

중첩법에 의한 중앙 크랙 선단의 응력확대계수에 관한 검증

한 문 식¹⁾ · 조 재 응²⁾ · 이 양 섭¹⁾

계명대학교 기계·자동차공학부¹⁾ · 천안공업대학교 자동차과²⁾

An Inspection on Stress Intensity Factor of Center Crack Tip by Superposition Method

Moonsik Han^{*1)} · Jaeung Cho²⁾ · Yangsub Lee¹⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

²⁾Department of Automobile, Cheonan National Technical College, Cheonan 330-717, Korea

(Received 18 November 2002 / Accepted 3 January 2003)

Abstract : In this study, the stress intensity factor of center crack tip is calculated by the superposition method when it is surrounded by symmetrically distributed small cracks. The values of stress intensity factors of center crack tips are compared with those of the center crack tips calculated by the superposition method. These compared errors are influenced by the locations of distributed small cracks. These errors are inspected. When small cracks overlap and approach near the center crack tip, the effect of interaction caused by these cracks becomes noticeable and these errors become larger. In case of multiple distributed small cracks except this case, the stress intensity factor of the center crack tip is easily calculated by the superposition method.

Key words : Stress intensity factor(응력확대계수), Distributed small cracks(분포된 작은 크랙들), Interaction(상호간섭), Center crack(중앙 크랙), Superposition method(중첩법)

1. 서론

일반적으로 강도상에 있어서 충분한 여유를 가지고 설계된 수송기기를 포함하는 기계 및 구조물에 있어서 파손이 일어나는 경우가 허다하며 특히 고장력강 등과 같은 경우 의외로 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력하에서도 파괴가 잘 일어난다. 왜냐하면 기계 또는 구조물의 파손은 대부분 용접, 주조, 단조 등 생산단계에서 필연적으로 발생하는 재료 내부에 존재하고 있는 결함에서부터 발생하는 크랙 진전에 의한 것이기 때문이다. 그리고 재료에 내재

하여 있는 결함이 응력집중원으로 거동을 하고 이들 결함에서 균열이 발생되어 전파될 경우에는 이들 사이 응력장의 간섭에 의한 중첩효과 때문에 특히 응력장이 형성되어 응력확대계수가 급격하게 증가됨으로써 균열들은 서로 빠른 속도로 합체된다.¹⁾ 또한 크랙 상호간의 간섭은 중요한 연구대상의 하나로서 크랙진전의 양상도 단일크랙 때와는 달리 특이한 현상을 나타내는 경우가 많다. 결국 재료의 파괴는 재료내부에 존재하고 있는 근접된 분포크랙의 간섭, 합체에 의한 성장으로 일어나는 것이 대부분임을 생각할 때, 그러한 크랙들을 가진 탄성체의 강도를 확실히 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 기초적으로 해석의 간편화를 위하

* To whom correspondence should be addressed.
sheffhan@kmu.ac.kr

여 대칭배치 크랙이 분포되어 있을 때에 대하여 해석하여 보았다. 이와 같은 해석의 결과로 불규칙 분포 크랙의 발생, 간섭, 합체에 의한 파괴를 통계적인 방법과 유한요소법 등을 포함시켜 해석 할 수가 있을 것으로 생각이 된다.²⁾

실제상의 피로파괴는 근접 분포크랙의 간섭, 합체에 의한 성장에 기인한다고 볼 수 있는데 이에 대한 연구로는 結城良治³⁾의 유한판중의 임의형상균열 및 양단굴절 또는 양단분기균열의 동각사상에 의한 해석이 있다. 또한 이들 결합들이 재료 내에 분포되어 있는 형태나 크기는 다양하고, 아울러 분포되어 있는 상태도 인접하는 등 다양하다.^{4,5)} 한편, 균일인장을 받는 유한판 내에서의 구멍들 사이를 크랙이 전파하는 경우 및 유한판중의 대칭배치의 3개 균열에 대한 해석도 발표되어 있고⁶⁾ 비대칭 크랙 분포에 대하여도 해석이 발표되어 있다.⁷⁾ 그리고 크랙에 대한 실험적인 연구로는 피로크랙진전에 대한 연구가 거의 대부분을 차지하며, 분포크랙에 대한 크랙 상호간섭의 영향을 규명하기 위한 광탄성 실험 및 변형을 측정 등도 유용하게 사용되고 있다.⁸⁾ 이러한 분포크랙 발생의 응력부식(Stress corrosion) 내지 부식파괴(Corrosion fatigue)에 있어서 잘 나타나는 데 이들에 대하여는 파괴역학과 통계적인 방법을 이용한 여러 가지 연구가 발표되어 있다.^{9,10)} 또한 압력용기에 있어서 내압에 의하여 응력을 받고 있는 내측에 다수의 표면크랙이 존재하고 있을 때의 응력확대계수에 대하여서도 실험결과가 발표되어 있다.¹¹⁾ 따라서 본 연구에서는 구조물내 분포되어 있는 크랙 또는 결합들의 위치와 갭수와 대응하여 이들 크랙들을 가진 탄성체의 강도를 쉽게 평가할 수 있는 수차로서의 응력확대계수를 간편하게 구할 수 있는 중첩법을 유한요소법으로 구한 응력확대계수로서 검증하여 제시하였고, 이를 바탕으로 작은 크랙들에 의한 중앙크랙선단의 상호간섭에 대해서 해석 검토하였다.

또한 이러한 사항을 체계적으로 연구, 그 결과를 종합하여 놓으면 재료의 재질 함상, 수송기기를 포함하는 기계 및 LPG, LNG 연료 저장 탱크 구조물의 안전설계 및 안전성 평가 등에 이용이 될 것으로 예상이 된다.

