폭이 좁은데 기인하는 레이저 용접의 특성에 의해 파괴경로가 용착금속부에서 모재로 그 경로가 변화하는 현상(FPD: Fracture Path Deviation)이 나타났기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 조선용 AH32 강 15t의 맞대기 이음부에 대한 하이브리드 용접의 현장 적용 가능성을 검토하기 위해 유한요소 수치해석 및 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 조선용 AH32 15t 강재에 대하여 하이브리드 용접시 변수를 고려한 최적의 용접조건을 선정하였다.
- 2) 용접 열 분포 및 용접잔류응력 분포 특성에 대한 수치해석 결과 실제 하이브리드 용접부에서의 열거동과 흡사한 형태를 보였으며 중공업에서 사용되고 있는 SAW 용접부 보다 잔류 응력 분포와 크기가 작게 나타났는데 이는 레이저 영향에 의한 좁은 열영향부의 형성, 적은 입열량 및 냉각 구배가 훨씬 크기 때문으로 사료된다.
- 3) X-Ray 잔류응력 측정기를 이용 X축에 대한 잔류응력을 측정하여 수치해석치와 비교한 결과 값 들이 정성적 및 정량적으로 유사함을 보임으로서 수치해석의 재현성에 좋은 결과라 할 수 있겠다.

4) SAW 및 하이브리드 용접부의 기계적강도(인장, 굽힘, 충격)시험 결과 두 용접법 모두 용접성이 우수함을 알 수 있었으나 하이브리드 용접부에서 보다 더 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 결과에 의해 SAW 및 하이브리드 용접부의 역학적 특성이 모두 우수하나 하이브리드 용접이 보다 더 우수한 용접 방법임을 알 수 있었다. 또한 제품의 품질 및 생산성 향상 부분에서 하이브리드 용접이 훨씬 우수함으로서 앞으로 현장에 적용해 나가야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Bang Han-Sur, Kim Young-Pyo : Fundamental Study on The Heat Input Model of Hybrid Welding for The Finite Element Analysis, Journal of KWJS Vol 41, (2003), 36-38(in Korean)
2. Bang Han-Sur, Lee Jin-Uk : A Study on The Reliability Evaluation of Hybrid(CW Nd:YAG Laser+MIG) Welding of Butt Joints in Al-Mg Alloy, Conference of The Korean Society of Ocean Engineers, (2005), 575
3. Oh Chong-In, Kim Young-Pyo, Park Ho-Kyung, Bang Han-Sur : A Study on The Thermal and Mechanical Characteristic of Hybrid Welded Ship Structure A-Grade Steel, Journal of The Korean Society of Ocean Engineers, 21-1, (2007), 64-68(in Korean)
4. Kaplan, A.F.H., Jurgen Zimmerma, Dieter Schuocker, and Walter Spruzina : Laser beam welding of aluminium alloys, International Conference Welding Technology, Materials and Materials Testing, Fracture Mechanics and Quality Management, Vienna University of Technology, (1997), 147-156
5. Nielsen, S.E., Andersen, M.M. and Kristensen, J.K. : Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminium, IIW-DOC.XIII, (2002), 258-272
6. R.M. Brick, A.W. Pense and R.B. Gordon : Structure and Properties of Engineering Materials(4th Edition), McGRAW HILL BOOK Co., 1977, 25-35