

해수환경중 캐비테이션 침식-부식 하에서의 응력부식균열 거동 (Ⅱ)

안 석 환 · 임 우 조

부경대학교

(2000년 5월 19일 접수)

Stress Corrosion Cracking Behavior under Cavitation Erosion-Corrosion in Sea Water-Part (Ⅱ)

Seok-Hwan Ahn and Uh-Joh Lim

Pukyong National University

(Received May 19, 2000)

Abstract

Cavitation can occur in pipes when liquid is moving at high velocity, especially at pittings where the smooth bore of the pipe is interrupted. The effect is usually to produce pitting on the downstream side of the turbulence. However, stress corrosion cracking behavior under cavitation erosion-corrosion was neatly unknown. In this study, therefore, some were investigated of stress corrosion cracking behavior, others were stress corrosion cracking behavior under cavitation erosion-corrosion of water injection. And datas obtained as the results of experiment were compared between the two.

Main result obtained are as follows:

1) Stress corrosion cracking growth rate of heat affected zone under cavitation erosion-corrosion becomes most rapid, and stress intensity factor K_1 becomes most high. 2) Stress corrosion cracking growth mechanism by cavitation erosion-corrosion is judgement on the strength of the film rupture model and the tunnel model. 3) The range of potential as passivation of heat affected zone is less noble than that of base metal, and that value is smaller. 4) Corrosion potential under cavitation erosion-corrosion in loaded stress is less noble than that of stress corrosion, and corrosion current density is higher.

Nomenclature

SCC : stress corrosion cracking
E/C : erosion-corrosion
BM : base metal
HAZ : heat affected zone

BMSC : BM of SCC
HAZSC : HAZ of SCC
BMEC : BM of SCC under cavitation E/C
HAZEC : HAZ of SCC under cavitation
E/C
WMSC : weldment of SCC

WMEC : weldment of SCC under cavitation
E/C

서 론

액체를 취급하는 기계장치는 유속 및 기계부분의 회전속도 등이 빠르게 되면 유체충격과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인해 캐비테이션 현상이 발생한다. 이러한 캐비테이션 현상이 발생함으로써 소음과 진동을 초래하고, 또한 기포의 붕괴에 따른 충격압으로 캐비테이션 침식-부식이 발생하여 기계장치의 구성재료에 손상을 발생시켜 이들 기계의 효율을 저하시킴과 아울러 수명을 단축시킬 수 있다. 더욱이, 부식성의 액체에 사용되는 기계장치의 재료에는 캐비테이션-침식과 동시에 전기화학적 부식이 일어나게 되며, 금속재료에 침식-부식(erosion-corrosion, E/C)이 중첩하여 발생하는 경우는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과 때문에 기계장치의 수명에 치명적인 영향을 미친다¹⁻⁶⁾. 그러므로, 여러 가지 형태의 응력이 작용하고 있는 환경기계에서는 캐비테이션 침식-부식하에서의 응력부식균열 거동에 관한 연구가 요구되고 있다⁷⁻⁹⁾. 현재, 각종 재료의 표면에 발생하는 캐비테이션 침식-부식에 대다수의 연구가 행하여지고 있다. 그러나 이들 연구는 침식-부식거동에 미치는 재료, 환경 및 유체역학적 영향인자 중에서 대부분 유체역학적 보고들이 대부분이다⁹⁻¹⁰⁾. 그러나 캐비테이션 침식-부식하에서의 응력부식균열 거동에 관한 연구는 미약한 실정이다¹¹⁻¹⁵⁾.

따라서 본 연구는 해수환경 중에서 연강(SS41)의 침식-부식하에서 응력부식균열 거동에 관해 실시되었고, 정적하의 응력부식균열시험과의 결과와 비교되었다.

시험편 및 시험방법

1. 시험편

본 실험에 사용한 시험편은, 인장강도: 415.5 MPa, 항복강도: 252.8 MPa, 연신율: 32 %, 화학

성분(wt%)으로 C : 0.11, Si : 0.29, Mn : 0.59, P : 0.01 및 S : 0.01를 함유하고 있는 일반구조용 탄소강재인 연강(SS41)이다.

