

〈論 文〉

인공부식재의 피로강도평가와 통계학적 수명예측에 관한 연구

권재도* · 진영준** · 장순식***

(1992년 4월 4일 접수)

Life Prediction and Fatigue Strength Evaluation for Surface Corrosion Materials

Jae-Do Kwon, Yeung-Jun Jin and Soon-Shik Jang

Key Words : Degradation(열화), Artificial Corrosion(인공부식), Random Variable(확률변수), Corrosion Pit(부식피트), Fatigue Strength(피로강도), Life Prediction(수명예측), Extreme Value Statistics(극치통계)

Abstract

The strength evaluation and life prediction on the corrosion part of structure is one of the most important subjects, as a viewpoint of reducing economic loss by regular inspection, maintenance, repair and replace. For this purpose, it has been difficult to obtain the available data on growth of pit depth or growth rate of each pit which depends on time. In this paper, the life prediction and strength evaluation method was suggested for the structure with irregular stress concentration part by surface corrosion. The statistical distribution pattern of corrosion depth and the degree of fatigue strength decline were confirmed according to corrosion period by artificial corrosion of SS41 steel. The life prediction and the fatigue strength evaluation of materials with consideration of the corrosion period on the extreme value statistic analysis by the data of maximum depth of corrosion and on random variable was studied.

1. 서 론

기계구조물의 강도 평가는 파괴역학의 도입과 그 발전에 따라 비약적인 진보를 거두어 왔으며 기존 기계구조물을 지속적이며, 안전하게 사용할려고 하는 요구가 커져가고 있다. 특수환경하에서의 기계구조물들을 정기적인 검사기간, 보수시기 예측 등을 행함으로서 잔존 수명을 예측하고 또 사고가 발생

되는 것을 미연에 방지하기 위한 하나의 수단으로 수명 예측^(1,2) 이 산업계 각 분야에서도 가장 중요하고 실질적인 문제로 대두되기 시작되었다.

실제 장기 사용한 기계구조물들에서는 부식에 의한 피트(pit)는 반드시라고 하여도 좋을 만큼 존재한다고 생각되어진다. 이런 부식 피트를 하나의 결함으로 간주하면 결함을 기점으로 한 크랙의 발생 가능성^(3,4) 은 매우 높다고 생각되어진다. 그렇지만 정기적인 검사, 수리, 교체로 인하여 급작스런 파괴 사고를 미연에 방지함으로서 경제적인 손실을 줄일 수 있다는 관점에서 고려한다면, 부식에 의한 강도 평가는 매우 중요하다고 생각되어진다.

* 정회원, 영남대학교 기계설계학과

** 정회원, 영남대학교 기계설계학과 대학원

*** 정회원, 한국원자력안전기술원 기술기준부

따라서 지금까지 부식에 의한 열화와 그 수명 및 강도 평가 방법에 대해서는 응력 부식 및 부식 환경하의 피로특성에 대한 연구⁽⁵⁻¹⁰⁾ 결과는 많이 보고되고 있으며, 특히, K. Ogawa의 염수부식에 의한 열간 압연강판의 피로강도 저하 요인의 검토⁽¹¹⁾, R. Araki의 압력용기의 부식에 관한 극치 통계법의 적용⁽¹²⁾, 및 T. Yokobori의 Cr-Mo강의 응력부식과 부식피로의 비교연구⁽¹³⁾에 관해 연구를 수행한 바는 있다. 그러나 부식에 따른 표면 형상이 불규칙한 응력 집중부를 갖는 기계 구조물의 강도평가 및 수명예측을 행하기 위해서는 시간에 대한 부식 피트의 개수, 깊이 및 곡률반경의 변화 등에 대한 통계학적 데이터가 필요하나 이와같은 연구 예는 거의 보이지 않는다. 따라서 본 연구에서는 열화평가 및 수명예측에 있어서 가장 중요한 문제로 대두되는 기계구조물의 사용시간과 부식 정도에 대한 관계 곡선을 규명하기 위하여 실험실의 가속 환경하에서 부식을 시키면서 표면을 측정된 데이터로 통계적인 파라메타(parameter)를 추정하여, 인공부식시킨 부식재료 피로 강도를 평가하고, 또 부식된 구조물의 잔존수명을 예측할 수 있는 하나의 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 재료 및 시험편

2.1 실험용 재료

실험에서 사용한 재료는 SS41 구조용 압연강판으로서 그 두께는 5.2 mm인 판이며, 이 재료의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 2에 각각 나타내었다.

본 연구에서 사용될 표면 부식제를 실험실에서 가속제작하기 위한 인공 부식액 즉, 인공해수(5% Nacl)을 만든후에 초산을 첨가하여 PH 3이 되도록 하였다. 재료를 인공 부식액에 담근후 다시 실험

Table 1 Chemical composition of SS41

Si	Mn	Cr	Ni	P	C	S
0.023	0.880	0.080	0.021	0.041	0.170	0.014

Table 2 Mechanical properties of SS41

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
343.14	450.98	22	27

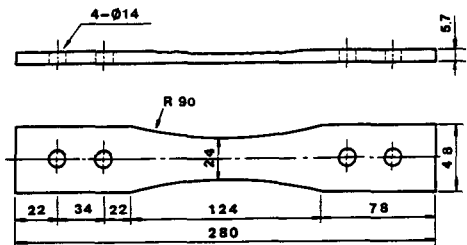


Fig. 1 Specimen geometries(all dimension:mm)

