

마찰용접에 의한 이종재 접합계면에 대한 응력특이성의 해석

정 남 용¹⁾ · 박 철 희^{*2)}

숭실대학교 기계공학과¹⁾ · 현대기계기술학원²⁾

Analysis of Stress Singularities on Interfaces of Friction Welded Dissimilar Materials

Namyong Chung¹⁾ · Chul Hee Park^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

²⁾Hyundai Technical Institute, 158-487 Gwangmyung4-dong, Gwangmyung-si, Gyeonggi 135-080, Korea

(Received 8 October 2004 / Accepted 31 December 2004)

Abstract : In this paper, the stress singularity on interface of friction welded dissimilar materials was investigated by using 2-dimensional elastic boundary element method. It is required that stress distributions and stress singularities on an interface for friction welded dissimilar materials analize to establish strength evaluation. The stress singularity index (λ) and stress singularity factor (Γ) were calculated from the results of stress analysis. The stress singularities on variations for shapes and thickness of friction welded flashes were analized and discussed. This paper suggested that the strength evalution by using the stress singularity factors as fracture parameters, considering the stress singularity on an interface edge of friction welded dissimilar materials were very useful.

Key words : Friction welding(마찰용접), Dissimilar materials(이종재료), Interface edge(계면단), Boundary element method(경계요소법), Stress singularity index(응력특이성지수), Stress singularity factor(응력특이성계수), Fracture parameter(파괴인자), Welded flash(용접덧살)

1. 서 론

마찰용접은 두 재료를 서로 가압하여 회전운동을 시킬 때 접촉부에 발생하는 마찰열을 이용하므로 외부의 에너지 공급 없이 열 에너지의 효율성에 의한 공정의 간편성, 자동화의 용이성과 경제성 등에 있어 매우 우수한 용접특성^{1,2)}을 갖고 있다.

자동차 관련 부품을 비롯하여 각종 운반기계, 공구류 등에는 특정부위마다 하중이나 열에 의해 각기 다른 기계적 성질 및 적정 강도가 만족되어야 하므로 이종재료(dissimilar materials)의 접합이 요구되

고 신속하고 신뢰성 있는 제품을 대량생산하기 위해 마찰 용접법이 널리 이용되고 있다.³⁾

재료특성이 서로 다른 이종재료의 마찰용접의 경우 두 재료가 접합된 계면은 재료들의 물성치 차이, 마찰 용접시 발생하는 덧살(flash)로 인한 계면길이의 변화, 불연속적인 외부의 형상변화와 열응력에 의해 응력 특이성^{4,5)}이 발생한다. 이와 같은 응력집 중 현상이 심하게 발생하는 응력특이점은 재료의 강도를 저하시키는 원인이 되어 결국, 파괴에 이르게 한다.

서로 접합된 재료의 강도는 계면에서 발생하는 응력특이성에 크게 좌우된다는 연구사례^{6,7)}가 있으며, 접합계면의 응력특이성을 고려한 파괴인자를

*To whom correspondence should be addressed.

admin@gonghak21.com

이용하여 접합강도를 평가하는 것은 매우 중요한 과제이다.

이종재료의 마찰용접에 대한 기계적 성질, 피로 강도, 균열거동 등에 대한 연구^{8,9)}가 있으나 접합계면에서의 응력특이성을 고려하여 용접재의 강도를 정량적으로 평가하기 위한 방법이 제시된 연구결과는 보고되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이종재의 마찰용접 계면에 대한 접합강도평가와 파괴기준설정을 하기 위한 연구의 일환으로 스테인리스강(STS304)과 Al합금(6061-T6)의 이종재료를 마찰 용접한 시험편을 제작하여 응력특이성의 영향인자와 마찰 용접시 필연적으로 형성되는 덧살에 의한 형상 및 계면길이의 변화 등을 고려하여 마찰용접계면에 대한 응력을 경계요소법(boundary element method: BEM)으로 해석하고 그 결과를 토대로 이종재 마찰용접계면에 대한 응력특이성계수의 상호관계를 비교 검토하였다.