2. 시험방법

시험편 형상을 Fig. 1에 나타내고, 시험편에는 기계적으로 노치를 삽입하였다. 이와 같은 시험편을 표면연마하여 오일랩핑한 후 아세톤으로 탈지하였다. 시험편의 유효노출면적을 제외한 나머지 부분은 실리콘수지로 피복 절연시켰다. 한편, 아크용접에 의해 용접한 시험편을 이용하여, Fig. 1과 동일한 형상으로 용접열영향부에 기계적으로 노치를 가공하였다.

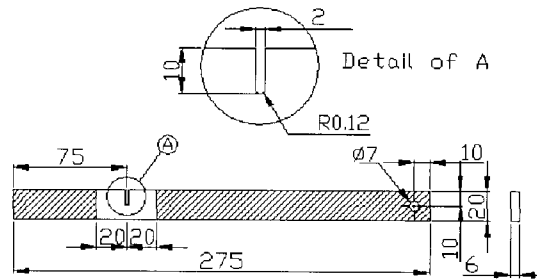
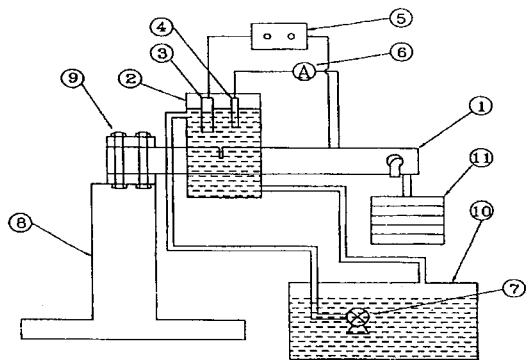


Fig. 1. Dimension of test specimen (mm).



- ① Specimen
- ② Corrosion cell
- ③ Reference electrode
- ④ Counter electrode
- ⑤ Potentiometer
- ⑥ Ampere meter
- ⑦ Water pump
- ⑧ Bed
- ⑨ Adjust bolt
- ⑩ Drain water tank
- ⑪ Dead weight

Fig. 2. Schematic diagram of stress corrosion cracking test apparatus.

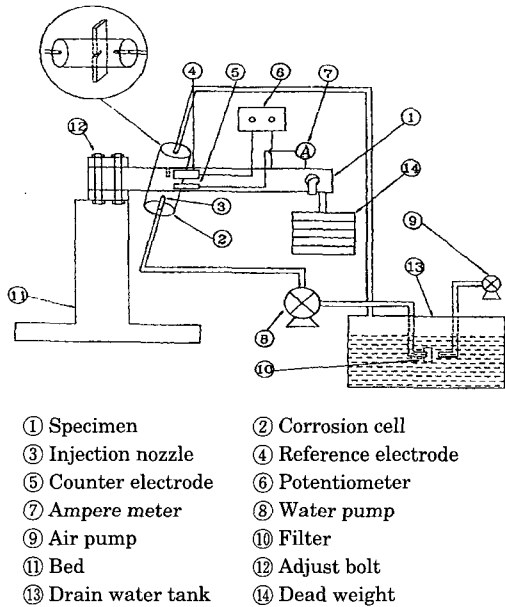


Fig. 3. Schematic diagram of stress corrosion cracking test apparatus under cavitation erosion-corrosion.

Fig. 2에는 응력부식균열 실험장치의 전체 모식도를, 그리고 Fig. 3에는 캐비테이션 침식-부식 하에서의 응력부식균열 실험장치를 각각 나타내었다. 시험편을 시험기의 고정단에 덮개로 덮여 볼트로 고정하고 자유단에는 추에 의해 196 MPa의 굽힘응력을 가하였다. 응력부식균열시험에서는 부식환경중 및 순환펌프는 시험편에 미칠 전기화학적인 영향을 고려하여 플라스틱으로 만들었고, 순환펌프는 시간당 4 l로 순환시켰다.

캐비테이션 침식-부식하의 응력부식균열 실험장치에서는 노즐에 의해 부식용액을 분사시키기 위해서 내경 10 mm의 플라스틱 평행노즐을 아르릴로 만들어 설치하고, 시험편에 충돌하도록 하였다. 시험편 노치상에 캐비테이션 기포군이 붕괴될 때 용액의 충격에 의한 침식-부식현상이 발생하도록 하고, 충돌되는 시험편의 배면에는 와류 캐비테이션에 의한 침식-부식현상이 발생하도록 하였다. 부식용액의 농도변화 방지를 위하여 매분 25 l의 양을 25 m/s의 속도로 순환시켰다. 또한, 부식용액의 변질을 막고 부식을 가속시키기 위하여 공기펌프를 설치하였다.

