

# 압력용기용 1.25Cr-0.5Mo 강의 Submerged Arc Welding시 입열 및 PWHT 냉각속도가 용접부 기계적 성질에 미치는 영향

이 동 환\* · 박 중 진\*\*

\*전북대학교 공과대학 기계항공시스템 공학부 기계설계전공

\*\*두산중공업 기술연구원

## Effect of Welding Heat Input and PWHT Cooling Rate on Mechanical Properties of Welded Region at SAW of 1.25Cr-0.5Mo Steel for Pressure Vessel

Dong-Hwan Lee\* and Jong-Jin Park\*\*

\*Faculty of Mechanical & Aerospace System Engineering, Engineering College,  
Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea,

\*\*R&D Center, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd, Changwon 641-792, Korea

### Abstract

In order to propose the optimum welding condition for field application, the effects of welding heat input and cooling rate at PWHT on the mechanical properties were investigated. Submerged arc welding of 1.25Cr-0.5Mo steel for pressure vessel was conducted at welding heat inputs of 15.2kJ/cm, 30.9kJ/cm, and 44.8kJ/cm, and cooling rates of 184°C/hr, 55°C/hr, and 20°C/hr at PWHT.

From the test results, as the welding heat input increase up to 30.9kJ/cm, the changes of microstructure and impact toughness were small. At the heat input of 44.8kJ/cm, however, toughness decreased obviously due to the coarsening of coarse-grained HAZ and formation of ferrite at bainite grainboundary of weld metal. On the other hand, cooling rates at PWHT did not effect on the changes in microstructure and mechanical properties. Even though tensile strength and impact toughness at all welding conditions of this study were above the minimum specification requirement, it was confirmed that heat input of 30.9kJ/cm was the optimum welding condition to improve welding performance by higher heat input.

\* Corresponding author : hsb9020@mitel.co.kr

(Received July 5, 2004)

Key Words : 1.25Cr-0.5Mo alloy pressure vessel, Submerged arc welding, Welding heat input, Cooling rate, Post weld heat treatment

## 1. 서 론

석유화학 플랜트에 사용되는 압력용기의 경우 화학공업의 발달과 새로운 프로세스의 개발에 따라 대형화 및 고온 고압화 등 사용조건이 가혹화가 진행되어 왔으며, 이에 대응하기 위한 새로운 압력용기용 강의 개발이 활발히 수행되어 왔다<sup>1-4)</sup>.

고온, 고압 및 수소환경에서 사용되어지는 압력용기

용 강은 대부분 ASME Code Section II Part A의 SA387계열의 Cr-Mo계 저합금강이 사용되고 있는데<sup>5,6)</sup>, 이러한 강종은 기본적으로 고용강화 및 미세 탄화물들의 석출에 의한 고온 강도, 크리프 강도 및 수소취식 저항성 향상을 목적으로 개발되었다.

그러나 압력용기 제작시 반드시 수행되어야 하는 용접공정은 제작 비용의 절반이상을 차지할 정도로 중요한 위치를 차지하지만, 용접시의 급열, 급냉의 다양한 열사이클로 인하여 용착금속의 물성치 저하 뿐만 아

니라 용접 열영향부(heat affected zone)의 취화, 용접결함, 수소취성(hydrogen embrittlement) 등의 문제점을 야기함으로써<sup>7-9)</sup> 본래의 우수한 특성을 저하시키게 된다. 이러한 문제점들은 용접능률을 향상시키기 위해 최근 널리 사용되고 있는 서브머지드 아크 용접 등과 같은 대입열 용접시에는 더욱 큰 문제점으로 나타나기 때문에 설비 건전성측면에서 용접 열영향부 및 용착금속의 제특성 확보가 중요시 된다.

