

LNG선박용 열교환기 세관의 SCC에 미치는 응력의 영향

임우조 · †정해규*

부경대학교 · *현대중공업

(2003년 4월 24일 접수, 2003년 6월 7일 채택)

The Effect of Stress on SCC of Heat Exchanger Tube for LNG Vessel

Uh Joh Lim and Hae Kyoo Jeong*

*Department of mechanical Engineering, Pukyong National University
San 100 YongDangDong, NamGu, Pusan, 607-739, KOREA*

**Outfitting Design Department No.3, Hyundai Heavy Industry Company
JeonHaDong, DongGu, Ulsan, KOREA*

(Received 24 April 2003 ; Accepted 7 June 2003)

요 약

Al-황동은 기계적 특성 및 열전도성이 우수하고 해수 중에서 표면 보호피막을 형성하므로 부식저항성이 높아 해수를 냉각수로 사용하는 선박용 열교환기의 세관재로 널리 사용되고 있다. Al-황동 세관은 실제 사용 환경에서 급힘 등에 의한 소성변형된 상태로 사용되는 경우가 많다. 이와 같은 소성변형에 의한 Al-황동 세관의 균열 파손사례는 선박의 오일 탱크 내의 가열코일, 각종 열교환기의 세관 등에서 흔히 찾아 볼 수 있다. 또한 세관의 확관에 의한 밀봉 방법에 따라 세관의 변형에 의한 잔류응력 및 어패류 혼입에 의한 해수 유입부의 국부적인 유속증가 등에 기인하여 Al-황동 세관의 균열 및 침식 등의 파손사례가 보고되고 있다. 본 연구에서는 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH 수용액을 시험편 표면에 5 m/s로 액분사하의 가속실험에서 Al-황동 세관의 응력부식균열 거동에 미치는 응력의 영향에 대하여 고찰하였다.

Abstract - Al-brass material is generally used at the state of plastic deformation, for example; bending, extension of bell mouth at shell and tube type heat exchanger. And SCC(stress corrosion cracking) of Al-brass material will be affected by residual stress as plastic deformation. SCC results from synergism between mechanical factor and corrosion environment. Mechanical factor is stress that directly relates with stress intensity factor at the crack tip.

This paper was studied on the effect of stress on SCC of Al-brass tube under in 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH solution by constant displacement tester. Increasing of acidified water flow into sea and speeds up corrosion rate of Al-brass which is used as a tube material of vessel heat exchanger by polluted coast seawater.

The experimental results are as follow. The latent time of SCC occurrence gets longer as the initial stress intensity factor(K_{II}) gets lower. The main crack was propagated as the initial stress intensity factor(K_{II}) gets higher, and secondary cracks

occurred by electro-chemical factor after stage of released stress. Dezincification phase showed around the crack, and the range of dezincification gets wider as the initial stress intensity factor(K_{II}) gets higher.

Key words : SCC, Al-Brass tube, dezincification, constant displacement test

1. 서 론

에너지의 소비량이 증가됨에 따라 유황화합물인 SO_2 , SO_3 및 H_2S , 질소화합물인 NO 와 NH_3 , 산화물인 CO 그리고 염화물인 HCl 과 Cl_2 등의 대기오염물질 배출이 증대됨으로써 환경오염을 가속시키고 있다. 이들 대기오염물질 중에서 SO_2 , SO_3 , 및 CO 등은 대기 중의 수분이나 물에 혼입되거나 산성비에 의해 하천이나 강물 등의 담수가 산성화되며, HCl 및 Cl_2 등은 물에 혼입되면 일부는 가수분해에 의해 산성화된다[1]. 이와 같이 산성화된 담수가 바다에 유입되어 연안 해수는 오염되고, 오염해수 사용으로 인한 기계류의 부식손상은 가속되는 추세이다.

이러한 대기오염의 감소 및 대체 에너지의 필요에 따라 액화천연가스(LNG)의 사용량이 증가되고 있다. 세계적으로 액화천연가스의 소비량이 증대됨에 따라 LNG선박의 건조량이 급증하고 있는 추세이다. LNG 선박은 가스를 $-162^\circ C$ 의 극저온상태를 유지하여 액상으로 가스를 운반하는 특수 선박으로서 선박의 꽃이라 불릴 만큼 최고의 건조기술을 요하는 선박이다. LNG 선박은 운송중인 잔여 가스를 이용하여 증기를 발생시켜 증기터빈으로 추진하는 선박으로서 왕복동기관으로 구동하는 일반상선과는 구동 시스템이 전혀 다르다. 이러한 선박에는 증기터빈콘덴스, 오일 쿨러 및 윤활유 쿨러 등 많은 종류의 열교환기가 사용되고 있으며, 열교환기들은 종류에 따라 가스, 유류, 해수 등 다종의 열전달 매체와 열전달 매체의 온도 및 유속범위가 다양한 환경에서 사용되며 주기관 및 보조기계류의 구동에 의한 선체 진동 등 외부환경이 가혹한 상태에서 사용되고 있다.

