

研究論文

SMAW 수중 다층용접시 용접부 특성에 관한 연구

최기용*·이상율*·이보영**·이병훈***·이상용***·박성두****

A Study on the effect of the multi-pass SMAW welding on the characteristic of the underwater welding areas

G. Y. Choi*, S. Y. Lee*, B. Y. Lee**, B. H. Lee***, S. Y. Lee*** and S. D. Park****

Key Word : Underwater Wet Welding, Cold Cracks, Diffusible Hydrogen, Shielded Metal Arc Welding, Bead-on-Plate, 3-Pass welds

Abstract

While excellent joint quality has been obtained using dry chamber underwater welding methods,¹⁾ the size limitations imposed by this process restrict its use for underwater construction work. The wet underwater shielded metal-arc welding eliminates this restriction but suffers from poor weld properties by the 1-pass bead-on-plate welding due to the excessive diffusible hydrogen. On the other hand, in the wet underwater welding, it is well known that the quantity of diffusible hydrogen in multi-pass welded parts reduce to less than that in 1-pass welded parts. Therefore, in this paper, welding experiments are made the 3-pass bead-on-plate welds by using TMCP and normalized steel plates and E4301 and cellulose coated electrode. After that, The amounts of the hydrogen absorbed into the 3-pass welded area were measured according to the JIS Z 3118 specification. The microstructural changes as well as the microhardness distribution after the underwater 3-pass welding were also investigated using Vickers microhardness tester and S. E. M and O. M. The results indicated that the quantity of diffusible hydrogen in 3-pass welded areas was reduced little less than a half of one of that in 1-pass welded areas at the specific welding condition. As a result, the cold cracking of 3-pass welded areas decreased by reduced effect of diffusible hydrogen. In the underwater 3-pass welding, the micrography of cold cracking fracture surface showed mainly the cleavage of hydrogen embrittlement.

※ 1998년 1월 19일 접수

* 정희원, 한국항공대학교 재료공학과

** 정희원, 한국항공대학교 기계설계학과

*** 정희원, 한국기계연구원 용접기술연구부

**** 정희원, 천안공업전문대학

1. 서 론

습식 수증용접²⁾에서 수소의 주 제공원은 용접 아크(arc) 중의 수증기의 해리에 의한 것이지만, 수증용접부의 확산성 수소량은 사용되는 용접방법과 변수에 따라 많은 차이를 나타낸다. 특히 고장력강의 습식 수증용접시에는 소량의 확산성 수소량도 용접부 지연균열을 유발시킬 수 있는 원인이 된다. 또한 다량의 확산성 수소를 포함한 연강의 경우 수증용접부에 마르텐사이트(martensite) 같은 경화조직이 존재할 경우 수소취성화가 발생하게 된다^{3,4)}. 이러한 수소취성화의 모델로 Granjon, H⁵⁾가 arc의 이동에 대한 수소 분포의 함수를 도식적으로 나타냈다. 수소로 인한 취성의 발생은 강 조직에 따라서 그 감수성이 현저하게 다르고 변형속도에 의존하는데, 아주 높은 변형속도나 또는 아주 낮은 변형속도의 경우에는 확산성 수소로 인한 강의 취화현상이 나타나지 않는다. 이러한 수소취성은 강 중에서 수소의 분포상태 또는 그 내압의 여하에 따라서 좌우되지만 일반적으로 강을 150~300℃의 온도범위로 장시간 가열하면 수소는 어느 정도 방출되므로 연성은 회복된다. 따라서 습식 수증용접부의 치명적인 영향을 줄 수 있는 확산성 수소의 감소화 방안으로 다층의 습식 수증용접부를 형성하는 방법들이 시도된 바가 있다⁶⁾. 이러한 다층의 습식 수증용접부는 비드수가 증가함에 따른 재가열에 의한 템퍼링(tempering)의 효과를 받게 되므로 습식 수증용접부에 침투한 확산성 수소가 외부로 방출될 시간적 여유를 가지게 될 뿐만 아니라 비드의 증가에 따른 템퍼링효과에 의해 습식 수증용접부 냉간균열에 치명적인 영향을 주는 열영향부 경화조직인 마르텐사이트조직을 감소시키고 연성이 풍부한 펄라이트(pearlite), 페라이트(ferrite) 조직이 형성된다⁶⁻⁹⁾.