2. 이종접합재료에 대한 계면단의 응력특이성

2.1 이종접합재의 계면 모델

Fig. 1과 같이 재료의 성질이 서로 다른 두 종류로 된 이종 접합재료의 계면 모델을 설정하였다. r 은 계면단으로부터 임의의 거리이며 임의의 두 재료가 이루는 각도 $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$ 이면 직선경계와 계면이 직교하는 맞대기이음(butt joint)이 되고, $\theta_1 = \pi/2, \theta_2 = -\pi$ 이면 단순겹치기이음(single-lap

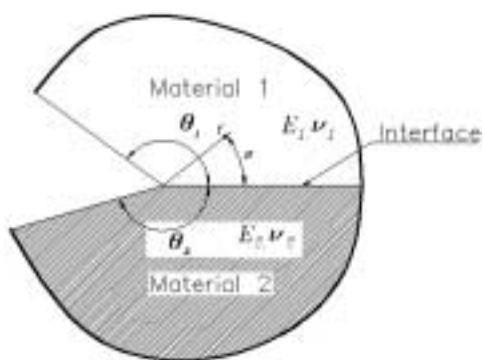
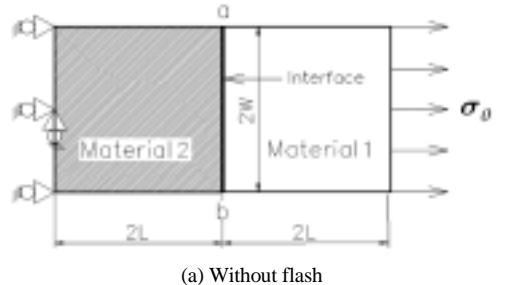


Fig. 1 Model of an interface edge in dissimilar materials

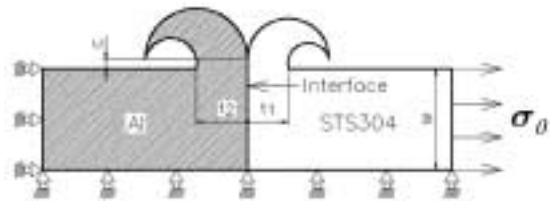
joint), $\theta_1 = \theta_2 = -\pi$ 로 하면 계면 균열모델이 된다.

또한, 세로탄성계수와 푸아송의 비를 같게 하면 균질재 V 놋치 모델이 된다.

2.2 수치해석모델



(a) Without flash



(b) With flash

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

본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 STS 304 / Al 마찰용접의 경우 덧살이 없는 $c=0$ 의 경우와 Fig. 2(b)와 같이 덧살 t 의 값이 축방향으로 각각 2 mm, 4 mm, 6 mm 씩 대칭으로 부착되면서 c 값이 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 1 mm로 접합계면 길이가 증가한 경우, 이종재의 마찰접합 특성상 t 와 c 값이 불규칙하게 진행될 것을 고려해 비대칭 덧살의 두께비 $t_1/t_2 = 0.33$ ($t_1 = 2$ mm, $t_2 = 6$ mm), $t_1/t_2 = 0.5$ ($t_1 = 2$ mm, $t_2 = 4$ mm)의 경우 c 값이 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 1 mm일 때 응력특이성을 해석하였으며 덧살이 있는 경우 해석의 용이성을 위해 Fig. 2(b)와 같이 형상의 대칭성을 고려하였다. 구속조건과 하중조건은 Fig. 2와 같고 2차원 등매개요소(isoparametric)를 사용하였다. 전체요소분할 수는 덧살이 없는 경우 140개, 덧살이 있는 경우 168개로 하고 접합계면단의 응력

분포를 고정밀도로 해석하기 위해 계면단은 서브(sub)요소로 분할하여 평면변형율상태에서 해석하였다. 수치해석에 사용된 재료의 기계적 성질은 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Mechanical properties of materials

Mechanical properties	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio ν
Materials		
STS 304	193	0.3
Aluminum alloy	70.3	0.345

2.3 응력특성방정식의 해석

Fig. 1의 계면 모델에 대해 응력 특이성을 결정하는 특성방정식은 Bogy¹⁰⁾에 의해 유도 되었다.

