

용입부족을 가진 횡방향 맞대기 용접부의 피로특성에 관한 연구

A Study on the Fatigue Characteristics in Butt-Welded Joints with Incomplete Penetration

장 동 일¹⁾ · 경 갑 수²⁾ · 홍 성 욱³⁾

Chang, Dong Il Kyung, Kab Soo Hong, Sung Wook

요 약 : 본 연구에서는 평면결합의 일종인 용입부족의 크기가 맞대기 용접부의 피로 특성에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였다. 정적실험 결과 비드를 삭제하지 않은 맞대기 용접부의 인장강도와 항복강도는 용입부족 크기에 관계없이 일정하였다. 또한 피로실험 결과 완전용입된 맞대기 용접부의 피로강도는 국내·외의 시방서에서 규정하고 있는 피로 등급을 모두 만족하며, 용입부족 크기에 따른 피로강도의 저하는 용입부족 크기가 증가함에 따라 피로강도가 급격하게 감소하였다. 파단형태에서 완전용입 시험체와 용입부족 시험체의 파단형태가 서로 다른 형식을 취하고 있음을 알 수 있었는데 이는 용접지단부와 용접루트부의 기하학적 형상에 따른 응력집중계수의 변화에 기인하는 것을 유한요소해석에서 확인하였다. 따라서 강구조물에 대한 용접제작시 발생할 수 있는 용접결합 중 평면결합의 일종인 용입부족은 반드시 피해야만 강구조물의 공용수명을 충분히 확보할 수 있을 것이다.

ABSTRACT : The objective of this study is to examine fatigue behavior of as-welded butt-welded joints with incomplete penetration from fatigue tests. The test results are the following. In static tests, tensile strength and yield strength of butt-welded joints are constant regardless of incomplete penetration. And in fatigue tests, fatigue strength of fully penetrated butt-welded joints satisfies fatigue limits, prescribed in Korean Specifications and JSSC, respectively. The results show that as the magnitude of incomplete penetration increases, fatigue strength decreases. In fractured surfaces, full and incomplete penetration specimen show different shapes, it is because that stress concentration factor vary with structural geometry in bead toe and root tip, and certify in FEM analysis. This study suggests that defects such as incomplete penetration from welding must be avoided in order to attain the sufficient life of steel structures.

핵심용어 : 맞대기용접부, 용입부족, 피로강도, 파단면, 응력집중계수

KEYWORDS : Butt-welded joints, Incomplete penetration, Fatigue strength, Fractured surfaces, Stress concentration factor

1) 정회원, 한양대학교 지구환경건설공학부 교수
2) 정회원, 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실 책임연구원
3) 학생회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 1999년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

강구조물 특히, 강교량에서 확인되고 있는 피로손상의 대부분은 그림 1.1과 같이 초기결함이 피로손상의 주요한 원인으로 작용하고 있음을 알 수 있는데 초기결함의 대다수는 맞대기 용접부 내부의 용접불량에 기인하는 것으로 보고되고 있다 (日本土木學會, 1996). 그러나 대부분의 강구조물에서 주부재의 연결은 강재중량의 감소 및 미관을 고려하여 용접에 의한 맞대기 이음이 주류를 이루고 있으므로 그림 1.1과 같이 주부재(예를 들면, FCM)에서 맞대기 용접부의 용접결함이 교량 붕괴사고의 원인을 제공할 수 있으므로 주부재의 용접결함은 반드시 강교량 제작단계에서 허용 결함치 이내로 억제하여야 한다.

W.O. Dinsdale과 J.G.Young(1965)은 용입부족이나 용융불량과 같은 평면적 결함을 가진 맞대기 용접부의 정적실험 결과 평면적 결함은 강재의 인장강도에는 거의 영향을 미치지 않으나 반복하중이 작용하는 경우에는 용접결함부에 응력집중

이 발생하기 때문에 피로강도는 정적실험 결과와는 일치하지 않는다고 보고하였다.

용입부족의 영향에 관한 연구는 W.G. Warren(1952)이 서브머지드 아크용접(S.A.W.)를 이용하여 횡방향 맞대기용접한 판상시험체에 대한 보고가 있다. 이 연구에서는 맥동(R=-1) 인장하중하에서의 피로실험 결과 건전한 시험체의 200만회 피로강도는 $\pm 72.2\text{MPa}$, 결함을 가진 시험체의 200만회 피로강도는 $\pm 53.2\text{MPa}$ 로 건전한 용접부의 피로강도에 비해서 약 26% 정도 피로강도가 저하하는 것으로 보고하였다.

R.P. Newman과 M.G. Dawes(1965)는 용접부 내부에 깊이 1.6mm, 길이는 각각 2.0mm와 3.2mm인 결함(결함률=2.3%, 3.9%)을 갖는 시험체의 피로실험 결과 편진(R=0) 인장하중하에서 결함을 내재한 시험체의 피로강도는 반복회수 10^5 회에서 약 250.6MPa 및 227.9MPa, 2×10^6 회에서 159.5MPa 및 117.7MPa임을 확인하고 결함률과 피로강도와의 관계를 나타내었다.