본 연구에서는 TMCP (Thermo-Mechanical Controlled Process) 처리한 SWS490강과 노말라이징(normalizing) 처리한 SWS490강에 대하여 다층용접에 의한 습식 수증용접부의 확산성 수소의 감소효과를 알아보고 확산성 수소가 수증용접부의 냉간균열에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 수증에서 다층의 수평하향식(bead-on-plate) 용접을 실시하여 습식 수증용접부의 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 용접구조용강판인 18mm두께의 TMCP강판과 12mm두께의 노말라이징강판을 100×35×18(or 12)mm로 절단하여 시험편을 연마한 후 뒷면에 3층(3-pass)의 수평하향식용접을 실시하였다. 용접봉은 일반 피복용접봉인 E4301 (φ 3.2, 4.0, 5.0mm)과 셀룰로오스 코팅(cellulose coating)된 Arcair사의 수증용접봉(φ 3.2, 4.8mm)을 사용하였고 용접기는 수하특성의 직류용접기를 사용하였으며 운봉속도는 20cm/min으로 일정하게 유지하였다. 그리고 확산성 수소측정 방법으로 JIS Z 3118 규정¹¹⁾에 따라 시행하였으며, 3층 습식 수증용접부의 미세조직과 확산성 수소에 의한 냉간균열의 여부를 조사하기 위해서 주사전자현미경(SEM)과 광학현미경(OM)을 사용하였다. 또한 습식 수증용접부의 미세경도분포를 마이크로 비커스(micro-vickers) 경도기를 사용하여 100gf의 하중으로 측정하였다.

본 연구에 사용된 모재와 용접봉의 조성 및 용접 조건은 앞서 발표된 논문에 나타내었다.¹¹⁾

3 결과 및 고찰

3.1 3층 습식 수증용접부의 경도분포 및 미세조직

단층(1-pass) 습식 수증용접부는 물에 의한 급냉효과로 인하여 대기중 용접부보다 훨씬 경화된다. 그러나 3층 습식 수증용접부는 패스(pass)수가 증가함에 따라 재가열의 열영향을 받기 때문에 이러한 재가열의 열영향을 받은 부분의 경도분포나 미세조직이 많은 차이를 보일 것으로 기대된다. Fig. 1에 3층 습식 수증용접부를 세분화하여 경도 측정 결과를 나타내었다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 E 4301을 사용하여 3층 습식 수증용접한 TMCP강 용접부의 각 부분별 경도 분포는 후속 패스(pass)에 의한 열처리 영향을 거의 받지 않은 용접열영향부인 1차 비드와 2차 비드의 양쪽 지단부(Fig. 1의 5지역)에서는 단층 용접열영향부의 경우와 같이 용접접합부위 근방에서 급냉경화조직인 마르텐사이트상이 다량 존재함에 따라 280~370Hv 정도의 높은 경도값을 나타내고 있다. 1차 비드의 수증용

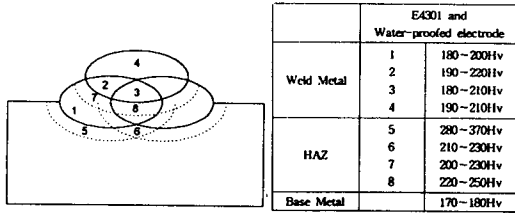


Fig. 1 Microhardness distribution in the 3-pass welded TMCP steel using E4301 electrode.

