연 구 논 문

# 조선용강재의 레이저-아크 하이브리드 용접금속부 충격인성에 미치는 용접변수의 영향

홍 승 갑* · 이 종 봉*

*포스코 기술연구소 접합연구그룹

# Effects of Hybrid Welding Parameters on the Toughness of Weld Metal in Ship Structural Steel

Seung-Gab Hong* and Jong-Bong Lee*

*Joining research group, Technical research laboratories, POSCO, Pohang 790-785, Korea

## Abstract

Since the 1990's, European shipbuilding industries introduced hybrid welding process in order to decrease thermal distortion of welded joints in passenger shipbuilding. In this study, we investigated effects of hybrid welding parameters on the toughness of weld metal using DH36 steel in order to obtain more sound welds in passenger shipbuilding. Type of leading process, joint gap distance and chemical composition of consumables were considerably correlated with the toughness of weld metal. Especially, the toughness was considerably increased with high-Ti containing consumables. In addition, hybrid welding speed increased by using plasma cut edges, the oxides layer of which increased absorption efficiency of laser beam.

*Corresponding author : sgab@posco.co.kr

(Received October 17, 2006)

Key Words : Hybrid welding, Toughness, Weld metal

## 1. 서 론

1990년대 중반이후 유럽조선소들은 크루즈선과 같이 주로 얇은 후판강재를 사용하는 선종에 대하여 레이저 및 레이저-아크 하이브리드 용접을 적용해왔다[1-3]. 이와 같은 고밀도 열원 용접은 용접 변형이 기존 아크 용접기법에 비해 매우 적은 장점을 지니고 있어, 최근 국내 조선소의 수주선종의 고부가가치화 및 용접생산성 향상 전략에 맞춰 향후 수년 내로 국내 조선소 현장에 적용될 것으로 전망된다.

기존 하이브리드 용접관련 연구는 주로 gap tolerance 혹은 용입 특성과 관련된 분야에 치중되어, 하이브리드 용접 이음부 물성과 관련된 연구는 매우 저조하였다. 하이브리드 용접이 산업적으로 가장 많이 사용되는 조선분야, 특히, 크루즈선과 같이 많은 인원을 수송하는 선박의 경우, 재난시 대형 인명사고와 직결되어 타 선종에 비해 선박의 안정성이 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 선체구조용으로 많이 사용되는 DH36강재를 대상으로 레이저-아크 하이브리드 용접금속부 충격인성에 미치는 용접공정 변수의 영향을 검토하고자 한다.

## 2. 실험 방법

레이저-아크 하이브리드 용접금속부 충격인성에 미치는 용접변수의 영향을 고찰하기 위하여, 14mm 두께의 DH36강재를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 DH36강의 화학조성은 Table 1과 같으며, 탄소당량은 0.34이다. 레이저-아크 하이브리드 용접을 위하여, 12kW $CO_2$ 레이저 (Trumpf TLF 12000 turbo) 및 GMA 용접기(ESAB Aristo 2000)를 이용하여 Fig. 1과 같은 하이브리드 용접 시스템을 구성하였다.

본 연구에서는 하이브리드 용접금속부 충격특성에 미

Table 1 Chemical composition of DH36 steel used. (wt%)

| C | Mn | Si | P | S | Others |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.16 | 1.05 | 0.42 | 0.013 | 〈0.002 | - |

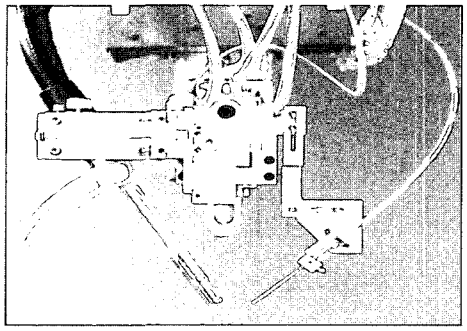

Fig. 1 $CO_2$ laser-MIG hybrid welding system

치는 용접변수로서, 용접재료, GMAW 와이어 송급속도, 선행 프로세스의 종류, 이음부 간격, 레이저-아크 간격 등을 선택하였다. DH-grade의 경우 용접금속부는 일반적으로 0℃기준 평균 34J이상의 충격인성값을 요구하나, 본 연구에서는 대상 선종이 여객선과 같이 안전이 중요시되는 선종이라는 점을 감안하여, -20℃에서 평균 34J이상으로 목표설정을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 하이브리드 용접금속부 충격인성 평가

