

# 高强度鋼 맞대기 鎔接連結部の 疲勞強度

## Fatigue Strength For The Butt Welded Joint Of High Strength Steel

김 성 훈<sup>1)</sup> · 배 두 병<sup>2)</sup> · 김 명 관<sup>3)</sup>

Kim, Sung Hoon Bae, Doo Byong Kim, Myeong Kwan

요 약 : 현재, 국내에서 사용되고 있는 고강도강은 SM570 강재만이 극히 일부분 사용되고 있으며, 그 이상의 고강도강의 사용은 국내의 강교량에는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 국내 장대교량 및 일반교량에서의 고강도강 적용의 활성화를 위해 고강도강재인 SM570 강재와 아직 교량에는 적용된 사례가 없는 POSTEN80 강재를 대상으로 횡방향 맞대기 용접연결부의 피로특성을 분석, 평가하였다. 이를 위해 소형 시험편을 제작하여 일정진폭하중하에서의 인장 피로시험을 실시하였으며, 피로균열의 발생 및 진전양상, 기존의 연구결과와 비교, 분석하였다. 또한, 모재의 정적 인장강도와 판두께가 용접연결부의 피로강도에 미치는 영향을 분석하고 피로강도를 평가하므로써 고강도강인 SM570과 POSTEN80 강재의 피로특성과 그에 따른 횡방향 맞대기 용접연결부에 대한 피로설계기준 제정을 위한 기초 자료를 제시하였다.

ABSTRACT : Currently, high strength steel is not used for steel bridges in Korea, except for the SM570 high strength steel in very isolated cases. The study aimed to promote the active adaptation of high strength steel for long-span steel bridges. Thus, the fatigue behavior of SM570 and POSTEN80 high strength steel was investigated. For the experimental study, the butt welded joints samples were manufactured. Likewise, regular amplitude tensile fatigue tests were conducted. Test results, e.g., location of fatigue cracks and their propagation were compared with the findings of other researchers. After analyzing the effects of fatigue strength, e.g., static tensile strength and plate thickness of base metal, basic data for fatigue design criteria of SM570 and POSTEN80 high strength steel were presented.

핵심용어 : 고강도강, 맞대기용접연결부, 피로강도, 판두께 효과

KEYWORDS : High Strength Steel, Butt Welded Joint, Fatigue Strength, Effect of Plate Thickness

### 1. 서론

강구조 부재의 용접연결시, 발생하는 대표적인 문제점으로 용접과정에서 발생하는 잔류응력, 개선킨 각도, 루트 간격, 용접 순서 그리고 용접봉의 부적절한 선택과 관리 등에 따라 발생하는 내부결합과 용접 끝이나 용접 단부와 같은 불연속부의 존재이다.<sup>(1)</sup> 이들은 피로균열의 발생수명과 대상 구조상세의 피로강도에 영향을 미치는 주요한 인자로 작용하므로 피로 특성 평가시 반드시 검토되어야 할 문제이다. 한편, 모재의 정적 인장강도가 용접연결 부재의 피로강도에 미치는 영향은 복잡하지만 일반적으로 인장강도가 상승하면 피로강도도 상승하며, 용접연결에 있어서도 어느 정도 인장강도에 의존성이 나

타난다.<sup>(2)</sup> 그러나 대부분의 용접연결에 있어 인장강도의 변화에 따른 피로강도의 차이를 무시하여<sup>(3)</sup> 용접연결에서 피로강도의 재료 의존성은 없다고 언급되어 왔으며, 대부분의 피로 설계지침<sup>(4),(5),(6)</sup>에서도 재료의 강도가 변하여도 용접구조물의 피로설계시 적용하는 피로강도의 변화를 무시하고 있다. 따라서 고강도 강재의 사용시 현재의 피로설계기준에 의한 설계는 모재의 강도 의존성이 반영되어 있지 않으므로 문제가 될 수 있다. 이런 실정에 맞춰 일반 강재를 사용하는 경우와 마찬가지로 고강도 강재에 대한 구조상세의 용접종류, 연결부의 형상, 응력의 작용방향 등을 변수로 한 피로특성의 평가가 필요하다고 하겠다.

본 논문에서는 SM570과 POSTEN80 강재에 대한 피로

1) 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 교수, 공학박사  
2) 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 교수, 공학박사  
3) 학생회원, 서울산업대학교 구조공학과 석사

본 논문에 대한 토의를 2002년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

설계지침의 기초적 자료를 제공하기 위해 강교량의 필수적인 용접구조상세 중 횡방향 맞대기 용접연결 구조상세에 대해 피로시험을 실시하였다. 이로부터 대상 고강도강재에 대한 피로강도, 균열발생 및 진전 양상 등 피로거동의 평가를 실시하고, 피로시험의 분석결과인 피로강도를 국내의 피로설계기준<sup>(4),(5),(7)</sup>과 기존의 연구결과<sup>(5),(8)</sup>와 비교함으로써 대상 구조상세에 대한 피로강도를 고찰하여 피로설계기준 마련을 위한 기초적 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 맞대기 용접연결부의 S-N특성

### 2.1 용접 그대로의 맞대기 용접연결

용접 그대로의 맞대기 용접연결에서 용접지단부는 피로균열의 발생점이 되며 이 위치에서는 응력집중현상이 나타난다. 용접 그대로의 연결지단부에서의 응력집중계수  $K_t$ 는 용접법, 용접조건이나 용접의 마무리 상태 등에 의존하며, 맞대기 용접연결의 경우, 응력집중계수  $K_t$ 는 약 1.2~3.0의 범위이다. 또한 용접에 의한 각변형 등도 피로강도에 영향을 미친다. 한편, 고강도강재를 사용한 용접 그대로의 맞대기 용접연결에 대한 강도특성 및 S-N회귀직선의 지수  $m$ , 계수  $C$ , 표준편차,  $2 \times 10^6$ 회 피로강도 등을 연강 SB42와 함께 정리하여 표 2.1에 나타내었다.

용접구조용강에 대한 용접 그대로의 맞대기 용접연결의 S-N선도 데이터와 JSSC 설계곡선과 비교하여 나타내면 그림 2.1과 같다.

