

블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로특성에 관한 연구

A Study on the Fatigue Characteristics of Transverse Butt-Welded Joints containing Blowholes

장 동 일¹⁾ · 경 갑 수²⁾ · 조 광 현³⁾ · 홍 성 욱⁴⁾

Chang, Dong Il Kyung, Kab Soo Cho, Kwang Hyun Hong, Sung Wook

요 약 : 이 연구에서는 강교량 주부재의 연결에 주로 사용되는 횡방향 맞대기 용접부를 대상으로 입체결합의 일종인 블로우홀을 인위적으로 도입하고 블로우홀의 크기 및 형상에 따른 피로특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일련의 실험을 실시하였다. 정적실험결과 블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 정적강도는 블로우홀의 크기 및 형상에 관계없이 일정한 경향을 나타내었다. 피로실험결과 블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로강도는 용접루트부 내부에 존재하는 블로우홀의 기하학적 형상이나 결함률에 크게 영향을 받으므로 이로부터 결함률과 피로강도 사이의 상관관계를 정량적으로 규명하였다. 또한 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로수명을 정확하게 산정할 수 있었다.

ABSTRACT : In this study, blowholes, a kind of solid defects, were intentionally introduced in transverse butt-welded joints which are widely used for the connection of main members in steel structures to evaluate the fatigue characteristics of these joints with blowholes according to the difference of the size and shape of blowholes, and a series of tests were performed. Static test results proved that the static strength of these joints with blowholes was not affected by their size and shape. From the fatigue test results on these joints with blowholes, the size and shape of blowholes inside the weld metals were strongly affected in fatigue strength, and we suggested the relationship between fatigue strength and their size and shape quantitatively. Also, Using the relationship of fatigue crack growth rate and stress intensity factor range, the fatigue life of transverse butt-welded joints with blowholes can be estimated properly.

1) 정희원, 한양대학교 도시환경건설공학과군 교수, 공학박사
2) 정희원, 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실 책임연구원, 공학박사
3) 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정
4) 정희원, 한림정보산업대학 토목과 전임강사, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

핵심 용어 : 블로우홀, 횡방향 맞대기 용접부, 피로균열성장속도, 응력확대 계수범위, 파괴역학적 해석, 피로수명

KEYWORDS : Blowhole, Transverse Butt-Welded Joints, Fatigue Crack Growth Rate, Stress Intensity Factor Range, Fracture Mechanics Analysis, Fatigue Life

1. 서론

대부분의 강구조물 특히, 강상자형교나 강판형교와 같은 강교량에서 주부재를 연결하는 경우 강재중량을 감소하거나 구조물의 미관을 고려해서 횡방향 맞대기 용접이음방법을 주로 적용하고 있다.

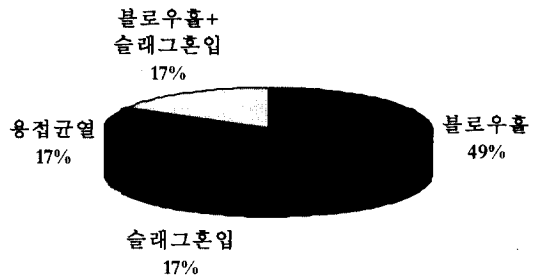
그러나 이러한 횡방향 맞대기 이음부의 용접부 내부에는 제작과정 중에 불가피하게 용접결함을 포함하게 되고 경우에 따라서는 용접결함부로부터 피로균열이 발생하여 구조물의 피로성능을 저하시킬 수 있기 때문에 강교량의 제작과정 중에서 용접결함의 크기를 허용결함크기 이내로 억제하는 것은 매우 중요하다.

용접부 내부에서 발생하는 용접결함의 종류는 용접방법에 따라 다양한데, 일반적으로 강교량의 용접에 많이 사용되는 자동용접법(SAW)과 반자동용접법(CO₂ 용접)으로 제작한 강교량 용접부에서 주로 발생하는 용접결함을 종류별로 구분하여 나타내면 그림 1.1과 같다.

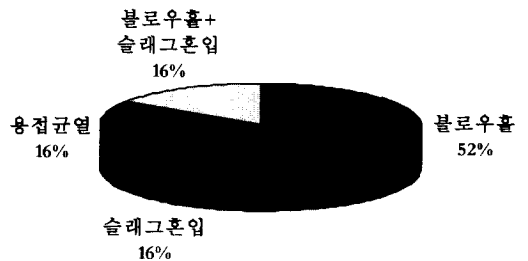
그림 1.1에서와 같이 자동용접법이나 반자동용접법에서 발생할 수 있는 용접결함 중 블로우홀(Blowhole)이 약 40% 정도로 가장 많은 빈도를 차지하고 있으며, 슬래그혼입(Slag Inclusion)이나 용접균열(Weld Crack) 또한 다수 차지하고 있음을 알 수 있다.

따라서 앞에서 설명한 다양한 용접결함 중에서도 가장 많은 빈도를 차지하고 있는 블로우홀과 횡방향 맞대기 용접부의 피로강도 사이의 관계를 정량적으로 평가하는 것이 횡방향 맞대기 용접부의 피로특성을 정량적으로 규명하는데 있어서 가장 중요한 과제일 것이다.

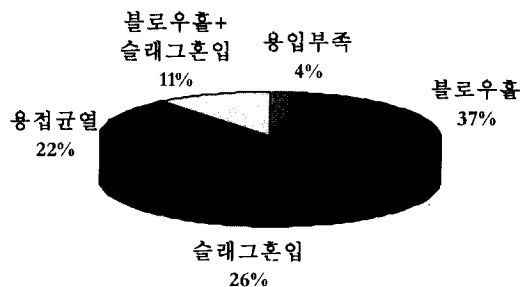
田島 및 奥川[1978]과 旭, 岸本 및 帆足[1980]은 800MPa급 고장력강을 이용해서 제작



(a) 자동용접시 발생하는 용접결함



(b) 반자동용접시 발생하는 용접결함



(c) 모든 용접방법에 대한 용접결함

그림 1.1 용접방법별 용접결함의 종류

한 실물 상자형단면 부재에 대해서 피로실험을 실시한 결과 각부분용입 용접루트부에 존재하는 블로우홀과 잔류응력 때문에 부재의 피로강도가 저하한다고 보고하고 있다.