시험편과 시험장치의 각 부재들 사이에 이중급속접촉에 의한 galvanic부식을 방지하기 위하여, 시험장치의 모든 부재들에는 절연성 재료를 사용하였다. 또 부식 중 시험편에서 부식된 부식생성물에 의한 전기화학적인 영향을 제거하기 위하여 순환회로배관에 절연성 필터를 설치하여 여과되도록 하였다. 부식환경 용액으로서 비저항 25Ωcm인 천연해수를 사용하였고, 매 24시간마다 부식용액을 교환하였다. 전기화학적인 거동은 포화카르멜전극을 기준전극으로 사용하여 고저항전위차계에 의해 부식전위를 측정하였고, 직경 2 mm, 길이 70 mm인 백금전극을 대극으로 하여 직류전류계에 의해 전류를 측정 후 시험편의 유효노출면적에 대한 부식전류밀도를 계산하였다. 전극전위와 전류는 1회/1일로 측정하였다. 또, 모재부 및 용접부에서의 각 조건에 따라 발생한 응력부식균열길이를 측정하였다.

결과 및 고찰

한편, 시험편의 균열선단에 있어서의 응력확대계수(stress intensity factor) K_1 값은 아래와 같이 주어진다¹⁶⁾.

$$K_1 = \frac{6M \sqrt{a}}{BW^2} \times F(a/W) \quad (1)$$

$$F(a/W) = \{1.99 - 2.47(a/W) + 12.97(a/W)^2 - 23.17(a/W)^3 + 24.8(a/W)^4\}$$

여기서, M = Bending moment, B = thickness, W = width, a = crack length

1. 응력부식균열성장거동의 평가

Fig. 4는 비저항 25Ωcm 인 천연해수 중에서 모재 및 용접열영향부에 대한 정적응력하에서의 응력부식균열성장거동과 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열성장거동을 시간경과에 대해 나타낸 것이다. 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식하에서 응력부식균열의 진전길이는 정적응력하에서의 응력부식균열의 진전길이 보다 더욱 성장됨을 보이고 있으며, 또한

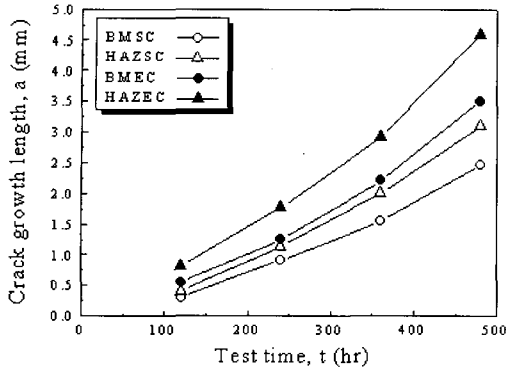


Fig. 4. Stress corrosion crack growth length of base metal and weldment under stress and cavitation in sea water.

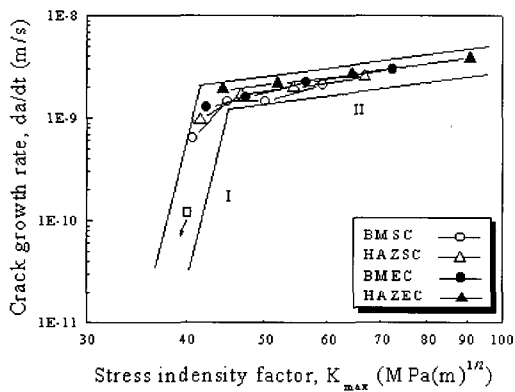


Fig. 5. Relation of crack growth rate da/dt vs stress intensity factor $K_{I\max}$ of base metal and weldment under stress and cavitation.

용접열영향부의 응력부식균열진전길이는 모재의 응력부식균열진전길이보다 더 성장하고 있으며, 특히 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서 용접열영향부의 응력부식균열진전길이가 가장 성장되는 양상을 나타내고 있다.

