

< 논문 >

# 유한요소법에 의한 플라스틱 파이프의 저속균열성장 저항성 시험편 균열선단 모드 I 응력확대계수 계산

서영성<sup>†</sup> · 최선웅\* · 박영주\*\*  
(2005년 2월 24일 접수, 2005년 7월 18일 심사완료)

## Computation of Crack Tip Mode I Stress Intensity Factor of a Specimen for Measuring Slow Crack Growth Resistance of Plastic Pipes Using Finite-Element Method

Yeong Sung Suh, Sunwoong Choi and Yeong Joo Park

**Key Words:** Stress Intensity Factor(응력확대계수), Slow Crack Growth Resistance or Resistance to Slow Crack Growth(저속균열성장 저항성), Plastic Pipe(플라스틱 파이프), Finite-Element Method (유한요소법)

### Abstract

Mode I stress intensity factor ( $K_I$ ) of Notched Ring Test(NRT) specimen for measuring slow crack growth resistance was found using finite-element method. The theoretical  $K_I$  value of NRT was not available in any references and could not be solved analytically. At first, in order to verify the accuracy of the finite-element approach, published  $K_I$  values of several cracks were calculated and compared with finite-element results. The results were in good agreement within inherent errors of theoretical  $K_I$ . Finally the mode I stress intensity factor of NRT was found using 2- and 3-dimensional finite-element methods and expressed as a function of the applied load. This enabled direct comparison of resistance to slow crack growth between NRT and Notched Pipe Test(NPT), which employ different loading regime.

---

### 기호설명

- $K_I$  : 모드 I 응력확대계수
- $E$  : 탄성계수
- $\nu$  : 푸아송 비
- $L$  : 하중
- $p, P$  : 내압
- $a$ : 균열 길이

### 1. 서론

플라스틱 파이프의 파손형태에는 파손되는 시간에 따라 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 연성 파손, 기계적 취성 파손, 그리고 장기간 사용에 의한 자연파손 (또는 화학적 파손)으로 분류할 수 있다. 여기에서 연성파손은 비교적 짧은 시간 동안 높은 압력에 의하여 파이프의 일부분이 부풀어 올라 터지는 현상을 말하고, 취성파손은 낮은 사용압력에서 저속균열성장 거동으로 인하여 파이프가 파손되는 현상을 가리킨다. 저속균열성장은 파이프의 성형 시 발생된 결함이나 운송 및 시공 시에 발생된 미세 균열이 낮은 압력 하에 있으면서 균열선단의 응력집중으로 인하여 균열이 서서히 장시

---

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한남대학교 기계공학과  
E-mail : suhy@hannam.ac.kr  
TEL : (042)629-7999 FAX : (042)629-8293

\* 한남대학교 생명정보신소재공학과

\*\* 회원, 한남대학교 대학원 기계공학과

---

간에 걸쳐 자라는 현상을 말한다. 플라스틱 압력 파이프는 저속균열성장으로 인한 파괴를 방지하는 설계를 주로하게 되는데, 이에 따른 플라스틱 파이프의 저속균열성장 거동에 관한 연구는 플라스틱 파이프의 장기 수명의 평가에 있어서 매우 중요하다.

현재 사용되고 있는 파이프의 저속 균열성장특성에 대한 국제시험규격은 영국에서 개발된 ISO 13479<sup>(1,2)</sup>와 프랑스에서 개발된 ISO 13480<sup>(3)</sup>이 있다. ISO 13480은 일정한 변형상태에서 저속균열성장을 측정하는 바, 실제 파이프에서 일어나는 크리프 상태와 상반되므로 그 사용이 제한되어 왔다

가장 널리 활용되고 있는 ISO 13479 노치 파이프(Notched Pipe Test, 이하 NPT)는 Fig. 2와 같이, 파이프 외면에 초기 균열을 만들어 저속 균열성장을 개시하는 방법으로서, 실제 크리프 상태에서 균열성장이 유도되는 장점을 가지고 있다. 그러나 통상 파이프의 외면에는 가공 시 발생하는 압축 잔류응력이 걸리면서 균열성장이 지연되어 실제보다 긴 균열성장시간으로 나타나며 가공 상태에 따른 균열성장의 차이로부터 나타나는 데이터의 분산들로 인해 정확한 균열성장 저항성의 측정에 어려움이 있다.

현재, 기존의 저속균열성장시험의 단점들을 보완하기 위해 Fig. 3에 보인 바와 같이 파이프를 횡 방향으로 잘라낸 링 형태의 시편 내면에 초기 균열을 만들어 저속균열성장을 유도하는 NRT(Notched Ring Test, 이하 NRT)가 국내에서 개발되었고, NRT는 시편 내면에 초기균열을 만들고 3점 굽힘 하중을 가하여 저속균열성장을 유도하기 때문에 파이프가 가공 이력을 모두 수용하고, 시편의 제작 방법이 비교적 간단하며, 균일하고 정확한 초기 균열을 생성할 수 있고, 단순 인장/압축 시험장비가 활용되므로 다른 시험법들에 비해 경제적으로도 유리한 장점을 가지고 있다.

