

해수환경중 캐비테이션 침식-부식 하에서의 응력부식균열 거동 (I)

안 석 환 · 임 우 조
부경대학교
(2000년 5월 19일 접수)

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

Seok-Hwan Ahn and Uh-Joh Lim

Pukyong National University

(Received May 19, 2000)

Abstract

The effect of fluid flow on corrosion and erosion-corrosion of metal is a well-recognized phenomenon in pipelines and machinery equipment, and so on. Not only are fluid hydrodynamics important, but also the corrosiveness of the process or production stream affects the corrosion system. Recent research demonstrates that it is possible to erosion-corrosion(E/C) phenomena in terms of hydrodynamics, electrochemical corrosion kinetics and film growth/removal phenomena.

Stress corrosion cracking behavior under cavitation erosion-corrosion of mild steel(SS41) was investigated of base metal and weldment under loaded stress.

Main result obtained are as follows : 1) The cavitation erosion sensitivity of base metal affected weight loss is more susceptible than heat affected zone, 2) The corrosion sensitivity affected weight loss of welding heat cycle is less susceptible on stress corrosion under cavitation erosion-corrosion than stress corrosion

Nomenclature

SCC : stress corrosion cracking
E/C : erosion-corrosion
BMC : base metal of SCC
WMC : weldment of SCC
BME : base metal of SCC under cavitation
E/C

WME : weldment of SCC under cavitation
E/C

서 론

각종 기계장치나 설비시설 등에 사용되는 금속 재료는 그 사용환경 중의 부식성에 의해 기계구조물의 수명 및 환경강도에 심각한 영향을 미친다¹⁻³⁾.

환경강도를 좌우하는 파손의 형태로서는 순수한 화학작용에 의해서만 일어나는 부식 및 화학작용에다 기계적작용이 서로 복합작용하는 응력부식의 두 종류로 나눌 수 있다. 통상의 환경강도는 공식, 틈부식, 입계부식 혹은 선택부식 등을 수반한다고 알려져 있다. 특히, 실제 기계부재나 구조물에서는 항상 응력이 작용하고 있으므로, 특정한 부식 환경 중에서 사용하고 있는 금속은 항복점 이하의 비교적 낮은 정적응력을 받고 있어도 균열이 발생할 수 있는 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)에 의해 그 파손이 진행되는 경우가 많으며, 특히 용접부는 이러한 응력부식균열에 더 민감하다고 알려져 있다. 이러한 일정 지속 하중하에서 침식성환경(aggressive environment)의 영향을 받아 현저하게 취성화해서 파괴되는 SCC는 1년 이내에 손상의 태반이 발생하고 있다⁴⁻⁷.

기계나 구조물은 항상 환경중에서 가동하고 있기 때문에 그들의 파괴에 미치는 환경의 효과는 무시할 수 없다. 특히, 액체를 취급하는 기계류는 유속 및 기계부분의 회전속도 등이 빠르게 되면 캐비테이션(cavitation) 현상이 발생한다, 이러한 캐비테이션 현상에 의해 발생된 기포가 붕괴되므로써 그 충격압에 의한 캐비테이션 침식이 발생한다. 더욱이, 전기화학적 부식과의 복합작용으로 인한 캐비테이션 침식-부식(erosion-corrosion)이 발생하면 기계의 효율을 저하시키거나, 수명단축을 초래한다. 많은 연구자들에 의해 응력부식균열에 관한 연구나 캐비테이션에 의한 연구는 개별적으로 많이 이루어져 있으나, 두가지가 복합적으로 작용하는 조건하에서의 연구는 거의 드문 형편이다⁸⁻¹⁵. 따라서, 본 연구에서는 연강(SS41)을 이용하여 해수환경의 분위기 중에서 캐비테이션 침식-부식하에서의 응력부식균열거동에 관하여 관찰·조사하였다.

시험편 및 실험방법

1. 시험편

본 실험에는 일반구조용 탄소강재인 연강(SS41)을 사용하였고, 그 기계적성질과 화학성분

Table 1. Mechanical properties of tested materials

Material	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
SS41	415.5	252.8	32

Table 2. Chemical compositions of tested materials [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S
SS41	0.11	0.29	0.59	0.01	0.01

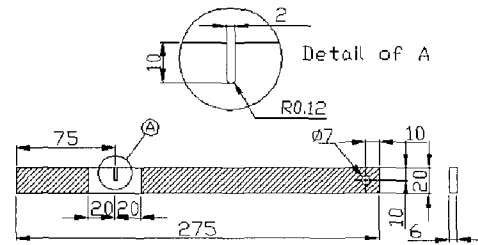


Fig. 1. Dimension of test specimen (mm).