일반적으로 레이저와 같은 고밀도 열원을 사용하는 용접의 경우 용접부 샤르피 충격시험에서 나타나는 FPD (Fracture Path Deviation)현상 때문에 충격인성을 정확하게 측정하기가 힘들다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 몇몇 연구자들은 사이드 노치 시험편과 같은 개량된 시험편을 활용한 충격인성 측정을 시도하기도 했다[4]. 본 연구에서 시험 용접한 시험편에 대해서도, FPD현상이 관찰되는지 확인하기 위해, 총 75개의 시험편에 대하여 표준 충격시험을 실시하였다. Fig. 2에서 보듯이, 상당수의 시험편에서 FPD 현상이 관찰되었으며, 낮은 충격인성값을 보이는 시험편들의 상당수도 모재쪽으로 파괴가 진행되었음을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 목표로 하는 하이브리드 용접금속부의 충격인성 향상에 미치는 용접변수의 영향을 정확히 평가하기 위해서는 우선적으로 용접부 충격인성 평가 방법부터 정립할 필요가 있었다. 앞서 언급했듯이 고밀도 열원 용접부에서 나타나는 FPD 현상을 피해서

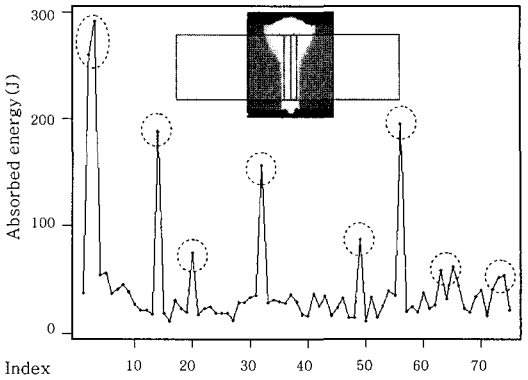


Fig. 2 Result of Charpy impact tests for hybrid weld metals at -20℃

용접금속부의 충격인성을 평가하는 방법은 몇 가지 있으나, 이중에서 표준 충격시험편의 양 옆에 사이드 노치를 가공해서 평가하는 방법이 주로 추천된다. 그러나, 이러한 시험방법상에도 문제점은 있다. 즉, 개량된 시험편으로부터의 충격 인성값을 표준 시험값으로 환산할 수 없어, 정성적인 비교평가밖에 할 수 없다는 점이다. 따라서, 본 연구에서는 사이드 노치 시험편의 충격값과 표준시험편의 충격값 사이의 상관관계를 구하고자 하였다. 이를 위해, 열 사이클 시험용 DH36강재를 가지고 1350℃까지 가열한 후 800-300℃구간에서의 냉각속도를 다르게 한 시험편에 대하여 표준 충격시험 및 사이드 노치 충격시험을 실시하였다. 식(1)은 이와 같은 실험에 의해 얻어진 표준시험편과 사이드 노치 시험편과의 충격값 사이의 상관관계를 보여준다. (Fig. 3)

$$SE = 1.85 \neq + 0.58(at - 20℃) \quad (1)$$

SE: Absorbed energy from standard Charpy specimen
NE: Absorbed energy from side-notched Charpy specimen

