

강교량의 표준적 구조상세에 대한 실험적 연구

An Experimental Study of the Fatigue Specimen for the Typical Structural Details of the Steel Bridge

정영화¹⁾ · 조재병²⁾ · 배두병³⁾ · 정경섭⁴⁾ · 우상익⁵⁾

Chung, Yeong Wha Jo, Jae Byung Bae, Doo Byong Jung, Kyoung Sup Woo, Sang Ik

요약 : 이 연구에서는 국내 피로설계규정상 용력범주 C, D, E 및 E'에 해당하는 표준적인 구조인 십자 연결형, 면외거셋 부착형, 면내거셋 부착형 및 덮개판형을 모형화한 소형 시험편에 대한 피로실험을 실시하여, 실험결과에 따라 각 시험편에 해당하는 국내 피로설계규정을 검증하며, 실험결과와 외국의 공개 데이터와의 비교·검토를 통해 국내 제작 강구조상세의 평가기준을 검토하였다. 실험 결과, AASHTO 및 JSSC, Eurocode의 관련 규정 값을 대부분 만족하는 것으로 확인되었다. 그러나, 십자연결형 접착부에 있어 모재가 파단된 하중전달형의 경우는 하중비전달형 보다 피로강도가 작으며, AASHTO 설계기준을 만족시키지 못하므로 설계기준에 대한 재검토가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 요점부 길이의 영향은 면외거셋에서 부착부 길이 80mm 시험편보다 150mm 시험편의 피로강도가 낮게 나타나 용접구조부 길이의 영향이 있음을 확인하였다. 실험결과들을 종합해보면, AASHTO 규정에 입각한 국내 시방서상의 피로규정을 대부분 만족하고 있으나, 보다 세분된 범주로 규정하고 있는 JSSC 및 Eurocode의 설계기준이 본 연구의 실험결과와 비교할 때 보다 합리적인 것으로 생각된다.

ABSTRACT : This paper presents the results of the experimental and analytical investigation for the fatigue strength of welded details frequently used in steel bridges, especially for the details with relatively lower fatigue strength. The welded details included four kinds of welded details corresponding to the categories C, D, E and E', which represent the flange attachment details, web attachment details, transverse stiffeners and cover-plate details. Tensile fatigue tests were performed. The test results were compared with other available test results and the fatigue criteria of AASHTO, JSSC and Eurocode specifications. Generally, our test results were well agreed with other test results and satisfied with above-mentioned fatigue design provisions. However, it was found that transversely loaded weld-details showed lower fatigue strength than longitudinally loaded weld-details in transverse stiffener detail, and the test results of those details were not satisfied with AASHTO fatigue provisions. Examining the effect of length of gusset plate attachment details, welded details with longer attachment showed relatively lower fatigue strength, especially for the out-of-plane gusset plate details. It is recommended to perform additional fatigue tests with various loading and detail parameters and to establish the more detailed fatigue categories such as Eurocode or JSSC

- 1) 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수
- 2) 정회원, 경기대학교 건설공학부 교수
- 3) 정회원, 국민대학교 토목환경공학부 교수
- 4) 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과 교수
- 5) 한국원자력연구소 하나로운영팀 박사후연구원

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

핵심 용어 : 면내거셋, 면외거셋, 수직보강재, 덮개판형, 용접구조상세, 피로강도
KEYWORDS : In-plane gusset, Out-of-plane gusset, Transverse stiffener, Cover plate, Welding structural detail, Fatigue strength

1. 서론

최근의 강도로교 및 강철도로교는 통행 차량의 증가 및 차량의 중량화 등에 의해 피로손상이 누적되어 구조물의 열화를 촉진하고 있다. 이와 같은 피로에 의한 열화현상은 성수대교 붕괴사고나 당산철교 철거 등의 원인이 되었으며, 구조물의 기능적 상실 또는 저하에 영향을 미치고 사회 및 경제에 큰 손실을 가져오게 된다. 강교량의 공용수명에 영향을 미치는 대표적인 열화현상에는 파로, 부식 및 지연파괴 등이 있으며, 이들 중 구조부재의 기하학적 변화부에서 발생하는 면내·면외용력의 응력집중에 따른 피로손상이 지배적이다.

또한, 구조적 특성에 의해 발생하는 피로손상 이외에 강구조부재의 용접연결부에서의 블로우홀, 용입불량, 슬래그 혼입 등의 용접결함이나 내재균열 등과 같은 구조부재의 내적결함 등이 있다. 그러므로, 이론적으로 구조물의 공용중 균열발생을 완전하게 제어하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 이유에 의해 외국에서는 구조용강재의 피로특성에 대한 이론뿐만 아니라 실험적 연구가 활발하게 진행되어 수많은 피로시험을 실시한 결과 AASHTO¹⁾, ECCS²⁾, JSSC³⁾ 등에서는 강구조부재의 연결구조상세에 대한 독자적인 피로설계기준을 설정하여 이를 강구조물의 설계에 최대한 반영하고 있다. 그러나, 년 3,500만톤 이상의 조강능력을 보유하고 있는 세계 6위의 철강생산국인 우리나라에서는 강구조물의 피로거동에 관한 연구의 필요성은 인식하고 있지만 시험기기의 부족, 장기적인 시험기간의 소요, 체계적인 연구와 환경의 미흡 등 여러 제약조건으로 인하여 체계적이고 구체적인 연구는 아직까지 미미한 실정이다. 현재 우리나라 도로교시방서에서 채택하고 있는 강교량의 허용피