저탄소강의 맞대기 용접연결의 회귀곡선 중, 장수명영역에서는 S-N선도가 JSSC D등급의 곡선을 대부분 만족하고 있으나 일부 데이터는 설계곡선의 하한계에 위치하거나 다소 낮게 나타나는 경우도 있음을 알 수 있다. 이는 고강도강재는

표 2.1 맞대기 용접연결의 강도특성 및 S-N직선회귀 (용접 그대로, 축하중)

구분	강종	판두께 (mm)	용접 방법 <sup>1)</sup>	항복 강도 (MPa)	인장 강도 (MPa)	응력 비 R	시험 편수	지수 m	계수 C	표준 편차	$2 \times 10^6$ 회피로 강도
연강	SB42	20	SAW	284	441	0	9	5.469	18.51	0.1955	171
	SM490B	9	SMAW	413	541	0	76	4.166	15.57	0.1243	168
HT50	SM490B	20	SMAW	397	534	0	47	4.092	15.16	0.1926	146
	SM490B	40	SMAW	346	526	0	31	3.846	14.46	0.1288	133
HT60	SM58Q	9	SMAW	581	634	0	27	5.476	18.78	0.1795	190
	SM58Q	20	SMAW	586	632	0	30	3.245	13.24	0.0925	138
HT80	HT80	9	SMAW	799	825	0	31	3.691	14.41	0.1410	158
	HT80	20	SMAW	806	840	0	39	3.466	13.69	0.1746	135

1) SAW : Submerged Arc Welding, SMAW : Shielded Metal Arc Welding

노치 감수성이 대단히 높아 피로강도가 용접지단 형상에 매우 민감하기 때문인 것으로 판단된다.

용접 그대로의 맞대기 용접연결에 있어 HT50 강재의 판두께 변화에 따른 S-N선도를 정리하여 그림 2.2에 나타내었으며 여기서 직선은 지수  $m$ 의 평균치를 정하여 직선 회귀분석한 결과이다.

동일 강종의 용접 그대로의 맞대기 용접연결의 S-N선도는 판두께가 증가함에 따라 점차 낮아지는 경향이 있으며 피로강도도 낮아짐을 알 수 있다.

한편, 그림 2.3은 동일한 판두께를 갖는 용접 그대로 맞대기 용접연결의 강종에 따른 S-N선도를 비교한 결과이다.

각 강종별로 S-N선도상의 뚜렷한 특성의 차이는 발견할 수 없으나, 재료의 강도가 작을수록 S-N선도의 기울기가 완만해지는 경향을 나타내고 있다. 이는 단수명영역에서 부하응력이

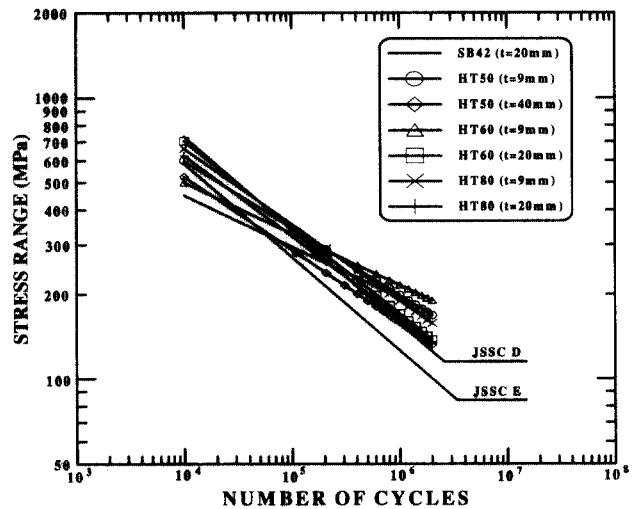


그림 2.1 맞대기 용접연결의 S-N선도와 설계곡선의 비교

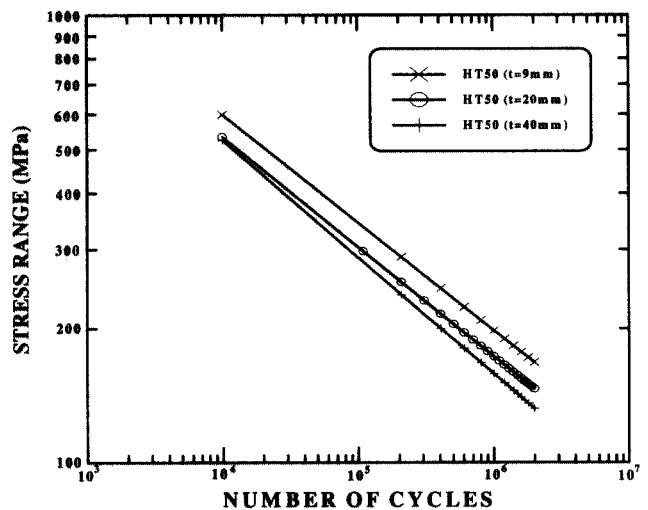


그림 2.2 맞대기 용접연결의 판두께 비교

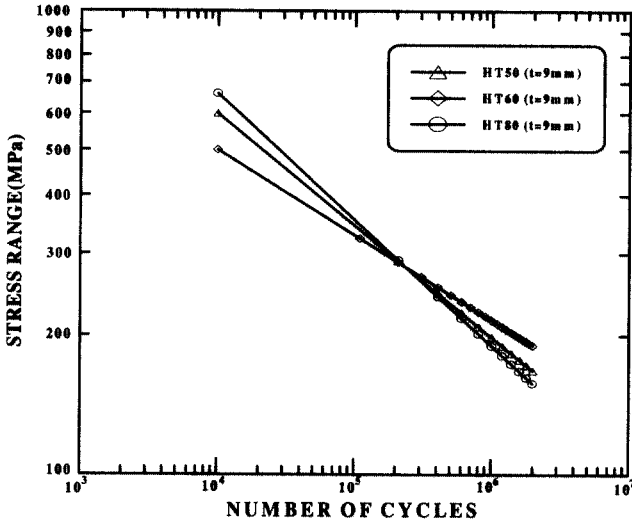
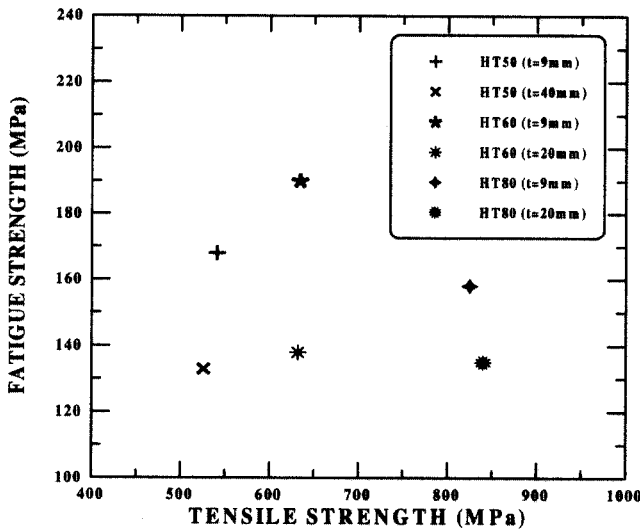
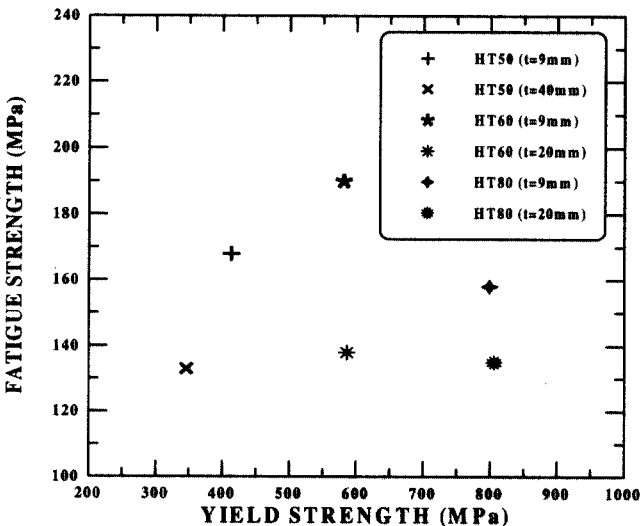


