

강판의 덮개판 용접부에서의 피로거동에 관한 연구

A Study on Fatigue Behavior near the Cover Plate Weldments in the Plate Girder

정영화* 김익겸** 김연경***
Jung, Young-Hwa Kim, Ik-Gyeom Kim, Yon-Kyung

AABSTRACT

Service life of steel bridges depends on fatigue and corrosion. Fatigue damage result from stress concentration and initial defects in the joint of secondary member such as weldments.

The objective of this study is to estimate fatigue strength of the cover plate weldments in the plate girder. For this study, fatigue tests, static tests and finete element method has been performed respectively from these results.

It was found that our test results were well agreed with other test results and satisfied with the fatigue criterion of AASHTO, JSSC and EUROCODE specifications

1. 서론

반복하중을 받는 대부분의 강구조물은 정적파괴 하중보다 훨씬 낮은 하중에서 파괴가 발생한다. 특히 교량의 주형 연결에 사용되는 덮개판, 수평보강재, 수직보강재, 거셋 등은 용접특성상 항상 결함을 내포하고 있으며, 이로 인한 피로균열의 생성, 진전으로 종국에는 파괴에 이르게 된다.

교량파괴의 원인은 사용한 재료의 인성부족, 한랭한 지역의 온도변화에 견딜 수 없는 부적절한 재료선택, 재료 자체에 내재된 불순물이나 균열, 또는 급격한 단면 변화 등의 응력 집중부 존재, 가공 및 용접시의 잔류변형, 부식이나 응력부식으로 인한 단면부족화 현상 등 여러 가지가 있었지만, 이것들에 대한 대책마련 후에도 피로가 교량파손의 주원인인 경우가 대단히 많았음을 발견할 수 있다.[1],[2]

이에 근원적인 문제해결을 위해 그 동안 많은

실험결과가 축적되었고, 피로해석을 위한 여러 가지 이론도 제시되었다. 이러한 연구와 실험의 결과를 바탕으로 피로에 대한 지침서가 개발되어 사용되고 있으며, 나라마다 각기 독특한 시방이 제정되어 피로 설계시에 적용하고 있다.

국내의 경우 아직까지 실험 혹은 실제 발생 사례에 대한 연구의 부족으로 각 시방서에 외국의 설계규정을 거의 그대로 인용하여 사용하고 있는 실정이다. 예로서, 도로교 설계 표준시방서[3]는 미국의 AASHTO 설계규정[4]을, 고속철도시방서(안)[5]는 일본의 국철 건조물 설계표준[6]을 인용하고 있다.

따라서 이 연구는 우리 나라 기술 실정에 기초하여 제작한 용접 연결된 판형교 덮개판의 용접구조상세에 대해 피로실험을 행함으로써, 피로관계 설계규정을 검증하는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 이론 및 설계기준

2.1 강도로교 표준시방서에서의 덮개판 용접부의 피

* 강원대학교 토목공학과 교수

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

*** 강원대학교 토목공학과 석사

로 설계 기준

1992년에 개정된 시방서의 강교편에는 피로에 관한 규정을 새로이 추가시켰다.[5] 구조물의 종류와 응력범주 및 설계수명(응력반복횟수)에 따라 정의된 허용응력에 대한 규정과 응력범주에 대한 예 등은 미국의 AASHTO[4] 규정을 인용하고 있다.

덮개판 용접부의 피로설계기준과 표준구조상세는 표 2.1 및 그림 2.1와 같다.[3],[4]

표 2.1 덮개판 용접부에 대한 도로교 표준시방서의 피로규정

개 요	응력범주
끝 부분의 용접여부에 관계없이 직각 또는 테이퍼 형상의 끝을 갖는 플랜지 보다 좁거나, 또는 끝단을 용접한 플랜지 보다 넓은 부분 용접한 덮개판 끝에서의 모재 (a) 플랜지 두께 ≤ 2.0cm (b) 플랜지 두께 > 2.0cm	E E'
끝단을 용접하지 않고 플랜지보다 넓은 부분 용접한 덮개판 끝에서의 모재	E'

