

# SS41강의 F.E.M.복합조직강에서 노치변화가 부식피로파괴에 미치는 영향

도영민<sup>†</sup> · 이규천

두원공과대학 자동차공학과  
(2001. 5. 25. 접수 / 2001. 6. 21. 채택)

## Influence of Notch Change on Corrosion Fatigue Fracture in F.E.M. Dual phase Steel of SS41 Steel

Young-Min Do<sup>†</sup> · Kyu-Cheon Lee

Department of Automobile Engineering, Doowon Technical College  
(Received May 25, 2001 / Accepted June 21, 2001)

**Abstract :** The rotated bending fatigue test was conducted in air and in 3.5% NaCl salt solution to investigate the fatigue fracture behaviour of raw material and F.E.M. dual phase steel made from raw material(SS41) by a suitable heat treatment. This study has compared the initial microcrack creation of material by tensile test with that by fatigue test. And the rotated bending test of cantilever type under the condition of 3.5% NaCl salt solution and air has investigated the corrosion fatigue fracture behaviour with the variation of stress concentration factor determined by each of notch shapes. The initial microcrack have been developed in fragile grainboundary with general corrosion occurring in raw material ; in the pits built up by corrosion in F.E.M. dual phase steel because pits bring out stress concentration. It is small that the degree of decrease in corrosion fatigue life for F.E.M. dual phase steel compared with raw material because the notch sensitivity of F.E.M. dual phase steel is lower than raw material in reason of characteristics with two-phase construction.

**Key Words :** raw material, dual phase steel, corrosion fatigue fracture, notch, stress concentration

### 1. 서 론

과학기술의 비약적인 발전과 더불어 원자로, 우주개발, 해양개발 등에 관한 연구가 진전됨에 따라 각종 재료에 대한 경량화, 고강도화, 강인화 내식성 등의 재료과학적 성질이 요구되어지고 있다. 또한, 구조물 부재의 안전성을 평가하기 위해서는 부식환경에서의 재료강도특성 규명이 필요하게 되었고 안전설계와 수명예측을 위하여 부식피로가 공학상 매우 중요한 문제로 인식되어, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 식염수 환경하에서 사용되는 기계나 구조물 등의 부식피로는 일반적으로 초기에 형성된 부식pit에서 크랙이 발생, 전파되어 파단에 이른다. 종래의 해양구조물 재료는 인장강도가

500MPa 이하의 연강이 다량 사용되고 있으나, 설계상 고강도, 저렴한 가격, 안정성 등을 요구할 경우 고강도 재료의 사용은 불가피하다. 이에 따라, 일반 구조용강인 SS41강을 열처리하여 고강도화 시킨 복합조직강을 해양구조물용 재료로서 사용할 경우, 이 재료의 해수부식 피로파괴특성을 규명하고, SS41강과 비교·고찰할 필요가 있다.

기계나 구조물 등에서 발생하는 파괴는 거의가 그 부재의 단면이 변화하는 부분, 즉 응력집중요소가 존재하는 곳에서 발생하기 때문에 Notch형상에 따른 부식피로파괴는 실용상 매우 중요한 문제이다. 한편 복합조직강의 부식피로파괴에 미치는 농도<sup>1)</sup>, 온도<sup>2)</sup>변화의 영향 등에 관한 연구들이 수행되어 그 결과들이 보고된 바 있으나, 식염수 환경하에서의 Notch변화에 대한 영향을 보고한 예는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구는 응력집중계수 및 Notch형상을

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
ymdo@doowon.ac.kr

달리한 SS41강과 F.E.M.복합조직강을 인장시험에 의한 재료의 초기미소크랙 형성거동과 대기 및 부식피로실험에 의한 초기미소크랙 형성거동에 대해서 상호 비교·고찰하였다. 또한 대기 및 3.5% NaCl 수용액중의 자유부식조건하에서 회전굽힘 부식피로 실험을 행하여 응력집중계수 및 Notch형상 변화에 따른 부식피로거동을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 소재는 직경 25mm의 열간압연재인 SS41강이며 그 화학적 성분은 Table 1과 같다. 이 소재를 Fig. 1과 같은 과정으로 열처리하여, Fig. 2와 같은 미시조직의 모양을 나타낼 수 있다. 즉, Fig. 2(a)에서 연질인 페라이트(ferrite)가 경질인 퍼얼라이트(pearlite)를 둘러싼 형태를 모재(raw material ; R.M.)라 하고, Fig. 2(b)에서 연질인 페라이트가 경질

