

두개의 평행한 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 최적 파손예측모델

이진호[†] · 송명호^{*} · 최영환^{*} · 김낙철^{*} · 문성인^{**} · 김영진^{**}

Optimum Failure Prediction Model of Steam Generator Tube with Two Parallel Axial Through-Wall Cracks

Jin Ho Lee, Myung Ho Song, Young Hwan Choi, Nak Cheol Kim, Seong In Moon, Young Jin Kim

Key Words : Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Failure Prediction Model(파손예측모델), Interaction Effect(간섭효과), Limit Load Method(한계하중법), Plastic Collapse(소성붕괴), Plugging Criteria(관막음기준), Tube Rupture(세관파열)

Abstract

The 40% of wall criterion, which is generally used for the plugging of steam generator tubes, may be applied only to a single crack. In the previous study, a total of 9 failure models were introduced to estimate the local failure of the ligament between cracks and the optimum coalescence model of multiple collinear cracks was determined among these models. It is, however, known that parallel axial cracks are more frequently detected during an in-service inspection than collinear axial cracks. The objective of this study is to determine the plastic collapse model which can be applied to the steam generator tube containing two parallel axial through-wall cracks. Nine previously proposed local failure models were selected as the candidates. Subsequently interaction effects between two adjacent cracks were evaluated to screen them. Plastic collapse tests for the plate with two parallel through-wall cracks and finite element analyses were performed for the determination of the optimum plastic collapse model. By comparing the test results with the prediction results obtained from the candidate models, a plastic zone contact model was selected as an optimum model.

1. 서 론

USNRC(US Nuclear Regulatory Commission)등에서는 증기발생기 세관의 중요성을 감안하여 세관 벽 두께가 40% 이상 감육된 경우에는 관막음을 하도록 규정하고 있다^(1~2). 그러나 이는 특정열화기구 및 세관 손상위치에 대해서 지나치게 보수적인 것으로 알려져 있다. 또한, 국내외의 가압경수로형 원자력발전소의 증기발생기 세관에 발생하는 결함

은 일반적으로 관판(tube sheet) 상단부에서 발견되며 다중균열의 양상을 띄고 있으나, 다중균열이 존재하는 경우에 대해서는 명확한 관보수 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다^(3~7).

지금까지 몇몇 연구자들에 의해 다중균열에 대한 연구가 수행되었으나, 대부분 탄성해석에 국한되어 있고 파손이 소성붕괴에 의해 지배되는 증기발생기 세관에 대한 연구는 전무한 실정이다⁽⁸⁾.

본 저자들은 이전 연구에서는 일직선상에 존재하는 두 개의 관통균열을 가공한 Inconel 600 평판 시편을 사용하여 소성붕괴실험을 수행했다. 또한, 9 가지의 국부파손 예측모델을 사용하여 다중균열의 합체하중을 구하였으며, 이를 실험결과와 비교하여 균열사이 리거먼트에서의 반력에 기초한 모델과 소성역의 접촉에 기초한 모델을 증기발생기 세관의 건전성 평가를 위한 최적의 국부파손 예측

[†] 한국원자력안전기술원 기계해석실

E-mail: peacelee@kins.re.kr

TEL: (042) 868-0587 FAX: (042) 861-2535

^{*} 한국원자력안전기술원

^{**} 성균관대학교 기계공학부

모델로 결정하였다⁽⁹⁾. 나란하게 존재하는 두개의 관통균열은 균열사이의 리거먼트가 합체된 후에 하나의 균열로 거동을 하지만, 평행한 두개의 관통균열의 경우에는 리거먼트가 합체되지 않고 하나의 균열에서 찢김이 발생한 후, 성장한다. 그래서 평행하게 존재하는 두개의 관통균열의 경우에는 일직선상으로 존재하는 경우와 다른 기준을 적용해야 한다. 이러한 점을 반영하여 이전 연구에서는 유한요소해석을 이용해서 증기발생기 세관에 평행하게 존재하는 두개의 축방향 관통균열의 파손하중을 예측하기 위해서 단일균열의 COD(Crack Opening Displacement)가 다중균열의 COD 와 일치할 때 파손된다는 파손모델을 제안하였다⁽¹⁰⁾.

