

## SUH35/SUH3 마찰용접 접합계면에 대한 잔류응력 특이성의 해석

정 남 용<sup>1)</sup> · 박 철 희<sup>2)</sup>

승실대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 현대기계기술학원<sup>2)</sup>

### Analysis of Residual Stress Singularities on Interfaces of Friction Welded SUH35/SUH3

Nam yong Chung<sup>1)</sup> · Chul Hee Park<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

<sup>2)</sup>Hyundai Technical Institute, 157-487 Gwangmyung4-dong, Gwangmyung-si, Gyeonggi 135-080, Korea

(Received 24 March 2005 / Accepted 2 June 2005)

**Abstract :** With increasing use of SUH35/SUH3 dissimilar materials for automotive engine valves, it is required that stress singularities under residual stress on an interface for friction welded dissimilar materials analyzed to establish strength evaluation. The stress singularity index( $\lambda$ ) and stress singularities factor( $I$ ) were calculated from using the results of stress analysis to consider residual stress and loads. The stress singularities on variations for shapes and thickness of welded flashes were analyzed and discussed. This paper suggested that the strength evaluation by using the stress singularity factors as fracture parameters, considering the stress singularity on an interface edge of friction welded dissimilar materials will be useful.

**Key words :** Friction welding(마찰용접), Welded flash(용접덧살), Dissimilar materials(이종재료), Residual stress(잔류응력), Boundary element method(경계요소법), Stress singularity index(응력특이성지수), Stress singularity factor(응력특이성계수)

### 1. 서론

마찰용접은 고상 용접 방법으로서 회전, 압축에 의한 마찰열을 이용하여 압접하는 것이다.<sup>1)</sup> 내연기관용 엔진 밸브류는 특정부위마다 하중과 고온에 견딜 수 있는 기계적 특성과 적정 강도가 요구 되므로 이종재료의 접합이 요구된다.<sup>2)</sup> 최근에는 엔진 배기 밸브용 재료로서 Si-Cr계 내열강봉인 SUH3와 Ni-Cr계 내열강봉 SUH35가 널리 사용되고 있으며 이 두 가지의 이종재료는 마찰용접에 의해 대량생산되어 각종차량의 밸브 부속품으로 사용되고 있다.<sup>3)</sup>

이종재료의 마찰용접은 고온 마찰열과 고압 상태에서 진행되며 냉각 될 때 두 재료의 선팽창계수와 탄성계수의 차이로 접합 계면단에서 접합 잔류응력으로 인한 응력특이성이 발생한다. 재료의 물성치 차이에 따라 잔류응력 특이성이 크게 좌우된다는 연구사례<sup>4)</sup>가 있고, 잔류응력특이성이 실제 외부 작용 하중에 의한 응력 특이성과 중첩이 된다면 접합 계면의 강도에 큰 영향을 주게 된다.<sup>5)</sup>

최근 많이 행해지는 SUH35/SUH3의 이종 마찰용접에 대해 마찰용접특성,<sup>6)</sup> 고온크리프 수명예측,<sup>7)</sup> 마찰용접의 최적화 등에 관한 연구<sup>8)</sup>가 있으나 접합 계면에서 응력특이성을 고려한 명확한 연구는 제시되지 않고 있으며, 강도평가 방법도 미 확립된 상태다.

\*To whom correspondence should be addressed.  
admin@gonghak21.com

따라서 본 연구에서는 접합 잔류응력이 존재하는 이중 마찰용접계면에 대한 접합 강도와 파괴기준 설정을 위한 연구의 일환으로 SUH35/SUH3 용접시 시험편을 제작하여 마찰용접을 할 때 생기는 덧살 (flash)로 인한 계면길이의 변화, 불연속적인 외부 형상변화를 동시에 고려한 응력을 경계요소법(Boundary Element Method : B.E.M)으로 해석한다. 그리고 해석 결과를 토대로 SUH35/SUH3 이중마찰용접 계면에 대한 잔류응력의 분포 및 응력특이성 계수의 상호 관계를 비교·검토 하였다.

## 2. 용접 잔류응력의 BEM 해석

### 2.1 이중용접재의 계면모델

Fig. 1과 같이 재료의 성질이 서로 다른 두 종류로 용접된 이중 용접재료의 계면 모델을 설정하였다.  $r$ 은 계면단으로부터 임의의 거리이며 두 재료가 이루는 각도  $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$ 이면 직선경계와 계면이 직교하는 맞대기이음(butt joint)이 된다.  $\theta_1 = \pi/2$ ,  $\theta_2 = -\pi$ 이면 단순겹치기이음(single-lap joint),  $\theta_1 = \theta_2 = -\pi$ 로 하면 계면균열 모델이 된다. 또한, 세로탄성계수와 푸아송의 비를 같게 하면 균질계 V-notch 모델이 된다.

