

# 평면변형률 상태 하에서 유한요소해석을 이용한 균열단합 거동 예측 및 평가

이학주<sup>†</sup>·송지호<sup>\*</sup>·강재윤<sup>\*\*</sup>

## Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure under Plane Strain State

Hak-Joo Lee, Ji-Ho Song and Jae-Youn Kang

**Key Words:** Fatigue Crack Closure(피로균열단합), Elastic-Plastic Finite Element Analysis(탄-소성 유한요소해석), Plane Strain(평면변형률), Stabilization(안정화), Mesh Size(요소크기)

### Abstract

An elastic-plastic finite element analysis of fatigue crack closure is performed for plane strain conditions. The stabilization behavior of crack opening level and the effect of mesh size on the crack opening stress are investigated. In order to obtain a stabilized crack opening level for plane strain conditions, the crack must be advanced through approximately four times the initial monotonic plastic zone. The crack opening load tends to increase with the decrease of mesh size. The mesh size nearly equal to the theoretical plane strain cyclic plastic zone size may provide reasonable numerical results comparable with experimental crack opening data. The crack opening behavior is influenced by the crack growth increment and discontinuous opening behavior is observed. A procedure to predict the most appropriate mesh size for different stress ratio is suggested. Crack opening loads predicted by the FE analysis based on the procedure suggested resulted in good agreement with experimental ones within the error of 5 %. Effect of the distance behind the crack tip on the crack opening load determined by the ASTM compliance offset method based on the load-displacement relation and by the rotational offset method based on the load-differential displacement relation is investigated. Optimal gage location and method to determine the crack opening load is suggested.

### 1. 서 론

탄소성 유한요소해석을 이용한 피로균열단합 연구가 많은 연구자에 의해 이루어져, 연구 현황과 문제점을 간추린 리뷰(review) 논문[1, 2]도 발표되고 있다. 통상적으로 균열단합현상은 3차원 특성을 지닌 경우가 많으므로, 3차원 유한요소해석을 수행하는 것이 바람직하다는 지적이 있으며

[2], 관통균열[3-7] 또는 부분관통균열[8-11]에 대해 3차원 유한요소해석을 한 연구가 어느 정도 발표되고 있다.

그러나 현재까지 3차원 유한요소 균열열림해석 결과는 반드시 실험결과와 잘 일치한다고는 할 수 없으며[7, 11], 만족스러운 수준은 아니다. 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는, 먼저 요소 크기(mesh refinement)의 영향을 비롯한 모델링문제(modeling issues)를 체계적으로 광범위하게 수행할 필요가 있으며, 또한 3차원 유한요소 균열단합 해석은 계산비용의 문제가 있는 등, 그렇게 쉽게 수행할 수 있는 일은 아니다.

한편, 2차원 유한요소 균열열림해석은 모델링에 관하여 비교적 많은 것이 밝혀져[1, 12, 13],

<sup>†</sup> 한국기계연구원 구조연구부

E-mail : hjlee@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7633 FAX : (042)868-7884

<sup>\*</sup> 한국과학기술원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 한국기계연구원 구조연구부

대체적인 방법론 자체는 거의 확립되어 있다고 볼 수 있어[1], 쉽게 사용할 수 있으며, 계산 수행상의 문제도 거의 없어, 현재도 비교적 많이 이용되고 있다. 최근에는 평면변형률 상태에서의 균열단합해석이 주로 수행되고 있다[14-20]. 피로 균열진전은 평면변형률상태에 주로 지배되므로, 평면응력 보다는 평면변형률 균열열립해석이 더욱 중요하다.

평면변형률 균열열립 유한요소해석에 관해서는 McClung 등[21]의 기본 메카니즘에 관한 연구결과를 비롯하여, Ashbaugh 등[16]의 안정화 거동에 관한 결과, Wei와 James[22]의 균열열립점 정의 방법에 관한 검토와 유한요소해석 결과와 측정 결과와의 비교, 최근의 Pommier[17, 20]의 되풀이가공경화의 영향에 관한 결과 등, 유익한 결과들이 발표되고 있다. 그러나 현재도 균열열립점에 미치는 유한요소크기의 상세한 영향을 비롯하여, 유한요소해석 결과와 실제 균열열립 측정 결과와의 비교 등, 명확하지 않은 부분이 많이 남아 있다.

