

鋼板桁의 덮개판 형상에 따른 피로균열성장특성

Fatigue Crack Growth Characteristics by the Cover Plate Shapes in the Steel Plate Girder

정영화*
Jung, Young-Hwa

김익겸**
Kim, Ik-Gyeom

정진석***
Jung, Jin-Suck

이형근***
Lee, Hyung-Koon

Abstract

When a variety of repeated loads are given, most steel structures failed in much lower level of loads than static failure loads. In addition, bridge always includes the internal defects or discontinuities. From these, fatigue cracks initiate and can lead to sudden failure.

Thus, in this study, tensile specimens by the cover plate shapes were used as the test specimens. The fatigue test was performed by constant amplitude fatigue loading and beach mark.

From the results of this study, each specimen's fatigue section was observed. In addition, stress intensity factor at crack tip was calculated by using the Green's function which applied to discontinuous section where causing stress concentration. Therefore, the fatigue life of structural detail was investigated by adopting the theories of fracture mechanics. Each specimen's crack shape is a semi-elliptical surface crack or center crack sheet, stress gradient correction factor, F_g is the most subjective of all stress intensity correction factors and fatigue life should be predicted by previous proposed function and finite element analysis.

키워드 : 피로균열, 피로수명, 응력구배계수, 응력확대계수 K

Keywords : *fatigue crack, fatigue life, Stress gradient correction factor, Stress intensity factor*

1. 서론

강교량의 공용수명에 영향을 미치는 열화현상중 대표적인 것으로 피로(Fatigue)와 부식(Corrosion) 및 지연파괴(Delayed failure) 등을 거론 할 수 있으며, 대부분의 경우는 구조부재의 기하학적 형상이 변화하는 부분에서의 응력집중에 따른 면내·면외의 피로손상이 주요한 열화현상으로 지적되고 있다. 이와 같은 응력집중부의 예로서 1차부재(주부재)와 2차부재의 연결부 및 모재단면의 절취부

등을 생각할 수 있다. 일반적으로 강교량에서 발생하는 피로손상은 교량설계시 피로검토를 수행하는 1차부재에서는 거의 발견되고 있지 않으나 피로설계에서 고려하고 있지 않은 2차부재 연결부(용접, 고장력볼트 및 리벳에 의한 이음)에서의 2차응력과 부재간의 상대처짐의 차이에 의하여 발생한다. 이러한 피로손상을 유발하는 2차응력은 교량구조의 전체적인 3차원 변형으로 인한 판의 면내 및 면외방향의 국부 응력에 기인하는 것으로 알려져 있다[1].

또한 이러한 구조적 특성에 따른 피로손상 이외에, 구조부재의 용접부에서의 블로우홀(Blowhole), 용입불량(Incomplete of penetration), 슬래그 혼입 등과 같은 미시적 용접결함이나 내재균열 등의 혼입에 의한 구조부재의 내적결함 등도 있다. 이밖에 용접부의

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

*** 강원대학교 토목공학과 석사과정

인장잔류응력, 예기치 못한 진동이나, 차량주행에 따른 진동, 바람에 의한 진동이 피로 손상을 유발시키는 것으로 보고되고 있다[1].

이러한 이유에 의해 선진외국에서는 구조용강재의 피로특성에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 미국에서는 NCHRP에 의한 피로시험이 수행되었고, 그 결과에 따라서 AASHTO 및 AISC 피로설계 기준을 정하였다. 일본의 JSSC, 유럽의 ECCS에서도 강구조부재의 연결구조상세에 대한 독자적인 피로설계 기준을 설정하여 이를 강구조물의 설계에 최대한 반영하고 있다.

반면, 국내의 경우 아직까지 피로실험 및 실제 발생 사례에 대한 연구의 부족으로 각 지방서에 외국의 설계규정을 거의 그대로 인용하여 사용하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 기술실정에 기초하여 제작된 용접 연결된 판형교 덮개판의 용접구조상세에 대한 피로실험을 행함으로서 국내의 피로설계 규정을 검증하는 기초자료를 제공하고자 하였다. 이를 위한 방법으로 비치마크를 도입하여 덮개판 형상에 따른 피로균열 성장특성을 파악하고, 선형탄성과 피역학적 방법을 이용하여 반복횟수별 균열성장의 크기를 측정함으로써 균열성장속도(da/dN)를 구하고, 유한요소해석에 의한 덮개판 용접지단부의 응력구배보정계수(F_g)와 Zettlemoyer[2][3]에 의해 제안된 응력구배보정계수(F_g)를 이용하여 응력확대계수범위(ΔK)를 계산하였다. 최종적으로 da/dN - ΔK 의 관계식으로부터 피로 수명을 예측하고, 이를 실험결과와 비교함으로써 이의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 응력확대계수범위

그림 2.1 (a)에 나타낸 바와 같이 무한판에 등분포 응력 σ 가 작용할 때 중앙부에 길이 $2a$ 인 판통균열의 응력확대계수는 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

