

## 응력특이성을 고려한 SUH35/SUH3 마찰용접재의 강도평가

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

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

### Strength Evaluation of Friction Welded SUH35/SUH3 Considering Stress Singularity

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, Gwangmyeong-si, Gyeonggi 135-080, Korea

(Received 26 October 2005 / Accepted 1 February 2006)

**Abstract** : Recently, application of friction welded SUH35/SUH3 is increasing in the manufacturing process of automotive engine valves . For securing its reliability and a reasonable strength evaluation method, it is necessary to assess stress singularity under the residual stress condition on the friction welded interface between dissimilar materials. In this paper, strength evaluation method of friction welded materials was investigated by boundary element method and static tensile testing. An advanced method of quantitative strength evaluation for SUH35/SUH3 friction welded material is to be suggested by establishing fracture criterion by using stress singularity factors.

**Key words** : Friction welding(마찰용접), Residual stress(잔류응력), Boundary Element Method(경계요소법), Stress singularity factor (응력특이성계수), Fracture criterion(파괴기준), Strength evaluation method(강도평가방법)

#### 1. 서 론

마찰용접은 가압력과 함께 상대적인 고속 회전 운동에 의한 마찰열을 이용하여 압접하는 것이다. 열에너지의 효율성에 의한 공정의 간편성, 자동화의 용이성과 경제성 등에서 우수한 용접특성을 갖고 있으며<sup>1)</sup> 자동차, 중장비 관련부품을 비롯하여 회전 기계부품, 공구류 등은 특정부위마다 하중과 고온에 견딜 수 있는 기계적 특성과 적정 강도가 요구되므로 이종재료의 접합이 요구된다.<sup>2,3)</sup> 최근에는 내연기관엔진의 배기 밸브용 재료로서 Si-Cr계 내열강봉인 SUH3 와 Ni-Cr계 내열강봉 SUH35 가 널리 사용되고 있으며 이 두 재료를 마찰용접하여

브류 부속품을 제작하고 있다.<sup>4)</sup>

이종재료의 마찰용접은 고온 마찰열과 고압 상태에서 진행되며 냉각 될 때 두 재료의 선팽창계수와 탄성계수의 차이로 접합 계면단에서 접합 잔류응력으로 인한 응력특이점이 발생한다. 재료의 물성치 차이에 따라 잔류응력 특이성<sup>5)</sup>이 크게 좌우된다는 연구사례가 있고, 잔류응력특이성이 실제 외부 작용 하중에 의한 응력 특이성과 중첩이 된다면 접합 계면의 강도를 저하시키는 요인이 되고 이 응력특이점은 파괴의 기점이 되므로 접합 계면단의 응력 특이성을 고려한 접합강도의 평가가 유효한 것으로 알려져 있다.<sup>6,7)</sup>

최근 많이 행해지는 SUH35/SUH3의 이종 마찰용접에 대해 마찰용접특성,<sup>8)</sup> 고온크리프 수명예측,<sup>9)</sup>

\*Corresponding author, E-mail: admin@gonghak21.com

마찰용접의 최적화 등에 관한 연구<sup>10)</sup>가 있으나 접합 계면에서 응력특이성을 고려한 강도평가 방법이 제시되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 접합 잔류응력과 외부하중이 동시에 작용하는 SUH35/SUH3 마찰용접계면에 대한 정적강도평가방법을 확립하기 위해 마찰용접 시험편을 제작하고 경계요소법(Boundary Element Method : B.E.M)을 이용한 수치해석을 통하여 얻어진 용접계면의 파괴역학적 파라미터인 응력특이성 계수  $\Gamma_{BEM}$ 의 결과<sup>11)</sup>와 시험편의 정적시험 결과를 토대로 SUH35/SUH3 이종마찰용접 계면에 대한 정량적 강도평가 방법을 제안하였다.

## 2. 계면단의 응력특이성

### 2.1 BEM해석모델

Fig. 1은 SUH35/SUH3 용접재의 접합계면에서 수직응력과 전단응력을 계산하기 위한 BEM 해석 모델의 형상을 나타낸다. 용접시에 발생하는 덧살(flash)은 가공에 의해 제거된 형상이며 Fig. 1의 (a)는 잔류응력만이 작용하는 경우, Fig. 1의 (b)는 외부하중만이 작용하는 경우의 해석모델형상이다. 외부하중과 잔류응력이 함께 작용하는 경우 응력특이성 지수( $\lambda$ )와 응력특이성계수( $J$ )를 계산하기 위해 각각의 응력해석결과를 중첩하여 사용하였다.<sup>11)</sup>

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

잔류응력만이 작용하는 경우 구속조건은 Fig. 1(a)와 같이 양단을 고정단으로 취급하기 위해 x, y 방향 모두 구속하여 온도변화를 가하였고 Fig. 1(b)는 외부하중만이 작용하는 경우 구속조건과 하중조건을 나타낸다. 2차원 등 매개요소를 사용하였고 요소분할 수는 140개로 하고 용접계면의 응력분포를 고정밀도로 해석하기 위해 계면단은 서브(sub) 요소로 분할하여 평면 변형률 상태에서 해석하였다.

