

**研究論文**

## 9%Ni 강의 전자빔 용접성에 관한 연구 (Ⅲ)

- 전자빔 용접부 기계적 특성과 조직 -

김 속 환\* · 강 정 윤\*\*

### A study on electron beam weldability of 9%Ni steels (Ⅲ)

- Microstructures and mechanical properties of welded joints -

S. H. Kim\* and J. Y. Kang\*\*

**Key words** : electron beam welding (전자빔 용접) mechanical properties (기계적 성질)  
retained austenite (잔류 오스테나이트) 9%Ni steel (9% 니켈강)

### Abstract

Electron beam weldability of 9%Ni steels has been investigated to apply EBW to the construction of LNG storage tank. While mechanical properties of welded joints were satisfied by ASTM specification, impact energy of weld metal was as low as 27 ~ 55J at -196°C. As the result of Ni wires inserted at the joint to be welded, Ni content of weld metal was increased to about 10%, resulting on the improvement of impact toughness to 110 ~ 120J at -196°C. This improvement of impact toughness in weld metal was due to the formation of tempered martensite and retained austenite. Above results indicate that, if Ni content of weld metal was increased about 10% by Ni wires addition, electron beam welded 9%Ni steels weld metal had sufficient impact energy necessary for a LNG storage tank.

### 1. 서 론

최근 부공해 연료로 각광받고 있는 액화천연가스 (LNG)의 수요가 급증함에 따라 LNG 저장탱크

용 소재로 널리 사용되고 있는 9%Ni강의 요구도 증가되고 있다. 그러나 9%Ni 강은 극저온용 소재로 용접부 저온인성(-196°C)이 중요하다. 따라서 저온인성을 확보하고자 고가인 Inconel계나 Hastelloy계 용접재료를 사용하고 있으나 강도가

\* 1997년 2월 19일 접수

\* 정회원, 포항산업과학연구원 집합가공연구팀

\*\* 정회원, 부산대학교 금속공학과

낮고 고Ni계 용접재료를 사용함에 따른 고온균열 발생과 성분 희석에 의한 강도 및 인성저하의 문제가 제기 되고 있다. 한편, LNG 탱크 제작시 적용되고 있는 용접법은 GTAW, SAW 및 SMAW등이 있지만 국내에서는 대부분 SMAW에 의존하고 있는 실정이어서 보다 경제적인 용접process의 적용가능성에 대한 검토가 대두되고 있다.<sup>3)</sup> 따라서, 본 연구에서는 9% Ni강에 용접재료를 사용함으로써 발생하는 문제점과 용접 생산성 향상 및 탈기능화를 위해 최근 추구하고 있는 용접자동화를 동시에 해결할 수 있는 방법등의 하나인 전자빔 용접법을 대상으로 용접부 조직 및 기계적 성질에 대하여 적용가능성을 검토 하고자 하였다.

## 2. 시험재 및 실험방법

### 2.1 시험편 준비 및 용접부 기계적 시험

본 실험에서는 제1, 2보에서 사용한 것과 동일한 9%Ni강을 대상으로 전자빔 용접부 조직과 기계적 특성을 검토하고자 하였다. 전자빔 용접부 인장시험은 -196°C ~ 상온에 이르기 까지 JIS Z3121 1호 시험편에 준하여 인장시험을 실시하였다. 또한 충격시험은 표준 V-notch 충격시험편을 사용하여 저온에서 용접부 충격인성을 평가하였다. 그리고 용접부 저온인성을 향상시키기 위하여 Fig. 1에서와 같이 Ni wire (1 $\phi$ )를 1~5개까지 삽입한 후 전자빔 용접을 실시하여 시험편으로 사용하였다.

### 2.2 용접부 조직 및 파면관찰

전자빔 용접부 조직은 Nital (알콜95%+질산5%)로 부식시켜 관찰하였고 용접금속의 미세조직을 정밀하게 관찰하기 위하여 투과전자현미경과 주사전자현미경을 사용하였다. 용접금속의 조직을 투과전자현미경으로 관찰하기 위하여 박막시료를 제작하여 lath 마르텐사이트와 석출물의 구조를 분석하고 해석하고자 하였다. 또한 주사전자현미경(SEM/EPMA)을 사용하여 충격파면과 용접시 진공도에 따른 용접금속내에 Ni, Mn 등의 성분분포 그리고 용접금속의 충격인성을 향상시키기 위하여 첨가한 Ni의 두께방향 성분분포를 측정 하였다.

