

## Fin-Tube 이종재의 고주파 압접 접합계면 및 계면균열 응력해석 The Analysis of Stress Behavior in welded interface and interface crack of High Frequency Pressure welding of Dissimilar materials for Fin-Tube

김도형\*, 이동진 (경희대학교 대학원 기계공학과)  
오환섭 (경희대학교 기계·산업시스템 공학부 교수)

### ABSTRACT

In this study, geometric shape and crack in welded interface of the air cooled heat exchanger Fin-Tube of Dissimilar Materials was analysed. The object of study is to understand the behavior of Stress Intensity Factor for fin length, flash thickness, flash length, symmetric and asymmetric cracks of coming from the manufacturing process. Stress Intensity Factor was analysed by BEM. Kelvin's solution was used as a fundamental solution in BEM analysis and stress extrapolation method was used to determine Stress Intensity Factor.

주요기술용어 : BEM(Boundary Element Method, 경계요소법), Dissimilar Materials(이종재), S.I.F(Stress Intensity Factor, 응력확대계수), Fin-Tube(핀-튜브), Interface crack(계면균열)

### Nomenclature

$H$  : Fin length  
 $h$  : Flash thickness  
 $t$  : Fin thickness  
 $a_1$  : Left crack length  
 $a_2$  : Right crack length  
 $b_1$  : Distance from the centerline of Fin to the left Flash-side  
 $b_2$  : Distance from the centerline of Fin to the right Flash-side  
 $r$  : Distance from the crack-tip to the

extrapolation point

$l_1$  : The left welding length  
 $l_2$  : The right welding length  
 $W$  : The width of Tube  
 $R^2$  : Coefficient of determination  
 $E_1$  : Young's modulus of Tube  
 $E_2$  : Young's modulus of Fin  
 $F_i$  : Dimensionless S.I.F in Dissimilar Materials

### 1. 서론

최근에 제품의 고강도화, 고기능화, 고신뢰성 및 경량화를 목적으로 재료의 성질이 서로 다른 이종재료(Dissimilar Materials)를 접합하여 사용하는 경우가 증가하고 있다. 실제로 사용되고 있는 이종재종에는 접합단부에서의 변형이 심하고 변형율 또는 응력이 집중되어 강도저하의 원인이 될 수 있다.

본 연구의 주체가 되는 고주파용접형 Fin-Tube도 이종재 또는 동종재를 Finning Machine을 이용하여 접합·생산하고 있는데, 접합과정은 strip을 Tube에 감으면서 Roller에 의한 가압과 동시에 접합이 이루어지게 된다. 이 과정에서 소성유동으로 인한 Flash가 발생하고, Fin의 비대칭 및 대칭형상이 생기게 된다. 이에 따라 Pre-crack이 발생하고 Spring back으로 인한 인장력이 생긴다. 특히, 이종재에서는 접합면에서 응력은 불연속으로 되고 외부의 경계와 교차하는 접합면에서 응력집중현상<sup>1)</sup>이 발생하는 특성이 있다.

따라서 접합면에서는 crack의 발생 및 성장이 이루어지므로, 본 연구에서는 파괴역학적 평가를 도입하여 이중재 Fin-Tube의 접합과점에서 생기는 여러 가지 Fin의 형상과 접합상태에 대한 계면의 균열을 해석하고자 한다.

### 2. Fin-Tube 접합부의 기학적특성



Fig. 1 The Symmetric and Asymmetric shape of Fin-Tube

Fin-Tube의 지름방향 단면은 그림 과 같이 Fin 중심에 대해 대칭형상과 비대칭형상, 두 가지로 나눌수 있다. 이는 strip을 Tube에 감으면서 생기는 lateral buckling<sup>2)</sup>으로 생기는 것이다. 또한 Flash의 영향으로 Fin과 Tube의 접합부에서 Pre-crack이 존재함을 관찰할 수 있다. 균열의 발생·성장 역시 Fin과 Tube의 접합부에서 진행됨을 알 수 있다.

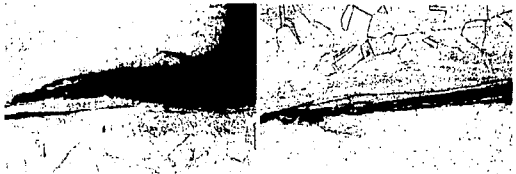


Fig. 2 The interface crack of Fin-Tube

### 3. 수치해석 모델

해석모델은 실측치를 바탕으로 형상변화를 고려하여 최대,최소값의  $\pm 50\%$ 까지의 치수를 해석하였다. 물성치는 일반강을 기준으로 하여 탄성비의 변화( $E_2/E_1 = 0.25, 1, 4$ )를 주어서 이중재와 동종재를 구분하였다.

