2016년 2월

석사학위 논문

파열시험을 통한 다중 부분관통균열이 존재하는 증기발생기 전열관의 손상거동 평가

조선대학교 대학원

원자력공학과

엄 기 현

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265541

파열시험을 통한 다중 부분관통균열이 존재하는 증기발생기 전열관의 손상거동 평가

Evaluation on the Failure Behavior of Steam Generator Tube with Multiple Part-Through-Wall Flaws by Burst Test

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

엄 기 현

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

파열시험을 통한 다중 부분관통균열이 존재하는 증기발생기 전열관의 손상거동 평가

지도교수 김 진 원

이 논문을 원자력석사학위 신청 논문으로 제출함

2015년 12월

조선대학교 대학원

원자력공학과

엄 기 현

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

엄기현의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

2015년 12월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

표 목차 ····· iii
그림 목차 ····· iv
ABSTRACT ····· vi

제 1 장 서론 ····· 1

제 2 장 증기발생기 전열관 파열시험 ····· 2
제 1 절 증기발생기 전열관 시편 및 재료 ····· 2
제 2 절 파열시험장치 ····· 10
제 3 절 예비파열시험 ····· 13

제 3 장 손상시험 결과 및 토의 ····· 15
제 1 절 축방향 표면균열의 손상압력 ····· 15
1. 축방향 단일 표면균열에 대한 손상압력 ····· 15
2. 동일선상에 배열된 2개의 축방향 표면균열에 대한 손상압력 ····· 16
3. 평행하게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상압력 ····· 18
4. 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상압력 ····· 21
5. 손상압력에 미치는 축방향 표면균열 개수의 영향 ····· 23
제 2 절 원주방향 표면균열의 손상압력 ····· 25

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 축방향과 원주방향의 복합 표면균열의 손상압력 ····· 27

제 4 절 균열의 위치, 형상, 방향, 배열에 따른 전열관 시편의 손상모드 ····· 29

1. 단일 축방향 표면균열의 손상모드 ····· 29
2. 동일 선상에 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드 ··· 29
3. 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드 ····· 31
4. 평행한 다중 축방향 표면균열의 손상모드 ····· 32
5. 다중 원주방향 표면균열의 손상모드 ····· 33
6. 복합 표면균열의 손상모드 ····· 34

제 4 장 결론 ····· 36

참고문헌 ····· 38

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

표 2.1.1. 시험에 사용된 Alloy 690TT 전열관의 화학조성(CMTR) ····· 2
표 2.1.2. 상온 파열시험에 고려된 결함의 형상 및 배치 종류 ····· 6

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 목차

그림 2.1.1. 전열관지지판에서 검출된 표면균열의 형상 ····· 3
그림 2.1.2. 전열관지지판의 형상과 균열 발생 위치 ····· 4
그림 2.1.3. 전열관 시편에서 표면균열 형상 정의 ····· 8
그림 2.1.4. 전열관 파열시험에 고려된 표면균열의 배치 종류 및 형태 9
그림 2.2.1. 파열시험 장치의 구성도 및 제작이 완료된 파열시험 장치 ····· 11
그림 2.2.2. 전열관 시편의 피팅류 결합 ····· 11
그림 2.2.3. 시험장치에 거치된 전열관 시편 ····· 12
그림 2.3.1. 파열시험 장치를 이용한 예비시험 결과 ····· 13
그림 3.1.1. 축방향 단일결함의 표면균열의 손상압력 ····· 16
그림 3.1.2. 동일선상에 배열된 2개의 축방향 표면균열에 대한 손상압력 ····· 17
그림 3.1.3. 평행한 축방향 표면균열의 손상압력 ····· 20
그림 3.1.4. 유한요소해석 시뮬레이션에 사용된 평행한 축방향 표면균열의 3D 모델 ····· 20
그림 3.1.5. 엇갈리게 배열된 2개의 축방향 표면균열에 대한 손상압력 ····· 22
그림 3.1.6. 유한요소해석 시뮬레이션에 사용된 엇갈리게 배열된 2개의 축방향 표면균열의 3D 모델 ····· 22
그림 3.1.7. 손상압력에 미치는 축방향 표면균열 개수의 영향 ····· 24
그림 3.2.1. 손상압력에 미치는 다중 원주방향 표면균열의 영향 ····· 26
그림 3.3.1. 축방향과 원주방향 복합 표면균열의 손상압력 ····· 27
그림 3.3.2. 유한요소해석 시뮬레이션에 사용된 축방향과 원주방향 복합 표면균열의 손상압력 ····· 29

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3.4.1. 축방향 단일 표면균열의 손상모드 ····· 30
그림 3.4.2. 동일 선상에 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드 ··· 31
그림 3.4.3. 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드 ····· 32
그림 3.4.4. 평행하게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드 ····· 33
그림 3.4.5. 다중 원주방향 표면균열의 손상모드 ····· 34
그림 3.4.6. 복합 표면균열의 손상모드 ····· 35

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Evaluation on the Failure Behavior of Steam Generator Tube with Multiple Part-Through-Wall Flaws by Burst Test

Eom Ki Hyeon
Advisor : Prof. Kim, Jin Weon
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

Steam generator tubes in nuclear power plants sustain the pressure difference between the primary reactor coolant system and the secondary system of nuclear power plants. However, steam generator tubes have been suffered from various types of degradation induced by mechanical and environment stressors while in-service. Therefore, a number of experimental and numerical studies have been conducted to evaluate the rupture of steam generator tubes. Most studies were performed on a single axial through-wall flaw. However, in practice, steam generator tubes with stress corrosion cracks were found by multiple part-through-wall flaws. Up to now, studies of steam generator tubes with multiple parts were insufficient. This study carried out burst tests on steam generator tube specimens containing multiple part-through-wall flaws. The specimens were machined from steam generator tube of alloy 690TT. All flaws were made by electro-discharge machining method on the outer surface of steam generator tubes, and depth of 50% of steam generator tubes.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

In the experiment, 9 types of multiple part-through-wall flaws, including collinear axial flaws, non-aligned axial flaws, parallel axial flaws, combined axial and circ. flaws, collinear circ. flaws, non-aligned circ. flaws and single flaw were considered. The tests were performed at room temperature with a pressurization rate of 1MPa/sec.

The interaction effect of axial collinear part-through-wall flaws diminished with increasing the separating axial ligament length. However, the failure pressure by interaction effect of axial collinear part-through-wall flaws deceased when the ligament between flaws was less than 5mm. In case of non-aligned axial part-through-wall flaws, the failure pressure diminished with increasing the separating circumferential ligament length. For parallel axial part-through-wall flaws, the failure pressure decreases the minimum at 90°. However, the failure pressure increases when the ligament between flaws was more than 15mm. For circumferential part-through-wall flaws, the failure pressure was similar to the failure pressure of sound steam generator tubes. For combined axial and circ. part-through-wall flaws, the failure pressure of length of 25.4mm was not the interaction effect. Multiple part-through-wall flaws with length of 6.3 or 12.7mm failed by coalescence and unstable tearing. The flaws with length of 25.4mm or 50.8mm failed by rupture at one of multiple part-through-wall flaws.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

원자력발전소(이하 원전)에 사용되는 증기발생기 전열관은 핵분열에 의해 생성된 열을 1차 냉각재가 전달받아 2차측으로 전달하는 역할을 하며, 1차측과 2차측의 압력 차이를 지탱하는 1차측과 2차측의 경계역할을 한다. 즉, 증기발생기 전열관은 열전달과 압력경계이라는 두 가지 역할을 수행하게 된다. 그리고 증기발생기 전열관은 열전달측면에서 효율적으로 열을 전달하기 위해서 두께가 매우 얇게 설계되고 제작되어 진다.[1,2] 또한, 증기발생기 전열관에서는 지지구조물마모와 같은 기계적인 원인에 의한 손상기구와 응력부식균열이나 피팅 등 화학적인 결함기구가 발생되고 있다. 즉, 증기발생기 전열관은 운전 중에 다양한 원인으로 인해 표면에 결함이 발생되며, 원전 증기발생기 전열관에는 다양한 형태의 결함이 발생될 수 있는데, 가장 많이 발생되고 있는 대표적인 결함이 증기발생기 전열관 외부표면(2차측)에서 발생되는 응력부식균열(SCC, Stress corrosion cracking)로 알려져 있다.[3-5] 이와 같이 증기발생기 전열관에 손상이 발생할 가능성이 매우 높다. 만약, 전열관에 손상이 발생하는 경우에는 1차측의 냉각수가 2차측으로 유출되는 사고가 발생되고, 누설로 인한 방사능 유출 및 원전의 가동 정지 등 심각한 경제적, 사회적 문제를 유발할 수 있다.[4,6]

따라서, 전열관 외부표면에 발생되는 응력부식균열 중에서 축방향 단일관통균열에 대해서 평가가 많이 수행되어 왔고, 단일균열의 파열압력 예측모델도 제시되어 있다. 그러나, 실제 증기발생기 전열관에서 발견되는 응력부식균열들은 대부분 다중 부분관통균열로 발생되며, 현재까지 부분관통균열을 모사한 증기발생기 전열관은 단일 부분관통균열에 대한 연구가 많았고, 상대적으로 다중 부분관통균열을 모사한 증기발생기 전열관에 대한 손상거동 연구가 미흡한 상태이다.[2,6-16]

본 연구에서는 상온파열시험을 통해서 다중 부분관통균열의 상호작용 효과가 증기발생기 전열관의 손상거동에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 또한, 다중 부분관통균열의 상호작용 효과가 전열관의 손상모드에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 증기발생기 전열관 파열시험

제 1 절 증기발생기 전열관 시편 및 재료

본 연구에서 사용된 재료는 국내 원자력발전소(이하 원전)의 증기발생기 전열관으로 제작하고 남은 Alloy 690TT 전열관을 확보하여 수행하였다. 실제 국내 원전의 증기발생기에서 응력부식균열(SCC, Stress Corrosion Cracking)이 발생되고 있는 전열관 재료는 Alloy 600이다. 그러나, 현재 Alloy 600은 증기발생기 제작에 사용되지 않고 있을 뿐만 아니라 생산도 하지 않고 있기 때문에 확보가 거의 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 Alloy 690 전열관을 이용하여 시험을 수행하였으며, Alloy 600와 Alloy 690의 SCC 저항성은 큰 차이를 보이지만, 본 연구에서 파악하고자 하는 기계적 성질과 파손 특성은 큰 차이가 없기 때문에 Alloy 600 대신 Alloy 690을 사용하였다. 본 시험에 사용된 Alloy690TT 전열관의 기계적 물성치는 시험에 사용된 전열관에 따라 Heat와 Lot가 차이가 있지만, 주로 사용된 전열관의 Heat와 Lot로 인장시험을 수행한 결과로 항복응력과 인장응력을 얻었다. 각각 314.9MPa과 696.3MPa이고, 총연신률은 50.2%이다. 또한, 시험에 사용된 시편의 화학조성은 재료성적서(CMTR, Certified Material Test Report)상에 나온 것을 표 2.1.1에 정리하였다.

표 2.1.1. 시험에 사용된 Alloy 690TT 전열관의 화학조성(CMTR)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	Nb	Al	B	N	Fe
0.01	0.30	0.26	0.01	0.00	0.04	29.6	59.3	0.03	0.01	0.25	0.00	0.17	0.00	0.00	9.91

전열관 파열시험에 관해서 EPRI지침서를 참고하여 전열관 파열시편을 제작하였다. 파열압력이 파열시편의 길이에 영향을 받지 않기 위해서는 전열관 파열시편이 직경의 6배 이상이어야 하고, 파열시편의 결함의 끝단이 파열시편 양쪽 끝단으로부터 직경의 1.5배 이상 떨어져 위치하여야 한다고 나왔고, 이에 따라 파열시편의 총 길이가 200mm이상이여야 파열압력에 영향을 주지 않고, 파열압력을 얻을 수 있다고 평가되었다. 본 파열시험에서는 전열관의 총 길이를 220mm로 정하여 수행하였다.[6,12-13]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

파열시험에 사용되는 전열관 시편에 결함을 가공하기 위해서, 실제 원전 전열관에서 발견되고 있는 결함의 유형과 형태, 크기 등을 검토하여 제작하였다. 결함의 형태에 대해서 표 2.1.2에 나타내었다. 원전 증기발생기 전열관에는 다양한 형태의 결함이 발생될 수 있는데, 가장 많이 발생되고 있는 결함이 전열관 외부 표면(2차측)에서 발생하는 응력부식균열(Stress corrosion cracking, SCC)이다. 응력부식균열은 주로 과판상단(TTS), 전열관지지판(TSP), 관판내부(T/S) 등과 접하는 부분에서 발생하며, 이들 균열 중 약 92%가 전열관지지판에서 발견되고, 약 6% 정도가 관판상단에서 발견되었다. 전열관지지판에서 발견된 대부분의 응력부식균열은 축방향 균열이며, 관판상단에서는 축방향과 함께 원주방향 결함이 발생되었다. 그림 2.1.1과 같이 비파괴검사를 통해 국내 원전의 증기발생기 전열관에서 발견되는 축방향 균열의 깊이는 대부분 두께의 50%미만이며, 균열의 길이는 최대 37mm까지 발견되지만, 대부분의 균열은 15mm 이하인 것으로 파악되었다.

