

# 세라믹스/금속 接合部の 強度評價에 관한 연구

- 접합부 계면에 존재하는 미소결합의 해석 -

韓國海技研修院 趙相明\*  
韓國海洋大學 金永植  
韓名洙

## 1. 서언

세라믹과 금속의 接合界面에 있어서 서로 다른 기계적 성질때문에 생기는 엣지효과(Edge Effect)를 비롯한 미소결합등은 그 接合體를 사용할 때의 커다란 문제로 되어있다. 이러한 異種材를 接合할 때, 삽입층(Insert Layer)을 넣어서 3重 또는 多重의 異種材接合體로 하여 쓰는 수가 있다. 이 경우는 二重異種材의 接合界面에 있는 균열에 대한 종래의 응력강도계수의 평가방법과 다른 수법을 도입할 필요가 있다.

본 연구에서는 세라믹/삽입층/금속으로 되어있는 3重異種材 接合體에 있어서 세라믹과 삽입층의 接合界面에 있는 미소균열을 대상으로 하여, 중첩의 원리와 彈性異種材FEM을 이용하여, 1) 균열에 대한 응력강도계수의 유일성을 검토하고, 2) 균열의 開口變位를 양측으로 분리하여 응력강도계수를 평가하며, 3) 균열의 응력강도계수에 미치는 삽입층과 접합금속의 영향에 대하여 검토한다.

## 2. 多重異種材 界面균열에 대한 응력강도계수

### 2.1 二重異種材와 多重異種材의 接合界面균열의 차이

2종류의 異種材로 되어있는 二重異種材 接合界面균열에 대하여는 Dundurs Parameter  $\alpha, \beta$  등을 적용하면, 에너지해방률G, 균열선단근방의 變位 또는 응력의 분포등을 써서 응력강도계수K를 구할 수가 있다<sup>1)3)</sup>. 이와 같은 K의 계산방법은 接合面을 경계로 하여 두개의 異種材만으로 되어있는 경우에 한정된다.

接合시에 삽입층을 넣을 때는 Dundurs Parameter는 그대로 적용할 수 없고, 接合되어있는 異種材 전부를 고려할 필요가 있다. 이 때에도 주로 문제로 되는 부분은 세라믹과 삽입층의 接合界面이며, 이 界面균열의 응력강도계수의 정의와 물리적 의미는 아직 명확하지 않는 것으로 보인다.

### 2.2 多重異種材의 接合界面균열 해석을 위한 기본적 개념의 도입

均質材의 Mode I 균열선단근방의 하중방향(y방향) 變位V와  $K_I$ 은 다음과 같은 관계가 있다<sup>4)</sup>.

$$V = \frac{K_I}{\mu} \frac{r}{2\pi} \sin \frac{\theta}{2} \left( \frac{x+1}{2} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \text{-----}(1)$$

윗식(1)에 있어서 균열의 自由面은  $\theta = \pm\pi$ 이고,  $\theta = +\pi$ 에서의 V는 균열의 上部自由面이 균열선단( $r=0$ )에 대하여 변형한 變位를 의미한다. 수치해석으로부터  $K_I$ 을 구하는 경우는 균열이 그 선단에 대하여 상하대칭으로 변형하기 때문에 자유면 全變位の 1/2을 식(1)에 대입하고, 外挿法( $r \rightarrow 0$ )을 써서  $K_I$ 을 산정하는 것이 일반적이다.

한편, 佐藤, 豊田등은 응집이음부에 있어서 동일한 탄성계수의 재료라고 하여도 강도의 차이로 인해서 생기는 균열의 비선형 비대칭변형에 대하여 局部COD(Crack Opening Displacement) 가설을 도입하여 균열의 성장특성을 평가하였다<sup>5)</sup>. 그 중에서 이음부 接合界面균열의 경우, 파괴는 균열의 全開口量중에서 低靱性층의 局部CTOD(Crack Tip Opening Displacement)가 限界CTOD로 될 때에 발생한다고 하는 개념이 있다.

본 연구에서는 이상의 局部COD가설에 있어서 비대칭 변형하는 균열에 대하여 양쪽 자유면으로 나누어서 각각의 開口量을 고려하는 개념을 도입하여, 多重異種材 接合界面균열의 응력강도계수를 평가하기로 한다.