A. Reggiori와 A. Erra(1957)는 고산화철계 피복용접봉에 의해 제작된 시험체의 용접비드를 완전히 삭제하고 결함이 시험체 전폭에 걸쳐서 존재하고 평균공칭단면적 감소율이 25%인 시험체, 결함이 시험체 전폭의 반에 걸쳐서 존재하고 평균공칭단면적 감소율이 12%인 시험체의 피로실험 결과로부터 피로강도는 비교적 큰 분산을 나타내지만 200만회 피로강도는 각각 $144.3 \pm 38.0\text{MPa}$ 및 $144.3 \pm 56.2\text{MPa}$ 임을 보고하였다.

이와 같이 용접부 내부에 존재하는 초기결함은 강구조물의 피로강도를 저하시키는 물론 피로손상을 유발시킴으로써 구조물의 사용성과 안전성에 중대한 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 강교량 주부재에서 주로 사용되는 용접방법의 하나인 횡방향 맞대기 용접부를 대상으로 용접부 내부에 평면결함의 일종인 용입부족을 인위적으로 도입하여 용입부족의 크기에 따른 피로강도 감소효과를 정량적으로 규명하여 용입부족이 맞대기 용접부의 피로거동에 미치는 영향을 평가하였다.

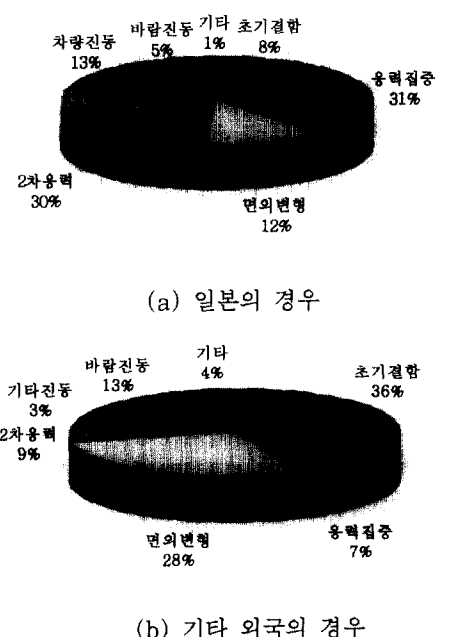


그림 1.1 피로손상사례의 원인별 비율

2. 실험개요

2.1 시험체

시험체는 현재 국내강교량에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 용접구조용강재인 SWS 490B를 사용하여 제작하였다. SWS 490B 강재의 화학성분 및 물리적 성질은 표 2.1 및 표 2.2와 같다.

표 2.1 화학성분

강종	화 학 성 분 (Wt %)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SWS 490B	0.15	0.32	1.25	0.012	0.007	0.03	0.03	0.01	0.03

표 2.2 물리적 성질

강종	물 리 적 성 질					
	항복하중 (kN)	항복응력 (MPa)	최대하중 (kN)	최대응력 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)
SWS 490B	215.1	340.3	328.6	519.8	205.3	27.6

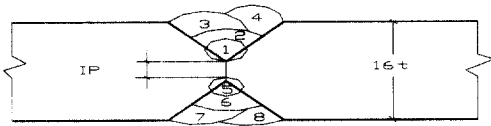


그림 2.1 시험체 용접방법

시험체 제작시 용입부족을 도입하기 위해서 그림 2.1과 같이 시험체 중앙부에 횡방향으로 각각 크기가 5%, 10%, 20%, 30%인 용입부족을 갖도록 용접을 실시하였으며, 용입부족을 도입하기 위해서 맞대기면을 X형으로 개선하고 플러스 코어드 아크용접(FCAW)법을 이용하여 용접을 실시하였다. 용접방법 및 각 층별 용접조건은 표 2.3 및 표 2.4와 같다.

한편 본 연구에서 사용한 정적 및 피로 시험체는 ASTM(1995)에 준하여 용접용 강재 패널을

표 2.3 용접방법

용접자세	용접봉	극성	전극	가스
F(하향)	KOBE(1.2φ)	DC, RP	단극	CO ₂ 25l/min

표 2.4 용접조건

적층수 (pass)	봉경 (mm)	전류 (amp.)	전압 (volt)	속도 (cm/min)	비고
1 ~ 8	1.2	160	25	20 ~ 30	

가공하여 제작하였으며, 시험체의 형상 및 치수는 그림 2.2와 같다.

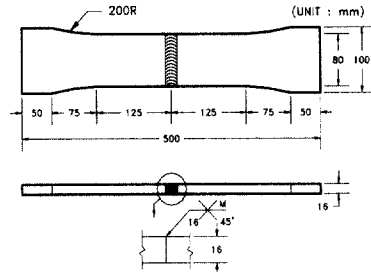


그림 2.2 시험체 형상 및 치수

2.2 실험방법

용입부족 크기에 따른 인장강도와 항복강도의 특성을 평가하기 위해서 본 연구에서는 100ton 용량의 만능시험기를 이용하여 정적실험을 실시하였다. 정적실험에서는 실제 구조물의 맞대기 용접부를 재현하기 위해서 용접비드를 삭제하지 않은 상태로 정적실험을 실시하였다. 정적실험시 하중 재하속도는 1ton/min으로 일정하게 재하하고 항복전에는 하중제어, 항복후에는 변형을 제어방법