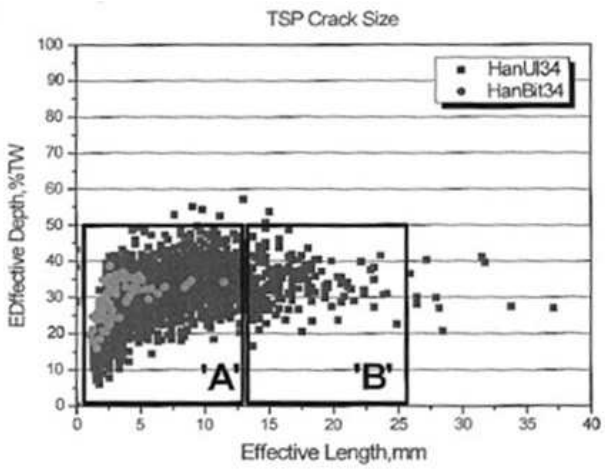


그림 2.1.1 전열관지지판에서 검출된 표면균열의 형상

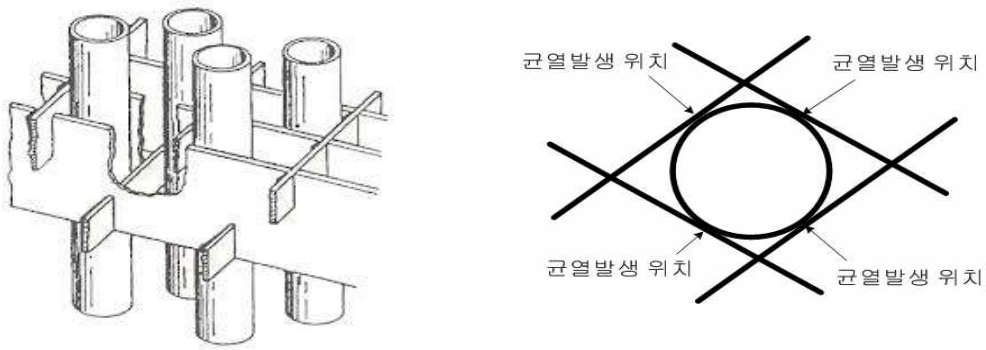
전열관지지판에서 발견되는 축방향 균열은 전열관과 지지대의 접촉면을 따라 길이방향으로 성장하였고, 따라서, 축방향 균열길이가 25.4mm 또는 50.8mm인 것을 고려하며, 축방향 결함의 최대 길이는 50.8mm이며, 다중 균열이 발생할지라도 결함의 축방향 길이는 50.8mm 이내일 것으로 예측된다. 또한, 다중 균열의 원주방향 위치는 그림 2.1.2

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에서 알 수 있는 바와 같이 매우 가까운 위치(동일한 접촉 위치)에서 생성되거나 약 90°또는 180°정도 떨어진 위치에서 생성될 수 있는 것으로 판단되었다.

관판상단에서는 축방향 균열과 원주방향 균열이 모두 발생될 수 있으므로 축방향과 원주방향의 다중균열이 발생될 수 있다.



(a) 전열관지지판 형상 (b) 전열관-지지판의 원주방향 접촉 위치

그림 2.1.2 전열관지지판의 형상과 균열 발생 위치

앞서 파악된 균열의 유형과 형태, 크기 등을 고려하여 전열관 시편을 가공하였다. 파열시험에 고려할 균열은 SCC균열이므로 전열관의 외부 표면에 위치하며, 균열의 깊이(d)가 두께의 50%인 표면균열을 고려하였고, 표면 균열의 형상은 그림 2.1.3에 나타낸 것과 같이 일정한 깊이와 축방향 길이(L)를 갖는 사각결함 또는 일정한 깊이와 원주방향 길이(C)를 갖는 사각결함으로 가정하였다.

본 파열시험에서는 단일결함뿐만 아니라 다중 표면균열이 전열관의 파열압력에 미치는 영향을 파악하고자 이들 표면균열이 다양한 조합으로 배열된 다중 결함을 갖는 시편을 설계하였다. 그림 2.1.4은 최종적으로 설계가 완료된 다중 결함의 배치를 정리한 것으로 단일 축방향 균열(AS), 여러 개의 축방향 균열이 길이방향으로 일렬도 배치된 경우(AC, ACT), 축방향 균열이 원주방향으로 평행하게 배열된 경우(AP, APT), 축방향 균열이 길이방향으로 엇갈리게 배열된 경우(AN, ANT), 축방향 균열과 원주방향 균열이 함께 존재하는 경우(CX), 단일 원주방향 균열(CR), 두 개의 원주방향 균열이 원주방향으로 일렬로 배치된 경우(CRA), 여러 개의 원주방향 균열이 원주방향으로 엇갈리

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

게 배치된 경우(CRN_A, CRN_B)를 수행하였다.

각각의 결함 배치에 대해서 결함 길이와 결함 사이의 거리 등이 변수로 고려되었으며, 결함의 길이와 결함간 거리는 앞서 살펴본 증기발생기 전열관에서 발견되는 결함의 형상과 기존 연구결과를 바탕으로 결정하여 수행되었다. 시편 가공에서 고려된 결함의 크기와 배치 형태는 총 44 경우이다. 각각의 시편 종류 별로 2개씩 가공하였으며, 결함은 방전가공(EDM)으로 가공하였다. EDM가공된 결함의 폭은 0.13mm로 실제 SCC 결함에 비해 폭이 넓지만, 전열관에서 SCC균열은 파열시 연성 파괴거동을 보이므로 균열의 폭이 0.2 ~ 0.3mm 이하인 경우에는 파열압력에 미치는 균열의 폭의 영향은 없는 것으로 알려져 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 2.1.2 상온 파열시험에 고려된 결함의 형상 및 배치 종류

시편번호	d/t	결함 개수	축방향결함길이, $L_1/L_2/L_3$(mm)	원주방향결함 길이, C(mm)	축방향간격, s(mm)	원주방향간격, l_1/l_2(mm)
AS-A	0.5	1	6.3	N/A	N/A	N/A
AS-B		1	12.7	N/A		
AS-C		1	25.4	N/A		
AS-D		1	50.8	N/A		
AC-A		2	6.3/6.3	N/A	1	Collinear
AC-B		2	6.3/6.3	N/A	2	
AC-C		2	6.3/6.3	N/A	5	
AC-D		2	6.3/25.4	N/A	1	
AC-E		2	25.4/25.4	N/A	1	
AC-F		2	25.4/25.4	N/A	2	
AC-G		2	25.4/25.4	N/A	5	
ACT-A		2	6.3/6.3/6.3	N/A	2/2	
ACT-B		2	12.7/25.4/12.7	N/A	1/1	
AP-A		3	6.3/6.3	N/A	Parallel (s=0)	1
AP-B		3	25.4/25.4	N/A		1
APT-A		2	6.3/6.3/6.3	N/A		1/2
APT-B		2	6.3/6.3/6.3	N/A		1/15
APT-C		2	6.3/6.3/6.3	N/A		1/30
APT-D		2	25.4/25.4/25.4	N/A		1/2
APT-E		2	25.4/25.4/25.4	N/A		1/15
APT-F		2	25.4/25.4/25.4	N/A		1/30
AN-A		2	6.3/6.3	N/A	Nonaligned (s=0)	1
AN-B		2	6.3/6.3	N/A		2
AN-C		2	6.3/6.3	N/A		15
AN-D		2	25.4/25.4	N/A		1
AN-E		2	25.4/25.4	N/A		2
AN-F		2	25.4/25.4	N/A		15
ANT-A		3	6.3/6.3/6.3	N/A		1/1
ANT-B		3	6.3/6.3/6.3	N/A		2/2
ANT-C		3	12.7/25.4/12.7	N/A		1/1

Collection @ chosun

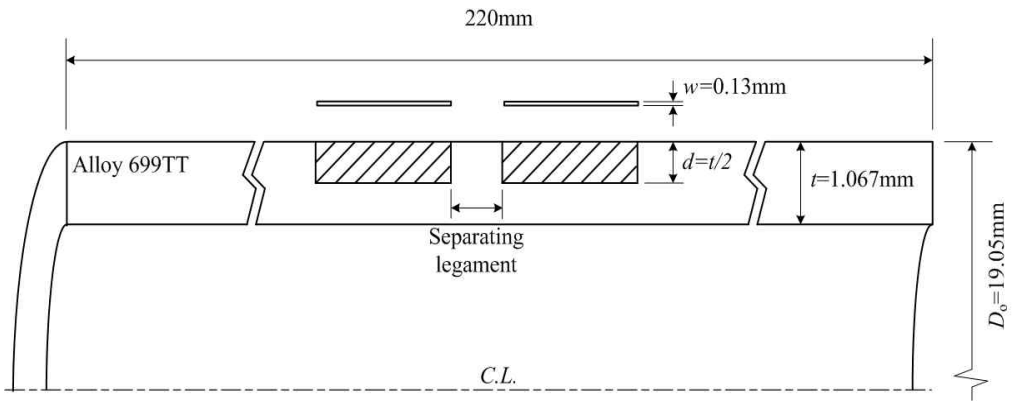
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 2.1.2 상온 파열시험에 고려된 결함의 형상 및 배치 종류(계속)

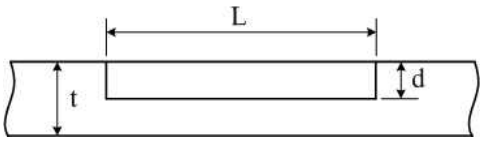
시편번호	d/t	결함 개수	축방향결함길이, $L_1/L_2/L_3$(mm)	원주방향결함 길이, C(mm)	축방향간격, s(mm)	원주방향간격, l_1/l_2(mm)
CX-A	0.5	2	6.3	15	0	Perpendicular
CX-B		2	6.3	15	1	
CX-C		2	6.3	15	2	
CX-G		2	6.3	15	5	
CX-D		2	25.4	15	0	
CX-E		2	25.4	15	1	
CX-F		2	25.4	15	2	
CX-H		2	25.4	15	5	
CX-I		2	25.4	15	10	
CR-A		1	N/A	15	0	0
CRA-A		2	N/A	15/15	Aligned (l=0)	1
CRA-B		2	N/A	15/15		2
CRN-A		2	N/A	15/15	1	Nonaligned
CRN-B		3	N/A	15/15	1/1	

Collection @ chosun

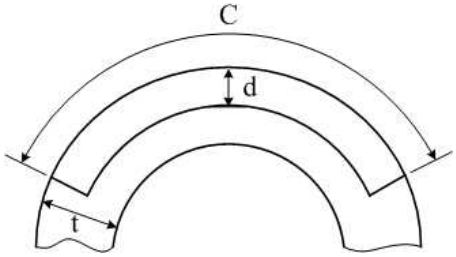
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 다중 표면균열 전열관 시편의 형상