NRT는 현재 ISO에 저속 균열성장 시험 규격 상정을 요청한 상태이며, 기존의 저속균열성장특성 측정 시험법 중 가장 많이 활용되고 있는 NPT에 비하여 비교적 단시간 내에 신뢰성 있는 저속균열성장 저항성 측정 시험을 수행 할 수 있다는 것을 증명하기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 이 작업의 일환으로 하중적용방식이 서로 다른 NRT(집중하중)와 NPT(내압)의 저

속균열성장특성을 비교하기 위하여 유한요소법을 이용, NRT의 집중하중에 따른 Mode I에서의 응력확대계수(stress intensity factor, 이하  $K_I$ )값을 도출하고 이들을  $K_I$ - 시간 의 동일 공간에서 비교할 수 있는 방법을 제시하였다.

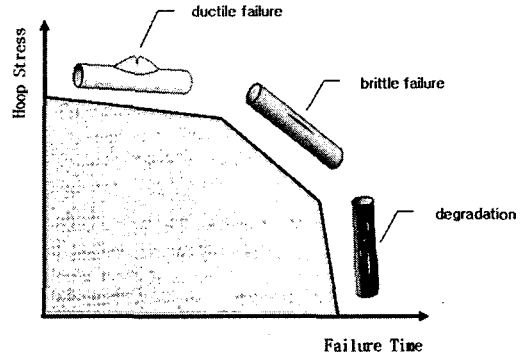


Fig. 1 Failure mode of pipe as a function of failure time

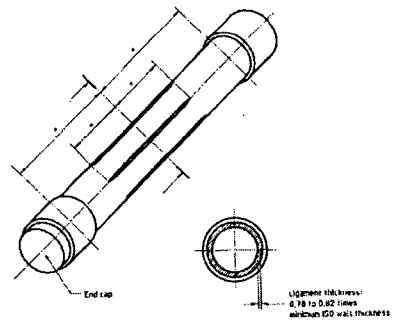


Fig. 2 ISO 13479 Notched Pipe Test specimen

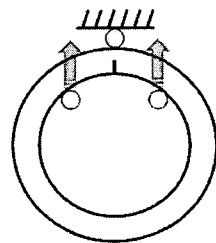


Fig. 3 Notched Ring Test specimen

한상배 외<sup>(4)</sup>와 장재순 외<sup>(5)</sup>는 각각 회전체 원판의 볼트구멍에 존재하는 균열의 경우와 CT시편의 경우에 유한요소법을 활용하여 응력확대계수를 계산하고 이론치와 비교하여 계산의 정확도를 입증한 바가 있다.

## 2. 접근 방법

NRT의 유한요소해석에 앞서 유한요소법을 활용한  $K_I$  값 계산에 대한 신뢰성 검토를 위하여 이미 해석적인 해가 알려져 있는 두 종류의 시편에 대해  $K_I$  값을 계산하고 이를 유한요소해석 결과와 비교하는 방법으로 유한요소해석의 정확성을 검증하였다.

### 2.1 이론식에 의한 응력확대계수

유한요소법의 신뢰성 검증을 위하여 저속 균열 성장 시험 시편과 유사한 두 가지 균열 시편을 선택하였다.

#### 2.1.1 3점 굽힘 하중을 받는 C-형 시편의 내면 모서리 균열<sup>(6)</sup>

Fig. 4에 나타낸 C-형 균열 시편은 하중 적용 방식이나, 파이프 내면의 초기 균열 위치 등이 NRT와 유사하다. 이 시편의 제원은 연구 중인 NRT 시편과 같도록 Table 1과 같이 결정하였고,  $K_I$  값은 식 (1)~(4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$K_I = \frac{L \cdot \tan \theta}{\sqrt{R_2} W} \left[ \frac{3R_1}{R_2} \left( \frac{t}{R_2} \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot Y_1 \cdot \sqrt{\frac{a}{t}} + \frac{1}{2} \left( \frac{t}{R_2} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot Y_2 \cdot \sqrt{\frac{a}{t}} \right] \quad (1)$$

여기서

$$\tan \theta = \frac{S}{2(R_2 - H) - D} \quad (2)$$

$$Y_1 = 1.93 - 3.07 \left( \frac{a}{t} \right)^1 + 14.53 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 25.11 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + 25.8 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \quad (3)$$