따라서 본 연구에서는 압력용기용 강판으로 주로 사용되고 있는 1.25Cr-0.5Mo강을 대상으로 하여 대입열 용접방법인 서브머지드 아크 용접의 적용 시 용접 입열량 변화 및 용접후열처리(PWHT) 냉각속도의 변화에 따른 용접이음부의 기계적 성질 및 미세조직 특성을 검토하여 최적 용접조건을 선정함으로써 실제 현장에서 적용 가능한 대입열 용접조건을 제시하고자 한다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 실험재료 및 용접

본 실험에 사용된 재료는 압력용기용 강재인 ASME SA-387 Gr.11 Cl.2의 1.25Cr-0.5Mo 강판으로서 두께는 38mm이며, 900℃에서 38분 동안 normalizing 열처리가 수행되었다. 용접 이음부는 용접 변형을 최소화하기 위해 그루브 홈의 깊이의 비를 6:4로 한 X형 그루브를 가공하였다. 초층 용접은 SMAW로 120~160 암페어, 24~26 볼트로 실시하였으며, 나머지 층은 직경 4.0mm의 플럭스 안에서 AWS Class F8P0-EB2-B2 solid wire를 송급하여 아크를 발생시키는 SAW를 500~700 암페어, 30~35 볼트에서 실시하였다. 용접속도는 30~46cm/min.이었으며, 층간온도는 최대 232℃ 이내에서 실시하였고 용접 후 용접부의 확산성 수소량을 감소시켜 균열방지를 위해 350℃에서 3시간 동안 후열(post-heating)을 실시하였다.

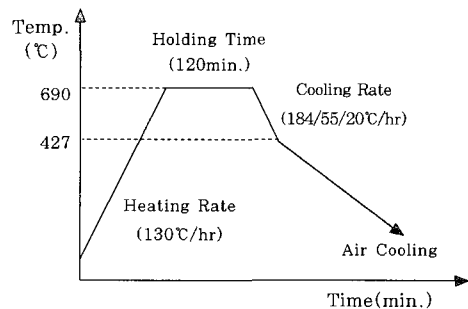
Table 1에 모재 및 용접재료의 화학성분을 보여준다. Table 2는 용접부 기계적 성질의 고찰을 위하여 용접 입열량과 후열처리 냉각속도를 변화에 따라 준비된 9개 시료의 용접조건을 보여주고 있으며, Fig. 1은 용접후열처리의 개략도를 보여준다.

**Table 1** Chemical composition of base metal and welding material(%)

|      | C    | Mn   | P     | S     | Si   | Cr   | Mo   |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| B.M  | 0.15 | 0.61 | 0.007 | 0.001 | 0.64 | 1.43 | 0.57 |
| Wire | 0.12 | 0.80 | 0.007 | 0.007 | 0.09 | 1.19 | 0.48 |

**Table 2** Conditions of heat input on welding and cooling rate at PWHT for each specimen

| Specimen | Heat Input (kJ/cm)                    | Cooling rate at PWHT(℃/hr) |
|----------|---------------------------------------|----------------------------|
| A1       | 15.2<br>(415amp./28volt/<br>46cm/min) | 184                        |
| A2       |                                       | 55                         |
| A3       |                                       | 20                         |
| B1       | 30.9<br>(600amp./30volt/<br>35cm/min) | 184                        |
| B2       |                                       | 55                         |
| B3       |                                       | 20                         |
| C1       | 44.8<br>(700amp./32volt/<br>30cm/min) | 184                        |
| C2       |                                       | 55                         |
| C3       |                                       | 20                         |



**Fig. 1** PWHT chart

### 2.2 실험방법

용접이 완료된 후 용접 비드에 수직 방향으로 시료를 절단하여 미세조직, 인장, 경도 그리고 충격 시험을 수행하였다. 미세조직은 2% 나이탈 용액을 사용하여 에칭을 실시한 후 용접부의 각 조직에서 관찰되었다. 인장 시험은 25.4 × 25.4 × 20mm의 표점거리 내에 모재, 열영향부, 용착금속이 포함되는 cross-weld 시험편을 제작하여 상온에서 수행되었다. 또한 용접후열처리의 영향을 평가하기 위해 용접후열처리를 수행하지 않은 용접부에 대해서도 인장시험이 수행되었다. 경도는 표면으로부터 약 2mm 지점에서 용접부를 가로질러 vickers hardness를 측정하였다. 충격시험은 ASME Code Section II, Part A, SA-370에 따라 Charpy V-notch 시험편을 가공하였다. 노치는 용착금속과 열영향부에서 각각 가공하여 시험온도에 따른 충격흡수에너지(joule)와 연성파면율(%)을 측정하였고 시험온도에 따른 연성파면율로부터 파면천이온도를 tangential hyperbolic function에 의해 결정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직 변화