(b) 축방향 표면균열

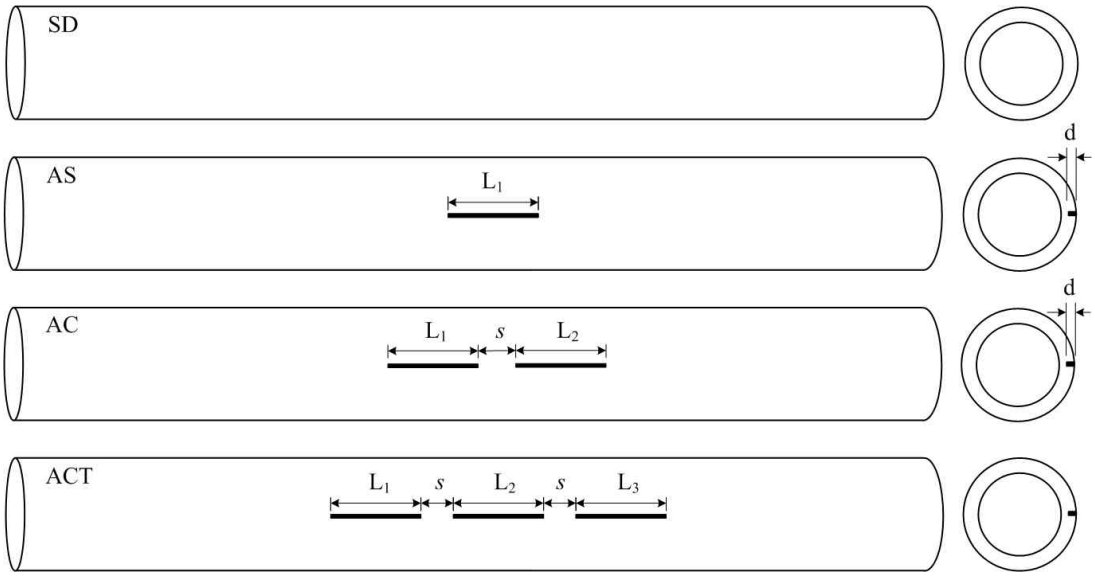


(c) 원주방향 표면균열

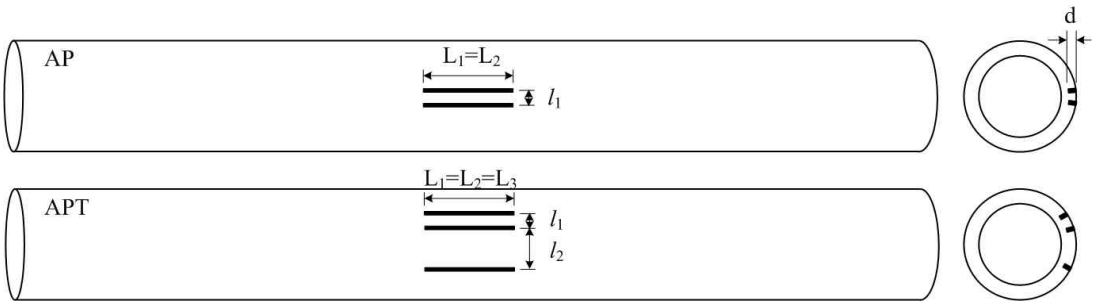
그림 2.1.3 전열관 시편에서 표면균열 형상 정의

Collection @ chosun

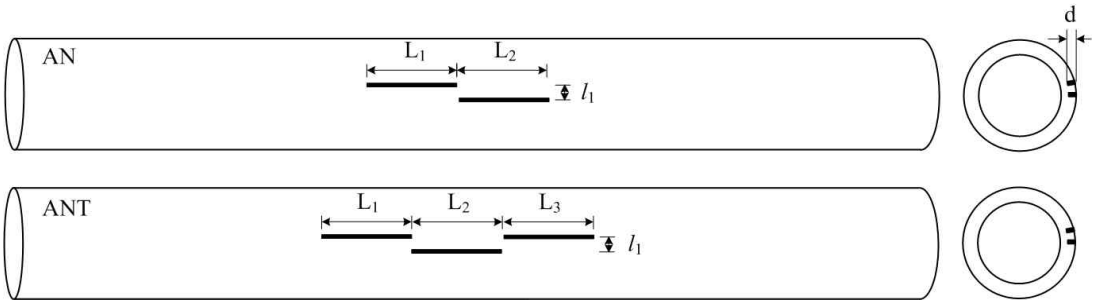
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) SD, AS, AC, ACT 균열 배치



(b) AP, APT 균열 배열

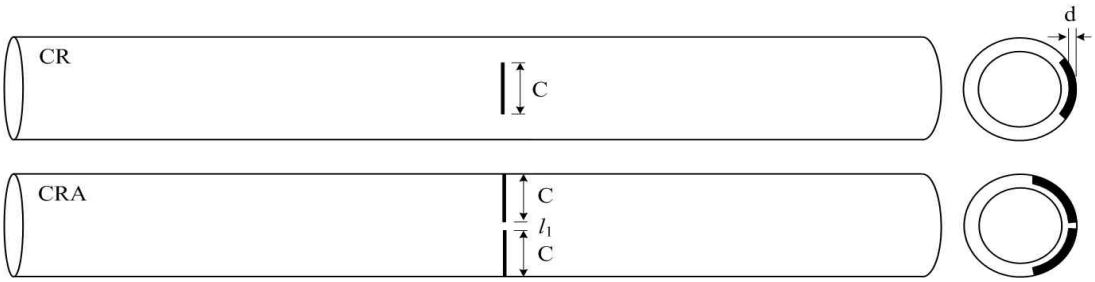


(c) AN, ANT 균열 배열

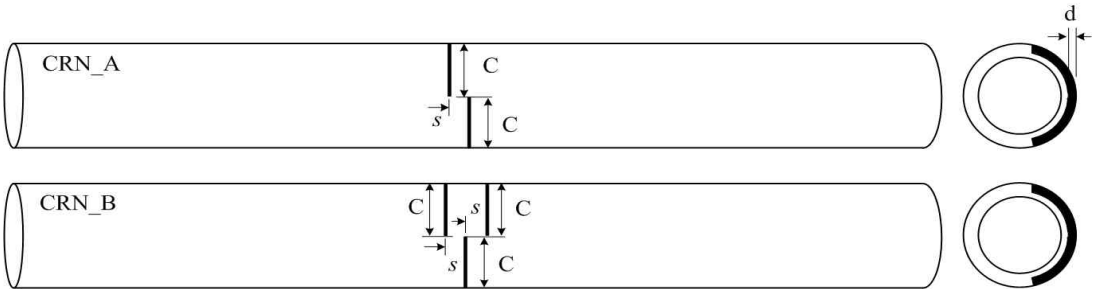
그림 2.1.4 전열관 파열시험에 고려된 표면균열의 배치 종류 및 형태

Collection @ chosun

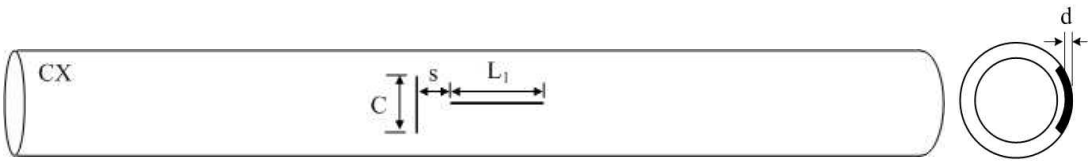
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(d) CR, CRA 균열 배치



(e) CRN_A, CRN_B 균열배치



(f) CX 균열배치

그림 2.1.4 전열관 파열시험에 고려된 표면균열의 배치 종류 및 형태 (계속)

제 2 절 파열시험장치

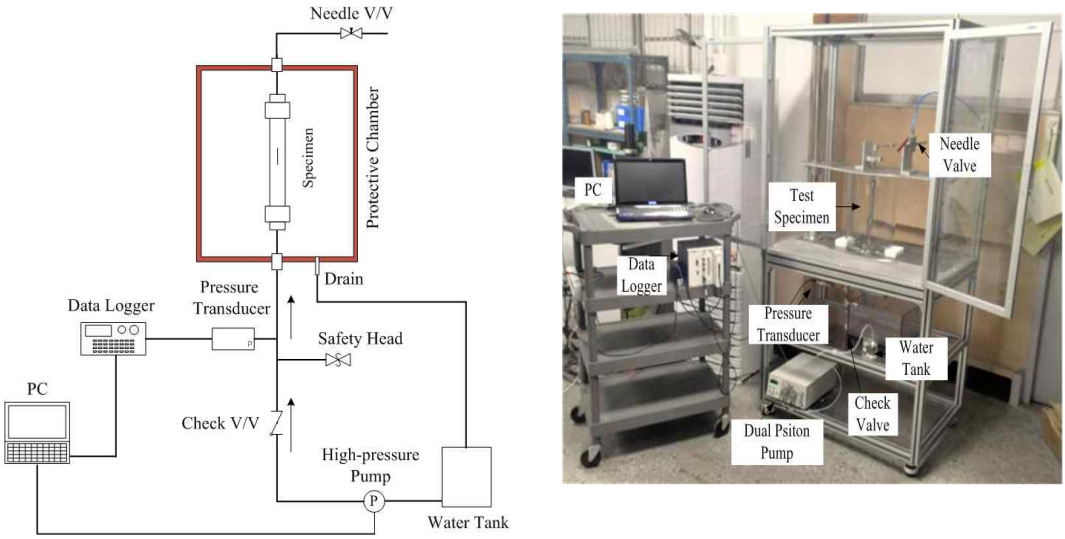
증기발생기 전열관 파열시험은 상온에서 수행하기위해 몇 가지 설계 요건에 따라 제작하였다. 설계 요건은 다음과 같다. 균열이 없는 증기발생기 전열관의 파열압력이 70MPa 내외일 것으로 예상되므로, 파열시험 장치는 최대 100MPa까지 가압이 가능하고, 가압중에 누설이 발생하지 않아야 한다. 또한, EPRI 지침서에서 권고하는 0.138 ~ 3.45MPa/sec 속도로 전열관 시편을 가압할 수 있어야 하며,[6,12-13] 정확한 파열압력을 측정하기위해서 파열압력을 1초에 100개의 데이터를 수집할 수 있어야 한다.

앞서 제시된 설계요건에 따라 파열시험 장치에 대한 상세 설계 및 제작을 하였다. 그

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

림 2.2.1은 파열시험 장치에 대한 구성 도면과 제작이 완료된 장치 및 사진이다. 파열 장치는 크게 가압장치, 고압 Loop, 시편부, 그리고 데이터 취득 장치로 구성되어 있다.



(a) 파열시험 장치 구성도 (b) 파열시험 장치

그림 2.2.1 파열시험 장치의 구성도 및 제작이 완료된 파열시험 장치

파열시험 장치에 대한 설계요건과 취급 용이성 등을 고려하여 수압을 이용한 가압 방법을 선택하였다. 고압펌프를 이용하여 Loop에 설치된 시편에 일정 유량의 유체를 주입함으로써 시편을 가압하는 방법을 선택하였고, 가압 펌프로는 최대 12mL/min 유량을 124MPa까지 주입할 수 있는 고압 펌프를 사용하였다. 고압펌프의 유량과 작동압력 등은 PC를 통해서 제어가능 하도록 하였다.

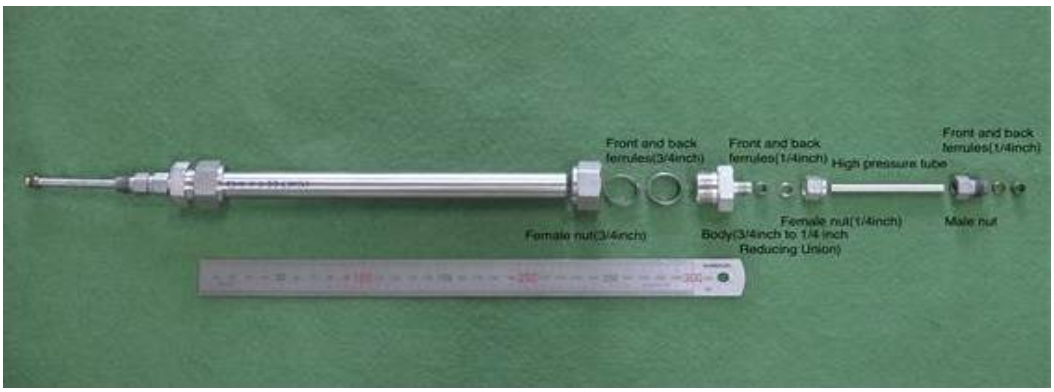


그림 2.2.2 전열관 시편의 피팅류 결합

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시편이 장착되는 고압 Loop는 내부식성을 갖는 최대 사용압력이 150MPa인 1/4 인치 튜브와 Fitting들로 구성하였다. 그림 2.2.2와 같이 전열관 시편의 직경이 3/4 인치이므로 시편을 고압 Loop에 설치하기 위해서는 시편 양단에 Reducing Union을 설치하여 1/4인치 튜브에 연결함으로써 고압 Loop에 체결할 수 있도록 하였다. 펌프 연결부 후단에는 Check 밸브가 설치되어 고압의 유체가 역류되는 것을 차단하였으며, Loop의 압력이 100MPa 이상 과압되는 경우를 방지하기위해 Safety head를 사용하였다. 또한, Loop에 분기관을 연결하여 압력계를 설치함으로써 시편이 가압되는 동안 Loop의 압력을 측정하였다. 고압 펌프의 공급유량이 최대 12mL/min으로 작기 때문에 설계요건으로 요구하는 가압 속도를 얻기 위해서, Loop의 길이와 직경을 최소화하여 제작하였다.

그림 2.2.3에 나타낸 것과 같이 시편은 고압 Loop에 수직으로 설치하였다. 시편 체결 시에 하부는 상하좌우로 고정하고, 상부는 시편의 축방향으로는 움직일 수 있도록 하지만, 좌우로는 고정되도록 구속하였다. 시편의 후단(상부가 연결된 Loop)에는 Loop를 가압하기 전에는 물을 주입하면서 시편과 고압 Loop에 존재하는 공기를 방출할 수 있도록 릴리프 밸브를 설치하였다. 또한, 이 릴리프 밸브는 시편이 파열되지 않았을 경우에 시편의 압력을 방출시키는 역할을 하도록 하였다. 시편 파열시 내부 유체의 방출과 시편 파편의 비산에 따른 위험성을 제거하기 위해서, 시편 주위에 투명한 2중 방호막을 설치하였다. 방출되는 유체를 집수하기 위한 집수조를 시편의 하부에 설치하였다.

그림 2.2.3 시험장치에 거치된 전열관 시편

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Data Logger와 PC로 구성된 데이터 취득 장치를 이용하여, 파열 시편에 가압된 압력을 1초에 100개의 파열압력 데이터를 실시간으로 측정하고 저장할 수 있도록 하였다.

제 3 절 예비파열시험

앞서서 설계요건에 맞게 제작된 파열시험장치를 이용하여 예비시험을 수행하였다. 예비시험을 통해서 파열시험 장치의 누설여부, 가압능력, 데이터 취득 능력 등을 확인하는 것과, 전열관 파열시험에서 요구되는 가압속도를 얻기 위한 최적의 주입유량을 파악하였다. 예비시험에는 전열관과 동일한 직경을 갖는 결함이 없는 STS304 튜브와 두께의 50%와 20% 깊이의 표면균열을 갖는 Alloy 690TT 전열관 시편을 사용하였다.