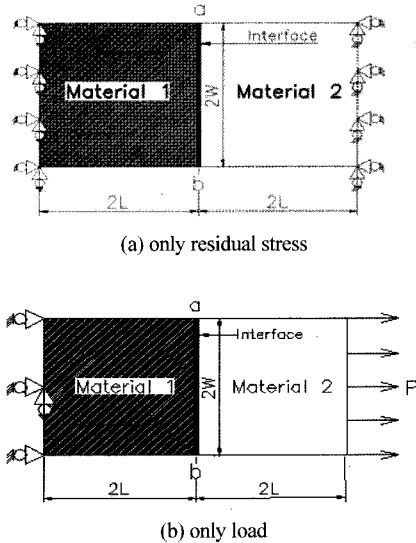


Fig. 1 Model of BEM analysis on friction welded dissimilar materials

SUH35/SUH3의 용접재 외에 이종마찰용접이 가능한 다양한 용접재들의 강도평가 및 파괴기준설정을 함께 제시하기 위한 방법의 일환으로 스테인레스강(STS304)과 알루미늄(Al)합금, 탄소강 SM45C와 알루미늄합금의 이종접합재에 대한 응력해석도 확대 실시하여 응력특이성계수를 구하였다.

재료의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of materials

| Mechanical properties | Young's modulus E(GPa) | Poisson's ratio $\nu$ | Coefficient of Thermal Expansion (m/m.°K) | Weld pair  |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|---|------------|
| SUH3                  | 196                    | 0.3                   | $17.5 \times 10^{-6}$                     | SUH35/SUH3 |
| SUH35                 | 215                    | 0.3                   | $16.7 \times 10^{-6}$                     |            |
| STS304                | 193                    | 0.3                   | $7.5 \times 10^{-6}$                      | STS304/Al  |
| Al alloy              | 70.3                   | 0.345                 | $16 \times 10^{-6}$                       | SM45C/Al   |
| SM45C                 | 206                    | 0.3                   | $12 \times 10^{-6}$                       |            |

### 2.2 SUH35/SUH3 용접계면의 잔류응력

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 무차원화하고 계면단으로부터의 거리  $r$ 도 ( $r/W$ )로 무차원화하여 나타내었다. Fig. 2는 덧살이 없는 경우 온도차가 클수록 용접 계면단의 수직응력분포가 증가 하

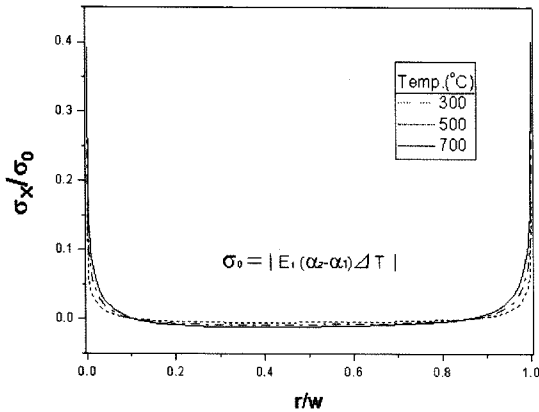


Fig. 2 Normal stress distribution at an interface edge on friction welded SUH35/SUH3

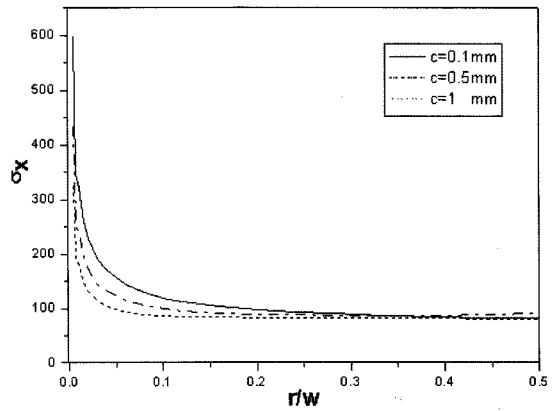


Fig. 4 Normal stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 (P=100N)