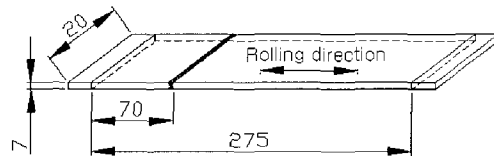


Fig. 2. Welding plate configuration and extraction of specimen (mm).

을 각각 Table 1, 2에 나타낸다.

시험편의 형상은 Fig.1과 같으며, 2 mm의 wire cutter machine을 이용하여 기계적으로 노치를 삽입하였다. 이와 같은 시험편을 표면연마하고, 오일랩핑한 후 아세톤으로 탈지하였다. 시험편의 유효노출면적을 제외한 나머지 부분은 실리콘수지로 피복 절연시켰다. 한편, 용접에 의한 용접열영향부에서의 응력부식균열의 특성을 규명하기 위해, 아크용접(arc welding)에 의해 Fig. 2와 같이 X형상으로 용접을 실시하였다. 각 시험편의 용접조건을 Table 3에 나타낸다. 일반적으로 용접부에 있어서 열영향부가 부식에 가장 민감함으로 용접열영향부(heat affected zone)에 노치를 기계적으로 가공하였다.

Table 3. Welding condition

Pre-heat of BM(°C)	Electrode pre-heat (°C/h)	Side	Amp. (A)	Volt (V)	Heat input (kJ/cm)
100-500	KSE 4301 80-100/2 4mm(dia)	Face	140	25	14
			170	26	17.7
		Back	170	26	17.7

2 pass 용접을 할 경우에는 슬랙을 철저히 제거한 다음 용접하고, 배면용접을 할 경우에는 밀면 따내기 후 뒷면에 용접을 실시하였으며, 각 시험편의 용접속도는 15 cm/min으로 일정하게 하였고, Table 3의 용접조건에 있어서 그 특성은 우천 시나 배관내의 습기가 있는 상태에서 용수배관을 용접에 의해 보수할 경우, 대기중의 습기에 의해 모재와 용접봉이 건조되지 않은 상태에서 용접을 실시함에 따른 용접결함 또는 수소취화에 의한 결함이 예상되는 바 예열하지 않은 상태와 용접봉도 건조하지 않은 상태에서 용접을 실시하였다.

2. 실험방법

2.1 정적하중하의 응력부식균열시험

Fig. 3은 본 실험에 사용한 응력부식균열 실험 장치의 전체 모식도를 나타낸다. 시험편을 시험기의 고정단에 덮개로 덮어 볼트로 고정하고 자유단은 추에 의해 196 MPa의 굽힘응력을 가하였다. 또한 부식환경조 및 순환펌프는 시험편에 미칠 전기화학적인 영향을 고려하여 플라스틱으로 제작하였다. 순환펌프는 시간당 4 l로 순환시켰고, 전기화학적인 부식특성을 조사하기 위하여 전위차계와 전류계를 Fig. 3의 회로도과 같이 배선하였다.

2.2 캐비테이션 침식-부식하에서의 응력부식 균열시험

Fig. 4는 캐비테이션 침식-부식하의 응력부식 균열 실험장치를 나타낸다. 캐비테이션 침식-부식하의 응력부식균열 실험장치에서도 시험편의 고정단은 덮개로 덮어 볼트로 고정하고 자유단은 추에 의해 196 MPa의 굽힘응력을 가하였다. 또한 실험환경조는 자작한 것으로서 부식환경조는 내경 50 mm×길이 200 mm의 아크릴 배관에 내경 10 mm의 플라스틱 평행노즐(parallel nozzle)을

