

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0102

기계구조용강 SM55C의 부식피로강도에 미치는 산성안개 분위기의 영향

Effects of Acid Fog Environment on the Corrosion Fatigue Strength of Structural Steel SM55C

김진학*, 김민건**
Jinhak Kim, Mingun Kim

ABSTRACT

Fatigue tests under acid fog environment were carried out to investigate the effect of acid fog on the corrosion fatigue strength of SM55C in comparison with distilled water. Main results obtained are as follows.

The fatigue strength of SM55C under acid fog environment are remarkably decreased as compared with that of distilled water specimen. The corrosive effect of acid fog on fatigue strength are more serious under low stress amplitude level than under high stress amplitude level, and this leads to continuous reduction of fatigue strength. Under acid fog environment in early stage of crack growth, because the corrosive components dissolve the crack face offensively, the unstable fracture surface appears. But, the stable corrosion precipitation and products layer are formed on the fracture surface in accordance with the time pass.

주요기술용어 : Corrosion fatigue(부식피로), Acid fog(산성안개), Distilled water(증류수), Fatigue strength(피로강도), Fractography(파면해석), Corrosion pit(부식피트)

1. 서론

오늘날 자동차와 같은 수송기관, 각종 난방시설, 산업시설 및 발전시설에 의한 대기오염은 우리나라 뿐만아니라 전세계의 대도시에서 직면하고 있는 가장 시급히 해결하지 않으면 안될 환경

오염문제 중의 하나이다.^{1,2)} 이와 같은 대기오염에 의하여 초래된 대표적인 현상중의 하나인 산성비는 농작물과 산림의 파괴, 미술품의 훼손, 인체의 건강은 물론 건축 구조물의 부식에도 매우 심각한 영향을 미치는 요인으로 지목되고 있다.¹⁻³⁾

특히, 산성비속에 포함되어 있는 부식물질(NO_x , SO_x , Cl , Na , NH_x 등)은 대기 중에 노출되어 있는 기계구조물, 건축물 및 교량 등의 각종 구조물에 작용하여 응력부식크랙(Stress

* 회원, 영남대학교 기계공학부

** 회원, 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

corrosion cracking : SCC), 부식피로크랙 (Corrosion fatigue crack: CFC) 등을 유발하여 그 강도를 현저히 저하시키고 있다. 최근, 대기 중에 존재하고 있는 산성물질(SO_x, NO_x 등)을 안개가 취입하는 경우와 안개로 존재하는 물방울이 반응장이 되어 일차 배출된 오염가스(SO_x)가 2차 생성물질(H₂O₂, O₃ 등)과 수용액 반응을 일으켜 산성화되어 발생하는 산성안개가 산성비보다 더 많은 부식성 오염물질을 포함하고 있는 것으로 알려지고 있다.¹⁻⁴⁾

한편 매우 작은 틈새(Crevice)에도 용이하게 침투할 수 있는 안개의 특성상 산성안개는 산성비보다 구조물에 악영향을 미치고, 산성비의 경우 강산성의 초기비(Rain)가 약산성의 후속비에 의해 씻겨 내리지만,⁵⁾ 산성안개는 구조물에 장시간 부착되어 산성비와 마찬가지로 각종 구조물에 작용하여 환경조장파괴 (Environmentally assisted fracture)를 일으킬 것으로 예상된다.

한편, 지난 수십년 동안 부식파괴를 야기하는 환경적인 인자로 NaCl, HCl, H₂SO₄, NaOH, MgCl₂⁵⁻¹²⁾ 등 많은 인자들이 검토되어져 왔다. 또한, 다양한 부식환경 하에서 반복적인 하중이 작용하는 금속재료를 대상으로 피로크랙의 발생과 성장메커니즘을 규명하기 위한 다양한 연구가 이루어져 왔으나,⁵⁻¹²⁾ 복합된 이온들을 가지는 산성안개가 기계·구조용 강재의 부식피로특성에 미치는 영향에 관한 연구는 발견할 수 없다.

