

하중 비전달형 면외 거셋판이 부착된 강교량 부재의 피로강도

The Fatigue Strength of Steel Bridge Components Attached with Non-load Carrying Out-of Plane Gusset Plate

우 상 익¹⁾ · 정 경 섭²⁾

Woo, Sang Ik Jung, Kyoung Sup

요 약 : 본 논문은 강교량 부재에 빈번하게 사용되는 용접상세로 비교적 낮은 피로강도를 보이는 부재에 대해 실험과 해석적 연구를 수행하였다. 측정응력을 고려해보면, 피로균열은 복부에 연결되는 거셋판의 필렛용접 지단부에서 시작하였으며, 용접단면의 기하학적 조건과 불연속성으로 인하여 집중응력이 발생하는 것으로 나타났다. 비드단면의 기하학적 형상을 고려한 FEM 모델의 해석결과와 동일한 위치에서 게이지에 의한 측정응력은 둘다 비슷한 수준의 응력집중이 용접지단부에서 발생하고 있음을 보여주고 있다. 피로실험 결과를 AASHTO와 JSSC의 피로설계기준과 비교한 결과, 80mm와 150mm 부착 시험편 모두에서 AASHTO의 D와 E등급, JSSC의 F와 G등급을 만족하거나 상회하는 것으로 나타났다. 또한, WG1와 WG3 시험편은 AASHTO와 JSSC의 S-N선도 보다 완만한 -0.3의 기울기를 갖는 것으로 나타났다.

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. Considering the measured stress, fatigue cracking initiated at toe of the transverse fillet weld joining the gusset plates to the web because of the stress concentration that developed as a result of the geometric conditions and the greater probability of microscopic discontinuities at the fillet weld toe. A comparison was made of the stress calculated by considering geometric aspect of bead and measured at same position. They indicate that the geometric conditions of the weld toe result in similar stress concentration on both FEM models and test results. The test results were compared with the fatigue criteria of AASHTO, JSSC specifications. Specimens of 80 and 150mm gusset plate configuration tested either respectively equaled or exceeded the fatigue resistance provided by category D and E of the AASHTO specification. It also satisfied the category F and G of JSSC. Both WG1 and WG3 specimen tend to provide S-N curves with a slope near -0.3 less than AASHTO and JSSC.

1) 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사수료
2) 정회원, 충북대학교 구조시스템공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

핵심용어 : 하중비전달형, 면외방향, 복부거셋판, 응력집중, 용접지단

KEYWORDS : non-load carry, out-of plane, web gusset plate, stress concentration, weld toe

1. 서론

국내의 강재 사용량이 점차 증가됨으로 인하여 강구조물 제작시 필연적으로 발생하는 연결부위에 대한 피로설계가 문제시 되고 있다. 강구조물은 리벳, 고장력볼트 및 용접에 의해 연결되는데, 현재 제작되고 있는 거의 모든 토목용 강구조물은 고장력 볼트와 용접에 의한 연결법을 이용하고 있다.

용접법은 강구조 부재를 연결하는 대표적 접합 방법으로 접합장소에 국부적인 대량의 열을 투입하여 재료를 용융시켜 구조적으로 일체화하는 것으로 대부분의 용접구조상세는 잔류응력과 용접결함 요인이 존재해 이들이 강구조물의 피로강도에 미치는 영향을 어떻게 평가하느냐가 중요한 문제이다. 용접부는 열이력으로 인해 부재에 현저한 불균일 온도분포가 발생하여 온도변화에 따른 부재의 팽창과 수축현상이 발생하는데, 차등냉각(uneven cooling)에 의해 구속력이 발생하고 용접부재에 내력이 생김과 동시에 구조물의 좌굴강도 또는 취성파괴강도에 영향을 미칠 수 있는 잔류응력이 발생하게 된다.⁽¹⁾

용접잔류응력의 정량적 평가는 가장 보편적으로 이용되는 ASTM의 스트레인 게이지를 이용한 측정법⁽²⁾ 등이 있으나, 실물 강재보에서는 여러 가지 용접상세가 존재하므로 다제약 상태의 잔류응력 측정은 상당히 어려운 문제이다. 따라서, 외국의 경우 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 구조상세를 대상으로한 피로실험을 수행하여, 이들 결과를 근거로한 피로설계기준⁽³⁻⁷⁾을 제정하여 각 구조상세에 대한 피로범주를 규정함으로써 강구조물 설계시 피로검토가 필요한 부분에 대해 각 상세의 피로등급을 만족하는 것으로 피로설계를 수행하고 있다.

