균열형상변수의 영향 고찰

박원배† ·이영신*

A Study on Influences of Crack Morphology Variables

Won-Bae Park, Young-Shin Lee

Key Words: Leakage Crack Size(누설균열크기), Surface Roughness(표면조도), Number of Flow Turns(유동우회횟수), Crack Opening Displacement(균열개구변위), Crack Morphology Variables(균열형상변수)

Abstract

In this study, an application of crack morphology variables 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 variables 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, 배관내부 유체가 관통균열을 통하여 배관외부로 누설되면 인근 누설감지 설비에 의해 사전에 감지되어 양단 순간파단(Double Ended Guillotine Break, DEGB)과 같은 극단적인 사고를 미연에 방지할 수 있다는 설계개념이며, 현재 한국표준형원전 가압기 밀림관 계통에 파단전누설 개념을 적용한다.

† 충남대학교 대학원 기계설계공학과
E-mail : wbpark@hanmir.com
TEL : (042)825-6531 FAX : (042)822-7366
* 충남대학교 기계설계공학과

배관계통 파단전누설 평가 시, 누설감지 설비로 감지가능한 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 균열형상변수(Crack Morphology variables)로서 표면조도만을 규정하고 있으며, 지금까지 밀림관계통 파단전누설 평가에서도 균열형상변수로서 표면조도와 입구손실계수만을 적용해왔다.[1,2]

최근 경수로 환경에서 응력부식균열 사례가 발생하였고(V.C. Summer 원전 고온관), 이를 계기로 해서 국내·외 규제기관에서는 누설률 평가 시 균

열면 유동의 우회횟수(number of flow turns)를 고려하지 않음에 따른 누설률 평가의 비보수성을 우려하는 견해가 제기되었다.[3] 또한 최근 연구에서는, 누설균열크기 및 파단전누설 평가에 직접적으로 영향을 미치는 균열형상변수를 고려하는 방법과 절차가 제시되었다.[4,5] 따라서 이 연구결과를 참고로 해서 본 논문에서는, 한국표준형원전 가압기 밀림관을 대상으로 균열개구변위(Crack Opening Displacement, COD)를 기초로 한 균열형상변수 즉 표면조도와 유동의 우회횟수를 적용할 때 이것이 누설균열크기 및 파단전누설 평가결과에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 개구변위를 고려한 균열형상변수

배관계통의 파단전누설 평가 시 누설균열크기 결정에 영향을 미치는 주요 균열형상변수에는 균열면의 표면조도, 균열을 통한 누설유로에서 발생하는 유동의 45도 및 90도 우회횟수, 균열입구의 유동손실계수 등이 있다. 특히 유동의 우회횟수의 영향은 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking, SCC)에서 비교적 크게 나타나지만, 상대적으로 평평한 단면을 가진 피로균열의 경우에서도 영향이 있는 것으로 실험적으로 확인되었다.[6] 균열형상변수 중 표면조도와 유동의 우회횟수 개략도를 Fig.1에 제시하고, 가압기 밀림관용 스테인레스강 및 균열발생기구에 대한 균열형상변수의 통계 평균값을 Table 1에 요약하였다.[5]

Table 1 Statistically averaged values of crack morphology variables

재질/ 균열발생기구	국부표면조도 μ_L(cm)	전체표면조도 μ_G(cm)	유동우회횟수 n_{tl}(cm^{-1})
스테인레스강 응력부식균열	0.00047	0.008	282
스테인레스강 피로균열	0.0008	0.0034	25

