

STS304와 S15C 이종마찰압접부의 접합계면 응력해석

오정국*, 차용훈+, 성백섭+, 박창언++, 김하식+++, 김충환++++

(논문접수일 2001. 10. 4, 심사완료일 2002. 4. 1)

Stress Analysis of Bonding Interface in the Dissimilar Friction Welded Joints

Jung-Kuk Oh⁺, Yong-Hoon Cha⁺, Back-Sub Sung^{*}, Chang-Eun Park⁺⁺,

Ha-Sig Kim⁺⁺⁺, Choong-Hwan Kim⁺⁺⁺⁺

Abstract

Friction welding has many merits such as energy efficiency, simple processing, etc. but it is difficult to obtain good welding at the welded interfaces and heat affected zone. It is discovered that stress singularity exists at the interfaces and heat affected zone. The computer program based on boundary element method is utilized in this study. A mathematical model is implemented based on results from several experiments performed at and around the welded interfaces and heat affected zone of dissimilar metals under static and dynamic loadings. This study is to investigate the characteristics of the deformation and fracture behavior around interfaces for friction welded materials under static tensile load. Also, the stress distribution at the tip of crack is analyzed by using BEM based on Kelvin's solution of 2-dimensional binding zone.

The results of BEM are identical with those in case of considering interfaces of both heat affected zone. Also, stress singularity at the tip of interfaces appears when the elastic modulus ratio is 1.07.

Key Words : Heat Affected Zone(열영향부), Bonding Interfaces(접합계면), Friction Welded(마찰용접)

1. 서론

서로 성질이 다른 금속을 상대속도로 마찰시켜 발생되는

마찰열을 이용하여 접합하는 기술은 제조 환경 차원에서 매우 각광 받고 있다⁽¹⁻⁵⁾. 그러나 특이성이 다른 재료를 접합하면 접합시 잔류 응력이나 재료 특성의 불연속성으로 인하

* 주저자, 조선대학교 기계공학부 (jkoh@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375번지, Tel: 062-230-7043
+ 조선대학교 기계공학부
++ 북표대학교 기계선반해양공학부
+++ 조선이공대학 컴퓨터응용기계공학부
++++ 조선대학교 대학원

여 응력 집중 등이 생기고, 이들은 접합강도에 강한 영향을 미친다. 이것 때문에 계면 혹은 계면 근방 균열을 갖는 접합 재료의 파괴거동에 관한 실험 및 이론적 연구가 활발히 진행 되어 왔다⁽⁶⁻⁹⁾.

본 연구를 위하여 접합계면이 뚜렷하고 계면 혹은 계면주위의 균열로 인한 파괴가 예상되는 S15C재와 STS304재를 선정하여 마찰압접을 위한 회전속도, 예열압력, 마찰압력, 단조압력, 예열시간, 마찰시간, 단조시간 등 이중 마찰압접재의 접합 조건을 결정하였다.

접합계면 주위에 발생한 균열의 거동을 관찰하고 실측을 통해 접합계면 주위에 발생한 균열과 일치하는 해석 모델을 제안하였다. 또한 마찰압접시 순간적인 고온 및 소성유동에 의해 발생하는 접합계면 주위 조직의 변화 및 경계요소법(BEM)을 이용하여 접합 계면에 발생하는 응력의 특이성과 분포를 해석하였다.

2. 관련이론

2.1 응력 특이성

계면과 계면 혹은 계면과 계면이 교차하는 계면단에서는 일반적으로 그 점에서 응력이 무한대가 되는 응력 특이성이 발생한다. 이 점이 파괴의 기점이 되고 강도 저하를 초래하는 경우가 있으므로, 이중 접합재의 강도 평가에는 먼저 이 특이성을 바르게 평가할 필요가 있다. 응력 특이성을 소실하는 재료의 조합도 존재하므로 이것을 이용하면 강도 향상도 기대할 수 있다⁽¹⁰⁾. 이중접합재가 외력을 받는 경우 계면 근방의 응력 σ_{ij} 는 계면단에서의 거리를 r 이라 할 때 다음의 특이성이 생긴다.

