

研究論文

## 고강도 고인성강 용접금속의 저온균열 감수성에 관한 연구

李鍾鳳\* · 安相昆\* · 安玲鎬\* · 金英宇\*\*

### Cold Cracking Susceptibility in Weld Metal of High Strength-Toughness Steel

J. B Lee\*, S. K. Ahn\*, Y. H. Ahn\* and Y. W. Kim\*\*

**Key Words** : High Strength-Toughness Steel(고강도 고인성강), Weld Metal Cracking(용접금속 균열), G-BOP Test(G-BOP시험), LB-TRC Test(LB-TRC시험), Cold Cracking Susceptibility(저온균열 감수성), Applied Stress(부가응력), Diffusible Hydrogen(확산성 수소)

#### Abstract

The cold cracking susceptibility of a variety of weld metals deposited by GMAW with several kinds of commercial solid wires for high strength-toughness steel was investigated. G-BOP test and LB-TRC test were carried out to study the effects of preheat, chemical composition and hydrogen level on the weld metal cold cracking.

The results obtained are as follows.

- 1) 10% CPT obtained by G-BOP test was the most valuable criteria for evaluating the cold cracking susceptibility of weld metals compared with percentage of cracking at room temperature and crack free temperature, and it had good correlation with the results of LB-TRC test.
- 2) Cold cracking susceptibility of weld metals was high in the row of MG100A, MG100C, MG100D and MG100B. Welds deposited with MG130 and MG80 showed similar incidents of cracking with MG100C and MG100B respectively, even though their strength levels were different.
- 3) Diffusible hydrogen level in weld metals which has good relation with hydrogen content in wire itself was the most critical factor for controlling the cold cracking susceptibility of weld metal.

\* 정회원, 포항종합제철(주) 기술연구소

\*\* 비회원, 국방과학기술연구소

## 1. 서 론

HY100 및 HY130강에 상당하는 국산 DS100 및 DS130강의 용접성에 대하여 이미 보고한 바 있다<sup>1)</sup>. 이러한 고강도강을 사용하여 우수한 성능과 안전성이 확보된 구조물 및 장치 등을 제작하기 위해서는 용접성이 우수한 강재의 개발과 함께 적절한 용접재료도 개발되어야 한다. 그러나 용접재료도 강재와 동일한 이유로 세계 시장에서 시판되고 있는 종류가 극히 제한되어 있고, 아직 국산화의 시도도 없기 때문에 현실적으로 선택의 폭이 대단히 좁다.

고강도강용 용접재료의 경우도 용접금속의 기계적 특성을 모재와 거의 동등한 수준으로 확보하기 위하여 합금원소가 다량 첨가되고 있다. 이와 같은 합금성분의 첨가에 의한 고강도화는 일반적으로 용접금속의 경화 정도를 높이기 때문에 용접시 저온균열의 발생 가능성을 상당히 증가시킨다. 특히 초층 용접금속부의 루트균열과 다층 용접금속부의 횡균열이 문제시 된다고 보고되어 있으며<sup>2, 3)</sup>, Shinozaki 등은<sup>4-7)</sup> 이러한 HY계 강의 용접 저온균열의 발생특성, 새로운 평가방법 등에 대하여 검토하여 보고한 바 있다. 또한 HY계 고강도강은 상변태 팽창량이 크고 상변태 온도가 낮은 재료일수록 용접 수축량의 감소효과가 증대되어 저온균열의 방지에 유효하다는 보고도 있다<sup>8)</sup>. 이와 같이 고강도강 용접금속의 저온균열 문제에 대해서는 비교적 기본적인 해명이 되어 있지만, 보다 정량적이고 재현성을 높이기 위해서는 아직 규명해야 할 부분이 많다. 특히 적용 용접재료가 다양화되고 품질보증이 엄격해짐에 따라 용접재료 측면에서는 용접금속 자신의 저온균열 감수성을 정확히 평가하고, 문제요인을 제거 또는 개선시킬 수 있는 방

안이 강구되어 용접시공시 안전성 확보에 기여하도록 되어야 할 것이다.

따라서 본 연구는 국산화된 고강도강의 건전한 용접시공을 위하여 시판의 각종 용접재료의 특성을 조사한 것으로, 주로 용접금속 자체의 저온균열 감수성을 평가하고, 시험방법간의 차이 및 저온균열의 발생요인 등을 비교 검토하였다.

