천연가스 수송용 API 5L-X42 강관의 용접방법에따른 용접부의 미세조직과 기계적 특성에 관한 연구

백종현, 김철만, 김영표, 김우식
한국가스공사 연구개발원

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, Woo-Sik Kim
Korea Gas Corporation R&D Center, 277-1 Il Dong, Ansan, 425-110

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.

1. 서론

국내 천연가스는 고장력 배관을 통하여 각 지역으로 공급되고 있다. 가스배관은 공급압력에따라 API 5L-X65, X42 두종류의 강종을 사용하고있다. 이 가스배관의 연결은 GTAW법에의해 초층을 용접하며 그 위층은 SMAW로 시공된다. 그리고 건설현장 여건에 따라 GTAW로 전층을 시공하는 경우도 있다. 가스배관 용접은 사용되는 강종, 공급압력, 배관직경, 용접부의 품질, 용접현장의 환경, 용접공의 기량등을 고려하여 가장 절적한 용접시공법이 채택되고 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 변화에의한 용접부의 미세조직 변화와 기계적성질 변화를 파악하고자 한다.

2. 이론

Thomson에의해 전기저항 용접법이 개발된이래 많은 종류의 용접법이 각종 구

조물에 적용되고 있다. 용접열에의해 용착금속부는 융점이상 온도로 가열 및 응고가 반복되어 기계적 성질과 미세조직이 변하게된다. 이러한 배관용접부는 입열량 변화에의한 냉각속도, 용접봉의 종류, 배관 및 용착금속의 화학성분등에의해 모재와는 다른 미세조직이 형성된다. 용접부는[1] 용착금속부, 조대역, 혼립역, 세립역, 부분변태역 및 취화역으로 구분된다. 이와같이 구분된 영역에서의 미세조직은 결정립계 페라이트, 침상형 페라이트, 펄라이트 그리고 부분적으로 마르텐사이트와 베이나이트로 형성된다. 이러한 용착금속 및 용접열영향부의 조직변화에따른 중요한 문제는 인성과 용접균열이다. C-Mn계 용착금속부 미세조직 변화에 대하여 Mn을 0.6~1.8%로 변화시킨 결과 Mn이 증가함에따라 침상형 페라이트의 증가와 조직의 미세화에의해 용착금속부 인성이 향상됨을 Evans는[2]연구하였으며, Zhang과 Farrar에의하면[3] 용착금속부에서 50~75%의 침상형 페라이트는 용접부의 인성향상에 상당한 효과가 있다고 보고하였고, Taylor[4]는 E7016 용접봉에 대하여 Mn을 1.1~2.0%로 변화시킨 결과 1.7%Mn이 가장우수한 인성과 기계적 성질을 나타내었음을 발표하였다. 또한 Abe등은[5] Ti-B이 첨가된 용착금속부는 조직이 미세화되어 인성이 향상되었다고 보고하고 있다. 이상과같이 용접부의 인성에관해서는 미세조직이 중요한 역할을 하고있다.

3. 실험방법

API 5L-X42, 24인치, 10.3t 배관에 대하여 W1, W2 두가지 용접공정으로 배관을 수직상향 원주용접하였다. W1 용접은 초층을 ER70S-G용접봉을 사용하여 GTAW으로, 나머지층은 저수소계 E7016 용접봉을 사용하여 SMAW로 배관을 용접하였다. W2방법은 ER70S-G용접봉으로 전층을 GTAW로 용접하였다. 표 1에는 본 실험에서 사용된 용접조건을 나타내었으며, 모재부와 용접부에대한 화학분석결과를 표 2에 표시하였다.

미세조직은 3% Nital 부식액을 사용하여 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며 W1, W2 용접부의 거시적조직을 그림1에 나타내었다. 미소비이커스 경도기를 사용하여 0.5kg 하중하에서 용접부와 모재부에 대하여 배관두께 중앙부위와 배관내,외부위에서 1㎜간격으로 측정하였다. 용착금속부에 대하여 0 ~-100℃구간에서 충격시험을 실시하였으며, 열영향부위에 대해서는 -30℃에서 노치위치를 변화시켜 시험을 하였다. 용접부의 인장강도를 평가하기 위하여 길이 230㎜, 폭 38.1㎜ 시험편으로 인장시험을 행하였으며, 또한 용접부의 연성평가를[6] 위하여 용접부위 양측에 노치각도는 45°,노치깊이는 6㎜로 시편을 가공하여, cross head speed는 1㎜/min.로 시험하였다.

