

다중균열 구조물의 소성붕괴거동 평가

문성인* · 장윤석* · 김영진† · 이진호** · 송명호** · 최영환** · 황성식***

(2004년 7월 27일 접수, 2004년 10월 15일 심사완료)

Evaluation of Plastic Collapse Behavior for Multiple Cracked Structures

Seong-In Moon, Yoon-Suk Chang, Young-Jin Kim,
Jin-Ho Lee, Myung-Ho Song, Young-Hwan Choi and Seong-Sik Hwang

Key Words : Steam Generator Tube(증기발생기 세관), Plastic Collapse(소성붕괴), Failure Prediction Model(파손예측모델), Limit Load Method(한계하중법), Plugging Criteria(관막음기준), Collinear Multiple Cracks(동일 직선상의 다중균열), Coalescence Load(합체하중)

Abstract

Until now, the 40% of wall thickness criterion, which is generally used for the plugging of steam generator tubes, has been applied only to a single cracked geometry. In the previous study by the authors, a total number of 9 local failure prediction models were introduced to estimate the coalescence load of two collinear through-wall cracks and, then, the reaction force model and plastic zone contact model were selected as the optimum ones. The objective of this study is to estimate the coalescence load of two collinear through-wall cracks in steam generator tube by using the optimum local failure prediction models. In order to investigate the applicability of the optimum local failure prediction models, a series of plastic collapse tests and corresponding finite element analyses for two collinear through-wall cracks in steam generator tube were carried out. Thereby, the applicability of the optimum local failure prediction models was verified and, finally, a coalescence evaluation diagram which can be used to determine whether the adjacent cracks detected by NDE coalesce or not has been developed.

1. 서론

USNRC(US Nuclear Regulatory Commission) 등에서는 증기발생기 세관의 중요성을 감안하여 세관 벽두께가 40% 이상 감육된 경우에는 관막음을 하도록 규정하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 이는 특정 열화기구 및 세관 손상위치에 대해 지나치게 보수적인 것으로 알려져 있다.^(4,5) 또한 국내외의 가압경수로형 원자력발전소의 증기발생기 세관에서 발생하는 결함은 일반적으로 관판(tube sheet) 상단부에서 발견되고 있고 다중균열의 양상을 띄고 있으나, 아

직까지 다중균열이 존재하는 경우에 대해서는 명확한 관보수 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다.⁽⁴⁻¹⁰⁾ 비록 다중균열에 대한 몇몇 선행연구⁽¹¹⁻¹⁵⁾가 수행된 바 있으나 대부분 탄성해석에 국한된 것이며 증기발생기 세관과 같이 소성붕괴가 지배적인 경우에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구자들은 선행연구⁽¹⁶⁾에서 유동응력에 기초한 모델, 두 균열사이 리거먼트(ligament)의 넥킹(necking)에 기초한 모델, 리거먼트의 응력에 기초한 모델, 리거먼트의 반력에 기초한 모델 및 소성역 접촉에 기초한 모델을 포함하여 총 9 가지의 국부파손 예측모델을 제시하였다. 또한 예측모델을 사용하여 평판에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 관통균열의 합체를 예측하였으며, 평판 소성붕괴실험 결과와 비교하여 평판에 존재하는 두 균열의 합체를 가장 잘 예측할 수 있는 최적 국부파손 예측모델을 제안한 바 있다.

본 논문의 목적은 증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim50@skku.edu
TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

* 성균관대학교 기계공학부

** 한국원자력안전기술원

*** 한국원자력연구소

체하중을 결정하는 것이다. 이를 위해 균열길이가 각각 5, 10mm 이며 균열간 거리가 각각 1, 2, 4mm 인 두 개의 관통균열을 가공한 6 개의 세관시편을 제작하여 소성붕괴실험을 수행하였다. 선행연구⁽¹⁶⁾에서 최적 국부파손 예측모델로 제안된 두 균열사이 리거먼트의 반력에 기초한 모델과 소성역 접촉에 기초한 모델을 사용하여 동일 직선상에 존재하는 두 개의 축방향 관통균열이 내재된 증기발생기 세관의 합체하중을 예측하였으며, 소성붕괴 실험 결과와 비교하여 최적 국부파손 예측모델의 타당성을 검증하였다. 또한 최적 국부파손 예측 모델을 사용하여 비파괴검사를 통해 검출된 다중 축방향 관통균열의 합체여부를 결정할 수 있는 합체평가선도(coalescence evaluation diagram)를 개발하였다.

