

## 3Ni-Cr-Mo계 고인성 고장력강의 부식피로 균열전파거동 연구

류 호 림·김 규 영

포항공과대학 재료금속공학과

### Corrosion Fatigue Crack Propagation Study on a High Toughness and High Strength 3Ni-Cr-Mo Steel

H. L. RYU and K. Y. KIM

*Department of Materials Science and Engineering*

*Pohang Institute of Science & Technology*

Corrosion fatigue crack propagation study was performed on a high toughness and high strength 3Ni-Cr-Mo Steel(or DS-100 Steel) which has been developed for the deep sea structural materials. Since multipass welding is generally applied for DS-100 steel, corrosion properties on weldment are the key factors to determine design limit. In this study, the crack propagation behavior was investigated in terms of welding process, heat input rate, and electrode potential. Corrosion fatigue crack propagation rates of DS-100 steel base and weld metals were faster when tested at-1100 mV than at any other potentials. These results clearly demonstrate that DS-100 steel is sensitive to the hydrogen embrittlement. Compressive residual stress (CRS) developed during multipass welding played an important role to determine the fatigue crack propagation rate(FCPR) in the stress intensity range of low to medium. The greater the CRS, the slower the FCPR. In the range of high stress intensity factor, however, the effect of metallographic parameters on FCPR became dominant over the effect of both CRS and hydrogen.

#### 1. 서 론

3Ni-Cr-Mo계 고인성 고장력강(DS-100강)은 심해 해양구조물 재료로 사용되기 때문에 구조물 건조시 용접공정이 필수적으로 요구된다. DS-100 강은 해수분위기에 장기간 노출되게 되어 응력부식 및 부식피로 특성에 용접공정이 직접적으로 영향을 주게 된다. 특히 용접부의 경우 용접공정 및 입열량과

같은 용접변수에 따라 재료의 기계적 성질과 미세구조 및 잔류응력량 등이 달라지게 되므로, 본 연구에서는 용접공정과 입열량에 따른 DS-100 강의 부식피로 균열전파 거동을 잔류응력관점에서 조사해 보았다. 마르텐사이트 구조를 갖는 고장력강은 저장력강에 비하여 수소취성에 매우 민감하기 때문에<sup>1)</sup> 시편에 수소발생반응이 지배적인 전극전위를 갖어주어 수소취성에 대한 민감성을 함께 조사하였다.

DS-100 강 용접부의 응력부식 실험결과에 의하면 열영향부보다는 용접부가 응력부식에 취약한 것으로 밝혀졌기 때문에<sup>2)</sup> 본 연구에서는 열영향부에 대한 실험은 수행하지 않고 용접부 자체에 대한 부식피로 균열전파거동을 관찰하였다.

수소취성에 민감한 고장력강의 경우 템퍼드 마르텐사이트와 베이나이트로 이루어진 조직이 펄라이트와 페라이트로 이루어진 조직보다 수소취성에 대한 저항성이 좋으며,<sup>3)</sup> 잔류 오스테나이트가 있는 경우 잔류오스테나이트가 소소의 트랩으로 작용하여 피로응력을 받아 변형이 일어나는 영역으로의 수소 확산을 억제할 수 있으므로 수소취성을 줄일 수 있다.<sup>4)</sup> 수소취성효과는 미세구조외에도 개재물에 의해서도 많은 영향을 받는다. DS-100 강의 경우 카바이드가 많이 석출하며 MnS와 같은 개재물이 상당량 존재하므로 개재물과 수소와의 상호작용이 수소취성 효과에 매우 중요한 인자가 된다. 다층 용접부의 경우 미세구조 및 개재물 농도의 변화 외에도

잔류응력이 존재하므로 잔류응력 효과도 무시할 수 없는 인자가 된다. DS-100 강과 동일 강종인 HY-100 강의 경우 용접부에 존재하는 압축잔류응력이 수소취성 효과를 압도하는 것으로 알려져 있다.<sup>5)</sup>

## 2. 실험방법

본 연구에서 사용한 시편의 조성, 용접방법 및 기계적 성질은 Table 1, 2, 및 3에 각각 주어졌으며, 시편의 채취방법과 모양은 각각 Fig. 1과 2와 같다. DS-100 강의 수소취성에 대한 민감성을 조사하기 위하여 모재부와 용접부에 대하여 공기중과 인공해수 중에서 균열전파 실험을 수행하였다. 용접부는 용접방법 및 입열량의 영향을 알아보기 위하여 SMAW(Shielded Metal-Arc Welding)와 GMAW(Gas Metal-Arc Welding)의 두가지 방법을 사용하였으며, 입열량은 17 kJ/cm과 30kJ/cm 두 조건을 채택하였다. 용접방법(SMAW, GMAW)에

Table 1. Composition of DS-100 Steel Base Metal, Weld Metal and Weld Zone.