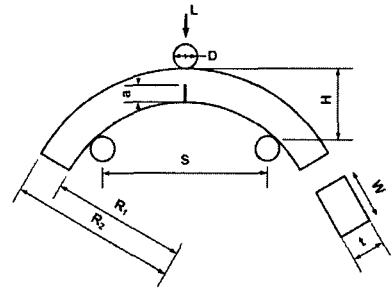


Fig. 4 C-shaped slow crack growth test specimen<sup>(6)</sup>

Table 1 Assigned geometric and loading configurations based on Fig. 4

|                |          |
|----------------|----------|
| L              | 150 N    |
| D              | 6 mm     |
| R <sub>2</sub> | 55 mm    |
| R <sub>1</sub> | 45 mm    |
| W              | 25 mm    |
| t              | 10 mm    |
| S              | 50 mm    |
| H              | 18.84 mm |
| a              | 3 mm     |

$$Y_2 = 1.99 - 0.41 \left( \frac{a}{t} \right)^1 + 18.7 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 38.48 \left( \frac{a}{t} \right)^3 + 53.85 \left( \frac{a}{t} \right)^4 \quad (4)$$

#### 2.1.2 균일 내압을 받는 파이프의 외면 모서리 균열<sup>(7)</sup>

Fig. 5에 나타낸 내압을 받는 파이프 균열 시편은 외부 균열의 개수를 제외하고는 단면 형상이 링(ring)형태인 것과, 균일한 내압을 받는 것 등이 NPT와 동일하기 때문에 검증 예제로 선택 하였다. 이 시편의 제원은 시험 중인 NPT 시편과 같게 결정하였고, Table 2에 표시하였다.  $K_I$  값은 Fig. 5에 표시된 식을 이용하여 구하였다.

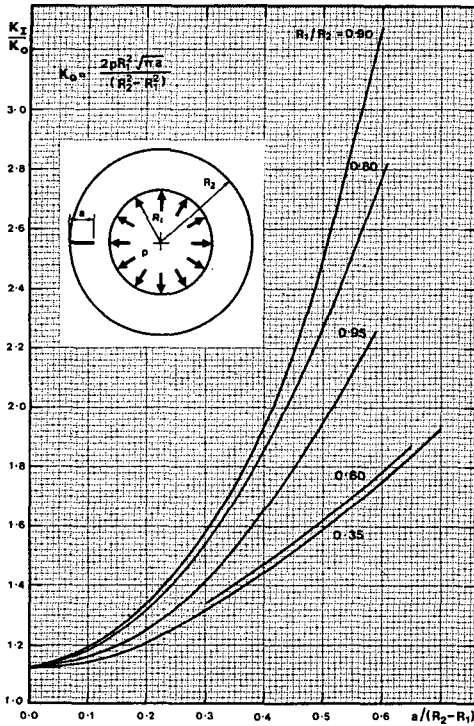


Fig. 5  $K_I$  for an external radial edge crack in a tube subjected to a uniform internal pressure<sup>(7)</sup>

Table 2 Assigned geometric and pressure configurations based on Fig. 5

|       |       |
|-------|-------|
| p     | 3 MPa |
| $R_2$ | 55 mm |
| $R_1$ | 45 mm |
| a     | 2 mm  |

2.2 유한요소해석에 의한 응력확대계수 계산

균열문제 해석을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(8)</sup>를 이용하였다. 선형탄성 파괴역학영역에서  $K_I$ 를 구하기 위하여,  $J$  적분을 이용하였다.  $J$  적분을 위한 적분 경로의 수를 사용자가 결정하면 적분경로가 지나는 요소를 프로그램이 자동으로 선택하여 각 요소에 대하여 수치적분을 취함으로써  $J$  적분 값을 구할 수 있고,  $K_I$ 은 식 (5)를 이용하여 계산한다.<sup>(9)</sup>

$$J = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2G} K_{III}^2 \quad (5)$$

여기에서 :

$$\bar{E} = \begin{cases} E & : \text{평면응력} \\ \frac{E}{(1-\nu^2)} & : \text{평면변형률} \end{cases}$$

하중형태가 Mode I에 해당하는 경우, Mode II와 Mode III는 소거되고 결국 Mode I에 대한 응력확대계수  $K_I$ 을 구할 수 있게 된다. 이 방법은 적분경로에 독립인 특성을 갖기 때문에 거친 요소분할을 가지고도 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 균열 선단의 특이성을 고려할 경우 그렇지 않을 경우에 비하여 더 정확한  $J$  적분 값을 얻을 수 있다.<sup>(10)</sup> 특이성은 균열 선단에서의 절점들을 함침으로써 사각형 요소를 삼각형 퇴행요소(degenerative element)로 만들고 가운데 변의 절점을 균열 선단 방향으로 1/4 지점으로 이동시킴으로써(quarter node point) 대처할 수 있으며 이렇게 해서 수치적 정확성을 높일 수 있다. 따라서 균열 선단의 특이성을 고려한 경우와 특이성을 고려하지 않은 경우, 그리고 균열 주위 요소 밀도에 따른 해석의 정확도를 살펴보기 위하여 HyperMesh<sup>(11)</sup>를 활용하여, 사각형 요소(Rectangular element), 사각형 특이요소(Rectangular element and quarter node point), 사각형 세밀한 요소(Refined rectangular element), 퇴행 삼각형 특이요소(Degenerative triangular element and quarter node point) 등, 네 가지 형태로 균열 주위에 유한요소를 생성하였다.  $J$  적분은 균열 주위의 적분 경로에 독립이지만, 균열선단의 특이성 때문에 첫 번째 윤곽선(contour)에서의  $J$  적분 값은 상대적으로 정확하지 않아 제외하였다. 여러 번의 계산을 통해, 대부분의 경우 두 번째 윤곽선부터 다섯 번째 윤곽선에서의 값들이 유사함을 확인하고, 이들을 선별해서 평균값을 취하여  $K_I$ 으로 결정하였다.