Table 1. Chemical composition of specimen

| material | Chemical composition (Wt. %) |      |      |       |       |
|----------|------------------------------|------|------|-------|-------|
|          | C                            | Si   | Mn   | P     | S     |
| SS41     | 0.19                         | 0.20 | 0.53 | 0.029 | 0.042 |

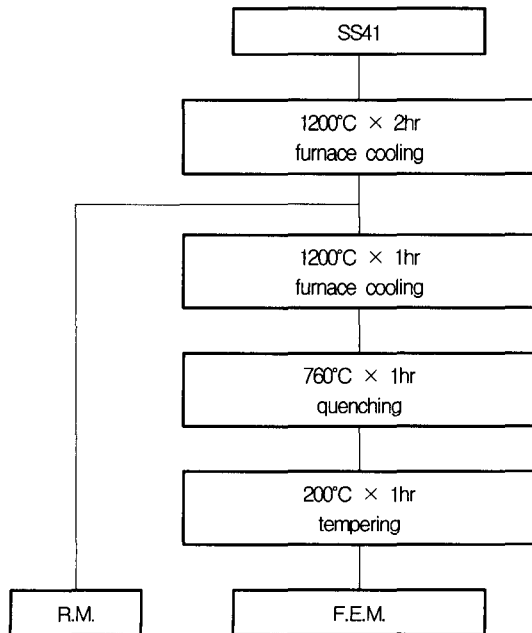
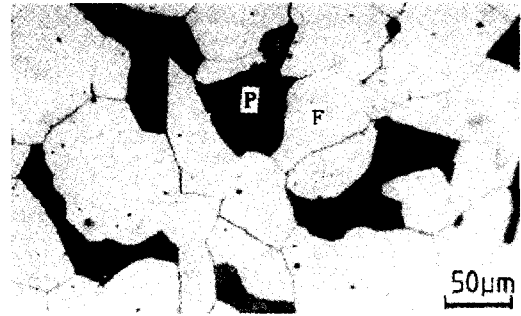
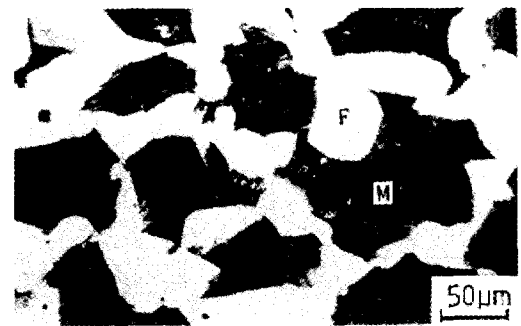


Fig. 1. Heat treatment process of R.M. and F.E.M. dual phase steel



(a) R.M. Microstructure



(b) F.E.M. Microstructure

Fig. 2. Optical micrographs of R.M. and F.E.M. dual phase steel

인 마르텐사이트(martensite)를 둘러싼 F.E.M.(ferrite encapsulated islands of martensite)복합조직강이라 한다. Table 2, 3은 각각 모재와 F.E.M.복합조직강의 기계적 성질과 금속적 성질을 나타낸 것이다. Fig. 3은 피로시험편의 형상 및 치수를 나타낸 것으로서, 각 시험편에 대한 응력집중계수는 Peterson선도<sup>3)</sup>에서 구하였다. 실험에 사용된 기기는 편지식 회전굽힘 피로시험기로서, 하중파형은 정현파형, 응력비 R=-1, 주파수는 감속기를 이용하여 4Hz로 하였다. Fig. 4는 수용액 순환장치도로서, 수용액의 온도는 히팅장치(heating apparatus)와 자동온도조절장치(thermostat)를 이용하여 30±1°C로 제어하고, 에어뱅크(air bank)를 이용하여 용존산소량은 7~7.2ppm으로 유지하였으며, 수용액을 150ml/min으로 공급하기 위해 펌프

Table 2. Mechanical properties of the materials

|        | Tensile strength (MPa) | Yield strength (MPa) | Young's modulus (GPa) | Elongation (%) | Reduction of area (%) | Poisson's ratio ( $\mu$ ) |
|--------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|
| R.M.   | 492.7                  | 330.5                | 206.0                 | 33.14          | 58.44                 | -                         |
| F.E.M. | 726.77                 | 406.60               | 194.2                 | 10.21          | 22.78                 | 0.2704                    |

