휨응력을 받는 바닥강판의 피로균열진전해석

Fatigue Crack Growth Analysis of Steel Deckplates Under Bending Stress

최 준 혁[1] · 경 갑 수[2] · 최 동 호[3] · 장 동 일[4]

Choi, Jun Hyeok Kyung, Kab Soo Choi, Dong Ho Chang, Dong Il

요 지 : 반복하중을 받는 용접구조물의 피로수명 추정에 있어서 파괴역학을 이용한 피로균열 진전해석방법은 매우 유용하다. 휨응력을 받는 바닥강판의 피로균열 진전해석 문제에서는 균일한 축하중 하에서의 피로균열 진전해석 절차를 동일하게 적용할 수 있다. 본 연구에서는 휨응력하에서 피로균열 진전수명을 계산하는 방법을 제시하고 2차원 균열 문제에서의 피로균열 진전을 다루었다. 수치적으로 계산된 균열진전은 균열길이가 증가함에 따라 피로균열의 진전속도가 점차 감소하고 실험결과와 잘 일치하였다. 피로수명은 초기균열길이와 균열형상에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

ABSTRACT : The fatigue crack growth analysis based on the fracture mechanics is useful to the estimation of the fatigue life on welded structures under cyclic loading. The analysis procedure in fatigue crack growth under uniform axial loading is applicable to bending fatigue problem as well. The intent of the present study is to show the procedure for calculating the fatigue crack propagation lifetimes of deckplates under bending stress and to explain the crack growth rates for the two dimensional crack problems. It is shown that the fatigue crack grows at a decreasing rate and the fatigue life depends on the initial crack length and the crack shape. The numerically predicted crack growth agree with the experimental data.

핵 심 용 어 : 피로균열진전, 피로수명, 초기균열, 균열형상, 균열진전속도

KEYWORDS : Fatigue crack growth, Fatigue life, Initial crack length, Crack shape, Crack growth rate

1. 서 론

반복하중을 받는 구조물에 발생된 피로균열의 진전거동평가 또는 피로수명의 평가를 위한 해석방법은 많이 보고되어 왔으며 일본강구조협회피로설계 지침에서도 반영되고 있다.[1]

여기서, 대부분의 해석방법은 부재에 균일한 축

1) 학생회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정
2) 정회원, 한국도로공사, 공학박사
3) 정회원, 한양대학교 도시환경건설공학과군 조교수
4) 정회원, 한양대학교 도시환경건설공학과군 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

응력이 작용하는 경우에 대한 것이며, 비균일 하중이나 휨응력이 작용하는 경우에 대한 해석방법 및 평가는 소형시험편과 같은 단순부재 또는 실구조물을 등가의 단순부재로 환산하여 수행되었다.[2] 일반적으로 피로수명을 평가하는 데 있어서는 주로 피로균열의 진전수명을 고려하므로 파괴역학에 기초한 해석방법이 유용하게 사용된다. 그래서, 휨응력을 받는 부재에 대해서도 그 해석과정이 부재에 균일한 축응력이 작용할 때의 해석절차를 동일하게 이용할 수 있는지를 재검토하고, 이때 발생하는 문제점을 파악할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 바닥강판에 발생한 휨피로균열에 대해서 피로균열 진전과 피로수명을 예측하기 위해서 기존의 해석절차를 이용하여 2차원 균열문제를 다루고 해석결과에 영향을 미치는 각종 변수들에 대한 평가를 실시하였다. 따라서, 본 논문에서는 응력확대계수의 산정을 위한 여러 보정계수들에 대한 검토, 2차원 균열문제, 즉 평면균열 문제의 해석 절차 등을 제시하고, 이를 이용한 피로균열의 진전을 예측하여 실험결과와 비교하였다. 또한, 피로균열의 진전에 영향을 미치는 초기균열의 크기, 균열형상비에 대한 검토를 수행하였다.