## 2. 시험재 및 실험방법

### 2.1 시험재

사용한 용접재료는 시판의 GMA(Gas Metal Arc) 용접용 solid 와이어(1.2mm $\Phi$ )로서, 항복강도 690MPa급 고강도강의 용접시 주로 사용되는 재료 4종과, 비교재로서 552MPa 및 897MPa급 고강도강용 용접재료 각 1종을 포함한 총 6종의 용접재료를 대상으로 하였다. Table 1은 이들 재료에 대한 용착금속의 화학조성을 나타낸 것이다. 표에 나타낸 이들 재료의 기호는 단위를 ksi로 하여 주로 적용되는 모재의 강도 수준을 기준하였으며, 100ksi 수준으로 동일 강도인 MG100의 경우에는 제조회사 및 제조시기에 따라 화학조성이 다소 상이하여 편의상 A, B, C 및 D로 구분하였다. 즉 A와 B는 동일회사 제품으로서 제조시기가 다르며, C 및 D는 서로 다른 회사의 제품이다.

### 2.2 전용착 시험

각 용접재료에 대한 전용착 금속부의 인장 및 충격특성을 조사하였다. 전용착 시험을 위한 시험편의 루터간격은 12mm로 넓게하여 용접시 모재성분의 희석을 최소화하였으며, Ar-2%O<sub>2</sub> 분위기에서 280A-28V-30cm/min의 조건으로 자동용접을 실

Table 1. Chemical compositions of deposited metals used

Material	Chemical composition (wt. %)												Ceq*	AWS Class. (A5.28)	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	Ti	B(ppm)			
MG100A	0.076	0.27	1.44	0.010	0.009	0.33	2.40	0.54	0.03	-	0.003	0.008	-	0.587	ER120S-1
MG100B	0.063	0.25	1.48	0.005	0.007	0.32	2.39	0.50	0.02	0.005	0.006	0.009	70	0.568	
MG100C	0.065	0.51	1.43	0.009	0.009	0.34	1.50	0.27	0.14	0.006	0.109	0.003	40	0.505	
MG100D	0.094	0.67	1.56	0.009	0.009	0.24	2.04	0.56	0.19	0.005	0.006	0.020	40	0.620	
MG80	0.040	0.22	1.39	0.006	0.007	0.11	1.78	0.34	0.02	-	0.002	0.009	-	0.432	ER100S-1
MG130	0.063	0.25	1.57	0.008	0.006	0.95	2.28	0.65	0.05	-	0.004	0.017	-	0.744	ER140S-1

\* : Ceq(WES) = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 (%)

시하였다. 용접중 예열온도 및 층간온도는 75~100°C로 관리하였다. 전용착 금속부의 인장시험은 직경 12.5 mm, 표점거리 50 mm의 환형 시험편을 사용하였으며, 충격시험은 표준의 V노치 샤르피 시험편을 사용하여 -18°C, -51°C 및 -80°C에서 시험하였다.

### 2.3 G-BOP(Gapped-Bead on Plate) 시험

자기 구속형의 저온균열 시험방법인 G-BOP 시험<sup>5,6)</sup>을 위한 시험편은 피시험체인 용접재료와 유사한 화학조성을 갖는 두께 50 mm 정도의 후판이 필요하지만, 본 시험에서는 이러한 시험편의 확보가 곤란하여 시험부위 만을 피시험체와 같은 용접재료로 육성용접하여 비슷한 화학조성을 갖도록 제작한 SWS50B를 사용하였다. 즉 Fig.1에 나타낸 바와 같이, SWS50B의 표면 중앙부에 가공한 30L×220W×15t(mm) 크기의 U형 홈의 내부를 각각의 피용접재료로 육성용접하여 시험편을 제작하였다. 방법은 용가재 자동송급 방식의 GMA용접법을 사용하여 270A-24V-38cm/min의 조건으로 4층 육성용접하였다. 이러한 육성용접부는 원자흡광 분석기로 성분을 분석하여 시험부위의 육성용접부의 표면 중심이 SWS50B의 성분과 거의 희석이 없고, 각 용접재료에 대한 용착금속의 성분과 동일함을 확인하였다.

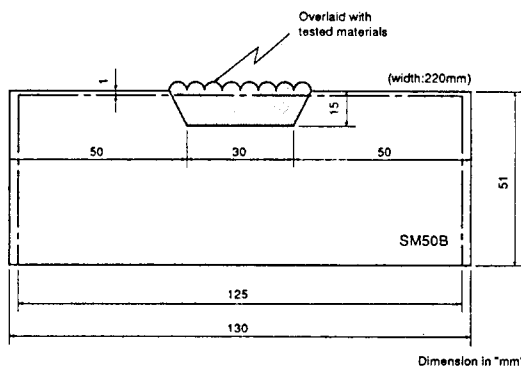
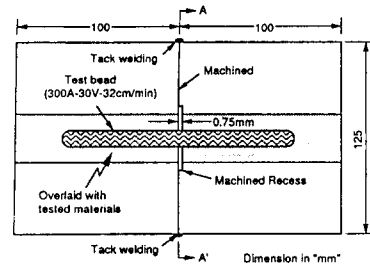