Table 3. Metallurgical properties of the materials

|        | ferrite grain size ( $\mu\text{m}$ ) | pearlite grain size ( $\mu\text{m}$ ) | martensite grain size ( $\mu\text{m}$ ) | pearlite volume fraction (%) | martensite volume fraction (%) | Hardness(Hv), 25gf |          |            |       |
|--------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|------------------------------|--------------------------------|--------------------|----------|------------|-------|
|        |                                      |                                       |   |                              |                                | ferrite            | pearlite | martensite | ratio |
| R.M.   | 65                                   | 90                                    | -                                       | 12.50                        | -                              | 151                | 270      | -          | 1.79  |
| F.E.M. | 65                                   | -                                     | 140                                     | -                            | 50.20                          | 151                | -        | 623        | 4.05  |

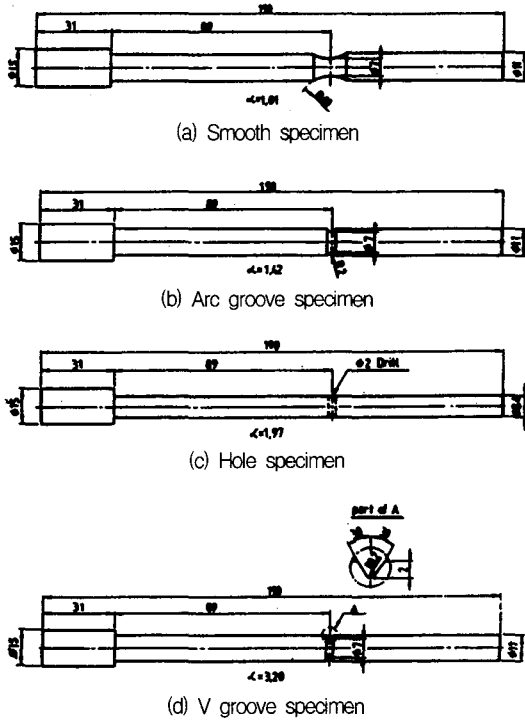


Fig. 3. Shape and dimensions of fatigue test specimens

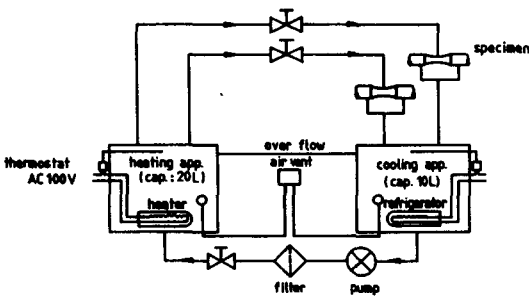


Fig. 4. Circulating system of 3.5% NaCl solutions for corrosion fatigue test

와 유량조절밸브를 사용하였다. 3.5% NaCl 수용액을 피로시험편에 직접 주입시키기 위해 개폐식 해수챔버(chamber)를 부착하였으며, 부식피로시험중에 생기는 부식생성물을 제거하기 위해 필터(filter)를

사용하였다. 그리고 pH, 용존산소량 및 온도를 고정시키기 위하여 수질측정기(WQC-1A)로서 일정시간마다 측정 및 조정하였다. Notch시험편에 부하된 응력은 최소단면적을 기준으로 한 공칭응력이며, 시험편의 직경은 실측공구현미경(배율:20배)으로 측정하였다. 실온·대기중에서 시험한 시험편들을 제외한 모든 피로시험편들은 파단면위에 부식생성물들이 쌓여 있기 때문에 아세톤에 30~40초 정도 담그고 초음파 세척을 하여 부식생성물을 제거한 후 주사식 전자현미경으로(S.E.M.)으로 파단면을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 인장 및 피로시험에 의한 미소크랙 형성 거동

Fig. 5는 ASTM E8에 따른 인장시험을 실시하면서 항복점을 경과하여 necking이 발생한 뒤, 하중을 제한하여 인장축에 평행한 중단면상에서 관찰된 void의 생성위치를 보여주는 사진이다. R.M.에서는 미소공동(microvoid)이 주로 시멘타이트(cementite)와 페