Fig. 5는 비저항 25 Ω·cm 인 천연해수 중에서 모재 및 용접열영향부에 있어서 정적응력하에서의 부식과 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열진전속도 da/dt 를 응력확대계수 K_I 에 대해 나타낸 것이다. 이때 균열선단의 K_I 치는 식(1)로부터 구한 K_I 의 최대치인 $K_{I\max}$ 를 의미한다. 여기서 응력부식균열이 성장함에 따라 나타난 균열진전속도 da/dt 는 Fig. 4의

$a-t$ 곡선에서 기점의 기울기로부터 구하였다. 즉, da/dt 와 K_I 사이에서의 관계를 다음과 같은 관계식을 이용하여 구한 것이다.

$$da/dt = f(K_I) \quad (2)$$

그림속의 기호 \square 은 위의 (1)식으로부터 구한 기계적으로 가공한 길이 10 mm의 초기 notch선단에서의 K_I 치로 약 40.12 MPa√m이다. 일반적으로 응력부식균열진전과정에서는 파괴의 조건이 만족되어지는 것으로부터, 대표적 3단계로 분류가 가능하다. 그러나, 이들 영역이 모두 나타나지 않을 수도 있다. 본 실험의 결과에서는 대체적으로 영역 I 과 영역 II 에 근사할 수 있는 영역이 나타나고 있다. 각 영역의 정성적인 해석을 하면, 영역 I 에서는 부식반응속도가 K_I 의 함수로 되고 있다. 즉, da/dt 가 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. da/dt 가 증가하는 영역 I의 경우에는 부식반응에 의해 생긴 피막의 파괴 혹은 피막의 부서짐이 관여하기 때문에 단순히 단일적인 문제로 파악하기 곤란하다고 생각한다. 그러나, 영역 II에서는 da/dt 가 그다지 K_I 에 의존하지 않는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그것은 균열의 분기가 발생하였기 때문으로 생각된다. 균열의 분기가 계속해서 발생하는 것에 의해 실제적으로는 K_I 치가 보다 더 저하하는 경향을 나타내리라고 생각한다. 따라서, 그림에서와 같은 단일균열로서 계산한 K_I 치에 비해 실효적인 K_I 치는 저하하거나 거의 일정으로 되어서 그에 따른 균열진전속도는 저하하는 경향으로 나타내리라고 추정된다.

전체적으로, 모재보다 용접열영향부의 응력부식균열진전속도가 더욱 빠르며, 특히 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 용접열영향부의 응력부식균열진전속도는 거의 영역 II에 위치하고 있으면서 가장 빠른 균열진전속도를 나타내고 있으며, 응력확대계수값도 가장 크게 나타나고 있다. 이와 같이 용접열영향부의 응력부식균열진전속도가 거의 영역 II에 위치하고 있는 이유는 응력은 같지만 용접열영향부가 부식에 민감함과 아울러 캐비테이션 침식에 의한 영향이 함께 영향을 미치는 재료 및 환경인자의 요인에 의한 것으로 생각된다.

2. 응력부식균열진전에 미치는 캐비테이션 침식감수성

Fig. 6은 비저항 $25\Omega.cm$ 인 천연해수 중에서 모재와 용접열영향부의 응력부식균열진전길이에 미치는 캐비테이션 침식을 정량적으로 구명하기 위하여, 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서의 응력부식균열진전길이에 대한 정적응력 작용하에서의 응력부식균열진전길이의 비를 계산에 의하여 비교함으로써, 응력부식균열진전길이에 미치는 모재와 용접열영향부의 캐비테이션 침식 감수성을 평가하여 보인 것이다. 여기서 응력부식균열진전길이에 미치는 모재와 용접열영향부의 캐비테이션 침식감수성 S_{cce} 는 Fig. 4의 실험치를 아래의 (3)식으로 계산하였다.

$$S_{cce} = A_c / A_s \quad (3)$$

여기서,

A_c = crack length of stress and cavitation erosion-corrosion

A_s = crack length of stress corrosion

이 결과에 의하면, 응력부식균열진전길이에 미치는 모재의 캐비테이션 침식감수성은 용접열영향부보다 더 둔감하게 나타나는 경향을 보이고 있다. 모재와 용접열영향부의 캐비테이션 침식감수성은 초기에 크게 나타나다가 시간이 경과함에 따라서 거의 일정하게 되는 양상을 나타내고 있다.