또한, 용접결함 요인으로는 블로우홀(blow hole), 용융부족, 비드(bead)불량 등 여러 가지 형태의 결함요인이 있지만, 최근에는 용접제작 기술의 발전으로 결함요인 내재율은 감소하고 있으나, 강구조부재에는 제 2의 상(Hard Phase), 잠재균열, 미시적인 용접결함 등 부정적인 요인의 혼입이 불가피한 것이어서 공용중에 균열의 발생을 완전히 제어하는 설계와 제작은 거의 불가능한 것이다.^(8,9)

외국에서는 이미 다양한 용접구조상세 및 실물에 가까운 구조체를 대상으로 일정진폭하중하에서의 피로거동을 연구하여 피로설계지침을 완성하였으며, 최근에는 변동진폭하중하에서의 피로거동을 규명하기 위한 연구⁽¹⁰⁾와 상당기간 동안의 공용기간을 거친 구조물을 샘플링하여 이들의 피로손상 정도를 규명하기 위한 연구를 수행중에 있다.^(11,12)

한편, 국내에서도 손상된 강교부재에 대한 연구가⁽¹³⁾ 있었지만, 국내의 상황은 피로에 의한 열화현상이 성수대교 붕괴나 당산철교의 철거 등의 원인이 되었음에도 불구하고 피로에 대한 연구가 미미한 실정이다. 또한, 현행 도로교시방서상에서는 국내에서 수행된 실험자료를 바탕으로한 피로설계기준을 마련하지 못하고 있는 것이 사실이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 강구조물 피로설계기준의 기초적 자료를 마련하기 위한 시도로서 복부에 부착된 면외방향 거셋판을 모형화한 시험편을 제작하여 이들의 피로강도를 확인하고, 용접상태에 따른 피로강도를 정량적으로 평가하기 위해 실측데이터와 필렛용접부의 비드를 FEM으로 모델링하여 용접끝돌림 부분의 기하학적 형상 변화에 따른 응력집중변화와 비교·평가하였다.

2. 시험편 및 시험방법

본 연구의 대상이 되는 구조상세는 강판형교나 강박스형교의 복부에 부착되는 하중 비전달형 거셋판으로 모재와 거셋판의 용접부가 응력작용 방향과 평행한 경우이다.(그림 2.1참조) 이러한 경우에는 부착물의 길이와 두께에 따라 응력범주가 달라지는데⁽³⁾, 부착물의 길이가 길어질수록 응력범주가 낮아지게 된다. 이는 부착물이 커질수록 응력집중부의 집중응력이 커지기 때문이다.⁽¹⁴⁾

대상 시험편은 복부에 수평방향으로 80, 150 mm 두가지 종류의 거셋판이 부착되었으며, 부착판과 모재의 두께는 각각 10mm이다. 80mm 거셋판 부착시험편은 불완전용입하였고, 150mm 시험편은 불완전용입과 완전용입으로 구분하여 각각 6개씩 총 18개의 시험편을 제작하였으며, 제작시 고의적인 용접의 품질차이를 완전용입과 불완전용입으로 구분하였다. 용접각장은 모두 6mm이며, 용접 지단부는 가능한 제작 당시의 상태로 두어 용접 덧살제거와 같은 피로강도를 상승시킬 수 있는 마무리 조치는 취하지 않았다. 이는 국내 철구조공장의 실정이 대부분 자동용접설비에 의해 제작하고 있는 상황으로 용접품질이 상당히 개선되었다는 판단하에 소부재 제작시 부분적으로 사용되는 수동용접에 의한 최악의 경우를 고려하기

$L > 12t$ or $L > 10cm$ (E) $t < 2.5cm$
(E') $t \geq 2.5cm$

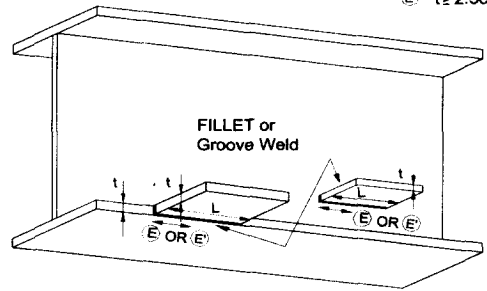


그림 2.1 면외거셋 부착부의 형태

위함이다.

본 연구에서 다룬 시험편은 그림 2.2에 나타낸 바와 같이 대칭구조의 소형시험편으로서 용접에 따른 변형이 크지 않도록 제작시 충분한 주의를 하였으며, 시험기 장착시 용접변형에 따른 초기 부정이 문제가 된 시험편은 없었으므로 시험편의 용접에 따른 변형은 고려하지 않았다.

시험편의 강종은 강교량 제작에 많이 사용되는 용접구조용 SWS 490B를 사용하였으며, CO₂반자동 용접법을 이용하였다.

시험편 제작에 사용된 강재와 용접봉의 화학성분 및 기계적 성질은 표 2.1과 같고, 각 시험편의 부착물 크기와 용접조건, 제작수, 기호의 정의는 표 2.2와 같다.