한편, 자동차는 대기 중에 항상 노출되어 있어 그 부품들에 대한 산성안개의 접촉을 방지한다는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 이러한 사실과 산성안개가 매우 많은 부식물질을 지닌 점에 주목하여 환경영향 인자로서의 산성안개가 기계구조용 탄소강으로 차축(Automobile shafts), 차륜(Automobile wheels), 로울러(Roller), 스프링(Spring) 등에 사용되는 SM55C의 부식피로 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험재료, 시험편 및 실험방법

본 실험재료는 시판되는 기계구조용 탄소강인 SM55C이다. Fig. 1에 현미경 조직사진을 나타내었다. 또한 실험재료의 화학성분 및 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었고, 시험편의 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

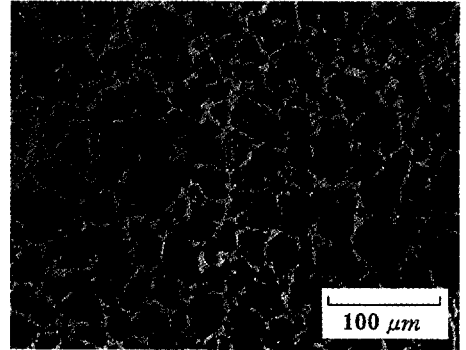


Fig. 1 Microstructure of the SM55C

Table 1 Chemical compositions of the SM55C(wt.%, Bal. Fe)

C	Si	Mn	P	S
0.58	0.17	0.70	0.01	0.0003

Table 2 Mechanical properties of the SM55C

σ_U (MPa)	σ_Y (MPa)	δ (%)	Hv
828	468	12	312

σ_U : Ultimate tensile strength

σ_Y : Yield strength, 0.2% offset stress

δ : Elongation Hv : Vickers hardness

Fig. 2에 보이는 것과 같이, SM55C를 회전굽힘 피로시험기(Rotary bending fatigue tester) 용 시험편으로 기계가공한 후 에머리페이퍼(#800~#1200)로 연마하였으며, 산성안개의 흡착 용이성을 고려하여 경면(Mirror surface) 연마는 실시하지 않고 실험에 제공하였다.

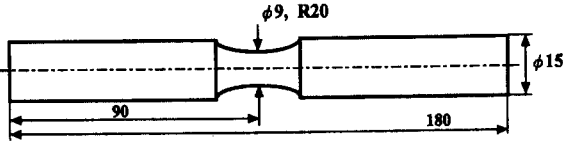


Fig. 2 Geometry of the specimens

시험편에 각기 다른 부식성 환경을 부여하기 위해 오염되지 않은 안개를 가정한 증류수와 산성안개수를 사용하였으며, 산성안개의 채취는 안개채집기를 이용하여 강원대학교 자연대학 건물 옥상에서 행하였다. 채집한 안개는 0.45 μm 의 멤브레인(Membrane) 필터를 사용하여 여과한 후 pH를 측정된 결과, pH=5의 약한 산성을 띠고 있었다. 이온 크로마토그래피(Dionex, DX-100)를 사용하여 이온 성분분석을 행한 결과, 전형적인 산성안개의 성분⁵⁾과 일치하였다. 채취한 안개는 pH=5의 약한 산성이었으나, 실험의 가속효과를 위해 산성안개의 주성분인 H_2SO_4 ⁵⁾를 첨가하여 pH=4로 조정하여 실험에 제공하였다.