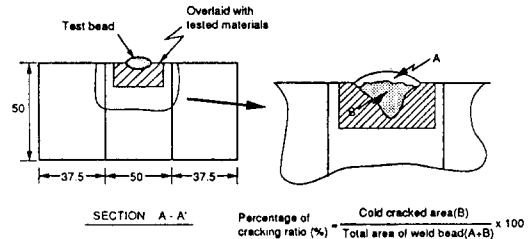
Fig. 1 Preparation of test block for G-BOP test

Fig.2는 이상의 시험편으로부터 제작한 G-BOP 시험편의 형상을 나타낸 것이다. 시험편은 100L×125W×50t(mm) 크기로 가공된 2개의 시험편으로 구성되며, 그중 하나에는 단면 중심부에 50L×

0.75W(mm) 크기의 기계노치를 두께방향으로 가공하여 그림에서와 같이 두 시험편을 가용접하여 구속시켰다. 각 시험체에 의한 시험용접은 GMA용접법을 사용하여 280A-28V-30 cm/min의 조건으로 시험편 표면의 노치부를 횡단하도록 하였다. 또 시험편의 예열온도는 상온에서 175°C까지 25°C 간격으로 7수준 변화시켰다. 시험용접 후의 시험편은 구속상태로 약 72시간 유지시킨 다음 망치로 파단시켜, Fig.2(b)에 나타낸 바와 같이 균열 발생을 백분률로서 나타내었다. 균열 감수성은 균열이 발생하지 않는 한계 예열온도 및 10%의 균열 발생 온도인 10% CPT(Crack Preheating Temperature)<sup>5,6)</sup>로서 평가하였다.



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 2 Specimen configuration of G-BOP test

### 2.4 LB-TRC(Longitudinal Bead-Tensile Restraint Cracking) 시험

Fig.3은 외부 구속형의 저온균열 시험방법인 LB-TRC 시험편의 형상 및 시험방법<sup>5,6)</sup>을 개략적으로 나타낸 것이다. 시험체는 항복강도 690MPa급 고강도강을 사용하였으며, 시험편은 폭 35 mm, 두께 25 mm로 일정하게 하고, 길이는 최대 400 mm로 가공하였다. 또 시험편의 두께 중심부까지 하부의 곡률 반경이 6 mm, 각도가 55°인 U형의 홈을 가공하

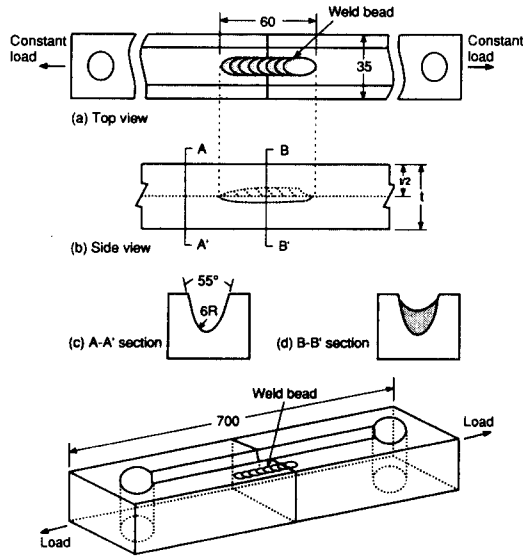


Fig. 3 Specimen configuration of LB-TRC test

였다.

시험에는 Table 1의 용접재료 중 MG100B, MG100C 및 MG100D를 사용하였다. 즉 그림에서 나타낸 바와 같이 먼저 두 시험편의 U형 홈을 일치시킨 후, 길이방향으로 약 60 mm의 비드길이 되도록 상온에서 280A-28V-30mm/min의 조건으로 GMA용접하였다. 용접된 시험편은 용접금속이 약 150°C로 냉각된 시점에서 용접선에 평행하게 임의의 일정하중을 부가하여 부가응력과 파단시간과의 관계를 구하였다. 시험결과에서의 파단응력인 부가응력은 부가하중을 파단된 시험편의 유효 단면적으로 나눈 값이다. 또 한계 파단응력은 최대 24시간 이후까지 파단되지 않는 임의의 부가응력 중 가장 높은 값으로 정의하였으며, 이 값이 높을수록 저온균열 감수성이 낮다.

한편 각 용접금속의 확산성 수소량은 가스 크로마토그래프법을 이용하여 측정하였으며, G-BOP 및 LB-TRC 시험 후의 시험편에 대해서는 주사전자현미경(SEM)으로 파면을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용착금속의 기계적 성질

Table 2는 시험재인 각종 GMA용접 와이어를 사

Table 2. Mechanical properties of deposited metals used

Material AWS Class. (A5.28)	Tensile property			vTr <sub>F</sub> (°C)
	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	
MG100A	779.0	836.0	15.0	-50
MG100B	757.5	815.0	18.3	-60
MG100C	772.0	848.0	19.6	-60
MG100D	916.0	973.0	14.0	-55
ER120S-1	731~840	Min.831	Min.14.0	
MG80	638.5	678.5	24.5	-55
ER100S-1	610~700	Min.690	Min.16.0	
MG130	948.5	1000.0	20.2	-65
ER140S-1	896~965	Min.887	Min.14.0	