夏目, 寺田 및 深澤(1983)은 블로우홀을 파이프상(높이 > 크기) 및 구상(球狀)(높이 ≈ 크기)의 블로우홀과 피로균열발생특성을 검토한 결과 파단에 이르는 것은 파이프상의 블로우홀에서만 나타난다고 보고하고 있다.

한편 블로우홀을 가진 종방향 맞대기 용접부의 2×10⁶회 피로강도는 V-형개선용접한 경우와 필릿용접한 경우에 약 10% 정도 저하하고 대형실물 시험체와 비교하면 대형실물 시험체의 피로강도가 약 35% 정도 저하한다고 보고하고 있다.

Miki, Nishino, Hirabayashi 및 Ohga (1982)는 블로우홀을 가진 종방향 맞대기 용접부에 대한 실물 트러스 격점부 시험체 및 소형시험체에 대한 피로실험결과 실물시험체의 피로강도는 잔류응력의 영향 때문에 소형시험체의 경우보다 피로강도가 저하하는 경향을 나타낸다고 보고하고 있으며, 실물 및 소형시험체 모두 용접부 내부에 내재된 블로우홀의 크기가 증가함에 따라 피로강도는 급격하게 저하한다고 보고하고 있다.

한편 파이프상의 블로우홀에서는 미세한 반원형의 피로균열이 블로우홀 벽면의 여러 곳에서 동시에 발생하고 이들이 합체되어 1개의 반타원형의 균열로 성장하고 최종적으로 동전모양의 원형균열형태를 이루어서 성장한다고 보고하고 있다.

그러나 이러한 연구결과만으로는 블로우홀과 같은 용접결함이 횡방향 맞대기 용접부의 피로강도에 미치는 영향에 대해서 정량적으로 설명하기에는 아직 실험자료가 많이 부족한 것으로 생각된다.

따라서 이 연구에서는 현재 강교량 주부재의 연결에 주로 사용되는 횡방향 맞대기 용접부를 대상으로 발생빈도가 가장 높은 입체결합의 일종인 블로우홀을 인위적으로 도입하여 블로우홀 크기 및 형상에 따른 피로강도특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

또한 블로우홀의 크기나 형상에 따른 피로강도특성과 피로균열성장특성을 기존의 연구결과인 용입부족 결함과 비교분석함으로써 용접결함이

횡방향 맞대기 용접부의 피로특성에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다.

2. 실험

2.1 시험체

이 연구에서 사용한 시험체는 현재 국내에서 널리 사용되는 용접구조용 압연강재인 SWS 490B로서 이의 화학성분 및 물리적 성질은 표 2.1 및 표 2.2와 같다.

표 2.1 화학성분

강종	화 학 성 분 (W %)				
	C	Si	Mn	P	S
SWS490B	0.15	0.32	1.25	0.012	0.007

표 2.2 물리적 성질

강종	물 리 적 성 질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)
SWS490B	340.3	519.8	205.3	27.6

2.2 용접방법

이 연구에서 사용한 시험체는 입체결합중 가장 빈번하게 발생하고 있는 블로우홀(Blowhole, 이하 BH로 약칭) 결함을 인위적으로 도입하기 위해서 맞대기면을 V-형으로 개선하고 반자동용접법인 플럭스코어드아크용접(FCAW)법을 이용해서 그림 2.1과 같이 용접을 실시하였다.

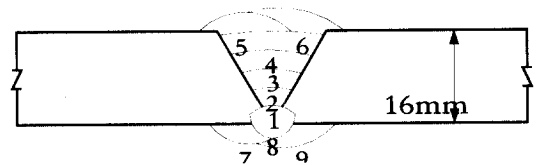


그림 2.1 용접방법

또한 시험체 내부에 블로우홀을 인위적으로 도입하기 위해서 2층용접이 종료된 후 표면에 청테이프를 부착하고 다시 용접을 실시하였으며, 용접이 종료된 후에는 방사선투과시험을 실시해서 블로우홀의 도입유무를 확인하였다.

이 연구에서 사용한 블로우홀 시험체의 실험변수는 *None*(블로우홀 미존재, 결함률 0%), *Small*(폭 1mm, 1점의 청테이프부착, 결함률 5~10%), *Medium*(폭 2mm, 2점의 청테이프부착, 결함률 10~20%), *Large*(폭 3mm, 3점의 청테이프부착, 결함률 20~30%)로 구분해서 시험체를 제작하였으며, 결함률의 구분은 방사선투과시험(RT)의 필름을 이용하였다.

이 연구에서 사용한 시험체의 각 층별 용접방법 및 용접조건은 표 2.3 및 표 2.4와 같다.

표 2.3 각 층별 용접방법

층수 (pass)	봉경 (mm)	전류 (amp.)	전압 (volt)	속도 (cm/min)	입열량 (J/cm)
1, 2	1.2	220	27	20~30	14,256
3,4,7	1.2	250	30	20~30	18,000
5,6,8,9	1.2	300	32	20~30	23,040

표 2.4 용접조건

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

또한 용접재료의 화학성분 및 물리적 성질은 표 2.5 및 표 2.6과 같다.

표 2.5 용접재료의 화학성분

종 류	화 학 성 분 (W%)				
	C	Si	Mn	P	S
DW55L	0.04	0.38	1.36	0.012	0.009

표 2.6 용접재료의 물리적 성질

종 류	물 리 적 성 질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신률 (%)	충격치(J) -60℃
	DW55L	530	600	27

한편 이 연구에서 사용한 시험체는 ASTM E8M-92(1992)에서 규정하고 있는 표준시험체의 형상과 치수에 준해서 그림 2.2와 같이 제작하였다.