표 2.1 강재와 용접봉의 화학성분 및 기계적 성질

종 류	화학성분(wt. %)					기계적 성질			
	C	S _i	M _n	P	S	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	신장률 (%)
SWS 490B	0.16	0.37	1.21	0.014	0.010	308.7	539.0	205800	23
용 접 봉	0.08	0.48	1.23	0.013	0.011	460.0	530.0	-	32

표 2.2 시험편의 제작현황

구 조 상 세	부착물 크 기	용 접 조 건	기호의 정 의	제작수	계
면외거셋형 (복부거셋)	$l = 80mm$	용접치수 6mm 끌돌림 불완전 용입	WG1	6	18
	$l = 150mm$	용접치수 6mm 끌돌림 불완전 용입	WG2	6	
	$l = 150mm$	용접치수 6mm 끌돌림 완전 용입	WG3	6	

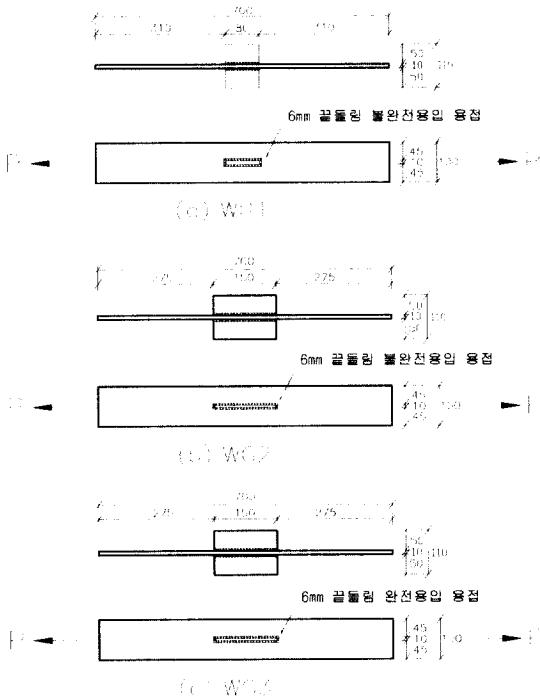


그림 2.2 면외거셋 접착부 시험편의 형상

도로교시방서 규정⁽³⁾에 따르면, 연구대상 시험편의 피로강도 등급은 80mm 거셋판 부착 시험편(WG1)인 경우 D등급, 150mm 거셋판 부착(WG2, WG3)인 경우 E등급으로 분류되지만, 시방서상의 등급보다 높은 결과를 나타내는 데이터도 있으므로 최초에 WG1 시험편은 C등급, WG2와 WG3 시험편은 D등급을 적용하였다. 각 시험편에 대해 강도등급에 따라 일정진폭 피로한계 응력범위를 $1\Delta\sigma_{th}$, $2\Delta\sigma_{th}$, $3\Delta\sigma_{th}$ 로 변화시켜, 응력범위당 2개씩을 실험하였다.

시험기는 동적 30tonf의 로드셀을 장착한 전기 유압식 피로시험기로, 재하형태는 정현파이며, 재하속도는 20Hz, 응력비는 $R=0.1$ 로 하여 하중제어에 의한 피로실험을 실시하였다. 재하된 하중의 크기는 각 시험편의 강도등급에 따라 5.471~23.446tonf이며(표 3.1 참조), 시험편의 공칭단면적은 $1,000\text{mm}^2$ 이다. 면외 거셋판 부착 시험편의 도로교시방서와 AASHTO 상에 규정된 응

력범위와 반복횟수에 대해 200만회 이상인 경우의 응력범위^(3~5)를 기준으로 계산한 예상 피로한도를 설정한 후, 시험편당 설정된 각 피로등급별 예상횟수 통과시까지 실험을 실시하였다. 피로하중 재하시 시험편에 발생하는 응력을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 부착하였는데, 부착위치는 그림 2.3과 같이 거셋판의 양쪽 끝단 응력 집중부로 예상되는 지점(거셋판의 좌우측 끝돌림 용접 지단부에서 게이지의 중심부까지의 거리가 용접부의 각장에 따라 다소 차이는 있지만 평균 14~16mm)에 용접단면의 기하학적 요인에 따른 응력집중현상을 확인하기 위하여 각각 2개씩 시험편당 4개의 게이지를 부착하였다.

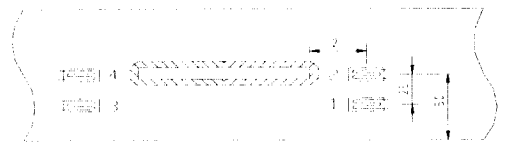


그림 2.3 스트레인 게이지 부착상황

3. 시험결과 및 분석

피로실험결과 WG1의 경우 AASHTO 기준의 C등급을 만족하는 것은 없었으며, 현행 도로교시방서나 AASHTO 기준에서와 같이 D등급으로 판명되었다.

WG2와 WG3의 경우 몇 개의 시험편에 한해 D등급으로 나타났지만 전체적인 피로강도를 평가할 때, 도로교시방서와 AASHTO의 E등급과 JSSC의 G등급을 만족하는 것으로 나타났다.

실험결과를 회귀분석한 결과, WG1, WG2, WG3시험편의 기울기는 각각 -0.300 , -0.362 , -0.301 로 나타나, WG1과 WG3 시험편의 경우는 AASHTO와 JSSC의 수직응력에 대한 기울기 $-1/m=0.333$ 보다는 완만한 경사를 갖는 것으로 나타났다. 이는 대상시험편의 경우 동일한 응력범주라 하더라도 통상 설계에 반영되는 피로한계근방에서 AASHTO나 JSSC의 기준보다는 피로수

명이 증가된 것을 의미한다.

