

산성안개 하의 구조용강에서 피로균열의 발생 및 정류특성

김민건[†] · 김진학* · 김명섭** · 지정근** · 구은희**
(2001년 7월 11일 접수, 2001년 11월 7일 심사완료)

Properties of Fatigue Crack Initiation and Arrest in Structural Steel Under Acid Fog

Mingun KIM, Jinhak KIM, Myungsub KIM, Juengkeun JI and Eunhoi KU

Key Words: Corrosion Fatigue(부식피로), Acid Fog(산성안개), Fatigue Strength(피로강도), Crack Initiation(균열발생), Non-propagating Crack(정류균열), Aspect Ratio(형상비)

Abstract

Corrosion fatigue tests were carried out to clarify the influence of acid fog as environmental factor on the fatigue strength of SM55C using rotary bending fatigue tester. The fatigue strength of acid fog specimen extremely decreased about 80% compared to that of distilled water specimen. In acid fog environment, a number of cracks commenced at corrosion pit and coalesced with the adjacent cracks during they propagate, and they formed a single non-propagating circumferential crack under the endurance stress of $N=5 \times 10^7$ cycles. Also, the depth of the crack is smaller than that of normal fatigue crack, so the crack has a very small aspect ratio. The reason of this peculiar crack growth characteristics is that the crack opening-closure behaviors are hindered by corrosion products on the surface crack faces, and hence it is thinkable that the strong corrosion action like anodic dissolution for crack growth in depth direction is weaker compared with surface, resulting from faint pumping action of crack during loading-shedding processes.

1. 서론

산업혁명이후 급속한 경제발달로 인한 산업활동의 증가로 자동차, 발전소, 공장 등에서 나오는 연소가스에 의해 대기는 급속도로 오염되어 왔다. 이와 같은 대기질 악화에 의하여 초래된 현상의 하나로서의 산성비는 농작물과 산림의 파괴, 건축물의 부식은 물론 인체의 건강에까지 영향을 미치는 요인으로 지목되고 있다.⁽¹⁾

최근, 산성안개는 산성비보다 더 많은 오염물질(NOx, SOx, Cl 등)을 포함하고 있는 것으로 알

려지고 있다.⁽²⁾ 안개는 비보다 대기 중에 체재하는 시간이 매우 길기 때문에 오염물질의 유입이 지속적으로 이루어지며, 광화학 반응에 의한 오염물질의 2차 생성으로 인하여 비보다 오염물질의 농도가 매우 높다.

이러한 산성안개는 산성비와 마찬가지로 금속 구조물에 대하여 충분한 분위기조장 파괴를 일으킬 것으로 예상되며, 작은 틈새에도 용이하게 침투할 수 있는 안개의 특성상 산성안개는 비보다 훨씬 심각한 영향을 줄 수 있다.

저자는 앞선 보고^(3,4)에서, 산성안개 분위기에서 피로균열의 전파는 안개의 pH에 크게 의존하며, 강산성의 안개수(pH=3)가 균열면 용해를 촉진하여 균열의 전파를 가속시킴을 규명하였다. 이러한 사실로 미루어, 산성안개는 구조물의 피로강도의 현저한 저하는 물론, 독특한 피로거동을 보일 것으로 예상된다.

[†] 책임저자, 회원, 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부
E-mail : kmg@cc.kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6313 FAX : (033)250-6313

* 일본 산업기술종합연구소

** 강원대학교 대학원 기계공학과

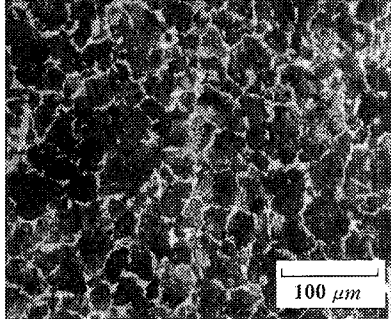


Fig. 1 Microstructure of the experimental material

Table 1 Chemical compositions of experimental material(wt.%, Balanced Fe)