용하여 약 16kJ/cm의 입열량으로 용접한 전용착금속부의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 인장시험 결과에 의하면 MG100A, MG100B 및 MG100C의 항복강도, 인장강도 및 연신율은 거의 비슷한 수준이다. 그러나 MG100D는 이들 시험재료보다 항복강도 및 인장강도가 다소 높고 연신율은 낮다. 이것은 MG100D가 다른 시험재료에 비해 탄소당량(Ceq.)이 다소 높기 때문이며, 인장특성을 규격에서 규정하는 범위로 확보하기 위해서는 Ceq.를 0.6% 이하로 관리하는 것이 필요하다고 생각된다.

한편 Fig.4에 나타낸 바와 같이 용착금속의 충격인성도 인장특성과 거의 동일한 경향을 보이고 있다. 즉 MG100A, MG100B 및 MG100C의 충격인성이 서로 비슷하며, MG100D는 이들 시험재료에 비해 다소 낮음을 알 수 있다. 비교재인 MG80 및

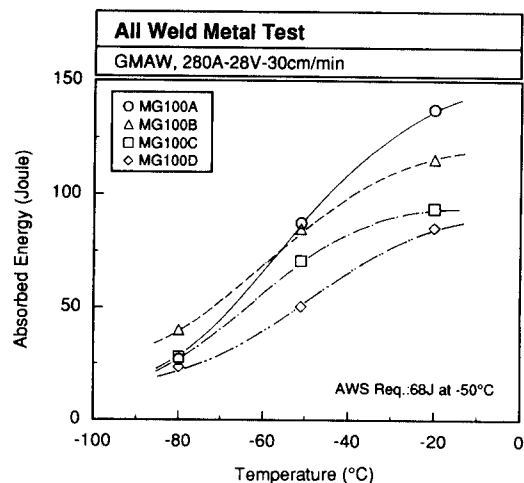


Fig. 4 Charpy impact test result of deposited metals

MG130의 경우에도 규격치를 모두 만족하고 있음을 확인하였다.

### 3.2 G-BOP 시험

Fig.5는 자기구속의 G-BOP 시험결과로서 예열온도와 균열 발생률과의 관계를 나타낸 것이다. 저온균열을 방지할 수 있는 예열조건인 한계 예열온도를 비교하면, MG100B가 약 75°C로서 100°C 정도로 동일한 MG100C, MG100D 및 150°C로 다소 높은 MG100A보다 상대적으로 낮은 온도임을 알 수 있다. 즉 한계 예열온도에 의한 저온균열 감수성은 MG100A>MG100C·MG100D>MG100B와 같이 평가할 수 있다.

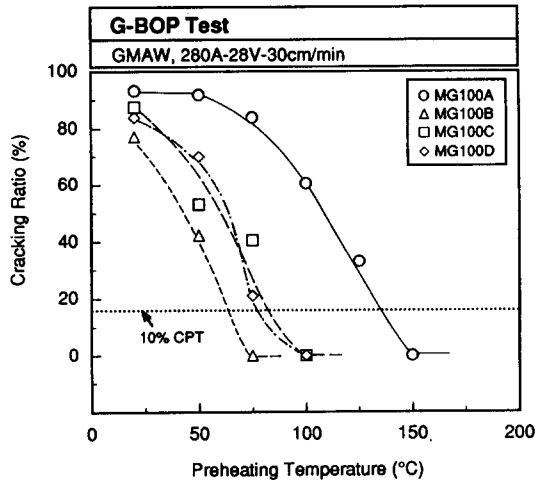


Fig. 5 Effect of preheating temperature on weld metal cracking in G-BOP test

그러나 이와 같이 재료의 균열 감수성을 한계 예열온도로서 평가하면 MG100C 및 MG100D와 같이 거의 비슷하여 우열을 판정하기 곤란한 경우가 많다. 비교제인 MG80 및 MG130의 한계 예열온도도 약 75°C 및 150°C로서 각각 MG100B 및 MG100A와 동일하다. 또 비교적 적은 시험량으로 균열 감수성을 평가할 수 있는 상온에서의 균열 발생률도 본 시험재와 같이 합금 첨가량이 많고 강도가 비교적 높은 재료의 경우에는 대부분 균열 발생률이 높기 때문에 상호 비교가 쉽지 않다.

이와 같이 한계 예열온도 및 상온에서의 균열 발생률이 거의 동일한 재료일지라도 상온에서 한

계 예열온도까지의 범위내에서는 균열 발생률이 서로 다른 경우가 많다. 일례로서 Photo.1은 한계 예열온도 및 상온에서의 균열 발생률이 거의 같은 MG100A 및 MG130을 대상으로 75°C로 예열한 경우의 거시파면을 나타낸 것이다. 사진에서 볼 수 있는 바와 같이, MG100A 및 MG130의 균열 발생률은 각각 80% 및 40% 정도로서 MG100A가 거의 2배의 균열 발생률을 나타내고 있다.