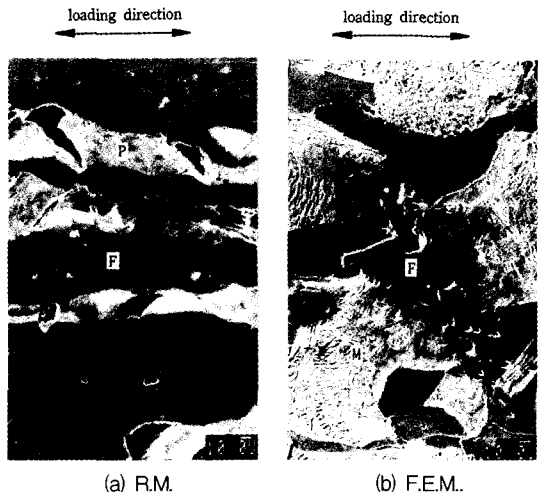


Fig. 5. Micrographs showing the voids formed during the tensile test (P: pearlite, F: ferrite, M: martensite)

라이트(ferrite)가 층상을 이루는 퍼얼라이트(pearlite)조직에서 발견되며, 산발적인 분포를 보이고 있다. 이것은 퍼얼라이트 내에서 페라이트의 소성유동을 시멘타이트가 구속함으로써 그 입계부분에서 미소공동이 형성되어 전체적으로 퍼얼라이트에서 미소공동이 형성되는 것으로 생각된다. 그리고 페라이트에서 발견되는 작은 미소공동은 개재물에서 생기는 것으로 보여진다. F.E.M.복합조직강에서는 미소공동이 페라이트와 마르텐사이트의 경계 및 페라이트 입내에서 존재하고 있으며, 응력축에 거의 45°방향으로 배열되어 있음을 알 수 있다. 마르텐사이트조직은 무확산변태에 의하여 합금원소 및 탄화물이 과포화되어 있기 때문에 기지조직인 페라이트에 비하여 불균일한 표면을 이루고 있다. 따라서 미시적으로 판단될 수 있을 정도의 응력집중이 상의 경계에서 우선적으로 일어나고, 여기에서부터 미소공동이 형성되어진다고 생각된다.

Fig. 6과 7은 평활재 시험편에 있어서  $5 \times 10^5$ 시간

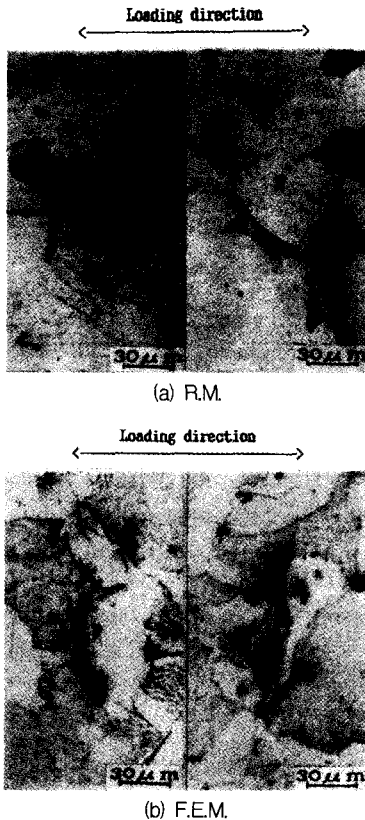


Fig. 6. Micrographs showing the crack initiation site formed during the fatigue test in air (P: pearlite, F: ferrite, M: martensite)

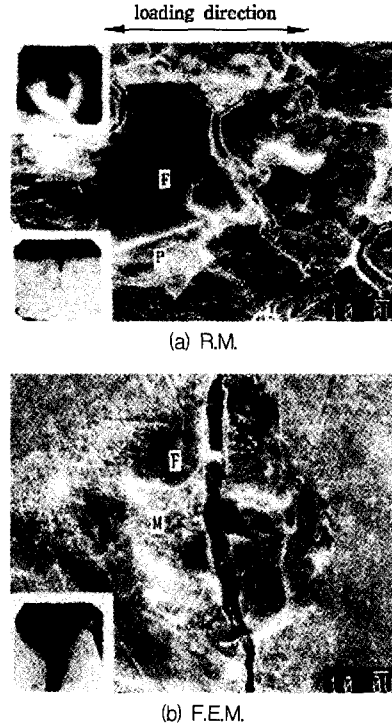


Fig. 7. Micrographs showing the crack initiation site formed during the fatigue test in artificial seawater (P: pearlite, F: ferrite, M: martensite)

