

## 이종 마찰용접재의 파괴기준 설정

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

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

### Establishment of Fracture Criterion on Friction Welded Dissimilar Materials

Nam Yong Chung<sup>1)</sup> · Cheol 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 Gwangmyung 4-dong, Gwangmyung-si, Gyeonggi 135-080, Korea

(Received 27 February 2006 / Accepted 18 April 2006)

**Abstract** : Application of friction welding is increasing in the manufacturing process of machine elements in many industry fields. To establish a reasonable strength evaluation method and fracture criterion, it is necessary to analyze stress singularity under the residual stress condition on friction welded interface between dissimilar materials. In this paper, a method to establish fracture criterion on interface of friction welded dissimilar materials was investigated by using the boundary element method BEM and static tensile testing. A quantitative fracture criterion for friction welded dissimilar materials is suggested by using stress singularity factor,  $I$ .

**Key words** : Friction welding(마찰용접), Fracture criterion(파괴기준), Residual stress(잔류응력), Boundary element method(경계요소법), Stress singularity factor(응력특이성계수), Dissimilar materials(이종재료)

### 1. 서 론

마찰용접은 용접할 물체의 접합면에 압력을 가한 상태로 상대적인 회전을 시켜 발생된 열에 의해 접합면이 적당한 고온에 도달 하였을 때 상대 회전속도가 0인 상태에서 가압력을 증가하여 압접시키는 고상 용접법<sup>1)</sup> 중의 하나이다. 높은 에너지의 효율성, 공정의 간편성, 자동화의 용이성 및 경제성 등의 우수한 용접특성이 있으며 항공기, 선박, 자동차의 부품 및 건설장비, 각종 산업기계 부품 등의 특정부위는 다양한 기계적 성질과 고강도가 요구되므로 이종재료의 마찰용접은 비원형재료의 용접이 가능한 교반용접<sup>2)</sup>으로까지 널리 이용되고 있다. 최근에

는 마찰용접 시스템 개발<sup>3)</sup>과 기존의 용접방법을 마찰용접법으로의 전환, 생산제품의 효율적인 품질관리 등을 통하여 우수한 용접특성을 극대화하고 있다.<sup>4)</sup> 이종재 마찰용접은 서로 다른 재료특성과 물성치 차이, 용접시 온도영향에 따른 잔류응력 등에 의해 접합계면단에는 응력 특이성이 발생<sup>5)</sup>하고 마찰용접 시 접합계면 주위에 형성되는 덧살(flash)로 인해 특정부위에 강도변화가 일어난다. 응력이 집중적으로 분포되는 계면단 응력특이점<sup>6)</sup>은 현저한 강도저하를 일으키거나 균열이 시작되는 파괴의 기점이 되므로 접합 계면단의 응력특이성을 고려한 접합강도의 평가<sup>7)</sup>는 유효한 것으로 알려져 있다. 이종 마찰용접일 때 파괴하중에 의한 성질,<sup>8)</sup> 마찰열,<sup>9)</sup> 고온크리프 수명예측<sup>10)</sup> 등의 연구가 있으나 이종접합

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

재료의 파괴역학적 파라미터인 응력특이성계수에 의한 정량적인 강도평가 방법은 제시되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 이종마찰용접이 가능한 재료들의 접합계면에 잔류응력과 외부하중이 작용하는 경우의 강도평가방법과 파괴기준 설정을 제안하기 위한 연구로서 STS 304/ SM 45C, STS 304/ SCM 440, SCM 440/SM 45C, SUH 35/SUH 3 마찰용접시험편을 제작하고 경계요소법(Boundary Element Method : BEM) 에 의한 마찰용접 계면의 응력특이성의 해석결과<sup>(1))</sup>와 시험편의 인장실험 결과를 토대로 접합 계면에 대한 정량적인 파괴기준의 설정방법을 제시하고자한다.