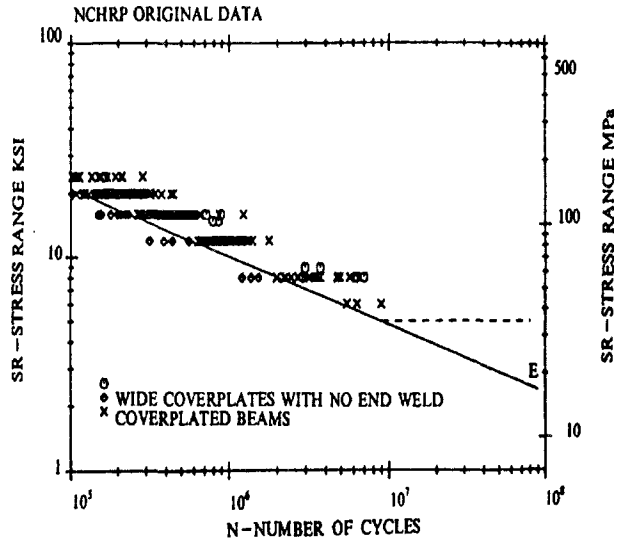


그림 2.2 AASHTO의 구조상세 E등급 피로저항곡선

2.2 일반철도 및 고속철도 표준시방서

강철도교 설계 표준시방서와 고속철도 강교량 설계 표준시방서에서는 강철도교 설계시 피로 검토를 하는 경우와 구조용 강재 및 용접부의 허용응력을 이음의 종류별로 규정하였다.[5], [6] 이 규정은 일본의 국철 건조물 설계표준집[9]의 규정을 인용한 것으로서 이음부의 응력상태를 인장, 압축 및 편진, 양진으로 구분하여 이를 허용응력에 적용시켰다. 즉, 평균 응력의 영향을 응력비($K = |\sigma|_{min} / |\sigma|_{max}$ 또는 $|\tau|_{min} / |\tau|_{max}$)를 사용하여 고려하였다. 1991년 제정된 고속철도 강교량 설계 표준시방서(시방안)에서는 피로검토를 허용응력을 사용하지 않고 허용피로응력범위를 사용하도록 규정하였다. 또한 일반 철도교 시방서는 모든 부재에 대해서 일률적으로 200만회의 반복횟수를 기본으로 한 피로허용응력에 의한 검토를 하도록 한 반면 고속철도 시방서에는 열차하중에 의한 응력변동의 크기, 교량을 통과하는 열차하중의 종류 및 빈도, 부재의 종류, 영향선의 길이와 지간의 종류 등을 고려한 규정을 하였다.

일반철도 및 고속철도 시방서에서 규정하고 있는 덮개판 용접부에 대한 규정은 다음 표 2.2과 같다.[5], [6], [8]

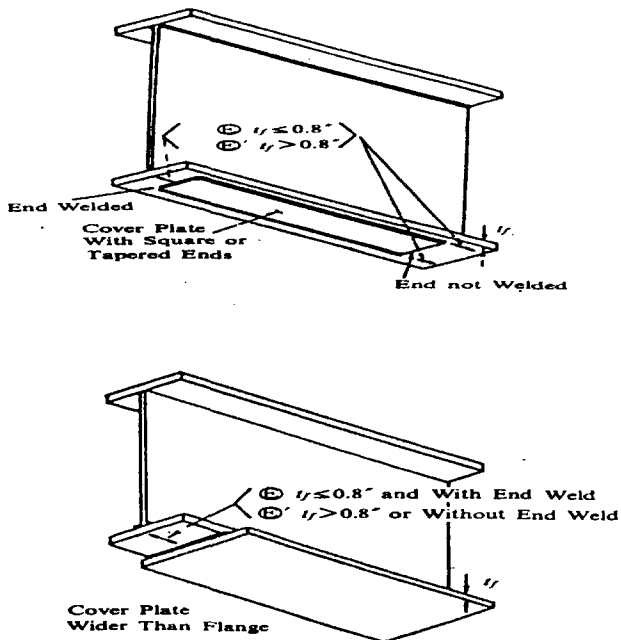




그림 85. 1 피로 범주 E와 E'의 형태(AASHT)

표 2.2 일반철도 및 고속철도 시방서의 덮개판 용접부
기본피로허용응력범위

이음의 종류	이음의 구분	기본피로 허용응력범위 (kg/cm ²)	비고
겹이음에 큰 부등치수의 전면필렛 용접을 하고 다듬질한 경우의 모재	C	1,050	9  다듬질
겹이음에 필렛용접을 하고 다듬질하지 않은 경우의 모재	D	800	12  다듬질하지 않음

3.2 시험편

일축인장피로시험을 하기 위하여 소형시험편을 제작하였다. 시험편은 덮개판형에 대하여 각각 용접조건 및 부착물의 크기에 따라 3가지씩의 변수를 두어 각 경우별 6개씩의 시험편을 제작하여 총 18개의 시험편을 제작하였다.