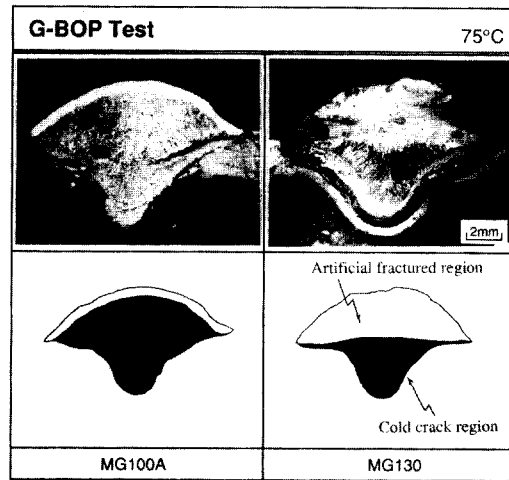


Photo. 1 Fractured surface of weld metals after G-BOP test with 75°C preheating

한편 또 하나의 균열 감수성의 평가 지표로서 활용되고 있는 10% CPT를 기준하면, 본 시험재의 저온균열 감수성은 Fig.5로 부터 MG100A>MG100C>MG100D>MG100B와 같이 평가될 수 있다. 즉 한계 예열온도를 기준하면 동일한 균열 감수성을 보이고 있는 MG100C와 MG100D의 경우에도 10% CPT를 기준하여 비교하면 MG100D의 균열 감수성이 MG100C에 비해 다소 양호함을 알 수 있다. 이와 같이 10% CPT로 판단한 균열 감수성의 순위는 후술하는 LB-TRC 시험결과와도 잘 일치하는 것이다. 또 비교제인 MG80의 10% CPT는 70°C 정도로서 MG100B와 거의 비슷하며, MG130은 125°C 정도로서 MG100A에 비해서는 양호하지만 MG100C보다는 다소 높은 수준임을 확인하였다.

### 3.3 LB-TRC 시험

Fig.6은 MG100B, MG100C 및 MG100D에 대한 외부구속의 LB-TRC 시험결과로서, 부가하중을 과단된 용접금속의 유효 단면적으로 나눈 값인 부가응력과 파단시간과의 관계를 나타낸 것이다. 시험재 모두 부가응력의 저하에 따라 파단시간이 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있으며, 한계 파단응력에 도달하는 시간도 거의 동일하다. 그러나 저온균열이 발생하지 않는 한계 파단응력은 MG100B가 약 43kgf/mm<sup>2</sup>으로 가장 높고, MG100D가 약 37kgf/mm<sup>2</sup>, MG100C가 약 27kgf/mm<sup>2</sup> 순으로 낮은 값을 보이고 있다. 이 결과로부터 이들 재료의 저온균열 감수성은 MG100B>MG100D>MG100C와 같으며, 재료간의 한계 파단응력도 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 전술한 G-BOP 시험결과와 동일한 경향이다. 특히 G-BOP 시험결과에서 한계 예열온도가 100°C 정도로 동일하고 10% CPT가 80°C 및 90°C 정도로서 큰 차이를 보이지 않았던 MG100C 및 MG100D의 경우도 LB-TRC 시험결과 얻어진 두 시험재의 한계 파단응력이 10kgf/mm<sup>2</sup> 정도 차이를 보임으로써 MG100D의 균열 감수성이 MG100C에 비해 양호함을 분명히 확인할 수 있었다.

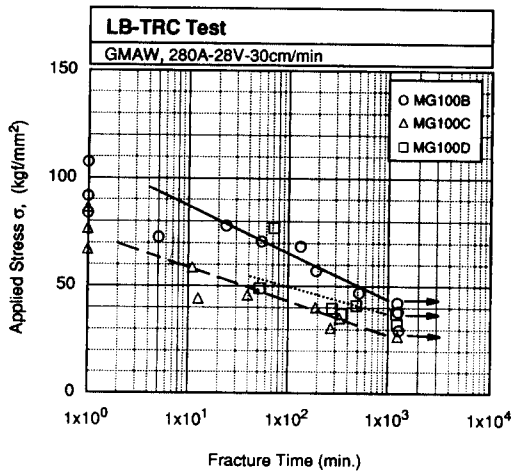


Fig. 6 Comparison of lower critical stress in the LB-TRC test

### 3.4 용접금속의 파면관찰

Photo.2는 상온에서 G-BOP 시험 후, 약 90%의 균열 발생률을 보인 MG100C의 거시 및 미세파면을 나타낸 것이다. (a)의 거시파면으로 부터 용접금속부는 대부분 주상정에 의한 방향성과 광택을 갖는 수직 파단임을 알 수 있다. (b)는 일반적인 미세파면의 예를 나타낸 것으로, 주로 입계파면이며 일부 입내파면도 관찰할 수 있다. (c)는 입계파면부를 확대한 것으로, 파면은 비교적 평탄하며 헤어 라인(Hair line)과 함께 기공(Void)이 보이고 기공내에는 개재물이 보이는 곳도 있다. 입내파면부는 (d)에서 볼 수 있는 바와 같이 전형적인 수소 의벽계(Quasi-cleavage) 파면 형태이며, 이곳에서도 일부에 기공과 함께 개재물도 관찰할 수 있었다.

