

산성안개가 내후성강재의 녹형성 및 피로강도에 미치는 영향

Effect of Acid Fog on Rust Formation and Fatigue Strength of Weathering Steel

김민건* 구은희**
Kim, Min-Gun Ku, Eun-hoi

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of acid fog on the rust formation behavior of weathering steel (SMA50) which is used in uncoated bridges. Weathering steel didn't form the passive film under the environment of acid fog(pH5.6), whereas the environment of distilled water formed the protective oxide film. Therefore, the construction of weathering steel under the environment extremely exposed to SOx and NOx which are the main compositions of acid fog is not adequate. Fatigue limits of weathering steel under acid fog environment are remarkably decreased as compared with environment of distilled water. The corrosive constituents in acid fog has piled up the corrosion products on specimen surface and generated the corrosion pits. Because of the high stress concentration arising at this corrosion pit, relatively low fatigue limits were obtained for acid fog specimens.

키워드 : 산성안개, 내후성강재, 녹형성거동, 피로강도

Keywords : Acid fog, Weathering steel, Rust formation behavior, Fatigue strength

1. 서론

1930년대에 미국에서 개발된 내후성강은 방청도장 시 물을 오염시킬 수 있는 상수원 보호지역의 교량 및 도장이 곤란한 철골 구조물 등에 사용되고 있는데, 우리나라에서도 1992년부터 포항제철에서 생산하여 보급하고 있다. 이 강재로 가설한 교량을 내후성 강교 또는 무도장 강교라 하며, 환경보호의 차원에서 그 시공이 점차 확대되고 있다. 일반 저탄소 강재에 내식성 원소인 니켈, 크롬, 구리 등을 적정량 첨가하여 제조되는 내후성강은, 강재를 대기 중에 폭로했을 때 처음에는 산화철의 황색 녹에서 적색 녹으로 진행된다. 이후 시간의

경과에 따라 그 녹의 일부가 모재에 안정녹층(보호 산화피막 : protective oxide film)을 형성시킨다. 이 안정녹층은 대단히 치밀하여 물과 산소를 통과시키지 않으므로 더 이상 녹의 내부침투를 막아주며, 색상도 진한 커피색으로 인간에게 정서적 안정을 주는 것으로 알려져 있다. 환경에 따라 다소의 차이가 있으나 이 안정녹층이 형성되기까지는 3~5년이 걸린다. [1]

내후성강을 사용한 구조물의 시공상의 유의 사항으로, 해안과 가까워 염분의 흡착위험이 있는 곳, 연간 다습한 장소 및 유황산화물이 다량 발생하는 공장지대 인근에는 시공해서는 안되는 것으로 되어있다. [2] 이들 유의사항 중에서 유황산화물과 관련된 사항이 문제가 될 수 있다. 근래의 대기오염으로 인하여 유황산화물이 다량 포함된 산성비, 산성안개가 자주 출현하는데, 특히 무도장

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사
** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 박사과정

강교의 경우 산성안개 다발지역에 건설되는 경우가 많다는 점이다. 산성비가 농작물과 산림의 파괴는 물론 건축물의 부식까지 초래하는 것으로 지목되고 있는데, 산성비보다 더 많은 농도의 NO_x, SO_x, Cl 등의 오염물질을 포함하고 있는 산성안개 [3]에 주목할 필요가 있다. 산성안개는 대기중 오랜 체류시간으로 인하여 오염물질의 유입이 상대적으로 많아지고, 또한 광화학반응으로 인하여 2차 산성물질을 생성하는 것으로 알려져 있다. [3] 그리고, 아주 작은 틈새(예를 들어, 균열)로도 침투 가능한 특성상 산성안개는 구조물에 심각한 악영향을 미칠 것으로 예상된다.

산성안개의 주 오염성분인 유황산화물 및 기타 오염물질이 무도장 강재의 안정녹의 형성을 방해하고, 부식에 의한 부식피트의 발생을 초래할 가능성이 있다. 특히, 산성안개가 강재에 닿아 결로하여 흘러내리면서 장시간 고여있게 되는 부위에서는 이러한 작용이 강하게 일어날 수 있다. 실제로, 볼트 체결 부분의 너트하단부에 이 곳에 산성안개가 고임으로 인하여 부식이 촉진된 상황을 그림 1이 보여주고 있다.

