

# 육성용접을 사용한 가스배관 보수용접시 허용용접입열 예측 및 기계적특성 평가

김영표, 백종현, 김우식,

한국가스공사 연구개발원

## Allowable Heat Input and Mechanical Properties of Repair Weld by Direct Deposition of Weld Metal

Young-Pyo Kim, Jong-Hyun Baek, Woo-Sik Kim

R&D Center, Korea Gas Corporation, 638-1 Il Dong, Ansan, 425-150

### 1. 서론

가스배관은 부식, 타공사 혹은 지반침하등에 의해 다양한 형태의 손상을 받을 수 있다. 손상된 가스배관을 절단한 다음 교체하는 방법은 가스공급의 중단을 야기하게 되고 배관내부의 가스를 대기중으로 방출해야 하기 때문에 경제적 손실이 크다. 따라서 해외 가스회사들은 지속적으로 가스를 공급하면서 손상된 배관을 보수하는 다양한 방법을 개발해왔으며 이에 대한 많은 현장적용 실적이 있는 상태이다. 현재 공급중인 가스배관을 보수하는 방법으로는 용접에 의한 방법, 기계적인 클램프를 사용하는 방법 및 복합물을 손상부에 감싸주는 방법등 다양한 방법이 사용되고 있다.[1] 그러나, 현재 영구적인 보수방법으로 가장 널리 사용되는 것은 용접으로 손상부를 보수하는 방법이다.

공급중인 가스배관 위에 용접하는 경우 고려해야 할 세 가지 사항이 있다. 첫 번째는 용접동안 용락(burn-through)이 발생하여 내압이 작용하는 배관이 폭발할 수 있기 때문에 용접사의 안전을 고려하여야 한다. 두 번째로 용접 후에 용접부에 발생할 수 있는 수소균열이다. 배관내에 흐르는 가스는 용접부의 열을 제거하는 역할을 하기 때문에 용접부는 급속한 냉각을 받게 된다. 이러한 용접부는 높은 열영향부 경도를 나타내어 수소균열에 민감하게 된다. 세 번째로 용접 후 용접부가 충분히 내압을 견디며 원래 가스배관의 인장강도, 파괴인성 및 피로강도등과 같은 기계적 특성을 회복할 수 있는가를 고려하여야 한다.

해외 가스회사들은 용락의 발생을 억제하고 수소균열의 발생을 최소화하며 충분한 기계적특성을 나타내는 보수용접을 수행하기 위해서 많은 연구를 수행해왔다.[1-6] 그러나, 현재 국내에서는 공급중인 가스배관위에 용접을 수행한 경험이 없기 때문에 손상된 배관을 보수할 때 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 공급중인 API 5L X65 가스배관위에 육성용접을 실시할 때 용접시 안전과 용접부의 건전성을 확보하기 위해서 본 연구를 시작하게 되었다. 본 연구에서는 공급중인 가스배관위에 육성용접에 의한 보수용접부시 용접조건이 허용용접입열과 기계적특성에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 우선 육성용접시 허용용접입열을 평가하기 위해서 다양한 용접조건하에서 한패스의 비드용접(bead-on-plate welding)을 실시하였다. 또한 다층용접을 실시한 육성용접부의 기계적특성을 평가하였다.

### 2. 실험방법

용접방법의 영향을 비교하기 위해서 피복아크용접(SMAW, shielded metal arc weldin)방법과 가스텅스텐아크용접(GTAW, gas tungsten arc welding)방법이 사용되었다. 피복아크용접에는 저

수소계용접봉인 E9016-G, 2.6mm 직경의 용접봉을 사용하였으며 가스텅스텐아크용접에는 ER70S-G, 2.4mm 직경의 용접봉을 사용하였다. 용접동안 용접입열을 계산하기 위해 용접전압, 용접전류 및 용접속도를 측정하였다. 실험에 사용된 API 5L X65 가스배관 재료와 피복아크용접과 가스텅스텐아크용접으로 용접된 용착금속부의 화학조성은 표 1과 같다.