2. Simulation 해석 절차 및 결과

2.1 Model 및 해석 절차

본 연구에서는 관통크랙이 한 방향으로 분포되어 있는 경우에 대하여 응력확대계수를 구하고 이들 크랙의 상호간섭에 의한 응력확대계수의 변동 및 그 오차도 아울러 검토하여 보기로 하였는데, 본 연구에서는 우선 2차원 모델을 대상으로 하되, 연구의 기본 모델로서는 중앙에 크랙을 갖는 정방형판을 선택하였다. 이때 이 중앙크랙 주변에 이 크랙보다 크기가 작은 크랙들이 발생하였을 때의 중앙크랙 선단에서의 응력확대계수가 분포되어 있는 크랙들의 위치에 따라 어떻게 변하는가를 해석하기 위하여 4개, 8개 및 12개의 크랙들이 중앙크랙 주변에 대칭으로 분포되어 있는 Fig. 1과 같은 모델을 선택하였다. 이 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 크랙들을 대표하고 있는 정방형판이 크랙선에 대하여 적 각 방향으로 하중의 작용을 받을 때 Fig. 1의 모든 경우에 있어서 조건이 상하, 좌우 모두 대칭이므로 해석은 판의 1/4의 사선선 부분에 대하여 행하였다.

본 연구에서는 분할요소로서 유한요소법에 적용하기가 가장 간편한 3각형 요소를 사용하였고, 중앙크랙선단에서의 응력확대계수를 구하는데 있어 요소수가 적어도 비교적 오차가 적은 에너지법인

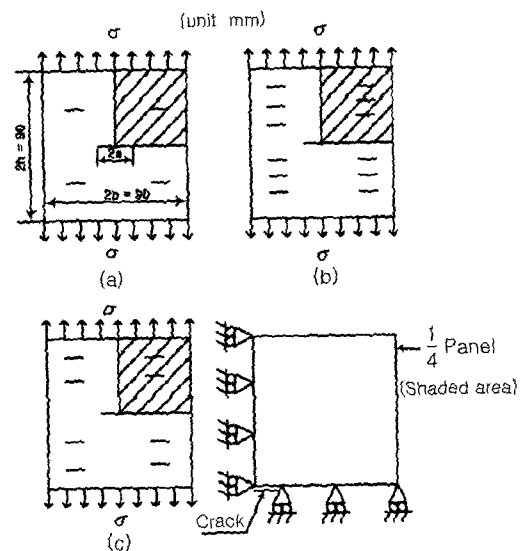


Fig. 1 Center cracked models with symmetric small cracks and boundary conditions

전에너지법(Total energy method)을 이용하였다. 또한 응력확대계수에는 중첩법이 적용되므로 크랙군이 존재할 때에 대하여는 중첩법의 적용여부 및 그 오차도 검토하여 보았다. 중첩법의 원리는 다음과 같이 적용된다.

지금 Fig. 2에서는 큰 중앙크랙 주위로 작은 크랙을 대칭으로 6개를 포함한 시편에서 균등분포 인장하중을 받고 있을 때, 각 (b), (c) 경우의 응력확대계수를 중앙크랙만이 있는 경우의 응력확대계수(K_0)로 나눠 주어 등응력확대계수(Normalized stress intensity factor)로 표시하여 주고 (a)의 경우의 Ka/K_0 의 값을 중첩법으로 구하면,

$$\begin{aligned} K_a/K_0 &= K_b/K_0 + K_c/K_0 - K_0/K_0 \\ &= K_b/K_0 + K_c/K_0 - 1 \end{aligned} \quad (1)$$

이 된다.

일반적으로 크랙이 여러 개(N개) 있을 때에 대하여도,

$$K_N = 1 + \sum_{n=1}^N (K_n - 1) \quad (2)$$

이 성립한다.¹²⁾

여기서, K_N 및 K_n 등은 등응력확대계수이다.

본 해석에서는 앞서도 말한 바와 같이 대칭임을 고려하여 시편 1/4에 대하여 검토를 하여 보았는데 시편 1/4에 대한 요소수는 162개, 절점수는 100개를 사용하였고, 구속 조건으로서 X축상의 절점에서는 Y축방향의 변위를 구속하였으며, Y축상의 절점에서는 X축방향의 변위를 구속하여서 중앙크랙에 있어서 크랙의 진행은 X축상의 절점에서는 Y축방향 변위의 구속을 하나씩 풀어줌으로써 행하였다.

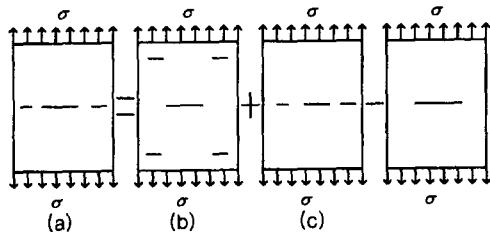


Fig. 2 Superposition concept applied to compound stress intensity factor

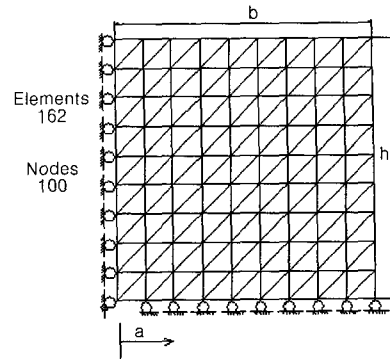


Fig. 3 Idealized model used for analysis

요소분할과 구속상태를 Fig. 3에 나타내었다. 본 모델에 있어서는 Fig. 3에서 보인 바와 같이 전체 시편의 폭은 $2b=90\text{mm}$, 길이는 $2h=90\text{mm}$, 두께는 $t=1\text{mm}$ 로 하였고, 길이 $2a=20\text{mm}$ 인 중앙크랙 주위에 대칭으로 분포되어 있는 작은 크랙의 길이는 10mm 로 하였다. 해석을 하기 위한 조건으로서는 평면변형률(Plane strain)상태하에서 균등분포하중 1764N 의 인장을 주고 양단에 작용하는 분포하중은 절점에 작용하는 하중으로 치환하여 작용시켰고, 탄성계수(Modulus of elasticity; E)는 205.8kN/mm^2 , 프와송비(Poisson's ratio; ν)는 0.3 으로 하였다.