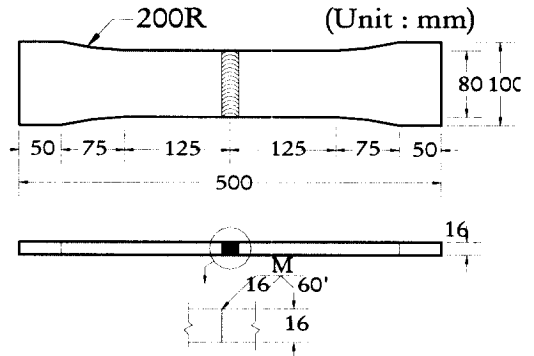


그림 2.2 시험체 형상 및 치수

2.3 실험방법

블로우홀의 크기 및 형상에 따른 정적강도특성, 즉 인장강도와 항복강도의 특성을 정량적으로 평가하기 위해서 정적실험을 실시하였다.

정적실험시 하중재하속도를 1ton/min으로 일정하게 유지하면서 하중을 증가시켰으며, 시험체가 항복하기 전에는 하중제어(Load Control), 항복한 후에는 변형률제어(Strain Control)를 실시해서 공칭변형률을 측정하고 이 결과로부터 응력-변형률 선도를 작성하여 정적강도특성을 정량적으로 평가하였다.

한편 블로우홀의 크기 및 형상에 따른 피로강도특성을 정량적으로 평가하기 위해서 인장피로 실험(Tension to Tension Test)을 실시하였다. 피로실험시 작용하중은 일정진폭하중(Constant Amplitude Loading)을 이용하였고 하중재하속도는 7.5Hz, 응력비는 0.1로 하였다.

또한 블로우홀에서의 피로균열 발생 및 성장특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일정반복회수 별로 비치마크(Beachmark)를 도입하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정적강도특성

블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부에 대한 정적실험결과로부터 응력-변형률 선도의 일례를 나타내면 그림 3.1과 같으며, 블로우홀의 크기에 따른 횡방향 맞대기 용접부의 인장강도와 항복강도를 정리하면 표 3.1과 같다.

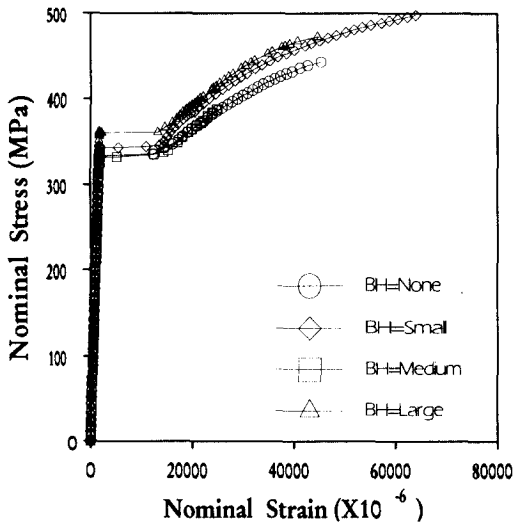


그림 3.1 응력-변형률 선도의 일례

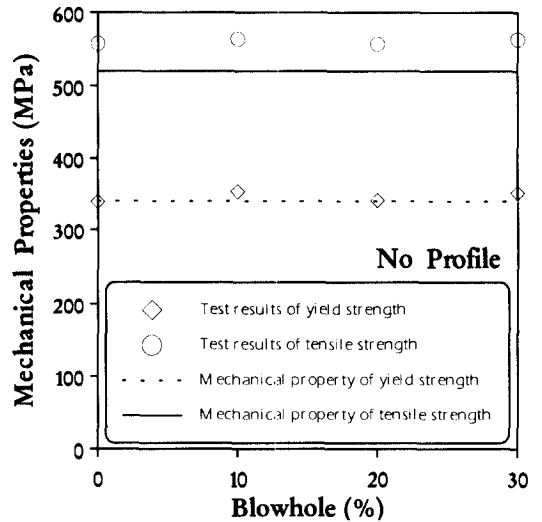
표 3.1 정적실험결과

블로우홀	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	$\frac{\sigma_u}{\sigma_y}$
None	556.2	339.4	1.64
Small	562.3	353.4	1.59
Medium	555.9	341.3	1.63
Large	562.3	351.9	1.60

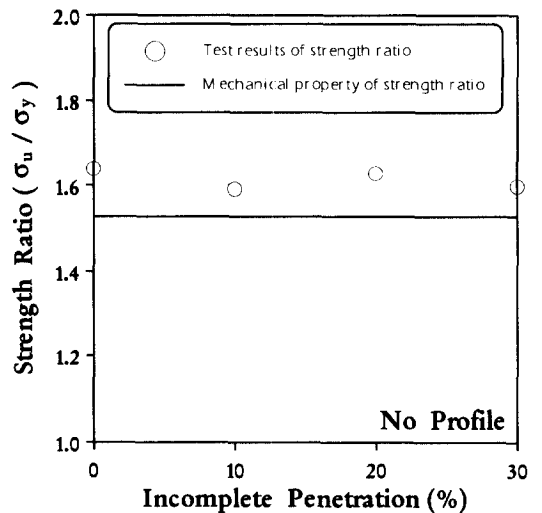
[주] σ_u : 인장강도, σ_y : 항복강도

또한 그림 3.1 및 표 3.1에서 나타난 정적시험 결과에 기초해서 블로우홀 크기에 따른 횡방향 맞대기 용접부의 정적강도특성을 모재의 물리적 성질과 비교해서 나타내면 그림 3.2와 같으며, 파단면 사진을 나타내면 그림 3.3과 같다.