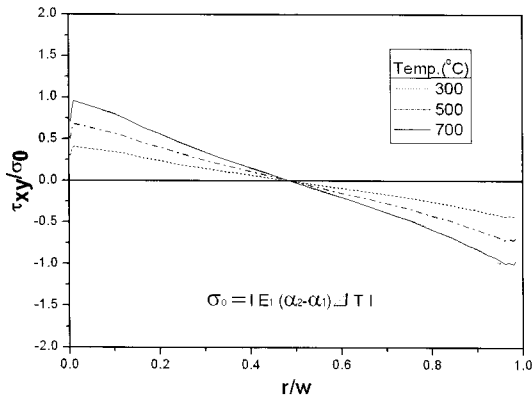


Fig. 3 Shear stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3

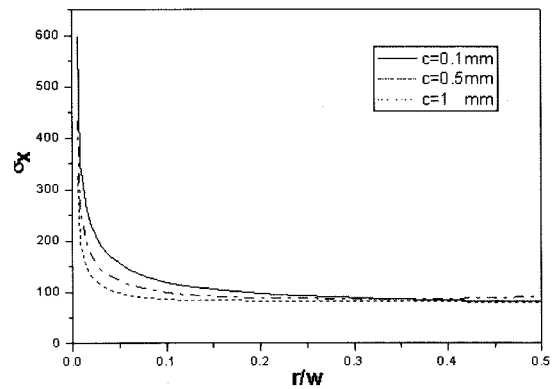


Fig. 5 Normal stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $\Delta T=700^\circ\text{C}$ , P=100N)

는 것을 나타내며 Fig. 3은 덧살이 없는 경우 전단응력의 분포를 나타낸다. 온도차가 클수록 응력분포가 증가하는 것을 나타낸다.

### 2.3 작용하중과 잔류응력의 중첩

Fig. 4는 단위길이당 인장하중 P=100 N이고 계면으로부터 반지름 방향으로 증가하는 덧살  $c=0.1$  mm, 0.5 mm, 1 mm 일 때 수직응력분포를 나타낸 것이며  $c$ 가 증가 할수록 응력특이성은 감소한다.

Fig. 5는 단위길이당 인장하중 P=100 N과 온도차  $700^\circ\text{C}$ 가 중첩되어 덧살  $c=0.1$  mm, 0.5 mm, 1 mm로 변화할 경우 수직응력의 분포를 나타낸 것이며  $c$ 가 증가 할수록 응력특이성은 완화 된다.

Fig. 6은 온도차가  $700^\circ\text{C}$ 일 때 단위길이당 인장하

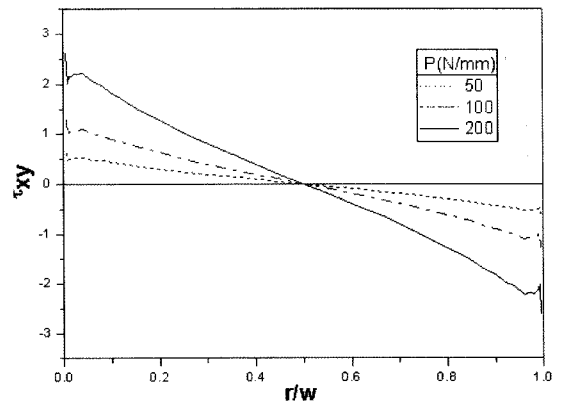


Fig. 6 Shear stress distribution at an interface on friction welded SUH35/SUH3 ( $\Delta T=700^\circ\text{C}$ )

중 50 N, 100 N, 200 N 이 중첩된 경우 전단응력의 분

포인테 하중이 증가 할수록 응력특이성은 증가한다.

### 2.4 작용하중에 의한 응력특이성

열응력이 작용하지 않고 작용 하중만에 의한 응력특이성 지수는 다음 식과 같이 된다.<sup>12)</sup>

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(r^{-\lambda}) \quad (1)$$

여기서 r은 용접 계면단 으로부터의 거리이고, λ는 응력특이성 지수이다.

### 2.5 용접계면 잔류응력의 특이성

이중용접재의 잔류응력은 외부하중에 의한 응력 특이성과는 달리 Dunders 파라미터 α, β가 다음 식으로 표시 될 때 잔류응력의 특이성은 다음 과 같이 된다.<sup>13)</sup>

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

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\log r) \quad (2)$$

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

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(r^{-\lambda}) + \sigma_{ij}(\log r) \quad (3)$$

등은 외부하중이 작용할 때 equal 및 good pair에서도 식 (2)와 같이 log r의 대수형 잔류응력 특이성이 존재하고, bad pair의 경우는 식 (3)과 같이 r<sup>-λ</sup>와 log r의 응력특이성이 공존한다.

## 3. 응력특이성계수의 계산

Fig. 7은 내연기관 엔진용 배기발브의 경우 연소실내의 실제사용온도범위가 500°C 이상인 것과 마찬가지로 용접시 용융되어 덧살이 형성된 후 덧살의 외부형상이 가공되어 나타난 표면임을 고려하여 온도차 700°C의 잔류응력 및 단위길이당 외부하중 100N에 대한 각각의 BEM응력해석 결과를 중첩한 후 식 (1)을 기준한 대수좌표에 도시한 그래프이다.