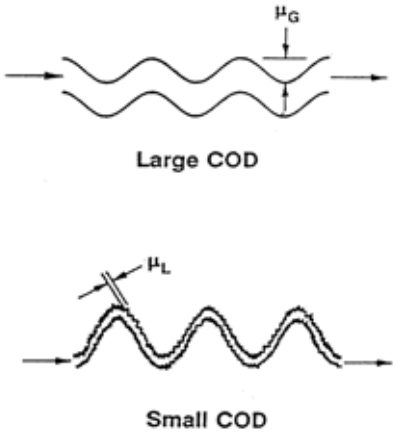

Fig.1 Local and global surface roughness and number of turns

지금까지 밀림관 파단전누설 해석에 적용된 균열형상변수는 균열개구변위의 영향이 고려되지 않은 값들이다. 이와 같이 COD에 무관한 균열형상변수의 결정방법으로는, 표면조도를 입계응력부식균열(IGSCC) 및 피로균열에 대하여 각각 일정한 상수값을 적용하거나, 또는 금속의 조직 및 금속입자의 크기를 이용하여 적용하는 방법 등이 제시된 바 있다.[6,9]

한편 기존 파단전누설 평가에서는 PICEP 프로그램에 제시된 기본값을 따르고 있다. 따라서 균열형상변수로서, 균열발생기구에 상관없이 누설유로를 자세히 알 수 없을 경우에는 표면조도를 0.0005 cm로 적용하고 피로균열을 가정하여 유동의 우회횟수를 고려하지 않으며 균열입구 손실계수는 그 기본값을 0.61로 적용한다.

본 연구에서는, 기존과는 다르게 균열형상변수에 균열개구변위의 영향을 고려한 평가를 시도하고자 한다. 균열면 표면조도(μ)는 식(1)과 같이 국부표면조도(μ_L), 전체표면조도(μ_G) 및 중심부 균열개구변위(δ)를 이용하여 표현되며, 유동의 우회횟수(n_t)는 국부우회횟수(n_{tL})를 이용하여 식(2)와 같이 표현된다.[4] 전체표면조도로 정규화된 균열개구변위값(δ/μ_G)에 대하여 위 식(1)과 (2)의 표면조도와 유동의 우회횟수를 Fig.2에 각각 나타내었다.

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

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

Fig.2에서 δ /μ G 값이 0.1 이하로 COD가 매우 작을 경우 유효 표면조도는 국부표면조도에 좌우되나, 반면 δ /μ G 값이 10 이상으로 COD가 클 경우에는 유효 표면조도가 전체표면조도에 좌우되는데 다시 말하면 COD가 커짐에 따라 표면조도 또한 커짐을 알 수 있다. 한편, 유동우회횟수는 δ /μ G 값이 10 이상으로 COD가 큰 경우 상대적으로 COD가 아주 작은 경우에 비해 그 값이 1/10 정도로, COD가 작아짐에 따라 상대적으로 커짐을 볼 수 있다. 또 다른 변수인 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 입계응력부식균열의 경우에는 0.95를 기본값으로 한다.

