

3 중 점용접재의 균열단 열림각(CTOA)을 이용한 피로균열거동

송삼홍*, 주동호**, 양윤진**

Fatigue Crack Behavior of Triple Piece Spot by Crack Tip Opening Angle of Welded Specimen

Sam Hong Song*, Dong Ho Joo**, and Yun Jin Yang**

ABSTRACT

In this study, internal fatigue crack initiation and propagation behavior were investigated by triple piece spot welded specimen. To estimate fatigue life of the specimen varied with shape and thickness, Crack tip opening angle(CTOA) correlated with stress intensity factor was used as the stiffness parameter. The relation between fatigue life and CTOA can be arranged by the quantitative equation for each specimen by experiment. In addition, the variation of stress distribution was solved and the effect on fatigue crack behavior was examined by finite element method(FEM).

Key Words : Triple Piece Spot Welding(3 중 점용접), Crack Tip Opening Angle(CTOA:균열단 열림각), Crack Propagation Behavior(균열 전파거동), Applied Load Range(작용하중범위), Fatigue Life(피로수명), Fatigue Limit(피로한도)

기호설명

ΔP = Applied load range
 N_f = Fatigue life
 θ = Crack tip opening angle(CTOA)
 X, Y, α, β = Correction constant

1. 서론

점용접은 편리성과 경제성이 인정되면서 판재 접합이 요구되는 구조물에 많이 이용되고 있다. 따라서 이러한 점용접을 효율적으로 이용하고자 최적 용접조건을 설정하거나 또는 피로수명을 예

측하기 위한 연구가 지속적으로 이루어져왔다.

Sawhill⁽¹⁾은 용접가압력, 용접전류, 너깃의 직경이 전단강도에 미치는 영향을 실험적으로 연구하고 점용접 강도 추정식을 제안하였다.

Wang, Corten⁽²⁾등은 점용접재의 피로수명에 관하여 해석적인 3 단계 모델을 제안하였다. 1 단계의 피로수명은 점용접부에서 균열발생에 대한 수명으로, 2 단계 수명은 균열이 두께방향으로 성장하는 과정으로, 3 단계 수명은 폭방향으로 균열이 성장하는 수명으로 하였다.

Satoh 와 Abe^{(3),(4)}는 SPCC(Steel Plate Carbon C)와 고강도 강판의 점용접재에서 스트레인 게이지를 이용하여 균열길이를 측정하고 피로수명을 하중범

* 고려대학교 기계공학과

** 고려대학교 대학원

위의 함수로 표현하였다.

Sawhill⁽¹⁾ 등은 점용접 구조물에서 산업계의 실용상 응력반복수 10^6 회 정도의 피로강도가 기준 피로강도로 적절하다고 보고하였다.

이러한 연구들은 주로 2 중 점용접재를 이용하여 연구된 것이 대부분이다. 그러나 실제 박판 구조물은 서로 다른 두께를 가진 판재를 3 겹으로 겹쳐 강판을 접합한 3 중 점용접 부위도 많으며, 기존의 연구된 내용은 이러한 3 중 점용접부의 피로수명을 예측하란 무척 곤란한 일이다.

따라서 본 연구는 형상과 두께 변화가 있는 3 중 점용접 시편을 선정하여 다음과 같은 연구를 실행하여 피로수명을 예측하고자 하였다.

- 1) 시편의 파괴형태와 정적강도를 평가하기 위하여 인장시험을 실시하여 그 결과를 검토하였다.
- 2) 중간판 두께가 다른 두 형태의 3 중 점용접재의 너그의 조직과 형태, 크기를 관찰하기 위해서 부식 시험과 경도 시험을 실시하였다.
- 3) 3 중 점용접재의 두께변화에 따른 피로거동의 특성을 작용하중의 변화에 따라 고찰하였다.
- 4) 피로수명에 지배적인 영향을 미치는 내부 피로크랙 전파거동을 고찰하였다.
- 5) 3 중 점용접 시편의 균열단 열림각을 측정하고 열림각에 의한 피로수명을 재평가하였다. 또한 평가된 수명식의 유효성을 검토하였다.
- 6) 유한요소해석을 통하여 시편의 피로거동에 영향을 미치는 응력분포를 확인하고 실제 설계단계에서 사용될 수 있는 예측수명 평가방법을 검토하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 시편 재료는 자동차 차체에 많이 사용되는 냉간압연강판 SPCC (Steel Plate Carbon C)이다. 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1 과 Table 2 에서 나타내었다. 점용접의 가압력과 용접전류를 변화시켜 점용접하였다. 이를 KS B 0802, KS B 0805, KS B 0851 의 규정에 따라 인장전단시험, 겹모양시험 및 단면시험을 실시하였다. KS 에 규정된 A 급 조건에 적합한 용접조건을 최종 선택하였다. 최종 선택한 점용접 조건은 Table 3 과 같다.