$$\sigma_{ij} \propto \frac{1}{r^\lambda} \quad (1)$$

2.2 Dunder 매개변수

2차원 탄성론에 근거하면 특이성의 차수 λ 는 다음의 특성 방정식에서 구할 수 있다.

$$D(\lambda; \theta_1, \theta_2, \alpha, \beta) = 0 \quad (2)$$

여기서 정의되는 재료정수 α, β 는 Dunder 매개변수로써 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\mu_1(k_2 + 1) - \mu_2(k_1 + 1)}{\mu_1(k_2 + 1) + \mu_2(k_1 + 1)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\mu_1(k_2 - 1) - \mu_2(k_1 - 1)}{\mu_1(k_2 + 1) + \mu_2(k_1 + 1)} \quad (4)$$

$$k_i = \begin{cases} 3 - 4\nu_i & (\text{평면 변형률}) \\ \frac{(3 - \nu_i)}{(1 + \nu_i)} & (\text{평면 응력}) \end{cases} \quad (5)$$

본 연구와 같이 $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$ 인 경우는 식 (2)의 특성 방정식을 풀고 $\alpha - \beta$ 선도 상에서 λ 의 등고선을 그리면 λ 의 크기와 특이성의 강도를 알 수 있다.

$$\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2 \text{인 경우}$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.5 + i\epsilon \\ \epsilon &= \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1-\beta}{1+\beta} \end{aligned} \quad (6)$$

$\epsilon = 0$ 인 경우는 균질재 중의 균열과 같이 $1/r^{1/2}$ 응력 특이성이 되지만 $\epsilon \neq 0$ 인 경우는 진동 응력 특이성이 생긴다.

3. 실험 및 해석

3.1 시험편

실험에 사용된 실험재료는 일반적으로 내열재로서 많이 사용되고 기계적 성질이 근사하며 접합계면이 뚜렷한 냉간 압연한 STS304와 S15C재를 선정하였고, 화학성분 및 기계적 성질을 각각 Table 1, Table 2에 표시하였다.

마찰압접을 위한 시료는 지름 $\phi 15\text{mm}$ 의 것을 사용하였으며 압접시 소성유동으로 인하여 감소하는 길이의 변화를 고려하여 각각 STS304의 경우 105mm, S15C재의 경우 110mm로 하였고 마찰압접 후의 길이는 약 200mm가 되도록 하였다.

접합계면 주위의 열영향부와 소성유동층의 두께에 따른 최적조건을 구하기 위하여, 압접조건인 변수로서 마찰압접재의 강도에 가장 중요한 영향을 미치는 인자인 엽셋압력과 엽셋시간을 변화시키면서 압접하였다. 마찰압접이 정상적으로 행하여졌는지의 여부를 확인하기 위하여 마찰압접한 시험편의 접합계면을 포함하는 접합부를 절단하여 계면의 접합상태를 Photo. 1과 같이 금속현미경으로 관찰하였다. 시험편의 마찰압접을 행한 후 접합계면을 관찰해 본 결과 두 모재의 금속학적 성질이 다름에도 불구하고 계면은 시험

편의 축에 수직한 방향으로 접합되어, 공극은 존재하지 않았으며 100% 이상의 접합효율을 나타내었다.

본 연구에서 사용한 이종접합재의 마찰압접은 습식 브레이크식 마찰 압접기를 사용하였고, STS304재를 고정하고 S15C재를 시계방향으로 회전·가압하였다. 시험편은 Fig. 1과 같이 KS B 14호 규격에 맞도록 가공하였다. 압접조건과 마찰압접공정을 Fig. 2에 표시하였으며, 인장시험 시험편의 기계적 성질을 Table 3에 표시하였다.