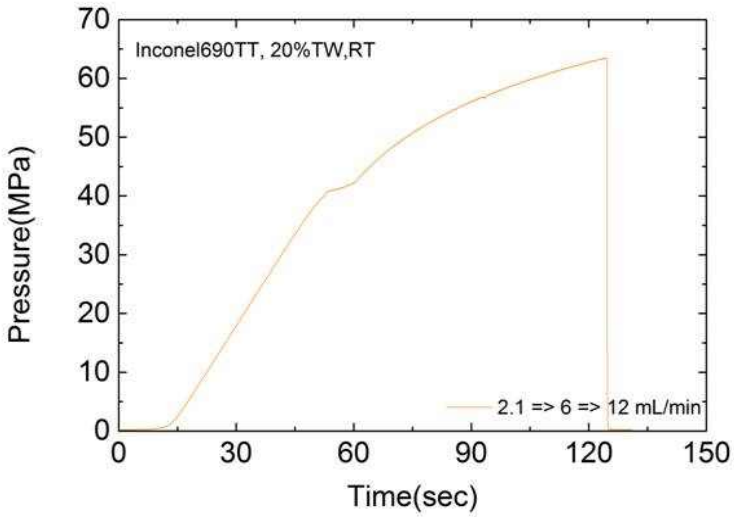


그림 2.3.1 파열시험 장치를 이용한 예비시험 결과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

예비시험을 통해서 얻는 결과는 다음과 같다. 결함이 없는 STS304 튜브를 전열관 시편과 동일한 방법으로 체결하여 파열시험 장치에 설치한 후 파열이 발생할 때까지 가압한 결과, 69MPa까지 누설이 발생하지 않았으며, 고압펌프를 이용하여 가압이 가능한 것을 확인하였다. STS304 튜브가 69MPa에서 파열됨에 따라 그 이상의 압력에서 누설이 생기는지와 가압능력을 확인하지는 못했다. 가압이 진행하는 동안에 데이터를 1초에 100개의 압력 데이터를 취득하여 PC에 저장할 수 있는 것을 확인하였다. 파열시험에서 요구하는 가압속도(0.138 ~ 3.45MPa/sec)를 얻기 위한 주입유량을 파악하기 위해서 몇 가지 유량 조건으로 시편을 가압한 결과 2.1mL/min의 유량을 주입할 때, 1MPa/sec 정도의 가압속도를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 다만, 시편전체가 소성변형 되는 경우에는 시편의 직경 증가로 인해 가압속도가 떨어지는 현상이 관찰되었고, 이에 따른 시편에서 소성변형이 발생하는 경우에 주입되는 유량을 단계적으로 증가시켜 가압속도가 일정한 범위를 유지할 수 있도록 가압절차를 확립하였는데 다음과 같다. 전열관시편(표면균열을 갖는 Alloy690TT 전열관)에 처음 주입유량을 2.1mL/min에서 일정하게 유지하다가, 38MPa부분에서 6.0mL/min으로 유속을 변경하고, 다시 42MPa 부분에서 12mL/min으로 증가시키면서 파열시험을 수행한 결과로 그림 2.3.1과 같이 시간에 따른 압력의 변화를 나타내었다. 비록 42MPa 이상에서는 가압속도가 감소하는 경향을 보이지만, 최종 파열이 발생할 때까지 전열관 파열시험에서 요구하는 적절한 범위의 가압 속도를 유지하는 것으로 확인되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 손상시험 결과 및 토의

앞서서 원자력발전소에서 사용되는 증기발생기 전열관에 발생되는 여러 가지 형태를 표 2.1.2와 그림 2.1.4를 통해서 정리하였다. 다중 부분관통균열이 존재하는 파열시편을 가지고 파열시험을 수행하였고, 전열관시편의 Heat와 Lot가 다름으로 인해 생기는 기계적 물성치의 영향을 제거하기 위해 정규화하여 평가를 수행하였다.

제 1 절 축방향 표면균열의 손상압력

1. 축방향 단일 표면균열에 대한 손상압력

다중 표면균열을 갖는 전열관 시편에 대한 파열시험에 앞서 각각의 균열길이에 대한 기준 데이터를 확보하기 위해서, 길이가 L_1= 6.3, 12.7, 25.4, 50.8mm인 축방향 단일표면균열을 갖는 전열관 시편에 대한 파열시험을 수행하였다.

앞서 설명된 바와 같이 파열시험에 사용된 전열관의 항복강도와 인장강도가 전열관의 Heat와 Lot에 따라 약간씩 차이가 있기 때문에, 그림 3.1.1에서 나온 것과 같이 파열시험에서 얻은 손상압력을 식 (3.1.1)을 통해서 정규화하여 손상압력에 미치는 전열관의 기계적 물성치와 형상의 영향을 제거하였다.

$$P_{fN}^{S} = \frac{P_f^S}{0.5(YS+UTS)\frac{t}{R_i}} \qquad \text{(식 3.1.1)}$$

여기서, P_f^S는 파열시험에서 주어진 단일균열에 대한 손상압력, R_i는 전열관의 내부반경, P_{fN}^S는 단일균열에 대한 정규화된 손상압력이다.

먼저 그림 3.1.1에서 동일한 균열조건의 손상압력이 거의 유사한 것을 알 수 있다. 따라서, 시험장치 및 절차의 신뢰성과 데이터의 재연성은 우수한 것으로 판단된다. 그림 3.1.1에서 균열길이에 따른 손상압력의 변화를 살펴보면, 25.4mm까지는 손상압력이 균열길이에 따라 지수함수적으로 감소하지만, 25.4mm이상에서는 균열길이에 다른 손

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

상압력의 변화가 거의 없는 것으로 알 수 있다. 한편, 단일 표면결함에 대한 손상압력을 식 (3.1.2)로 주어지는 EPRI의 손상압력 평가 모델과 비교하면, 균열길이에 관계없이 전체적으로 평가 모델이 실험 결과를 약 9~13% 정도 보수적으로 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

$$P_f^S = 0.58(YS + UTS)\frac{t}{R_i}\left(1 - \frac{L_1}{L_1 + 2t}\frac{d}{t}\right) \qquad \text{(식 3.1.2)}$$

여기서, P_f^S는 단일균열에 대한 손상압력, R_i는 전열관의 내부반경, t는 단일균열의 두께, L_1은 균열의 길이, d는 균열의 깊이이다.

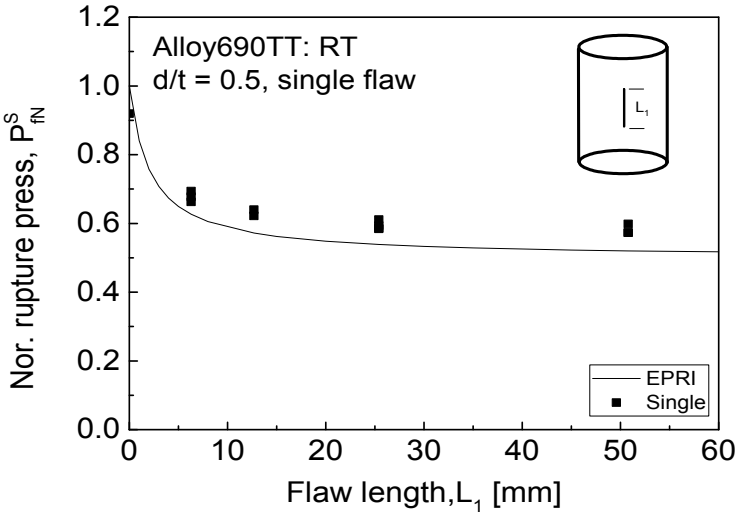


그림 3.1.1 축방향 단일결함의 표면균열의 손상압력

2. 동일선상에 배열된 2개의 축방향 표면균열에 대한 손상압력

전열관의 손상거동에 미치는 일렬로 배열된 다중 축방향 표면균열의 영향을 살펴보기 위해서, 길이가 같은 2개의 축방향 표면균열이 동일 선상에 배열되어 있는 시편(그

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

림 2.1.4의 Type AC)에 대한 파열시험을 수행하였다. 표 2.1.2에 나타낸 바와 같이 시험에서 고려된 균열 길이는 L_1=L_2=6.3mm와 25.4mm이며, 균열 사이의 거리(s)는 1, 2, 5mm이다. 그림 3.1.2은 2개의 축방향 표면균열이 동일 선상에 배열되어 있는 전열관의 손상압력을 균열 사이의 거리에 따라 나타낸 것이다. 손상압력에 미치는 다중 표면균열의 영향을 정량적으로 살펴보기 위해서, 다중 표면균열의 손상압력을 동일한 길이의 단일 표면균열의 손상압력으로 정규화하였다. 따라서, 그림 3.1.2에서 정규화 손상압력이 1보다 작으면 상호작용에 의해 다중 표면균열의 손상압력이 단일 표면균열에 비해 감소된 것을 의미하며, 정규화 손상압력이 1보다 크다면 상호작용에 의해 다중 균열의 손상압력이 단일 균열에 비해 증가한 것을 의미한다.

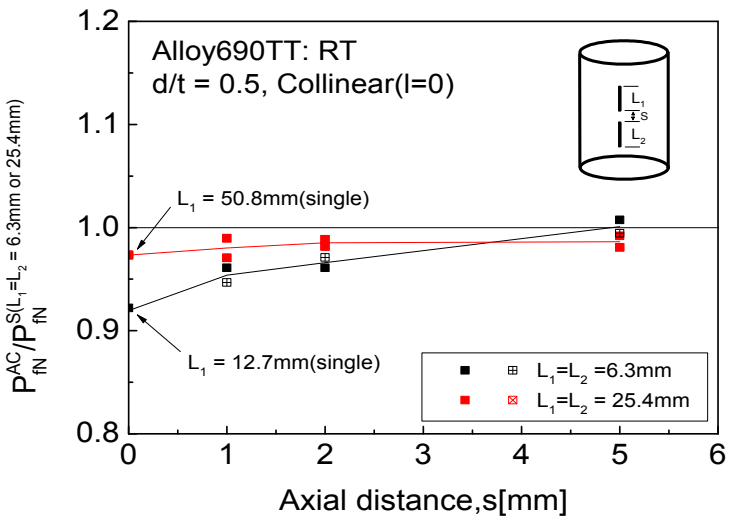


그림 3.1.2 동일선상에 배열된 2개의 축방향 표면균열에 대한 손상압력

그림 3.1.2에서 알 수 있는 바와 같이 표면균열의 길이에 관계없이 두 균열 사이의 거리가 1mm와 2mm인 경우에는 단일 균열에 비해 다중 균열에서 낮은 손상압력을 보였다. 전체적으로 균열 사이의 거리가 증가함에 따라 손상압력이 증가하는 경향을 보였으며, 균열길이가 짧은 경우(L_1=L_2=6.3mm)에는 균열간 거리가 5mm 이상에서 다중 표면균열의 손상압력이 단일 균열과 거의 같았다. 즉, 두 표면균열이 5mm 이상 떨어

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

져 있을 때 균열간의 상호작용이 거의 사라져 개별 표면균열과 같은 손상거동을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, 균열길이가 긴 경우(L_1=L_2=25.4mm)에는 손상압력에 미치는 균열간 거리의 영향이 크지 않았으며, L_1=50.8mm인 단일 표면균열과도 거의 유사한 손상압력을 보였다. 이것은 그림 3.1.1에서 파악된 바와 같이 균열길이가 25.4mm 이상인 경우에는 손상압력에 미치는 균열길이의 영향이 미미하기 때문이다.

3. 평행하게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상압력

전열관의 손상거동에 미치는 평행한 다중 축방향 표면균열의 영향을 살펴보기 위해서, 그림 2.1.4에 나타낸 바와 같이 동일한 길이를 갖는 축방향 표면균열이 원주방향으로 2개 또는 3개 평행하게 배열된 시편(그림 2.1.4의 type AP & APT)을 이용하여 파열시험을 수행하였다. 시험에는 표 2.1.2에 나타낸 바와 같이 길이가 6.3mm와 25.4mm인 표면균열이 고려되었으며, 평행한 축방향 균열 사이의 원주방향 거리는 균열의 개수에 따라 다르게 고려되었다. 2개의 균열이 평행하게 배열된 경우에는 두 균열 사이의 원주방향 거리(l_1)가 1mm로 일정하며, 3개의 균열이 평행하게 배열된 경우에는 가까운 두 균열간의 원주방향 거리(l_1)는 1mm이고 나머지 균열과의 거리(l_2)는 2, 15, 30mm를 고려하였다.