접부가 2차 비드의 수중용접부에 의해 재가열의 열영향을 받은 용접열영향부(Fig. 1의 6지역)는 후속 패스에 따른 템퍼링효과에 의해 마르텐사이트조직의 감소 및 연화에 따라 210~230Hv정도로 낮은 경도값이 측정되었다. 또한 1차 비드와 2차 비드의 용착금속부가 3차 비드에 의한 재가열의 열영향을 받은 3차 비드 열영향부(Fig. 1의 7지역)에서도 200~230Hv정도로 1차 비드와 2차 비드의 용착금속부(Fig. 1의 1지역)의 경도 180~200Hv과 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 1차 비드와 2차 비드의 재가열 되지 않은 용접열영향부(Fig. 1의 5지역)에 비해서 3차 비드 열영향부(Fig. 1의 7지역)는 높은 경도의 증가를 가져오지 않는 것으로 확인되었다. 또한 노말라이징강의 경우나 수중용접봉을 사용하여 3층 습식 수중용접을 수행한 후에도 Fig. 1과 유사한 경도 분포를 나타냈다. 따라서 습식 수중용접에 사용한 시험편의 종류나 용접봉의 종류는 3층 습식 수중용접부의 경도값에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 2은 TMCP강을 $\phi 5.0\text{mm}$ 의 E4301를 사용하여 3층 습식 수중용접시 각 비드의 용접열영향부 미세조직 사진이다. Fig. 2(a)는 후속 패스에 의한 열영향을 받지 않은 용융선(fusion line)부근의 1차 비드와 2차 비드 열영향부(Fig. 2의 ①지역)의 미세조직 사진으로 앞서 발표한¹¹⁾ 단층의 열영향부와 같은 조대한 경화조직으로 입내에는 다량의 침상 마르텐사이트와 베이나이트(bainite) 조직을 형성하고, 입계에는 소량의 side-plate 페라이트가 형성되어 있다. Fig. 2(b)는 1차 비드와 2차 비드의 용착금속부가 3차 비드용접에 의해 재가열의 영향을 받은 3차 비드 열영향부(Fig. 2의 ②지역)의 조직으로 단층 용접열영향부와 다르게 조직이 세립화되고 마르텐사이트조직이 감소하고 베이나이트와 페라이트조직이 많이 생성됨을 알 수 있다. 그리고, 1차 비드 수중용접부가 2차 비드와 3차 비드용접에 의해 계속

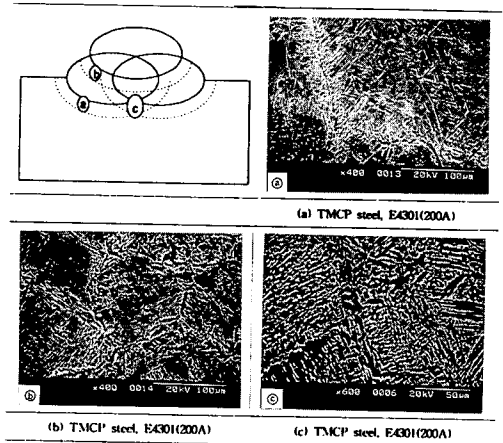


Fig. 2 Microstructure from various HAZ areas in the 3-pass welded TMCP steel using an E4301 electrode of $\phi 5.0\text{mm}$ (200A)

적인 열영향을 받는 중앙 부분(Fig. 2의 ③지역)의 미세조직 사진을 Fig. 2(c)에 나타내었다. 이 부위에서는 비드수가 증가함에 따라 후속 패스에 의해 재가열의 영향을 받게 되어 용융선 부근에서는 마르텐사이트조직은 크게 감소하고 베이나이트조직과 페라이트조직이 생성되었으며, 모재부근의 열영향부에서는 미세립 펄라이트와 페라이트가 넓게 분포되어 있었다. 노말라이징강판의 3층 습식 수중용접부의 미세조직은 TMCP강판의 미세조직과 유사하게 나타났다. 이와 같이 3층 습식 수중용접부의 각 패스들은 후속 패스의 영향으로 열처리 효과를 받아 용접부조직의 변화를 유발시키게 되어 조직의 개선의 효과를 얻을 수 있으며, Fig. 1에 나타난 결과에서와 같이 경도의 저하에도 커다란 효과를 나타내어 습식 수중용접부의 기계적 물성향상에도 기여할 것으로 사료된다.