본 연구의 목적은 이전 연구에서 제안한 국부 파손 예측모델을 사용하여 증기발생기 세관에 평행하게 존재하는 두개의 축방향 관통균열에 대한 파손 예측모델을 선정하는 것이다. 본 연구는 그 1 단계로 여기에서는 평판에 평행하게 존재하는 두개의 관통균열의 파손을 예측할 수 있는 모델을 선정하고자 한다. 이를 위해 두개의 관통균열을 가공한 9 개의 평판시편에 대해 소성붕괴시험을 수행하였다. 다음으로 이전연구에서 제안한 3 가지 모델을 사용하여 평판에 평행하게 존재하는 다중 관통균열의 소성붕괴하중을 예측하였으며, 실험결과와 비교하여 최적의 파손모델을 결정하였다. 본 연구의 2 단계에서는 평판을 대상으로 개발된 최적 파손모델을 증기발생기 세관에 적용하여 다중 균열의 파손하중을 예측하고자 한다.

2. 축방향 다중관통균열의 합체모델

지금까지 표면균열에 대한 합체기준으로는 ASME Sec. XI, BSI PD6493, 표면점의 연결방법 등이 제시되었으며 표면점의 연결방법이 실험결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다^(11~13). 이러한 실험결과는 두 균열사이의 잔여리거먼트(remaining ligament)가 없을 때, 즉, 두 균열사이의 리거먼트가 외부에서 가해지는 하중을 더 이상 지탱할 수 없을 때 두 균열은 서로 합체됨을 의미한다. 그러나, 이 합체기준들은 소규모항복(small scale yielding)이 발생하는 경우에 적용할 수 있는 것으로 대규모항복(large scale yielding)의 지배를 받는 증기발생기 세관에는 적용할 수 없다. 따라서, 본 연구자들은 증기발생기 세관에 존재하는 축방향 다중균열의 합체시기를 결정하기 위해 Flow Stress Model I (FSM-I)^(6, 14-15), Flow Stress Model II (FSM-II), Necking Base Model (NBS-I)⁽¹⁶⁾, Stress Base Model I

(SBM-I)⁽¹⁷⁾, Stress Base Model II (SBM-II), Reaction Force Model (RFM)⁽¹⁸⁾, Plastic Zone Contact Model I (PZC-I), Plastic Zone Contact Model II (PZC-II), Plastic Zone Contact Model III (PZC-III)를 사용하였다⁽⁹⁾. 이와 같이 총 9 가지의 국부파손 모델을 사용하여 다중균열의 합체하중을 구하였으며, 실험결과와 비교하여 균열사이 리거먼트에서의 반력에 기초한 모델과 소성역의 접촉에 기초한 모델을 증기발생기 세관의 건전성 평가를 위한 최적의 국부파손 예측모델로 결정하였다.

나란하게 존재하는 두개의 관통균열은 균열사이의 리거먼트가 합체된 후에 하나의 균열로 거동을 하지만, 평행한 두개의 관통균열의 경우에는 리거먼트가 합체되지 않고 하나의 균열에서 찢김이 발생하여 바로 소성붕괴로 이어진다. 그래서 일직선상에 존재하는 경우와 평행하게 존재하는 경우에 서로 다른 기준을 적용하였다.

평행하게 존재하는 두개의 관통균열에 대해 이전 연구에서는 유한요소해석을 수행하여 파손예측 모델로서 COD Based Model (CBM)⁽¹⁰⁾을 제안하였다.

3. 평판에 대한 소성붕괴시험

평행한 두개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관에 대한 파손을 예측하기 위해 두개의 관통균열을 가공한 평판시편을 사용하여 소성붕괴시험을 수행하였다.

3.1 재료 및 시험편

본 실험에서는 현재 가압경수로형 증기발생기 세관 재료로 사용되는 Inconel 600 과 동일한 성분의 평판재료를 사용하였다. 인장시험과 소성붕괴 시험에 사용된 평판의 두께는 1.6 mm 이며 그 화학조성과 기계적 성질은 각각 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

Fig. 1 은 본 실험에 사용된 시편의 형상을 나타낸 것이다. 시편은 T-L 방향으로 채취하였으며, 노치는 전기방전가공(EDM)으로 제작하였다. 소성붕괴시험은 균열길이 $2c$ 가 각각 5, 8, 13 mm, 균열간 거리 d 가 각각 1, 2, 4 mm 인 다중균열을 가공한 9 개의 평판시편과 동일한 균열길이를 가진 단일균열을 가공한 평판시편을 사용하여 수행하였다.