2. 해석방법

균열의 역학적 특성을 평가하는 것은 균열을 둘러싸고 있는 작은 영역에서의 응력장의 강도를 나타내는 응력확대계수 K 에 의해 나타낼 수 있다. 선형탄성파괴역학에서의 이 변수는 작용응력, 균열의 크기 그리고 균열 주변의 기하학적인 형태의 함수로 나타낼 수 있다.[3] 피로균열의 진전과정은 응력확대계수와 피로균열의 진전속도에 의해 식 (1)과 같이 표현된다. 이로부터 피로수명의 예측은 피로균열의 진전속도를 초기균열크기(a_i)에서부터 한계균열크기(a_c)까지 적분하므로서 얻을 수 있다.

$$da/dN = f(\Delta K) \tag{1}$$

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{f(\Delta K)} \tag{2}$$

여기서, 피로균열 진전 모델은 피로균열의 모델링 방법, 초기균열 크기, 응력확대계수의 산정, 균열형상의 변화, $da/dN - \Delta K$ 의 관계, 한계균열 크기 등으로 구성된다.

2.1 초기균열크기, a_i 와 한계균열크기, a_c

비파괴검사 등에 의해서 균열이나 결함의 크기 및 형상이 확인되지 않는 경우는 피로균열이 발생하는 위치에 적절한 크기의 초기균열의 존재를 가정할 필요가 있다. 기존의 연구결과에 의하면 초기 균열크기를 0.1mm이하로 하면 피로수명의 80% 이상이 예측가능하며 초기균열의 크기는 0.05~0.1mm정도가 타당한 것으로 보고되어 있다.[4]

한계균열크기, a_c 는 반복하중에 의해 균열이 진전하여 파괴모드를 취성파괴나 연성파괴 또는 부재의 전면항복, 균열의 판두께 관통 등으로 규정할 때의 균열치수로 정의된다. 예를 들면, 용접연결부에 내부결함이나 표면결함으로부터 발생하는 피로균열을 다루는 경우 판두께의 관통까지 소요되는 하중 반복회수는 전수명의 대부분을 차지하며 관통 후에는 균열의 진전속도가 빨라지는 것으로부터 판두께 관통시의 균열 크기를 한계균열의 크기로 이용하는 경우가 많다.[1]

2.2 응력확대계수의 산정

응력확대계수는 이상적인 물체에서 유도된 값을 실제 부재에서의 균열의 형상, 부재의 치수 및 형상 등을 고려하여 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} K &= F(a)\,\sigma\sqrt{\pi a} \\ &= F_e F_s F_w F_g \sigma\sqrt{\pi a} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, F_e는 균열형상, F_s는 표면균열, F_w는 유한판 폭 또는 두께, F_g는 응력구배에 대한 보정계수이며 각각 다음 식들에 의해 구할 수 있다.[5][6]

$$F_e = \frac{1}{E(k)}(1 - k^2\cos^2\phi)^{1/4} \quad (4)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2}(1-k^2\cos^2\phi)^{1/2}d\phi$$

$$k^2 = 1 - a^2/b^2$$

$$F_{eA} = \frac{1}{E(k)}, \quad F_{eB} = F_{eA}\cdot\sqrt{\frac{a}{b}} \quad (5)$$

$$F_{sA} = 1 + 0.12(1 - a/b) \quad (6)$$

$$F_w = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^2)\sqrt{\sec(\pi\lambda)} \quad (7)$$

여기서, 반타원 표면균열의 균열깊이 방향에 대해서는 $\lambda = a/t$로, 균열폭방향에 대해서는 $\lambda = 2b/W$로 둠으로서 구해진다.

또한, 첨자 A와 B는 그림 1과 같이 균열을 반타원형 표면균열로 가정할 때 각각 단축방향(균열깊이 방향)의 균열선단과 장축방향(균열폭 방향)의 균열선단에서의 보정계수를 나타낸다.