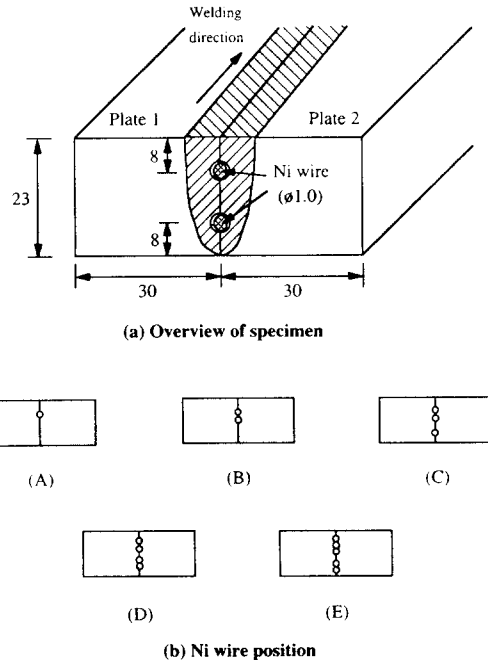


Fig 1. Schematic diagram of specimen preparation

### 2.3 잔류 오스테나이트 측정

용접금속내에 잔존하는 잔류오스테나이트가 용접부 인성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Ni wire를 첨가하지 않은 경우와 첨가하여 Ni함량을 변화시킨 용접시험편을 대상으로 Mössbauer spectroscopy를 이용하여 잔류 오스테나이트량을 측정하였다. 먼저 잔류 오스테나이트를 측정하기 위하여 시험편을 부식시켜 정확히 전자빔 용접부를 확인한 다음 용접선 방향으로 용접금속 중앙부까지 밀링가공하고 정밀절단한 후 60 $\mu$ m까지 전해연마(HClO<sub>4</sub> 80% + CH<sub>3</sub>COOH 20%, 30V)하여 소성가공층을 최소화시켰다. 잔류 오스테나이트의 측정조건은 표준 Fe foil로 reference값을 설정한 다음 방사성 동위원소 Fe<sup>57</sup> (25 curie)를 사용하여 시험편에 감마선을 충돌시켜 얻은 원자의 전이 에너지를 비례계수기로 검출하고 컴퓨터로 data처리하여 잔류 오스테나이트량을 측정하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 용접부 기계적 특성

9%Ni강의 전자빔 용접부 기계적 특성을 평가하기 위하여 선행연구 결과 얻어진 조건 150kV-30mA-100mm/min으로 용접한 시험편에 대하여 인장, 경도 및 충격시험을 실시하였다. Fig. 2는 150kV-30mA-100mm/min의 조건으로 용접한 시험편을 -196°C~실온까지 인장시험한 결과를 나타낸 것이다. 모든 시험은도 범위에서 강도 및 연신율이 모두 ASTM 규격을 만족하고 있음을 확인할 수 있었으며, 모재부에서 파단이 일어나 용접부의 문제는 없는 것으로 확인되었다. 이와같은 결과는 용접부가 모재보다 경도가 Hv 100~180 (Fig. 3참조) 정도 높기 때문에 모재부에서 연신이 일어나고 Necking이 발생되어 모재에서 파단이 일어나는 것으로 생각된다.

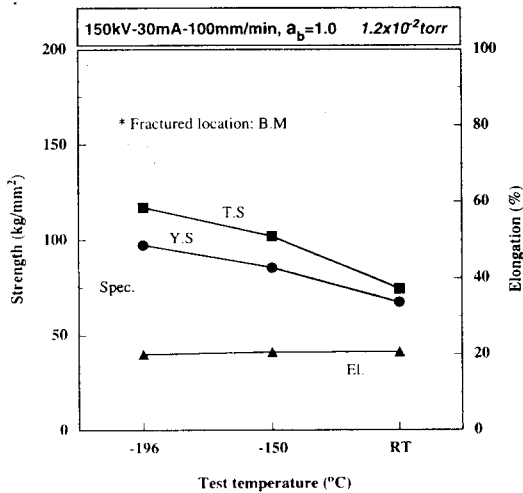


Fig 2. Effect of testing temperature on mechanical properties

Fig. 3은 인성개선을 위하여 Ni wire(1 $\phi$ )를 1~5개까지 삽입한것과 삽입하지 않은 것을 150kV-30mA-100mm/min의 조건으로 용접한 시험편 1/4 위치의 경도분포를 나타낸 것이다. Ni wire의 삽입여부에 관계없이 용접금속과 열영향부가 거의

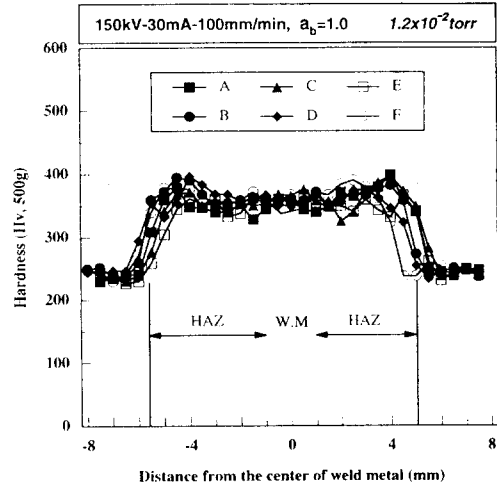


Fig 3. Hardness distributions of welded joint (A:1ea B:2ea C:3ea D:4ea E:5ea F:no filler)

비슷한 경도분포를 나타냄을 알 수 있는데 이는 용접금속조직이 대부분 마르텐사이트 조직을 나타내고 후술하는 바와같이 용접금속중의 Ni함량이 증가함에 따라 잔류 오스테나이트의 증가도 미미하기 때문으로 생각된다. 즉, 용접금속부 및 열영향부의 경도분포는 각각 Hv 350~370 및 Hv 380~400으로서 열영향부가 다소 높았으며, 모재에 인접한 열영향부에서 다소 높은 경도분포를 나타내었는데 이는 최고가열온도가 낮아 아주 미세한 마르텐사이트 변태조직의 형성에 기인한 것으로 생각되었다 (Photo. 4참조). 전체적으로 이들 값은 모재의 경도 Hv 230에 비추어 볼 때 상당히 높았다. 그러나 강의 전자빔 용접시 균열의 한계값으로 보고되고 있는 Hv 600<sup>2)</sup>보다는 훨씬 낮은 값을 나타내고 있으며 실제로 용접시 용접부 균열등의 결함발생 문제는 없었다.