접합 계면단 근방의 응력장 σ_{ij} 는 계면단으로부터의 임의의 거리 r 에 의해 다음 식과 같이 표시된다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\Gamma}{r^\lambda} f_{ij}(\phi) \quad (1)$$

여기서, λ 는 응력특이성지수, Γ 는 응력특이성계수이고, $f_{ij}(\phi)$ 는 부하조건 및 형상에 의존하는 계수이다. 응력특이성지수 λ 는 θ_1 , θ_2 및 각 재료의 조합특성에 의해 결정되는 상수이다. 또한, $\lambda < 0$ 이면 응력특이성이 소멸될 수도 있으며 λ 가 복소수로 되는 경우에는 다음과 같은 진동특이성의 응력장으로 된다.¹⁰⁾

$$\sigma_{ij} = \frac{\Gamma}{r^{1-\xi}} [c_1 \cos(\eta \ln r) + c_2 \sin(\eta \ln r)] \quad (2)$$

여기서, $1 - \lambda = \zeta + i\eta$ 이고, 응력특이성 지수 λ 는 다음과 같은 특성방정식으로부터 구해진다.¹⁰⁾

$$A\beta^2 + 2Ba\beta + Ca^2 - 2D\beta - 2Ea + F = 0 \quad (3)$$

여기서, a, b 는 Dundur 파라미터이며 다음 식과 같이 된다.¹¹⁾

$$a = \frac{\mu_1(k_2+1) - \mu_2(k_1+1)}{\mu_1(k_2+1) + \mu_2(k_1+1)}$$

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

식 (4)에서 k_i 와 μ_i 는 다음과 같다.

$$k_i = \begin{cases} 3-4\nu_i & (\text{평면응력}) \\ 3-4\nu_i & (\text{평면변형율}), (i=1, 2) \\ 1+4\nu_i & \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \quad (6)$$

여기서, ν_i , E_i , μ_i 는 각각 재료의 푸아송비, 세로탄성계수, 전단탄성계수를 의미한다. 또한, 식 (3)에서 각각의 계수 $A \sim F$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} A &= 4Q(\lambda, \theta_1)Q(\lambda, \theta_2) \\ B &= 2(1-\lambda)^2 [\sin \theta_1 Q(\lambda, \theta_2) + \sin \theta_2 Q(\lambda, \theta_1)] \\ C &= 4(1-\lambda)[(1-\lambda)^2 - 1] \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + Q(\lambda, \theta_1 - \theta_2) \\ D &= 2(1-\lambda)[\sin^2 \theta_1 \sin^2(\lambda, \theta_2) - \sin^2 \theta_2 \sin^2(\lambda, \theta_1)] \\ E &= -D + Q(\lambda, \theta_2) - Q(\lambda, \theta_1) \\ F &= Q(\lambda, \theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, Q 는 다음 식과 같이 된다.

$$Q(\lambda, \phi) = \sin^2[\phi(1-\lambda)] - (1-\lambda)^2 \sin^2 \phi \quad (8)$$

응력특성방정식 (3)은 λ 에 관하여 비선형 방정식이므로 실수인 경우 $0 < \lambda < 1$ 의 범위에서 만족할 수 있는 해가 얻어질 때까지 반복되는 프로그램을 이용하여 구할 수 있고, λ 가 복소근인 경우는 특성방정식을 실수부와 허수부로 분리하여 계산한다.

3. 응력특이성의 해석결과 및 고찰

3.1 응력특이성지수의 계산

응력해석은 Kelvin의 기본해를 이용한 경계요소법 탄성해석을 실시하였고 Fig. 3은 덧살이 없는 $c = 0$ 인 경우 BEM 응력해석 결과를 계면단으로부터의 거리로 무차원화 하여 도시하였으며 그레프의 기울기를 이용하여 수직응력과 전단응력에 대한 응력특이성지수를 구하는 예를 나타낸다. 식 (3)의 응력특성방정식으로 작성된 프로그램에 의해 구해진

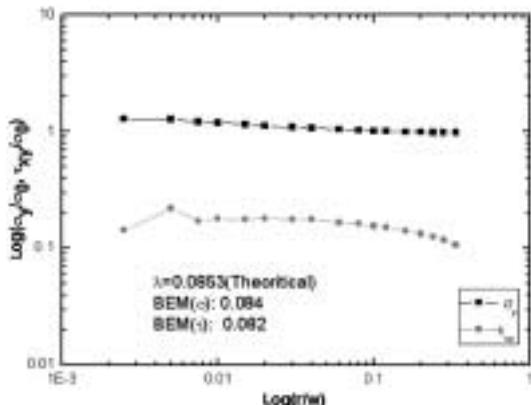


Fig. 3 Stress singularity at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($c=0$)

이론적인 λ 와 BEM 응력해석으로부터 구해진 λ 를 나타낸 것이다. λ 는 이종재료의 조합특성에만 관계되므로 해석모델 Fig. 2(b)에도 그대로 적용된다.