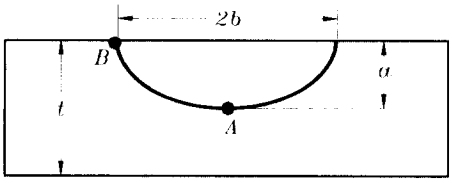

그림 1. 표면균열의 형상

한편, 응력구배에 대한 보정계수는 부재단면의 공칭응력에 대한 균열면의 작용응력의 비를 나타내는 응력집중계수(K_{Tl})를 이용하여 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$F_g = \frac{2}{\pi}\int_0^a \frac{K_{Tl}}{\sqrt{a^2 - l^2}}\,dl \quad (8)$$

위의 식을 이용하여 F_g를 계산하기 위해서는 K_{Tl}을 알아야 하는데, 이를 보다 실용적으로 계산하기 위해서 K_{Tl}을 다항식으로 나타내면 적분하기가 편리하다. 응력집중계수의 분포를 다음과 같은 다항식으로 가정한다. 여기서 SCF는 최대응력집중계수를 의미한다.

$$\frac{K_{Tl}}{SCF} = 1 + Al + Bl^2 + Cl^3 + Dl^4 + \cdots \quad (9)$$

위의 식(9)을 식(8)에 대입하여 정리하면 F_g를 구할 수 있다.

$$\frac{F_g}{SCF} = 1 + \frac{2A}{\pi}a + \frac{B}{2}a^2 + \frac{4C}{3\pi}a^3 + \frac{3D}{8}a^4 + \cdots \quad (10)$$

2.3 피로균열진전속도와 응력확대계수범위

피로균열이 진전하는 영역에서 균열진전속도, da/dN과 응력확대계수 범위, ΔK의 관계를 대수 그래프로 나타내었을 때 직선으로 표시된다. 이 영역에서의 $da/dN - \Delta K$의 관계는 식 (11)과 같이 적용성이 간편한 Paris의 균열전파법칙을 이용하는 경우가 많다.[7]

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (11)$$

여기서, 균열진전속도는 상수 C, m의 값에 따라 달라지며 강재의 특성에 좌우되는데, JSSC 피로설계지침에서는 다음과 같은 값을 제시하고 있다.[1]

표 1. $da/dN - \Delta K$ 곡선에서의 상수값

	$C(\times 10^{-11})$	m	ΔK_{th}
최안전설계곡선	2.69	2.75	2.0
평균설계곡선	1.54	2.75	2.9

2.4 피로균열 진전수명의 계산

피로균열 진전수명은 일반적으로 다음 식과 같은 Paris의 균열 전파 관계식을 적분하는 것에 의해서 구해진다.[7]

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{1}{C(\Delta K)^m}\,da \quad (12)$$

위의 적분식은 ΔK가 균열에 대한 함수로 주어지고 평면균열문제의 경우 균열형상에 의해 달

라지기 때문에 일반적으로 수치적분에 의해 구해진다. 앞서 언급한 바와 같이 반타원형 또는 타원형의 표면균열의 경우 균열 깊이방향과 폭방향에 대한 응력확대계수 범위, ΔK_A, ΔK_B를 계산하여 식 (12)에 대입하므로서 양방향의 균열진전량을 계산한다. 피로수명을 계산할 때에는 그림 3과 같이 비교적 계산이 용이한 하중 반복회수 ΔN을 증가시키면서 균열증분량을 계산하는 하중 반복회수의 증분법을 사용하였으며 균열증분량 계산절차를 자세히 나타내면 다음과 같다.

Step 1) : (1) 균열크기 (a, b)에 대한 응력확대계수범위, ΔK_{A1}, ΔK_{B1}를 구한다.