비드용접은 폭이 100mm 이고 길이가 200mm인 후판위에 실시하였으며 후판의 두께는 4, 6, 8과 10mm로 각각 변화시켰다. 비드용접시 후판의 초기온도는 약 10℃ 이었다. 이러한 비드용접부는 절단, 연마 및 에칭을 수행하여 용접부의 거시적인 조직을 관찰하였다. 그림 1에 보는바와 같이 용입깊이(penetration)는 표면으로부터 용착금속과 열영향부의 경계가 미치는 최대깊이이고, 열영향부깊이(depth of HAZ)는 표면으로부터 미세결정립열영향부(FGHAZ, fine grained heat affected zone)와 모재의 경계가 미치는 최대깊이이다. 또한 비드용접부내의 조대화결정립열영향부(CGHAZ, coarse grained heat affected zone)의 경도를 측정하였다.

그림 2와 같이 인위적으로 두께 14mm의 후판위에 깊이 7mm와 폭 12.7mm의 홈을 가공한 다음 다층으로 육성용접을 실시하였다. 표 2에 육성용접부의 용접조건을 정리하였다. 육성용접부의 기계적특성을 파악하기 위해서 경도측정, 인장시험 및 충격시험을 실시하였다. 마이크로버커스경도는 용접부의 마지막층을 가로질러 1mm 간격으로 측정하였다. 그림 2는 육성용접부의 인장시험편 형상을 보여주고 있으며 용접부는 인장시험편의 중심에 위치하도록 하였다. 사피충격시험은 10x10x55mm 표준 시험편을 사용하여 0℃에서 시험을 실시하였다. 용접부의 위치별 충격인성 변화를 평가하기 위하여 노치의 위치를 용착금속(WM, weld metal)의 중심, 용융선(FL, fusion line), FL+1mm, FL+2mm, FL+3mm, FL+5mm로 변화시켜 제작하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 비드용접시 허용용접입열의 예측

본 연구의 목적은 용락과 수소균열이 발생시키지 않는 허용용접입열을 예측하는 것이다. 용락과 수소균열을 발생시키지 않는 허용용접입열을 예측하기 위해서 다양한 용접조건으로 용접된 비드용접부의 용입깊이, 열영향부깊이 및 용접부의 경도를 관찰하였다.

이전 연구에서 주요결과는 용접부 하단의 내부표면온도가 982℃ 이상이 되면 용락이 발생한다는 것이다.[2] 따라서 내부표면 하단의 온도를 측정하거나 거시조직관찰로 보수용접부의 용락을 예측할 수 있다. 육안으로 관찰할 수 있는 FGHAZ와 모재의 경계선이 도달하는 온도는 약 723℃ 이다. 본 연구에서는 FGHAZ와 모재의 경계가 용접부 하단 내부표면에 도달할 때 용락이 발생한다고 가정하여 허용용접입열을 예측하였다.

그림 3은 각각의 두께위에 비드용접부의 용입깊이와 열영향부깊이 관찰결과를 보여주고 있다. 그림 3에서 보는바와 같이 용접입열이 증가하면 SMAW 용접부와 GTAW 용접부의 용입깊이와 열영향부의 깊이는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 주어진 용접입열에서 SMAW 용접부의 용입깊이와 열영향부깊이는 GTAW 용접부의 용입깊이와 열영향부깊이보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

허용용접입열을 예측하기 위해서 그림 3에 나타난 것과 같이 각각의 데이터에 대해서 원점을 통과하는 linear regression 방법을 사용하였다. 즉 열영향부의 깊이(D, mm)는 비례상수(A)와 용접입열(Q, J/cm)의 곱으로 나타낼 수 있다. 표 3은 linear regression시 직선의 기울기를 나타내는 비례상수와 이때 각각의 두께에서 용락발생없이 용접이 가능한 허용용접입열의 계산값을 정리하였다.