으로 시험체 상·하단의 전후면에 부착된 전기저항식 변형률게이지를 이용하여 공칭변형률을 측정하였다. 용입부족 크기에 따른 피로강도특성을 평가하기 위한 피로실험은 $\pm 30\text{ton}$ 용량의 전기유압식 피로시험기를 사용하여 실시하였으며, 정적 실험에서와 같이 용접비드를 삭제하지 않은 상태에서 피로실험을 실시하였다. 작용하중은 일정진폭의 하중을 반복적으로 재하하였으며, 하중재하 속도는 7.5Hz , 응력비는 0.1 로 하였다. 또한 피로실험시 피로균열발생 및 성장특성을 조사하기 위해서 일정반복회수마다 비치마크(Beachmark)를 도입하였으며, 60배율 현미경과 용접저단부에 부착된 전기저항식 변형률게이지의 변형률 변화를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

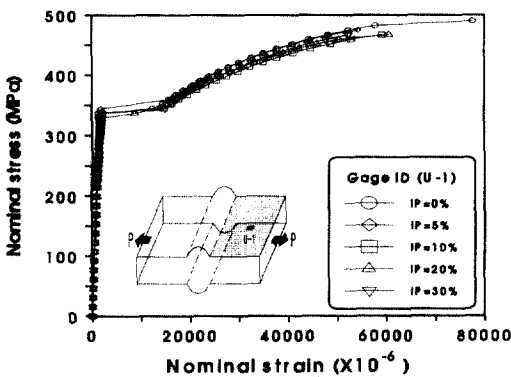
3.1 용입부족 크기에 따른 정적강도특성

정적실험 결과로부터 얻어진 용입부족 크기에 따른 응력-변형을 선도는 그림 3.1과 같으며, 용입부족 크기에 따른 인장강도 및 항복강도를 정리하면 표 3.1과 같다.

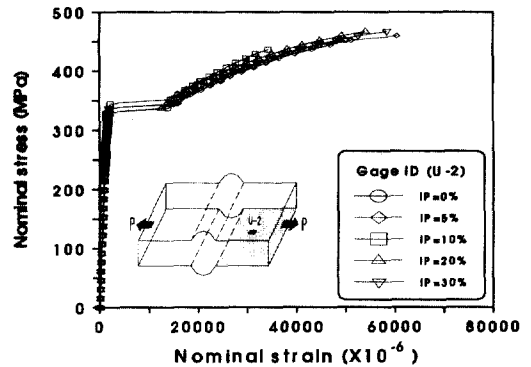
또한 그림 3.2 및 그림 3.3은 용입부족 크기에 따른 맞대기 용접 시험체의 인장강도와 항복강도의 변화특성 및 항복강도에 대한 인장강도의 비율 표 2.2의 모재의 물리적 성질과 비교해서 나타낸 것이다.

표 3.1 정적실험 결과

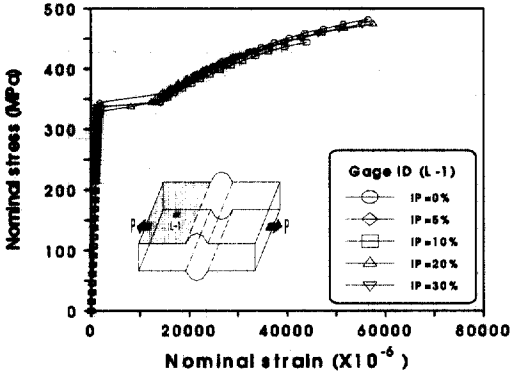
용입부족 (%)	인장하중 (kN)	항복하중 (kN)	공칭단면적 (mm^2)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	$\frac{\sigma_u}{\sigma_y}$
0	673.0	431.7	1280	525.2	336.9	1.56
5	668.1	431.7	1280	521.4	344.9	1.51
10	674.9	431.7	1280	526.8	344.5	1.53
20	669.1	412.0	1280	522.2	336.9	1.55
30	672.0	431.7	1280	524.5	344.5	1.52