Al-황동은 기계적 특성 및 열전도성이 우수하고 해수 중에서 cuprous oxide(Cu_2O)와 같은 표면 보호피막을 형성하므로 부식저항성이 높아 해수를 냉각수로 사용하는 열교환기의 세관재로 널리 사용되고 있으며, 이러한 Al-황동 세관은 실제 사용 환경에서 굽힘 등에 의한 소

성변형된 상태로 사용되는 경우가 많다. 이와 같은 소성변형에 의한 Al-황동 세관의 균열 파손사례로는 선박의 오일 탱크 내의 가열코일, 각종 열교환기의 세관 등에서 흔히 찾아볼 수 있다. 또한 세관의 확관에 의한 밀봉 방법에 따라 세관의 변형에 의한 잔류응력 및 어패류 혼입에 의한 해수 유입부의 국부적인 유속증가 등에 의한 Al-황동 세관의 균열 및 침식 등의 파손사례가 보고되고 있다[2-4].

특정한 부식환경 중에 있는 금속구조물은 항복점이하의 비교적 낮은 응력에도 균열이 일어날 수 있으며, 이것을 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking, SCC)이라 칭한다. 이러한 SCC가 발생하기 위해서는 전기화학적 부식인자와 기계적인 응력인자가 동시에 작용해야 하며, 이러한 인자들의 상승효과에 의해 SCC가 발생 및 진전되는 것으로 보고되고 있다[5-6].

본 연구에서는 Al-황동 세관(tube)의 SCC 거동에 미치는 응력의 영향을 고찰하기 위하여, 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH 수용액의 유동 중에서 부하 응력을 항복강도 이하로 변화하였을 때 응력의 변화에 따른 응력부식균열의 발생 및 진전 거동을 고찰하고, 응력 변화에 따른 Al-황동 세관의 탈아연 현상에 대한 상관관계를 규명하였다.

2. 시험편 및 실험 방법

2.1. 시험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 원통다관형 열교환기 세관재로 주로 사용되고 있는 Al-황동으로 그 화학적 조성과 기계적 특성은 Table 1과 같다. Table 1과 동일한 화학 성분 및 기계적 특성을 가진 Al-황동 세관(C6870T)으로부터 절취하여 시험편으로 사용하였고 이러한 절취 중에 시험편에 미치는 열영향을 최소화하기 위하여 저속으로 가공하였으며 가공 후 시험편의 표면은 사포 #800-1200번으로 연마하고 아세톤으로 탈지하여 사용하였다. 이러한 시험편의 형상 및 크기는 Fig. 1과 같이

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of Al-Brass(C6870T).

Chemical composition (wt %)	Cu	Pb	Fe	Al	As	Zn
		76.0	0.05	0.05	1.85	0.02
Mechanical properties	Tensile Strength (N/mm ²)		Yield Strength (N/mm ²)	Hardness (HR30T)	Elongation (%)	Grain Size (μ m)
	345		125	-	39	40

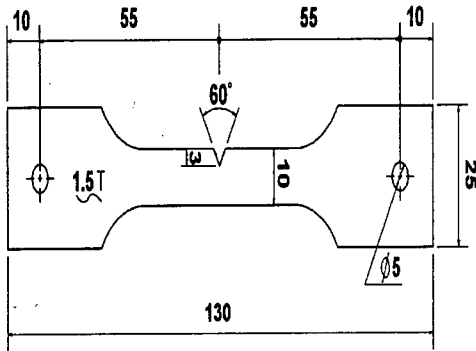


Fig. 1 Dimension of single edge notched test specimen(unit : mm).

SEN[7](Single Edge Notched) 시험편으로 제작하였다. 본 실험에 사용된 시험편의 노치반경은 0.2mm로 제작되었으므로 SEN시험편 형상에 따른 노치선단에 있어서의 초기 응력강화계수(initial stress intensity factor) K_{II} 값은 다음 식(1)으로 계산된다[8].

$$K_{II} = Y \sigma \sqrt{a} \text{-----} (1)$$

$$Y = 1.99 - 0.41 \lambda + 18.70 \lambda^2 - 38.48 \lambda^3 + 53.85 \lambda^4$$