그래프내의 λ<sub>1</sub>과 λ<sub>2</sub>값은 대수좌표의 기울기인데 이 값이 수직응력과 전단응력에 대한 응력특이성 지수가 된다. 수직응력의 경우 응력특이성이 log r에만 의존하므로 그래프는 거의 수평적이지만 전단응력의 경우는 r<sup>-λ</sup>와 log r의 응력특이성이 공존하므로 곡선적이다. 전단응력성분은 열응력 σ<sub>0</sub> = E<sub>1</sub>α(t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>)

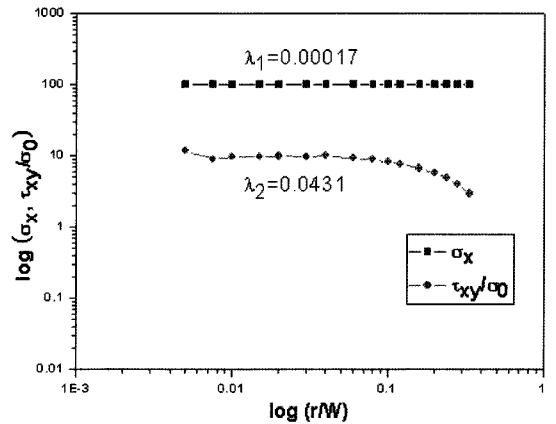


Fig. 7 Calculation of stress singularity index at an edge on friction welded SUH35/SUH3

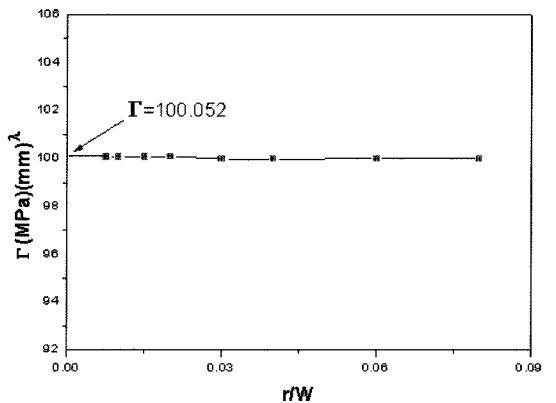


Fig. 8 Extrapolation of stress singularity factor at an edge on friction welded SUH35/SUH3

으로 무차원화 하여 표시하였고 Fig. 8은 Fig. 7과 같은 방법으로 구해진 λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>를 식 (4)에 대입하여 계면상의 임의 r에 대한 Γ<sub>1</sub>과 Γ<sub>2</sub>를 구한 후 최소자승법에 의한 외삽법으로 r→0일 때 Γ를 구하는 예를 보여준다.

$$\Gamma_1 = \sigma_x \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^{\lambda_1}$$

$$\Gamma_2 = \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^{\lambda_2} \quad (4)$$

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

Table 2는 Fig. 7과 Fig. 8과 같은 방법으로 SUH35/SUH3외의 이중마찰용접재 용접쌍(Weld Pair) STS304/

Table 2 Stress singularity index and factor for friction welded weld pairs

| Weld pair   | Load (N)   | Temp. (°C) | Stress singularity parameter |             |            |            |           |          |
|-------------|------------|------------|------------------------------|-------------|------------|------------|-----------|----------|
|             |            |            | $\lambda_1$                  | $\lambda_2$ | $\Gamma_1$ | $\Gamma_2$ | $\lambda$ | $\Gamma$ |
| SUH35 /SUH3 | 0          | 300        | 0.0266                       | 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    |
|             | 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    | 0.865      | 0.04311   | 100.052  |
|             | 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  |
|             | STS304/ AI | 100        | 500                          | 0.0655      | 0.011      | 96.56      | 0.02      | 0.0664   |
| 700         |            |            | 0.066                        | 0.0136      | 96.41      | 0.02       | 0.0674    | 96.41    |
| SM45C/ AI   | 100        | 500        | 0.0709                       | 0.0192      | 96.09      | 0.02       | 0.0735    | 96.09    |
|             |            | 700        | 0.0732                       | 0.01924     | 95.465     | 0.02       | 0.076     | 95.465   |