그림 3.2에서 나타낸 바와 같이 블로우홀을 갖는 횡방향 맞대기 용접부의 경우 블로우홀 크기와 형상에 관계없이 정적강도특성은 항상 일정함을 알 수 있었다.



(a) 인장강도 및 항복강도의 변화특성

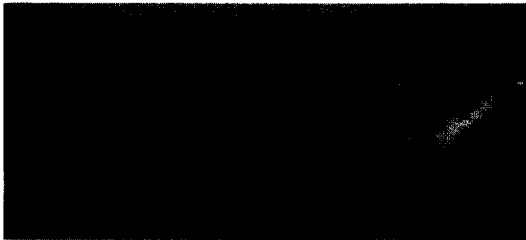


(b) 항복강도에 대한 인장강도비

그림 3.2 정적강도특성



(a) BH=Small



(b) BH=Large

그림 3.3 파단면 특성

또한 그림 3.3에서 나타난 바와 같이 파단은 모두 모재부에서 발생하였는데 이상의 결과로부터 블로우홀과 같은 불연속적인 용접결함은 용입부족 시험체에 대한 연구결과[김학재, 1998]와는 달리 횡방향 맞대기 용접부의 정적강도에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

3.2 피로강도특성

최초피로실험은 비드를 삭제하지 않은 상태에서 실시하였는데 피로실험결과 피로파괴양상이 블로우홀의 크기와 형상에 관계없이 용접지단부에서 피로균열이 발생하여 파단되었기 때문에 블로우홀에서의 피로파괴양상을 확인할 수 없었다.

따라서 이 연구에서는 블로우홀에서 피로파괴가 발생하도록 하기 위해서 비드를 완전히 삭제한 후 피로실험을 실시하였으며, 피로실험결과로부터 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 그림 3.4와 같으며, 이를 회귀분석법을 이용해서 관계식으로 나타내면 표 3.2와 같다.

그림 3.4에서 나타난 실선과 점선은 각각 한국

의 도로교 표준시방서[1996], 미국의 AASHTO [1996]과 일본의 JSSC[1993]의 피로설계지침에서 규정하고 있는 비드를 삭제 또는 미삭제한 횡방향 맞대기 용접부에 대한 피로강도등급을 나타낸다.

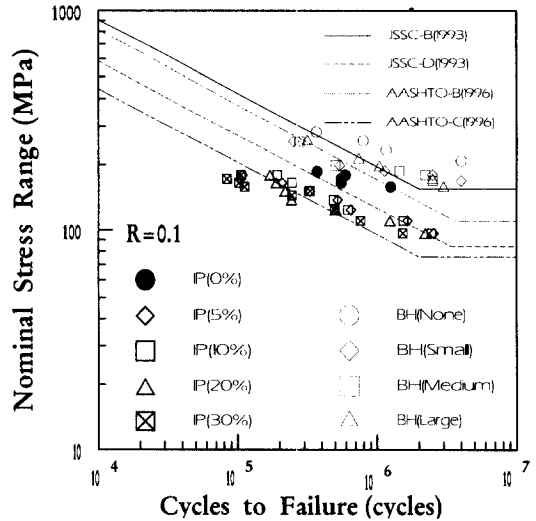


그림 3.4 공칭응력범위-반복회수 선도

표 3.2 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계식

시험체 종류	회귀분석식	2×10^6 회 피로강도 (MPa)	피로강도 감소율 (%)
BH=None	$0.128 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.28$	224.89	100
BH=Small	$0.132 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.11$	180.61	80
BH=Medium	$0.152 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.38$	176.59	78
BH=Large	$0.206 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 8.14$	172.67	77

그림 3.4에서 알 수 있는 바와 같이 비드를 삭제한 완전용입된 횡방향 맞대기 용접부의 2×10^6 회 피로강도는 도로교표준시방서, AASHTO와 JSSC에서 규정하는 피로강도등급인 B-등급을 만족하고 있으나 블로우홀이 존재하는 경우에는 시방서의 기준을 만족하지 않음을 알 수 있었다. 또한 김학재(1998)의 연구결과에서도 알 수 있는 바와 같이 비드를 삭제하지 않은 횡방향 맞대기 용접부의 2×10^6 회 피로강도는 AASHTO에서 규정하는 C-등급과 JSSC에서 규정하는 D-등급을

만족하고 있으나 비드를 삭제한 시험체의 경우와 비교하면 비드를 삭제한 경우 용접지단부의 응력 집중원이 제거됨에 따라서 피로강도가 매우 향상됨을 알 수 있었다.

블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 경우 허용피로한계를 *JSSC*를 기준으로 하면 *D*-등급, *AASHTO*를 기준으로 하면 *B'*-등급으로 결정하는 것이 타당함을 알 수 있었으며, 피로실험결과 응력범위-반복회수선도의 기울기가 기존 시방서의 기준보다 다소 완만하게 나타내는 경향을 확인할 수 있었다.

그러나 용입부족(IP) 시험체의 피로실험결과 [김학재, 1998]와 비교하면 블로우홀을 가진 시험체의 피로강도 감소정도가 용입부족을 가진 시험체의 피로강도 감소정도보다 완만함을 알 수 있다.

이와 같은 이유로는 용접결함의 특성상 용입부족의 경우 결함이 용접선 전체길이에 걸쳐서 연속적으로 분포하고 판통균열의 형태로 성장하는 특성을 가지고 있으며, 블로우홀의 경우는 블로우홀의 여러 부분에서 균열이 동시다발적으로 발생하여 타원형 및 원형형태의 균열로 성장하기 때문에 용입부족 시험체의 경우 블로우홀 시험체보다 피로수명이 짧아지기 때문인 것으로 생각된다.