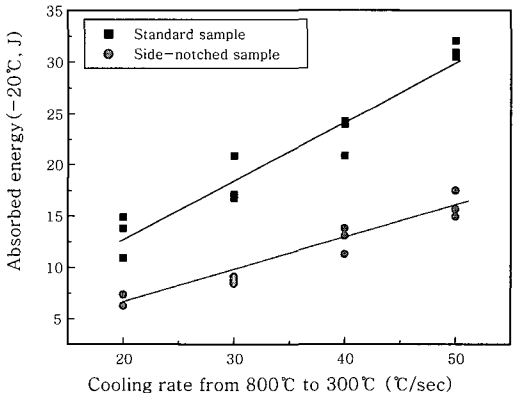


Fig. 3 Correlation of absorbed energies between standard Charpy specimens and side-notched Charpy specimens

따라서, 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 사이드 노치 시험편으로 용접금속부 충격인성을 측정한 후, 식(1)을 이용하여 표준 충격시험 값으로 환산함으로써 하이브리드 용접금속부 충격인성을 보다 정확히 평가하고자 하였다.

### 3.2 용접금속부 위치에 따른 충격인성 특성

레이저-아크 하이브리드 용접금속부는 일반적인 레이저 용접이나, 아크용접과 달리 두 가지 용접 프로세스의 영향을 동시에 받는다. 따라서 하이브리드 용접금속부에서 레이저와 아크의 영향도를 정성적으로 평가하기 위해 Ni이 약 22% 함유된 304 스테인리스 와이어를 사용하여 하이브리드 용접 후 Ni 원소 분포를 관찰해보았다. Fig. 5에서 보듯이, 아크에 의해 공급되는 용접재료는 하이브리드 용접비드 상부에만 주로 영향을 미치며, 비드 하부에 미치는 영향은 적음을 알 수 있다. 따라서, 이러한 결과로부터 하이브리드 용접금속부에 있어서, 아크의 영향을 주로 받는 상부와 레이저 빔의 영향을 주로 받는 하부의 합금성분이 다름을 예측할 수 있다.

이와 같이 위치에 따라 합금성분의 차이를 보이는 하이브리드 용접금속부에 있어서 아크의 영향을 많이 받는 상부비드와 레이저의 영향을 많이 받는 하부비드 중에서 어느 부분이 충격인성에 더 취약한지 조사하기 위해 sub-size 충격시험편을 가지고 충격특성을 비교해 보았다.

Fig. 6에서 보듯이 하이브리드 용접금속부 하단부 충격인성이 상단부에 비해 더 우수한 것으로 측정되었다. 따라서, 본 연구에서는 충격인성이 낮은 용접금속부 상단부에 영향을 미치는 용접변수를 대상으로 충격특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

### 3.3 용접금속부 충격인성에 미치는 용접 조건의 영향

하이브리드 용접금속부 상단부의 충격특성에 미치는 용접변수의 영향을 고찰하기 위해 레이저 출력은 12kW, 용접속도는 1m/min으로 고정시키고, 이음부 간격, 레이저-아크 사이 간격, 와이어 송급속도, 선행 용접 프로세스 종류, 용접재료 종류 등을 변화시켰다. 평가 결과, 이들 용접변수들중에서 용접재료 종류, 이음부 간격 및 선행 프로세스 종류가 용접금속부 충격인성에 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 7). 즉, 아크 선행 하