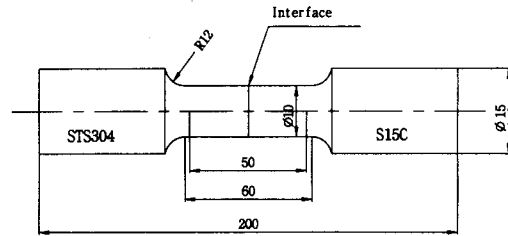


Fig. 1 Tensile test specimen

Table 1 Chemical compositions of base metal

(Wt. %)

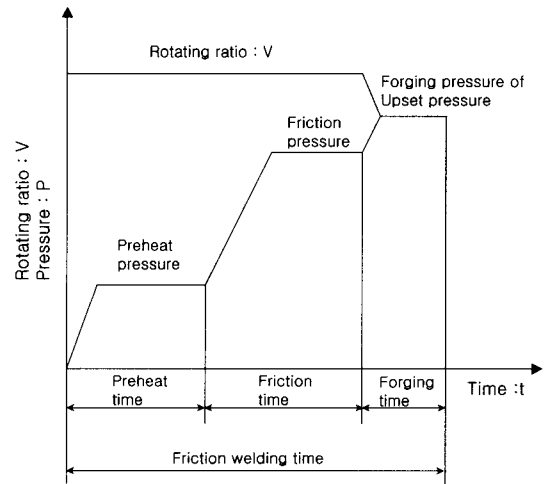
Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
STS304	0.08	1.17	2.28	0.045	0.30	8.19	24.39
S15C	0.16	0.21	0.52	0.02	0.35	0.18	0.16

Table 2 Mechanical properties of base metal

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction (%)	Hv (100gr)
STS304	604.00	731.63	29.09	77.20	257
S15C	680.62	701.81	7.03	47.44	224

Table 3 Mechanical properties of tensile test

Yield Strength(MPa)	Tensile Strength(MPa)
460.48	607.34



Preheat Pressure (MPa)	Preheat Time (sec)	Heating Pressure (MPa)	Heating Time (sec)	Upset Pressure (MPa)	Upset Time (sec)
45	2	125	0.7	150	2.5

Fig. 2 Schematic illustration and conditions of friction welding process

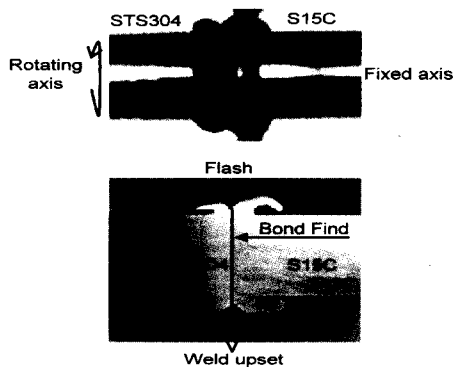


Photo. 1 Friction welded specimen by dissimilar materials

3.2 접합계면 모델링 및 해석 방법

이종마찰압접재의 접합계면은 미시적으로 보면 매우 복잡하다. 그러나 거시적으로 본 역학적 모델을 Fig. 3과 같이 단순화하여 재료정수가 다른 이종재료가 이상적으로 접합되어 있고 동종재일지라도 열영향부와 모재부와의 금속조직학적 불연속부분을 접합계면으로 간주하였다. 이종마찰압접재의 계면응력해석을 3개의 계면이 존재하는 경우 각 계면상의 응력을 유동층의 두께를 변화시키면서 Kelvin해를 기본해로 한 2차원 경계요소법을 사용하여 영역분할법으로 해석하였으며 사용된 언어는 Fortran 77이다. 재료 1, 2를 예로 들면 계면 상에서는 다음과 같은 완전 접합조건을 만

족한다고 가정하고 편의상 접합계면은 직선이며 x 축으로 하였다.