본 연구에서는, 평면변형률 상태의 균열열립응력을 잘 평가할 수 있는 유한요소해석 모델을 제안하기 위하여, 요소크기의 영향, 안정화 거동을 검토하고, 유한요소해석 결과를 이용하여, 실제 사용되는 균열열립점 측정방법의 타당성에 대해서도 검토 한다.

## 2. 유한요소모형 및 비교용 실험데이터

### 2.1 유한요소모형

탄소성 유한요소해석은 상용 유한요소해석프로그램인 ABAQUS[23]를 이용하였으며, 유한요소모형 구성, 경계조건 변경 및 균열열립응력을 결정하는 자체 프로그램을 작성하였다.

해석은 소변형 이론을 적용하였고, 재료의 소성거동은 변형률 속도에 독립적인 소성 증분(incremental rate independent plasticity)과 항복이론(Von Mises)을 사용하여 표현하였다. 응력과 변형률 관계는 바이리니어(bilinear) 모델을, 그리고 비선형 이동경화법칙(nonlinear kinematic hardening rule)을 사용하였다[23].

실제 실험[24]에 사용된 길이 184 mm, 폭 70 mm인 MT 시편의 유한요소모형을 구성하였다. Fig. 1은 741 개의 요소와 789 개의 절점으로 구

성된 유한요소 모형 중 미소요소영역을 확대한 모습의 한 예를 보여준다. 최대하중에 의해서 발생하는 소성역이 미소요소의 내부에 위치하도록 균열선단 부위는 종횡비(aspect ratio) 1인 68 x 9 개의 미소요소로 모형화 하였다.

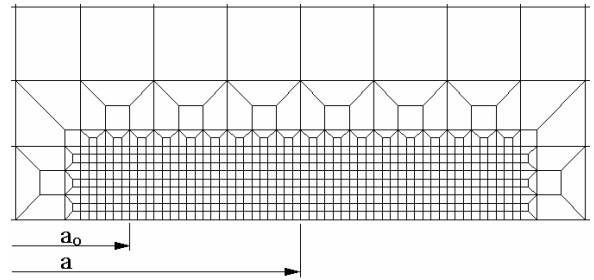


Fig. 1 Typical fine mesh configuration

균열선단에서의 요소 잠김(element locking)[25]을 방지하기 위하여 ABAQUS에서 지원되는 4-절점 bilinear reduced integration 요소(CPE4R)를 사용하였다[23].

균열선단절점 진전 방법과 경계조건 변경에 대해서는 비교적 잘 규명되어 있으며[1], 본 연구에서는 Park 등[26]의 연구 결과를 이용하였다.

소재는 알루미늄합금의 일종인 Al2024-T351이며, 탄성계수는 70 GPa, 포와송비 0.33, 항복강도는 379 MPa 이며, 선형 변형률 경화지수  $H' = d\bar{\sigma}/d\bar{\epsilon}_p = 0.01 E = 700 \text{ MPa}$ 을 이용하였다.

### 2.2 비교용 실험데이터

실제 실험 결과와 가능한 한 잘 부합하는 유한요소해석 결과를 위해, 그리고 유한요소해석 결과의 검증에 위해, Kim과 Song[24]의 실험 연구결과를 비교용으로 사용하였다. Kim과 Song의 균열열립 실험 결과가 응력비의 영향과 변동하중 하의 균열진전속도를 잘 평가하고 있다는 점에서 유한요소해석 결과를 평가할 때의 참고 또는 비교 기준으로서 충분히 사용될 수 있을 것이다.

## 3. 해석 결과 및 토론

### 3.1 안정화거동

계산 효율과 관련하여 매우 중요한 균열열립하중의 안정화 거동에 관하여 검토하였다.

미소요소크기  $\Delta a = 0.05 \text{ mm}$ 로 하여, 초기균열길이  $a_0 = 20, 21, 22$  및  $23 \text{ mm}$ 에 대해, 응력비

$R = 0, 0.1, 0.3$ , 낮은 부하응력  $S_{\max}/\sigma_y = 0.13-0.15$ 에서 해석을 수행하였다.