은 상태에서 자연건조시키는 과정을 일일 약 3회씩 계속 반복하면서 부식기간을 최대는 16개월까지 부식시켰으며, 또 부식액은 약 3주마다 정기적으로 교환하였다. 특히, 시험편의 중간부분 약 100 mm 정도에서만 부식이 생기도록 하기 위하여 시험편의 나머지 부분은 Araldiate와 Hardener를 중량비 10 : 3의 비율로 혼합한 에폭시 수지를 코팅시킨 다음, 로에 넣어 130°C 상태에서 약 13시간 정도 경화시킨후 부식액속에 침적 시켜서 다른 부분에서 부식이 일어나지 않도록 유도하였다.

2.2 시험편

일정 기간 (10개월 및 16개월) 동안 부식이 된

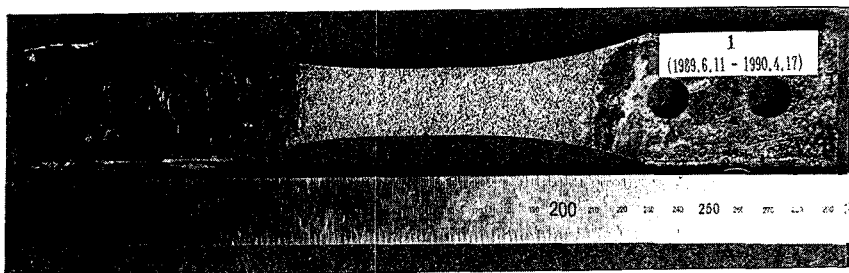


Fig. 2 Photograph of fatigue test specimen after corrosion time 10 months

재료는 먼저 코팅된 에폭시 수지를 제거한 후, Fig.1에 나타낸 바와 같이 시험편의 형태로 밀링머신을 이용하여 외형을 가공한 다음, 양쪽 체결용 구멍은 볼링머신으로 작업을 하였으며, 꼭면은 방전가공기(electricity discharge machine : E.D.M)을 사용하여 제작하였다. 특히, 피로실험하기전 모서

리 부분의 깊은 부식 피트에 의해 크랙이 발생하는 것을 방지하기 위하여 이런 부분을 에머리 페이퍼로 꼭면 연마한후 피로실험을 행하였다. Fig.2는 부식 기간이 약 10개월된 시험편을 에폭시를 제거한 후의 시험편의 형상을 나타내고 있다.

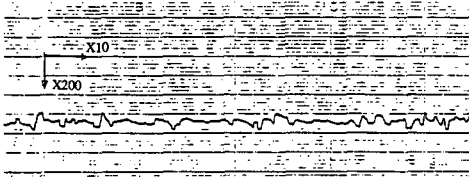


Fig. 3 Shape of measured corrosion surface

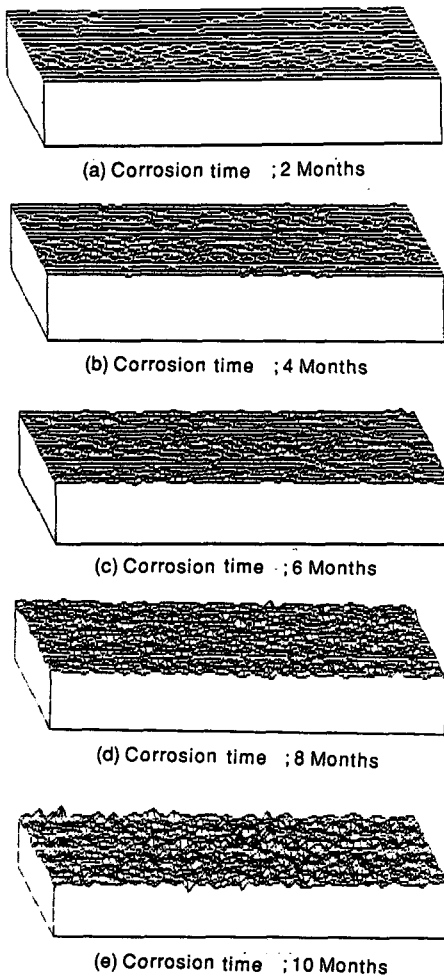


Fig. 4 Computer graphics of surface corrosion specimens

2.3 부식부 형상측정

일정 기간 부식된 시험편을 약 2개월 마다 표면조도계(surface roughness measuring instrument, No SE-3F)를 이용하여 30(X방향)×20(Y방향)mm의 부식부위 면적을 X방향으로 0.5 mm, Y방향으로는 1 mm씩 등간격으로 측정하여 시험편 1개에 대해 매번 측정시마다 1200점의 표면형상 데이터를 얻었다. 표면 계측의 배율은 깊이 방향으로 200배, 길이 방향으로 10배로 측정하여 Recorder에서 기록하였다. Fig.3는 표면조도계에서 측정된 데이터의 일예를 나타내고 있다.

본 연구에서 사용되는 부식재의 시간별 부식 손상의 정도를 시각적으로 파악하기 위하여 표면 조도계에서 측정된 아날로그형 데이터를 디지털 형태의 데이터로 변환하여 본연구실에서 개발된 3차원 화상처리 프로그램을 이용하여 화상처리한 예를 Fig.4에 나타내었다.