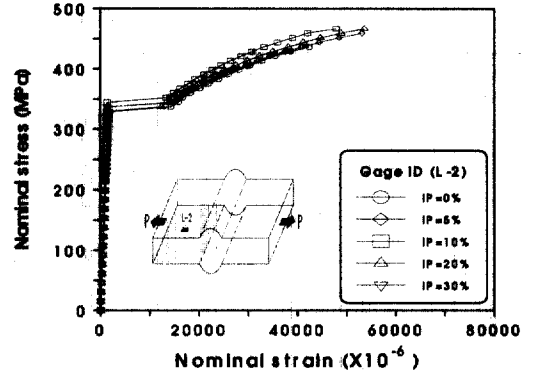
(a) 상단전면



(b) 상단하면



(c) 하단전면



(d) 하단후면

그림 3.1 용접-변형률 선도

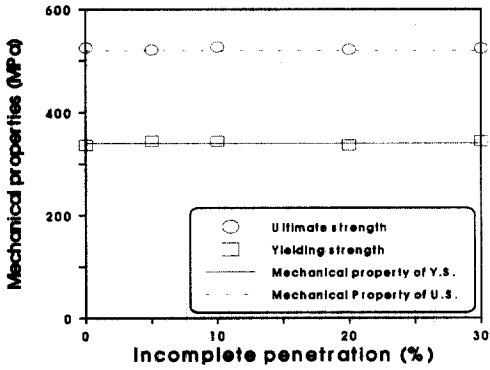


그림 3.2 인장강도와 항복강도의 변화 특성

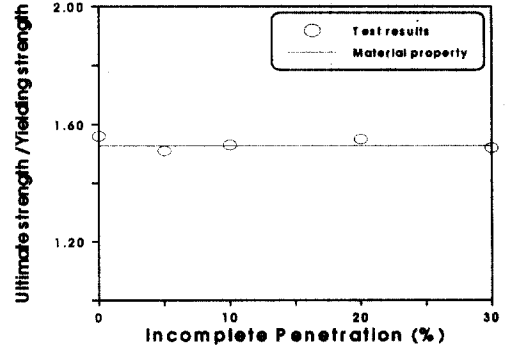
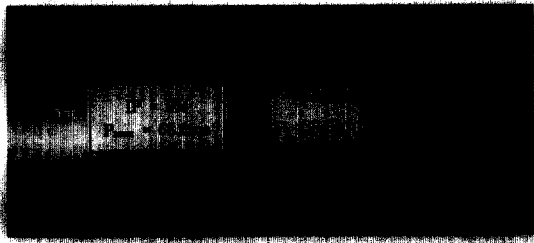
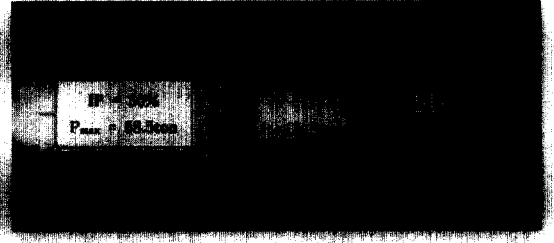


그림 3.3 항복강도에 대한 인장강도의 비



(a) IP=0%



(b) IP=30%

그림 3.4 파단면 형상

정적실험 결과 용입부족 크기에 따른 인장강도와 항복강도는 차이가 없으며, 그림 3.4에서 나타낸 것과 같이 파단은 모재부에서 발생하였다. 이러한 경향은 용접비드에 의한 유효단면적의 증가와 용착부와 열영향부의 경도증가에 의한 영향인 것으로 생각된다.

3.2 용입부족 크기에 따른 피로강도특성

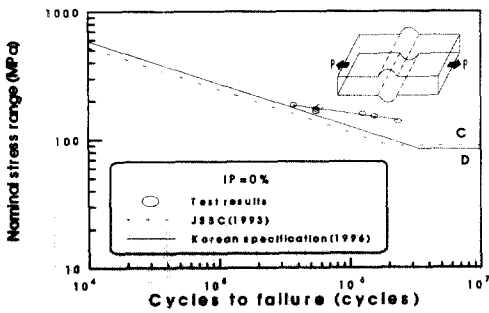
용입부족 크기에 따른 피로강도 감소량을 정량적으로 평가하기 위해서 피로실험 결과로부터 공칭용력범위 및 반복회수 사이의 관계를 나타낸 것이 표 3.2 및 그림 3.5이다.

표 3.2 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계식

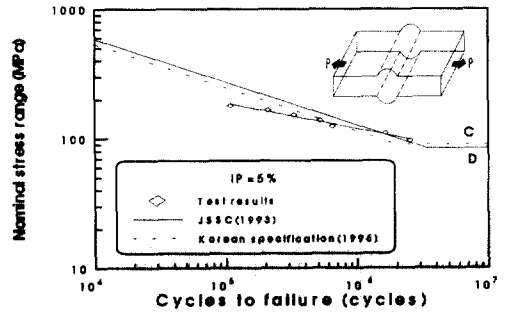
시험체	회귀분석식	200만회 피로강도(MPa)	피로강도 감소율 (%)
0% IP	$0.146074 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.09069$	144.2	100
5% IP	$0.197920 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.51052$	103.4	72
10% IP	$0.232157 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.97783$	100.4	70
20% IP	$0.211279 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.64130$	97.1	67
30% IP	$0.200045 \log(N) + \log(\Delta\sigma) = 7.44606$	94.0	65

그림에서 나타낸 C-등급과 D-등급은 각각 국내 도로교표준시방서와 일본강구조협회에서 규정하는 피로 강도등급이다. 표 3.2에서 용입부족 크기가 증가함에 따라 200만회 피로강도는 완전용입된 맞대기 용접부의 200만회 피로강도를 기준으로 하면 5%의 용입부족이 존재하는 경우는 약 28%, 10%의 용입부족이 존재하는 경우는 약 30%, 20%의 용입부족이 존재하는 경우는 약 33%, 30%의 용입부족이 존재하는 경우는 약 35% 감소하였다.