내후성강은 자연상태에서 안정녹층 형성에 장기간 소요되므로, 산성안개 환경 하에 노출된 내후성강은 안정녹의 형성이 안될 가능성이 있으며, 안정녹층이 형성 안된 강재는 부식에 의하여 구조물의 강도에 심각한 영향을 줄 수 있다. 즉, 산성안개에 의하여 층상박리녹(laminar rust slab)이 발생함으로써 부재두께의 감소와 아울러, 응력집중원으로서의 부식피트의 발생은 내후성강재 구조물의 안전을 위협할 것이다.

저자는 앞선 보고에서, 산성안개가 SNCM강의 피로강도를 현저히 저하시키며, [4] 특히 용접부에는 더욱 공격적으로 작용하여 부식 및 피로균열의 전파를 촉진시킨다는 사실을 밝혔다. [5] 그러나, 내후성강의 부식거동에 미치는 산성안개의 영향에 관한 연구는 찾아볼 수가 없다.

따라서 본 연구에서는, 1996년에 측정되었던 춘천지역의 산성안개의 수소이온농도(pH)가 4~6(평균 4.84)인 점을 감안하여, pH=5.6의 산성안개가 내후성 강재의 녹형성거동 및 부식에 따른 피로강도의 변화에 대하여 고찰해 보고자 한다. [3]

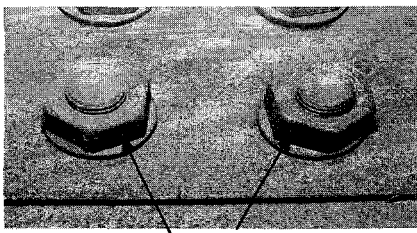


그림 1 산성안개에 의해 무도장 강교의 볼트하단부에 형성된 부식자국

2. 시험재료 및 실험방법

시험재료는 무도장 강교용 내후성 강재인 SMA50 W재(KS D 3529)를 사용하였으며, 화학성분을 표 1에, 기계적 성질을 표 2에 나타내었다.

실험에 사용된 시편은 그림 2와 같은 형상으로 선삭 가공하여, 시편 중앙 시험부를 에머리 페이퍼로 연마하였다.

내후성 강재가 자연상태에서 안정녹을 형성하기까지는 3~5년이 경과하여야 한다. 그러나 습윤과 건조의 주기를 빠르게 하면 녹형성과정을 1년 이내로 단축시킬 수 있다. [1] 본 연구에서는 습윤과 건조를 빠른 주기로 수행하여 가속적으로 녹을 형성시킬 수 있는 실험장치를 제작하여 사용하였다. 그림 3은 가속환경실험장치의 외관을, 그림 4에 치수를 명기하였다. 본체는 아크릴로 제작되었으며, 내부는 증류수와 산성안개수를 각각 분무하기 위한 2개의 립으로 나누어져 있다. 각 립에는 시편을 8개씩 장착하고 교류 감속모터(10rpm, 220V)에 의해 저속으로 회전하는 회전판이 있으며, 본체 하부에서 송풍되는 열풍에 의하여 시편의 습윤부가 고루 건조되도록 하였다. 송풍시간은 대략 10분으로 타이머에 의하여 조절할 수 있도록 되어 있으며, 송풍 정지 후 약 30분~60분의 정체시간을 두는 방법으로 분부와 열풍에 의한 건조를 반복적으로 행하였다. 본 연구의 1300회 분무 시편의 경우, 일일 평균 8회 분무로 대략 7개월 간 소요되었다.

본 실험에서 사용된 안개수는 춘천지역에서 채집된 안개수로, pH5는 채집된 안개를 그대로 사용하고 pH6은 증류수를 가하여 pH를 조절하였다. 안개 채집기의 구조는 그림 5와 같다. 팬에 의한 강제흡입방식으로, 흡입된 안개입자는 테프론 와이어에 의하여 안개수의 형태로 폴리에틸렌병에 수집된다. 테프론을 사용한 이유는 안개성분과의 반응으로 인한 성분변화를 최소화하기 위함이다.

