

강판형의 덮개판 형상에 따른 피로특성

Fatigue Characteristics according to the Shape of Cover Plate in Steel Plate Girders

정 영 화¹⁾ · 홍 성 욱²⁾ · 김 익 겹³⁾ · 정 진 석⁴⁾
Jung, Young Hwa Hong, Sung Wook Kim, Ik Gyeom Jung, Jin Suck

요 약 : 이 연구에서는 덮개판 형상이 피로특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 강교량을 구성하는 구조세목 중 덮개판 필렛용접부를 대상으로 일련의 피로실험을 실시하였다. 피로실험결과 덮개판 형상에 따라 피로강도에 다소 차이를 나타내고 있었으나 국내 및 외국의 피로설계기준을 만족함을 알 수 있었다. 또한 비치마크실험결과로부터 피로균열 발생점은 용접지단부의 형상에 밀접하게 관련되어 있음을 확인할 수 있었으며, 용접지단부의 여러 곳에서 동시다발적으로 발생한 피로균열이 반타원형의 표면균열의 형태로 성장하고 이 균열이 서로 합체되어 관통균열의 형태로 성장함으로써 결국 파단에 이르렀다. 한편, 파괴역학적 해석결과로부터 기존의 제안식 및 유한요소해석에서 구한 균열보정계수 중기하학적형상보정계수가 가장 지배적임을 알 수 있었으며, 피로균열성장속도와 유한요소해석에서 구한 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 덮개판 필렛용접부의 피로수명을 산정할 수 있었다.

ABSTRACT : In this study, A series of fatigue tests have been performed on the fillet welded joints of cover plates in steel plate girders in order to quantitatively assess the fatigue characteristics according to the shapes of cover plates. From the results of fatigue tests, it has been shown that the fatigue strengths were slightly different according to their shapes, but satisfied the fatigue design curves in Korea and other countries. Also, from the results of beachmark tests, it has been confirmed that the points of fatigue crack initiation were closely related to the shapes of weld bead toes, and fatigue cracks simultaneously initiated from several points in weld bead toes have been grown as semi-elliptical surface cracks, and these cracks have been coalesced each other, and grown as through thickness cracks, and finally reached to fracture. Besides, from the results of fracture mechanics approaches, stress gradient factors were the most dominant factors among crack correction factors obtained from the existing equations and finite element analysis, and the fatigue life on fillet welded joints of cover plates could be estimated using the relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range obtained from finite element analysis.

핵심용어 : 덮개판, 피로강도, 피로균열성장속도, 응력확대계수범위, 피로수명

KEYWORDS : cover plate, fatigue strength, fatigue crack growth rate, stress intensity factor range, fatigue life

1) 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
2) 정희원, 한림정보산업대학 토목과 전임강사, 공학박사
3) 학생희원, 강원대학교 토목공학과 박사과정
4) 강원대학교 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

반복하중을 받는 대부분의 토목구조물은 정적 하중보다 훨씬 낮은 하중에서 파괴가 발생하는 경우가 있는데 이러한 현상을 피로라고 하며, 특히 강교량을 구성하는 부재 중에서 2차 부재에 해당되는 덮개판, 수평보강재, 수직보강재, 거셋트 등의 용접부에서는 여러 원인으로 인해서 피로손상이 발생하게 되어 결국에는 구조물의 성능에 크게 영향을 미치게 된다⁽²⁷⁾.

강교량에서 피로손상의 원인으로는 부적절한 재료의 선택, 재료자체에 내재된 불순물이나 초기 결함, 급격한 단면변화에 따른 응력집중, 부재가 공 및 용접시 잔류변형 등과 같은 것이 있으며^{(19), (20), (23)}, 일본토목학회⁽²⁶⁾에서는 앞에서 설명한 원인 이외에도 하중작용에 따른 면외휨변형에 의한 2차적인 응력의 작용, 바람과 차량주행 등에 의한 진동 등도 피로손상의 원인으로 제시하고 있다.

이러한 피로손상의 원인을 정량적으로 평가하기 위해서 외국에서는 수십년간에 걸쳐서 활발하게 피로실험을 실시하여 실험자료를 축적해 오고 있으며, 파괴역학의 이론적인 접근도 활발하게 실시해 오고 있다^{(15), (16), (17)}.

그러나 우리나라에서는 과거 발생한 성수대교 붕괴, 당산철교 철거 등과 같은 일련의 사고를 교훈으로 삼아 현재 강구조물의 피로특성에 관해서 일부 학자들을 중심으로 연구가 실시되고 있지만 실험기기의 부족, 장기적인 실험기간의 소요, 체계적인 연구환경의 미흡 등 여러 제약조건으로 인해서 체계적이고 정량적인 연구는 아직까지 미미한 실정이다.

이러한 실정으로 인해서 현재 국내 도로교표준시방서⁽²¹⁾에서 적용하고 있는 강교량의 허용피로 응력범위에 관한 규정은 국내 고유의 특수성을 고려하지 못하고 미국의 AASHTO⁽²⁵⁾에서 규정한 피로설계기준을 그대로 사용하고 있는 실정이다.