3.2 실험장치 및 방법

소성붕괴실험은 25 ton 용량의 전기유압식 재료시험기(Instron model 8802)를 사용하여 변위제어방식으로 수행하였다. Fig. 2 는 실험장치를 나타낸 것

으로서 시편 양끝을 유압 grip 을 사용하여 시험기에 고정하였다. 하중을 증가시키면서 두 균열이 합체되는 시점을 고배율 카메라를 사용하여 관찰하였으며, A/D 변환기를 사용하여 strain gauge 신호, COD gauge 신호 및 extensometer 신호를 연속적으로 PC 에 저장하였다.

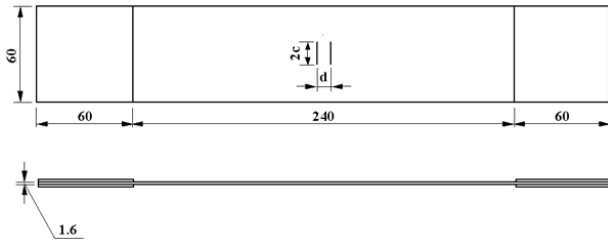


Fig. 1 Geometry and size of test specimen

Table 1 Chemical composition of Inconel 600 plate

Element	C	Mn	Si	P	S
Wt. %	404*	0.22	0.37	N.D.	N.D.
Element	Ni	Cr	Co	Ti	Al
Wt. %	74.4	15.7	0.056	0.16	0.26
Element	Cu	Fe	N		
Wt. %	0.09	9.7	69.6*		

*Unit: ppm

Table 2 Mechanical properties of Inconel 600 plate

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
329	662	213	44	0.3



Fig. 2 Test facilities

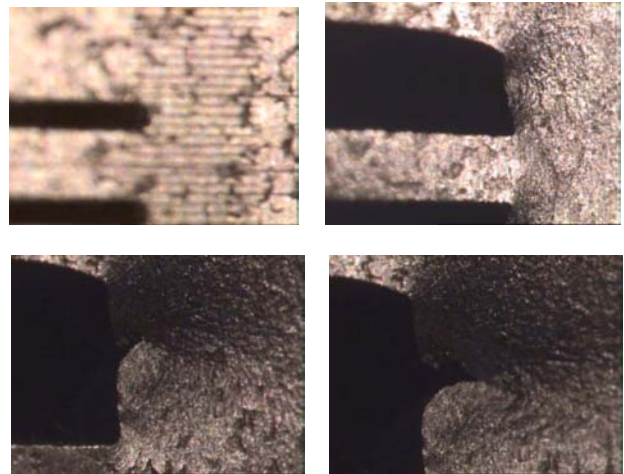


Fig. 3 Process of plastic collapse

Table 3 Failure loads of single cracked plates

Crack size (mm)	Failure load (kN)
2c=5	47.2
2c=8	42.3
2c=13	37.7

Table 4 Failure loads of double cracked plates

Crack size (mm)	Failure load (kN)
2c=5, d=1	52.9
2c=5, d=2	52.4
2c=5, d=4	50.9
2c=8, d=1	47.4
2c=8, d=2	47.3
2c=8, d=4	47.7
2c=13, d=1	41.5
2c=13, d=2	42.3
2c=13, d=4	42.5

3.3 실험결과

Fig. 3 은 하중증가에 따른 시편의 파손거동을 나타낸 것으로 고배율($\times 100$) 카메라를 사용하여 촬영한 것이다. 하중이 증가함에 따라 두개의 균열선단이 둔화되고, 하나의 균열에서 찢김이 발생하였다. 그 후 그 균열이 성장하여 바깥쪽 리거먼트가 완전히 파단되었다. Table 3 과 Table 4 는 각각 단일균열과 평행한 두개의 관통균열이 존재하는 시편에 대한 소성붕괴 하중을 나타낸 것이다.