2.2.1 3점 굽힘 하중을 받는 C-형 시편의 내면 모서리 균열

대칭경계조건을 이용할 수 있으므로 유한요소 모델은 Fig. 6과 같이 전체 시편의 1/2에 대하여 유한요소를 생성하였다. 시편의 재질은 고밀도

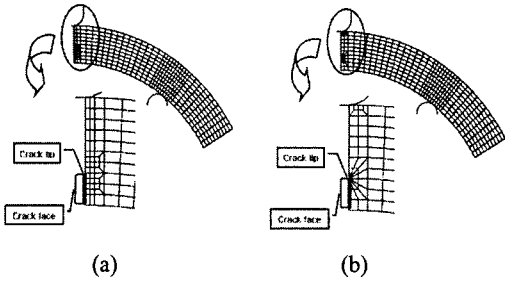


Fig. 6 Finite-element meshes for C-shaped slow crack growth test specimen; (a) Isoparametric rectangular elements only, (b) Degenerative elements around the crack tip

Table 3 Number of elements for C-shaped slow crack growth test specimen

| Element Type | Mesh Type            | Number of elements |
|--------------|----------------------|--------------------|
| CPE8         | Rectangular          | 414                |
|              | Rectangular and qnp  | 414                |
|              | Refined rectangular  | 1,150              |
|              | Degenerative and qnp | 410                |

qnp: quarter node point

폴리에틸렌(polyethylene) PE100와 동일하게 하여 탄성계수  $E = 540 \text{ MPa}$ , 푸아송 비  $\nu = 0.43$ 을 적용하였다. 시험을 눌러 하중을 가할 하중 편과 시험편을 받쳐주는 지지 편은 강(steel)이므로, 강체(rigid body)로 가정하여 강체요소를 적용하였다. Fig. 4에 보인 C-형 시험편은 재료의 마찰 계수에 따라 하중 및 지지 편 반력이 바뀔 수 있고, 이에 따라  $K_I$  값이 상이하게 산출될 수 있다. 그러나 참고문헌의 식은 어떤 재료의 시험편을 사용하여 도출된 것인지 알려지지 않았으므로 몇 번의 전산 실험을 거쳐 마찰 계수를 0.1로 가정하였다. Fig. 6에 요소분할의 형태를 예로서 보여주고 있으며, 각 경우에 대하여 생성된 요소의 수는 Table 3과 같다.

2.2.2 균일 내압을 받는 파이프의 외면 모서리 균열

역시 대칭경계조건을 이용할 수 있으므로 전체 시험편의 1/2에 대하여 유한요소를 생성하였다.

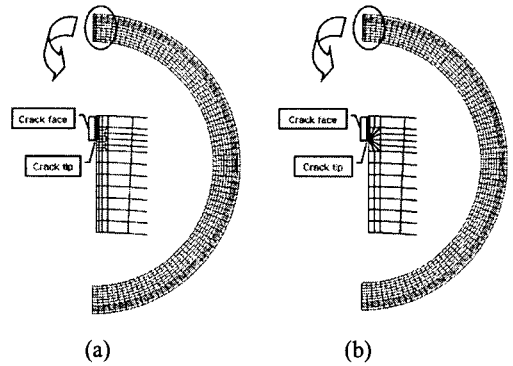


Fig. 7 Finite-element meshes for an external radial edge crack in a tube subjected to a uniform internal pressure; (a) Isoparametric rectangular elements only, (b) Degenerative elements around the crack tip

Table 4 Number of elements for an external radial edge crack in a tube subjected to a uniform internal pressure

| Element Type | Mesh Type            | Number of elements |
|--------------|----------------------|--------------------|
| CPE8         | Rectangular          | 1,012              |
|              | Rectangular and qnp  | 1,012              |
|              | Refined rectangular  | 1,468              |
|              | Degenerative and qnp | 992                |

시험편의 재질은 C형 시험편의 경우와 동일하다. Fig. 7에 요소 분할의 형태를 예로서 보여주고 있으며, 각 경우에 대하여 생성된 요소의 수는 Table 4와 같다.

2.3 이론식과 유한요소해석 결과 비교

2.3.1 3점 굽힘 하중을 받는 C-형 시험편의 내면 모서리 균열

유한요소해석 결과와 식 (1)의 이론식을 사용하여 계산한  $K_I$  값을 Table 5에 나타내어 비교하였다. 특이성을 고려하지 않은 사각형 요소만의 경우 오차율이 2.75 %로 가장 큰 것을 알 수 있고, 세밀한 요소분할의 경우에는 오차율이 0.92 %로 이론값과 가장 가까운 것을 볼 수 있다. 또 특이요소를 이용한 경우를 살펴보면 상대적으로 적은

요소수를 이용하고도 이론값과의 오차율이 1.07%로 매우 근사한 해석결과를 얻었다. 이는 균열 선단에서 특이요소를 이용하면 적은 요소수를 가지고도 비교적 정확한 값을 얻을 수 있음을 보여준다.