2. 최적 국부파손 예측모델

지금까지 구조물의 표면균열에 대한 합체기준으로는 ASME Section XI, BSI PD6493, 표면점의 연결방법 등이 제시되었으며, 표면점의 연결방법이 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ 이러한 실험결과는 두 균열사이에서 잔여 리거먼트가 없을 때, 즉 두 균열사이의 리거먼트가 외부에서 가해지는 하중을 더 이상 견딜 수 없을 때 서로 합체됨을 의미한다. 그러나 이 합체기준들은 소규모항복(small scale yielding)이 발생하는 경우에 적용할 수 있는 것으로서 대규모항복(large scale yielding)의 지배를 받는 증기발생기 세관에는 적용하기 어렵다. 따라서 대규모항복이 예상되는 구조물에 존재하는 다중균열의 합체시기를 결정하기 위한 대체 기준 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 동일 직선상에 있는 두 균열이 존재하는 증기발생기 세관의 변형거동을 평가하기 위해 다음과 같은 국부파손 예측모델을 제안하였다.

2.1 국부파손 예측모델

증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합체하중을 예측하기 위해 선행연구⁽¹⁶⁾에서는 9 가지의 국부파손 예측모델을 제안한 바 있으며, 본 연구에서는 1 가지의 모델(PZC-IV)을 추가하여 총 10 개의 국부파손 예측모델을 제안하였다. 그 주요 특징을 요약하면 다음과 같다.

(1) Flow Stress Model I (FSM-I)^(9,20,21): 두 균열사이의 리거먼트가 완전소성 상태에 도달할 때 두 균열이 합체된다고 가정한다. 재료는 탄성-완전소성거동을 보이며 소성은 유동응력(σ_f)에 도달할 때 발생하는 것으로 가정한다. 이 때, 유동응력은 항복강도와 인장강도의 평균값으로 정의한다.

(2) Flow Stress Model II (FSM-II): FSM-I 과 동일

하며 유동응력은 인장강도로 정의한다.

(3) Necking Base Model (NBM)⁽²²⁾: 두 균열사이 존재하는 리거먼트의 평균두께가 빠르게 감소하기 시작하는 시점에서 두 균열이 합체된다고 가정한다.

(4) Stress Base Model I (SBM-I)⁽²²⁾: 두 균열사이의 리거먼트에 작용하는 평균 상당응력(effective stress)이 인장강도에 도달할 때 두 균열이 합체되는 것으로 가정한다.

(5) Stress Base Model II (SBM-II)⁽²²⁾: SBM-I 과 동일하며 해석에는 공칭응력-공칭변형률 선도를 사용한다.

(6) Reaction Force Model (RFM): 두 균열사이의 리거먼트에 작용하는 반력이 감소하기 시작할 때 두 균열이 합체된다고 가정한다.

(7) Plastic Zone Contact Model I (PZC-I): 두 균열 선단에서 성장하는 소성역이 서로 접촉할 때 두 균열은 합체된다고 가정한다. 소성은 상당응력이 항복강도에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

(8) Plastic Zone Contact Model II (PZC-II): PZC-I 과 동일하며 소성은 상당응력이 인장강도에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

(9) Plastic Zone Contact Model III (PZC-III): PZC-I 과 동일하며 소성은 상당응력이 인장강도의 진응력값에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

(10) Plastic Zone Contact Model IV (PZC-IV): 두 균열사이의 리거먼트가 완전 소성화될 때 두 균열은 합체된다고 가정한다. 소성은 상당응력이 인장강도에 도달될 때 발생한다고 가정한다.

2.2 최적 국부파손 예측모델 결정

해석과 실험의 단순화를 위해 동일 직선상에 두 개의 관통균열이 존재하는 평판시편을 사용하여 소성붕괴실험을 수행하였으며, 전술한 총 10 가지의 국부파손 예측모델을 사용하여 구한 합체하중을 소성붕괴 실험결과와 비교하였다. RFM 모델은 최고 14% 및 평균 5%의 편차 내에서 실험결과를 예측하였으며, PZC-II, III, IV 모델은 각각 최고 15, 10, 15%와 평균 7, 1, 6% 내에서 실험결과를 예측하였다. 따라서 RFM, PZC-II, III, IV 모델을 동일 직선상에 있는 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 세관의 건전성 평가를 위한 최적 국부파손 예측모델로 결정하였다.

3. 증기발생기 세관 소성붕괴실험

선행연구⁽¹⁶⁾에서 평판을 대상으로 제안한 최적 국부파손 예측모델의 타당성을 검증하기 위해 동일 직선상에 존재하는 두 개의 축방향 관통노치를 가공한 증기발생기 세관시편을 사용하여 소성붕괴 실험을 수행하였다.

3.1 재료 및 시험편

본 실험에서는 가압경수로형 원자력발전소 증기발생기 세관재료로 사용되고 있는 Inconel 600 성분의 세관을 시험편으로 제작하여 사용하였다. 인장실험과 소성붕괴실험에 사용된 세관의 외경과 두께는 각각 19.05mm 와 1.09mm 이며, 화학적 조성은 Table 1 에 나타내었다. 세관의 재료물성을 측정하기 위해 세관시편을 사용하여 인장실험을 수행하였으며 그 결과를 Table 2 에 나타내었다.