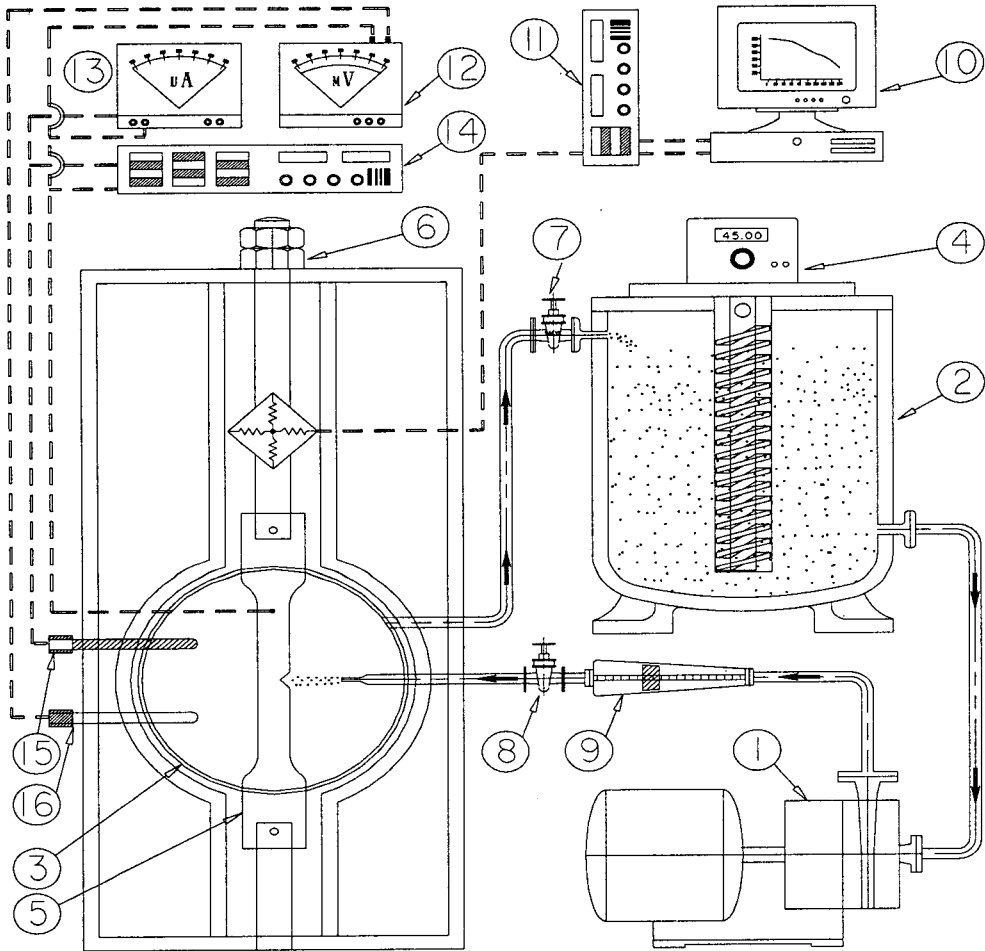
σ =응력, $\lambda = a/w$, a =노치길이, w =시험편의 폭

2.2. SCC 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 용액분사하의 SCC 실험장치의 전체계통도는 Fig. 2와 같다. 인장시험기는

일정변위형 실험장치(Constant Displacement Tester, CDT)로서 인장시험기에 시험편을 고정 한 후 인장용 조임볼트를 이용하여 부하 하중을 조절할 수 있도록 하였으며, 시험편에 연결된 로드셀(Load cell) 및 AD converter를 거쳐 부하하중 Data가 컴퓨터에 저장될 수 있도록 설계 및 제작하였다. 또한 용액분사장치의 구성은 실험중 전기화학적 부식에 의한 영향을 최소화하기 위하여 마그네틱 펌프 및 석영관히터를 사용하였고 수조, 배관 및 밸브 등은 아크릴 및 PVC로 제작 설치하였다. 또 액분사하에서 응력부식균열 거동을 연구하기 위하여, 시험편 상부 50mm 지점에 노즐(ϕ 5mm)을 설치하고 밸브 및 유량계를 이용하여 유속범위를 0 m/s ~ 9 m/s로 조절 할 수 있도록 하였다. 용액의 온도 변화를 위하여 수조내에 히터를 설치하고 온도조절기를 이용하여 온도 범위를 상온에서 75℃까지 조절 할 수 있도록 하였으며, 누설을 방지하기 위하여 각 연결부에 고무오링으로 기밀을 유지하였다.

본 연구에서는 Al-황동 세관의 응력부식균열에 미치는 응력의 영향을 연구하기 위하여, Fig. 2의 일정변위실험(CDT)장치에 시험편을 고정 한 후 인장용 조임볼트를 이용하여 초기응력강화계수 K_{II} 값을 각각 438 N.mm^{-3/2}(50% σ_y), 525 N.mm^{-3/2}(60% σ_y), 570 N.mm^{-3/2}(65% σ_y), 657 N.mm^{-3/2}(75% σ_y), 855 N.mm^{-3/2}(95% σ_y)로 변화하였다. 또 실험용액은 3.5% NaCl 수용액에 가속실험을 위하여, 0.1% NH₄OH를 첨가하여 실험용액으로 사용하였고, 실험용액의 온도는 30℃ ± 1℃로 일정하게 유지하였으며, 시험편 표면에 5m/s의 유속으로 액분사하여 수충격을 부가하였다. 또한 실험시간은 160시간 동안 실시하였고, 균열길



- 1. magnetic pump
- 2. test liquid tank
- 3. test liquid chamber
- 4. cylinder type heater
- 5. specimen
- 11. A/D convert
- 13. ampere meter
- 15. counter electrode

- 6. tension jig with load cell
- 7. supply control valve
- 8. discharge control valve
- 9. flowmeter
- 10. computer
- 12. potentiometer
- 14. power supply
- 16. reference electrode

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

이의 측정은 용액의 순환을 정지하고 확대경으로 매 10시간 단위로 측정하였으며, 실험상태에서 하중방향으로 다이얼 게이지를 설치하여 실제 균열성장과 비교하였다.

그리고 Al-황동세관의 응력부식균열 시험을 실시한 후 실험장치로부터 시험편을 해체한 후, 연마한 다음 초음파 세척기로 3분 세척하여, 알코올로 탈지 및 열풍으로 건조한 후 25g FeCl₃ + 25mL HCl + 100mL 수용액에 20초간 Etching[9]하여 광학현미경 및 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)가 장착된 주사현미경(SEM)을 이용하여 조직을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. SCC 발생 및 진전 거동

Fig. 3은 30℃인 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH 수용액을 시험편 표면에 5m/s로 분사하에서 초기응력강화계수 K_{li} 값의 변화에 따른 Al-황동 세관의 SCC 발생 및 진전 거동을 나타낸 것이다.

