

## 천연가스 수송용 API 5L-X42 강관의 용접방법에 따른 용접부의 미세조직과 기계적 특성에 관한 연구

백중현 · 김철만 · 김영표 · 김우식

한국가스공사 연구개발원  
(1997년 11월 12일 접수, 1998년 5월 25일 채택)

### A Study on the Microstructure and Mechanical Properties for the Weldment with Variation of Welding Process of the API 5L-X42 Pipeline for Natural Gas Transmission.

Jong-Hyun Baek · Cheol-Man Kim · Young-Pyo Kim and Woo-Sik Kim

Korea Gas Corporation R&D Center, 277-1 Il Dong, Ansan, 425-150

(Received 12 November 1997; accepted 25 May 1998)

#### 요 약

국내에 액화천연가스가 도입된 이래 환경에 대한 문제를 인식함에 따라 천연가스의 수요는 계속적으로 증가하고 있다. 청정연료인 천연가스는 용접에 의해 고장력강 배관을 사용하여 각 도시로 공급되고 있다. 천연가스 공급용 배관은 공급압력에 따라 중압관과 고압관으로 구분된다. 배관은 주로 작업의 용이성으로 피복아크용접에 의해 용접되며, 현장 작업여건에 따라 다른 용접공정이 적용되기도 한다. 본 연구는 고압관으로 사용되는 API 5L X42 배관에 대한 용착금속부의 미세조직 변화와 기계적 특성을 관찰하였다.

**Abstract** - Demand of the clean and convenient natural gas has continuously increased with recognizing of the environment problem since liquefied natural gas was introduced in Korea. Clean fuel natural gas was supplied to each city through high tensile strength pipeline connected by welding. Grades of pipeline were divided into the high and middle pressure according to supply pressure. Pipeline was welded mainly SMA welding process due to its easy handling, the other welding process was adopted according to the constructing condition. We were examined on the microstructure variation and mechanical properties of weld metal for high pressure pipeline, API 5L X-42.

**Key words** : Natural gas, Pipeline, SMAW, Welding, API 5L X42.

#### 1. 서 론

국내 천연가스는 고장력 배관을 통하여 각 지역으로 공급되고 있다. 가스배관은 공급압력에 따라 API 5L -X65, X42 두종류의 강종을 사용하고 있다. GTAW 공정에 의해 초층을 용접

하며 그 위층은 SMAW로 가스 배관을 시공하고 있다. 그리고 건설현장 여건에 따라 GTAW로 전층을 시공하는 경우도 있다. 가스배관 용접은 사용되는 강종, 공급압력, 배관직경, 용접부의 품질, 용접현장의 환경, 용접공의 기량등을 고려하여 가장 절적인 용접시공법이 채택되

고 있으며, 가연성 고압가스를 공급하기 때문에 엄격한 시공관리가 행해지고 있다. 동절기시 용접부 취약성을 방지하기 위하여 SMAW 공정에서는 고인성, 고강도 저수소계 용접봉인 E7016과 E9016-G 피복아크 용접봉을 사용하며, GTAW에서는 ER70S-G를 사용하여 수직상향자세로 용접된다. 본 연구는 용접공정 변화에 의한 용접부의 미세조직 변화와 기계적성질 변화를 파악하고자한다.

## 2. 이론

Thomson에 의해 전기저항 용접법이 개발된 이래 많은 종류의 용접법이 각종 구조물에 적용되고 있다. 용접금속부는 용점이상 온도로 가열 및 응고가 반복되어 기계적 성질과 미세조직이 변하게된다. 이러한 배관용접부는 입열량, 냉각속도, 용접봉의 종류, 배관 및 용착금속의 화학성분등에 의해 모재와는 다른 미세조직이 형성된다. 용접부조직은 1500℃ 이상으로 용융되어 응고된 용착금속부, 1250℃ 이상으로 가열되어 조대화된 조대역, 1100℃까지 가열되어 미립과 세립이 혼합된 혼립역, A<sub>C3</sub>변태점까지 가열되어 미세화되어 인성과 기계적성질이 우수한 세립역, 750℃, 즉 A<sub>C1</sub>변태점이상으로 가열되어 펄라이트의 변태 또는 세멘타이트의 구상화가 진행된 부분변태역 및 300℃ 부근으로 가열되어 열응력 및 석출에 의해 취화를 나타내는 취화역으로 구분된다.<sup>1)</sup> 이와같이 구분된 영역에서의 미세조직은 결정립계 페라이트, 침상형 페라이트, 펄라이트 그리고 부분적으로 마르텐사이트와 베이나이트로 형성된다. 이러한 용착금속 및 열영향부의 조직변화에 따른 중요한 문제는 인성과 용접균열이다.