## 2. 시험편 제작

### 2.1 시험편의 재료와 형상

본 실험에 사용된 이종재 마찰용접 시험편의 재료는 내열재로서 주로 많이 사용되는 열간 압연재인 STS 304, 기계구조용 탄소강 SM 45C, 크롬 몰리브덴 강재 SCM 440, 내식성, 내산화성, 고온 강도가 높은 오스테나이트계의 내열강으로써 자동차 엔진의 배기 밸브용 재료로 널리 사용 되는 Ni-Cr계 내열강봉 SUH 35와 내마모성이 우수한 마텐사이트계 내열강봉인 Si-Cr계 SUH 3이다. 이 재료들을 마찰용접에 의해 4가지 시리즈로 시험편을 제작하였으며, Table 1은 각 재료들의 기계적 성질을 나타내었다. Fig. 1(a)는 마찰용접후 덧살이 제거되지 않은 시험편이며, Fig. 1(b)는 덧살이 제거된 형상으로 시험편의 치수를 나타낸다. 용접을 하기전 시험편가공은 직경 12 mm의 모재를 인장시험이 용이하도록 지름 8 mm로 축소시켜 평행 가공한 후 실재로 자동차 엔진밸브의 대량 생산용 마찰용접기로 쓰이는 브레이크형 FF80-II-C Type을 사용하여 용접 하였다. 용접 시 고정축의 척에는 탄성계수가 큰 재료의 지름 12 mm 끝단을 고정하였고, 회전축의 척에는 강도가 작은 재료를 회전시켜 엷셋 압력을 가하여 마찰용접을 하였다. 각각의 용접시험편 시리즈에서는 소성유동의 영향과 극성효과로 탄성계수가 작은 재료가 탄성계수가 큰 재료보다 덧살이 더욱 크게 생성되었다.

Table 1 Mechanical properties of materials

| Mechanical properties<br>Materials | Young's modulus<br>$E$ (GPa) | Poisson's ratio<br>$\nu$ | Coefficient of thermal expansion<br>( $m/m \cdot ^\circ K$ ) | Welding specimen series |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------|--|-------------------------|
| STS 304                            | 193                          | 0.3                      | $7.5 \times 10^{-6}$   | STS 304/ SM 45C         |
| SM 45C                             | 205                          | 0.3                      | $12 \times 10^{-6}$  |                         |
| SCM 440                            | 203                          | 0.3                      | $14.2 \times 10^{-6}$  | STS 304/ SCM 440        |
| SUH 35                             | 215                          | 0.3                      | $16.7 \times 10^{-6}$  | SCM 440/ SM 45C         |
| SUH 3                              | 196                          | 0.3                      | $17.5 \times 10^{-6}$  | SUH 35/ SUH 3           |

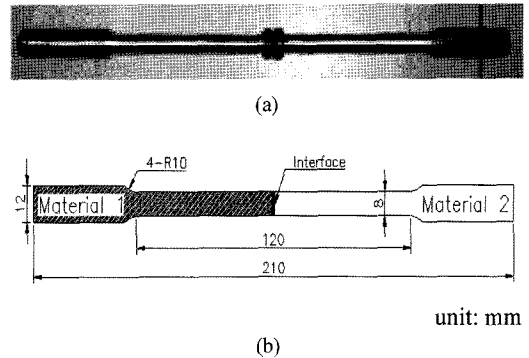


Fig. 1 Shape and dimension of friction welded specimen

용접시리즈마다 덧살이 있는 경우 3개씩과 대부분의 용접제품들은 용도별로 실제 사용될 경우 표면 처리를 위해 덧살이 제거되는 점을 감안하여 덧살이 없는 경우도 각각 3개씩을 제작하였다. 덧살이 없는 경우도 각각 3개씩을 제작하였다. 덧살이 없는 경우도 각각 3개씩을 제작하였다. 덧살이 없는 경우도 각각 3개씩을 제작하였다. 덧살이 없는 경우도 각각 3개씩을 제작하였다.

덧살이 제거되면서 가공된 시험편 표면의 거칠기를 제거하기 위해 #600~#1200번까지 사포(sand paper)를 사용하여 표면가공(polishing) 하였다. Fig. 2는 재료 불침치의 차에 따라 덧살의 형상이 다르게 생성되는 것을 확인하기 위해 용접시험편 시리즈 SCM 440/SM 45C, SUH 35/SUH 3의 덧살 형상을 확대하여 나타낸 그림이다. Fig. 2(a), (c)는 덧살이 있는 경우로서 탄성계수의 비가 1에 가까운 SCM 440/SM 45C는 덧살의 크기가 양쪽모두 비슷한 반면, 탄성계수의 차가 더욱 큰 SUH 35/SUH 3의 경우 양쪽 재료의 덧살 형상이 차이가 나는 것을 알 수 있