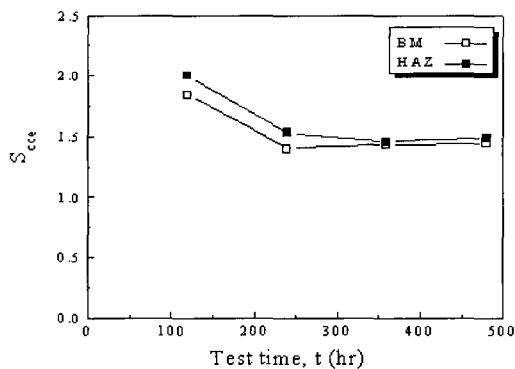


Fig. 6. Cavitation erosion-corrosion sensitivity of crack growth length (S_{cce}) on base metal and heat affected zone in sea water .

3. 응력부식균열진전에 미치는 용접부의 부식감수성

Fig. 7은 비저항 $25\Omega.cm$ 인 천연해수 중에서 용접에 의한 용접열사이클이 용접열영향부의 응력부식균열진전에 미치는 부식감수성을 정량적으로 구명하기 위하여, 용접열영향부의 응력부식균열길이에 대한 모재의 응력부식균열길이의 비를 계산에 의하여 비교함으로써, 정적응력하에서와 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서의 용접열사이클에 의한 응력부식균열길이에 미치는 부식 감수성을 평가하여 보인 것이다. 여기서 용접열사이클에 의한 응력부식균열진전길이에 미치는 부식 감수성 S_{uscc} 는 Fig. 4의 실험치를 아래의 (4)식으로 계산하였다.

$$S_{uscc} = A_h / A_b \quad (4)$$

여기서,

A_h = crack length of heat affected zone

A_b = crack length of base metal

용접열사이클에 의한 응력부식균열진전에 미치는 부식감수성은 정적응력하에서 보다 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서 전반적으로 더 민감하게 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한 용접열사이클에 의한 응력부식균열진전에 미치는 부식감수성은 정적응력하에서와 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서

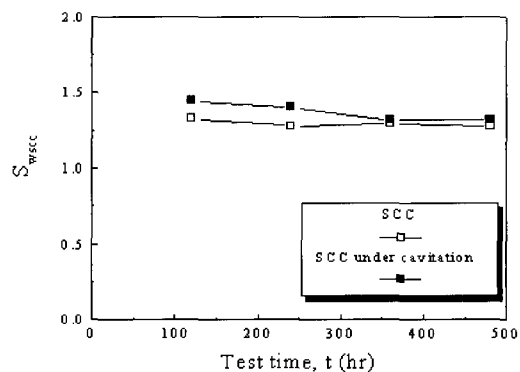


Fig. 7. Corrosion sensitivity of welding on SCC (S_{uscc}) under stress and cavitation erosion-corrosion in sea water.

다 같이 시간이 경과함에 따라 점차적으로 둔감해지는 양상이지만, 특히 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서 용접에 의한 부식감수성이 둔감해지는 거동이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 정적응력과 캐비테이션 침식-부식하에서 응력부식균열진전기구

본 실험으로부터 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열의 진전거동은 응력부식균열이 캐비테이션 침식-부식에 의해 발생한 공식을 따라 성장되는 것으로 추측된다. 그러므로, 본 연구의 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열진전기구는 지금까지 제안된 다수의 모델 중에서도 R. W. Staehle 과 P. R. Swann 이 제안한 피막파괴모델(film rupture model)과 터널모델(tunnel model)¹⁷⁾이 가장 근사한 것으로 생각된다. 그러나, 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열의 성장되는 경향은 균열선단에 발생한 공식과 결합하여 진전하는 것으로 예상되므로서 위의 두 모델에 의해서는 진전기구를 나타내기는 불충분하다고 생각된다. 따라서 본 실험의 결과로부터 응력부식균열진전기구를 Fig. 8 및 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 8은 정적응력하에서의 응력부식균열 진전기구를 도식화한 것으로, 피막파괴모

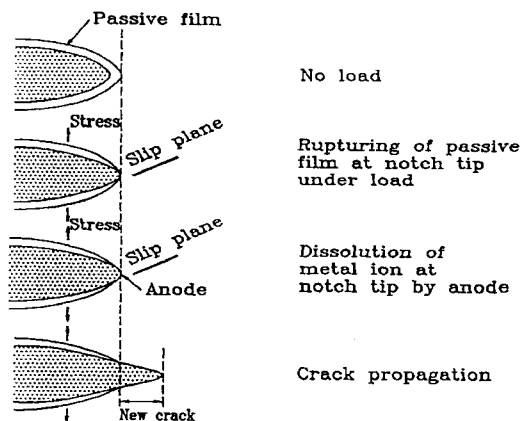


Fig. 8. Schematic representation of SCC propagation mechanism by the film rupture model under stress.