C-Mn계 용착금속부 미세조직 변화에 대하여 Mn의 첨가량을 0.6~1.8%로 변화시킨 결과 Mn이 증가함에 따라 침상형 페라이트의 증가와 조직의 미세화에 의해 용착금속부 인성이 향상됨을 Evans는<sup>2)</sup> 연구하였으며, Taylor는<sup>3)</sup> E7016 용접봉에 대하여 Mn을 1.1~2.0%로 변화시킨 결과 1.7%Mn이 가장우수한 인성과 기계적 성질을 나타내었음을 보고하였다. Zhang

과 Farrar에 의하면<sup>4)</sup> 용착금속부에서 50~75%의 침상형 페라이트의 형성은 용접부의 인성향상에 상당한 효과가 있다고 보고하였고, Abe등은<sup>5)</sup> Ti-B이 첨가된 저수소계 용접봉을 사용하여 수직상향 용접결과 용착금속부의 조직이 미세화되어 인성이 향상되었다고 보고하고 있다. 이상과같이 용접부의 인성에 관해서는 미세조직이 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 본 연구는 용접공정을 달리한 용접부에 대하여 미세조직 관찰, 인장시험, 경도측정, 충격시험 및 CTOD 시험을 실시하여 용접부의 특성을 파악하고자한다.

## 3. 실험방법

API 5L-X42, 24"(외경), 10.3t 배관에 대하여 W1, W2 두가지 용접공정으로 배관을 원주용접 하였다. Bevel각도는 30°, V-Groove로 가공하여 수직상향용접 하였다. 표 1에는 본 실험에서 사용된 용접조건을 나타내었다.

Table 1. Welding procedure sequence for API 5L-X42 pipeline

Variation Specimen	Pass	Welding Method	Filler Metal		Polarity	Heat Input (KJ)
			AWS	Dia. (∅)		
W1	1	GTAW	ER70S-G	2.4	DCSP	5~15
	2~3	SMAW	E7016	3.4	DCRP	9.6~31
W2	1~5	GTAW	ER70S-G	2.4	DCSP	5~15

배관모재부와 용접부를 관찰하기 위하여 3% Nital 부식액을 사용하여 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 용착금속부와 모재부에 대하여 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer)를 이용해 성분분석 결과를 표2에 나타내었다. 경도측정은 0.5kg 하중하에서 미소비이커스 경도기를 사용하여 BS4515<sup>6)</sup> 규정에 의거 용접부와 모재부가 포함된 부분에 대하여 배관두께 중앙부위와 배관 내, 외부 ±1.5mm부위에서 1mm간격으로 측정하였다. 용접부의 연성-취성전이 온도를 살펴보기 위하

Table 2. Chemical compositions of the base metal and weldments (wt.%)

Element Specimens	Si	Mn	C	S	O	N	P	Ni	Mo	Cu	Nb	Cr	Fe
Base	0.19	0.89	0.067	0.0051	0.0010	0.0044	0.016	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	bal.
W1	0.53	0.93	0.074	0.0053	0.0507	0.0196	0.019	0.01	0.01	0.08	0.01	0.04	bal.
W2	0.65	1.17	0.065	0.0078	0.0044	0.0044	0.014	0.01	0.01	0.09	0.01	0.03	bal.

여 용착금속부에 대하여 0~-100℃구간에서 충격시험을 실시하였다. CTOD 시험편의 길이방향은 배관축과 평행하며, 폭은 배관의 원주방향과 평행하며, 노치는 배관두께방향으로 용접부 중앙에 위치하도록하여 40, 0 및 -30℃에서 실험하였다. 용접부의 인장강도를 평가하기 위하여 길이 230mm, 폭 38.1mm 시험편으로 인장시험을 행하였다. 또한, 용접부의 연성평가를<sup>7)</sup> 위하여 용접부위 양측에 노치각도는 45°, 노치깊이는 6mm로 별도의 시험편을 가공하였으며, cross head speed는 1mm/min.로 시험하였다. 노치인장강도와 인장강도비(NTS/TS), 노치인장강도와 항복강도비(NTS/YS)를 비교하여 용접부 연성을 비교하였다.