2.3.2 균열 내압을 받는 파이프의 반경반향 모서리 균열

Fig. 5에 주어진 식은 완화법(relaxation method)을 사용하여 오차가 3%이내가 되도록 구한 것이기 때문에<sup>(7)</sup> 기준치를 일정 범위 값으로 나타냈다. 유한요소해석 결과와 식 (5)의 이론식을 사용하여 계산한  $K_I$  값을 비교하면, Table 6에서 보는 바와 같이 모든 경우에 있어서 이론값의 오차 범위에 들며, 또한 해석 결과 값이 요소의 수가 증가하거나 특이성을 고려할 때 일정 값에 수렴해가므로, 해석결과가 타당하다고 판단된다. 이 경우에서도 앞의 경우와 마찬가지로, 균열선단에서 특이요소를 이용하면 보다 적은 요소수를 가지고도 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

Table 5 Values of  $K_I$  for C-shaped slow crack growth test specimen

| Mesh Type            | $K_I$ (MPa·m <sup>0.5</sup> ) |        | Error (%) |
|----------------------|-------------------------------|--------|-----------|
|                      | Reference <sup>(6)</sup>      | ABAQUS |           |
| Rectangular          | 0.654                         | 0.636  | 2.75      |
| Rectangular and qnp  |                               | 0.645  | 1.38      |
| Refined rectangular  |                               | 0.648  | 0.92      |
| Degenerative and qnp |                               | 0.647  | 1.07      |

Table 6 Values of  $K_I$  for an external radial edge crack in a tube subjected to a uniform internal pressure

| Mesh Type            | $K_I$ (MPa·m <sup>0.5</sup> ) |        |
|----------------------|-------------------------------|--------|
|                      | Reference <sup>(7)</sup>      | ABAQUS |
| Rectangular          | 1.237<br>~ 1.314              | 1.287  |
| Rectangular and qnp  |                               | 1.301  |
| Refined rectangular  |                               | 1.298  |
| Degenerative and qnp |                               | 1.282  |

3. NRT의 유한요소해석

지금까지 두 종류의 균열을 가진 시편에 대해 균열선단에서의 응력확대계수를 발표된 이론식과 유한요소로 계산하였고 그 결과를 서로 비교하였으며, 특이요소를 균열선단 주위에 포진시키고 비교적 적은 수의 요소를 사용하여 계산한  $K_I$  값이 이론식과 거의 정확히 일치함을 확인하여 이후에 유한요소법으로 구하는 응력확대계수가 충분히 정확할 것임을 예측할 수 있었다. 이를 바탕으로 NRT의 유한요소해석을 수행하되, 동일한 방법으로 균열선단에 특이요소를 생성하였고, 해석결과의 신뢰성 검토와 2차원 해석시 평면변형을 가정이 타당함을 평가하기 위하여 2차원과 3차원 두 경우로 해석하였다. 3차원 모델링은 HyperMesh와 ZenCrack<sup>(12)</sup>으로 수행하였다.

NRT에서는 NPT에서와 마찬가지로, 초기 균열을 만든 후에 하중 또는 압력을 가하면 Fig. 8과 같은 플라스틱 재료 특유의 블런팅 현상이 먼저 일어나고, 이 후에 균열이 개시되고 성장하는데, 두 시험 모두 저속균열성장에 대한 저항성을 측정하는 것을 목적으로 하는 것이기 때문에, 균열 개시 이후의 성장현상은 고려하지 않았다. 또한 본 연구에서는 주어진 기하 형상에서의  $K_I$ 을 구하는 것이 목적이었기에, 블런팅 과정을 제외하고 선형탄성 파괴역학을 고려하는 응력 해석만을 수행하였다.

3.1 2차원 및 3차원 유한요소해석

NRT의 제원을 Fig. 9와 Table 7에 보였다. 대칭 경계조건을 이용하여 Fig. 10과 같이 유한요소를 생성하였다.

