

## 밀림관 파단전누설 평가에 미치는 균열면 형상 매개변수의 영향

### Influences of Crack Morphology Parameters on the Leak-Before-Break Evaluation for Surge-line Piping

박원배, 박준수, 윤기석, 최택상  
한국전력기술(주)  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 연구에서는 원자력 배관계통의 파단전누설 평가에 있어서 균열면 형상 매개변수를 고려할 시 누설균열크기와 균열의 불안정 하중의 평가 결과에 나타나는 영향과 적용성을 분석하였다. 한국표준형원전 가압기 밀림관을 분석대상으로 해서 배관 파손기구로서 피로와 응력부식균열을 고려하고, 균열의 개구변위를 고려한 균열면 표면조도와 이에 따른 유동의 우회횟수를 적용하여 밀림관의 파단전누설 평가를 수행하였다. 분석결과에 따르면, 누설률 및 누설균열크기의 계산에 추가적으로 균열면 형상 매개변수들을 고려한다면 현행 규제지침에 따른 파단전누설 평가에서 설계여유도를 심각한 수준으로 저하시킬 수 있는 것으로 나타났다.

#### Abstract

In this study, an application of crack morphology parameters in the Leak-Before-Break(LBB) evaluation for nuclear piping systems is investigated, including influences on the leakage crack size and crack instability loads. The crack surface roughness and the number of flow turns as a function of the crack opening displacement are applied to LBB evaluations for KSNP pressurizer surge line, for which fatigue and stress corrosion cracking are considered as failure mechanisms. As a result, there would be a significant impact on safety margins to acceptance criteria for the surge line if crack morphology parameters are applied additionally to the current regulatory guide without re-analyses for justification of safety factors being applied on the leakage crack size and piping loads for evaluations.

## 1. 서 론

원자력발전소 배관계통에 적용하는 파단전누설(Leak-Before-Break, LBB) 개념은, 배관 내부 유체가 관통균열을 통하여 배관외부로 누설되면 인근 누설감지 설비에 의해 사전에 감지되어 양단순간파단(Double Ended Guillotine Break, DEGB)과 같은 극단적인 사고를 미연에 방지할 수 있다는 설계개념이다. 한국표준형원전(Korean Standard Nuclear Power Plant, KSNP) 가압기 밀림관계통에 파단전누설 설계개념을 적용하고 있다. 배관계통 파단전누설 평가 시, 누설감지 설비로 감지가 가능한 누설률(1시간 이내에 3.78 liter/min의 누설 감지)의 10배를 누설시키는 원주방향 관통균열을 누설균열크기(Leakage Crack Size)로 정의하며, 주어진 배관소재의 탄소성 파괴 저항성에 대해서 균열 불안정성을 평가한다. 배관계통 파단전누설 해석 시 누설균열크기는 균열 안정성 평가에 큰 영향을 미친다. 현행 규제지침은 누설률 계산 시 고려할 균열면 형상 매개변수(Crack Morphology Parameters)로서 표면조도만을 규정하고 있으며, 지금까지 밀림관계통 파단전누설 평가에서도 균열면 형상 매개변수로서 표면조도와 입구손실계수만을 적용해왔다.<sup>(1, 2)</sup>

최근 경수로 환경에서 응력부식균열 사례가 발생하였고(V.C. Summer 원전 고온관), 이를 계기로 해서 국내·외 규제기관에서는 누설률 평가 시 균열면 유동의 우회횟수(number of flow turns)를 고려하지 않음에 따른 누설률 평가의 비보수성을 우려하는 견해가 제기되었다.<sup>(3)</sup> 최근 연구에서는, 누설균열크기 및 파단전누설 평가에 직접적으로 영향을 미치는 균열면 형상 매개변수를 고려하는 방법과 절차가 제시되었다.<sup>(4, 5)</sup> 이 연구결과를 참고로 해서 본 논문에서는, 한국표준형원전 가압기 밀림관을 대상으로 균열개구변위(Crack Opening Displacement, COD)를 기초로 한 균열면 형상 매개변수 즉 표면조도와 유동의 우회횟수를 적용할 때 이것이 누설균열크기 및 파단전누설 평가결과에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 균열면 형상 매개변수를 고려한 누설균열크기 계산