시험에 사용된 점용접 시편은 시편형상에 따라 크게 Type A 와 Type B 로 나누고 상하판의 두께를 1mm 로 일정하게 하였다. 일정한 두께의 상판 사이에 중간판을 끼워 두께를 0.5mm, 0.8mm, 1.0mm

로 변화시켰다. 각 시편의 기하학적 형상은 Fig. 1 과 Fig. 2 에 나타내었다. 피로시험은 전기 유압식 인장 압축 시험기(Instron 1331)를 사용하였으며 진동수는 10Hz, 응력비($R=P_{min}/P_{max}$)은 0.1 로 하였다. 피로수명은 균열이 전파하여 시편이 완전히 파단될 때까지로 하였으며, 피로한도는 응력반복수 10^6 cycle로 파단하지 않는 하중⁽¹⁾으로 하였다.

Table 1 Chemical composition of SPCC (wt%)

C	Mn	P	S
0.025	0.14	0.012	0.011

Table 2 Mechanical properties of SPCC

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
221.5	331.2	45

Table 3 Welding conditions

Welding force (kN)	Welding current (kA)	Current cycle (cycle)
3.433	11.88	10

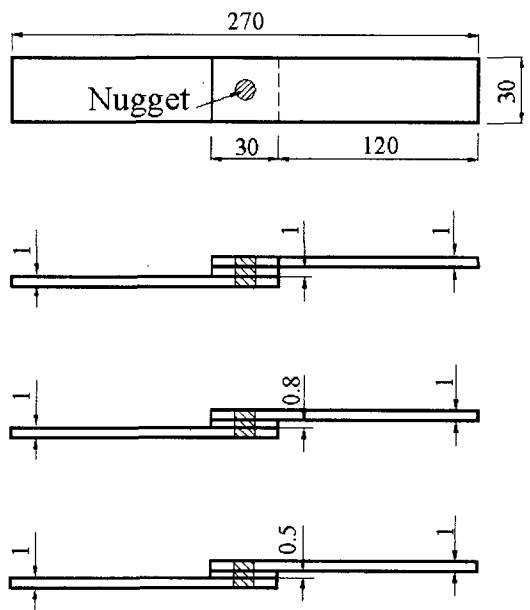


Fig. 1 Geometry of type A specimens

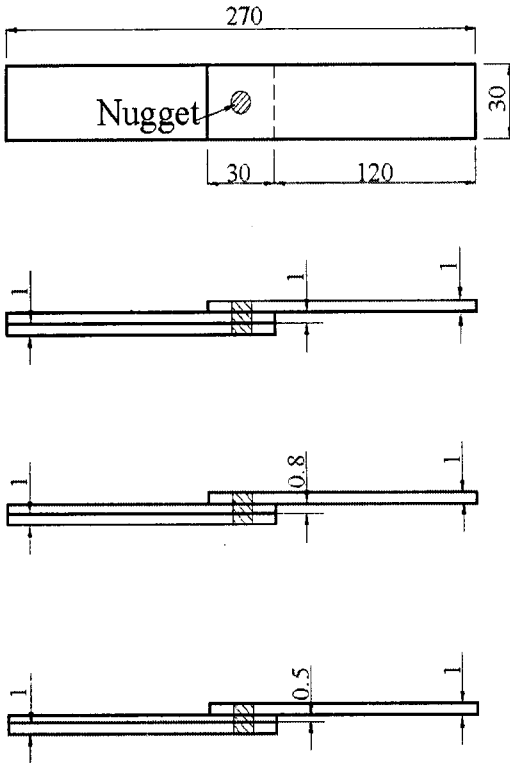


Fig. 2 Geometry of type B specimens

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험에 의한 거시적 파괴거동

본 장은 시편형상과 두께변화에 따른 시편의 정적 파괴거동과 파단강도를 고찰하였다. 두 종류의 시편은 인장시험시 모두 테어(tear)파괴⁽⁵⁾형태를 나타낸다.

각 시편의 파단강도값은 Table 4와 Table 5에서 나타내었다. Type A에 비하여 Type B가 인장강도와 항복강도가 상대적으로 큰 값을 가졌다. 각 형태의 시편에서 중간판의 두께가 감소할수록 항복강도가 조금 증가하였다. 이것은 동일 용접조건하에서 점용접됨으로 인해 중간판의 두께가 얇을수록 용접단면의 상태가 좋아짐을 알 수 있다.

3.2 점용접부의 내부조직 및 경도분포

본 장은 조직관찰과 경도시험을 실시하여 점용접부의 재료의 변화, 너깃의 크기, 형태 그리고 너깃의 실제 크기를 관찰하였다.