3. 피로 실험 방법

제작된 시험편은 Instron사 제품의 유압 서어보 피로 시험기로서 실험을 수행 하였으며, 시험기의 최대 용량은 25 KN 이다. 실험 조건은 상온에서 주파수 3 Hz, 응력비($R = P_{min}/P_{max}$)=0.05, 하중은 사인 파형의 인장-인장 하중제어 방식으로 실험을 수행하였다.

실험을 행하기 앞서 시험편을 유압척에 체결시에 체결력의 불균일에 의한 크랙 발생 부위등의 부정이 야기 될 수 있으므로 시험편의 양측에 스트레인 게이지를 부착하여 양측면의 스트레인의 차이를 약 10%이내에 들어가도록 체결 조건을 조정하면서 고정하였다. 피로 실험은 부식 기간이 10개월인 부식재와 건전재에 대해 각각 294, 333, 353 및 373 MPa의 4개 응력 레벨과 부식 기간이 16개월인 부식재를 284, 373 MPa의 2개 응력 레벨에서 실험을 행하였으며, 건전재에 비교하기 위해 부식기간을 변화시켜가면서 실험을 수행하여 부식재의 강도의 저하정도를 파악하였다.

4. 부식재의 피로수명

Fig.5는 부식재 2종류와 건전재에 대해 피로실험을 행하여 얻은 응력과 피로수명 사이의 관계, S-Nf선도를 나타내고 있다. 부식되지 않는 재료(건전재), 부식기간이 10개월 및 16개월인 재료의 파단수명을 각각 비교해 볼때 부식기간은 파단수명에 지대한 영향을 주는것으로 사료된다. 이는 부식에 의한 두께의 감소와 부식 피트와 같은 불규칙한 표면에서의 응력 집중으로 인하여 파단수명이 현저히 짧아지는 것을 파악할 수 있었다. 아울러 동일 부식 조건 및 기간에서 인공부식 후 부식깊이가 유사한 시험편을 사용하여 응력 레벨을 바꾸어가면서 피로실험을 행해 보았다. 그 결과 부식재와 건전재의 피로 수명비는 고응력 레벨에서는 수명의 감소비는 작고, 저응력 레벨에서는 수명의 감소비가 고응력레벨보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig 6은 부식의 최대 깊이와 파단 수명과의 관계를 나타내기 위해 건전재의 파단수명(N_f)에 대한 부식재의 파단수명(N_{fc})의 비(즉, N_{fc}/N_f)와 건전재의 두께(t)에 대해 5.1절에서 언급한바와 같이 측정된 최대 부식깊이(d)의 비(즉, d/t)와의 관계를 나타낸것이다. 동 그림에서 나타난바와 같이 부식에 의한 두께의 감소가 생길 경우 피로 수명비는 $(N_{fc}/N_f) = a^{(d/t)}$ 의 형태 곡선으로 표시되고, 본 연구에서는 $a=0.857$ 의 값을 가지는것을 알 수 있었다. 따라서 동 그림은 5.2절에서 후술한 바와 같은 방법으로 부식깊이가 추정이 되면 피로 수명예측이 가능함을 시사한다. 그러나 응력레벨의 변화에 대한 피로 수명비에 대해서는 좀더 연구가 필요한 부분이라고 생각된다.