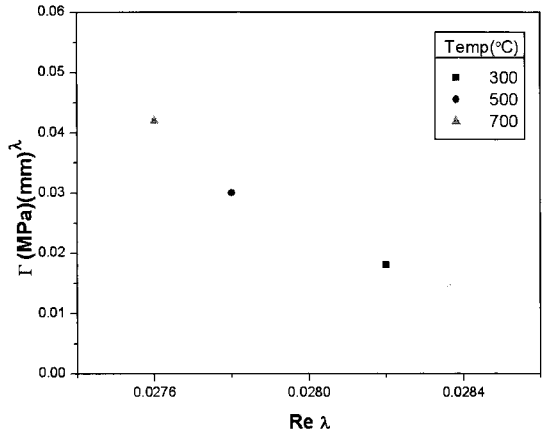


Fig. 11 Relationship between  $\lambda$  and  $\Gamma$  at an edge on friction welded SUH35/SUH3

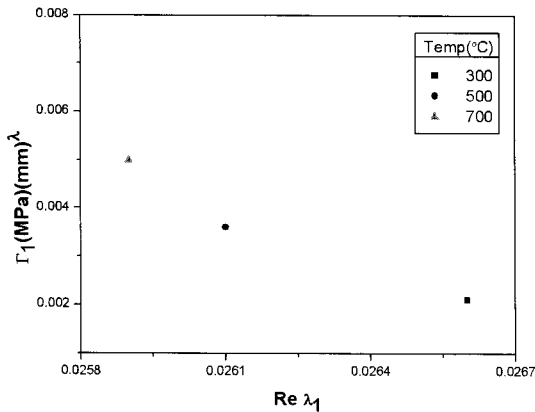


Fig. 9 Relationship between  $\lambda_1$  and  $\Gamma_1$  at an edge on friction welded SUH35/SUH3

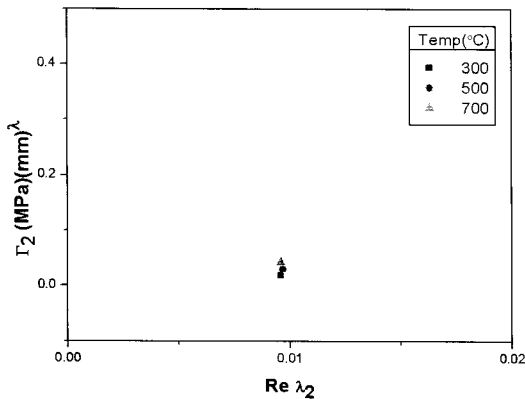


Fig. 10 Relationship between  $\lambda_2$  and  $\Gamma_2$  at an edge on friction welded SUH35/SUH3

Al, SM45C/Al에 대해 온도차 300°C, 500°C, 700°C에 따른 용접 잔류응력과 마찰용접계면에 하중 100 N, 200 N 이 동시작용하는 경우 응력해석결과를 중첩하여 그 결과로부터 응력특이성지수 및 계수를 계산한 결과를 나타내었다. 하중의 크기 변화에 따른  $\Gamma$ 의 변화는 크지만 재료의 물성치차이가 크지 않으므로 온도변화에 따른 응력특이성의 변화는 그다지 크지않다. Fig. 9, Fig. 10은 온도차를 300, 500, 700°C로 변화시켰을 때 수직응력에 의한 응력특이성지수  $Re\lambda_1$ 과 전단응력에 의한  $Re\lambda_2$ 의 값을 식 (1)에 대입하여 얻은 응력특이성계수  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 의 관계를 나타낸 그림이다. 수직응력에 의한 경우 온도차가 클수록  $\Gamma_1$  값이 크고  $\lambda_1$  이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 전단응력의 경우는  $\lambda_2$ 의 변화가 거의 없으며 특이성계수  $\Gamma_2$ 의 변화도 아주 미세한 차이만을 나타낸다. 실제접합의 경우 수직응력성분에 의한 박리현상은 접합체의 파괴에 직접적인 영향을 미치므로 수직응력과 전단응력성분을 동시에 고려한 전임계응력특이성계수  $\Gamma = \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2}$ 를 사용하는 것이 더욱 합리적인 평가방법이 될 수 있다.

Fig. 11은 응력특이성지수  $Re\lambda$ 와  $\Gamma$ 의 관계를 나타낸 것이고 Fig. 12는 온도차 500°C와 단위길이당 인장하중 100N, 200N가 중첩된 경우  $\lambda$ 와  $\Gamma$ 의 관계를 나타내었다.