일반적으로 열영향부의 경도는 용접후 용접부의 냉각속도와 용접에 사용된 재료의 탄소당량에 의해 큰 영향을 받는다. 표 1의 성분분석 결과에서 알 수 있듯이 현재 국내에서 생산되는 API 5L X65강의 탄소당량은 약 0.36 정도이다. 이러한 상황에서 열영향부의 경도값에 큰 영향을 미치는 것은 용접부의 냉각속도이다. 용락을 방지하기 위해서는 용접입열을 감소시켜야 하지만 용접입열의 감소는 용접부의 냉각속도를 증가시켜 균열발생에 민감한 미세조직을 생성하게 된다. 이전의 연구결과에 따르면 비드밀균열의 관점으로부터 저수소계용접봉을 사용하는 경우 열영향부의 경도가 400HV 이상이 되면 수소균열에 민감하게 된다고 보고하고 있다[2]. 또한 산성의 성

분을 포함한 가스를 수소하는 경우에는 열영향부의 경도가 248HV 이상이 되면 응력부식균열에 민감하게 된다고 보고하고 있다.[3] 국내에서 공급되고 있는 천연가스는 액화된 상태로 도입되기 때문에 산성분위기를 나타내는 황과 같은 성분은 액화과정에서 정제된다. 따라서 보수용접시 응력부식균열의 발생에 대해서는 고려하지 않아도 무방하다.

그림 4는 SMAW와 GTAW 용접부의 용접입열에 따른 CGHAZ 경도변화를 보여주고 있다. 모든 용접조건에서 CGHAZ 경도는 400HV 이하로 나타났으며 따라서 이러한 모든 용접부는 수소균열에 민감하지 않다고 판단할 수 있다. 용접방법에 관계없이 용접입열이 증가하면 경도는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 주어진 용접입열에서 용접되는 판의 두께가 증가하면 CGHAZ 경도값이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 용접입열 감소하거나 판두께의 증가하면 용접부의 냉각속도가 증가함을 의미한다. 또한 주어진 용접입열에서 GTAW 용접부의 CGHAZ 경도값이 SMAW 용접부의 경도값보다 크게 나타났다. 이는 SMAW에 의한 용접시 생성되는 고상의 슬래그는 용접부를 냉각으로부터 보호하는 역할을 하지만 GTAW에 의한 용접시 사용되는 아르곤가스와 같은 보호가스는 용접부의 냉각을 촉진시키는 역할을 하기 때문으로 판단된다.

만약, 생산지로부터 배관을 통하여 천연가스를 직도입하는 경우에는 응력부식균열에 대해서도 고려하여야 한다. 응력부식균열을 방지하기 위해서는 그림 4에서 나타낸 것과 같이 CGHAZ 경도가 248HV 이상이 되도록 용접입열의 최소값을 제한하여야 한다.

### 3.2. 육성용접부의 기계적 특성

육성용접에 의한 보수방법은 부식으로 손상된 가스배관을 공급중인 상태에서 보수할 때 많이 사용되고 있다. 이러한 보수방법은 작업이 간편하고 벤딩관과 같이 슬리브뒹개 보수용접이 불가능한 곳에 적용될 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 SMAW에 의해 육성용접된 용접부와 GTAW에 의해 육성용접된 용접부의 기계적특성을 비교해 보았다.

그림 5는 각각의 용접방법을 사용한 용접부의 거시조직을 보여주고 있다. 그림 6은 각각의 육성용접부의 경도변화를 보여주고 있다. 용접방법에 관계없이 비슷한 경도분포를 나타내고 있다. 표 4에는 API 5L X65강, SMAW 육성용접부 및 GTAW 육성용접부의 인장시험결과를 정리하였다. 인장시험결과 보수용접부의 인장강도는 모재의 인장강도보다 크게 나타났으며 모든 시험편은 모재부에서 파단되었다. 그림 7은 용접방법과 노치위치에 따른 충격인성의 변화를 보여주고 있다. 용착금속의 중심과 용융선에 노치가 위치하는 시험편에서는 GTAW 용접부의 충격인성이 조금 크게 나타났으며, 다른 위치에서는 용접방법에 관계없이 비슷한 충격인성값을 나타내었다.