델을 이용하였다. 이와 같은 응력부식균열진전기구는 부식환경 중에서 응력이 작용하지 않을 때에는 부동태피막이 형성되어 있지만, 응력이 작용함으로써 노치선단의 응력집중에 의해 슬립면(slip plane)이 형성되면서 노치선단의 부동태피막이 파괴되고, 이 부동태피막의 파괴에 의해 노치선단이 양극활성화되고, 금속이온의 용출로 새로운 균열성장으로 발전되는 것으로 생각된다. Fig. 9는 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열진전기구를 터널모델을 이용하여 도식화한 것이다. 부식환경 중에서 응력과 캐비테이션 침식-부식이 작용하지 않을 때에는 부동태피막이 형성되어 있지만, 응력과 더불어 캐비테이션 침식-부식이 복합적으로 작용함으로써 노치선단의 응력집중에 의해 슬립면(slip plane)이 형성되면서 노치선단의 부동태피막이 파괴되어 짐과 동시에 노치선단 주위에 공식이 형성되어 진다. 이와 같이 부동태피막이 파괴된 노치선단과 그 주위에 발생한 공식이 양극활성화 되어짐으로써 금속이온의 용출로 노치선단과 공식이 서로 연결되어 새로운 균열성장으로 발전되는 것으로 생각된다. 따라서, 정적응력하에서의 응력부식균열성진전 정도보다 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열진전의 정도

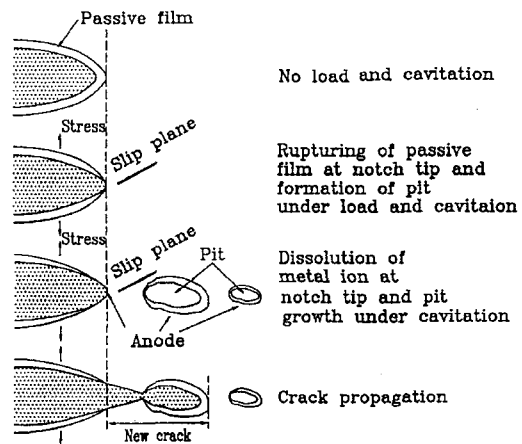


Fig. 9. Schematic representation of SCC propagation mechanism by the film rupture and the tunnel model under stress and cavitation.

가 더 빨라지는 것으로 추정된다.

5. 정적응력과 캐비테이션 침식-부식에 의한 용접부의 전기화학적거동

5.1 부식전위 및 부식전류밀도

Fig. 10은 비저항 $25\Omega\cdot cm$ 인 천연해수 중에서 모재 및 용접부에 대한 정적응력하에서와 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 부식전위 E (mV/SCE)의 거동을 시간경과에 대해 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 용접부의 부식전위가 모재의 부식전위 보다 더 비전위화되고 있다. 그리고 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 부식전위는 정적응력하에서 보

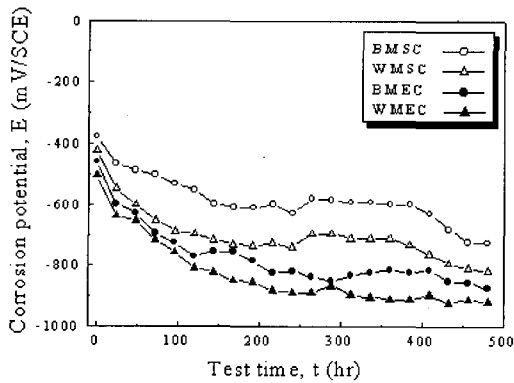


Fig. 10. Relation of corrosion potential of base metal and weldment under stress and cavitation vs test time in sea water.

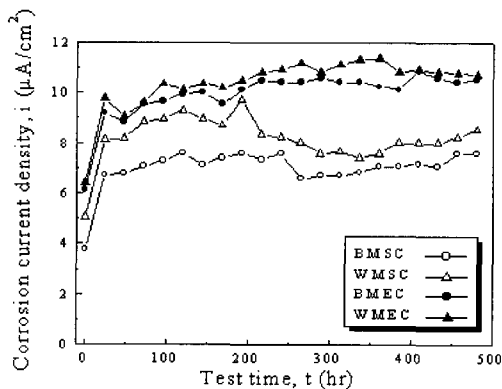


Fig. 11. Relation of current density of base metal and weldment under stress and cavitation vs test time in sea water.