부식실험결과 Fig. 3에서와 같이 너깃, 열영향부, 모재부의 경계가 자세히 드러남을 볼 수 있다. 너깃부는 모재에 비하여 조직이 치밀하며 너깃끝단은 예리한 노치형상을 이루고 있으며 열영향부는

Table 4 The results of tensile tests (Type A) unit : mm

Specimen	0.5	0.8	1.0
Load			
Failure strength (kN)	5.631	5.042	5.062

Table 5 The results of tensile tests (Type B) unit : mm

Specimen	0.5	0.8	1.0
Load			
Failure strength (kN)	6.014	5.994	5.876

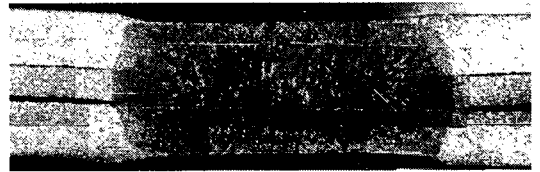


Fig. 3 Microstructure of welded joint (t=0.5mm, The thickness of middle plate)

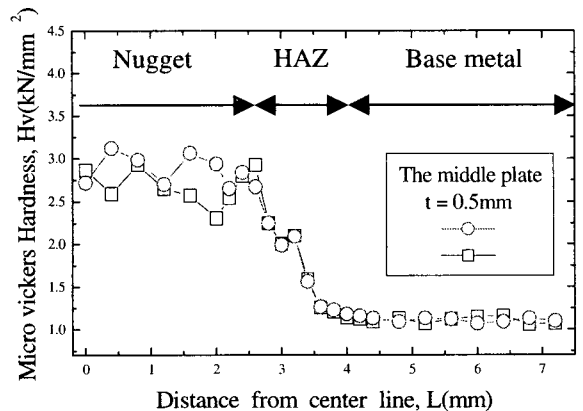


Fig. 4 The result of hardness test for middle plate

열 전달과 냉각에 의한 재결정 조직으로 입자가 상당히 조대화되어 나타나고 있다

중간판에서의 너깃과 너깃주위의 경도분포는 Fig. 4와 같다. 너깃의 경우 모재에 비하여 높은

경도값을 나타냈다. 열영향부로 갈수록 경도값이 급격히 감소하고 불연속적임을 볼 수 있다. 중간판의 두께가 증가할수록 너깃의 직경이 감소하였다. 이는 시편 제작시 시편 두께와 관계없이 동일한 용접조건을 사용함으로 인하여 일어나는 결과라고 판단된다.

3.3 작용하중의 변화에 따른 피로거동

각 시편의 작용하중범위(Applied load range)에 따른 파단수명(N_f)과의 관계는 Fig. 5 와 같다. 각 시편의 피로한도는 Table 6 에 정리하였다.

Table 6 The results of fatigue tests

Style	Type A			Type B		
	0.5	0.8	1.0	0.5	0.8	1.0
Limit						
Fatigue limit(kN)	1.0	0.961	0.892	1.373	1.520	1.589

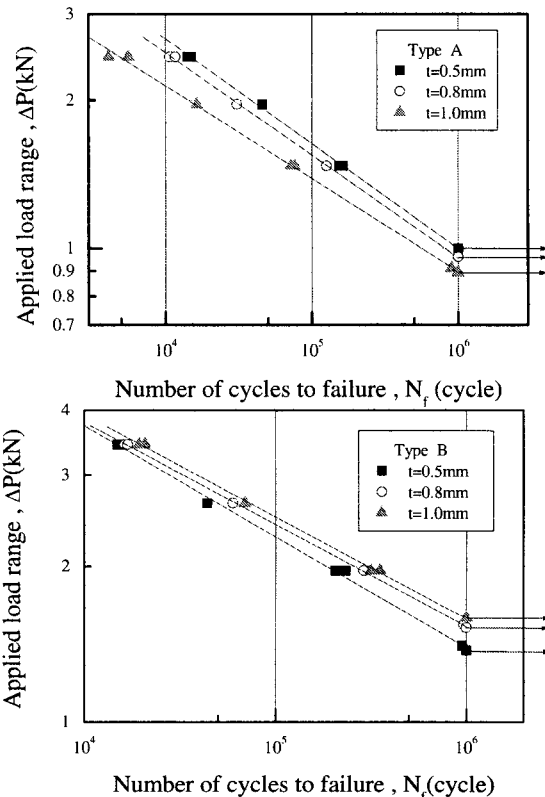


Fig. 5 The result of the fatigue test for each specimen(type A, type B)

같은 작용하중에서 Type B 가 Type A 보다 큰 파단수명을 가졌으며 작용하중이 낮아질수록 그 차이는 커졌다. Type A 에서는 두께가 감소할수록, Type B 에서는 두께가 증가할수록 파단수명의 향상이 관찰되었다.

3.4 내부균열 발생과 전파거동

본 장은 작용하중 변화에 따른 내부균열의 발생 지점과 균열 전파거동을 고찰하였다.

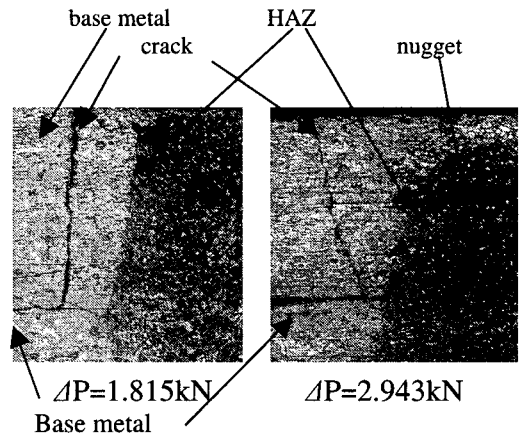


Fig. 6 Internal crack propagation of type B specimen (t = 1.0mm)