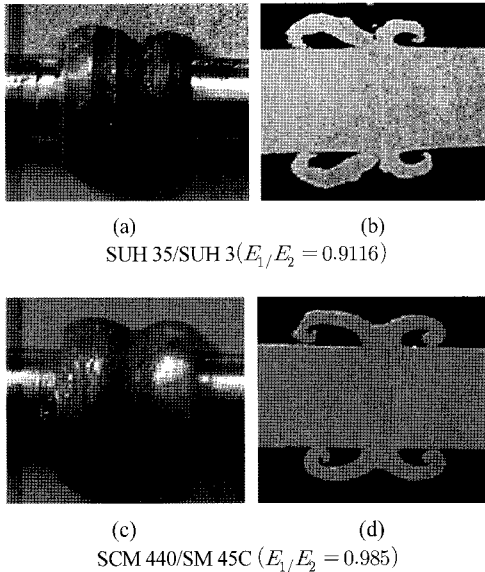


Fig. 2 Shapes of flash for SUH 35/SUH 3 and SCM 440/SM 45C

다. 탄성계수가 작은 SUH 3쪽이 탄성계수가 큰 SUH 35보다 덧살은 더욱 크게 생성되었다. Fig. 2 (b), (d)는 덧살크기의 비교와 덧살의 치수 측정이가 가능하도록 와이어 컷팅으로 시험편을 측 방향으로 절단한 단면이다.

### 2.2 시험편의 BEM응력해석과 응력특이성

마찰 용접시 발생한 접합계면의 발생열로 인하여 용접후에도 접합계면에는 잔류응력이 남게 되고, 외부하중이 작용할 때 이들이 중첩되어 응력특이성의 증가를 가져온다. 용접시험편 시리즈마다 잔류응력과 외부하중이 각각 작용하는 경우의 해석 모델을 설정하여 접합계면에 대한 BEM응력해석<sup>11)</sup>을 한 후 계면에서의 응력값을 수직응력과 전단응력으로 분리하여 중첩한다. 다음으로 수직응력과 전단

응력값을  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(r^{-\lambda})$  식에 적용하여 대수그래프에 도시한 후 그래프의 기울기를 구하면, 그 값이 분리 응력특이성 지수  $\lambda_1, \lambda_2$ 가 된다. 분리 응력특이성 지수  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 식 (2)에 대입하여 분리 응력특이성계수  $\Gamma_1, \Gamma_2$ 를 외삽법으로 구한 후  $\Gamma$ 를 계산한다. 응력특이성지수의 값은 BEM해석에 의한 결과와 응력특성방정식<sup>12)</sup>에 의한 결과를 비교 검토하여 정밀도를 검증하였다.<sup>5)</sup>

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

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

$$\Gamma_2 = \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^{\lambda_2} \tag{2}$$

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

Table 2는 각 용접시험편에 대해 외부하중 100 N과 온도차에 의한 잔류응력을 중첩하여 응력특이성 지수와 응력특이성계수를 구한 결과를 나타 낸 것이다. 마찰 용접되어 실용화 될 때 표면처리 되는 점을 고려하여 본 연구에서는 덧살이 없는 시험편의 경우 응력특이성계수  $\Gamma$ 를 계산하였다.

### 3. 실험방법

인장시험기는 용량 245 kN의 전기모터식 만능시험기(Shimadzu AG-25TG)를 사용하였으며 신장계(extensometer)는 측정범위가 2.5 mm ~ 25 mm인 SG50-50 모델을 부착하였다. 인장시험 조건은 인장속도를 2 mm/min으로하여 STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440, SUH 35/SUH 3, SCM 440/SM 45C의 순서로 덧살이 있는 경우와 없는 경우로 3회씩 인장 실험을 하였으며, 하중-변위 선도를 기록하여 비교 하였다.

