연구논문

교량의 피로강도를 고려한 맞대기용접부 불완전용입 한계결함 결정에 관한 연구

백 영 남* · 장 영 권**

*경희대학교 기계공학과
**산업기술시험원(KTL)

An Experimental Study on Allowable Size of Incomplete Penetration in Butt Joint Bridge Weld Considering Fatigue Strength

Young Nam Paik* and Young Kwon Chang**

*Mechanical Engineering Dept. Kyung-Hee Univ., Yongin 449-701, Korea
**Tech. Supervision Dept. Korea Testing Laboratory, Seoul 152-053, Korea

Abstract

The incomplete penetration(IP) discontinuity in butt joint weld, which is detected during safety analysis of the steel bridge by nondestructive evaluation(NDE) method, is classified as unacceptable defect according to the NDE codes and standards.

In fact, there are a little allowance in butt joint weld in the view point of design criterion, and also detected IP discontinuity should be classified and evaluated for the fatigue strength and residual life estimation.

In this study, we performed fatigue test to evaluate the fatigue strength of high strength steel(SWS490A) containing IP discontinuities in various size, the results compared and classified according to the bridge construction standard specification which published by korea administration of construction and traffic.

Experimental results could be used to evaluate and estimate the IP discontinuities considering different stress range in butt joint bridge weld during periodic safety inspection.

(Received October 23, 1999)

Key Words : Incomplete penetration, Fatigue strength, Butt joint weld, Korea standard specification for road bridge, Nondestructive test

1. 서 론

강교량 제작시 용접부에 발생 가능한 용접결함으로는 용입부족(incomplete penetration ; IP), 불완전용융(incomplete fusion), 균열(crack) 등과 같은 평면(선형)결함과 기공(porosity), 슬래그 혼입(slag inclusion)등과 같은 입체적 결함이 있다[1]. 용접방법으로 강 구조물을 제작할 때 완전무결한 용접품질을 얻기는 현실적으로 어려운 관계로 대상 강교량 또는 용접구조물의 사용응력조건에 따라 허용결함의 크기를 결정하는 것이 타당하다. 뿐만 아니라 이미 설치된 교량에 대한 정밀 안전진단 결과 많은 수의 교량에서 다양한 용접결함이 발견되고 있으며, 그 중에서도 특히 인장플랜지 맞대기용접부에 심각한 용입부족이 확인되었다[2]. 용접구조물의 피로강도 평가를 위해 위와 같이 종류와 크기가 다양한 용접결함이 존재하는 경우에 대하여 학술적으로 연구 발표된[3~5] 재료의 피로파괴 한계를 공통적으로 적용하기는 매우 곤란할 뿐 아니라 현재 국내에는 기존교량 용접부에 대한 허용결함의 크기가 규정되어있지 않고 이에 대한 연구도 미흡한 실정이며 완전용입 맞대기용접부에 대한 피로강도

연구는 용접부의 형상 및 재료에 따른 피로강도 곡선을 얻거나 균열전파특성에 대한 연구가 수행되었으며 이러한 연구결과를 사용응력이 다양한 교량의 정밀 안전진단결과 확인된 용접결함부의 피로수명 평가 및 용접결함의 한계를 결정하는 자료로 활용하기에는 어려운 점이 있다.

따라서 본 연구에서는 강교량의 정밀안전진단에서 확인된 주요 용접결함인 크기가 다른 불완전용입 결함 시험편을 제작하여 실제 교량의 사용응력을 고려한 실험조건으로 피로강도실험을 실시하여 맞대기용접부 불완전용입 결함이 피로강도 저하에 미치는 정도를 실험적으로 고찰하고자 한다. 또한 피로강도실험 결과를 도로교표준시방서의 응력구분선과 비교하여 기존 교량의 맞대기용접부 불완전용입 용접결함의 한계크기를 결정하고 교량의 사용응력에 따른 맞대기용접부 불완전용입 결함의 보수여부를 판정할 수 있는 자료확보에 목적이 있다.

2. 시험편 제작 및 실험 방법

2.1 시험편 제작

본 연구를 위한 실험용 강재는 실제 교량제작에 주로 사용되는 KS D 3515의 50kgf/㎟급, 공칭두께 12mm의 SWS490A 강재를 선정하였으며, 선정된 강재의 화학적 성분 및 기계적 특성을 확인하기 위하여 자체적으로 습식 화학성분 분석 및 기계적 강도시험 결과를 Table 1및 Table 2에 나타내었다. 시험편 제작을 위해 사용한 용접봉은 선정된 모재의 강도 등급과 유사하고 실제 교량 제작에 사용되는 KS D 7006의 E5016 용접봉을 사용하였으며, 용착금속의 기계적특성은 Table 3에 나타내었다.

