

인장구속 균열시험에 의한 ABS EH 32강 용접부 저온 균열 감수성 시험

정수원* · 박동환* · 최기영* · 김대현*

The TRC Test for Cold Crack Susceptibility of Welded Zone for ABS EH32 Steel

by

S. H. Chuug* · D. H. Park* · K. Y. Choi* · D. H. Kim*

Abstract

In this study, cold crack susceptibility of high strength steel (ABS EH32 Steel) welded zone with shielded metal arc welding was investigated by tensile restraint cracking test method. Effects of diffusible hydrogen content on root cracking, lower critical stress, crack initiation and fracture mode, hardness value distribution of welded zone and fractograph were mainly investigated.

Following conclusions are made:

1. In the view of the lower critical stress level, wet electrode, containing much diffusible hydrogen content shows lower value than dried electrode.
2. Hardness value (Hv 5kg) in Heat Affected Zone of wet electrode is higher than that of dried electrode caused by hydrogen embrittlement.
3. In the case of wet electrode, root crack is initiated and propagated in Heat Affected Zone and then propagated to weld metal, but using of dried electrode, root crack is initiated in Heat Affected Zone and propagated to weld metal without propagating in HAZ.
4. For wet electrode, quasi-cleavage fracture mode is majorly observed on the fracture surface of HAZ and partially of weld metal due to hydrogen embrittlement.

1. 서 론

선박의 경제적인 운항을 위해서는 선체의 중량을 감소시키는 반면, 더 많은 화물을 적재하고 빠른 속도로 항해할 수 있어야 한다.

최근 선박의 건조에도 고장력강의 사용이 점차 증대되고 있는 사실은 그러한 이유의 한가지임을 알 수 있다. 그러나 고장력강의 사용은 반드시 좋은 점만 가지고

있는 것은 아니다.

이는 용접 중 또는 용접 후에 용접 열영향부의 균열이 연강보다 쉽게 발생될 수 있기 때문에 파괴에 치명적인 원인이 될 수 있는 불리한 점도 함께 지니고 있다. 특히 고장력강 용접 열영향부에 발생되기 쉬운 균열은 대부분이 저온균열로 용접부의 확산성 수소에 기인되는 균열이라는 이론¹⁻³⁾들이 보고되었다.

강의 수소 취화에 대해서는 40여년 전 부터 많은 연구가 수행되어 왔으나, 아직까지 이론적 실험적으로 확실

* 현대중공업(주) 용접기술연구소

하게 정리되어 있지 못하고 있는 실정이다.

수소 취화에 대한 이론을 대별해 보면 강 중의 미소 공간(void)에 집적한 비확산성 수소에 의한 분자상의 수소 취화 이론과, 강 중에 고용된 확산성 수소에 의한 원자상의 수소 취화 이론으로 나누어져 있다.

먼저 전자적 이론은 미소 공간에 집적한 비확산성 수소가 고압으로 되는 것이 주원인이 된다고 생각하는 가장 고전적인 이론,⁴⁻⁶⁾ 즉 griffith crack의 표면 에너지가 수소의 존재에 의해 저하한다는 것이 주원인이 된다는 Petch⁹⁾ 등의 이론과, 균열전파에 필요한 에너지의 일부가 가스의 팽창에 따라서 해방되는 에너지로 부터 받는다는 Kazinczy의 이론¹⁰⁾ 등으로 나눌 수가 있다.

후자의 이론 중에는 고용된 확산성 수소가 전위의 극점에 cottrel cloud로 존재하여 소성변형에 의해 전위가 집적하는 장소(결정립계, 석출물, 개재물 등)에 국부적 일시적인 수소 과포화 상태가 되어 그 장소에 수소 압이 증가하여 3축 응력장을 만들어 취화된다고 생각하는 Bastien 이론^{11,12)} 등이 있지만, 확산성 수소에 기인된 강의 취화가 일어나는 것을 생각하는 가장 대표적인 것으로는 Troiano 등의 이론^{13,14)}을 들 수 있다.