Table 2 Stress singularity index and factor for friction welded specimen series

| Welding specimen series | Load (N) | Temp. (°C) | Stress singularity parameter |             |            |            |           |                |
|-------------------------|----------|------------|------------------------------|-------------|------------|------------|-----------|----------------|
|                         |          |            | $\lambda_1$                  | $\lambda_2$ | $\Gamma_1$ | $\Gamma_2$ | $\lambda$ | $\Gamma_{BEM}$ |
| SUH 35 / SUH 3          | 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        |
| STS 304 / SM 45C        | 100      | 700        | 0.000304                     | 0.0469      | 99.9201    | 0.02       | 0.046     | 99.92          |
| STS 304 / SCM 440       | 100      | 700        | 0.000304                     | 0.0473      | 99.92      | 0.02       | 0.0473    | 99.9           |

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 시험편의 파단면

각 용접시험편의 경우에 대하여 덧살이 있는 경우와 없는 경우를 인장 실험한 결과 Table 3과 같은 파단위치의 결과를 얻었다.

인장시험에서 재료 물성치의 차가 1에 가장 가까운 SCM 440/SM 45C 용접시험편 시리즈의 경우는 덧살이 있는 경우와 없는 경우 모두 용접계면 이외의 모재(substrate)부분이 파단 되었다. 재료 물성치의 차가 1보다 약간 차이가 있는 SUH 35/SUH 3 용접시험편의 경우는 덧살이 있는 경우에만 모재부분에서 파단되었다. 이들보다 재료물성치의 차가 큰 STS 304/SM 45C 와 STS 304/SCM 440 시리즈는 덧살이 있는 경우와 없는 경우 모두 용접 계면에서 파단되었다. 모재가 파단된 SUH 35/SUH 3 시리즈는 두 재료의 모재중 탄성계수가 큰 모재(SUH 35)측의 단면이 파단되는 결과를 나타내었다. 이는 탄성계수가 작은 재료의 경우 Fig. 2와 같이 마찰 용접시 덧살의 형상이 크게 생성되는데, 형상이 큰 덧살이 용접부 접합계면 둘레에 안착하여 강도의 보완과 함께 응력특이성을 완화시켜줌으로서 덧살이 작게 생성된 탄성계수가 큰 모재보다 강도가 크게 개선된 것으로 볼 수 있다. Fig. 3(a)는 SUH 35/SUH 3 시리즈에서 덧살이 있는 경우 탄성계수가 큰 모재(SUH 35)가 파단된 것을 나타내며, Fig. 3(b)는 STS 304/SM 45C 시리즈의 덧살이 있는 경우 용접계면의 파단 모습을 보여준다.

본 연구에서는 용접 계면의 파단특성도 함께 연구하고자 SUH 35/SUH 3 시리즈로부터 탄성계수가 큰 SUH 35 모재의 계면 이외의 단면에 대한 BEM 응력해석을 실시하였다.



(a) SUH 35/SUH 3



(b) STS 304/SM 45C

Fig. 3 Fractured shapes for specimen series of SUH 35/ SUH 3 and STS 304/SM 45C with flash

### 4.2 모재의 파단강도

모재가 파단되는 경우는 균질재이면서 접합계면도 아니므로 강도평가는 일반적인 균질재 모재의 강도를 고려한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 해석모델을 이용하여 BEM 응력해석을 행한 후 응력거동과 함께 수직응력의 최대 값이 발생하는 단면의 위치를 파악하였다. Fig. 4는 BEM 응력해석 모델이며 응력해석 면은 인장시험시 파단되었던 SUH 35 모재측에 설정하였고, 접합계면으로부터

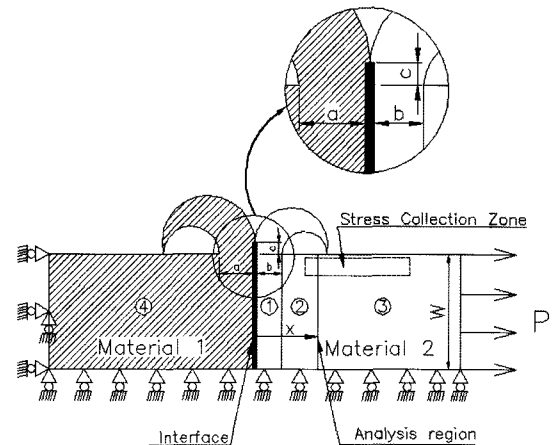


Fig. 4 Model of BEM analysis for substrate on friction welded SUH 35/ SUH3 specimen