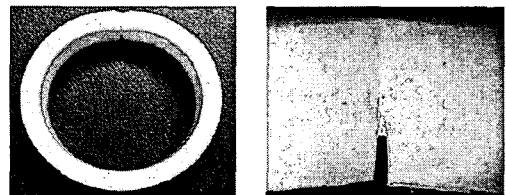


Fig. 8 NRT specimen illustrating the slow crack growth

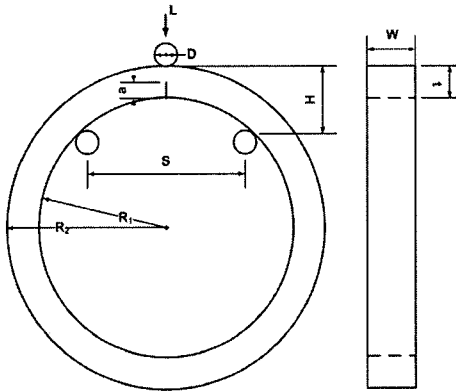


Fig. 9 NRT specimen geometry

Table 7 Geometric and Load configurations for Fig. 9

|                |           |
|----------------|-----------|
| L              | 0 ~ 250 N |
| D              | 6 mm      |
| R <sub>2</sub> | 55 mm     |
| R <sub>1</sub> | 45 mm     |
| W              | 25 mm     |
| t              | 10 mm     |
| S              | 50 mm     |
| H              | 18.84 mm  |
| a              | 3 mm      |

시험편의 재질은 고밀도 폴리에틸렌(polyethylene) PE100으로 하여 탄성계수  $E = 540 \text{ MPa}$ , 푸아송비  $\nu = 0.43$ 을 적용하였다. 시험편을 눌러 하중을 가할 하중 핀과 시험편을 받쳐주는 지지 핀의 재질은 스테인리스강(stainless steel)이므로, 강체(rigid body)로 가정하여 강체요소를 적용하였다. 강과 폴리에틸렌 사이의 마찰 계수는 0.1~0.28 사이로 발표된 바 있으나,<sup>(13)</sup> Carter<sup>(14)</sup>는 특별히 DIN 53 375에 따른 실험결과로서 PE100의 마찰계수를 0.02로 발표하여 이 수치를 사용하였다. 생성된 요소의 수는 평면변형률 문제로 가정한 2차원의 경우 810개이고, 3차원의 경우는 2,321개 이다.

3.2 해석결과 및 고찰

Fig. 11에서 NRT의 2차원과 3차원 해석 결과를 살펴보면 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 NRT시험편의 해석결과가 비교적 정확하고, 2차원 평면변형률 가정이 유효한 것을 입증한다.

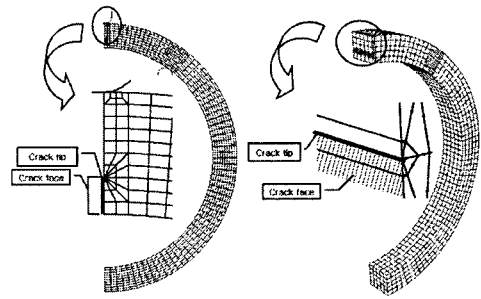


Fig. 10 Finite-element meshes for NRT specimen; (a) Two dimensional and (b) Three dimensional modeling

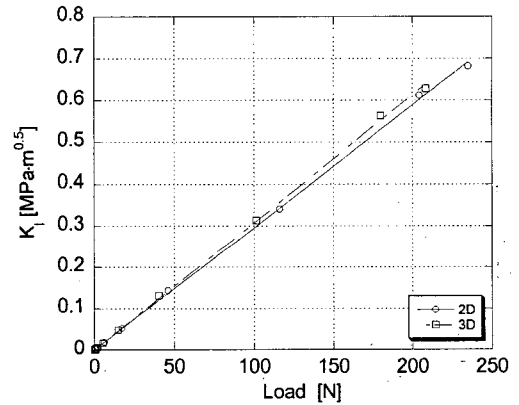


Fig. 11  $K_I$  vs. Load for NRT with two dimensional (2D) and three dimensional(3D) finite-element method

2차원 유한요소해석으로부터 산출된  $K_I$  과 하중(L: load)간의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$K_I = 0.002942 \cdot L \quad (6)$$

4. NRT와 NPT의  $K_I$  값의 응용

앞서 서론에서 기술한 바와 같이 NRT는 기존의 플라스틱 파이프의 저속균열성장특성 측정 시험의 몇 가지 문제점과 단점을 보완하기 위하여 국내에서 처음으로 개발되고 있는 시험법이고 현재 ISO에 본 규격을 제출한 상태로, 기존 시험 규격 중 가장 많이 이용되는 NPT에 비하여 그 우수성을 입증하고자, NRT와 NPT를 비교하는 연

구가 수행되고 있다. Figs. 12와 13의 그래프들은 각각 NRT와 NPT의 실제 저속균열성장 저항성 측정시험 결과로서, 각각 시편에 걸리는 하중( $L$ : load)과 내압( $P$ : internal pressure)에 대한 파손까지의 시간을 나타낸 것이다. 이렇게 하중방식이 다르므로 인하여, 이들 결과를 직접적으로 동일 공간에서 비교 할 수 없다. 따라서 각 시편의 균열 선단에서의 응력확대계수  $K_I$ 을 활용하여 NRT와 NPT를  $K_I$  대 파손까지의 시간( $t$ )으로 나타냄으로써, 동일 공간에서 비교할 수 있게 하였다. 즉,  $m$ 을 직선의 기울기라면,

$$m_{NRT} = \frac{d(\log L)}{d(\log t)} \quad (7)$$

$$m_{NPT} = \frac{d(\log P)}{d(\log t)} \quad (8)$$

이 되고, 두 경우 모두  $K_I$ 을 시간에 관한 함수로 표시하기 위하여 다음과 같은 관계를 활용한다.