Step 2) : 하중반복회수 ΔN을 이용하여 균열 증분량, $\Delta a'$, $\Delta b'$을 다음식과 같이 계산한다.

$$\Delta a' = \{C(\Delta K_{A1})^m\} \cdot \Delta N \qquad (13.a)$$

$$\Delta b' = \{C(\Delta K_{B1})^m\} \cdot \Delta N \qquad (13.b)$$

Step 3) : 균열, $(a + \Delta a', b + \Delta b')$에 대한 응력확대계수범위, ΔK_{A2}, ΔK_{B2}를 구한다.

Step 4) : 균열이 (a, b)에서 부터 $(a+\Delta a', b+\Delta b')$까지 진전할 때의 응력확대계수 범위는 Step 1), 3)에서 계산된 응력확대계수범위의 평균값을 사용하여 다음 식과 같이 표시되며 이를 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다.

$$\Delta K_A = \{(\Delta K_{A1}^m + \Delta K_{A2}^m)/2\}^{1/m} \qquad (14.a)$$

$$\Delta K_B = \{(\Delta K_{B1}^m + \Delta K_{B2}^m)/2\}^{1/m} \qquad (14.b)$$

Step 5) : 균열증분량 Δa, Δb는 위 식에서 얻어진 결과를 이용하여 계산된다.

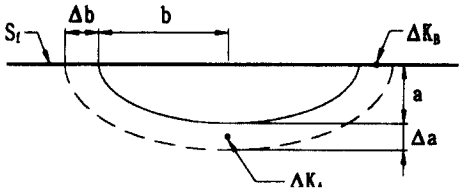

그림 2. 응력확대계수의 계산

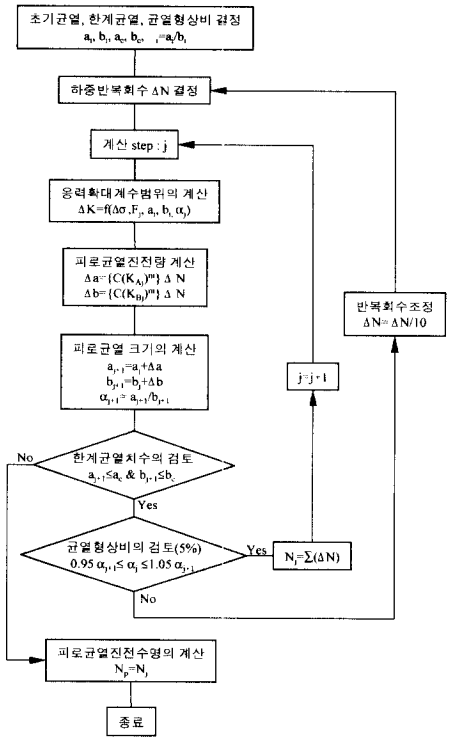

그림 3. 피로균열 진전해석 흐름도

3. 바닥강판의 휨피로균열 진전해석

3.1 해석대상

대상으로 하는 피로균열은 강바닥판의 피로시험 과정에서 발생한 휨피로균열로서 시험체의 국부 형상 및 피로균열의 발생양상을 그림 4에 나타내었다.

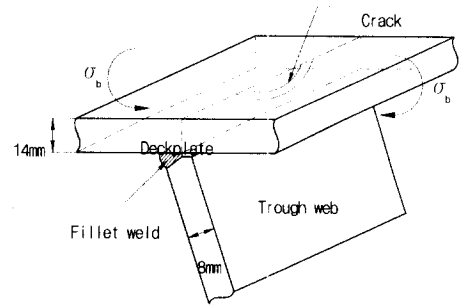

그림 4. 휨피로균열 발생양상

위의 휨피로균열 양상은 실구조물에서는 일반적으로 잘 발생되지 않는 균열로서 균열의 발생원인은 종리브 위에 재하된 등분포 하중으로 인한 바닥강판의 과대한 변형과 바닥강판의 횡방향휨에 의해 용접루트부 위치의 바닥강판 상부에 발생한 매우 높은 인장응력에 의해 발생된 것이다. 이러한 균열은 강바닥판에서 일반적으로 발생하는 균열양상이나 거동상의 문제와는 직접적인 관련은 적지만 그림 4와 같은 작용응력상태에서 발생된 피로균열에 대해 피로수명 예측과 진전거동을 명확히 할 필요가 있다고 생각된다.