Table 3 Comparison of fracture strength for friction welded specimen series

| Welding specimen series | $E_1 / E_2$ | $\alpha_1 / \alpha_2$ | Fracture results |         |               |         |
|-------------------------|-------------|-----------------------|------------------|---------|---------------|---------|
|                         |             |                       | With flash       |         | Without flash |         |
|                         |             |                       | Interface        | Outside | Interface     | Outside |
| SUH 35 / SUH 3          | 0.9116      | 0.954                 |                  | •       | •             |         |
| STS 304 / SM 45C        | 0.941       | 0.625                 | •                |         | •             |         |
| STS 304 / SCM 440       | 0.951       | 0.528                 | •                |         | •             |         |
| SCM 440 / SM 45C        | 0.985       | 1.18                  |                  | •       |               | •       |

응력 해석면까지 임의의 거리  $x$ 를 3~15 mm까지 1 mm씩 이동 시켜가면서 응력해석을 하였다. 덧살의 형상 및 치수는 모재가 파단된 시험편을 와이어 컷팅으로 측방향으로 절단 한 후 치수를 측정하여 Fig. 4의 덧살치수  $a=1.2$  mm,  $b=2.4$  mm,  $c=1$  mm를 실제로 대입하여 계산하였다. 영역수는 4개로 설정하여 ①, ④ 영역은 고정이며 ②, ③영역은 해석면의 이동에 따라 영역의 크기를 서로 변화 시켰다. 해석을 간단히 하기위해 대칭성을 고려하여 구속조건을 설정하였다. 해석모델의 전체 요소수는 189개이며 Kelvin의 기본해를 이용한 2차원 BEM 탄성해석 프로그램을 사용하였다.

응력해석을 한 후 Fig. 4와 같이 응력수집구역(stress collection zone) 내 응력의 결과 값을 선택하여 임의의  $x$ 값의 변화에 대한 수직응력 값을 그래프로 작성하였다. Fig. 5는  $x$ 의 변화에 따른 수직응력의 변화를 나타낸 것인데, 용접계면으로부터  $x$ 값이 약 10 mm 근방에서 응력값은 최대를 나타낸다. 응력해석의 결과는 재료 물성치의 차가 작을때 덧살이 존재하는 경우 응력특이성의 완화로 용접계면은 파단되지 않고 계면 이외의 모재부가 파단된 실험결과와 잘 일치한다.

Fig. 6은 SUH 35/SUH 3 시리즈의 경우 덧살이 있는 경우 인장실험에서 SUH 3보다 탄성계수가 큰 SUH 35 모재가 파단되었을 때의 응력-변형률선도이다. Table 4는 덧살로 인한 양측 모재의 강도 개선율을 계산하여 비교 한 것이다. SUH 35는 순수 재료

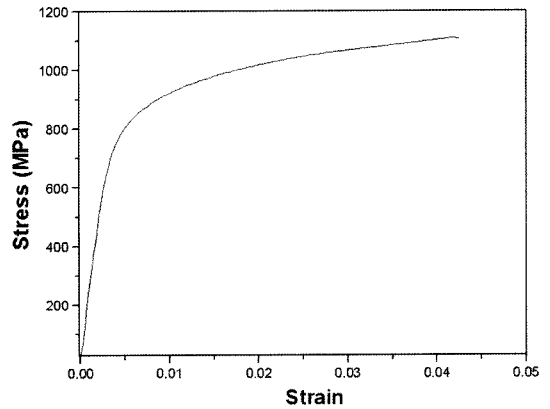


Fig. 6 Stress-strain diagram of SUH 35 substrate

Table 4 Comparison of tensile strength for SUH 35 and SUH 3 materials

| Properties | Tensile strength [MPa] |            | Increasing rate of strength | Results  |
|------------|------------------------|------------|-----------------------------|----------|
|            | without flash          | with flash |                             |          |
| SUH 3      | 941                    | 1106       | 17.5%                       | Safety   |
| SUH 35     | 1082                   | 1106       | 2.2%                        | Fracture |

일 때 인장강도 1082 MPa 이지만, 덧살이 있는 경우 인장강도는 1106 MPa 로 증가 되었다. 순수 단일 재료일 때 보다 덧살이 있는 경우 인장강도가 2.2% 증가한 반면 파단 되지 않은 SUH 3의 경우는 17.5% 이상의 강도 개선효과를 나타내었다.