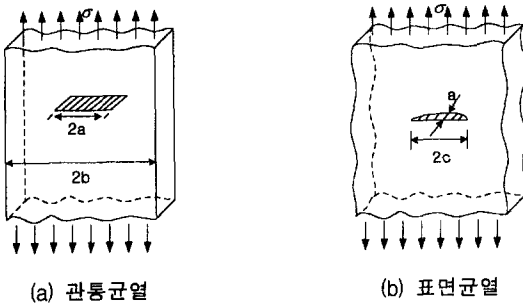


그림 2.1 이상적인 균열상태

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

용접구조물에서 보통 사용되는 복잡한 상세구조에 발생하는 길이 a 인 표면균열(그림 2.1 (b))에 대한 응력확대계수 K 는 무한판의 중앙 판통균열의 응력확대계수에 대하여 보정계수[4]를 사용하는 방법으로 간단히 구할 수 있다. 따라서 일반화된 응력확대계수는 식 (2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K = F_e F_s F_w F_g \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

여기서,

- F_e : 균열형상에 대한 균열형상보정계수
- F_s : 표면균열에 대한 자유표면보정계수
- F_w : 판두께, 판폭이 유한한 것에 대한 유한판 보정계수
- F_g : 응력집중의 영향을 고려한 기하학적형상 보정계수

2.1 보정계수 $F(a)$

H. Tada, P.C. Paris. 및 G.R. Irwin[4]은 보정계수 F_e, F_s, F_w 를 다음과 같이 정의하고 있다. 일정한 응력을 받는 반무한판의 반타원형균열에 대한 자유표면보정계수(F_s)는 식 (2.3)와 같이 정의할 수 있다.

$$F_s = 1.211 - 0.186 \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (2.3)$$

그림 2.1(a)에 나타낸 유한판폭의 중앙균열에 대한 유한판보정계수(F_w)는 식 (2.4)과 같이 정의할 수 있다.

$$F_w = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2b}} \quad (2.4)$$

이는 a/b 의 비가 0.7보다 작은 범위에서는 정도가 0.3%이다.

균열형상보정계수(F_e)는 3차원적인 타원형상의 균열을 타원상의 최대응력의 값으로 식 (2.5)과 같이 정의할 수 있다.

$$F_e = \frac{1}{E(k)} \quad (2.5)$$

여기서,
$$E(k) = \int_0^{\pi/2} [1 - k^2 \sin^2 \theta]^{1/2} d\theta$$

여기서,
$$k^2 = \frac{c^2 - a^2}{c^2}$$

식 (2.5)는 타원의 장경(주축)과 단경(부축)의 비 a/c 에만 의존한다. 장경(c)이 단경(a)의 2배보다 작을 때 $E(k)$ 는 식 (2.6)로 정의된다.

$$E(k) = \frac{3}{8} \pi + \frac{\pi}{8} \frac{a^2}{c^2} \quad (c < 2a) \quad (2.6)$$

타원균열의 장경과 단경의 비는 여러 가지 상세구조 형상에 대하여 실험적으로 구할 수 있다.

용접지단부와 용입부족선단에서 응력집중의 영향을 고려한 기하학적형상보정계수(F_g)를 P. Albrecht 및 K. Yamada[5]는 균열이 없는 구조물의 응력장을 유한요소법으로 구하고, 이 결과에서 균열표면에 작용하는 응력을 제거해 나가는 수치해석방법을 제시하고 있다.

덮개판-보의 용접끝에서의 응력집중보정계수(F_g)에 대한 근사식은 식 (2.7)와 같이 정의할 수 있다.

$$F_g = \frac{K_{tm}}{1 + 6.789 (a/t_f)^{0.4348}} \quad (2.7)$$

여기서, K_{tm} = 응력집중계수
 a = 균열의 깊이
 t_f = 플랜지의 두께

균열이 없는 단면에 대한 용접끝에서의 응력집중계수(K_{tm})는 다음 식 (2.8)에 의해 근사적으로 정의하였다.

$$K_{tm} = -3.539 \ln\left(\frac{Z}{t_f}\right) + 1.981 \ln\left(\frac{t_{cp}}{t_f}\right) + 5.798 \quad (2.8)$$

여기서, Z = 용접의 다리길이
 t_{cp} = 덮개판의 두께
 t_f = 플랜지의 두께

3 실험

3.1 시험체 및 형상

본 연구에서 사용한 시험체는 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 용접구조용강재인 SWS 490B로써 반자동용접법에 의해 제작되었다.

시험체에 사용된 강종과 용착금속의 화학성분 및 물리적 성질은 각각 표 3.1, 3.2과 같다.

표 3.1 강재의 화학성분 및 물리적 성질

| 강재의 종류 | 화학성분 | | | | | 물리적 성질 | | | |
|----------|------|------|------|-------|-------|------------|------------|------------|---------|
| | C | Si | Mn | P | S | 항복강도 (MPa) | 인장강도 (MPa) | 탄성계수 (GPa) | 연신율 (%) |
| SWS 490B | 0.16 | 0.38 | 1.23 | 0.012 | 0.009 | 368.3 | 539.2 | 205.8 | 23 |

표 3.2 용착금속의 화학성분 및 물리적 성질

| 종 류 | 화학성분 | | | | | 물리적 성질 | | |
|-------|------|------|------|-------|-------|------------|------------|---------|
| | C | Si | Mn | P | S | 항복강도 (MPa) | 인장강도 (MPa) | 연신율 (%) |
| SF-71 | 0.08 | 0.48 | 1.23 | 0.012 | 0.011 | 460.0 | 530.0 | 32 |

본 연구의 일축인장피로시험을 하기 위하여 소형시험체를 제작하였다. 시험체는 덮개판의 형상에 따라 3가지의 변수를 두어 각 경우별 6개씩 제작하였다. 이들 각 시험체의 형상과 치수는 그림 3.1과 같다.