육성용접부의 기계적특성을 평가한 결과, SMAW와 GTAW 방법을 사용한 육성용접부는 원래 배관의 인장강도 및 충격인성을 회복하는 것으로 나타났다.

### 4. 결론

(1) 비드용접을 실시하여 용접조건이 용입깊이, 열영향부깊이와 CGHAZ 경도에 미치는 영향을 관찰한 결과, 공급중인 가스배관위에 용락과 수소균열을 발생시키지 않고 보수용접이 가능한 허용용접입열값을 예측하였다.

(2) 다층으로 SMAW와 GTAW 방법을 사용한 육성용접부의 기계적특성을 관찰한 결과, SMAW와 GTAW 방법을 사용한 육성용접부는 원래 배관의 인장강도 및 충격인성을 회복하는 것으로 나타났다.

### 5. 참고문헌

- 1) J. F. Kiefner, "Pipeline Repair Manual", American Gas Association, December 31, 1994.
- 2) J. F. Kiefner, "Effects of Flowing Product on Line Weldability", Oil & Gas Journal, July 18, 1988, pp. 49~54.
- 3) R. D. Felix, W. A. Bruce and P. L. Threadgill, "Development of Procedures for Hot Tap Welding Onto Sour Service Pipelines", Society of Petroleum Engineers, SPE 22098, 1991, pp. 349~359.

- 4) B. Phelps, B. A. Cassie and N. H. Evans, "Welding onto Live Natural Gas Pipeline", Metal Construction, August 1996, pp. 350~354.
- 5) I. P. Rietjens, "Safely Weld and Repair In-service Pipe Lines", Pipe Industry, December 1986, pp. 26~29.
- 6) W. A. Bruce, H. D. Mishler and J. F. Kiefner, "Repair of Pipelines by Direct Deposition of Weld Metal", American Gas Association, June 8, 1993.

**Table 1. The chemical composition of API 5L X65 plate and weld metal welded by SMAW and GTAW.**

Element(wt%)	Fe	Mn	C	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	V	CE <sub>IIW</sub> *
API 5L X65 plate	Bal.	1.51	0.09	0.30	0.024	0.002	0.031	0.019	0.003	0.060	0.048	0.057	0.36
SMAW weld metal	Bal.	1.27	0.07	0.56	0.018	0.005	0.041	0.561	0.273	0.017	0.041	0.021	0.39
GTAW weld metal	Bal.	1.51	0.07	0.95	0.023	0.014	0.046	0.026	0.005	0.013	0.029	0.013	0.34

\*CE<sub>IIW</sub> = C + Mn/6 + (Ni+Cu)/15 + (Cr+Mo+V)/5.

**Table 2. The multi-pass welding conditions for direct deposition of weld metal welded by SMAW and GTAW.**

Process	Welding variable\pass	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SMAW E9016-G 2.6mm φ	Voltage(V)	32	31	31	31	30	31						
	Current(A)	126	118	121	112	105	107						
	Welding speed(mm/min.)	117	108	118	65	103	107						
	Heat input(kj/cm)	20.7	20.3	19.1	32.0	18.3	18.6						
GTAW ER70S-G 2.4mm φ	Voltage(V)	20	21	21	21	23	23	24	24	25	23	24	22
	Current(A)	204	200	198	205	219	225	223	226	232	218	214	203
	Welding speed(mm/min.)	316	186	157	157	115	152	107	129	102	173	118	84
	Heat input(kj/cm)	7.7	13.5	15.9	16.5	26.3	20.4	30.0	25.2	34.1	17.4	26.1	31.9

**Table 3. The proportional constant of linear regression through origin and calculated allowable heat input on the basis of the depth of HAZ.**

Plate thickness	SMAW		GTAW	
	Proportional constant(A)	Allowable heat input(kj/cm)	Proportional constant(A)	Allowable heat input(kj/cm)
10mm	0.339	29.5	0.210	47.6
8mm	0.367	21.8	0.192	41.7
6mm	0.457	13.1	0.335	17.9

**Table 4. Tensile properties of API 5L X65 plate and repair welds by direct deposition of weld metal(at room temperature).**