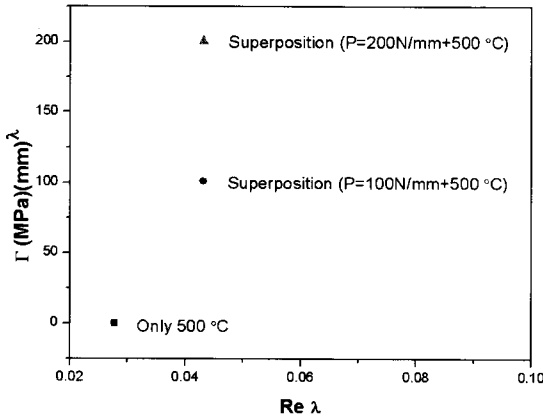


Fig. 12 Relationship between  $\lambda$  and  $\Gamma$  for superposition at an edge on friction welded SUH35/SUH3

#### 4. 실험

##### 4.1 시험편의 제작 및 실험방법

본 실험에 사용된 마찰용접시험편 재료는 내식성, 내산화성, 고온 강도가 높은 오스테나이트계의 내열강으로써 자동차 엔진의 배기밸브용 재료로 널리 사용 되는 Ni-Cr계 내열강종 SUH35와 내마모성이 우수한 마텐사이트계 내열강종인 Si-Cr계 SUH3의 용접재이다.

시험편가공은 직경12mm의 모재를 인장시험이 용이하도록 지름 8mm로 축소시켜 평행 가공한 후 실제로 자동차 엔진밸브의 대량 생산용 마찰용접기로 쓰이는 브레이크형 FF80-Ⅱ-C Type을 사용하였다. 용접시 고정축의 척(Chuck)에 SUH3보다 강도가 큰 SUH35의 지름12mm 끝단을 고정하였고 회전축의 척에는 SUH3 을 회전시켜 업셋(Upset)압력을 가하여 마찰용접을 행하였다. 소성유동의 영향과 극성효과로 SUH3의 덧살(flash)이 SUH35보다 더 많이 생성되었고 용접시 형성된 덧살 부분은 실제 배기밸브로 사용될 경우 표면 처리를 위해 제거 되는 부분이므로 CNC 선반에서 덧살 부분을 선삭가공 하여 제거 하였다. 가공된 표면은 거칠기를 제거하기 위해 #600~#1200번까지 사포(Sand paper)를 사용하여 표면가공(Polishing) 하였다. Fig. 13의 (a)는 덧살이 있는 용접시험편으로부터 덧살을 제거한 시험편의 형상이고 Fig. 13의 (b)는 용접계면이 파단된 모습을 나타내며 Fig. 13의 (c)는 덧살이 제거된 시

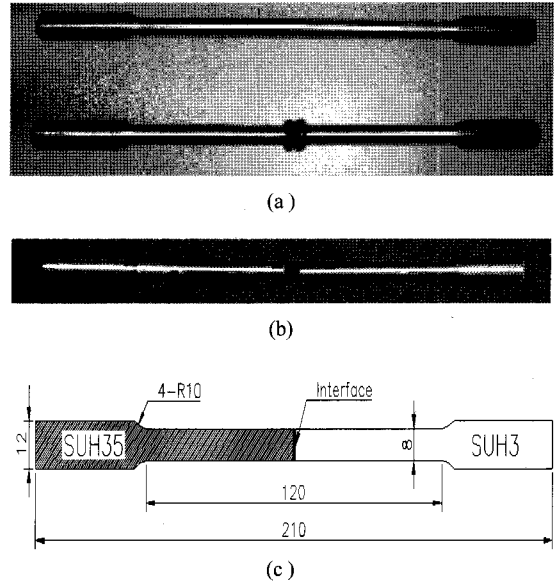


Fig. 13 Shape of dimension of specimens on friction welded SUH35/SUH3

험편 형상의 치수를 나타낸다. 인장시험기는 용량 25ton의 전기 모터식 만능시험기(Shimadzu AG-25TG)를 사용하였으며 신장계(Extensometer)는 게이지 길이(Gage length) 25mm 이며 측정범위(Measuring range) 2.5mm ~ 25mm 인 SG50-50 모델을 부착하였고 인장속도 2mm/min 으로 하여 하중-변위 선도를 Monitor X-Y Recorder에 기록하여 비교하였다. 인장시험은 시험편 3개의 각 시험편 마다 동일한 방법으로 실시하였고 구해진 파단하중의 평균값을 재료의 파단강도  $\sigma_{max}$ 의 계산에 사용하였다.

##### 4.2 실험결과와 고찰

SUH35/SUH3 용접재의 인장시험에서 구한 하중과 변위의 관계를 Fig. 14에 나타내었다.

파단하중까지 하중-변위선도는 그림에 나타낸바와 같이 일정구간 선형적으로 진행하다가 비선형적으로 변화하는 탄 소성변형경화 현상을 나타내었으며 항복점이 뚜렷하지 않으므로 영구 변형률 0.2%를 기준한 오프셋(off-set) 항복강도를 구한결과 751MPa로 나타났고 항복점까지의 공칭 변형률은 0.0062를 나타내었다. 용접계면의 파단면은 축방향에 대해 90°에 가까운 수직 파단을 형성하여 취성파괴특성을 나타내었다.