그 이론에 따르면 강 중의 미소공간 선단이 늦치가 되어 그곳이 국부적인 소성변형을 가지는 3축 응력장이 형성되어지고 그 응력장에 확산성 수소가 집적해서 강기중 수소 농도가 상승하여 수소 취화를 일으킨다고 생각하고 있다. 앞서 언급된 바와 같이 고장력강 용접부의 저온 균열은 용접시 흡수된 확산성 수소에 의해 취화된 용접 열영향부에서 발생되기 쉽다고 보고¹⁻³⁾되어 있다.

본 연구에서는 선박용 고장력 강제로써 미국선급협회(ABS)의 분류 강제 EH 32강에 대한 확산성 수소의 영향을 대별하기 위해 완전 건조 및 수침시킨 저수소계 용접봉(AWSE-7016 type)을 사용한 수동용접(SMAW), 즉 초 층 용접부의 저온 균열 감수성을 인장구속 균열시험을 통해 조사함과 동시에 클리셰린법에 의한 저수소계 용접봉의 확산성 수소함량을 측정하여, 확산성 수소함량이 용접부의 저온 균열 감수성에 미치는 영향을 분석했다. 또한 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 파단면을 관찰 분석함으로써 궁극적으로 고장력 강의 용접에 저수소계 용접봉을 사용하는 용접 시공시 확산성 수소에 의해 취화되어 발생하는 용접 열영향부의 저온 균열 방지에 도움을 주고자 하였다.

2. 인장구속 균열시험 (TRC test)의 원리

2·1 원리 및 장치

본 연구에 사용된 인장구속 균열시험(TRC test)은 y 大韓熔接學會誌 第2卷 第2號 1984年 12月

개선된 시편을 맞대어 용접을 행한 다음, 용접 열영향부의 온도를 열전대에 삽입하여 측정하였다. 그리고 열영향부의 온도가 시험하고자 하는 설정 온도에 달했을 때 용접선에 수직으로 정하중을 가하여 그때의 응력과 파단 시간과의 관계에서 균열이 일어나지 않는 임계하한 응력을 비교하여 저온 균열 감수성을 평가하였다.

본 연구에 사용된 TRC machine은 전기 모터를 사용한 치차식 하중전달 방식으로 시험하고자 하는 하중의 설정상, 하한치를 load cell에서 감지하여 feed back시키는 system으로 구성되어 있다.

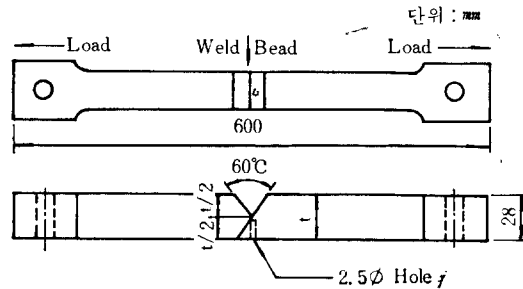


Fig. 1. Configuration of the TRC test specimen and testing method

Fig.1에는 본 시험에 사용된 TRC 시편의 형상과 시험방법, Photo. 1에는 시험장치, 그리고 Photo. 2에는 용접되어질 시편을 나타내었다.

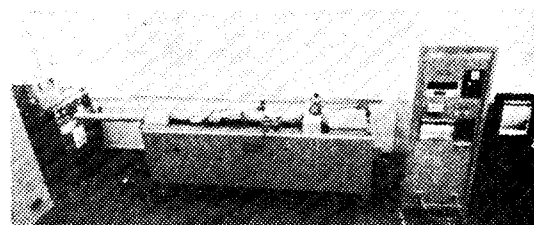


Photo. 1. Apparatus for TRC test

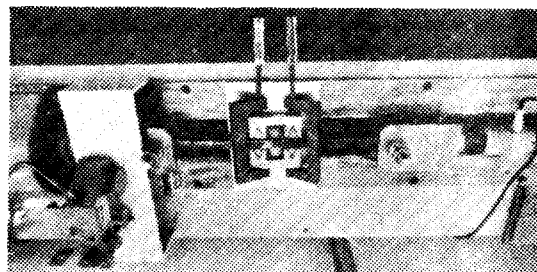


Photo. 2. TRC test specimen being welded

3. 실험 방법

3·1 시 편

본 연구에 사용된 재료는 ABS EH32 강제로 roll 방

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of base metal. (Nippon steel Co, Ltd¹⁷⁾)

Base Metal	Chemical composition (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb
ABS EH32 steel	0.16	0.34	1.22	0.016	0.005	0.01	0.01	0.02	Trace
	Mechanical properties								
	Y.P (Kg/mm ²)		T.S (Kg/mm ²)		EL. (%)		Impact value Kg.f.m(-40°C)		
33		50.2		33		20.2			

Table 2. Chemical compositions, mechanical properties and diffusible hydrogen contents of deposited weld metal.