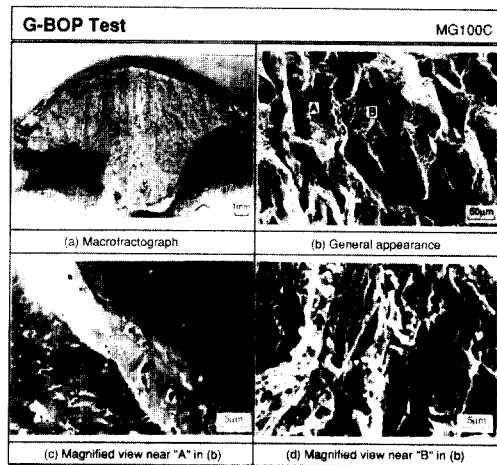
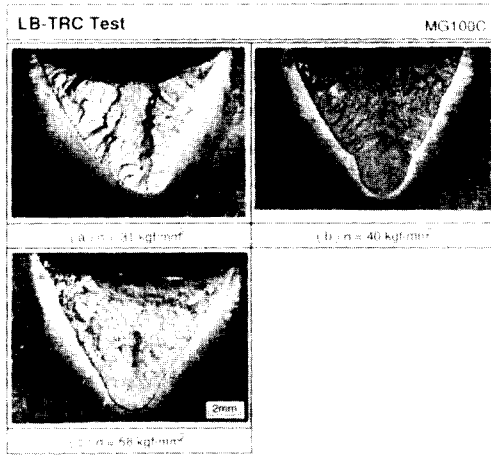


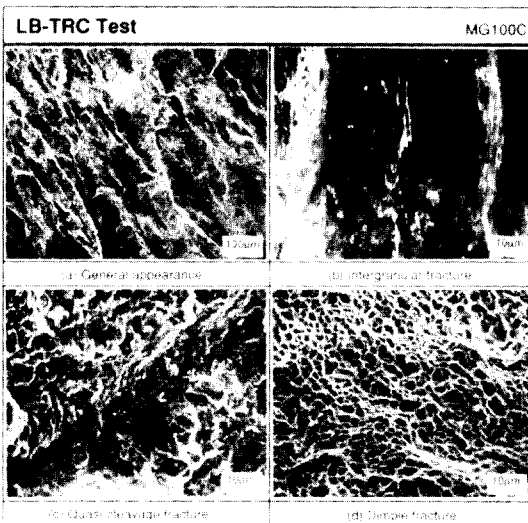
Photo. 2 Macro and Microfractographs of cold cracking in MG100C weld metal after G-BOP test without preheating

한편 Photo.3은 MG100C에 대한 LB-TRC 시험 후의 거시파면을 나타낸 것이다. (a)는 부가응력이 31kgf/mm<sup>2</sup>의 경우로서, 파면은 방향성을 가지며 광택을 보이고 있다. 이러한 파면의 특징은 (b) 및 (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 부가응력의 증가와 함께 점차 소멸되는 경향을 보이며, (c)와 같이 부가응력이 58kgf/mm<sup>2</sup>로 비교적 높은 경우에는



**Photo. 3** Variation of fractured surface of MG100C weld metal with increase applied stress in the LB-TRC test without preheating

방향성 및 광택이 거의 없는 주로 연성적인 파면 형태를 나타내고 있다. Photo.4(a)는 Photo.3에서 방향성 및 광택을 보인 파면부를 확대한 것이다. 파면은 주상정의 구 오스테나이트 입계를 따른 입계파면과 수소 의벽계 파면이 혼재되어 있으며, 입계파면에는 일부 2차균열도 관찰되었다. 또 광택이 없는 파단부는 (b)에 나타낸 바와 같이 덩굴



**Photo. 4** Microfractographs of MG100C weld metal after LB-TRC test

(Dimple) 형태의 전형적인 연성파면이 관찰되었다.

이와 같은 G-BOP 시험 및 LB-TRC 시험 후의 파면 형태는 다른 시험재도 거의 동일함을 확인하였다. 따라서 파면의 형태로서 판단하면 자기구속 또는 외부구속에 관계없이 균열에는 수소가 주요 인자로서 작용한 것으로 생각된다.