표 3.3 덮개판형 인장시험편의 제작현황

기호	부착물 크기	용접조건	제작수	계
CP1	l = 150mm (변단면 처리)	용접장 6mm 은둘레 용접	6	18
CP2	l = 150mm	용접장 6mm 은둘레 용접	6	
CP3	l = 150mm	용접장 6mm 길이방향 용접	6	

제 3 장 실 험

3.1 재료

이 연구의 피로 시험편에 사용된 강재는 강교량 제작에 많이 사용되는 용접구조용 강재인 SWS 490 B 로써 CO₂ 반자동 용접법을 이용하여 제작하였다. 시험편에 사용된 강종 및 용접봉의 화학성분 및 물리적 성질은 각각 표 3.1 및 표 3.2와 같다.

표 3.1 강재의 화학성분 및 물리적 성질

강재의 종류	화학 성분					물리적 성질			
	C	Si	Mn	P	S	항복 강도 MPa	인장 강도 MPa	탄성 계수 MPa	신장 률 %
SWS 490 B	0.16	0.38	1.23	0.012	0.009	368.3	539.2	205274.5	23

표 3.2 용접봉의 화학성분 및 물리적 성질

용접봉 종류	화학성분					물리적 성질		
	C	Si	Mn	P	S	항복 강도 MPa	인장강 도 MPa	신장률 %
용접 구조용	0.08	0.48	1.23	0.013	0.011	460.0	530.0	32

이들 각 시험편의 제작조건에 따른 제작수와 각 조건 별로 부여된 기호는 표 3.1과 같고, 시험편의 형상과 치수는 그림 3.1과 같다.

3.3 시험장치

이 연구에 사용한 기계는 Shimadzu사 EUF-UB25 -70으로 전기유압 servo식 피로시험기이다. 이 실험에서는 토목구조물에 가장 일반적인 load 제어를 행하였다. 또한 25ton 로드셀(Load cell)을 사용하였고, Strain Gauge를 부착한 후 Data Logger(TDS-601A)에 연결하였다.

3.4 시험방법

피로시험편은 덮개판의 용접조건 및 형상에 따라 3가지로 분류하고, 25ton 용량의 피로시험기를 이용하여 인장 피로 실험을 실시하였다. 시험 파형은 Sine파를 사용하였고, 하중재하 속도는 각 시험편에 대하여 20Hz, 응력비는 0.1로 일정하게 하였다.

이 연구에서 피로실험은 시험편이 파단될 때까지 계속 수행하였으며, 해당되는 반복하중이 한계피로수명에 도달하여도 파단되지 않을 경우에는 피로실험을 중지하였다. 여기에서, 피로한계응력범위 및 한계 피로수명은 시험편의 제작조건에 해당되는 국내 도로 교시방서의 피로설계기준을 준용하였다.[5]

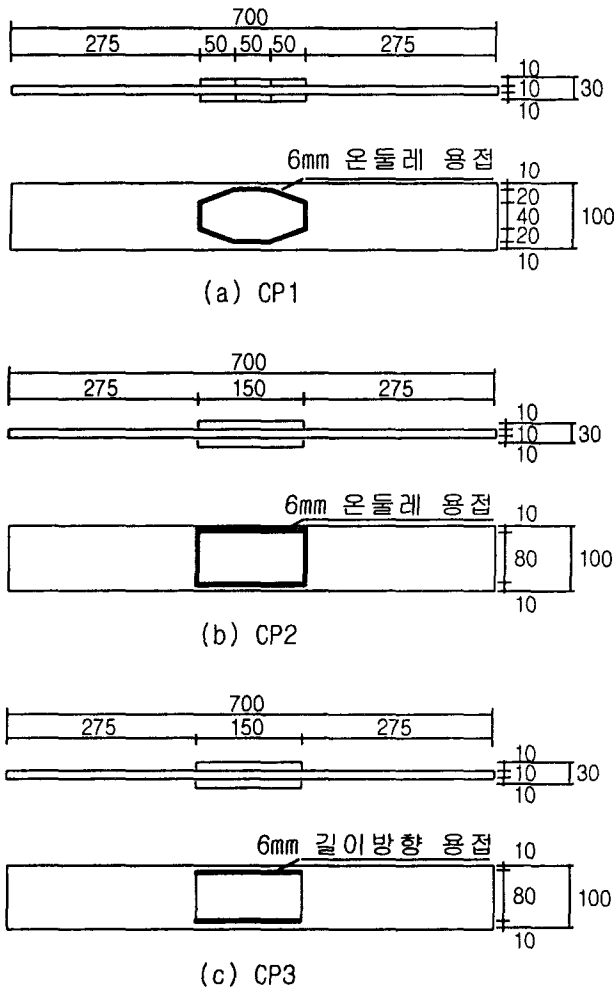


그림 3.1 덮개판 인장시험편의 형상

AASHTO 시방서에 따르면 200만회 이상에 해당하는 일정진폭 피로한계 응력범위의 크기와 반복하중과의 관계는 다음 (3.1)식과 같다.