피로시험은 증류수, pH6 및 pH5의 산성안개수를 1300회 가하여 녹을 형성시킨 시편에 대하여 수행하였으며, 시험기는 회전굽힘피로시험기(3000rpm)이다.

표 1 화학성분(SMA50)

강종	화 학 성 분 (wt %)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
SMA50	.18	.15 ~.65	1.40	.035	.035	.30 ~.5	.45 ~.75	.05 ~.3

표 2 기계적 성질(SMA50)

강종	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
SMA50	353	490~600

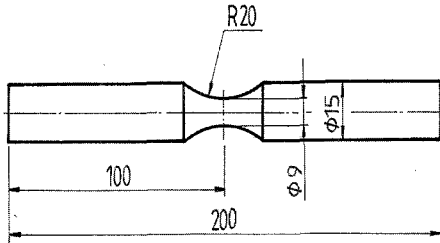


그림 2 시험편의 형상

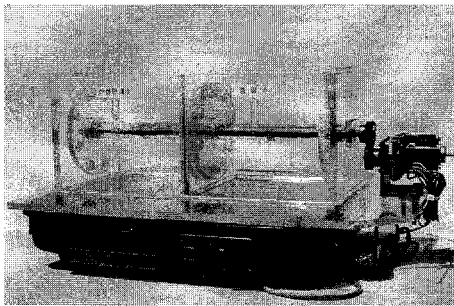
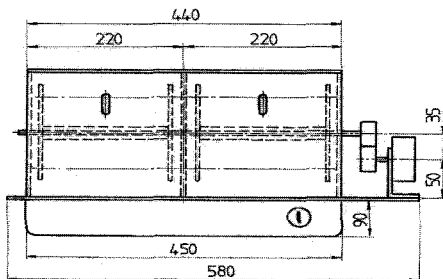
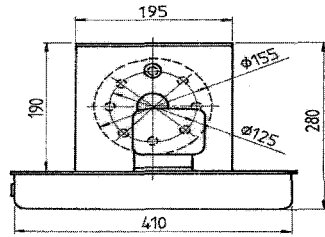


그림 3 시험편에 녹을 발생시키기 위한 가속환경 실험장치



(a) 정면도



(b) 측면도

그림 4 가속환경 실험장치의 상세도

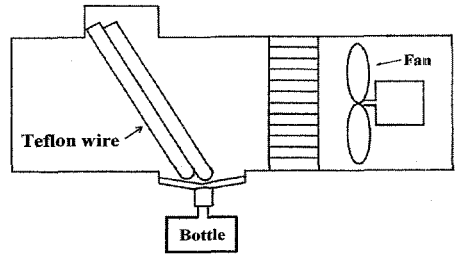


그림 5 안개 채집기의 구조

3. 결과 및 고찰

3.1 산성안개에 의한 내후성 강재의 녹형성 거동

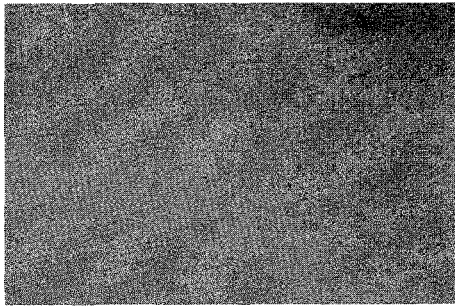
그림 6에 내후성 강재의 내식성 피막을 형성하기 위한 안정녹과 내식성피막이 파괴되어 나타나는 층상박리녹의 사진을 제시하였다. 이 사진은 산성안개의 영향이 없는 자연상태에서 3년간 폭로하여 촬영된 것이다. [1] 층상 박리녹은 검고 조절이 거칠어서 층상으로 박리되는 녹층으로, 해안지역에 가설된 교량이나 누수 및 체수에 의해 장기간 습한 부위에서 발생할 수 있다. 층상박리녹이 발생하면 안정녹의 내식성 피막은 안 얻어지며, 따라서 층상 박리녹의 유무는 안정녹 형성의 판단기준이 된다. [1]

가속환경실험장치를 사용하여 증류수, pH6 및 pH5의 산성안개를 1000회 및 1300회 분무시킨 시편의 사진을 그림 7 및 그림 8에 각각 제시하였다. 그림으로부터, 증류수 환경 하의 시편은 대기 중에서 발생한 안정녹의 형상(그림 6)과 유사한 색상과 조절을 띄고 있는 반면, pH6 및 pH5의 산성안개환경 하의 시편에서는 검고 조절이 거친 녹이 발생