사용한 시험기는 회전굽힘 피로시험기 ($R=-1.0$)이고 시험속도는 인버터(Invertor, LG, 8V0221G-2)를 장착하여 20Hz로 조정하여 실험하였다. 또한, 시험편에 지속적인 부식 환경을 부여하기 위해 증류수와 산성안개를 드롭 앤 폴다운(Drop and fall down)방식으로 시험편에 가하였고, 산성안개수의 pH가 변화되는 것을 고려하여 재사용은 하지 않았다. 또한, 파단된 시험편을 대상으로 SEM을 이용한 파면해석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피로강도에 미치는 산성안개의 영향

기계구조용 탄소강재인 SM55C를 사용하여 오염되지 않은 안개를 가정한 증류수(Distilled Water : D.W 재)와 pH=4인 산성안개(Acid Fog : A.F 재) 분위기 하에서 피로시험을 행한

결과를 Fig. 3에 나타내었다.

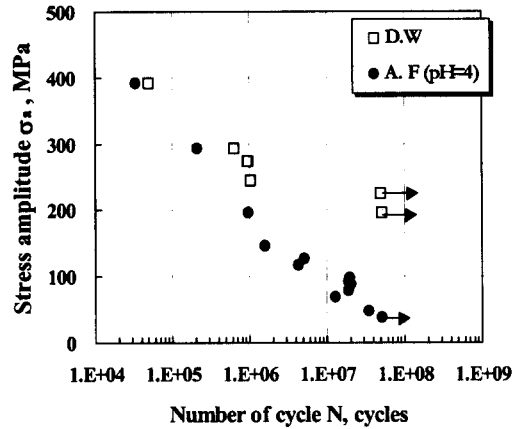


Fig. 3 S-N data of the specimens

Fig 3를 참고하면 D.W 재의 경우, 부식성 환경임에도 불구하고 일반적인 철강재와 마찬가지로 10^6 회의 수명 부근에서 나이(Knee)가 출현하고 있다. 그러나 A.F 재의 경우에는 시간이 경과함에 따라 부하응력을 낮추어도 나이는 출현하지 않고 그 피로강도는 계속 저하하고 있다. D.W 재의 피로강도 또한 부식성 환경하에서 철강재의 나이가 존재하지 않는다는 일반적인 사실에 비추어 볼 때, 비록 일시적으로 나이가 나타나는 것처럼 보일지라도 시간이 지나면 부식에 의해 새롭게 크랙이 생성 및 전파되고 그로 인한 최종 파괴가 일어날 것으로 예상된다.

따라서, 뚜렷한 피로한도가 나타나지 않는 부식피로의 특성을 고려하여 5×10^7 회의 시간강도를 기준으로 하여, 양 재의 피로시험 결과를 고찰하였다. 5×10^7 회를 기준으로 D.W 재의 피로강도는 196MPa, A.F 재의 피로강도는 40MPa이었다. 이러한 사실로부터 산성안개 분위기하에서의 SM55C의 피로강도가 증류수 분위기하에 비하여 80%나 대폭 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 전 수명영역에 걸쳐서 동일 응력레벨에서 양 재의 피로수명을 비교해 보면 D.W 재보다 A.F 재의 수명이 매우 짧은 것을 알 수 있고, 이러한

현상은 부하응력진폭(σ_a)이 작아질수록 현저한 차를 나타내고 있다.

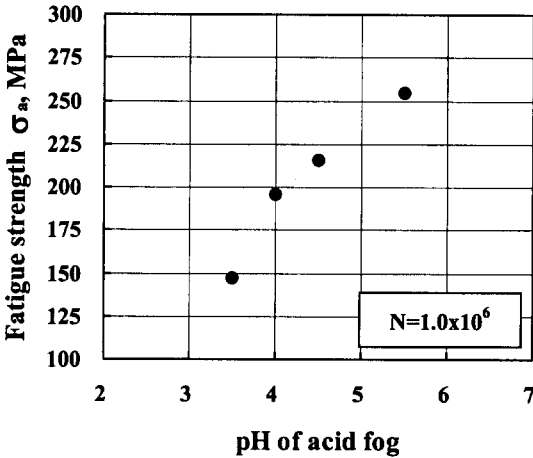


Fig. 4 The relationship between acid fog pH and fatigue strength of SM55C.