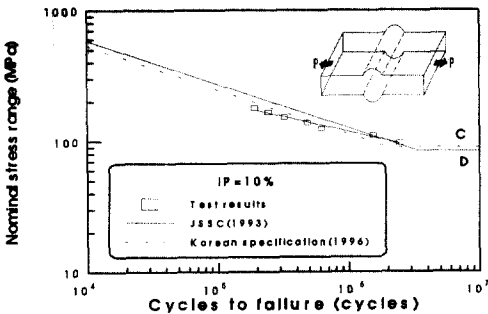
또한 완전용입된 맞대기 용접부의 피로강도는 국내 도로교표준시방서 및 일본강구조협회에서 피로한계로 규정하고 있는 C-등급(도로교표준시방서, 1996)과 D-등급(일본강구조협회, 1993)을 만족하고 있으나 용입부족이 존재하는 경우에는 시방서의 기준을 만족하지 않음을 알 수 있었으며, 본 실험에서 사용한 용접결합의 최대값인 30% 용입부족 시험체의 피로등급은 국내 도로교시방서를 기준으로 하면 대략 D-등급이 타당한 것으로 생각된다



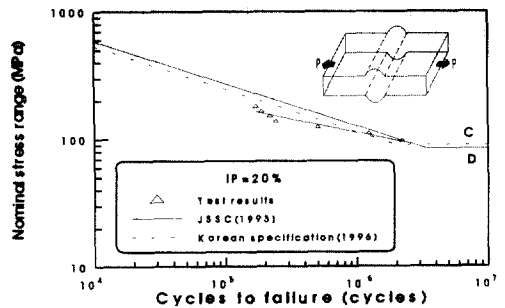
(a) IP=0%



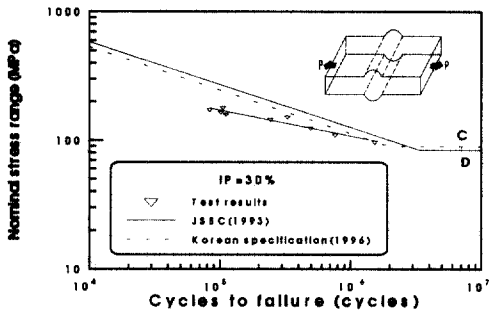
(b) IP=10%



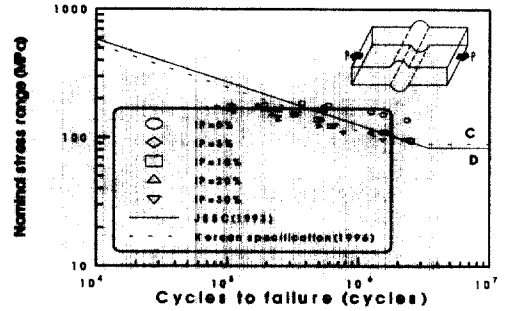
(c) IP=10%



(d) IP=20%



(e) IP=30%



(f) IP=0~30%

그림 3.5 공칭응력범위-반복회수 선도

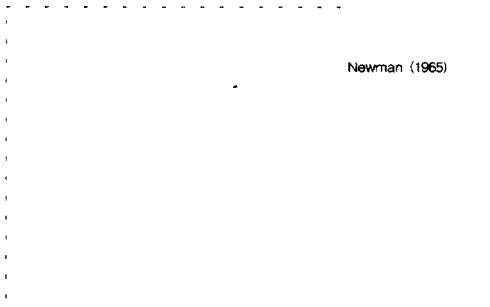


그림 3.6 용입부족 크기에 따른 피로강도 감소량 사이의 관계

여기서, IP는 용입부족의 크기(%), $\Delta\sigma_{200}$ 은 200만회 피로강도(MPa)이다.

3.3 용입부족 크기에 따른 파단면특성

용입부족 크기에 따른 용접지단부 및 용접루트 부에서의 파단면 특성을 조사하기 위해서 시험체에 대한 피로실험을 종료한 후 파단면 형상의 일례를 나타내면 그림 3.7과 같다.

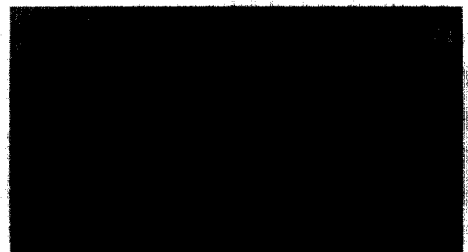
또한 용입부족 크기에 따른 200만회 피로강도 감소량을 나타내면 그림 3.6과 같고 이 그림에서 R.P Newman(1965)의 연장을 이용한 실험결과와 같이 나타냈다.

그림에서 나타낸 바와 같이 맞대기 용접부의 200만회 피로강도는 용접결함의 유무에 따라 피로강도의 저하가 현저하며, 결함의 크기에 따른 피로강도의 저하정도는 결함률과 반드시 비례하지 않는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 피로강도의 감소특성에 대해서는 파단면 특성과 유한요소 해석 결과에서 설명하고자 한다. 또한 위의 결과로부터 피로강도 감소량을 용입부족의 크기와 200만회 피로강도의 관계로 회귀분석하면 식 (3.1)과 같이 지수함수의 형태로 나타낼 수 있다.