또한 표 3.2에서 알 수 있는 바와 같이 완전용입된 횡방향 맞대기 용접부의 2×10^6 회 피로강도를 100으로 간주해서 *Small*인 경우에는 약 20%, *Medium*인 경우에는 약 22%, *Large*인 경우에는 약 23% 피로강도가 감소하는 것을 확인하였으며, 블로우홀의 크기가 증가함에 따라 $\Delta\sigma$ -*N* 선도의 기울기가 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 이상의 결과로부터 블로우홀 크기에 따른 2×10^6 회 피로강도 감소량을 나타내면 그림 3.5와 같으며, 여기서는 본 연구에서 사용한 강재인 *SWS490B*에 대한 실험결과와 Homes[1938], Masi 및 Erra[1953]가 이용한 연강(*Mild Steel*)으로 제작한 횡방향 맞대기 용접부에 대한 실험결과를 같이 나타내고 있다.

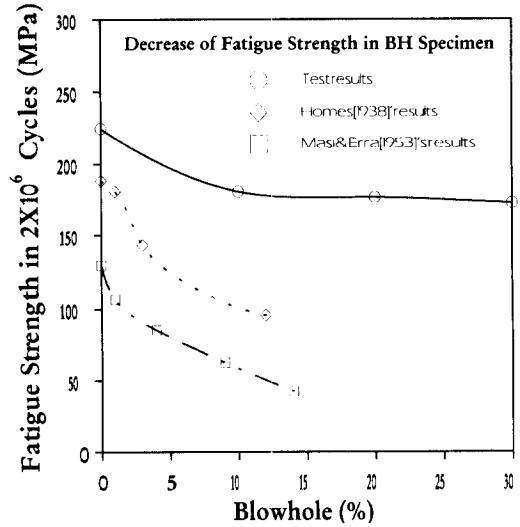


그림 3.5 블로우홀 크기에 따른 피로강도 감소량

그림 3.5에서 나타난 바와 같이 비드를 삭제한 횡방향 맞대기 용접부의 2×10^6 회 피로강도는 결함률이 증가함에 따라 급격하게 감소하고 결함률에 따른 피로강도의 감소정도는 결함률과 반드시 비례하지 않음을 알 수 있었다. 또한 기존 연구결과와 비교하면 비교적 유사한 경향을 나타내고 있으나 이 연구결과보다 피로강도가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 사용강재의 차이, 용접방법 및 조건의 차이, 판두께의 차이 등의 여러 시험조건의 특성차이에 기인한 것으로 생각된다.

한편 그림 3.5의 결과를 이용해서 피로강도 감소량에 따른 블로우홀의 결함률과 2×10^6 회 피로강도의 관계로 회귀분석하면 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

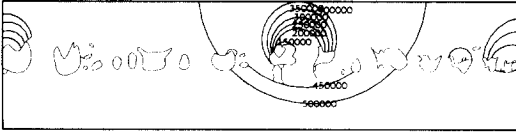
$$(\Delta\sigma_f)(BH)^{0.0169} = 185.38 \quad (3.1)$$

여기서, BH는 블로우홀 크기(%), $\Delta\sigma_f$ 는 2×10^6 회 피로강도(MPa)이다.

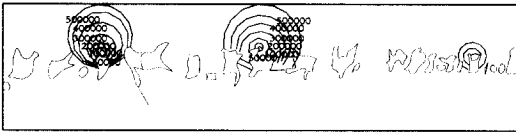
3.3 파단면특성

블로우홀 크기 및 형상에 따른 파단면 특성을

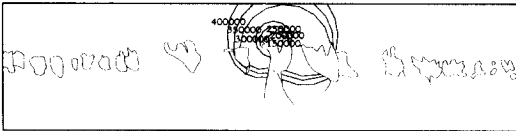
조사하기 위해서 피로실험을 종료한 후 파단면 형상의 일례를 나타내면 그림 3.6 및 그림 3.7과 같다.



(a) BH=None 시험체

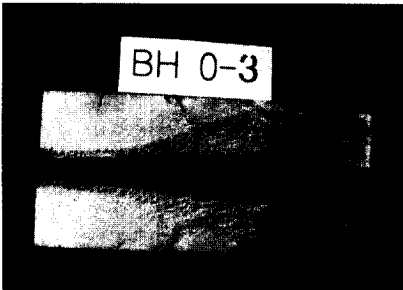


(b) BH=Small 시험체

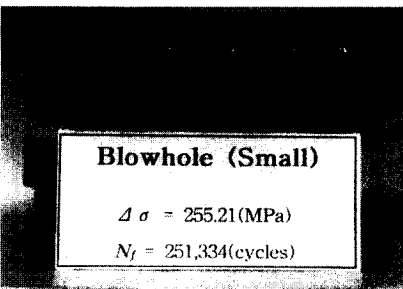


(c) BH=Large 시험체

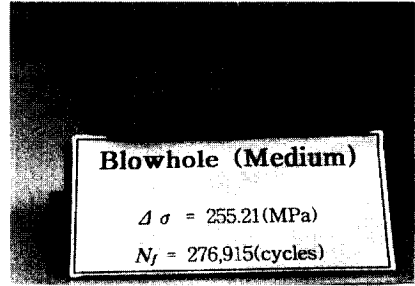
그림 3.6 피로실험 결과에 따른 파단면 모식도



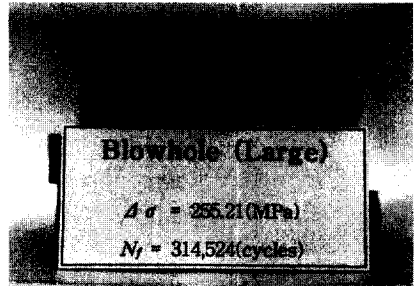
(a) BH=None 시험체



(b) BH=Small 시험체



(c) BH=Medium 시험체



(d) BH=Large 시험체

그림 3.7 피로실험 결과에 따른 파단면 형상

그림 3.6 및 그림 3.7에서 알 수 있는 바와 같이 본 시험체에 도입된 블로우홀은 구상(球狀)의 것으로 크기가 상대적으로 큰 1~2개의 블로우홀 벽면의 여러 부분에서 피로균열이 동시에 발생하고 이것이 만타원 균열(Semi-Elliptical Crack)의 형태로 성장하다가 서로 합체되어 하나의 원형균열(Circular Crack) 또는 타원형균열(Elliptical Crack)을 형성하고 이러한 형태의 균열이 동전모양의 균열(Penny-shaped crack)로 성장하여 파단에 이르는 것을 비치마크시험결과로부터 확인할 수 있었다.