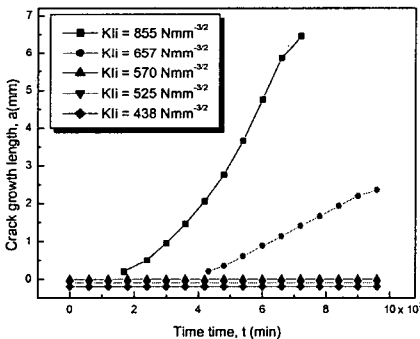


Fig. 3 Crack growth length vs test time(hr) in 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH solution(30℃, v=5%).

초기응력강화계수 K_{li} = 855 N·mm^{-3/2}(95% σ_y)하에서 Al-황동 세관의 SCC 발생은 가장 빨리 일어나고, 실험시간의 경과에 따라 SCC 진전 거동은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 초기응력강화계수 K_{li} = 657 N·mm^{-3/2}(75% σ_y)하에서 Al-황동 세관의 SCC 발생은 초기응력강화계수 K_{li} = 855 N·mm^{-3/2}(95% σ_y)하에서 Al-황동 세관의 SCC

발생보다 더 지연되고, 실험시간의 경과에 따른 SCC 진전 거동은 크게 둔화되는 양상이다. 그러나 초기응력강화계수 K_{li} = 570 N·mm^{-3/2}(65% σ_y)이하에서는 본 연구의 실험시간인 160시간 경과 후에도 Al-황동 세관의 SCC 발생은 관찰되지 않았다.

일반적으로 실용되는 부식환경 중에서는 SCC가 억제되는 한계응력값(threshold stress for cracking)이 존재하지만, 가혹한 부식환경 중에서는 SCC가 억제되는 한계응력값이 명확하지 않는 것으로 보고[10-11]되고 있으므로 본 연구의 가속실험인 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH 수용액을 시험편 표면에 5 m/s로 액 분사하에서 Al-황동 세관의 한계응력값의 존재 여부를 고찰하고자, Fig. 4에 초기응력강화계수 K_{li} 값의 변화에 따른 Al-황동 세관에 대한 노치선단에서 균열발생까지의 잠복기간을 정리하여 나타내었다.

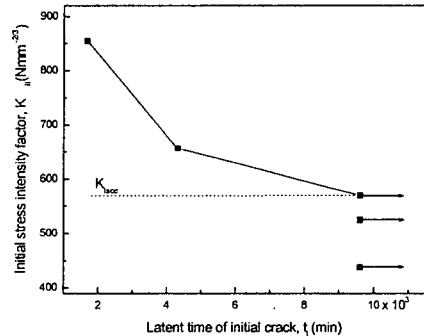


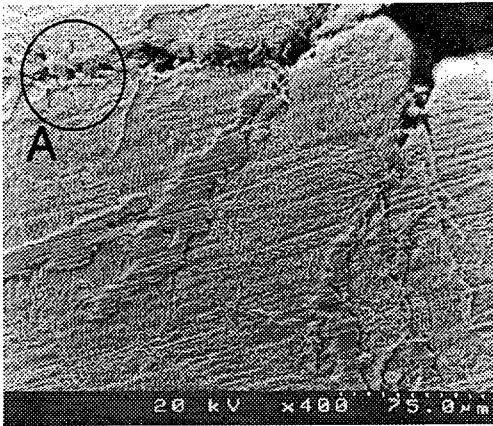
Fig. 4 Latent time of initial crack vs Initial stress intensity factor in 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH solution(30℃, v=5%).

초기응력강화계수 K_{li} 값이 낮아짐에 따라 노치선단에서 균열발생까지의 잠복기간은 지연되는 경향을 보이고 있다. 또한 항복강도의 65%인 초기 응력강화계수 K_{li} = 570 N·mm^{-3/2}(65% σ_y)값 이하에서 노치선단에서 균열이 발생하지 아니함으로써 응력부식균열이 억제되는 한계 초기응력강화계수(K_{lisc}) 값이 존재함을 알 수 있다.

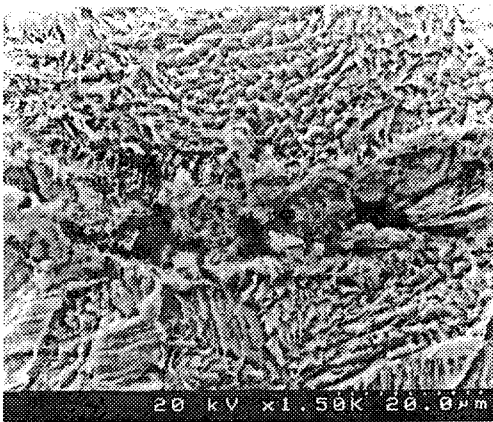
3.2. 응력부식균열에 따른 손상양상

Fig. 5는 30℃인 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH

수용액을 시험편 표면에 5 m/s로 액분사하에서 항복강도 75%인 초기응력강화계수 $K_{II} = 657 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 을 부하 하였을 때 나타난 Al-황동세관의 SCC 진전 파면을 주사형 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 여기서, Fig. 5(a)는 노치선단에서 균열전전 거동을 나타낸 것이고, Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 응력부식균열 선단부 위인 A부위를 확대하여 나타낸 것이다.