시험편 제작을 위한 용접을 위해 모재를 폭 250mm , 길이 1000mm되게 기계가공으로 절단하여 groove 각도가 45°되도록 하고, root face가 일정하도록 밀링가공 하였으며, root face는 최종적으로 얻고자하는 불완전용입 결함의 크기가 각각 1, 2, 3, 4 및 5mm되도록 Table 4의 용접조건에서 침투깊이를 고려하여 용접하였으며, 용접 방향은 용접 중심선이 모재의 압연방향과 수직방향으로 용접하였다.

용접이 완료된 판재시료는 비파괴시험[6,7]을 통하여 불완전용입 결함의 크기를 확인하고, 맞대기 용접부에 발생된 기공, 슬래그 혼입, 언더컷 등의 결함이 존재하는 부분은 절단하여 실험 시료에서 제외하였다. 준비된 판재형 용접시료는 Fig. 1과 같이 ASTM E466[8]의 요건에 따라 피로시험편을 제작하였다.

Table 1 Chemical composition of base material(wt%)

	C	Mn	Si	P	S
Code requirements	0.20 max.	1.50 max.	0.55 max.	0.040 max.	0.040 max.
Analysis results	0.193	1.50	0.445	0.0165	0.0165

Table 2 Mechanical properties of base material

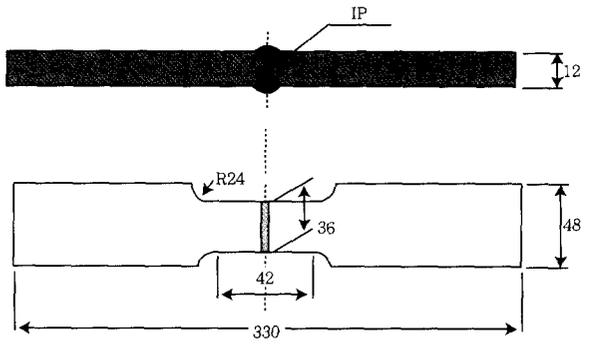
	Yield strength(kgf/mm²)	Tensile strength(kgf/mm²)	Elongation(%)
Code requirement (≤16t)	33 min.	50~65	17 min.
Mechanical properties	38.7	55.4	21.2

Table 3 Mechanical properties of weldment

	Yield strength(kgf/mm²)	Tensile strength(kgf/mm²)	Elongation(%)
Code requirement	48 min.	58 min.	31 min.
Mechanical properties	49.6	59.2	32.3

Table 4 Welding conditions

Welding conditions	Rod diameter(mm)	Current(A)	Voltage(V)	Welding speed (mm/min)	PWHT	Remarks
SMAW (E5016)	ø2.6	114~134A	24	100	no	-



*Dimension unite in mm

Fig. 1 Shape and size of the test samples

2.2 실험방법

준비된 시험편은 Table 5와 같이 분류하고, 각각의 결함 크기가 다른 시료군에서 인장시험을 실시하여 정적강도 저하 정도를 확인하였다. 피로시험은 Instron 사의 서어보 유압식 피로시험기를 사용하여 Table 5의 조건으로 피로균열 진전속도 및 S-N 곡선을 구하기 위한 피로시험은 JSME S 002-1981"통계적 피로시험방법"[9]에 따라 파괴확률 50%에 상당하는 S-N곡선을 구하는 경사부는 staircase method로, 피로한도 이후의 수평부에 대한 피로시험은 locati method로 시험하였다. 피로시험 진행중 균열진전속도 측정을 위하여 피로반복회수 매 5×10^3 회마다 이동현미경으로 20배 확대하여 피로균열 크기를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 강도평가

3.1.1 결함크기 증가에 따른 정적강도

불완전용입 결함을 갖는 맞대기용접 시료의 인장강도시험을 실시하여 불완전용입 결함 크기 증가에 따른 정적강도 저하정도를 확인하고, 확인된 정적강도 값을 근거로 이론적[5]으로 피로강도를 구하여 예상 S-N곡선을 구할 수 있다. Table 6은 불완전용입결함크기 증가에 따른 정적강도 시험결과로서 불완전용입결함 크기 증가에 따른 정적 파단하중은 불완전용입 결함에 의한 단면적 감소 비율만큼 감소하는 것으로 확인되었다.