따라서 이 연구에서는 덮개판 필렛용접부를 대

상으로 피로실험과 유한요소해석을 실시하여 덮개판 형상에 따른 피로강도특성과 피로균열발생 및 성장특성을 파괴역학적 이론을 이용해서 정량적으로 평가함으로써 추후 국내 강교량의 고유한 피로설계기준을 설정하고 향후 강교량의 유지관리에 있어서 합리적인 안전성 판단기준을 수립하기 위한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험체 및 형상

이 연구에서 사용한 시험체는 현재 강교량에서 사용되고 있는 용접구조용 강재인 SM490B이며, 대상강재의 화학성분 및 기계적 성질은 표 2.1 및 표 2.2와 같다.

표 2.1 화학성분

강 종	화 학 성 분				
	C	Si	Mn	P	S
SM490B	0.16	0.38	1.23	0.012	0.009

표 2.2 기계적 성질

강 종	기 계 적 성 질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)
SM490B	368.3	539.2	205.8	23

또한 이 연구에서 사용한 시험체는 반자동용접법인 플럭스코어드 아크용접(FCAW)법으로 제작하였으며, 용접방법 및 용접조건은 표 2.3 및 표 2.4와 같다.

표 2.3 용접방법

시험체 종 류	봉 경 (mm)	전 류 (amp.)	전 압 (volt)	속 도 (cm/sec)
CP 1	1.2	36~38	270~300	10~15
CP 2	1.2	38	270~310	10~15

표 2.4 용접조건

용접자세	용접봉	극성	전극	가스
F(하향)	SF-71	DC, RP	단극	CO ₂ 25l/min

한편 이 연구에서 사용한 시험체는 덮개판 형상에 따라 2가지 유형으로 제작하였으며, 이들 시험체의 형상 및 치수는 그림 2.1과 같다.

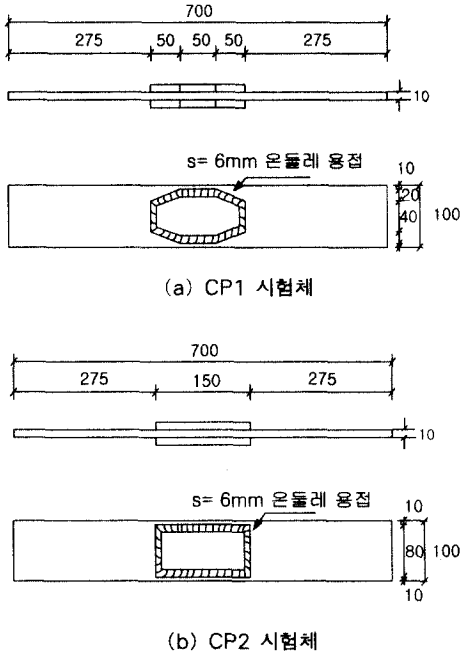


그림 2.1 시험체 형상 및 치수

2.2 실험방법

이 연구에서는 덮개판 형상이 피로강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 ±25ton 용량의 전기유압식 피로시험기를 이용해서 편진인장피로실험을 실시하였다.

피로실험시 작용하중은 일정진폭하중으로 하고 파형은 정현파를 이용하였으며, 하중재하속도는 5Hz, 응력비는 0.1로 하였다. 그리고 용접지단부에서의 피로균열발생 및 성장특성을 평가하기 위해서 일정반복회수마다 비치마크를 도입하였으며,

덮개판 형상에 따른 각 시험체 용접지단부에서의 균열발생점을 예상하고 구조해석 모델링시의 기하학적 형상에 관한 자료로 활용하기 위해서 용접지단부의 형상을 측정하였다.

한편 시험체에 작용하는 공칭응력과 용접지단부에서의 국부응력을 측정하기 위해서 변형률 게이지를 그림 2.2와 같이 부착하였다.

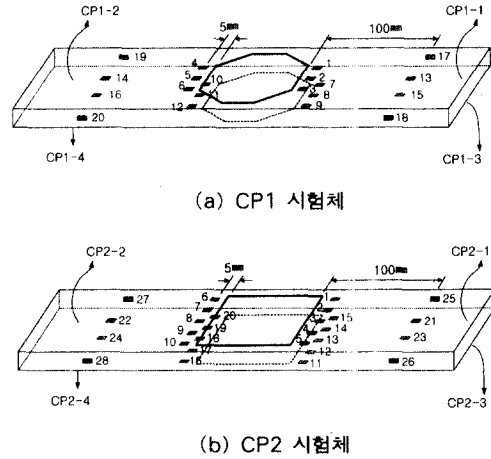


그림 2.2 변형률게이지 부착위치

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로강도 특성

덮개판 형상에 따른 덮개판 필렛용접부의 피로강도 특성을 정량적으로 평가하기 위한 피로실험 결과로부터 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 그림 3.1과 같다.

그림 3.1에서 나타난 E'등급과 F등급은 각각 AASHTO⁽²⁵⁾와 JSSC⁽²⁴⁾에서 규정하고 있는 덮개판 필렛용접부의 피로강도등급이며, 그림 중의 실선과 점선은 각각 JSSC와 AASHTO에서 규정하는 피로설계곡선을 나타낸다. 한편 그림 3.1의 결과로부터 회귀분석법을 이용해서 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 표 3.1과 같다.