### COD를 고려한 균열면 형상 매개변수

배관계통의 파단전누설 평가 시 누설균열크기 결정에 영향을 미치는 주요 균열면 형상 매개변수에는 균열면의 표면조도, 균열을 통한 누설유로에서 발생하는 유동의 45도 및 90도 우회횟수, 균열입구의 유동손실계수 등이 있다. 특히 유동의 우회횟수의 영향은 응력부식균열(stress corrosion crack, SCC)에서 상대적으로 크게 나타나지만, 상대적으로 평평한 단면을 가진 피로균열의 경우에서도 영향이 있는 것으로 실험적으로 확인되었다.<sup>(6)</sup> 균열면 형상 매개변수 중 표면조도와 유동의 우회횟수 개략도를 그림 1에 제시하고, 가압기 밀림관용 스테인레스강 및 균열발생기구에 대한 균열면 형상 매개변수의 통계 평균값을 표 1에 요약하였다.<sup>(5)</sup>

지금까지 밀립관 파단전누설 해석에 적용된 균열면 형상 매개변수는 균열개구변위의 영향이 고려되지 않은 값들이다. COD에 무관한 균열면 형상 매개변수 결정방법으로서, 표면조도를 입계응력부식균열(IGSCC) 및 피로균열에 대하여 각각 일정한 상수값을 적용하거나, 또는 금속의 조직 및 금속입자의 크기를 이용하여 계산하는 방법 등이 제시된 바 있다.<sup>(6, 9)</sup>

한편 기존 파단전누설 평가에서는 PICEP 프로그램에 제시된 기본값을 따르고 있다. 균열면 형상 매개변수로서, 균열발생기구에 상관없이 누설유로를 자세히 알 수 없을 경우로 해서 표면조도를 0.0005 cm로 적용하며 피로균열을 가정하여 유동의 우회횟수를 고려하지 않으며 균열입구 손실계수는 그 기본값을 0.61로 적용한다.

본 연구에서는, 기존과는 다르게 균열면 형상 매개변수에 균열개구변위의 영향을 고려한 평가를 시도하고자 한다. 균열면 표면조도( $\mu$ )는 식(1)과 같이 국부표면조도( $\mu_L$ ), 전체표면조도( $\mu_G$ ) 및 중심부 균열개구변위( $\delta$ )를 이용하여 표현되며, 유동의 우회횟수( $n_t$ )는 국부우회횟수( $n_{tL}$ )를 이용하여 식(2)와 같이 표현된다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_L, & 0.0 < \frac{\delta}{\mu_G} < 0.1 \\ \mu &= \mu_L + \frac{\mu_G - \mu_L}{9.9} \left( \frac{\delta}{\mu_G} - 0.1 \right), & 0.1 < \frac{\delta}{\mu_G} < 10 \\ \mu &= \mu_G, & \frac{\delta}{\mu_G} > 10 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n_t &= n_{tL}, & 0.0 < \frac{\delta}{\mu_G} < 0.1 \\ n_t &= n_{tL} - \frac{n_{tL}}{11} \left( \frac{\delta}{\mu_G} - 0.1 \right), & 0.1 < \frac{\delta}{\mu_G} < 10 \\ n_t &= 0.1n_{tL}, & \frac{\delta}{\mu_G} > 10 \end{aligned} \quad (2)$$

전체표면조도로 정규화된 균열개구변위값( $\delta/\mu_G$ )에 대하여 위식 (1)과 (2)의 표면조도와 유동의 우회횟수를 그림 2에 각각 나타냈다. 그림 2에서,  $\delta/\mu_G$  값이 0.1 이하로 COD가 매우 작을 경우 유효표면조도는 국부표면조도에 좌우되나, 반면  $\delta/\mu_G$  값이 10 이상으로 COD가 클 경우에는 유효표면조도가 전체표면조도에 좌우되는데 다시 말하면 COD가 커짐에 따라 표면조도 또한 커짐을 알 수 있다. 한편,  $\delta/\mu_G$  값이 10 이상으로 COD가 큰 경우 상대적으로 COD가 아주 작은 경우에 비해 그 값이 1/10 정도로 COD가 작아짐에 따라 유동우회횟수는 상대적으로 커짐을 볼 수 있다. 또 다른 매개변수인 균열입구 손실계수의 경우, 균열입구 모서리의 반경이 COD의 1/6이상일 경우를 둥근 모서리로 가정하고

이것을 피로균열에 의해 발생하는 것으로 하여 그 기본값으로 0.62를 적용한다. 반면에 COD값이 0.015 cm 이하의 좁은 균열 또는 균열입구 모서리를 날카롭게 하는 입계응력 부식균열의 경우에는 0.95를 기본값으로 한다.