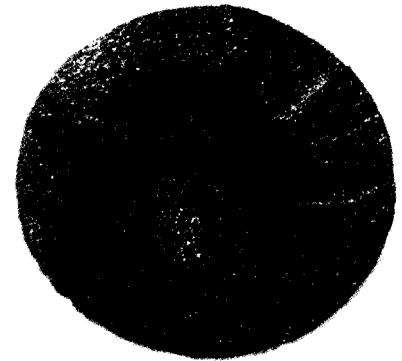
한편, Fig. 4는 1.0×10^6 의 응력반복을 기준으로 산성안개의 pH를 변화시켜 피로강도와와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 4를 참고하면, 산성안개의 pH가 저하할수록 피로강도는 선형적으로 감소하고 있으며, pH=3.5 정도의 강산성에서는 피로강도의 뚜렷한 저하가 관찰되었다.

이러한 사실은 부하응력진폭이 작을수록 산성안개 환경하에서 SM55C의 피로강도가 역학인자의 영향보다 부식에 의한 영향을 더 크게 받는다는 것을 시사하는 것이다. 이러한 사실을 확인하기 위하여 다음 절에서는 파단된 시험편에 대해 SEM을 이용한 파면해석을 실시하였다.

3.2 파단면에 대한 파면해석

먼저, A.F 재에서 피로강도에 미치는 산성안개에 의한 부식의 영향을 확인하기 위하여 저응력과 고응력인 경우의 파면에 대한 거시적인 관찰을 실시하였다. Fig. 4에 SEM 관찰사진을 나타내었다.

Fig. 5를 참고하면, 저응력진폭(σ_a)인 (b)의



(a) $\sigma_a=196\text{MPa}$, $N_f=9.8 \times 10^5$



(b) $\sigma_a=40\text{MPa}$, $N_f=3.5 \times 10^7$

Fig. 5 Macroscopic SEM fractography of A.F specimen

파면이 고응력인 (a)에 비해 산성안개의 부식작용으로 인해 심하게 부식되어 있으며, 피로크랙의 기점부도 부식이 심해 확인이 어려울 정도이다. 그러나, 고응력인 경우에는 그 파면에 산성안개의 부식흔적보다는 시험편에 피로크랙에 의한 흔적이 뚜렷이 관찰되고 있다. 따라서, SM55C에 고응력보다는 저응력이 반복되어 작용할 때 산성안개에 의한 부식의 영향이 현저하게 나타나며, 이에 의한 피로강도의 저하는 계속되는 것으로 생각된다.

한편, 양재에서 거의 동일한 수명을 보인 2개의 시험편을 선택하여 그 파단면에서 피로크랙의 기점과 파단면의 특징에 대한 해석을 실시하였

다. D.W 재 ($\sigma_a=245\text{MPa}$, $N_f=1.0\times 10^6$)의 결과를 Fig. 6에, A.F 재 ($\sigma_a=196\text{MPa}$, $N_f=9.9\times 10^5$)의 결과를 Fig. 7에 각각 나타내었다. 크랙면에 대한 증류수와 산성안개의 부식영향을 극명하게 구분할 수 있도록 양재 모두 피로크랙의 기점부에서 2 mm와 5 mm의 거리에서 파면을 관찰 및 촬영하였다.

Fig. 6와 Fig. 7을 참고하면, 양재 모두 피로크랙의 기점부에서 부식의 영향으로 발생하는 부식피트(Corrosion pit)가 피로크랙의 기점에 존재하는 것이 관찰되었다. 이러한 부식피트는 부식액의 부식작용과 반복응력의 영향으로 발생하는 것으로서 SM55C의 경우에도 동일하게 부식피트에서 피로크랙이 발생하는 메커니즘을 가지는 것으로 생각된다.

한편, 표면에서 피로크랙이 성장하여 시험편의 내부로 진행될수록 양재의 파면에는 커다란 차이가 발견되었다.