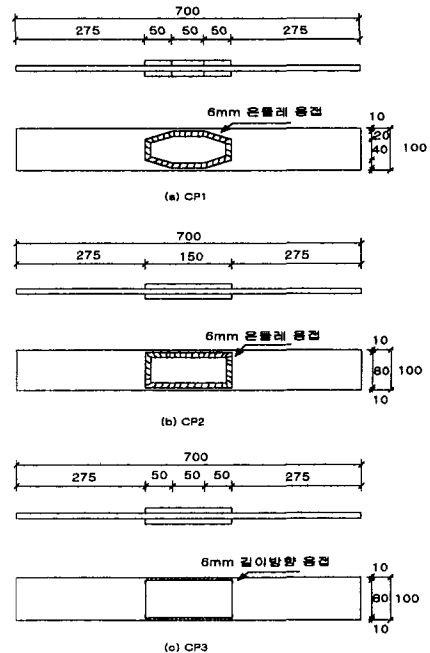


그림 3.1 덮개판 인장 시험체의 형상

3.2 실험방법

덧개판 형상의 따른 피로강도를 정량적으로 평가하기 위해서 본 연구에서는 $\pm 25\text{ton}$ 용량의 전기유압식 피로 시험기를 사용해서 편진인장피로시험을 실시하였다.

피로실험시 작용하중은 그림 3.2에서 나타낸 바와 같이 일정진폭하중으로서 파형은 sin파를 이용하였고 하중재하속도는 5Hz, 용접 지단부에서의 피로균열발생 및 균열 성장 특성을 평가하기 위해서 일정 반복회수마다 비치마크(Beach mark)를 도입하였다.

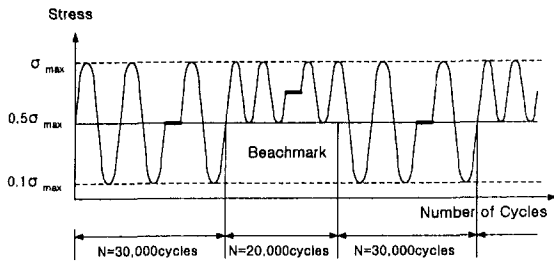
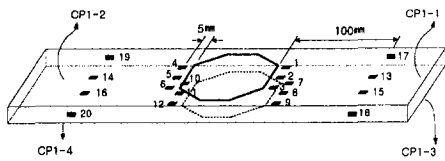
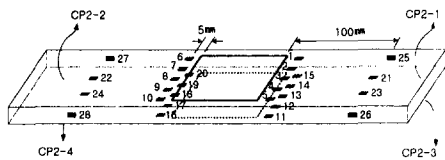


그림 3.2 응력파형 및 비치마크 도입양상

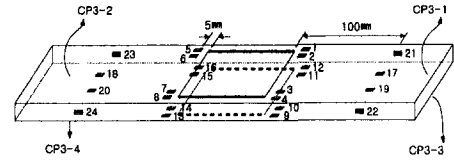
덧개판 형상에 따른 각 시험체의 용접 지단부에서의 균열발생예상지점을 확인하고 구조해석 모델링의 기초자료로 활용하기 위하여 용접 비드각도를 등간격으로 측정하였다. 그림 3.3은 본 연구에서 시험체의 공칭용력과 용접 각변형에 따른 용접지단부의 오목한 부분과 볼록한 부분에서의 국부용력을 측정하고 피로실험시 시험체의 편심을 잡기 위한 변형을 게이지 부착위치를 나타낸다.



(a) CP1



(b) CP2



(c) CP3

그림 3.3 피로실험용 시험체의 변형율게이지 부착위치

4. 피로균열성장특성

4.1 시험편의 파단면 특성

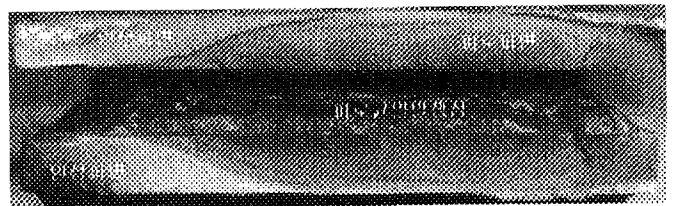
덧개판 형상에 따른 각 시험체의 용접지단부에서의 파단면 특성을 조사하기 위해서 시험체에 대한 피로 실험을 종료한 후 파단면 형상을 나타낸 것이 그림 4.1과 같으며, 이에 대한 모식도를 보여주는 것이 그림 4.2이다

CP1 시험체는 그림 4.1 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 용접지단부에서 반타원형의 표면균열이 여러곳에서 발생하여 판폭, 판두께 방향으로 성장하다가 인접한 균열과 서로 합체(간섭)되어 더 큰 형상의 반타원형 균열로 성장하여 파단에 이르렀다. 이러한 현상은 용접길이방향으로 비드형상이 변화하기 때문에 비드 접선각도가 가장 작고 용접지단부의 곡률반경이 가장 작은 부분, 즉 용접지단부의 응력집중계수가 가장 큰 부분에서 피로균열이 발생하는 것을 알 수 있었다.