4. 국부파손 예측모델

4.1 국부파손 예측모델

본 연구에서는 평판에 평행하게 존재하는 두개의 관통균열의 파손하중을 예측하기 위해 이전 연구에서 제안한 모델들을 사용하였다. 두개의 평행한 관통균열의 파손거동의 특성을 고려하여 SBM,

RFM 및 NBM 등은 두개의 평행한 관통균열의 파손을 예측하기 위한 모델에서는 제외하였으며, PZC-II, PZC-III 및 CBM 을 사용하였다. 총 10 개의 모델 중 3 개의 파손예측모델을 사용하였으며, 이들 모델을 사용하여 구한 예측결과를 실험결과와 비교하였다.

4.2 유한요소해석

평판에 평행하게 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 파손거동을 살펴보기 위해 상용프로그램인 ABAQUS Ver. 5.8 을 사용하여 3 차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 해석모델은 실험시편과 동일한 형상을 갖도록 구성하였으며, 재료물성은 인장시험으로부터 구한 Table 1 의 데이터를 사용하였다. Fig. 4 는 해석에 사용된 두 개의 균열이 존재하는 평판의 유한요소모델을 나타낸 것으로 대칭성을 이용하여 1/8 만 모델링하였으며, 20 절점 요소(20-node brick element)를 사용하여 요소망을 구성하였다. 노치선단의 곡률반경은 실제 시편과 동일하게 0.15 mm 로 고려하였다. 해석은 2c 가 각각 5, 8, 13 mm, d 가 각각 1, 4, 8 mm 인 경우에 대하여 수행하였으며, 3 가지 모델을 사용하여 각각에 대한 파손하중을 계산하였다.

Table 5 는 균열길이와 균열간 간격을 변화시켜가면서 앞에서 제시한 3 가지 국부파손모델을 이용하여 구한 두 균열의 합쳐하중을 나타낸 것이다.

5. 결과 및 토의

Table 2 와 3 은 단일균열과 두개의 평행한 관통균열이 존재하는 시편에 대해서 실험으로부터 구한 소성붕괴 하중을 나타낸 것이다. 균열길이가 증가할수록 소성붕괴하중은 감소하였으나, 균열간 거리가 소성붕괴 하중에 미치는 영향은 미미하였다. 두개의 평행한 다중관통균열의 경우에는 소성붕괴 하중이 단일균열의 경우보다 더 낮은 값을 보였다.

Table 5 는 3 가지 국부파손모델을 이용하여 구한 두 균열의 합쳐하중을 나타낸 것이다. Fig. 5 는 하중증가에 따른 시편 중앙면에서의 소성역의 변화를 나타낸 것이다. PZC 모델은 균열선단으로부터 성장한 소성역이 서로 접촉할 때 소성붕괴되는 것으로 가정하였으며, PZC-II 와 PZC-III 는 각각 인장강도와 인장강도의 진응력값에 도달할 때 재료가 소성화되는 것으로 가정하였다. 시편의 표면보다 중앙면에서 하중증가에 따른 소성역의 성장속

도가 더 느리기 때문에 중앙면을 파손하중을 예측하기 위한 기준면으로 설정하였다. PZC-III 모델을 사용하여 구한 파손하중은 실험으로부터 구한 파손하중과 17% 범위내에서 잘 일치함을 Table 5 에서 확인할 수 있다.

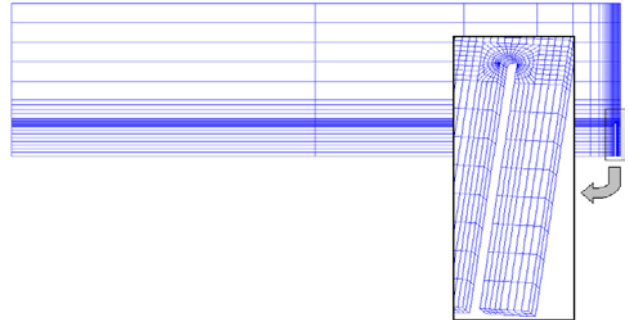


Fig. 4 Finite element mesh of plate with two parallel cracks

Table 5 Coalescence loads of plates with two parallel cracks

2c & d (mm)	Failure load (kN)			
	PZC-II	PZC-III	CBM	Exp. Results
2c=5, d=1	36.4	43.9	50.9	52.9
2c=5, d=2	39.6	50.5	50.5	52.4
2c=5, d=4	44.4	54.3	49.7	50.9
2c=8, d=1	32.9	39.7	47.3	47.4
2c=8, d=2	36.4	45.6	47.1	47.3
2c=8, d=4	40.5	50.2	46.4	47.7
2c=13, d=1	30.3	34.4	42.6	41.5
2c=13, d=2	32.6	39.8	42.8	42.3
2c=13, d=4	36.3	44.3	42.5	42.5