로응력범위에 관한 규정은 한국적 상황을 고려하지 못한 채 미국의 NCHRP에서 수행한 피로실험결과⁴⁾를 기초로 한 AASHTO의 피로설계기준을 그대로 사용하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 강구조물 피로설계 지침의 기초적 자료를 구축하기 위한 기본적 연구로서, 국내 생산 구조용 강재를 대상으로, 최근 보편적으로 강교량 제작에 사용되고 있는 용접기술을 적용하여 강교량 용접구조 상세 중 대표적인 면내거셋(플랜지 거셋), 면외거셋(웹 거셋), 십자연결형(수직 보강재) 및 덮개판 접착부를 시험편으로 각각 제작하여 소형 인장피로실험을 실시함으로써 각 구조세목별 피로강도를 확인하고자 한다. 또한, 소형피로실험의 피로실험결과를 S-N 선도에 나타내어 국내외의 피로설계기준과 비교·검토하여 각 구조세목에 대한 국내 피로설계기준을 검증하고, 소형 피로시험편에 대한 실험결과를 상호 비교함으로써 각 구조상세에 대한 피로강도를 규명하고자 한다.

2. 피로실험

2.1 시험편의 제작

이 연구에서는 강교량에 사용되는 용접구조상세 중 주로 많이 사용되는 4가지 용접구조상세를 선정하였다. 외국의 관련문헌에 따르면 강재의 종류에 따라라도 피로강도의 차이가 있는 것으로 보고되고 있으나, 이 연구에서는 현재 국내에서 강교량 제작시 가장 많이 사용되는 SM490B를 사용하였으며, 용접은 CO₂ 반자동 용접법을 이용하여 제작하였다.

면내거셋, 면외거셋, 십자연결형, 덮개판 접착

부의 용접구조에 대하여 각각 용접조건 및 부착물의 크기에 따라 3가지씩의 변수를 두어 각 경우 별 6개씩의 시험편을 제작함으로써 총 72개의 시험편을 제작하였다. 각 시험편의 제작조건에 따른 제작 수와 각 시험편의 형상은 그림 1~4와 같

다. 또한, 면내거셋 이음을 제외한 나머지 시험편은 모두 필렛용접으로 용접의 품질차이를 완전한 용입과 부분적 용입으로 구분하였으며, 면내거셋은 개선 여부에 따라 완전용입과 불완전용입으로 구분하였다.

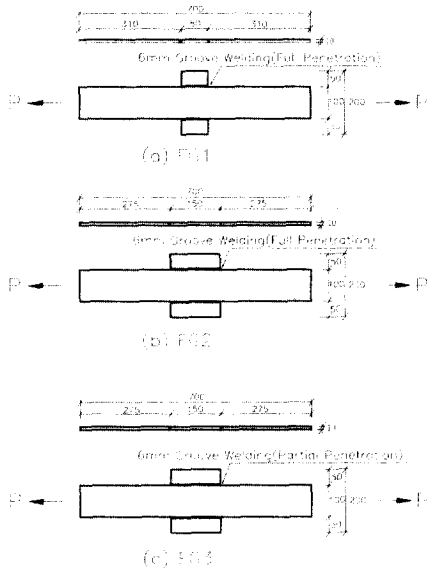


그림 1. 면내거셋의 형상(단위: mm)

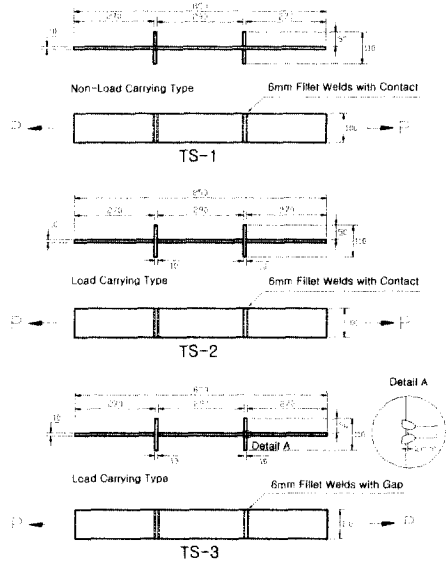


그림 3. 십자연결형 접합부의 형상(단위: mm)

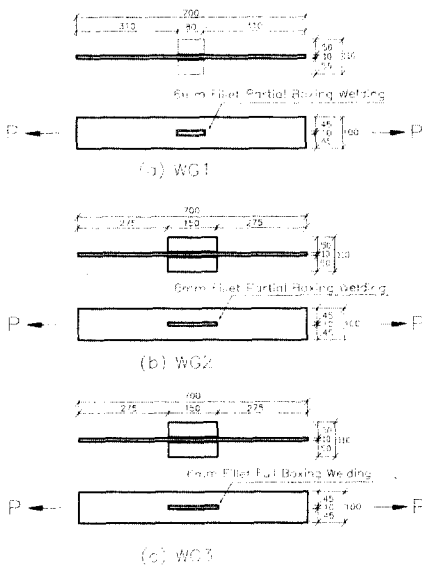


그림 2. 면외거셋의 형상(단위: mm)

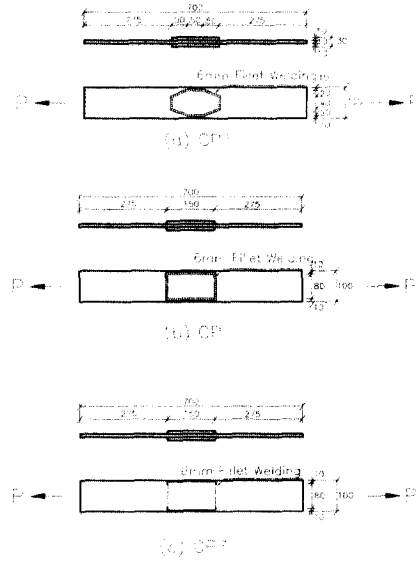


그림 4. 덮개판형 접합부의 형상(단위: mm)