$$\frac{d(\log K_I)_{NRT}}{d(\log t)} = \frac{d(\log K_I)_{NRT}}{d(\log L)} \cdot \frac{d(\log L)}{d(\log t)} \quad (9)$$

$$\frac{d(\log K_I)_{NPT}}{d(\log t)} = \frac{d(\log K_I)_{NPT}}{d(\log P)} \cdot \frac{d(\log P)}{d(\log t)} \quad (10)$$

NPT를 유한요소법으로 해석해 본 결과,  $K_I$  값은 Fig. 5에 주어진 식에서 나온 결과와 거의 유사함을 확인하였다.<sup>(15)</sup> 이는 비록 균열의 수가 다르더라도, 환방향의 응력이 동일하기 때문인 것으로 보인다. 실험에 적용한 체원에 대하여 Fig. 5로부터 다음과 같이 NPT의  $K_I$  대 내압의 관계식을 얻었다.

$$K_I = 0.4252 \cdot P \quad (11)$$

이제 식 (6)과 (11)을 이용하여 Figs. 12 및 13의 실험 결과로부터  $K_I$  값을 계산 한 후, 동일 영역에 함께 나타내면 Fig. 14와 같다.

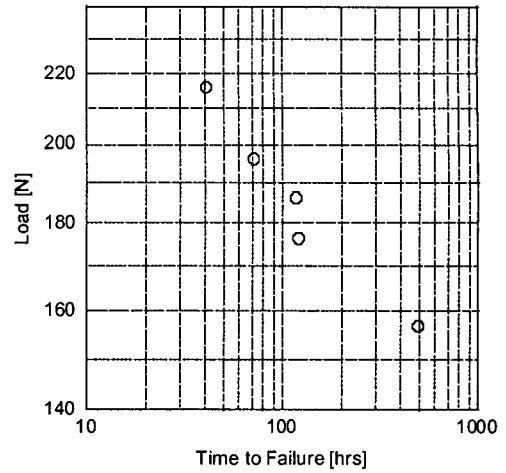


Fig. 12 Load vs. Time to Failure with NRT (Material: PE100)

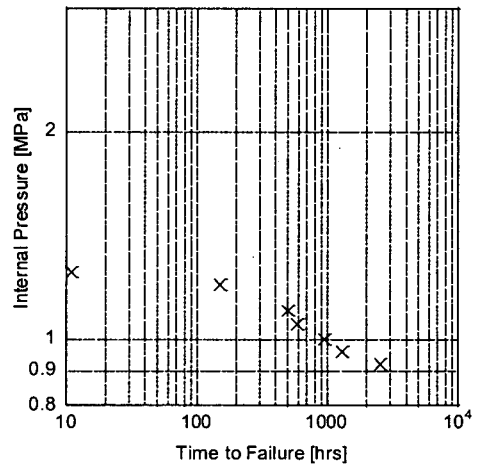


Fig. 13 Internal Pressure vs. Time to Failure with NPT (Material: PE100)

Fig. 14를 보면 NPT의 경우  $K_I$ 이 0.5 이하일 때, 파손까지의 시간이 100시간 혹은 그 이상이다.  $K_I$ 이 낮으면 이보다 훨씬 장시간에서 균열이 개시된다는 것을 알 수 있다. 반면에 NRT의 경우, SEM으로 균열단면을 관찰하여  $K_I = 0.6$ 이상인 경우에도 저속균열성장에 의한 취성파손이 일어난 것을 확인하였다.<sup>(15)</sup> 이는  $K_I$ 을 높이면(즉, 작용 하중을 높이면), NRT가 NPT보다 상대적으로 단시간 내에 저속균열성장에 의한 파손을 일으킬 수 있음을 보여준다.



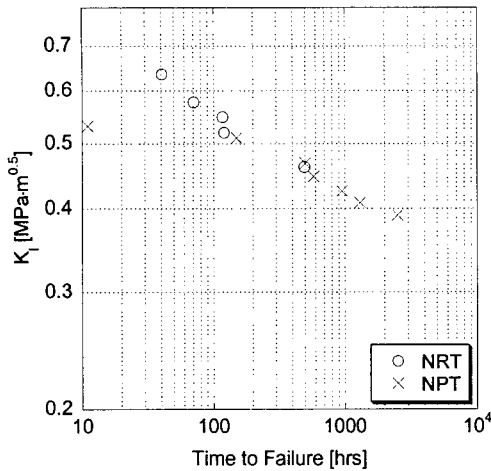


Fig. 14  $K_I$  vs. Time to Failure with NRT and NPT (Material: PE100)