Electrode	Chemical composition (wt%)					Diffusible hydrogen content (ml/100gr)	
	C	Si	Mn	P	S	Dried	Wet
S-7016H 4.0φ (AWS E-7016 Type)	0.08	0.54	1.14	0.014	0.014		
						4.3	11.2
	Mechanical properties						
Y.P (Kg/mm ²)		T.S (Kg/mm ²)		EL. (%)		Impact value (Kg.f.m)	
58.4		66.3		24.0		-20°C 15.4	-40°C 12.9

향에 평행하게 소정의 크기로 가스 절단을 행한 다음 y 개선으로 기계 가공을 하였다. 그리고 열영향부의 온도를 정확히 측정하기 위해 개선부 직하에 열전대를 삽입할 수 있도록 2.5φ hole을 내었다. 시편의 화학 조성 및 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

3.2 용접봉 및 수소 시험

용접봉은 저수소계 피복 아크 용접봉인 AWS-E7016 type을 선택하였으며 용접하기 전에 350°C에서 1시간 건조한 후 150°C로 보온한 것과 또 상온에서 2분 동안 수침시킨 것을 구분하여 글리세린법(ABS rule¹⁸⁾)으로 용접봉의 확산성 수소 함량을 측정하였다. 용착 금속의 화학 성분과 기계적 특성 그리고 확산성 수소 함량을 Table 2에 나타내었다.

3.3 용접 방법

용접은 DC 용접기를 사용하여 수침 및 건조봉을 수동용접(SMAW)으로 실시하였으며, 용접조건은 시편의 예열없이 DCRP.170A 25V 150mm/min 입열 17KJ/cm로 하였다.

특히 용접속도를 일정하게 하기 위해 속도조정이 가



$$\begin{aligned} \text{인장응력 } (\sigma) &= \frac{\text{하중}(P)}{\text{단면적}(A)} \\ &= \frac{\text{하중}(P)}{h \times \text{시편폭}} \end{aligned}$$

Fig. 2. Specimen configuration for the calculation of stress (a)

능한 torch mate를 별도로 설치하여 사용하였다.

시편은 root face=0, root gap=2mm로 일정하게 하였으며 시종 단부에 run off tap을 부착시켜 완전하게 용접을 하였다.

Photo. 3에 용접된 시편을 나타내었다.

3.4 TRC test

용접이 완전하게 끝난 다음 열영향부의 온도가 150°C일 때 용접선에 수직으로 정하중을 가하였다. 이때 시편에 걸리는 인장응력은 똑같은 조건에 의해서 얻어진 단면적으로 하중을 나누어 다음과 같이 계산하였다.

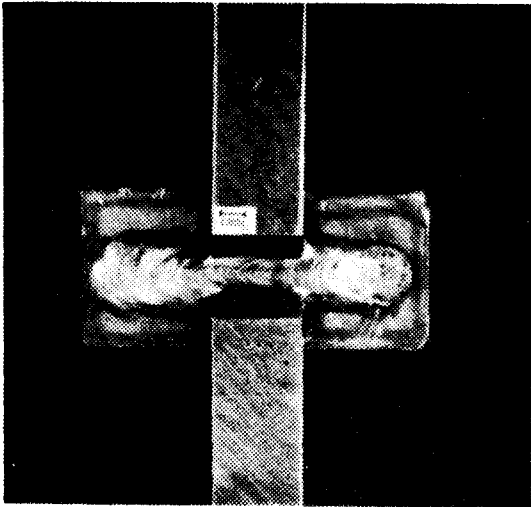


Photo. 3. Welded TRC specimen



Photo. 4. Typical fractured y groove TRC test specimen

인장응력은 $5kg/mm^2$ 간격으로 실험하였으며 인장속도는 처음 설정한 하중까지는 $5mm/min$ 설정하중에서 파단시까지 $1mm/min$ 로 하였다.