그림 2.3 맞대기 용접연결의 강종에 따른 S-N선도 비교



(a) 인장강도와  $2 \times 10^6$ 회 피로강도



(b) 항복강도와  $2 \times 10^6$ 회 피로강도

그림 2.4 맞대기 용접연결의 강도특성과  $2 \times 10^6$ 회 피로강도의 관계

항복점을 크게 초과하여 피로강도가 더 커지지 않고 한계점에 이르기 때문에 피로강도가 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

용접구조용강의 맞대기 용접연결에 대한 축하중 데이터에 대해 판두께별로 반복회수  $2 \times 10^6$ 회의 피로강도와 인장강도와와의 상관관계를 정리하여 나타내면 그림 2.4와 같다.

그림 2.4의 시험 데이터는 다양한 용접법과 판두께의 변화로 편차는 있겠지만 피로강도가 항복강도와 인장강도에 의존적이라는 평가를 내리기에는 무리가 있을 만큼 일률적인 경향은 나타나지 않음을 알 수 있다.

## 2.2 용접 잉여두께를 삭제한 맞대기 용접연결

용접 잉여두께를 삭제한 맞대기 용접연결 구조상세에 대한 고강도강재의 강도특성 및 S-N회귀직선의 지수 m, 계수 C, 표준편차,  $2 \times 10^6$ 회 피로강도 등을 정리하여 나타내면 표 2.2와 같고, S-N선도와 설계곡선의 비교는 그림 2.5와 같다.

표 2.2 맞대기 용접연결의 강도특성 및 S-N직선회귀 (용접 잉여두께 삭제, 축하중)

구분	강종	판두께 (mm)	용접 방법	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	용력비 R	시험편 수	지수 m	계수 C	표준편차	$2 \times 10^6$ 회 피로강도
HT50	A537 <sup>1)</sup>	30	SAW	403	517	0.1	7	11.02	33.61	0.0730	300
	NVE32 <sup>2)</sup>	38	SAW	420	513	0.02	5	8.657	28.19	0.1029	337
HT60	SPV50	20	SAW	579	628	-1.0	10	20.84	65.14	0.1817	667
	SPV50	20	SAW	579	628	-1.0	11	15.79	49.99	0.1970	590
HT65	HT65	27	SAW	616	687	0.01	3	39.03	114.1	0.2249	602
	HT65	27	SAW	511	623	0.01	4	34.02	97.92	0.2169	494
HT70	HT70	16	GMAW <sup>2)</sup>	647	745	0.1	7	8.654	28.76	0.3212	394

1) TMCP강, 2) Gas Metal Arc Welding

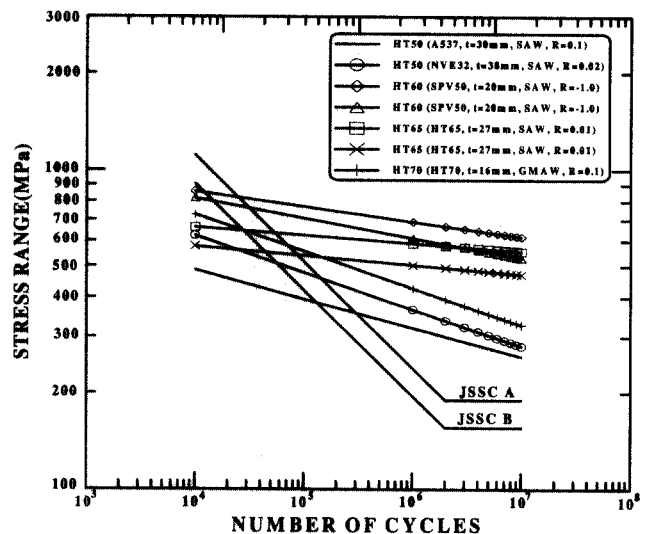


그림 2.5 맞대기 용접연결의 S-N선도와 설계곡선의 비교

용접 표면성상과 용접부 강도에 따라 다소 차이는 있겠지만 일반적으로 용접 잉여두께를 삭제한 맞대기 용접연결은 그림 2.5의 용접 그대로의 맞대기 용접연결에 비하여 모재와 같은 정도의 피로강도가 나타남을 알 수 있다. 잉여두께를 완전히 삭제한 평활 시험편의 피로시험으로부터 용접부 강도가 모재의 강도보다 높기 때문에 모재부에서 균열이 발생, 진전하여 파단되는 경향을 나타내고 있다. 한편, HT60 강재는 용력비 R이 -1이기 때문에 피로강도가 높게 나타나고 있다.

### 3. 시험편, 실험기기 및 방법

#### 3.1 재료의 물성치

사용된 공시재료는 국내에서 생산되고 있는 용접 구조용 강재인 SM570과 POSTEN80 강재로서 대상 강재와 용접재료의 화학적 및 기계적 성질을 정리하여 표 3.1~표 3.4에, 그리고 용접조건은 표 3.5에 나타내었다.