### 2.3 多重異種材 接合界面의 편축균열 해석과 COD分離法의 제안

Fig.1과 같이 탄성변형하는 3重異種材의 界面균열은 비대칭변형한다. 이 界面균열의 응력강도계수를 재료I측의 開口變位V1만에 의하여 구하기 위하여 다음과 같이 3단계로 논리를 전개하여 가기로 한다.

#### 1) 均質材의 균열

Fig.1에 있어서 재료I=재료II=재료III의 관계가 성립한다. 따라서 재료I측과 재료II측의 균열자유면의 開口變位와 응력강도계수K<sub>Ij</sub>는 다음과 같은 관계에 있다.

$$V_j = \frac{(K_I)_j}{\mu_j} \frac{r}{2\pi} \left( \frac{x_j+1}{2} \right); \quad (j=1, 2) \text{ -----(2)}$$

均質材이기 때문에 j=1과 2의 경우는 동일한 V로 되고, 균열은 동일한 응력강도계수K<sub>I</sub>를 가지게 된다. 여기에 중첩의 원리를 적용하여 본다<sup>6)</sup>. 균열이 없는 平滑材가 균열재와 같은 하중조건에 있을 때, 균열相當面에서 생기는 응력을 하중이 없는 균열재의 균열양측 자유면에 等値逆符號의 분포력으로서 작용시킨 경우의 解는 하중이 있는 균열의 K<sub>I</sub>과 같게 된다. 여기서 균열이 유일의 진전력을 갖게 되는 것은 평활재에 있어서 균열의 兩自由面에 상당하는 면에서 응력의 解는 唯一性을 갖기 때문이다. 이와 같이 중첩의 원리를 적용하여 얻어지는 K<sub>I</sub>은 균열상당면에서 작용하는 응력분포와 균열재의 형상만의 함수로 되며, 그 외에 재료의 성질등에는 의존하지 않는 것이 특징이다.

#### 2) COD分離法에 의한 2重異種材 接合體의 界面균열의 해석

Fig.1에 있어서 재료I=재료II=재료III의 관계가 성립한다. 이 때에는 균열이 없는 異種材 接合界面의 엣지에는 양재료의 차이에 의하여 응력이 무한대로 되는 特異性이 생기는 경우가 있지만, 接合界面에서의 응력의 분포는 唯一의 解를 갖게 된다. 여기서도 중첩의 원리를 적용한다. 가령 서로 다른 재료가 接合되어 있어도 균열의 양자유면에 같은 크기의 분포력을 작용시켜서 얻어지는 각각의 응력강도계수는 동일하게 되어 균열의 進展力은 唯一性을 갖는 것으로 된다.

한편, 이와 같은 2重異種材에 있어서 식(2)의 j=1,2로부터 별도로 구한 K<sub>I</sub>의 동일성에 대하여는 다음과 같이 탄성FEM을 이용하여 검토하였다.

Fig.2는 사용한 모델의 전체모양이며, 帶板(폭7.68mm, 길이45.76mm, a=0.2mm일정)으로 하였다. 삼각형요소를 쓰고, 평면응력 조건으로 가정하였으며, 총절점수762, 총요소수1386, 최소요소크기를 0.0025mm로 하였다. 재료I=알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 재료II=구리(Cu), 재료III=알루미나 또는 구리 또는 강(Steel)으로 하였고, 사용한 계산기는 PC386이었다. 또한 여기서는 面內剪斷(Mode II)의 성분에 대하여는 고려하지 않는 것으로 하였다.

Fig.3은 FEM결과로부터 나온 V1과 V2를 이용하여 식(2)로부터 얻은 K<sub>I</sub>\*의 경향을 보인다. 均質材에 대하여 外插法으로 구한 K<sub>I</sub>은 알려진 解와의 오차가 0.3%이하이었다<sup>7)</sup>. 그림에서 외삽(r→0)하기 위하여 직선을 그었으나, 양측의 관계는 r/a=0.05~0.15의 사이에서만 직선관계로 되었기 때문에 그 범위만을 이용하여 K<sub>I</sub>을 구하였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu의 界面균열에 대해서는 ▲이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>측(식(2), j=1)으로부터 얻은 것이고 ▽이 Cu측(식(2), j=2)로부터 얻은 것이다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>측의 경향은 r/a=0.2전후에서 그 기울기가 급격히 변하며, 양측을 외삽하여 얻은 값은 거의 동일한 K<sub>I</sub>으로 되었다. 이와 같은 동일성은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Steel의 界面균열에 있어서도 확인되었다.