파단시간은 설정 하중치 이후부터 시편이 파단될 때까지로 하였으며 최대 24시간까지 측정하였다.

파단된 시편의 균열 형태는 측면 macro 시편으로 육안검사를 하였으며 파면은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 자세하게 관찰하였다.

Photo. 4에 전형적인 y 개선 TRC 시편의 파단면을 나타내었다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 입계하한 응력

수침봉과 건조봉의 확산성 수소 함량과, 가해진 응력 대 파단 시간과의 관계를 semi log graph를 이용하여 Fig.3에 나타내었다.

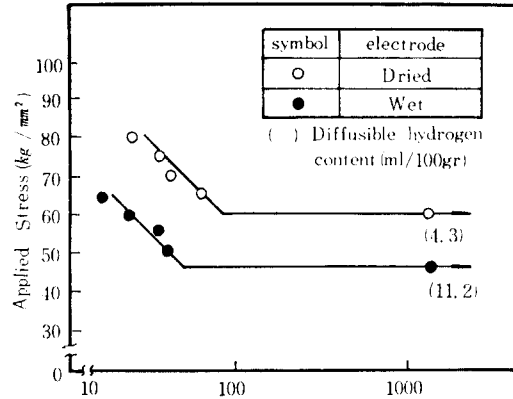


Fig. 3. Relation between applied stress and fracture time (min)

Fig. 3으로부터 확산성 수소 함량이 많은 수침봉은 용접된 시편의 입계하한 응력($\sigma=45kg/mm^2$)이 건조봉으로 용접된 시편의 입계하한 응력($\sigma=60kg/mm^2$)보다 훨씬 낮음을 알 수 있다.

용착금속의 확산성 수소 함량이 많아 입계하한 응력이 이와 같이 현저하게 감소된다는 것은 확산성 수소에 기인되는 수소 취화현상 때문에 용접 열영향부의 저온균열 발생에 민감하게 영향을 미친다는 것을 잘 알려 준다.

이는 implant 시험에 의해서 얻어진 결과²⁾와 잘 일치하고 있다.

4.2 균열 및 파단 형상

Photo. 5는 본 TRC 시험에 의해 얻어진 파단면 macro 사진을 나타내었다. 균열은 root로 부터 발생되어 용접금속 중으로 전달되는 형태와 root로 부터 발생되어 HAZ를 거쳐 weld metal로 이어지는 두 가지 형태로

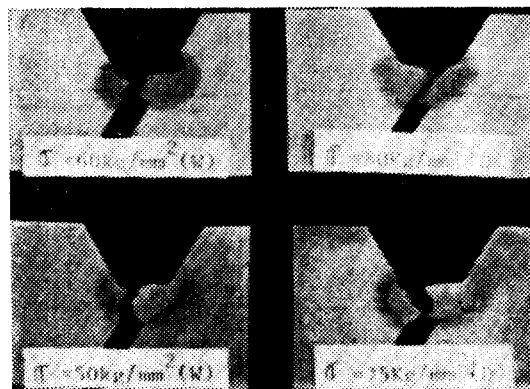


Photo. 5. Macro specimens of TRC testing

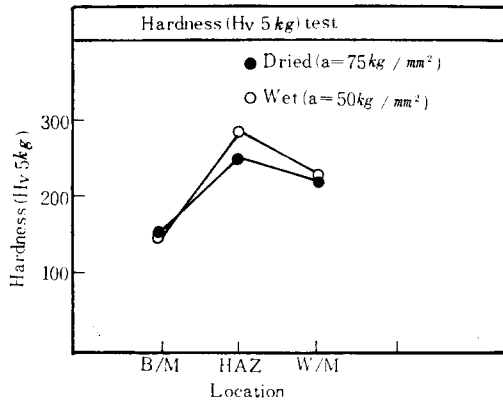


Fig. 4. Comparison of Hv (5Kg) hardness test results depending on applied stress and diffusible hydrogen contents.