한편 전자빔 용접부 비드 폭의 변화에 따른 용접부 충격인성의 영향을 검토하기 위하여 앞선 연구 결과에서 얻어진 가속전압 120kV와 150kV의 조건하에서 용접속도를 500mm/min로 일정하게 유지시켰다. 그리고 두께 23t를 1pass로 용접할 수 있는 조건의 하나로 도출된 빔 전류 50, 60, 70mA로 용접하고 용접금속 중심부에 노치를 주어 얻어진 충격 시험결과는 Fig. 4와 같다. 즉 용접금속의 비드 폭이 1.5~2.1mm의 범위내에서는 일부 용접금속

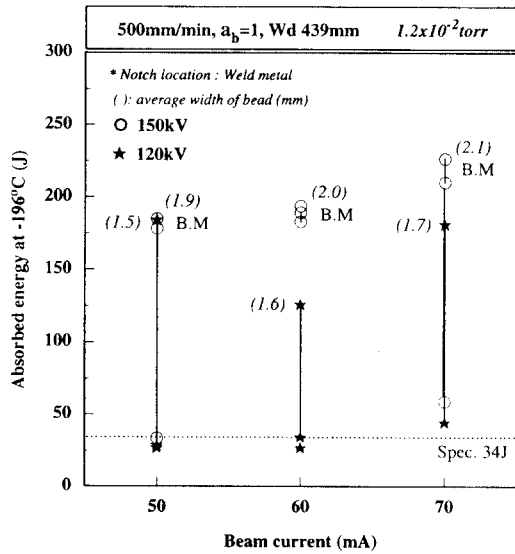


Fig 4. Variation of impact energy with beam current

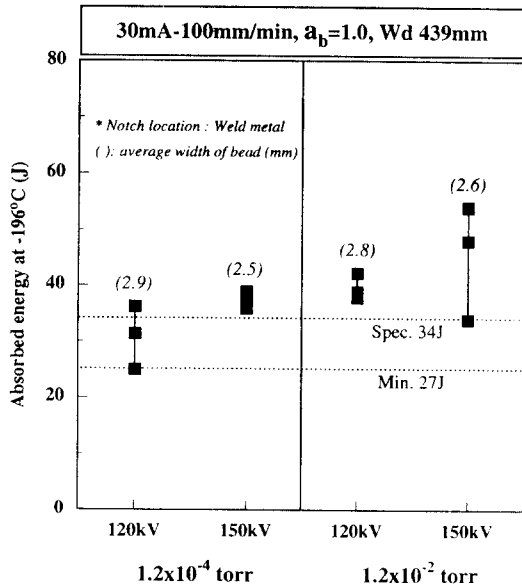


Fig 5. Variations of impact energy with welding conditions

에서 파단 되어 충격치가 낮았지만 대부분의 파단 경로가 노치 선단부에서 모재쪽으로 천이되어 파단됨에 따라 충격치의 산포가 크고 모재의 충격치와 비슷한 값을 나타내었다. 이러한 이유는 전자

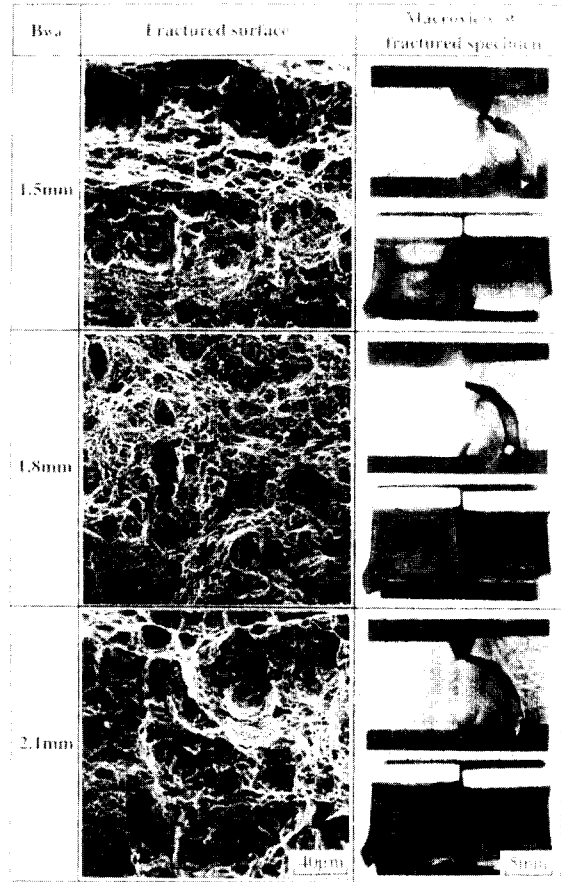


Photo 1. Fractographs of welded joints and macroview of fractured specimens

빔 용접부의 비드 폭이 상당히 좁을 뿐만 아니라 용접금속의 경도값(Hv 350~370)이 모재(Hv 230)보다 훨씬 높기 때문에 Photo.1에서 잘 알 수 있는 바와같이 충격시험시 노치선단에서 모재쪽으로 소성 변형되면서 파괴가 일어나기 때문으로 생각된다. 이와같이 비드 폭이 비교적 좁은 전자빔 용접부의 충격시험시 야기되는 문제를 해결하여 인성을 평가할 수 있는 방법들이 종래부터 다수 거론되고 있지만 아직 까지 명문화되어 있는 것은 없다. 따라서 본 시험에서는 우선 통상의 충격시험 방법으로부터 다수의 유효결과를 확보하기 위하여 비드 폭을 넓히는 방안을 시도하였다. 즉 용접조건은 가속전압을 120kV 및 150kV로 변화시키고, 빔 전류 및 용접속도는 각각 30mA 및 100mm/min으로 일정하게 하였다. 또한 실제 시공상의 경제적인 조