COD가 균열면 형상 매개변수에 미치는 영향을 보기 위해 그림 2에서  $\delta/\mu_G$ 를 0.1과 10 사이에서 총 7개의 임의점 값으로 취하여 표 1의 입계응력부식균열 및 피로균열 각각에 대한 균열면 형상 매개변수 통계평균값을 이용하여 식 (1)과 (2)로부터 이들 선택점들에 대하여 구한 표면조도 및 유동의 우회횟수를 구하고 그 결과를 그림 3에 도시하였다. 그림 3에서,  $\delta/\mu_G$ 값이 커질수록 즉 COD가 클수록 유동우회횟수는 감소하나 표면조도는 상대적으로 증가하였으며, 특히 피로균열에 비해 입계응력부식균열의 경우에 그 감소량 및 증가량의 변화가 더욱 심하다. 한편,  $\delta/\mu_G$ 의 전구간 내에서 유동의 우회횟수는 피로균열보다 입계응력부식균열의 경우에서 항상 높았으며 COD가 작을수록 큰 차이를 보였으나, COD가 커짐에 따라 그 차는 감소한다. 표면조도는  $\delta/\mu_G$ 값이 1이하의 작은 COD에서는 피로균열의 경우가 더 높았으나 1이상이 되면 입계응력부식균열에서 그 값이 더욱 크다.

한국표준형원전 가압기 밀림관에 대하여 정상운전 하중값으로 76,260 N-m 작용 시, PICEP 프로그램에서 계산된 누설률(37.8 liter/min)에서의 균열개구변위값으로 0.015 cm를 적용하여 입계응력부식균열 및 피로균열에 대한 균열면 형상 매개변수를 구하고 그 결과를 표 2에 요약하고 COD를 고려하지 않은 PICEP 프로그램의 균열면 형상 매개변수 값과 비교하였다. COD를 고려하여 계산된 균열면 형상 매개변수는 균열발생기구에 관계 없이 기존 PICEP 프로그램의 균열면 형상 매개변수값보다 크게 나타났다.

#### 균열면 형상 매개변수를 적용한 누설균열크기 계산

누설평가 전산코드로 공인된 PICEP 프로그램을 사용하여 누설균열크기를 구한다.<sup>(8)</sup> 이 프로그램을 사용하여 균열크기 및 균열개구변위의 계산을 위한 탄소성 파괴역학 모듈과 누설률 평가를 위한 유체역학 모듈을 동시에 구현할 수 있으며, 누설률 평가를 위한 열수력학적 모델로는 Henry의 균질 비평형 이상입계유동 모델을 가정한다. 유체역학 모듈에서는 내경 및 외경에서의 균열크기 변화를 고려하나, 균열개구변위 계산에서는 단지 내경에서의 균열크기만을 사용한다. 한편, PICEP 프로그램은 배관을 구성하는 재료의 응력-변형률 곡선(Ramberg-Osgood식 계수 및 인장물성치), 배관 운전온도, 운전압력, 균열의 형상 및 배관크기 등을 입력으로 하여 균열개구변위 및 누설률을 계산하게 된다. PICEP 프로그램의 입력으로 사용되는 주요변수를 표 3에 기술하였다.