4. 실험결과

가. 미세조직관찰

본 실험에 사용된 API 5L X-42 배관의 조직은 약 7-8㎛ 크기의 결정립으로 이루어져 있으며, 등축상의 페라이트가 주로 이루어져있으며 부분적으로 펄라이트조직도 관찰되었다.

W1 용접법에의한 미세조직 변화는 다음과같다.[7] 상층부위는 단층용접의 응고조직과 동일한 형태로 형성된다. 상층비드는 일단 오스테나이트화된후 급냉되어 초기오스테나이트(prior austenite) 결정립이 조대하게 형성되며 그 결정립계를따라 ferrite side plate가 성장되어 있으며 결정립내부에는 침상형 페라이트 조직이 형성되어 있었다. 그리고 열영향부는 망상형 페라이트로 형성되었으며 그 내부는 조대한 lath ferrite로 이루어져 있었으며 모재방향으로는 점차로 미세한 페라이트조직으로 이루어져있다. 두 번째층 상단부위는 용접에의해 융점부근까지 가열된후 세번째층의 용접열이력에의해 1250℃이상으로 열영향을받아 조대화된 영역이다. 두 번째층의 중간부위는 용접에의해 용융점 부근까지 가열된후 세번째층 열이력에의해 A_{C3}점 이상으로 가열된 조직으로 미세한 등축 페라이트로 형성되어 있으며 이러한 미세 결정립은 우수한 인성을 나타내는 조직이다. 두 번째층 하단부위는 A_{C3}과 A_{C1}점사이 온도로 가열된 영역으로 두 번째층 용접에의해 조대한 오스테나이트로 형성되고 세 번째층 용접에의해 다시 오스테나이트화된 조직으로 결정립계에는 ferrite side plate가 발달되어있다. 초층은 GTAW로 가열되고 다시 두 번째층 용접에의해 A_{C3}점 이상으로 열이력을 받은 영역으로 등축 페라이트로 형성되어있으며, 초층부의 열영향부에는 미세한 페라이트로 형성되어있다.

W2공정에의한 다층용접부는 다음과같은 양상으로 발달되었다.[7] 상층부 비드부분은 결정립계를따라 조대한 페라이트가 발달되었으며 결정립계 내부에는 침상형 페라이트로 구성되었다. 용융선 부근은 융점까지 가열되어 오스테나이트 결정립이 조대화되고 이것이 급냉되어 등축 및 침상형의 페라이트 조직으로 형성되었으며 열영향부폭은 W1용접부에 비하여 작게 형성되었다. 상층부 직하부위는 A_{C3}점 이상으로 가열되어 조대한 침상형 페라이트로 발달되었다. 그리고 초층에서 네번째층까지의 조직은 대부분 등축페라이트로 형성되어있으며 각 층사이는 미세한 침상페라이트로 되어있었다. 그리고 각 용접층의 외측부위는 모재부의 조직보다 더욱 미세한 등축페라이트 조직으로 형성되어있다.

용접공정 변화에의한 조직변화는 다음과같다. W1 공정은 W2에 비하여 더 높은 입열량으로 용접비드가 형성된 조직으로 조대한 초기오스테나이트가 상층부를 형성하였으며 열영향부 크기도 크게 형성되어 있었다. W2의 초층에서 네 번째층까지는 등축페라이트가 균일한 크기로 형성되어있는반면 W1의 용접층은 등축페라이트와 조대한 오스테나이트로 성장되어져 있었다.

나. 충격시험

충격인성에대한 요구조건은 재료가 사용되어지는 온도에의해 다르지만 일반적으로 임의온도에서 27J이상의 에너지값을 요구하며, 엄격한 적용을 위해서는 34~40J값을 적용하고있다.[8] W1, W2 용접시편에대한 시험결과를 표 3에 나타내었다. 천연가스배관 설계온도의 하한치인 -30℃에서는 모두 60J의 에너지값을 나타내고 있으며 전 온도구간에서 W2 시험편이 더 높은 에너지값을 나타내고 있다. 또한 표 4는 -30℃에서 용착금속부,용융선부 및 열영향부에대한 충격시험결과이며 W2 시험편이 W1에비하여 상당히높은 에너지값을 나타내고 있다. 이러한

충격에너지값의 차이는 용접비드부분을 형성하고있는 미세조직 변화에의한 것이다. W1용접부에서 두번째층 하단부에서는 조대한 결정립계 페라이트가 형성되어 있으며 이러한 조직으로 인하여 저온인성에 악영향을 미친 것이다. 또한 상층부 비드면 관찰에서 W1으로 용접된 부위는 주상정으로 형성된 초기오스테나이트(prior austenite)가 용접비드의 약 30%을 차지하고 있다. 반면에 W2의 비드부는 20%만 초기오스테나이트가 형성되어있으며, 용착금속부는 미세한 등측페라이트 형성으로 인하여 충격시험결과 더 높은 에너지값을 나타낸것이다.