### 4.3 용접계면의 파단강도

#### 4.3.1 덧살의 영향을 고려한 경우

SCM 440/SM 45C, SUH 35/SUH 3 보다 재료 물성치의 차가 큰 STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440 시리즈는 덧살이 있는 경우에도 용접계면에서 파단이 일어났다. Fig. 7과 Fig. 8은 덧살이 있는 경우와 없는 경우 STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440 시리즈 각각에 대한 하중-변위 선도를 나타낸다. 실험결과 STS 304/SM 45C의 파단하중은 덧살이 있는 경우 31.4 kN, 덧살이 없는 경우 29.6 kN이고, STS 304/SCM 440은 덧살이 있는 경우 33.9 kN, 덧살이 없는 경우 29.0 kN을 나타낸다. 파단하중의 경우 덧살이 있는 경우가 덧살이 없는 경우보다 증가하며, 변위도 덧살이 있는 경우가 덧살이 없는 경우보다 더욱 증가한다.

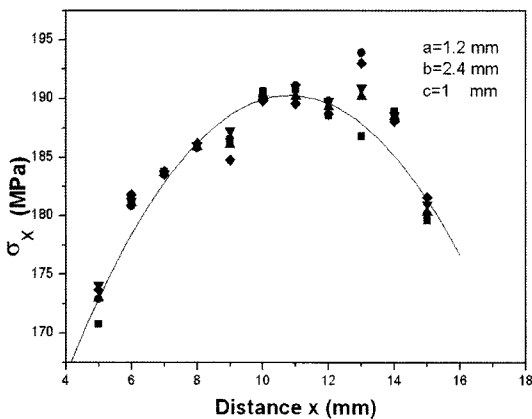


Fig. 5 Normal stress distribution in stress collection zone of SUH 35 substrate

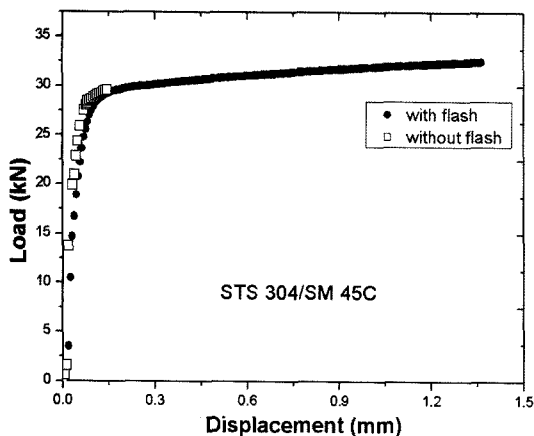


Fig. 7 P-δ diagram on an interface of STS 304/SM 45C

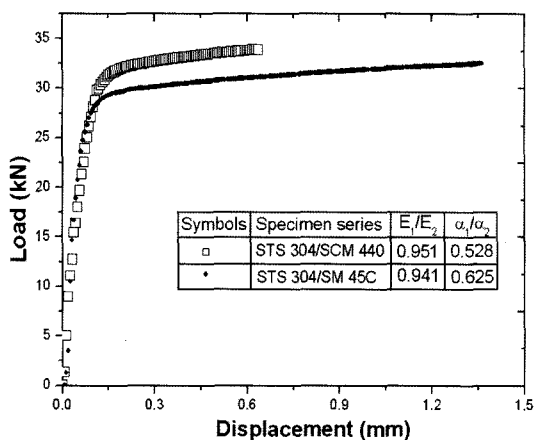


Fig. 9 P-δ diagram at interface of STS 304/SM 45C and STS 304/SCM 440

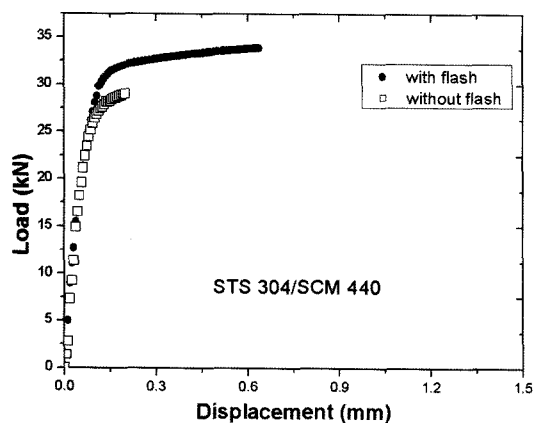


Fig. 8 P-δ diagram on an interface of friction welded STS 304/SCM 440

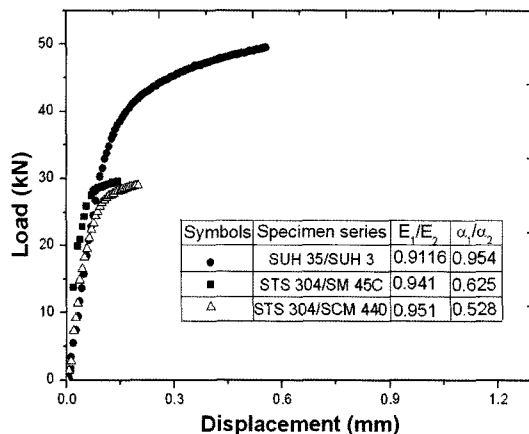


Fig. 10 P-δ diagram at interface of friction welded specimen series

### 4.3.2 재료 물성치의 영향을 고려한 경우

Fig. 9는 덧살이 있는 경우 STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440 시리즈에 대한 하중-변위 선도를 비교한 것이다. STS 304/SM 45C와 STS 304/SCM 440의 재료 물성치의 비  $E_1/E_2$ ,  $\alpha_1/\alpha_2$ 에 대한 차이가 크지 않으므로, 최대 파단하중 값은 거의 동일함을 보여 준다. Fig. 10은 덧살이 없는 용접시험편시리즈를 인장하였을 때 각각의 파단하중을 하중-변위 선도로 나타낸 것이다. 