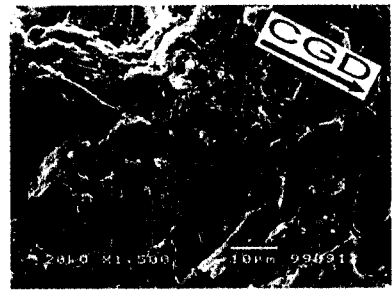
D. W 재의 경우(Fig. 6 참조)에는 파면에 전형적인 피로크랙에 의해 발생하는 피로줄무늬(Fatigue striation)가 파면에 형성된 것이 관찰되지만, A. F 재(Fig. 7 참조)의 파면에는 피로줄무늬는 관찰되지 않고 산성안개의 부식작용으로 인한 부식생성물이 파면을 덮고 있는 것이 관찰되었다. 이러한 사실로부터, 산성안개가 SM55C의 크랙면을 증류수보다 더 심각하게 부식시킨다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실도 Fig. 3에서 관찰되는 A.F 재의 계속되는 피로강도의 저하 현상을 뒷받침하는 것이다.



(a) Fatigue crack origin



(b) 2 mm from crack origin



(c) 5 mm from crack origin

Fig. 6 SEM photographs of D.W specimen fracture surface ($\sigma_a=245\text{MPa}$, $N_f=1.0\times 10^6$), CGD : Crack growth direction

이러한 산성안개의 크랙면에 대한 공격적인 부식작용은 저자¹³⁾ 등이 보고한 바와 같이 크랙의 둔화(Blunting)와 분지(Branching)를 초래하여, SM55C에서도 동일하게 초기의 피로크랙성장율이 매우 느린 특이한 현상을 초래할 것으로 생각된다.

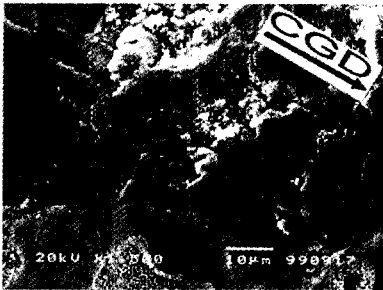
또한, 더 오래 부식환경에 노출되더라도 오염되지 않은 안개를 가정한 증류수의 경우에는 크랙면의 부식정도가 그다지 큰 차이를 보이지 않았으나(Fig. 6(b), (c) 참조), 산성안개 시험편의 경우에는 시간이 경과함에 따라 그 부식은 현저하게 일어나는 것이 관찰되었다.

Fig. 7을 참고하면, 산성안개하에서는 크랙 성장의 초기단계에서 부식작용에 의해 크랙면이 용해되어 매우 불안정한 파면이 관찰되지만(Fig 7(c)), 시간이 경과함에 따라 점차 부식생성물들이 안정된 층을 형성하는 것이 관찰되었다 (Fig.

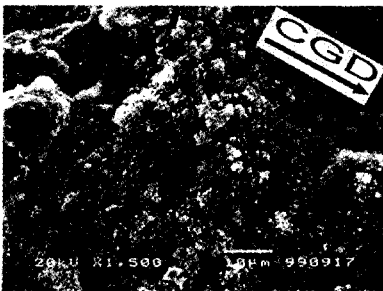
6(b)).



(a) Fatigue crack origin



(b) 2 mm from crack origin



(c) 5 mm from crack origin

Fig. 7 SEM photographs of A.F specimen fracture surface ($\sigma_a=196\text{MPa}$, $N_f=9.9 \times 10^5$), CGD : Crack growth direction

이러한 사실로부터, SM55C에 대한 대기오염을 결과로 발생되는 산성안개의 공격적인 부식작용은 증류수보다 더 심각하다는 사실을 알 수 있다.