그러나, 부분용입한 WG2 시험편의 경우는 AASHTO나 JSSC의 기준 보다 약 8.7% 급경사로 나타나, 거셋판의 길이가 같은 경우라도 용접상태에 따라 피로수명이 감소하는 것으로 나타났다. 완전용입한 WG3 시험편에 있어서 응력집중이 발생하는 끝돌림 용접부 용접기공의 존재로 인해 수명이 크게 짧았던 1번 시험편을 고려하고, WG1 시험편과 완전용입한 WG3 시험편 보다 부분용입에 의한 용접결함 요인이 더 많았을 것을 생각하면, 부분용입한 WG2 시험편의 피로수명이 다소 감소된 것으로 판단되며, 타당한 결과라 생각된다.

각 피로등급별 실험결과를 표 3.1에 나타내었으며, 시험편의 파단모습을 사진 3.1에 나타내었다. 또한, 각 시험편별 실험결과를 AASHTO⁽⁵⁾와 JSSC⁽⁶⁾ 피로설계기준 S-N선도를 이용하여 그림 3.1에 나타내었다.

파단부위는 파단된 시험편 모두에서 거의 같은 양상으로 나타나고 있는데, 초기 균열발생 위치는

표 3.1 면외거셋 접착부 피로시험 결과

시험편	응력범위 (MPa)	P _{max} (tonf)	파단횟수 (N _F)	비고	
WG1	1	69.0	7.816	>4,500,000	미파단
	2	69.0	7.816	3,644,510	파 단
	3	138.0	15.631	379,890	
	4	138.0	15.631	395,980	
	5	207.0	23.446	104,590	
	6	207.0	23.446	107,100	
WG2	1	48.3	5.471	>6,000,000	
	2	48.3	5.471	>6,000,000	미파단
	3	96.6	10.942	736,580	파 단
	4	96.6	10.942	692,300	
	5	144.9	16.413	283,500	
	6	144.9	16.413	345,970	
WG3	1	69.0	7.816	1,456,220	파 단
	2	69.0	7.816	>6,000,000	미파단
	3	96.6	10.942	927,100	파 단
	4	48.3	5.471	>6,000,000	미파단
	5	144.9	16.413	287,090	파 단
	6	144.9	16.413	264,210	



사진 3.1 WG3-1 시험편의 파단면 모습

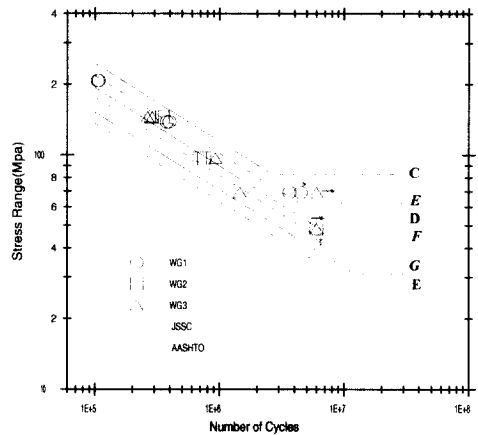


그림 3.1 피로시험 결과 S-N선도

거셋 양끝단 돌림용접부의 용접지점에서 발생되어 성장한 것으로 나타났다.

실험결과를 분석하여 피로수명과 응력범위의 관계를 다음과 같이 도출할 수 있었다.

$$WG1 : N = 53.77279 \times 10^{11} \Delta\sigma^{-3.33176}$$

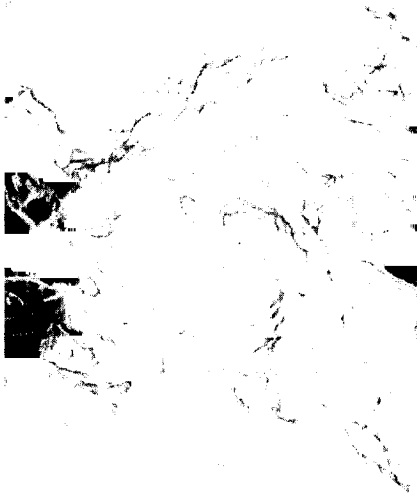
$$WG2 : N = 2.55448 \times 10^{11} \Delta\sigma^{-2.75985}$$

$$WG3 : N = 35.25455 \times 10^{11} \Delta\sigma^{-3.31781}$$

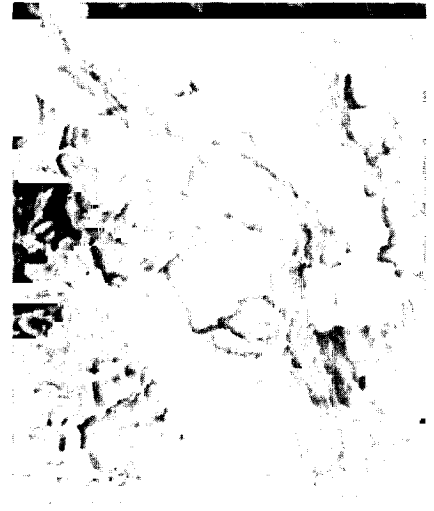
또한, 돌림용접부 직하면에는 용접열에 의한 열영향부가 나타나고 있어 이들의 크기를 조사한

결과, 불완전용입의 경우 모재 두께의 0.35~0.55배, 완전용입의 경우 모재 두께의 0.5~0.7배까지 열영향에 의한 흔적이 나타나고 있었으며, 결과적으로 응력집중이 발생하는 끝돌림 용접부의 결합요인이 있는 시험편의 피로수명이 낮았음을 확인할 수 있었다. 특히, 완전용입 1번 시험편(WG3-1)은 예상피로한도인 600만회에 훨씬 못 미치는 145만회에 파단되어 제작시 치명적인 피로결함을 가지고 있었던 것으로 판단되어 시험편의 파단면을 조사한 결과, 응력 집중부 표면 근처에 용접시 발생한 기공(Porosity)으로부터 초기 균열이 발생한 것으로 나타났다.