$$\sigma_{yy}^{(1)} = \sigma_{yy}^{(2)}, \sigma_{xy}^{(1)} = \sigma_{xy}^{(2)}, \sigma_{xx}^{(1)} \neq \sigma_{xx}^{(2)} \quad (7)$$

$$u^{(1)} = u^{(2)}, v^{(1)} = v^{(2)} \text{ on } y=0 \quad (8)$$

식 (7)은 표면력의 평형, 식 (8)은 변위의 연속성을 의미하고, 접합계면 방향의 σ_{xx} 의 불연속성에 주의할 필요가 있다. 이 응력불연속의 양은 별도 계면 변형의 연속성과 관계되고, 여기서 해석모델 재료 1과 재료 2는 압접시 소성유동으로 인한 모재와는 이방성을 갖는 유동층을 의미한다. 재료 3은 STS304의 모재재료, 재료 4는 S15C의 모재이다. 이때 유동층의 두께(h_1, h_2)는 접합계면에서 모재와 열영향부와의 경계까지로 하였고, 열영향부와 모재와는 동종재이나 이종재로서 간주하고, 재료 1, 2의 두께는 각각 S15C 재와 STS304 재 측의 열영향부의 두께로서 h_1, h_2 로 표기하였다. 특히 $h_1 = h_2$ 인 경우는 동종재의 마찰압접, $h_1 \neq h_2$ 인 경우는 이종재의 마찰압접을 각각 의미하고, $h = h_1 = h_2 = 0$ 인 경우는 열영향부, 소성유동층이 존재하지 않는 접합계면의 해석에 적용될 수 있다.

수치계산시 재료상수에 대한 자료는 Table 4의 데이터를 활용하였고, 이 데이터는 수치해석을 위하여 실험적으로 구한 것으로서 열영향부의 데이터는 모재를 용접온도에서 열처리하여 실험한 것이다.

Table 4 Properties for numerical analysis

Properties Materials	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio (ν)
S15C	208	0.3
HAZ of S15C	147	
HAZ of STS304	158	
STS304	198	

4. 결과 및 고찰

4.1 접합계면부의 금속조직 관찰

Photo. 2는 STS304와 S15C의 마찰압접재의 계면부와 열영향부, 그리고 모재부의 금속조직을 나타낸다. 계면부는 이종재료의 모재조직입자가 압접 중에 고온상태에서 서로 혼합되어 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 볼 수

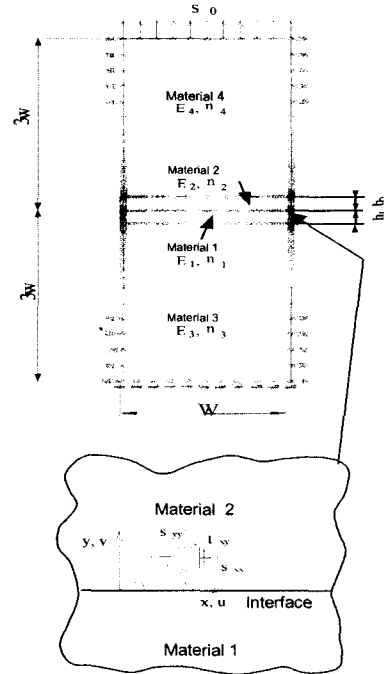


Fig. 3 Stress near the crack tip in dissimilar material

있다. S15C의 경우 계면으로부터 약 3.0mm 떨어진 곳에서 모재조직인 페라이트와 퍼얼라이트가 나타나고, 열영향부는 모재의 페라이트가 아주 미세화되어 협소하게 나타나고 있다. STS304의 경우 계면으로부터 약 2.3mm 떨어진 곳에서 모재조직인 오스테나이트가 나타나고, 열영향부는 극심한 반지름방향의 소성유동이 발생하여 슬립선이 형성되어 있음이 관찰되었다.