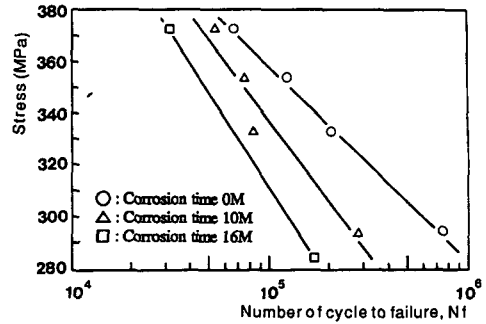


Fig. 5 S-Nf curves in the corrosion material and the new material of SS41

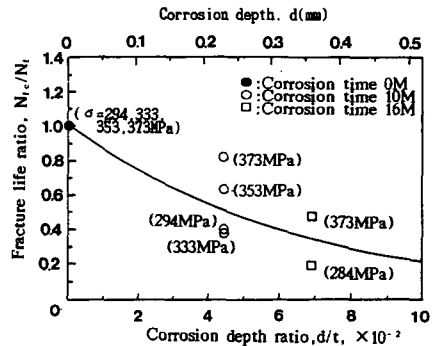
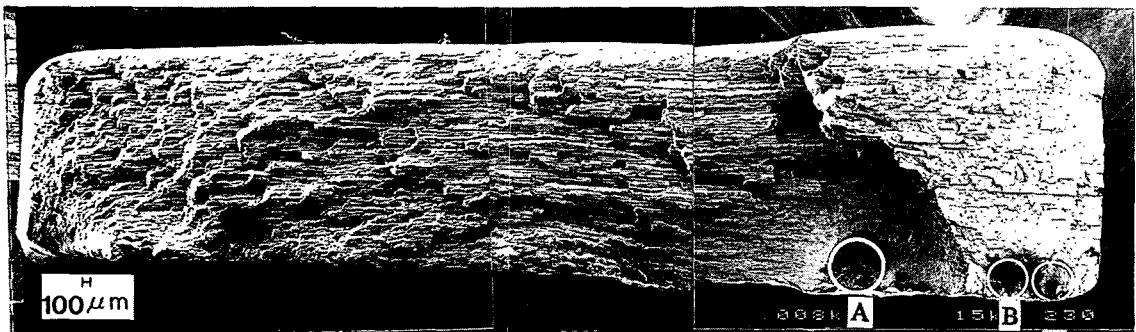
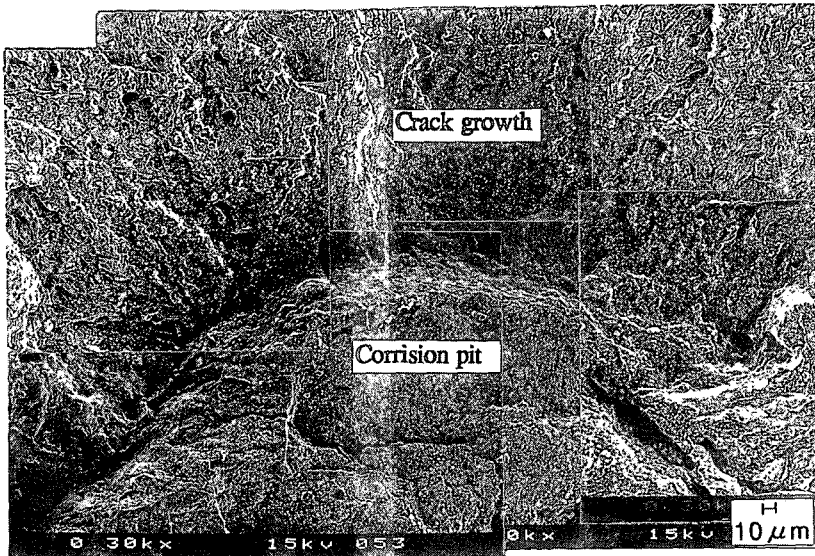


Fig. 6 The relation ship between fracture life ratio and corrosion depth ratio

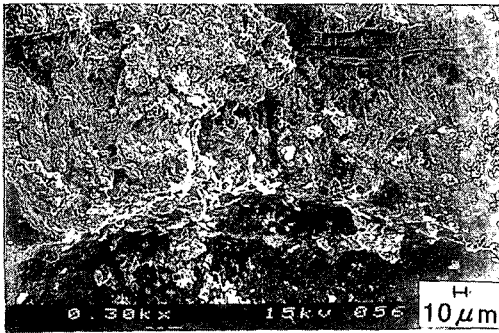
Fig.7(a)는 부식 기간이 16개월된 부식재의 파단면을 전자 현미경(SEM)에서 8배로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 파단 사진상에는 파단의 원인이라고 판단되는 3개의 균열 발생부를 A,B,C라고 구분하여 나타내었고, 특히 이들 세부분을 각각 300배로 확대하여 균열 발생의 특징을 관찰한 결과를 Fig.6의 (b), (c), (d)에 나타내었다. 그 중 초기



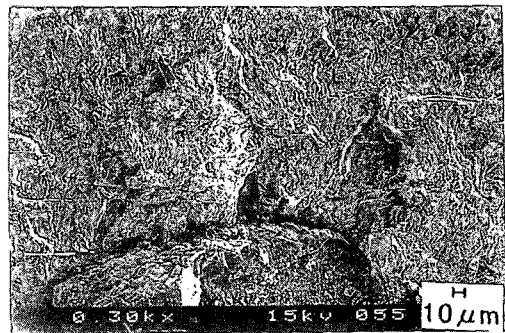
(a) General view of fracture surface



(b) Detail of part A



(c) Detail of part B



(d) Detail of part C

Fig. 7 Photograph of fracture surface in the corroded SS41 steel by using SEM (Corrosion time;16 months)

발생 균열의 크기가 가장 큰 A부분 즉, 주균열이라고 판단되는 부분이 파단에 지대한 영향을 미친 것으로 보이며, B부분과 C부분은 인접 균열로서 먼저 합체한 후에 A부분과의 전체적인 합체에 이르면서 시험편이 완전파단에 도달하게 되었다고 판단 된다.

특히, 파단의 주 원인이라고 판단되는 A부분에서는 부식 피트 부분을 기점으로 한 균열 진전형태를 관찰할 수 있다. 이 부분에서는 균열의 성장이 반원을 형성한 진전의 형태로 나타내고 있으며, 균열초기는 부식반응에 의한 수소침투로 인해 취성형태의 균열이 발생 하였으며, 내면으로 진전해가며 딩플(Dimple)의 형태로 파괴에 도달한것으로 생각

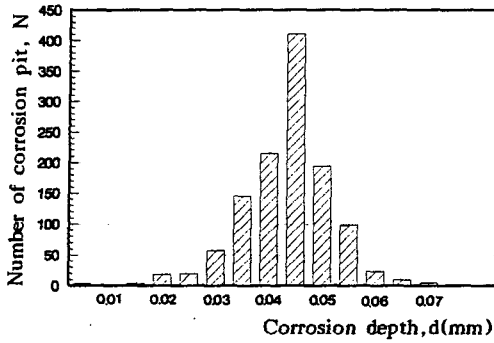
되어진다.