참고로 Fig. 14에서, 단수명 영역(100 시간 이내)에서는 NPT와 NRT의 파손 양상이 달라 보이지만, 이와 같이 NPT의 연성 파괴영역에서 NRT가 저속균열성장을 나타내는 것은 시료 형상 그리고 균열에 대한 하중을 가하는 기하학적 형상이 균열 선단의 변형을 NPT보다 더욱 구속 시키는 이유라 생각된다. 플라스틱 파이프의 사용에 있어 장기 내구성의 안정성이 확보된 설계압력은 용도에 따라 다르지만 0.25 bar 에서 4 bar 범위로 비교적 낮은 압력이며, 따라서 실제로 사용 현장에서 관찰되는 파괴모드는 저속균열성장 모드이다. 연성 파괴영역은 본 연구의 대상이 아니지만 NRT 시료의 핵심인 가속 성능을 보여주기 위하여 포함시켰다.

### 5. 결론

(1) 유한요소법으로 NRT(Notched Ring Test) 및 NPT(Notched Pipe Test) 시험편의 균열선단에서의  $K_I$  값을 계산하였다. 우선 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 이론적으로  $K_I$  값이 알려져 있는 두 가지 균열 형상들을 선택하여 유한요소해석 결과와 비교하였다. 해석결과는 이에 상응하는 이론식 값과 허용오차 범위 안에서 일치하여 유한요소해석법을 활용하여 구하는  $K_I$  값이 비교적 정확할 것임을 예측하였다.

(2) 해석적으로 구할 수 없는 NRT 시험편의 균열선단에서의  $K_I$  값을 2차원 및 3차원 유한요소법을 활용하여 구하고, 이를 하중의 함수로 도출하였다. 이 과정에서 2차원 및 3차원 결과가 거의 동일함을 보임으로써 평면변형률을 가정한 2차원 결과가 거의 정확한 것임을 보였다.  $K_I$  함수를 이용하여 NRT가 NPT에 비하여 짧은 시간에 저속균열성장 저항성 측정시험을 할 수 있다는 증명이 가능하도록 동일공간에서의 실험 기준 변수를 제공하였다.

### 후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (R05-2004-000-10264-0)

### 참고문헌

- (1) ISO/TC 138/SC 5, 1997, "Polyolefin Pipes for the Conveyance of Fluids - Determination of Resistance to Crack Propagation - Test Method for Slow Crack Growth on Notched Pipes (Notch Test)," ISO, ISO 13479:1997(E).
- (2) Allwood, W. J. and Beech S. H., 1993, "The Development of the 'Notched Pipe Test' for the Assessment of the Slow Crack Growth Resistance of Polyethylene Pipe," *Construction and Building Materials*, Vol. 7, No. 3, pp. 157~162.
- (3) ISO/TC 138/SC 5, 1997, "Polyethylene Pipes - Resistance to Slow Crack Growth - Cone Test Method," ISO, ISO 13480:1997(E).
- (4) Han, S. B., Lee J. H. and Kim Y. J., 1993, "Finite Element Analysis of a Rotating Disc with a Corner Crack Original at the Bolt Holes," *Trans. of the KSME*, Vol. 12, No. 12, pp. 3055~3062.
- (5) Jang J. S., Yang W. H., Kim C., Ko M. H. and Cho, M. R., 2002, "Analysis of the Residual Stress due to Cold Expansion and Stress Intensity Factor in CT Specimen Using Finite Element Method," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 5, pp. 890~895.

- (6) Uralil, F. S. and Hulbert, L. E., 1985, "The Slow Crack Growth Test for Comparing and Selecting Polyethylene Gas Pipe Materials," *Topical Report*, Gas Research Institute(GRI), B22-B24.
- (7) Rooke, D. P. and Cartwright, D. J., 1976, *Compendium of Stress Intensity Factor*, London, Her Majesty's Stationary Office, pp. 240~241.
- (8) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 2001, *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.2.
- (9) Anderson, T. L., 1995, *Fracture Mechanics CRC Press, Inc.*, pp. 586~590.
- (10) ABAQUS, Inc., 2004, *Fracture Mechanics with ABAQUS*, Lecture Note.
- (11) Altair Computing Inc., 2002, *HyperMesh User's Manual Version 5.0*.
- (12) Zentech International Ltd., 2004, *Installation and Execution Manual for Zencrack, Version 7.3*.
- (13) Holmberg, K. and Wickström, G., 1987, "Friction and Wear of Polymers," *Wear*, Vol. 115, pp. 95~105.
- (14) Carter, B., 2000, "Use of Thermoplastics for Railroad Braking Systems," *The Air Brake Association Annual Technical Conference*, Chicago, IL, <http://www.asahi-america.com/pdf/RRBook.pdf>.
- (15) Suh, Y. S., 2005, "A Computational Study on the Crack Growth and the Determination of Stress Intensity Factors for NPT-ISO 13478 and NRT Slow Crack Growth Test Specimens", *Research Grants for Outstanding Professors of Provincial Universities, Final Report, R05-2004-000-10264-0*, Korea Research Foundation.