강도 응력을 일정 반복회수 이하하였을 때, 원주표면에 생성된 초기미소크랙( $100\mu\text{m}$  이하)의 형성 위치를 보여주는 사진이다. 대기중에서의 초기미소크랙이 형성 위치를 나타내는 Fig. 6인 경우, R.M.인 (a)에서는 피로손상이 누적됨으로써 형성된 연질인 페라이트 입내의 슬립밴드(slip band)나 페라이트와 퍼얼라이트의 경계에서 초기미소크랙이 형성되며, 복합조직강인 (b)에서는 R.M.과는 달리 슬립밴드는 확인되지 않고 연질인 페라이트부분이나 마르텐사이트 입계 및 입계근방에서 초기미소크랙이 형성되고 있다.

3.5% NaCl 수용액 중에서의 초기미소크랙의 형성 위치를 나타내는 Fig. 7인 경우, R.M.인 (a)에서는 시험편 표면이 전체적으로 전면부식된 상태에서 페라이트나 퍼얼라이트의 입계를 따라 초기미소크랙이 형성되어 있다. 일반적으로 퍼얼라이트에서 발생하는 부식피트가 크랙의 기점이 되어 크랙이 발생·진전한다고 보고되어 있으나<sup>4)</sup>, 본 실험에 있어서 R.M.의 입계에 존재하는 불순물은 입내보다 부식에 의해 더 활성적이기 때문에 여러 가지 이온들

이 취약한 입계에 축적됨으로써 이러한 입계가 좋은 응력집중원이 되며, 그 결과 이 부분에서 초기미소크랙이 형성된다고 판단된다. 좌측 상단에 보여지는 다이아몬드 콘 형식의 etch pit인 방위성 pit는 원자배열이 BCC구조인 경우 원자충진율이 가장 좋은 {100}면을 따라 부식이 됨으로써,  $\alpha$ -철인 BCC구조로 이루어진 기지조직인 페라이트의 {100}면을 따라 전체적으로 고르게 분산되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 etch pit에서 크랙이 발생하는 경우도 있으나<sup>5,6)</sup>, 본 연구에 있어서는 부식에 의한 입계의 취약화, 즉 입계의 불안정성에 따른 낮은 내식성이 초기미소크랙 형성에 결정적인 원인이 되어 주로 이러한 입계를 따라 피로크랙이 형성된다고 생각된다. 복합조직강인 (b)에서는 어느 특정한 조직의 선택성 없이 국부적인 부식피트의 발생으로 초기미소크랙이 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 크로라이드(Cl-)이온의 작용으로 산화피막의 국부적인 파괴로 형성되는 부식피트 저부에서 전기화학적 반응이 유도되어 피팅(pitting)에 의해 초기미소크랙이 형성되어 성장하는 것으로 생각된다. Fig. 8은 초기미소크랙이 형성된 시험편을 축방향으로 절단하여 그 단면부와 표면부를 대응시켜 S.E.M.으로 입체촬영한 사진이다. R.M. 인 (a)인 경우 표면부는 취약한 입계를 따라 입계부식된 상태이며 깊이 방향으로는 입계만을 따라 크랙이 진전하는 양상을 확인할 수 있고, F.E.M. 복합조직강인 (b)인 경

우 조직의 선택성 없이 발생된 부식피트저부가 노치역할을 함으로써 깊이 방향으로 특정한 조직의 선택성 없이 진전하는 양상을 관찰할 수 있다.

### 3.2. 응력집중계수의 변화에 따른 부식피로 특성

Fig. 9~12는 SS41강인 모재와 복합조직강을 각각 공기중 및 인공해수중에서 피로시험편의 응력집중계수와 Notch형상( $\alpha=1.01, 1.42, 1.97, 3.20$ ) 및 작용응력레벨을 변화시켜 회전굽힘피로시험한 피로강도곡선(S-N curve)을 나타낸 것이다. 공기중 피로시험에서의 피로강도곡선은 응력집중계수가 증가할수록 Notch형상에 관계없이 피로강도는 감소하는 반면에, 인공해수중의 부식피로시험에 있어서는 황공재( $\alpha=1.97$ )가 원호재( $\alpha=1.42$ )보다 피로강도가 증가된 경향을 보였다. 이것은 환상원호노치재의 경우 원주표면 전반에 걸쳐 부식피로가 진행되어 부식 pit에서 발생한 크랙이 표면에서 깊이쪽으로 전파하