소성붕괴실험은 동일 직선상의 두 개의 축방향 관통노치가 존재하는 세관을 이용하여 수행하였으며 실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 1 에 나타내었다. 노치는 전기방전가공(EDM)으로 제작하였으며 균열길이(2c)가 5, 10mm, 균열간 거리(d)가 각각 1, 2, 4mm 인 경우에 대해 소성붕괴실험을 수행하였다. 이외에 비교를 위해 2c 가 5, 10mm 인 단일균열이 존재하는 시험편에 대해서도 소성붕괴실험을 수행하였다.

3.2 실험장치 및 방법

증기발생기 세관 소성붕괴실험은 세관 내부에 작용하는 유체의 압력을 일정 속도로 증가시켜 세관이 소성붕괴되는 순간의 하중을 측정하는 실험이다. 이를 위해 본 연구에서 사용한 소성붕괴 실험장치는 고압 발생장치, 데이터 취득장치, 시험 고정장치 및 제어장치로 구성되어 있다.

일반적으로 가압률이 증가함에 따라 증기발생기 세관의 소성붕괴하중은 증가하는 것으로 알려져 있다. Table 3 은 ANL(Argonne National Lab.) 및 Framatome 에서 수행한 축방향 단일균열에 대한 증기발생기 세관 소성붕괴 실험결과^(23,24)를 나타낸 것으로서 가압률에 따른 소성붕괴하중을 보여주고 있다. ANL 의 실험결과를 검토한 결과, 가압률을 13.78MPa/s(2000psi/s)와 48.23MPa/s(7000psi/s)로 증가시킬 경우에는 준정적(quasi-static) 상태에서 얻어진 소성붕괴하중에 비해 각각 13% 및 24% 증가하였다. 또한 Framatome 의 실험결과로부터 가압률이 3.45MPa/s(500psi/s) 이하일 경우에는 소성붕괴하중에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가압률의 영향을 최소화하기 위해 2.8~4.1MPa/s(400~600psi/s)의 속도로 가압하면서 소성붕괴실험을 수행하였다.

한편 EPRI 등에서는 관통균열의 경우에는 세관이 파열되기 전에 작동유체의 누설이 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해 블래더(bladder)로서 플라스틱 세관을 사용하고, 블래더가 균열면을 가압하는 효과를 제거하기 위해 세관과 블래더 사이에 두께가 0.1524mm(0.006in) 이하인 보강박판(back-up foil)을 덧대도록 권고하고 있다.⁽²⁵⁾

Fig. 2 는 보강박판의 영향을 파악하기 위해 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm 두께의 황동 보강박판 또는 보강박판을 사용하지 않고 수행한 소성붕괴 실험결과

와 유한요소해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 유한요소해석에 대한 구체적인 내용은 다음 장에 상세히 기술하였으며 해석시 균열면에 압력을 고려하지 않았다. 2c 가 5mm 이고 0.2mm 두께의 보강박판을 사용하여 실험한 경우에는 균열개구변위(COD)가 해석으로 구한 값보다 약간 작게 측정되었으며, 이는 보강박판의 사용으로 인한 강성의 증가 때문인 것으로 판단된다.

Table 1 Chemical compositions of Inconel 600 tube

Element	C	Mn	Si	P
Wt. %	0.025	0.21	0.19	0.005
Element	S	Ni	Cr	Co
Wt. %	<0.001	74.19	15.52	0.018
Element	Ti	Al	Cu	Fe
Wt. %	0.29	0.22	0.012	9.30
Element	N	B	-	-
Wt. %	0.024	<0.0005	-	-

Table 2 Mechanical properties of Inconel 600 tube

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
285	674	214	40	0.3

Table 3 Influence of pressurization rate on plastic collapse load

I.D.	2c (mm)	a/t	Pressurization rate (MPa/s)	Plastic collapse load (MPa)	
ANL	19.05	0.8	Quasi-static	21.36	
			13.78	24.18	
			48.23	26.39	
Framatome	7.00	1.0	0.12	45.80	
			3.00	45.20	
			0.12	29.80	
	15.00		1.62	29.90	
			0.36	27.00	
			0.39	26.90	
			1.55	26.60	
			30.00	0.12	12.60
				0.52	12.80

0.15mm 의 보강박판을 사용한 경우에 약 40 MPa 이전에는 해석치와 잘 일치하였지만 그 이후에 해석치보다 더 크게 측정되었다. 이는 두께가 상대적으로 얇은 보강박판을 사용할 경우 높은 하중상태에 도달하게 되면 COD 가 증가하고 보강박판이 부풀어 올라 균열면을 가압하기 때문인 것으로 보인다. 보강박판을 사용하지 않은 경우에는 모든 하중상태에서 COD 가 해석치보다 크게 측정되었으며, 이는 블래더가 균열면을 가압하기 때문인 것으로 판단된다. $2c$ 가 10mm 인 경우에도 상대적으로 두꺼운 보강박판을 사용할 때 COD 가 작게 측정되었다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 3 에 나타난 것과 같이 블래더로서 3.175mm 두께의 타이곤(tygon) 판을 시편 내부에 삽입하였으며, 보강박판으로 두께의 영향을 최소화할 수 있다고 판단되는 0.15mm 두께의 황동박판을 사용하였다. 소성붕괴실험은 두 균열이 합체될 때까지 수행하였다. 하중증가에 따른 두 균열의 성장거동을 고배율 카메라를 사용하여 촬영하였으며 압력센서를 사용하여 세관시편 내면에 작용하는 하중을 측정하였다. 이러한 데이터들은 시간-영상 또는 시간-하중 데이터의 형태로 실시간으로 PC 에 저장하였다.