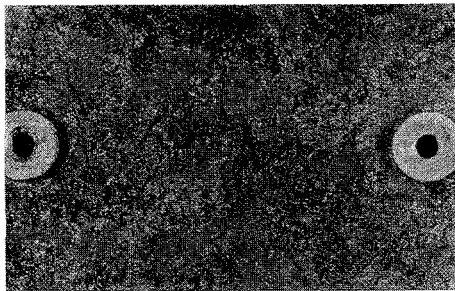
함을 알 수 있다. 또한, 그림 7과 그림 8을 비교해 보면, 형성된 녹이 그림 7에서보다 그림 8에서 더 많이 박리되고 있는 상황도 관찰된다.

분무횟수 1300회에서 전자현미경 촬영을 한 증류수 환경의 녹사진을 그림 9에, 그리고 pH6 및 pH5의 산성안개환경 하의 녹사진을 그림 10 및 그림 11에 각각 제시하였다. 이들 사진으로부터도 증류수 환경에서는 녹의 피막이 치밀한데 비해, pH6의 산성안개에서는 피막의 손상과 박리가, 산성도가 높은 pH5에서는 그 정도가 더욱 심함을 뚜렷이 알 수 있다.

따라서, 약산성의 pH6 및 강산성의 pH5의 산성안개는 안정녹의 피막형성을 방해하고 있음을 알 수 있다. 즉, 산성안개의 주요 오염물질인 SOx와 NOx 등에 노출된 환경 하에서는 내후성강재를 사용한 구조물의 시공이 부적합하다고 할 수 있으며, 시공시방에도 이러한 사항이 포함되어야 할 것으로 사료된다.



(a) 안정 녹



(b) 층상 박리 녹

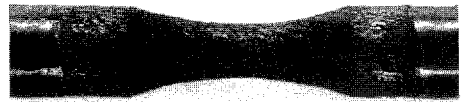
그림 6 건전대기 하에서 내후성강재 표면에 형성된 안정녹과 층상박리녹 (폭로기간 = 3년)



(a) 증류수



(b) 산성안개수 : pH6



(c) 산성안개수 : pH5

그림 7 분무횟수 = 1000 회



(a) 증류수



(b) 산성안개수 : pH6



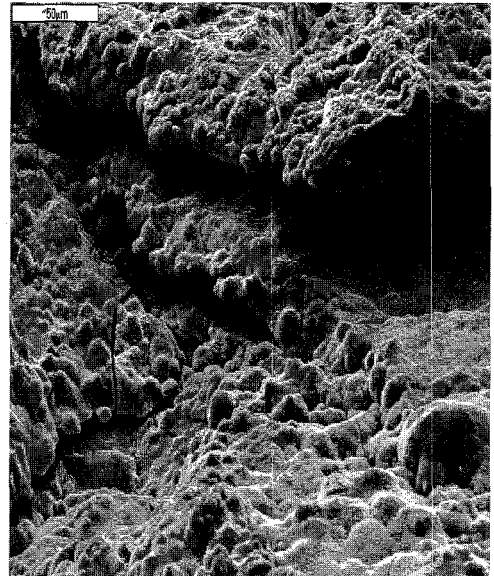
(c) 산성안개수 : pH5

그림 8 분무횟수 = 1300 회



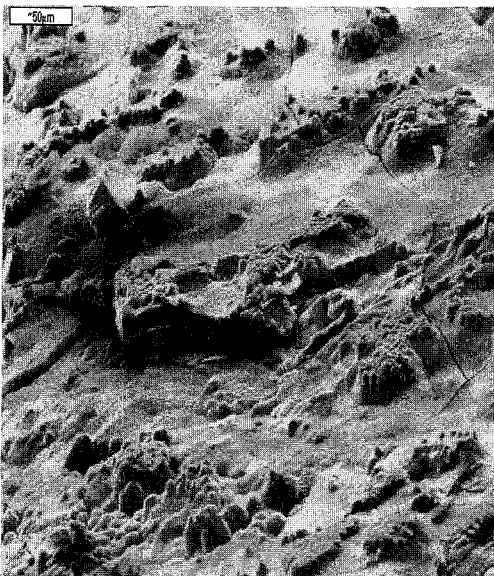
(배율 = 350)