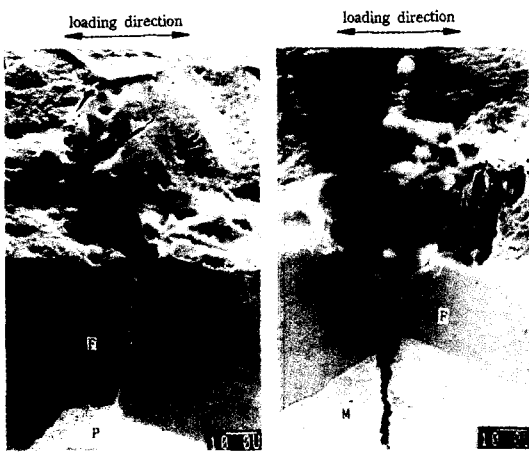


Fig. 8. S.E.M. micrographs showing the appearance with the corresponding microstructure formed during the fatigue test in artificial seawater (P: pearlite, F: ferrite, M: martensite)

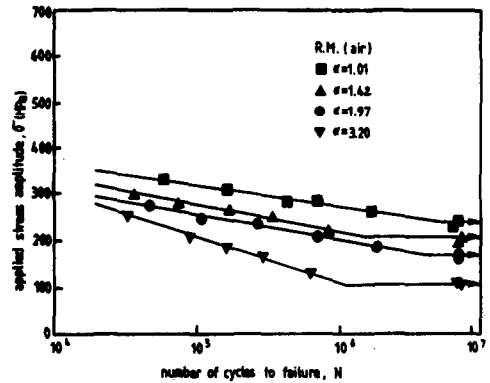


Fig. 9. S-N curves of R.M. in air

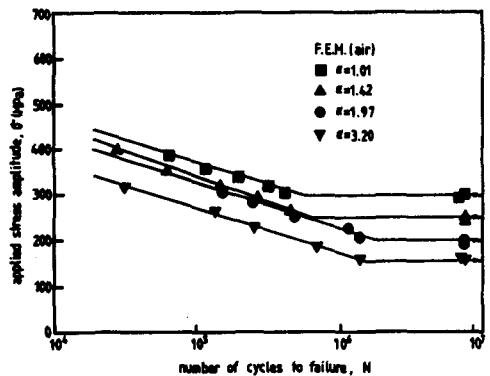


Fig. 10. S-N curves of F.E.M. dual phase steel in air

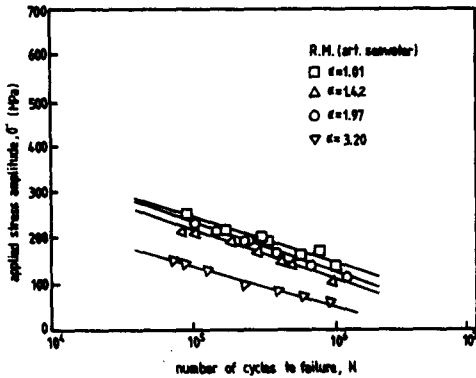


Fig. 11. S-N curves of R.M. in artificial seawater

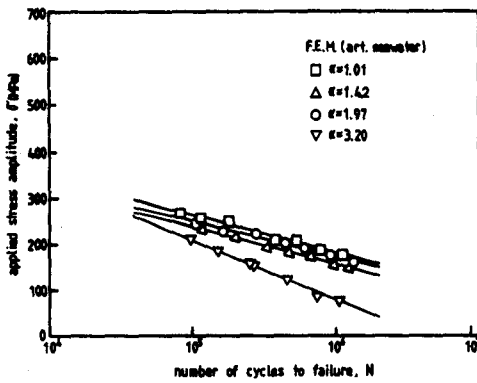


Fig. 12. S-N curves of F.E.M. dual phase steel in artificial seawater

므로 여러 단(step)이 생기는 반면에, 황공재의 경우는 표면에서의 단은 거의 찾아볼 수 없고, 황공내에서의 부식pit로부터 크랙이 발생하여 원주표면으로 진전하는 경향이 나타나는 것으로 보아 기하학적 형상에 따른 부식양상의 차이로 생각된다. 즉, 황공 노치 내부는 주위의 신선한 부식액과의 순환이 거의 되지 않아서 크로라이드 이온의 고농도화가 초래되기 때문에 표면부위보다 훨씬 부식이 활성화된다. 따라서 크랙발생지점이 실용력이 낮은 곳에 분포하게 된다. 그 결과로 원호재보다 부식피로수명이 높아진 것으로 생각된다. 인공해수중에서의 피로강도곡선은 공기중에 비하여 피로수명이 현저하게 감소하며 피로한도가 명확히 나타나지 않는 것으로 보아 부식용매와 금속간의 전기화학적 작용 및 기계적 피로작용으로 Notch에서의 초기크랙발생이 용이해짐을 알 수 있다. Fig 13은 각 시험편에 대하여 피로수명  $1 \times 10^6$ 을 기준으로 했을 때의 공기중에 대한 인공해수의 피로강도를 나타내었다. 일반적으로