균열진전에 따른 균열열림응력 변화를 검토한 결과, 균열이 초기균열에 의해 발생한 평면변형률 일방향소성역  $w_p$ 의 4 배 이상 진전하면 균열열림응력이 안정화된다. 여기서, 평면변형률 일방향소성역  $w_p$ 는 다음과 같이 정의되는 값이다.

$$w_p = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{K_{\max}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1)$$

평면변형률 하에서, 균열열림응력이 균열진전에 따라 초기에 상승한 후, 감소하여 안정한 값이 되는 거동은, Ashbaugh 등[16]의 연구결과, Pommier와 Ph. Bompard[17]의  $R = 0$ 에 대한 결과 및 Wei와 James[22]의 결과에서도 볼 수 있다. 이들의 결과에서는 15 ~ 30 사이클 정도 진전시키면 안정화되고 있으나, 소성역크기와 관계에 대해서는 언급이 없다. Parry 등[18]이, 다른 연구자의 단일과대하중 하의 실험결과로부터 균열단힘이 안정화되기 위해서는  $4w_p$  이상 균열을 진전시켜야 할 것이라고 지적하고 있다.

### 3.2 요소크기의 영향

여기서는 보이지 않지만 요소크기가 작아지면 균열열림응력은 증가하며, 이러한 경향은 평면응력에 관한 Park 등의 연구결과[26]와 같은 경향이다. 이것은 균열열림점 정의와 관련이 있다고도 생각된다. 균열선단 바로 뒤 절점이 균열선단에 가까울수록 균열열림응력은 높아지기 때문이다.

여러 요소크기에 대해  $K_{\max}$ 의 넓은 영역에서 해석하여 얻어진 열림응력강도계수  $K_{op}$ 를 Kim과 Song의 실험 결과[24]와 비교하였다.

요소크기를 고정하여, 하중을 증가시키면 해석에 의한  $K_{op}$  값은 실험결과의 경우보다 훨씬 빨리 증가하므로, 실험 결과와 일치하는 해석 결과를 얻기 위해서는, 하중조건에 따라 요소크기를 달리해야 한다. 이러한 결과는 Park 등의 평면응력에 대한 해석결과와 일치한다[26]. 특히, 그들은 어떠한 주어진 하중조건에 대해 실험결과와 일치하는 해석결과를 주는, 유일한 요소크기가 존재한다고 하고, 이 요소크기를 적정 요소크기  $\Delta a^*$ 라 부르고 있다.

여기서도 그들의 적정요소크기 개념을 적용한다.  $\Delta a^*/w_p$  값은 주어진 응력비  $R$  값에 대해,  $K_{\max}$ 에 거의 관계없이 일정한 값을 가지며,  $R$ 이 증가하면 감소한다.  $\Delta a^*/\Delta w_p$  값은  $\Delta K$ 가 변화여도 거의 일정하다고 볼 수 있으며,  $R$ 이 증가하면 증가한다. 본 연구의 범위 내에서  $\Delta a^*/\Delta w_p$  값은 1.03 ~ 1.55 정도이며, 적정요소크기로서는 식 (2)로 정의되는 되풀이 소성역 크기 정도를 잡으면 좋다는 것을 시사한다.  $\Delta a^*/\Delta w_{p, eff}$ 는  $\Delta K_{eff}$ 나 응력비  $R$ 에 관계없이 약 2.2 정도의 값이 되고 있다. 이 결과는 적정요소크기가 유효되풀이소성역 크기와 관련이 있을 가능성을 시사하고 있다고도 생각되어 흥미로우나, 약 2가 되고 있는 계수의 의미는 불분명하다. 되풀이소성역 크기  $\Delta w_p$  및 유효 되풀이소성역 크기  $\Delta w_{p, eff}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta w_p = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (2)$$

$$\Delta w_{p, eff} = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{\Delta K_{eff}}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (3)$$

이상 결과로부터, 평면변형률에서는 McClung [1]이 지적한 바와 같이 요소크기를 되풀이소성역 크기 정도로 하여 해석하면 어느 정도 합리적인 결과가 얻어지리라 기대된다. 다만 하나의 요소 크기만으로는 넓은 범위에서 실험결과와 일치하는 해석결과를 얻기는 힘들므로, Park 등[26]이 제안하고 있는 적정요소크기 개념을 이용하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.