$$(\Delta\sigma)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{\frac{1}{3}}$$

따라서, 각 상세범주에 대한 한계수명을 계산하면 다음 표 3.4와 같다.

표 3.4 일정진폭 피로한계응력 범위와 피로한계수명

상세범주	상수 $A \times 10^{11} (\text{MPa})^3$	한계값 (MPa)	계산된 한계수명 (만회)
C	14.4	69.0	450
D	7.21	48.3	600
E	3.61	31.0	1,000
E'	1.28	17.9	2,000

대상 시험편은 모재에 덮개판이 접착되어 피로수명에 영향을 미치는 기하학적 구조를 갖는 것으로, 돌림 용접 지단부의 발생응력이 평면부의 응력과는 다를 것으로 예상되어 용접지단부와 평면부의 평균응력부의 용접 영향에 따른 응력의 분포를 보기 위

해 변형률 게이지를 부착하여 하중 단계별 정적 하중-변형률 값을 측정하였다.

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 공칭응력에 의한 피로강도

실험에 적용된 하중은 3.5~14 ton이며, 시험편의 전체 단면적은 1,000mm²으로 시험결과는 표 4.1에 나타나 있다.

피로실험결과를 그림 4.1~4.3에 AASHTO 및 JSSC에서 제안한 허용피로설계기준과 비교하여 나타내었고, 실험값들은 회귀분석하여 결과값을 직선으로 나타내었다. 표 4.2는 회귀분석한 S-N선도를 이용하여 200만회 기준의 피로강도를 나타낸 것이다.

이 실험결과에서는 덮개판을 변단면 처리한 경우(CP1)의 강도가 가장 낮았으며, 직4각형 덮개판에서 4변을 모두 용접한 경우(CP2)의 강도가 가장 높았다. 직4각형 덮개판의 측면만을 용접한 경우(CP3)의 강도는 위 두 경우의 중간정도로 나타났다.

이들 실험결과들은 대부분 피로한계 근처에서는 충분한 여유를 갖고 있으나 고응력 범주로 갈수록 피로수명이 짧아지는 경향을 보였다. 그러나, 덮개판 용접 구조상세에 대하여 AASHTO 기준을 준용한 현행 도로교시방서의 피로설계기준을 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

표 4.1 덮개판 인장 시험체에 대한 피로시험 결과

시험편	응력범위 (MPa)	P _{max} (ton)	시험결과 (N _F)	비고	
CP1	1	30.97	3.5	10,000,000	미파단
	2	44.10	5.0	10,000,000	미파단
	3	57.33	6.5	5,623,440	
	4	66.15	7.5	2,370,780	
	5	74.97	8.5	2,131,060	
	6	88.20	10.0	695,340	
CP2	1	30.97	3.5	10,000,000	미파단
	2	44.10	5.0	10,000,000	미파단
	3	61.74	7.0	10,000,000	미파단
	4	88.20	10.0	1,398,000	
	5	123.87	14.0	558,920	
	6	123.87	14.0	529,500	
CP3	1	30.97	3.5	10,000,000	미파단
	2	30.97	3.5	10,000,000	미파단
	3	44.10	5.0	10,000,000	미파단
	4	57.33	6.5	10,000,000	미파단
	5	66.15	7.5	4,997,450	
	6	88.20	10.0	1,047,070	