3.2 보정계수의 산정

피로균열진전해석을 위해서는 응력확대계수 범위가 결정되어야 하며 이를 위한 보정계수들의 값이 결정되어야 한다. 대상구조물은 바닥강판 하부에 용접부를 가지기 때문에 용접루트부에서 응력집중이 발생하여 두께방향의 응력구배가 일정하다고 볼 수 없다. 따라서, 응력구배에 대한 보정계수의 계산을 위해 수치해석에 의한 검토를 행하였으며 해석모델링을 그림 5에 나타내었다. 또한, 판두께 방향의 응력집중계수의 분포를 균일한 인장응력이 작용할 때와 휨응력이 작용할 경우에 대하여 해석을 실시하고 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

여기서, SCF는 균열발생 위치에서의 최대 응력집중계수를 나타낸다.

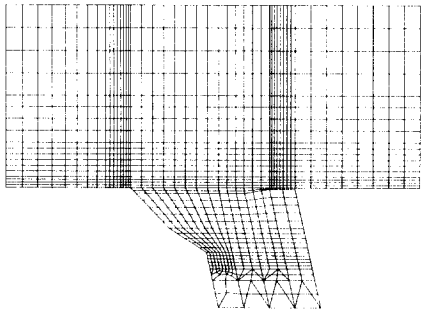

그림 5. 국부 모델링

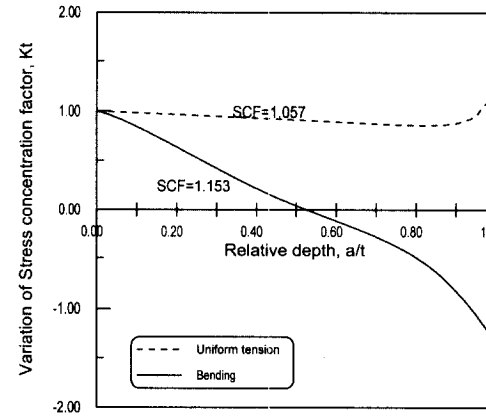

그림 6. 데크플레이트 상대깊이에 따른 응력집중계수의 변화

그림 6을 살펴보면 균일한 인장응력을 받는 경우는 응력구배가 거의 완만하며 판두께에 달하게 되면 용접부의 응력집중으로 인해 그 크기가 증가한다. 그러나, 휨응력이 작용하는 경우는 판두께의 약 80%까지 거의 선형으로 감소하다가 용접부의 응력집중으로 인해 압축응력이 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 경향으로부터 부재에 휨응력이 작용할 경우는 균열이 판두께 방향으로 진전할수록 압축응력의 영향이 커지므로 균열의 진전속도가 점차 감소하며 판두께 방향보다는 판폭방향으로의 균열진전이 계속될 것으로 예상할 수 있다.

응력집중계수의 분포식을 구하기 위해서 다항식으로 회귀분석한 결과는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{K_{Tl}}{SCF} = 1 - 0.989\left(\frac{a}{t}\right) - 6.215\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 12.576\left(\frac{a}{t}\right)^3 - 7.722\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (15)$$

여기서 SCF는 휨응력에 대한 최대응력집중계수로 1.153이다. 위의 식 (15)로 부터 얻어진 K_{Tl}를 이용하면 응력구배에 대한 보정계수 F_g는 식 (10)에 의해 구해질 수 있으며 그 결과를 2.2절에서 기술한 다른 보정계수들과 함께 그림 7에 나타내었다.