표 3.1 사용 고강도강재의 화학적 성질

강종	화학적 성분 (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo	B
SM570	0.13	0.30	1.39	0.015	0.003	-	-	-	-	-	-
POSTEN80	0.07	0.29	0.92	0.014	0.004	0.44	0.96	0.02	0.043	0.45	0.0014

표 3.2 고강도강재의 기계적 성질

강종	인장시험			충격시험	
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	신장율 (%)	온도 (OC)	흡수에너지 (J)
SM570	556	656	24	-5	270
POSTEN80	820	862	20	-	-

표 3.3 용접재료의 화학적 성질

용접 방법 <sup>1)</sup>	화학적 성분 (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo
FCAW	0.03	0.35	1.12	0.013	0.017	0.03	1.05	-	0.02	0.19
GMAW	0.07	0.29	0.92	0.014	0.004	0.44	0.96	0.02	0.043	0.45

1) FCAW : Flux Cored Arc Welding, GMAW: Gas Metal Arc Welding

표 3.4 용접재료의 기계적 성질

강종	인장시험			충격시험	
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	신장율 (%)	온도 (OC)	흡수에너지 (J)
SM570	582	610	27	-30	43
POSTEN80	770	850	22	-20	120

표 3.5 맞대기 용접연결의 용접조건

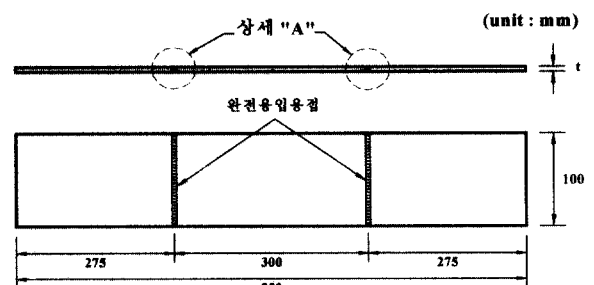
강종	용접 방법	용접봉		용접 전압 (V)	용접 전류 (A)	용접 속도 (cm/min)	예열 온도 (OC)
		종류	지름				
SM570	FCAW	SUPER CORED 81	1.2	30	220 ~245	20 ~40	110 ~121
POSTEN 80	GMAW	MGS-80	1.2	25~30	220 ~240	20~35.3	60~100

#### 3.2 시험편 제작

대상 강재는 판두께 10mm인 POSTEN80 강재와 판두께 40mm인 SM570강재로서, 대상 구조상세인 용접잉여두께를 삭제한 횡방향 맞대기 용접연결에 대한 피로시험편의 형상 및 치수는 그림 3.1과 같다.

#### 3.3 피로시험방법

피로시험에 앞서 시험편에 대한 공칭응력을 조사하기 위해 그림 3.2와 같이 실험실에서 정적인장시험을 실시하였다. 이때 응력측정을 위해 변형률 게이지를 각 피로시험편의 용접지단부와 모재의 양면에 부착하였으며, 또한 용접연결부에 작용하는 공칭응력과 시험편의 장착에 따른 편심여부를 조사하기 위해 용접연결부로부터 15mm 떨어진 위치에서 모재 양면의 중앙 그리고 좌측과 우측 6개소에 길이 5mm의 변형률 게이지를 부착하였다.



상세 "A"

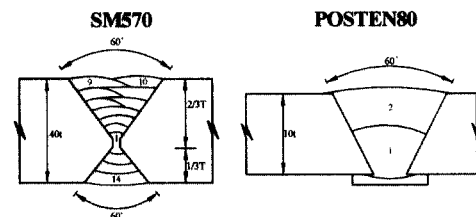


그림 3.1 시험편 형상 및 치수

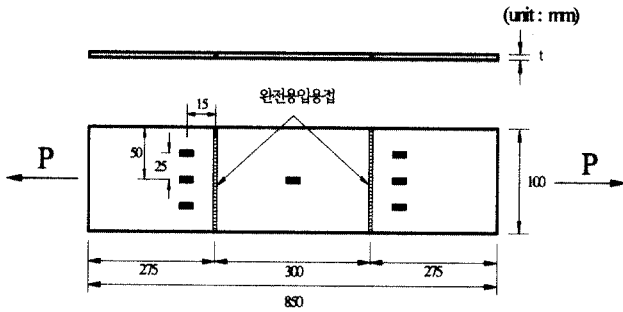


그림 3.2 시험편 변형률 게이지 부착위치

표 3.6 피로시험기 현황

강종	시험기 용량	제작회사	제작국	실험실
SM570 (t=40mm)	200tonf급	MTS	미국	포항산업 과학연구원
	100tonf급	MHI	일본	포항산업 과학연구원
POSTEN80 (t=10mm)	30tonf급	SHIMADZU	일본	한양대학교
	25tonf급	MTS	미국	국민대학교

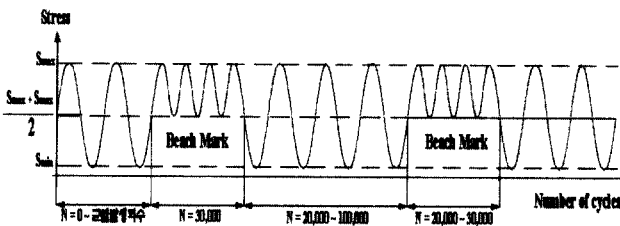


그림 3.3 비치마크도입 응력이력

사용된 피로시험기의 기종 및 용량은 표 3.6과 같고, 피로 시험시 하중재하속도는 재하하중의 크기와 피로시험기 용량에 따라 5~10Hz 범위에서 축방향으로 일정진폭하중을 재하하여 실시하였으며, 응력비는 0.1로 하였다.

또한, 피로균열의 발생 여부를 조사하기 위해 균열탐상 방법의 하나인 침투탐상법을 사용하였으며, 균열진전양상을 조사하기 위하여 반복회수에 따른 균열의 진전길이를 측정하였다. 이때 판두께 방향의 균열진전길이를 얻기 위해 비치마크(Beach Mark)법을 사용하였다.

한편, 대상 구조상세별 시험조건을 정리하여 나타내면 표 3.7과 같고, 피로시험 전경은 사진 3.1과 같다.

#### 4. 실험결과

피로시험에 앞서 맞대기 용접연결 시험편에 작용하는 공칭 응력을 알아보기 위해 정적시험을 실시하였다. 그림 3.2에 나타낸 바와 같이 시험편 중앙의 앞뒤면과 상하 용접끝단에서

표 3.7 시험편의 시험조건

시험편 분류	시험편 구분	폭 (mm)	두께 (mm)	단면적 (mm <sup>2</sup> )	P <sub>max</sub> (kN)	P <sub>min</sub> (kN)	응력 범위 (MPa)	응력비
SM570	B-1	100	40	4000	726.0	66.0	165.0	0.1
	B-2				968.0	88.0	220.0	
	B-3				1210.0	110.0	275.0	
POSTEN80	PB-1	100	10	1000	181.5	16.5	165.0	
	PB-2							
	PB-3				242.0	22.0	220.0	
	PB-4							
	PB-5				211.8	19.3	192.5	
	PB-6							
	PB-7							
	PB-8							

사진 3.1 피로시험 전경

15mm 떨어진 위치에 변형률 게이지를 각각 3개씩 부착하여 시험편 장착 후, 좌·우측 응력분포와 공칭응력을 조사하였다. 한편, 수치해석을 실시하여 얻은 계산공칭응력과 정적시험으로부터 얻은 실측공칭응력을 비교하여 검증하였다.