(a) Appearance of crack propagation



(b) Crack tip of A region

Fig. 5 SEM fractography of SCC at $K_{II}=657 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ (75% σ_y) in 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH solution (30 $^\circ\text{C}$, $v=5\%$).

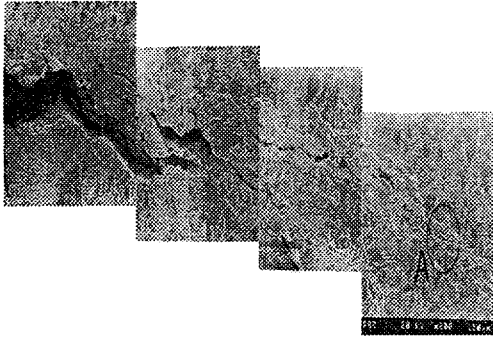
Fig. 5(a)는 노치선단부에서 초기응력강화계수 $K_{II} = 657 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 의 부하에 의한 전단응력이 최대가 되는 슬립계적(slip trace)을 따라 균열이 성장되는 양상을 보이고 있다. 이와 같은 양상은 인장응력으로 인한 슬립계적 부위는 응력집중에 의해 양극으로 되고 변형되지 않은 슬립계적 주위 부분은 음극으로 되면서 갈바닉(galvanic) 전지회로가 형성되어 응력집중부위에 국부적으로 선택적 양극용해[12-13]가 발생하여 슬립계적을 따라 균열이 성장되는 것으로 사료된다. 또한 선택적 양극용해는 Table 1의 화학적 성분 중 양성금속이면서 전위(potential)가 가장 낮은 Zn이 탈리될 것으로 추정된다.

Fig. 5(b)에서는 균열선단부위에 미세균열과 공식(pit)들이 형성되어 있음을 알 수 있다. 또한 미세균열과 공식 부위에 탈아연현상(dezincification)[14]으로 추정되는 부위가 관찰되고 있다.

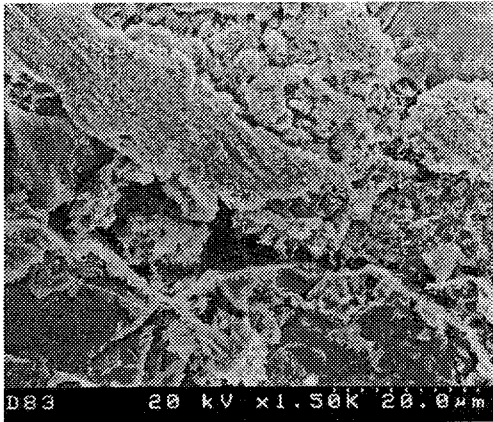
Fig. 6은 30 $^\circ\text{C}$ 인 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH 수용액을 시험편 표면에 5 m/s로 액분사하에서 항복강도 95%인 초기응력강화계수 $K_{II} = 855 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 을 부하하였을 때 나타난 Al-황동세관의 SCC 진전 파면을 주사형 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 여기서, Fig. 6(a)는 노치선단에서 균열전전 거동을 나타낸 것이고, Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 응력부식균열 선단부 위인 A부위를 확대하여 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)는 노치선단부에서 초기응력강화계수 $K_{II} = 855 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 의 부하에 의한 전단응력이 최대가 되는 슬립계적을 따라 주균열이 크게 성장되고 주균열선단에 부균열 혹은 미세균열이 많이 성장되어 있는 양상을 보이고 있다. 초기응력강화계수 K_{II} 값이 높아짐에 따라 주균열이 진전되다가 부균열이 발생하는 이유는 일정변위시험장치의 특성에 의해 균열전전에 따라 응력이 완화되면서 기계적 인자보다 전기 화학적 인자의 지배에 의해 선택적 양극용해로 추정되는 탈아연현상이 심하게 일어나는 부위를 따라 부균열이 발생하여 성장하는 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 Fig. 5(b)에서와 같이 미세균열과 공식들이 형성되어 있고, 미세균열과 공식 부위에 탈아연현상으로 추정되는 부위가 좀 더 명확하게 관찰되고 있다.



(a) Appearance of crack propagation



(b) Crack tip of A region

Fig. 6 SEM fractography of SCC at $K_{II}=855 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ ($95\% \sigma_y$) in 3.5% NaCl + 0.1% NH₄OH solution (30°C, v=5%).

3.3. 응력부식균열에 미치는 탈아연화 특성

Fig. 5 및 Fig. 6에서 탈아연현상으로 추정되는 부위가 SCC 선단부위에서 관찰됨으로써 Al-황동 세관의 SCC 발생 및 진전에 미치는 탈아연 현상을 좀 더 정량적으로 고찰을 하기 위하여, SCC 시험 후 탈아연 현상이 일어나지 아니할 것으로 추정되는 부위와 SCC 시험 후 균열 선단부위에 탈아연 현상이 일어난 것으로 추정되는 경계부위를 SEM 및 EDS로 성분 분석한 결과를 Fig. 7 ~ Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 7은 SCC 시험후 탈아연 현상이 일어나지 아니할 것으로 추정되는 부위인 Al-황동

세관재 시험편 표면에 대해 SEM을 이용하여 관찰한 사진으로서 수많은 층상 쌍정을 가지고 규칙적으로 경계를 이룬 다면체로 α/β -황동 [15] 조직을 나타내고 있다.