이하에서는 이와 같이 균열의 양자유면의 開口變位를 분리하여 각각의 진전력을 구하는 수법을 COD分離法(COD Separating Method)이라고 부르기로 한다. 또한 ●는 참고로 結城 등이 쓴 Composite Parameter(2重異種材)를 고려한 균열의 全開口變位와  $K_I^*$ 의 관계를 이용하여 얻은 결과로서, 본 연구의 COD분리법에 의한  $K_I$ 은 그 값보다 1.7%정도 낮은 값으로 되어,  $K_I$ 의 절대치도 신뢰할 수 있는 범위에 있는 것으로 판단된다.

여기서  $Al_2O_3/Cu$ 의 경우  $K_I$ 이 均質材보다 크게 되는 것은 Fig.4에 보이는 바와 같이 균열이 없는 같은 異種材의 균열상당면에서의 응력분포가 높게 되어있기 때문이라고 할 수 있다.

결국, 여기서는 Fig.1의 재료I측의 균열開口變位와 그 기계적 성질만을 써서 界面균열의 응력강도계수를 구하여도 타당하며, 그 값은 균열이 없는 異種材接合體의 균열상당면에서 생기는 응력분포에 주로 지배된다고 할 수 있다.

### 3) COD分離法에 의한 3重異種材 接合體의 界面균열의 해석

재료I\*재료II\*재료III의 경우로서, Fig.1과 같이 재료I과 재료II의 界面에 균열이 있다고 한다. 이 때는 Fig.4에서 알 수 있듯이 균열이 없는 같은 異種材 接合界面에 있어서 엇지효과는 있지만, 균열상당면에서의 응력분포는 삽입층의 두께와 재료III의 영향을 크게 받는다.

이 모델이 있어서도 전술한 바와 같은 중첩의 원리는 적용할 수 있고, 균열의 양자유면의 開口變位를 분리하여 각각 구한  $K_I$ 은 동일하게 되어야 한다. 그러나, 균열을 중심으로하여 재료I측만이 均質材로 되었기 때문에  $K_I$ 은 식(2)의  $j=1$ 의 경우에 대하여만 계산할 수 있다.

Fig.5는 3重異種材 接合體의 界面균열에 대하여 Fig.3과 같은 방법으로  $K_I$ 을 구한 것으로, 재료II의 삽입층의 두께와 그 背面에 있는 재료III의 영향을 나타낸 것이다. 이 전체의 경향은 균열의 길이에 크게 지배되었지만, 삽입층이 얇을수록  $K_I$ 은 작게 되어, 같은 재료II( $E_1 > E_2$ )일 때라도 재료III의 탄성계수가 재료I보다 작을수록  $K_I$ 은 크게 되는 것을 알 수 있다. 특히 삽입층이 어느 두께이하로 되면 均質材의  $K_I$ 보다 작게 되는 특성을 보이고, 이것은 Fig.4의 균열이 없는 같은 異種材의 응력분포로부터 설명할 수 있다.

Fig.6은 균열의 개구변위를 확대하여 도시함으로써 균열의 개구거동에 미치는 접합재료의 기계적 성질의 영향을 명확히 한 것이다.

이와 같은 COD분리법은 삽입층 그 자체가 2重이상인 多重異種材 接合體의 界面균열에 대해서도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 3. 결론

2重 및 3重異種材 接合體의 界面 미소균열을 대상으로 하여 중첩의 원리를 적용하고, 彈性異種材FEM해석을 행하여 그 응력강도계수를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 중첩의 원리를 적용하면 異種材接合體의 界面균열은 비대칭 변형하더라도 그 응력강도계수는 유일한 값을 가져야 한다고 할 수 있다.
- 2) 異種材 接合體의 편측계면균열에 대하여 兩自由面의 開口變位를 분리하는 COD분리법에 의한 응력강도계수의 평가방법을 제안하였다.
- 3) 2重異種材接合體의 界面균열의 경우 COD分離法에 의하여 각각 구한 응력강도계수가 동일하게 되어 그 유일성을 확인하였다.
- 4) COD分離法을 적용하면, 3重이상의 多重異種材 接合體의 界面균열에 대한 응력강도계수도 계산할 수 있을 것이다.
- 5) 삽입층을 사용하는 3重異種材 接合體에 있어서, 세라믹과 삽입층의 界面엇지에 균열이 있을 때 삽입층이 어느 두께 이하로 되면 그 응력강도계수는 均質材의 값보다 작게 되는 것

을 확인하였다.