한편, 이러한 안정화된 부식생성물층은 피로크랙의 성장에 필요한 유효응력해대계수폭(ΔK_{eff})

을 감소시켜 크랙폐구 현상을 유발^{14,15)}하여 니이(Knee)가 출현할 가능성이 높다고 생각되며, 이에 관한 연구는 계속되어야 할 과제이다.

4. 결 론

산성안개가 SM55C의 부식피로거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 산성안개 분위기하에서의 피로시험을 증류수 분위기와 비교하여 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 산성안개 분위기하에서의 SM55C의 피로강도는 증류수 분위기하에 비해 약 80% 감소하였다.

2) 고응력보다 저응력진폭하에서 피로강도에 미치는 산성안개에 의한 부식의 영향이 현저하게 나타나며, 이에 의한 피로강도의 저하는 계속된다.

3) 산성안개하에서는 크랙 성장의 초기단계에서 부식작용에 의해 크랙면이 용해되어 매우 불규칙한 파면이 관찰되나 시간이 경과함에 따라 점차 부식생성물들이 안정된 층을 형성하며, 크랙폐구가 발생할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- 1) 대기환경연구회 공저, "대기오염개론", 동화기술, pp. 235~333, 1996.
- 2) 이우근, 선우영, "대기오염 제어공학", 동화기술, pp. 509~556, 1999.
- 3) 村野健太郎, "酸性雨の酸性霧", 裳和傍, pp. 61~95, 1993.
- 4) Hileman B., "Acid Fog", Environ. Sci. Tech., 17-3, 117A-120A, 1983.
- 5) Mangoo, "The Study on the Behavior and Deposition of Acid Precipitation/Chemical Composition of Fog Water at Chunchon (1996-1997)", Jr. of Korea Air Pollution Research Asso., Vol. 15, No. 5, pp. 491~498, 1998.
- 6) 中島正貴, 國枝久嗣, 戸梶惠郎, "大氣中

- および水中における炭素鋼S45Cの疲労寿命分布特性", 日本機械學會論文集, 第57巻, 536號, pp. 727~732, 1999.
- 7) 森田辰郎, 清水 眞佐男, 川寄一博, "窒化處理を施した純チタンの鹽酸環境下での疲労特性", 日本機械學會論文集, 第58巻 555號, pp. 2040~2045, 1992.
 - 8) Magnim T., Chambreuil A. and Bayle B., "The Corrosion Enhanced Plasticity Model for Stress Corrosion Cracking in Ductile FCC Alloys", Acta mater., Vol. 44, No. 4, pp. 1457~1470, 1996.
 - 9) Raquet O., Helie M., and Santarini G., "Initiation and Propagation of Stress Corrosion Cracking of Type 304 Austenite Stainless Steel in Hot Aqueous Chloride Solution", Corrosion, Vol. 52, No. 9, pp. 697~707, 1996.
 - 10) 유효선, 나의균, 정세희, "인공해수의 pH에 따른 강용접부의 응력부식균열거동에 관한 연구", 대한용접학회지, 제13권, 제1호, pp. 510~520, 1995.
 - 11) M. N. James and Li Wenfeng, "Fatigue crack growth in austempered ductile iron and grey cast irons-stress ratio effects in air and mine water", Mater. Sci. and Eng., A265, pp. 129~139, 1999.
 - 12) W. O. Soboyejo and J. F. Knott, "An Investigation of Environmental Effects on Fatigue Crack Growth in Q1N(HY80) Steel", Metall. Trans. A, 21A, pp. 2977~2983, 1990.
 - 13) KIM Mingun and LIM Yongho, "Behavior of Corrosion Fatigue in Structural Steel under Acid Fog Environment", Proc. of APCFS99, LA06, 1999.
 - 14) 권영각, "부식피로", 대한기계학회지, 제29권, 제2호, pp. 138~143, 1989.
 - 15) 김민건, "구조용 강재에 발생하는 미소 피로크랙의 정류요인", 대한기계학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 880~886, 1991.