재료 물성치의 비  $E_1/E_2$ ,  $\alpha_1/\alpha_2$ 가 모두 1에 가까운 조합인 SUH 35/SUH 3 시리즈의 경우 파단하중은 49.8 kN 으로 가장 크게 나타난다. 재료 물성치의 비에 대한 범위가 서로 비슷한 STS 304/SM 45C와 STS 304/SCM 440 시리즈는 파단하중의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

재료 물성치의 차가 큰 재료들의 조합일수록 응력특이성은 증가하므로 접합계면의 파단강도는 감소하고, 재료 물성치의 차가 작은 재료들의 조합일수록 응력특이성의 완화로 파단하중은 오히려 증가하는 것을 나타내고 있다.

## 5. 용접 접합계면에 대한 강도 평가법의 제안

응력특이성에 의해 접합면이 파단되는 경우 응력특이성계수에 의한 정량적인 파괴기준의 설정이 가능하다.<sup>7)</sup> Fig. 10의 덧살이 없는 경우 SUH 35/SUH 3, STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440 시리즈의 접합계면 파단하중 값을 식 (3)에 대입하면 파단강도

$\sigma_{max}$  이 결정된다.

$$\sigma = 4P/\pi d^2 \quad (3)$$

식 (3)에서  $\sigma$ : 과단강도(MPa),  $P$ : 과단하중(N),  $d$ : 시험편의 지름(mm) 이다.

식 (3)에서 구한  $\sigma_{max}$  값은 시험편의 형상, 치수 및 부하조건에 의존하므로 각각의 용접시험편 시리즈에 대해 접합면의 파괴를 지배하는 정량적인 파괴인자인 응력특이성 계수  $\Gamma$ 를 사용하는 것이 유효하다. BEM 해석시 작용시킨 외부하중에 의한 응력 ( $\sigma_{BEM}$ ) 과 이때의 응력해석 결과를 식 (1)에 대입하여 응력특이성계수 ( $\Gamma_{BEM}$ )을 구한다. 또한, 임계응력특이성계수  $\Gamma_{cr}$ 과 이들 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\Gamma_{cr} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{BEM}} \Gamma_{BEM} \quad (4)$$

본 연구에서는 이미 BEM응력해석 결과로부터 얻은 Table 2의  $\Gamma_{BEM}$  결과를 식 (4)에 대입하여 SUH 35/SUH 3, STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440에 대한 임계응력특이성계수  $\Gamma_{cr}$ 을 계산하였다.