피로균열 발생위치상의 제작결함 여부를 조사하기 위해 SEM을 이용해 1000배로 촬영한 모습을 사진 3.2에 나타내었다. 사진 3.2 b)는 a) 사진의 윗 부분으로 결합근처를 움직여가며 확대 촬영한 것이다. 1000배 확대사진에서는 정상적인 피로에 의한 동심원 형상이 나타나지 않았으나, 2000배 확대사진에서는 균열부의 금속조직이 들떠 있는 모습을 확인할 수 있어, 제작시 발생한 결함이 초기균열발생 및 균열 진전속도에 영향을 주어 예상피로한도에 비해 상당히 빠른 속도로 파단되면서 나타난 무늬로 판단된다.



a) 피로균열부 모습



b) 균열부 확대 모습

사진 3.2 WG3-1 시험편의 파면형상

사진부분은 모재 두께 10mm에 대해 깊이 1~2mm인 위치로서 초기결합부 근처를 촬영한 것이다. 일반 강재의 경우 반복응력 1회에 대해 형성되는 줄무늬는 6000배 이상의 확대사진에서 나타나고 있으며, 1만배 확대사진을 이용하는 것이 보통이지만 결합부의 균열진전 속도를 고려할 때 2000배 수준에서도 균열진전거동을 확인할 수 있다고 판단하였다.

문헌⁽¹⁵⁾에 따르면 균열이 무한판 피로균열이라고 할 때 반복응력범위 69MPa인 경우 응력확대계수가 $K=20\text{kgf/mm}^{3/2}$ 정도로서 줄무늬간격은 $4 \times 10^{-6}\text{mm}$ 정도가 된다. 사진 3.2 b)에 의하면 최소 줄무늬 간격이 1mm 정도로 축척을 고려하면 $5 \times 10^{-4}\text{mm}$ 로 위와 비교할 때 균열이 매우 빠르게 성장하였음을 알 수 있다.

물론 사진 3.2를 1만배이상 확대할 경우 사진에 보이는 줄무늬들 사이에 보다 적은 줄무늬들이 있을 수 있겠으나 사진상 검은 계곡으로 나타난 무늬를 고려할 때 WG3-1 시험편의 경우 결합이 예상수명 보다 훨씬 짧은 수명을 가져오는 요인이 있음을 보여주는 사진이라 생각된다.

이러한 초기결합에 의해 비정상적인 피로거동

을 일으킨 파단면의 모습이 정상적인 피로균열전파에 의한 매끈한 단면 보다는 거칠게 나타난 것으로 생각된다.

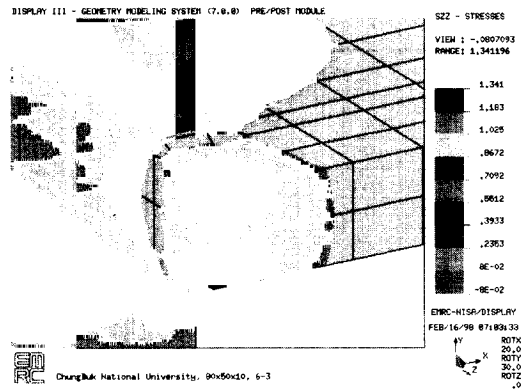
4. 구조해석

4.1 모델링 및 구조해석

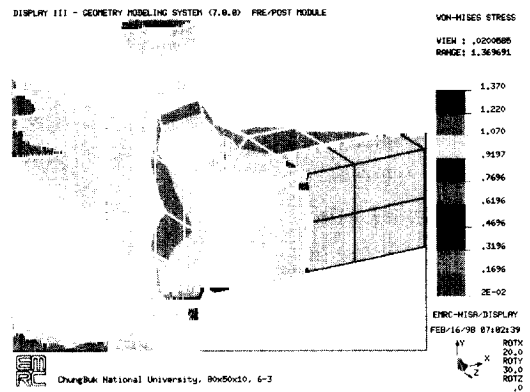
본 연구에서 실시한 구조해석은 필렛용접부 비드단면에 대해 부착면의 길이 및 용접각장, 목두께를 변화시켜, 이들 각각의 단면에 대해 인장하중을 재하하여 필렛형상에 따른 응력집중 정도를 확인하기 위한 것이었다. 물론, 필렛의 형상을 고려하기 위해서는 비드의 곡률을 고려하여야 하나, 본 대상 시험편의 경우 수동용접으로 제작된 것으로 비드의 형상이 일정하지 못하므로 자동용접된 단면으로 가정해 동일한 각장에 목두께만을 세가지 형태의 삼각요소로 고려하여 해석을 수행하였다. 목두께의 형상은 그림 4.1과 같이 비드곡률이 오목한 경우와 볼록한 경우 그리고 비드곡률이 없는 경우 등 세가지 형태로 목두께를 3~7.5mm 까지 변화시켜 고려하였다.