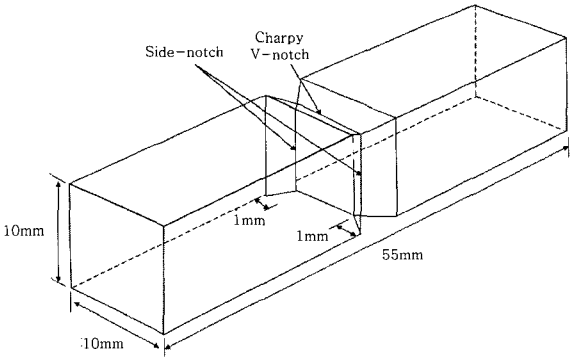


Fig. 4 Side-notched specimen for Charpy impact test of hybrid weld metals

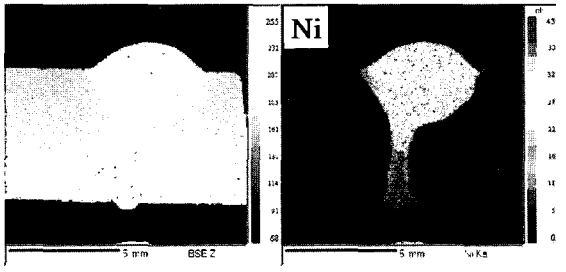


Fig. 5 Distribution of Ni element on hybrid weld metal using EPMA

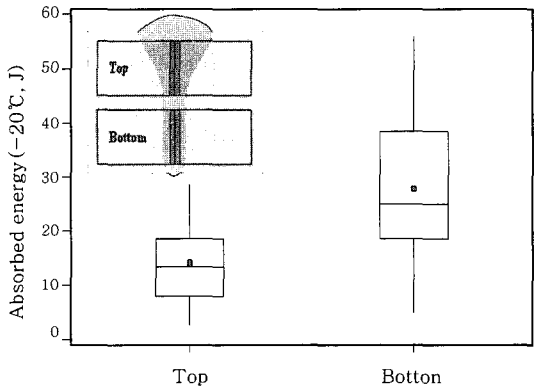


Fig. 6 Absorbed energies depending on test positions of weld metal for side-notched Charpy specimens (sub-size)

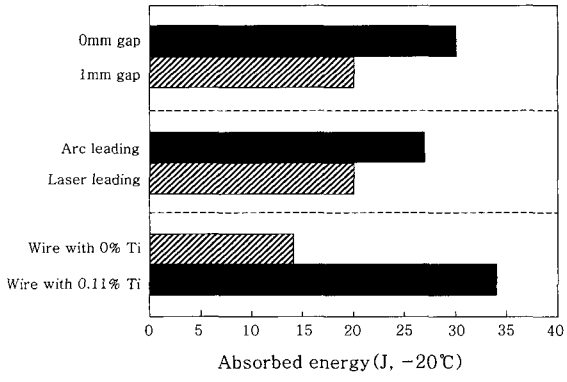


Fig. 7 Effects of hybrid welding conditions on impact toughness of weld metals using side-notched Charpy specimens

이브리드 용접프로세스를 이용하여 이음부 gap을 최대한 작게 유지하면서, Ti을 일정량 이상 함유한 용접재료를 사용했을 때, 가장 우수한 용접금속부 충격특성을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이중에서도 특히, 용접재료 Ti 성분에 따라 용접금속부 충격특성은 많은 영향을 받았다.

Fig. 8에서 보듯이, Ti이 0.024t.%이하 포함된 용접재료에서는 매우 낮은 충격인성값을 보이나, Ti이 0.05wt.%이상 증가함에 따라 충격인성값은 계속 증가하는 경향을 보인다. 그러나, 이러한 경향도 0.1wt.% 이상에서는 포화되어 더 이상의 충격인성 향상은 기대할 수 없었다.

용접재료의 Ti 함유량에 따른 충격인성값 차이의 원인을 규명하기 위해 하이브리드 용접금속 상단부의 미세조직을 관찰하였다. Fig. 9에서 보듯이, Ti를 거의 함유하고 있지 않은 용접금속의 경우 미세조직이 상부베이나이트와 마르텐사이트로 구성된 반면, 많은 양의 Ti를 함유하고 있는 경우에는 입계 페라이트, 구상 페라이트, 침상 페라이트 등으로 구성된 미세조직을 보이고 있다. 이와 같은 미세조직 차이를 나타낸 원인을 분석하기 위해 하이브리드 용접금속의 상단부에 대한 TEM 분석을 실시하였다.