그림 3.1.3은 2개 또는 3개의 축방향 표면균열이 원주방향으로 평행하게 배열되어 있는 전열관의 손상압력을 단일 표면균열에 대한 손상압력으로 정규화하여 균열간 원주방향 거리(l_2)에 따라 나타낸 것이다. 따라서, 그림 3.1.3에서 x-축이 0인 경우는 2개의 표면균열이 평행하게 배열되어 있는 것을 의미한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 결함간 거리가 l_1=1mm인 평행한 2개 균열과 결함간 거리가 각각 l_1=1mm와 l_2=2mm인 평행한 3개 표면균열은 단일 표면균열보다 더 높은 손상압력을 보였다. 즉, 인접한 표면균열 사이의 상호작용에 의해 손상압력이 증가하였다. 그러나, 결함 사이의 거리가 증가함에 따라 손상압력이 오히려 감소하여 3개의 균열 중 1개가 l_2=15mm 떨어져 있을 때 가장 낮은 손상압력을 보였으며, 균열 사이의 거리가 l_2=30mm인 조건에서 손상압력이 다시 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로는 평행한 표면균열 사이의 원주방향 거리에 따른 이러한 변화 경향은 균열길이에 관계없이 유사하게 관찰되었으나, 균열이 길수록 다중 표면균열간의 상호작용에 의한 손상압력 감소가 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3.1.4에 나타낸 바와 같이 평행한 축방향 표면균열간의 상호작용을 관찰하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 일반적으로 유한요소해석으로 손상압력을 얻기는 어렵지만, 손상시험 결과로 얻은 손상압력을 이용하여 응력(stress) 분포를 비교하는 것에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 평가 방법으로는 축방향 표면균열 중심부분에서 응력의 평균값 분포를 비교하였다. 그림 3.1.4와 같이 균열의 형태와 위치, 배열을 고려하여 증기발생기 전열관을 1/2만 모델링한 3차원 모델을 적용하였다. 유한요소에는 20절점의 Brick 요소(C3D20 in ABAQUS)가 사용되었으며, 손상시 결함부에서의 대변형을 고려하기 위해서 기하학적 비선형 옵션을 적용하였다.[17] 또한, 튜브 한쪽에는 관막음 효과를 주었다. 2개의 표면균열(L_1=L_2=6.3mm)이 평행하게 배열되어 있는 모델과 단일균열(L_1=6.3mm)모델의 응력 분포를 비교하였을 때, 2개의 평행 표면균열이 단일균열보다 낮은 응력 분포를 보였다. 즉, 2개의 인접한 표면균열간의 상호작용에 의해 손상압력이 증가하는 것을 확인하였다. 3개의 표면균열(L_1=L_2=L_3=6.3mm)이 원주방향으로 평행하게 배열되어 있고, 균열간 거리가 l_2=15mm과 l_2=30mm인 모델의 응력 분포를 비교했을 때, 응력 분포는 균열간 거리가 l_2=30mm가 l_2=15mm보다 더 낮은 응력 분포를 보였다. 즉, l_2=30mm보다는 l_2=15mm만큼 떨어진 경우에 상호작용에 의한 손상압력이 더 낮은 것으로 판단된다.

또한, 떨어져 있는 한 개의 표면균열의 응력 분포는 2개의 인접한 표면균열의 응력 분포에 비해 더 높은 응력 분포를 가진다. 그러므로 그림 3.4.4에서 알 수 있는 바와 같이 떨어져 있는 단일표면균열에서만 손상이 되는 것을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

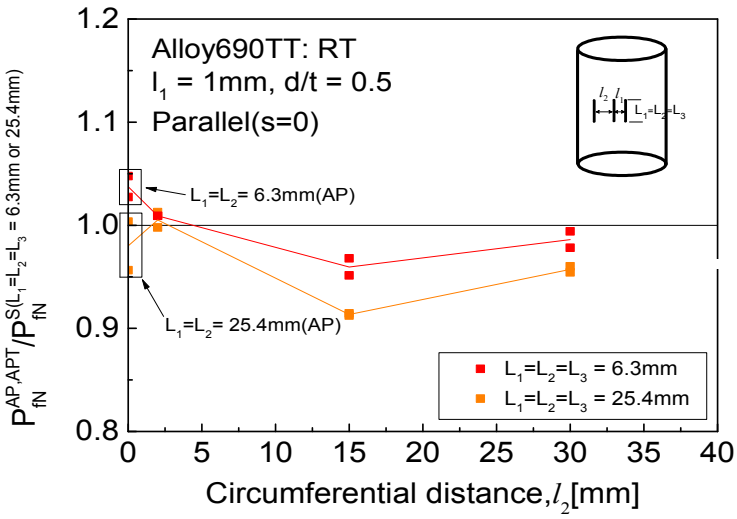


그림 3.1.3 평행한 축방향 표면균열의 손상압력

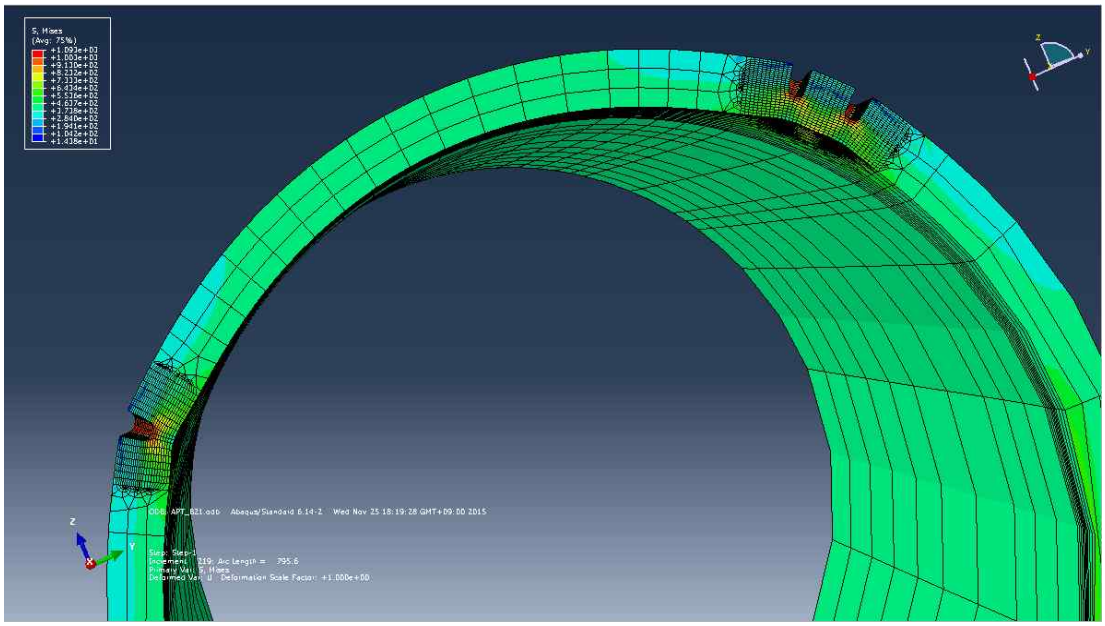


그림 3.1.4 유한요소해석 시뮬레이션에 사용된 평행한 축방향 표면균열의 3D 모델

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상압력

동일한 길이를 갖는 2개의 축방향 표면균열이 길이방향으로 서로 엇갈리게 배열되어 있는 전열관 시편(그림 2.1.4에서 type AN)에 대한 파열시험을 수행하였다. 2개의 축방향 표면균열이 길이방향으로 엇갈려 배열되어 있는 경우, 시험에서 고려된 두 균열 사이의 원주방향 거리(l_1)는 1, 2, 15mm이며 균열의 길이는 6.3mm와 25.4mm이다.

그림 3.1.5는 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상압력을 동일한 길이의 단일 표면균열에 대한 손상압력으로 정규화하여 두 균열 사이의 원주방향 거리에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열 길이에 관계없이 다중 균열의 손상압력이 단일 균열에 비해 감소하였다. 또한, 다중 균열의 상호작용에 의한 손상압력의 감소 효과는 짧은 균열에 비해 긴 균열에서 더 크게 나타났다. 그러나, 동일 선상에 2개의 표면균열이 배열되어 있는 경우(그림 3.1.2)와 달리 2개의 축방향 표면균열이 엇갈리게 배열되어 있는 경우에는 두 균열이 원주방향으로 15mm 떨어져 있어도 상호작용에 의한 손상압력의 감소가 여전히 관찰되었다. 이러한 거동은 그림 3.1.3에서 관찰된 축방향 표면균열이 원주방향으로 평행하게 배열되어 있는 경우와 유사한 것을 알 수 있다. 따라서, 길이방향으로 엇갈리게 배열된 축방향 표면균열의 손상거동은 동일 선상에 2개의 표면균열이 배열된 경우와 2개의 축방향 균열이 평행하게 배열된 경우가 복합된 형태를 보이는 것으로 판단된다.

2개의 축방향 표면균열이 엇갈리게 배열되어 있고, 2개의 축방향 표면균열이 원주방향으로 15mm 떨어져 있을 때에도 상호작용에 의한 손상압력 감소가 발생하는지 확인하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 앞서 설명한 바와 같이 일반적으로 유한요소해석을 통해서 손상압력은 얻기는 어렵지만, 손상시험 결과로부터 얻은 손상압력을 이용하여 응력(stress) 분포를 비교하는 것에는 큰 차이가 없다고 보며, 균열 중심부분에서 응력의 평균값 분포를 비교하였다. 그림 3.1.6에 나타낸 바와 같이 2개의 표면균열이 엇갈려있는 경우에 균열간의 상호작용을 관찰하기 위해서 증기발생기 전열관을 3차원 모델링하여 적용하였다. 유한요소에는 20절점의 Brick 요소(C3D20 in ABAQUS)가 사용되었으며, 손상시 결함부에서의 대변형을 고려하기 위해서 기하학적 비선형 옵션을 적용하였다.[17] 또한, 튜브 한쪽에는 관막음 효과를 주었다. 2개의 축방향 표면균열이 엇갈려서 배열되어 있고, 2개의 축방향 표면균열간 거리가 2mm와 15mm인 모델을 비교해보았다. 균열간 거리가 멀어짐에 따라 응력 분포가 감소하는 경향을 보였다. 즉, 균열간 거리가 멀어짐에 따라 상호작용에 의한 영향이 미미해지는 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

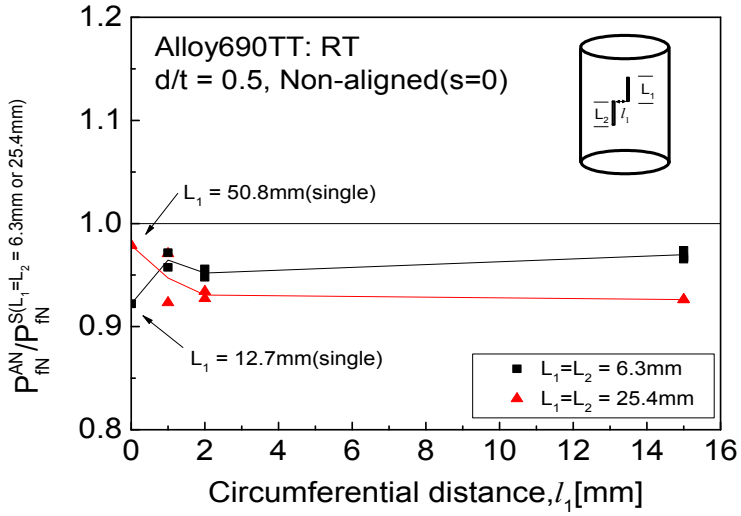


그림 3.1.5 엇갈리게 배열된 2개의 축방향 표면균열에 대한 손상압력

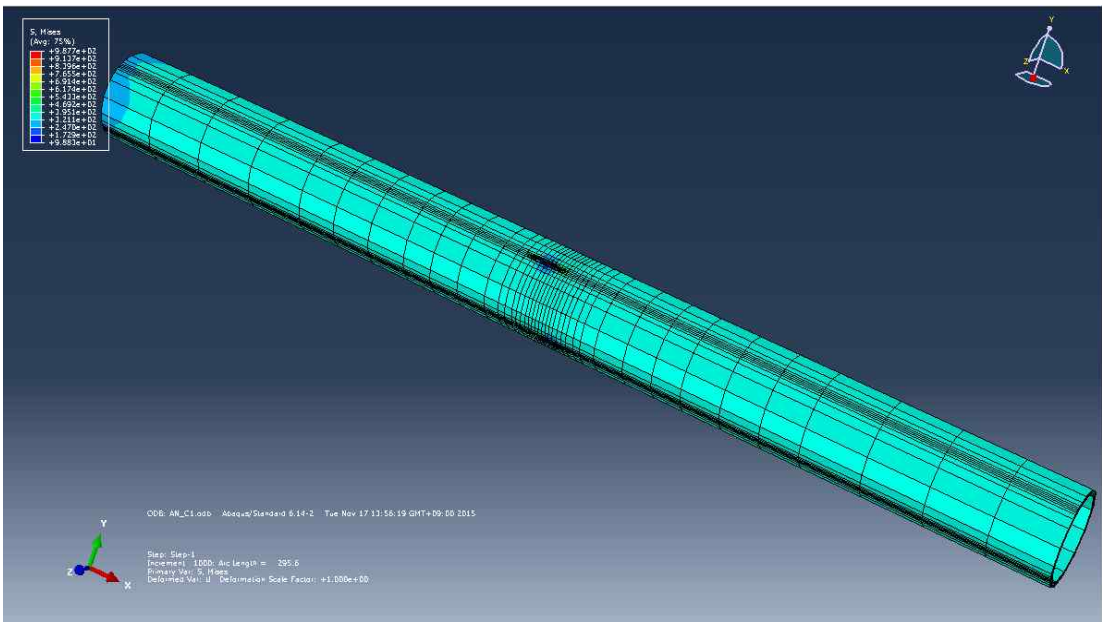


그림 3.1.6 유한요소해석 시뮬레이션에 사용된 엇갈리게 배열된 2개의 축방향 표면균열의 3D 모델

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

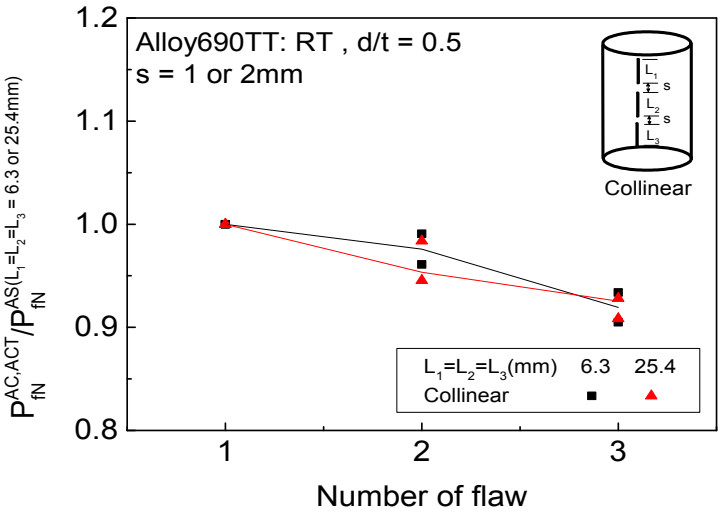
5. 손상압력에 미치는 축방향 표면균열 개수의 영향

전열관의 손상압력에 미치는 축방향 표면균열 개수의 영향을 살펴보기 위해서, 3개의 축방향 표면균열이 동일 선상에 배열된 시편과 3개의 축방향 표면균열이 길이방향으로 엇갈리게 배열된 시편을 이용하여 파열시험을 수행하였다.