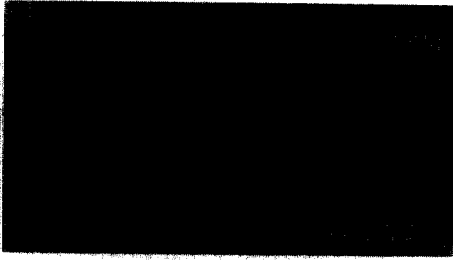
$$(\Delta\sigma_{200})(IP)^{0.0272} = 105.78 \quad (3.1)$$



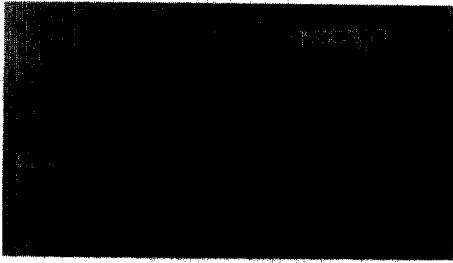
(a) IP=0%



(b) IP=5%



(c) IP=10%



(d) IP=20%



(e) IP=30%

그림 3.7 파단면 형상

그림 3.7(a)에서 완전용입 맞대기 용접부의 경우 용접지단부에서 피로균열이 발생, 성장여 파단되는 형식을 취하고 있으며, 피로균열은 용접지단부의 여러 곳에서 동시에 발생하는 형식을 나타내는데 이것은 용접길이방향으로 용접비드의 형상이 변화하므로 용접지단부의 응력집중계수가 가장 큰 부분에서 피로균열이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 그림 3.7(b)~그림 3.7(e)에서 용입부족을 갖는 맞대기 용접부의 경우에는 용접루트부의 여러 부분에서 피로균열이 발생, 성장하고 용접지단부에서도 피로균열이 발생, 성장함으로써 용접지단부와 용접루트부에서 동시에 발생한 피로

균열이 서로 합체되는 형식을 나타내고 있으며, 용입부족 크기가 증가함에 따라 대부분의 균열은 용입부족선단에서 발생하여 성장하는 경향을 나타내었다. 이와 같이 결합률이 증가함에 따라 피로균열이 용입부족 선단에서 다발적으로 발생, 성장하여 합체됨으로써 피로수명이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 원인으로는 유한요소해석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 최대응력집중이 발생하는 부분이 결합률의 크기에 따라 변화하기 때문인 것으로 생각된다.

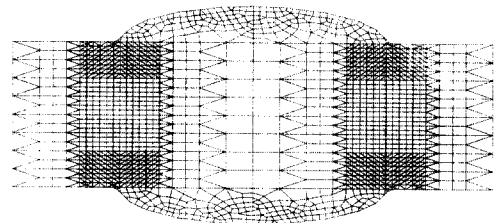
4. 유한요소해석

4.1 해석모델

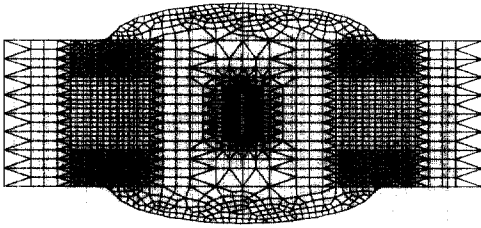
맞대기 용접부의 용접지단부 및 용접루트부에 대한 국부적인 응력특성을 해석적으로 파악하기 위해서 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 선형탄성해석을 실시하였다.

해석시 모델링은 시험체를 평면변형률 상태로 가정하여 2차원 판요소를 이용하였다. 용접지단부는 비드형상을 측정된 결과의 평균값(비드높이=4mm, 비드접선각도=135°, 곡률반경=3mm)를 이용하고 용입부족 선단은 60배율의 현미경으로 선단의 곡률반경을 측정하여 그 평균값(용입부족 선단의 곡률반경=0.1mm)을 사용하여 실시하였다. 이로부터 요소의 크기를 0.1mm에서 2mm까지 변화시키면서 모델링을 실시하였다.

완전용입된 맞대기 용접부 시험체와 용입부족



(a) IP=0%



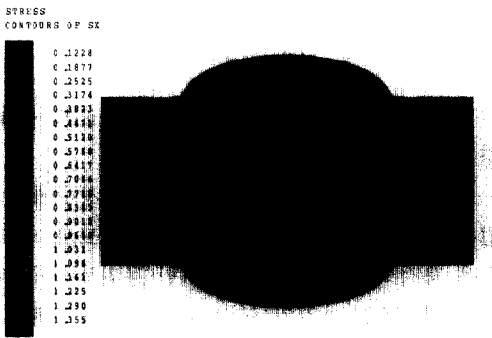
(b) IP=30%

그림 4.1 해석모델의 일례

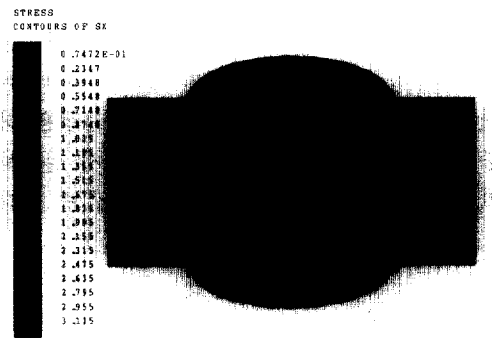
을 가진 맞대기 용접부 시험체에 대한 해석모델은 그림 4.1과 같다.