다 더 비전위화되고, 정적응력하에서 부동태화되는 시간에 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 부식전위는 활성화태로 되는 경향을 나타내고 있다. Fig. 11은 비저항 $25\Omega\cdot cm$ 인 천연해수 중에서 모재 및 용접부에 대한 정적응력하에서와 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 부식전류밀도 i ($\mu A/cm^2$)를 시간경과에 대해 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 용접부의 부식전류밀도는 모재의 부식전류밀도 보다 더욱 높게 나타나고 있다. 또한 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 부식전류밀도는 정적응력하에서 보다 더 높게 나타내고 있다. 그리고 정적응력이 작용하는 응력부식균열하에서의 모재나 용접부의 부식전류밀도는 증가하다가 약간 감소하면서 안정상태로되지만 캐비테이션하에서의 모재나 용접부의 부식전류밀도는 증가하다가 감소하지 않고 그대로 부식전류밀도가 안정상태로 되는 것을 알 수 있다.

결 론

- 1) 캐비테이션 침식-부식하에서 용접열영향부의 응력부식균열성장속도가 가장 빠르며, 응력확대계수값은 가장 크게 나타난다.
- 2) 본 실험의 결과로부터 캐비테이션 침식-부식에 의한 응력부식균열진전기구는 피막과 피모델과 터널모델의 조합에 의하여 설명가능하다고 생각한다.
- 3) 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 부식전위는 정적응력하에서보다 더 비전위화되고, 부식전류밀도도 더 높게 나타난다. 또한, 부동태화되는 전위의 영역은 용접열영향부가 모재보다 더욱 비전위화되어진다.

참고문헌

- 1) Tretheway, K. R. and Chamberlain, J.(1988) : Corrosion(for students of science and engineering), Longman Scientific & Technical, 153-156.

- 2) 松村倉信, 岡 良則(1982): 腐蝕に及ぼすエロシヨンの影響, 防蝕技術, 31, 67-72
- 3) Talks, M.G. and Moreton, G.(1981-6) : Proc. ASME Symp. Cavitation erosion Fluid System, 139.
- 4) Dawson, J.L. Shih, C.C. Gearey, D. and Miller, R.G.(1991) : Flow Effect on Erosion-Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, 57-60.
- 5) 松村倉信, 岡 良則, 植田雅也(1990) : キャビテーション攻撃を受ける金属材料の壽命豫測, 日本防蝕技術, 39(10), 550-555.
- 6) 日本機械學會(1985) : 腐蝕と破壊(環境を考慮した設計, 對策, 評價と事例), 日本工業出版, 74-86.
- 7) Craig, H.L.(1976) : Stress Corrosion New Approaches, STP610, 32-37.
- 8) 日本機械學會(1985) : 腐蝕と破壊(環境を考慮した設計, 對策, 評價と事例), 日本工業出版, 265-271.
- 9) 加藤洋治(1979) : キャビテーション, 日本振書店, 1
- 10) 渡邊 豊, 高橋秀明(1988) : 炭素鋼の氣液2相流中エロシヨンのコロシヨンにおける電氣化學的作用, 日本防蝕技術, 37(2), 69-74.
- 11) Sekine, I. and Tanaki, T.(1991) : Erosion-Corrosion Behavior of Copper Alloy under Flowing Water Condition, Zairyo toKankyo, 40(8), 527-532.
- 12) Zahavi, J. and Wagner, H.J.(1980) : Characterization of Erosion-Corrosion Process, The Metallurgical Society of AIME, 226-239.
- 13) Matsumura, M. and Oka, Y.(1982) : Influence of Erosion on Corrosion, Boshoku Gijutsu, 31(2), 67-69.
- 14) 임우조, 이진열(1991) : 캐비테이션에 의한 베어링재의 부식-침식거동에 관한 연구(1), 한국부식학회지, 20(4), 285-289.
- 15) 松島 巖(1974) : 炭素鋼, 低合金鋼の應力腐蝕龜れ, 鐵の鋼, 60-410.
- 16) 國尾 武, 中澤 一, 林 郁彦, 岡村弘之(1984) : 破壊力學實驗法, 朝倉書店, 177.
- 17) Bastien, P.G.(1973) : Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of iron base alloys, 37-51