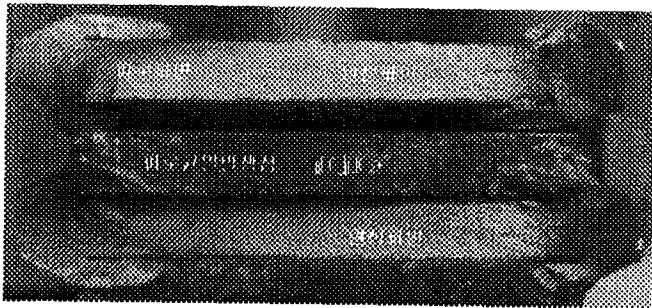
$\sigma_{max} = 98.1 \text{ (MPa)}$ $\sigma_{min} = 9.81 \text{ (MPa)}$ $\Delta\sigma = 88.29 \text{ (MPa)}$ $R = 0.1$

(a) CP1 시험체의 파단면 특성



$\sigma_{max} = 117.7 \text{ (MPa)}$ $\sigma_{min} = 11.77 \text{ (MPa)}$ $\Delta\sigma = 105.93 \text{ (MPa)}$ $R = 0.1$

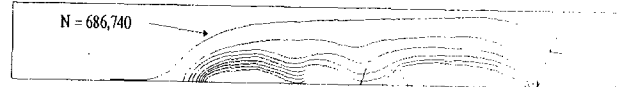
(b) CP2 시험체의 파단면 특성



$\sigma_{max} = 107.9 \text{ (MPa)}$ $\sigma_{min} = 10.79 \text{ (MPa)}$ $\Delta\sigma = 97.11 \text{ (MPa)}$ $R = 0.1$

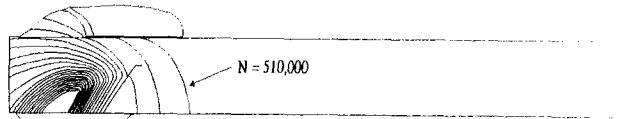
(c) CP3 시험체의 파단면 특성

그림 4.1 피로실험 결과에 따른 시험체의 파단면 특성



$\sigma_{max} = 117.7 \text{ (MPa)}$ $\sigma_{min} = 11.77 \text{ (MPa)}$ $\Delta\sigma = 105.93 \text{ (MPa)}$ $R = 0.1$
 $N_i = 662,500 \text{ cycles}$ $N_p = 686,740 \text{ cycles}$ $N_f = 1,340,240 \text{ cycles}$

(b) CP2 시험체의 파단면 모식도



$\sigma_{max} = 107.9 \text{ (MPa)}$ $\sigma_{min} = 10.79 \text{ (MPa)}$ $\Delta\sigma = 97.11 \text{ (MPa)}$ $R = 0.1$
 $N_i = 453,020 \text{ cycles}$ $N_p = 510,000 \text{ cycles}$ $N_f = 963,020 \text{ cycles}$

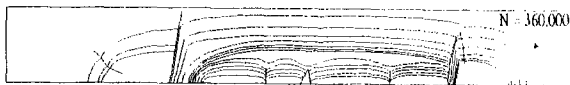
(c) CP3 시험체의 파단면 모식도

그림 4.2 피로실험 결과에 따른 시험체의 파단면 모식도

CP2 시험체도 그림 4.1 (b)에서 보는 바와 같이 CP1 과 마찬가지로 반타원형의 표면균열이 여러 곳에서 발생하여 판폭, 판두께 방향으로 성장하다가 인접한 균열과 서로 합체되어 성장하여 결국에는 파단에 이르렀다. CP2는 CP1과는 달리 최종적으로 합체된 균열길이가 균열깊이가 상대적으로 큰 값을 보였으며, 균열의 합체과정이 크게 2번 이루어졌음을 확인하였다. 이는 덮개판 형상에 따른 비드형상의 변화가 서로 다르고 용접지단부에서의 응력집중의 분포가 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다.

CP3 시험체는 그림 4.1 (c)에서 보는 바와 같이 다른 두 시험체와는 달리 용접결합이 있는 곳에서 균열이 발생하여 반원형 형태의 균열로 성장하다가 반타원형 균열로 성장 다시, 점차적으로 판통균열형태로 이행되면서 파단에 이르렀다. CP3의 피로균열성장은 모재부에서 시작하여 용접부까지 이행되는데 모재부와 용접부사이의 열영향부에 대한 영향은 균열형태로 보아 거의 없음을 확인할 수 있었다.

이상에서와 같이 각 시험체의 피로균열형상은 덮개판 형상에 따른 비드형상의 변화로 인하여 각각 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

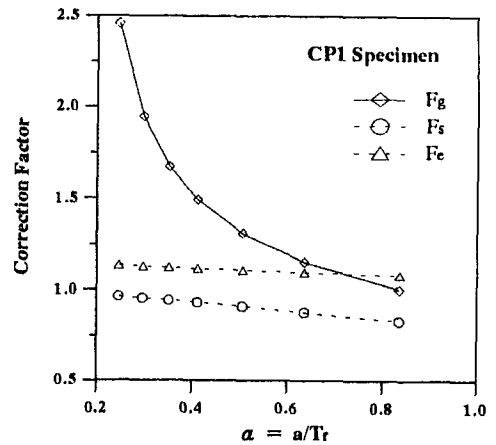


$\sigma_{max} = 98.1 \text{ (MPa)}$ $\sigma_{min} = 9.81 \text{ (MPa)}$ $\Delta\sigma = 88.29 \text{ (MPa)}$ $R = 0.1$
 $N_i = 303,810 \text{ cycles}$ $N_p = 360,000 \text{ cycles}$ $N_f = 663,810 \text{ cycles}$