#### 4. 실험결과

##### 가. 미세조직관찰

본 실험에 사용된 API 5L X-42 배관모재의 미세조직은 약 7-8 $\mu$ m 크기의 결정립으로, 등축상의 페라이트가 주로 있으며 부분적으로 펄라이트조직도 관찰되었다.

그림1에 W1 용접법에 의한 미세조직을 나타내었다. 그림 1-a)의 상층부위는 단층용접의 용고조직과 동일한 형태로 형성된다. 상층부는 일단 오스테나이트화된후 급냉되어 주상정 조

직으로 조대하게 형성되며 그 결정립을 따라 ferrite side plate들이 성장되어 있으며 결정립 내부에는 '침상형 페라이트 조직이 형성되어 있었다. 그리고 열영향부는 망상형 페라이트로 형성되었으며 그 내부는 조대한 lath ferrite로 이루어져 있었으며 모재방향으로는 점차로 미세한 페라이트조직이었다. 그림 1-b)의 두 번째층 상단부위는 용접에의해 용접부근까지 가열된후 세번째층의 용접열이력에 의해 1250℃ 이상으로 열영향을받아 조대화된 영역이다. 두 번째층의 중간부위는 용접에의해 용융점 부근까지 가열된후 세 번째층 열이력에 의해 Ac<sub>3</sub>점 이상으로 가열된 조직으로 미세한 등축 페라이트로 형성되어 있으며 이러한 미세 결정립은 우수한 인성을 나타내는 조직이다. 두 번째층 하단부위는 세 번째층 용접에의해 Ac<sub>3</sub>와 Ac<sub>1</sub>사이 온도로 가열된 영역으로 두 번째층 용접에 의해 조대한 주상정이 그대로 잔존하고있는 조직으로 결정립계에는 ferrite side plate가 발달되어있다. 그림 1-c)의 초층은 GTAW로 용접되고 다시 두 번째층 용접에의해 Ac<sub>3</sub>점 이상으로 열이력을 받은 영역으로 등축 페라이트로 형성되어있으며, 초층부 측면의 열영향부에는 미세한 페라이트로 형성되어있다. 그리고 초층과 두 번째층의 열영향부는 대부분 미세한 페라이트로 형성되어 있다.

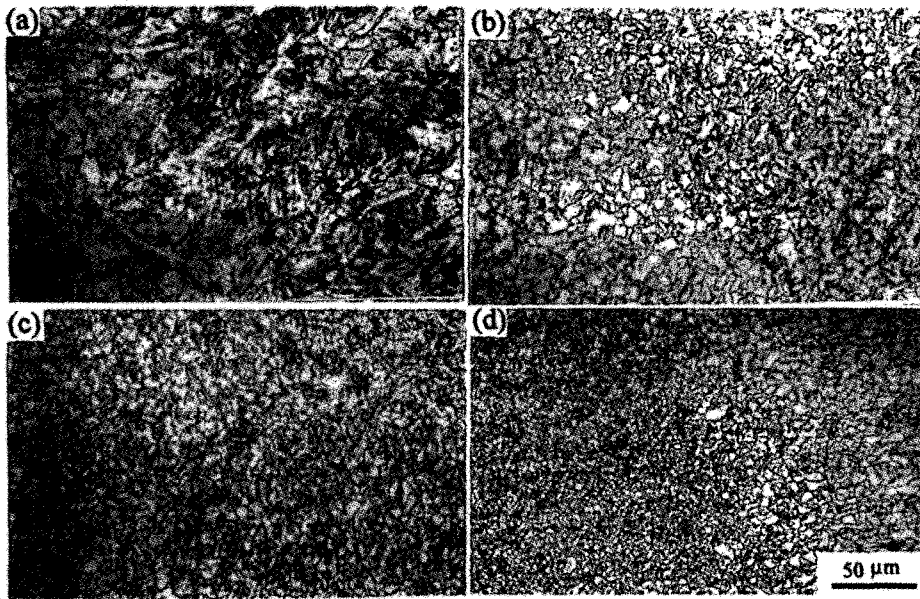


Fig. 1. Optical microstructure of weldment for the W1 weld joint.  
 (a) HAZ / Top pass      (b) HAZ / 2nd pass  
 (c) HAZ / 1st pass      (d) Grain refinement / Base metal.