Photo. 2는 STS304와 S15C의 마찰압접재의 계면부와 열영향부, 그리고 모재부의 금속조직을 나타낸다. 계면부는 이종재료의 모재조직입자가 압접 중에 고온상태에서 서로 혼합되어 입자성장이 없는 미세입자의 혼합조직을 볼 수 있다. S15C의 경우 계면으로부터 약 3.0mm 떨어진 곳에서 모재조직인 페라이트와 퍼얼라이트가 나타나고, 열영향부는 모재의 페라이트가 아주 미세화되어 협소하게 나타나고 있다. STS304의 경우 계면으로부터 약 2.3mm 떨어진 곳에서 모재조직인 오스테나이트가 나타나고, 열영향부는 극심한 반지름방향의 소성유동이 발생하여 슬립선이 형성되어 있음이 관찰되었다.

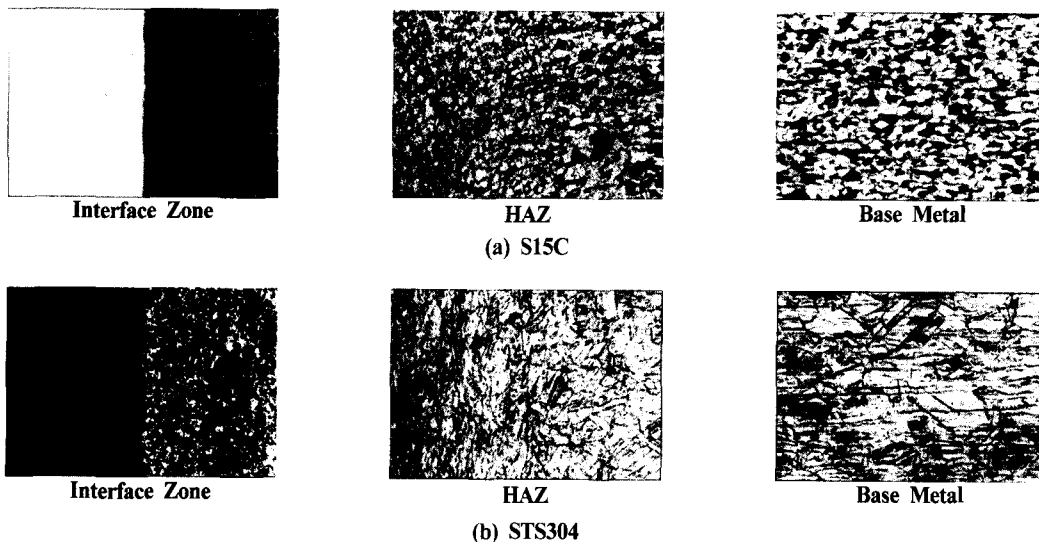


Photo. 2 Micro structure in friction weld

4.2 마찰접합계면부 응력분포거동과 특이성

Fig. 4는 열영향부를 무시한 이종재의 접합계면의 응력 해석결과를 표시한 것이다. 탄성계수비(E_1/E_2)가 10인 경우 접합 끝부분 표면에서의 σ_{yy} 는 σ_0 에 대하여 160%, $E_1/E_2 = 4$ 인 경우는 σ_{yy} 는 σ_0 에 대하여 125%정도의 크기로서 단부에서 응력 특이성이 나타나고 있다.

본 실험에서와 같이 이종재를 마찰압접한 경우 압접계면의 탄성계수비(STS304 열영향부의 E_1 /S15C재의 열영향부 E_2)는 1.07로서 탄성계수비만으로 볼 때 동종재로 간주할 수 있다. 탄성계수비가 접합계면을 중심으로 인접계면의 거리가 $h = h_1 = h_2$ 와 같이 변할 때 접합단부에서의 응력 특이성에 관한 해석 결과를 Fig. 4에 표시하였다. 여기서 알 수 있듯이 접합단부에서의 응력 특이성은 $x/W = 1$ 인 위치이고, 접합중앙부로서 접합계면을 중심으로 볼 때 인접계면의 두께 h 에 무관함을 알 수 있다. 접합계면을 중심으로 볼 때 인접계면의 두께 h 의 의존성이 있고 h 가 클수록 응력 크기는 낮아지며 $h = 3.0$ mm일 때 1.052이고, h 가 작아질수록 응력 크기는 높게 되고 $h = 0.4$ 일 때 1.111로 나타났다. 이상과 같은 결과는 Fig. 4에서 보여준 1개의 접합계면을 고려한 해석결과와 일치한다.