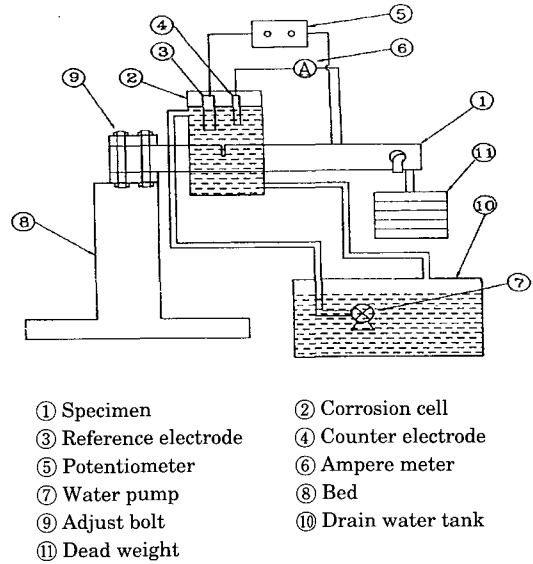


Fig. 3. Schematic diagram of stress corrosion cracking test apparatus.

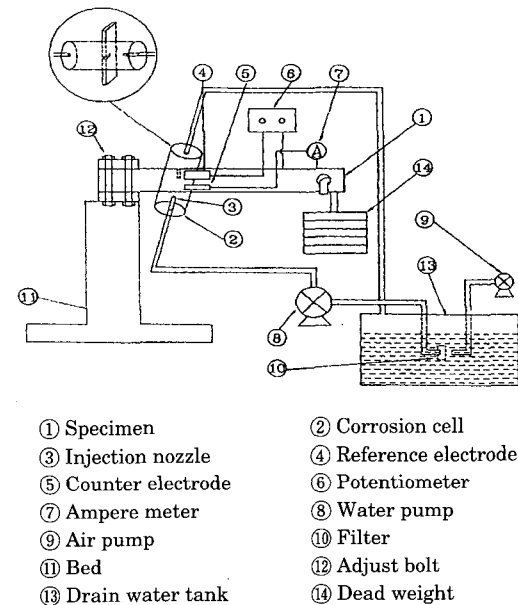


Fig. 4. Schematic diagram of stress corrosion cracking test apparatus under cavitation erosion-corrosion.

설치하여, 플라스틱 펌프에 의해 매분 25 l의 부식용액을 25 m/s의 속도로 순환시켰다. 노즐로부터 분사된 부식용액이 노즐선단으로부터 40 mm

의 거리에 고정된 시험편에 충돌하도록 하였다. 굽힘응력을 받고있는 시험편에 분사된 부식용액 으로부터의 캐비테이션 기포군이 노치상에 충돌 하여 붕괴될 때 용액의 충격에 의한 침식-부식현 상이 발생하도록 하고, 충돌되는 시험편의 배면에는 와류 캐비테이션에 의한 침식-부식현상이 발 생하도록 하였다.

Fig. 3과 Fig. 4의 실험장치에 있어서 시험편과 시험장치의 각 부재들 사이에 이중금속접촉에 의한 전기작용부식(galvanic corrosion)을 방지하기 위하여, 순환회로배관을 비롯한 시험장치의 부재 들을 플라스틱, 테프론 및 아크릴 등의 절연성 재 료를 사용하였다. 또 부식 중 시험편에서 부식된 부식생성물에 의한 전기화학적인 영향을 제거하 기 위하여 순환회로배관에 절연성 필터를 설치하 였다. 그리고 각 시험장치에 있어서 부식액의 농 도변화를 막기위하여 순환펌프에 의해 부식용액 을 순환시켰으며, 부식용액의 변질을 막고 부식을 가속시키기 위하여 공기펌프를 설치하였다.

응력부식균열시험과 캐비테이션 침식-부식하 의 응력부식균열시험은 부식환경 용액으로서 비 저항 $\rho=25\Omega\text{cm}$ 인 천연해수를 사용하였고, 24시 간마다 부식용액을 교환하였다. 또한 무게감소량 의 측정은 시험전에 시편의 중량을 측정하고, 부 식용액에 시험편을 침지 및 수분사시켜 시간의 경 과 후에 각각의 시험편을 시험장치에서 해체하여 물로 세척하였다. 그리고 60%의 농질산용액에 1 분간 침지하여 시험편 표면의 부식생성물을 제거 시킨 다음 증류수 및 아세톤으로 세척한 후 건조 시켜서 무게감소량과 균열진전길이를 측정하였 다.