요소분할은 등분할과 응력집중이 예상되

는 곳은 등비수열로 분할하였으며, 크랙선단을 기준으로 크랙면과 리가먼트면에 특이요소(quarter point element-변위형<sup>3)</sup>)를 각각 배치하였다.

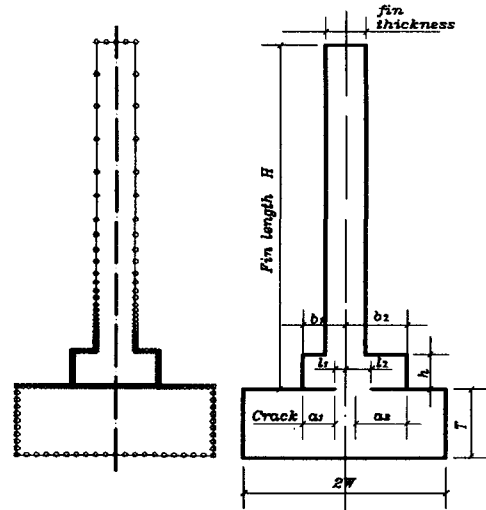


Fig. 3 BEM analysis model

### 3. 접합부의 기하학적 형상에 따른 응력확대계수의 거동

이중재는 동종재와는 달리 crack mode에 따라서 응력확대계수를 분리할 수 없고, 대칭하중을 받더라도 Mixed Mode가 되므로 다음식<sup>4)</sup>에 의해 이중재응력확대계수 ( $K_I$ )를 구한다.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r (\sigma_y^2 + \tau_{xy}^2)} = \sqrt{K_{I1}^2 + K_{I2}^2}$$

#### 3.1 Fin-Length(H) 변화에 따른 응력확대계수의 거동

Fin-Length가 크랙에 미치는 영향을 알아보고자  $H/t$ 를 25~150%사이로 변화시키면서 해석하였다.

해석결과 Fig. 4는 동일한  $E_2/E_1$ 에  $H/t$  변화에 따른  $F_I$ 값의 변화는 0.4% 이내로 영향이 거의 없다고 볼 수 있다. 그러나,  $E_2/E_1$ 의 증가에서는  $F_I$ 값은 증가하는 경향

을 보이고 있다.

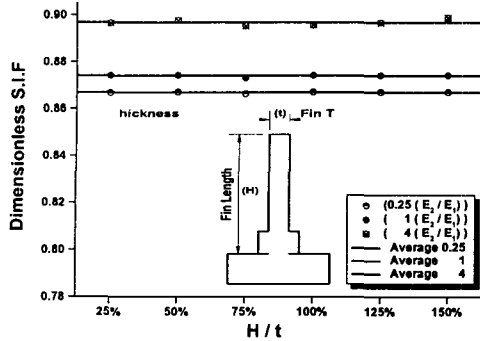


Fig. 4 The effect on crack tip of Fin-Length change under plane strain

### 3.2 Flash-Thickness 변화에 따른 응력확대계수의 거동

Flash Thickness( $h$ )의 변화에 따른 무차원 응력확대계수의 거동을 알아보하고자, Flash Thickness를 Fin 두께 ( $t$ )에 대해 15%씩 증가시켜 ( $a/h = 0.26 \sim 1.6$ ) 해석하였다

해석결과 Fig. 5를 보면  $h/a$ 가 증가할수록  $F_I$ 값은  $b = h$ 인 지점까지 선형적 증가하는 구간과 일정한 구간, 그리고 선형적증가와 일정구간의 중간단계인 천이구간으로 구분할 수 있다.

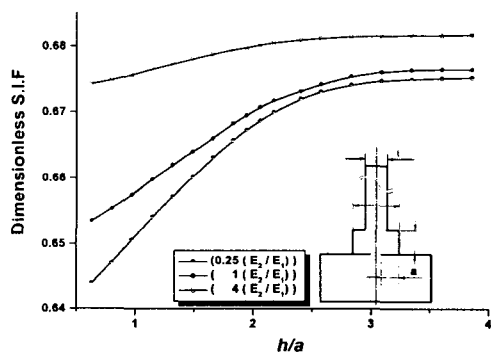


Fig. 5 The effect on crack tip of Flash-Thickness change under plane strain

$E_2/E_1$ 가 4인 경우는 증가폭이 작으나, 0.25인 경우는 증가폭이 매우 커서 천이구간

과 일정구간에서는  $E_2/E_1 = 1$ 인 경우와 유사한  $F_I$ 값을 가진다.