이처럼 불완전용입 결함에 의한 응력집중효과의 영향이 정적강도에 미치는 영향이 나타나지 않는 이유는 재료의 항복강도 이상의 하중에서는 재료 내에서 응력 재분포가 형성되기 때문으로 사료되며, 용접시료의 파괴형태는 완전용입시료의 경우는 용접지단에서, 불완전용입 결함시료는 불완전용입 결함 끝에서 파괴가 시작되어 열영향부를 따라 주응력 방향으로 파단되었다.

3.1.2 균열진전속도(da/dN - ΔK)평가

피로균열진전속도 da/dN 은 ASTM E 647-91에

Table 5 Sample classification and fatigue test conditions

Specimen classification	IP size(mm)	Stress ratio(R)	Stress range (kgf/㎟)	Stress type	Test frequency	Number of samples	Remarks
T0	0	0.2	Sr=15-57	simple alternating sine wave	10Hz±1	15	
T1	1		Sr=8.5-55			40	
T2	2		Sr=10-55			40	
T3	3		Sr=9-55			45	
T4	4		Sr=9-52			45	
T5	5		Sr=8-45			45	

Table 6 Tensile test results

Specimen classification	Sectional area reduction (%)	Fracture strength(kg)	Fracture strength reduction (%)	Remarks
Complete penetration(T0)	0	22,736	0	HAZ fracture
1mm(T1)	9.1	20,429	9.0	weldment fracture
2mm(T2)	17.5	18,620	18.1	
3mm(T3)	26.3	16,420	27.7	
4mm(T4)	35.0	14.358	36.8	
5mm(T5)	43.8	12.257	46.0	

제안된 할선법(Secant Method)과 7점증분다항법(Seven Point Incremental Polynomial Method)을 이용하여 구할 수 있다. 할선법은 a-N 선도 상에서 근접한 점을 연결하는 직선의 기울기로서 평가하며 피로균열성장속도 da/dN은 식(1)과 같다.

$$(\frac{da}{dN})_a = \frac{(a_{i+1}-a_i)}{N_{i+1}-N_i} \quad (1)$$

식(1)으로 계산된 da/dN은(a_{i+1} - a_i) 구간에서의 평균 균열속도이므로 $\triangle K_I$의 계산에서는 평균 균열길이가 사용된다. 7점 증분 다항법은 먼저 연속적인 7개의 자료 점에서 식(2)과 같은 2차 다항식을 핏팅(fitting)하여 평가한다.

$$\bar{a}_i = b_0+b_1[(N_i-C_1)/C_2]+b_2[N_i-C_i)/c_2]^2 \quad (2)$$

여기서, $-1 \le [(N_i - C_i)/C_2] \le 1$ 이고, 상수 b_0, b_1, b_2는 최소자승법으로 $a_{i-n} \le a \le a_{i+n}$의 범위에서 결정되는 회귀 파라메터 이고, C_1, C_2는 식(3)과 같다.

$$C_1 = \frac{N_{i-n}+N_{i+n}}{2} \qquad C_2 = \frac{N_{i-n}+N_{i+n}}{2} \quad (3)$$

따라서, 2차 다항식의 미분으로부터 균열성장비 da/dN은 식(4)으로부터 구해진다.

$$(\frac{da}{dN})\bar{a}_i = \frac{b_i}{C_2} + \frac{2b_2(N_i-C_1)}{C_2^2} \quad (4)$$

응력확대계수 폭 $\triangle K$는 소규모 항복 조건하에서 균열범위의 응력강도를 평가하는 것으로 균열진행 시험편에 대한 $\triangle K$의 계산식은 ASTM E 647-91에 제시된 식(5)을 사용하여 평가할 수 있다.

$$\triangle K = \triangle P \frac{(2+a)}{B\sqrt{w}(1-a)^2}(0.886+4.64x-13.32x^2+14.72x^3-5.60x^4) \quad (5)$$

여기서, x = a/w이고, x〉0.2인 범위에서만 적용가능하다.

위 방법에 따라 평가한 $\triangle K$와 피로실험에서 측정한 불완전용입 결함 크기별 균열진전속도(da/dN)를 Fig. 2에 나타내었다.