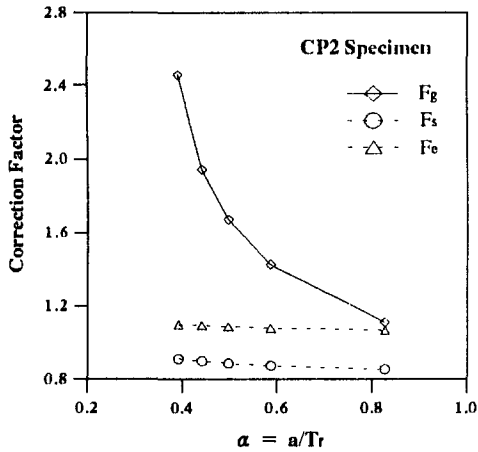
(a) CP1 시험체의 파단면 모식도

4.2 피로균열성장해석

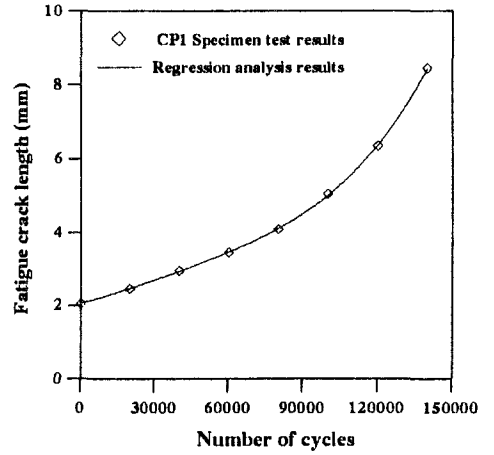
각각의 시험체에 대한 피로균열성장 해석을 하기 위하여 응력확대계수의 보정계수 $F(a)$ 를 그림 4.3에 나타냈었다. 응력구배보정계수 (F_g)는 N. Zettlemoyer[2]가 제안한 식 (2.7)과 식 (2.8)를 사용하였으며, 균열형상 보정계수 (F_e)는 반타원형상 균열에 적용되는 식 (2.5)를 사용하였고, 자유표면 보정계수 (F_s)는 식 (2.3)을 사용하였다. 판두께, 판폭이 유한한 것에 대한 유한판 보정계수 (F_w)는 S.J. Maddox[6]가 제안한 1의 값을 사용하였다.