#### 4.1 실측공칭응력과 계산응력의 비교

맞대기 용접연결 시험편의 정적시험으로부터 측정된 공칭 응력과 수치해석에 의한 계산공칭응력을 정리하여 도식적으로 그림 4.1에 나타냈으며, 여기서 S<sub>mea</sub>는 정적시험으로부터 얻은 공칭응력이고, S<sub>cal</sub>는 수치해석 결과에 의한 계산공칭응력이다.

측정응력과 계산응력을 비교해 보면 피로시험편 제작시 초기변형이나 제작상 오차 등에 의해 대상 시험편별로 다소 차이는 있지만 대체로 실측치와 계산치가 잘 일치하는 경향을 보이고 있다.

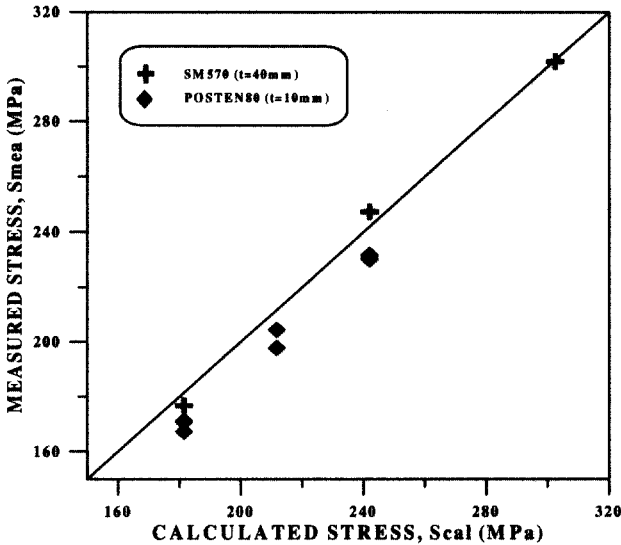


그림 4.1 실측공칭응력과 계산응력의 비교

#### 4.2 응력범위별 반복회수

본 논문의 대상 고강도강재를 사용하여 맞대기 용접연결 구조상세의 피로강도를 정량적으로 평가하기 위해 피로시험을 실시하였으며, 이로부터 얻은 응력범위별 시험편 파단까지의 반복회수를 정리하여 표 4.1에 나타내었다.

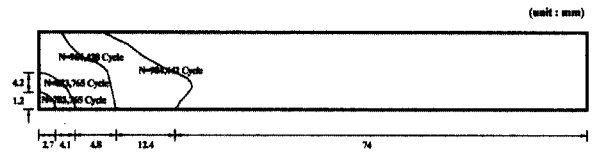
표 4.1 응력범위별 반복회수 결과

강재종류	시험편	응력범위 (MPa)	반복회수 (Nf)	비고
SM570 (t=40mm)	B-1	165.0	1,850,000	Run-out
	B-2	220.0	640,000	Run-out
	B-3	275.0	360,000	Run-out
POSTEN80 (t=10mm)	PB-1	165.0	2,878,000	
	PB-2		986,000	
	PB-3		995,000	
	PB-4	220.0	874,310	
	PB-5		981,690	
	PB-6		988,009	
	PB-7	192.5	540,034	
	PB-8		1,469,408	

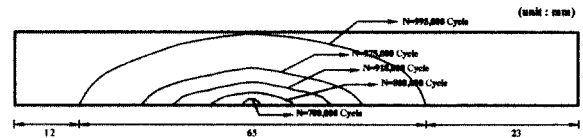
### 5. 실험결과 분석, 고찰

#### 5.1 피로균열 발생 및 파단면 특성

맞대기 용접연결부의 지단부 형상에 따라 피로균열의 발생 수명이 판이하게 다르게 나타나며 이는 S-N선도의 허용응력 범위와 균열발생수명과의 관계를 결정한다. 한편, 발생된 피



(a) PB-6 시험편의 파단면 모식도



(b) PB-3 시험편의 파단면 모식도

그림 5.1 파단면 모식도

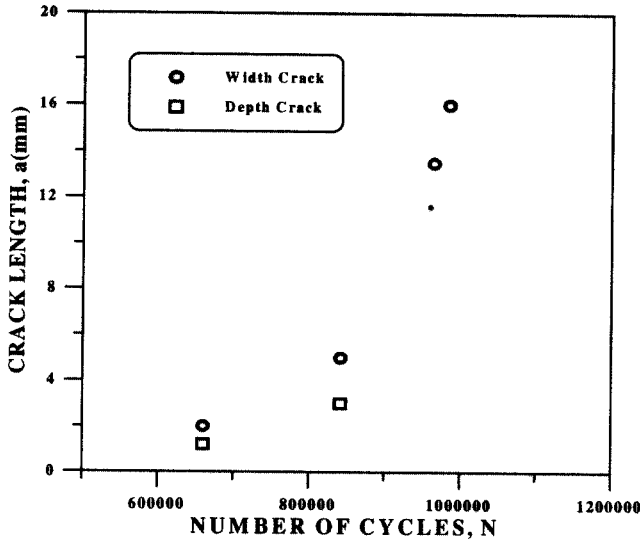
로균열의 위치에 따라 균열의 전파 메커니즘이 다르고 피로수명에 끼치는 영향도 다르다. 따라서 본 논문에서는 균열발생 상황과 진전 그리고 파단에 이르는 파괴특성을 조사하고자 Beach Mark 법을 사용하였으며, 그 결과 용접지단부에서의 피로균열 발생과 진전을 파단면 모식도로 나타내면 그림 5.1과 같다.

맞대기 용접연결부의 균열발생부위는 대부분 용접지단부의 단부와 부재의 폭 중앙부분에서 발생하였다. 초기균열이 단부에서 발생할 경우, 1/4 원의 형상으로 균열이 진전하다가 판통 균열화되면서 파단에 이르고 있으며, 초기 균열이 부재의 폭 중앙부분에서 발생할 경우 반포물선의 형상으로 균열이 진전됨을 알 수 있었다. 전반적으로 모재에서 균열이 발생하는 경우, 균열진전 수명이 크게 나타나며 용접지단부에서 균열이 발생할 경우, 균열이 급속히 진전되므로 이 부위에 대한 양질의 용접성 확보에 세심한 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