<참고 문헌>

- 1) 小林眞人, 異材接合界面の力學, 溶接學會溶接構造研究委員會技術資料N1(平3年), pp4~31
- 2) 須賀唯之, 日本金屬學會會報, 25-5(1986), pp419~423
- 3) 結城良治, 曹相鳳, 日本機械學會論文集(A), 55-510(1989), pp234~347
- 4) 岡村弘之, 線形破壊力學入門(1976), p22
- 5) 佐藤邦彦, 豊田政男, ほか, 溶接學會論文集, 2(1984), p447
- 6) 上記4)のpp40~43
- 7) 上記4)のp217

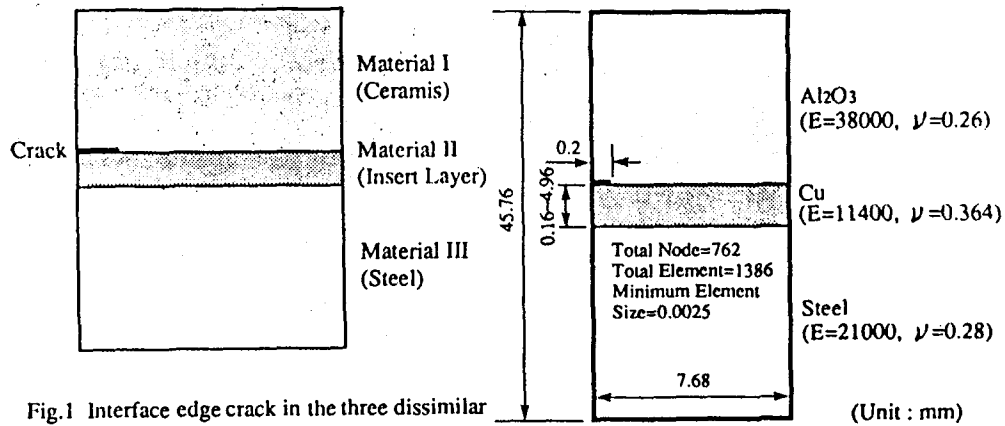


Fig.1 Interface edge crack in the three dissimilar materials

Fig.2 FEM model for three dissimilar materials

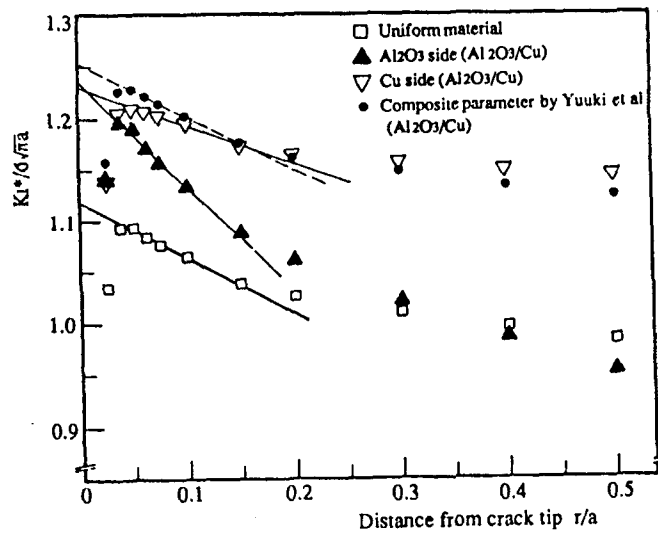


Fig.3 Determination of  $K_I$  for an interface edge crack by COD separating method