### 3.3 Flash-Size 변화에 따른 응력확대계수의 거동

각각의 Flash size에서 크랙길이  $a$ 의 변화에 따른 무차원 응력확대계수의 영향을 알아보고자, 크랙길이를  $b$ 에 대해 20~80%까지는 20%씩 증가시켰으며 20%이하와 80%이상에서는 10%씩 증감하여  $a/b = 0.1 \sim 0.9$ 까지 해석하였다.

해석결과 Fig. 6, 7, 8를 보면,  $a/b$ 에 대해 무차원 응력확대계수의 회귀함수는 2차함수(결정계수  $R^2 = 0.976 \sim 0.991$ )의 형태를 보임을 알 수 있다. 이 중  $b/t = 1.1 \sim 1.5$ 사이의 무차원 응력확대계수는 전체적인 크랙길이가 증가함에도 불구하고 감소를 보였다.

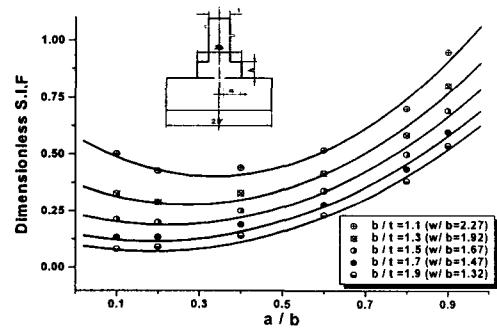


Fig. 6 The analysis of each Flash-Size  $E_2/E_1 = 0.25$

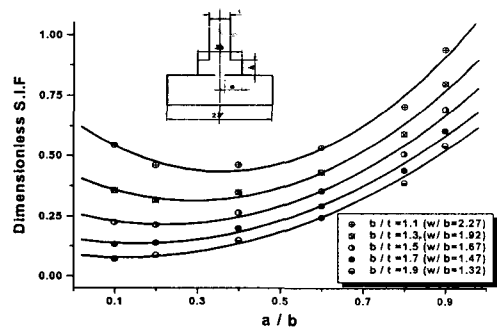


Fig.7 The analysis of each Flash-Size  $E_2/E_1 = 1$

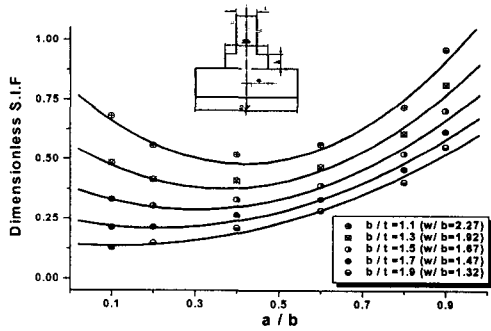


Fig. 8 The analysis of each Flash-Size

$$E_2/E_1 = 4$$

이를 고찰해보면 무차원 응력확대계수는 Fin의 끝단(Tube 폭의 1/5)에만 하중이 작용하는 모델을 무한평판 내 관통크랙에 대한  $K_I$  값으로 나눠줌으로써 구하게 된다. 즉 응력의 삼식

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (-t_y)$$

을 이용하여 구한  $K_I$  값과 무한평판 내 관통크랙에 대한  $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ 의 비로 무차원 응력확대계수를 나타내었는데,  $F_1$ 의 감소구간은  $\sigma_x$ 와  $\tau_{xy}$ 에 의한  $K_I$ 의 증가보다는 무한평판의  $\sqrt{a}$ 에 의한  $K_I$ 의 증가가 크기 때문이다. 즉, 본 모델에서 감소값을 보이는 구간은 크랙의 증가에 대해 둔감하다고 할 수 있다.

$E_2/E_1$ 가 증가할 경우, 크랙의 길이가 작고,  $b/t$ 의 값의 차가 적을수록 무차원응력확대계수의 값은 큰 차이를 보이면서 탄성비의 영향을 많이 받으나, crack의 길이가 증가할수록 그 값의 차이가 작아지면서 오히려 crack의 영향을 많이 받는다.