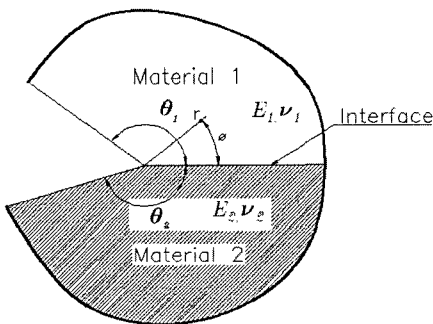


Fig. 1 Model of an interface edge in dissimilar materials

### 2.2 SUH35/SUH3 용접재의 수치해석 모델

BEM 해석에 적용한 SUH35/SUH3 용접재 모델의 형상은 Fig. 2와 같고, Fig. 2(a)는 덧살이 없는 경우 잔류응력과 작용하중, (b)는 덧살이 있는 경우 잔류응력과 작용하중에 대한 해석 모델이다.

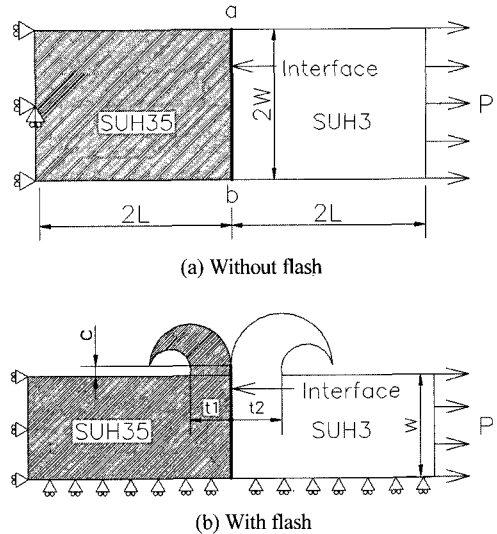


Fig. 2 Model of BEM analysis on friction welded dissimilar materials

마찰용접 접합계면에서 온도변화에 의한 잔류응력 및 작용하중에 의한 응력특이성을 검토하기 위해 온도차  $\Delta T$ 는 300°C, 500°C, 700°C로 하고 작용인장하중  $P=50$  N/mm,  $P=100$  N/mm,  $P=200$  N/mm에 대한 응력해석을 각각 실시하여 잔류응력과 작용하중에 의한 응력해석결과를 중첩하여 응력특이성을 구하였다.

마찰용접 계면의 불규칙한 형상변화를 고려하여 덧살이 없는  $c=0$ 의 경우와 Fig. 2(b)와 같이 축방향 용접두께  $t$ 의 값이 2 mm, 4 mm씩 대칭으로 부착되면서  $c$ 값이 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm로 용접계면의 길이가 증가한 경우, 이중재의 마찰용접 특성상  $t$ 와  $c$ 의 값이 불규칙하게 될 것을 고려하여 축방향 비대칭 용접두께 비율이  $t_1/t_2 = 0.33$  ( $t_1=1$  mm,  $t_2=3$  mm),  $t_1/t_2 = 0.5$  ( $t_1=2$  mm,  $t_2=4$  mm)인 경우  $c$ 값이 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm 일 때 응력특이성을 해석하였다. 덧살이 있는 경우 해석의 용이성을 위해 형상의 대칭성을 이용하였다.

구속조건과 하중 조건은 Fig. 2와 같고 2차원 등매개 요소를 사용하였다. 전체 요소수는 덧살이 없는 경우 140개, 덧살이 있는 경우 168개로 하고 용접계면의 응력분포를 고정밀도로 해석하기 위해 계면단은 서브(sub)요소로 분할하여 평면 변형률 상태에서 해석하였다.

재료의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었고, 탄성계수의 비( $E_2/E_1$ )와 선팽창계수의 비( $\alpha_1/\alpha_2$ )는 1에 가깝다.

Table 1 Mechanical properties of materials

Mechanical properties	Young's modulus	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion
Materials	E(GPa)	$\nu$	(m/m.°K)
SUH3	196	0.3	$17.5 \times 10^{-6}$
SUH35	215	0.3	$16.7 \times 10^{-6}$

### 2.3 BEM에 의한 2차원 용접 잔류응력

2차원 열탄성 기초 이론에 의한 변형률과 응력의 관계는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{bmatrix} = \frac{1}{E^*} \begin{bmatrix} 1 & -\nu^* \\ -\nu^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \end{bmatrix} \quad (1)$$

(plane stress)

여기서  $E$ 는 세로탄성계수,  $\nu$ 는 푸아송비,  $\alpha$ 는 선팽창계수,  $\Delta T$ 는 온도차이고,  $\epsilon_t = \alpha \Delta T$ 는 열변형률을 의미한다. 또한 평면변형률 상태에서는 다음 식과 같이 된다.