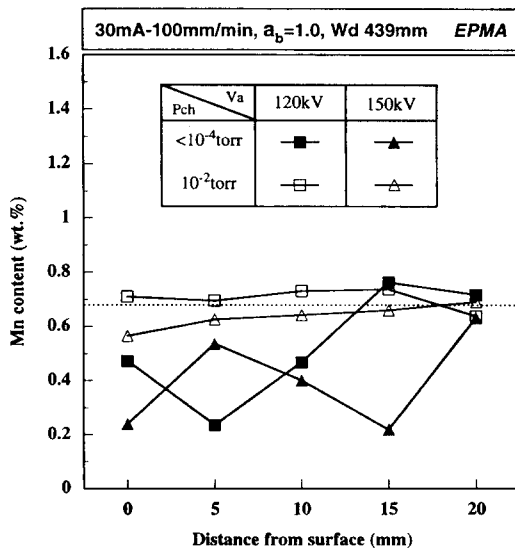


Fig 6. Variations of Mn content with distance from surface

건을 확보하고 진공도의 영향을 검토하기 위하여 용접은 고진공 ( $10^{-4}$  torr) 뿐만아니라 저진공 ( $10^{-2}$  torr) 조건에서도 실시하였다. Fig. 5 및 Photo. 2는 이러한 각각의 조건으로 용접한 시험편의 충격흡수에너지와 파단형태 및 충격파면을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와같이 용접입열량 21.6~27kJ/cm, 저진공 조건에서 용접금속의 충격치는 ASTM 규격의 평균값인 34J를 만족하고 있지만 대부분 규격치의 하한에 치우쳐 있다. 저진공 ( $10^{-2}$  torr) 150kV의 조건에서 약 50J 정도의 값을 나타내고 있지만 용접입열량 22~28kJ/cm의 조건으로 Inconel이나 Hastelloy 등을 사용하여 SMAW 및 SAW 용접한 용접금속의 충격치 70~120J<sup>8)</sup> 보다는 상당히 낮은 값을 나타내고 있다. 그리고 비드 폭이 2.5~2.9mm의 범위에서는 정상적인 충격시험이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 충격시험시 모재로 천이되지 않으면서 용접금속만의 충격치를 평가하기 위해서는 최소한 비드 폭이 2.5mm 이상이 필요하였다. 한편, 저진공 ( $10^{-2}$  torr) 상태에서 충격치가 미미하지만 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 용접시 고밀도 에너지인 전자빔에 의하여 시험편이 고온으로 가열되어 용융될때 증기압이 큰 원소인 Mn이 고진공에서는 증발되어 소실되지만 저진공에서는 별 영향을 받지 않는 것에 기인한 것으로

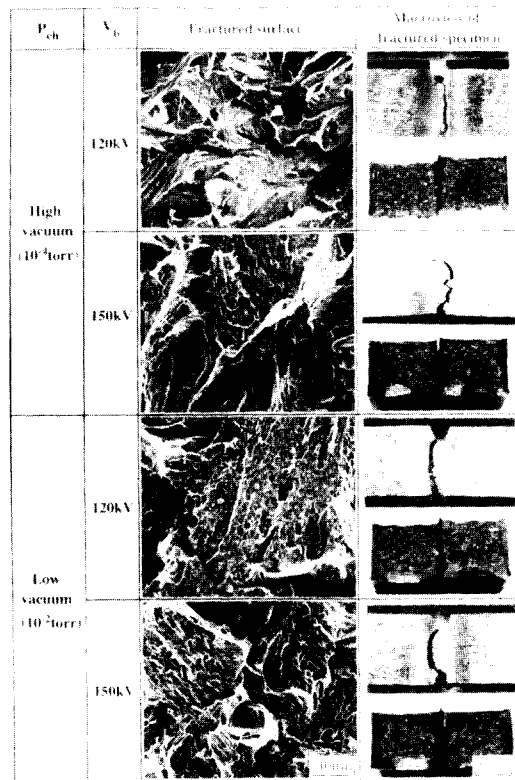


Photo 2. Fractographs of welded joints and macroview of fractured specimens

추정된다.

이러한 결과를 뒷받침하는 것으로 Mn은 용접 (1244°C)에서도 증기압이 1torr 수준<sup>9)</sup>으로 상당히 클 뿐만아니라 Fig. 6에서 잘 알 수 있는 바와같이 용접시 진공실의 진공도에 따라서 Mn량의 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 저진공 ( $10^{-2}$  torr)의 경우 모재 (0.67%Mn)와 거의 같은 수준의 Mn량이 용접금속의 위치에 관계없이 확인되고 있지만 고진공 ( $10^{-4}$  torr)에서는 저진공 ( $10^{-2}$  torr)에서 보다 Mn량이 훨씬 작고 위치에 따라 Mn량의 분포도 상당히 불균일함을 알 수 있다. 이것은 松田 등<sup>4)</sup>의 실험결과에서 모재중에 함유되어 있는 Mn의 약 30% 이상이 용접금속에서 소실되는 것으로 보고되고 있는 것과 잘 일치하고 있다. 따라서 전자빔 용접에서 증기압이 큰 원소들의 손실을 고려하여 합금설계시 기계적 성질을 해치지 않는 범위에서 상향조정하거나 진공도를 높여 용접속도를 빠르게 하는 것이

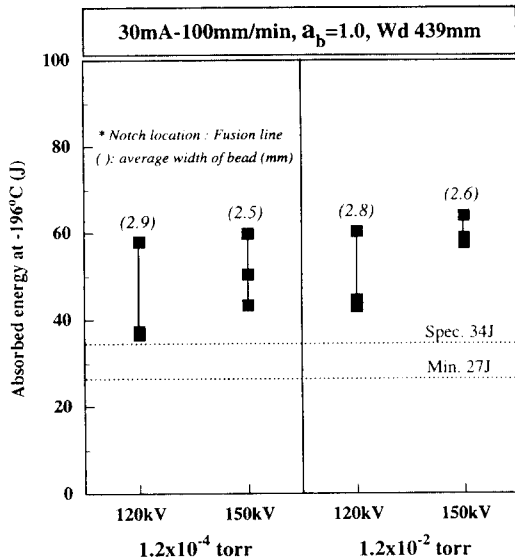


Fig 7. Variations of impact energy with welding conditions

바람직할 것으로 생각된다.