5. 부식재의 수명 예측

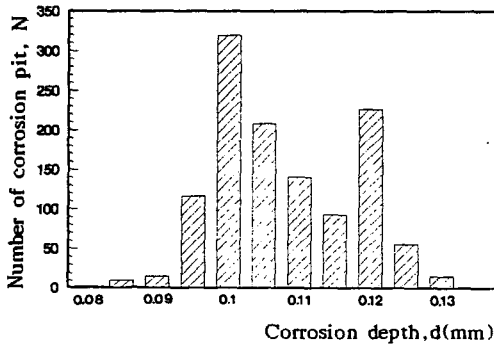
피로실험 결과 부식 피트는 재료의 수명과 직접적인 관련이 있다는 점을 고려할때, 최대 부식깊이 추정은 수명예측에 있어서 매우 중요한 점이라고 사료되어, 확률변수 및 극치 통계해석을 이용한 부식 깊이 예측방법에 대하여 언급하고자 한다.

5.1 확률 변수에 의한 부식깊이 예측

실험실 가속 분위기에서 부식시킨 시험편을 2.3 절에서 언급한 바와 같이 표면조도계에서 그 형상



(a) Corrosion time : 2 Months



(b) Corrosion time : 6 Months

Fig. 8 The histogram of the corrosion depth for various corrosion time

을 측정하였다. Fig.8은 부식부의 깊이를 측정된 데이터를 등간격의 구간으로 나누어서 히스토그램을 작성하여 본 일례를 나타낸 것이다. Fig.8(a)는 부식기간 2개월에 대한 예이며, (b)는 부식기간 6개월에 대한 예를 나타내었으며, 부식기간이 4개월, 8개월 및 10개월에 대해 측정된 예도 이 두그림과 유사한 형태로 나타났다. 또, 이들 데이터들을 정규확률지에 누적분포와 부식깊이에 대해 플롯트한 결과를 Fig.9에 나타내었다. 동 그림에서 ○표는 부식기간이 2개월, △표는 4개월, □표는 6개월, ●표는 8개월, ▲표는 10개월의 시험편에서 측정된 데이터를 각각 나타내고 있다. 또 이들 데이터의 확률분포 특성이 통계학적으로 정규 분포에 따르는가를 K.S(kolmogorv-smirnov)검정⁽¹⁴⁾을 통하여 검정해 보았다. K.S검정은 측정 데이터를 $X_1 < X_2 < X_3 < \dots < X_n$ 이라 할때, 이들 데이터가 가정한 분포에 따른가 어떤가를 판정하는 경우에 데이

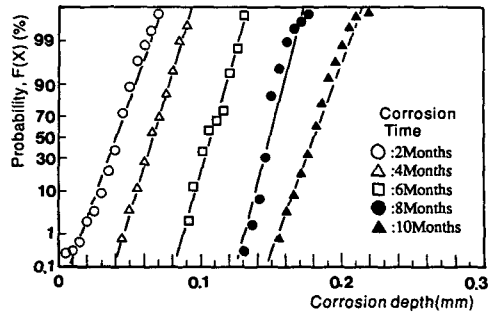


Fig. 9 The distribution of corrosion depth for the SS41 steel in 5% NaCl+PH3 circumstances (Normal distribution)

터의 랭크(순서 통계량에 대한 누적 분포의 값 : 확률지의 플로팅 위치의 값에 상당) i/n 또는 $(i-1)/n$ 과 이론적으로 계산한 누적 분포함수 $F(X_i)$ 과의 차의 최대치 (i 를 변화된 경우) D_n 는 다음과 같이 표현된다.

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} [\max\{|F(x_i) - \frac{i-1}{n}|, |\frac{i}{n} - f(x_i)|\}] \quad (1)$$

이 D_n 값이 어떤 한계치 D_n^a 보다 작은 값이면, 가정한 이론분포에 적합하다고 판정하는 것이 K.S 검정이다.

K.S 검정 결과 2개월, 4개월, 6개월, 8개월 및 10개월에서 고장률 α 가 1%일때 유의수준이 각각 0.25778, 0.29577, 0.29577, 0.28469 및 0.25778인 반면에 실제 측정된 데이터에서 계산한 결과 D_n 의 값은 0.0887, 0.0989, 0.0989, 0.0964 및 0.0886로 나타나 실제 측정된 값들이 K.S 검정의 유의수준보다 작게 나타나므로 이들 데이터는 정규 분포에 만족한다고 판정된다.

실험실에서 가속 실험한 부식재가 정규 분포의 특성을 따르고 있으므로, 먼저 이들의 확률변수 추정을 위하여 본 연구실에서 개발된 확률지 프로그램을 이용하여 각 부식 시간별에 대한 평균값 μ 과 표준편차 σ 를 구한 결과를 Table 3에 나타내었다. 부식기간 8개월까지의 확률변수, 즉, 평균값 μ 과 표준편차 σ 를 이용하여 다음 부식기간인 10개월에 대하여 추정하여 보았다. 추정방법은 먼저 표준편차 σ 는 각 부식기간에 대한 σ 를 평균한 값을 사용하였다. 그 결과 0.8742×10^{-2} 를 얻을수 있었고, 평균값 μ 는 각 부식기간에서 μ 의 차이를 평균하여 계산한 결과 3.6128×10^{-2} 를 부식기간이 8개월일때