2.2 해석 결과

본 해석에 앞서, 중앙크랙만이 존재하고 있을 경우의 해석의 정도를 검토하기 위하여 본 연구에서의 해석의 결과를 Isida 등의 해석¹³⁾과 비교하여 보았다.

Table 1에 비교표를 나타내었다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 대체적으로 본 해석의 결과는 오차 약 3.6% 이내에 있고, 본 연구에 필요한 작은 크랙이 존재하고 있을 때의 해석의 상호비교에는 큰 지장이 없는 것으로 사료된다. 중앙크랙 주위에 작은 크랙이 존재하고 있을 때의 응력 확대계수를 구하는데 있어서, 중첩법을 사용하였을 때의 정도를 검토하기 위하여 해석을 하여 보았는데 이 해석결과는 다음과 같다. 즉, 여기서는 Fig. 1 (a),(b),(c)들의 3가지 형에 대하여만 작은 크랙의 위치를 각각 변화시켜 가면서 해석을 하였는데, 이 때의 중앙크랙의 길이로서는 $2a=20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}$ 및 50mm 로 잡

Table 1 Calculated K_I Value by Total Energy Method

| a | a/b | Calculated K_I value | K_I value by Isida | Error(%) |
|----|-------|------------------------|----------------------|----------|
| 10 | 0.222 | 12.4593 | 12.0227 | +3.63 |
| 15 | 0.333 | 16.3269 | 15.7651 | +3.56 |
| 20 | 0.444 | 20.6443 | 20.0378 | +3.03 |
| 25 | 0.556 | 25.7246 | 25.0823 | +2.56 |

Table 2 Values of K_I/K_0

| Position 2a | 15 | 45 | RATT | RAT | Error(%) |
|----------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 20 mm | 1.15811 | 1.01957 | 1.17768 | 1.16422 | +1.157 |
| 30 mm | 1.19579 | 1.01054 | 1.20633 | 1.19240 | +1.168 |
| 40 mm | 0.73266 | 0.98044 | 0.7131 | 0.73219 | -2.608 |
| 50 mm | 0.98258 | 0.98795 | 0.97053 | 0.97349 | -0.003 |

RATT : Superposition Method

RAT : Total Energy Method

Table 3 Values of K_I / K_0

| Position 2a | 15 | 45 | RATT | RAT | Error(%) |
|----------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 20 mm | 1.15811 | 1.01957 | 1.17768 | 1.16422 | +1.157 |
| 30 mm | 1.19579 | 1.01054 | 1.20633 | 1.19240 | +1.168 |
| 40 mm | 0.73266 | 0.98044 | 0.7131 | 0.73219 | -2.608 |
| 50 mm | 0.98258 | 0.98795 | 0.97053 | 0.97349 | -0.003 |

RATT : Superposition Method

RAT : Total Energy Method

고 그 때마다 해석을 하였다. 해석의 결과를 보면 전 에너지법(Total energy method)으로 직접 구한 해와 중첩법에 의하여 구한 해와는 잘 일치하여 대체적으로 중첩법의 효용성을 증명하여 주고 있으며, 작은 크랙으로 인하여 중앙크랙선단에서의 응력확대계수의 값이 현저하게 떨어지는 경우 등을 포함할 때는 Table 2 및 3에 예로서 표시된 바와 같이 그 오차가 3% 이내에 이르렀다.

본 연구에서는 균열 상호간의 간섭효과를 연구하기 위하여 작은 크랙들의 위치를 8백여 회 바꾸어가면서 중앙크랙선단의 응력확대계수를 구하여 그 오차의 정도를 비교하여 보았다. 해석 결과 그 오차의 정도는 Table 2나 3에서와 같이 역시 3% 이내에 들어 갔다. 작은 크랙들이 서로 겹쳐져 있거나 중앙크랙선단에 작은 크랙들이 가까이 갈 때에는 그 오차의 정도는 커진다. 또한 본 해석에 있어서는 아무리 작은 크랙들이 겹쳐져 있거나 작은 크랙들이 중앙크랙선단에 가까이 있을지라도 요소의 한 눈금

5mm 미만으로는 더 겹쳐지거나 더 좁혀지지 못하기 때문이다. 따라서 본 해석에 앞서 균열 상호간의 간섭현상에 대한 검증은 충분하다고 사료된다.

Table 2에서 번호 15 등은 작은 크랙을 나타내는 것으로서, Fig. 4에서 작은 크랙의 중심이 15번에 있으며 길이가 14-16번에 걸쳐 있음을 뜻하는 것이다. 또한 번호 아래 있는 값은 예컨대 15번에 중심을 둔 작은 크랙만이 있을 때의 중앙크랙선단에서의 K_I/K_0 의 값을 나타낸 것이고, RATT는 중첩법에 의한 K_I/K_0 의 값, RAT는 전에너지법(Total energy method)에 의하여 구한 값을 나타낸다.