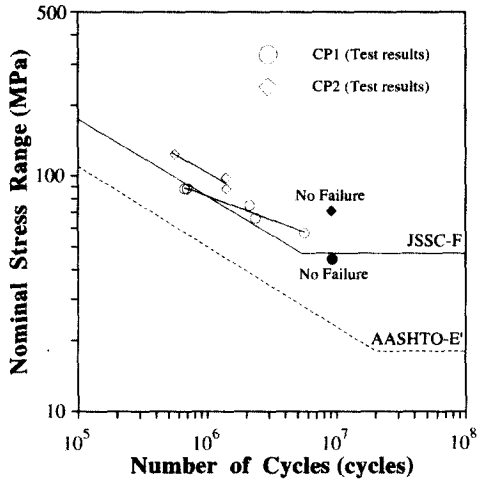


그림 3.1 공칭응력범위와 반복회수 선도

표 3.1 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계식

시험체 종류	회 귀 분석 식	2×10^6 회 피로강도 (MPa)	S-N 선도 기울기
CP1	$\log(\Delta\sigma) + 0.203\log(N) = 7.21$	71.4	4.3
CP2	$\log(\Delta\sigma) + 0.268\log(N) = 8.35$	87.3	4.7

그림 3.1에서 알 수 있는 바와 같이 덮개판 형상에 따른 피로강도는 현행 국내 도로교표준시방서⁽²¹⁾와 AASHTO⁽²⁵⁾ 및 JSSC⁽²⁴⁾의 피로설계기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

표 3.1에서 알 수 있는 바와 같이 덮개판 필렛 용접부의 2×10^6 회 피로강도는 CP1 시험체보다 CP2 시험체가 다소 증가하는 경향을 나타내며, 공칭응력-반복회수 선도의 기울기 또한 CP2 시험체가 CP1 시험체보다 완만한 경향을 나타내고 있었다. 이는 CP2 시험체가 CP1 시험체에 비해서 시험체의 폭방향 전체적으로 작용외력을 분담하는 메카니즘이 형성되기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 피로강도의 측면에서는 CP2 시험체와 같이 4변 직사각형 온돌레 용접한 경우가 가장 효율적임을 알 수 있으며, 특히 토목구조물과 같이 고주기피로(high cycle fatigue)를 받는 경우에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

3.2 파단면 특성

덮개판 형상에 따른 덮개판 필렛용접부의 피로 균열발생 및 성장특성을 조사하기 위해서 시험체에 대해서 피로실험을 종료한 후의 파단면 형상을 나타내면 그림 3.2와 같으며, 이에 대한 모식도를 나타내면 그림 3.3과 같다.

그림 3.2 피로실험 결과에 따른 파단면 특성

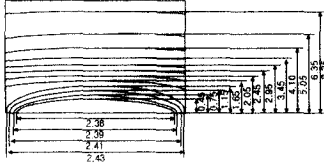
그림 3.2(a)에서 알 수 있는 바와 같이 CP1 시험체의 경우 용접지단부에서 응력집중계수가 가장 큰 여러 부분에서 피로균열이 동시다발적으로 발생하여 반타원형의 표면균열형태로 판폭, 판두께 방향으로 성장하다가 인접한 균열과 합체되어 보다 큰 형상의 반타원형 균열로 성장하여 파단에 이르는 것을 확인할 수 있었으며, 그림 4.1에서 나타낸 용접선 방향의 비드형상 측정결과에서도 알 수 있는 바와 같이 비드접선각이 가장 작은 부분에서 피로균열이 발생하는 것을 알 수 있었다.

또한 그림 3.2(b)에서 알 수 있는 바와 같이 CP2 시험체는 CP1 시험체의 경우와 동일한 피로균열발생 및 성장특성을 나타내고 있었다.

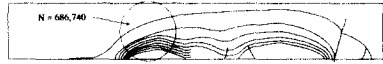


$\sigma_{max} = 98.1(MPa)$ $\sigma_{min} = 9.8(MPa)$ $\Delta\sigma = 88.3(MPa)$ $R = 0.1$
 $N_i = 303,810(cycles)$ $N_p = 360,000(cycles)$ $N_f = 663,810(cycles)$

(확대부분)

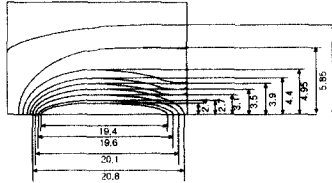


(a) CP1 시험체



$\sigma_{max} = 117.7(MPa)$ $\sigma_{min} = 11.8(MPa)$ $\Delta\sigma = 105.9(MPa)$ $R = 0.1$
 $N_i = 662,500(cycles)$ $N_p = 686,740(cycles)$ $N_f = 1,340,240(cycles)$

(확대부분)



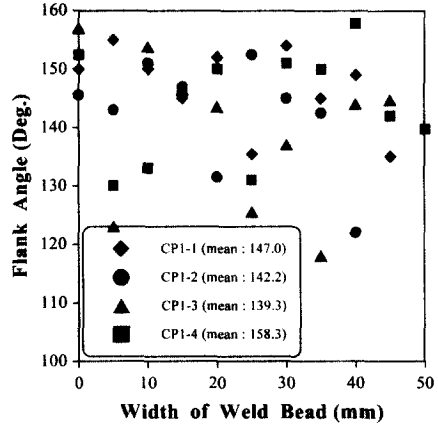
(b) CP2 시험체

그림 3.3 각 시험체별 파단면 모식도

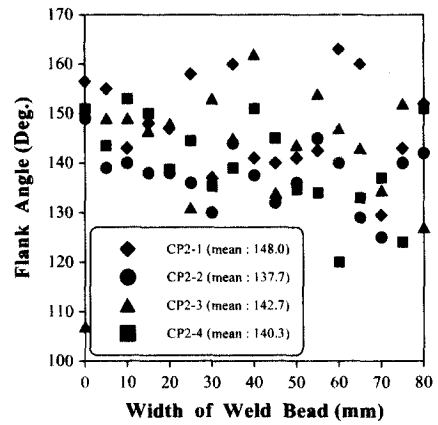
4. 유한요소해석

덮개판 형상에 따른 용접지단부에서의 국부적인 응력발생특성을 평가하고 이로부터 응력집중계수 및 기하학적 형상보정계수를 산정하기 위해서 상용구조해석프로그램인 LUSAS⁽²²⁾를 이용해서 선형탄성해석을 실시하였다.