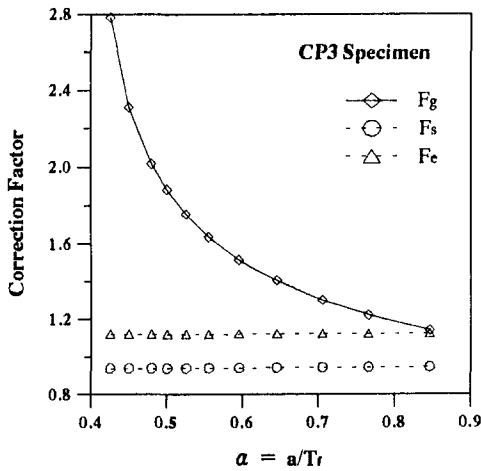
(a) CP1 시험체의 보정계수



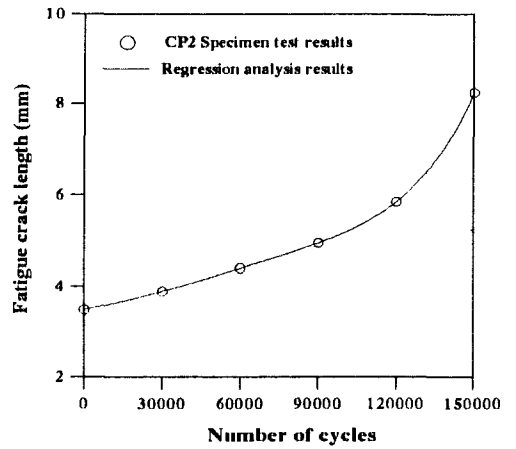
(b) CP2 시험체의 보정계수



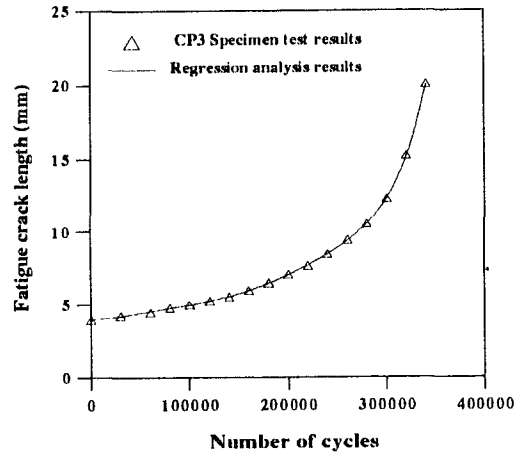
(a) CP1 시험체의 a-N 선도



(c) CP3 시험체의 보정계수



(b) CP2 시험체의 a-N 선도



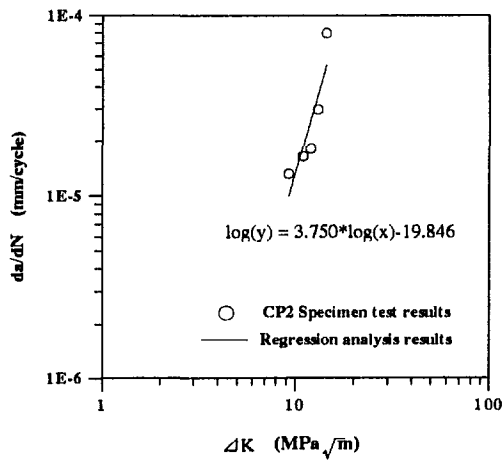
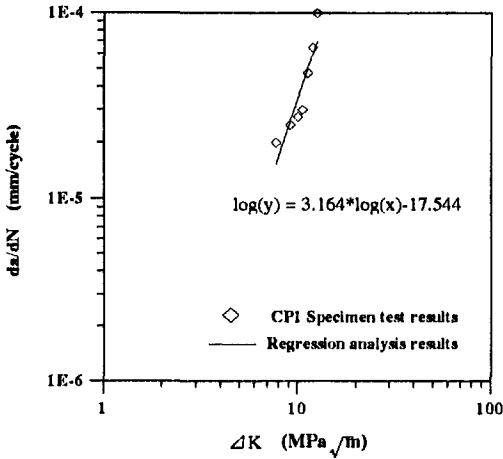
(c) CP3 시험체의 a-N 선도

그림 4.3 보정계수 F(a)

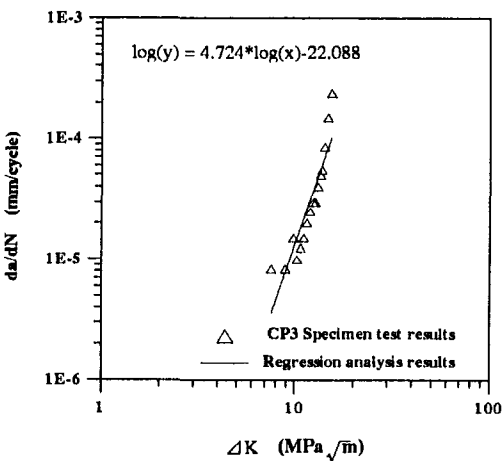
그림에서와 같이 덮개판 인장 시험체에서의 보정계수(F(a))는 균열형상 보정계수(Fe)와 자유표면 보정계수(Fs)가 거의 1에 근접함으로써 응력구배보정계수가 응력확대계수범위를 결정하는데 있어서 거의 지배적임을 확인할 수 있었다.

그림 4.4는 비치마크 시험으로부터 각 시험체의 하중반복 회수별 균열길이인 a-N선도를 나타낸 것이고 a-N선도로부터 보정계수중 응력구배보정계수(Fg)를 고려하여 da/dN-ΔK선도를 그림 4.5에 나타내었다.

그림 4.4 각 시험체의 a-N 선도



(b) CP2 시험체의 da/dN - ΔK 선도



(c) CP3 시험체의 da/dN - ΔK 선도

그림 4.5 각 시험체의 da/dN - ΔK 선도

표 4.1은 da/dN - ΔK 선도로부터 각 시험체의 재료상수인 C , m 값을 나타내고 있다.

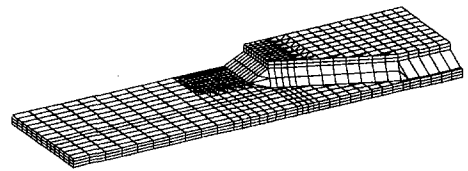
표 4.1 각 시험체의 재료상수 C 와 m

| 시험체의 종류 | C | m |
|---------|---------------------------|---------|
| CP1 | 2.40321×10^{-8} | 3.16433 |
| CP2 | 2.40517×10^{-9} | 3.75045 |
| CP3 | 2.55492×10^{-10} | 4.72375 |

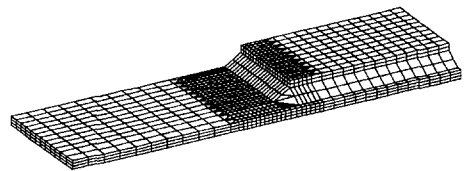
표 4.1에서 나타낸 바와 같이 덮개판 형상에 따른 균열성장 지수 m 과 균열성장상수 C 는 각각 3.16433~4.72375와 2.40321×10^{-8} ~ 2.55492×10^{-10} 의 범위에 존재하고 있는데, 이는 J.M. Barsom[7]과 J.W. Fisher[8]가 용접부재에 대한 피로시험의 자료로부터 구조용 강재의 기초적인 균열성장률에 적용할 수 있는 균열성장지수를 3으로 확인한 것과, 또 C 의 상한값으로 S.T Rolf 와 J.M Barsom[7]이 제안한 $C = 2.18 \times 10^{-13}$ 의 범위와 차이를 보이고 있는데 이는 사용 강종 및 용접방법에 차이가 존재하고 용접지단의 기하학적 형상의 차이로 인하여 발생했다고 생각된다.