3.2 접합계면의 응력해석

3.2.1 덧살이 없는 경우

Fig. 4와 Fig. 5는 $c=0$ 의 경우 마찰용접 계면에서 수직 및 전단응력 분포를 나타낸 것이다. 계면의 양단에서 응력특이성이 대칭으로 나타난다.

3.2.2 대칭 덧살의 경우

Fig. 6과 Fig. 7은 각 재료에 대해 부착길이(side attached length) t 가 2 mm로 동일한 경우 c 값이 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 1 mm 씩 늘어난 계면의 수직응력과 전단응력 해석결과를 무차원으로 표시하여 검토하였다. c 값이 증가할수록 응력분포는 감소된다.

Fig. 8은 $t=4$ mm, Fig. 9는 6 mm 일 경우 수직응력 분포를 나타낸다. 덧살 c 가 0.1 mm 일 때 0.3, 0.5, 1 mm의 경우 보다 응력이 크게 분포하며 덧살의 중간 값 0.3 mm, 0.5 mm 일 때 응력 크기의 순서가 바뀌는 것은 이종재료이면서 t 의 값을 대칭으로 동일하게 고정시켜 놓았기 때문으로 판단된다. 두께 t 가 가장 두꺼운 6 mm 일 때 응력분포는 c 의 변화에 따라 별 차이가 없다.

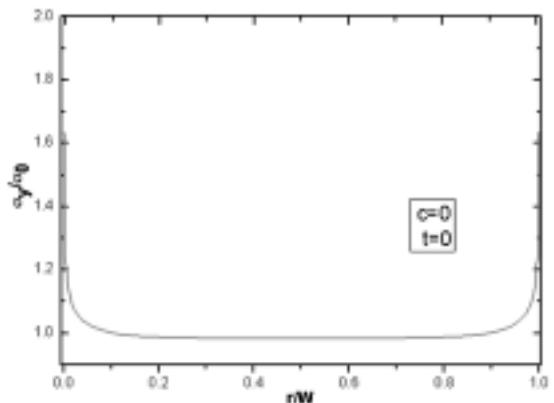


Fig. 4 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($c=0, t=0$)

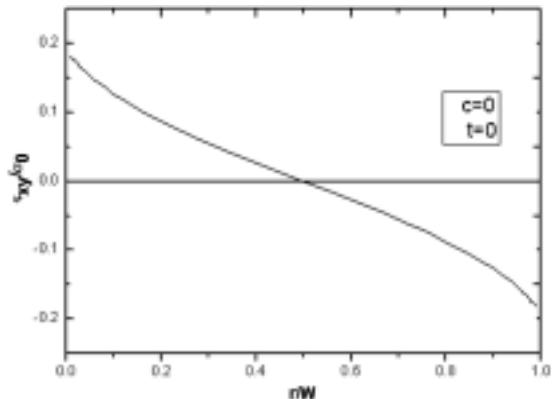


Fig. 5 Shear stress distribution at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($c=0, t=0$)

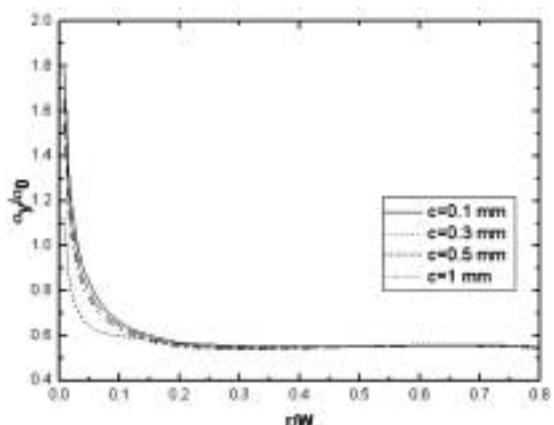


Fig. 6 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($t=2mm$)