유한요소해석시 시험체의 기하학적 형상을 정확하게 고려하기 위해서 3차원 입체해석을 실시하였으며, 용접지단부에 대한 모델링은 앞에서 언급한 바와 같이 각각의 시험체에 대한 용접비드형상을 측정해서 그 평균값을 이용하였으며, 용접비드형상의 측정결과를 나타내면 그림 4.1과 같다.



(a) CP1 시험체



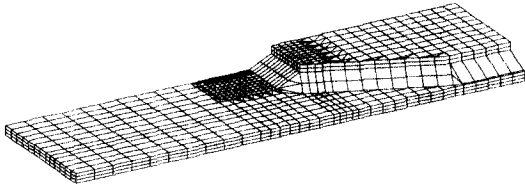
(b) CP2 시험체

그림 4.1 비드점선각도 측정결과

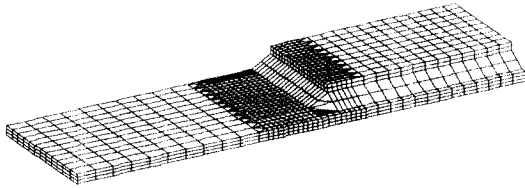
그림 4.1과 같이 용접비드형상 중 비드점선각도의 측정결과는 CP1 시험체의 경우 약 147°, CP2 시험체의 경우 약 142°임을 알 수 있었다.

그림 4.1의 비드점선각도 측정결과를 이용해서 유한요소해석을 실시하기 위한 모델링을 실시하였으며, 요소의 크기는 전체구조계에 대해서 0.1mm에서 20mm까지 변화시켰다.

또한 대상 시험체의 대칭성을 이용해서 전체구조계의 1/4에 대해서만 모델링을 실시하였으며, 경계조건은 절단면의 병진변위를 모두 구속하는 것으로 하였다. 대상 시험체의 모델링의 일례를 나타내면 그림 4.2와 같다.



(a) CP1 시험체



(b) CP2 시험체

그림 4.2 유한요소해석 모델링의 일례

그림 4.2에서 나타낸 덮개판 필렛용접부에 단위하중을 작용시킨 경우에 대한 유한요소해석결과 의 일례를 나타내면 그림 4.3과 같으며, 그림 4.3에서 응력등고선이 나타내는 값은 외력이 작용하는 방향에 대한 응력을 의미하고 단위는 t/m^2 이다.

그림 4.3 유한요소해석결과의 일례

그림 4.3에서 알 수 있는 바와 같이 유한요소 해석결과 최대응력은 덮개판 필렛용접부의 용접지 단부에서 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 그림 3.2 및 그림 3.3에서 나타낸 파단면 형상의 피로균열 발생위치가 유한요소해석상의 응력집중 부와 일치하는 것을 알 수 있었다.

한편 유한요소해석결과에 기초해서 용접지단부로부터의 거리에 따른 응력집중계수의 변화를 나타내면 그림 4.4와 같다.

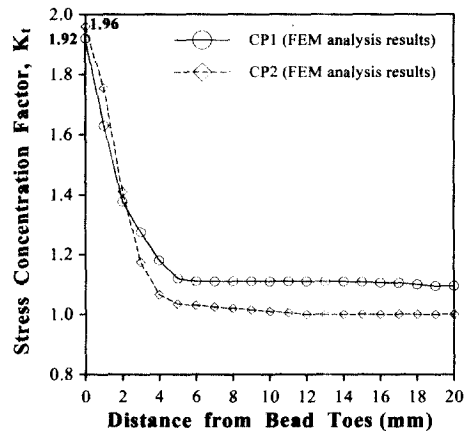


그림 4.4 용접지단부로부터의 응력집중계수 변화

그림 4.4에서 알 수 있는 바와 같이 용접지단부에서의 응력집중계수는 CP1 시험체의 경우 1.92, CP2 시험체의 경우 1.96으로 나타나고 있었다. 이로부터 덮개판의 형상에 따른 응력집중 계수에는 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, 각 시험체에서 응력집중계수에 다소 차이가 존재하는 이유는 대상 시험체의 용접지단부 형상 즉, 비드접선각도에 차이가 존재하기 때문인 것으로 생각된다.

5. 파괴역학적 해석

5.1 응력확대계수범위

중양부에 길이가 $2a$ 인 관통균열을 갖는 무한판에 등분포응력 $\Delta\sigma$ 가 작용할 때 응력확대계수범위 ΔK 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

그러나 실제 구조물은 이상적인 구조물과는 달리 결함이 존재하게 되고 이러한 결함의 형상이나 결함이 존재하는 부재형상을 고려함으로써 일반적인 경우의 응력확대계수는 식 (1)에 균열에 대한 보정계수 $F(a)$ 를 고려함으로써 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다^{(6),(14)}.

$$\Delta K = F(a) \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$F(a) = F_e F_s F_w F_g \quad (2)$$

여기서, F_e 는 균열형상에 대한 균열형상보정계수, F_s 는 표면균열에 대한 자유표면보정계수, F_w 는 유한판폭, 판두께에 대한 유한판보정계수, F_g 는 응력집중의 영향을 고려한 기하학적 형상보정계수이다.