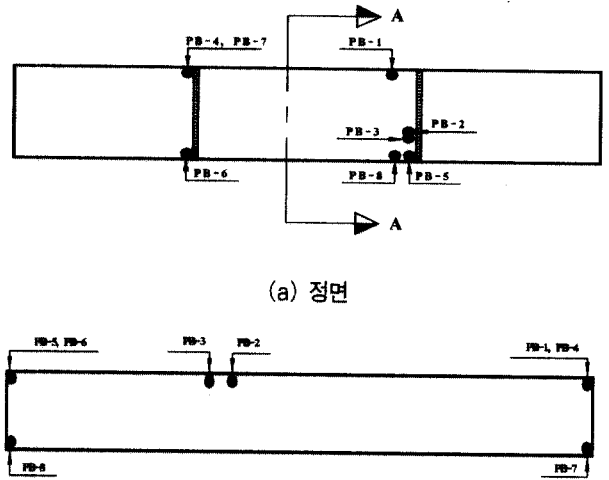
한편, 초기균열이 발생된 후, 그 진전에 따른 피로수명의 평가를 위해서는 반복회수와 그에 대응하는 균열길이의 측정 자료가 필요하며, PB-6 시험편의 경우, Beach Mark법을 사용하여 균열길이를 측정하였으며 PB-8 시험편의 경우에는 균열경을 사용하여 길이를 측정하여 얻은 균열진전곡선은 그림 5.2와 같다.

이를 살펴보면, 초기균열 발생시 균열끝 응력의 집중으로 균열의 진전이 다소 빠르게 진행되다가 어느 시점에서 응력이 이완되어 일정한 속도의 균열진전 현상을 보이고 있다. 그러나 어느 임계점에 이르러서는 탄성피로한계를 넘어 소성피로 상태로 돌입하면서 찢어짐과 함께 균열이 급속히 진전하다가 파단되는 일련의 파괴기구를 갖고 있다.

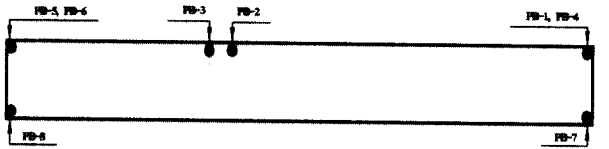
한편, 대상 피로시험편에 대한 피로균열 발생 및 진전에 따른 파괴특성을 규명하고자 피로시험을 종료한 후, 모재 혹은 용접지단부에서의 균열발생 및 Beach Mark에 의한



(a) PB-6 시험편의 a-N 선도

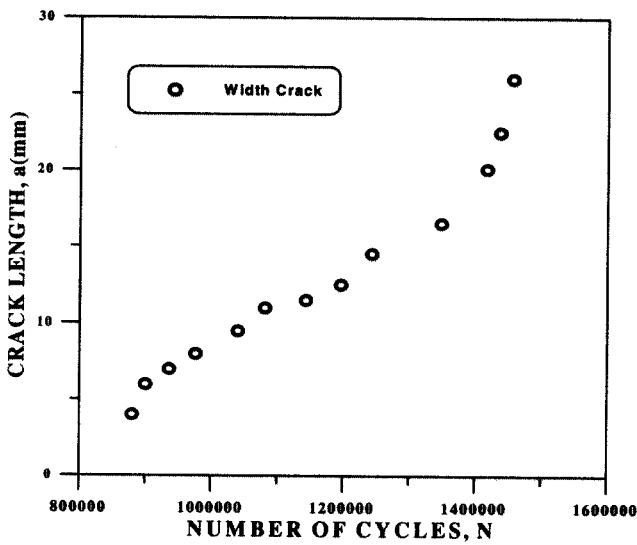


(a) 정면



(b) A - A면(파단면)

그림 5.3 초기균열 발생위치



(b) PB-8 시험편의 a-N 선도

그림 5.2 반복회수에 따른 균열진전곡선

표 5.1 파단시험편의 조사결과

시험편	초기균열			초기균열 발생위치	파단부위
	회수	폭 (mm)	두께 (mm)		
PB-1	128만	4	10	용접지단부에서 33mm의 부재단부	모재
PB-2	89만	14	-	부재단부에서 40mm	용접지단부
PB-3	70만	2	-	부재단부에서 44mm	용접지단부
PB-4	48만	2	5	부재 단부	용접지단부
PB-5	72만	3	2	부재 단부	용접지단부
PB-6	65만	2	1	부재 단부	용접지단부
PB-7	50만	-	-	부재 단부	용접지단부
PB-8	88만	4	8	부재 단부	용접지단부

사진 5.1 파단면 사진

균열의 진전상황 그리고 파단면을 조사하였다. 이를 정리하여 표 5.1에 제시하였으며 초기균열 발생위치를 그림 5.3에, 그리고 대표적인 파단면 형상을 사진 5.1에 제시하였다.

맞대기 용접연결 시험편에서 초기균열 발생위치는 PB-1 시험편을 제외하고는 모두 용접 지단부에서 발생하였으며, 대부분이 시험편 폭의 끝부분에서 발생하였다. 동일한 응력범위에서 조기에 파단된 PB-2, PB-3 그리고 PB-7 시험편의 경우,

지단부의 표면결합에서 균열이 발생되어 진전되었다. 또한 모재의 표면결합에서 균열이 발생하여 파단된 시험편도 있었다. 이로부터 언더 컷이나 노치 등의 지단부 표면결합에서는 응력 집중현상이 증대되어 초기균열 발생점이 되며 탄성피로거동에 의해 균열이 진전되다가 취성적인 파단으로 이어져 피로강도를 급격히 저하시키는 요인으로 작용한다. 특히 고강도강은 노치 감수성이 높기 때문에 용접 지단부 형상이 피로강도에 미치는 영향은 민감하므로 용접시공에 있어서 세심한 유의가 필요하며 용접지단부나 모재의 표면 마무리시 시험편에 결함이 없도록 하여야 할 것으로 판단된다.

5.2 S-N선도와 피로강도특성

완전용입 용접한 맞대기 용접연결 구조상세에 대한 피로강도등급은 표 5.2와 같이 국내 도로교 설계기준과 AASHTO에서는 "B"등급으로, JSSC에서는 "C"등급으로 규정하고 있으며,  $2 \times 10^6$ 회 기본 허용응력범위는 거의 같다.