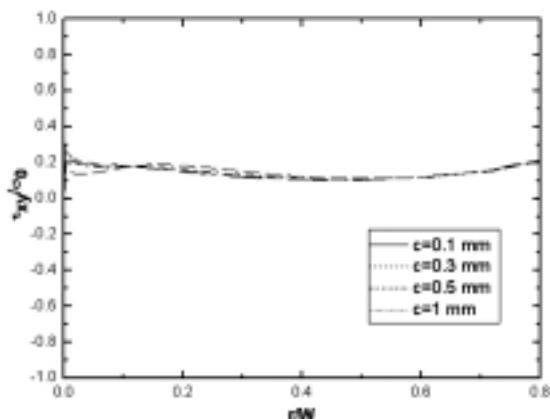


Fig. 7 Shear stress distribution at an interface on friction welded dissimilar materials ($t=2\text{ mm}$)

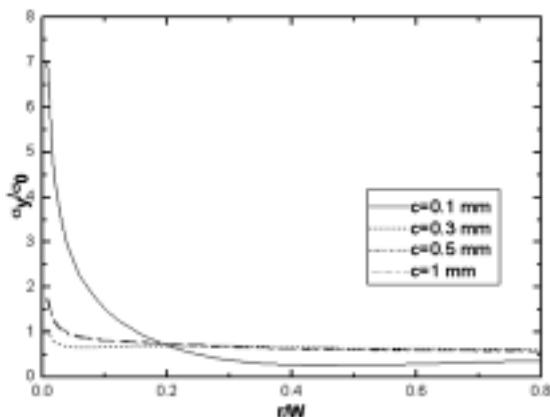


Fig. 8 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($t=4\text{ mm}$)

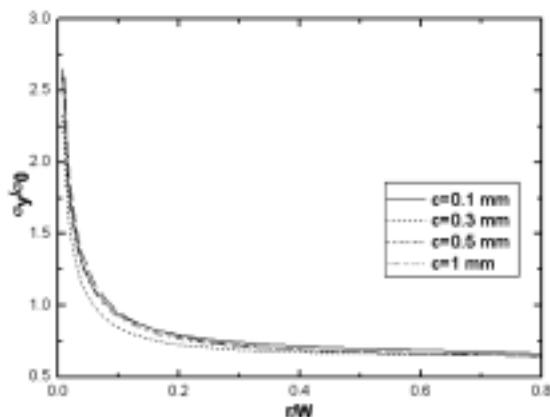


Fig. 9 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($t=6\text{ mm}$)

3.2.3 비대칭 덧살의 경우

Fig. 10은 부착두께 t_1 과 t_2 가 각각 2 mm , 6 mm ,

Fig. 11은 2 mm , 4 mm 일 때 c 의 변화에 따라 해석된 수직응력을 무차원화 하여 응력분포를 나타내었다. t_1/t_2 의 비는 다르지만 c 가 증가할수록 응력특이성이 둔화된다.

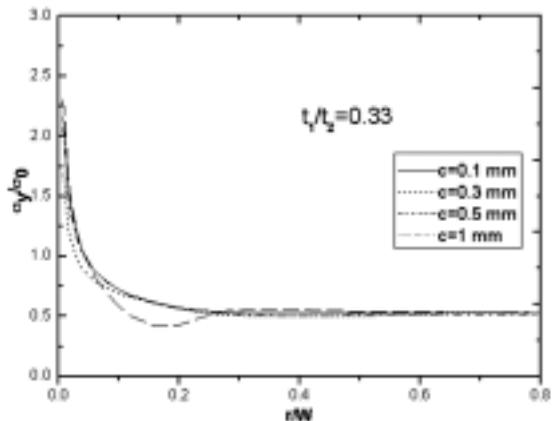


Fig. 10 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($t_1/t_2 = 0.33$)