(1) 표면균열에 대한 보정계수

H.Tada, P.C.Paris 및 G.R.Irwin^{(3),(18),(20)}은 등분포응력을 받는 반무한판의 반타원형 균열에 대한 자유표면보정계수를 식 (3)과 같이 정의하고 있다.

$$F_s = 1.211 - 0.186 \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (3)$$

여기서, a : 반타원균열의 짧은지름,
 c : 반타원균열의 긴지름이다.

(2) 균열형상에 대한 보정계수

무한체 내부에 매립된 타원형 균열의 균열개구변위에 대한 해를 이용해서 균열개구변위와 응력확대계수에 대한 Westergaard의 해⁽⁴⁾로부터 균열형상 보정계수를 식 (4)와 같이 정의하고 있다.

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

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

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2, \phi : \text{위상각이다.}$$

(3) 유한판폭에 대한 보정계수

유한판두께 또는 유한판폭의 중앙에 길이 $2a$ 인 관통균열에 대한 유한판 보정계수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_w = (1 - 0.025 \lambda^2 + 0.06 \lambda^4) \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \lambda}{2}\right)} \quad (5)$$

여기서, 반타원형의 균열에 대해서 $\lambda = a/t$ 로 주어진다.

(4) 응력구배에 대한 보정계수

덧개판 필렛용접부에서의 응력집중계수에 대한 회귀분석결과로부터 그린함수법을 이용해서 기하학적 형상보정계수를 산정하였으며^{(5),(7)}, 그 결과를 그림 5.1에서 나타내었다.

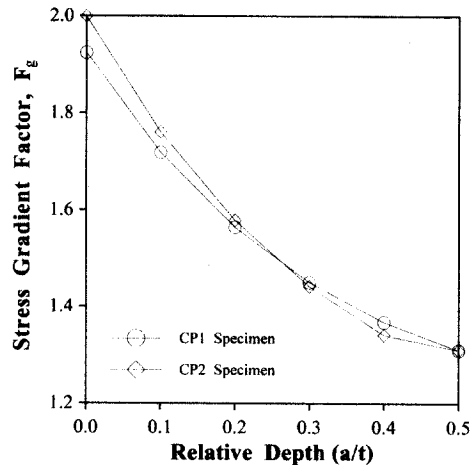


그림 5.1 기하학적 형상보정계수

한편, N.Zettlemoyer^{(1),(2)}는 덧개판 필렛용접부의 기하학적 형상보정계수를 식 (6)과 같이 나타내고 있다.

$$F_g = \frac{k_t}{1 + \frac{1}{0.1473} \left(\frac{a}{t}\right)^{0.4348}} \quad (6)$$

여기서, k_t : 응력집중계수, t : 모재두께, a : 균열길이이다.

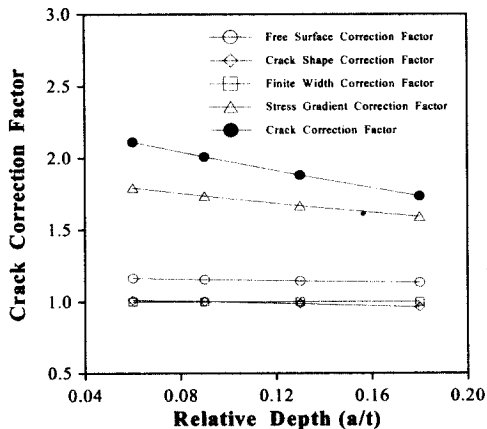
또한 응력집중계수는 균열이 발생하지 않은 덮개판 필렛용접부에 대해서 식 (7)과 같이 나타내고 있다.

$$k_t = -3.54 \log\left(\frac{Z}{t}\right) + 1.98 \log\left(\frac{t_{cp}}{t}\right) + 5.8 \quad (7)$$

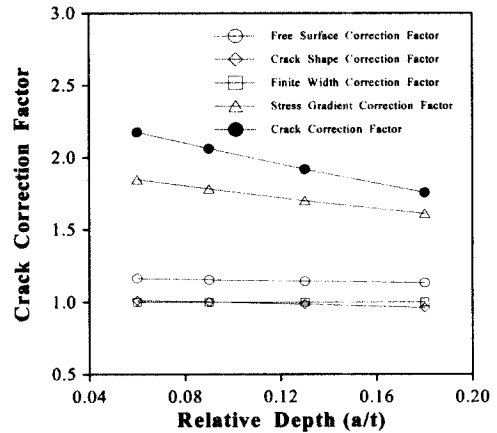
여기서, Z : 용접각장, t_{cp} : 덮개판 두께이다.

이상의 결과를 이용해서 대상 시험체에 대한 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 산정한 균열보정계수를 정리해서 나타내면 그림 5.2와 같다.