Table 3 Random variable of corrosion depth on the statistical distribution

Corrosion Time	Mean Value (μ)	Standard Deviation (σ)
2 Months	3.9867E-2	1.0266E-2
4 Months	6.5709E-2	0.8661E-2
6 Months	10.6560E-2	0.8337E-2
8 Months	14.8252E-2	0.7706E-2
10 Months	17.9760E-2	1.1051E-2
○	18.3613E-2	0.9526E-2
— · —	18.4380E-2	0.8742E-2
— · · —	21.4733E-2	0.9075E-2

의 μ 에 더한 결과 18.4380×10^{-2} 얻을수 있었다. 한편 부식기간이 10개월된 동일한 시험편에서 측정 한 부식깊이에 대한 데이터의 변동계수 ($S = \sigma/\mu$)는 0.0615이며, 10개월에 대하여 추정된 확률분포의 변동계수는 0.0474로 나타났다. 측정분포에 대한 변동계수가 실제 측정 데이터의 변동계수보다 다소 적게 나타났으며, 이는 표면조도계의 측정시에 시험편의 부동태 피막을 완전히 제거하지 못한 원인으로 부식기간 10개월인 시험편의 부식깊이의 분포는 다른 부식분포와 비교할때 분포의 기울기가 다소 차이가 났다. 그러나 동일한 환경하에서 부식기간이 10개월된 다른 시험편의 부식분포와 비교할 경우 변동계수 0.0518로서 추정된 분포와도 유사함을 알 수 있다. 따라서 부식기간이 12개월일때의 부식분포에 대해서도 같은 방법으로 추정하였다.

Fig.10은 부식기간 10개월 및 12개월에 대한 추정치 확률변수를 이용하여 분포상태를 같은 확률지상에 플로팅한 것이다. 실선은 부식조내에 10개의 시험편을 동시에 넣어서 부식시킨 시험편중 하나의 시험편에 대한 부식기간 2, 4, 6, 8 및 10개월의 표면형상(부식깊이)을 측정 한 데이터를 통계처리한 후, 이들 데이터에 대한 확률변수만을 이용하여 플롯트한 결과이다. 그리고 ○표는 부식기간이 10개월된 시험편중에서 다른 시험편의 부식기간이 10개월일때 표면형상을 측정하여 통계처리한 결과를 나타내었다. 그리고 일점쇄선은 부식기간이 10개월일

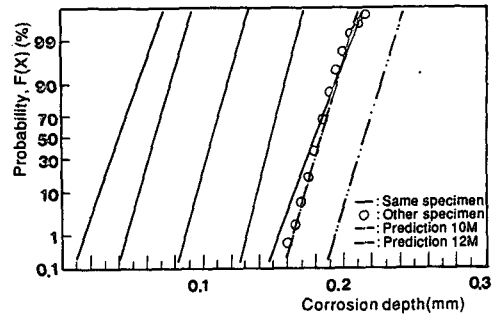


Fig. 10 An example of the predicted corrosion depth distribution by using the statistical parameter of measured corrosion depth data

때의 추정 분포를 나타내고 있다. 이 결과, 이와같은 추정법에 의해 임의의 부식기간에 대한 부식분포상태의 추정이 가능함을 시사한다. 그러므로 같은 방법으로 부식기간이 12개월일때의 부식분포를 추정하여 이점쇄선으로 나타내었으며, 이 방법을 응용하면 부식기간이 경과함에 따라 부식 정도를 예측할수 있을것으로 사료된다. 특히, 일점쇄선 및 이점쇄선은 확률지 프로그램의 확률변수의 값만으로 분포를 나타낼수 있는 기능을 이용하여 플롯트한 것이다.

5.2 극치해석에 의한 잔존 수명예측

통상 부식에 의한 손상에서 강도에 영향을 미치는 가장 큰 변수는 최대 부식깊이, 부식부의 곡률반경 등을 들수 있으며, 이값에 따라서 부식부의 수명이 좌우된다고 할수 있다. 따라서 부식부의 수명을 해석하는 방법으로 극치통계법(extreme value statistics method)^(12,15) 이 널리 사용되고 있다.

극치해석은 데이터들의 최대값 또는 최소값만으로 통계처리하여 해석하는 방법으로 통상 이증지수 분포와 Weibull 분포를 많이 사용한다. 본 연구에서 사용된 부식재의 수명은 부식깊이의 최대치 데이터들이 구조물의 수명에 지대한 영향을 미칠것으로 사료되므로 최대치 데이터를 이용한 극치해석법에 따라 수명예측에 응용해 보았다.

우선, 부식깊이의 극치해석에서 최대치의 의미는 측정된 n개의 부식 깊이에 관한 데이터를 데이터의 크기 순으로 놓을 경우, $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 가 된다. 이 데이터의 최대값 U_n 을 제외한 다른값이 X보다 진적으로 적어지는 확률 $\Phi_n(X)$ 은, 1개의 데이터가 X보다 작을 확률을 $F(X)$ 로 표시하기 위

해서는 $\Phi_n(X) = \{F(X)\}^n$ 와 같이 근사적으로 표현할 수 있다. 이 $\Phi_n(X)$ 는 n 개의 부식깊이 데이터가 얻어질때의 X 가 최대가 되는 확률로 생각되며, $n \rightarrow \infty$ 로 극한을 취할 경우, 접근 분포에 접근하는 경우, 이 분포가 부식깊이 최대치의 극치분포가 된다.