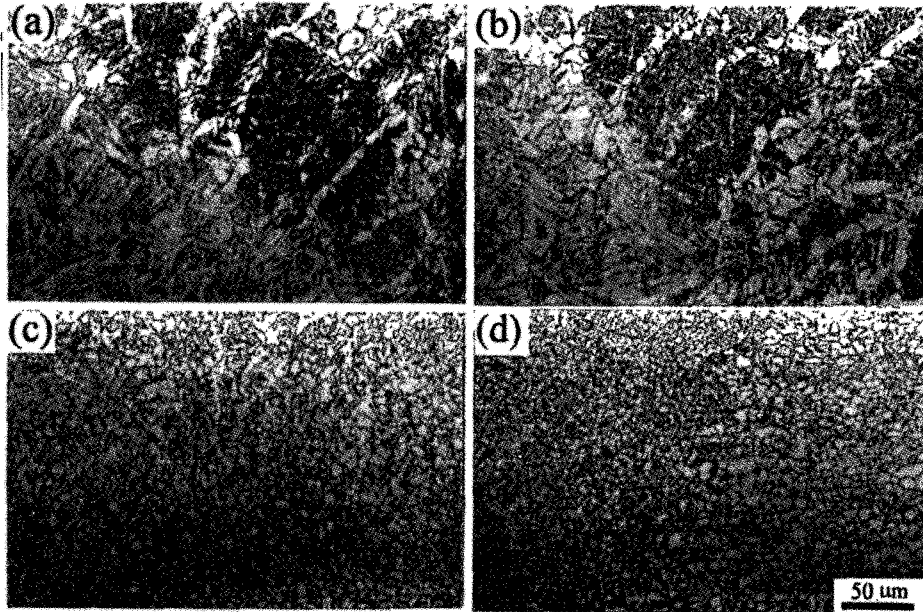


Fig. 2. Optical microstructure of weldment for the W2 weld joint.

- (a) HAZ / Top pass      (b) HAZ / 3rd pass  
 (c) HAZ / 1st pass      (d) Grain refinement / Base metal.

W2공정에 의해 다층용접부의 미세조직을 그림 2에 나타내었다. 그림 2-b)의 상층부는 주상정 조직으로 형성되었으며 결정립계 내부에는 침상형 페라이트로 구성되었다. 용융선 부근은 용접까지 가열되어 오스테나이트 결정립이 조대화되고 이것이 급냉되어 등축 및 침상형의 페라이트 조직으로 형성되었으며 열영향부쪽은 W1용접부에 비하여 작게 형성되었다. 상층부 직하부위는  $A_{C3}$ 점 이상으로 가열되어 조대한 침상형 페라이트로 발달되었다. 그림 2-b)와 c)의 초층에서 네번째층까지의 조직은 대부분 등축페라이트로 형성되어있으며 각 층사이의 미세한 침상페라이트로 되어 있었다. 그리고 그림 2-d)의 모재부와 열영향부의 경계부분은 모재부보다 더욱 미세한 등축페라이트 조직으로 형성되어 있었다.

용접공정 변화에 의한 조직변화는 다음과 같다. W1 공정은 W2에 비하여 더 높은 입열량으로 주상정조직으로 상층부를 형성하였으며 열영향부 크기도 크게 형성되어 있었다. W2의 초층에서 네 번째층까지는 등축페라이트가 균일한 크기로 형성되어 있는 반면 W1의 용접층은 등축페라이트와 조대한 주상정조직이 혼합되어 있었다.

나. 충격시험

충격인성에 대한 요구조건은 재료가 사용되는 온도에 의해 다르지만 일반적으로 임의온도에서 27J이상의 충격에너지값을 요구하며, 엄격한 적용을 위해서는 34~40J을 적용하고 있다.<sup>8)</sup> W1, W2 용접시편에 대하여 온도변화에 따른 충격시험 결과를 표 3에 나타내었다. 천연가스배관 설계온도의 하한치인 -30°C에서는 모두 60J의 충격에너지값을 나타내고 있으며 전 온도구간에서 W2 시험편이 더 높은 에너지값을 나타내고 있다. 표 4는 -30°C에서 용착금속부, 용융선부 및 열영향부에 대한 충격시험 결과이며 W2 시험편이 W1에 비하여 상당히 높은 충격에너지값을 나타내고 있다.