3.2 용접부 냉간균열에 미치는 확산성 수소량

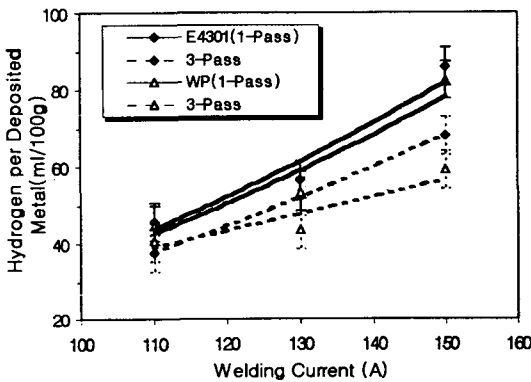
단층 습식 수중용접부는 용접부에 침투한 다량의 확산성 수소에 의해 수중용접부의 기계적 물성을 저하시키는 가장 큰 요인인 냉간균열이 많이 발생되고 있었다.¹¹⁾ 그러나, 3층 습식 수중용접부는 후속 패스를 통한 용접부의 재가열로 인하여 확산성 수소의 외부방출 시간을 부여할 뿐만 아니라 후열처리의 효과도 기대할 수 있기 때문에 미세조직

의 개선의 효과와 동시에 3층 수증용접부의 확산성 수소 감소효과를 가져올 것으로 기대된다. 아래에 3층 수증용접부의 각각의 용접변수에 따른 확산성 수소량의 측정결과를 고찰하였다.

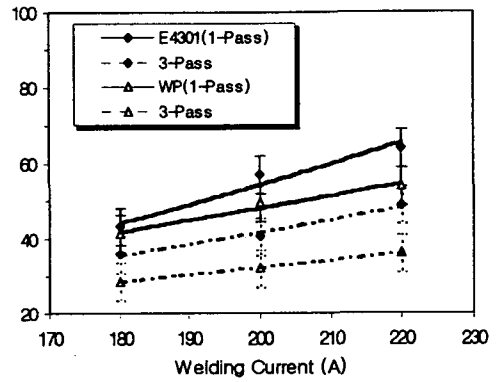
3.2.1. 용접부의 종류에 따른 확산성 수소량 비교

Fig. 3에 TMCP강과 노말라이징강을 E4301과 방수처리된 수증용접봉을 사용하여 단층과 3층 수증수평하향식 용접한 용접부의 용착금속 100g당의 확산성 수소량 측정결과를 나타내었다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 TMCP강에 대한 단층과 3층 용접시 확산성 수소측정 결과로서 용접봉 지름이 3.2mm인 E4301이나 방수처리된 수증용접봉을 사용했을 때 단층 수증용접부와 마찬가지로 용접전류

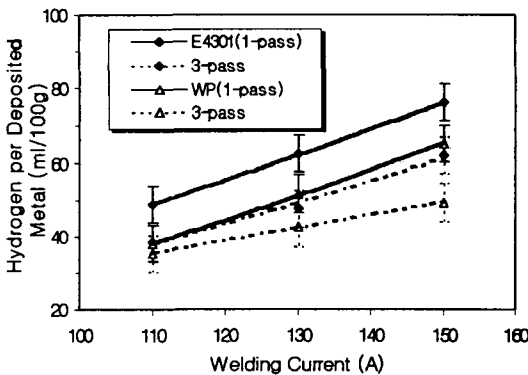
가 증가함에 따라 확산성 수소량은 거의 직선적으로 증가하고 있다. 초기 110A의 용접전류에서는 용착금속 100g당 35ml정도로 용접부의 종류에 관계없이 비슷한 수소량을 나타내다가 용접전류가 증가함에 따라 E4301과 방수처리된 수증용접봉으로 용접한 용접부에서 확산성 수소량의 차이가 증가하고 있다. Fig. 3(b)는 TMCP강에서 용접봉 지름을 증가시켰을 경우의 3층 수증용접부 확산성 수소 측정결과로 용접봉 지름이 3.2mm인 용접봉의 경우와 마찬가지로 E4301보다 방수처리된 수증용접봉을 사용한 용접부에서 확산성 수소량이 감소하고 있으며, 또한 각각의 용접봉 지름에서 적정전류를 사용하여 수증용접한 경우에는 용접봉 지름이 증가할수록 수증용접부에 함유된 확산성