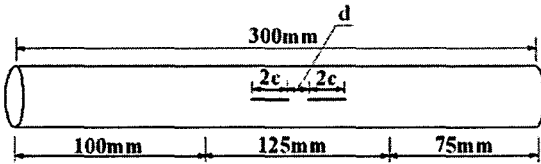


Fig. 1 Geometry of tested tube containing two collinear through-wall cracks

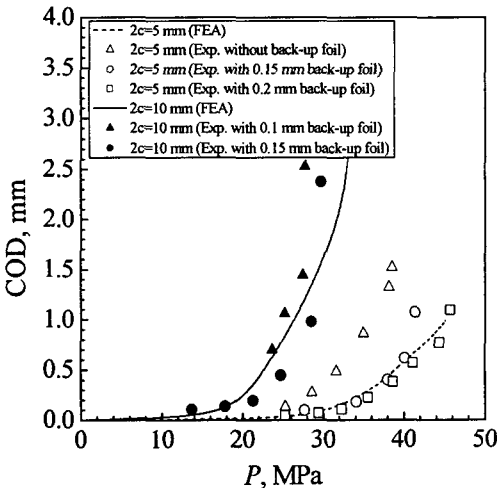


Fig. 2 Comparison of COD obtained by FE result and test result

3.3 실험결과

Fig. 4 는 하중증가에 따른 시편의 변형거동을 나타낸 것으로서 고배율 카메라를 사용하여 촬영한 것이다. (a)는 실험 수행전에 촬영한 사진으로서 두 개의 균열과 그 사이의 리거먼트를 보여준다. (b)는 두 균열이 합체되기 직전의 모습을 나타낸 것으로서, 하중증가에 의해 COD 가 증가되고 두 균열사이의 리거먼트가 크게 변형된 모습을 볼 수 있다. (c)는 두 균열이 합체되어 두 균열길이와 리거먼트 길이를 합한 길이를 갖는 단일균열로 변화된 상태를 나타낸 것이다. 두 균열이 합체되어 형성된 단일균열의 소성붕괴하중은 두 균열의 합체하중보다 작기 때문에 단일균열로 변화됨과 동시에 소성붕괴된다. (d)는 실험후의 모습을 나타낸 것으로서 균열 선단에서 불안정 균열성장이 발생하였음을 알 수 있다.

각각의 동일 직선상에 있는 두 균열의 합체하중(P_c)은 $2c$ 가 크고 d 가 작을수록 감소하는 경향을 보였으며 이를 Fig. 5 에 도시하였다. 제시된 값은 다음 장에서 선행연구⁽¹⁶⁾ 및 최적 국부파손 예측모델을 사용하여 구한 값의 타당성 입증에 사용된다.

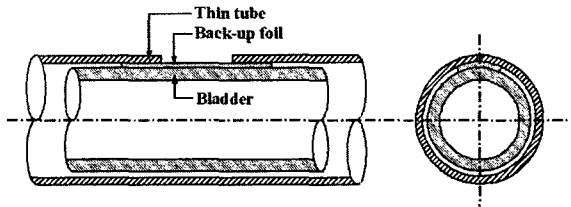


Fig. 3 Schematic illustration of a tube with bladder and back-up foil

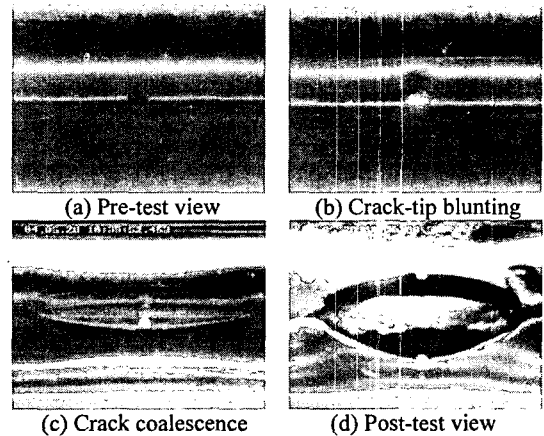


Fig. 4 Process of plastic collapse of SG tube containing two collinear through-wall cracks ($2c=5$ mm, $d=1$ mm)

4. 최적 국부파손 예측모델을 이용한 두 균열의 합체하중 예측

4.1 유한요소해석

이전 연구에서 최적 국부파손 예측모델로서 제안된 RFM, PZC-II, III, IV 모델의 타당성을 검증하기 위해 증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합체하중을 예측하였으며 소성붕괴 실험결과와 비교하였다. 세관의 변형거동을 살펴보기 위한 3 차원 탄소성 유한요소해석에는 상용 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4 를 사용하였다.