일방향소성역의 크기로 나눈 적정요소 크기  $\Delta a^*/w_p$ 가  $K_{\max}$ 에는 의존하지 않고, 응력비  $R$ 만의 함수라 가정하고, 적정요소크기를 구하여,  $K_{op}$ 를 해석한 결과는 실험결과와 잘 일치한다.

$\Delta a^*/w_p$ 와 응력비의 관계는 다음 식 (4)로 근사할 수가 있으며, 이 식을 이용하면 임의의 응력비에서의 적정요소크기를 더욱 쉽게 예상할 수가 있을 것이다.

$$\frac{\Delta a^*}{w_p} = \left( \frac{\Delta a^*}{w_p} \right)_{R=0} \cdot \frac{1}{(1+R)} \quad (4)$$

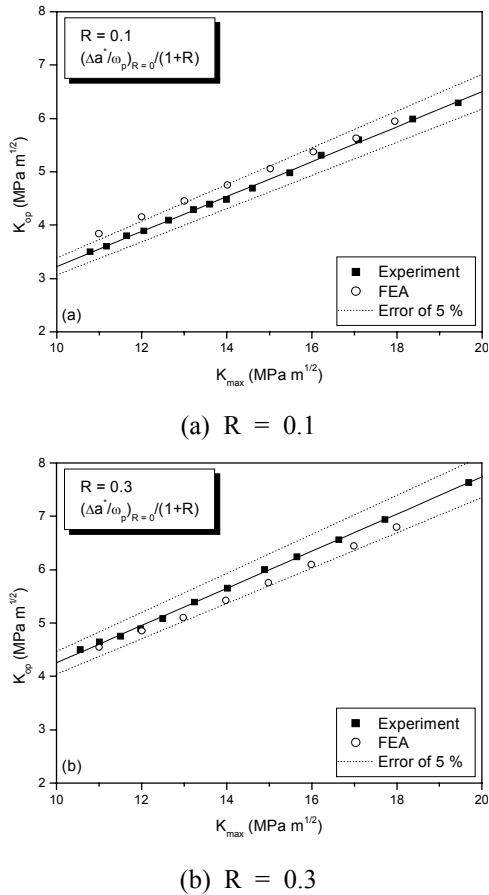


Fig. 2 Prediction of  $K_{op}$  by using the  $\Delta a^*/w_p - K_{max}$  relationship of  $R = 0$

Fig. 2는 응력비  $R = 0$ 인 경우에 최대 응력강도계수를 11 ~ 18  $MPa\ m^{1/2}$  사이에서 변화시키면서  $\Delta a^*/w_p - K_{max}$ 의 관계로부터 적정요소 크기를 구하고, 식 (4)를 이용하여 응력비  $R = 0.1$  과  $0.3$ 인 경우의 적정요소 크기를 계산한 후, 이를 이용하여 유한요소해석으로 구한 균열열림응력과 실험에서 측정된 균열열림응력을 비교한 그림을 보여 준다. 그림에서 점선은 실험결과와 해석 결과의 오차가 5%인 선을 나타낸다.  $R = 0.1$ 인 경우 해석에서 구한 열림 응력강도계수  $K_{op}$ 가 실험 결과보다 조금 큰 경향을 보이며,  $R = 0.3$ 인 경우 해석에서 구한 열림 응력강도계수  $K_{op}$ 가 실험 결과보다 조금 작은 경향을 보이지만, 전체적으로 해석 결과와 실험 결과가 열림 응력강도계수  $K_{op}$  오차 범위 5% 이내에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 이를 균열열림비  $U$ 를 이용하면 균열열림비  $U$ 의 오차범위 2.4 ~ 3.7% 이내에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

### 3.3 균열열림응력 결정 방법 및 위치의 영향

균열열림응력을 결정하기 위한 대표적인 방법은 하중 - 변위( $P - \delta$ ) 곡선을 이용하는 방법과 하중 - 감산변위( $P - \Delta\delta$ ) 곡선을 이용하는 방법이 있다. 이하에서는 이 두 방법을 각각  $P - \delta$  이용법,  $P - \Delta\delta$  이용법이라 칭한다.