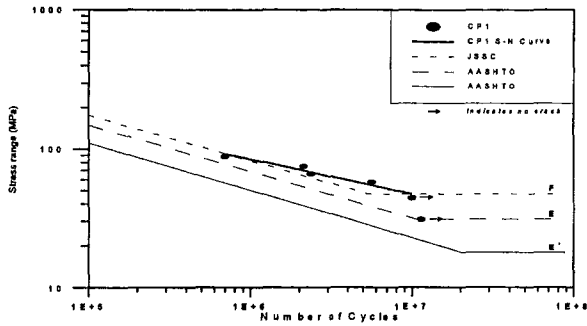


그림 4.1 CP1 시험편의 S-N선도

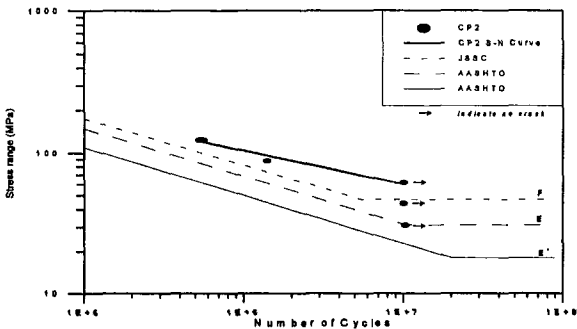


그림 4.2 CP2 시험편의 S-N선도

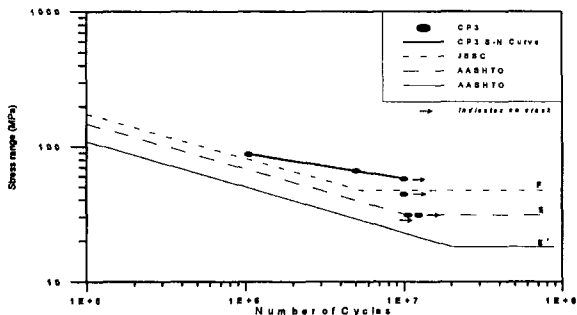


그림 4.3 CP3 시험편의 S-N선도

피로실험결과를 그림 4.1~4.3에 AASHTO 및 JSSC에서 제안한 허용피로설계기준과 비교하여 나타내었고, 실험값들은 회귀분석하여 결과값을 직선으로 나타내었다. 표 4.2는 회귀분석한 S-N선도를 이용하여 200만회 기준의 피로강도를 나타낸 것이다.

이 실험결과에서는 덮개판을 변단면 처리한 경우(CP1)의 강도가 가장 낮았으며, 직4각형 덮개판에서

4변을 모두 용접한 경우(CP2)의 강도가 가장 높았다. 직4각형 덮개판의 측면만을 용접한 경우(CP3)의 강도는 위 두 경우의 중간정도로 나타났다.

이들 실험결과들은 대부분 피로한계 근처에서는 충분한 여유를 갖고 있으나 고응력 범주로 갈수록 피로수명이 짧아지는 경향을 보였다. 그러나, 덮개판 용접구조상세에 대하여 AASHTO 기준을 준용한 현행 도로교시방서의 피로설계기준을 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있었다

표 4.2 덮개판형의 제작조건별 피로강도의 차이

기호	피로강도 (MPa)	피로강도 비	외국 자료의	
			AASHTO (MPa)	JSSC (MPa)
CP1	75.34	1.00	E (55)	F (65)
CP2	105.84	1.40		
CP3	81.86	1.09		

[주] 1) 회귀분석을 통하여 추정된 200만회 기준 피로강도

2) CP1에 대한 피로강도의 비

3) ()은 200만회 기준 허용피로응력 범위

4.2 정적응력 측정결과

대상 시험편은 모재에 덮개판이 접착되어 피로수명에 영향을 미치는 기하학적 구조를 갖는 것으로, 돌림용접 지단부의 발생응력이 평면부의 응력과는 다를 것으로 예상되어 용접지단부와 평균응력부의 용접 영향에 따른 응력의 분포를 보기 위해 변형률 게이지를 부착하여 하중 단계별 정적 하중-변형률 값을 측정하였다.

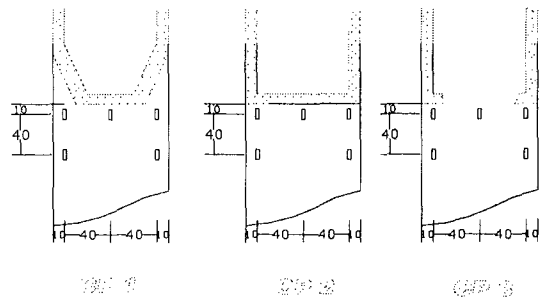


그림 4.4 변형률 게이지의 부착위치

그림 4.5에서 CP1은 모재의 중앙부에서 응력이 보다 크게 나타났으며 CP2와 CP3보다 더 큰 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 피로 실험 결과 역시 CP1 시험편이 가장 취약한 것으로 나타나고 있다.