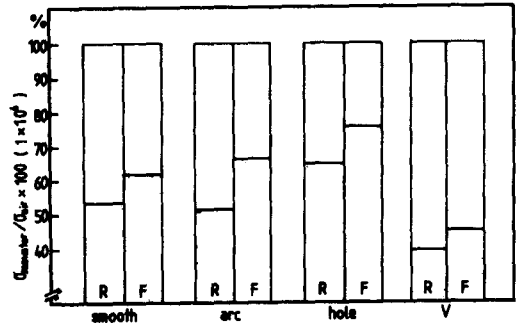


Fig. 13. Corrosion fatigue strength ratios in contrast to fatigue strength in air

고강도강은 노치감도가 높기 때문에 부식pit와 같은 작은 결함에 의한 큰 강도저하를 나타내는 것으로 보이나, 본 실험의 경우, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 복합조직강이 모재보다 피로강도저하가 적은 것을 알 수 있으며, 이는 연질상과 경질상의 조직에 의한 노치감도의 저하가 발생하고 이것이 부식pit 발생에 대해서도 낮은 감수성을 보이기 때문이라고 생각된다. Fig 14는 모재와 복합조직강에 대한 응력집중계수와 부식피로수명  $1 \times 10^6$ 을 기준으로 한 부식피로강도(공기중  $1 \times 10^7$ )와의 관계를 나타낸 것으로, 응력집중계수가 증가함에 따라 피로강도가 감소하는 경향이 있다. 그러나 인공해수중에 있어서  $\alpha = 1.97$ , 즉 황공재인 경우에는 원호재( $\alpha = 1.42$ )보다 부식피로강도가 증가하는 경향이 있는데, 이는 앞에서 고찰하였듯이 Notch형상에 따른 부식양상의 차이

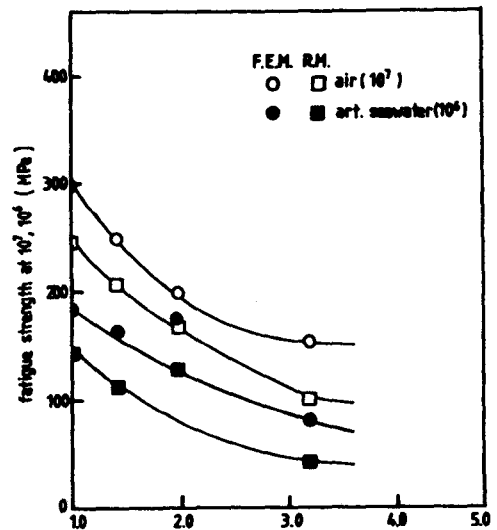


Fig. 14. Relation between stress concentration and fatigue strength

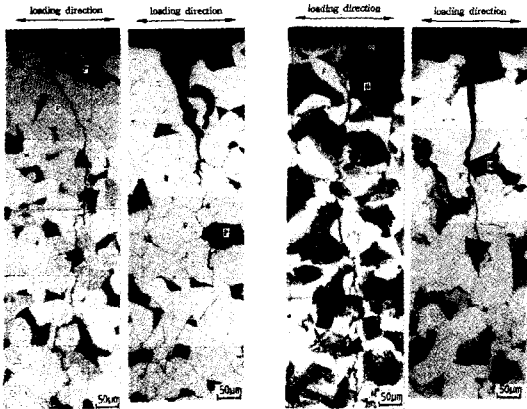


Fig. 15. Crack propagation of R.M. and F.E.M. dual phase steel (a: air, R.M.,  $\sigma=285.80\text{MPa}$ , b: art. seawater, R.M.,  $\sigma=172.63\text{MPa}$ ) (c: air, F.E.M.,  $\sigma=310.48\text{MPa}$ , d:art. seawater, F.E.M.,  $\sigma=207.53\text{MPa}$ ) (P: pearlite, F: ferrite, M: martensite)