그림 5.2에서와 같이 덮개판 필렛용접부의 균열보정계수 중 균열형상보정계수(F_g)와 자유표면보정계수(F_s) 및 유한판보정계수(F_w)는 a/t 에 관계없이 일정한 경향을 나타내고 있으나 기하학적 형상보정계수(F_g)는 a/t 가 증가함에 따라 급격하게 감소하는 경향을 나타내고 있으므로 균열보정계수에 가장 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.



(a) CP1 시험체

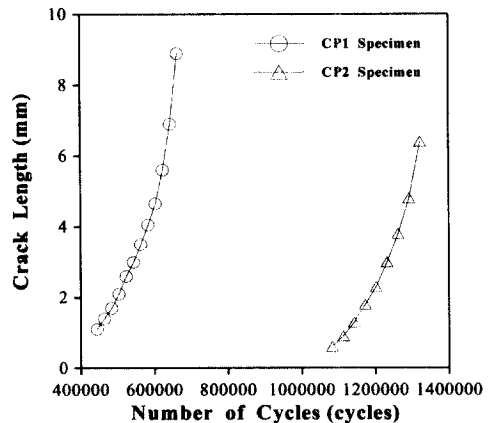


(b) CP2 시험체

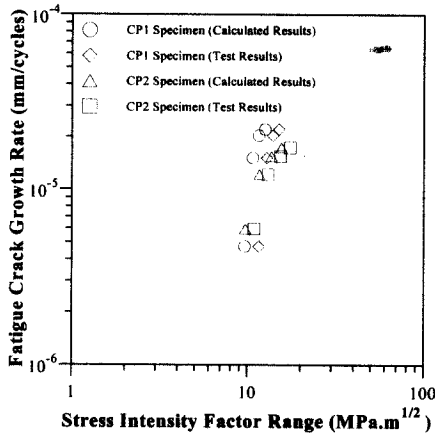
그림 5.2 균열보정계수의 일례

한편, 제4장에서 설명한 유한요소해석결과로부터 산정한 기하학적 형상보정계수와 제5장에서 나타난 균열보정계수들에 대한 결과를 이용해서 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 피로실험시 도입한 비치마크실험결과로부터 각 시험체별 $a-N$ 선도를 나타내면 그림 5.3과 같다.

그림 5.3(a)에서와 같이 덮개판 필렛용접부의 반복회수에 따른 균열성장특성은 큰 차이가 없음을 알 수 있었으며, 이 결과를 이용해서 피로균열 성장속도를 구하고 N.Zettlemoyer의 제안식⁽¹⁾과 유한요소해석에서 구한 균열보정계수를 이용해서 응력확대계수범위를 산정한 결과를 그림 5.3



(a) a-N 선도



(b) da/dN - ΔK 선도

그림 5.3 피로균열성장특성

(b)에서 나타내었다.

그림 5.3(b)에서 알 수 있는 바와 같이 피로균열성장속도는 CP1 시험체가 CP2 시험체보다 빠른 것으로 나타났는데, 이는 CP1 시험체의 경우 응력집중부가 CP2 시험체에 비해서 보다 좁은 영역에서 분포하고 있기 때문에 피로균열발생수명과 성장수명이 빨라지기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 그림 5.3의 결과를 이용해서 나타낸 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계식⁽¹⁴⁾에서 계수 C 와 지수 m 을 산정하면 표 5.1과 같다.

표 5.1 각 시험체별 C 및 m

구 분	C		m	
	제안식	유한요소해석	제안식	유한요소해석
CP-1	1.08×10^{-14}	4.40×10^{-15}	5.80	5.78
CP-2	3.25×10^{-11}	3.00×10^{-11}	2.29	2.26

표 5.1에서 알 수 있는 바와 같이 계수 C 는 CP1 시험체의 경우 $4.40 \times 10^{-15} \leq C \leq 1.08 \times 10^{-14}$, CP2 시험체의 경우 $3.00 \times 10^{-11} \leq C \leq 3.25 \times 10^{-11}$ 으로 나타나고 있으며, 지수 m 은 CP1 시험체의 경우 5.80, CP2 시험체의 경우 2.29로 나타나고 있다.

이와 같은 결과로부터 지수 m 은 제안식이나

유한요소해석에서 구한 값이 모두 일치하였으나 계수 C 는 제안식의 경우가 유한요소해석의 경우에 비해서 다소 큰 값을 나타내고 있었다.

J.M.Barsom⁽¹⁰⁾과 J.W.Fisher^{(7)-(9),(11)-(13),(18),(23)}가 구조용 강재를 대상으로 용접부재에 대한 피로실험을 실시해서 산정한 지수 $m=3$ 과 S.T.Rolfe와 J.M.Barsom⁽⁶⁾이 제안한 계수 $C=2.18 \times 10^{-13}$ 과 비교하면 C 값은 거의 유사한 경향을 나타내고 있으나 m 값은 CP1 시험체에서 다소 큰 값을 나타내고 있는데 이는 덮개판 필렛용접부 형상의 차이, 사용강종 및 용접방법의 차이에 기인하는 것으로 생각되며, 이에 대해서는 동일한 시험체에 대한 보다 많은 실험결과를 바탕으로 평가되어야 할 것으로 생각된다.