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2}, \nu^* = \frac{\nu}{1-\nu}, \alpha^* = (1+\nu)\alpha \quad (2)$$

(plane strain)

Fig. 2와 같이 접합 층이 없는 경우 각각의 재료에 대해 다음 식과 같은 관계가 성립 된다.

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2 \\ v_1 &= \alpha_1^* y \Delta T = v_2 + \alpha_2^* y \Delta T \\ t_1 &= t_2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $u, v$ 는 각 재료의 용접계면상의 수평, 수직방향에 대한 변위이며  $t$ 는 표면력이다.

## 3. SUH35/SUH3 용접계면의 응력분포

### 3.1 용접잔류응력이 존재하는 경우

용접계면의 온도차가 300°C, 500°C, 700°C로 각각 일정할 때 잔류응력에 대한 수직응력 및 전단응력 분포를 열응력  $\sigma_0 = |E_1(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T|$ 로 무차원

화 하고 계면단 으로부터의 거리  $r$ 도 ( $r/w$ )로 무차원화 하여 나타내었다. Fig. 3, 4는 덧살이 없는  $c=0$ 의 경우 온도차가 클수록 용접 계면단의 응력분포가 증가 하는 것을 나타내며 Fig. 5, 6은 축방향 용접 두께의 비  $t_1/t_2=1$ 인 대칭, Fig. 7은  $t_1/t_2=0.33$ 의 비대칭인 경우 온도차 500°C 일 때  $c$ 의 변화에 따른 응력분포이다. 덧살  $c$ 의 증가에 따라 응력분포가 크게 변화 하지 않으므로 잔류열응력은  $c$ 의 변화에 큰 영향을 받지 않는다.

### 3.2 작용하중과 잔류응력의 중첩

Fig. 8, 9는 덧살이 없는 경우 하중  $P=100(N/mm)$  일 때 수직응력과 전단응력의 분포를 나타낸 것이

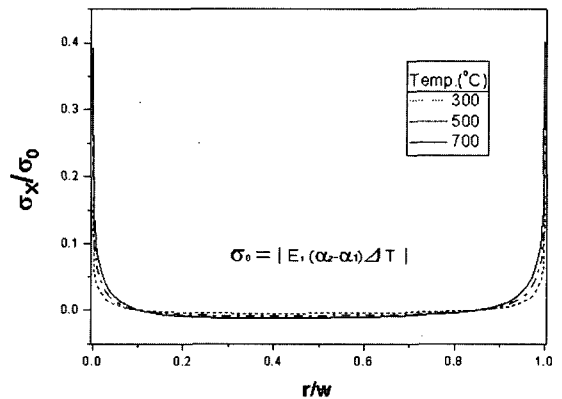


Fig. 3 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded SUH35/SUH3

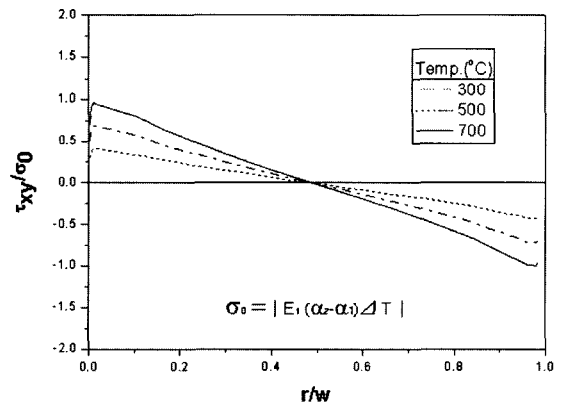


Fig. 4 Shear stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3

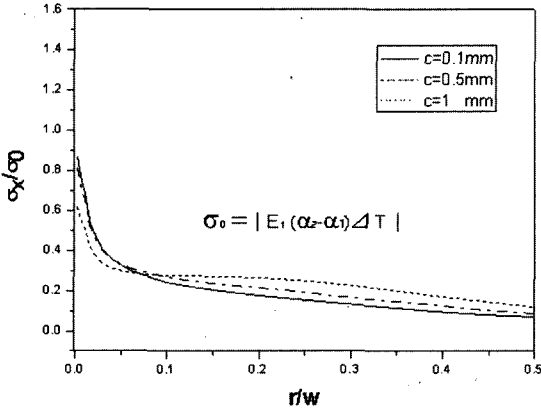


Fig. 5 Normal stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $\Delta T=500^{\circ}\text{C}$ )