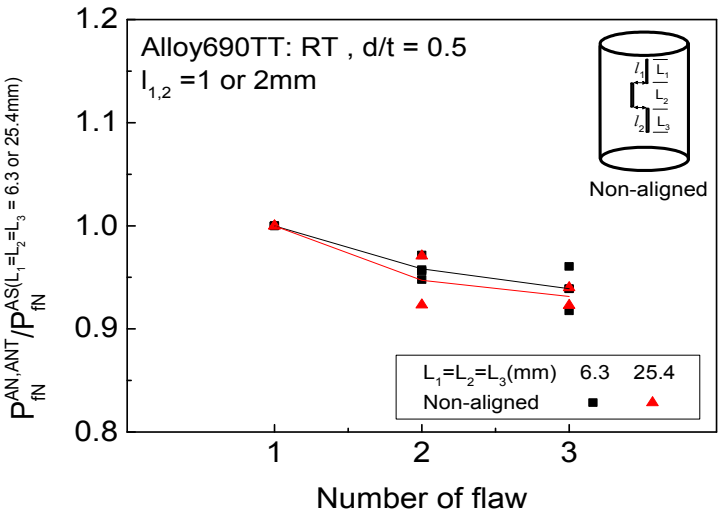
그림 3.1.7(a)와 3.1.7(b)는 동일 선상에 배열된 3개의 축방향 표면균열과 길이방향으로 엇갈리게 배열된 3개의 축방향 표면균열이 존재하는 전열관에 대한 손상압력을 앞서 시험된 단일 표면균열과 2개의 표면균열을 갖는 전열관의 손상압력과 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 표면균열의 크기와 배열 형태에 관계없이 균열 개수가 증가함에 따라 손상압력이 감소하는 경향을 보였다. 이것은 균열의 개수가 증가함에 따라 다중 표면균열의 상호작용에 의한 손상압력의 감소가 더 심화된다는 것을 보여주고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 동일 선상의 다중 표면균열



(b) 엇갈리게 배열된 다중 표면균열

그림 3.1.7 손상압력에 미치는 축방향 표면균열 개수의 영향

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

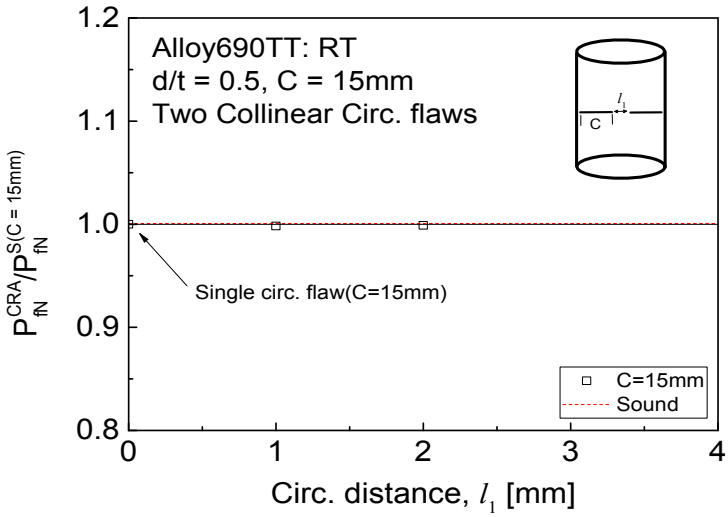
제 2 절 원주방향 표면균열의 손상압력

전열관의 손상거동에 미치는 다중 원주방향 표면균열의 영향을 파악하기 위해서, 원주방향 길이(C)가 15mm인 원주방향 표면균열이 동일 선상에 배열된 시편(그림 2.1.4의 type CRA)과 엇갈리게 배열된 시편(그림 2.1.4의 type CRN)을 이용하여 파열시험을 수행하였다. 2개의 원주방향 표면균열이 동일 선상에 배열되어 있는 경우에는 두 균열 사이의 거리(l_1)는 1mm와 2mm를 고려하였다. 원주방향 표면균열이 엇갈리게 배열된 경우에 균열 사이의 거리(s)는 1mm이며, 2개의 균열이 배열된 시편과 3개의 균열이 배열된 시편이 각각 시험되었다. 또한, 손상압력에 미치는 다중 원주방향 표면균열의 영향을 정량적으로 분석하기 위해서 단일 원주방향 표면균열을 갖는 시편에 대한 파열시험을 수행하였다.

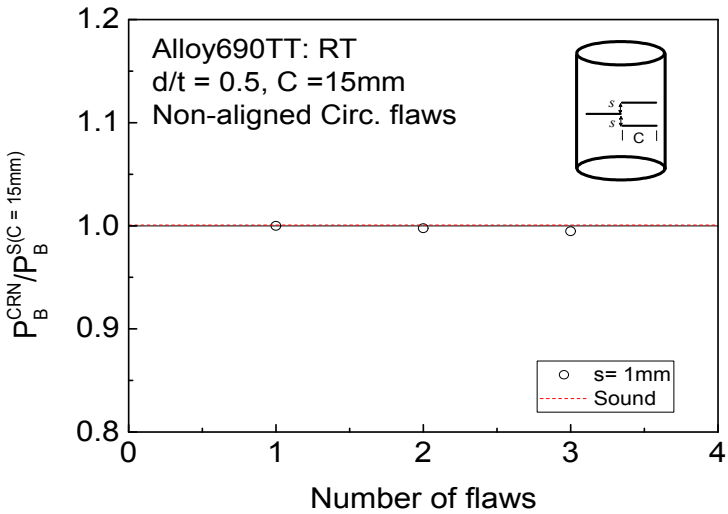
그림 3.2.1은 다중 원주방향 표면균열에 대한 손상압력을 단일 원주방향 표면균열에 대한 손상압력으로 정규화하여, 균열 사이의 거리와 균열 개수에 따라 나타낸 것이다. 그림 3.2.1에서 알 수 있는 바와 같이 원주방향 표면균열의 경우에는 균열 사이의 거리나 균열의 배열 형태, 그리고 균열 개수에 관계없이 거의 유사한 손상압력을 보였다. 심지어 결함이 없는 전열관시편(그림 2.1.4의 type SD)과 거의 유사한 손상압력을 보였다. 따라서, 균열의 배열 형태, 거리, 개수에 관계없이 전열관에 존재하는 원주방향 표면균열은 전열관의 손상압력에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 동일 선상의 원주방향 표면균열



(b) 엇갈리게 배열된 원주방향 표면균열

그림 3.2.1 손상압력에 미치는 다중 원주방향 표면균열의 영향

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 축방향과 원주방향의 복합 표면균열의 손상압력

추가적으로 축방향 표면균열과 원주방향 표면균열이 T자 형태로 배열된 복합 균열 시편(그림 2.1.4의 type CX)에 대한 파열시험을 수행하였다. 표 2.1.2에 나타낸 바와 같이 복합 균열에서 원주방향 표면균열의 길이는 C=15mm로 일정하며, 축방향 표면균열의 길이는 6.3mm와 25.4mm를 각각 고려하였다. 시험에서 고려된 축방향 표면균열과 원주방향 표면균열의 간격(s)은 0, 1, 2, 5mm이고, 축방향 표면균열이 25.4mm인 경우는 간격이 10mm를 추가적으로 수행하였다.

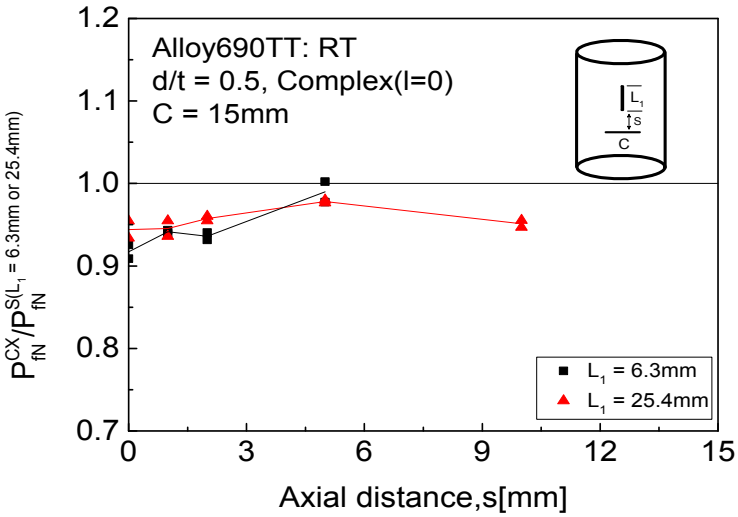


그림 3.3.1 축방향과 원주방향 복합 표면균열의 손상압력

그림 3.3.1는 복합 균열에 대한 손상압력을 동일한 길이의 축방향 단일 표면균열에 대한 손상압력으로 정규화하여 결함 사이의 거리에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 축방향 표면균열과 원주방향 표면균열이 함께 존재하는 경우에 균열간 거리가 0, 1, 2mm인 경우에는 축방향 표면균열의 길이에 관계없이 축방향 단일 균열에 비해 뚜렷이 낮은 손상압력을 보였다. 축방향 표면균열의 길이가 6.3mm인 경우에는 축방향 균열과 원주방향 균열 사이의 거리가 증가함에 따라 손상압력이 증가하

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

는 경향을 보였으며, 균열간 거리가 5mm일 때 축방향 단일 표면균열과 거의 유사한 손상압력을 보였다. 즉, 두 균열이 5mm 이상 떨어져 있는 경우에는 개별적인 단일 균열과 같은 손상거동을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, 축방향 균열의 길이가 25.4mm인 경우에는 두 균열이 5mm 이상 떨어져 있을지라도 축방향 단일 표면균열에 비해 낮은 손상압력을 보였다. 따라서, 앞서 원주방향 표면균열만 존재하는 경우에는 손상압력에 미치는 영향이 미미하지만, 원주방향 표면균열이 축방향 표면균열과 함께 존재하는 경우에는 상호작용에 의해 전열관의 손상압력 저하시키는 것을 알 수 있다. 특히 균열길이에 관계없이 두 균열 사이의 거리가 2mm 이하인 경우에는 손상압력에 미치는 상호작용의 영향이 뚜렷한 것을 알 수 있다.