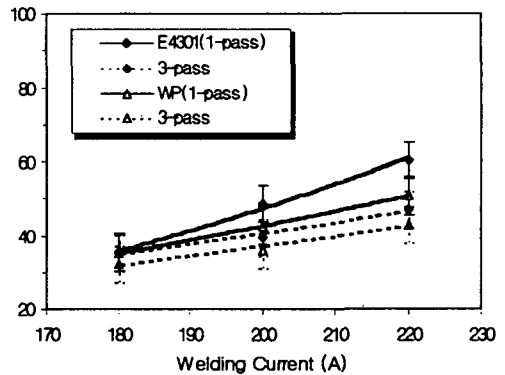
(a) TMCP steel using E4301 and water-proofed electrode of ϕ 3.2mm



(b) TMCP steel using E4301 of ϕ 5.0mm and water-proofed electrode of ϕ 4.8mm



(c) Normalized steel using E4301 and water-proofed electrode of ϕ 3.2mm



(d) Normalized steel using E4301 of ϕ 5.0mm and water-proofed electrode of ϕ 4.8mm.

Fig. 3 Diffusible hydrogen contents as a function of welding conditions.

수소량도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 수중용접부의 확산성 수소량의 감소는 용접봉 지름이 증가함에 따라 용접봉지름이 작은 용접봉에 비해 상대적으로 용입이 얕아져서 수소량의 감소화 효과가 나타난 것으로 사료된다. Fig. 3(c)와 (d)의 점선으로 표시된 부분이 노말라이징강의 3층 습식 수중용접부의 확산성 수소량 측정결과로서 TMCP강과 유사한 결과를 보여주고 있다. 따라서 3층 습식 수중용접부시에 용착금속부의 확산성 수소량은 강의 종류가 변함에 따라 큰 차이는 없는 것으로 사료된다.

3.2.2 비드수의 증가에 따른 확산성 수소량 비교

Fig. 3의 (a)와 같이 TMCP강을 용접봉지름이 3.2mm인 E4301과 방수처리된 수중용접봉을 사용하여 습식 수중용접을 수행했을 때 3층 수중용접부는 단층 수중용접부보다 단위 용착금속당 최대 20ml 이상의 확산성 수소량 감소효과가 나타났다. 또한 Fig. 3의 (b)와 같이 용접봉지름이 5.0mm인 E4301과 4.8mm인 방수처리된 수중 용접봉을 사용했을 경우에도 용접봉지름이 3.2mm인 용접봉을 사용한 경우와 마찬가지로 3-pass 수중용접부에서 확산성 수소량을 크게 감소시킬 수가 있었다. 또한 TMCP강을 220A의 용접전류를 사용하여 용접봉지름이 4.8mm인 방수처리된 수중용접봉으로 3층 수중용접을 시행했을 경우에는 용접봉지름이 5.0mm인 E4301을 사용하여 단층의 수중용접을 수행한 경우보다 확산성 수소량을 절반정도로 감소시킬 수가 있었다. 따라서 습식 수중용접에서는 다층용접을 수행함에 따라 수중용접부의 확산성 수소량은 감소시킬 수 있으며, 이것은 1차 비드 (bead) 용접 후 계속 2차 비드와 3차 비드로 비드수를 증가시키기에 따라 첫번째 비드는 후속 비드인 두번째 비드에 의해 재가열되고, 두번째 비드는 세번째 비드에 의해 다시 재가열됨으로 인해 습식 수중용접시 용접부에 다량으로 존재하던 원자 [proton (H⁺)]상태의 수소가 외부로 방출할 수 있는 시간적 여유를 부여할 수 있기 때문일 것으로 사료된다. 또한 각각의 용접봉에서 동일한 지름의 용접봉으로 적정전류 범위에서 3층 수중용접을 실시한 경우에 가장 낮은 적정전류에서 최소의 확산성 수소량을 얻을 수가 있었다. 그리고 노말라이징강의 3층 수중용접부에서도 Fig. 3(c)와 (d)에 나타난 바와 같이 유사한 결과를 얻을 수가 있었

다. 이러한 실험결과로부터 수중용접부의 확산성 수소량을 최소화시키기 위해서는 방수처리된 수중용접봉을 사용하여 가장 낮은 적정전류에서 다층의 수중용접을 시행하는 것이 가장 적절함을 알 수 있다.