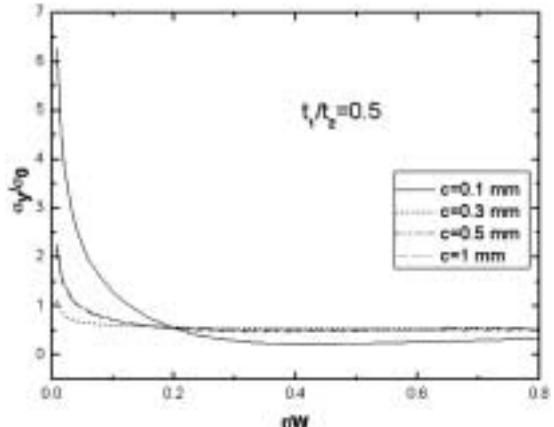


Fig. 11 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded dissimilar materials ($t_1/t_2 = 0.5$)

4. 응력특이성계수의 해석

BEM 응력해석 결과와 3.1 절에서 구한 응력특이성지수를 식 (1)에 대입하여 계면단으로부터의 거리 r 에 따라 외삽하여 응력특이성계수는 다음식에서 계산하였다.

$$\Gamma_1 = \sigma_y \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda$$

$$\Gamma_2 = \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \quad (8)$$

$$\Gamma = \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2}$$

여기서 Γ_1 과 Γ_2 는 BEM 응력해석에서 얻어진 수직응력 및 전단응력성분을 사용하여 구한 분리임계응력특이성계수이고 이들의 합을 전응력특이성계수 Γ 로 하였다.

4.1 덧살이 없는 경우

Fig. 12는 $c=0$ 일 때 응력특이성지수 $\lambda=0.0853$ 을 BEM 해석결과에 대입하여 $r=0$ 일 때 외삽값으로 Γ_1 , Γ_2 를 구하는 방법을 나타낸 것이다. 이것을 이용하여 식 (8)로부터 전응력특이성 계수 Γ 를 계산하면 0.98245를 얻는다.

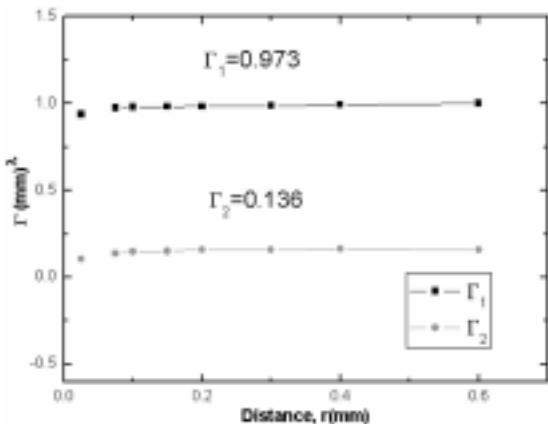


Fig. 12 Extrapolation of stress singularity factor on dissimilar friction welded materials

4.2 대칭 덧살의 경우

Fig. 13은 t 의 치수가 대칭인 경우 c 의 변화에 따른 전응력특이성계수 Γ 를 나타내었다. 응력특이성지수가 일정하므로 전응력특이성계수는 응력해석 값에 의존하며 c 가 증가할수록 Γ 는 감소하는 경향을 나타낸다. 부착두께 t 가 가장 두꺼운 6 mm 경우 Γ 의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타나며

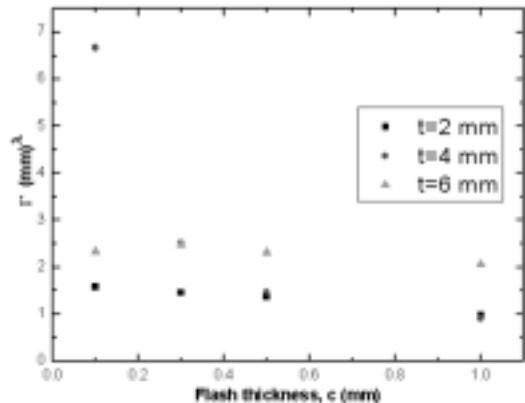


Fig. 13 Total stress singularity factor for variation of flash thickness

동일한 c 값의 범위에서 t 의 변화에 따른 전응력특이성계수에 대한 크기의 순서가 바뀌는 것은 t_1 과 t_2 의 비율에 따라 응력특이성이 복잡하게 변화하는 것을 보여준다.