또한 CP1의 경우 응력분포에서 좌우 비대칭 현상이 CP2와 CP3에 비해서 심하게 나타나는데, 이것은 변단면 처리된 CP1 시험편의 특성상 덮개판 부재의 정렬이 좋지 못하여 힘의 편심으로 인한 휨 응력이 추가로 작용하였기 때문인 것으로 판단되며 이로 인하여 피로강도에 불리한 영향을 미친 것으로 생각된다.

그림 4.6에서 CP2의 경우, 용접선단부의 중앙에서 응력집중현상이 발생하고 있으나 CP1 및 CP3와 비교했을 때 응력이 집중되는 정도가 가장 적은 것으로 나타나고 있다. 용접선단부의 중앙을 제외한 덮개판의 모서리부와 평균응력부에서는 비슷한 수준의 응력분포를 보이고 있다.

그림 4.7에서 CP3는 덮개판 모서리의 끝돌림 용접한 부분에서 응력이 가장 높은 것으로 나타났으나 덮개판과 모재가 용접되지 않은 중앙부에서는 평균 응력부의 응력 수준으로 나타났다. 그러므로 CP3와 같은 덮개판이 길이 방향으로만 용접되어질 때에는 모서리의 끝돌림 용접처리시 열영향에 의한 재료의 변화와 더불어 형상의 불연속성에 대하여 고려되어야 할 것으로 판단된다.

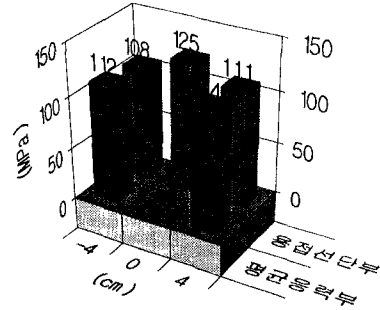


그림 4.6 CP2의 정적응력 측정결과(P=10ton)

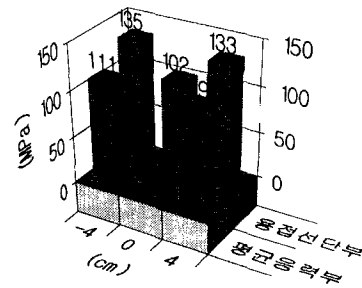


그림 4.7 CP3의 정적응력 측정결과(P=10ton)

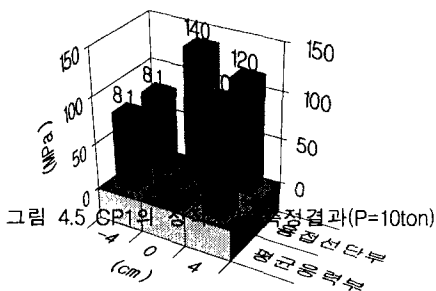


그림 4.5 CP1의 정적응력 측정결과(P=10ton)

4.3 구조해석

피로시험편에 대해서 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 유한요소 해석을 하였다. Solid Element를 사용하였으며 전체 시험편의 형상에 따라 Mesh를 조정하여 해석하였다.

하중은 10ton이 재하된 상태이며, 재하하중이 작아 현재 응력집중부에 발생된 응력도 모두 탄성한계로 나타나고 있다. 실제로는 외력에 대해 항복응력을 초과하는 응력 집중부에서는 비탄성으로 탄소성 또는 소성부분이 발생할 것이지만 현재의 해석은 탄성해석으로 하중의 대소에 관계없이 모두 비례하여 나타날 것이므로 모든 시험편에 대해 10ton을 재하하였다.

구조해석 결과에 따르면 덮개판 접착부 시험편의 응력집중부는 끝돌림용접부 근방에 나타나는 것을 그림 4.8~4.10에서 확인할 수 있다. 실제로 피로 파단된 파단면은 끝돌림 용접과 모재가 만나는 곳임을 고려할 때, 이 근방에서 요소를 세분화하면 연구대상

조상세의 응력집중을 보다 정확히 예측이 가능할 것
이지만, 이는 어디까지나 이상적인 시험편 형상에 국
한된 결과에 지나지 않을 것이므로, 여기서는 응력
발생의 개략적인 현황을 알고자 한 것이다.

그림 4.8~4.10에서 각 시험편에 대해 응력집중의
분포를 검토하면 은둘레 용접된 CP1과 CP2의 경우,
덮개판의 길이 방향보다는 횡방향 용접지단부에 큰
응력이 발생되는 모습을 확인할 수 있었으며, 길이방
향으로 용접된 CP3는 좌우 끝돌림 용접된 선단부근
과 용접면내에서 국부적으로 CP1과 CP2보다는 훨씬
큰 응력집중이 나타났다.