Alloy Element	Base Metal	SMAW		GMAW	
		Weld Zone	Mil-1280M	Weld Zone	Mil-120S-1
C	0.17	0.079	<0.10	0.093	<0.10
Mn	0.25	1.650	0.80/0.85	1.446	0.40/1.80
Si	0.22	0.335	<0.65	0.305	0.25/0.60
P	0.016	0.015	<0.03	0.013	<0.01
S	0.005	0.015	max. 0.012	0.006	0.010
Ni	3.0	2.484	1.5/4.0	2.551	0.62/2.80
Cr	1.5	0.900	<0.65	0.548	0.30
Mo	0.39	0.457	<0.90	0.500	0.30/0.65
V	0.02	0.013	<0.09	0.003	—
Cu	—	0.015	—	0.033	—
Ti	—	0.008	—	0.010	—
N	0.0025	—	—	—	—
Sol. Al	0.045	—	—	—	—

Table 2. Welding Conditions of DS-100 Steel Weldments

Process	Electrode	Voltage V	Current A	Speed cm/min	Heat Input Rate KJ/cm
SMAW	Mil-1208M	26	170	15	17
GMAW	Mil-120S-1	30	325	34	17 & 30

Table 3. Mechanical Properties of Deposited Weld Metal, Mil-Spec and Base Metal.

Sample	Y.S MPa (Ksi)	T.S MPa (ksi)	Elongation %	CVN J
Base Metal	716 (104)	814 (118)	20	237(-40°C) 246(-18°C)
MIL-12018M	700-828 (102-120)	-	18	42(-51°C) 82(-18°C)
SMAW (17KJ/cm)	836 (121)	948 (137)	22	41(-51°C) 53(-18°C)
MIL-120S-1	700-783 (102-114)	-	14	48(-51°C) 82(-18°C)
GMAW (17KJ/cm)	629 (94)	794 (115)	23	18(-51°C) 109(-18°C)

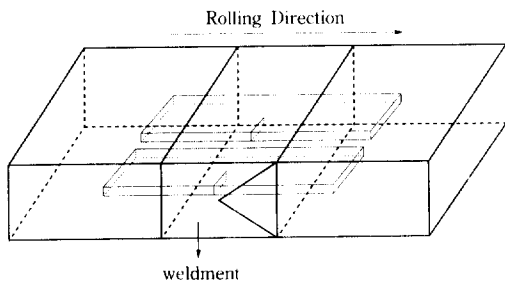


Fig. 1. DS-100 Steel Weld Metal Specimen Preparation Method for Crack Propagation Test.

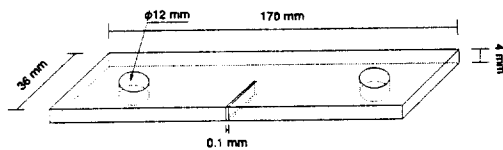


Fig. 2. SEN(Single Edge Notch) Specimen used for Crack Propagation Test.

따른 부식피로 균열전파 거동은 입열량 17 kJ/cm에서, 입열량의 영향은 GMAW의 같은 용접방법을 사용했을 때 17 kJ/cm에서 30KJ/cm로 증가시킴에 따른 균열전파 거동을 잔류응력 측면에서 조사하였다.

본 연구에서 모재부와 용접부의 부식피로 균열전파 속도를 측정하기에 앞서 각 시편의 음분극 거

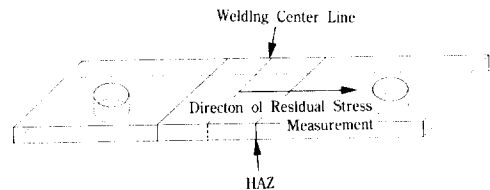


Fig. 3. Schematic of Positions tested for Residual Stress.

동을 조사하였으며, 용접방법과 입열량에 따른 잔류응력량을 Fig. 3과 같이 용접중심부에서 HAZ (Heat Affected Zone) 방향으로 3 mm 간격으로 X-선을 이용하여 측정하였다. 균열전파 실험은 Instron Model 8500을 이용하여 Tension to Tension 응력을 시편에 가해주었으며, 인공해중에서 시편에 원하는 전극전위를 Fig. 4와 같이 정전위계(Potentiostat)를 이용하여 걸어주었다. 본 실험에서 사용한 기준전극은 포화칼로멜전극(Saturated Calomel Electrode : SCE)이며, 응력비는 0.1, 공기중에서 10Hz로 인공해수에서는 충분한 전극반응시간을 주어 1Hz의 주파수로 실험을 하였으며, 이동식 현미경을 이용하여 균열길이를 측정하였다. 투과전자현미경을 이용하여 모재부와 용접부의 미세조직을 관찰하였으며, 주사전자현미경을 이용하여 피로실험에 의해 파괴된 파면을 관찰하였다. 인공해수중에서 실험한 파면의 경우는 산세처리하여 파면에

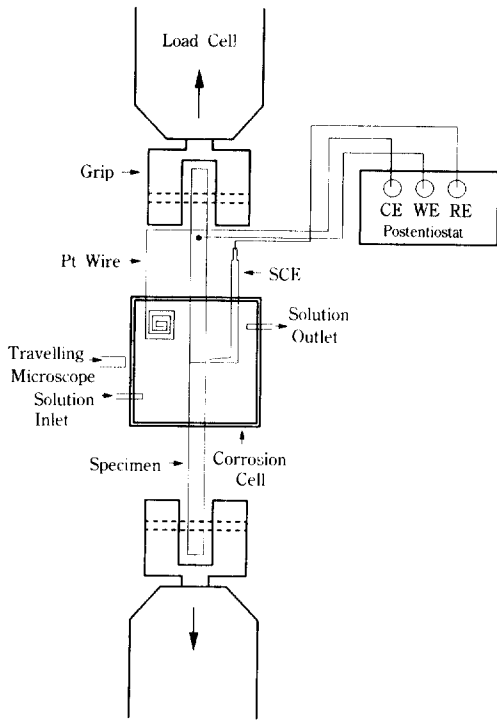


Fig. 4. Schematic of a Corrosion Fatigue Cell Arrangement with an Electrochemical Potential Control System.