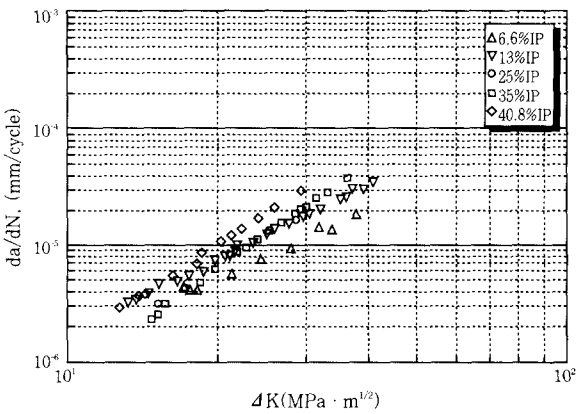


Fig. 2 Fatigue crack growth rate according to IP size

피로균열 진전속도 측정결과 회귀식으로 얻은 재료상수(C) 및 지수(m) 파라메터는 재료상수의 범위가 2E-9~3.75E-8이고, 지수범위는 1.9~3.453으로 평가되었다. 실험결과 얻은 각 불완전용입결함 시료군에 대한 재료상수(C) 및 지수(m)를 정리하면 Table 7과 같다.

위 결과에서 실험을 실시한 각 불완전용입 결함군의 피로균열 진전속도 기울기는 불완전용입 결함의 크기가 증가할수록 증가하는 경향을 보였는데 이는 불완전용입 결함의 크기가 증가함에 따라 상대적으로 용착금속량이 감소하여 용접후 냉가속도 증가에 의한 미세한 취성의 증가에 기인한 것으로 분석된다.

SWS490A 강재 맞대기용접부의 피로균열 진전속도 실험결과는 일본 강구조협회에서 발행한 "강구조물의 피로설계지침 제 4장, 피로수명 추정법"[11]에서 제시한 재료상수(C) 2.7×10^{-8}, 지수(m) 2.75 와 같은 경향의 실험결과를 얻었다.

Table 7 Exprimental results of material constant(C) and index(m) according to IP size

	$\triangle K$ Range(MPa · $m^{1/2}$)	Material constant(C)	Index(m)	Remarks
6.6% IP	18〈$\triangle K$〈38	2.14E-8	1.895	
13% IP	11〈$\triangle K$〈40.2	2.19E-8	2.212	
25% IP	12.3〈$\triangle K$〈37	2.09E-9	2.949	
35% IP	12〈$\triangle K$〈37	3.75E-8	3.453	
40.8% IP	10.7〈$\triangle K$〈40.5	2.23E-8	2.797	

3.1.3 피로수명선도 (S-N Curve)

Fig. 3은 SWS 490A강재의 완전용입 및 불완전용입 결함 크기별 시험편의 피로시험 결과 얻은 S-N 곡선이다. 이 피로강도시험 결과를 일본 강구조협회[11] 자료에서 얻은 50kgf/mm2급 강재의 피로한도 곡선과 비교하면 용접부의 피로응력은 동급 모재의 피로한도 응력에 비하여 저주기 피로영역(1×10^4이하)에서는 동일한 값을 얻었으나 1×10^5 영역에서는 19%, 2×10^6의 피로한도에서 50%정도의 피로강도 저하가 있는 것으로 확인되었다.

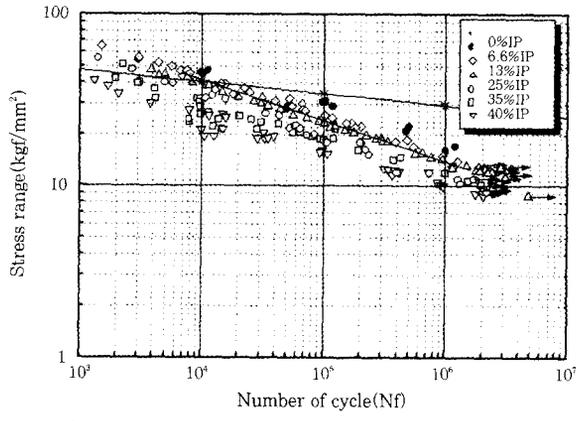


Fig. 3 S-N curves according to variable size of IP

3.1.4 맞대기용접부 평가를 위한 피로한계 구분

본 실험결과 얻은 각 불완전용입 결함 크기별 피로강도곡선의 각 데이터를 최소자승법으로 핏팅하여 평균값을 얻어 표준편차와 안전측면을 고려하여 데이터의 최하한값을 기준으로 도로교 표준시방서(2)의 응력범주와 비교하여 Fig. 4에서 Fig. 9에 나타내었다.