4. 파괴역학적 해석

강구조물이 피로파괴하는 과정은 피로균열발생 과정, 피로균열성장과정, 피로파괴과정의 3단계로 구분할 수 있다.

피로균열발생수명은 비교적 거시적으로 균열이 발생하는 수명으로 정의하지만 용접지단부의 미

세한 언더컷이나 용접루트부의 블로우홀 등의 용접결합이 피로균열의 기점이 되는 용접부재의 경우에는 부재의 전체수명에서 차지하는 균열발생수명의 비율은 매우 작고 수명의 대부분을 피로균열성장수명이 차지하기 때문에 일반적으로 피로균열발생수명은 무시한다.

피로균열성장속도는 응력확대계수범위의 함수로 나타낼 수 있으며, 피로균열성장수명 N_p 는 Paris 및 Erdogan[1963]이 제안한 식 (4.1)로부터 산정할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4.1)$$

또한 식 (4.1)의 응력확대계수범위 ΔK 는 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = F(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.2)$$

한편 식 (4.2)에서 $F(a)$ 는 균열형상에 따른 보정계수로서 블로우홀, 슬래그혼입 등에서 발생하는 피로균열에 대해 파괴역학적인 방법을 적용하기 위해서 Sneddon[1973]은 블로우홀이나 슬래그 등을 갖는 무한판이 일정인장응력을 받을 때 이를 원형의 내부균열로 간주하고 보정계수를 식 (4.3)와 같이 정의하고 있다.

$$F(a) = \frac{2}{\pi} \quad (4.3)$$

이와 같이 블로우홀의 형상이 피로강도에 미치는 영향에 대해서는 ASME Code [1983]에서는 보일러나 압력용기 내부에 존재하는 블로우홀을 타원형 균열로 간주하여 파괴역학적 방법을 적용한 예가 있다. 또한 Miki[1982, 1984, 1987]는 블로우홀을 임의의 공극으로 간주해서 공극의 벽주위에 작은 초기균열을 갖는 구형의 균열로 간주해서 사용강재의 등급별로 식 (4.4)와 같이 블로우홀의 직경을 산정한 예도 있으며, 균열형상에 대한 보정계수도 제안하고 있다.

$$2a_e = 0.90 \cdot W^{0.22} \cdot H^{0.47} \quad (500\text{MPa급})$$

$$2a_e = 0.94 \cdot W^{0.29} \cdot H^{0.48} \quad (600\text{MPa급}) \quad (4.4)$$

여기서 a_e : 원형균열에서의 반지름

W : 블로우홀의 폭

H : 블로우홀의 높이

따라서 본 연구에서는 식 (4.3)에서 제시한 보정계수 $F(a)$ 를 이용해서 응력확대계수범위 ΔK 를 식 (4.5)과 같이 산정하였다.

$$\Delta K = \frac{2}{\pi} \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.5)$$

따라서 피로시험이 종료된 후 피로균열이 발생한 블로우홀을 대상으로 초기균열을 식 (4.4)를 이용해서 원형균열로 간주하고 비치마크시험결과를 이용해서 피로균열의 성장과정을 관찰하고 이 결과에 기초해서 균열길이와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 그림 4.1과 같다.

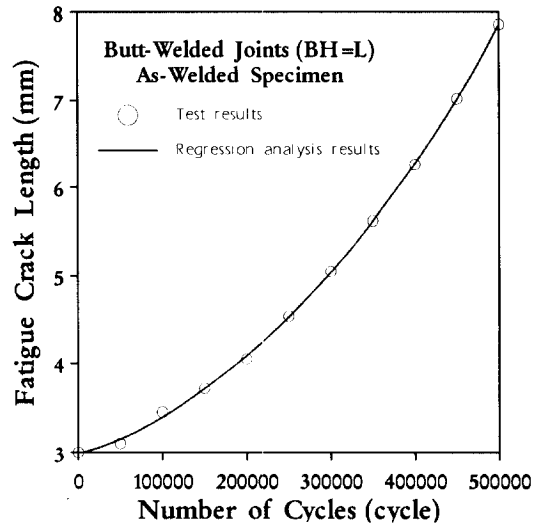


그림 4.1 균열길이-반복회수 선도

또한 식 (4.2)에 식 (4.3)의 균열형상보정계수에 대한 식을 이용해서 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계를 나타내면 그림 4.2와 같다.

그림 4.2의 결과로부터 피로균열성장속도 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 사이의 관계를 나타내면 식 (4.6)과 같다.

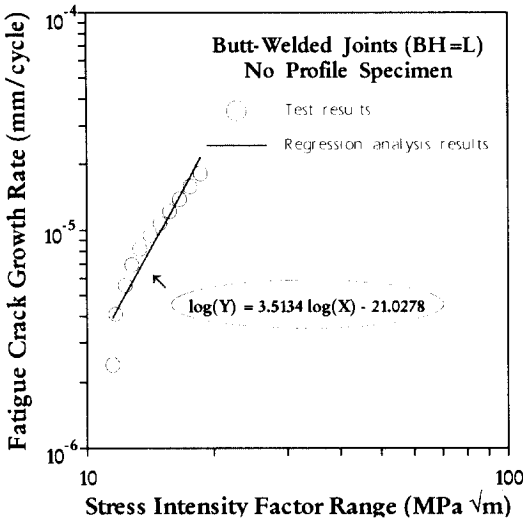


그림 4.2 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계

$$\frac{da}{dN} = (7.38 \times 10^{-10})(\Delta K)^{3.51} \quad (4.6)$$

식 (4.6)에서 알 수 있는 바와 같이 본 실험결과 도출된 C , m 값은 JSSC 피로설계지침의 평균설계곡선과 최안전설계곡선에서 제안하고 있는 값보다 다소 상회하고 있는 경향을 나타내고 있다.