Fig. 2는 184°C/hr의 용접후열처리 냉각속도에서 용접 입열에 따른 용접부의 단면을 보여준다. 용접 입열량의 증가에 따라 열영향부가 커지고 있으며, 각 용접 pass의 용입이 깊고 용착량이 증가함을 알 수 있다. 용접부 각 위치별 미세조직을 보면, 모재는 페라이트와 베이나이트의 혼합조직 또는 베이나이트 조직을 보이고 있다. 열영향부는 완전 베이나이트 조직을 보이고 있으며, Fig. 3은 용접후열처리 냉각속도가 184°C/hr일 때 용접 입열에 따른 coarse-grained HAZ의 미세조직을 나타낸다. 용접 입열량이 30.9kJ/cm 까지 증가할 때 결정립 크기의 증가가 약간 발생하지만 44.8kJ/cm에서는 조대화가 뚜렷이 관찰된다. 그러나 후열처리 냉각 속도에 따라서는 결정립의 조대화는 차이가 보이지 않았다. Fig. 4는 용접후열처리 냉각속도가 184°C/hr일 때 용접 입열에 따른 용착금속의 미세조직을 나타낸다.

용접 입열량이 30.9kJ/cm일 때 까지 미세한 베이나이트 조직을 보이고 있으나, 용접 입열량이 가장 큰 44.8kJ/cm에서는 베이나이트 결정 입계에 페라이트가 관찰되고 있다. 그러나 후열처리 냉각속도에 따른 각 미세조직의 변화는 큰 차이를 보이지 않았다.

#### 3.2 인장특성의 변화

용접부의 용접 절차에 대한 검증을 위해 수행되는 인장시험의 합격기준은 ASME Section IX의 QW-153에 따라 모재의 최소 요구 인장강도 이상이거나 용착금속 또는 용접 계면(weld interface) 밖의 모재에서 파단될 경우 모재 최소 인장강도 요구치의 5% 이상 저하되지 않으면 합격으로 간주된다<sup>10)</sup>. Fig. 5는 각 용접 입열에서 용접후열처리 냉각속도에 따른 인장강도의 변화를 보여준다. 시험된 모든 용접조건에서 파단은 모재 영역에서 파단되었으며, ASME 코드의 모재 최소 요구치(517.1MPa)를 상회함으로써 설계 강도 요구치를 만족함을 확인하였다. As-welded 상태에서의 인장강

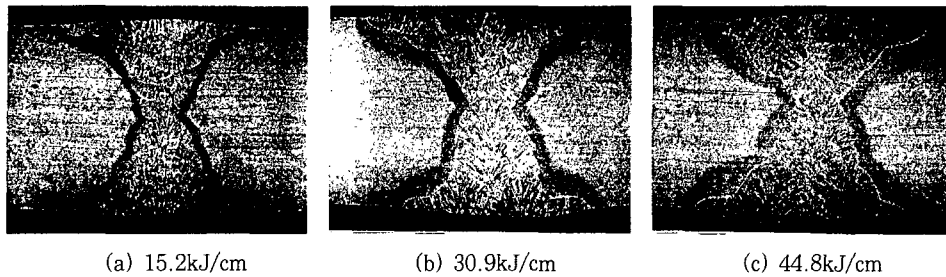


Fig. 2 Macrostructures of weldment with the welding heat input at 184°C/hr PWHT cooling rate

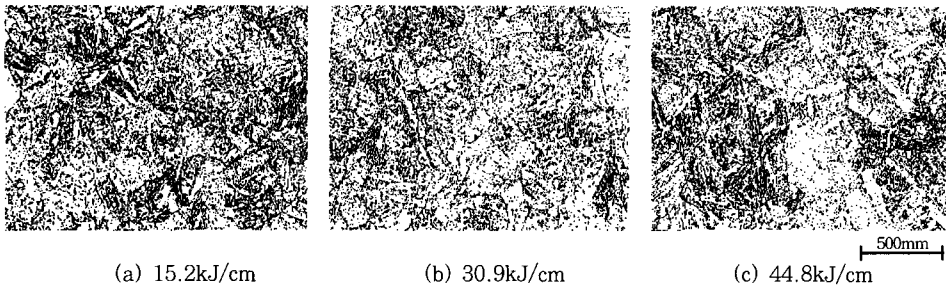


Fig. 3 Microstructures of CG HAZ with the welding heat input at 184°C/hr PWHT cooling rate