한편, 표 5.1에서 나타낸 계수 C 와 지수 m 은 표 5.2에서 나타낸 바와 같이 日本鋼構造協會의 피로설계지침⁽²⁴⁾의 최안전설계곡선이나 평균설계곡선에서 제시하고 있는 값을 대체적으로 만족하고 있는 것을 알 수 있으며, 이 연구결과를 JSSC 피로설계지침의 최안전설계곡선 및 평균설계곡선

표 5.2 da/dN-ΔK 선도의 제안정수

구 분	C	m	ΔK_{th} (MPa√m)
최안전설계곡선	2.7×10^{-11}	2.75	2.0
평균설계곡선	1.5×10^{-11}	2.75	2.9

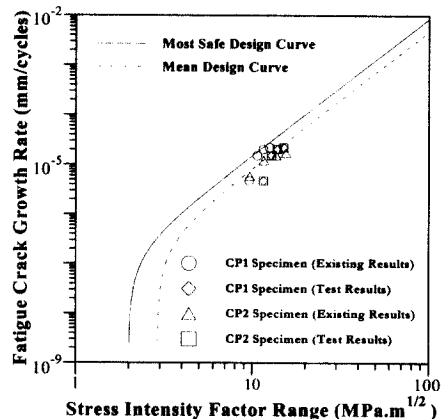


그림 5.4 JSSC 피로설계지침과의 비교

과 비교해서 나타내면 그림 5.4와 같다.

그림 5.4에서 알 수 있는 바와 같이 덮개판 필렛용접부에 대한 N.Zettlemoyer의 제안식⁽¹⁾과 이 연구의 유한요소해석결과는 JSSC⁽²⁴⁾의 피로 설계지침에서 제안하고 있는 평균설계곡선에 거의 일치하는 경향을 나타내고 있었다.

또한 식 (8)과 같이 Paris-Erdogan의 제안식⁽²⁸⁾을 이용해서 피로수명을 산출하면 표 5.3과 같다.

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (8)$$

여기서, a_i : 초기균열길이, a_f : 한계균열길이이다.

표 5.3에서 나타낸 피로시험결과로부터 실험피

표 5.3 피로수명 산정결과

시험체 종류	응력 범위 (MPa)	실험피로 수명, N_E (cycles)	계산피로수명 N_C (cycles)		수명비 (N_C/N_E)	
			제안식	FEM	제안식	FEM
CP1	57.3	5623440	8640127	8668034	1.54	1.54
	66.2	2370780	3750548	3762662	1.54	1.59
	75.1	2131060	1809069	1814912	0.85	0.85
	88.3	663810	709579	712337	1.07	1.07
	88.3	695340	709579	712337	1.02	1.02
CP2	88.3	1398000	389552	389895	0.28	0.28
	105.9	558920	182169	182330	0.33	0.33
	123.6	529500	182169	182330	0.34	0.35
	123.6	1349240	258328	258556	0.19	0.19

로수명과 N.Zettlemoyer의 제안식⁽¹⁾ 및 유한요소해석에서 산정한 계산피로수명 사이의 관계를 나타내면 그림 5.5와 같다.

표 5.3 및 그림 5.5에서 알 수 있는 바와 같이 실험피로수명과 계산피로수명의 비 N_C/N_E 는 CP1 시험체의 경우 $0.85 \leq N_C/N_E \leq 1.59$, CP2 시험체의 경우 $0.19 \leq N_C/N_E \leq 0.35$ 로 CP1 시험체의 경우 실험결과와 계산결과가 비교적 유사한 경향을 나타내고 있으나 CP2 시험체의 경우

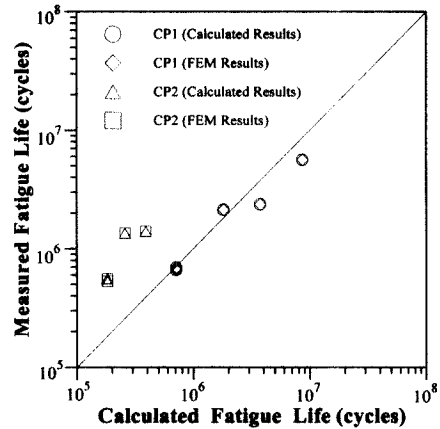


그림 5.5 실험피로수명과 계산피로수명의 비교

실험결과와 계산결과에 많은 차이가 존재하는데 이는 비치마크시험으로부터 측정된 피로균열을 정확하게 측정하는 데에 한계가 있었으며, 또한 이 연구에서 적용한 응력확대계수는 순수 수직응력만 작용하는 경우에 대한 식을 이용하였으나 실제 시험체에서는 용접열영향으로 인한 각변형이 존재하였으며, 이러한 각변형에 의한 면외응력을 고려할 수 없었기 때문인 것으로 생각된다.

6. 결 론

이 연구에서는 강교량을 구성하는 구조세목 중 덮개판 필렛용접부를 대상으로 덮개판 형상에 따른 피로강도 및 피로균열성장특성을 평가하기 위해서 피로시험 및 유한요소해석을 실시하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 덮개판 필렛용접부의 피로강도는 국내 및 외국의 피로설계기준에서 규정하고 있는 피로강도등급을 모두 만족하였으며, 직사각형 형상을 가진 덮개판 필렛용접부의 피로강도가 가장 높음을 알 수 있었다.
- (2) 덮개판 필렛용접부에서 피로균열은 필렛용접부의 비드접선각이 최소인 점에서 동시에 다발적으로 발생하였으며, 반타원형 표면균열의 형태로 성장하다가 이들 균열이 합

체되어 파단에 이르는 것을 확인하였으며, 이로부터 용접지단부의 피로강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 용접지단부의 형상임을 확인하였다.