Fig. 6 은 동일 직선상에 두 개의 축방향 관통균열이 존재하는 증기발생기 세관의 유한요소모델을 나타낸 것으로서, 대칭성을 이용하여 1/4 만 모델링 하였으며 20 절점요소(20-node brick element)를 사용하여 요소망을 구성하였다. 이 때 노치선단의 곡률반경은 실제 시편과 동일하게 0.09mm 로 고려하였다.

해석은 $2c$ 가 5, 10mm, d 가 각각 1, 2, 4mm 인 경우에 대해 수행하였다. 총 4 가지 최적 국부파손 예측모델을 사용하여 각각에 대한 균열 합체하중을 계산하였으며, 그 결과를 무차원화하여 Table 4 에 수록하였다. 표에 나타난 바와 같이 증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합체하중은 $2c$ 가 크고 d 가 작을수록 감소하는 경향을 보였다.

4.2 결과 및 고찰

Table 4 는 각각의 단일균열의 소성붕괴하중과 동일 직선상에 있는 두 균열의 합체하중의 예측결과를 실험결과로 무차원화하여 나타낸 것으로서 두 균열의 합체하중은 $2c$ 가 크고 d 가 작을수록 감소하는 경향을 보였다. 축방향 단일 관통균열의 소성붕괴하중(P_{cr})은 한계하중법에 기초하여 제시된 다음 식으로 계산할 수 있다.⁽²⁶⁾

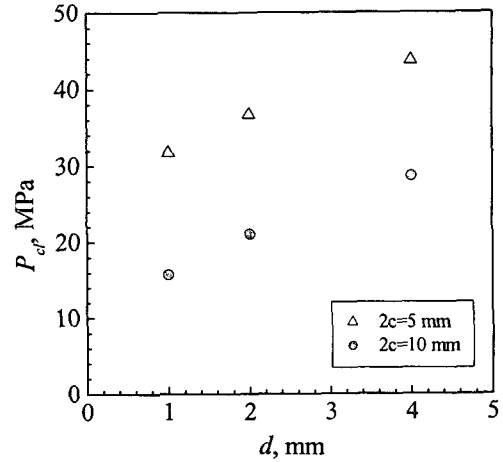


Fig. 5 Experimental coalescence loads of collinear cracks

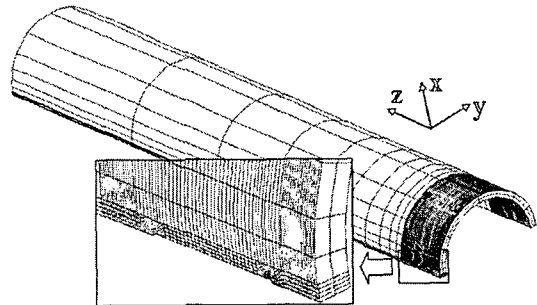


Fig. 6 A typical finite element mesh of SG tube containing two collinear through-wall cracks ($2c=5$ mm, $d=4$ mm)

Table 4 Coalescence loads of SG tube containing two collinear through-wall cracks

Crack size (mm)	Plastic collapse load for a single crack	Coalescence load for two collinear cracks		
	Erdogan Eq.	RFM	PZC-II	PZC-IV
$2c=5, d=1$	0.967	0.917	0.899	0.917
$2c=5, d=2$		0.972	0.949	0.965
$2c=5, d=4$		0.971	0.974	0.974
$2c=10, d=1$	0.971	0.984	0.989	0.989
$2c=10, d=2$		0.988	0.983	0.992
$2c=10, d=4$		0.967	0.970	0.970

$$P_{cr} = \frac{\sigma_f t}{M_T R} \quad (1)$$

여기서, σ_f 는 유동응력, t 는 관두께, R 은 세관의 평균반경, M_T 는 Erdogan 이 제시한 벌징계수(bulging factor)로서 다음과 같이 표현된다.

$$M_T = 0.614 + 0.481\lambda + 0.386 \exp(-1.25\lambda) \quad (2)$$

for $5 \leq R/t \leq 50$

$$\lambda = [12(1-\nu^2)]^{0.25} (c/\sqrt{Rt}) \quad (3)$$

여기서, λ 는 쉘 파라미터, ν 는 포아송비, c 는 균열 길이의 1/2이다. 식 (1)을 사용하여 소성붕괴하중을 예측하였으며, 예측결과는 약 3% 이내에서 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 7 은 RFM 모델을 적용하여 구한 하중증가에 따른 균열사이 리거먼트에서 발생하는 반력의 변화를 도시한 것이다. $2c$ 가 크고 d 가 작을수록 최대 반력을 유발하는 하중이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 8 은 하중증가에 따른 소성역의 변화를 $2c=5\text{mm}$, $d=2\text{mm}$ 인 경우에 대해 나타낸 것이다. 소성역은 균열간 거리가 작은 경우에는 세관의 중앙면, 내면, 외면의 순서로, 균열간 거리가 큰 경우에는 내면, 중앙면, 외면의 순서로 빠르게 성장하였다.