Fig. 5는 그림에서도 볼 수 있는 바와 같이 중앙크랙선단으로부터 위치가 첫 번째와 두 번째인 작은 크랙들의 위치가 고정되어 있고 세 번째 위치의 작

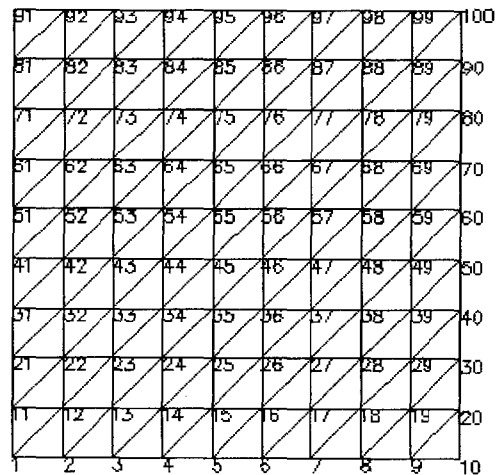


Fig. 4 Schematic illustration for the position of small crack

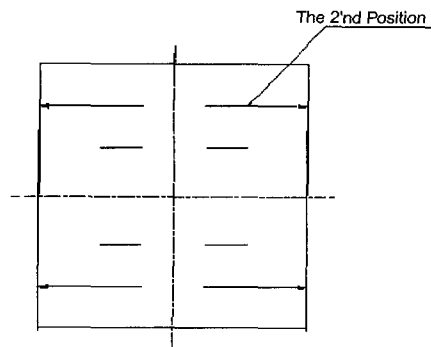


Fig. 5 The movement of small crack at the 2nd position from center crack tip ($2a=20\text{mm}$)

은 크랙이 수평으로 이동하는 경우를 나타낸 것이며 중앙크랙의 길이(2a)는 20 mm로 잡았다. Fig. 6부터 15까지는 Positions에서 나타난 번호와 같이 작은 크랙의 중앙의 위치가 있는 것으로, Fig. 5에서 보인 바와 같은 경우이다. 단, Fig. 6부터 8까지는 중앙크랙 선단으로부터 위치가 첫 번째인 작은 크랙들의 위치가 고정되어 있고 두 번째 위치의 작은 크랙이 수평으로 이동하는 경우를 나타낸 것이며 중앙크랙의 길이(2a)는 20 mm로 잡았다. 또한 작은 크랙들을 함유하고 있을 때의 큰 중앙크랙 선단에서의 응력확대계수(K_1/K_0)로 무차원화시켜 K_1/K_0 의 데이터를 Y좌표(RAT)로 삼았는데, 중첩법에 의하여 구한

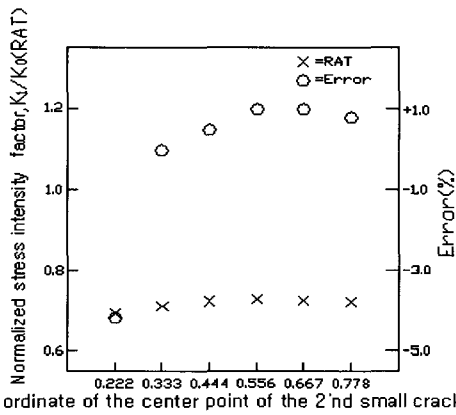


Fig. 6 K_1/K_0 and error(%) vs. relative position of the 2nd small crack in the horizontal direction (13,43-48 specimens, 2a=20mm)

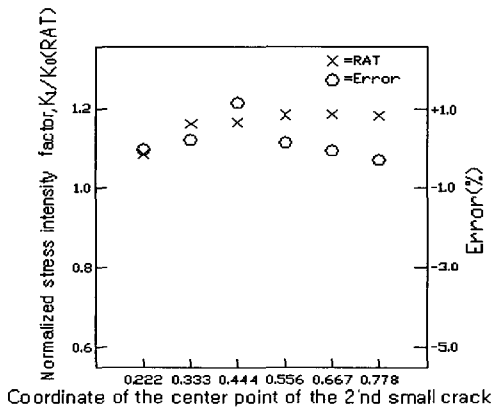


Fig. 7 K_1/K_0 and error(%) vs. relative position of the 2nd small crack in the horizontal direction (15,43-48 specimens, 2a=20mm)

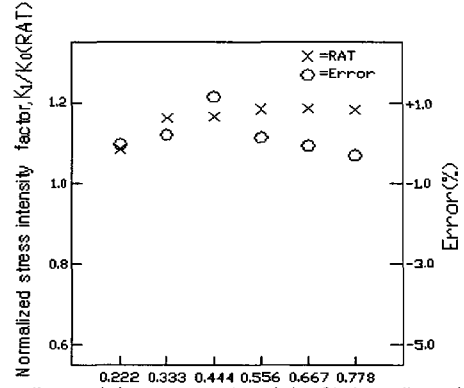


Fig. 8 K_1/K_0 and error(%) vs. relative position of the 2nd small crack in the horizontal direction (17,43-48 specimens, 2a=20mm)

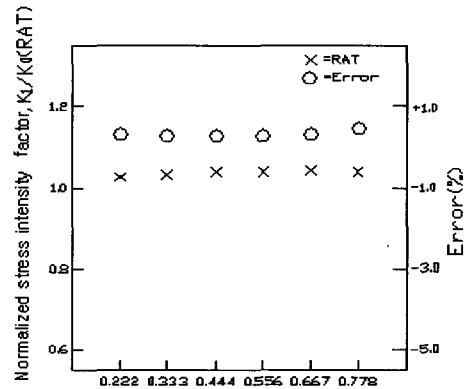


Fig. 9 K_1/K_0 and error(%) vs. relative position of the 3rd small crack in the horizontal direction (18,48,73-78 specimens, 2a=20mm)