4.2 해석결과 및 고찰

완전용입 시험체와 용입부족 시험체에 단위하중(1톤)을 작용시킨 경우 유한요소해석 결과를



(a) IP=0%

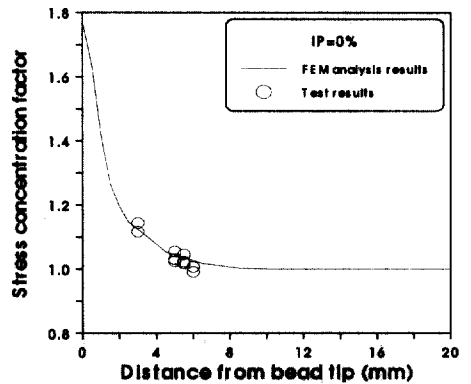


(b) IP=30%

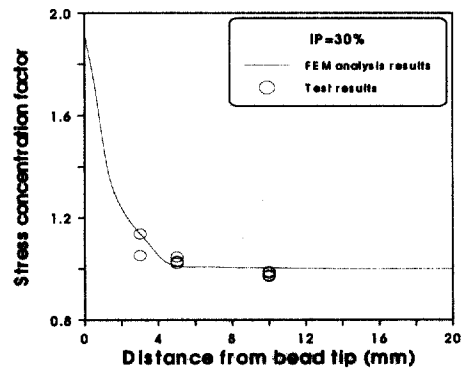
그림 4.2 해석결과의 일례

나타내면 그림 4.2와 같다. 여기서, 그림 4.2의 응력등고선(Stress Contours)이 나타내는 값은 외력이 작용하는 방향에 대한 응력을 의미하고 단위는 kgf/mm^2 이다.

위의 유한요소 해석결과와 응력등고선에서 최대응력은 완전용입 시험체는 용접지단부, 용입부족 시험체는 용입부족 선단에서 발생하고 있는데 이로부터 피로균열 발생부위가 응력집중부와 일치하는 것을 알 수 있다. 완전용입 시험체의 유한요소해석 결과에 기초해서 해석값과 측정값을 비교하면 그림 4.3과 같으며, 해석값과 실측값은 비교적 잘 일치하고 있으므로 본 해석의 타당성을 확인할 수 있었다.

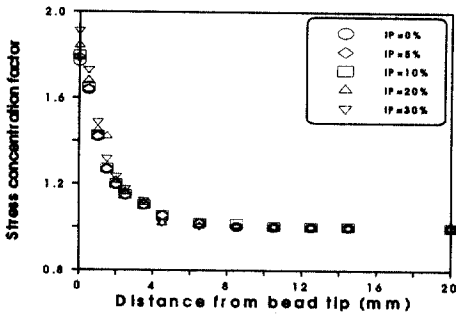


(a) IP=0%

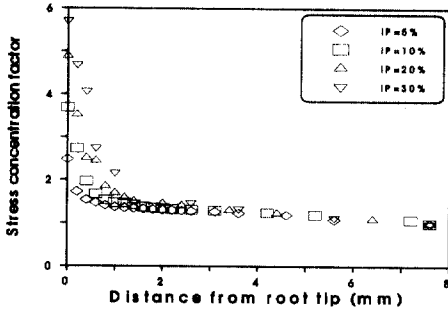


(b) IP=30%

그림 4.3 해석값과 측정값의 비교



(a) 용접비드부



(b) 용접루트부

그림 4.4 용접지단부 및 루트부에서의 응력집중계수

또한 각 시험체별 용접지단부와 용접루트부 선단에서의 응력집중계수를 나타내면 그림 4.4와 같으며, 용입부족 크기에 따른 용접지단부와 용접루트부 선단에서의 응력집중계수의 변화특성을 나타내면 그림 4.5와 같다. 그리고 이 결과를 西田(1973)과 後川(1980)이 제안한 응력집중계수 제안식과 비교해서 나타내면 그림 4.6과 같다.

그림 4.4~그림 4.5에서 알 수 있는 바와 같이 완전용입 시험체의 용접지단부에서 응력집중계수는 약 1.77이며, 5% 용입부족 시험체는 용접지단부에서 약 1.79, 용접루트부에서 약 2.48로 용접루트부의 응력집중계수가 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 경향은 용입부족 크기가 증가함에 따라 더욱 뚜렷해지는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 용입부족 크기가 증가함에 따라 용접지단부보다는 용접루트부에서 응력집중계수가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 또한 그림 4.6과 같이 본 해석결과를 西田(1973)과 後川(1980)

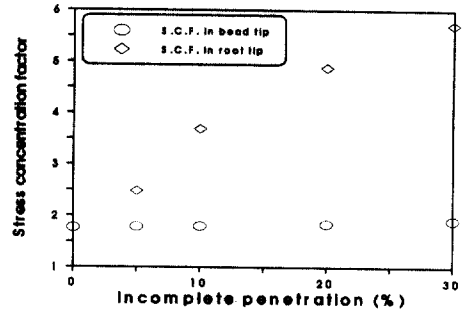


그림 4.5 용입부족 크기별 응력집중계수 변화

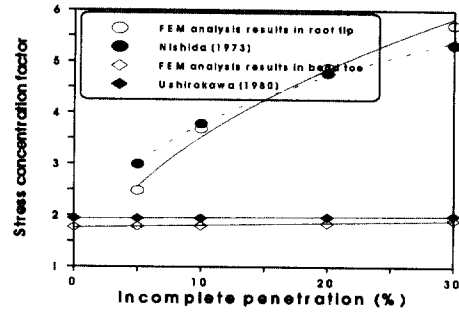


그림 4.6 해석결과와 제안식의 비교

이 제안한 응력집중계수 제안식과 비교적 유사한 경향을 나타내고 있다.