4.3 응력 특이성에 영향을 미치는 인접계면 영향

Fig. 6은 접합계면을 중심으로 인접계면의 거리가 같을 때($h = h_1 = h_2$) 접합계면단부에서의 응력 크기를 h 에 따라

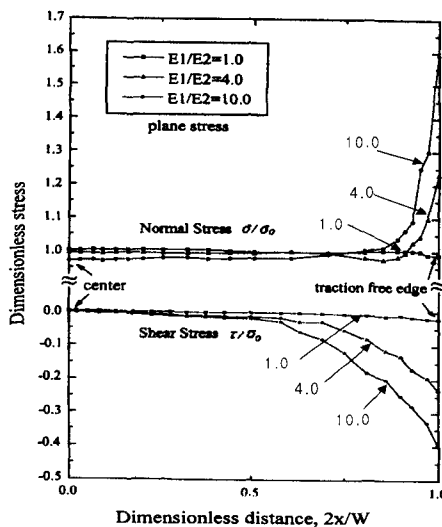


Fig. 4 Stress distribution at dissimilar interface

표시한 것이다. 여기서 계산범위내의 응력 크기와 $\frac{h}{W}$ 와는 직선적으로 반비례하는 경향을 나타낸다. 접합계면이 1개만 있는 경우, 탄성계수비가 1.07이고 $\frac{h}{W} = 0$ 인 경우의 응력 크기는 $\sigma_{yy}/\sigma_0 \approx 1.12$ 정도임을 알 수 있고, 접합계면에 영향을 미치지 않는 인접계면의 거리는 $\frac{h}{W} \geq 0.55$ 로 추정된다.

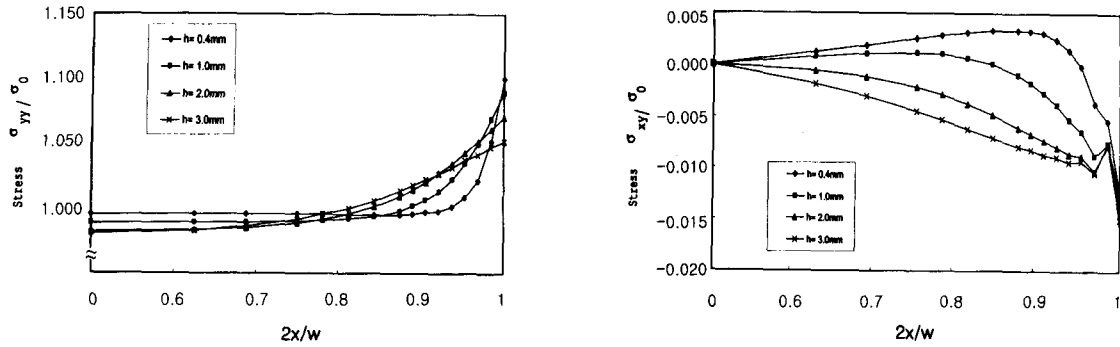


Fig. 5 Stress distribution of interface for various HAZ thickness($h=h_1=h_2= 0.4, 1.0, 2.0, 3.0, E_1/E_2=1.07$)

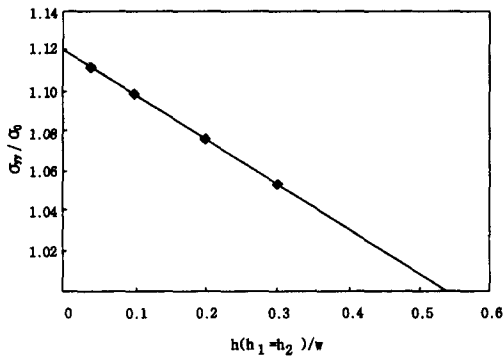


Fig. 6 Stress singularity at domain of dissimilar weld line tip by neighborhood interface