앞서, 두 균열이 5mm 이상 떨어져 있는 경우에는 개별적인 단일균열과 같은 손상거동을 보이지만, 축방향 균열의 길이가 25.4mm인 경우에는 두 균열이 5mm이상 떨어져도 축방향 단일 표면균열에 비해 낮은 손상압력을 보였다. 따라서, 그림 3.3.2와 같이 두 균열간의 상호작용을 비교하기 위해 증기발생기 전열관을 1/2만 모델링한 3차원 모델을 적용하였다. 유한요소에는 20절점의 Brick 요소(C3D20 in ABAQUS)가 사용되었으며, 손상시 결함부에서의 대변형을 고려하기 위해서 기하학적 비선형 옵션을 적용하였다.[17] 또한, 튜브 한쪽에는 관막음 효과를 주었다. 앞서 평가한 방법과 같은 방식으로 축방향 표면균열 중심부분에서 응력의 평균값 분포를 비교하였다. 축방향 표면균열(L=25.4mm)과 원주방향 표면균열(C=15mm)간의 거리에 따라 손상압력에 미치는 상호작용을 관찰하기 위해서 균열간의 거리는 5mm와 10mm를 고려하였다. 두 모델에서 축방향 균열의 응력(stress) 분포는 유사하게 관찰되었다. 또한, 축방향 단일 표면균열의 응력 분포와 두 모델의 축방향 표면균열의 응력 분포를 비교하였을 때, 축방향 단일 표면균열보다 두 모델의 축방향 표면균열의 응력 분포가 더 높은 것을 확인하였다. 즉, 축방향과 원주방향 복합 표면균열이 상호작용의 영향으로 축방향 단일 표면균열보다는 낮은 손상압력을 보이는 것을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

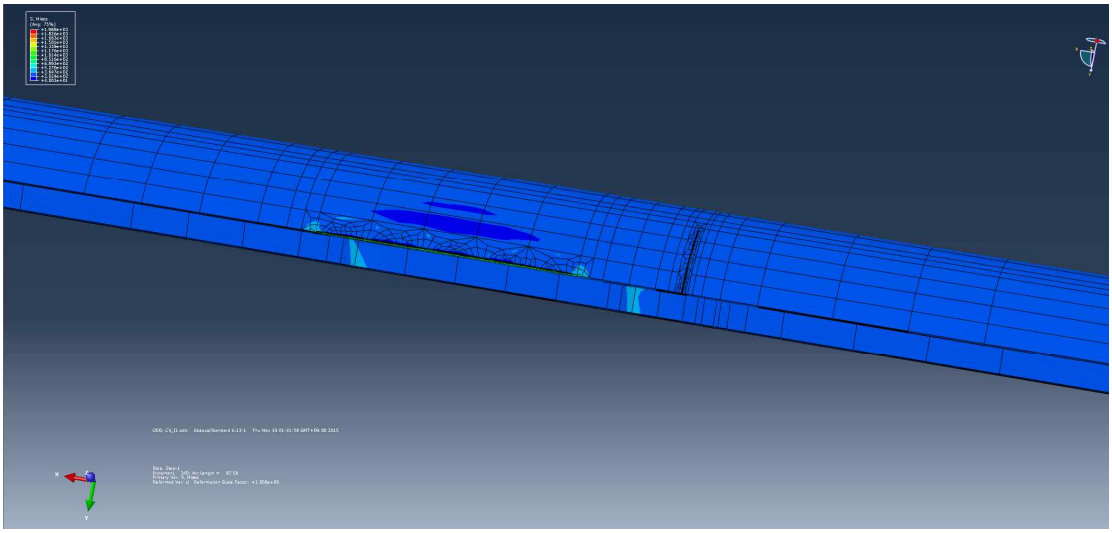


그림 3.3.2 유한요소해석 시뮬레이션에 사용된 축방향과 원주방향 복합 표면균열의 3D 모델

제 4 절 균열의 위치, 형상, 방향, 배열에 따른 전열관 시편의 손상모드

1. 단일 축방향 표면균열의 손상모드

그림 3.4.1은 축방향 단일 표면균열을 갖는 전열관 시편의 시험 후 사진을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열길이가 6.3mm와 12.7mm인 경우에는 표면균열의 잔여면이 파열된 후 균열 가장자리에서 불안정 찢김이 발생하였다. 그러나, 균열길이가 긴 경우(25.4mm, 50.8mm)에는 표면균열의 잔여면이 파열된 이후 균열 가장자리에서 불안정 찢김 현상은 발생하지 않았다. 따라서, 기본적으로 표면균열의 손상모드는 균열 길이에 따라 구분되는 것을 알 수 있다.

2. 동일 선상에 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드

그림 3.4.2은 동일 선상에 일렬로 배열된 다중 축방향 표면균열을 갖는 전열관 시편

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에 대한 시험 후 사진이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열길이가 6.3mm인 경우에는 균열의 개수와 균열 사이의 거리에 관계없이 모든 표면균열이 파열되었으며 균열이 서로 합체되었다. 또한, 균열 가장자리에서 불안정 찢김이 발생하였다. 그러나, 균열길이가 25.4mm인 경우에는 여러 개 중 1개의 균열만 파열되었으며 균열 가장 자리에서 불안정 찢김도 관찰되지 않았다. 균열간 거리가 1mm인 경우에는 균열 사이와 인접 균열의 일부에서 찢김이 발생하였으나, 균열간 거리가 2mm 이상에서는 균열 사이의 찢김이 발생하지 않았다.

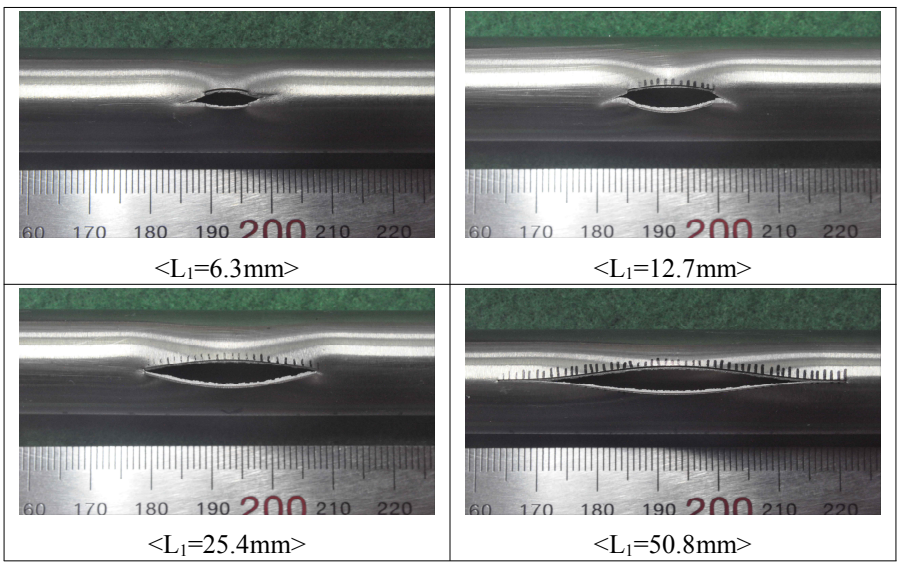


그림 3.4.1 축방향 단일 표면균열의 손상모드

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

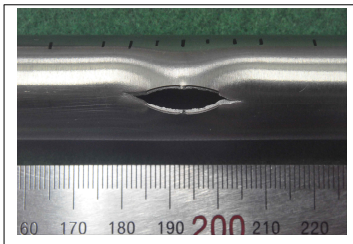
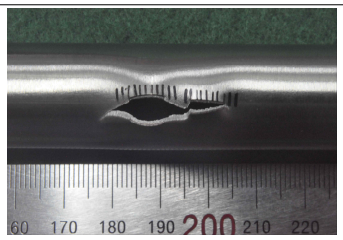
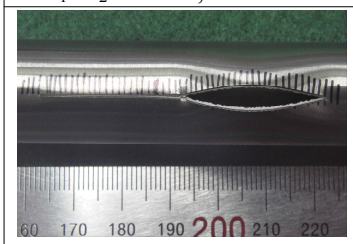
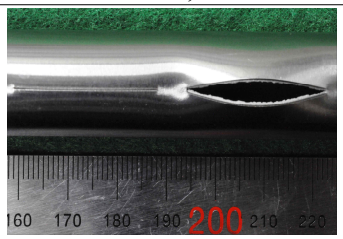
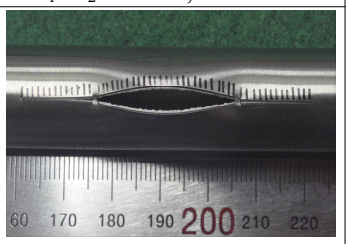
		
<L_1=L_2=6.3mm, s=1.0mm>	<L_1=L_2=6.3mm, s=1.0mm>	<L_1=L_2=6.3mm, s=1.0mm>
		
<L_1=L_2=6.3mm, s=1.0mm>	<L_1=L_2=6.3mm, s=1.0mm>	<L_1=L_2=6.3mm, s=1.0mm>

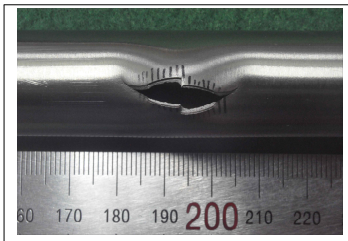
그림 3.4.2 동일 선상에 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드

3. 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드

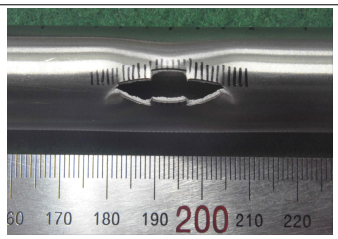
그림 3.4.3는 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열을 갖는 전열관 시편에 대한 시험 후 사진이다. 이 경우에도 기본적으로 균열 길이에 따라 손상모드가 일정한 경향을 보였다. 즉, 균열길이가 6.3mm인 경우에는 균열의 개수와 균열 사이의 원주방향 거리에 관계없이 모든 표면균열의 잔여면이 파열되었으며 균열이 서로 합체되었다(단, 원주방향 거리가 15mm인 경우 제외). 또한, 균열 가장자리에서 불안정 찢김이 발생하였다. 그러나, 균열길이가 25.4mm인 경우에는 여러 개 중 1개의 균열만 파열되었으며 균열 가장 자리에서 불안정 찢김도 관찰되지 않았다. 균열 사이의 원주방향 거리가 1mm인 경우에는 균열 사이와 인접 균열의 일부에서 찢김이 발생하였으나, 균열 사이의 원주방향 거리가 2mm 이상인 조건에서는 균열 사이에서 찢김이 발생하지 않았다.

Collection @ chosun

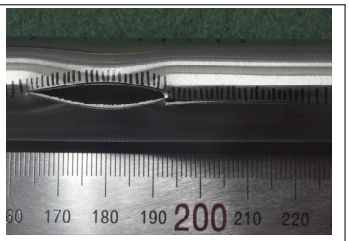
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



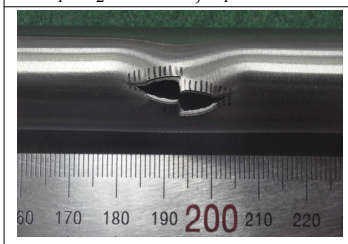
<L_1=L_2=6.3mm, l_1=1.0mm>



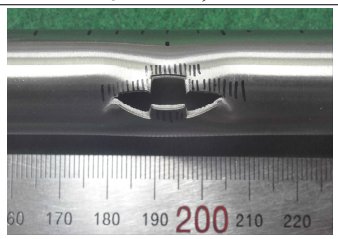
<L_1=L_2=L_3=6.3mm, l_1=1.0mm>



<L_1=L_2=25.4mm, l_1=1.0mm>



<L_1=L_2=6.3mm, l_1=2.0mm>



<L_1=L_2=L_3=6.3mm, l_1=2.0mm>

<L_1=L_2=25.4mm, l_1=2.0mm>

그림 3.4.3 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드

4. 평행한 다중 축방향 표면균열의 손상모드

그림 3.4.4은 원주방향으로 평행하게 배열된 다중 축방향 표면균열을 갖는 전열관 시편에 대한 시험 후 사진을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열길이, 개수, 그리고 균열 사이의 원주방향 거리에 관계없이 1개 균열만 파열되었으며, 균열 사이의 찢김에 의한 합체는 발생하지 않았다. 균열길이가 6.3mm인 경우에는 균열 가장자리에서 불안정 찢김이 발생하였으며, 균열길이가 25.4mm인 경우에는 불안정 찢김이 관찰되지 않았다. 따라서, 기본적으로 평행한 다중 축방향 표면균열의 손상모드는 단일 표면균열과 유사하였다. 그러나, 그림 3.4.4에서 주목할 손상거동은 3개의 균열이 평행하게 배열되어 있는 경우에는 항상 멀리 떨어져 있는 표면균열에서 파열이 발생한다는 것이다. 이것은 앞서 그림 3.1.3의 손상압력에서 평행한 표면균열이 가까이 위치할 때 보다 멀리 떨어져 있을 때 더 낮은 손상압력을 보이는 것과 잘 일치하는 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

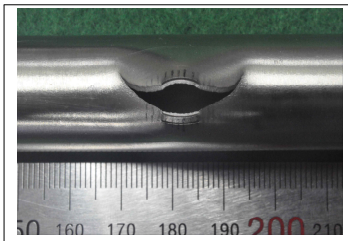
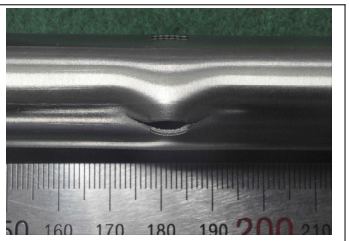
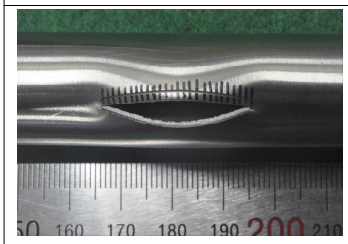
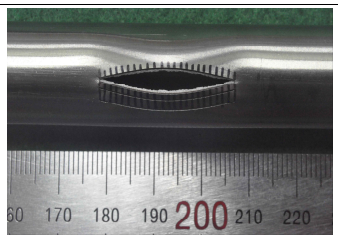
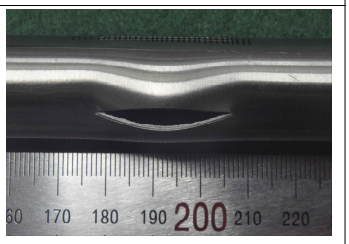
		
<L_1=L_2=6.3mm, l_1=1.0mm>	<L_1=L_2=L_3=6.3mm, l_1=1.0mm & l_2=2.0mm>	<L_1=L_2=L_3=6.3mm, l_1=1.0mm & l_2=15.0mm>
		