그림 2로부터 선택한 총 7개의 점에 대하여 계산된 균열면 형상 매개변수값을 적용하여 입계응력부식균열 및 피로균열 각 경우에 37.8 liter/min의 누설을 유발하는 균열의 크기를 PICEP프로그램으로 각각 구하여 그 결과를 그림 4에 도시하였다. PICEP프로그램의 입력으로서 기존 가압기 밀림관 파단전누설 평가에 사용하였던 값을 사용하였다.  $\delta/\mu_G$ 에 대한 누설균열크기에 있어서, 입계응력부식균열의 경우 피로균열에 비해 29%~35% 정도

크게 나타났으며 또한 입계응력부식균열 및 피로균열 조건에 대해 누설균열크기 차이는  $\delta/\mu_G = 0.1$ 과 10사이의 구간에서 12%~16% 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 이는 COD에 따라서 표면조도 및 유동우회횟수가 서로 상반되는 방향으로 작용한 결과로 판단된다. 그림 2의  $\delta/\mu_G = 1.88$  및 4.47 지점은 각각 KSNP 가압기 밀림관의 입계응력부식균열 및 피로균열 조건에 해당하는 점으로, 이들 점에서 구한 가압기 밀림관의 총 누설균열크기는 각각 27.29 cm와 20.16 cm이다. 결과적으로, KSNP 가압기 밀림관에 COD의 영향을 고려한 입계응력부식균열 및 피로균열을 가정 시, 누설균열크기가 기존의 15.72 cm보다 크게 증가함을 알 수 있다.

### 3. 균열면 형상 매개변수를 적용한 밀림관 파단전누설 평가

#### 해석 방법

가압기 밀림관은 직경 30.48 cm 두께 3.33 cm의 Type 347 스테인레스강 배관이다. 파단전누설 평가 시, 배관계에서 가장 큰 응력이 작용하는 지점에서 원주방향 관통균열을 가정하고 이 부위에 정상운전하중 하에서 37.8 liter/min의 누설을 유발하는 균열크기를 결정하고 이 균열의 안정성을 확인한다.<sup>(1, 2)</sup>

밀림관의 파단전누설 해석용으로 20절점 입방요소(solid element)를 사용하여 총 199 개 요소와 총 1,302 개 절점으로 구성된 3차원 유한요소 망이 그림 5에 제시되어 있다. 기하학적 대칭성을 고려하여 전체 배관의 1/4 모델로 작성되었으며, 작용하중으로는 배관내의 운전압력과 배관 양단의 굽힘모멘트를 고려하였다. 파단전누설 해석에 적용된 원주방향 관통균열의 크기는 입계응력부식균열과 피로균열 조건에서 누설균열크기의 반으로 즉 각각 13.64 cm 와 10.08 cm이며, 이를 균열의 각도로 환산하면 각각 54도와 40도가 된다(기존의 균열길이 및 균열각은 각각 7.86 cm와 31도임). 유한요소 해석에 사용된 밀림관용 Type 347 스테인레스강의 물성값으로 탄성계수  $E = 175,170$  Mpa, 항복강도  $S_y = 120$  Mpa이며, 유한요소 해석 프로그램으로 CEMARC<sup>(10)</sup>를 사용하였다.

#### 평가 결과

입계응력부식균열 및 피로균열 조건에 대해 계산된 밀림관의 누설균열크기로서 13.64 cm 및 10.08 cm 관통균열이 존재할 경우, 균열의 안정성 평가를 수행하기 위하여 탄소성 유한요소 해석을 수행하였으며 그 결과를 그림 6에 나타냈다. 하나의 동일한 재료 파괴저항 곡선에 대하여 균열면 형상 매개변수를 적용한 경우와 그렇지 않은 기존의 해석 결과를 비교하였다. 그림 6에서, 적용하중에 의한 J적분(integral) 및 찢김계수(tearing modulus) 값이 재료의 J적분 및 찢김계수 값과 같아지는 교차점을 균열 불안정점으로 할 때, 기존의 작용하중이 약 369,000 N-m이나, 피로균열 및 입계응력부식균열에 대해서 균

열면 형상 매개변수를 적용한 결과 각각 311,000 N-m와 228,000 N-m 즉 약 90%와 62% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해서, 한국표준형원전 가압기 밀림관을 대상으로 해서 균열개구변위를 고려한 균열면 형상 매개변수로서 표면조도와 유동의 우회횟수를 적용하여 이들이 누설균열 크기 및 파단전누설 평가결과에 미치는 영향을 평가검토한 결과는 아래와 같다.