$P - \delta$  이용법은 Carman 등[27], Donald[28], Roberson[29]에 의해서 연구되어, ASTM E647에서는 Donald의 방법을 개선한 이른바 오프셋 컴플라이언스 방법[30]을 추천하고 있다.

한편  $P - \Delta\delta$  곡선을 이용할 경우 균열이 완전히 열려있는 부분의 컴플라이언스가 0이 되므로, 균열이 완전히 열려있는 부분의 컴플라이언스 값에 대한 컴플라이언스 오프셋 퍼센트를 구할 수가 없다. 따라서  $P - \Delta\delta$  회전 오프셋 방법에서는 Fig. 3과 같이  $P - \Delta\delta$  곡선을  $45^\circ$  회전 시킨 후, 컴플라이언스 상대 오프셋 퍼센트를 구하여 균열열림점을 결정한다.  $P - \Delta\delta$  곡선은 균열이 닫혀있는 부분을 증폭하기 때문에, 상대 오프셋 컴플라이언스의 변화가 크게 나타난다. Song 과 Kang [31]은 상대 오프셋 값 30%로 구한  $\Delta K_{eff}$ 가 목적으로 구한  $\Delta K_{eff}$ 와 가장 근접함을 보였다.

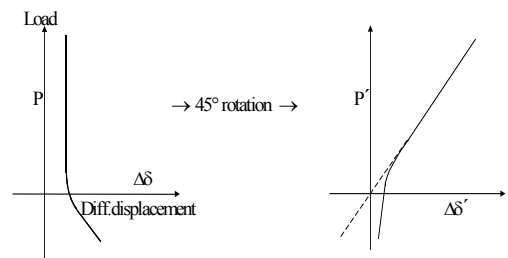


Fig. 3 The rotational  $P - \Delta\delta$  offset method

유한요소해석에서 구한 임의의 절점에서의 하중 - 변위 및 하중 - 감산변위 데이터를 이용하여 균열열림응력을 결정하고, 측정위치의 변화에 따른 균열열림응력의 변화를 살펴보기 위하여 응력비  $R = 0$ , 최대응력  $S_{max} = 42\ MPa$ , 균열길이  $a = 21\ mm$ , 미세 요소크기  $0.037\ mm$ 인 경우에 하중 - 변위 및 하중 - 감산변위 관계를 구하였다.

Fig. 4는 균열선단 으로부터의 거리 변화에 따른 하중 - 변위 관계를 보여 주며, 숫자는 균열선단에서 균열선단 뒤쪽에서의 거리를 나타낸다. 균열선단에 접근할수록 변위가 감소하며, 기울기

는 증가함을 알 수 있다. 그림에서 작은 수평 방향의 직선은 세그먼트 및 오프셋의 크기가 각각 10 % 및 2 %인 경우의 ASTM 컴플라이언스 오프셋법으로 구한 균열열림응력을 나타낸다. 균열열림응력이 균열선단으로부터의 거리에 따라 크게 변화하여 균열선단에서 멀어지면 균열열림응력이 급격히 감소하며, 균열선단으로부터의 거리가 일방향소성역의 5 배 이내에 위치한 경우 균열열림응력이 비교적 일정함을 알 수 있다.

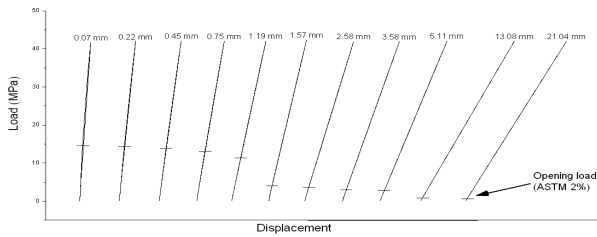


Fig. 4 Variation of load - displacement relationship with different distance from crack tip

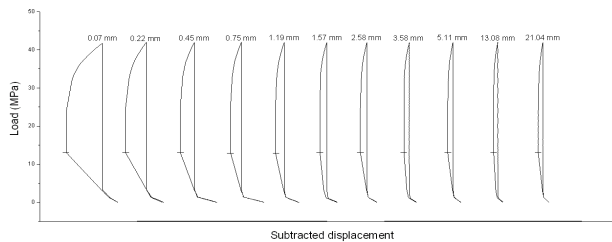


Fig. 5 Variation of load - differential displacement relationship with different distance from crack tip

Fig. 5는 균열선단 으로부터의 거리 변화에 따른 하중 - 감산변위( $\Delta\delta$ ) 관계를 보여 준다. 그림에서 균열선단에 접근할수록 하중-감산 변위 곡선의 히스테리시스가 증가함을 알 수 있으며, 작은 수평방향 직선은 균열열림응력을 나타낸다.