면내거셋과 면외거셋 접착부는 부착물의 길이에 따른 효과를 조사하기 위하여 동일한 용접조건에 대하여 부착물의 길이만 변화시켜 $l=80, 150\text{mm}$ 의 두 가지로 제작하였고, 용접상태에 따른 피로강도의 저감정도를 조사하기 위하여 동일한 부착물의 크기($l=150\text{mm}$)에 대하여 완전용입과 부분용입된 시험편을 각각 제작하였다. 십자연결형 접착부에 대해서는 하중비전달형에 비하여 하중전달형의 피로강도 저감정도를 조사하기 위하여 모재로부터 부착물의 돌출높이를 일정($h=50\text{mm}$)하게 한 상태에서 동일용접조건(부분용입)에 대하여 하중비전달형(VS1)과 하중전달형으로 구분하였고, 하중전달형에서는 용접시단파괴와 루트파괴에 따른 피로강도 효과를 조사하기 위하여 모재에 부착물을 밀착시킨 시험편(VS2)과 모재와 부착물의 간격을 2mm 이격시킨 시험편(VS3)을 각각 제작하였다.

덮개판 접착부에 대해서는 덮개판의 길이는 일정($l=150\text{mm}$)하게 하고 덮개판 끝부분을 변단면 처리하여 둘레 전체를 용접한 것, 덮개판의 폭을 일정하게 하고, 둘레 전체를 용접한 것(온둘레용접)과 길이방향만 용접한 것(길이방향용접)을 각각 제작하여 덮개판 끝부분의 단면변화상태와 온둘레용접 및 길이방향용접에 따른 피로강도 차이를 검토하였다.

2.2 실험방법

피로실험은 전기유압식 피로시험기를 이용하여 일정진폭의 반복하중과 응력비 0.1을 적용하였다.

다만, 십자연결형 접착부 소형시험편에서는 반복하중의 응력비에 따른 피로강도 효과를 고찰하기 위하여, 응력비를 0.1과 0.2의 두가지 조건에 대하여 각각 실험하되, 동일한 시험편 갯수로 두배의 실험효과를 얻도록 1개의 시험편에 2개의 부착물을 용접부착하여, 그 중 하나의 부착물이 파단되면 다시 나머지 하나의 부착물에 대하여 계속적으로 피로실험을 실시하였다. 각 용접구조상세는 용접조건과 부

착물의 크기에 따라 3종류로 분류된다. 응력범위는 각 구조상세별 도로교시방서 피로설계기준에 규정된 다재하경로구조에 대한 200만회 이상의 허용피로응력범위의 1, 2, 3배를 기준으로 적용하였다.

피로실험은 시험편이 파단될 때까지 계속 수행하였으며, 해당되는 반복하중이 시방서상의 각 범주별 한계피로수명에 도달하여도 파단되지 않을 경우에는 피로실험을 중지하였다. 여기에서, 피로한계응력범위 및 한계피로수명은 각 시험편의 제작조건에 해당되는 국내 도로교시방서의 200만회 이상에 대한 피로설계기준⁴⁾을 이용하였다. AASHTO¹⁾에 따르면 200만회 이상에 해당하는 일정진폭 피로한계 응력범위의 크기와 반복하중은 $(\Delta\sigma)_n = AN^{-m}$ 의 관계에 있다. 따라서, 기울기를 3으로 결정하고 각 범주별 상수 A(MPa³)를 고려하면, 각 상세범주별 한계수명은 C범주인 경우 450만회, D범주인 경우 600만회, E범주인 경우 1000만회, E'범주인 경우 2000만회로 계산된다.

2.3 실험결과

각 시험편에 대한 실험결과를 표 1과 표 2에 나타내었고, 그림 5~9에서 본 실험결과를 외국의 피로설계기준과 비교·분석하기 위하여 S-N 선도로 나타내었다. 십자연결형 접착부 시험편은 먼저 파단된 쪽의 상세를 절단한 다음 파단되지 않은 상세에 대해서는 동일한 조건하에서 계속 실험을 수행하였다. 상세를 구분하기 위하여 먼저 파단된쪽을 "a" 그리고 나중에 파단된 쪽을 "b"로 하였다.

표 2에 나타난 VS2-2a의 경우는 시험편 VS3와 같이 용접금속이 파단되었으므로 VS3로 분류하여 취급하였다.