Fig. 10에서 보듯이, Ti이 거의 첨가되지 않은 용접재료를 사용한 경우에는(Fig. 10(a)) 주로 Al 산화물만 관찰되었으나, Ti이 다량 첨가된 용접재료를 사용한 경우에서는(Fig. 10(b)) Al 산화물외에 Al-Ti 복합산화물이 추가로 관찰되었다. 또한, 산화물 분포에 있어서도 Ti이 다량 첨가된 경우가 좀 더 많았다. Al 산화물에 비해 Ti 산화물은 침상 페라이트의 핵생성 사이트로서 매우 효과적으로 작용한다고 보고되고 있다[5].

본 연구에서는 Ti 산화물이 단독으로 형성되지는 않고, 대부분 Al 산화물 위에 복합으로 석출되었다. Ti 산화물이 Al 산화물 위에 형성되었기 때문에 침상 페라이트 핵생성에는 Ti 단독 산화물과 동일한 효과를 나타낼 것으로 사료된다. 즉, Ti 첨가로 인해 형성된 Al-Ti 복합산화물이 침상 페라이트 핵생성을 촉진하여 결국, 용접금속부 충격인성을 향상시킨 것으로 판단된다.

또한, 하이브리드 용접금속부 충격인성에 미치는 선행 프로세스의 영향을 살펴보면 레이저 선행보다는 아크선행일 때 더 높은 충격인성값을 보임을 알 수 있었다. 이것은 본 연구에서 사용한 DH36-TM강의 SH-CCT 곡선을 측정한 Fig. 11의 결과에서 예상할 수 있다. 즉, 레이저 선행의 경우 후행 아크용접 프로세스의

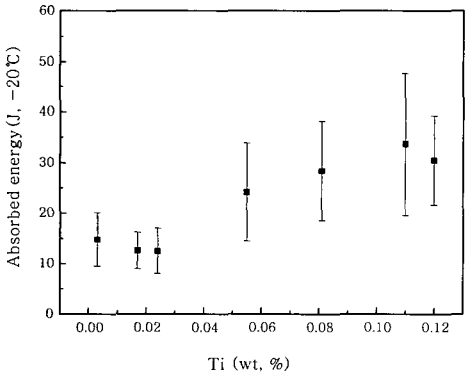


Fig. 8 Effects of Ti addition on impact toughness of weld metals using side-notched charpy specimens

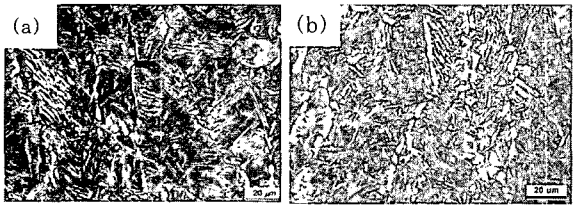


Fig. 9 Microstructure of weld metals containing (a) 〈0.003wt.% Ti and (b) 0.12wt.% Ti

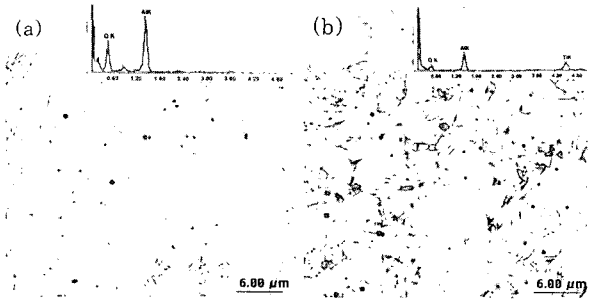


Fig. 10 TEM replicas of weld metals containing (a) 〈0.003wt.% Ti and (b) 0.12wt.% Ti