#### 4. 대칭형상에서의 접합부의 기하학적 형상에 따른 응력확대계수의 거동

Flash의 폭은 실측치의 평균치 ( $b = 1.1t$ )를 기준으로 하여  $b_1 = b_2$ 로 하였다. 이모델은 양측 crack 길이가 달라서 비대칭하중이 되어 Moment가 발생하게 된다.

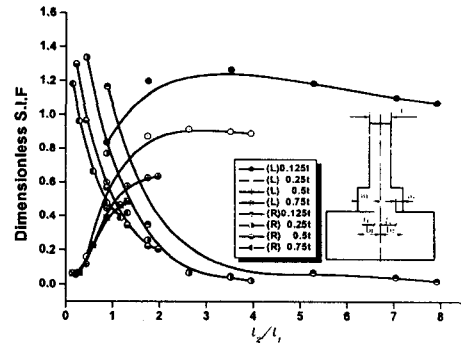


Fig. 9 The Asymmetric crack of symmetric shape

$$E_2/E_1 = 0.25$$

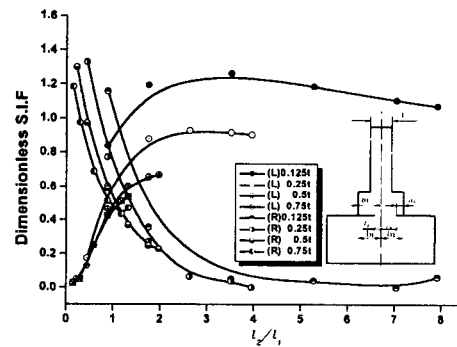


Fig. 10 The Asymmetric crack of symmetric shape

$$E_2/E_1 = 1$$

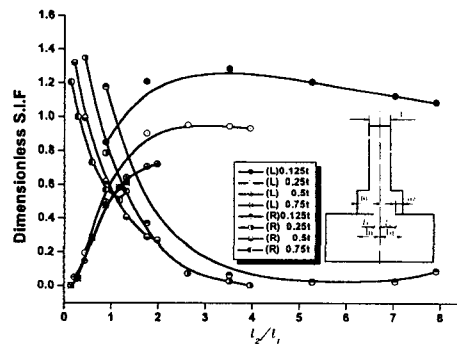


Fig. 11 The Asymmetric crack of symmetric shape

$$E_2/E_1 = 4$$

해석결과(Fig. 9, 10, 11)를 고찰해보면,  $l_1$ 을 고정한 상태에서  $l_2$ 의 증가( $a_2$ 의 감소)에 따라  $l_2/l_1 = 2 \sim 3$ 사이를 기점으로 좌측의  $F_i$ 값은 증가후 감소하는 경향을 보인 반면, 우측의  $F_i$ 값은 감소후 일정한 값을 가진다. 이는 우측 crack 성장에 따른 좌측 crack tip에서의 간섭효과와 Moment의 영향이 감소되기 때문인 것으로 생각된다.

즉,  $a_2$ 값이 증가할수록 Moment는  $l_2/l_1 = 1$ 을 기점으로 시계방향에서 반시계방향으로 변하고, 이에 따라 우측은 opening crack으로 되며, 좌측의 closing crack으로 되어서 위와 같은 결과가 발생하게 된다. 따라서,  $l_2/l_1 = 1$ 을 기준으로  $F_i$ 는 최소가 되며,  $l_2/l_1 = 0 \sim 1$ 사이에서는 반대의 현상이 일어남을 알 수 있다.

$E_2/E_1$ 를 증가할수록  $F_i$ 는 미소한 증가를 보이고, 특히  $l_2/l_1 = 1$ 에서의  $F_i$ 의 값의 증가현상이 보인다.

### 5. 비대칭형상에서의 접합부의 기하학적 형상에 따른 응력확대계수의 거동

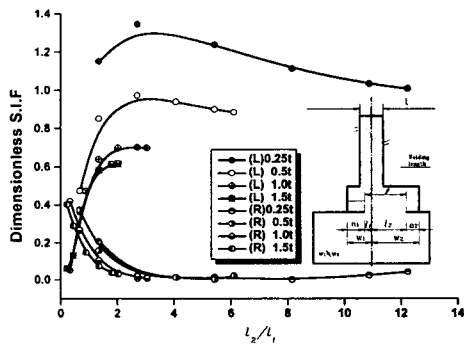


Fig. 12 The Asymmetric crack of asymmetric shape  $E_2/E_1 = 0.25$

해석결과(Fig. 12, 13, 14)를 보면, 같은  $l_2/l_1$ 에서 대칭형상의 해석결과와 비교해보면, 좌측의  $F_i$ 는 매우 증가한 반면 우측은