3. 분석 및 고찰

피로실험 결과를 외국의 공개된 실험자료와 비

표 1. 덮개판형과 면내거셋 접착 시험편의 피로실험결과

덮개판 접착부					면내거셋 접착부						
시험편	응력범위 (MPa)	P _{max} (ton)	실험결과 (N _F)	비고	시험편	응력범위 (MPa)	P _{max} (ton)	실험결과 (N _F)	비고		
CP1	1	30.97	3.5	11,342,700	미파단	FG1	1	48.26	5.41	9,550,000	미파단
	2	44.10	5.0	10,000,000	미파단		2	48.26	5.41	6,370,000	미파단
	3	57.33	6.5	5,623,440			3	95.65	11.70	600,000	
	4	66.15	7.5	2,370,780			4	95.52	10.82	610,000	
	5	74.97	8.5	2,131,060			5	144.78	17.73	120,000	
	6	88.20	10.0	695,340			6	144.78	16.24	230,000	
CP2	1	30.97	3.5	10,262,000	미파단	FG2	1	33.01	3.70	13,440,000	미파단
	2	44.10	5.0	10,000,000	미파단		2	33.01	3.70	23,520,000	
	3	61.74	7.0	10,000,000	미파단		3	66.02	7.40	1,700,000	
	4	88.20	10.0	1,398,000			4	66.02	7.40	1,740,000	
	5	123.87	14.0	558,920			5	99.03	11.10	390,000	
	6	123.87	14.0	529,500			6	99.03	11.10	720,000	
CP3	1	30.97	3.5	10,561,500	미파단	FG3	1	33.01	3.70	18,630,000	미파단
	2	30.97	3.5	12,336,300	미파단		2	33.01	3.70	15,990,000	미파단
	3	44.10	5.0	10,000,000	미파단		3	66.02	7.40	1,440,000	
	4	57.33	6.5	10,000,000	미파단		4	66.02	7.40	1,000,000	
	5	66.15	7.5	4,997,450			5	99.03	11.10	560,000	
	6	88.20	10.0	1,047,070			6	99.03	11.10	790,000	

표 2. 면외거셋과 십자연결형 접착 시험편의 피로실험 결과

면외거셋 접착부					십자연결형 접착부							
시험편	응력범위 (MPa)	P _{max} (ton)	실험결과 (N _F)	비고	시험편	응력범위 (MPa)		피로수명 (N _F)		비고		
						a	b	a	b			
WG1	1	69.0	7.816	4,500,000	미파단	VS1	1	140.7	140.7	540,000	857,120	
	2	69.0	7.816	3,644,510			2	70.3	70.3	4,500,000	4,500,000	미파단
	3	138.0	15.631	379,890			3	211.0	211.0	155,870	192,610	
	4	138.0	15.631	395,980			4	70.3	70.3	5,234,000	5,234,000	미파단
	5	207.0	23.446	104,590			5	140.7	140.7	592,270	890,420	
	6	207.0	23.446	107,100			6	211.0	211.0	174,590	177,340	
WG2	1	48.3	5.471	6,000,000	미파단	VS2	1	49.2	49.2	7,000,000	7,000,000	미파단
	2	48.3	5.471	6,000,000	미파단		2	-	98.5	-	894,640	
	3	96.6	10.942	736,580			3	147.7	147.7	201,190	409,450	
	4	96.6	10.942	692,300			4	49.2	49.2	6,011,250	6,011,250	미파단
	5	144.9	16.413	283,500			5	98.5	98.5	982,000	982,000	실험중단
	6	144.9	16.413	345,970			6	147.7	147.7	148,920	175,340	부재정렬불량
WG3	1	69.0	7.816	1,456,220		VS3	1	39.5	39.5	6,000,000	6,000,000	미파단
	2	69.0	7.816	6,000,000	미파단		2	68.0	85.8	680,500	1,249,220	
	3	96.6	10.942	927,100			3	89.6	128.7	172,590	182,130	부재정렬불량
	4	48.3	5.471	6,000,000	미파단		4	39.5	39.5	6,000,000	6,400,000	미파단
	5	144.9	16.413	287,090			5	85.8	85.8	931,200	1,004,260	
	6	144.9	16.413	264,210			6	109.6	128.7	151,200	293,280	
					VS2-2	85.8	-	883,240	-			