실제로 파단면을 보면 초기균열 위치는 끝돌림 용접과 모재가 만나는 곳임을 고려할 때, 이 근방에서 요소를 세분화하면 연구대상 구조상세의 응력집중을 보다 정확히 예측 할 수 있을 것이지만, 이는 어디까지나 이상적인 시험편 형상에 국한된 결과에 지나지 않을 것이므로, 여기서는 응력집중의 개략적인 현황을 알고자 한 것이다.

대상 모델링에 대해 $1\text{kgf}/\text{mm}^2$ 의 단위응력을 재하하여 구조해석을 수행한 결과, 모델링의 요소 분할 수가 많아지면 응력집중현상이 보다 뚜렷해짐이 나타나고 있다. 재하하중이 작아 현재 응력집중부에 발생한 응력도 모두 탄성한계내로 나타나고 있으나, 실제로는 외력에 대해 항복응력을 초과하는 응력집중부에서는 비탄성으로 탄소성 또는 소성부분이 발생할 것이지만 현재의 해석은 탄성해석으로 하중의 대소에 관계없이 모두 비례하



(a) Z방향 수직응력



(b) Von-Mises 파괴응력

그림 4.1 목두께 3.0mm에 대한 계산응력 분포(496요소)

여 나타날 것이므로 단위하중을 재하하였다.

목두께 형상별 해석결과는 거셋판의 용접지단부에서 부재 축방향으로 20mm 떨어진 지점까지 목두께의 크기에 따라 최대응력의 분포가 변하고 있는데 즉, 목두께가 3mm인 경우 비드부와 용접지단부에서 최대응력이 발생하고 목두께가 7.5mm인 경우 용접지단부에서 20mm 떨어진 지점까지 최대응력이 발생하고 있는 것으로 나타났다. 시험편의 파단면을 절단하여 측정된 목두께가 약 6.4~9.6mm인 점을 감안한다면 게이지 부착위치에서의 측정응력과 해석결과의 비교는 타당하다고 생각하며, 이들 결과 중 용접지단부 근처에서의 최대치를 표 4.1에 나타내었다.

표 4.1 구조해석 결과 (단위 : kgf/mm²)

시험편 형상	모델링 A		모델링 B	
	Szz	Von-Mises	Szz	Von-Mises
80-6-3	1.182	1.377	1.341	1.370
80-6-4.5	1.161	1.202	1.390	1.418
80-6-5.6	1.172	1.217	1.415	1.443
80-6-7	1.182	1.234	1.440	1.469
80-6-7.5	1.185	1.239	1.447	1.477
150-6-3	1.272	1.606	1.442	1.534
150-6-4.5	1.219	1.348	1.498	1.531
100-6-5.6	1.231	1.293	1.526	1.557
100-6-7	1.242	1.311	1.552	1.582
100-6-7.5	1.246	1.317	1.559	1.589

표 4.1에서 시험편형상을 80-6-3 등으로 구분하고 있는데, 이것의 의미는 부차물길-용접각장-목두께의 치수를 나타내는 것이다. 분할 요소수에 따른 응력집중 정도를 측정응력과 비교하기 위하여 모델링 A는 시험편의 1/4을 매쉬를 크게하여 분할한 것이고, 모델링 B는 시험편의 1/2을 보다 세분한 것으로 해석결과에 따르면, 시험편의 응력집중부는 끝돌림 용접부 근방에서 나타나지만, 요소분할법에 따라 그 위치가 차이가 있으며, 세분 할 수록 끝돌림 용접부 가까이로 접근하는 것을 확인할 수 있다. 시험편 형상에 대한 응력집중의 영향을 나타내는 그림 중 일부를 그림 4.1에 나타내었다. 해석결과에 따르면 목두께가 커질수록 응력집중부가 용접지단의 모재와 다음 첫 번째 요소 사이에서 발생하고, 요소가

세분되면 응력집중 위치는 점차 용접지단에 가까워지며, 크기는 점차 커지는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 실제의 구조상세에 있어서는 일찍 생각되는 부위에 압축, 늦게 생각되는 부위에는 인장이 발생하여 잔류응력으로 남게 된다. 물론 이러한 경향은 기하학적으로 복잡한 위치에서는 명확히 분석해 내기가 곤란하지만, 복부판과 플랜지 사이에서는 목두께가 커서 용접지단이 볼록하여 매끄럽지 못하고 각을 갖을 경우도 오목하게 연결되어 응력집중이 완화되는 비드와 거의 동등한 효과를 갖는다는 연구보고도 있다.⁽¹⁶⁾

그러나, 면외거셋 접착부 시험편은 웨브와 플랜지가 연결되는 형식과는 달리 거셋이 웨브에 부착된 형상으로 끝돌림 용접결합과 더불어 기하학적 형상이 지배적일 수 있음이 증명되었다. 실제 실험결과에 따르면 모든 시험편이 용접지단부에서 초기균열이 발생 파단되고 있는 점과 기공 내재와 같은 용접결함에 의한 파괴를 고려할 때 용접비드의 기하학적인 불연속성과 용접결함요인 모두에 지배받고 있는 것으로 판단된다.