CP2에서는 응력집중의 정도가 평판부와 비교했을
때 그리 크지 않으며 실제 피로실험결과 용접지단부
가 아닌 평판부에서도 파단이 발생하였다. CP3의 경
우는 모든 시험편에서 파단시 모재에서 시작된 균열
이 끝돌림 용접면을 관통하는 것으로 나타나 이 부분
의 응력이 상대적으로 크을 알 수 있었다.

대상 시험편의 응력방향으로의 변위를 1차부재인
평판판의 계산값과 유한요소해석을 통하여 얻어진 각
시험편의 계산값을 비교하면 10ton이 재하될 때 평판
만의 계산값이 0.167mm이며 시험편 CP1, CP2, CP3의
계산값은 각각 0.136mm, 0.130mm, 0.144mm로 계산되었
다.

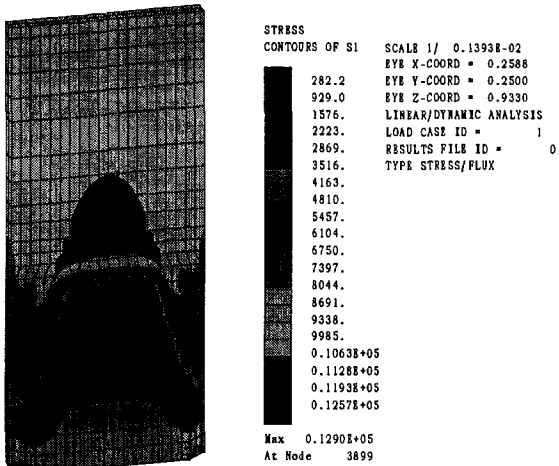


그림 4.8 CP1 시험편의 응력분포

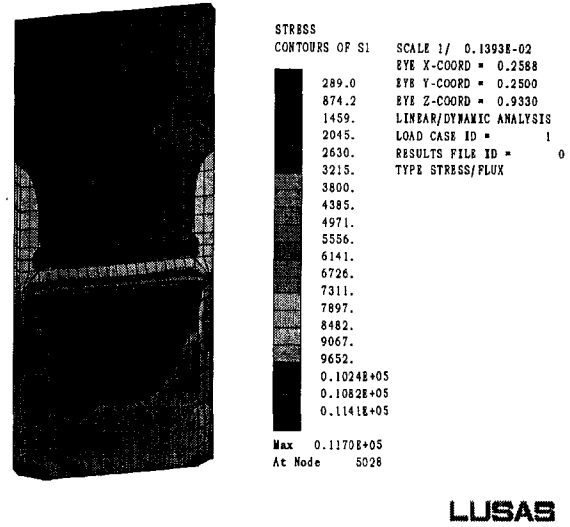
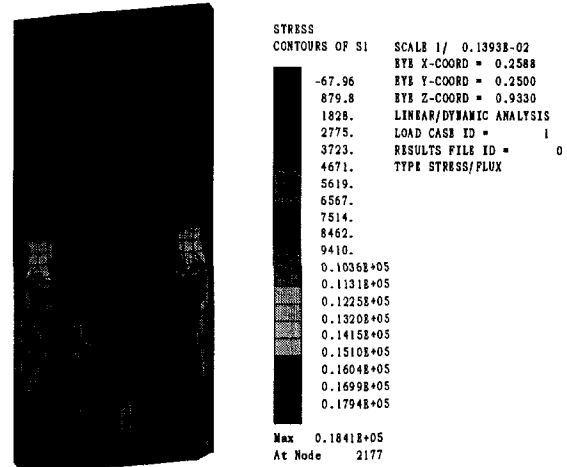


그림 4.9 CP2 시험편의 응력분포



4.4. 실험결과 분석

그림 4.10 CP3 시험편의 응력분포

측정응력을 기준으로 볼 때 CP1시험편은 공칭응력
에 비해 1.4배, CP2 시험편은 1.27배, CP3 시험편은
1.35배의 응력집중이 있는 것으로 나타났으며, 구조해
석 결과에서도 CP1 시험편에 대해서는 1.33배, CP2
시험편에 대해서는 1.19배의 응력집중이 되고 있으며,
CP3 시험편의 경우에는 끝돌림 용접면내에서 1.84배,
모재에서는 아주 미소한 부분에서 1.79배의 응력집중
이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

덮개판 용접부의 경우, 모든 경우에서 AASHTO의 E등급, JSSC의 F등급 등 외국의 설계기준을 다소 상회하는 강도를 나타내었다. 따라서 시방서 기준을 그대로 사용하여도 무리가 없음을 알 수 있었다. 그리고, 세 경우의 덮개판 형상 및 용접 구분별로 비교해보면 직4각형 온돌레용접의 경우가 강도가 가장 높고, 변단면 처리된 6변용접의 경우가 강도가 가장 낮았다.