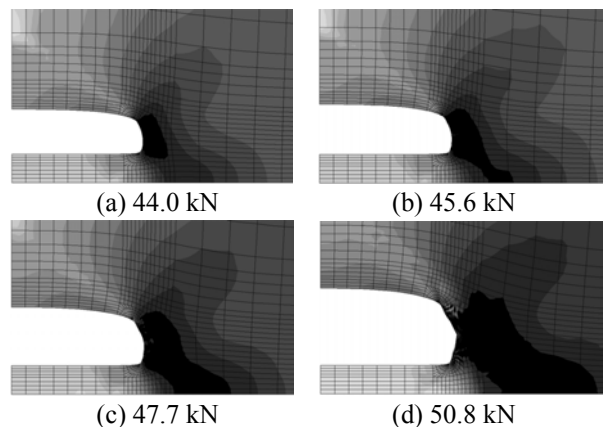


Fig. 5 Changes of plastic zone size along the mid-plane

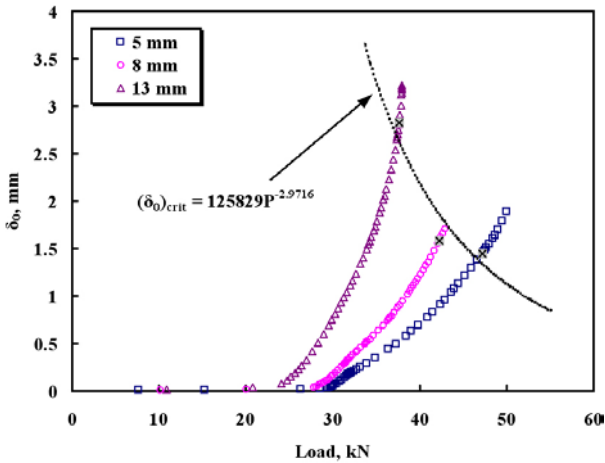


Fig. 6 Critical COD data at the center of a single crack(Experiment)

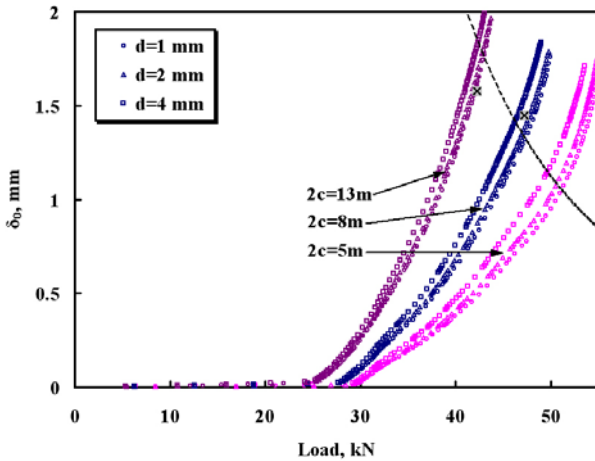


Fig. 7 Changes of δ_0 value (two parallel cracks)

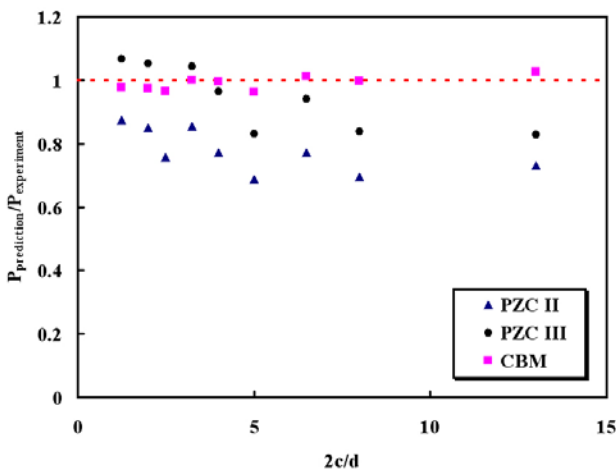


Fig. 8 Comparison of estimated results with experimental result

Fig. 6 은 유한요소해석으로부터 구한 COD 의 변화, δ_0 를 나타낸 것이다. 단일균열에 대한 파손하중은 소성붕괴실험으로부터 측정하였으며, Fig. 6