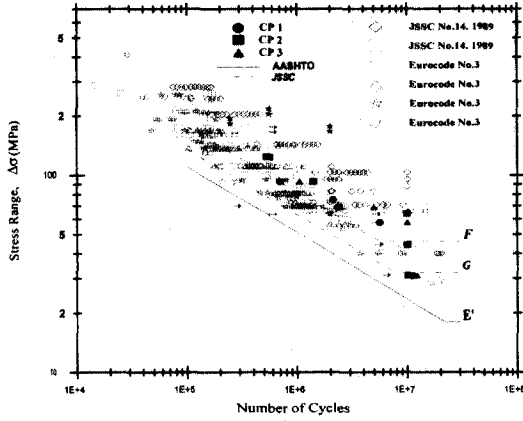


그림 5. 덮개판 접착부 시험편의 실험결과

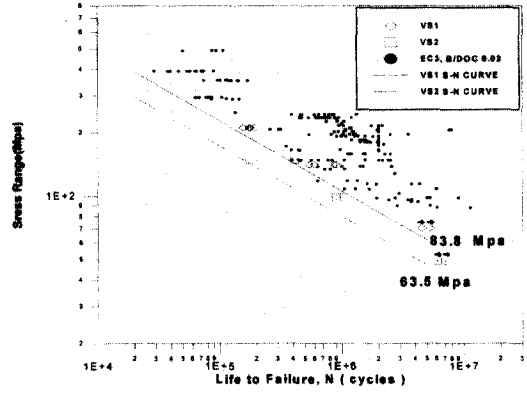


그림 8. 모재파단 시험편에 대한 S-N 선도

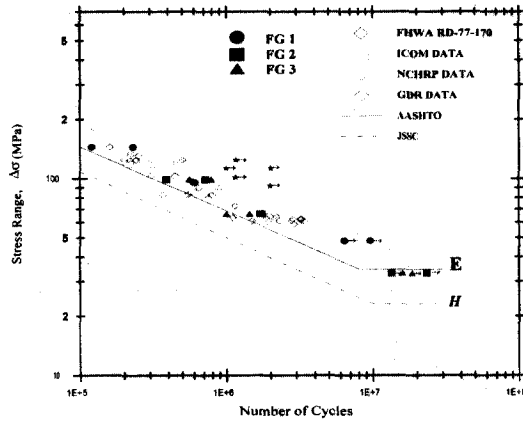


그림 6. 면내거셋 시험편의 실험결과

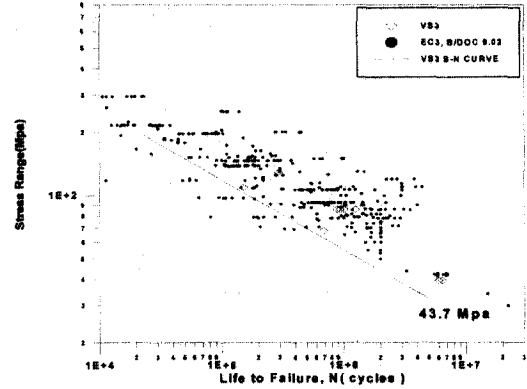


그림 9. 용접골속 파단 시험편에 대한 S-N 선도

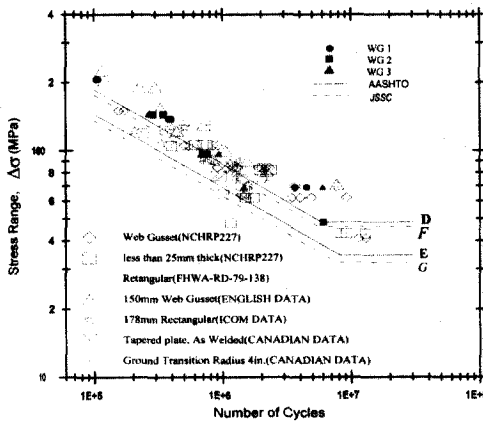


그림 7. 면외거셋 시험편에 대한 실험결과

교·분석하기 위하여 각 구조상세별로 S-N선도 상에 나타내었다. 그림 5~9의 외국 실험자료는 모두 NCHRP 보고서⁵⁾에 나타난 실험결과를 이용한 것으로 대상 시험편과 동일한 구조상세와 용접조건을 갖는 시험편에 대한 것이다.

그림 5에 나타난 덮개판 접착부 시험편은 도로 교시방서의 피로범주 E에 해당하는 구조상세로 덮개판의 두께가 2.5cm보다 작거나 같은 경우이다. 덮개판 선단의 폭을 그림 4(a)와 같이 변화시켜 제작한 시험편에 대한 피로실험 결과를 비롯하여 대부분 피로한계 근처에서는 충분한 여유를 갖고 있으나 고응력범위로 갈수록 피로수명이 짧아지는 경향을 보였다. 그러나, 이 연구에서 실험

한 모든 결과는 덮개판 접착부에 대한 도로교시방서 피로규정을 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 6에 나타난 먼내거šet 접착부 시험편에 해당하는 도로교시방서 피로규정을 살펴보면, 시험편 FG1에 해당되는 규정은 주부재의 방향으로 Groove 또는 Fillet 용접으로된 접합길이가 평판 두께의 12배 보다 작거나 5cm에서 10cm 사이인 경우이며, 시험편 FG2 및 FG3에 해당되는 범주는 다른 것들과 비교하여 가장 낮은 피로 강도를 갖는다. 일반적으로 같은 형태를 가진 용접 세목에서 피로 범주 E'는 플랜지 평판 두께가 2cm를 초과하거나 접착 평판 두께가 2.5cm 이상인 경우에 적용된다. 실험결과를 회귀분석한 결과, AASHTO 피로수명곡선의 안전축과 평균선 사이에 위치하며, 피로범주 FG2와 FG3의 경우에는 평균선과 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 전반적으로는 기울기의 절편의 실험값이 AASHTO5) 시방서보다 높게 나타났다. 또한, 초기균열은 단면이 급변하는 용접부 끝단에서 발생하여 수직응력에 시험편의 중앙단면쪽으로 진전되었으며, 초기 균열은 파괴소요 회수의 약 80%정도에서 발생되었다. 균열형상은 각 시험편 별로 비슷한 양상을 보였다.

표 3. 플랜지 거šet 시험편의 S-N선도 비교

시험편 (피로범주)	용접 길이	실험결과		AASHTO 기준	
		기울기	절편	기울기	절편
FG1(D)	80mm	3.849	13.477	3.071	10.442
FG2(E)	150mm	3.124	11.937	3.095	10.131
FG3(E)	150mm	3.102	11.879	3.095	10.131

면외거šet 접착부는 강판형교나 강박스형교의 복부에 부착되는 하중 비전달형 거šet판으로 모재와 거šet판의 용접부가 응력작용 방향과 평행한 경우이다. 이러한 경우에는 부착물의 길이와 두께에 따라 응력범주가 달라지는데, 부착물의 길이가 길어질수록 응력범주가 낮아지게 되며, 이는 부착물

이 커질수록 응력집중부의 집중응력이 커지기 때문이다.

도로교시방서 강교편에서는 용접 부착물이 종방향으로 채하되는 경우에 대해, 완전 또는 부분용입 홈용접과 필렛용접의 경우 용접길이가 5cm 이하이면 C등급, 5cm 초과 10cm 이하(다만, 판 두께의 12배 이하)이면 D등급으로 규정하고 있으며, 용접길이가 판두께의 12배를 초과하거나 10cm를 초과하면 부착물의 두께에 따라 2.5cm 미만인 경우 E등급, 2.5cm 이상인 경우 E'등급으로 규정하고 있다.