	C	Si	Mn	P	S
SM55C	0.58	0.17	0.70	0.01	0.0003

Table 2 Mechanical properties of experimental material

	σ_B (MPa)	σ_Y (MPa)	δ (%)	Hv	E (GPa)
SM55C	828	468	12	312	200

σ_B : Ultimate tensile strength

σ_Y : Yield strength, 0.2% offset stress

δ : Elongation

Hv : Vickers hardness

E : Young's modulus

그러나, 산성안개가 금속구조물의 부식피로거동에 미치는 영향에 관한 연구는 국내외적으로 찾아볼 수 없으며, 기존의 부식피로에 관한 연구들은 대부분 단일 부식 환경 하에 노출된 부재에 관한 것들이다.^(5,6)

따라서 본 연구에서는, 다수의 오염물질(부식물질)을 지닌 산성안개가 구조용 강재의 피로강도에 미치는 영향에 대하여 조사하고, 특히 피로균열의 발생 및 정류거동을 고찰하고자 한다.

2. 실험재료, 시험편 및 실험방법

실험재료는 시판되는 기계 구조용 탄소강인

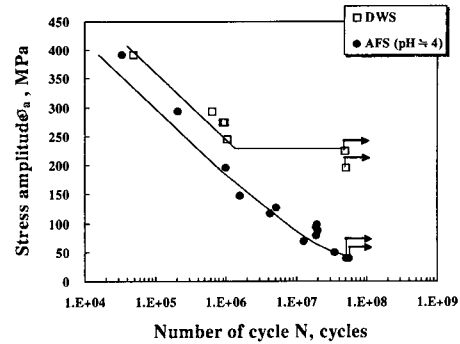


Fig. 2 S-N curves of the specimens

SM55C이며, Fig. 1에 조직사진을 나타내었다.

또한 화학성분 및 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

시험편의 형상은 시험부 최소직경이 $\phi 9$, R20의 회전굽힘 피로시험기용이며, 시험부는 에머리 페이퍼(#800~#1200)로 연마하였다.

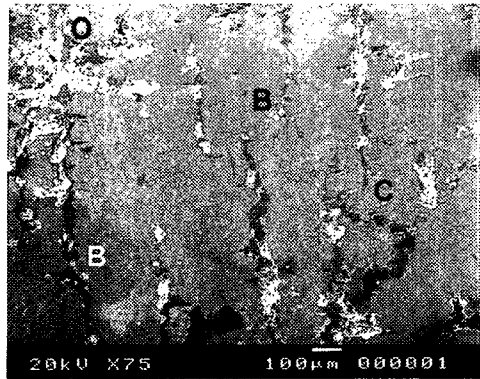
시험분위기로는 pH≈4인 산성안개와 비교하기 위하여 오염되지 않은 안개를 가정 한 증류수를 사용하였다. 산성안개의 채취는 자체 제작한 안개채집기를 사용하였으며,⁽³⁾ 산성안개의 주성분인 H₂SO₄를 극미량 첨가하므로써 pH≈4로 조정하여 실험하였다. 시험편에의 증류수와 산성안개수의 공급은 드롭 앤 폴다운(Drop and fall down)방식으로 하였다.

시험속도는 회전굽힘 피로시험기(3600RPM)에 인버터(LG, 8V0221G-2)를 장착하여 20Hz로 조정하여, 환경노출시간을 최대한 길게 배려하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피로강도에 미치는 산성안개의 영향

SM55C를 사용하여, 증류수(DWS : Distilled Water Specimen)와 pH≈4인 산성안개수(AFS : Acid Fog Specimen) 분위기 하에서 피로시험을 행한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2를 참고하면, AFS의 경우에는 부하응력을 낮추어도 피로한도의 존재를 의미하는 니이(Knee)는 출현하지 않고, 피로강도는 계속 저하하고 있다. 반면, DWS는 습윤 분위기에 도 불구하고 일반적인 철강재료에서 나타나는 것과 마찬가지로 10⁶ 회의 수명 부근에서 뚜렷한 니이(Knee)가 출현하고 있다.