3.3 다층(3-pass) 습식 수중용접부의 냉간균열

확산성 수소에 의한 습식 수중용접부에 발생하는 대표적인 냉간균열로서는 용착금속부에 생기는 미소균열 (microcrack)과 용접열영향부에서 발생하는 비드 밑 균열 (underbead cracks)이 있다. TMCP강이나 노말라이징강에 대하여 단층 저수심 습식 수중용접을 수행하였을 때 용착금속부의 비금속 재래물의 주변이나 결정입계의 열간 미소균열 등에 수소가 집적한 결과 발생하는 마이크로 크랙의 발생은 없었으나, 대부분의 용접조건에서 마르텐사이트조직이 다량으로 존재하는 용접 접합부 근방의 열영향부에서 확산성 수소에 의한 심각한 비드 밑 균열이 발생되고 있었다. 그러나, TMCP강이나 노말라이징강에 3층 수중용접을 시행할 경우 후속 패스에 의한 수중용접부가 재가열을 통한 후열처리의 효과로 인해 3층 수중용접부는 Table 1에서 보여주는 바와 같이 단층 수중용접부보다 냉간균열 발생률이 훨씬 낮았다¹³⁾. Table 1에 TMCP강을 3층 습식 수중용접한 용접부의 냉간균열의 발생유무를 나타내었다. 일반 용접봉인 E4301를 사용하여 3층 습식 수중용접한 용접부의 냉간균열은 용접봉지름이 3.2mm의 경우에는 110A와 130A의 용접전류에서 그리고, 용접봉지름이 4.0mm와 5.0mm의 경우에는 180A의 용접전류에서 냉간균열이 부분적으로 적게 발생했으나 나머지 용접조건에서는 심각한 냉간균열이 발생되고 있었다. 그러나, 방수처리된 수중용접봉으로 3층 습식 수중용접한 용접부의 냉간균열은 용접봉지름이 3.2mm의 경우에는 110A의 용접전류에서 용접봉지름이 4.8mm의 경우에는 180A의 용접전류에서 냉간균열이 발생되지 않았으며, 나머지 용접조건에서도 냉간균열의 발생이 부분적으로 적게 발생되었다. 따라서, 일반 용접봉인 E4301보다 방수처리된 수중용접봉을 사용하여 3층 습식 수중용접을 수행할 경우에 더 큰 확산성 수소량 감소효과에 의해 냉간균열도 감소하였다. 이러한 실험 결과에

Table. 1 Summary of the cold cracking behavior in the 3-pass welded TMCP steel.

[E4301]

A class of electrode	Welding current (A)	Underbead crack	Microcrack	
		3-pass welding	3-pass welding	
E4301	3.2	110	△	×
		130	△	×
		150	○	×
	4.0	180	△	×
		200	○	×
		220	○	×
5.0	180	△	×	
	200	○	×	
	220	○	×	

[Cellulose coated electrode]

A class of electrode	Welding current (A)	Underbead crack	Microcrack	
		3-pass welding	3-pass welding	
(WP) water proofed electrode	3.2	110	×	×
		130	△	×
		150	△	×
4.8	180	×	×	
	200	△	×	
	220	△	×	

따라 수중용접에서 냉간균열의 영향을 최소한으로 줄이기 위해서는 방수처리된 수중용접봉을 사용하여 각각의 용접봉지름의 적정전류 범위에서 가장 낮은 적정전류를 사용하여 다층의 수중용접을 실시할 경우에 확산성 수소에 의한 냉간균열을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 양호한 비드외관도 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 4에서는 TMCP강과 노말라이징강의 3층 수중용접부의 냉간균열(cold cracks)의 발생위치와 특성을 고찰하였다. Fig. 4(a)는 3층 습식 수중용접부에서 비드 밑 균열이 발생하는 부분을 도식적으로 나타낸 것으로 2차 비드와 3차 비드에 의해 열영향을 받지 않은 1차 비드 용접열영향부와 3차 비드에 의해 열영향을 받지 않은 2차 비드 열영향부의 양쪽 지단부에서 비드 밑 균열이 많이 관찰되고 있다. Fig. 4(b)와 (c)는 TMCP강과 노말라이징강의 1차 비드와 2차 비드의 양쪽 지단부에서 발