다. 인장시험

용접공정 변화에따른 인장강도 변화와 용접부의 연성을 평가하기위하여 용접부에 노치가공을하여 노치인장강도와 인장강도비(NTS/TS), 노치인장강도와 항복강도비(NTS/YS)를 비교한 결과를 표 5에 나타내었다. 용접부의 인장강도는 모재부에 비하여 높은값을 나타내고있으며 W1과 W2의 인장강도는 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 용접공정 변화에따른 미세조직 변화는 충격치에는 영향을 미쳐도 인장강도에는 큰영향을 미치지않음을 알 수 있었다. Williams[6]에의하면 실험적 경험으로 가스배관 용접부 연성평가에대한 용접부 NTS/TS의비를 1.0, NTS/YS의비를 1.18 이상이되면 우수한 용접부연성을 나타낸다고 하였다. 이러한 수치 이하가되면 탄성변형후 급격한 소성변형으로 용접부의 급작스런 파괴를 초래하기 때문이다 본 실험결과 NTS/TS는 1.07, NTS/YS는 1.25정도를 나타내어 용접공정 변화에의해 연성차이는 변화가 없었으며, 본 실험에서 사용된 두가지 용접법은 위에서 규정한 수치이상을 나타내어 우수한 용접부 연성을 나타낸다고 할 수 있다.

라. 경도측정

미소비이커스 경도기를 사용하여 배관 용접부의 내,외부 및 중앙부위에대해 경도측정한 결과를 그림 2에 나타내었으며 상층용접부가 가장높은 경도치를 나타내며, 초층부위는 모재부와 비슷한 경도치를 나타내고 있다. W1 시험편의 용융선부에서는 급격한 경도치 감소를 나타내고있는 반면에 W2의 용융선부는 완만한 감소를 나타내고 있다. 木原등[9]에의하면 저탄소강 용융선부의 냉각속도는 입열량과 반비례하여 감소한다고 하였다. 이러한 결과에의하면 표 1에서 보는바와 같이 W1용접법이 W2용접에 비하여 더높은 입열량으로 낮은 냉각속도에의해 용융선부의 조직은 조대한 페라이트로 형성되어 낮은 경도치를 나타낸 것이다. 또한 경도측정 결과는 충격시험 결과와도 유사한 관계를 나타내는데 W1의 용융선부위는 W2에 비하여 조대한 결정립 형성에의하여 -30℃ 용융선부 충격시험에서 W1은 107J, W2는 222J 로 더 낮은 충격에너지를 나타낸 것이다.

5. 결론

용접공정 변화에의한 용접부의 미세조직 변화 및 기계적성질 변화에 대하여 다음과같은 결론을 얻었다.

1) W1 용접부는 용착금속부 중간에 조대한 초기오스테나이트가 형성되어 있었으나 W2의 용접부는 용접층수 증가에의해 A_{C3}점 이상으로 열영향을받아 미세한

등축페라이트가 균일하게 형성되어있었다.

2) 충격시험결과 미세한 등축페라이트로 용착금속부가 형성되어있는 W2 공정이 더 우수한 저온인성을 나타내었다.

3) 용접공정 변화에의해 용접부 연성과 인장강도 차이는 관찰되지않았다.

4) 경도측정결과 W1의 용융선부에서는 조대한 페라이트 형성에의해 큰 경도감소를 나타내는반면 W2에서는 완만한 경도감소를 나타내고있었다.

참고문헌

1) 稻垣道夫 , 伊藤慶典 : 現代溶接技術大系 , Vol. 11, "高張力鋼. 低溫用鋼の溶接" , 産本出板, 東京, (1980)

2) G.M. Evans : Welding Journal, 59, pp67s~75s (1980)

3) Z. Zhang and R.A. Farrar : Welding Journal, 76 , pp183s~196s (1997)

4) D.S. Taylor : Welding & Metal Fab., Nov., pp452~460 (1982)

5) A. Abe et. al : Proceedings of the Fourth(1994) International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10-15, 1994, pp200~207

6) D.N. Williams : American Gas Association, NG-18 Report No. 141, May,1984 "A method for evaluating the ductlity of the seam weld in ERW pipe."

7) J.H. Baek, C.M. Kim, Y.P. Kim and W.S. Kim : Unpublished data.