Fig. 6 은 Type B 의 시편중 중간판의 두께가 1mm 인 시편을 이용하여 피로한도를 제외한 작용하중 변화에 따른 피로시험하고, 그 내부를 촬영한 것이다. 점용접재의 전체 피로수명은 일반적으로 3 단계로 구분을 한다. 첫 번째 단계는 너깃단 주위에서 미소 균열이 발생할 때까지의 단계(Stage I)이고, 두 번째 단계는 미소 균열이 모재의 두께 방향으로 진전하는 단계(Stage II)이고, 세 번째 단계는 모재의 표면까지 진전한 균열이 시험편의 폭 방향으로 진전하는 단계(Stage III)를 말한다. 따라서 내부균열의 발생과 전파는 I, II 단계에서의 균열거동을 말한다. Sato⁽⁶⁾ 등에 의하면 점용접재에 대한 굽힘 피로 시험의 경우에 프레스본드(pressure bond)를 포함하여 두 판재의 갈라진 끝에서 0.1~0.2mm 떨어진 지점에서 균열이 발생하는 것으로 보고하였다. 또한 송⁽⁷⁾ 등에 의하면 내부균열의 처음 발

생방향은 너깃단 쪽으로 향하는 것이 공통적이지만 그 후의 전파방향은 하중에 따라 다르며 작용하중이 증가할수록 균열의 전파는 너깃 쪽에서 모재쪽으로 바뀐다고 하였다.

본 실험에서도 균열발생지점은 모두 내표면부에 위치한 너깃단의 열영향부 부근에서 발생하였으며 작용하중의 변화에 따라 전파의 방향이 변하는 것을 관찰할 수 있었다.

피로시험시 표면 균열의 성장과정을 살펴보면 작용하중이 커질수록 표면균열이 너깃단을 따라 조금 흐르다가 순간적인 파단을 일으켰고 작용하중이 낮아질수록 표면균열은 시편폭 방향으로 직선적인 성장을 이루며 파단되었다.

3.5 하중 작용에 따른 균열단 열림각의 변화

0.49kN 씩 정하중을 증가시켜 시편이 파단할 때까지의 시험편을 근접촬영하고 균열단 열림각을 측정하였다. Fig. 7은 Type A와 Type B의 시험편 측면부의 균열단 열림각의 변화를 나타낸 것이다.

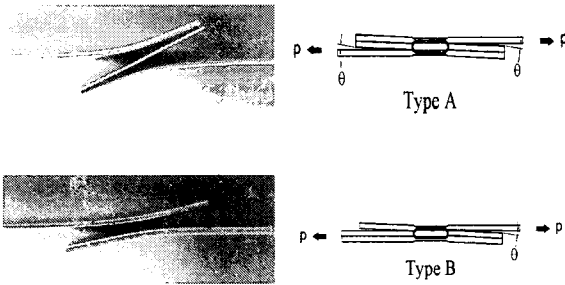


Fig. 7 Deformed shape of each specimen(P=4.905kN)

초기 저하중의 균열단 열림각의 변화는 매우 미세하였으며 하중이 증가할수록 각의 크기는 비선형적으로 증가하였다. Type A의 경우 균열단 열림각은 대칭적이었으나, Type B의 경우에는 그 크기가 비대칭적이었다. 인장시험시 Type A는 상판과 하판이 중간판의 영향을 받지 않아 대칭적으로 벌어지며, Type B는 중간판이 하판의 두께를 증가시키는 원인이 되어 비대칭적으로 벌어지는 것이다. 작용하중이 낮은 경우 모재가 두겹이 겹친 판의 끝단과 한겹판에서의 균열단 열림각(측정각)의 크기가 반대편 각에 비하여 상대적으로 큰 값을 가졌다. 하중이 증가하여 파단되기 직전의 하중

값에서는 측정각 반대편의 균열단 열림각의 크기가 상대적으로 더 커지거나 같아짐을 관찰할 수 있다.

Type A의 경우 동일하중 조건에서 중간판의 두께가 두꺼워질수록 균열각의 크기가 더 커짐을 알 수 있으며 Type B의 경우에는 상이하게 중간판의

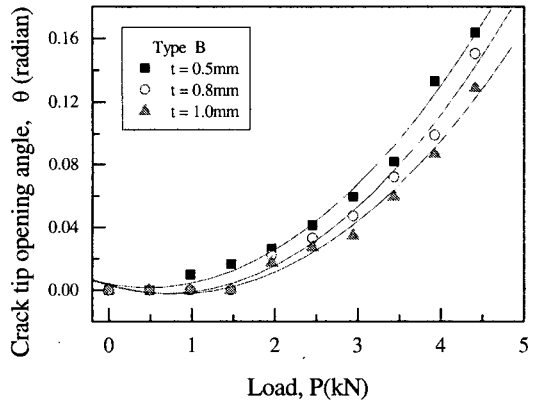
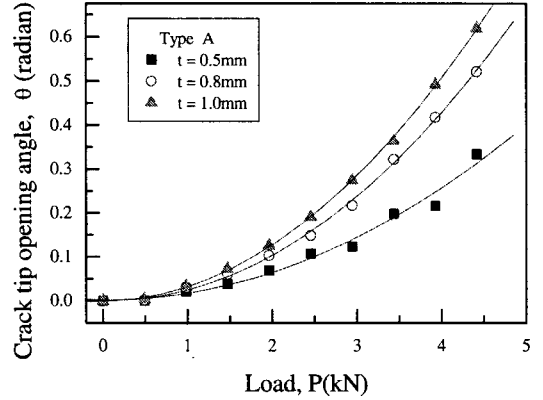