### 3.5 용접금속의 저온균열 감수성에 대한 검토

용접금속부의 저온균열 감수성은 Ceq. 및 경도 시험으로 추정할 수 있는 용접열에 의한 조직의 경화 외에도 용접부의 구속도 및 수소량에 의해 좌우되며 이들 인자들은 단독 또는 복합적으로 작용하는 것으로 알려져 있다.

그러나 본 시험재의 경우에는 Ceq.에 의한 단순한 추정과 전술한 G-BOP 시험 및 LB-TRC 시험결과가 일치하지 않는다. 즉 Ceq.가 0.51%로 가장 낮은 MG100C와 0.62%로 가장 높은 MG100D의 시험결과가 거의 비슷하다. 또 MG100A 및 MG100B의 Ceq.가 각각 0.57% 및 0.59%로서 비슷하고, 사용된 4종의 용접재료 중 이들 재료의 Ceq.가 중간 수준임에도 불구하고, 시험에 의한 균열 감수성은 MG100B가 가장 낮고 반대로 MG100A는 가장 높다.

한편 전술한 G-BOP 시험결과와 LB-TRC 시험결과로부터 저온균열 감수성의 변화는 자기구속 및 외부구속과 같은 구속 조건과는 무관함이 확인되었다. 또한 두께 50mm의 시험편을 사용한 G-BOP 시험편의 경우 용접비드에 부과되는 구속도는  $5 \times 10^3 \text{N/mm}$  정도로 일정하다<sup>9)</sup>.

이와 같이 일정한 구속조건에서, Ceq.에 의한 추정과 시험결과가 서로 일치하지 않는 원인을 검토하기 위하여 확산성 수소량을 조사하였다. Table 3은 그 결과로서 비교를 위해 G-BOP 시험결과도 함께 나타내었다. MG100의 경우 확산성 수소량의 변화와 10% CPT로 판단할 수 있는 균열 감수성의 우열 정도가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또 MG130은 확산성 수소량이  $0.86 \text{ml}/100 \text{g}$  수준으로 낮음에도 불구하고 거의 비슷한 수소량을 함유한 MG100B에 비해 균열 감수성이 높다. 이것은 MG130에는 고강도화를 위해 합금원소가 다량 첨가되었기 때문이라고 생각된다. 그러나 MG130은 비록 고강도강일지라도 수소량이 낮기 때문에,

MG100A와 같이 강도가 비교적 낮지만 수소량이 많은 재료에 비해서는 균열 감수성이 양호하다. 이것은 본 시험재와 같은 고강도 용접금속의 저온균열 감수성에는 합금원소의 첨가에 따른 경화정도의 증가에 비해 확산성 수소의 영향이 크다는 것을 의미한다. 또한 전술한 저온균열 시험 후의 파면관찰 결과에서도 수소가 균열 발생의 주요 인자임이 확인된 바 있다.

**Table 3.** Comparison of diffusible hydrogen content in weld metals and weld metal cracking in G-BOP test Material

Material	H <sub>p</sub> <sup>1)</sup> (ml/100g)	CFT <sup>2)</sup> (°C)	10%CPT <sup>3)</sup> (°C)
MG100A	5.92	150	125
MG100B	0.65	75	70
MG100C	4.16	100	90
MG100D	2.79	100	80
MG80	2.72	75	70
MG130	0.86	150	125

- 1) Diffusible hydrogen content in weld metal
- 2) CFT : Crack Free Temperature
- 3) CPT : Crack Preheat Temperature

이러한 용접금속 중의 수소량은 용접 와이어 자체의 수소함량과도 밀접한 관계가 있다. 비교를 위해 와이어 자체의 수소함량을 분석한 결과 MG80, MG100A 및 MG130의 수소량이 각각 6.3ppm, 8.49ppm 및 2.45ppm으로서 Table 3에 나타난 용접금속 중의 확산성 수소량과 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 제조회사에 따라 와이어의 수소함량이 다를 수 있고, 특히 MG100A와 MG100B의 확산성 수소량이 큰 차이를 보이고 있는 것은 동일회사 제품일지라도 제조시기에 따라 수소함량이 크게 다를 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 이러한 관점에서 실용접용 GMA용접 와이어를 선택할 경우에는 용접금속의 저온균열 감수성을 최소화시키기 위한 와이어의 한계 수소함량을 결정할 필요가 있다. 이를 위해서는 보다 많은 시험이 필요하겠지만 본 시험 범위에서 균열 감수성이 비교적 양호한 범위인 MG130을 기준으로 하면 용접 와이어의 한계 수소함량은 약 3ppm 이하로 규제해야 될 것으로 생각된다.