일반적으로 용접연결을 행한 구조상세에 있어서는 일찍 냉각되는 부위에 압축, 늦게 냉각되는 부위에는 인장이 발생하여 잔류응력으로 남게 된다. 물론 이러한 경향은 기하학적으로 복잡한 위치에서는 명확히 분석해 내기가 곤란하지만, 최근 복부판과 플랜지 사이에서는 목두께가 커서 용접지단이 매끄럽지 못하고 각을 갖을 경우도 원형으로 매끄럽게 연결되는 용접비드와 거의 동등한 효과를 갖는다고 보고하고 있다. 그러나 덮개판 집착부 시험편은 웨브와 플랜지가 연결되는 형식과는 달리 덮개판이 플랜지에 부착된 형상으로 끝돌림 용접부의 열영향에 의한 재질의 변화와 더불어 기하학적 형상이 지배적일 수 있음이 증명되었다.

실제 실험결과에 따르면 모든 시험편이 용접 지단 부에서 파단 되고 있는 점, 열영향부가 큰 시험편에서 빨리 피로파괴된 시험편이 있음을 고려할 때, 용접열에 따른 재질 변화의 영향과 더불어 기하학적인 영향 모두가 지배받고 있는 것으로 판단된다.

제 5 장 결 론

이 연구는 강교량의 대표적인 형식인 덮개판으로 보강된 강관형에 대한 피로강도평가 및 국내실정을 반영한 피로설계기준을 위한 기초적 자료를 제공할 목적으로 일련의 피로시험과 해석을 수행하였다. 다음은 이연구로부터 얻은 결론이다.

응력-변형률의 관계에 의한 측정응력과 구조해석의 계산응력을 분석한 결과 실험 변수에 따른 덮개판 용접부의 인장강성 효과는 덮개판 구조상세의 경우 덮개판 돌림용접부의 용접지단이 취약부로 나타나며, 불균등 응력분포에 의한 응력집중이 피로수명에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

덮개판 형상 및 용접 구분별로 피로강도를 비교해보면 직4각형 덮개판의 측면 및 전면등 4변 모두를 돌려 용접한 경우의 강도가 가장 높고 선단부 폭 일부를 점차 줄여 6각형 덮개판으로 하고 6변 모두를 돌려 용접한 경우의 강도가 가장 낮았다. 직4각형 덮

개판의 측면만 용접한 경우는 중간 정도로 나타났다. 따라서 덮개판 설계시 형상과 용접조건 및 두께에도 변화를 주는 등 충분한 검토가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

실제의 구조상세를 모델링한 덮개판형 시험편의 실험결과가 외국의 시방기준에 잘 적용됨을 알 수 있었다. 특히 국내 도로교 시방규정과 AASHTO의 규정 및 JSSC의 규정보다 다소 피로강도가 높은 것으로 판명되었다. 그러므로 국내의 용접구조물의 안전성이 AASHTO를 비롯하여 외국의 거의 모든 기준을 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

향후 과제로는 이 실험연구 결과와 기존의 연구가 큰 차이를 보이는 시험편을 대상으로 재검토해야 하

며 변동응력 상태하의 피로실험도 기존의 피로 실험자료와 비교하기 위해 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. 장동일, 정영화 “강교량의 취성 및 피로파괴의 사례와 이에 대한 고려”, 대한토목학회, 제 26권, 제 2호. 1978. 6.
2. J. W. Fisher "Fatigue and Fracture in Steel Bridges", New York, A Wiley Interscience Publication. 1984
3. "도로교 표준 시방서", 건설부, 1992.
4. "AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges," American Association of State Highway Transportation Officials, 1992.
5. "고속철도강교량 및 합성형 교량 설계표준시방서 해설(안)", 한국고속철도 건설공단. 고속전철 사업기획단, 1992.
6. "國鐵建造物設計標準解説", 日本 土木學會.
7. 小西一郎 編, 경갑수 譯, "鋼橋", 건설도서, 기초편 I, pp.178~179.
8. "강철도교설계표준시방서", 철도청, 철도청 훈령 제4917호, 1980.
9. "國鐵建造物設計標準解説", 日本 土木學會.