Fig. 8 Crack tip opening angle of each specimen

두께가 얇아질수록 (1.0mm, 0.8mm, 0.5mm 순) 균열단 열림각의 크기가 증가하였다. 이를 Fig. 8에서 비교하였다

3.6 균열단 열림각 변화에 대한 피로거동

실험을 통하여 얻어진 결과를 이용하여 피로수명과 균열단 열림각을 양 대수관계 그래프로 나타내어 균열단 열림각과 피로수명의 관계를 알아보았다. Fig. 9에서 균열단 열림각이 증가함에 따라 피로한도는 낮아진다. 반대로 균열단 열림각이 작아수록 피로한도가 향상됨을 볼 수 있었다. 또한 두 그래프 모두가 중간판 두께에 관계없이 하나의

피로한도곡선을 중심으로 각 점들이 분포하고 있다.

송⁽⁸⁾등은 균열단 열림각을 강성파라미터로 삼아 점용접의 피로수명 평가식을 제안하였다. 이를 이용하여 두께의 변화에 따른 점용접제의 피로한도곡선을 통일적으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\log(N_f) = X - Y \log(\sqrt{\theta}) \quad (1)$$

위 식에서 X 는 파단수명 보정을 위한 형상계수이며, Y 는 균열단 열림각을 고려한 형상계수이다. 각 상수 값은 Table 7 에서 정리하였다.

Type	X	Y
Type A	1.734	5.3
Type B	1.966	4.115

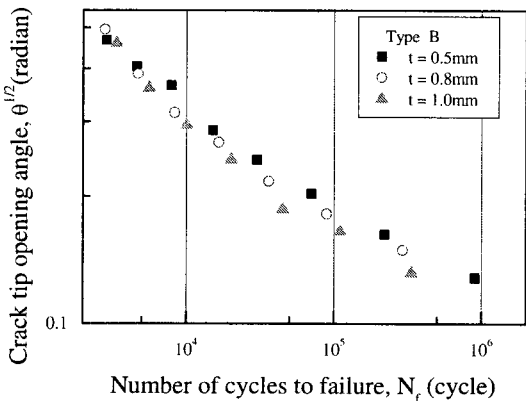
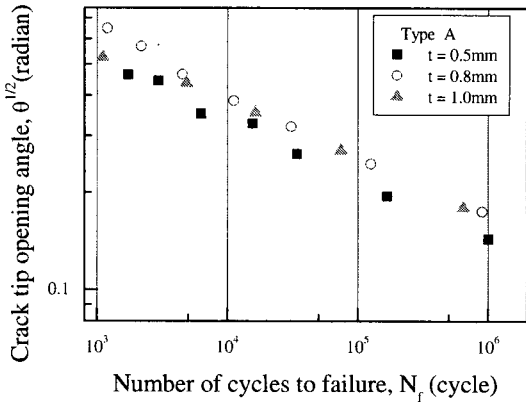


Fig. 9 Relationship between CTOA and Number of cycles to failure

3.7 피로수명식의 평가

3 중 점용접 시편의 피로수명의 예측결과를 실제 실험결과와 비교 검토하여 제안된 예측식의 유효성을 평가하였다. Fig. 10 에서와 같이 균열단 열

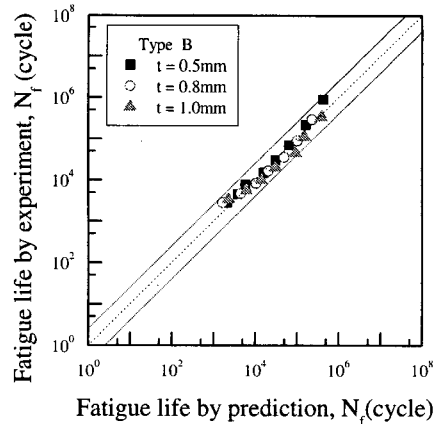
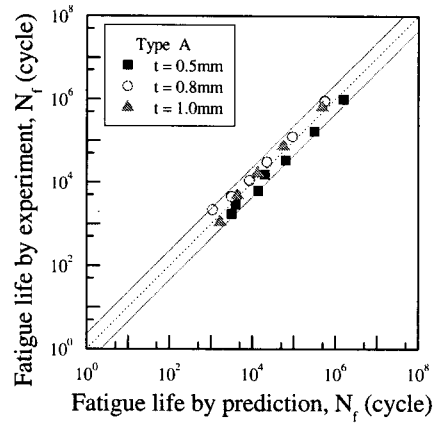


Fig. 10 Comparison of experimental fatigue life and predicted fatigue life

림각 (θ) 으로 정의한 예측결과가 실험결과에 대하여 2-밴드영역내에 좁게 분포하여 제안된 예측식이 피로수명예측에 있어서 유효함을 알 수 있다.