O : crack origin B : crack branch
C : crack coalescence

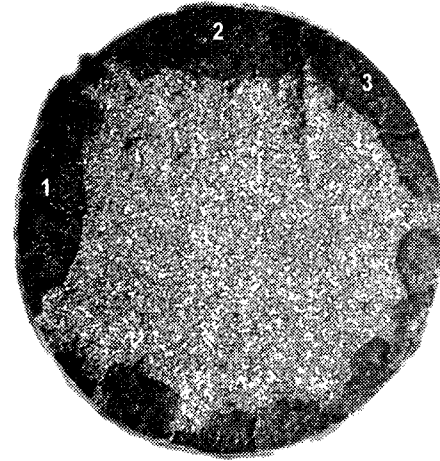
Fig. 3 Photograph of surface cracks observed on AFS surface ($\sigma_a=40$ MPa, $N=5 \times 10^7$)

따라서, 명확한 피로한도가 나타나지 않는 부식피로의 특성을 고려하여, 5×10^7 회의 시간강도를 기준으로 양 재의 피로시험 결과를 비교하였다. 먼저, 5×10^7 회의 시간강도는 DWS는 225 MPa, AFS는 40 MPa이었다. 즉, 산성안개 분위기 하에서 SM55C의 피로강도가 증류수 분위기 하에 비하여 80% 이상 대폭 감소하였다. 이러한 사실은 산성안개 내에 포함되어 있는 강산성의 부식물질이 원인인 것으로 생각된다.

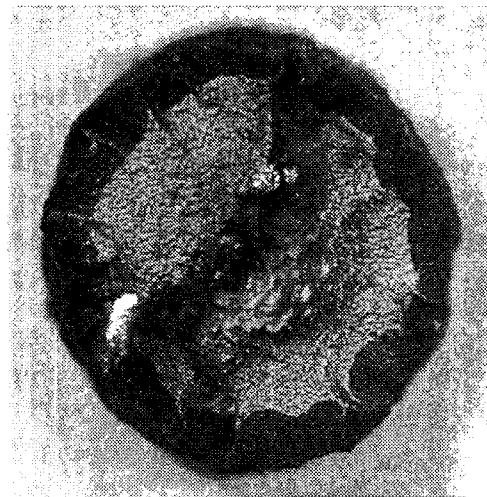
또한, $\sigma_a = 200$ MPa 이상의 동일 응력레벨에서 양재의 피로수명을 비교해 보면, DWS보다 AFS의 수명이 매우 짧은 것을 알 수 있고, 이러한 차는 부하응력 진폭이 작아질수록 현저해지고 있다. 부하응력이 작아질수록 파단에 요하는 시간이 길어지고 따라서 부식의 영향도 본격화된다는 점을 고려하면, 응력이 작아질수록 SM55C의 피로강도가 역학적 인자보다는 부식에 의한 영향을 더 크게 받는다는 것을 시사하고 있다.

3.2 표면균열에 대한 관찰

산성안개 분위기에서 5×10^7 회의 반복응력을 견딘 시험편에 존재하는 표면균열의 관찰을 실시하였다. 균열의 관찰은 시험편 표면에 두꺼운 층을 형성하고 있는 부식물층을 제거하기 위하여, 에머리페이퍼(#100~#1200)와 전해연마를 실시해 표면을 약 $100 \mu\text{m}$ 정도 제거한 후 실시하였다. Fig. 3은 AFS ($\sigma_a=40$ MPa, $N=5 \times 10^7$)의 표면균열을 SEM으로 관찰한 것이다.