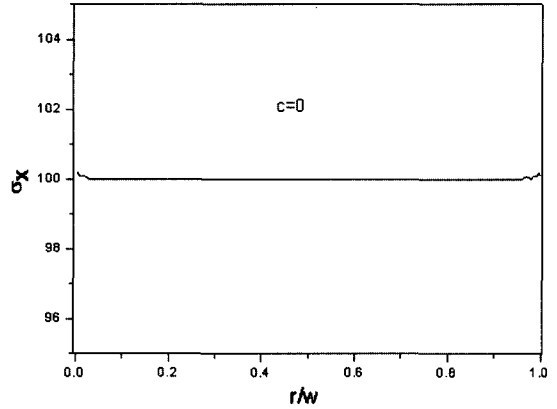


Fig. 8 Normal stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $P=100\text{N/mm}$ )

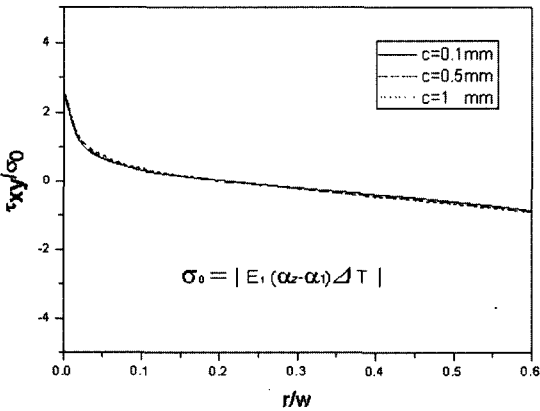


Fig. 6 Shear stress distribution at an interface on friction welded dissimilar materials SUH35/SUH3 ( $\Delta T=500^{\circ}\text{C}$ )

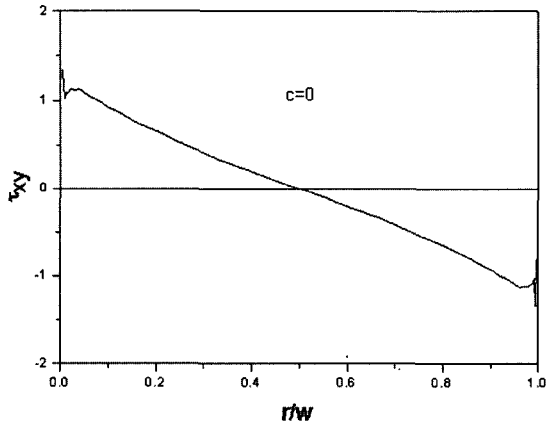


Fig. 9 Shear stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $P=100\text{N/mm}$ )

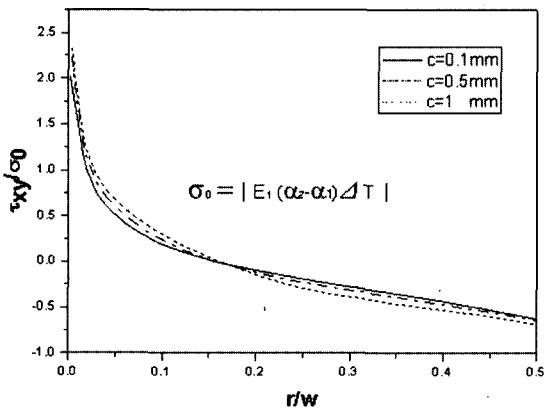


Fig. 7 Normal stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $t_1/t_2=0.33$ )

다. 탄성계수의 비( $\frac{E_2}{E_1} = 0.9116$ )가 크지 않으므로 계면단에서 수직응력의 변화는 전단응력에 비해 크지 않다. Fig. 10은 대칭 덧살이 있는 경우 하중  $P=100\text{ N/mm}$ 이고  $c=0.1\text{ mm}$ ,  $0.5\text{ mm}$ ,  $1\text{ mm}$ 일 때 수직응력분포를 나타낸 것이며  $c$ 가 증가 할수록 응력특이성은 감소한다.

Fig. 11은 대칭 덧살일 때  $P=100\text{ N/mm}$ 와 온도차  $700^{\circ}\text{C}$ 가 중첩되어  $c=0.1\text{ mm}$ ,  $0.5\text{ mm}$ ,  $1\text{ mm}$ 로 변화할 경우 수직응력의 분포를 나타낸 것이며  $c$ 가 증가 할수록 응력특이성은 완화된다. Fig. 12는 온도차가  $500^{\circ}\text{C}$ 일 때 하중이  $50\text{ N/mm}$ ,  $100\text{ N/mm}$ ,  $200\text{ N/mm}$ 가 중첩된 경우 전단응력의 분포인데 하중이 증가 할수록 응력특이성도 증가한다.