그림 9 증류수환경 하에서
시험편 표면에 형성된 녹
(분무횟수 = 1300)



(배율 = 350)

그림 11 산성안개환경 하에서
시험편 표면에 형성된 녹
(분무횟수 = 1300, pH5)



(배율 = 350)

그림 10 산성안개환경 하에서
시험편 표면에 형성된 녹
(분무횟수 = 1300, pH6)

3.2 녹이 형성된 내후성강재의 피로한도의 비교

무도장교량의 내후성강재에 안정녹의 피막이 형성되지 않고 층상박리녹이 형성된다면 구조물의 강도에 심각한 영향을 줄 수 있다. 특히, 교량은 반복되는 피로부하를 받고 있기 때문에 피로한도에 대한 검토가 있어야 하겠다.

증류수, pH6 및 pH5의 산성안개수 분위기 하에서 녹이 형성된 시편(1300회 분무시편)에 대하여 피로시험을 수행하여, 그 결과를 그림 12에 S-N곡선으로 나타내었다. 그리고 각각에 대한 $N=10^7$ 사이클에서의 피로한도를 표 3에 정리하였다. 그림 12로부터, 증류수환경 하에서 안정녹이 형성된 시편의 피로한도가 가장 높고, pH6 및 pH5의 순으로 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 모든 경우에서 뚜렷한 니이(knee)가 출현하여 명확한 피로한도 값을 보여주고 있다. 뚜렷한 니이의 출현은 철강재료의 상온 및 건전환경 하의 피로의 특징으로, 본 연구에서는 부식환경이 아닌 실험실환경 하에서 피로시험이 이루어졌기 때문에 니이가 출현한 것으로 생각된다.

표 3으로부터, 자연상태를 가정한 증류수 분위기 하에서의 1300회 분무를 수행한 시편의 피로한

도를 기준으로, pH6 녹발성 시편의 피로한도는 약 14 %, pH5 시편의 피로한도는 약 21 % 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 피로한도의 저하의 원인은 산성안개에 노출되었던 시편의 표면에 공식(pitting)에 의하여 부식피트가 형성되었기 때문이라고 추측된다. 즉, 피트의 형성으로 인한 응력 집중 때문에 피로균열의 발생이 용이해진 결과라 생각된다. 이러한 부식 피트의 수 및 크기는 pH에 영향을 받을 것이다. 따라서 다음 장에서는 각 시편 표면부에 발생한 부식피트의 관찰을 통하여 이러한 사실을 확인하고자 한다.

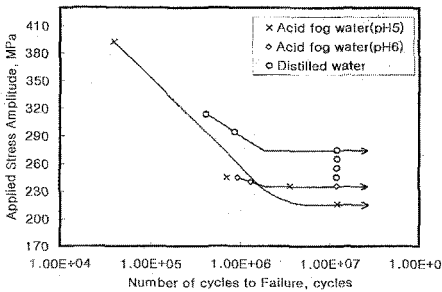


그림 12 다양한 환경 하에서 녹형성 시킨 시편면에 대하여 건전환경 하에서 구한 S-N곡선 (중류수, pH6 및 pH5 산성안개)

표 3 각 환경 하에서 구한 피로한도 값

환경	Fatigue limit(MPa)
Distilled water	275
Acid fog water(pH6)	235
Acid fog water(pH5)	216