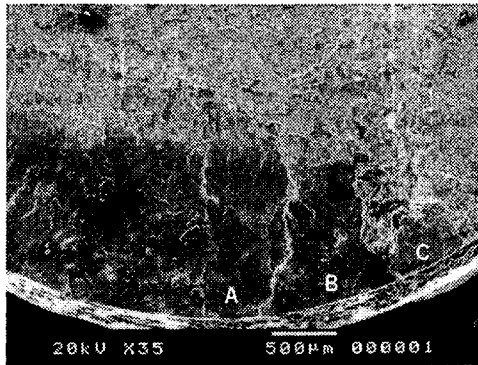
(a)



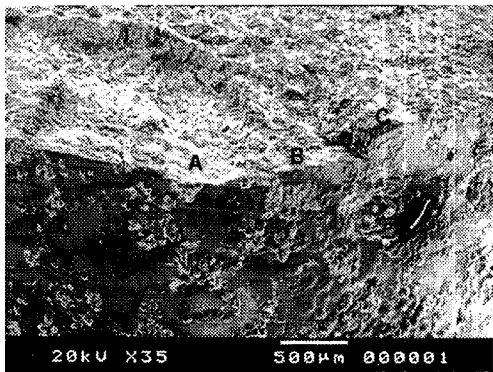
(b)

Fig. 4 Macroscopic observation of fracture surface of the non-propagating cracks under acid fog ($\sigma_a = 40$ MPa, $N=5 \times 10^7$)

Fig. 3을 참고하면, 서로 다른 기점을 가지는 다수의 피로균열이 존재하고 있으며, 균열의 분지(Crack branching)와 합체(Crack coalescence)를 반복하여 대부분의 균열들이 환봉 시험편의 전 원주에 걸쳐서 서로 연결되어 있었다. 이와 같이 인접하는 균열이 상호연결되게 되면 균열 성장률 (da/dN)이 급격히 증가하고, 시험편의 잔여 단면적의 감소로 인하여 피로수명은 매우 짧은 것으로 예상된다.



(a) Observation from 90° at fracture surface



(b) Observation from 60° at fracture surface

Fig. 5 Schematic illustration of fatigue crack growth in cylindrical specimen

그러나, 본 연구에서는 상당히 긴 반복응력($N=5 \times 10^7$)에서도 파단이 발생하지 않았다.

이와 대조적으로 DWS에서는 AFS와 동일 수명 ($\sigma_a=200$ MPa, $N=5 \times 10^7$)을 갖는 시험편의 표면을 관찰한 결과, 단일 정류균열($L_c=900 \mu m$)이 관찰되었다.

3.3 균열의 깊이방향에 대한 고찰

산성안개 분위기 하에서 $N=5 \times 10^7$ 사이클의 응력부하 동안 파단되지 않았던 시험편을 강제 취성파단 시켜, 거기에 발생해 있는 정류균열의 파면을 Fig. 4의 (a), (b)에 각각 제시하였다. 시험편을 인장시험기에 장착하고 액체질소 속에 충분히 침적하여 높은 하중으로 당기면 잔여단면은 취성파단 하게 된다. Fig. 4의 (a)의 피로파면의

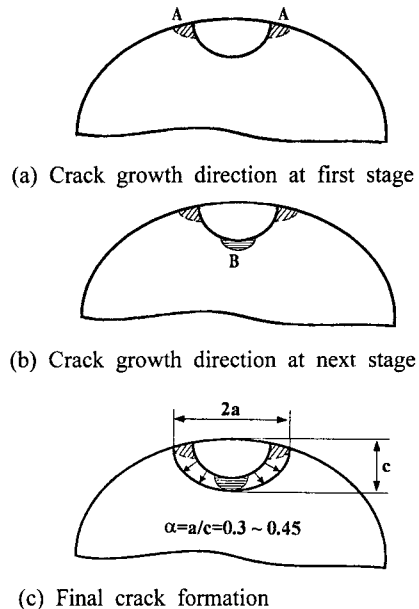
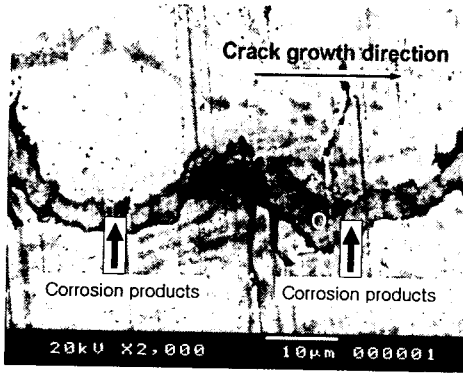