(1) 유한요소해석에 의한 보정계수(F_g)

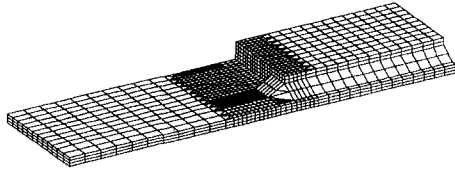
덮개판 형상에 따른 용접지단부에서의 응력집중계수를 산정하고 이로부터 기하학적 형상보정계수(F_g)를 계산하기 위하여 유한요소해석을 통한 선형탄성 해석을 실시하였다.



(a) CP1 시험체의 구조해석모델



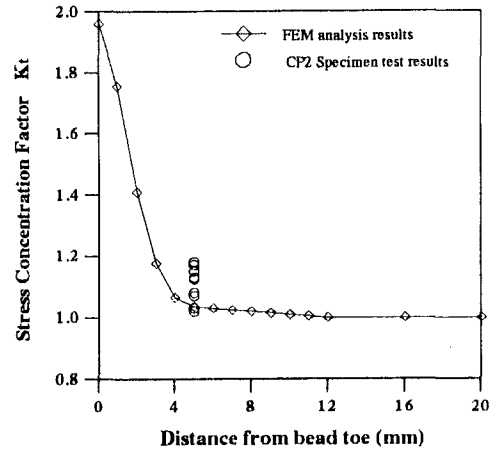
(b) CP2 시험체의 구조해석모델



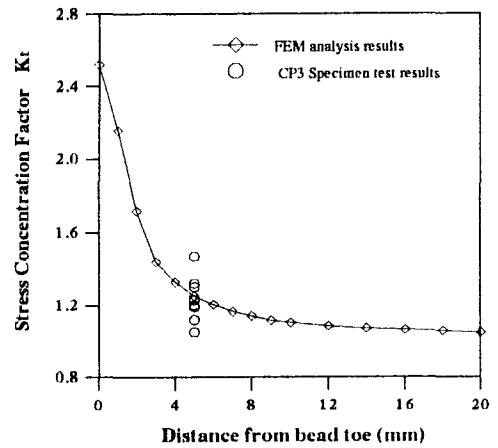
(c) CP3 시험체의 구조해석 모델

그림 4.6 각 시험체의 구조해석 모델

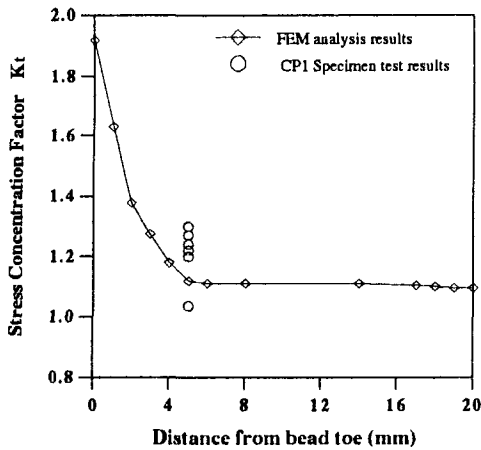
유한요소해석시 시험체형상의 기하학적 특성으로 인하여 2차원 평면해석을 실시하지 않고 3차원 solid로 해석하였으며, 용접지단부에 대한 모델링은 각각의 시험체에 대한 비드각도를 측정하여 그때의 평균값을 사용하였다. 이때의 평균비드각도는 CP1이 147°, CP2 142°, CP3는 149°로 하였다. 해석모델에 사용한 요소는 3차원 입체요소(3D Continuum Element)로 U,V,W의 3자유도를 가진 TH4, PN6, HX8요소를 사용하였으며, 용접지단부에서 모재에 이르기까지 1mm에서 2cm까지 변화를 주면서 실시하였다. 덮개판과 모재는 0.01mm의 갭을 두었고, 용접부와 맞닿는 모재부는 강성을 키워줌으로써 일체로 거동하도록 하였다. 그림 4.6과 같이 각 시험체의 구조해석 모델은 전체 시험체의 1/8에 해당하는 부분을 모델링 하였으며, 경계조건은 잘린단면의 병진변위 방향을 모두 구속하였다.



(b) CP2 시험체의 응력집중계수 변화



(c) CP3 시험체의 응력집중계수 변화



(a) CP1 시험체의 응력집중계수 변화

그림 4.7 용접지단에서의 응력집중계수의 변화

그림 4.7은 유한요소 해석을 통한 각 시험체의 용접지단에서부터의 응력집중계수를 보여주는 것으로 실측치와 비교하였다. 각각의 시험체의 경우 해석치와 실측치를 비교하였을 때 각변형과 용접길이방향에 따른 비드각도의 차이에 의해서 어느정도 차이를 보이고 있으나 이는 구조해석시 이러한 모든 변화 요인을 고려할 수 없는 이유인 것으로 판단된다. 그림에서와 같이 응력집중은 전체적으로 용접지단부에서 크게 나타났으며, 비드각도가 147°인 CP1과 비드각도가 142°인 CP2에서 응력집중계수가 비슷하게 나타남으로써 용접지단의 비드각도에 따라 응력집중계수에 영향이 있음을 확인할 수 있었다.

반면, CP3는 비드각도가 149°임에도 불구하고 응력집중계수가 다른 두 시험체에 비하여 상대적으로 크게 나타났는데 이는 또한 용접형태에 따라서도 응력집중계수에 영향을 있음을 구조해석을 통하여 확인할 수 있었다.

그림 4.8은 유한요소해석에서 구한 응력집중계수의 회귀분석식으로부터 그린함수법을 이용하여 응력구배보정계수를 나타낸 것으로 일방향 용접의 CP3 시험체가 다른 두 시험체에 비하여 큰 값을 보이고 있다.