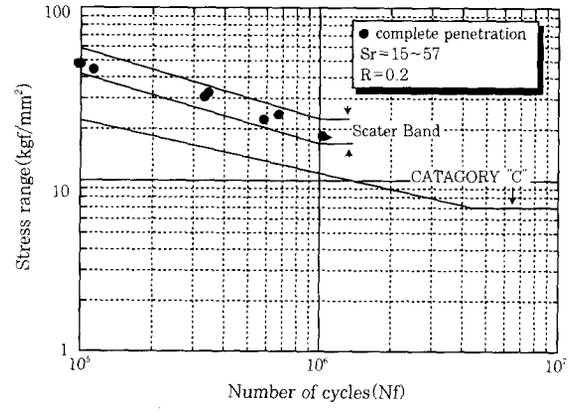


Fig. 4 Comparison between S-N curve of the complete penetrate welded samples and the stress grade of the korea standard specification.

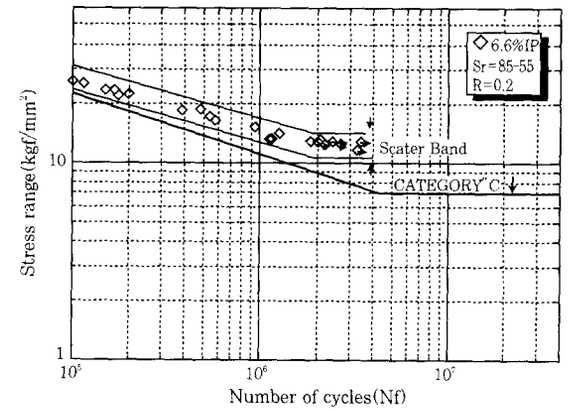


Fig. 5 Comparison between S-N curve of the 6.6% IP welded samples and the stress grade of the korea standard specification

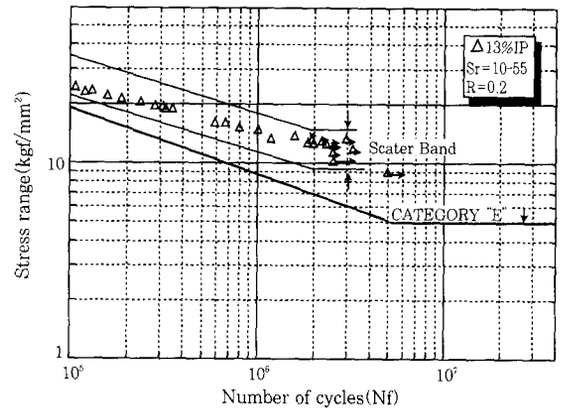


Fig. 6 Comparison between S-N curve of the 13% IP welded samples and the stress grade of the korea standard specification

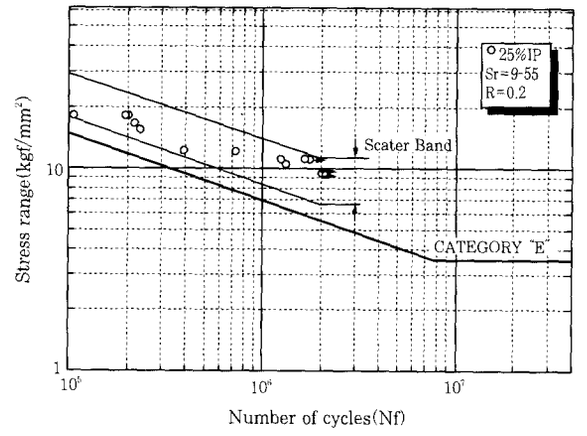


Fig. 7 Comparison between S-N curve of the 25% IP welded samples and the stress grade of the korea standard specification

본 실험에서 수행한 완전용입 및 불완전용입을 포함하는 맞대기용접부의 피로강도 등급을 도로교 표준시방서의 응력등급 구분선과 비교한 결과 완전용입 맞대