Fig. 7은 Fig. 5의 접합계면을 중심으로 인접계면의 거리가 h ($h_1=h_2$)이고 $h=0.4\sim 3.0$ mm의 범위로 변화할 때 계면 중앙부의 응력 크기를 표시한 것이다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 $h_1=h_2=0.4$ mm일 때는 계면 A, B, C 모두 근사한 응력을 나타내지만, h 가 증가함에 따라 접합계면 C는 계속 증가하지만 계면 A, B는 $h=1\sim 2$ mm의 범위에서 최대치를 갖고 $h > 2$ mm이면 오히려 응력크기는 감소한다. 이상의 내용을 요약하면 h 가 비교적 작은 쪽에서는 계면 A, B, C의 응력이 근사하게 같고 비교적 큰 쪽으로 갈수록 C는 증가하는데 비하여 A와 B는 오히려 감소하였다.

이러한 결과는 h 가 작은 영역에서 인접계면의 간섭으로 3개의 계면의 응력이 거의 같고, 인접계면(B, C)이 접합면(C)으로부터 멀어짐에 따라 계면 C의 응력 특이성이라 생각된다. 접합계면(C)에 대한 인접계면(B, C)의 영향은 계면 B, C의 응력 크기가 최대치가 되는 $h \approx 1.75$ mm이하라고 생각된다.

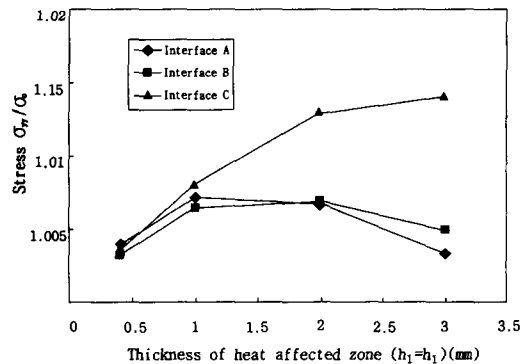
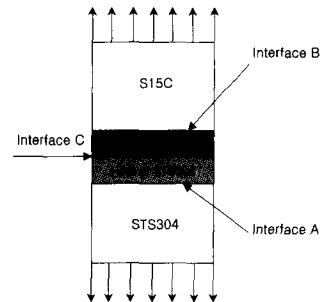


Fig. 7 Stress (σ_{yy}/σ_0) distribution for various HAZ thickness (STS304 vs HAZ of STS304 for $h_1=h_2$: Plane Stress)

Fig. 8은 접합계면을 중심으로 인접계면의 거리 h 가 다른 경우($h_1 \neq h_2$, 즉 $h_1=1$ mm로 하고 $h_2=0.4\sim 3.0$ mm으로 변화할 때) 접합계면 C와 양 인접계면 B선(S15C모재부와 열영향부와의 계면: h_2) 및 A선(STS304 모재부와 열영향부와의 계면: h_1)의 중앙부에 발생하는 응력 크기를 표시한 것이다.

이 경우 접합계면 C에 대한 인접계면(A, B)의 영향은 $h_2 \leq 2h_1$ 인 범위에서 점차 응력장의 독립성을 유지한다고 생각된다.

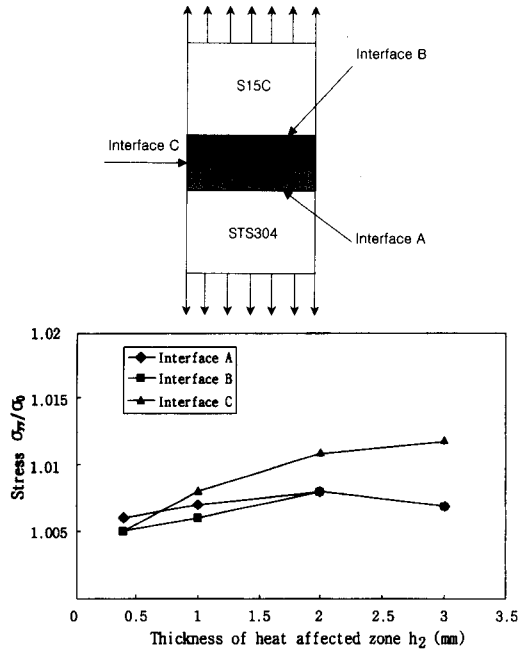


Fig. 8 Stress (σ_y/σ_0) distribution for various HAZ thickness (STS304 vs HAZ of STS304 for $h_1=1\text{mm}$ and various, h_2 : Plane Stress)