3.3 녹형성 시편의 부식피트의 관찰

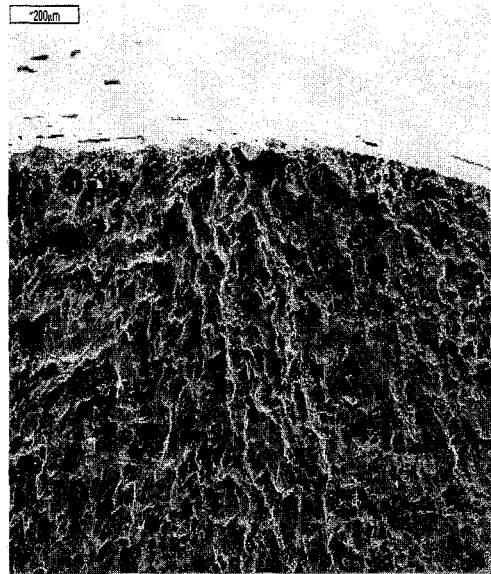
회전굽힘피로시험을 통하여 파단된 중류수, pH6 및 pH5 산성안개수 분무 시편을 대상으로, 피로파면의 파단 기점부를 전자현미경으로 촬영하여 그 결과를 그림 13, 14, 15에 각각 나타내었다.

중류수 분위기 하에서 녹형성된 시편의 피로파단 기점부에는 부식에 의한 피트발생이 거의 관찰되지 않는다. 한편, pH5 및 pH6의 산성안개환경 하에서 녹형성된 시편에서는 부식피트의 발생이 인정되며, pH가 낮을수록 즉 강산성일수록 피트의 수 및 크기가 증가하고 있다. 또한 표면녹층이 심각하게 손상되어 불균일하고, 두께도 불균일함을 알 수 있다. 즉 앞 절에서 지적했듯이, 발생된 피

트는 응력집중부로서 작용하여 피로균열의 발생을 촉진시킴과 아울러 시편의 유효 단면적을 감소시키기 때문에, pH에 따른 부식피트의 발생상황은 해당 재료의 피로한도크기와 바로 직결되고 있다. 이러한 상황은 메조균열부(Mesocrack range)의 개념으로 검토될 수 있다. [6,7] 시험편 표면에 발생한 피트는 그림 16의 모식도와 같이 완전한 구형이 아니고 다수의 요철부를 갖는 구형이다. 그 결과, 피로균열은 요철부에서 발생하여 점선과 같이 성장한 후 거시균열로 성장하게 된다. 따라서 점선과 같이 성장한 상태를 피트결합의 메조균열부로 평가하게 된다. 여기서 균열길이(a)는 메조균열부의 면적(A)을 측정하여 그 평방근(\sqrt{A})이 된다. 그러면 메조파괴역학(Meso fracture mechanics)에 기초하여 피트의 즉 메조균열부의 응력확대계수는 다음과 같다.

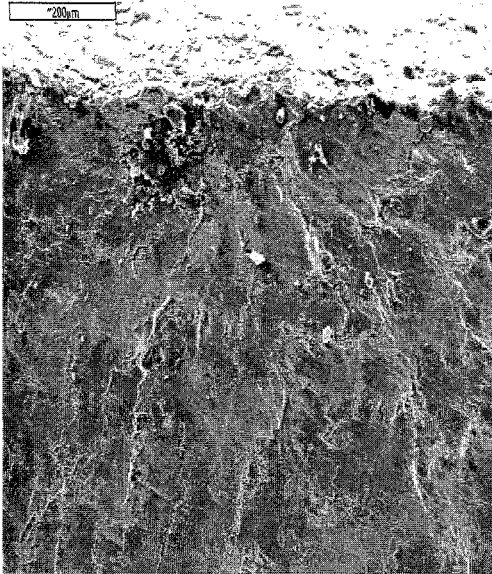
$$K = \sigma_a \sqrt{\pi a} = \sigma_a \sqrt{\pi \sqrt{A}}$$

그러므로, 크고 깊은 부식피트일수록 상대적으로 낮은 응력에서의 균열 발생원이 되고, 높은 균열구동력을 갖게되어 피로수명을 단축시킨다고 할 수 있다.



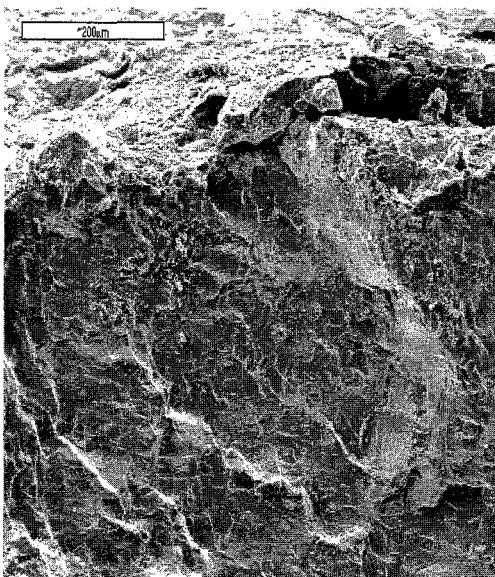
(배율 = 150)