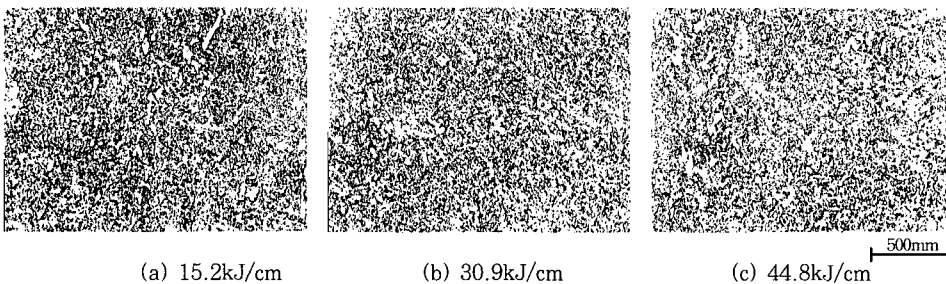


Fig. 4 Microstructures of weld metal with the welding heat input at 184°C/hr PWHT cooling rate

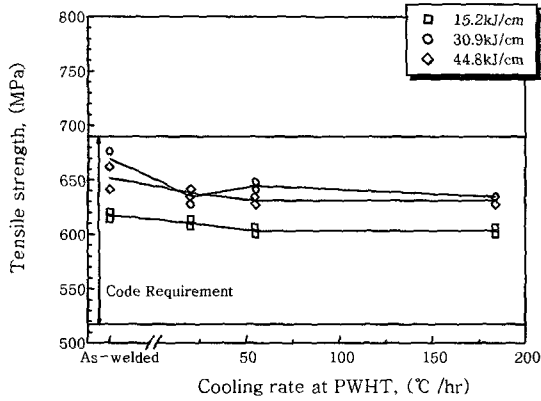
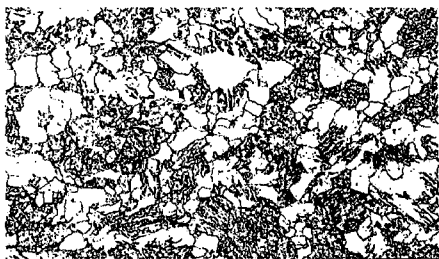
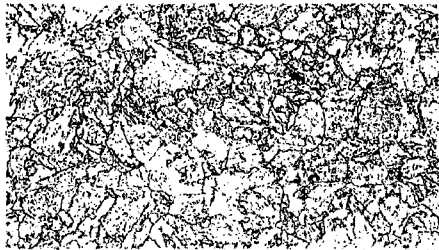


Fig. 5 Changes of tensile strength with cooling rate for each welding heat input



(a) 15.2kJ/cm



(b) 30.9kJ/cm

Fig. 6 Microstructures of base metal

도는 용접후열처리를 수행하였을 때 보다 높게 나타났으며, 이는 PWHT에 의한 템퍼링 효과로 판단된다. 그러나 후열처리 냉각속도에 따라서는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 또한 모재에서 파단 되었을지라도 15.2kJ/cm의 용접 입열량에서 가장 낮은 인장강도를 보임에 따라 모재의 미세조직을 관찰하였다. Fig. 6은 15.2kJ/cm과 30.9kJ/cm의 용접 입열량에서 파단된 인장시편의 모재 조직을 보여준다. 15.2kJ/cm의 용접 입열량에서는 페라이트와 베이나이트의 혼합조직을 보인 반면, 30.9kJ/cm의 용접 입열량에서는 완전 베이나이트를 보임으로써 30.9kJ/cm의 용접 입열에서 강도의 증가를 초래하였을 것으로 사료된다.