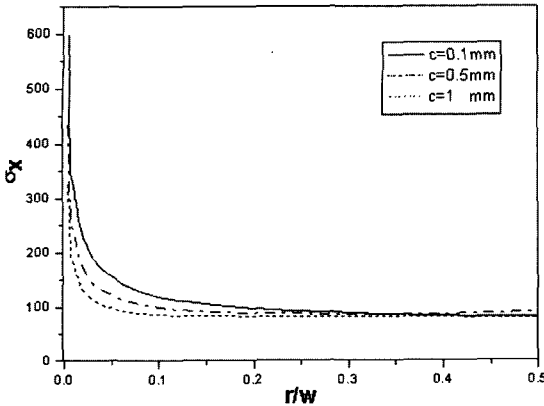


Fig. 10 Normal stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 (P=100N/mm)

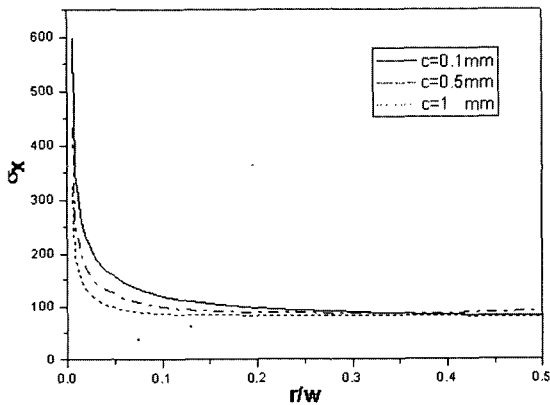


Fig. 11 Normal stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $\Delta T = 700^\circ\text{C}$ , P=100N/mm)

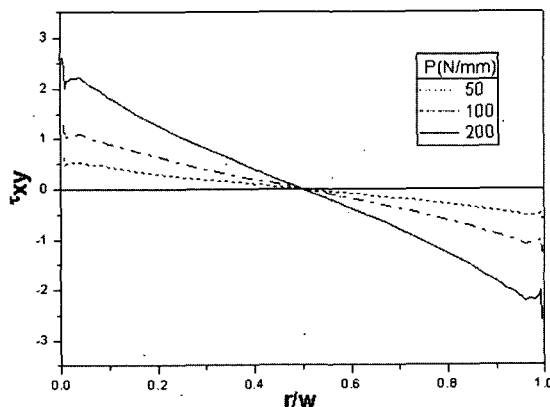


Fig. 12 Shear stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $\Delta T = 500^\circ\text{C}$ )

#### 4. SUH35/SUH3 용접계면에 대한 응력특이성

##### 4.1 작용하중에 의한 응력특이성

열응력이 작용하지 않고 작용 하중만에 의한 응력특이성 지수는 다음 식과 같이 된다.<sup>9)</sup>

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(r^{-\lambda}) \quad (4)$$

여기서 r은 용접 계면단으로부터의 거리이고,  $\lambda$ 는 응력특이성 지수이다.

##### 4.2 용접 잔류응력의 특이성

이중용접재의 잔류응력은 등은 외부하중에 의한 응력특이성과는 달리 Dunders 파라미터  $\alpha, \beta$ 가 다음 식으로 표시 될 때 잔류응력의 특이성은 다음 과 같이 된다.<sup>10)</sup>

$$\alpha(\alpha - 2\beta) \leq 0 : (\text{equal, good pair})$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\log r) \quad (5)$$

$$\alpha(\alpha - 2\beta) > 0 : (\text{bad pair})$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(r^{-\lambda}) + \sigma_{ij}(\log r) \quad (6)$$

등은 외부하중이 작용할 때 equal 및 good pair에서도 log r의 대수형 잔류응력 특이성이 존재하고, bad pair의 경우는  $r^{-\lambda}$ 와 log r의 응력특이성이 공존하는 것으로 보고 되어 있다.<sup>11)</sup>

##### 4.3 응력 특이성 지수의 계산

잔류 응력과 작용 하중이 각각 단독으로 작용하는 응력특이성 지수를 구한 후 이들 결과를 중첩하면 잔류응력과 작용하중이 동시에 작용하는 응력 특이성 지수가 구해진다. Fig. 13은 온도 변화  $300^\circ\text{C}$ 에 대한 수직 및 전단 응력의 해석 결과인 Fig. 3과 Fig. 4를 이용하여 응력특이성 지수  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 를 구하는 방법을 대수 그래프에 도시한 예이다. 계면단의 응력분포가 무한대로 되는 경향을 보이므로 계면단에서의 거리 r에 대하여 응력을 외삽하여 기울기를  $\lambda_1, \lambda_2$ 로 한 것이다. 식 (5)와 (6)에서 알수 있듯이 전단응력에 의한  $\lambda_1$ 은 대수형 잔류응력의 특이성이 존재하므로 대수그래프 상에서 기울기의 직선성이 잘 유지되고 있지만 수직응력에 의한  $\lambda_2$ 는  $r^{-\lambda}$ 와 log r의 응력특이성이 공존하므로 대수그래프 상에