생된 비드 밑 균열을 나타내었다. Fig. 4(b)는 TMCP강을 ϕ 5.0mm의 E4301로 200A의 용접전류를 사용하여 3층 습식 수중용접한 용접부에 발생한 비드 밑 균열으로 용융선(fusion line) 부근에서 조대해진 조직내부의 침상 마르텐사이트조직이 많은 열영향부에서 관찰되었다. Fig. 4(c)는 노말라이징강을 ϕ 4.8mm의 방수처리된 수중용접봉으로 200A의 용접전류로 3층 습식 수중용접부를 형성했을 때 비드 밑 균열사진으로 TMCP강과 차이가 없었다. 이처럼 TMCP강이나 노말라이징강에서 확산성 수소에 의해 비드 밑 균열이 발생된 부분의 미세조직을 살펴보면 냉간균열에 치명적인 영향을 주는 침상 마르텐사이트조직이 잘 발달되어 있는데, 이것은 1차 비드와 2차 비드의 지단의 열영향부는 후속 비드에 의한 재가열되지 않았음을 반증한다. 또한 3층 수중용접부에서 비드 밑 균열이 발생되지 않은 부분의 미세조직은 Fig. 2(b)나 (c)와 같이 마르텐사이트조직이 발달되어 있지 않았다. 이러한 결과로 볼 때 확산성 수소가 유발시키는 비드 밑 균열은 침상 마르텐사이트조직이 다량으로 존재하는 지역에서 발생됨을 확인할 수 있었고, 모재의 종류에 따른 3층 용접부의 냉간균열의 발생위치는 차이를 보이고 있지 않았다. 따라서 다층(multi-pass) 습식 수중용접부의 적정전류 범위에서 확산성 수소에 의한 냉간균열의 발생을 최대한 방지하기 위해서는 후속 비드에 의한 열영향을 받지 않는 부분을 최소화 시켜야 될 것으로 사료된다.

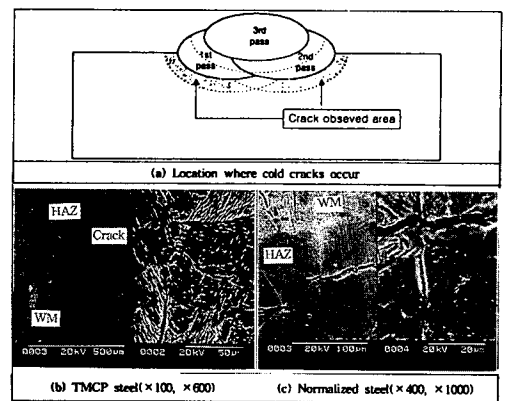


Fig. 4 Typical underbead cracks in the heat-affected zone in the 3-pass underwater welded steel.

3.4 3층 습식 수중용접부 파괴단면

3층 습식 수중용접부의 1차 비드와 2차 비드의 지단 열영향부에서 냉간균열이 발생되고 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 3층 수중용접부의 비드 밑 균열이 발생한 균열 표면의 파괴단면을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 노말라이징강을 용접봉지름이 3.2mm인 E4301로 150A의 용접전류를 사용하여 3층 습식 수중용접한 용접부의 확산성 수소에 의한 비드 밑 균열이 발생한 1차 비드와 2차 비드의 지단부에 충격을 가하여 파괴시켰을 때 수소유기 균열이 발생한 부분의 파면으로 이처럼 3층 수중용접부의 비드 밑 균열이 발생한 부분은 수중용접부에 침투한 확산성 수소에 의해 취성파괴를 나타내고 있다. Fig. 5(b)는 동일한 시험편에서 수소유기 균열이 발생되지 않은 1차 비드와 2차 비드의 3층 수중용접 지단부의 파면을 보여 주고 있으며, 이러한 부분의 파면은 연강의 파괴 형태인 연성파괴를 일으키고 있다.