1. 기존 평가결과에 비해서 입계응력부식균열의 경우 최대 16% 피로균열의 경우 최대 12%까지 누설균열크기가 증가한 한편, 균열 불안정 하중에 있어서는 각각 62%와 90% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.
2. 입계응력부식균열의 경우 균열 불안정 하중이 균열면의 형상 매개변수에 민감하여 파단전누설 설계여유도가 기존의 평가방법에 의한 경우보다 크게 감소하였다. 피로균열의 경우에는 상대적으로 덜 민감한 것으로 나타났다.
3. 밀림관의 파단전누설 평가에 표면조도와 유동의 우회횟수를 균열면 형상 매개변수로서 적용하기 위해서는, 기존의 규제지침에 따른 감지가능 누설률, 누설균열크기, 하중 등에 적용하는 안전계수의 재평가가 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] "Evaluation of Potential for Pipe Breaks," USNRC Report NUREG-1061, Vol.3, November 1984.
- [2] "Leak-Before-Break Evaluation Procedures," USNRC draft Standard Review Plan 3.6.3, August 1987.
- [3] KNPP Docket 50-305, Responses to NRC Request for Additional Information Concerning Leak Before Break Analysis for Kewaunee Nuclear Power Plant, June 24, 2002.
- [4] Scott, P.M., and others, "Development of Technical Basis for Leak-Before-Break Evaluation Procedures," NUREG/CR-6765, May 2002.
- [5] Rahman, S., and others, "Probabilistic Pipe Fracture Evaluations for Leak Rate Detection Applications," NUREG/CR-6004, April 1995.

- [6] Paul, D.D., and others, "Evaluation and Refinement of Leak-Rate Estimation Models," NUREG/CR-5128, Rev.1, June 1994.
- [7] "Reactor Coolant Pressure Boundary Leakage Detection Systems," USNRC Reg. Guide 1.45, May 1973.
- [8] Norris, D.M. and Chexal, B., "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program," EPRI Report NP-3596-SR, Revision 1, December 1987.
- [9] "Steam Generator Tube Leakage Experiments and PICEP Correlations," EPRI Report NP-6897-L, July 1990.
- [10] ABB-CE, CEMARC Ver.1, CEMARC Computer Program, User's Manual, 1988.

표 1. 균열면 형상 매개변수의 통계평균값

재질 및 균열발생기구	국부표면조도 $\mu_L(\text{cm})$	전체표면조도 $\mu_G(\text{cm})$	유동 우회횟수 $n_{\text{fl}}(\text{cm}^{-1})$
스테인레스강, 응력부식균열	0.00047	0.008	282
스테인레스강, 피로	0.0008	0.0034	25

표 2. LBB평가에 적용된 균열면 형상 매개변수값 비교표

균열면 형상 매개변수	PICEP Rev.1 입력값	균열면 형상 매개변수 계산값	
		입계응력부식균열	피로균열
표면조도(cm)	0.0005	0.0018	0.0019
유동의 90도우회횟수( $\text{cm}^{-1}$ )	0	237	15
입구손실계수	0.61	0.95	0.62

표 3. PICEP전산코드 프로그램 주요입력 변수

종류	입력 내용
기하학적 형상	배관 외경 및 두께
재질 특성	탄성계수, 항복강도, Ramberg-Osgood 상수( $a, n$ )
열수력 특성	배관 운전압력 및 온도
균열면 형상 매개변수	균열면 조도, 유동 우회횟수 및 입구손실계수