또한 Miki(1984, 1987)가 실시한 연구에서 제시하고 있는 블로우홀을 가진 종방향 맞대기 용접부 시험체에 대한 $5.47 \times 10^{-12} \leq C \leq 5.40 \times 10^{-9}$, $m = 3.0$ 과 C 값은 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, m 값에 다소 차이가 존재하는 이유는 용접부 종류의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

한편 그림 4.2의 결과와 표 4.1에서 나타낸 바와 같이 JSSC의 피로설계지침에서 제안하고 있는 최안전설계곡선과 평균설계곡선을 비교해서 나타내면 그림 4.3과 같다.

표 4.1 $da/dN-\Delta K$ 선도의 제정수 (JSSC, 1993)

	C	m	$\Delta K_{th}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$
최안전설계곡선	2.7×10^{-11}	2.75	2.0
평균설계곡선	1.5×10^{-11}	2.75	2.9

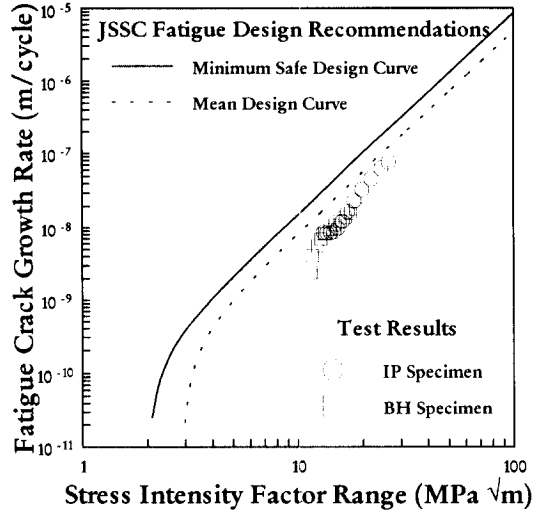


그림 4.3 실험결과와 제안식의 비교

그림 4.3에서 알 수 있는 바와 같이 블로우홀 시험체에 대한 실험결과는 JSSC의 피로설계지침에서 제안하고 있는 평균설계곡선에 거의 일치하는 경향을 나타내고 있으며, 응력확대계수범위에 대한 피로균열성장속도는 용입부족 시험체의 실험결과(김학재, 1998)와도 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

또한 식 (4.7)에서 나타낸 바와 같이 피로균열 성장수명을 산출하면 표 4.2와 같으며, 여기서 초기균열길이 a_i 는 식 (4.4)를 이용해서 산정하였다.

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{(7.38 \times 10^{-10})(\Delta K)^{3.51}} da \quad (4.7)$$

표 4.2 피로수명 산정결과

시험체 종류	응력범위 $\Delta \sigma$ (MPa)	실험피로수명 N_c (cycles)	계산피로수명 N_E (cycles)	N_c / N_E
BH(L-1)	255.21	314,524	556,707	1.77
BH(L-2)	210.50	736,240	1,163,259	1.58
BH(L-3)	194.24	1,039,225	1,258,308	1.21
BH(L-4)	169.86	2,523,924	3,154,905	1.25
BH(L-5)	156.44	over 3,000,000	3,275,323	1.09

표 4.2에서 나타내고 있는 피로실험결과와 기존 용입부족 시험체에 대해 실시한 실험결과(장동일, 1998)로부터 계산피로수명과 실험피로수명 사이의 관계를 나타내면 그림 4.4와 같다.

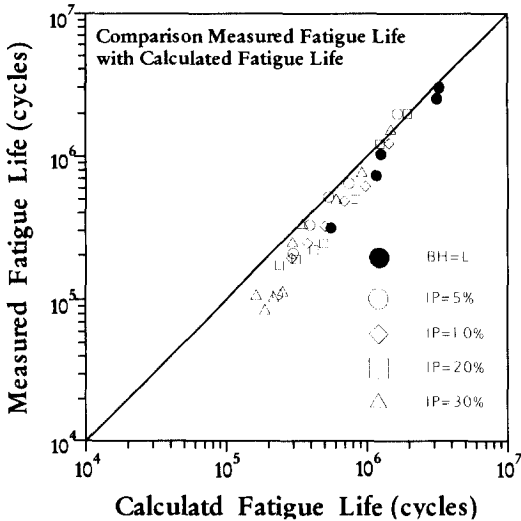


그림 4.4 피로수명 산정결과

그림 4.4에서 알 수 있는 바와 같이 피로수명에 대한 계산결과는 실험결과와 비교해서 저수명 영역(Low-Cycle Fatigue)에서는 다소 과대평가되는 경향을 나타내지만 고수명영역(High-Cycle Fatigue)에 접근함에 따라 계산결과가 거의 일치하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 용입부족 시험체의 연구결과와도 유사한 경향을 나타내고 있었다.

5. 결론

- (1) 블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 정적강도는 블로우홀의 크기나 개수 및 형상에 관계없이 일정하였다.
- (2) 비드를 삭제한 횡방향 맞대기 용접부의 피로강도는 비드를 삭제하지 않은 경우보다 피로강도가 향상되었으며, 비드를 삭제한 경우와 비드를 삭제하지 않은 경우 모두 각국의 피로설계시방서에서 규정하고 있는 피로강도등급을 모두 만족하

고 있었다.