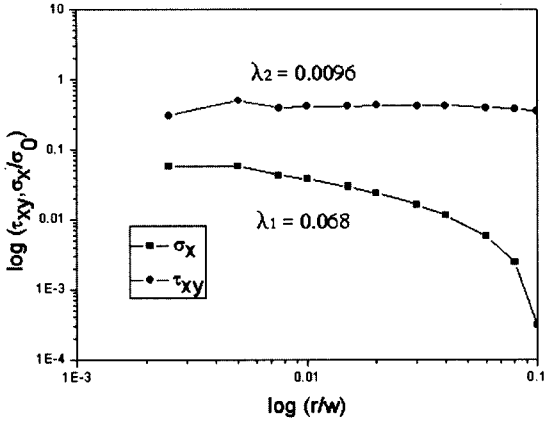


Fig. 13 Calculation of stress singularity index at an edge on friction welded SUH35/SUH3

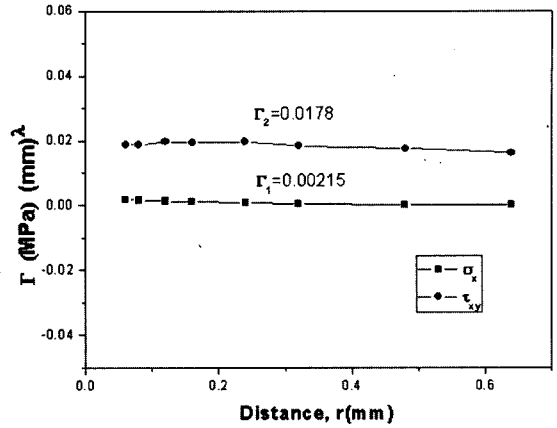


Fig. 14 Extrapolation of stress singularity factor at an edge on friction welded SUH35/SUH3

서 곡선적으로 변화 하였다. 이 경우 계면단 근방에 대한 응력들을 외삽하여 기울기  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 구하는 방법을 나타내고 있다. 이때 계면단 근방에 대한 응력 값을 취하는 방법에 따라  $\lambda_1, \lambda_2$ 의 값은 임의성을 가지므로 본 연구에서는 진동응력을 제외한  $\log(r/W) = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ 범위에서 계산하였다. 중첩(5)의 경우에도 동일한 방법으로 외삽하여 그 기울기  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 계산하였다.

#### 4.4 응력특이성 계수의 계산

Fig. 13과 같은 방법으로 구해진  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 다음 식에 대입하여 분리응력 특이성계수  $\Gamma_1, \Gamma_2$ 와 전응력 특이성계수  $\Gamma$ 를 구한다.

Fig. 14는 Fig. 13의 결과를 식 (7)에 대입하고  $r=0$  일때 외삽에 의해  $\Gamma$ 를 구하는 방법을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \sigma_x \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^{\lambda_1} \\ \Gamma_2 &= \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^{\lambda_2} \\ \Gamma &= \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2} \end{aligned} \quad (7)$$

### 5. 해석결과 및 고찰

#### 5.1 덧살이 없는 경우

덧살이 없는  $c=0$ 의 경우 온도차 300°C, 500°C, 700°C에 따른 용접 잔류응력과 마찰용접계면에 하

중 100 N/mm, 200 N/mm이 작용하는 경우 각각의 응력해석결과를 중첩하여 그 결과로부터 응력특이성지수 및 계수를 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다. 하중조건 각각에 대한  $\Gamma$ 의 변화는 크지만 용접 잔류 응력에 의한 변화는 작다.