시험편의 전기화학적인 전극전위와 부식전류를 측정하기 위하여 전위차계(potentiometer), 전류 계(amperes), 포화 카르멜전극(reference electrode) 및 백금 대극(Pt electrode)을 Fig. 3 및 4의 실험장치내의 회로도와 같이 배선하였다

전기화학적인 거동은 포화카르멜전극 (saturated calomel electrode)을 기준전극으로 사용하여 고저항전위차계에 의해 전극전위(부식 전위)를 측정하였고, 직경 2 mm, 길이 70 mm인 백금전극을 대극으로 하여 직류전류계에 의해 전

류를 측정후 시험편의 유효노출면적에 대한 부 식전류밀도를 계산하였다. 그리고 전극전위와 전 류는 1회/1일로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 무게감소량 및 무게감소율

Fig. 5는 비저항 $25\Omega\text{cm}$ 인 천연해수 중에서 모 재 및 용접부위에 대한 정적응력하에서의 응력부 식과 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부 식에 의한 무게감소량 $Wt(\text{mg})$ 을 시간경과에 대해 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 모재와 용접부 에 대해 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식- 부식하에서의 무게감소량은 정적응력하에서의 부 식에 의한 무게감소량보다 더욱 증가하는 경향이 다. 이것은 캐비테이션에 의해 발생한 기포의 붕 괴에 의해 침식이 되어 상대적으로 무게의 감소가 많아졌기 때문이라고 생각한다. 또한 용접부위의 무게감소량은 모재의 무게감소량 보다 더 높게 나 타나는 양상을 보이고 있으며, 이러한 양상은 시 간이 경과할 수록 용접부위의 무게감소량이 더욱 크게 증가하는 경향이다.

Fig. 6은 비저항 $25\Omega\text{cm}$ 인 천연해수 중에서 모 재 및 용접부위에 대한 정적응력하에서의 부식과 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식 하에서의 무게감소율 $Rt(\text{mg}/\text{dm}^2 \text{ day})$ 을 시간경과 에 대해 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 정적응

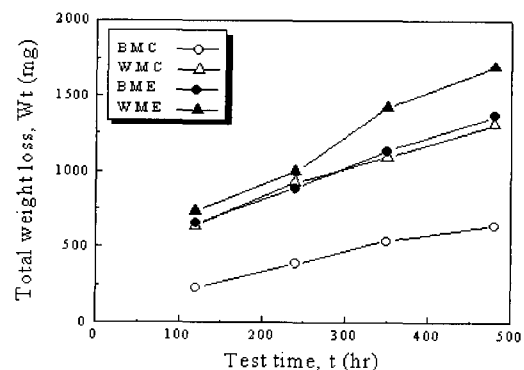


Fig. 5. Relation of total weight loss of base metal and weldment by stress and cavitation vs test time in sea water.

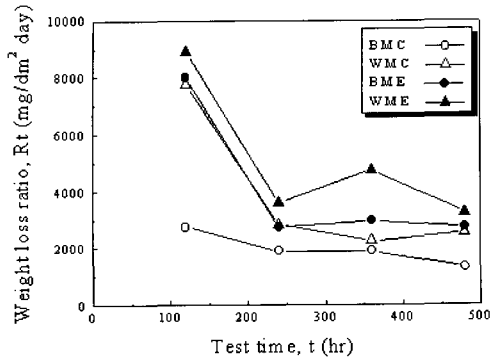


Fig. 6. Relation of weight loss rate of base metal and weldment by stress and cavitation vs test time in sea water.

력하에서의 부식에 의한 모재의 무게감소율은 어느 정도 일정하게 감소되고 있다. 그러나 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식에 의한 모재와 용접부위의 무게감소율이나 정적응력하에서의 부식에 의한 용접부위의 무게감소율은 초기에 매우 높게 나타나다가 시간이 경과할 수록 무게감소율이 둔화되는 경향이며, 모재보다 용접부위의 무게감소율이 크게 나타남을 알 수 있다. 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게감소율이 시간 경과와 더불어 둔화되는 경향이 나타나는 것은 최초에 캐비테이션에 의한 침식의 정도가 많았지만, 이후 침식에 의해 발생된 표면의 함유부분에 부식용액이 유입되고 그것이 완충작용을 일으키므로서 침식의 영향이 다소 감소되었기 때문으로 생각된다.