한편 PZC-III 모델은 평판에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 관통균열의 합체하중은 비교적 정확하게 예측하였으나, 증기발생기 세관에 적용할 경우 수치해석시 수렴하는 범위내의 모든 경우에 두 균열이 합체되지 않는 것으로 예측하여 비보수적인 결과를 초래하였다. 따라서 PZC-III 모델은 증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합체를 예측하기에 부적절한 것으로 판단된다.

Fig. 9 는 RFM, PZC-II, PZC-IV 모델을 사용하여 예측한 결과를 실험결과와 비교한 것으로서, 세가지 모델 모두 실험값을 비교적 근접하게 예측하였다. 이중 RFM 과 PZC-IV 모델은 실험결과를 최대 8%, 평균 3% 내에서 작게 예측하였으며, PZC-II 모델은 최대 10%, 평균 4%내에서 작게 예측하였다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 평판을 사용하여 결정한 최적 국부파손 예측모델인 RFM 과 PZC-IV 는 증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합체하중 예측에도 무리 없이 사용 가능한 것으로 판단된다.

Table 5 는 내압이 작용하는 세관과 인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 두 관통균열의 합체하중을 RFM 모델을 사용하여 예측한 결과를 무차원화하여 나타낸 것이다. 평판모델은 세관의 축방향 길이, 원주방향 길이, 두께를 이용하여 사각평판 형태로 구성하였으며, 세관의 경우에 내압에

의해 발생하는 원주방향하중에 상당하는 하중을 평판시편 양 끝단에 가하였다. 두 균열의 합체하중은 두 균열이 평판에 존재할 경우보다 세관에 존재할 때 더 작게 나타났으며, 이는 세관의 경우 압력에 의한 균열주위의 부풀이 원인인 것으로 판단된다. 본 논문에서는 동일 직선상에 있는 두 균열에 대한 부풀계수(M_D)를 다음과 같이 정의하였다.

$$M_D = \frac{P_{plate}}{P_{tube}} \quad (4)$$

여기서, P_{plate} 와 P_{tube} 는 각각 평판과 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 균열의 합체하중을 의미한다.

Table 5 에 나타낸 바와 같이 균열길이가 증가하고 균열간 거리가 감소할수록 부풀의 영향은 증가하였다. 이러한 부풀영향의 보다 체계적인 정량적 평가 연구는 추후 수행할 예정이다.

한편 실험 및 예측 결과로부터 d 가 특정값 이상인 경우에 단일균열의 소성붕괴하중과 두 균열의 합체하중이 거의 동일하게 나타남을 확인하였다. 이로부터 두 균열간 거리가 멀어질 경우에 균열사이의 간섭효과가 사라지고 단일균열처럼 거동함을 알 수 있다. 균열길이 및 균열간 거리에 따라 다중균열의 영향이 사라지고 단일균열과 같이 거동하는 정확한 시점은 최적 국부파손 예측모델에 기반을 둔 해석을 수행함으로써 결정할 수 있다.

5. 균열합체평가선도 제안

전술한 실험 및 예측 결과로부터 증기발생기 세관에 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합체하중 예측시 RFM 과 PZC-IV 모델을 사용하는 것이 타당함을 확인하였다.

Table 5 Comparison of coalescence loads between SG tube and plate

Crack size (mm)	Coalescence load for two collinear cracks		
	Tube	Plate	Bulging factor
$2c=5, d=1$	0.84	1.15	1.37
$2c=5, d=2$	1.03	1.25	1.21
$2c=5, d=4$	1.23	1.43	1.17
$2c=10, d=1$	0.45	0.98	2.18
$2c=10, d=2$	0.60	1.05	1.75
$2c=10, d=4$	0.80	1.15	1.44