$$\frac{F_g}{SCF} = 1 - 0.630\left(\frac{a}{t}\right) - 3.1075\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 5.337\left(\frac{a}{t}\right)^3 - 2.896\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (16)$$

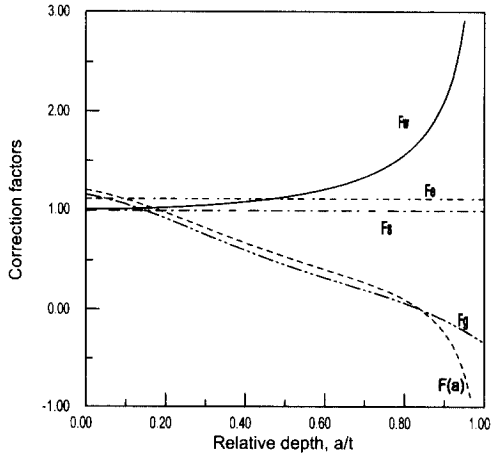

그림 7. 보정계수의 분포

그림 7을 살펴보면 보정계수 $F(a)$는 균열이 작을 때는 F_g의 값에 의존하지만 균열길이가 커지면 F_w의 값에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

3.3 해석결과 및 고찰

3.3.1 균열 진전형상

피로균열 진전 해석은 그림 2의 절차에 따라 C 언어로 프로그래밍하여 수행하였다. 해석결과로부터 얻어진 균열의 진전양상을 도식적으로 나타내면 그림 8과 같다. 이때, 균열형상은 a_i=0.05mm, a_i/b_i=0.5에 대한 결과이다.

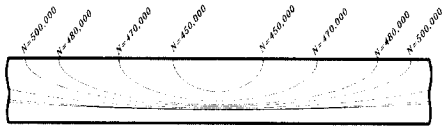

그림 8. 균열진전에 따른 균열형상의 변화

위의 결과를 보면 균열 진전 초기에는 반원형에 가까운 형상으로 진전하여 타원형으로 나타나게 된다. 또한, 균열의 진전은 판 두께 방향은 균열이 점차 감소하고 판폭방향으로는 균열이 크게 증가하는데 이러한 양상은 그림 7에서 나타낸 바와 같이 균열이 판두께 방향으로 증가할수록 보정계수 $F(a)$의 값이 점차 감소하는데 원인이 있는 것으로 판단된다.

3.3.2 반복회수에 따른 균열진전

반복회수에 따른 균열의 진전관계를 살펴보기 위해서 실험으로 부터 얻은 $a-N$곡선과 예측된 값을 비교, 고찰하였다. 균열진전속도를 결정하는 재료상수의 값은 JSSC피로설계지침에서 사용되는 표 1의 값을 사용하였다.

이때, 피로균열은 그림 9와 같이 균열이 하중재하판 위치에서 균열이 발생하였기 때문에 재하판의 폭인 200mm이상을 통과한 후에 측정되었다.

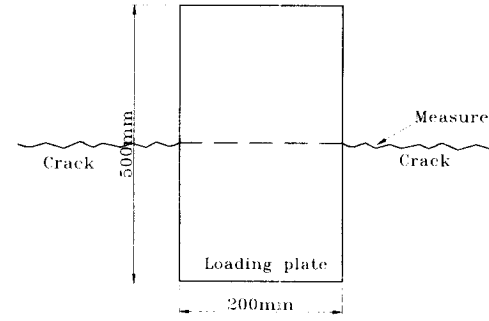

그림 9. 균열길이의 측정

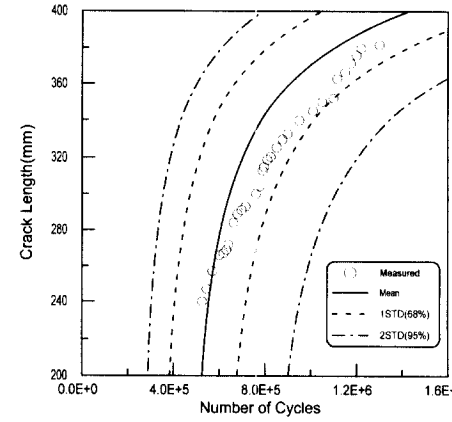

그림 10. 피로균열 진전곡선

본 연구에서 수행된 방법으로 피로균열의 진전을 예측한 결과를 나타내면 그림 10과 같으며 실험결과와 비교적 잘 근접하는 것을 볼 수 있다.