Photo. 2는 저진공 ( $10^{-4}$  torr) 과 고진공 ( $10^{-2}$  torr) 의 상태에서 용접한 시편의 충격시험후 파단형상과 충격파면을 나타낸 것으로 용접조건과 진공도에 관계없이 용접금속내에서 파단이 일어나고 있음을 확인할 수 있고 취성파면이 주로 나타나고 일부 연성파면이 혼합된 형태로 나타나고 있다.

Fig. 7은 용접금속의 경계부에 노치를 주어 충격 시험한 결과를 나타낸 것으로 용접조건과 진공도에 관계없이 약 40~60J의 충격치를 나타냄으로서 ASTM 규격의 하한값인 27J과 평균값인 34J을 상회하는 범위이지만 용접금속에서와 같이 규격치의 하한에 치우쳐 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 Photo. 3에서 알 수 있듯이 용접금속의 경계부를 따라서 파단이 일어나고 있음을 확인할 수 있어 충격 시험상의 문제는 없었으며 연성 및 취성파괴가 혼합된 파단면을 나타내고 있다. 그러나 최근 생산되는 9%Ni강은  $-196^{\circ}\text{C}$ 에서의 충격흡수에너지가 200J 이상이며, Inconel계 및 Hastelloy계 용접재료를 사용하는 용접금속의 인성도 70~120J 정도로서 ASTM의 규격치를 훨씬 상회하고 있다. 따라서 9%Ni강에 전자빔 용접을 적용할 경우, 용접부의 충격인성을 향상시킬 수 있는 대책이 수립되어야

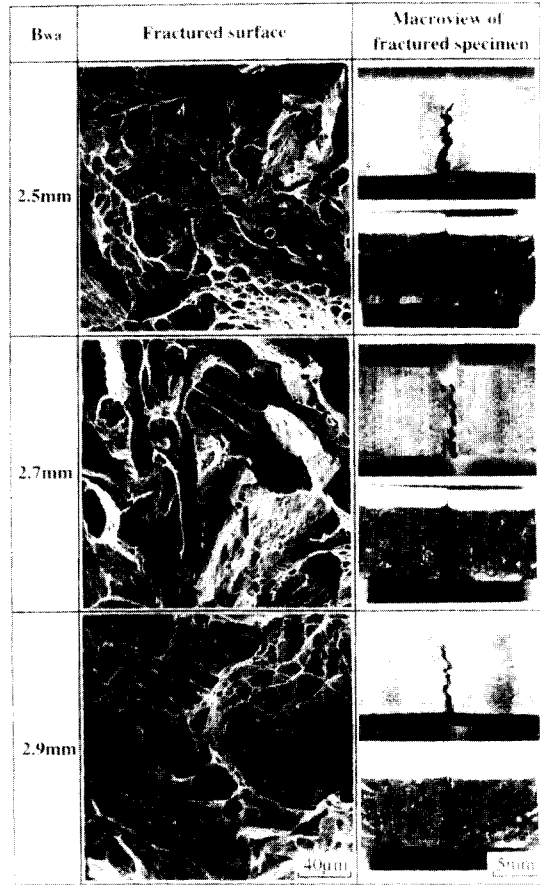


Photo 3. Fractographs of welded joints and macroview of fractured specimens

할 것으로 생각된다.

### 3.2 용접부 조직 및 인성개선

전자빔 용접에서는 용접입열량이 작아 열영향부의 조직변화는 큰 문제가 되지 않지만 용접금속부는 상당히 작기 때문에 강종에 따라 인성 확보가 가장 중요한 문제로 대두되고 있다. 그리고 전항에서 기술한 바와같이 용접부 인성이 규격은 만족하지만 하한에 치우쳐 있기 때문에 용접부 인성개선을 위해 Ni wire를 첨가한 용접금속부의 조직특성과 인성의 상관성을 검토하고자 하였다.

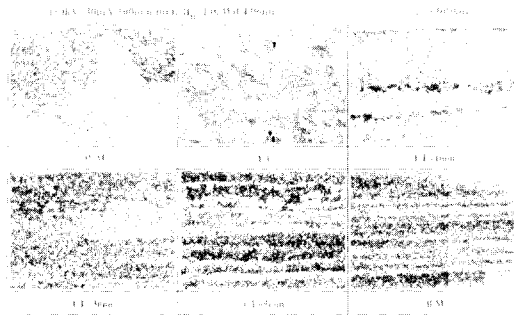


Photo 4. Microstructures of electron beam welded joint (No filler wire)

3.2.1 용접부 조직

Photo. 4는 150kV-30mA-100mm/min의 조건으로 용접한 용접부의 조직사진을 나타낸 것으로 용접금속부는 조대한 전형적인 마르텐사이트 조직을 나타내고 있다. 따라서 -196°C에서 충격인성은 전체적으로 용접금속에서 가장 낮았고 ASTM의 규격은 만족하고 있지만 하한에 치우쳐 있다. 용접금속의 경계부에서는 최고 도달온도가 높기 때문에 조대화되고 band조직이 상당부분 소실되지만 용접금속의 경계부에서 3mm 위치 (F.L+3mm) 에서 가장 미세한 조직으로 변화하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 경계부에서 3mm 위치가 27kJ/cm상당의 용접입열량으로 900°C까지 재현 열싸이클을 주었을 때 형성되는 조직<sup>3)</sup>과 같은 위치로서 최고 도달온도가 낮아 결정립의 조대화가 일어나지 않아 미세한 오스테나이트 상태에서 마르텐사이트로 변태가 일어난 것에 기인한 것으로 생각된다. 그리고 경계부에서 5mm (F.L+5mm) 이상 떨어진 위치에서는 조직상의 변화는 발견되지 않았으며 band상의 조직이 그대로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2.2 Ni wire 삽입에 의한 인성 개선