하중-변위곡선 보다는 하중-감산변위 곡선을 이용하여 균열열림응력을 구하는 것이 더욱 정확한 균열열림응력을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 하중-변위 데이터를 이용하여 ASTM 컴플라이언스 오프셋법으로 구한 대표적인 위치에서 세그먼트 크기 및 오프셋 량의 변화에 따른 균열열림응력의 변화를 보여 준다.

오프셋이 0.2 % 이하인 경우에는 위치 및 세그먼트에 무관하게 균열열림응력이 거의 일정함을 알 수 있으며, 오프셋이 0.4 % 이상인 경우에는 위치 및 세그먼트에 따라 균열열림응력이 매우

크게 변화됨을 알 수 있다. 따라서 오프셋 2 %를 적용하는 ASTM법을 이용하여 하중 - 변위 데이터로부터 균열열림응력을 측정할 경우에는 변위 측정 위치에 따라 균열열림응력이 매우 크게 변화될 수도 있음을 알 수 있으며, 이는 측정 위치 선정 시 매우 세심한 주의를 기울여야 정확한 균열열림응력을 얻을 수 있음을 의미 한다.

세그먼트 크기와 오프셋 크기가 작으면 정확한 균열열림응력을 얻을 수 있으므로, 하중-변위 데이터를 현재 보다 많이 획득하여 한 개의 세그먼트에 속하는 데이터 수를 유지하면서 세그먼트의 크기를 감소시켜서 실제 실험에 적용하면 정확한 균열열림응력을 측정할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 오프셋 크기를 줄이는 것은 실험 시 발생하는 노이즈의 영향으로 실제 실험에 적용하기 어렵다.

Fig. 7은 하중-감산변위 데이터를 이용하여 P -  $\Delta\delta$  회전 상대오프셋 방법으로 구한 대표적인 위치에서 세그먼트 크기 및 오프셋 량의 변화에 따른 균열열림응력의 변화를 보여 준다. 오프셋이 증가하면 균열열림응력이 감소하는 경향을 보이며, 오프셋이 20 % 이상에서는 균열열림응력이 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

세그먼트가 증가하면 균열열림응력이 증가하는 경향을 보이며, 세그먼트가 4 % 이하에서는 위치 및 오프셋에 무관하게 균열열림응력이 거의 일정함을 알 수 있다. 다만, 세그먼트가 10 %인 경우에 오프셋이 7 % 이하에서 균열열림응력이 급격히 감소하며, 균열선단에 접근하면 감소량이 둔화됨을 알 수 있다.

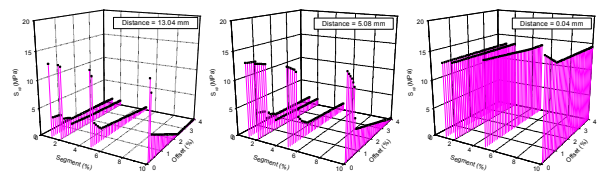


Fig. 6 Variation of crack opening load determined by the load - displacement relation

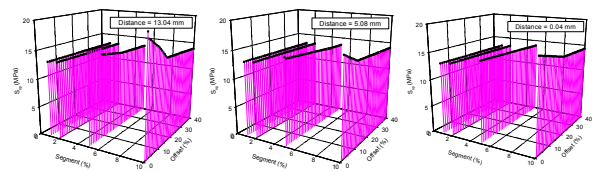


Fig. 7 Variation of crack opening load determined by the load - differential displacement relation

Fig. 8은 하중-변위 데이터를 이용하여 ASTM 컴플라이언스 오프셋법으로 구한 균열열림응력 및 하중-감산변위 관계를 이용하여 P -  $\Delta\delta$  회전 상대오프셋 방법으로 구한 균열열림응력의 균열 선단으로부터의 거리에 따른 변화를 보여 준다. 그림에서 세그먼트의 크기는 ASTM에 규정된 10 %, 오프셋은 하중-변위의 경우에는 ASTM에 규정된 2 %이며, 하중-감산변위의 경우에는 20 % 및 30 %인 경우의 결과이다. 감산변위를 구할 때 배율은 10을 이용하였기에 오프셋 20 %를 기준으로 하였으며, 상대 오프셋 값 30 %로 구한  $\Delta K_{eff}$ 가 목측으로 구한  $\Delta K_{eff}$ 와 가장 근접한 결과를 가짐[31]을 고려하여 오프셋 30 %를 기준으로 하였다.