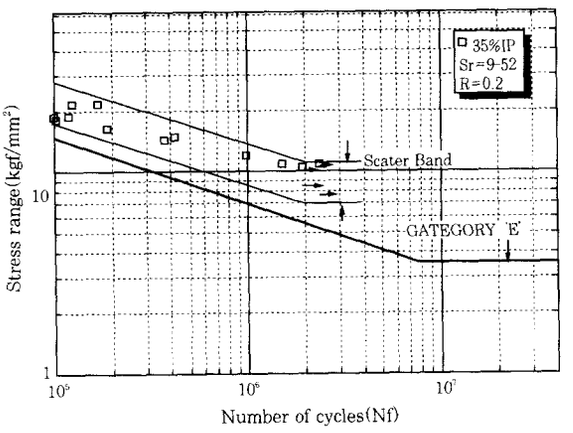


Fig. 8 Comparison between S-N curve of the 34% IP welded samples and the stress grade of the korea standard specification

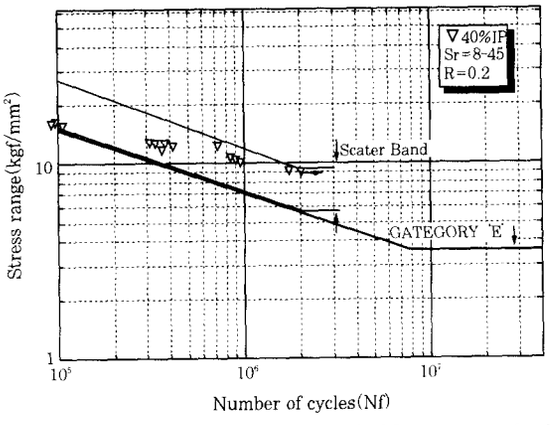


Fig. 9 Comparison between S-N curve of the 40.8% IP welded samples and the stress grade of the korea standard specification

기용접부는 상세범주 "C"에 해당되어 도로교 표준시방서의 용접덧살을 제거하지 않은 완전용입 홈용접한 이음부나 인접부 모재의 응력범주를 만족하며, 또한 피로 파단면적 대비 6.6% 불완전용입결함을 갖는 시료군은 응력범주 "C", 13% 불완전용입 결함을 갖는 시료군은 응력범주 "D"에 해당되고, 25%, 35% 및 40.8% 불완전용입 결함을 갖는 시료 군은 응력범주 "E"로 평가된다.

위와같은 평가 결과를 근거로 공용중인 교량에서 측정된 변동응력범위가 7.0~9.0kgf/㎟ 이라면 피로반복회수 200만회를 기준으로 맞대기용접부의 응력범주는 도로교 표준시방서의 응력범주 "D"에 해당되므로 해당 맞대기용접부의 허용 불완전용입 결함 크기는 표준편차와 안전측면을 고려하여 데이터의 최하한값을 기준으로 용접모재의 두께대비 13%를 한계결함으로 결정할 수 있다.

3.2 파면관찰

3.2.1 파단형태의 거시적 관찰

Fig. 10은 완전용입 맞대기용접 시험편의 피로파단 형태이며 Fig. 11 및 Fig. 12는 불완전용입 결함시험편의 응력조건에 따른 피로파단 형태이다.

Fig. 10과 같이 완전용입 시험편의 피로파단은 피로시험 조건에 관계없이 응력집중계수가 가장 큰 용접지단(weld toe)에서 피로균열이 발생되어 모재와 용착금속의 열영향부를 따라 전파되어 파단에 이르게 되며, 이러한 피로파단 형태는 피로시험을 실시한 완전용입 맞대기용접 시험편에서 시험응력 크기와 무관하게 동일한 형태로 파단되었다.

Fig. 11은 불완전용입 결함을 포함하는 시험편의 파단 반복회수가 5×10^4 이하의 저주기 고응력 조건에서의 피로파단 형태로서 불완전용입결함 양 끝단부에서 피로균열이 전파되어 주응력 방향으로 성장되어 시험편 표면과 45°정도의 각도로 파괴되는 전형적인 불안정파괴 형태를 확인하였다. 그러나 불완전용입결함 시험편의 파단 반복회수 5×10^4 이상의 고주기, 저응력 조건에서의 피로파단 형태는 Fig. 12와 같이 불완전용입결함 양 끝단에서 피로균열이 발생되어 시험편 표면과 수직으로 성장하여 파단되는 안정파단의 거시적인 파괴형태를 확인하였다.