먼저 측정된 전체 데이터 개수 1200개 중에서 부식 최대 깊이가 1%이내에 속하는 데이터들만을 사용하여 이들 데이터들로 부터 평균랭크법을 이용하여 측정된 면적보다 약 500배 정도 큰 면적에서 최대 부식깊이를 추정하였다. 또 추정된 최대 부식깊이 데이터만으로 앞으로 시간이 변화함에 대한 최대 부식깊이의 분포를 추정하여 보고자 한다.

작은 면적에서 측정된 최대 부식깊이의 데이터로 큰 면적에서의 최대 깊이를 확률통계적으로 추정하기 위해 재귀기간(T : return period)을 이용코자하며, 재귀기간 T 는 다음과 같이 정의된다.

$$T = \frac{1}{1-F} \quad (2)$$

이 재귀기간의 의미는 극치 분포에 따르는 부식 데이터(X)가 있을 경우, $X \geq a$ 인 값이 N 번째의 시료에서 처음 측정될 확률 $P(N)$ 는, $N-1$ 번째까지의 부식 데이터(X)는 $X < a$ 이기 때문에 ($X < a$ 의 확률이 $F(a)$ 이다) 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P(N) = [1 - F(a)] F(a)^{N-1}$$

이 확률을 이용하여 \bar{N} 의 평균치(기대치)를 구하면

$$\begin{aligned} \bar{N} &= \sum_{N=1}^{\infty} N(P(N)) = \sum_{N=1}^{\infty} N[1 - F(a)] F(a)^{N-1} \\ &= \sum F(a)^{N-1} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1 - F(a)^N}{1 - F(a)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $F(a) < 1$ 이기 때문에 식(4)는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{N} = \frac{1}{1 - F(a)} \equiv T(a) \quad (5)$$

이 결과로부터 $X \geq a$ 의 값이 처음 측정되는 시험 회수의 기대치 \bar{N} 는 $T(a)$ 가 된다. 즉, 시료면적이 N 배의 시료에서 측정된 최대 부식깊이 a 를 추정하는 경우의 재귀기간(T)는 $T = \bar{N}$ 으로 표현 할수 있다. 따라서 본 연구에서는 측정된 전체 데이터의 최대 부식깊이가 약 1%에 속하는 데이터수 $N = 12$ 를 평균랭크법에 의하여 구하면 $F = N/N + 1 \approx 0.923$ 이며 누적 분포함수 F 는 92.3%까지 존재한

다. 또한 부식 환경도 동일하고, 재질도 동일하다면 확률지상에서 동일한 직선으로 나타날 것이다.

따라서 전체 면적의 크기가 기존 면적의 500배라고 가정하면, 이 경우를 평균랭크법에 의하여 구하게 되면 누적 분포함수 F 는 99.8%가 된다. 500배 면적의 시료에 최대 부식피트 깊이의 추정은 먼저 이중지수 분포를 이용하여 시간 t 를 변화하여 측정 한 경우를 Fig. 11에 나타내었다. 이것을 시간의 변화 즉, 2개월, 4개월, 6개월, 8개월 및 10개월에 대한 $N \approx 500$ 인 지점에서 확률지상에서 최대 부식 깊이를 추정하면 각각 0.09, 0.1025, 0.1475 0.2075 및 0.257 mm를 얻을 수 있다.

또 Fig.12에서는 각 부식시간에 대하여 추정한 최대 부식깊이 데이터를 \circ 표로 플로트하여 이들을 최소자승법(least square method)으로 직선을 그어 시간 t 에 대해 나타내 보았다. 아울러 본 측정방법의 신뢰성을 검토하기 위해 부식시간이 10개월인 동일한 환경하의 다른 시험편에서 추정한 데이터를 \square 표로 플로트하여, 동일한 시험편에서 추정된 최

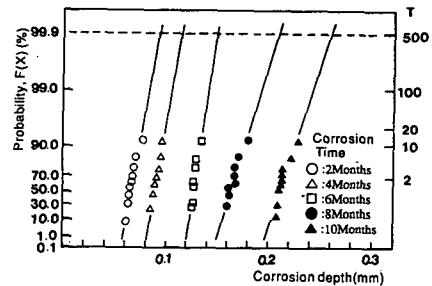


Fig. 11 An example of the predicted corrosion maximum depth on the extensive area by using the measured data to small area

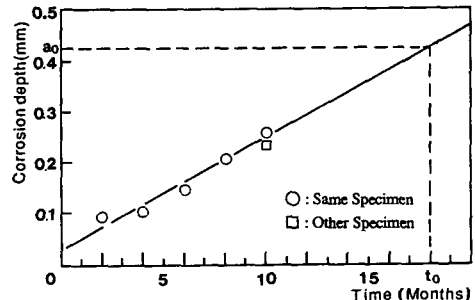


Fig. 12 Prediction method of maximum corrosion depth by using the measured data to doubly exponential distribution

대 부식깊이와 비교하여 유사함을 확인하였다. 더 나아가서는 예를 들어 부식기간 t_0 즉, 18개월일때 최대 부식깊이가 잉라는것을 추정할수 있으므로 시험편의 허용두께에 대한 부식시간도 추정이 가능할 것으로 사료된다. 아울러 최대 부식깊이가 추정되면 Fig.6에서와 같은 방법으로 파단 수명을 예측할 수 있을것으로 생각된다. 그러나 부식기간이 일정하고, 부식깊이가 유사하더라도 응력레벨에 따른 파단수명 감소비의 차이에 대해서는 앞으로의 과제라고 사료된다.