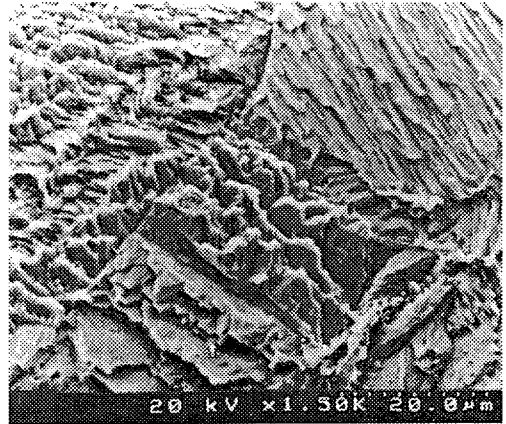
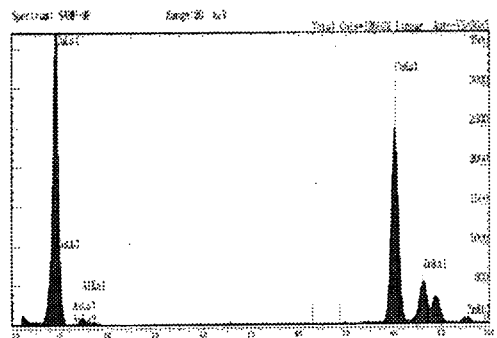


Fig. 7 SEM micrograph after SCC test at the region of zincification.

Fig. 8은 SCC 시험후 탈아연 현상이 일어나지 아니할 것으로 추정되는 부위에 대한 화학 조성을 EDS 분석한 결과이며, 이 화학조성에서 아연 성분은 Table 1의 아연 성분과 같이 나타남으로써 탈아연현상은 일어나지 아니한 것으로 판단된다.



Chemical composition(wt%)	Cu	Zn	Al	Fe	As	Pb
	76.0	22.03	1.85	0.05	0.02	0.05

Fig. 8 EDS spectrum of Al-brass material at the region of zincification.

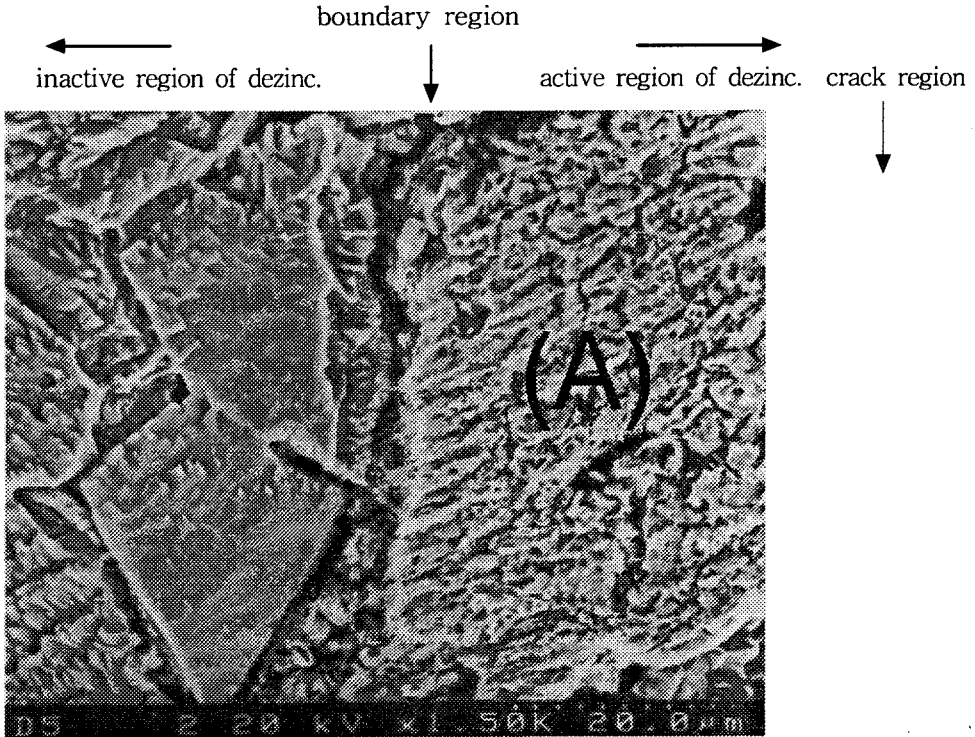
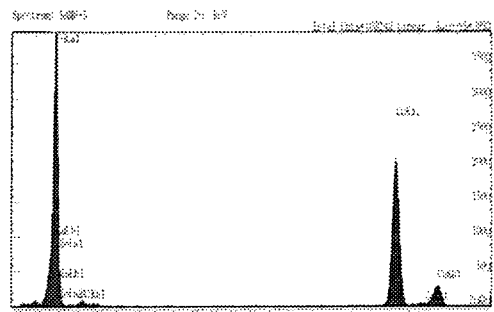


Fig. 9 SEM micrograph observed at $K_{II}=657 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}(75\% \sigma_y)$ in 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH solution(30°C, $v=5\text{m/s}$) after test time 160hr.