구분되어 진다. 전자의 경우는 인장응력(σ)이 커서 stress intensity factor가 크게 되거나 용착금속 중의 확산성 수소 함량이 적어 수소 취화현상이 적을수록 그 양상이 뚜렷하게 나타났으며, 후자의 경우는 그와 반대로 인장응력이 적고, 용착금속 중의 확산성 수소 함량이 많을수록 그 양상이 뚜렷하게 나타났다.

또 용접부의 모재, HAZ 용착금속의 경도시험(Hv 5kg)을 실시한 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 HAZ부의 경도가 현저하게 높은 값을 나타냈으며, 용착금속 중 확산성 수소 함량이 높은 시편의 HAZ부 경도가 가장 높은 값을 나타내고 있는데, 이것은 HAZ가 수소에 의해 취화되었다는 것을 잘 나타내고 있다.

4.3 SEM에 의한 파면 관찰

Photo. 6, 7, 8, 9에 전형적인 TRC 시편의 파면 사진을

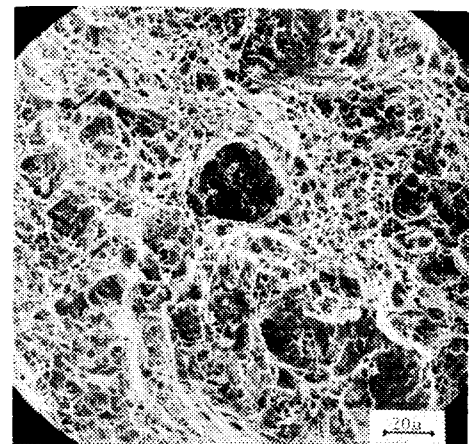
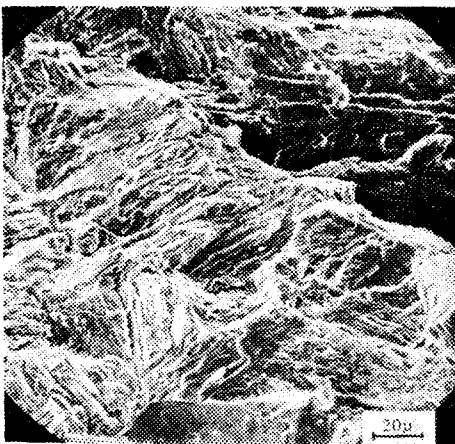
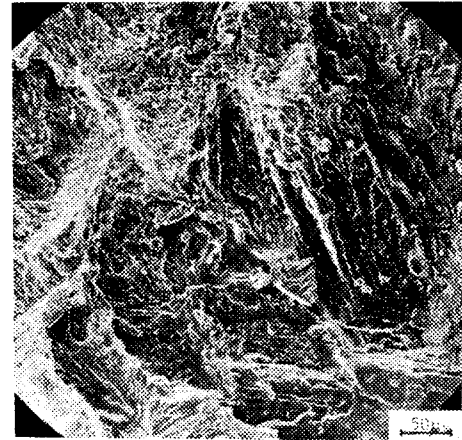


Photo. 6. Fractographs welded specimen by wet electrode at $\sigma=50\text{kg/mm}^2$

나타내었다.

Photo. 6에는 $\sigma=50kg/mm^2$, diffusible hydrogen content=11ml/100gr fracture time이 40min의 경우로 HAZ 부와 용착금속의 경계가 뚜렷하게 나타나 있으며 수소에 의해 취화되어 파단된 취성파괴(입계 및 벽개) 형태가 대부분이며 용착금속 중에서도 연성파괴(dimple fracture)가 대부분이지만 수소에 기인된 취성파괴 양상도 부분적으로 관찰되었다.

Photo. 7에는 $\sigma=55kg/mm^2$, diffusible hydrogen content=11ml/100gr fracture time이 41min의 경우로 위 Photo. 6의 경우와 유사하나 가하는 하중이 약간 증가되어 stress intensity factor의 입계파괴 형태가 Photo. 6보다 뚜렷하게 나타나고 있다.