ASYM 방법을 이용하는 경우 위치에 따라 균열열림응력이 크게 변화하여 균열선단에서 멀어지면 균열열림응력이 매우 감소함을 알 수 있으며, 균열선단으로부터의 거리가 일방향소성역  $w_p$ 의 5 배 이내에 위치한 경우에만 유한요소해석에서 얻은 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

P -  $\Delta\delta$  회전 상대오프셋 방법을 이용하는 경우 균열열림응력은 균열선단으로부터의 거리에 무관하게 거의 일정한 값을 가지며, 유한요소해석에서 얻은 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

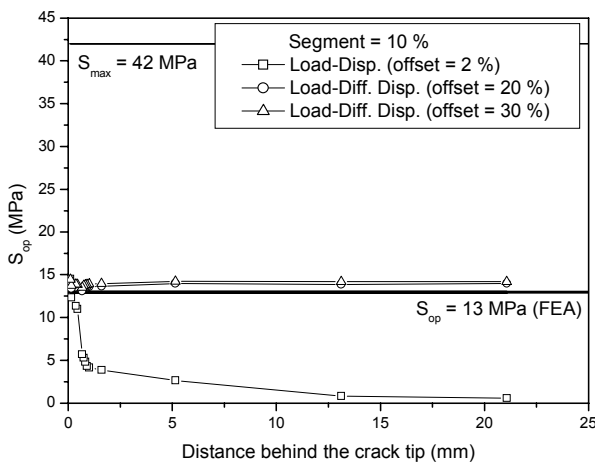


Fig. 8 Variation of crack opening load determined by the load-displacement and load-differential displacement relations as a function of distance from the crack tip

#### 4. 결 론

1) 평면변형률 상태에서 일정진폭이 작용하는 경우에 해석을 수행하여 적정요소크기를 결정하였으며, 적정요소크기와 일방향소성역 크기의 비  $\Delta a^*/w_p$ 는 응력비 R이 일정한 경우에 최대 응력강도계수에 관계없이 일정한 값을 가진다.

2) 응력비가 다른 경우에도 적정요소크기를 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. 예측된 적정요소크기를 이용하여 유한요소 모형을 구성하고, 이를 이용하여 유한요소해석을 수행하여 균열열림응력을 결정하고 이를 실험결과와 비교한 결과, 해석결과와 실험 결과가 열림응력강도계수 오차 범위 5 % 이내에서 비교적 잘 일치한다.

3) 하중 - 변위 관계를 이용하여 ASTM 컴플라이언스 오프셋법으로 균열열림응력을 계산한 결과, 기존의 ASTM 방법을 적용할 경우 균열열림응력이 균열선단으로부터의 거리에 따라 크게 변화하여 균열선단에서 멀어지면 균열열림응력이 급격히 감소하며, 균열선단으로부터의 거리가 일방향소성역의 5 배 이내에 위치한 경우 세그먼트와 오프셋에 무관하게 균열열림응력이 비교적 일정하다.

4) 하중 - 감산변위를 사용하여 P -  $\Delta\delta$  회전 상대오프셋 방법으로 계산 한 경우에는 변위측정위치가 변해도 일정한 균열열림응력 측정이 가능할 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

(1) McClung, R. C., 1999, "Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure: A Historical and Critical Review," *Fatigue 1999*, the Seventh International Fatigue Conference, Beijing, China, Vol. 1, pp. 495~502.

(2) Newman, J. C. Jr., 2002, "Advances in Finite-Element Modeling of Fatigue-Crack Growth and Fracture," *Fatigue 2002*, the Eighth International Fatigue Conference, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 55~70.

(이하 생략)