전자빔 용접부의 충격인성을 개선하기 위하여 Ni wire을 삽입하고 전자빔 용접을 실시하였다. 전자빔 용접은 용접금속중 Mn의 손실을 최소화하기 위하여 저진공 (10<sup>-2</sup>torr) 하에서 150kV-30mA-100mm/min, Wd 439mm, a<sup>b</sup>=1.0의 완전 용입조건으로 실시하였다. 또한, 용접금속의 중앙부에서 두께방향으로 Ni 함량을 EPMA로 분석하여 Ni wire의 삽입조건에 따른 성분분포를 검토하고자

하였다. Fig. 8은 그 분석결과를 나타낸 것으로, 삽입갯수가 1개에서 5개로 증가함에 따라서 Ni함량은 10%에서 17% 정도로 증가함을 알 수 있다. 그러

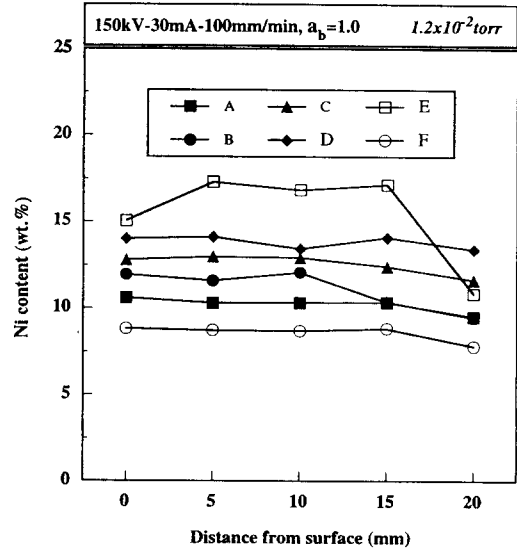


Fig 8. Variations of Ni content with distance from surface (A:1ea B:2ea C:3ea D:4ea E:5ea F:no filler)

나 Ni wire 삽입 갯수가 증가함에 따라 이론적인 계산과 실제 측정결과와 다소 큰 차이를 나타냄을 알 수 있었으며 표로 정리하여 보면 Table 1과 같다. 이것은 Ni wire수가 증가할수록 고밀도 에너지 전자빔에 의해 소실되는 Ni wire량이 증가한 것에 기인한 것으로 생각되며, 그외에 Ni wire를 삽입하기 위하여 홈을 내었는데 실제로 이 홈과 Ni wire와의 공간이 발생하지만 계산할때 빈 공간이

Table 1. Comparison of Ni contents of weld metal

삽입한 Ni Wire 갯수	용착금속 평균 Ni 함량 (wt. %)	계산한 용착금속 Ni함량 (wt. %)
1	10.40	9.82
2	11.50	10.39
3	12.80	10.96
4	13.90	11.51
5	16.60	12.08

없는 것으로 가정했을 뿐만아니라 강중에 Ni과 Fe만 존재한다고 가정하고 계산한 결과로 해석된다. 또 5개의 Ni wire를 삽입한 (E)를 제외하면 두께방향으로의 성분편차도 거의 없다. 이러한 결과로 부터 Ni wire의 삽입에 의해 용접금속중의 Ni 함량을 조정할 수 있고, 용융금속의 유동이 복잡한 전자빔 용접부에서도 적정조건으로 용접하면 Ni wire를 삽입하여 용접금속의 위치에 관계없이 비교적 균일한 성분분포를 얻을 수 있음이 확인되었다.

Fig. 9는 Ni wire를 삽입하여 용접한 각 시험편의 충격시험결과를 나타낸 것으로 시험편은 두께의 1/4 위치에서 채취하였으며, 노치는 용접금속의 중앙부에 가공하고 시험온도는 -196°C~실온까지 4단계로 변화시켰다. 또한 -196°C에서는 Ni wire를 첨가하지 않은 용접금속의 시험결과도 병기하였다. 이 결과로 부터 알 수 있듯이 Ni wire를 첨가한 용접금속의 흡수에너지는 -196°C에서 110~120J 정도를 나타냄으로서, 통상의 용접금속보다 약 70J 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 또 Ni wire의 첨가 방식, 즉 wire 개수의 증가에 따라 흡수에너지가 약간 상승하는 경향을 보이지만, 시

험온도에 따라 역전되는 경우도 있어 wire 개수에 따른 변화는 무시해도 좋을 것으로 생각된다. 이와같이 Ni wire의 첨가에 의해 Ni 함량이 소량 증가함에도 불구하고 충격인성이 크게 개선되는 원인을 검토하기 위하여 용접부에 대한 조직검사를 실시하였다.