Table 3. Results of chary impact energy with variation of temperature

Temp. / Specimens	0°C	-20°C	-30°C	-40°C	-60°C	-80°C	-100°C
W1	131	83.9	59.5	41.7	6.5	6.9	5.4
W2	177.33	135.33	88.7	82.4	57	29.46	9.6

이러한 충격에너지값의 차이는 용착금속부를 형성하고 있는 미세조직 변화에 의한 것이다.

**Table 4. Results of chary impact energy with variation of distance at -30°C**

Position of notch Specimens	Center	Fusion Line	FL+ 1mm	FL+ 3mm	FL+ 5mm
W1	59.5	107.9	179.3	213.02	230.2
W2	88.7	222.725	247.5	237.05	229.36

W1용접부에서 두 번째층 의 하단부에서는 조대한 주상정 조직이 형성되어 있으며 이러한 조직으로 인하여 저온인성에 악영향을 미친 것이다. 또한 용착금속부 에서 W1으로 용접된 부위의 주상정 조직은 약 35%을 차지하고 있는 반면에 W2에서는 20% 정도가 주상정 조직으로 형성되어 있으며, W2의 용착금속부는 미세한 등축페라이트 조직으로 인하여 충격시험 결과 더 높은 충격에너지값을 나타낸 것이다.

**다. 인장시험**

용접공정 변화에따른 인장강도 변화와 용접부의 연성을 평가하기 위하여 용접부에 노치가 공을하여 노치인장강도와 인장강도비(NTS/TS), 노치인장강도와 항복강도비(NTS/YS)를 비교한 결과를 표5에 나타내었다. 용접부의 인장강도는 모재부에 비하여 높은 값을 나타내고 있으며 W1과 W2의 인장강도는 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 용접공정 변화에 따른 미세조직 변화는 충격치에는 영향을 미쳐도 인장강도에는 큰영향을 미치지않음을 알 수 있었다.

**Table 5. Mechanical properties of the base metal and weldments**

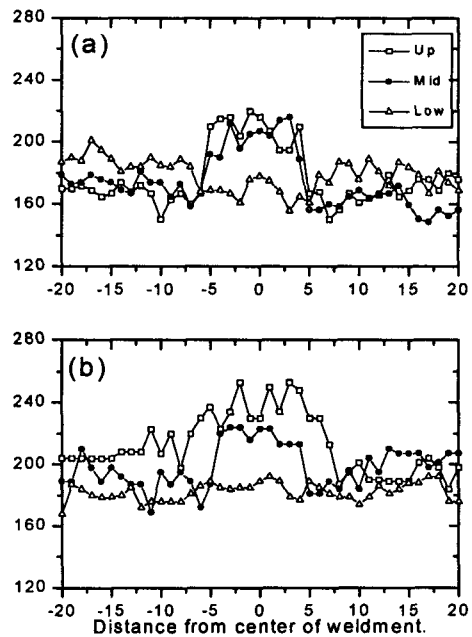
Mechanical properties Specimens	Y.S (MPa)	U.T.S (MPa)	NTS/TS	NTS/YS	Elongation
Base-Longitudinal	426.45	519.5	-	-	39.4
W1-Longitudinal	457.17	533.60	1.071	1.250	29.3
W1-Notch	499.89	571.85			15.4
W2-Longitudinal	439.15	537.05	1.069	1.256	35.8
W2-Notch	500.51	574.25			18.3

Williams<sup>7)</sup>에 의하면 실험적 경험으로 가스배관 용접부 연성평가에대한 NTS/TS의 비를 1.0, NTS/YS의 비를 1.18 이상이면 우수한 용접부연성을 나타낸다고 하였다. 이러한 수치가 이하가 되면 탄성변형후 급격한 소성변형으로 용접부의 급작스런 파괴를 초래하기 때문이다

본 실험결과 W1, W2 두공정 모두 NTS/TS는 1.07, NTS/YS는 1.25 정도를 나타내어 용접공정 변화에의해 연성차이는 변화가 없었으며, 본 실험에서 사용된 두가지 용접법은 위에서 규정한 수치이상을 나타내어 우수한 용접부 연성을 나타낸다고 할 수 있다.