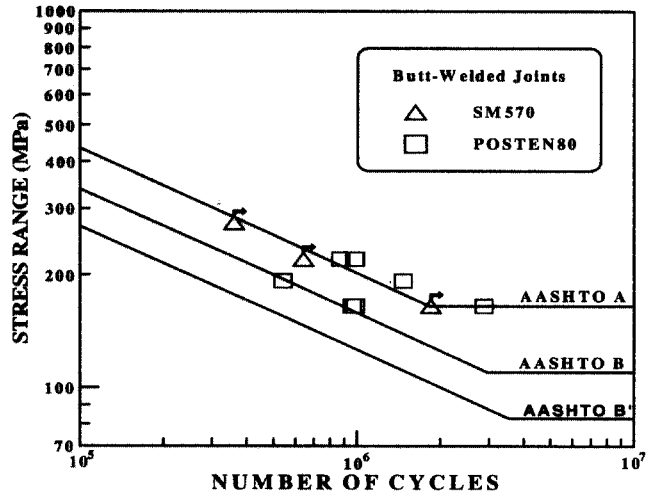
표 5.2 맞대기 용접연결의 피로강도 등급

구조상세	용접조건	구분	피로등급
맞대기 용접연결	완전용입용접 (grinding)	도로교 설계기준	B (124)
		AASHTO	B (124)
		JSSC	C (125)

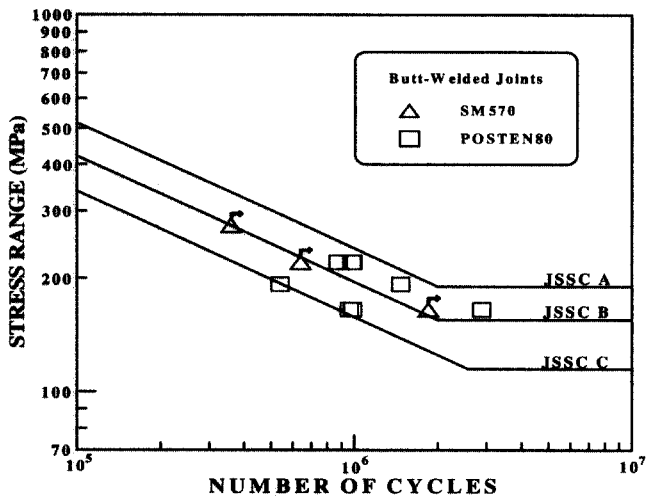
< ( )은 200만회 기준 허용피로응력범위(MPa) >

본 논문의 대상 고강도 강재인 SM570과 POSTEN80 강재에 대한 맞대기 용접연결부의 피로시험 결과를 S-N선도에 나타내면 그림 5.4와 같다. 여기서 피로시험시 파단되지 않은 시험편의 경우에는 S-N선도상에 →의 기호로 나타내었다.

POSTEN80 강재의 경우, 피로강도는 도로교 설계기준과 AASHTO 설계곡선의 B등급, JSSC에 대해서는 C등급을 만족하는 것으로 나타났다. AASHTO B등급과 JSSC C등급에 해당하는 설계곡선 부근에 위치한 PB-2, PB-3, PB-7은 표면 마무리시 그라인딩에 의한 용접지단부의 표면결합에 따른 원인으로 피로강도가 다른 시험체에 비해 다소 낮게 나타났다. 일본 강구조 피로설계지침에 의하면 고강도강은 노치에 대해 감수성이 높기 때문에 피로강도는 용접 지단 형상에 민감하므로 용접시공에 있어서는 세심한 유의가 필요하다고 제시하고 있으며, 본 피로시험에 사용된 시험편 중에서도 모재와 용접지단부에 표면결합의 존재로 인하여 피로강도가 같은 응력범위의 다른 시험편에 비해 1등급 정도 저하된 것으로 판단된다.



(a) 도로교설계기준, AASHTO



(b) JSSC

그림 5.4 공칭응력범위와 반복회수 선도

5.3 고강도 강재별 피로강도특성

맞대기 용접연결에 대하여 기존의 고강도강재와 피로강도를 비교, 분석하기 위해 인장강도 500MPa의 SM490B 강재 (non-grinding)와 인장강도 600MPa의 SM520B 강재 (grinding), 그리고 HT50~HT70 강재(용접인여두께삭제)에 대한 S-N선도를 정리하여 본 시험결과와 함께 그림 5.5에 나타내었다.

그림 5.5의 S-N선도의 회귀직선으로부터 다양한 고강도 강재를 사용한 맞대기 용접연결 구조상세에 대한 기존의 연구결과와 비교하면, 용접지단부를 그라인딩 처리 안한 SM490B 강재가 기타 그라인딩 처리한 고강도 강재보다 피로강도가 낮게 나타나고 있어 표면 마무리 여부에 따라 피로강도 1등급의 차이가 나타남을 확인할 수 있었다.