### 3.3 경도의 변화

Fig. 7은 용접부에서 측정된 경도의 분포를 보여준

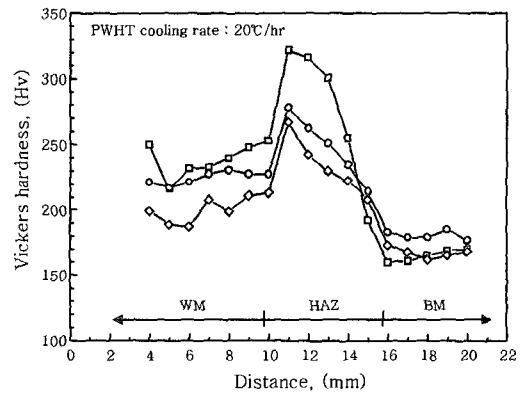
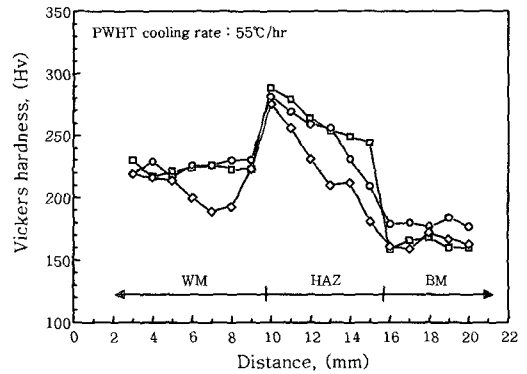
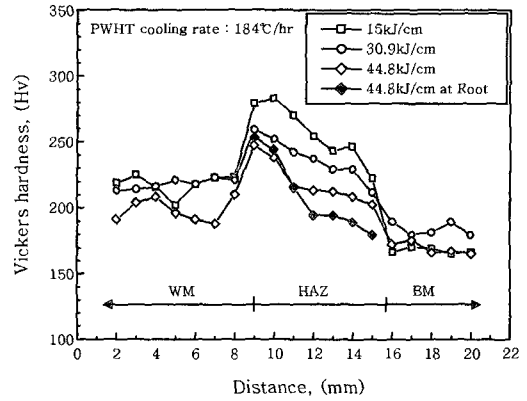


Fig. 7 Hardness distribution of weldment

다. 열영향부의 경도는 용융선 부근에서 가장 높은 값을 보이고 모재 측으로 갈수록 저하한 반면, 용착 금속은 열영향부 보다 낮은 경도 값을 보였으며 모재에서 가장 낮은 경도 값을 보였다. 용착금속의 경도가 열영향부 보다 낮은 것은 wire에 포함된 탄소함량이 낮았기 때문으로 사료된다. 또한 용접인자와의 관계를 살펴보면, 먼저 용접 입열량의 증가에 따라 열영향부 및 용착 금속의 경도는 감소하고 있음을 보여준다. 입열량의 증가로 인하여 경도에 영향을 미치는 최고온도는 입열량과 관계가 없기 때문에 경도의 차이는 용접 입열 후 냉각속도의 차이에 의한 것으로 사료된다. 즉, 고입열의 용접 입열량에서는 용접 입열 후 냉각속도가 느리게 됨으로써 열영향부에서는 Fig. 3에서 확인된 바와 같이

조대 열영향부의 결정입자가 크고 넓은 범위에 형성될 것이며, 용착금속에서는 Fig. 4에서 확인한 바와 같이 냉각속도가 느려 입계 페라이트의 형성이 이루어짐으로써 경도의 저하를 유발한 것으로 판단된다. 입열량 44.8kJ/cm와 184°C/hr의 용접후열처리 냉각속도에서 용접된 시편의 루트부에서 측정된 경도 값이 표면에서 5mm 떨어진 위치의 경도보다 낮은 이유도 다층 용접 시 용접부 표면층에서의 용접 후 냉각속도가 축적된 열 사이클의 영향을 받는 용접 루트부 보다 빨랐음을 입증해준다. 모재의 경우 용접변수와 관련이 없음에도 불구하고 30.9kJ/cm의 입열량에서 가장 높은 경도값을 보이는 것은 페라이트와 베이나이트로 구성된 다른 입열량에서의 미세조직과는 달리 완전 베이나이트로 구성되었기 때문으로 사료된다. 반면에, 용접 입열시의 온도보다 상당히 낮은 용접후열처리 온도에서의 냉각속도에 의해서는 큰 차이를 보이지 않았다.

3.4 충격특성의 변화

Fig. 8은 열영향부에서 용접 입열량에 따른 충격흡수 에너지의 관계를 180°C/hr의 용접후열처리 냉각속도에 대하여 대표적으로 보여준다. 충격흡수에너지에 의한 용접 절차의 검증 기준은 명시되지 않으나, 일반적으로 상온에서 30joule 이상이면 만족스러운 것으로 판단된다. 본 용접부에 대한 충격인성 값은 모두 이 값을 상회하였다. 열영향부에서의 충격흡수에너지는 용접 입열량이 증가함에 따라 저하함을 보이고 있다. 이 이유는 미세조직에서 관찰된 바와 같이 조대 열영향부의 구 오스테나이트 입계 크기가 증가하고 있기 때문으로 사료된다. 결정 입자의 크기와 인성과의 관계는 전위의 이동에 의해 설명되어 진다. 전위의 이동은 slip band를 따르며, 한 입자에서 다른 입자로의 이동은 slip 면에 존재하는 전단응력이 slip band 선단에 집중되어 이루어진다.