Table 2 Stress singularity index and factor for friction welded SUH35/SUH3(without flash)

Flash (mm)	Load (N)	Temp. (°C)	SUH35/SUH3					
			$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\Gamma_1$	$\Gamma_2$	$\lambda$	$\Gamma$
0	0	300	0.0286	0.0096	0.0021	0.018	0.0282	0.018
		500	0.0261	0.0097	0.0036	0.029	0.0278	0.03
		700	0.0259	0.0096	0.005	0.042	0.0276	0.042
0	100	300	0.00015	0.0431	100.101	0.887	0.0431	100.105
		500	0.000153	0.0431	100.101	0.885	0.0431	100.105
		700	0.00017	0.04311	100.048	0.885	0.04311	100.052
0	200	500	0.00014	0.04316	200.24	1.778	0.04316	200.253
		700	0.000147	0.04316	200.25	1.768	0.0432	200.257

#### 5.2 덧살이 있는 경우

SUH35/SUH3 내열강재 이중 용접계면에 대해 온도차 300°C, 500°C, 700°C와 작용하중 50 N/mm, 100 N/mm, 200 N/mm 일때 축방향 용접 두께비가 대칭( $t_1/t_2=1$ )이면서 덧살  $c=0.1$  mm, 0.5 mm 또한, 축방향 용접 두께비가 비대칭으로서  $t_1/t_2=0.33(t_1=1$  mm,  $t_2=3$  mm),  $t_1/t_2=0.5(t_1=2$  mm,  $t_2=4$  mm)인 경우  $c$ 값이 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm일 때 응력해석을 실시하고 그 결과를 중첩하여 응력특이성지수 및 응력특이성계수의 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다. 응력특이성계수  $\Gamma$ 는 덧살이 없는 Table 2의 경우보다 덧살

이 있는 Table 3의 경우 더 크게 나타났고 용접잔류 응력에 의한 변화는 작다.

Table 3 Stress singularity index and factor for friction welded SUH35/SUH3(with flash)

$t_1/t_2$	Flash (mm)	Load (N)	Temp (°C)	SUH35/SUH3					
				$\lambda_1$	$\lambda_2$	$I_1$	$I_2$	$\lambda$	$\Gamma$
1	0.1	50	300	0.0093	0.0162	183.388	4.8427	0.0186	183.4519
			500	0.0094	0.0163	186.377	4.8014	0.0954	186.4388
			700	0.0094	0.0163	186.400	4.722	0.0188	186.4602
	0.5	100	300	0.00876	0.015	272.400	9.1994	0.0173	272.5552
			500	0.00876	0.0155	272.410	9.1568	0.0178	272.5847
			700	0.00875	0.0155	272.436	9.1143	0.0177	272.5889
0.33	0.1	200	500	0.0092	0.0094	628.524	49.878	0.0131	630.5000
			700	0.0092	0.0094	628.553	49.912	0.0131	630.5519
			500	0.0862	0.0077	238.828	31.019	0.0115	240.8346
	0.5	100	700	0.00863	0.0077	238.844	31.266	0.0116	240.8823
			300	0.00864	0.0118	308.641	48.768	0.0146	312.4709
			700	0.00864	0.0118	308.690	48.845	0.0462	312.5308

Fig. 15는 온도차 300°C, 500°C, 700°C, 작용에 대한 순수 잔류응력과 그것에 하중 P=100N/mm를 중첩한 경우, 그리고 덧살 c=0.5mm 하에서 중첩한 경우에 대한 응력 특이성계수  $\Gamma$ 의 거동을 나타낸 것이다. 중첩된 경우  $\Gamma$ 는 증가 하였고 덧살 c가 존재할 때 더욱 크게 증가 하였다. 재료의 물성치 차가 적으므로 온도차에 의한 잔류응력은  $\Gamma$ 의 크기에 영향을 주지 않는다.

Fig. 16은 온도차 500°C의 등온 부하 상태에서 작용하중 P=50N/mm, 100N/mm, 200N/mm를 각각 중첩시키면서 덧살 c=0.1mm, 0.5mm, 1mm에 대한  $\Gamma$ 의 변화를 나타낸 것이다. 작용하중에 대한 모든 중첩 조건에서 응력특이성계수  $\Gamma$ 는 덧살 c가 두껍게 증가 할수록 감소하였다.

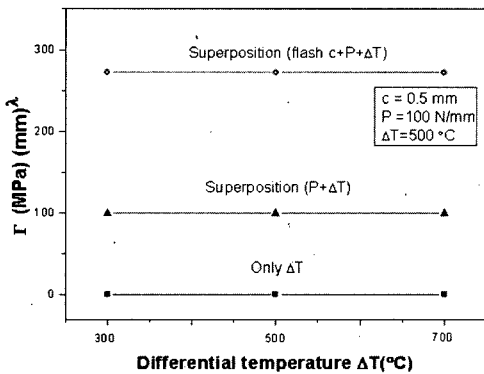


Fig. 15 Behavior of total stress singularity factor by using superposition on friction welded SUH35/SUH3