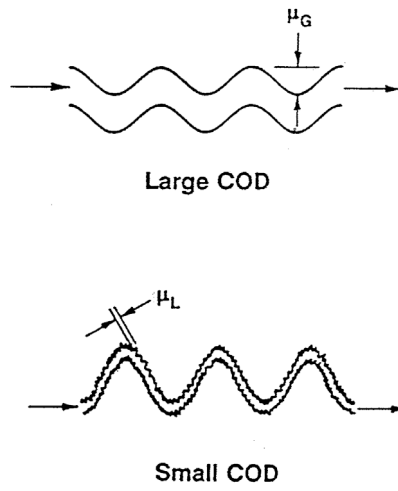


그림 1. 균열면의 전체 또는 국부표면조도와 유동 우회횟수 개략도

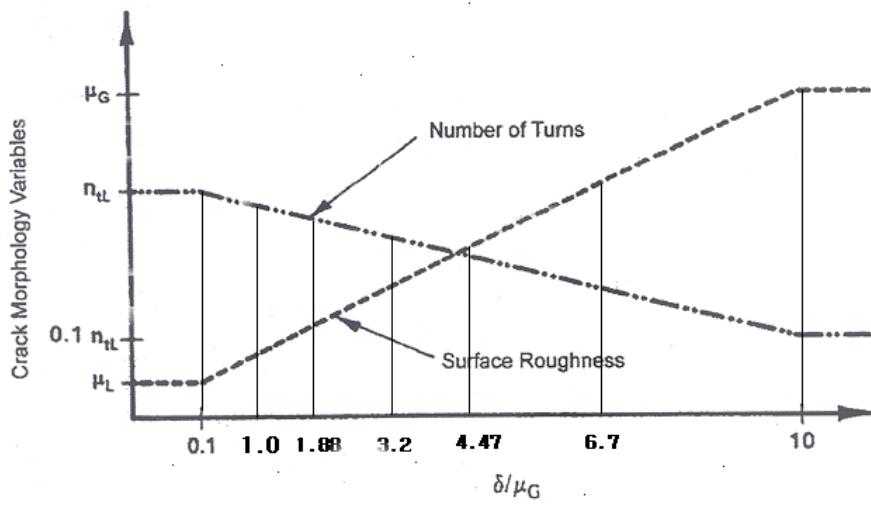


그림 2. 정규화된 균열개구변위에 대한 균열면 형상 매개변수 선도

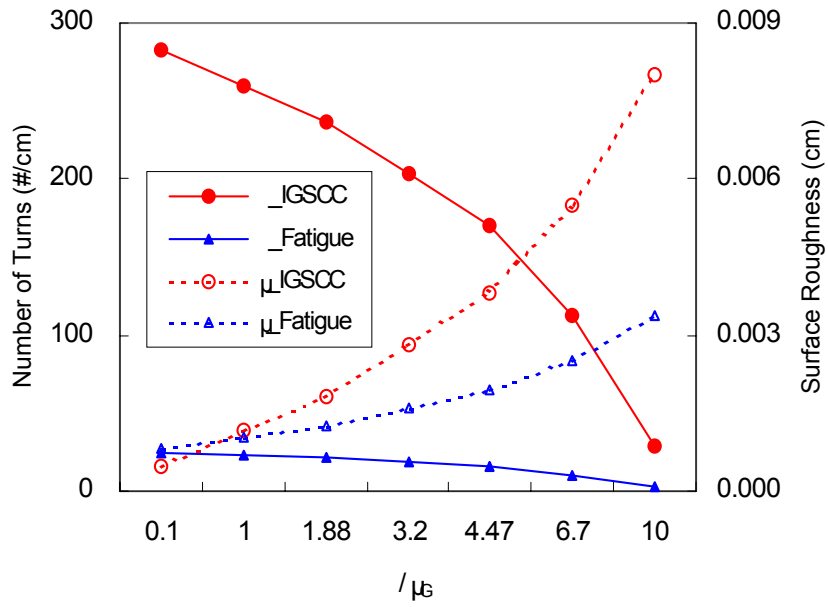


그림 3. 정규화된 균열개구변위에 따른 표면조도 및 유동 우회횟수 변화선도