Fig. 6 Typical crack growth behavior and aspect ratio(α) in round bar specimen

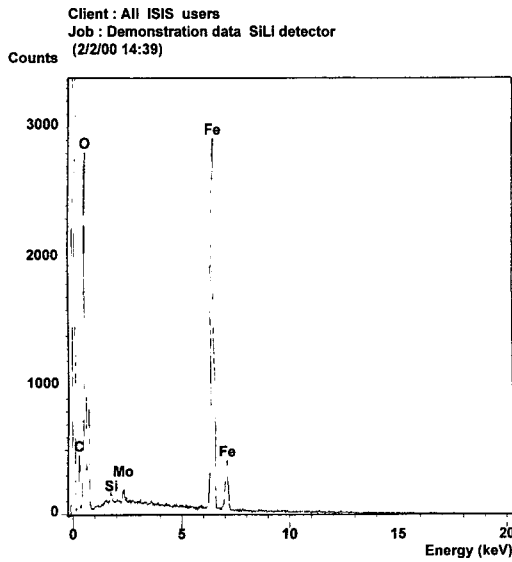
형상을 참고하면, 피로균열이 서로 다른 기점에서 발생 및 성장하는 과정에서 인접한 균열과 서로 연결되어 있는 것처럼 관찰된다. 그러나 각각의 균열면과의 경계에 단차가 존재하는 것이 관찰되었다. Fig. 5는 시험편을 파단면의 90°와 60° 방향에서 관찰한 것이다. Fig. 5의 (a)에 의하면 A와 B의 균열면이 동일한 균열에 의해 발생된 것처럼 보이지만, A와 B사이에 단차를 나타내는 경계가 존재하는 것이 관찰되었다. 이 사실을 확인하기 위하여 파단면의 60° 방향에서 관찰한 결과(Fig. 5의(b)), A와 B는 서로 다른 기점에서 발생 및 성장한 균열이 서로 합체한 것으로 밝혀졌다.

여기서, Fig. 4 (b)의 정류균열에서 매우 특징적인 사실을 발견할 수 있다. 정류균열이 시험편 전원주에 걸쳐 발생하여 있고, 내부에서도 완전히 연결된 소위 원주형균열을 형성하고 있다. 그러나 깊이방향으로는 표면길이에 상응하는 균열 성장이 이루어지지 못하고 정류하고 있다.

이러한 형상의 균열이 시험편을 파단으로 이끌지 않고 정류하게된 원인을 우선 역학적으로 검토하면 다음과 같다. Kobayasi는 굽힘을 받는 원주형 균열재의 응력확대계수를 다음과 같이 제안하였다.⁽⁷⁾



(a) Corrosion product between the surface crack faces

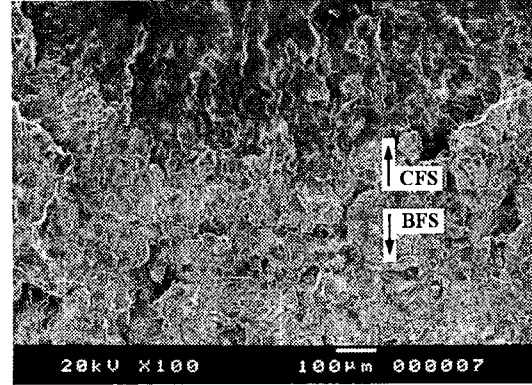


(b) EDS results of the point O at (a)