3.8 점용접부 주위의 응력해석과 피로수명 평가

본 장은 실험적으로 확인된 균열의 발생 위치가 유한요소해석으로 알아본 최대응력 집중부위와 일치함을 증명하고 응력집중으로 인한 시편의 피로수명 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

각 시편을 3 차원 solid 요소로 모델링하고, 탄성

유한요소해석을 실시하였다. 너깃부는 지름이 6mm 인 원형으로 모델링하고 상판 너깃 원형부와 하판 너깃 원형부를 일체시켜 너깃부를 형성하였다. Fig.11 은 너깃부의 모델을 개략적으로 나타낸 것이다.

다축응력하에서 시편의 항복응력을 알기 위해 Von mises 응력분포로 나타내었다. 사용한 패키지

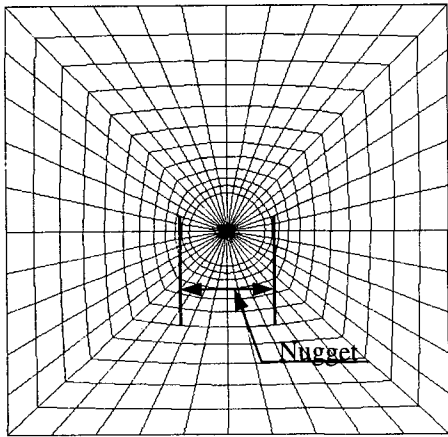


Fig. 11 The part of FEM Model

Table 8 Number of elements and nodes for each type

Factor Type	Total number of elements	Total number of nodes
Type A	984	1916
Type B	1044	2056

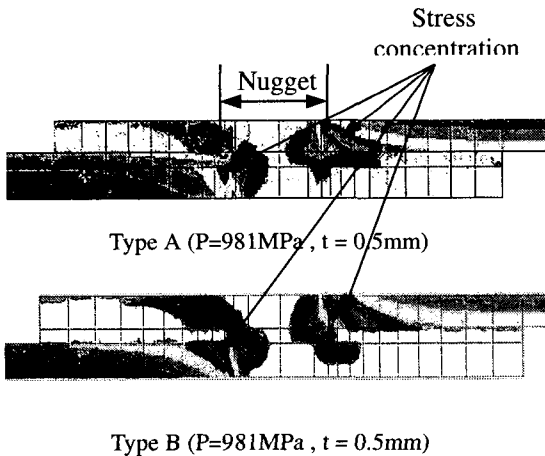


Fig. 12 Stress distribution of each specimen

는 display3 와 EMRC NISAⅡ이며 사용된 절점수와 요소수는 Table 8 과 같다.

해석 결과 최대 응력 집중값과 응력분포가 하중과 시편의 형상에 따라 다양하게 분포하였다. 두 형태(Type A, Type B)의 시편의 상하부의 내표면 너깃단 양쪽의 약간 떨어진 부분에서 응력집중부가 발생하였다. 이 부분은 열영향부에 해당하며 실제 피로시험시 초기 크랙이 생성되는 지점이다.

최대 응력 집중값들은 작용하중에 따라 차이가 있으나 모두 항복응력값을 훨씬 넘고 있었다. 또한 응력집중이 일어난 너깃단 부분은 피로시험시 내부크랙이 발생하는 지점과 일치한다. Fig.12 에 잘 나타남을 알 수 있다.

Type A 가 Type B 에 비하여 Von Mises 상당응력 값이 높게 나타났으며, Type A 의 경우 중간판의 두께가 두꺼워질수록 Von Mises 상당응력이 커짐을 알 수 있었으며 Type B 의 경우에는 중간판의 두께가 두꺼워질수록 Von Mises 상당응력이 작아짐을 보였다.

Von Mises 상당응력의 커짐은 피로강도에 상당한 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 시편의 형태와 두께에 따라 상대적으로 Von Mises 상당응력이 크게 작용한 시편에서는 그 피로수명이 짧은 것으로 확인되었다. 또한 이런 현상을 인장-인장 피로시험시 잘 나타남을 알 수 있었다.

3.9 피로수명 평가에 대한 유한요소해석

실제 구조물의 3 차원 유한요소해석은 절점수와 노드수의 증가함에 따른 시간과 비용으로 인해 불가능하다. 설계평가에서 사용될 수 있는 수명 평가 방법을 알아보고 그 실용성을 검토해 보고자 하였다. 이러한 방법 중에는 분담하중해석에 의한 해석방법⁽⁴⁾등이 보고되고 있었다.

본 실험에서는 실험에 의하여 얻어진 결과와 작용하중에 따른 강체 요소 변형각(Beam deformation angle)의 변화를 비교하여 강체요소변형각의 변화와 피로수명과의 관계를 검토하였다. 모델은 모재와 너깃을 각각 판 요소 (Shell element)와 강체 요소(Beam element)로 하여 두 요소를 접합한 것을 선택하였다. 이러한 모델은 실제 설계시 점용접부를 모델링하는 대표적인 방법이다. 다음 모델을 간략하게 Fig.13 에 나타내었다.