4.3 비대칭 덧살의 경우

Fig. 14는 t_1/t_2 이 각각 0.33 및 0.5 일 경우 전응력특이성계수를 나타낸 것이다. t_1/t_2 의 비가 0.33 일 때 응력특이성계수는 큰 변화가 없는 것으로 보아 각 재료의 조합특성이 양호한 조건으로 여겨지며 비가 0.5일 경우는 c 의 변화에 크게 좌우되어 급격한 감소현상을 나타낸다.

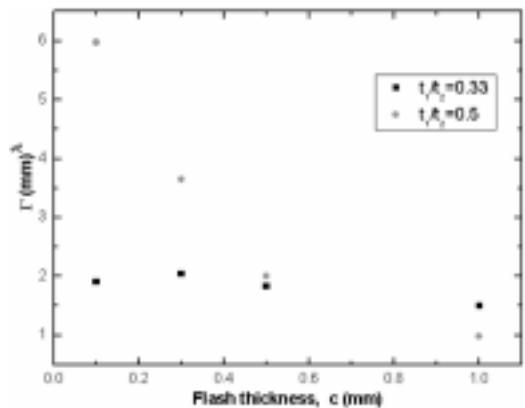


Fig. 14 Total stress singularity factor for variation of flash thickness

또한, $c=1$ 일 때 응력특이성의 크기가 바뀌는 것으로 보아 응력특이성계수는 덧살의 형상 및 비율에 따라 여러 가지 양상으로 변화할 것이다.

5. 결 론

마찰 용접에 의한 이종재 접합 계면의 강도평가 방법을 확립하기 위한 기초 연구로써 STS304/A1 합금(6061-T6)의 마찰용접에 대한 BEM 응력 및 응력특이성 계수의 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) STS304/A1 합금의 이종재 마찰용접 접합계면에 대한 응력해석 결과로부터 응력특이성지수 λ 를 계산하고 전응력특이성계수 Γ 를 구하는 방법을 제시하였다.
- 2) 이종재 마찰용접의 접합 계면에 대한 응력특이성계수 Γ 는 덧살의 두께 c 와 축 방향으로 접합되는 길이 t 의 변화에 큰 영향을 받는다.
- 3) 덧살이 있는 경우 접합계면에 대한 응력분포는 덧살이 없는 경우보다 크게 나타났으며, 그 크기는 c 의 증가에 따라 감소하였다.
- 4) 전응력특이성계수 Γ 는 덧살이 없는 경우 보다 덧살이 있는 경우 크게 나타났으며, 덧살의 두께 c 의 증가에 따라 감소하였다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌다.

References

- 1) H. S. Jeong and T. Shinda, "Fundamentals and Basic Application of Friction Welding," J. of KWS, Vol.9, No.6, p.1, 1997.
- 2) S. K. Oh, "Real-time Evolution of Automatic Production Quality Control for Friction Welding Machine," J. of KSME, Vol.9, No.6, pp.757-766, 1985.
- 3) "最近摩擦鎔接の 適用," 溶接技術 Vol.50, No.9, pp.104-107, 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) N. Y. Chung and J. H. Yi, "Evaluation Method of Bonded Strength in Adhesively Bonded Structures of the Aluminum Alloys," J. of KSMTE, Vol.8, No.1, pp.35-44, 1999.
- 7) N. Y. Chung, S. I. Park, M. D. Lee and C. H. Park, "Ultrasonic Detection of Interface Crack in Adhesively Bonded DCB Joints," Int. J. Automotive Technology, Vol.3, No.4, pp.157-163, 2002.
- 8) D. G. Lee, S. Y. Lee, J. K. Jung and J. Zhang, "An Evaluation of Fatigue Properties on Dissimilar Friction Weld of Heat-Resisting Steels Used in Vehicle Valves," Journal of KSAE, Vol.10, No.2, pp.186-192, 2002.
- 9) S. O. Oh, C. W. Hue, J. W. Yoo and J. C. Kim, "A Study on the Rupture and Crack Propagation Characteristics in the Material Friction-Welded with Heterogeneous Steels of 40C and STS304," J. of KWS, Vol.10, No.4, pp.230-239, 1992.
- 10) D. B. Bogy, "The Plane Solution for Joined Dissimilar Elastic Semistrips under Tension," J. Appl. Mech, Vol.42, pp.93-98, 1975.
- 11) J. Dunders, "Discussion of Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading," J. Appl. Mech, Vol.36, pp.650-652, 1969.