생긴 산화물을 제거한 다음 Gold Coating을 하여 주사전자현미경으로 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

부식피로실험시, 전기화학전위가 부식피로 균열거동에 미치는 영향은 본 연구의 중요한 목적중의 하나이다. Fig. 5는 본 실험에서 사용한 DS-100 강 모재부와 입열량이 17 kJ/cm인 용접부의(SMAW 및 GMAW) 음분극거동을 보여주고 있다. 모재부와 용접부에 관계없이 전극전위 약 -1000 mV를 기준으로, 이 이상의 전위에서는 산소 환원반응이 지배적으로 일어나고, 그 이하의 전위영역에서는 수소발생반응이 지배적으로 일어남을 알 수 있다. 본 연구에서는 이들 자료를 기준으로 하여 수소가 부식피로 균열전파에 미치는 영향을 보기위하여 수소발

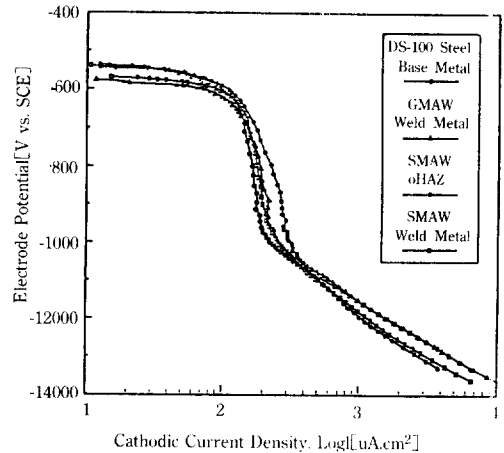


Fig. 5. Cathodic Polarization Behaviors of Various Electrodes in Synthetic Seawater with Air Bubbled Through.

생전위 영역내에 있는 -1100 mV의 음극전위를 사용했으며, 자연부식전위(모재 및 SMAW)와 최적 음극방식전위 영역내에 있는 -750 mV(모재부)의 음극방식전위를 채택하여 -1100 mV 경우와 비교실험 하였다.

공기중과 인공해수중에서 DS-100 강의 균열전파거동을 관찰하였으며, Fig. 6은 모재부에 관한 결과이며 Fig. 7은 입열량이 17 kJ/cm인 SMAW 용접부에 관한 결과이다. 수소발생반응이 지배적인 -1100 mV에서 균열전파속도가 가장 빨랐으며, 그 다음이 자연부식전위였고, 공기중에서 가장 느리게 전파하였다. 위의 실험 결과는 수소가 있으면 균열전파속도가 가속화된다는 여러 연구자들의 실험 결과와도 잘 일치하는 것이다.<sup>6,7)</sup> 모재부의 경우, 인공해수중에서 음분극 전위영역인 -750 mV에서의 균열전파속도가 자연부식전위나 수소발생 영역인 -1100 mV에서보다 느리게 전파하는 것으로 관찰되었다. Fig. 5에 도시된 DS-100 강의 음분극곡선이 보여주는 바와 같이 -750 mV에서는 산소의 환원반응이 지배적으로 일어나기 때문에 시편의 표면에서는 수소발생이 거의 없을 것으로 판단된다. 그러나 자연부식전위 조건에서는 음극반응이 일어나는 장소에서 국부적으로 수소가 발생하므로 수소취성을

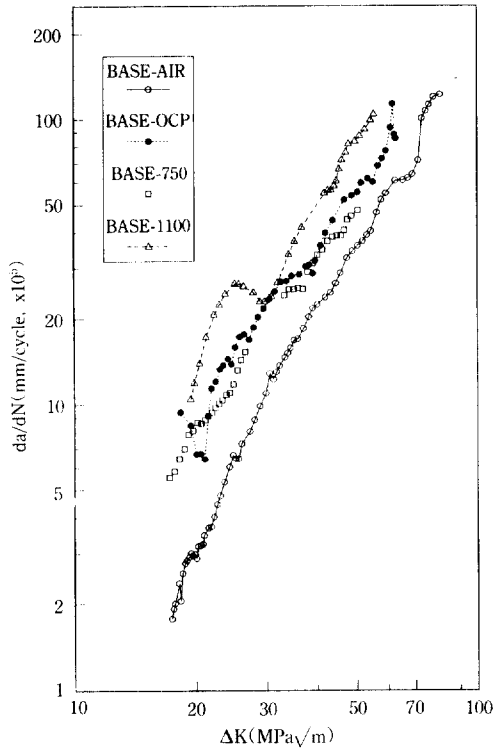


Fig. 6. Effect of the Electrode Potential on FCPR of DS-100 Steel Base Metal.

일으킬 가능성이 있으며, DS-100 강 of 응력부식 실험시 자연부식전위에서 수소취성의 영향이 관찰된 바 있다.<sup>2)</sup> 따라서 -750 mV는 최적 음극방식 전위 영역내에 있다고 할 수 있다.