2. 무게감소에 미치는 캐비테이션 침식 감수성

Fig. 7은 비저항 $25\Omega\text{cm}$ 인 천연해수 중에서 모재와 용접부위의 무게감소량에 미치는 캐비테이션 침식을 정량적으로 구명하기 위하여, 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식하에서의 무게감소량에 대한 정적응력하에서의 무게감소량의 비를 계산에 의하여 비교함으로써 무게감소량에 미치는 모재와 용접부의 캐비테이션 침식감수성을 평가하여 보인 것이다. 여기서 무게감소량에 미치는 모재와 용접부의 캐비테이션 침식감수성 S_{wce} 는 Fig. 5의 실험치를 이용하여 아래와 같이 (1)식

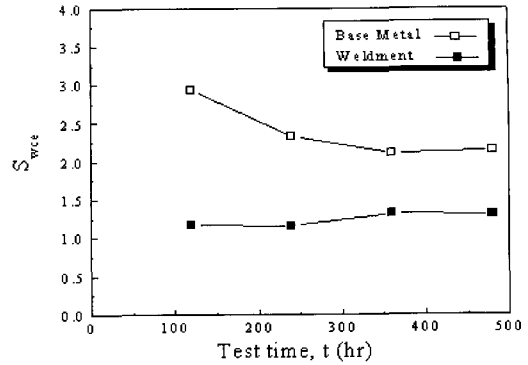


Fig. 7. Cavitation erosion sensitivity of weight loss (S_{wce}) of base metal and weldment in sea water.

으로 계산하였다.

$$S_{wce} = Wt_c / Wt_s \quad (1)$$

여기서,

Wt_c = weight loss of static stress and cavitation erosion-corrosion

Wt_s = weight loss of stress corrosion

이 결과에 의하면 무게감소량에 미치는 모재의 캐비테이션에 의한 침식감수성은 용접부에서 보다 더 민감하게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그러나, 모재의 캐비테이션에 의한 침식감수성은 용접부보다 시간이 경과함에 따라 크게 둔화되는 양상을 보이고 있다. 무게감소량에 미치는 모재의 캐비테이션 침식감수성이 용접부에서 보다 시간이 경과함에 따라 크게 둔화되는 양상을 보이는 것은 모재에 있어서는 캐비테이션 침식-부식에 의해 공식이 크게 성장되어 캐비테이션 기포의 완충작용에 의해 시간의 경과와 더불어 모재에서 무게감소량이 둔화되기 때문인 것으로 생각된다. 특히, 균열 주위를 따라 음극방식이 활성화되므로서 다소 무게감소량의 감소를 가져온 것으로 생각된다.

3. 무게감소에 미치는 용접부의 부식감수성

Fig. 8은 비저항 $25\Omega\text{cm}$ 인 천연해수 중에서 용접에 의한 용접열사이클이 용접부위의 무게감소량에 미치는 부식감수성을 정량적으로 구명하기

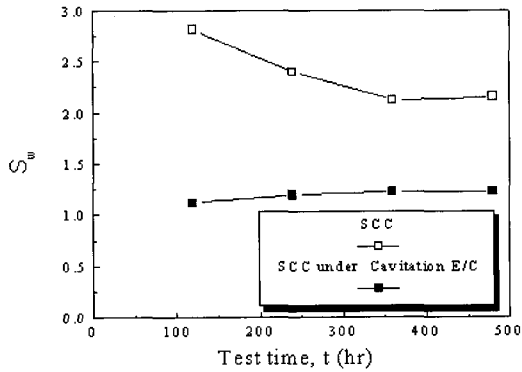


Fig. 8. Corrosion sensitivity by welding on weight loss (S_w) according to stress and cavitation in sea water.