따라서, 시험편의 피로강도 등급은 80mm 거šet판 부분용입 시험편인 경우 D등급, 150mm 거šet판 부분 또는 완전용입 시험편인 경우 E등급이 된다.

그림 7에 나타난 피로실험결과를 회귀분석한 결과, 80mm 부착시험편, 150mm 부분용입 시험편, 150mm 완전용입 시험편의 기울기는 각각 3.332, 2.760, 3.318로 나타나, 80mm 부착시험편과 완전용입한 150mm 시험편의 경우는 AASHTO와 JSSC의 3보다는 완만한 경사를 갖는 것으로 나타난다고 생각한다. 이는 국내산 강재의 경우 동일한 응력범주라 하더라도 통상 설계에 반영되는 피로한계근방에서 AASHTO나 JSSC의 기준보다는 피로수명이 더 증가된 것을 의미한다. 그러나, 150mm 부분용입 시험편의 경우는 AASHTO나 JSSC의 기준 보다 약 8.7% 급경사로 나타나, 거šet판의 길이가 같은 경우라도 용접상태에 따라 피로수명이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 파단부위는 파단된 시험편 모두에서 거의 같은 양상으로 나타나고 있는데, 초기 균열 발생 위치는 거šet 양끝단 돌림용접부의 용접지단에서 발생되어 성장한 것으로 나타났다.

또한, 돌림용접부 직하면에는 용접열에 의한 열영향부가 나타나고 있어 이들의 크기를 조사한 결과, 모재 두께의 0.35~0.7배까지 열영향에 의한 흔적이 나타나고 있었으며, 결과적으로 응력집중이 발생하는 끝돌림 용접부의 결합요인이 있는 시

험편의 피로수명이 낮았음을 확인할 수 있었다. 150mm 완전용입 1번 시험편은 예상피로한도인 600만회에 훨씬 못 미치는 145만회에 파단되어 제작시 치명적인 피로결함을 가지고 있었던 것으로 판단되어 시험편의 파단면을 조사한 결과 응력 집중부 표면 근처에 용접시 발생한 기공으로부터 초기균열이 발생한 것으로 나타났다.

그림 8과 9에 실험결과를 나타낸 십자연결형 접착부는 하중이 필렛용접의 축에 직각 방향으로 작용하는 경우에 대한 것으로 휨모멘트를 받는 주형의 복부에 용접된 수직보강재와 같이 용접금속이 직접 하중을 전달하지 않는 경우와 수직보강재에 수평보강재가 필렛용접된 상부와 같이 직접 하중이 용접부를 통해 전달되는 경우로 구분된다. 도로교 시방서에서는 응력 방향에 수직으로 필렛용접한 연결부재의 경우 모재응력에 대하여 응력 범주 C로 규정하고 있으며, 연결부재의 두께가 1.25cm이상인 경우에는 용접치수와 모재의 두께를 고려한 계수를 곱하여 피로강도를 구하도록 되어있다. 이것은 Frank와 Fisher⁶⁾의 연구에 근거한 것으로 하중전달형 용접부의 용접치수가 모재의 두께에 비하여 일정한 값 이하인 경우 용접루트에서 피로균열이 시작하여 용접금속이 파단되므로 모재단면에 대한 공칭응력으로 나타낸 피로

강도의 감소를 고려한 것이다. Eurocode No. 3에서는 이 경우 용접목두께에 대한 공칭응력을 기준으로 등급 36으로 규정하고 있다. 응력범위 ($\Delta\sigma$)는 모재에서 피로균열이 발생하여 파괴된 횡보강재 시험편과 밀착 십자형 시험편의 경우 모재 단면에 대해 구한 공칭응력을 사용하였다. 용접루트로부터 균열이 진행하여 용접금속이 파괴된 간격 십자형 시험편의 경우에는 용접의 품질(특히 힘이 전달되는 유효 단면적)에 따른 차이를 제거하기 위하여 실측 평균 용접목두께에 대해서 구한 공칭응력을 각각 사용하였다. 실험이 완료된 각 시험편의 파괴형상, 용접상태 등을 조사한 결과 초기균열발생 추정 위치 및 파단면 특징은 표 4, 5와 같다. 횡보강재 시험편(VS1)과 대부분의 밀착 십자형 시험편(VS2)은 용접지단에서 모재에 균열이 발생하여 모재의 파단으로 진행되었다.

간격 십자형 시험편(VS3)과 밀착 십자형 시험편중 VS2-2a의 경우는 용접루트에서부터 피로균열이 시작되어서 용접금속이 파단되었다. 시험편 VS2-6a, VS2-6b 등의 경우에는 용접루트에서도 일부 피로균열이 발견되었으나 파단에는 이르지 못하였다. 용접루트를 지나는 파단면을 살펴보면 간격 십자형 시험편의 경우 모재가 표면에서 1~2mm 정도만 용융되어 접합된 것으로 나타났

표 4. 모재 파단 시험편의 조사결과

시험편	시험명	초기균열발생 추정 위치	용접부 상태
VS1	1	· 용접끝 3.3cm지점, 용접지단	· 용입깊이가 다른 시험편보다 깊음
	2	· 파단되지 않음.	
	3	· 용접끝 3.3cm지점, 용접지단	· 횡강재와 모재 사이 2.0mm 간격
	4	· 파단되지 않음.	
	5	· 용접끝 2.0cm지점, 용접지단	· 횡보강재와 모재 사이 2.0mm 간격
	6	· 용접끝 3.3cm지점, 용접지단	· 용접상태 양호
VS2	1	· 파단되지 않음.	
	2	· 용접끝 4.3cm지점, 용접지단	· 시편2-2a는 용접금속 파단
	3	· 용접끝 4.0cm지점, 용접지단	· 용접상태 양호
	4	· 파단되지 않음.	
	5	· 파단되지 않음.	· N=982000회에서 시편 손상, 실험 중단
	6	· 용접 중앙점, 용접지단	· 부재 정렬 불량

다. 십자연결형 시험편의 피로실험을 통해 얻은 각 응력범위에 대한 피로수명을 통계·확률적으로 분석하였다. 이 연구의 피로실험 갯수가 많지 않으므로 지금까지 일반적으로 사용되고 있는 S-N 선도의 기울기 $m=3.0$ 을 택하여 사용하였다.