Fig. 7 Corrosion product between the surface crack faces and its EDS results

$$K = \left(\frac{\pi r L}{0.8r + 7.1L} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot S \quad (1)$$

여기서, r은 깊이방향 균열선단에서의 시험편의 반경, L은 균열의 깊이, S는 균열선단에서의 공칭 응력이다. Fig. 4 (b)의 균열에 대하여, 균열이 형성될 때의 부하응력(40 MPa)을 근사적으로 S라 하고, 평균 균열길이(L=1.5mm)등을 고려하여 K값을 계산해 보면 $K=1.3 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이다. 또한 Harrison에 의하면 탄소강의 ΔK 의 값이 다음과 같다.⁽⁸⁾



CFS : Corrosion fracture surface

BFS : Brittle fracture surface

Fig. 8 SEM photography near the crack tip

$$2.4 \times 10^{-5} \sqrt{m} \leq \frac{\Delta K_{th}}{E} \leq 2.9 \times 10^{-5} \sqrt{m} \dots (2)$$

여기서, E는 탄성계수이다. 본 원주형 정류균열의 K는 식 (2)의 ΔK_{th} 보다 현저히 작은 값을 알 수 있다. 이것은 40 MPa의 부하응력이 정적강도(항복응력=468 MPa)에 비해서 아주 낮기 때문이다. 따라서, 역학적으로는 전파할 수 없는 균열이라고 판단된다. 그러나, 발생한 균열은 전파·합체하는 과정을 거쳐서 원주형 균열을 형성하였는데, 이러한 점이 부식피로의 특징중의 하나이다.

Fig. 4 (a), (b)의 또 하나의 특징은, 발생한 균열들이 내부로는 제대로 성장하지 못하고 주로 원주방향으로 성장하여 합체하는 점이다. 이러한 특이한 현상의 원인을 고찰하면 다음과 같다.

일반적으로, 균열파면의 형상으로부터 형상비 ($\alpha = a/c$)에 대해 고찰을 행하면, 반타원 표면 균열의 경우 Fig. 6의 (a)~(c)에서 보는 것처럼, A방향인 표면으로 먼저 성장한 후 B방향인 내부로 성장하게 되며, 그 후 형상비가 0.3~0.45사이의 값을 가진 형상으로 성장한다.⁽⁹⁾

그러나 Fig. 4의 (a)에 보이는 것과 같이, 번호를 붙인 1번, 2번 및 3번의 균열형상에서 알 수 있듯이, 산성안개 분위기하에서 발생한 정류균열의 형상은 이러한 형상비를 논하는 것이 무의미할 정도의 매우 특이한 형상을 보이고 있다.

즉, 1번 균열의 형상비를 구해보면 $\alpha_1 = 1.9$ 정도의 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이러한 사실은 표면 균열의 길이가 깊이 방향의 길이에 비

해 매우 길다는 것이다. 이러한 특이한 균열의 성장거동은 산성안개에 포함되어 있는 다수의 부식물질의 영향 때문인 것으로 생각된다. 즉, 표면은 부식물질과 계속해서 접촉하기 때문에, 많은 부식피트로부터 멀티사이트 균열이 형성되면서 그 성장이 촉진되는 반면, 내부에서는 표면과 다른 상황이 일어난다고 생각해 볼 수 있다. 즉, 내부에서는 균열성장과 관련된 부식의 상황이 표면층과 다를 수도 있다는 점이다. 산성안개에 의하여 부식물질이 균열 표면층에 우선적으로 퇴적되게 되면, 그로 인하여 산성안개의 내부로의 유입이 어려워지고 또한 균열개폐구운동의 방해가 생길 수 있다. 균열개폐구운동은 부식물질을 균열내부 깊숙이 공급하는 소위 펌핑작용을 한다. 따라서 이러한 펌핑작용이 방해를 받게되면 내부 균열선단에서의 부식작용은 표면보다 미약할 수 밖에 없다. 이러한 사실을 확인하기 위하여, Fig. 4의 (a)균열에서 부식생성물의 존재여부를 확인한 결과, Fig. 7 (a)와 같이 표면 균열면에 두꺼운 부식생성물이 관찰되었고, Fig. 7 (b)의 EDS분석결과 전형적인 산화물(Fe_xO_y)임을 확인할 수 있었다.