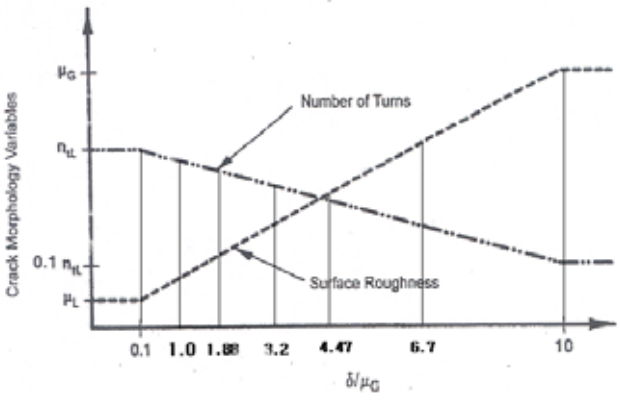

Fig.2 Crack morphology variables versus normalized COD

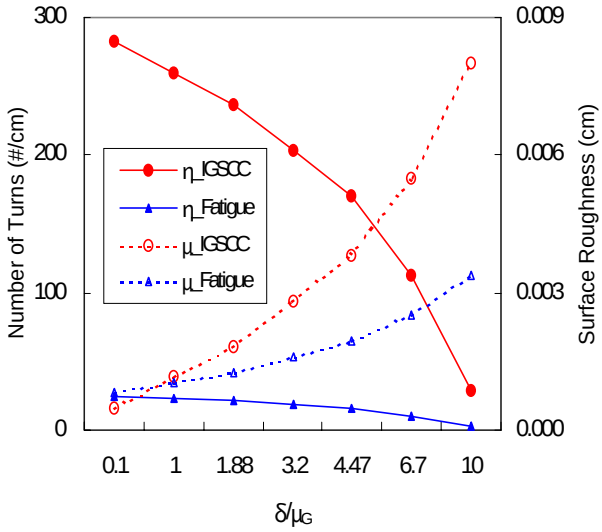

Fig.3 Surface roughness and number of turns versus normalized COD

COD가 균열형상변수에 미치는 영향을 보기 위해 Fig.2에서 δ /μ G를 0.1과 10사이에서 총 7개의 임의점 값으로 취하여 Table 1의 응력부식균열 및 피로균열 각 경우에 대한 균열형상변수 통계평균값으로부터 식 (1)과 (2)를 이용하여 이들 선택점들에 대하여 구한 표면조도 및 유동의 우회횟수를 구하고 그 결과를 Fig.3에 도시하였다. Fig.3에서, δ /μ G값이 커질수록 즉 COD가 클수록 유동우회횟수는 감소하나 표면조도는 상대적으로 증가하며, 특히 피로균열에 비해 응력부식균열의 경우에 그 감소량 및 증가량의 변화가 더욱 심하다. 한편, δ /μ G의 전구간 내에서 유동의 우회횟수는 피로균열보다 응력부식균열의 경우에서 항상 높으며 COD가 작을수록 큰 차이를 보이나, COD가 커짐에 따라 그 차는 점차 감소한다. 표면조도는 δ /μ G값이 1이하의 작은 COD에서는 피로균열의 경우가 더 높으나 1이상이 되면 응력부식균열에서 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 균열형상변수를

Table 2 Comparison of crack morphology variable values

균열형상변수 종류	PICEP (Rev.1) 제안값	본 논문 계산값	
		입계응력 부식균열	피로균열
표면조도(cm)	0.0005	0.0018	0.0019
90도 유동우회횟수 (cm^{-1})	0	237	15
입구손실계수	0.61	0.95	0.62

구하고 그 결과를 Table 2에 요약하고 COD를 고려하지 않은 PICEP 프로그램의 균열형상변수값과 비교하였다. COD를 고려하여 계산된 균열형상변수값은 균열발생기구에 관계없이 기존 PICEP 프로그램에서 적용된 균열형상변수값보다 크게 나타났다.

3. 누설균열크기 측면의 영향

본 연구에서는, 누설률 평가 전산코드로 공인된 PICEP 프로그램을 사용하여 누설균열크기를 구한다.[8] 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 이상임계유동 모델을 가정한다. 또한, 유체역학 모듈에서는 내경 및 외경에서의 균열크기 변화를 고려하나, 균열개구변위 계산에서는 단지 내경에서의 균열크기만을 사용한다.

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 Table 3에 기술하였으며, Fig.2로부터 선택된 총 7개의 점에 대하여 계산된 균열형상변수값을 적용하여 입계응력부식균열 및 피로균열 각 경우에 37.8 liter/min의 누설을 유발하는 균열의 크기를 PICEP 프로그램

Table 3 Input variables in PICEP

종 류	입력내용
기하학적 형상	배관외경 및 두께
재질 특성	탄성계수, 항복강도, Ramberg-Osgood 상수(α ,n)
열수력 특성	배관 운전압력 및 온도
균열형상변수	균열면 조도, 유동우회횟수 및 입구손실계수

으로부터 각각 구하여 그 결과를 Fig.4에 도시하였다. 여기서, PICEP 프로그램의 입력으로는 기존 가압기 밀림관 파단전누설 평가에 적용하였던 값을 그대로 사용하였다.