Photo. 5는 Ni wire를 삽입한 각 용접부 두께의

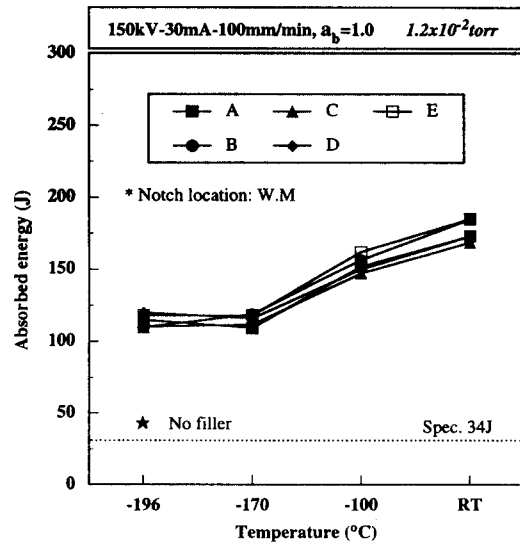


Fig 9. Variation of impact energy of weld metal with the number of Ni filler wire (A:1ea B:2ea C:3ea D:4ea E:5ea)

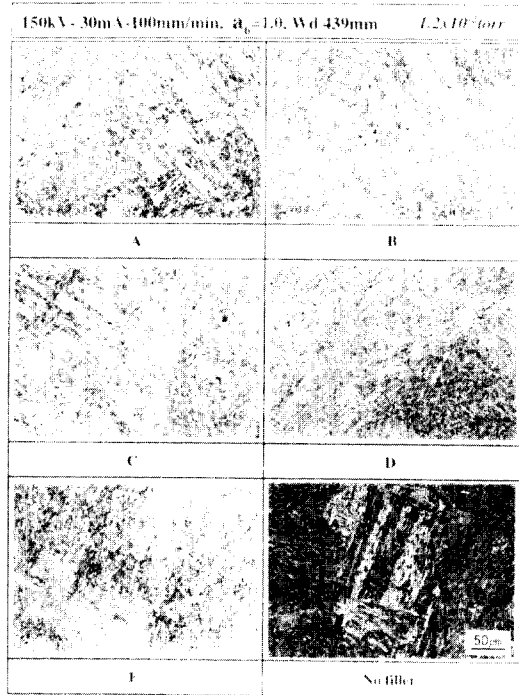
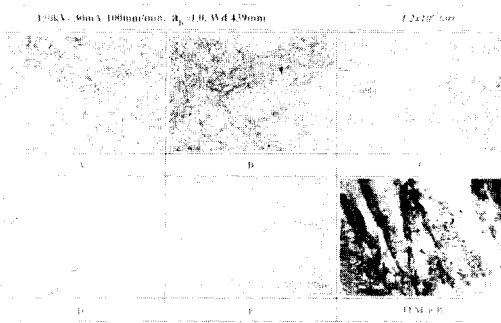


Photo 5. Variation of microstructures of weld metal with the number of Ni filler wire (A:1ea B:2ea C:3ea D:4ea E:5ea)

1/4 위치에 대한 현미경 조직을 나타낸 것이다. Ni wire를 삽입하지 않은 용접부를 포함한 모든 용접금속이 cell상의 응고조직을 포함한 lath 마르텐사이트 조직을 보이고 있지만, Ni wire가 삽입된 용접부는 결정립내에 피상의 제2상이 소량 관찰되고 있다.

또한 Ni wire의 삽입에 따른 용접금속중 제2상의 변화 추이를 보다 정확하게 관찰하기 위하여 500배 조직사진과 투과전자현미경으로 관찰한 사진을 Photo. 6에 나타내었다. 즉 Ni wire의 삽입개수가



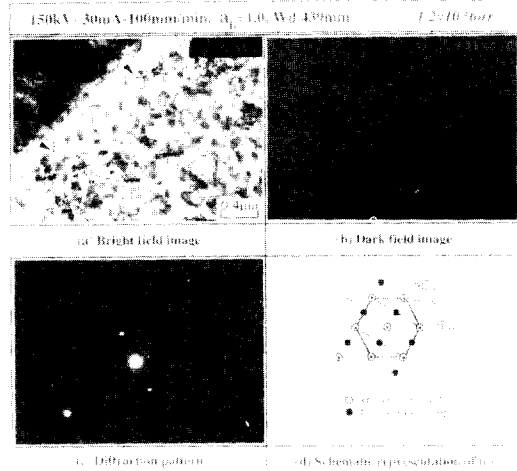


**Photo 6.** Variation of microstructures of weld metal with the number of Ni filler wire (A:1ea B:2ea C:3ea D:4ea E:5ea)

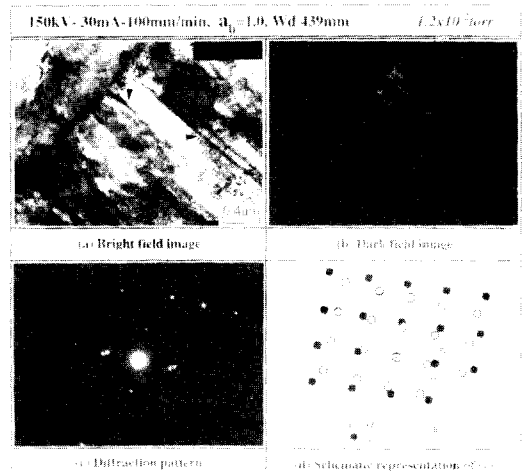
1개에서 5개로 증가함에 따라서 괴상의 제2상이 증가함을 잘 나타내 주고 있고 투과전자현미경의 관찰에서 lath상의 마르텐사이트가 주종을 이루고 있음을 알 수 있으며 괴상의 제2상의 내부에 아주 미세한 석출물들이 다량 분포되어 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 석출물들은 Photo. 7과 같은 투과전자현미경 사진과 회절도형을 분석한 결과 100 ~ 200°C의 저온에서 소려시 형성되는 불안정한 탄화물<sup>5,6)</sup>인  $\epsilon$ -carbide로 확인되었으며 기지조직의 최종 밀면(011)과  $\epsilon$ -carbide의 최종밀면(002)은 서로 평행하며 석출물이 성장하기 쉬운 기지조직의 최종 밀 방향(111)으로 석출물이 성장하고 있음을 잘 나타내 주고 있다. 또한, Ni wire 삽입개수를 1개에서 5개로 증가시키에 따라서 용접금속중의 Ni 함량이 10%~17%까지 증가하게 되고 Ni함량이 증가함에 따라서 마르텐사이트 변태 개시온도(이하 Ms로 표기) 및 마르텐사이트 변태 종료온도(이하 Mf로 표기)가 상대적으로 낮아지게 된다.