Fig. 9는 30 °C인 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH 수용액 중에서 시험편 표면에 5 m/s로 액분사 하에서 항복강도 75%인 초기응력강화계수 $K_{II} = 657 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 을 부하하였을 때 나타난 Al-황동세관의 SCC 미세균열과 공식 부위에 대한 탈아연현상으로 추정되는 경계부위를 SEM에 의해 관찰한 것이다.

미세균열 부위에 인접한 탈아연부위로 추정된 영역에서는 거의 순수한 α -황동[16]으로 형성되어 있으며, 탈아연에 의한 미세균열과 공식이 많이 발생하는 탈아연의 활성영역이 나타나고 있다 [17]. 그러나 미세균열과 공식으로부터 벗어나는 탈아연 경계부 좌측의 탈아연 영향부에서는 탈아연현상이 일부 진행됨으로써 Fig. 7과 같은 층상이 거의 사라진 상태를 나타내고 있다.

Fig. 10은 Fig. 9의 탈아연부위를 EDS로 성분 분석한 결과로서 Fig. 8의 SCC 시험후 탈아연 현상이 일어나지 아니한 부위와 비교했을 때 Zn 함유율이 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.



Chemical	Cu	Zn	Al
composition(wt%)	95.79	3.85	0.36

Fig. 10 EDS spectrum of (A) dezincification region at $K_{II}=855 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}(75\% \sigma_y)$ in 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH solution(30°C, $v=5\text{m/s}$) after test time 160hr.

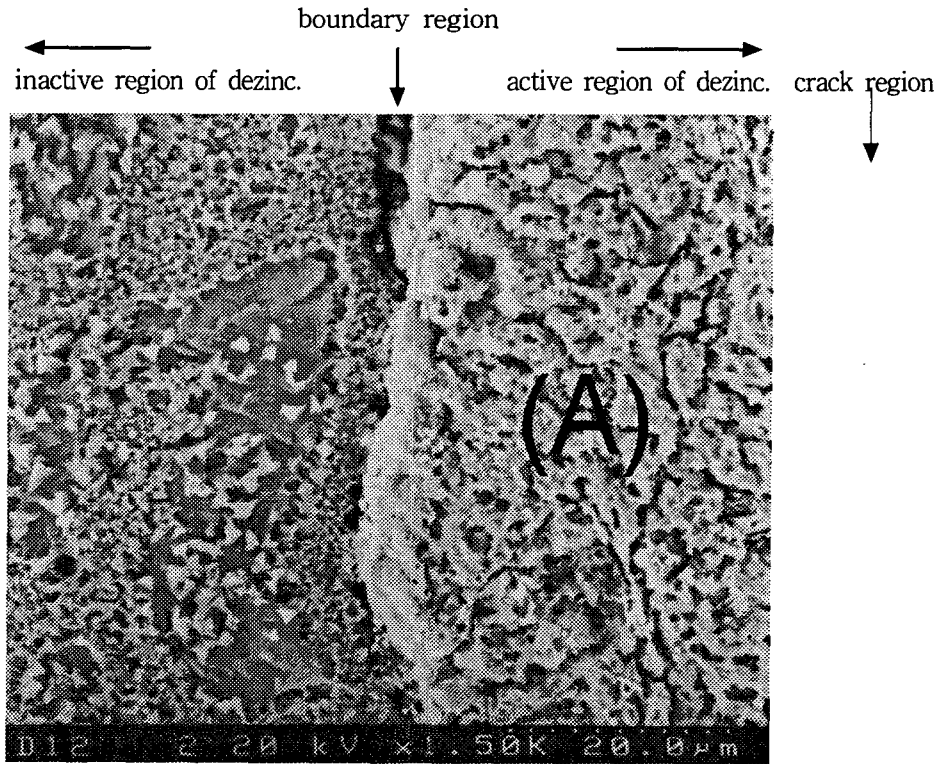


Fig. 11 SEM micrograph observed at $K_{II}=855 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ ($95\% \sigma_y$) in 3.5% NaCl+0.1% NH_4OH solution (30°C , $v=5\text{m/s}$) after test time 160hr.

Fig. 11은 30°C 인 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH 수용액 중에서 시험편 표면에 5 m/s로 액분사하에서 항복강도 95%인 초기응력강화계수 $K_{II} = 855 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 을 부하하였을 때 나타난 Al-황동세관의 SCC 미세균열과 공식 부위에 대한 탈아연현상으로 추정되는 경계부위를 SEM에 의해 관찰한 것이다.