δ/μ_G에 대한 누설균열크기에 있어서, 입계응력부식균열의 경우 피로균열에 비해 29% 35% 정도 크게 나타났으며, 또한 입계응력부식균열 및 피로균열 조건에 대해 누설균열크기 차이는 δ/μ_G = 0.1과 10사이의 구간에서 12%~16% 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 이는 COD에 따라서 표면조도 및 유동우회횟수가 서로 상반되는 방향으로 작용한 결과로 판단된다. Fig.2의 δ/μ_G =1.88 및 4.47 지점은 각각 한국표준형원전 가압기 밀림관의 입계응력부식균열 및 피로균열 조건에 해당하는 점으로, 이들 점에서 구한 가압기 밀림관

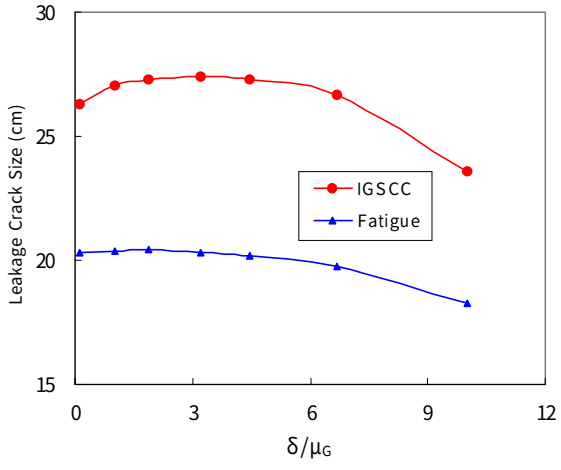

Fig.4 Variation of the leakage crack size versus normalized COD

의 총 누설균열크기는 각각 27.29 cm와 20.16 cm 이다.

결과적으로, 한국표준형원전 가압기 밀림관에 COD의 영향을 고려한 입계응력부식균열 및 피로균열을 가정 시, 누설균열크기가 기존의 15.72 cm보다 크게 증가함을 알 수 있다.

4. 파단전누설 측면의 영향

4.1 해석방법

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.[1,2]

밀림관의 파단전누설 해석용으로 20절점 입방요소(solid element)를 사용하여 총 199개 요소와 총 1,302개 절점으로 구성된 3차원 유한요소망을 Fig.5에서 보여주고 있다. 기하학적 대칭성을 고려하여 전체 배관의 1/4 모델로 작성되었으며, 작용하중으로는 배관내의 운전압력과 배관 양단에서의 굽힘모멘트를 고려하였다.

파단전누설 해석에 적용된 원주방향 관통균열의 크기는 입계응력부식균열과 피로균열 조건에서의 누설균열크기의 반으로 즉 각각 13.64 cm와 10.08 cm이며, 이를 균열의 각도로 환산하면 각각 54도와 40도가 된다(기존의 균열길이 및 균열각은 7.86 cm와 31도임). 또한, 파단전누설을 위한 유한요소해석에 사용된 밀림관용 Type 347 스테인레스강의 물성값은 탄성계수 E = 175,170 Mpa, 항복강도 Sy = 120 Mpa이다.

4.2 평가결과

밀림관에서 입계응력부식균열 및 피로균열 조건에 대하여 계산된 균열크기(13.64 cm 및 10.08 cm)의 관통균열이 존재할 경우, 이와 같은 균열의 안정성 평가를 위하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig.6에 나타내었다. 하나의 동일한 재료 파괴저항 곡선에 대하여 균열