때문이다. Fig. 15는 평활재 피로시험편에 대하여  $5 \times 10^5$ 시간강도 응력을 부하하였을 때 피로크랙이 진전되고 있는 상태에서 시험편을 시험기로 분리한 후, 시험편을 축방향으로 절단하여 연마, 에칭함으로써 형성된 피로크랙 진전과정을 관찰한 사진이다. 공기중에서는 모재나 복합조직강 모두 페라이트 입내 또는 입계를 따라 지그재그로 진전하고 있는 반면에, 인공해수중인 경우, 모재는 입계를 따라 크랙이 진전하고 있으며, 복합조직강은 pitting에 의해 형성된 크랙이 조직 선택성없이 직진하고 있다. R.M.의 경우는 부식작용으로 인하여 입계가 취약화되어 크랙이 입계를 따라 진전한 것이라 보여진다.

#### 4. 결론

SS41강과 열처리하여 얻은 F.E.M.복합조직강을 인장실험과 회전굽힘 피로시험기를 사용하여 대기 및 부식환경에서 형성된 초기미소크랙 형성거동과 3.5% NaCl 수용액중의 자유부식조건하에서 응력집중계수 및 노치형상 변화에 따른 부식피로거동을 고찰한 결과는 다음과 같다.

1) 인장실험시 R.M.은 퍼얼라이트 부분에서 미소공동이 발생하나, F.E.M.복합조직강의 경우는 페라이트의 개재물과 마르텐사이트의 입계 및 입계근방에서 입계면의 분리에 의하여 미소공동이 발생한다.

2) 대기중의 피로실험시 R.M.은 페라이트내의 슬립이나 퍼얼라이트의 입계를 따라 피로크랙이 발생하나, F.E.M.복합조직강의 경우는 슬립은 확인되지 않고 연결인 페라이트나 마르텐사이트 입계 및 입계근방에서 초기미소크랙이 발생한다.

3) 부식피로실험시 SS41강은 전면부식을 일으키며 취약한 상태에서 초기미소크랙이 발생하고, F.E.M.복합조직강은 피팅에 의해 응력집중이 초래되어 이러한 피트로부터 초기미소크랙이 발생한다.

4) 환상노치재의 경우는 응력집중계수가 높을수록 피로수명이 감소하나, 황공재의 경우는 노치형상으로 인한 부식양상의 차이로 말미암아 실용력이 낮은 곳에서 크랙이 발생함으로 인하여 원호재보다 부식피로 수명이 향상된다.

5) F.E.M.복합조직강은 조직의 2상 성질로 인하여 모재보다 노치감도가 낮아 R.M.에 비하여 공기중에 대한 부식피로 수명의 감소율이 적다.

#### 참고문헌

- 1) Sae-Wook Oh, Ho-Min Kang, Young-Min Do and Tae-Man Kim, "Influence of Salt Solution Concentration on Pit Growth Characteristic of Dual Phase Steel", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 278~286, 1988.
- 2) Sae-Wook Oh, Young-Min Do, Soo-Young Park and Young-Ha Yum, "The Effects of 3.5% NaCl Aqueous Solution Temperature on the Corrosion Fatigue Fracture of Dual Phase Steel", Proceedings of PACOMS-90(Seoul Korea), Vol. 3, pp. 201~206, 1990.
- 3) R. E. Peterson, "Stress Concentration Design Factors", John Wiley & Sons, New York, p. 48, 49, 50, 104, 1965.
- 4) Komai, K., Minoshima, K., Kinoshita, S. and Kim, G. S., "Corrosion Fatigue Crack Initiation of High-stensile Strength Steels in Synthetic Sea Water", JSME Trans.(A), Vol. 53, No. 496, pp. 2267~2273, 1987.
- 5) Masuda, C., Nishijima, S., Abe, T., Sumiyoshi H., "On Corrosion Fatigue Mechanisms for S45C and SCM435 Steels in Rotating Bending", JSME Trans. (A), Vol. 50, No. 453, pp. 1019~1025, 1984.
- 6) Kawai, S., Kasai, K. and Kotani, S., "Fatigue Strength of Round Bars Fitted Sleeves in 3% NaCl Solution", JSMS, Vol. 30, No. 329, pp. 173~179, 1981.