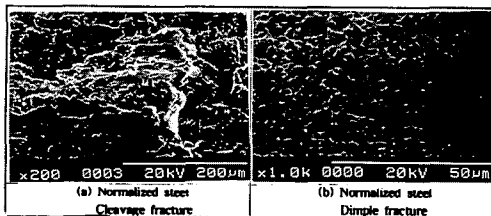


Fig. 5 Typical fractography observed in the 3-pass underwater welded normalized steel using E 4301 electrode of 3.2mm (150A)

4. 결 론

TMCP강과 노말라이징강판을 E4301과 방수처리된 수중용접봉을 사용하여 3층 습식 수중 SMAW용접을 시행했을 때 3층 수중용접부의 미세조직 변화와 경도분포, 확산성 수소량과 냉간균열의 상호관계를 조사한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 3층 수중용접부의 각 층들은 후속 패스의 영향으로 열처리의 효과를 받아 금속조직의 변화를 유발시켜 조직의 개선의 효과를 얻게되고 경도의 저하에도 커다란 효과를 나타내었다.

(2) 일정 용접전류 범위에서 수소 측정된 결과 E4301보다 방수처리된 수중용접봉이 더 확산성 수

소량을 감소시킬 수 있지만 다층용접 (multi-pass)에 의한 확산성 수소량 감소 효과가 훨씬 크게 나타났다. 각각의 용접봉의 적정전류 범위에서 수중용접을 시행할 경우 가장 낮은 적정전류범위에서 다층 수중용접을 시행할 경우에 확산성 수소량을 최소로 감소시킬 수 있고 비드 밑 균열의 방지에도 효과적이었다.

(3) 습식 수중용접에서 냉간균열의 영향을 최소한으로 줄이기 위해서는 방수처리된 수중용접봉을 사용하여 가장 낮은 적정전류범위에서 다층 수중용접을 실시할 경우에 확산성 수소에 의한 냉간균열을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 양호한 비드의 관도 얻을 수 있을 것이다.

(4) TMCP강과 노말라이징강을 3층 수중용접한 용접부의 냉간균열 발생률은 TMCP강에서 낮게 나타났으며, 이것은 TMCP강이 노말라이징강보다 모재의 탄소량이 0.04% 정도 낮기 때문일 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 BMP기술개발 과제 중 위탁과제로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Mishler, H. W., and Randall, M. D., Underwater Joining and Cutting—Present and Future, Proc. of 2nd Annual off-shore Technology Conference, V. II, (1970), P. II-235-II-242
- Cotton, H. C., Welding Underwater and in The Splash Zone A Review Prov. of Int. Conf. IIW, 4-48, (1983)
- Hideo, Y., and Yasuji, M., Implant Welding Testing for High Strength Steel, Study on Wet Underwater Welding, Vol. 3, (1985)
- Hideo, Y., and Yasuji, M., Feasibility of Covered Electrode, Study on Wet Underwater Welding, Vol. 1, (1983)
- Granjon, H., Cold cracking in welding of steels, Japan Welding Society, Tokyo, IB. 1. 1, (1971)

6. Atsushi, H., and Yasuo, S., On Underwater Gravity Arc Welding, Vol. 43, (1974)
7. Hideo, Y., and Yasuji, M., Impact Values and Fatigue Strength of Weld Metals of High Strength steel, Study on Wet Underwater Welding, Vol. 2, (1984)
8. Yasuo, S., The Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties of Underwater Wet Welds, Vol. 5, (1987)
9. Silva, E. A., and Hazlett, T. H., Shielded Metal-Arc Welding Underwater with Iron Power Electrodes, Welding Journal, June, (1971)
10. JIS Z 3118., Method of Measurement for Hydrogen Evolved from Steel Welds, Vol. 1, (1992)
11. Choi, G. Y., and Lee, S. Y., The Underwater Wet Welding Characteristics of the SWS490 Steel 용접학회 투고증, (1997)