Base metal(API 5L X65 plate)			SMAW	GTAW
Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (% , 50mm)	Tensile stress (MPa)	Tensile stress (MPa)
465.8	550.2	48.4	600.3	587.9

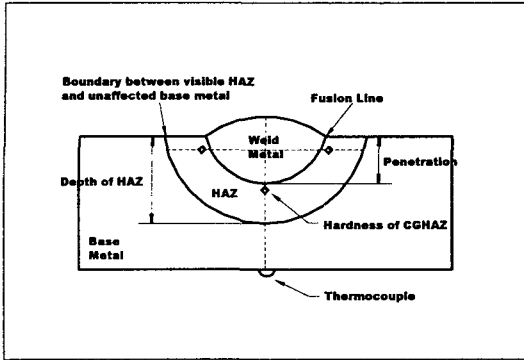


Figure 1. The cross sectional view of the bead-on-plate weld.

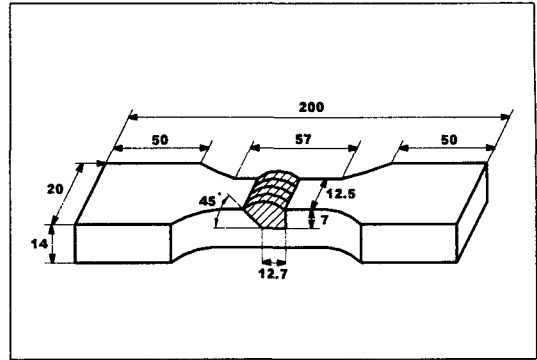


Figure 2. Tensile test specimen of repair weld by direct deposition of weld metal.

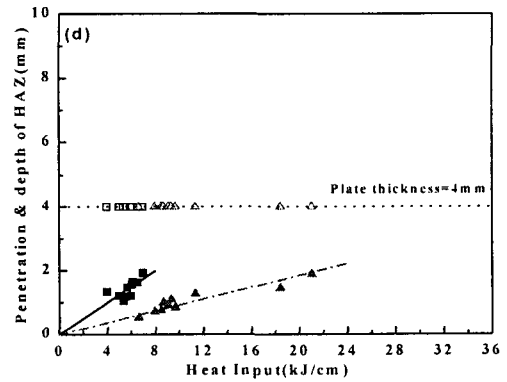
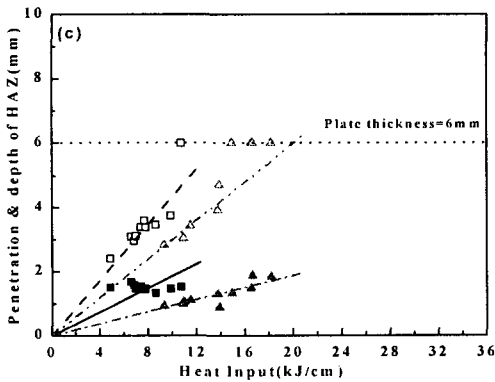
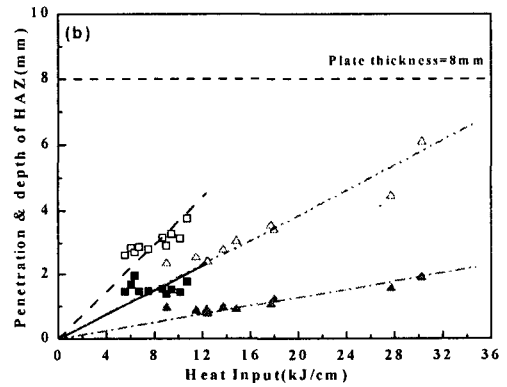
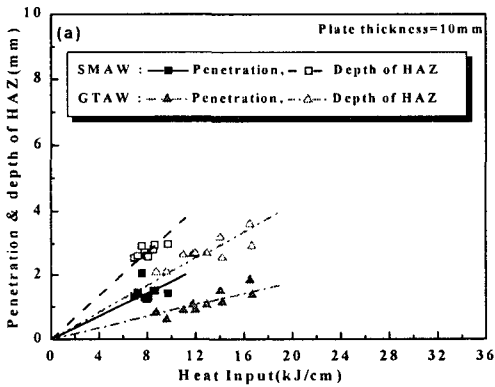


Figure 3. The effects of heat input and welding process on the penetration and depth of HAZ in bead-on-plate welds on (a) 10mm, (b) 8mm, (c) 6mm and (d) 4mm thickness plates.