Photo. 8의 경우 $\sigma=65kg/mm^2$, diffusible hydrogen content=4.3ml/100gr fracture time 65min으로 HAZ

부와 용착금속의 경계부는 명확하지 못하며 부분적으로 HAZ 부는 수소 취화의 영향을 받은 것으로 생각되는 준벽개 파괴 형태를 나타내고 있고, 용착금속은 전반적으로 연성 파괴 형태를 보이고 있다. Photo. 9의 경우 $\sigma=75kg/mm^2$, diffusible hydrogen content=4.3ml/100gr. fracture time이 31min으로 Photo. 6의 경우보다 다소 인장응력이 높다. 이 경우에도 HAZ부와 용착금속의 경계는 명확하게 나타나고 있지 않고 인장 하중이 높기 때문에 HAZ 부는 입계파괴와 부분적인 벽개 및 준벽개파괴 양상을 띠고 있으며, 용착금속은 전반적으로 연성파괴 형태를 보이고 있다.

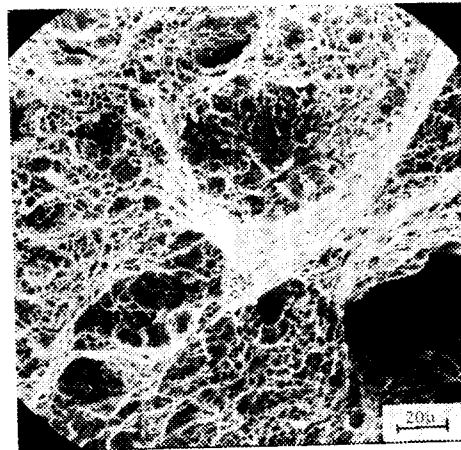
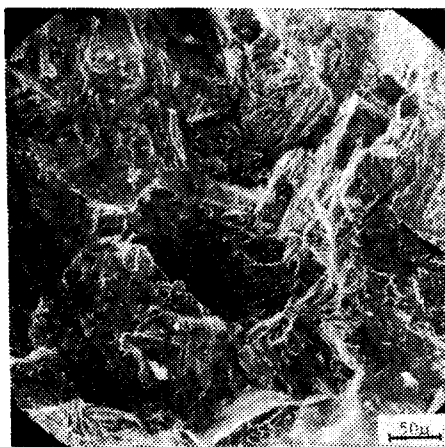
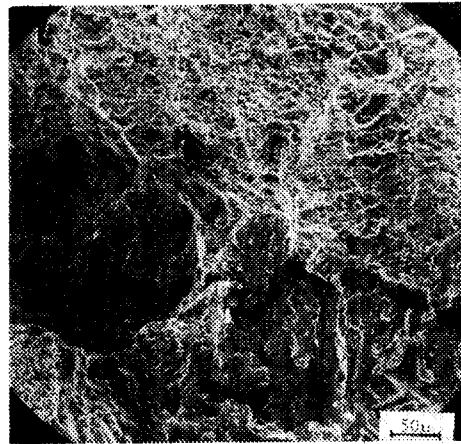
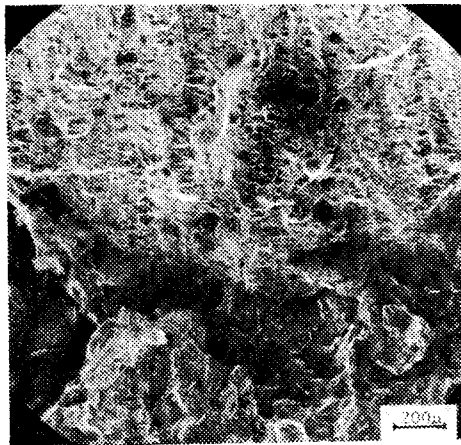