에서 단일균열의 파손하중에서의 COD 는 X 로 나타내었다. 본 논문에서는 그 값을 임계 COD, $(\delta_0)_{crit}$ 로 정의하였다. 임계 COD 를 결정하기 위한 식은 아래와 같이 나타내었다.

$$(\delta_0)_{crit} = 125829P^{-3.0188} \quad (1)$$

위의 식은 최소자승법에 의해서 구하였으며, Fig. 6 에 점선으로 나타내었다. 이 곡선은 두개의 평행한 관통균열의 파손하중을 구하기 위하여 사용하였다. Fig. 7 은 두개의 평행한 관통균열에 대해 유한요소해석으로부터 구한 COD 의 변화를 나타낸 것이다. CBM 모델을 사용하면 주어진 균열길이와 균열간 거리에 대해 파손하중을 임계 COD 곡선과 두개의 평행한 관통균열의 COD 곡선의 교차점으로 구할 수 있다. 이와 같이 CBM 모델을 사용하여 구한 파손하중은 실험에서 구한 파손하중과 약 3.7% 이내에서 잘 일치하였다.

Fig. 8 은 PZC II, PZC III 및 CBM 모델을 사용하여 예측한 결과를 실험결과와 비교한 것이다. CBM, PZC III, PZC II 순으로 실험결과를 잘 예측하였다. 이상의 결과로부터 CBM 모델을 평판에 존재하는 두개의 평행한 관통균열의 소성붕괴하중을 예측하기 위한 최적 파손예측모델로 선정하였다.

실험과 해석결과로부터 두개의 평행한 관통균열은 단일균열에 비하여 더 높은 파손하중을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 원인을 평가하기 위해 3 차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 간섭효과를 평가하였다. 두 균열사이의 간섭효과를 평가하기 위해 J-적분을 사용하였다. 간섭효과를 나타내는 간섭계수를 각각 J_{ratio} 로 표기하여 다음과 같이 정의하였다.

$$J_{ratio} = \frac{J_D}{J_S} \quad (2)$$

여기서, 첨자 S와 D는 각각 단일균열과 다중균열에 대해 나타낸 것이다.

Table 6 은 2c 가 8 mm 이고 d 가 각각 1, 2, 4 mm 인 경우에 대하여 J_{ratio} 를 나타낸 것이며 d 가 증가함에 따라 J_{ratio} 는 증가하였다. 균열간 거리가 가까울 때 더 큰 음의 간섭효과($J_{ratio} < 1$)를 나타내었으며 탄소성 해석의 경우 더 큰 음의 간섭효과를 나타냈다.

두개의 관통균열이 평행하게 존재할 경우에는 균열선단의 응력장을 완화시키기 때문에 음의 간섭효과가 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 탄성해석을 바탕으로 한 기존연구(8)와 동일한 경향을 보였다.

Table 6 Evaluation of interaction effect based on J

Crack size (mm)	P (MPa)	J_S (MPa · m)	J_D (MPa · m)	J_{ratio}
$2c=8, d=1$	27.8	12.0	6.4	0.553
	28.3	18.4	10.2	0.554
	30.1	60.8	34.7	0.571
$2c=8, d=2$	27.8	12.0	6.7	0.558
	28.5	23.1	14.5	0.628
	30.1	60.8	39.2	0.645
$2c=8, d=4$	28.1	15.2	11.1	0.730
	28.9	32.4	22.7	0.701
	30.3	67.3	47.8	0.710

6. 결론

본 연구에서는 평행하게 존재하는 두 개의 관통균열을 가공한 Inconel 600 평판시편을 사용하여 소성붕괴실험을 수행하였다. 또한, 3 가지의 국부파손 예측모델을 사용하여 다중균열의 합체하중을 구하였으며, 이를 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

실험결과로부터 관통균열이 평행하게 존재할 경우에는 단일균열에 비해 높은 소성붕괴하중 보임을 확인하였다. 이는 두개의 관통균열이 평행하게 존재할 경우에는 균열선단의 응력장을 완화시켜서 음의 간섭효과가 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 평행한 다중균열은 단일균열에 비해 파손되는데 더 큰 하중이 필요하므로 동일하중하에서 더 큰 안전성을 갖는 것으로 판단된다.