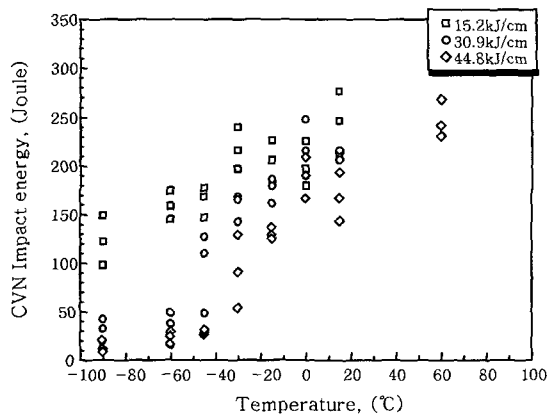


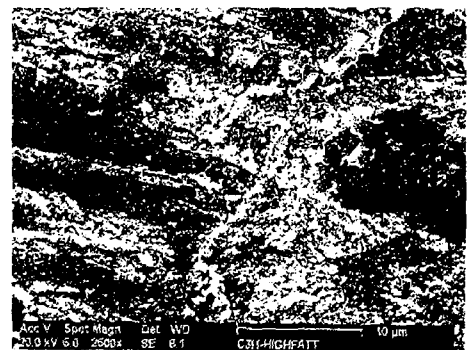
Fig. 8 Effect of heat input on CVN impact energy at HAZ and 184°C/hr PWHT cooling rate

어진다. 이러한 전위의 이동에 관여하는 전단응력은 입자의 크기에 따라 커지므로 전위가 쉽게 이동할 수 있어 충격인성이 감소하게 된다. 또한 Fig. 9는 열영향부 시험편 중에서 파면천이온도(fracture appearance transition temperature)가 가장 낮은 A1(입열량 15.2kJ/cm)과 가장 높은 C3(입열량 44.8kJ/cm) 시험편의 SEM 관찰사진을 각각 보여준다. 입열량이 많은 C3 시험편은 구 오스테나이트 입계의 조대화가 관찰된 바 있으며, 구 오스테나이트 입계 내의 베이나이트 기지조직은 SEM 사진에서 보인 바와 같이 페라이트 상이 넓게 존재하고 있어 미세한 탄화물의 분포가 A1에 비하여 성기게 발생하였기 때문에 충격 인성치를 떨어뜨린 것으로 사료된다.

Fig. 10은 용착 금속에서의 용접 입열량에 따른 파면천이온도의 변화를 180°C/hr의 용접후열처리 냉각속도에 대하여 보여준다. 용접 입열량에 따라서는 30.9kJ/cm 까지의 입열량에서는 충격인성의 저하를 보이지 않지만 44.8kJ/cm의 입열량에서 명백한 충격인성의 저하를 보이고 있다. 후열처리 냉각속도가 184°C/hr 일 때 용접 입열량에 따른 미세조직을 보여주는 Fig. 4로부터 30.9kJ/cm까지의 용접 입열량에서는 아주 미세한 베이나이트의 조직이 관찰된다. 그렇지만 44.8kJ/cm의 용접 입열량에서는 미세한 베이나이트