Photo. 7. Fractographs welded specimen by wet electrode $\sigma=55kg/mm^2$

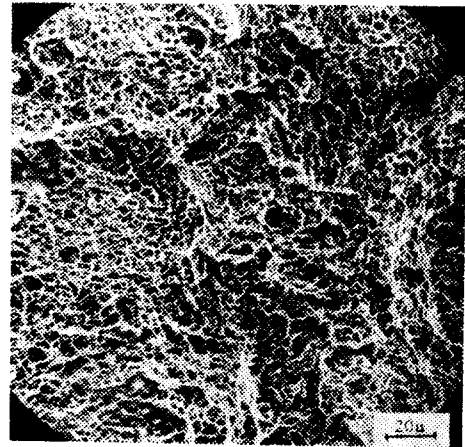
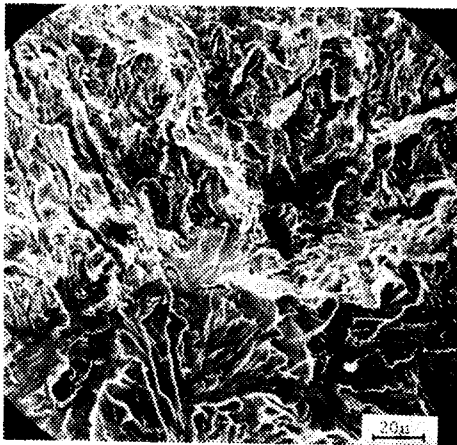
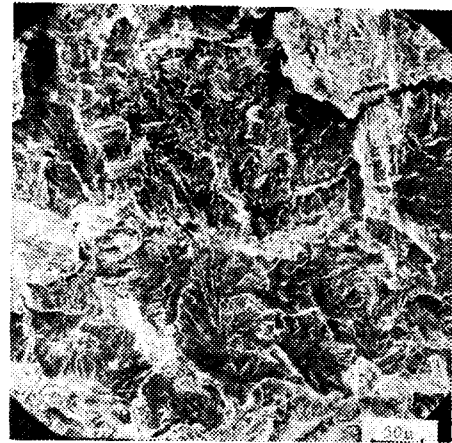
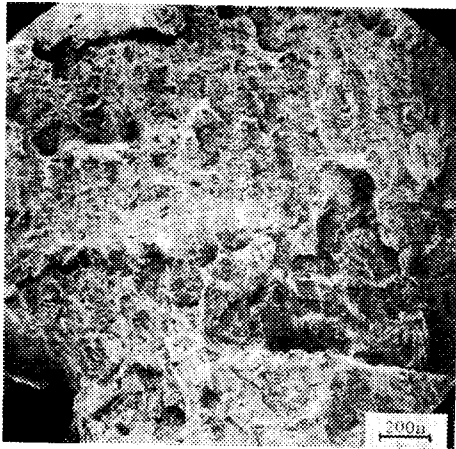
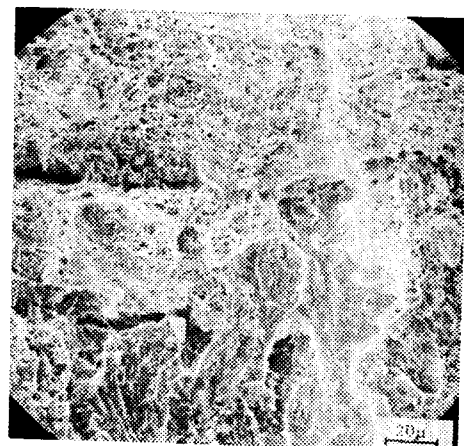
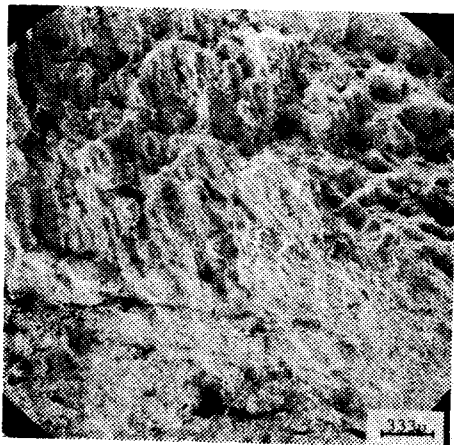