- (3) 기존 제안식과 유한요소해석에서 구한 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계에서 덮개판 필렛용접부의 피로수명을 비교적 정확하게 산정할 수 있었다.
- (4) 이 연구에서는 덮개판 필렛용접부에 작용하는 하중을 면내응력에 국한하였으나 추후 보시험체를 대상으로 해서 면외응력에 따른 피로특성을 정량적으로 평가할 필요가 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) N.Zettlemoyer, "Stress Concentration and Fatigue of Welded Details", Ph. D. Dissertation, 1976.
- (2) N.Zettlemoyer and J.W.Fisher, "Stress Gradient Correction Factor for Stress Intensity at Welded Stiffeners and Cover Plates", Welding Research Supplement, pp. 393s-398s, 1977.
- (3) H.Tada, P.C.Paris and G.R.Irwin, "The Stress Analysis of Crack Handbook", Del Research Corp., Hellertown, 1973.
- (4) P.A.Albrecht, K.Yamada, "Rapid Calculation of Stress Intensity Factors", Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE., Vol.103, No.ST2, pp. 377-389, 1977.
- (5) S.J.Maddox, "An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints", International Journal of Fracture Mechanics, Vol. 11, No. 2, pp. 221, 1975.
- (6) S.T.Rolfe, J.M.Barsom, "Fracture and Fatigue Control in Structures-Application of Fracture Mechanics", Prentice-Hall, pp. 425-454, 1977.
- (7) M.A.Hirt, J.W.Fisher, "Fatigue Crack Growth in Welded Beams", Engineering Fracture Mechanics, Vol.5, 1973.
- (8) J.W.Fisher, M.A.Hirt, B.M.McNamee and K.H.Frank, "Effects of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams", NCHRP Report No.102, National Cooperative Highway Research Program, 1970.
- (9) J.W.Fisher, P.A.Albrecht, D. J. Klingerman, B.T.Yen and B.M.McNamee, "Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments", NCHRP Report No. 147, 1974.
- (10) J.M.Barsom, S.R.Novak, "Subcritical Crack Growth and Fracture of Bridge Steels", NCHRP Report No. 181, 1977.
- (11) J.W.Fisher, M.D.Sullivan, A.W.Pense and H.Hausammann, "Detection and Repair of Fatigue Damage in Welded Highway Bridges", NCHRP Report No. 206, 1978.
- (12) J.W.Fisher, D.R.Mertz, J.A.Edinger and B.M.Barthelemy, "Fatigue Behavior of Full-Scale Welded Bridge Attachments", NCHRP Report No.227, 1979.
- (13) R.F.Stockbower and J.W.Fisher, "Fatigue Resistance of Full Scale Cover-Plated Beams", Fritz Engineering Laboratory Report 386-9, Lehigh University, 1978.
- (14) K.Yamada, M.A.Hirt, "Fatigue Life Estimation using Fracture Mechanics", Proceedings of IABSE Colloquium-Lausanne, Fatigue of Steel and Concrete Structures, pp. 361-368, 1982.
- (15) P.Berger, "Fatigue Testing of Welded Beam", Proceedings of IABSE Colloquium-Lausanne, Fatigue of Steel and Concrete Structures, pp. 323-330, 1982.
- (16) M.P.Comeau, G.L.Kulak, "Fatigue Strength of Welded Steel Element", Technical Report 79, University of Alberta, Canada, 1979.
- (17) D.G.Bowers, "Loading History Span No.10 Yellow Mill Pond Bridge I-95 Bridgeport, Connecticut", Research Project HPR, pp. 175-332, State of Connecticut

- Department of Transportation, 1972.
- (18) R.Roberts, J.W.Fisher, G.R.Irwin, K.D.Boyer, G.V.Krishna, V.Morf, H.Hausammann and R.E.Slockbower, "Determination of Tolerable Flaw Sizes in Full Size Welded Bridge Details", Final Report No.FHWA- RD-77-170, Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Washington, D. C., 1977.
- (19) F.G.Signes, R.G.Baker, J.D.Harrison and F.M.Burdekin, "Factors Affecting the Fatigue Strength of Welded High Strength Steels", British Welding Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 108, 1967.
- (20) H.Tada, G.R.Irwin, "K-Value Analysis for Cracks in Bridge Structures", Fritz Engineering Laboratory Report No. 339, Lehigh University, 1975.
- (21) Ministry of Construction & Transportation, "Standard Highway Specification -Design/Construction&Maintenance", pp. 119-122, 1996.
- (22) LUSAS, "Lusas Thoery Manual et al", Ver.12, FEA Korea Ltd., 1997.
- (23) J.W.Fisher, "Fatigue and Fracture in Steel Bridges", John Wiley&Sons, 1984.
- (24) 日本鋼構造協會編, "鋼構造物の疲勞設計指針・同解説", 技報堂出版, pp. 5-12, pp. 240-260, 1993.
- (25) AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", pp. 144-147, 1996.
- (26) 日本土木學會編, "鋼橋における劣化現象と損傷の評価", (株)丸善, pp. 10-12, 1996.
- (27) 佐藤邦彦, "溶接強度ハンドブック", 理工學社, pp. 6(15)-6(17), 1990.
- (28) P.C.Paris, F.Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. of ASME, Series-D, Vol.85, No.4, pp. 528-533, 1963.

(접수일자 : 1999년 12월 15일)