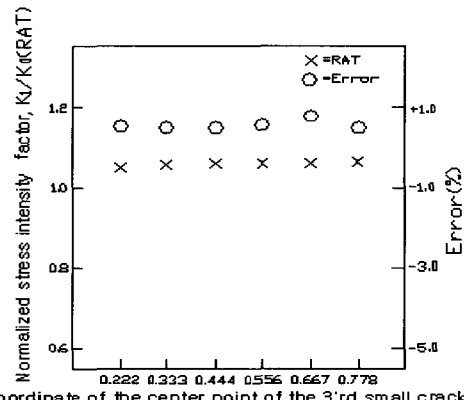


Fig. 10 K_1/K_0 and error(%) vs. relative position of the 3rd small crack in the horizontal direction (17,47,73-78 specimens, 2a=20mm)

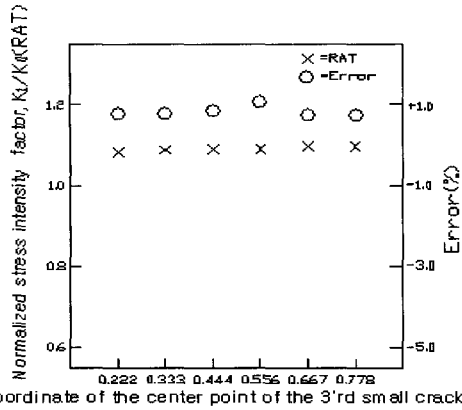


Fig. 11 K_I/K_0 and error(%) vs. relative position of the 3rd small crack in the horizontal direction (16,46,73-78 specimens, 2a=20mm)

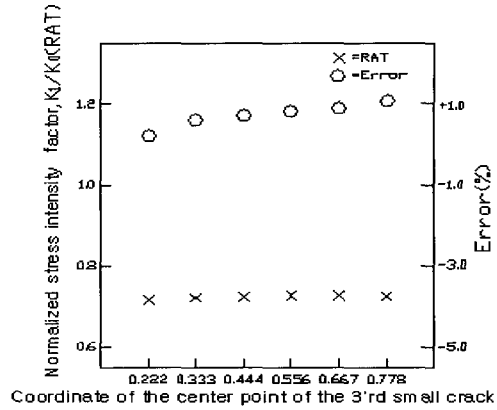


Fig. 14 K_I/K_0 and error(%) vs. relative position of the 3rd small crack in the horizontal direction (13,48,73-78 specimens, 2a=2mm)

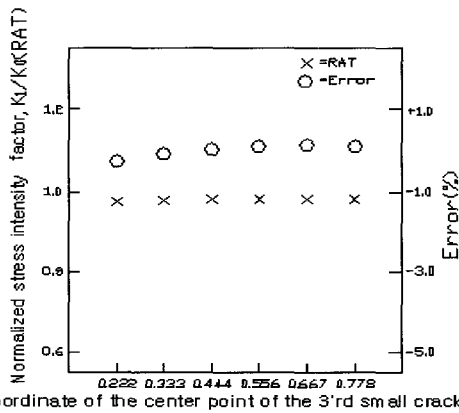


Fig. 12 K_I/K_0 and error(%) vs. relative position of the 3rd small crack in the horizontal direction (18,43,73-78 specimens, 2a=20mm)

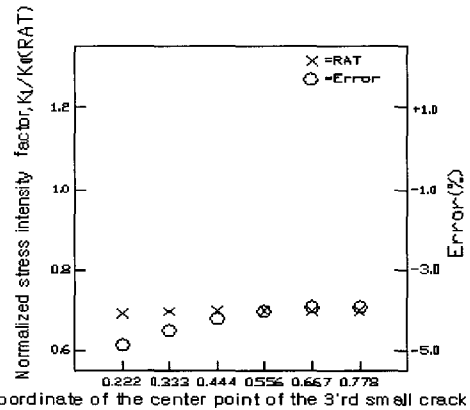


Fig. 15 K_I/K_0 and error(%) vs. relative position of the 3rd small crack in the horizontal direction (13,43,73-78 specimens, 2a=2mm)

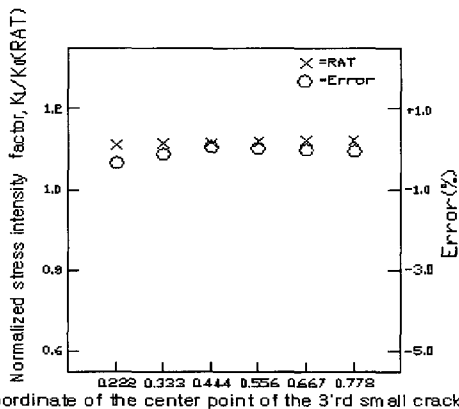


Fig. 13 K_I/K_0 and error(%) vs. relative position of the 3rd small crack in the horizontal direction (15,43,73-78 specimens, 2a=20mm)

RATT와의 오차(%)도 나타내고 있다. 또한 이동하는 작은 크랙의 중앙위치를 시편의 1/2 쪽에 대한 비로써 무차원화시켜 X 좌표로 잡았다.

3. 해석 결과에 대한 고찰

해석 결과에 대하여 축차적으로 고찰을 가하여 보겠다.