피로강도는 일반적인 피로설계기준에서 적용하고 있는 생존확률 95%의 값을 취하였다. 분석에서는 우선 시험편의 종류와 피로 파단 형태에 따라 구분하고, 응력비 R=0.1과 0.2를 구분한 경우와 구분하지 않은 경우, 그리고 시험편의 제작 오차가 크고 부재의 정렬이 불량하여 피로강도가 유별나게 작은 경우를 제외한 경우 등을 각각 다루었다. 각 경우에 대한 분석결과를 하중 반복회수 200만회에 대한 피로강도($\Delta\sigma_c$)로 나타내면

표 6과 같다. 여기서, 응력비의 영향은 응력비가 클수록 피로강도가 낮을 것으로 예상되었으나 횡보강재 시험편과 용접금속 파단 십자형 시험편의 경우는 작은 차이이지만 반대로 나타났다. 그러나, 이와 같은 크기의 차이는 피로실험에서 흔히 있을 수 있는 범위이므로 응력비의 영향은 거의 없는 것으로 간주할 수 있다. 횡보강재 시험편의 경우 힘 작용방향으로 부재 정렬상의 제작오차 문제로 인해 특별히 낮은 피로강도를 나타내는 실험 결과는 없었으며, 십자형 시험편의 경우에는 제작 오차가 심한 시험편에 대한 실험결과를 제외시키면 피로강도는 약간 증가하는 것으로 나타났다.

실험결과, 횡보강재 시험편과 시험편 VS2-2a을 제외한 모든 밀착 십자형 시험편은 모재가 파

표 5. 용접금속 파단 시험편의 조사결과

시험편	시험명	초기균열발생 추정 위치 및 용접 상태	양측 용접의 용입단 간격
VS3	1	· 파단되지 않음	
	2	· 용접끝 4.0cm 지점, 용접 루트	· a : 1mm ~ 4mm · b : 7mm ~ 8mm
	3	· 용접끝 4.0cm 지점, 용접 루트 · 제작시 부재 정렬 불량	· a : 1mm ~ 3mm · b : 6mm ~ 8mm
	4	· 파단되지 않음.	
	5	· 용접 중앙점, 용접 루트	· a : 6mm ~ 8mm · b : 6mm ~ 8mm
	6	· 용접 중앙점, 용접 루트	· a : 3mm ~ 6mm · b : 6mm ~ 8mm
	VS2-2	· 용접 중앙점, 용접 루트	· a : 6mm ~ 8mm

표 6. 십자형 시험편의 200만회 피로강도 비교

시험편	응력비	$N=2 \times 10^6$ 에 대한 피로강도(MPa)			피로강도 비교 (%)	
		①	②	③	④	⑤
		응력비 고려	응력비 무시	정렬불량 시험편 제외	(②-①)/①	(③-①)/②
VS1	0.1	81.70	83.83	83.83	+2.60	-
	0.2	85.72			-2.20	
VS2	0.1	62.74	59.42	63.50	-5.29	+6.86
	0.2	44.81			+3.67	
VS3	0.1	35.87	39.90	43.74	+11.23	+11.88
	0.2	57.32			-12.96	

단되었다. 횡보강재 시험편(VS1)의 경우 피로강도가 AASHTO LRFD의 상세범주 C와 Eurocode의 상세범주 80사이 에 놓이나 모재가 파단된 십자형 시험편(VS2)의 경우는 상세범주 C에 비하여 30%정도 작게 나타났다. 전체적으로 기존의 일반적인 소형 시험편 피로실험에 의한 피로강도보다 작게 나타난 것은 시험편 제작시 절단 후 수동용접하여 용접 시작점과 끝점의 결합과 불균일한 용접 형상이 많은 영향을 주었을 것으로 추정된다.

또한, 모재가 파단된 십자형 시험편의 피로강도가 특히 더 작게 나타난 것은 시험편의 부재 정렬이 좋지 못하여 힘의 편심으로 인한 휨응력이 용접지단에 추가로 작용하였기 때문인 것으로 판단된다. 간격 십자형 시험편(VS3)과 밀착 십자형 시험편중 VS2-2a는 용접 루트에서 균열이 발생하여 용접금속이 파단되었다.

이 경우의 파단면을 조사한 결과 용접 루트부에서 모재의 일부가 용용되어 용접금속과 일체화 되어 있으며 실측한 목두께의 평균값은 공칭 용접목 두께보다 2~3mm 정도 더 큰 것으로 나타났다. 실측한 평균 용접목두께를 기준으로 한 피로강도는 AASHTO LRFD의 규정에 의한 값과 거의 비슷하고 Eurocode의 값보다는 조금 큰 것으로 나타났다.