(2) 피로수명계산

표 4.2에서 알 수 있는 바와 같이 실제 피로수명과 계산 피로수명의 사이에 약 1.5~2.2배의 차이를 보이고 있는데 이는 비치마크를 통한 정확한 피로균열

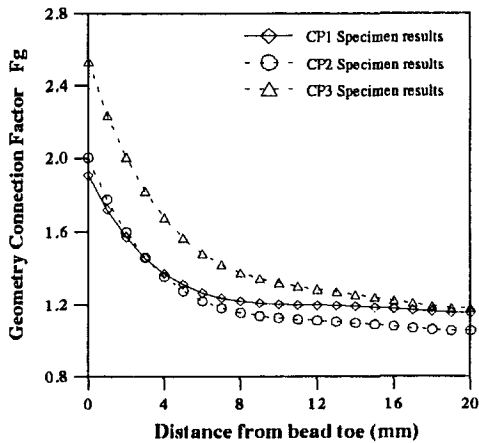


그림 4.8 각 시험체의 응력구배보정계수(F_g)

성장길이를 측정하기가 곤란하고, 시험체의 용접지단 형상이 용접길이방향으로 일정하지 않고 어느 정도의 분포형상을 가지고 있기 때문이라고 생각된다.

표 4.2 각 시험체의 피로수명 산정결과

| 시험체의 종류 | 응력 범위 (MPa) | 고려된 균열길이(mm) $a_i \sim a_f$ | 실험 피로수명 (cycles) | 계산피로수명(cycles) | |
|---------|-------------|-----------------------------|------------------|----------------|---------|
| | | | | 제안식 | 해석수명 |
| CP1 | 88.29 | 2.05~8.35 | 140,000 | 89,076 | 96,715 |
| CP2 | 105.93 | 3.5~8.25 | 150,000 | 89,364 | 109,991 |
| CP3 | 97.11 | 4~20.05 | 340,000 | 155,792 | 183,311 |

반면, Zettlemoyer에 의해 제안된 응력구배보정계수를 고려한 계산 피로수명이 실제 피로수명보다 작게 평가되었는데, 이는 제안식을 적용하는데 있어 시험체 형상에 따른 용접지단에서의 응력집중계수의 차이 즉, 용접지단에서의 비드각도와 곡률반경 그리고 각변형에 의한 2차 면외응력의 유발등으로 인한 응력구배보정계수의 차이가 있었다고 판단된다.

유한요소 해석을 통해 얻어진 응력구배보정계수를 고려한 피로수명 역시 실제 피로수명과 차이를 보였지

만, Zettlemoyer의 제안식에 의한 피로 수명보다는 실제피로수명과의 오차를 줄일 수 있었다. 따라서 특정 구조상세에 대하여 보다 세밀하게 구조해석이 행해진다면 실제 피로수명을 어느 정도 예측할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 강교량을 구성하는 구조세목중 덮개판 형상에 따른 피로균열 성장특성과 피로수명을 산정하기 위하여 유한요소 해석과 피로시험을 행하였는데, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 용접부의 피로 강도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 용접지단부의 형상에 기인하는 피로균열발생점에서의 응력집중계수임을 확인하였다.
- (2) 덮개판 인장 시험체의 응력확대보정계수는 기하학적 형상보정계수가 가장 지배적임을 확인하였으며, 균열이 발생하여 합체되는 과정에서 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (3) 덮개판 형상에 따른 피로균열성장 특성은 CP1, CP2 시험체는 반타원형 표면균열을 이루며, CP3 시험체는 (반)원형 형태의 균열에서 반타원형 균열로 성장, 다시, 점차적으로 관통균열형태를 이루고 있음을 확인하였다.
- (4) 기존의 제안식에 의한 피로균열성장속도 $da/dN \sim \Delta K$ 선도와 유한요소해석을 통하여 구한 피로수명이 어느 정도 실제 피로수명을 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 정경섭[1997], "일본의 강교량 피로파손사례", 한국강구조학회지, 제9권, 제2호, pp. 11-25.
- [2] Zettlemoyer, N. "Stress Concentration and Fatigue of Welded Details", *Ph.D. Dissertation*. 1976.
- [3] Zettlemoyer, N. and Fisher J.W. "Stress Gradient Correction Factor for Stress Intensity at Welded Stiffeners and cover Plates", *Welding Research Supplement*, pp. 393-s-398-s, 1977.
- [4] Tada, H., Paris, P.C., and Irwin, G.R. "The Stress Analysis of Crack Handbook", Del Research

Corp., Hellertown, Pa. 1973.

- [5] Albrecht, P.A., and Yamada, K. "Rapid Calculation of Stress Intensity Factors" *Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE.*, Vol. 103, No. ST2, pp. 377-389, 1977
- [6] Maddox, S.J. "An analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints", *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 11, No. 2, pp. 221, 1975.
- [7] Rolfe, S.T. and Barsom, J.M. "Fracture and Fatigue control in Structures", *Application of Fracture Mechanics* (Englewood Cliffs, N.J.:Prentice-Hall), 1977.
- [8] Hirt, M.A., and Fisher, J.W. "Fatigue Crack Growth in Welded Beams", *Engineering Fracture Mechanics*. 5, 1973.