6. 결 론

SS41강을 5% NaCl에 PH 3을 첨가한 부식액에 인공부식시켜 가면서 정기적으로 측정한 부식깊이 데이터의 확률 통계적인 해석과 피로실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 인공부식에 의한 시험편의 부식깊이를 측정한 결과 부식깊이는 정규 확률분포에 따르며, 정기적으로 측정된 데이터의 확률변수를 이용하여 일정 기간후의 부식깊이의 확률분포 상태의 추정이 가능함을 알수 있었다.

(2) 동일부식 조건 및 기간에서 인공부식후 부식깊이가 유사한 시험편을 사용하여 응력 레벨을 바꾸어가면서 피로실험을 행한 결과, 부식재와 건전재의 피로수명은 고응력 레벨에서의 수명의 감소비는 작고, 저응력 레벨에서는 수명의 감소비가 고응력 레벨보다 크게 나타나는 것을 알수 있다.

(3) 부식에 의한 두께의 감소가 생길 경우 부식재와 건전재의 피로수명비는 $(N_{fc}/N_f) = a^{(d/v)}$ 의 형태 곡선으로 표시됨을 알았다. 따라서 실제 부식 구조물에서 부식깊이를 예측할 경우 이에 따른 파단수명의 예측이 가능할것으로 사료된다. 그러나 응력레벨의 변화에 대한 피로수명비에 대해서는 좀 더 연구가 필요한 부분이라고 생각된다.

(4) 피로 파면을 전자 현미경에서 관찰한 결과, 부식 피트 부근에서는 부식 반응에 의한 수소침투로 인해 취성 형태의 균열이 발생하였으나, 균열이 더 진전하면서 덩플 형태로 파단하였다고 사료되어진다.

(5) 극치해석법에 따라 최대 부식깊이가 약 1% 이내의 부식깊이 데이터를 이용하여 이중지수 분포함수로부터 부식 면적이 확대된 넓은 면적의 최대 부식깊이의 추정이 가능하였다.

참고문헌

- (1) 木島茂, 1974, “環境強度に對する各種アフロ-チと相互關連,” 日本機械學會論文集, 第77卷, 670號, pp. 951~958.
- (2) Hideo Kitagawa and Jae-Do Kwon, 1990, “Degradation Problems in Life Prediction,” Proceeding of the KSME/JSME Conference, Fracture and Strength 90, pp. 708~713.
- (3) Tsurui A. and Tanaka, H., 1988, “Probabilistic Analysis for the Propagation Surface Cracks of Semi-Elliptic Type,” Materials Science, Vol.37, No.420, pp. 996~1002.
- (4) 朝倉祝治, 1985, “腐食のしくみと対策,” 日本金屬學會誌, 第55卷, 6號, pp. 14~21.
- (5) Staehle R.W. Hochmann J. McCright R.D. and Slater, J.E., 1972, “Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys,” National Association of Corrosion Engineers, Nace-5
- (6) 윤경석, 1983, “응력부식”, 한국부식학회지, 제12권 제2호, pp. 19~25.
- (7) Hirose, Y. and Mura, T, 1984, “Growth Mechanism of Stress Corrosion Cracking in High Strength Steel,” Engineering Fracture Mechanics, Vol.19, No.6, pp. 1057~1067.
- (8) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 1980, “高力 A1合金の應力腐食割れ, 腐食疲勞に及ぼす板厚の影響,” 日本機械學會論文集(A編), 第42卷, 412號, pp. 1344~1351.
- (9) Wei, R.P. and Simmons, G.W., 1981, “Recent Progress in Understanding Environment Assisted Fatigue Crack Growth,” International Journal of Fracture, Vol.17, No.2, pp. 235~247.
- (10) 우창기, 김희승, 1989, “반복인장-압축하중을 받는 이온질화 처리한 SM45의 부식피로 파괴거동에 관한 연구,” 대한기계학회논문집, 제13권 제3호, pp. 451~460.
- (11) Ogawa, K., Saruki, K. and Asano, T., 1985, “Factor Affecting Fatigue Strength of Hot-Rolled Steel Sheets Corroded with Salt-Water,” Materials Science, Vol.134, No. 385, pp. 1211~1216.

- (12) Araki, R. and Miura T., 1986, "Application of Extreme Value Statistics for Backside Corrosion of Tank Bottom Plates(1st Report)," JHPI, Vol.24, No.3, pp. 20~28.
- (13) 横堀武夫, 桑野博喜, 1981 "クロムモリブデン鋼の應力腐食割れと 腐食疲労の比較研究," 日本機械學會論文集(A編), 第47卷 419號, pp. 689~697.
- (14) 海老原態雄, 1984 "裝置材料の 壽命 豫測 入門," 丸善株式會社 pp. 52~62, 174~178.
- (15) Barlow, R.E. and Proschan, F., 1975, "Statistical Theory of Reliability and Life Testing," International Series in Decision Process, pp. 52~80.