5. 결론

STS304와 S15C재를 마찰압접하여 접합계면 근방에 발생한 인접 균열 선단에서의 응력 분포를 해석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 접합계면을 1개만 고려한 경우나 양측 열영향부의 인접계면을 동시에 고려한 경우의 경계요소법 해석결과는 잘 일치하였고, 탄성계수비가 1.07인 경우도 접합단부의 응력 특이성이 나타났다.
- (2) 인접계면(A, B)의 거리를 접합계면(C)에서 h_1, h_2 라 할 때 $h=h_1=h_2=0.4\sim 3.0$ 의 순서로 변화할 때 h 가 비교적 작은 0.4일 때는 계면 A, B, C의 응력이 근사하게 같고, $h=1\sim 2\text{mm}$ 의 범위에서 최대치를 갖고 h 가 증가할수록 계면 C의 응력은 증가하는데 비하여 A, B의 계면 응력은 감소하였다.
- (3) 접합계면(A)의 두께를 $h_1=1\text{mm}$ 로 고정하고 계면 B의 두께를 $h_2=0.4\sim 3.0$ 으로 변화시켜 계면 A, B, C의 응력특성을 조사한 결과 접합계면 C에 대한 계면

A, B의 영향은 $h_2 \leq 2h_1$ 인 범위에서는 상호응력장의 간섭이 생기고, $h_2 > 2h_1$ 인 범위 내에서는 점차 응력장의 독립성을 회복하였다.

후기

이 논문은 2000년도 조선대학교 교내 학술연구조성비에 의해 연구되었음.

참고 문헌

- (1) Williams, M. L., "The Stress around a Fault of Crack in Dissimilar Media", Bull. Seism. Soc. Am, 49, pp. 199~208, 1959.
- (2) England, A. H., "A Crack between Dissimilar Media", J. Appl. Mech., 32, pp. 400~407, 1965.
- (3) Sih, G. C. and Rice, J. R., "The Bending of Plates of Dissimilar Materials with Cracks", J. Appl. Mech., 31, pp. 477~483, 1964.
- (4) Erdogan, F., "Stress Distribution in a Nonhomogeneous Elastic Plane with Cracks", J. Appl. Mech., 30, pp. 232~238, 1963.
- (5) Erdogan, F., "Stress Distribution in Bonded Dissimilar Materials Containing Circular or Ring-shaped Cavities", J. Appl. Mech., 32, pp. 829~836, 1965.
- (6) Atkinson, C., "The Interface Crack with a Contact Zone", Int. J. of Fract. 18, pp. 161~168, 1982.
- (7) Shih, C. F. and Asaro, R. J., "Elastic-Plastic Analysis of Cracks in Bimaterial Interface; Part I - Small Scale Yielding", J. Appl. Mech., 55, pp. 299~316, 1988.
- (8) Shih, C. F. and Asaro, R. J., "Elastic-Plastic Analysis of Cracks in Bimaterial Interface; Part II - Structure of Small Scale Yielding Fields", J. Appl. Mech., 56, pp. 763~779, 1989.
- (9) 오환섭, 이정우, 양인수, "계면 및 주위 균열의 간섭거동", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, Vol. 1, pp. 145~150, 1996.
- (10) 이원, "피착제의 두께가 다른 단순접지기 접착이음의 응력특이성 파라미터에 대한 경계요소해석", 한국자동차공학회논문집, Vol. 4, No. 5, pp. 100~108, 1996.