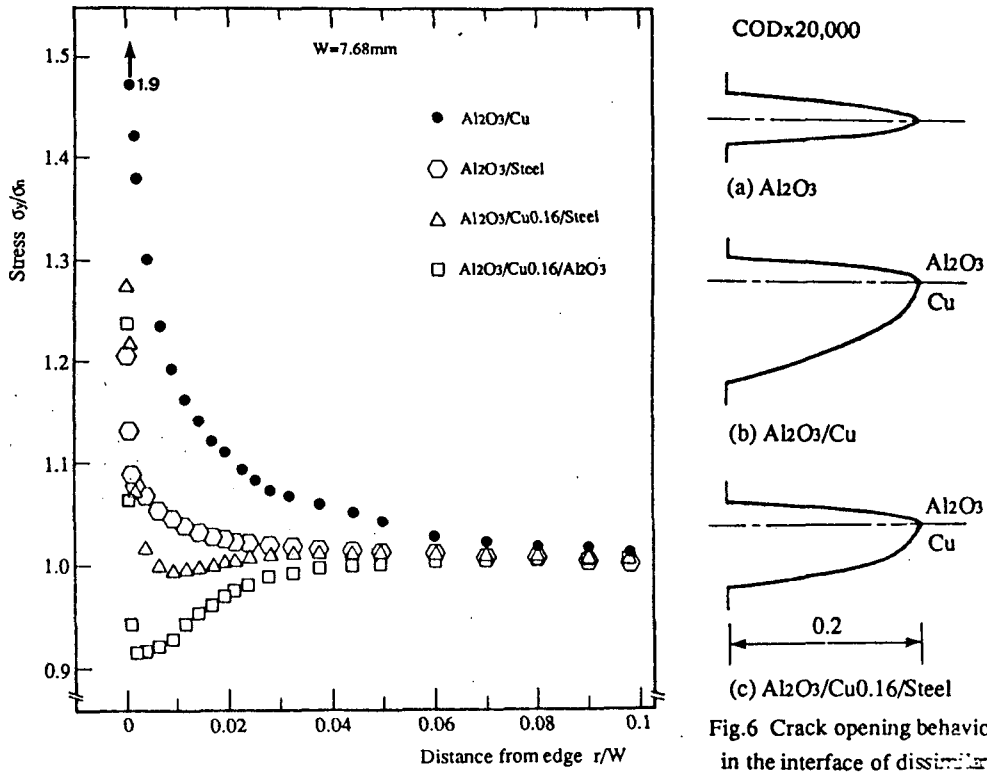


Fig.4 Edge effect in the various dissimilar materials

Fig.6 Crack opening behavior in the interface of dissimilar materials

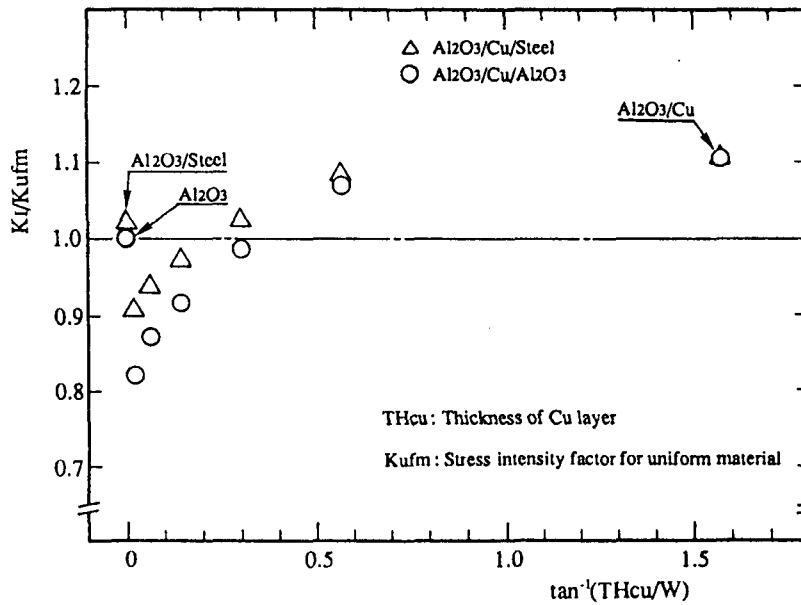


Fig.5  $K_I$  to an interface edge crack in the three dissimilar materials