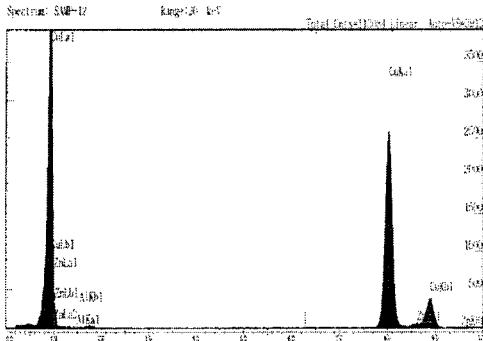
Fig. 9의 항복강도 75%인 초기응력강화계수 $K_{II} = 657 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 을 부하 하였을 때와 같이 탈아연부위로 추정된 영역에서는 거의 순수한 α -황동으로 형성되고, 탈아연에 의한 미세균열과 공식이 많이 발생하는 탈아연의 활성영역이 더 민감하게 나타나고 있다. 그러나 Fig. 9의 항복강도 75%인 초기응력강화계수 $K_{II} = 657 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 을 부하하였을 때와는 달리 탈아

연 경계부 좌측의 탈아연 영향부에서도 탈아연 현상이 더 많이 진행되면서 미세균열과 공식이 일부 성장되고 있다. 즉, 초기응력강화계수 K_{II} 값이 높아짐에 따라 SCC 균열 부위의 탈아연 영역이 더 넓게 성장되고 있다. 이와 같이 초기응력강화계수 K_{II} 값이 높아짐에 따라 탈아연 범위가 넓게 발생하고 있는 이유는 균열선단 부위에 집중응력이 더 크짐에 따라 갈바닉 회로가 활성화됨으로써 양극용해가 더 넓은 영역에 일어나기 때문인 것으로 판단된다[18].

Fig. 12는 Fig. 11의 탈아연부위를 EDS로 성분 분석한 결과로서 Fig. 8의 탈아연현상이 나타나지 아니한 시험편 부위와 비교했을 때 Zn 함유율이 크게 감소하고 있음을 알 수 있으며, Zn 함유율은 Fig. 10의 항복강도 75%의

부하응력에 비해 좀 더 감소한 양상이다.

Fig. 10 및 Fig. 12의 Zn 성분은 Fig. 8의 탈아연 현상이 일어나지 아니한 부위의 Zn 성분보다 크게 감소함으로써 Fig. 5 및 Fig. 6에서 추정된 바와 같이 실제 선택부식인 탈아연 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다.



Chemical composition(wt%)	Cu	Zn	Al
	96.44	3.23	0.33

Fig. 12 EDS spectrum of (A) dezincification region at $K_{II}=855 \text{ N. mm}^{-3/2}$ ($95\% \sigma_y$) in 3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH solution (30°C , $v=5\text{m/s}$) after test time 160hr.

4. 결 론

3.5% NaCl + 0.1% NH_4OH 수용액을 시험편 표면에 5 m/s로 액분사하의 가속실험에서 Al-황동 세관의 응력부식균열 거동에 미치는 응력의 영향에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초기응력강화계수 K_{II} 값이 낮아짐에 따라 잠복기간은 지연되고, 본 연구의 가속 실험에서도 Al-황동 세관의 한계 초기응력강화계수값(K_{IIsc})이 존재한다.
- 2) 초기응력강화계수 K_{II} 값이 높아짐에 따라 SCC 진전 거동은 주균열이 진전되다가 응력완화에 의해 기계적 인자보다 전기화학적 인자가 지배되면서 선택적 양극용해가 일어나는 부위를 따라 부균열이 발생하여 성장하는 것으로 판단된다.
- 3) SCC 선단부의 응력집중에 따라 미세균열

주위에 탈아연현상이 일어나는 것으로 판단되며, 이러한 탈아연 범위는 초기응력강화계수 K_{II} 값이 높아짐에 따라 확산된다.

참 고 문 헌

- 1) Denny A. Jones : Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan publishing Co., p. 398-401, (1991).
- 2) H. I. Lee and K. K. Back : Hyundai Industrial Research Institute, Effects of Grain Size and Plastic Deformation on the SCC Susceptibility of Al-Brass Tube, (2001).
- 3) Evert D. D. Corrosion Atlas, p. 511~560, (1997).
- 4) U. J. Lim and H. K. Jeong : Study on the Characteristics of Erosion-Corrosion for Heat Exchanger of Shell & Tube Type(I), Kor. Soc. Fish. Tech. Vol. 35, No. 2, p. 196~200, (1995).
- 5) Corrosion and Corrosion Control, Hebrt H. Uhlig, p.338,(1991).
- 6) Atlas of Stress-Corrosion and Corrosion Fatigue Curves, A. J. McEvily, ASM International, p. 353,(1990).
- 7) W. F. Brown, Jr. and J. E. Srawley, "Plan Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials," ASTM STP 410
- 8) A. R. Jack & A. T. Price, "The initiation of fatigue cracks from notches in mild steel plates" Int. J. of fracture Mech., Vol. 6 No. 4, 401-409, (1970).
- 9) ASTM Standards, E407-99, Standard Practice for Microetching Metal and Alloys
- 10) 임우조, 양학회, .. "부식과방식", 원창출판사, p195 (1994).
- 11) Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 3rd ed, p274, (1996)
- 12) N. W. Polan, Metals Handbook, Vol. 13, Corrosion, 9th ed., ASM International, Metals Park, OH, p. 614 (1987).
- 13) R. H. Heidersbach and E. D. Verink, Corrosion, Vol. 28, p. 397, (1972).

- 14) Denny A, Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 3rd ed, p326, (1996)
- 15) H. Schumann, Metallographie p. 481, (1996).
- 16) H. Schumann, Metallographie p. 488, (1996).
- 17) H. H. Uhlig and R. W. Revie, Corrosion and Corrosion Control, 3rd ed., Wiley, New York, p. 334, (1985).
- 18) 임우조, 양학회, .. “부식과방식”, 원창출판사, p212 (1994).