4.2 측정응력과 구조해석 결과의 비교

일반적으로 피로하중하의 용접 이음부의 피로수명에 관련된 인자에는 재하되는 하중의 형태와 용접 비드의 형상 그리고 용접결합 등이 포함되고

표 4.2 구조해석 결과와 측정응력의 비교

조건 시험편	P _{max} (tonf)	σ _{max} (kgf/mm ²)	변형률 게이지 부착위치 (mm)	측정응력 (kgf/mm ²)	496요소 분할 모델의 환산응력 (kgf/mm ²) (구조해석 결과 × σ _{max})	목두께 (mm)
WG1-5	23.446	23.446	평면부(25) (1번 게이지)	21.78	21.92	3.0
					23.21	5.6
			용접지단부(50) (2번 게이지)	30.45	21.36	7.5
					31.44	3.0
WG3-6	16.413	16.413	평면부(25) (1번 게이지)	14.55	33.17	5.6
					33.92	7.5
					13.43	3.0
			용접지단부(50) (2번 게이지)	21.32	14.22	5.6
					14.54	7.5
					23.66	3.0
				25.04	5.6	
				25.58	7.5	

있다.⁽¹⁶⁾ 대상 시험편은 모재에 거셋판이 접착되어 피로수명에 영향을 미치는 기하학적 구조를 갖는 것으로, 돌림용접 지단부의 발생응력이 평면부의 응력과는 다를 것으로 예상되어 용접지단부와 평면부에 변형률 게이지를 부착하여 응력 집중현상을 확인하기로 하였다. 표 4.2의 측정응력은 그림 2.3에 나타난 거셋판의 길이방향 양단의 돌림용접 지단부와 평면부의 응력이며, 해석결과는 구조해석에서 단위하중($1\text{kgf}/\text{mm}^2$) 재하시의 계산응력을 해당시험편을 모델링한 표준시험편에 작용된 최대하중에 대해 공칭응력 재하시의 값으로 환산한 응력이다. 이들 결과를 동시에 비교하여 그림 4.2와 4.3에 나타내었다.

측정응력과 구조해석 결과 모두 평면부 보다 돌림 용접 지단부에서 더 큰 응력이 발생되었다. WG1-5 시험편에 23.446tonf 재하시 공칭응력은 $23.446\text{kg}/\text{mm}^2$ 이지만, 평면부와 돌림용접부는 각각 $21.78, 30.45\text{kg}/\text{mm}^2$ 로 나타나 전단면에 걸쳐 불균등 응력분포가 발생되고 있음을 알 수 있다. WG3-6 시험편의 경우도 같은 결과를 보이고 있다. 측정응력을 기준으로 볼 때, WG1-5 시험편은 1.4배, WG3-6 시험편은 1.47배의 응력 집중이 있는 것으로 나타났으며, 해석결과에서도 WG1-5 시험편에 대해서는 1.48배, WG3-6 시험편에 대해서는 1.76배의 응력집중이 되고 있음을 알 수 있다. 이로서, 모델링이 표준형상에 대한 것이고 시험편 각각을 정확히 나타내지는 않았지만 응력집중의 경향은 충분히 나타나고 있음을 확인 할 수 있다.

피로실험 결과 총 18개의 시험편 중 파단된 13개 시험편이 돌림용접부 지단에서 파단되었으며, 이들의 초기균열 발생위치와 파단면 조사결과의 내용과 구조해석 결과를 고려할 때, 본 구조상세에서는 거셋 돌림용접부 지단에 집중된 응력이 피로수명에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 분석 및 결과

이상과 같이 면외방향 거셋판 시험편에 대하여

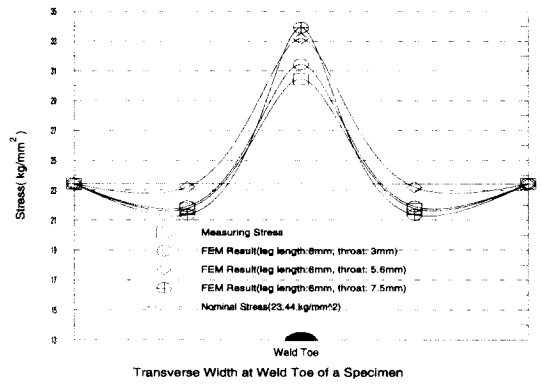


그림 4.2 WG1-5 시험편 응력발생 상황

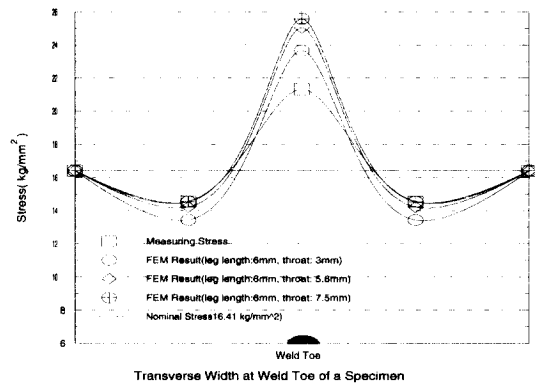


그림 4.3 WG3-6 시험편의 응력발생 상황

피로실험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 측정응력과 구조해석의 계산응력 그리고 파단된 13개 시험편의 파단면을 분석한 결과, 면외 거셋형 구조상세의 경우 거셋판 돌림용접부의 용접지단이 취약부로 나타나 불균등 응력분포에 의한 응력집중이 피로수명에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