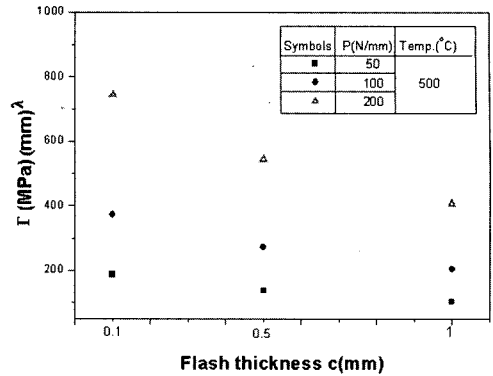


Fig. 16 Total stress singularity factor for variation of flash thickness by using superposition

### 6. 결론

마찰용접에 의한 SUH35/SUH3의 용접계면의 강도 평가법을 확립하기 위한 기초연구로써 외부 작용 하중, 온도차에 의한 잔류응력, 덧살로 인한 마찰용접 계면주위의 형상변화와 계면길이 변화를 고려하여 BEM에 의한 응력해석을 하고 그 결과를 토대로 응력특이성을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 외부 작용하중과 용접 잔류응력이 함께 존재하는 이중마찰용접재의 경우 BEM 응력 해석 결과로부터 중첩에 의해 용접계면단의 응력 특이성지수  $\lambda$ 와 응력특이성계수  $\Gamma$ 를 구하는 방법을 제시하였다.
- 2) 이중재 마찰용접 접합계면에서 온도차에 의한 순수 잔류 응력은 탄성계수비와 선팽창계수의 비가 1에 가까운 경우 응력특이성에 큰 영향을 주지 않는다.
- 3) 내열강봉 SUH35/SUH3 이중재 마찰용접 계면에 대한 응력특이성계수  $\Gamma$ 는 덧살 두께 c와 축방향 용접 두께의 비( $t_1/t_2$ )에 큰 영향을 받는다.
- 4) 용접 잔류응력에 대한 응력특이성은  $r^{-\lambda}$ 와  $\log r$ 의 항이 공존하므로 응력특이성지수  $\lambda$ 의 결정에 임의성이 존재하는데 이에 대한  $\lambda$ 의 결정 방법을 제안하였다.
- 5) 외부 작용하중과 용접 잔류응력에 의한 용접계면단의 응력특이성계수  $\Gamma$ 를 사용하여 이중 마찰 용접재에 대한 정량적인 강도평가가 가능 할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

## References

- 1) H. S. Jeong, Takeshi Shinoda, "Fundamentals and Basic Application of Friction Welding," J. of KWS, Vol.9, No.6, pp.1-12, 1997.
- 2) N. Y. Chung and C. H. Park, "Analysis of Stress Singularities on Interfaces of Friction welded Dissimilar Materials," Transactions of KSAE, Vol.13, No.2, pp.142-148, 2005.
- 3) D. G. Lee, S. Y. Lee, J. K. Jung and J. Zhang, "An Evaluation of Fatigue Properties on Dissimilar Friction Welded of Heat-Resisting Steels Used in Vehicle Valves," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.186-192, 2002.
- 4) K. S. Kim, H. S. Kim and N. Y. Chung, "Analysis of Stress Singularity on Ceramic/Metal Bonded Joints," J. of KSME, Vol.20, No.10, pp.3058-3067, 1996.
- 5) K. S. Kim, H. S. Kim and N. Y. Chung, "Evaluation of Static Strength on Ceramic/Metal Bonded Joints Considering Stress Singularity," J. of KSMTE Vol.6, No.1, pp.59-68, 1997.
- 6) H. T. Yang, S. K. Oh, S. P. Hwang and I. S. Kim, "Study on Friction Welding of Heat Resisting Steel Materials of SUH3 and SUH35, and Its Real Time Evaluation by AE," Proceedings of the KSOE Fall Annual Meeting, pp.12-19, 2000.
- 7) S. K. Oh, "High Temperature Creep Life Prediction of Friction Welded Joints by Initial Strain Method and the AE Evaluation," J. of KSOE, Vol.11, No.4, pp.40-48, 1997.
- 8) S. K. Oh, M. H. Yoon, S. U. Jeong and J. H. Oh, "Optimization of Heat Resisting Steels Friction Welding and Its Real Time Predictability of High Temperature Creep Life of Long Time(1)," J. of KSME, Vol.17, No.3, pp.512-519, 1993.
- 9) D. B. Bogy, "The Plane Solution for Joined Dissimilar Elastic Semistrips under Tensions," J. Appl. Mech, Vol.42, pp.93-98, 1975.
- 10) J. Dunders, "Discussion of Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading," J. Appl. Mech., Vol.36, pp.650-652, 1969.
- 11) R. Yuuki, "Logarithmic Singularity on Thermal or the Interface Edge Point of Bounded Dissimilar Materials," J. of JSME, Vol.58, No.556, pp.2394-2400, 1992.