사용된 절점 수와 요소 수는 Table 9 와 같다. 이 모델은 3 차원 유한요소해석에 비해 절점수와 요

소수를 절감하는 효과를 나타낸다.

다음 모델에 대해 인장하중을 가하면 강체요소에 굽힘하중과 축방향 하중값이 존재하게 된다. 강체요소의 각변화는 강체 요소의 축방향 하중값(박리하중)과 굽힘하중 값의 크기에 의해 좌우된다. 이러한 힘들이 커짐에 따라 변형각의 크기도 커짐을 알 수 있다. Fig.14은 강체요소의 각변화와 굽힘하중과의 관계를 나타낸 것이다.

유한요소해석과 실험에서 얻어진 강체요소변형각(θ_1) 과 균열단 열림각(θ)의 관계는 Fig. 15에서 확인할 수 있듯이 균열단 열림각과 강체요소변형각은 선형적 비례관계에 있음을 알았다.

작용하중이 저하중인 경우에는 상호관계가 단일 직선 상에 놓여지며 이러한 관계를 정리하여 피로 수명과의 관계를 나타내었다

$$\log(N_f) = \alpha - \beta(\sqrt{\theta_1}) \quad (2)$$

Table 9 Number of elements and nodes for each type

Factor Type	Total number of elements	Total number of nodes
Type A	683	1303
Type B	729	1434

Table 10 Value of α and β

Value Type	α	β
Type A	8.760	-6.464
Type B	8.520	-7.918

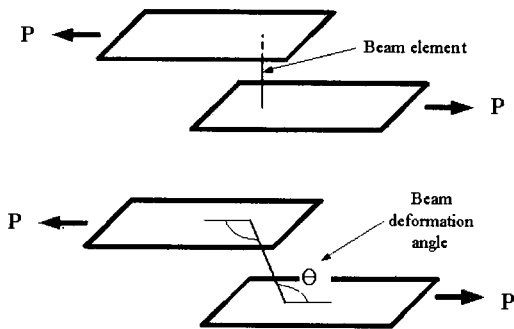


Fig. 13 The FEM model composed of sell element and beam element & Load acting on spot weld nugget (continued)

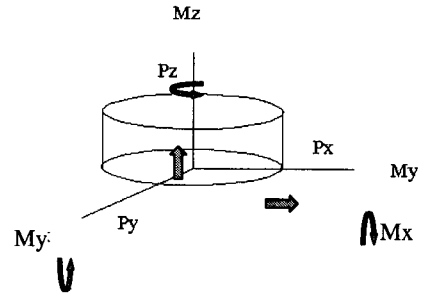


Fig. 13 The FEM model composed of sell element and beam element & Load acting on spot weld nugget

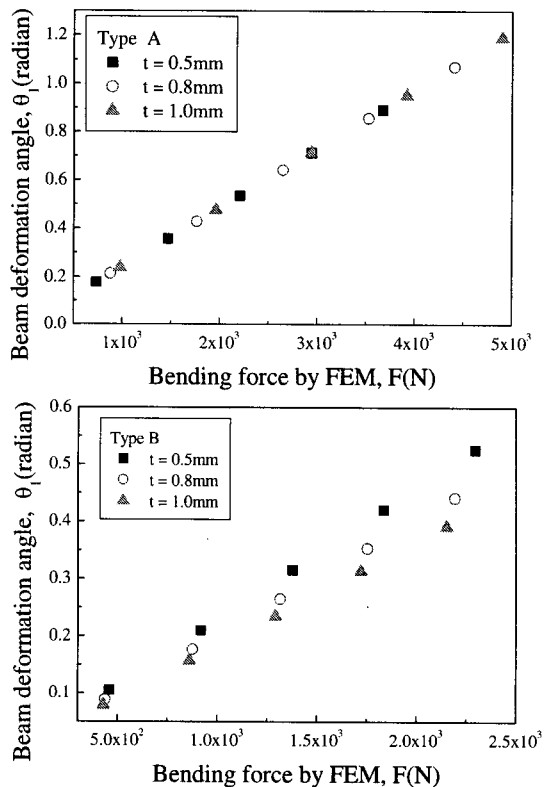


Fig. 14 Relationship between beam deformation angle and node bending force.

4. 결론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 인장시험결과 모두가 태어파괴를 일으켰다. Type A에 비하여 Type B가 인장강도와 항복강도가 상대적으로 큰 값을 가졌으며, 시편 중간판의 두께가 감소할수록 항복강도가 조금 증가하였다.