따라서 저온에서의 냉각속도가 늦어지고 Ms~Mf 온도 구간에서의 유지시간이 길어지기 때문에 자기소려(auto-tempering) 효과에 의해 불안정한  $\epsilon$ -carbide가 형성되고 tempered 마르텐사이트인 괴상의 제2상이 나타나는 것으로 생각된다. 그리고 lath 사이에는 Photo. 8에서 알 수 있는 바와같이 잔류 오스테나이트가 잔존하고 있음을 투과전자현미경 조직사진과 회절도형 분석결과 확인할 수 있었다. 용접금속중의 Ni량이 증가함에 따라서 Ms 및 Mf점이 낮아지고 그 결과 잔류 오스테나이트량이 증가할 것으로 추정되어 Mössbauer

spectroscopy를 이용하여 정량적으로 분석한 결과는 Fig. 10과 같다. 즉 Ni wire를 삽입하지 않고 용접한 9%Ni강 용접금속중의 잔류 오스테나이트는 2.7(at. %)이었지만 Ni wire 삽입에 의한 용접금속의 Ni함량 증가(17%)에 따라 잔류 오스테나이트



**Photo 7.** Transmission electron micrographs of weld metal and SAED pattern showing the crystallographic relationship between matrix and ppt.



**Photo 8.** Transmission electron micrographs of weld metal and SAED pattern showing the crystallographic relationship between matrix and ppt.

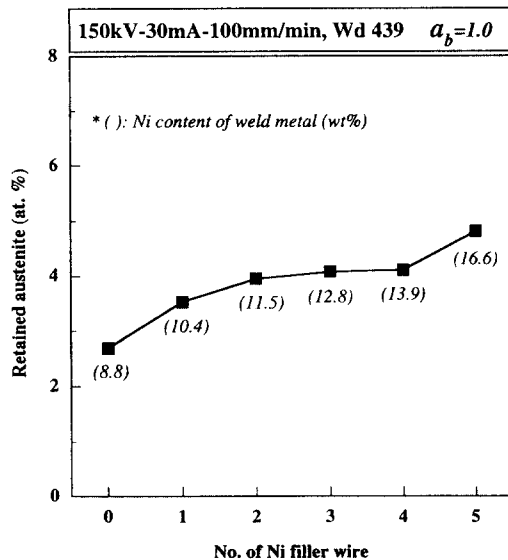


Fig 10. Variations of retained austenite with number of Ni filler wire

는 4.8(at. %)까지 증가하여 미미한 증가추이를 나타내었다. 따라서 Ni wire 삽입에 의한 용접금속의 인성증가는 광학현미경 조직과 투과전자현미경 사진으로 확인된 tempered 마르텐사이트량의 증가에 기인한 것으로 사료되며 일부 잔류 오스테나이트량의 증가가 인성 개선에 기여한 것으로 생각되었다.

#### 4. 결 론

9%Ni강의 전자빔 용접적용 가능성을 검토하기 위하여 용접부 조직 및 기계적 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 9%Ni강의 전자빔 용접 적용시 결함 및 강도상의 문제는 없는 것으로 확인되었으며 용접금속의 충격치는 50J정도로서 ASTM 규격은 만족하지만 하한에 근접하고 있다.
- 2) 용접금속의 충격인성을 개선시키기 위하여 Ni를 삽입한 경우 용접금속내에 Ni 함량은 비교적 균일한 분포를 나타내었으며 충격인성도

-196°C에서 110~120J정도를 나타냄으로서 실제 시공상 문제가 없을 것으로 생각되었다.

- 3) Ni 삽입에 따른 용접부 충격인성의 개선은 마르텐사이트 변태온도 저하에 따른 tempered 마르텐사이트 형성에 기인한 것으로 생각되며 일부 잔류 오스테나이트량의 증가가 인성 개선에 기여한 것으로 판단된다.
- 4) 전자빔 용접부는 비드 폭이 좁기 때문에 충격 시험시 노치 선단부에서 약한 모재로 균열이 전파 파괴되어 표준 V-notch 충격시험을 통해 용접금속의 인성을 평가하기 위한 용접금속 폭은 2.5mm 이상 이었다.
- 5) 증기압이 큰 원소인 Mn은 저진공에서는 큰 문제가 없었으나 고진공 상태에서는 용접금속중의 Mn 분포가 불균일할 뿐만아니라 모재의 약 50%까지 부분적으로 감소하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 김숙환, 강정윤: 9%Ni강의 비드 형상에 미치는 전자빔 용접조건의 영향, 대한용접학회 추계학술발표 개요집, (1996) p. 153
2. 入江宏定: "電子ビ-ム溶接", 溶接學會誌, Vol. 64, No. 8, (1995) pp582~597
3. 주용용, 이종봉, 김결실, 한재광: "9%Ni강 파괴특성 및 LNG탱크에의 적용성 평가, 산업과학기술연구소 보고서, (1995) p. 117 ~ 124
4. Mel M. Schwartz: Brazing, ASM International (1987) p. 44
5. Matsuda, Hashimoto, Arata: "Some metallurgical investigations on electron-beam welds" IIW Doc. IV-22-70, (1970) p. 1 ~ 14
6. 菊池, 長倉, 桶谷: "遷移金屬炭化物の結晶構造", 鐵と鋼, (1971) p. 127 ~ 171
7. Smith: "Structure and properties of engineering alloys", McGraw-Hill, 1981, p. 61