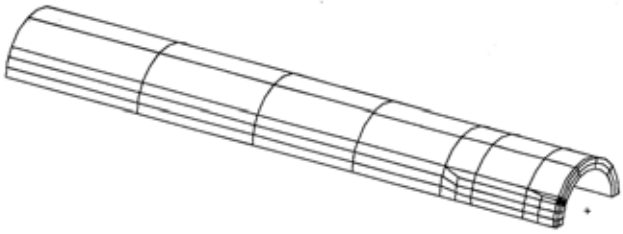

Fig.5 Finite element model for the LBB evaluation of surge line piping

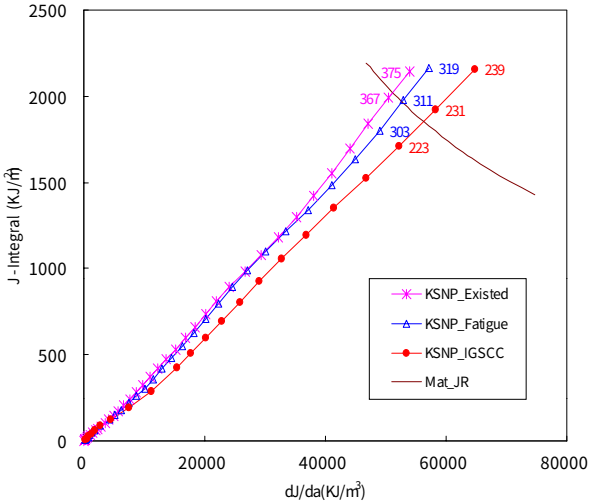

Fig.6 LBB evaluation results of surge line

형상변수를 적용한 경우와 그렇지 않은 기존의 해석결과를 비교하였다.

Fig.6에서 적용하중에 의한 J적분(integral) 및 찢김계수(tearing modulus) 값이 재료의 J적분 및 찢김계수 값과 같아지는 교차점을 균열 불안정점으로 할 때, 이 점에서의 기존의 작용하중이 약 369,000 N-m이나, 피로균열 및 입계응력부식균열에 대한 본 논문에서의 균열형상변수값을 적용한 결과 각각 311,000 N-m와 228,000 N-m로, 기존에 비해 약 84%와 62% 수준으로 각각 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구를 통해서, 한국표준형원전 가압기 밀림관을 대상으로 균열개구변위를 고려한 균열형상변수로서 표면조도와 유동의 우회횟수를 적용하여 이들이 누설균열크기 및 파단전누설 평가결과에 미치는 영향을 평가 검토한 결과는 아래와 같다.

1) 기존 평가결과에 비해서 입계응력부식균열의 경우 73%, 피로균열의 경우 28%까지 누설균열크기가 증가한 한편, 균열 불안정 하중에 있어서는 각각 62%와 84% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.
2) 입계응력부식균열의 경우 특히 균열 불안정 하중이 균열의 형상변수에 더욱 민감하게 작용하여 파단전누설 설계여유도가 기존의 평가방법에 의한 경우보다 크게 감소하였으나, 피로균열의 경우에는 상대적으로 덜 민감한 것으로 나타났다.
3) 균열개구변위를 고려한 새로운 균열형상변수의 적용을 위해서는, 기존의 파단전누설 규제지침에 따른 감지가능 누설률, 누설균열크기 및 하중 등에 적용하는 안전계수의 재평가가 필요하다.

참고문헌

(1) November 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Breaks," USNRC Report NUREG-1061, Vol.3.
(2) August 1987, "Leak-Before-Break Evaluation Procedures," USNRC draft Standard Review Plan 3.6.3.
(3) June 24, 2002, "Responses to NRC Request for Additional Information Concerning Leak Before Break Analysis for Kewaunee Nuclear Power Plant," KNPP Docket 50-305.
(4) Scott,P.M., and others, May 2002, "Development of Technical Basis for Leak-Before-Break Evaluation Procedures," NUREG/CR-6765.
(5) Rahman,S., and others, April 1995, "Probabilistic Pipe Fracture Evaluations for Leak Rate Detection Applications," NUREG/CR-6004.
(6) Paul,D.D., and others, June 1994, "Evaluation and Refinement of Leak-Rate Estimation Models," NUREG/CR-5128.
(7) May 1973, "Reactor Coolant Pressure Boundary Leakage Detection Systems," USNRC Reg. Guide 1.45.
(8) Norris,D.M. and Chexal,B., December 1987, "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program," EPRI Report NP-3596-SR.
(9) July 1990, "Steam Generator Tube Leakage Experiments and PICEP Correlations," EPRI Report NP-6897-L.