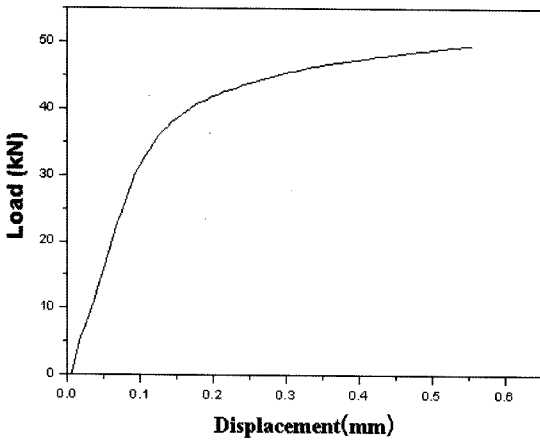


Fig. 14 Tensile load and displacement on interface of friction welded SUH35/SUH3

용접 접합면에서의 파단하중은 49.5 kN으로 나타났고 용접시험편에 대한 파단강도는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma = P/A = 4P/\pi d^2 \quad (5)$$

여기에서  $P$ : 파단하중(N)  $\sigma$ : 파단강도  
 $d$ : 시험편의 지름 (mm)이다

### 4.3 SUH35/SUH3 용접재의 강도평가 방법의 제안

Fig. 14와 같이 실험으로부터 얻어진 파단하중 값을 식 (5)에 대입하여 구한 파단강도  $\sigma_{max}$ 은 시험편의 형상, 치수 및 부하조건에 의존하므로 본 연구에서는 이에 의존하지 않는 SUH35/SUH3 용접재 접합면의 파괴를 지배하는 정량적인 파괴인자를 사용하는 것이 보다 효과적이라 생각되어 응력특이성 계수  $\Gamma$ 를 사용하고자 한다.

BEM 해석시 작용시킨 외부 응력  $\sigma_{BEM}$ 과 이때의 응력해석 결과를 식 (1)에 대입하여 구한  $\Gamma_{BEM}$  그리고, 실험에서 구한 임계응력특이성계수  $\Gamma_{cr}$  사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\Gamma_{cr} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{BEM}} \Gamma_{BEM} = \Psi \Gamma_{BEM} = \beta \sigma_{max} \quad (6)$$

여기에서

$$\Psi = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{BEM}}, \beta = \frac{\Gamma_{BEM}}{\sigma_{BEM}} \text{이며 } \Gamma_{cr} \text{ 과 } \Gamma_{BEM} \text{ 사이에는}$$

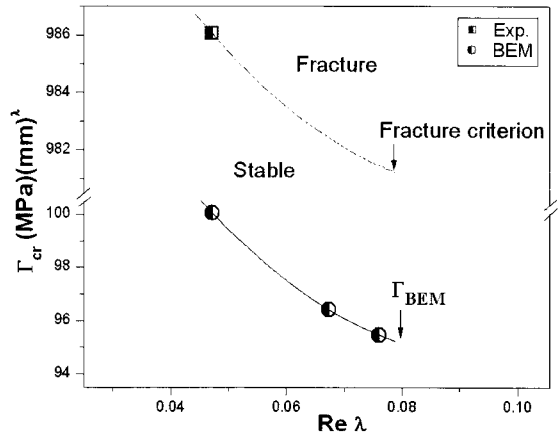


Fig. 15 Fracture criterion on interface of friction welded SUH35/SUH3 and weld pair

$\Psi$  배,  $\Gamma_{cr}$  과  $\sigma_{max}$  사이에는  $\beta$  배 만큼 차이가 있다.

SUH35/SUH3 용접재 접합면의 경우  $\Psi$ 와  $\beta$ 를 계산하여 곱한 전 임계응력특이성계수  $\Gamma_{cr}$ 은 각각  $985.78 \text{ MPa} (mm)^\lambda$  과  $985.804 \text{ MPa} (mm)^\lambda$  로 거의 동일하게 나타났다. SUH35/SUH3 만의 용접재 (Weld Pair)에 대한  $\Gamma_{BEM}$ 과  $\Gamma_{cr}$ 의 결과로는 파괴기준 설정의 그래프 작성은 곤란하므로 이종마찰용접이 가능한 재료들에 대해 다양한 시험편을 제작하고 인장실험에 의해 얻어진 파단하중으로부터  $\sigma_{max}$ 를 계산한 후 BEM해석으로부터 구한  $\Gamma_{BEM}$  값에

$\Psi = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{BEM}}$  비를 곱해주면 각각의 용접재 계면에 대한 임계응력특이성계수  $\Gamma_{cr}$ 가 얻어지고 이 점들을 연결하면 다양한 이종마찰 용접재에 대한 파괴기준 설정이 가능하다.