위의 결과는 판폭방향에 대한 균열의 진전을 나타낸 것으로 피로균열은 반복회수에 따라 점차 진전속도가 감소하여 약 400mm정도에서는 균열이 거의 진전되지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 작용응력의 크기가 일정할 경우 균열의 진전은 균열길이가 증가함에 따라 점차 가속되지만 여기서는 그림 11에서 알 수 있듯이 휨응력이 하중점으로부터 점차 멀어질수록 점차 감소하기 때문에 균열이 어느 정도의 길이를 지나게 되면 균열의 진전속도는 감소하게 된다.

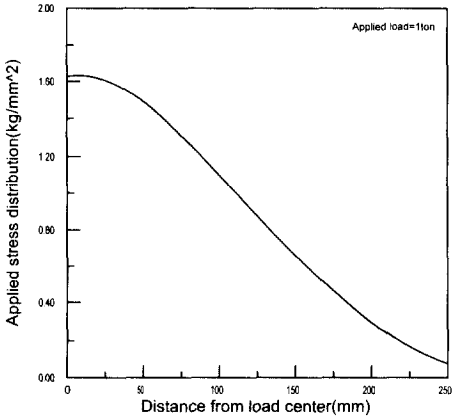

그림 11. 작용응력의 분포

한편, 실측된 피로균열은 일본 피로설계지침의 평균설계곡선보다 아래에 위치하며 제 1 표준편차의 신뢰구간(1σ, 68%)의 범위에 포함되고 있으며 최안전설계곡선으로 예측된 결과에 대해서는 충분한 여유를 가지는 것을 알 수 있다.

3.3.3 초기균열길이의 영향

초기균열이 피로균열의 진전수명에 영향을 미치는 영향을 살펴보기위해서 초기균열의 크기를 $a_i = 0.035,\ 0.05,\ 0.1\,mm$로 하여 진전해석을 수행하였으며 그 결과를 그림 12에 나타내었다. 이때, 균열 형상비는 0.5이다.

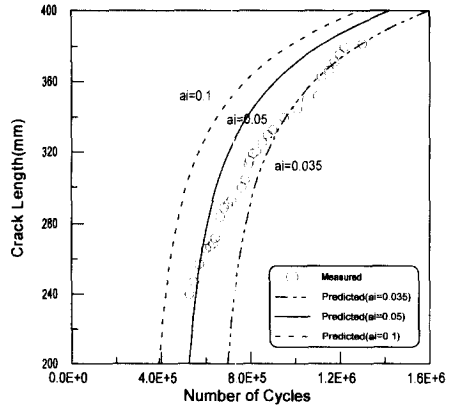

그림 12. 초기균열길이의 크기의 영향

위의 결과를 보면 초기 균열의 크기가 클수록 반복회수는 점차 작아짐을 알 수 있다. 이는 작은 크기의 균열을 진전시키는 데는 많은 반복회수가 필요하다는 것을 의미하며 초기균열의 가정에 따라 반복회수나 피로수명이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 한편, 예측된 결과를 실험결과와 비교해 보면 실측균열은 초기균열의 크기가 0.035~0.05mm인 경우에 비교적 근접하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 본 연구에서는 실측결과를 대부분 포함할 수 있도록 초기균열의 가정을 0.05mm로 하는 것으로 하였다.