Fig. 6은 중앙크랙선단으로부터 첫 번째인 작은 크랙의 중심이 13번 위치에 있을 때 두 번째 작은 크랙의 중심이 43번 위치에서 48번 위치까지 이동할 때의 그림이며 그 오차는 두 번째인 작은 크랙의 중심이 0.222 위치에 있을 때, 즉 첫 번째인 작은 크랙

과 두 번째 작은 크랙이 겹쳐질 때 그 오차의 절대치가 약 4.1%까지 올라가고 있음을 보이고 있다. 이는 중앙크랙선단에 가까운 작은 크랙들이 서로 겹쳐질수록 Error(%)가 가장 높음을 보여주고 있으며 그 외의 위치의 경우는 1% 이내를 보이고 있다. 그리고 등응력확대계수(RAT)는 중앙크랙 선단 위로부터 첫 번째인 작은 크랙 우측선단이 중앙크랙 우측선단 바로 안쪽으로 들어왔을 때이며 대체로 0.8보다 낮고, 두 번째 작은 크랙의 영향은 별로 없음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 중앙크랙선단으로부터 첫 번째인 작은 크랙의 중심이 15번 위치에 있을 때 두 번째인 작은 크랙의 중심이 43번 위치에서 48번 위치까지 이동할 때의 그림이다. 마찬가지로 그 오차는 두 번째인 작은 크랙의 중심이 0.444 위치에 있을 때, 그 오차는 1.15% 이상으로 올라가고 있음을 보이고 있으며 역시 작은 크랙들이 서로 겹쳐질 때 Error는 가장 높았다. 그리고 등응력확대계수는 중앙크랙 선단으로부터 첫 번째인 작은 크랙의 좌측선단이 바로 바깥쪽으로 나와 있을 때로서 대체로 1.1보다 높다. 그러나 두 번째인 작은 크랙이 첫 번째인 작은 크랙과 겹쳐질 때, 즉 0.444 위치에 두 번째인 작은 크랙 중심이 있을 때는 1.16으로 다소 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이는 두 번째인 작은 크랙이 첫 번째인 작은 크랙과 겹쳐져서 다소 상호간섭의 효과가 크기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 8은 중앙크랙선단으로부터 첫 번째인 작은 크랙의 중심이 17번 위치에 있을 때, 두 번째인 작은 크랙의 중심이 43번 위치에서 48번 위치까지 이동할 때의 그림이다. 마찬가지로 그 오차는 작은 크랙들이 서로 겹쳐지게 되는 경우, 즉 두 번째인 작은 크랙의 중심 위치가 0.667에 있을 때, 0.5%로 가장 커지고 있으며 그 외의 경우는 0.1% 이내를 나타내고 있다. 그리고 등응력확대계수는 중앙크랙으로부터 첫 번째인 작은 크랙 좌측선단이 중앙크랙 우측선단 바깥쪽으로 멀리 나와 있을 때로서 1보다 크지만 1.06이하가 됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 7에서의 경우, 즉 작은 크랙들이 중앙크랙 우측선단 바깥쪽으로 더 가까이 있을 때보다는 다소 낮아짐을 보이고 있다. Fig. 6부터 Fig. 8까지를 보면, 중앙크랙선단으로

부터 위치가 첫 번째, 두 번째인 작은 크랙들이 중앙크랙의 우측선단에 가까울수록 Error는 높아져 상호간섭 효과는 커진다. 또한 중앙크랙선단으로부터 첫 번째인 작은 크랙의 좌측선단이 중앙크랙의 우측선단 바로 안쪽으로 들어와 있을 때는 등응력확대계수가 1보다 상당히 낮아져 중앙크랙만이 있을 때의 응력확대계수보다 훨씬 낮아짐을 알 수 있다. 그러나 첫 번째인 작은 크랙의 좌측선단이 중앙크랙의 우측선단을 바로 벗어난 후는 1보다 훨씬 높아져 중앙크랙만이 있을 때의 응력확대계수보다는 상당히 높아짐을 보이고 있다. 또한 첫 번째인 작은 크랙의 좌측선단이 중앙크랙 우측선단 바깥쪽으로 멀리 나와 있을 때는 바로 벗어난 후 보다는 응력확대계수가 다소 낮아지나 중앙크랙만이 있을 때의 경우보다는 높아짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 중앙크랙선단으로부터 첫 번째와 두 번째의 작은 크랙들의 중심이 각각 18번과 48번 위치에 있을 때, 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에서 78번 위치까지 이동할 때의 그림이며 그 오차는 세 번째의 작은 크랙의 중심이 78번 위치에 있을 때, 즉 첫 번째, 두 번째, 세 번째 크랙이 겹쳐질 때 그 오차가 0.48%까지 올라가고 있음을 보여 주고 있다. 이는 중앙크랙선단 주위에 작은 크랙들이 서로 겹쳐질수록 오차가 가장 높음을 보여 주고 있다.

Fig. 10은 중앙크랙선단으로부터 첫 번째와 두 번째의 작은 크랙들의 중심이 각각 17번과 47번 위치에 있을 때, 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에서 78번 위치까지 이동할 때의 그림이며 그 오차는 세 번째의 작은 크랙의 중심이 77번 위치에 있을 때, 즉 첫 번째, 두 번째, 세 번째 크랙이 겹쳐질 때 그 오차가 0.79%까지 올라가고 있음을 보여 주고 있다. 이는 중앙크랙선단 주위에 작은 크랙들이 서로 겹쳐질수록 오차가 가장 높음을 보여 주고 있다.

Fig. 11은 중앙크랙선단으로부터 첫 번째와 두 번째의 작은 크랙들의 중심이 각각 16번과 46번 위치에 있을 때, 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에서 78번 위치까지 이동할 때의 표이며 그 오차는 세 번째의 작은 크랙의 중심이 76번 위치에 있을 때, 즉 첫 번째, 두 번째, 세 번째 크랙이 겹쳐질 때 그 오차가 1.098%까지 올라가고 있음을 보여 주고 있

다. 이는 중앙크랙선단 주위에 작은 크랙들이 서로 겹쳐질수록 오차가 가장 높음을 보여 주고 있다.