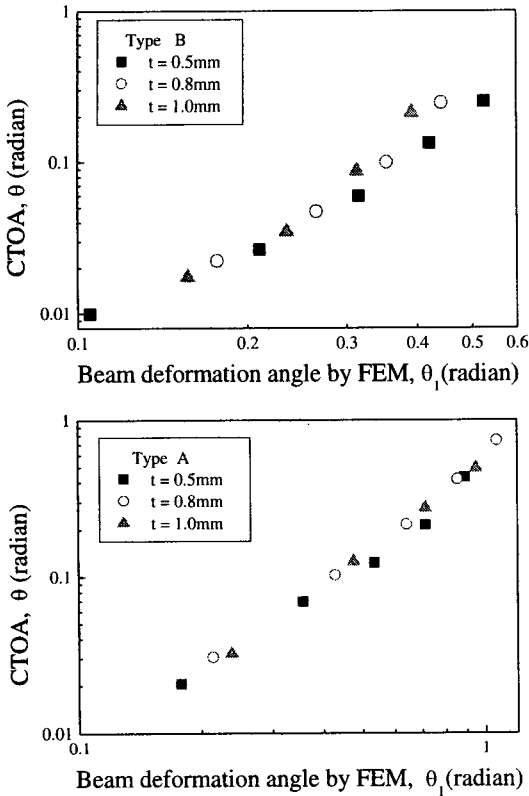


Fig. 15 Relationship between beam deformation angle and CTOA by FEM

(2) 너깃부는 모재에 비하여 조직이 치밀하였다. 경도 값은 모재에 비하여 그 값이 컸으며, 열영향부에서는 경도값이 급속히 감소하였다. 시편의 중간판 두께가 증가할수록 너깃의 크기는 감소하였다.

(3) Type A 의 피로수명은 두께가 감소할수록, Type B 의 피로수명은 두께가 증가할수록 향상되었으며 같은 작용하중에서 Type B 가 Type A 보다 큰 파단수명을 나타냈다. 작용하중이 낮아질수록 그 차이는 커졌다.

(4) 균열단 열림각 측정결과 Type A 의 경우 시편 중간판의 두께가 증가할수록 균열단 열림각의 크기가 비선형적으로 증가하였고, Type B 의 경우에는 중간판의 두께가 감소할수록 균열단 열림각의 크기가 비선형적으로 증가하였다.

(5) Type A 와 Type B 의 피로수명을 중간판 두께에 관계없이 단일화된 식으로 정리할 수 있었다.

$$\log(N_f) = X - Y \log(\sqrt{\theta})$$

(6) 피로균열은 프레셔본드(pressure bond)를 포함한 너깃단 주위에서 어느 정도 떨어진 지점에서 발생하였고 이는 FEM 에 의해 구한 응력분포해와 일치한다. 유한 요소 해석을 통하여 각 시편의 응력 분포와 응력 집중, 균열의 발생위치와 피로수명과의 연관성을 파악할 수 있었다. 또한 작용하중의 변화에 따라 내부 균열의 진전 방향을 달리 함을 확인할 수 있었다.

(7) 유한요소해석 결과 강체요소변형각은 굽힘하중과 박리하중에 의하여 그 크기가 좌우되며 강체요소변형각과 균열단 열림각은 상호 비례적인 관계를 갖는다. 작용하중이 저하중인 경우 이를 이용하여 유용한 피로수명 평가식을 유도할 수 있다.

$$\log(N_f) = \alpha - \beta(\sqrt{\theta_1})$$

참고문헌

1. J. M. Sawhill, Jr., J. C. Baker, "Spot Weldability of High-Strength sheet Steels," *Welding Journal* January, pp. 19~30, 1980.
2. P. C. Wang, H. T. Corten, and F. V. Lawrence, "A Fatigue Life Prediction Method for Tensile-Shear Spot Welds," SAE850307.
3. T. Satoh, and H. Abe, "non - Destructive Detection Method of Fatigue Crack in Spot-welded Joint Specimens," SAE 860601.
4. H. Abe, S. Kataoka, and T. Satoh, "Empirical Formula for Fatigue Strength of Single Spot Welded Joint Specimens under Tensile-Shear Repeated Load," SAE 860606.
5. 송삼홍, 김부동, "점용접재의 파괴거동과 응력분포," *대한기계학회 논문집*, 제 8 권 제 3 호, pp. 224~231, 1984.
6. Y Sato, Y Ito, T Shida and S Minakawa, "The Fatigue Strength of Spot Welded Joints," *Welding international*, No. 2 pp. 140~145, 1988.
7. 송삼홍, 배준수, 장성재, "하중작용방식에 따른 차체용 점용접재의 피로특성에 관한 연구," *韓國精密工學會 97 年度 秋季學術大會論文集*, pp.

668~671, 1997.

8. 송삼홍, 허지웅, “SPCC 점용접재에 따른 피로거동의 변화,” 韓國精密工學會 98 年度 秋季學術大會論文集, pp. 567~570, 1998.
9. 송삼홍, 양윤진, 최병호, “하중작용방식에 따른 차체용 점용접재의 피로특성에 관한 연구,” 韓國精密工學會 99 年度 秋季學術大會論文集, pp. 964~967, 1999.
10. 송삼홍, 양윤진, 전재욱, “냉간압연강판 점용접재의 너깃간 거리에 따른 피로거동,” 대한기계학회 논문집 A 권, 제 24 권, 제 11 호, pp. 2845~2852, 2000.