그러나 깊이방향의 균열선단 부근을 촬영한 사진(Fig. 8)에서는 유의할만한 부식퇴적물이 발견되지 않았다. 결국, 특이한 균열형상은 산성안개에 포함되어 있는 강산성의 부식물질이 균열 표면을 우선적으로 부식시킨 결과에서 비롯된 것으로 판단된다.

4. 결 론

부식피로에서 분위기인자로서의 산성안개가 기계구조용강인 SM55C의 피로강도에 미치는 영향을 규명하고, 균열의 발생 및 성장 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 산성안개의 강한 부식작용으로 SM55C의 피로강도가 증류수 분위기에 비해 80%정도 대폭 감소하였다. 그 이유는 산성안개 속에 포함된 다수의 부식물질이 작용하여 표면에 멀티사이트 균열을 발생시키고, 그 균열들이 상호 합체하여 긴 균열로 성장하기가 용이하기 때문이라 생각된다.

(2) 산성안개 분위기 하에서 발생한 다수의 피로균열은 서로 합체하여, 적정 응력에서는 시험편의 전 원주에 걸친 원주형 정류균열을 형성하고, 그 형상비는 정상적인 균열의 것보다 현저히

작은 특이한 형상을 하고 있다.

(3) 균열이 표면에 비하여 깊이방향으로 제대로 성장하지 못한 주된 원인은, 표면층에 발생한 부식퇴적물에 의하여 균열개폐구운동이 방해를 받고, 그로 인하여 부식물질을 내부로 운반하는 펌핑작용의 약화를 초래하여, 균열 성장을 촉진하는 부식작용이 표면 보다 약화되기 때문이다.

후 기

본 연구는 2001년 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-2-309-001-3)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) 村野健太郎, 1993, “酸性雨と酸性霧,” 裳華房, pp. 61~95.
- (2) 김만구, 임양석, 박기준, 황훈, 1998, “산성강하물의 침착량과 동태해명에 관한 연구-춘천지역 안개의 화학조성(1996-1997),” 한국대기보전학회지, 제14권, 제5호, pp. 491~498.
- (3) 김민건, 임용호, 김만구, 2000, “산성안개환경하에서 Ni-Cr-Mo강의 피로크랙전파거동,” 대한기계학회논문집A, 제24권, 제7호, pp. 1841~1846.
- (4) KIM Mingun, LIM Yongho, 1999, “Behavior of Corrosion Fatigue in Structural Steel under Acid Fog Environment,” *Proc. of APCFS '99*, LA06.
- (5) 오세욱, 강호민, 1987, “複合組織鋼의 부식피로파괴에 미치는 3.5% NaCl水溶液의 pH와 母相粒徑의 效果,” 대한기계학회논문집A, 제11권, 제6호, pp. 867~876.
- (6) 우창기, 김희송, 1989, “반복인장-압축하중을 받는 이온질화 처리한 SM45C의 부식피로 파괴거동에 관한 연구,” 대한기계학회논문집A, 제13권, 제3호, pp. 451~460.
- (7) 小林, 山本, 中澤, 1970, “回轉曲げによる切欠き材の疲れき裂進展速度,” 日本機械學會論文集, 36-288, pp. 1238~1245.
- (8) Harrison, J. D., 1970, *British Welding J.*, Vol. 2., No. 3
- (9) 清家, 北岡, 高 行男, 1975, 日本機械學會論文集, 41A-341, p. 1.