8) LE. Svensson and B. Gretoft : 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 1. Welding procedure sequence for API 5L-X42 pipeline.

	pass	welding	filler metal		polarity	A	V	speed (cm/min.)	heat input (KJ)
			AWS	dia.(Φ)					
W1	1	GTAW	ER70S-G	2.4	DCSP	100~120	10~13	6-12	5~15
	2~3	SMAW	E7016	3.4	DCRP	80~30	24~32	8-12	9.6~31
W2	1~5	GTAW	ER70S-G	2.4	DCSP	100~120	10~13	6-12	5~15

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

	Fe	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Al	Cu	Nb	V	Cr	Ti
Base	bal.	0.067	0.896	0.195	0.005	0.016	0.011	0.010	0.005	0.022	0.027	0.002	0.029	0.007
W1	bal.	0.074	0.935	0.535	0.005	0.019	0.019	0.011	0.007	0.089	0.010	0.005	0.040	0.019
W2	bal.	0.065	1.174	0.650	0.007	0.014	0.016	0.012	0.005	0.098	0.011	0.002	0.033	0.008

Table 3. Results of chary impact energy in terms of temperature variation.

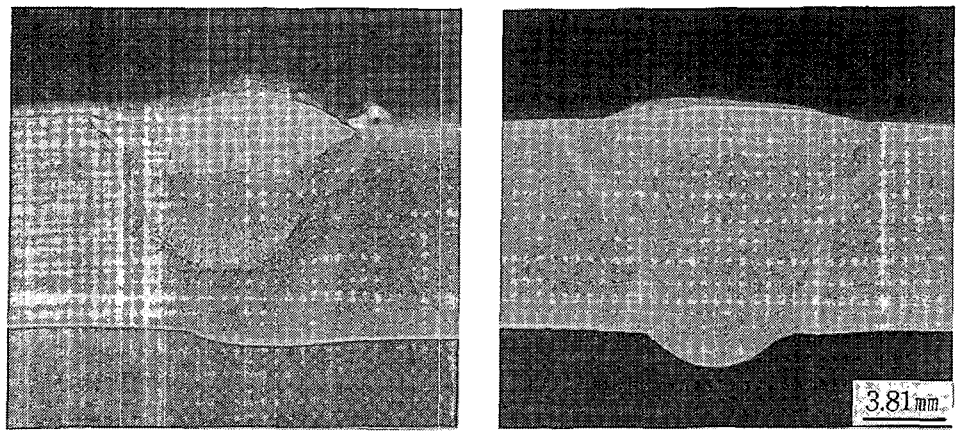
Weld	0℃	-20℃	-30℃	-40℃	-60℃	-80℃	-100℃
W1	131	83.9	59.5	41.7	6.5	6.9	5.4
W2	177.33	135.33	60	82.4	57	29.46	9.6

Table 4. Results of chary impact energy with variation of distance at -30℃.

Weld	Center	Fusion Line	FL+1mm	FL+3mm	FL+5mm
W1	59.5	107.9	179.3	213.02	230.2
W2	60.2	222.725	247.5	237.05	229.36

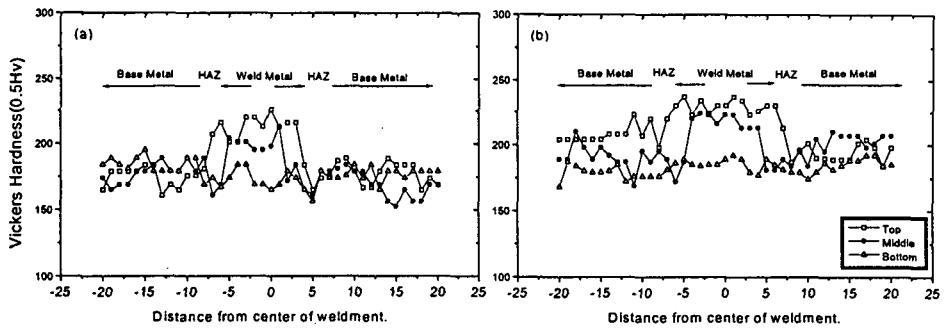
Table 5. Mechanical properties of the base metal and weldments.

	Y.S(MPa)	U.T.S(MPa)	NTS/TS	NTS/YS	Elongation (% in 2inch)
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



(a) (b)

Fig. 1. Macrophotograph of weld joint for (a) W1 and (b) W2.



(a) (b)

Fig. 2. Hardness distribution with variation of welding process.
(a) W1 process (b) W2 process