Fig. 8과 9는 비교적 낮은 응력확대계수 영역내에서 공기중과 인공해수중 -1100 mV에서 실험한 시편의 파면 관찰결과이다. 공기중에서는 Fig. 8과 같이 모재부와 SMAW 용접부 모두 연성파면을 보여주고 있으므로 모재부 보다는 SMAW 용접부가 불균질함을 알 수 있다. 인공해수중 수소발생전위 영역인 -1100 mV에서는 Fig. 9에서 처럼 Quasi-Cleavage 형태의 취성파면이 관찰되는 것으로 보아 균열전파가 공기중보다 각각 다르게 일어나고 있음을 보여주는 것으로써, 공기중에서는 주로 균열둔화 및 재예리화(Crack Blunting and Resharping)의 반복에 의하여 균열이 전파하고, 인공해수중 -1100

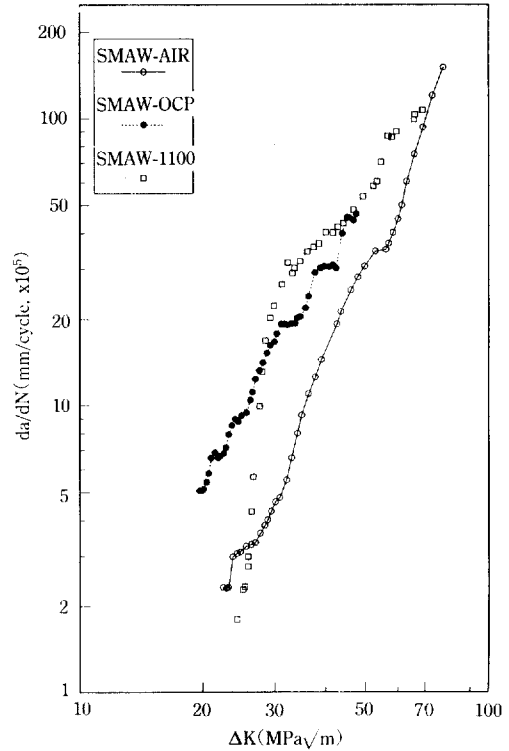
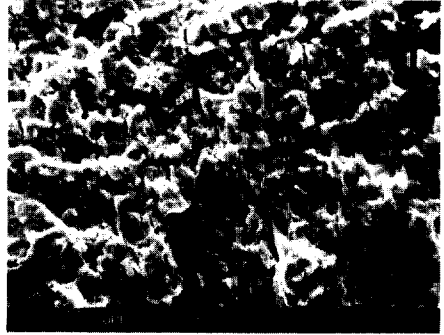


Fig. 7. Effect of the Electrode Potential on FCPR of DS-100 Steel SMAW Welded Metal

mV에서는 수소취성에 의해 균열이 전파하기 때문에 나타나는 현상이라 할 수 있다. 특히 Fig. 6과 7에서 보듯이, 응력확대계수가 증가함에 따라 여러 부식분위기에서의 균열전파속도가 비슷해지는 것은 기계적인 영향이 환경적인 영향을 압도하기 때문이다. Fig.10은 높은 응력확대계수 영역에서 인공해수중 -1100 mV에서 실험한 시편의 파면관찰 결과로서, 특징적인 것은 높은 응력확대계수 영역에서 화살표로 표시되어 있는 부분과 같은 이차균열(Secondary Crack)이 매우 많이 존재하는 것이다. 공기중에서 실험한 시편에서도 이차균열은 높은 응력확대계수 영역에서 조금씩 관찰되나 이차균열의 분포 및 크기가 -1100 mV에서 실험한 시편에서 관찰된 것에 비하여 아주 미미하였다. Morris<sup>8)</sup> 등은 고장력강에서 이차균열이 균열전파 속도를 가속화 한다고 주장하고 있으나, 본 연구에서는 Rungta<sup>9)</sup> 등이



(a)

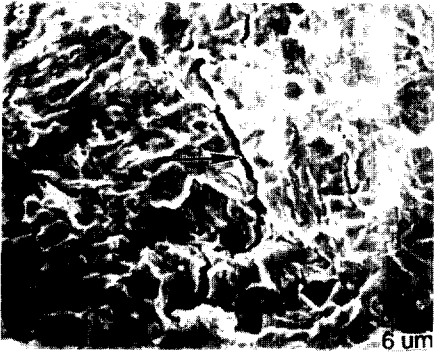


(b)

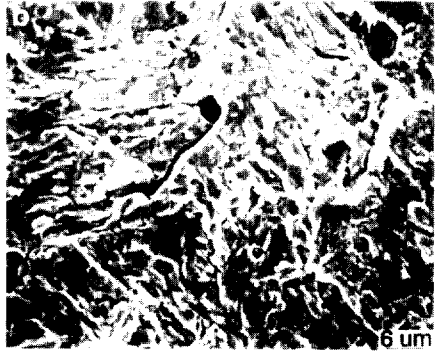
Fig. 8. SEM Fractography observed in Air

(a) Base Metal at low  $\Delta K$  Level

(b) SMAW Weld Metal at low  $\Delta K$  Level



(a)

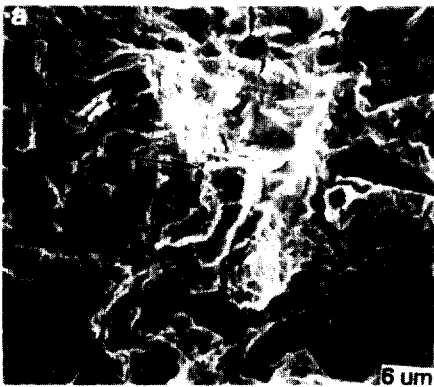


(b)