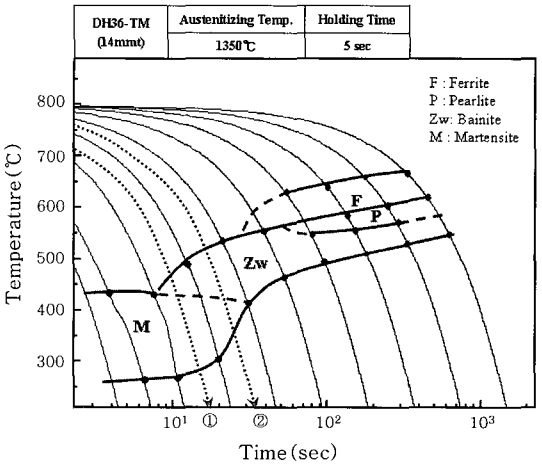


Fig. 11 SH-CCT diagram of DH36-TM steel ①: cooling curve of weld metal (bottom) in arc leading hybrid welding process ②: cooling curve of weld metal (bottom) in laser leading hybrid welding process

열로 인해 용접금속부, 특히 루트부분의 냉각속도가 늦어져, 주로 상부 베이나이트로 구성된 미세조직을 나타낸다. 이에 비해 아크 선행 하이브리드 용접의 경우 후행 프로세스가 레이저이므로 용접금속 루트부의 냉각속도가 상대적으로 빨라서 주로 마르텐사이트로 구성된 미세조직을 가짐을 확인 할 수 있었다. 따라서, 아크선행 하이브리드 용접에서는 충격인성을 저하시키는 미세조직인 상부 베이나이트가 상대적으로 적어서 높은 충격인성값을 가지는 것으로 사료된다.

용접금속부 충격인성값에 미치는 이음부 간격의 영향에서는 이음부 간격이 커짐에 따라 용접금속부의 충격인성값이 저하되었다. 이것은 본 연구에서 사용한 모재의 탄소당량이 0.34인데 비해, 용접재료의 탄소당량은 0.25~0.31로서 이음부 간격이 증가할수록 모재보다는 용접재료의 희석이 많아짐에 따라 용접금속부의 탄소당량이 모재에 비해 낮아짐을 예측할 수 있다. 따라서, 위의 Fig. 11에서 설명했듯이, 용접재료의 희석률이 커져서 용접금속의 탄소당량이 감소됨에 따라 미세조직 측면에서는 냉각속도가 느려지는 효과를 가져와 상부 베이나이트 분율을 증가시킴을 예상할 수 있다. 따라서, 이러한 이유 때문에 이음부 간격이 증가함에 따라 충격인성값이 저하되는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 조선소에서 강재를 플라즈마 절단할 경우 형성되는 절단 산화층이 용접금속부 충격인성에 미치는 영향을 비교하기 위해, 기계가공된 이음부와 플라즈마 절단가공된 이음부의 충격인성을 비교하였다. 하이브리드 용접금속부 충격인성값은 큰 차이가 없었으나, 플라즈마 절단가공된 이음부를 사용할 경우, 동일한 레이저 및 아크 출력에서도 용접속도를 80%이상 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 현상의 원인은 Fig. 12의 하이브리드 용접금속부 단면형상을 비교함으로서 유추할 수 있다. 즉, 기계가공 이음부의 용접비드 단면에 비해 플라즈마 절단가공 이음부의 용접비드 단면은 비드 중앙부에 비해 하단부가 더 넓은 형상을 지니고 있다. 이와 같은 현상은 맞대기 이음 하단부의 절단 산화층에 의해 레이저 빔 흡수율이 증가하기 때문이며, 레이저 빔 흡수율 증가는 결국, 용접속도를 증가시키는 효과를 나타내었다.