Fig. 15는 SUH35/SUH3, STS304/Al, SM45C/Al 이종마찰용접 접합계면에서 외부하중 100N 과 온도 차 700°C의 잔류응력을 고려한 BEM 응력해석결과로부터 얻어진  $\Gamma_{BEM}$ 의 값과 실험으로부터 얻어진  $\Gamma_{cr}$ 을 실수부 응력특이성지수  $Re \lambda$ 와의 관계로써 나타낸 것이다. BEM 해석으로부터 얻어진  $\Gamma_{BEM}$ 을 기준하여 그려진 선으로부터  $\Psi$ 배를 곱하여 이동시키면  $\Gamma_{cr}$ 의 선과 일치하게 된다.

결국, SUH35/SUH3 용접재 및 이종마찰용접이 가능한 용접재 접합계면에 실제하중이 임의로 작용

할 때 임의작용하중에 의한  $I$ 와 과단하중에서 구한  $\Gamma_{cr}$ 의 값 사이에는 다음과 같은 파괴강도를 예측할 수 있는 식이 결정된다.

$$\Gamma \geq \Gamma_{cr} \quad (7)$$

위의 식에서 용접재 접합면이 파괴되지 않고 안정 되려면 응력특이성지수  $Re \lambda$ 에 대한  $\Gamma$ 의 값이  $\Gamma_{cr}$ 의 선 아래에 있어야 하고  $\Gamma \geq \Gamma_{cr}$  이면 용접 접합면은 파괴된다.

이와같은 파괴기준을 이용하여 이종재 마찰용접 접합면의 강도평가 및 파괴강도의 예측도 가능할 것으로 기대된다.

### 5. 결론

마찰용접에 의한 SUH35/SUH3의 용접계면에 대한 응력특이성의 BEM 해석 및 인장시험에 대한 강도평가 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 외부작용하중과 용접 잔류응력이 중첩하는 경우 응력특이성지수  $\lambda$ 를 이용하여 이종 마찰용접재에 대한 응력특이성계수  $I$ 를 구하는 방법을 제시하였다.
- 2) 응력특이성계수를 사용하여 이종재 마찰용접 접합계면의 강도평가방법과 파괴기준을 제안 하였다.
- 3) 내열강 SUH35/SUH3 이종재 마찰용접 접합계 면에서 강도평가 및 파괴기준을 결정하는 임계응력특이성계수  $\Gamma_{cr} = 985.8 \text{ MPa (mm)}^\lambda$ 로 나타났다.
- 4) SUH35/SUH3 용접재 외 이종마찰용접이 가능한 다양한 용접재의 접합면에 대한 정량적인 강도 평가와 파괴기준예측도 가능할 것으로 기대된다.

### 후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

### References

1) H. S. Jeong and T. Shinoda, "Fundamentals and Basic Application of Friction Welding," Jour-

nal of KWS, Vol.9, No.6, pp.1-12, 1997.

2) H. Okamura and K. Aota, "Joining of Dissimilar Materials with Friction Stir Welding," 輕金屬溶接, Vol.42, No.2, pp.49-58, 2004.

3) 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.

4) 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," Journal of KSAE, Vol.10, No.2, pp.186-192, 2002.

5) K. S. Kim, H. S. Kim and N. Y. Chung, "Analysis of Stress Singularity on Ceramic/Metal Bonded Joints," Journal of KSME, Vol.20, No.10, pp.3058-3067, 1996.

6) K. S. Kim, H. S. Kim and N. Y. Chung, "Evaluation of Static Strength on Ceramic/Metal Bonded Joints Considering Stress Singularity," Journal of KSMTE Vol.6, No.1, pp.59- 68, 1997.

7) N. Y. Chung and J. H. Yi, "Evaluation Method of Bonded Strength in Adhesively Bonded Structures of the Aluminum Alloys," Journal of the KSME, Vol.8, No.1, pp.35-44, 1992.

8) 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.

9) S. K. Oh, "High Temperature Creep Life Prediction of Friction Welded Joints by Initial Strain Method and the AE Evaluation," Journal of KSOE, Vol.11, No.4, pp.40-48, 1997.

10) 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)," Journal of KSME, Vol.17, No.3, pp.512-519, 1993.

11) N. Y. Chung and C. H. Park, "Analysis of Residual Stress Singularities on Interfaces of Friction welded SUH35/SUH3," Transactions



- of KSAE, Vol.13, No.5, pp.104-111, 2005.
- 12) D. B. Bogy, "The Plane Solution for Joined Dissimilar Elastic Semistrips under Tensions," J. Appl. Mech, Vol.42, pp.93-98, 1975.
- 13) J. Dunders, "Discussion of Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading," J. Appl. Mech, Vol.36, pp.650-652, 1969.