(a) A1\_heat input : 15.2kJ/cm



(b) C3\_heat input : 44.8kJ/cm

Fig. 9 SEM microstructure near to fracture face in HAZ specimen

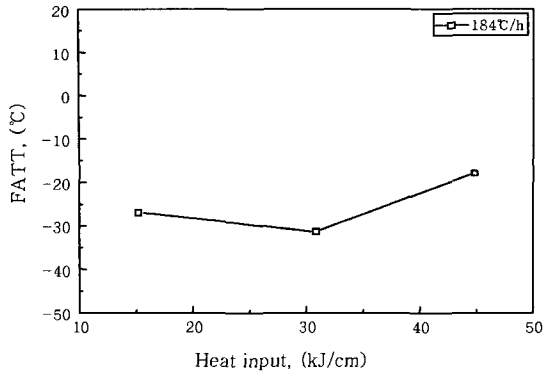


Fig. 10 Relationship between FATT and heat input in weld metals

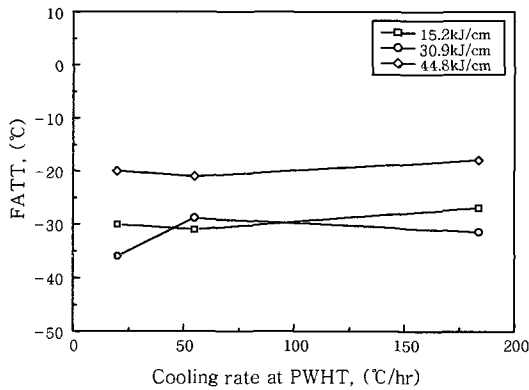


Fig. 11 Relationship between FATT and PWHT cooling rate in weld metals

트를 보이고 있으나 입계 페라이트의 형성이 관찰됨으로써 이로 인한 충격인성의 저하가 발생한 것으로 사료된다. 따라서 용접 능률 향상을 위해서는 용접 입열을 높이면서 미세한 베이나이트 조직을 갖는 30.9kJ/cm의 용접 입열량이 적합할 것으로 사료된다.

Fig. 11은 용착금속에서의 후열처리 냉각속도에 따른 파면전이온도의 변화를 보여준다. 각 용접 입열량의 조건에서 파면전이온도는 후열처리 냉각속도에 따라 상관관계가 명확하지 않음을 알 수 있다. 이는 후열처리 냉각속도에 따른 미세조직적 변화의 차이가 없었기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

압력 용기용 1.25Cr-0.5Mo강의 서브머지드 아크 용접부를 대상으로 기계적 성질에 미치는 용접 입열량

및 용접후열처리 냉각속도의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접 입열량이 30.9kJ/cm 까지 증가함에 따라 미세조직 및 충격인성의 변화는 거의 없으나, 44.8kJ/cm의 입열량에서는 조대 열영향부의 결정립 조대화과 용착 금속의 베이나이트 결정입계에 페라이트가 형성됨으로써 충격인성을 저하시켰다.

2) 용접후열처리 냉각속도에 따라 미세조직적 변화는 관찰되지 않았으며, 이로 인한 인장강도, 경도, 충격인성의 변화는 미미한 것으로 판단된다.

3) 본 연구에 적용된 용접 입열량과 후열처리 냉각속도의 범위에서는 인장, 충격이 규격 요구치를 상회하는 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 그렇지만 용접 능률을 향상시키기 위한 대입열 용접을 위해서는 30.9kJ/cm의 용접 입열량이 최적의 용접조건임을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. S. Inoue et al. : Manufacture of Huge Pressure Vessel Made from Advanced Cr-Mo Steel, Proc. 13th Int. Forgemasters Meeting, 2 (1997), 255-266
2. 김정태, 지병하, 김동진 : 수소취가 반응기용 극후 2.25Cr-1Mo 단강의 미세조직과 기계적 성질, 제9회 재료강도 심포지움, 1995, 225-237 (in Korean)
3. J.T.Kim, B.H.Ji and D.J.Kim : Mechanical Properties and Cracking Susceptibility in Welds of 3Cr-1Mo-base Steels for Pressure Vessels, Preprints of the Natioal Meeting of Autumn, 1998, 301-302 (in Korean)
4. 石黒 澈 : 鐵と鋼, 73 (1987), 34-40 (in Japanese)
5. W.F. Bland et al. : Petroleum Proc. Handbook, McGraw-Hill, New York, 1967
6. American Society of Mechanical Engineers(ASME) Code Section II Part A
7. 김병훈, 김동진, 김정태 : 압력용기용 Cr-Mo강 재현 HAZ부의 수소취식 저항성에 관한 연구, 대한금속학회 추계학술대회, 1999, 110 (in Korean)
8. B.H.Kim, D.J.Kim and J.T.Kim : Behaviour of Carbides on Hydrogen Attack at weld Joint of 3Cr-1Mo-V Steel for Hydrocracking Vessel, Proceedings of the 1999 spring Annual Meeting of KWS Volume 33 (1999), 35-38 (in Korean)
9. H. Kihara et al., : Weld Cracking Tests of High Strength Steels and Electrics, Welding Journal, 1968, 14-15
10. American Society of Mechanical Engineers(ASME) Code Section IX Part QW-153, 2001