2. 피로등급 D인 80mm 거셋판 부착 시험편 (WG1)은 설계기준을 충분히 만족하는 피로강도를 보였다. 또한, AASHTO의 C 기준에 속하는 것은 나타나지 않았으나, JSSC 설계기준을 적용하면 $1\Delta\sigma_{th}$ 과 $2\Delta\sigma_{th}$ 응력범위의 4개 시험편은 E등급으로 해당 피로등급 보다 한 등급 위로 분류되었다.

3. 150mm 완전 용입시험편(WG3)의 경우 $1 \Delta\sigma_{th}$, $2 \Delta\sigma_{th}$, $3 \Delta\sigma_{th}$ 응력범위의 5개 시험편은 시방서상의 피로등급 E 보다 상향인 D 설계기준에 속하였으나, C등급의 $1 \Delta\sigma_{th}$ 실험한 1개의 시험편은 용접에 내재한 기공(Porosity)의 영향으로 E 설계기준으로 분류되어 다른 시험편에 비해 낮은 피로강도를 보임으로서 용접결합이 피로수명을 낮게하는 요인이라는 것이 확인되었지만, 도로교시방서 피로등급은 이를 고려해도 충분히 안전측으로 규정되었음을 확인할 수 있었다.

4. 150mm 불완전 용입시험편(WG2)의 경우, 시방서상의 피로설계기준인 E등급은 만족하는 것으로 나타났으나, 회귀분석결과 설계기준의 $m=3$ 보다 작은 2.76으로 나타나 200만회 이상에서는 완전 용입시험편에 비해 다소 짧은 피로수명을 갖는 것으로 나타나고 있어 피로등급의 세분화를 위해서는 세심한 주의가 필요하다고 생각된다.

5. 이상의 실험결과, 용접결합을 줄일 수 있다면 피로등급의 세분화로 피로범주를 상향조정할 수 있음을 확인했으나, 이러한 결과를 뒷받침하기에는 시험편의 수가 적어 추가적인 연구를 통해 보완하여야 할 것으로 생각된다. 더불어, 본 실험 결과는 면내변형만을 고려한 것으로 추후의 연구 과제로는 면외변형을 고려한 거셋판의 피로거동을 규명하여야 할 것으로 생각된다.

감사의 말

본 연구는 포항종합제철(주)의 지원하에 수행된 1997년도 "강교량 구조상세의 피로실험"의 결과 중 일부임을 밝히며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 한국강구조학회, "강구조편람" 제 2권, 강구조의 접합, 1995, pp. 113~132, pp. 150~162.
- (2) ASTM E837-85: Determining Residual Stress by the Hole Drilling Strain Gage

Method.

- (3) 건설교통부, "도로교 표준시방서", 1996, pp. 142~148, pp. 230~231.
- (4) "AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFI-CATONS", 1st edition, 1994, pp. 6-18~6-30.
- (5) AASHTO, "Standard Specification for High-way Bridges", 1986, pp. 109~113.
- (6) 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, pp. 22~30.
- (7) "Eurocode No.3, Design of Steel Structures Part 1-General Rules and Rules for Buildings Background Documentation", Liaison Engineers, April 1989.
- (8) 장동일, 정영화, 용환선, "구조강의 취성과피 거동에 대한 실험적 연구", 대한토목학회지, 제 27권, 제 2호, 1979. 4, pp. 79~7.
- (9) 장동일, 용환선, 김동희 "구조강 용접부의 국부 취성분포에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제 4권, 제 3호, 1984. 9, pp. 19~25.
- (10) "Variable Amplitude Load Fatigue Task A-Literature Review", Vol. II-Constant Amplitu-de Fatigue Behavior, July, 1990, pp. 62~78.
- (11) 山田健太郎 外 3人, "50年供用したリベット継手の疲勞試験", 構造工學論文集, Vol., 36A, 1990, 3, pp. 944~946.
- (12) John W. Fisher, "Fatigue and Fracture in Steel Bridges", Wiley Interscience, 1984
- (13) 우상익, 정경섭, "손상된 비드단면을 갖는 垂直補強材의 疲勞壽命", 대한토목학회논문집, 제 18권, 제 I-3호, 1998. 5, pp. 335~343.
- (14) "강교량 구조상세의 피로강도 실험", 한국강구조학회, 1997, pp. 75~95.
- (15) "破壞力學實驗法", 國尾武 外 3人, 調創書店, 1984. 6, p. 217, pp. 251~253.
- (16) S. J. Maddox, "Fatigue Strength of welded Structures", Second Edition, 1991, pp.106~115.

(접수일자 : 1998년 4월 14일)