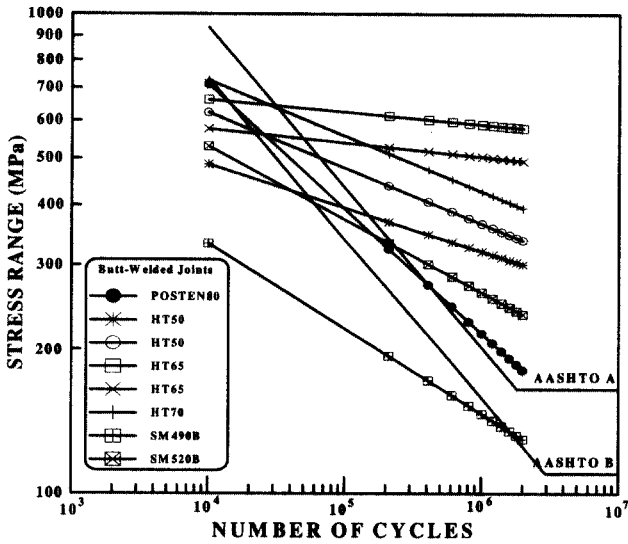


그림 5.5 S-N선도와 설계곡선의 비교

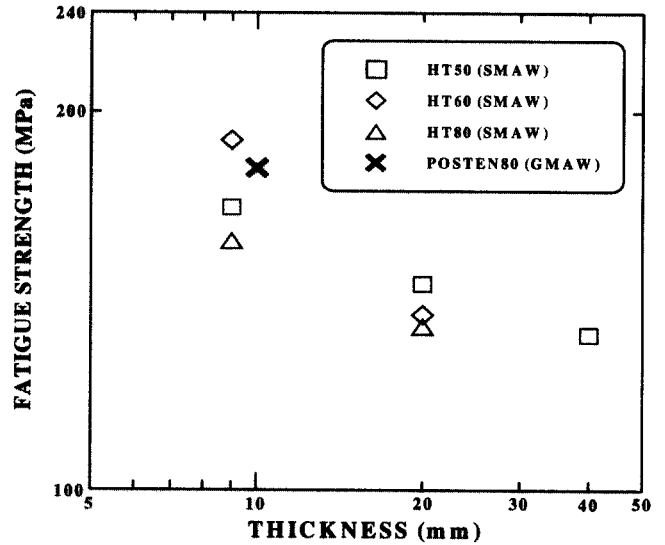


그림 5.7  $2 \times 10^6$ 회 피로강도와 판두께의 관계

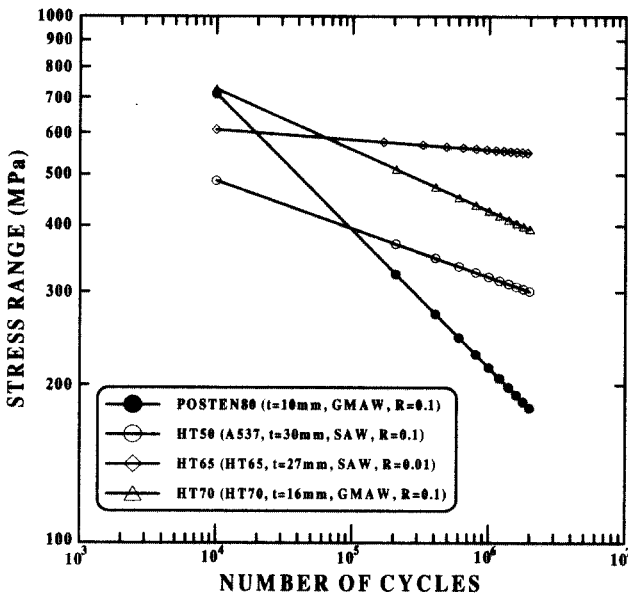


그림 5.6 S-N선도에 대한 강종 비교

POSTEN80 강재에 대한 회귀직선으로부터, 저수명영역에 있어 피로강도는 AASHTO B등급에 해당하며, 장수명영역에서는 A등급을 만족하고 있어 전반적으로 피로강도 등급 B를 만족함을 알 수 있었다.

한편, 용접 잉여두께를 삭제한 맞대기 용접연결 구조상세에 대해 고강도 강재별 S-N선도를 정리하여 그림 5.6에 나타내었다.

이로부터 표면성상이나 용접부 강도에 따라 다소 차이는 있지만, 인장강도가 낮은 강재의 S-N선도상의 기울기가 POSTEN80 강재와 HT70 강재와 같이 인장강도가 큰 강재의 기울기보다 완만해지는 경향이 나타나고 있다. 따라서 인장강도가 작은 경우, 기울기의 변화 정도는 작게 나타나다가

인장강도가 커짐에 따라 기울기의 변화 폭이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

#### 5.4 판두께 효과

맞대기 용접연결부에서 강재 종류별 200만회 피로강도와 판두께와의 관계를 조사하기 위해 용접 그대로의 HT50~HT80 강재와 그라인딩한 POSTEN80 강재에 대해 정리하여 나타내면 그림 5.7과 같다.

이를 살펴보면, 시험편 제작 및 시험조건에 의해 다소 편차는 있지만, 판 두께가 커지면 피로강도는 log-log 선상에서 거의 선형적으로 감소하는 경향이 나타나며 판두께가 두꺼울수록 피로강도는 낮아짐을 알 수 있으며, 강도의 변화에 따른 판두께-피로강도 선도의 기울기 변화에 대한 뚜렷한 경향은 나타나고 있지 않다. 본 대상 고강도 강재인 POSTEN80 강재에 있어 판두께 10mm 부근에 대한 피로강도는 HT80 강재에 비해서는 다소 크며, HT50과 HT60 강재의 피로강도와 비슷한 경향을 나타내고 있어 맞대기 용접연결의 구조상세에 있어 인장강도와 피로강도사이의 일관성 있는 상관관계는 나타나고 있지 않다.

#### 6. 결론

고강도강인 SM570과 POSTEN80 강재를 사용한 맞대기 용접연결구조상세에 대해 피로강도 특성을 조사할 목적으로 시험편을 제작하여 피로시험을 실시하였다. 그 분석 결과로부터 기존 고강도 강재와의 S-N선도 및 피로파괴거동을 비교, 분석하여 대상 고강도 강재에 대한 피로강도 특성을 규명하였다.

- (1) POSTEN80 강재를 이용한 맞대기 용접연결 구조상의 피로강도는 도로교 설계기준과 AASHTO 피로설계곡선의 B등급, JSSC 피로설계곡선에 대해서는 C등급에 해당하는 것으로 나타났다.
- (2) 피로균열은 대부분 용접지단의 부재단부에서 발생하였으나 모재에서도 발생되어 파단에 이르는 경우도 있다. 이때, 모재 혹은 용접지단부에 표면결함이 있는 경우는 같은 응력범위의 다른 시험편에 대해 1등급 정도의 피로강도가 저하되는 것으로 나타나 용접, 표면처리, 품질관리 등에 세심한 유의가 필요함을 알 수 있었다.
- (3) 맞대기 용접연결의 경우 모재의 판두께가 커질수록 피로강도는 낮아지는 경향이 있으나 모재의 인장강도나 피로강도사이에는 뚜렷한 관계가 나타나지 않음을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. Rolfe, S. T. and Barsom, J. M., "Fracture and Fatigue Control in Structure", Prentice-Hall, 1977.
2. 日本鋼構造協會, "銲接継手の疲れ強さに關する實驗的研究-リブ十字全面隅肉容接継手の疲れ強さ", JSSC, Vol.7, No.72, 1971, pp.17~38.
3. 日本造船研究協會, "第202研究部會海洋構造物の疲勞設計法及び銲接部の品質に關する研究報告書, 研究資料, No.395, 1991.
4. AASHTO, "LRFD Bridge Design Specifications", Second Edition, American Association of Steel Highway and Transportation Officials, 1998.
5. 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, 1993.
6. BS5400, "Steel Concrete Composite Bridge : Part 10", Code of Practice on Fatigue, British Standards Institution, pp.1~54, 1980.
7. 한국도로교통협회, "도로교설계기준", 2000.
8. 김대영, "鋼鐵道橋 連結部の疲勞舉動에 關한 研究", 한양대학교 대학원 박사학위 논문 1995. 6.
9. E. G. Signes et al., "Factors Affecting the Fatigue Strength of Welded High Strength Steels", British Welding Journal, 14, NO. 3, 1967.
10. J. W. Fisher et al., "Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams," NCHRP Report 102, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1970.
11. F. Watkinson et al., "The Fatigue Strength of Welded Joints in High Strength Steels and Methods for Its Improvement", Proceedings : Conference on Fatigue of Welded Structures, The Welding Institute, Brighton, England, July 1970.
12. J. W. Fisher et al., "Fatigue Strength of Steel Beams with Transverse Stiffness and Attachments", NCHRP Report 147, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1974.
13. "Welding Inspection", American Welding Society, Miami, 1980.
14. R. D. Stout and W. D. Doty, "Weldability of Steels", Welding Research Council, New York, 1978.
15. H. C. Campbell, "Certification Manual for Welding Inspectors", American Welding Society, Miami, 1977.

(접수일자 : 2002년 1월 17일)