한편 본 시험재와 같이 합금원소가 비교적 많이 첨가된 용접금속의 저온균열 감수성에는 확산성 수소 외에도 용접고 후에 일어나는 마르텐사이트

변태시의 변태 팽창응력이 다소 영향을 미칠 것으로 생각된다. 즉 G-BOP 시험과 같이 시험편 자체의 구속도가 동일한 경우에도 용접금속의 화학조성에 따라 변태온도가 다르고, 그 온도에서의 변태 팽창응력에 따라 시험비드에 작용하는 최종응력도 서로 다를 것이다. 통상 용착금속의 변태온도가 낮을수록 G-BOP 시험편의 노치를 통과하는 시험비드가 완전히 냉각되었을 때 부가되는 최종응력은 감소한다. 즉 합금원소의 첨가량이 증가할수록 변태온도는 낮아지며, 변태 팽창응력의 증가에 따라 시험비드의 최종응력은 감소한다. 따라서 시험으로 명확히 확인한 것은 아니지만 MG130의 Ceq가 MG100에 비해 높기 때문에 최종응력이 쉽게 저하될 것이므로 저온균열 감수성에도 다소의 영향을 미쳤으리라 생각된다.

#### 4. 결 론

시판되고 있는 각종 고강도강용 용접재료를 사용하여 주로 용접금속 자체의 용접 저온균열 감수성을 평가하고, 균열 감수성을 좌우하는 주요 원인등을 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전용착시험 결과 MG100D를 제외한 시험재 모두 인장 및 충격특성이 양호하고 규격을 만족하였다. 그러나 규격 범위내의 적정한 기계적 성질을 확보하기 위해서는 용접재료의 Ceq를 0.6% 이하로 관리해야 한다고 생각된다.
- 2) G-BOP 시험에 의한 저온균열 감수성의 평가는 한계 예열온도 및 상온에서의 균열 발생률에 비해 10% CPT가 가장 정량화하기 쉽고, LB-TRC 시험결과와의 상관관계도 양호하다.
- 3) 사용한 용접금속의 저온균열 감수성은 자기 구속 또는 외부구속에 관계없이 MG100A>MG100C>MG100D>MG100B의 순이며, MG80은 MG100B와 비슷하고 MG130은 MG100A와 MG100C의 중간 수준이다.
- 4) 본 시험재와 같은 고강도 용접금속의 저온균열 감수성은 화학조성인 Ceq에 의한 추정이 곤란하며, 수소량의 영향이 가장 큰것으로 확인되었다.
- 5) 용접금속의 확산성 수소량은 용접 와이어 자체의 수소함량에 크게 의존되며, 이것은 제조회사와 제조시기에 따라 상이할 수 있으므로 선택시 주의가 필요하다. 본 시험범위에서 판단할 때 저



은균열 감수성을 최소화시키기 위한 실용접용 GMA용접 와이어의 한계 수소함량은 약 3ppm 이하로 규제해야 할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. 이종봉, 안상곤, 정홍철, 심인옥: "HY계 고강도 고인성강의 용접성", 대한용접학회, 제13권 제3호, (1995), pp.209~220
2. 岸本, 印藤, 江端, 大友: 高張力鋼のサブマ-ジア-ク溶接における溶接割れの研究(第1報), 溶接學會誌, Vol.46, No.8, (1977), pp.561~566
3. 岸本, 印藤, 江端, 大友: 高張力鋼のサブマ-ジア-ク溶接における溶接割れの研究(第2報), 溶接學會誌, Vol.46, No.12, (1977), pp.875~880
4. 松田, 中川, 篠崎, 實松: 初層突合せ継手におけるHAZおよび溶接金屬での低溫割れ發生條件についての検討, 溶接學會論文集, Vol.5, No.1, (1987), pp.94~100
5. 松田, 中川, 篠崎: LB-TRC試驗法の開發とその實用性に關する検討, 溶接學會論文集, Vol.5, No.2, (1987), pp.233~238
6. 松田, 中川, 篠崎: LB-TRC試驗法による溶接金屬の低溫割れ感受性の評價, 溶接學會論文集, Vol.5, No.2, (1987), pp.239~243
7. 松田, 中川, 篠崎: 殘留水素を用いた溶接金屬の低溫割れ限界應力の整理, 溶接學會論文集, Vol.5, No.2, (1987), pp.244~249
8. 松田, 中川, 篠崎: HY系高張力鋼溶接部の相變態舉動による拘束應力の緩和現象について, 溶接學會論文集, Vol.5, No.2, (1987), pp.250~255
9. M.McPARLAN and B.A.GRAVILLE: "Hydrogen Cracking in Weld Metals", Welding J., Vol.55, No.4, (1976), pp.95s~102s
10. P.H.M.HART: "Resistance to Hydrogen Cracking in Steel Weld Metals", Welding J., Vol.65, No.1, (1986), pp.14s~22s
11. A.P.CHAKRAVARTI and S.R.BALA: "Evaluation of Weld Cold Cracking Using the G-BOP Test", Welding J., Vol.68, No.1, (1989), pp.1s~8s