Fig. 9부터 11까지를 보면 Fig. 11의 경우에 중앙 크랙선단의 등응력확대계수가 1.09 부근이어서 Fig. 10의 경우(등응력확대계수 1.06 부근)보다 크고 Fig. 10은 Fig. 9(등응력확대계수 1.04 부근)보다 큼을 알 수 있다. 이는 Fig. 11의 경우가 Fig. 10의 경우보다 작은 크랙들이 중앙크랙선단에 더 가까워져서 등응력확대계수가 더 커지고 Fig. 10의 경우는 Fig. 9의 경우보다 작은 크랙들이 중앙크랙선단에 더 가까워져서 등응력확대계수가 더 커짐을 알 수 있었다. 또한 Fig. 9부터 11까지를 볼 때, 작은 크랙들이 서로 겹쳐질수록 오차는 높아짐을 보이고 있고 그 겹쳐진 크랙들이 중앙크랙으로부터의 거리가 가까워질수록 오차는 높아짐을 보이고 있다.

Fig. 12는 중앙크랙선단으로부터 첫 번째와 두 번째의 작은 크랙들의 중심이 각각 18번과 43번 위치에 있을 때, 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에서 78번 위치까지 이동할 때의 표이며 그 오차는 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에 있을 때, 즉 두 번째, 세 번째 크랙이 겹쳐질 때 그 오차가 -0.271%까지 차이가 있음을 보여 주고 있다. 이는 중앙크랙선단 위에 첫 번째 작은 크랙이 가까이 있을 때, 그 간섭이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 13은 중앙크랙선단으로부터 첫 번째와 두 번째의 작은 크랙들의 중심이 각각 15번과 43번 위치에 있을 때, 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에서 78번 위치까지 이동할 때의 표이며 그 오차는 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에 있을 때, 즉 두 번째, 세 번째 크랙이 겹쳐질 때 그 오차가 -0.320%까지 차이가 있음을 보여 주고 있다. 이는 중앙크랙선단 주위에 첫 번째 작은 크랙이 Fig. 7보다 가까이 있을 때, 그 간섭이 커짐을 알 수 있다. 따라서 그 오차는 Fig. 7보다 다소 커짐을 알 수 있다.

Fig. 12와 13의 경우를 보면, Fig. 13의 경우(등응력확대계수 1.12 부근)가 중앙크랙으로부터 첫 번째 작은 크랙이 중앙크랙선단에 Fig. 12의 경우(등응력확대계수 0.98 부근)보다 더 가까워져서 등응력확대계수가 더 커짐을 보이고 있다.

Fig. 14는 중앙크랙선단으로부터 첫 번째와 두 번째

의 작은 크랙들의 중심이 각각 13번과 48번 위치에 있을 때, 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에서 78번 위치까지 이동할 때의 표이며 그 오차는 세 번째의 작은 크랙의 중심이 78번 위치에 있을 때, 즉 두 번째, 세 번째 크랙이 겹쳐질 때 그 오차가 1.105%까지 올라가고 있음을 보여 주고 있다. 첫 번째 크랙이 중앙크랙에 더 가까워져 그 상호간섭의 영향을 받고 있지만, 두 번째 및 세 번째 크랙들이 중앙크랙선단 선상에서 가까운 부위에서 가장 많은 영향을 일으켜 그 간섭이 커짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 14(등응력확대계수 0.72 부근)는 중앙크랙으로부터 첫 번째의 작은 크랙이 중앙크랙선단의 바로 위에서 간섭현상을 일으켜 중앙크랙의 진전을 오히려 방해하여 그 등응력확대계수는 더 작아짐을 보이고 있다.

Fig. 15는 중앙크랙선단으로부터 첫 번째와 두 번째의 작은 크랙들의 중심이 각각 13번과 43번 위치에 있을 때, 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에서 78번 위치로 이동할 때의 표이며 그 오차는 세 번째의 작은 크랙의 중심이 73번 위치에 있을 때, 즉 두 번째, 세 번째 크랙이 겹쳐질 때 그 오차가 -4.848%까지 차이가 있음을 보여 주고 있다. 첫 번째 크랙과 두 번째 크랙이 중앙크랙에 가까워져 그 상호간섭의 영향을 받고 있고 그 크랙들이 서로 겹쳐져 상호간섭을 많이 일으키고 있다. 그리고 첫 번째, 두 번째 및 세 번째 크랙들이 서로 겹쳐졌을 때 중앙크랙선단 선상에서 가까운 부위에서 가장 많은 간섭을 일으켜 그 오차가 가장 커짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 15는 Fig. 14의 경우와 같이 중앙크랙으로부터 첫 번째의 작은 크랙의 위치는 같으나 중앙크랙으로부터 두 번째의 작은 크랙의 위치는 달라져 있다. Fig. 14와 15는 각각 등응력확대계수가 각각 0.72와 0.69를 대략 나타내고 있다. Fig. 15에서 중앙크랙선단의 등응력확대계수가 Fig. 14보다 다소 낮아진 것은 중앙크랙으로부터 첫 번째와 두 번째 크랙들이 서로 가까운 위치에서 겹쳐져 있고 중앙크랙 선단의 바로 위에서 간섭을 일으켜서 그 등응력확대계수를 더 낮게 한 것으로 사료된다.