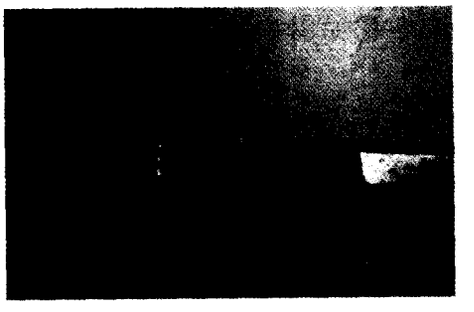


Fig. 10 Fatigue fracture shape of complete penetration welded sample.

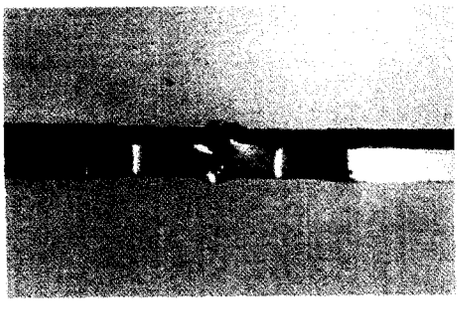


Fig. 11 Fatigue fracture shape of incomplete penetration welded sample at high stress range(lower than 5×10^4 cycles).

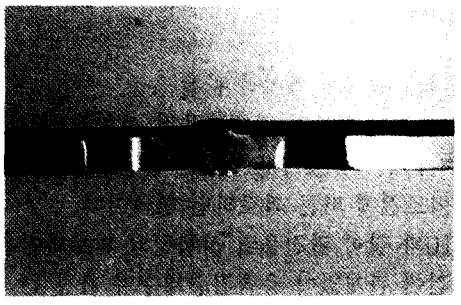


Fig. 12 Fatigue fracture shape of incomplete penetration welded sample at low stress range(higher than 5×10^4 cycles)

이처럼 불완전용입 결함이 존재하는 맞대기용접 시험편의 피로파단 형태는 작용하는 응력범위에 따라 즉 반복주파수에 따라 파괴형태가 다르게 파단되었는데 변동응력 ($\Delta\sigma$)이 재료 항복응력(σy)의 약 65% 이상인 경우는 불완전용입 결함의 양 끝단부에서 피로균열이 전파되어 결함 끝단과 시료표면의 용접지단 끝과 45°정도의 각도로 피로파괴가 진행되며, 변동응력 ($\Delta\sigma$)이 재료 항복응력(σy)의 65% 보다 작은 경우는 불완전용입 결함의 양 끝단부에서 균열이 전파되어 시험편 표면과 수직으로 피로균열이 진행된다. 이와 같은 고주기 피로영역에서의 피로균열 진행형태는 불완전용입 결함의 크기에 관계없이 동일하였고, 피로균열이 진행되면서 시험편의 잔류단면적에 작용하는 응력이 재료의 항복강도보다 커지는 시점에서 순간적인 파단이 일어날 때는 시험편의 파단끝면에 정적 인장강도 시험시 발생되는 dimple이 확인되었다.

3.2.2 피로파단면의 미세 관찰

불완전용입 결함 크기별, 응력범위 변화에 대한 피로강도 시험 후 피로 파단면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)으로 관찰하였다.

Fig. 13은 피로파단면의 대표적인 불완전용입 결함 끝단과 용착금속부의 경계를 나타내는 사진으로 확인

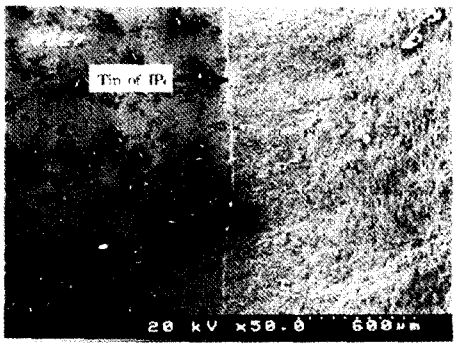


Fig. 13 Micrograph of fracture surface

된 불완전용입 결함 선단부는 균일하게 제작되었음을 확인하였다. Fig. 14는 피로균열성장에 의한 안정파괴가 불안정파괴로 천이되는 경계면에 대한 SEM사진으로 사진의 왼쪽으로부터 피로파단이 시작되어 오른쪽으로 진행된 형태로서 수직선을 기준으로 왼쪽의 피로균열 진전 형태는 피로균열 성장거동의 Ⅱ단계인 피로균열 성장단계[10]에 해당되어 이 부분에 대한 확대관찰에서 입내파괴인 안정파괴가 확인되었다. 사진의 오른쪽 부분은 시험편의 피로파괴가 진행되면서 잔류 단면적이 감소하여 불안정파괴에 이르는 피로파단 단계인 Ⅲ단계에 해당된다.