따라서 완전용입 맞대기 용접부의 경우에는 용접지단부에서 응력집중계수가 가장 크므로 피로균열은 용접지단부에서 발생하지만 용입부족이 존재하는 경우에는 용접지단부보다 용접루트부에서 응력집중계수가 크기 때문에 피로균열이 용접루트부에서 발생하여 성장할 가능성이 많으며, 용입부족의 크기가 증가함에 따라 용접루트부에서의 응력집중계수가 급격하게 증가하기 때문에 용접루트부에서 피로균열이 발생하여 성장할 가능성은 더욱 증가함을 알 수 있는데 이것은 3.3에서 설명하고 있는 피로파단면의 형상과 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 강교량 주부재의 연결에 주로 사용되는 맞대기 용접부를 대상으로 평면결합의

참 고 문 헌

일종인 용입부족을 인위적으로 도입하여 용입부족 크기에 따른 거동특성을 정량적으로 평가하기 위해서 정적 및 피로실험 및 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 맞대기 용접부의 인장강도와 항복강도는 용입부족 크기에 관계없이 일정한데, 이는 용접비드에 의한 유효단면적의 증가와 용착부와 열영향부의 경도증가에 의한 영향인 것으로 생각된다.

(2) 완전용입된 맞대기 용접부의 피로강도는 국내 도로교표준시방서 및 일본강구조협회에서 피로강도 등급으로 규정하고 있는 C-등급과 D-등급을 만족하고 있으나 용입부족이 존재하는 경우에는 시방서의 기준을 만족하지 않으며, 용입부족이 5%일 때까지 200만회 피로강도가 급격하게 감소하고 5%를 초과함에 따라 피로강도의 감소 정도가 크게 둔화하였다.

(3) 완전용입 시험체는 용접지단부에서 피로균열이 발생하여 성장여 파단되는 형식을 취하고 또한 피로균열은 용접지단부의 여러 곳에서 동시에 발생하는 형식을 나타내지만 용입부족 시험체는 용접루트부의 여러 부분에서 피로균열이 발생, 성장함과 동시에 용접지단부에서도 피로균열이 발생, 성장함으로써 용접지단부와 용접루트부에서 동시에 발생한 피로균열이 서로 합체되는 형식을 나타내고 있는데 이는 유한요소 해석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 최대응력집중이 발생하는 부분이 변화하기 때문인 것으로 생각된다.

(4) 완전용입 시험체는 용접지단부에서 응력집중계수가 가장 크며, 용접루트부에 용입부족이 존재하는 경우 용접루트부의 응력집중계수가 용접지단부의 응력집중계수보다 다소 증가하고 용입부족 크기가 증가함에 따라 응력집중계수는 더욱 증가한다. 또한 용입부족이 존재하는 경우 용입부족의 크기가 증가함에 따라서 용접루트부에서 응력집중계수가 급격하게 증가한다.

- (1) 대한토목학회편, "도로교표준시방서", pp.142-149, 1996.
- (2) 日本土木學會編, "鋼橋における劣化現象と損傷の評價", (株)丸善, pp.10-12, 1996.
- (3) 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, pp.5-12, pp.240-260 1993.
- (4) 銲接學會編, "銲接・接合工學の基礎", (株)丸善, pp.175-234, 1993.
- (5) 木原 博, "現代 銲接工學", オーム社, pp.99-124, pp.157-176, 1992.
- (6) 佐藤邦彦 外, "銲接強度ハンドブック", 理工學社, pp.4(1)-4(35), pp.5(57)-5(58), pp.6(2)-6(22), 1990.
- (7) 中根金作, 大谷 碧, 太田省三郎, "(銲接總書 第5卷) 新版 銲接繼手の強度", 産報, pp.71-178, pp.191-199, 1972.
- (8) 鶴田 明, 善利博臣, "銲接構造の疲れ", 産報, pp.45-62, pp.150-161, 1973.
- (9) 永井欣一, 度辺正紀, 日置進, 梶本勝也, "構造用鋼材の疲れき裂傳播について(第1報)", 銲接學會誌, 第38卷 第11號, pp.1243-1248, 1968.
- (10) 造船協會 電氣銲接研究委員會編, "銲接繼手の疲勞強度", 第239號, 1951. 10.
- (11) 後川 理, 中山英治, "銲接繼手部の應力集中係數", UDC 621.791.05:539.43, pp.351-355.
- (12) 木下秀雄, 窪堀俊文, "溶込み不足が曲げ疲れ強さに及ぼす影響", 銲接學會誌, 第46卷 第10號, pp.741-748, 1977.
- (13) 西田正孝, "應力集中", 森北出版, 1973.
- (14) T.R. Gurney, "Fatigue Tests on Butt and Fillet Welded Joints in Mild and High Tensile Structural Steels", Br. Weld. J. Vol.9, No.11, pp.614-620, 1962.
- (15) R.P. Newman and M.G. Dawes, "Exploratory Fatigue Tests on Transverse Butt-Welds Containing Lack of Penetration", Br. Weld. Jr. Vol.12, No.3, pp.117-120, 1965.

(16) W.G. Warren, "Fatigue Tests on Defective Butt-Welds", Weld. Res. Vol.6, No.6, 1952.

(17) W.O. Dinsdale and J.G. Young, "The Significance of Defects in Aluminium Alloy Fusion Welds", Commonwealth Weld. Conf. London, 1965.

(접수일자 : 1998년 7월 13일)