- (3) 블로우홀에 따른 피로강도의 감소정도는 블로우홀의 크기나 형상에 비례하지 않았다.
- (4) 횡방향 맞대기 용접부의 피로강도는 블로우홀의 크기나 형상에 의한 영향보다 용접지단부의 형상에 지배적으로 영향을 받음을 알 수 있었다.
- (5) 블로우홀 시험체는 블로우홀 벽면의 여러 곳으로부터 피로균열이 동시에 발생하여 피로균열이 서로 합체되어 원형균열의 형태로 성장하고 이것이 이웃한 블로우홀에서 발생한 피로균열과 합체되어 파단되는 것을 확인하였다.
- (6) 피로균열성장속도 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 사이의 관계로부터 블로우홀을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로수명을 비교적 정확하게 산정할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 대한토목학회편 (1996), "도로교표준시방서", pp.142-149.
- (2) 장동일, 경갑수, 홍성욱 (1998), "용입부족을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로특성에 관한 연구", 한국강구조학회논문집, 제 10권 제3호.
- (3) 김학재 (1998), "용입부족을 가진 맞대기 용접부의 피로특성에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문.
- (4) 홍성욱 (1999), "횡방향 맞대기 용접부의 피로특성에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문.
- (5) 渡辺正紀, 蒲池一義 (1961), "溶接缺陷と継手強度の關係", 溶接學會論文集, 第30卷, 第6號.
- (6) 飯田國廣 (1973), "溶接欠陥が疲勞強度に及ぼす影響", 非破壊検査, 第22卷 第8號.
- (7) 石井勇五郎 (1973), "破壊試験結果よりみた溶接部の欠陥算定範圍", 非破壊検査, 第22卷 第8號.
- (8) 日本土木學會編 (1974), "本州四國連絡橋鋼上部構造に關する調査研究(本四公團委託)報告書, 別冊(二):本州四國連絡橋の疲勞設計", 日本土木學會.
- (9) 矢島浩, 川野始, 平田隆明, 仁藤弘 (1977), "溶接欠陥の許容寸法の決定法に關する一考察", 日本造船學會論文集, 第141號.

- (10) 野崎甚藏, 阪井大輔, 矢島浩, 安藤清, 平田隆明 (1977), "Al合金A5038-0材突合せ溶接継手のブローホール許容缺陷率とJIS規格との対応について", 日本造船學會論文集, 第141號.
- (11) 田島二郎, 免川淳志 (1978), "80キロ鋼を使用したトラス格点構造の疲労試験", 橋梁と基礎, pp.12-19.
- (12) 旭 一穂, 岸本良考, 帆足博明 (1980), "箱断面供試體を用いた大型疲労試験", 橋梁と基礎, pp.18-23.
- (13) 三木千壽 (1992), "溶接欠陥の種類とその継手強度への影響", 溶接學會誌, 第61巻, 第4號, pp.278-282.
- (14) 日本鋼構造協會編 (1993), "鋼構造物の疲労設計指針・同解説", 技報堂出版, pp.5-12, pp.240-260.
- (15) 三木千壽, 館石和雄, 慶甲秀 (1994), "縦方向継手強度に與えるブローホールの影響に関する確率的検討", 日本材料學會紙, 第43巻 第487號, pp.421-426.
- (16) 日本土木學會編 (1996), "鋼橋における劣化現象と損傷の評価", (株)丸善, pp.10-12.
- (17) 金井 卓 (1998), "突合せ溶接継手における許容欠陥寸法の検討", 東京工業大學工學部土木工學科 卒業論文.
- (18) G.A. Homes (1938), "Relationships between endurance limit and porosity of arc welds in mild steel", Arcos, Vol.15, No.89, pp.1951-1957.
- (19) W.G. Warren (1952), "Fatigue tests on defective butt-welds", Weld. Res. Vol.6, No.6.
- (20) O. Masi and A. Erra (1953), "The radiographic examination of welds-A complete evaluation of the defects in terms of static strength and fatigue strength", La. Met. Ital., Vol.45, No.8, pp.273-283.
- (21) B. Lauterburg (1956), "The Effect of Artificial Porosity on the Fatigue Strength of Arc Weld Metal", Translated abstract in Welding Research Abroad, Vol.2, No.3, pp.46-47.
- (22) W.L. Green, M.F. Hamad and R.B. Mccauley (1958), "The effect of porosity on mild steel welds", Weld. Res. Suppl. Vol.38, No.5, pp.206-209.
- (23) P.C. Paris and F. Erdogan (1963), "A critical analysis of crack propagation laws", Trans. of ASME, Series-D, Vol.85, No.4, pp.528-533.
- (24) M.A. Hirt, J.W. Fisher (1973), "Fatigue crack growth in welded beams", Engineering Fracture Mechanics, Vol.5, pp.413-429.
- (25) G.C. Sih (1973), "Handbook of Stress Intensity Factors", Mechanics of Fracture and Solid Institute, Lehigh Univ.
- (26) P. Albrecht, K. Yamada (1977), "Rapid calculation of stress intensity factors", Proc. of ASCE, Vol.103, No.ST2.
- (27) C. Miki, F. Nishino, Y. Hirabayashi and H. Ohga (1982), "Fatigue strength of longitudinal welded joints containing blowhole", Proc. of JSCE, Vol.325, pp.155-165.
- (28) M. Natsume, H. Terada and M. Fukazawa (1983), "Effects of root blowholes on fatigue strength of longitudinal welded joints in high strength steels", Proc. of JSCE, Vol.334, pp.177-180.
- (29) ASME (1983), "Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI", Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components.
- (30) J. Tajima, K. Takena, C. Miki and F. Ito (1984), "Fatigue strengths of truss made of high strength steel", Proc. of JSCE, Vol.341, pp.1-10.
- (31) C. Miki, T. Mori, K. Sakamoto and T. Sasaki (1987), "An analysis of fatigue crack growth from blowholes in longitudinal welded joints", Proc. of JSCE, Vol.386(I-8), pp.73-81.
- (32) AASHTO (1996), "Standard Specification for Highway Bridges", pp.144-147.

(접수일자 : 1999년 6월 14일)