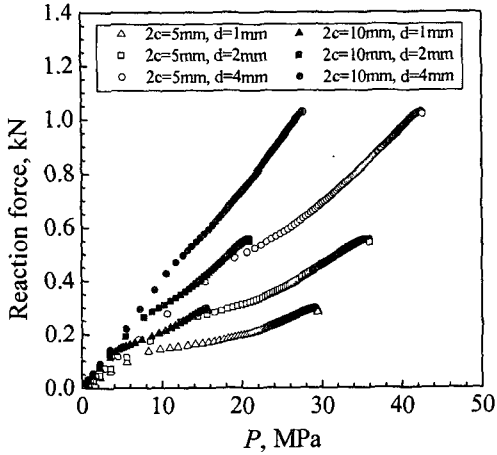


Fig. 7 Change of reaction forces in the ligament between two cracks

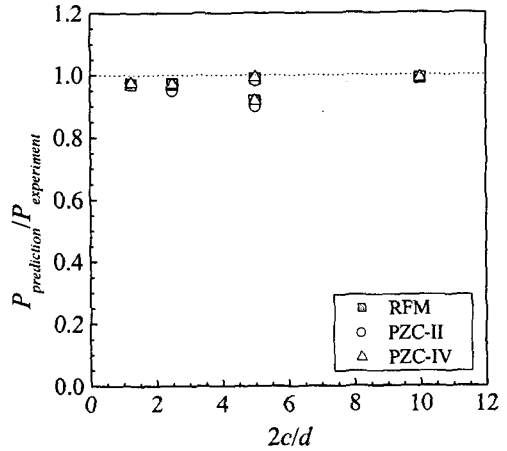


Fig. 9 Normalized coalescence load prediction results

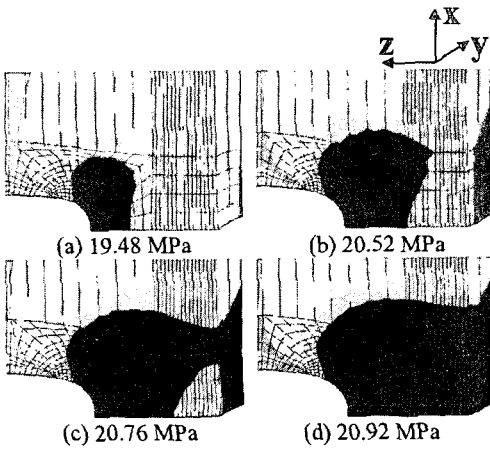


Fig. 8 Contour plots of von Mises stress

이와 더불어 비파괴검사에서 검출된 다중균열의 합체여부를 결정하기 위해서는 두 균열이 합체되는 하중 또는 두 균열 사이의 간섭효과가 사라지고 단일균열과 같이 거동하는 시점을 정확히 평가하는 것이 바람직하다. 따라서 본 장에서는 다중균열의 합체여부를 결정할 수 있는 합체평가선도 작성을 위해 추가적인 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 최적 국부파손 예측모델 중의 하나인 RFM 모델을 사용하여 $2c$ 가 2, 4, 6, 8, 10, 12mm이고 d 가 각각 1, 2, 4, 6, 8mm인 경우에 대하여 추가해석을 수행하였으며, 그 결과로부터 균열이 합체되는 순간의 작용하중을 결정하였다.

Fig. 10 은 유한요소해석 결과로부터 두 균열이 합체되는 순간의 하중을 결정할 수 있는 선도를 도시한 것이다. 그림에서 실선은 단일균열의 소성붕괴하중을 나타내며 각각의 기호는 두 균열의

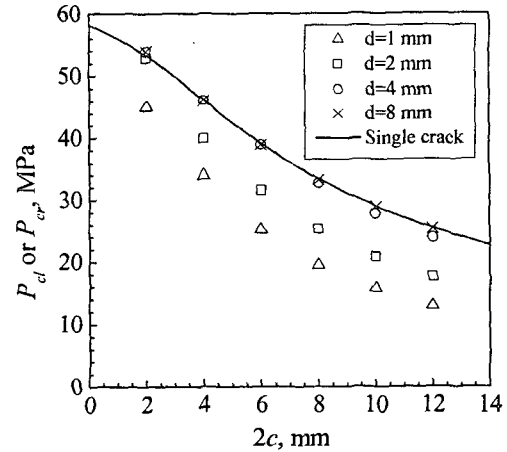


Fig. 10 Change of coalescence load-crack length curve

합체하중을 나타낸다. 균열간 거리가 4 mm 이상인 경우에는 인접한 두 균열의 합체하중은 단일균열의 소성붕괴하중과 거의 일치하였다. 이는 균열간 거리가 4 mm 이상인 경우에는 인접한 균열사이에 간섭효과가 발생하지 않음을 의미한다.

Fig. 10 의 결과를 Fig. 11 과 같이 축 매개변수를 바꾸어 나타내면 주어진 작용하중 하에서 두 개의 균열이 합체될 때의 균열간 거리를 결정할 수 있다. 따라서 Fig. 11 을 합체평가선도라 명하였으며, 이를 사용하면 비파괴검사에서 검출된 동일 직선상에 존재하는 두 균열의 합체여부를 신속, 정확하게 평가할 수 있다. 동일 직선상에 존재하는 두 균열은 합체 후에 각각의 균열길이와 균열간 거리를 합한 새로운 균열로 변화된다.