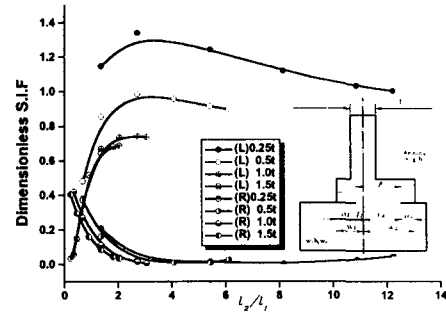


Fig.13 The Asymmetric crack of asymmetric shape  $E_2/E_1 = 1$

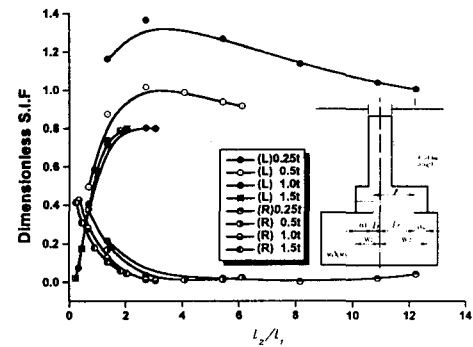


Fig. 14 The Asymmetric crack of asymmetric shape  $E_2/E_1 = 4$

상당히 감소하였고, 무차원응력확대계수값은  $l_2/l_1 = 0.8 \sim 0.9$ 사이에서 최소값을 보이고 Symmetric shape에서보다 더 작은 값을 보이고 있다. 이는 우측 Flash-Size의 증가로 인한 결과임을 알 수 있다.

$E_2/E_1$ 에 따른 결과는 Symmetric shape와 비슷한 결과를 보이고 있다.

### 6. 결론

고주파 용접형 이중재 Fin-Tube의 형상, 접합계면, 계면균열에 따른 특성을 파괴역학적 관점에서 BEM을 통해 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Flash보다 큰 Fin length(H)에 대해 Fin의 끝단에 분포력이 작용하는 경우를 해석한 결

과, Fin length가 크랙선단에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 그러나,  $E_2/E_1$ 의 증가에서는  $F_i$ 값은 증가하는 경향을 보이고 있다.

2) Flash의 형상 즉  $h/a$ 가 증가함에 따라 무차원 응력 확대 계수  $F_i$ 의 거동을  $h/a=2.5$ 를 기준으로 하여  $h/a < 2.5$ 인 영역에서는 민감하게 나타나고  $h/a > 2.5$ 인 영역에서는 매우 둔감하게 나타난다. 그리고  $E_2/E_1$ 의 값이 클수록 ( $E_1/E_2=4$ ) 둔감하고,  $E_2/E_1$ 의 값이 작을수록 ( $E_1/E_2=0.25$ ) 민감하다.

3) Flash size가 변할 때, 같은 Flash thickness에 대해서는 Flash size가 클수록 보다 작은 응력확대계수를 갖으며,  $a/b$ 가 작을 때는  $E_2/E_1$ 가 증가할수록  $F_i$  값이 커지지만  $a/b$ 가 커질수록  $E_2/E_1$ 의 영향이 작아지고 crack의 영향이 지배적으로 되어  $F_i$  값은 거의 일치하게 된다.

4) 동일한 크랙비율에서의 대칭형상과 비대칭형상의 무차원응력확대계수 값을 비교했을 때, 둘다 유사한 양상을 보이지만 비대칭형상에서 좀더 작은 값을 갖는다.

5) Tube의  $E_1$ 과 Fin의  $E_2$  비를 달리하여 동종재와 이종재를 비교·검토한 결과 Crack의 길이가 작은 경우는  $E_2/E_1$ 의 영향을 많이 받게 되어 그 비가 작을수록 무차원응력 확대계수가 작은 경향을 보이거나, Crack의 진전에 따라  $E_2/E_1$ 에 영향을 거의 받지 않게 된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 結城良治, 曹相鳳, "異材界面き裂の應力擴大係數の境界要素解析"
- 2) T.X. Yu, L.C. Zhang, "plastic bending - Theory and Applications", Series on engineering mechanics, Vol. 2., 1996
- 3) Henshell, R.D. and Shaw. K.D., "Crack tip

elements are unnecessary", Int. J. Num. Meth. Eng., 9, 495p, 1975

4) Sih,G.C., Rice,J.R., "The Bending of Plates of dissimilar Materials with Cracks", J. Appl. Mech., 86-447, 1964