또한, SUH 35/SUH3, STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440 용접시험편시리즈 이외의 이종마찰용접이 가능한 경우 임의의 하중이 실제로 가해 질 때 실제하중에 의한 응력특이성계수  $\Gamma$ 와 과단하중에 의한  $\Gamma_{cr}$ 을 계산하면, 다음과 같은 식에 의해 파괴조건을 결정하는 것이 가능하다.

$$\Gamma \geq \Gamma_{cr} \quad (5)$$

식 (5)에서 용접 접합계면이 파괴되지 않고 안정 되려면, 응력특이성지수  $Re \lambda$ 에 대한 임의의  $\Gamma$  값이  $\Gamma_{cr}$  값보다 작아야 하며,  $\Gamma$  값이  $\Gamma_{cr}$  보다 크면 접합면은 파괴된다. Fig. 11은 임계응력특이성계수  $\Gamma_{cr}$ 과 응력특이성지수  $\lambda$ 의 관계를 그래프로 작성하여 강도평가를 위한 파괴 기준선을 예측한 것이다. 결국, Fig. 11의 파괴기준선의 설정 선에서 실제작용하중으로 구한  $\Gamma$  값이 파괴기준선의 아래에 있으면 안정되고 기준선 위에 위치하면 파괴된다. 이와 같은 파괴 기준을 이용하여 이종재 마찰용접 접합계면의 강도 평가 및 파괴강도의 예측이 가능하다.

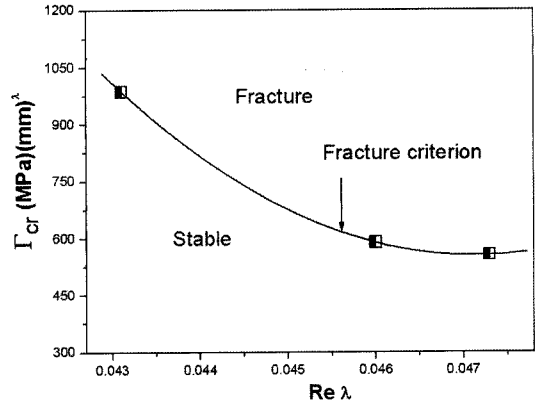


Fig. 11 Fracture criterion on interface of friction welded specimen series

## 6. 결론

마찰용접에 의한 SUH 35/SUH 3, STS 304/SM 45C, STS 304/SCM 440, SCM 440/SM 45C 용접시험편시리즈의 인장실험에 대한 강도평가 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) BEM응력해석에 의한  $\Gamma_{BEM}$ 과 실험에서 구한 과단강도를 이용한 마찰용접 접합계면의 강도평가방법과 파괴기준의 설정방법을 제안하였다.
- 2) 마찰 용접시 접합계면 주위와 모재표면에 형성되는 덧살의 크기 변화는 재료 물성치의 차에 크게 의존하고, 덧살치수의 크기에 따라 모재의 강도는 큰 영향을 받으며, 탄성계수가 작은 모재쪽이 탄성계수가 큰 모재쪽보다 강도의 증가율이 더욱 크다.
- 3) 물성치 비가 1에 가깝고 덧살이 있는 경우 용접계면이 아닌 모재에서 과단 될 확률이 크며, 이때 BEM응력해석에 의한 모재부분의 응력거동 해석방법을 제시 하였다.
- 4) 본 연구에서 적용한 이종 마찰용접재 이외의 다양한 이종 마찰용접재의 경우에도 접합계면에 대한 정량적인 강도평가와 파괴기준의 예측도 가능할것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

### References

- 1) T. Okita, "An Overview and Recent Advances in the Solid-state Welding of Aluminum Alloys," 輕金屬溶接, Vol.40, No.1, pp.5-18, 2002.
- 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) D. Suigeng, Y. Junhui and F. Li, "Application of a Closed-Loop Control System to Friction Welding," Mechanical Science and Technology, Vol.23, No.3, pp.300-302, 2004.
- 4) M., Sahin, "Simulation of Friction Welding Using a Developed Computer Program," Journal of Materials Processing Technology, 153-154, pp.1011-1018, 2004.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) S. Y. Lee and B. S. Yun, "Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C," Journal of KSMTE, Vol.10, No.1, pp.65-70, 2001.
- 10) S. K. Oh, M. H. Yoon, S. U. Jeong and J. H. Oh, "Optimization of Heat Resisting Steels Friction Welding and Its Real Tim 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," Journal of Appl. Mech., Vol.42, pp.93-98, 1975.