위하여, 용접부의 무게감소량에 대한 모재의 무게 감소량과의 비를 계산에 의하여 비교함으로써, 정적응력하에서와 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서의 용접열사이클에 의한 무게감소량에 미치는 부식감수성을 평가하여 보인 것이다. 여기서 용접열사이클에 의한 무게감소량에 미치는 부식감수성 S_w 는 Fig. 5의 실험치를 이용하여 아래와 같이 (2)식으로 계산하였다.

$$S_w = Wt_w / Wt_b \quad (2)$$

여기서,

Wt_w = weight loss of weldment

Wt_b = weight loss of base metal

이 결과에 의하면 용접열사이클에 의한 무게감소량에 미치는 부식감수성은 정적응력하에서 보다 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서 전반적으로 더 둔감하게 나타나는 경향을 보이고 있으며, 용접열사이클에 의한 무게감소량에 미치는 부식감수성은 정적응력하에서는 시간이 경과함에 따라서 둔화되는 양상이지만, 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서는 시간이 경과함에 따라 약간 증가하는 추세를 보이고 있다.

이와 같이 정적응력하에서 보다 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서 용접열사이클에 의한 무게감소량에 미치는 부식감수성이 전

반적으로 더 둔감하게 나타나는 이유는 정적응력만이 작용하는 경우에 있어서의 부식감수성은 모재에 비해 용접열영향부가 부식에 민감하나 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서의 부식감수성은 기계적인 캐비테이션 침식이 모재에 비해 용접열영향부가 더욱 둔감하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 용접열사이클에 의한 무게감소량에 미치는 부식감수성이 정적응력하에서 시간이 경과함에 따라서 둔화되는 이유는 초기에는 부식이 활성화되어지나 시간이 경과함에 따라서 부식에 의한 부동태피막의 형성으로 용접열영향부의 부식이 둔화되기 때문이며, 용접열사이클에 의한 무게감소량에 미치는 부식감수성이 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서 시간이 경과함에 따라 약간 증가하는 이유는 용접열영향부에 부동태피막의 형성이 캐비테이션 기포에 의해 파괴되어지기 때문인 것으로 생각된다.

결론

- 1) 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서의 무게감소량이 정적응력하에서의 부식에 의한 무게감소량보다 더욱 증가하였다.
- 2) 캐비테이션 침식-부식에 의한 무게감소율이 시간 경과와 더불어 둔화되는 경향을 나타낸다.
- 3) 무게감소량에 미치는 모재의 캐비테이션 침식 감수성은 용접부에서 보다 더 민감하게 나타나는 경향을 보이고 시간이 경과함에 따라 크게 둔화되는 양상을 나타낸다.
- 4) 용접열사이클이 무게감소량에 미치는 부식감수성은 정적응력하에서 보다 정적응력이 작용하는 캐비테이션 침식-부식하에서 더 둔감하게 나타난다.

참고문헌

- 1) 전대회(1985) : 우리나라 부식계의 어제와 오늘, 한국부식학회지, 14(1), 33.
- 2) 驅井謙治郎(1983) : 應力腐蝕龜れ及び”腐蝕疲勞

- への破壊力学の應用,日本容接學會誌, 52(3), 23.
- 3) 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.
 - 4) 松田誠吾, 松島 嚴(1975): 腐蝕反應制御, 産業圖書出版, 東京, 71-126.
 - 5) 임우조(1986): 금속구조물의 응력과 부식, 한국 박용기관학회지, 10(1), 33.
 - 6) Kenneth R. Tretheway and Chamberlain, John (1988): Corrosion(for students of science and engineering), Longman Scientific & Technical, 153-156.
 - 7) 松島 嚴(1974): 炭素鋼, 低合金鋼の應力腐蝕龜れ, 鐵の鋼, 60-410.
 - 8) 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.
 - 9) Talks, M.G and Moreton, G.(1981-6): Proc. ASME Symp. Cavitation erosion Fluid System, 139.
 - 10) 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.
 - 11) Craig, H.L.(1976): Stress Corrosion New Approaches, STP610, 32-37.
 - 12) 渡邊 豊, 高橋秀明(1988): 炭素鋼の氣液2相流 中エローション” ヨン.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.
 - 13) Sekine, I. and Tanaki, T.(1991): Erosion-Corrosion Behavior of Copper Alloy under Flowing Water Condition, Zairyo toKankyo, 40(8), 527-532.
 - 14) Zahavi, J. and Wagner, H. J.(1980): Characterization of Erosion-Corrosion Process, The Metallurgical Society of AIME, 226-239.
 - 15) Matsumura, M. and Oka, Y.(1982): Influence of Erosion on Corrosion, Boshoku Gijutsu, 31(2), 67-69.