Fig. 12부터 14를 보면 중앙크랙선단 주위에 첫 번째의 작은 크랙이 중앙크랙선단에 가까워질수록

그 상호간섭의 영향은 많아지고 있다. 또한 두 번째 및 세 번째 크랙들은 중앙크랙선단 주위에 가까워지고 그 크랙들이 겹쳐질수록 그 상호간섭이 큼을 알 수 있었다. 또한 Fig. 15에서 보면, 중앙크랙 주위에 작은 크랙들이 가까워질수록 그 상호간섭은 커져 그 오차는 커짐을 알 수 있었고, 작은 크랙들이 서로 겹쳐져 밀집할수록 그 오차는 더 커짐을 알 수 있었다. 그러나 위와 같이 중앙크랙선단에 작은 크랙들이 극히 가까워지고 서로 겹쳐지는 경우를 제외하고는 대체적으로 작은 크랙들이 많이 산재하고 있을 때의 중앙크랙선단에서의 응력확대계수는 중첩법으로 쉽게 구할 수가 있었는데, 그 오차가 대체로 1% 이내에 있으므로 그 정도가 좋은 것으로 판명되었다.

4. 결론

본 해석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 작은 크랙의 좌측선단이 중앙크랙의 우측선단보다 좌측에 있는 경우에는 중앙크랙선단에서의 응력확대계수는 작은 크랙이 없는 경우에 비하여 더 작은 값을 취하고, 반대로 작은 크랙 좌측선단이 중앙크랙의 우측선단보다 우측에 있는 경우에는 중앙크랙선단에서의 응력확대계수는 중앙크랙만이 있을 때에 비하여 더 큰 값을 취한다.
- 2) 중앙크랙 주위에 작은 크랙들이 서로 겹쳐질수록 상호간섭은 커져 그 오차는 높아짐을 보이고 있고 그 겹쳐진 크랙들이 중앙크랙으로부터의 거리가 가까워질수록 오차는 높아짐을 보이고 있다.
- 3) 중앙크랙선단 주위에서 첫 번째로 가까운 작은 크랙이 중앙크랙의 선단에 가까워질수록 그 상호간섭도는 커져 그 오차가 높아짐을 보이고 있다.
- 4) 중앙크랙선단 주위에서 두 번째 및 세 번째로 가까운 크랙들이 중앙크랙선단 주위에 가까워지고 그 크랙들이 겹쳐질수록 그 상호간섭은 커져 중첩법과 유한요소법에 의해 구한 응력확대계수와 오차는 더 커짐을 알 수 있다.
- 5) 작은 크랙이 산재하고 있을 때에 중앙크랙 선단에서의 응력확대계수는 중앙크랙선단에 작은 크랙들이 극히 가까워지고 서로 겹쳐지는 경우를 제외하고는 중첩법으로 정도 좋게 구할 수가 있었다.

6) 이러한 위의 결과들을 종합적으로 살펴보면 작은 크랙들이 분포된 위치에 따라서 그 응력확대계수를 쉽게 계산하여 재료의 안전성에 대한 강도를 판정할 수 있다.

References

- 1) S. H. Song, B. H. Choi, J. S. Bae, "An Experimental Study on the Fatigue Behavior and Stress Interaction of Arbitrarily Located Defects(1)," *Journal of KSME*, Vol.24, No.5, pp.1288-1296, 2000.
- 2) H. Kitagawa, "Passive Analysis of Various Given Cracks and Cracking Processes," *Proc. Int. Conf. Frac. Mech. & Tech.*, Vol.2, pp.995-1009, 1977.
- 3) S. H. Song, B. H. Choi, J. S. Bae, "Crack Propagation Behavior on the Characteristic of the Interaction Between Two Fatigue Cracks," *KSME International Journal*, Vo.12, No.2, pp.191-198, 1998.
- 4) S. H. Song, H. S. Oh, "Behavior of Initiation and Propagation Cracks around Holes," *Journal of Korea Committee for Ocean Resources and Engineering*, Vol.1, No.2, pp.250-258, 1987.
- 5) R. Chang, "On Crack-Crack Interaction and Coalescence in Fatigue," *Engineering Fracture Mechanics*, Vo.16, No.5, pp.683-693, 1982.
- 6) A. A. Rubinstein, H. C. Choi, "Macrocrack Interaction with Transverse Array of Microcracks," *International Journal of Fracture*, Vol. 36, pp.15-26, 1988.
- 7) C. Mauge, M. Kachanov, "Anisotropic Materials with Interacting Arbitrarily Oriented Cracks. Stress Intensity Factors and Crack-microcrack Interactions," *International Journal of Fracture*, Vol.65, pp.115-139, 1994.
- 8) C. W. Smith, M. Jolles, W. H. Peters, *Proc. 3'rd Int. Conf. Press. Vessel Tech.*, Part 2, p.535, 1977.
- 9) J. L. Bogdanoff, F. Kozin, "Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth-II," *Eng. Frac. Mech.*, Vol.20, pp.255-270, 1984.
- 10) S. Tanaka, M. Ichikawa, S. Akita, "A Probabil-

- istic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," Eng. Frac. Mech., Vol.20, pp.501-513, 1984.
- 11) F. I. Baratta, "Stress Intensity Factors for Internal Multiple Cracks in Thick Walled Cylinders Stressed by Internal Pressure Using Load Relief Factors," Eng. Frac. Mech., Vol. 10, pp.691-697, 1978.
 - 12) B. Aamodt, Bergan, "On the Principle of Superposition for Stress Intensity Factors," P. G., Eng. Frac. Mech., Vol.8, pp.437-440, 1976.
 - 13) M. Isida, "Effect of Width and Length on Stress Intensity Factors of Internally Cracked Plates under Various Boundary Conditions," Int. J. of Frac. Mech., Vol.7, pp.301-316, 1971.