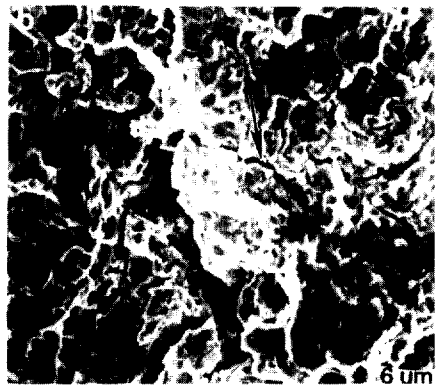
Fig. 9. SEM Fractography observed in Synthetic Seawater at -1100 mV

(a) Base Metal at low  $\Delta K$  Level

(b) SMAW Weld Metal at low  $\Delta K$  Level



(a)



(b)

Fig. 10. SEM Fractography observed in Synthetic Seawater at -1100 mV

(a) Base Metal at High  $\Delta K$  Level

(b) SMAW Weld Metal at High  $\Delta K$  Level

주장하고 있는 것 처럼 이차균열이 인공해수중에서의 균열전파속도를 지연시키고 있음이 Fig. 6과 7의 균열전파 곡선이 파상(Wave Shape)을 이루고 있는 것으로 확인할 수 있다.

해양구조물 건조시 DS-100 강은 후판으로 사용되며 다층용접을 하게되므로 용접공정변수에 의하여 부식피로 균열전파속도도 직접적인 영향을 받게 된다. Fig. 11과 12는 용접방법과 입열량이 균열전파 속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공기중과 인공해수중 -1100 mV에서의 균열전파속도를 관찰한 결과로서 모재부에 관한 결과와 함께 도시한 그림이다. 낮은 확대계수 영역에서는 공기중과 인공해수중에서 공히 SMAW 및 GMAW 용접부가 모재부보다 현저히 느리게 전파하다가 응력확대계수가 증가함에 따라 모재부와 용접부의 균열전파속도 차이는 점점 줄어들는다. 주목 할 것은 입열량이 17

kJ/cm인 GMAW 용접부는 특정 응력확대계수 영역 (공기중에서는 50MPa√m, 인공해수중에서는 30 MPa√m) 이상이 되면 균열전파 속도가 가장 빠르게 나타나고 있다. 일반적으로 항복강도가 크면 균열전파속도가 증가한다고 알려져 있다.<sup>10)</sup> 항복강도는 Table 3에서 보았듯이 SMAW 용접부가 모재나 GMAW 용접부보다 100MPa정도 크게 나타나므로 모재부와 용접부의 균열전파 거동을 항복강도 관점만으로는 설명할 수 없다. 후판구조물은 용접후 일반적으로 열처리를 하여 용접시 나타나는 잔류응력을 제거하지만 완전히 제거되지 않기 때문에 잔류응력이 부식피로 균열전파속도에 영향을 미치게 된다. 그러므로 다층용접시 잔류응력이 균열전파 속도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 본 연구에서

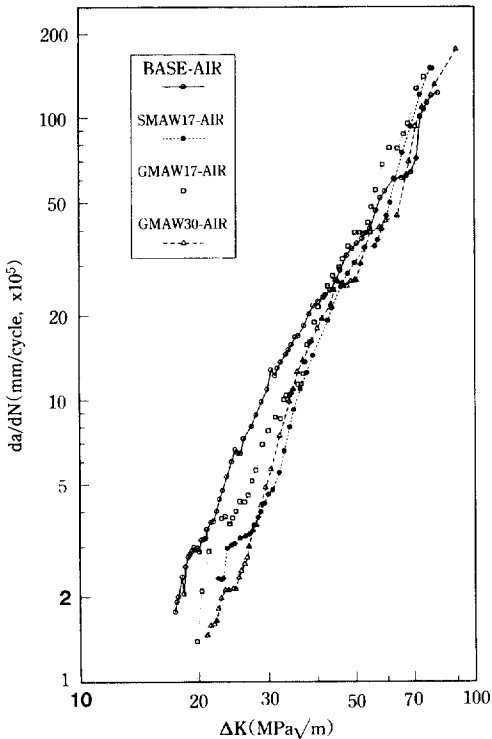


Fig. 11. FCPR Data for DS-100 Steel Base Metal and Various Welded Metals (SMAW and GMAW) tested in Air.

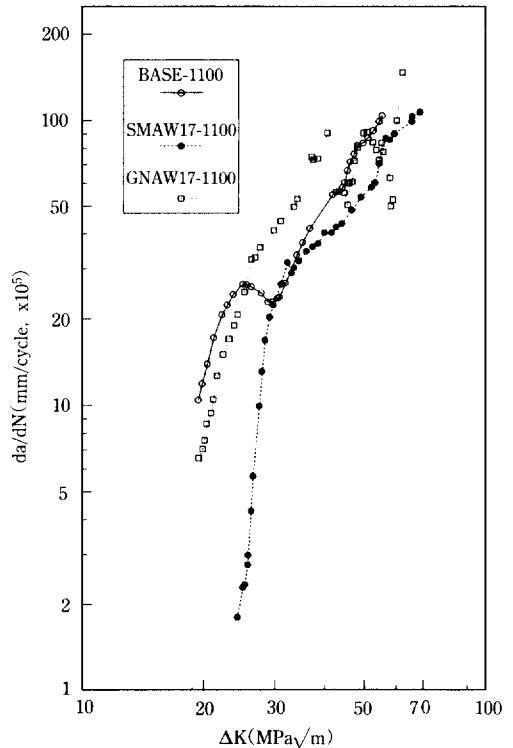


Fig. 12. Comparison of FCPR of DS-100 Steel among Base Metal, SMAW Welded Metal and GMAW welded metal tested in a synthetic sea water at -1100 mV. (Heat input rate : 17 kJ/cm)