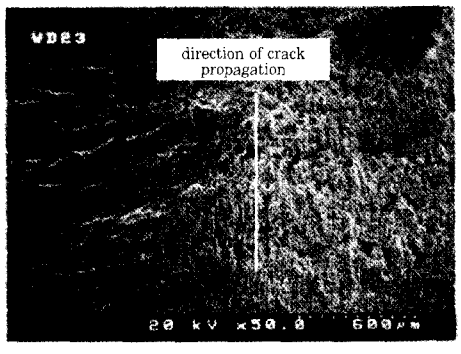


Fig. 14 Micrograph of fracture surface where can be seen transition between stage II and III, Sr(10.5kgf/mm^2), Nf(1×10^6)

4. 결 론

본 연구의 목적인 맞대기용접부의 불완전용입 결함이 피로강도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 시험편 두께대비 불완전용입 결함 크기가 다른 시험편을 제작하고, 응력범위별로 피로시험을 수행하여 피로강도 평가 및 피로 파단면분석 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 정적강도 시험결과 불완전용입결함 크기 증가에 따른 파단하중은 불완전용입 결함에 의한 단면적 감소 비율만큼 감소한다.

2) 불완전용입 결함 크기가 다른 피로강도 시험편에 대한 피로균열 진전속도 측정결과 회귀식으로 얻은 재료상수(C) 및 지수(m) 파라메터는 재료상수의 범위가 2E-9~3.75E-8이고, 지수범위는 1.9~3.453으로 평가되었다.

3) 완전용입 및 불완전용입 결함 크기별 맞대기용접 시험편의 피로강도곡선과 우리 나라 도로교 표준시방서의 응력범주와 비교한 결과를 얻음으로서 강교량의 사용응력 등급별 불완전용입 결함 크기 한계를 결정할 수 있었다.

4) 완전용입 및 불완전용입결함 맞대기용접 시험편에

작용하는 응력의 크기에 따른 피로파단형태를 확인하였으며, 불완전용입결함 맞대기용접 시험편의 경우 불완전용입 결함 선단으로부터 피로균열이 발생되나 작용하는 변동응력 ($\Delta\sigma$)의 크기(재료 항복응력의 약 65%)에 따라 불안정파괴와 안정파괴로 파단된다.

위와 같이 불완전용입 결함의 크기에 따른 응력등급 분류를 위해서는 비파괴시험방법에 의한 모재 두께방향의 불완전용입 결함크기의 정확한 측정이 선행되어야하며, 본 연구의 피로실험 결과는 인장-인장의 조건만을 고려하였으므로 실제 교량의 외력조건, 잔류응력, 불완전용입결함 외에 용접시 발생 가능한 결함과 용착금속부가 불균일한 형상불량 등 맞대기용접부의 피로강도 저하에 미치는 영향을 계속 연구, 보완함으로서 실제 강교량의 피로수명 평가 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 시설안전기술공단의 목적사업 연구비를 지원 받아 수행한 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. ASM International : Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 6, "Welding, Brazing and Soldering"
2. 시설안전기술공단 : 강구조 교량의 안전진단 보고서(1996~1997)
3. 장동일 : 강구조물의 피로현상 (I, II), 한국강구조학회, 제2권4호(1990)
4. 김성훈 : 레일강의 피로균열 성장거동에 관한 응력비(R), Kmax효과, 한국강구조학회, 제6권3호(1994), pp. 167-172
5. T. R. Gurney : "Fatigue of welded structure", Cambridge University Press (1979), pp. 244-281
6. 한국산업규격 : "강 용접부의 초음파탐상시험 및 검출결함의 등급분류(KS B 0896), 강 용접부의 방사선투과시험 및 투과사진의 등급분류(KS B 0845)" (1997)
7. ASM International : Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 17, "Nondestructive Evaluation and Quality Control"
8. ASTM E466-91 and E647-91
9. 일본기계학회 : "통계적 피로시험방법", JSME S 002-1981.
10. Introduction to Elements in Engineering, Prentice Hall, Inc.
11. (사)일본강구조협회 : 강구조물의 피로설계지침,동해설(1993), pp. 249-257
12. 건설교통부 : 도로교 표준시방서, 제II편(1996), pp 117-172