4. 결론

이상과 같이 국내 피로설계기준을 위한 기초적 자료 구축의 기본적 연구로서, 강교량 용접구조상세 중 대표적인 피로등급의 구조상세를 모델링하고, 이들 시험편들에 대하여 피로실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 피로실험결과로부터 면내거셋, 면외거셋, 십자연결형, 덮개판 접착부 용접 구조상세에 대한 피로강도는 AASHTO 및 JSSC의 피로설계곡선을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 십자연결형 부착 구조상세에서 하중 비전달형에 비하여 하중전달형의 피로강도는 매우

낮게 나타나고 있었으며, 국내 도로교시방서의 하중 전달형에 대한 피로설계기준을 만족시키지 않으므로 이에 대한 설계기준의 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

- 2) 피로강도에 대한 용접부 길이의 영향은 면내 거셋에서는 미미하지만 면외거셋에서는 150 mm 부착 시험편의 피로강도는 80mm 부착 시험편보다 낮게 나타나 용접구조부 길이의 영향이 있음을 확인하였다.
- 3) 면내거셋 접착부 시험편에 변형을 게이지를 부착해 응력을 측정한 결과 부착물의 길이가 긴 것이 용접단부에서 큰 응력집중이 일어남을 알 수 있었으며, 이는 피로실험결과와도 일치하는 것을 알 수 있었다. 부착물의 길이가 같은 경우에는 완전용입용접을 한 경우가 더 큰 응력집중도를 보였으나, 피로실험결과는 오히려 부분용입용접의 경우가 더 낮은 피로강도를 보였다. 이는 부분용입용접의 경우에는 용접결합 및 기하학적 불연속 정도가 더 크게 발생되었기 때문으로 생각된다.
- 4) 면내거셋 접착부에 대한 피로실험 결과 E범주(부착물의 길이가 150mm이며 완전용입 및 부분용입 용접)인 경우는 대체로 피로설계기준을 만족하는 것으로 나타났으나, D범주(부착물의 길이가 80mm)인 경우는 피로설계기준보다 약간 낮은 피로 강도를 나타내었다. 그러므로, 이에 대한 기준은 하향조정을 검토해야 할 것으로 생각되나, 시험편의 개수가 제한적이어서 추가적인 연구를 통해 수정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.
- 5) 덮개판 접착부의 경우 직사각형 덮개판의 측면만 용접한 경우와 측면 및 4면 모두를 돌림 용접한 경우, 선단부 폭 일부를 점차 줄여 6각형 덮개판으로 하고 측면, 전면 및 경사 등 6면 모두를 돌려 용접한 경우 등 모든 경우에서 AASHTO의 E등급, JSSC의 F등급 등 외국의 설계기준을 다소 상회하는 강도를 나타내었다. 따라서 시방서 기준을 그대로 사용하

여도 무리가 없음을 알 수 있었다. 그리고, 위 세 경우의 덮개판 형상 및 용접 구분별로 비교해 보면 4변 용접의 경우의 강도가 가장 높고, 6변 용접의 경우의 강도가 가장 낮게 나타났다.

감사의 글

이 연구는 포항산업과학연구소의 지원으로 수행된 "강교량 구조상세의 피로실험"중 소형시험편에 대한 연구결과이며, 이에 깊은 감사를 드린다.

참고 문헌

1. "AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS", SI Units 1st edition, American Association of State Highway And Transportation Officials, 1994. pp. 10.3~10.5.4
2. "Report on the comparison of classification tables in existing national codes for fatigue in Europe and statistical evaluation of large and small scale specimen test data", Eurocode No. 3, Design of Steel Structures, Part 1-General Rules and Rules for Buildings, Background Documentation, Chapter 9, Document 9.02, Liaison Engineers. Apr., 1989.
3. 日本鋼構造協會 "鋼構造物の疲勞設計指針・同解説", 技報堂出版, 1993.
4. 건설교통부, "도로교 표준시방서", 1996, pp. 142~148, 12, pp. 230~231..
5. P. B., Keating and J. W., Fisher, "Evaluation of Fatigue Tests and Design Criteria on Welded Details" NCHRP Report, No. 286, Sept. 1986, pp. 3~40.
6. J. W., Fisher, K. H., Frank, M. A., Hirt, and B. M., McNamee, "Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams", NCHRP Report, No. 102, 1970, pp. 13~25.
7. 成本ほか, "十字すみ肉溶接継手の疲勞強度に及ぼす板厚の影響", 日本鋼構造協會 第112回 講演概要集, 名古屋, 1986. 10.
8. 征矢, "溶接構造用鋼の母材と基本的溶接継手の疲勞強度特性とその影響因子", JSSC 疲勞設計指針・資料編・第1章, 1993.
9. 三木・森・阪本・柏木, "前面隅肉溶接継手の疲勞強度に對する継手寸法の影響", 土木學會構造工學論文集, Vol.33A, 1987.3.
10. 장동일, 정영화, 정경섭, 조재병, 배두병, "강교량 구조상세의 피로강도 실험", 한국강구조학회, 1998, pp. 2~11.
11. Woo, S. I., Chung, Y. W., Jung, K. S., Jo, J. B., and Bae, D. B., "An Experimental Study of the Fatigue Specimen for the typical Structural Details of the Steel Bridge", 5th Pacific Structural Steel Conference, Oct., 13-16, 1998, Seoul KOREA, pp. 159~164.
12. Woo, S. I., "Fatigue Behavior of Gusset Plates Subjected to out-of-plane Distortions", Ph.D. Dissertation, Chungbuk National University., 1999. 8, pp. 8~10, pp. 76~88.

(접수일자 : 1999년 10월 13일)