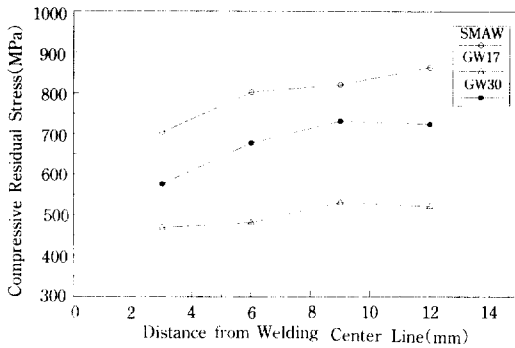


Fig. 13. Results of Residual Stress Measurements on SEN Specimen Surface of Various DS-100 Steel Weld Metals.

사용된 시편은 용접후 열처리를 하지 않고 잔류응력을 측정하였다. Fig. 13은 SMAW와 GMAW 시편을 이용하여 용접공질 및 입열량의 영향을 각각 관찰하기 위하여 X-선 방법으로 측정한 압축잔류응력 결과를 보여주고 있다. 이들 잔류응력방향은 시편에 가하는 응력과 같은 방향이므로 균열전파 거동에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 입열량이 17 kJ/cm인 경우, SMAW 용접부가 GMAW 용접부보다 300MPa정도 많은 압축잔류응력량을 보여주고 있으며, 같은 GMAW 용접부의 경우, 입열량을 17 kJ/cm에서 30kJ/cm로 증가시킬 때 압축잔류응력량이 100에서 200MPa정도 증가함을 알 수 있다. 낮은 응력확대계수 영역에서 용접부의 응력확대계수가 모재부보다 느린것은 용접부에 전반적으로 압축잔류응력이 존재하기 때문이라고 설명할 수 있다. 특정 응력확대계수 이상에서 입열량이 17 kJ/cm인 GMAW 용접부가 다른 용접시편보다 균열이 빨리 전파하는 것은 17 kJ/cm SMAW 용접부나 입열량이 30kJ/cm인 GMAW 용접부에 비해 상대적으로 적은 압축잔류응력으로 인하여 이느 응력확대계수 이상에서는 압축잔류응력이 상쇄되기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 압축잔류응력이 상쇄되는 응력확대계수 영역이상에서는 다층용접시 용접부의 불균일한 미세조직 영향으로 인하여 상대적으로 균일한 미세조직을 갖는 모재부보다 균열이 빨리 전파하는 현상을 관찰할 수 있다. 한편 Fig. 14와 같이 인공해

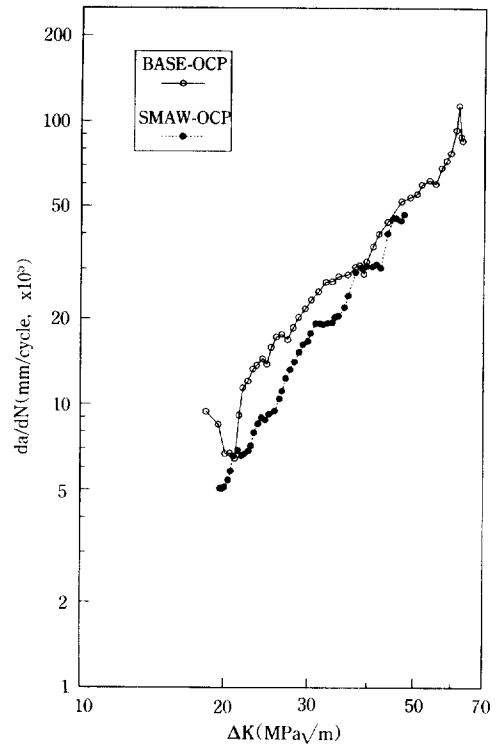


Fig. 14. Comparison on FCPR Properties of DS-100 Steel between Base and SMAW Weld Metal in Synthetic Seawater at Open Circuit Potential.

수중 자연부식전위 에서 관찰한 모재부와 SMAW 용접부의 균열전파속도를 비교해 보면 여전히 용접부가 느리게 전파하는 것으로 보아 압축잔류응력효과를 잘 뒷받침해 주고 있다. 이러한 잔류응력효과는 DS-100과 같은 강종인 HY-100 용접부에서도 피로거동에 중요한 영향을 미친다고 보고되고 있다.<sup>5)</sup>

공기중에서 시험한 균열전파 거동을 Fig. 11에서 보인 바와 같이 낮은 응력확대계수 영역에서는 압축잔류응력의 영향이 지배적이다가 응력확대계수가 증가함에 따라 금속조직학적 영향이 지배하기 시작하였다. 응력확대계수가 70MPa $\sqrt{m}$  이상에서는 압축잔류응력이 가장 높은 SMAW 시편의 균열전파속도가 가장 빨라지고 있다. 이와 같이 높은 응력확대계수 영역에서는 금속의 조직 및 개재물등에 의하여 균열전파 속도가 영향을 받게 되므로 개재