그림 13 중류수환경 하에서 녹형성 시킨 시편면의 피로파면 (분무회수 = 1300)



(배율 = 150)

그림 14 산성안개환경 하에서 녹형성 시킨 시험편의 피로파면
(pH6의 산성안개, 분무횟수 = 1300)



(배율 = 150)

그림 15 산성안개환경 하에서 녹형성 시킨 시험편의 피로파면

(pH5의 산성안개, 분무횟수 = 1300)

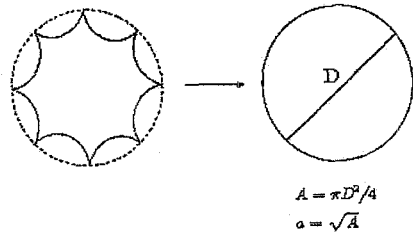


그림 16 메조파괴역학적 관점에서 본 부식피트에서의 균열발생의 모식도

4. 결론

최근 산성안개다발지역에 무도장 교량이 다수 시공되고 있음에 비추어, 무도장 교량용 내후성 강재(SMA50 W재, KS D3529)를 증류수와 pH6, pH5의 산성안개환경 하에서 가속적으로 녹을 발생시켜, 각 환경 하에서의 녹형성 거동을 특히 내식성 피막인 안정녹의 형성유무라는 관점에서 고찰하였다. 또한, 내후성 강재의 용도가 피로하중을 받는 구조물이 많음을 고려하여, 상기 환경 하에서 녹형성된 시편을 대상으로 피로시험을 수행하여, 피로한도의 변화 및 그 변화원인에 대해서도 고찰하였다. 얻어진 결론을 다음에 요약하였다.

1. 증류수환경 하에서 형성되는 녹은 피막이 치밀한 안정녹인데 비해, pH6의 산성안개환경 하에서는 녹피막의 손상과 박리가 발생하였고, 산성도가 높은 pH5에서는 그 정도가 더욱 현저하였다. 따라서, 약산성의 pH6 및 강산성의 pH5의 산성안개는 내후성 강재의 안정녹의 피막형성을 방해한다. 즉, 산성안개의 주요 오염성분인 SOx와 NOx 등에 과다 노출된 환경 하에서의 내후성강재의 시공은 부적합하며, 구조물의 시공시방에도 이러한 사항이 포함되어야 할 것으로 사료된다.

2. 건전상태를 가정한 증류수 분위기 하에서 녹형성시킨 시편의 피로한도를 기준으로, pH6 녹발생 시편의 피로한도는 약 14%, pH5 시편의 피로한도는 약 21% 감소하였다. 이러한 피로한도의 저하원인은 산성안개에 노출되었던 시편의 표면에 형성된 부식피트 때문으로 생각되며, pH가 낮을수록 피트의 수 및 크기가 증가한다. 즉, 피트의 형성으로 인한 응력집중 때문에 피로균열의 발생이 용이해진 결과라 생각된다.

참고문헌

- [1] Pohang Research Institute of Industrial Science & Technology, Steel Structure Research Laboratory, Uncoated Weathering Steel Bridge, 1-15
- [2] Pohang Research Institute of Industrial Science & Technology, Steel Structure Research Laboratory, Guidelines for the Use of Uncoated Weathering Steel Bridges, BR-D-98-001, I-18~I-19, 1999
- [3] Min-Gun Kim, et al, J. Korea Air Research Asso, 15-5, 491, 1998
- [4] Min-Gun Kim, Yong-Ho Lim, Transactions of the KSME A, 24-7, 1841, 2000
- [5] Min-Gun Kim, Yong-Ho Lim, Jin-Hak Kim, J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 38, No.7, 911, 2000
- [6] Jin-Hak Kim, Min-Gun Kim, Transactions of the KSME A, 24-11, 2742, 2000
- [7] Y. Murakami, M. Endo, Transactions of the JSME, 49-438A, 127, 1983