**라. 경도측정**

미소 비이커스 경도기를 사용하여 배관 용접부의 내, 외부 및 중앙부위에대해 W1,W2의 경도측정 결과를 그림 3에 나타내었다. 상층 용착금속부가 가장 높은 경도치를 나타내며, 초층부위는 모재부와 비슷한 경도치를 나타내고 있다. W1 시험편의 용융선부에서는 급격한 경도치 감소를 나타내고있는 반면에 W2의 용융선부는 완만한 감소를 나타내고 있다. 木原등에 의하면 저탄소강 용융선부의 냉각속도는 입열량과 반비례 한다고 하였다.<sup>9)</sup> 이러한 결과에 의하면, 표1에서 W1공정이 W2에 비하여 더 높은 입열량으로 용접되었는데, 따라서 W1 공정이 더 낮은 냉각속도를 나타내어 용융선부의 조직은 조대한 페라이트로 형성되어 낮은 경도값을 나타낸 것이다.



**Fig. 3. Vickers Hardness Variation for the W1 and W2 weld joint**

마. CTOD 시험

가스배관 설계온도 구간에서 배관용접부의 파괴거동에 대한 안전성을 평가하기 위하여 BS 7448 규격에 의거 CTOD 시험을 실시하였으며, 그 결과를 표 6에 나타내었다. 0℃ 이상에서는 W1과 W2 시편의 CTOD값은 비슷하였으나, -30℃에서는 W1시편이 더 낮은 값을 나타내었다. 이는 용착금속부의 미세조직과 관계가 있다. W2의 경우 상층부를 제외한 나머지 부분은 대부분 미세한 등축페라이트로 형성되어 있는 반면에 W1에서는 용착금속부 중앙에 조대한 주상정 조직이 형성되어 저온에서 균열저지에 대한 저항력이 감소되었기 때문이다. 파단면 관찰에서도 W1에서 연성파괴와 부분적으로 벽개파괴가 관찰되어 더 낮은 CTOD값을 나타내게 된 것이다. 그리고 표2의 W1의 성분분석결과 산소와 질소등과 같은 불순원소의 함유량이 W2와 모재부에 비하여 상대적으로 높게 나타나 저온인성에 상당히 악영향을 미친 것이다.

사한 값을 나타내었으나, -30℃에서는 W2 용접부가 더 높은값을 나타내었다.

참고문헌

1. 稻垣道夫, 伊藤慶典現 : 現代溶接技術大系, Vol. 11. “高張力鋼. 低溫用鋼の溶接”, 産本出版, 東京, (1980)
2. G.M. Evans : Welding Journal, 59, pp67s-75s (1980)
3. D.S. Taylor : Welding & Metal Fab., Nov., pp452~460, (1982)
4. Z. Zhang and R.A.Farrar : Welding Journal, 76 , pp183s~196s (1997)
5. A. Abe et. al : Proceedings of the fourth International offshore and polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10~15, 1994, pp200~207
6. BS 4515 : BSI , 1984 , “Process of welding of steel pipelines on land and offshore”
7. D.N.Williams : Americal Gas Association, NG-18 Report No.141 , May,1984  
“A method for evaluating the ductility of the seam weld in ERW pipe.”
8. LE. Svensson and B. Greftoft : Welding Journal, 69, pp454s~461s, (1990)
9. 木原博, 鈴木春義, 金谷文善 : 日本溶接學會紙, 26 , pp83~90, (1957)

Table 6. Results of CTOD with variation of temperature for W1 and W2

Temp. \ Specimen	W1	W2
40℃	0.7961	0.7366
0℃	0.7882	0.8085
-30℃	0.4136	0.6971

5. 결 론

용접공정 변화에 의한 용접부의 미세조직 변화 및 기계적성질 변화에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) W1 용접부는 용착금속부 중간에 조대한 주상정 조직이 형성되어 있었으나 W2의 용접부는 용접층수 증가에 의해 Ac3점 이상으로 열영향을 받아 미세한 등축페라이트가 균일하게 형성되어 있었다.
- 2) 충격시험결과 미세한 등축페라이트로 용착금속부가 형성되어 있는 W2 공정이 더 우수한 저온인성을 나타내었다.
- 3) 용접공정 변화에 의해 용접부 연성과 인장강도 차이는 관찰되지 않았다.
- 4) 경도측정결과 W1의 용융선부에서는 조대한 페라이트 형성에 의해 큰 경도감소를 나타내는 반면 W2에서는 완만한 경도감소를 나타내고 있었다.
- 5) CTOD 실험결과 40, 0℃에서는  $\delta_m$ 은 유