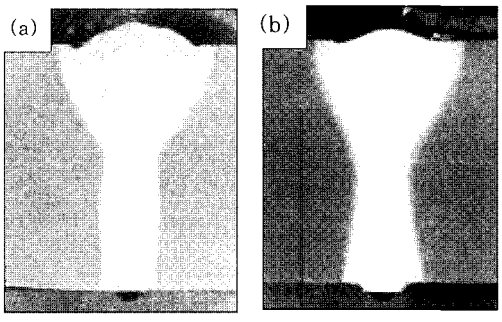

Fig. 12 Cross sections of hybrid welds using (a) milling surface and (b) plasma cutting surface

이상에서 설명한바와 같이 하이브리드 용접금속부 충격인성에 미치는 다양한 용접변수의 영향을 고찰한 결과, Table 2와 같은 최적의 용접조건을 설정하였다. Table 2의 용접조건을 사용하여 총 15조의 하이브리드 용접을 실시하였다. 이와 같이 만들어진 하이브리드 용접금속부에 대하여 사이드 노치 시험편을 사용하여 -20°C 충격인성을 평가한 결과, Fig. 13에서 보듯이, 평균 25.2J, 표준편차 3.9J의 충격인성값을 나타내었다. 이러한 값을 식(1)을 사용하여 표준 충격인성값으로 환산했을 때 약 47J의 우수한 값을 나타내어, 선급에서 요구하는 0℃ 34J을 상회하는 것으로 확인되었다.

## 4. 결 론

1) DH36-TM강재의 하이브리드 용접금속부에 대하여, 사이드 노치 충격시험값과 표준 충격시험값과의 상관관계를 다음과 같이 도출하였다.

Table 2 New hybrid welding conditions

| Parameters | 설정값 |
|---|---|
| Steel | DH36 (14mmt) |
| Laser power | 12kW |
| Wire feed rate | 8m/min |
| Welding speed | 1.8m/min |
| Joint gap | 0mm |
| Leading process | Arc |
| Filler wire | Wire containing 0.11% Ti |
| Cutting method | Plasma cutting |

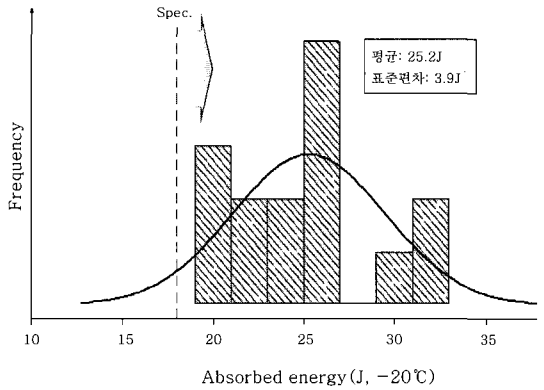

Fig. 13 Absorbed energy for side-notched specimens using new hybrid welding conditions

2) DH36-TM강재의 하이브리드 용접에서 아크선행 프로세스, 0mm 이음부 간격 및 고 Ti계 용접재료를 사용했을 때 가장 우수한 용접금속부 충격특성을 얻을 수 있었다.

3) 고 Ti계 용접재료를 사용했을 때 용접금속부에 Al-Ti 복합산화물이 형성되었으며, 이러한 복합산화물은 용접금속부의 침상 페라이트 형성을 촉진시켜 저온충격인성을 향상시킨 것으로 사료된다.

4) 플라즈마 절단 이음부를 사용할 경우, 기계가공 이음부에 비해 충격인성값은 차이가 없었으나, 하이브리드 용접속도를 80%이상 향상시킬 수 있었으며, 이는 플라즈마 절단층에 형성된 산화층에 의한 레이저 빔 흡수율 증가 때문으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. P. Denney: Laser: The new wave in ship construction, Welding Journal, 80-3 (2001), 47-50
2. J. K. Kristensen: Laser welding in ship building-a challenge to research and development for more than a decade, Proceeding of 7th international Aachen welding conference, 2001, 447-461
3. F. Roland & H. Lembeck: Laser beam welding in shipbuilding-experience and perspectives at Meyer Shipyard, Proceeding of 7th international Aachen welding conference, 2001, 463-475
4. Iabel Hadley: Testing the waters- shipbuilding laser welds, TWI bulletin, 41(5) (2000) 67-70
5. Lars-Erik Svensson: Control of microstructures and properties in steel arc welds, CRC Press, 1994, 156-159