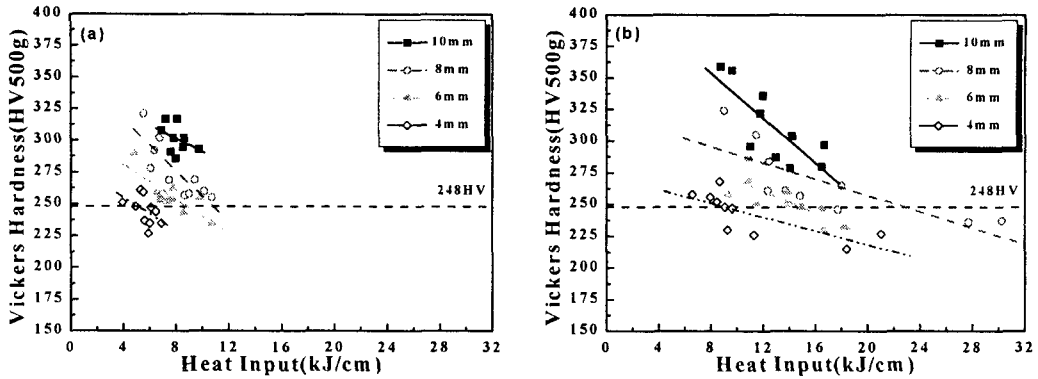


Figure 4. Vickers hardness of CGHAZ for (a) SMAW weld and (b) GTAW weld on various plate thicknesses according to heat input.

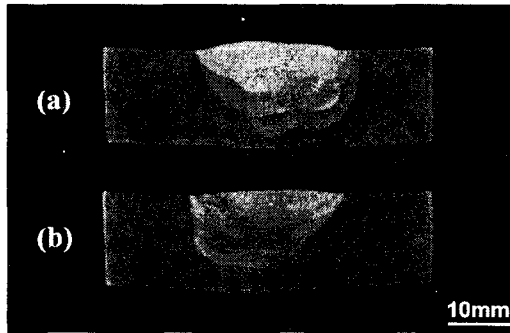


Figure 5. Macro-structures of repair welds by direct deposition of weld metal made by (a) SMAW and GTAW.

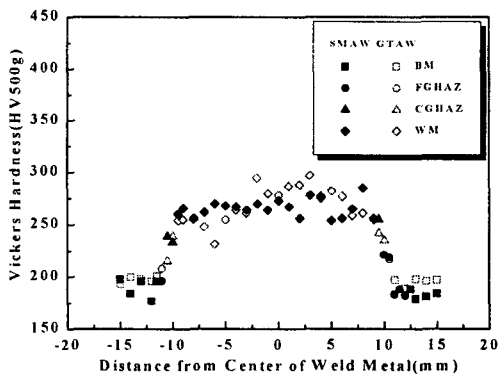


Figure 6. Vickers hardness distribution of repair welds made by direct deposition of weld metal using SMAW and GTAW processes.

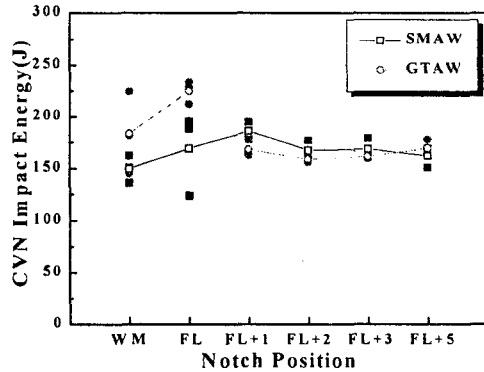


Figure 7. Impact toughness of repair welds according to notch position and welding process at 0°C.