Photo. 8. Fractographs welded specimen by dried elecmode at $\sigma=65kg/mm^2$



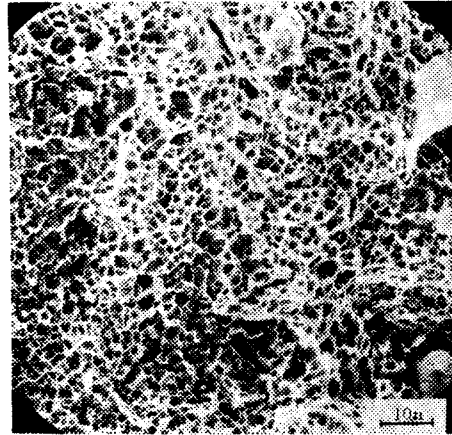
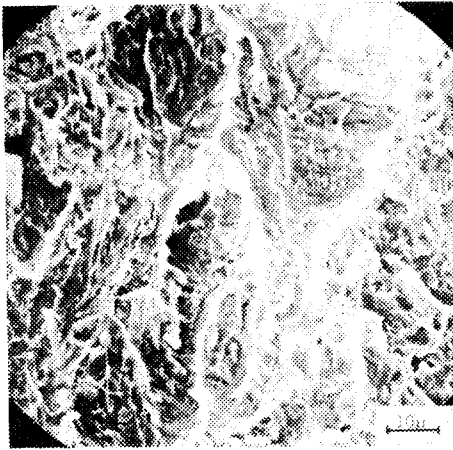


Photo. 9. Fractographs welded specimen by dried electrode at $\sigma=75kg/mm^2$

5. 결 론

인장구속 균열시험에 의한 ABS EH32 강의 수동 용접부 저온 균열 감수성 시험 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 확산성 수소 함량이 많은 수침봉의 경우가 건조봉의 경우보다 억제하한 용력이 낮았다.
2. 수침봉의 경우가 건조봉에 비해서 수소취화가 심해 열영향부의 경도가 높았다.
3. root 균열은 수침봉의 경우 열영향부에서 발생하여 어느정도 전과하다가 용착금속으로 전과되었으나 건조봉의 경우는 열영향부에서 발생 전과하는 경향이 감소하였다.
4. 수침봉의 경우 수소취화에 의한 열영향부의 파면은 취성파괴(입계 및 벽개) 양상으로 명확히 관찰되었으며, 용착금속 파면에서도 역시 부분적으로 관찰되었다.

참 고 문 헌

- 1) F. Matsuda, H. Nakagawa, K. Shinozake, *Trans, JWRI*, Vol. 8, No. 1, pp. 113~119
- 2) F. Matsuda, H. Nakagawa, T. Tsuji and M. Tsukamoto, *Trans, JWRI*, Vol. 7, No. 1, (1978), pp. 71~85
- 3) H. Suzuki, M. Inagaki, H. Nakamura, *J. Japan Weld, Soc*, Vol. 32, No. 1, pp. 44~55
- 4) C. A. Zapffe and G. A. Moore, *Metal Technology*, Vol. 10, (1943), Tech. Publ., No(1553)

- 5) C. A. Zapffe and M. E. Haslem, *Trans. Amer. Inst. Min Met. Eng*, Vol. 167, (1946), pp. 281~302
- 6) J. H. Andrew, H. Lee, H. K. Lloyd and N. Stephenson, *J. Iron and steel Inst*, Vol. 156, (1947), pp. 208~253
- 7) C. E. Sims, G. A. Moore and D. W. Williams, *Trans Amer. Inst. Min. Met. Eng*, Vol. 176, (1948), pp. 283~308
- 8) J. B. Seabrook, N. J. Grant and D. Carney, *Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng*, Vol. 188, (1950), pp. 1317~1321
- 9) N. J. Petch and P. Stables, *Delayed Fracture of Metals under static Load Nature*, Vol. 169, (1952), pp. 842~843
- 10) F. de Kazinczy, *J. Iron & steel Inst*, Vol. 177, (1954), pp. 85~92
- 11) P. Bastien and P. Azou, *Proceeding of 1st World Metallurgical Congress*. ASM, (1951) pp. 535~552
- 12) P. Bastien, *British W. J.* Vol. 7, (1950), pp. 546~557
- 13) I. G. Morlet, H. H. Johnson and A. h Troiano, *J. Iron & steel Inct.* Vol. 189, (1958), pp. 37~44
- 14) H. H. Johnson, J. G. Morlet and A. K. Troiano, *Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng*, Vol. 212, (1958), pp. 528~536
- 15) *ABS Approved Welding Electrodes Wire-Flux and Wire-Gas Combinations*, July. (1980), p. 151
- 16) 松田福久, 中川博二, 溶接部 破面カ フラウトグラフィ集, (1979), pp. 220~223
- 17) *Nippon Steel Corporation Mill Sheet*.