참고문헌

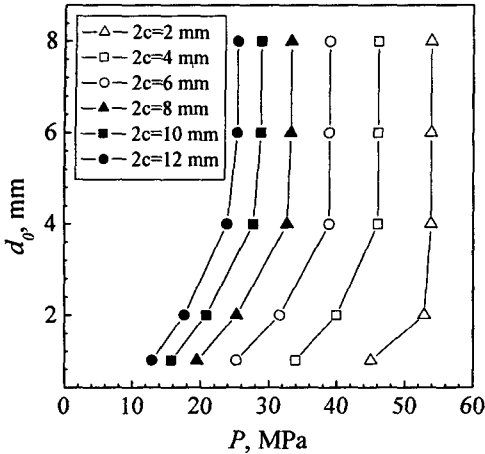


Fig. 11 Coalescence evaluation diagram

6. 결론

본 연구에서는 다중균열 구조물의 소성붕괴거동 평가를 위해 증기발생기 세관시편을 사용하여 소성붕괴실험을 수행하고, 유한요소해석을 통해 최적 국부파손 예측모델의 타당성을 검증하였으며, 균열합체평가선도 개발을 위한 추가적인 해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 가압률 및 보강박판이 증기발생기 세관의 소성붕괴하중에 미치는 영향을 검토하였으며 이들의 영향을 최소화하기 위한 실험조건을 결정하였다. 이러한 실험조건을 이용하여 증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 균열의 합체하중을 측정하였다.

(2) 두 균열사이 리저먼트의 반력에 기초한 모델(RFM)과 소성역 접촉에 기초한 모델(PZC-IV)은 증기발생기 세관에 동일 직선상으로 존재하는 두 개의 축방향 관통균열의 합체를 정확하게 예측하였다.

(3) 최적 국부파손 예측모델을 적용하여 다중균열의 합체여부를 결정하기 위한 균열합체평가선도를 작성하였으며, 이를 이용하면 비파괴검사서에서 검출된 다중균열의 합체여부를 신속, 정확하게 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국원자력안전기술원 및 한국과학기술원 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

- (1) USNRC, 1996, "Steam Generator Tube Failures," NUREG/CR6365.
- (2) USNRC, 1976, "Bases for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes," Regulatory Guide 1.121.
- (3) ASME, 1998, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III.
- (4) Cochet, B. and Flesch, B., 1987, "Crack Stability Criteria in Steam Generator Tubes," 9th Int. Conference on SMiRT, Vol. D, pp. 413~419.
- (5) 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.
- (6) Kim, H.D., Chung, H.S. and Hong, S.R., 1999, "Discussion on Operation Leakage Criteria of Ulchin Unit 1&2 Steam Generators," Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting.
- (7) Kim, H.D., Kim, K.T. and Chung, H.S., 1999, "Structural Integrity Assessment on Axial PWSCC of Steam Generator Tubes," Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting.
- (8) Gorman, J.A., Harris, J.E. and Lowenstein, D.B., 1995, "Steam Generator Tube Fitness-for-Service Guidelines," AECB Report, No. 2.228.2.
- (9) 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.
- (10) Kim, J.S. et al., 1999, "Investigation Report for Steam Generator Tubes Pulled Out from Ulchin #1."
- (11) Murakami, Y., 1987, "Stress Intensity Factors Handbook," pp. 204~205.
- (12) Cho, Y.J., 1990, "A Study on the Interaction Effect of Adjacent Semi-Elliptical Crack," Master's Thesis.
- (13) Hasegawa, H., Miyazaki, K. and Kanno, S., 2001, "Interaction Criteria for Multiple Flaws on the Basis of Stress Intensity Factors," ASME PVP, Vol. 422, pp. 23~29.
- (14) Moussa, W.A., Bell, R. and Tan, C.L., 1999, "The Interaction of Two Parallel Non-Coplanar Identical Surface Cracks under Tension and Bending," Int. J. PVP, Vol. 76, pp. 135~145.
- (15) Park, J.H., 1996, "Analysis of an Isotropic Infinite Plate with Many Collinear Multiple Cracks by the Alternating Method," Transactions of the KSME A, Vol. 20, No. 12, pp. 3838~3846.
- (16) Moon, S.I., Kim, Y.J. and Lee, J.H., 2003, "Estimation of Plastic Collapse Load of Steam Generator with Two Parallel Axial Through-Wall Cracks," ASME PVP, Vol. 464, pp. 223~230.
- (17) 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.
- (18) 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. 2, pp. 250~262.
- (19) 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.
- (20) Park, Y.W., Song, M.H. and Lee, J.H., 2000, "Steam Generator Tube Integrity Program," KINS/RR-001.
- (21) Lee, J.H., Park, Y.W., Song, M.H., Kim, Y.J. and Moon, S.I., 2000, "Evaluation of Plugging Criteria on Steam Generator Tubes and Coalescence Model of Collinear Axial Through-Wall Cracks," *J. Korean Nuclear Society*, Vol. 32, pp. 465~476.
- (22) Diercks, D.R., 2000, "Steam Generator Tube Integrity Program Monthly Report," ANL.
- (23) Diercks, D.R., 1998, "Steam Generator Tube Integrity Program Monthly Report," ANL.
- (24) EPRI, 1991, "Steam Generator Tube Integrity," EPRI NP-6865-L, Vol. 1.
- (25) McIlree, A., 2002, "Steam Generator Tubing Burst Testing and Leak Rate Testing Guidelines," *EPRI*, Technical Report 1006783.
- (26) Erdogan, F., 1976, "Ductile Failure Theories for Pressurized Pipes and Containers," *Int. J. PVP*, Vol. 4.