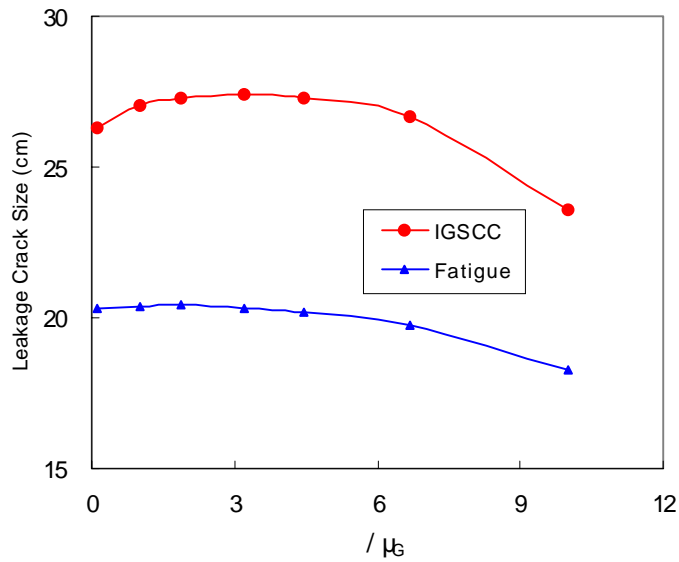


그림 4. 정규화된 균열개구변위에 따른 누설균열크기 변화선도

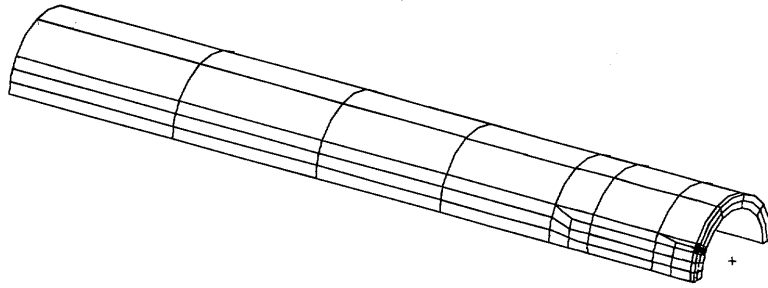


그림 5. 가압기 밀림관 파단전누설 해석용 유한요소 모델

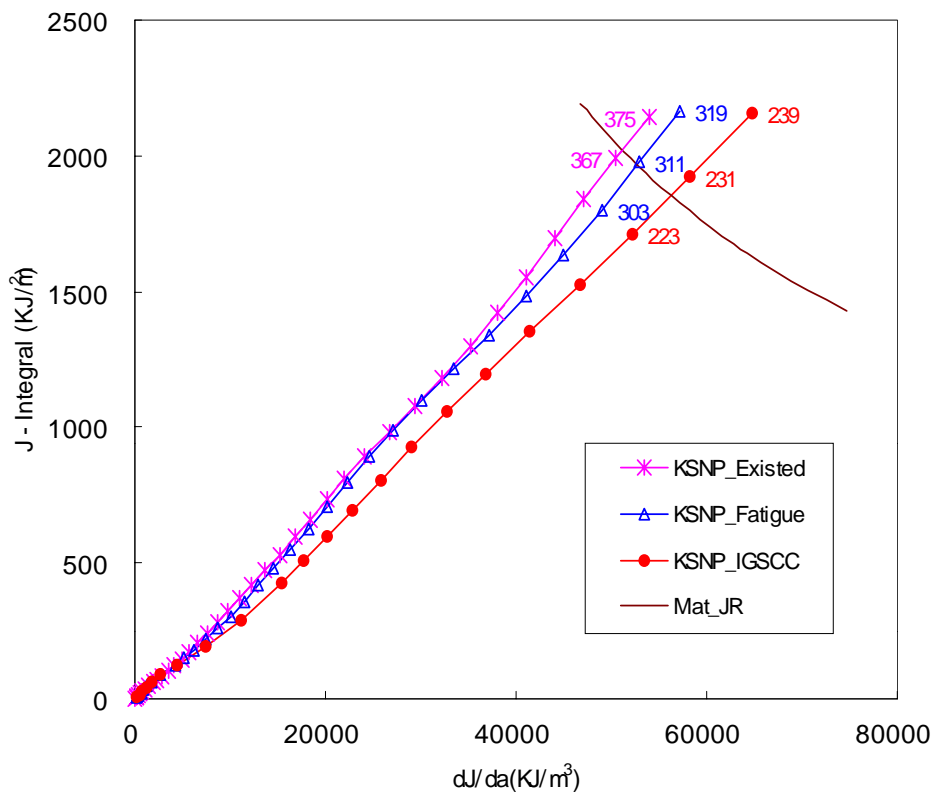


그림 6. 균열면 형상 매개변수를 고려한 밀림관 파단전누설 평가결과 선도