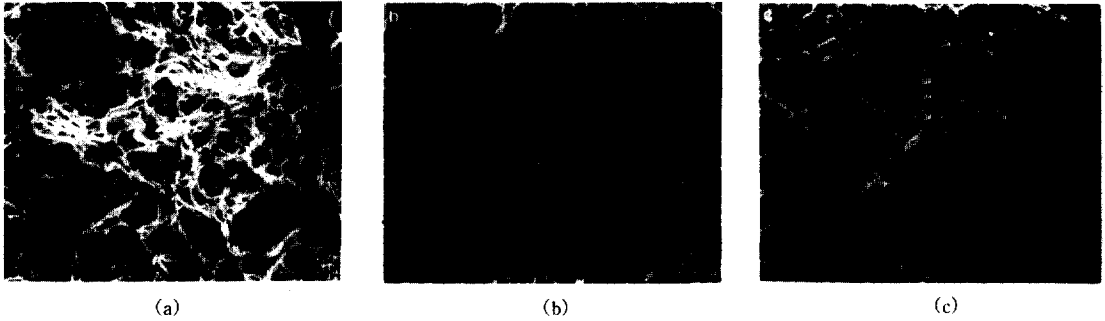


Fig. 15. Various Dimple Structures of DS-100 Steels.  
 (a) Base Metal (b) SMAW Weld Metal(17 kJ/cm)  
 (c) GMAW Weld Metal(17 kJ/cm)

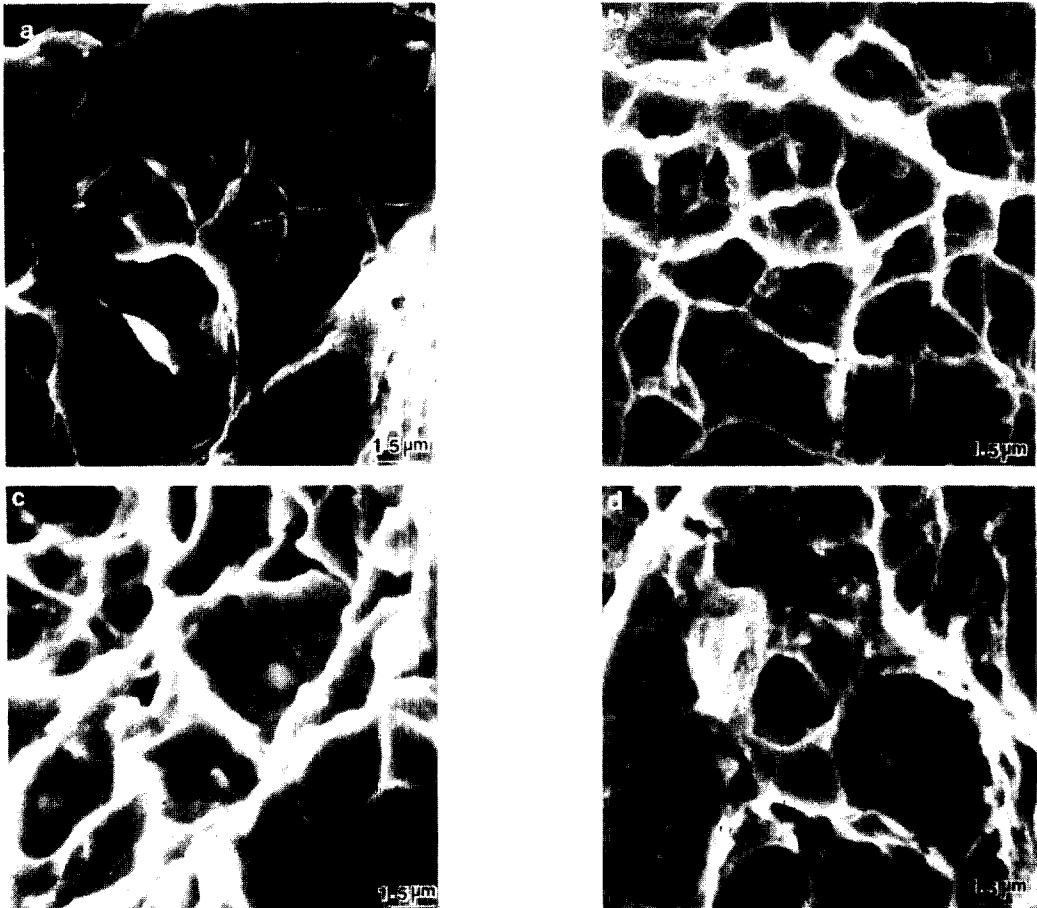


Fig. 16. Various Dimple Structures of DS-100 Steel Weld Metals.  
 (a) SMAW tested in Air(17 KJ/cm) (b) SMAW tested in Synthetic Seawater at -1100 mV(17 kJ/cm)  
 (c) GMAW tested in Air(17 kJ/cm) (d) GMAW tested in Synthetic Seawater at -1100 mV(17 kJ/cm)

물의 영향을 알아보기 위하여 공기중에서 인장응력을 가하여 파괴한 시편의 파면을 관찰하여 보았다. Fig. 15는 DS-100 강 모재, SMAW 및 GMAW 시편의 파면을 보여주며, 모든 시편에서 연성파괴의 전형적인 파면인 MVC(Microvoid Coalescence)에 의하여 파괴되었음을 보여준다. MVC에 의한 파괴는 일반적으로 Void의 형성, 성장, 합체에 의해 일어나게 된다. Microvoid는 개재물들의 Cracking<sup>11,12)</sup>이나 개재물과 Matrix 사이의 계면에서 Decohesion<sup>13)</sup>등으로 인해 일어나게 된다. Fig. 16은 개재물의 분포를 확인하기 위하여 SMAW와 GMAW 시편의 파면을 확대하여 관찰한 결과로서 Dimple 안에 개재물이 존재하고 있음을 보여준다. 개재물