3.3.4 초기균열 형상비의 영향

피로균열의 진전 또는 피로수명에 영향을 미치는 변수로서 균열형상비를 고려할 수 있다. 균열진전 해석시에는 초기균열이 가정되므로 그 형상비도 달라진다. 따라서, 여기서는 초기균열 형상비를 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0에 대해서 균열진전 곡선을 구하였으며 그 결과를 그림 13에 나타내었다. 여기서, 초기균열 형상비를 고려한 것은 균열진전에 따라 달라지는 균열의 형상은 프로그램 내에서 고려되기 때문이다.

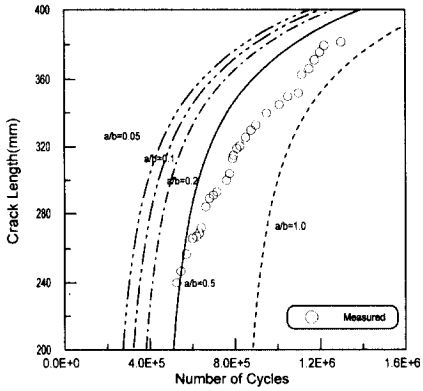

그림 13. 초기균열형상비의 영향

위의 결과를 살펴보면 초기균열 형상비가 1.0인 경우는 원형균열을 의미하는데 균열진전이 다른 형상비에 비해 매우 낮음을 보여주고 있다. 균열형상비가 점차 작아질수록 균열의 진전은 점차 빨라지나 다른 균열형상비와의 차이는 점차 줄어듬을 알 수 있다.

4. 결 론

휨응력을 받는 부재에 발생한 피로균열에 대한 균열진전해석결과로 부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 균일한 축응력을 받는 바닥강판에서의 피로균열 진전해석 과정은 휨을 받는 경우에도 그 절차를 동일하게 적용할 수 있으며 실험결과와 근접한 결과를 얻었다.

(2) 휨을 받는 부재의 피로균열 진전특성은 판두께 방향의 응력구배의 감소로 인하여 두께 방향의 진전보다는 판폭방향으로 균열이 진전되며, 작용 휨응력의 감소에 영향을 받아 진전속도가 점차 감소한다. 따라서, 이러한 균열의 진전해석에서는 작용응력의 분포와 응력구배를 보다 정확히 산정해야 한다.

(3) 반복회수에 따른 균열의 진전은 초기균열의 가정과 균열형상비에 따라 달라지는데, 본 연구의 결과에 있어서는 초기균열의 크기는 0.05mm, 균열형상비는 0.5정도가 실험치와 근접함을 알 수 있었다.

감사의 말

본 연구는 '97 건설교통부 기술연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 저자들은 연구비를 지원해주신 건설교통부와 한국도로공사에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

(1) 일본강구조협회, 1993, 강구조물의 피로설계지침・동해설.

(2) Susumu Machida, Masaaki Matoba, Hitoshi Yoshinari, Chung-hung Lin, Hiroyuki Makino, 平成 4年, ブロック荷重を受ける溶接構造の疲勞壽命推定法に關する一考察, 日本造船學會論文集 第 172号, pp. 579~587

(3) P. Albrecht and K. Yamada, 1977, Rapid calculation of stress intensity factors, ASCE. ST2, No. 103, pp 377~389.

(4) Miki, C., Mori, T., Sasaki, T. and Sakamoto, K., 1987, An analysis of fatigue crack growth from blowholes in longitudinal welded joints, JSCE, No. 386, pp 73~81, 1987.

(5) H. Tada, P. Paris, G. Irwin, 1973, The Stress analysis of crack handbook.

(6) J. B. Chang, 1977, Part-Trough Crack Fatigue Life Prediction, ASTM. STP 687.

(7) John M. Barsom, Stanley T. Rolfe, 1987, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice-Hall, 2nd Edition.

(접수일자 : 1999년 6월 21일)