평판에 평행하게 존재하는 두개의 축방향 관통균열의 합체를 예측하기 위해 소성역의 접촉에 기초한 모델과 COD 에 기초한 모델을 사용하였다. 두 결과 모두 시편의 파손하중을 잘 예측하였지만 COD 에 기초한 모델이 좀더 정확한 예측을 하였다. 이상의 결과로부터 COD 에 기초한 모델을 평판에 존재하는 두개의 평행한 관통균열의 소성붕괴하중을 예측하기 위한 최적 파손예측모델로 선정하였다.

참고문헌

- (1) USNRC, April 1996, "NUREG/CR-6365, Steam Generator Tube Failures"
- (2) USNRC, August 1976, "Regulatory guide 1.121, Bases for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes"

- (3) Cochet, B. and Flesch, B., 1987, "Crack Stability Criteria in Steam Generator Tubes," 9th Int. Conference on SMiRT, Vol. D, pp.413-419
- (4) Yu, Y.J., Kim, J.H., Kim, Y., and Kim, Y.J., 1994, "Development of Steam Generator Tube Plugging Criteria for Axial Crack," ASME PVP, Vol, 280, pp.79-83
- (5) Gorman, J. A., Harris, J. E., and Lowenstein, D.B., 1995, "Steam Generator Tube Fitness-for-Service Guidelines," AECB Report No. 2.228.2, pp. 220
- (6) Lee, J.H., Park, Y.W., Song, M.H., Kim, Y.J., and Moon, S.I., 2000, "Determination of Equivalent Single Crack based on Coalescence Criterion of Collinear Axial Cracks," Nuclear Engineering and Design, Vol.205, pp. 1-11
- (7) Kim, J.S. et al., October 1999, "Investigation Report for Steam Generator Tubes Pulled out from Ulchin #1,"
- (8) Y. Murakami, 1987, "Stress Intensity Factors Handbook," pp.204-205
- (9) Moon, S.I., Kim, Y.J., Kim, Y.J., Park, Y.W., Song, M.H., and Lee, J.H., 2002, "Determination of Optimum Local Failure Model of a Steam Generator Tube with Multiple Through-wall Cracks," Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers - Part of Material and Fracture Spring Meeting, pp.87-93
- (10) Park, Y.W., Song, M.H., Lee, J.H., Moon, S.I., and Kim, Y.J., October 2002, "Investigation on the Interaction Effect of Two Parallel Axial Through-Wall Cracks existing in Steam Generator Tube"
- (11) Kim, Y.J., Choy, Y.S., and Lee, J.H., 1993, "Development of Fatigue Life Prediction Program for Multiple Surface Cracks," ASTM STP 1189, pp.536-550
- (12) Shibata, K., Yokoyama, N., Ohba, T., Kawamura, T., and Miyazono, S., 1985, "Growth Evaluation of Fatigue Cracks from Multiple Surface Flaws (I)," J. Japanese Nuclear Society, Vol. 28, No. 3, pp.250-262
- (13) Shibata, K., Yokoyama, N., Ohba, T., Kawamura, T., and Miyazono, S., 1986, "Growth Evaluation of Fatigue Cracks from Multiple Surface Flaws (II)," J. Japanese Nuclear Society, Vol. 28, No. 3, pp.258-265
- (14) Park, Y.W., Song, M.H., and Lee, J.H., 200, "Steam Generator Tube Integrity Program," KINS/RR-001
- (15) Lee, J.H., Park, Y.W., Song, M.H., Kim, Y.J., and Moon, S.I., 2000, "Evaluation of Plugging Criteria an Steam Generator Tubes and Coalescence Model of Collinear Axial Through-Wall Cracks," J. Korean Nuclear Society Vol. 32, pp.465-476
- (16) Diercks, D. R., August 2000, "Steam Generator Tube Integrity Program Monthly Report," ANL
- (17) Diercks, D. R., September 2000, "Steam Generator Tube Integrity Program Monthly Report," ANL
- (18) S. B. Lambert, W. J. Alcott, A. G. Glover, "Numerical Simulation of Interaction Effects for Through Cracks in Plastic Collapse"