량은 GMAW 용접부(Fig. 16b)보다는 SMAW 용접부(Fig. 16a)에서 많이 발견되고 있다. 이들 개재물은 MnS로 여겨지며, SMAW 용접부에서 개재물이 많은 것은 표 1에서 보았듯이 S의 함량이 SMAW 용접부에 상대적으로 많기 때문으로 생각된다. TEM조직사진결과에서도 Fig. 17에서 보듯이 SMAW 용접부와 GMAW 용접부에서 공히 개재물이 관찰되고 있으며 그 양은 SMAW 용접부에서 다소 많음을 볼 수 있다. Fig. 15는 모재부와 입열량이 17 kJ/cm인 SMAW 용접부와 GMAW 용접부의 Dimple 크기를 비교한 그림으로서 SMAW 용접부의 Dimple(Fig. 15b)이 모재부(Fig. 15a)나 GMAW(Fig. 15c)의 Dimple 보다 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 개재물이 상대적으로 많은 SMAW 용접부에서 Void가 형성되는 Site가 가장 많기 때문에 전체적인 Dimple 크기는 작아지는 것으로 생각된다. 이상에서 고찰한 바와 같이 응력확대계수가 70 MPa $\sqrt{m}$  이상에서 SMAW 용접부의 균열전파 속도가 가장 빠른 이유는 용접부에 존재하는 개재물의 영향이 크게 작용했으리라 판단된다.

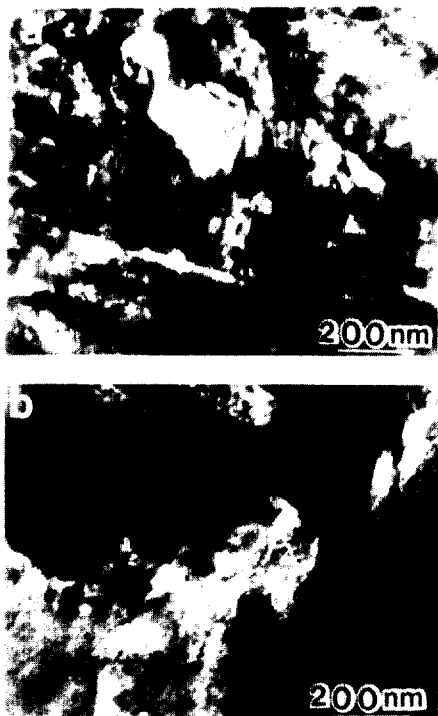


Fig. 17. Transmission Electron Micrographs of DS-100 Steel Weld Metals

- (a) SMAW Weld Metal(Heat Input Rate : 17 kJ/cm)  
 (b) /GMAW Weld Metal(Heat Input Rate : 17 kJ/cm)

#### 4. 결 론

1) DS-100 강의 모재부와 SMAW 및 GMAW 용접부는 수소발생반응이 지배적인 -1100 mV에서의 균열전파 속도가 가장 빠르게 전파하였고, 모재부의 경우 음극방식 전위영역에 해당하는 -750 mV에서 부식피로 균열전파속도가 자연부식전위나 -1100 mV에서 보다 느리게 전파하였다.

2) 입열량이 17 kJ/cm인 경우 압축잔류응력이 GMAW 용접부에서 보다는 SMAW 용접부에 더 많이 축적되었으며, GMAW 용접부의 경우 입열량을 30 KJ/cm로 증가시켰을 때 압축잔류응력도 증가하였다. 용접방법과 입열량에 따른 압축잔류응력 변화가 균열 전파속도에 직접적으로 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

3) 용접부의 균열전파 속도는 낮은 응력확대계수 영역에서는 압축잔류 응력에 의하여 지배되고 높은

응력확대계수 영역에서는 금속조직학적 영향에 의하여 지배됨이 관찰되었다.

### 〈후 기〉

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. T. Boniszewski and F. Watkinson, *Met. Mater.*, 7(1973) 90
2. 김영호, 김규영, 김영우, *한국부식학회지*, 20(1991) 247
3. I. M. Bernstein and A. W. Thompson, *Int. Metall. Rev.*, 21(1976) 269
4. R. Fratesi and G. Roventi, *Metall. Trans.*, 16A(1985) 2039
5. D. A. Davis and E. J. Czyryca, *ASTM STP* 801(1983) 175
6. R. P. Wei and J. D. Landes, *Mayer. Res. Stand.*, *ASTM*, 9(1969) 25
7. N. S. Cheruvu, *ASTM STP* 872(1984) 309
8. W. L. Morris, J. D. Fraudsen and H. L. Marcus, *ASTM STP* 872(1984) 309
9. R. Rungta and J. A. Begley, *Metall. Trans.*, 11A(1980) 821
10. P. K. Liaw, W. A. Logsdon and J. A. Begley, *Metall. Trans.*, 20A(1989) 2067
11. T. B. Cox and J. R. Low, *Metall. Trans.*, 5(1974) 1457
12. A. S. Argon and J. Im, *Metall. Trans.*, 6A(1975) 839
13. A. S. Argon, J. Im and A. Meedleman, *Metall. Trans.*, 6A(1975) 815