<L_1=L_2=25.4mm, l_1=2.0mm>	<L_1=L_2=L_3=25.4mm, l_1=1.0mm & l_2=2.0mm>	<L_1=L_2=L_3=25.4mm, l_1=1.0mm & l_2=15.0mm>

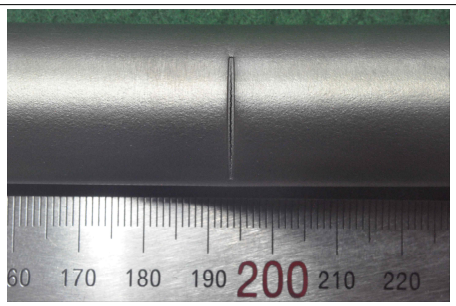
그림 3.4.4 평행하게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상모드

5. 다중 원주방향 표면균열의 손상모드

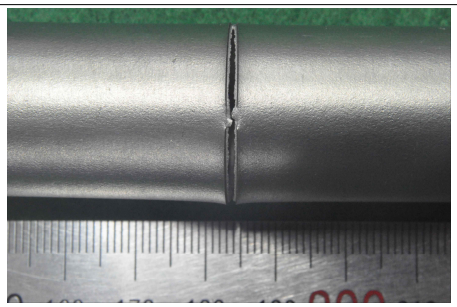
그림 3.4.5은 단일 및 다중 원주방향 표면균열을 갖는 전열관 시편에 대한 파열시험 후 사진을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열길이, 개수, 그리고 결함의 배열 등에 관계없이 모든 원주방향 균열에서 불안정 찢김 현상은 관찰되지 않았다. 2개의 원주방향 표면균열이 동일 선상에 배열된 경우에 2개의 균열이 모두 파열되었으며, 균열 사이의 거리에 관계없이 두 균열 사이에서 찢김이 발생되어 서로 합체되었다. 원주방향 표면균열이 엇갈리게 배열된 경우에는 1mm 간격으로 배열된 2개의 균열중 1개만 파열되었으나, 1mm 간격으로 3개의 균열이 배열되어 있는 경우에는 2개의 균열이 파열되었으며 서로 합체되었다.

Collection @ chosun

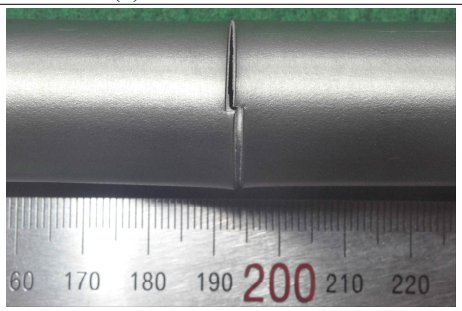
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

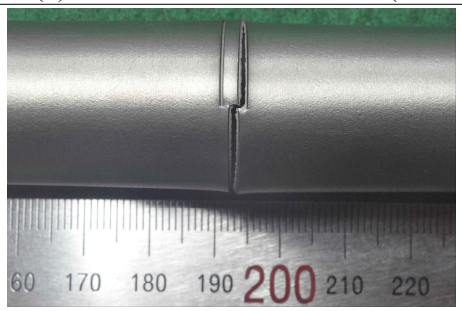


(a) 단일 균열



(b) 동일 선상의 다중 균열 (l_1=2mm)





(c) 엇갈리게 배열된 다중 균열

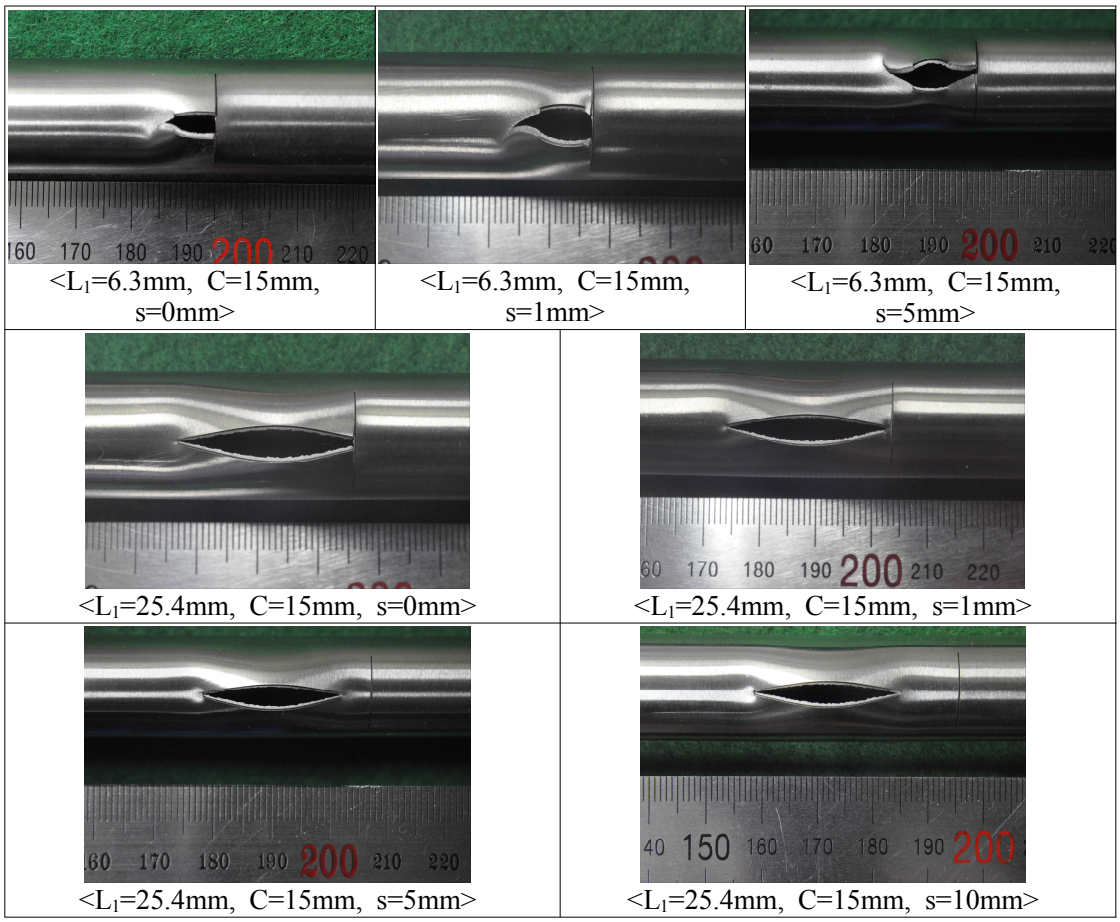
그림 3.4.5 다중 원주방향 표면균열의 손상모드

6. 복합 표면균열의 손상모드

그림 3.4.6은 축방향 표면균열과 원주방향 표면균열이 함께 존재하는 복합 균열을 갖는 전열관 시편의 파열시험 후 사진을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열길이와 균열 사이의 거리에 관계없이 축방향 균열만 파열되었다. 축방향 균열이 짧은 경우(6.3mm)에는 파열과 함께 균열의 양쪽 가장자리에서 불안정 찢김이 발생하였으며, 이로 인해 균열 사이의 거리에 관계없이 s=5mm까지 축방향 균열과 원주방향 균열이 합체되고 원주방향 표면균열의 일부가 찢어졌다. 그러나, 축방향 균열길이가 25.4mm인 경우에는 축방향 균열에서 불안정 균열찢김이 발생하기 않았다. 또한, 축방향 균열과 원주방향 균열이 서로 접촉하고 있는 경우(s=0mm)를 제외하면, 모든 조건에서 축방향 표면균열과 원주방향 표면균열이 합체되지 않았으며 원주방향 표면균열에서 균열전파가 발생되지 않았다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



<L_1=6.3mm, C=15mm, s=0mm>

<L_1=6.3mm, C=15mm, s=1mm>

<L_1=6.3mm, C=15mm, s=5mm>

<L_1=25.4mm, C=15mm, s=0mm>

<L_1=25.4mm, C=15mm, s=1mm>

<L_1=25.4mm, C=15mm, s=5mm>

<L_1=25.4mm, C=15mm, s=10mm>

그림 3.4.6 복합 표면균열의 손상모드

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 결론

본 논문에서는 파열시험을 통해서 다중 부분관통균열이 존재하는 증기발생기 전열관의 손상압력을 평가하였다. 사용된 증기발생기 전열관의 기계적 물성치에 차이를 제거하기 위해 정량화하여 평가하였고, 파열시험 결과와 해석결과를 분석함으로써 다중 부분관통균열이 존재하는 전열관의 손상압력에 미치는 상호작용 영향을 검토하였다. 또한, 다중 부분관통균열이 존재하는 전열관의 손상모드를 관찰하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 부분관통균열의 손상압력은 일반적으로 균열의 길이가 길어짐에 따라 손상압력이 감소하였다. 또한, EPRI의 손상압력 평가 모델과 비교하였을 때, 실제 손상압력보다는 9~13% 정도 낮은 보수적인 값으로 평가되었다.

(2) 동일 선상에 배열된 2개의 축방향 표면균열에 대한 손상압력은 균열간의 거리가 멀어짐에 따라 단일 표면균열의 손상압력과 유사함을 확인하였다.

(3) 평행하게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상압력은 세 개의 표면균열간 거리가 짧을수록 단일 부분관통균열의 손상압력과 유사하거나 높았지만, 표면균열간의 거리가 원주방향으로 15㎜(90°)인 경우에 가장 낮은 손상압력을 보였다. 그러나, 표면균열의 거리가 원주방향으로 15㎜(90°)보다 더 멀어짐에 따라 다시 손상압력이 증가하는 것으로 확인되었다.

(4) 엇갈리게 배열된 다중 축방향 표면균열의 손상압력은 균열간의 거리가 짧은 경우보다는 긴 경우에 상호작용에 의한 감소 영향이 더 미치는 것으로 확인되었다.

(5) 손상압력에 미치는 축방향 표면균열 개수의 영향으로는 표면균열 개수가 증가함에 따라 손상압력이 감소하였다. 즉, 균열의 길이가 증가함과 같은 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(6) 다중 원주방향 표면균열의 손상압력은 배열 형태, 거리, 개수와는 관계없이 손상 없는 전열관의 손상압력과 유사하였다.

(7) 축방향과 원주방향의 복합 표면균열의 손상압력은 표면균열간의 거리가 멀어짐에 따라 단일 부분관통균열의 손상압력과 유사하였다. 단, 표면균열의 길이가 25.4㎜인 경우에는 표면균열간의 거리와는 관계없이 단일 부분관통균열의 손상압력보다 낮은 손상압력으로 유지되는 것으로 판단된다.

(8) 손상모드로 축방향 균열길이가 6.3㎜, 12.7㎜인 경우에는 가장자리가 찢어지는 현상을 관찰하였다. 그러나, 25.4㎜이상인 축방향 균열길이가 표면균열간의 거리가 2㎜이상일 때에는 가장자리가 찢어지지 않았다. 원주방향 균열은 균열부분에서만 손상되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] IAEA, 2011, "Assessment and management of aging of major nuclear power plant component important to safety: steam generator", IAEA-TECDOC-1668.

[2] Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H., and Choi, Y.H., 2005, "Evaluation of Plastic Collapse Pressure for Steam Generator Tube with Non-Aligned Two Axial Through-Wall Cracks", Tans. of KPVP, Vol. 29(8), pp.1070-1077.

[3] MacDonald, P.E., 1996, "Steam generator tube failures", NUREG/CR-6365.

[4] Kim, J.S., Kim, J.S., Jin, T.E., Kim, H.D., and Chung, H.S., 2004, "Burst Pressure Evaluation for Through-wall Cracked Tubes in the Steam Generator", Tans. of KPVP, Vol. 28(7), pp.1013-1013.

[5] USNRC, 2009, "Steam Generator Tube Integrity Issues: Pressurization Rate Effects, Failure Maps, Leak Rate Correlation Models, and Leak Rates in Restricted Areas", NUREC/CR-6879, ANL-05/16

[6] Lee, K.H., Kim, H.D., Kang, Y.S., Nam, M.W., and Cho, N.C., 2014, "Burst Pressure tests of axial notched steam generator tubes", Tans. of KPVP, Vol. 10, pp.56-63.

[7] Hwang, S.S., Kim, H.P., and Kim, J.S., 2004, "Evaluation of the burst characteristics for axial notches on SG tubings," Nucl. Eng. & Design, Vol. 232, pp139-143.

[8] Shin, K.I., Yoon, K.B., and Park, J.H., 2013, "Experimental and Numerical study on The Burst Pressure of Steam Generator Tubes with L-and U-type Through-wall Combination Cracks", J. of. Mech. Sci. & Tech., Vo.27, pp.2299-2304.

[9] Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H., Choi, Y.H., Kim, J.S., 2006, "Determination of global failure pressure for tubes with two parallel cracks," Fatigue Frac. Engng. Mater. Struct., Vol. 29, pp.623-631.

[10] USNRC, 2002, "Results From Pressure and Leak-Rate Testing of Laboratory-Degraded Steam Generator Tubes", NUREC/CR-6789, ANL-01/31

[11] S. Majumdar, K. S. Kasza, J. Y. Park, and Abou Hanna, 2001, "Analysis and Testing of Rupture of Steam Generator Tubing with Flaws", ICF100503PR

[12] Kim, J.W., Eom, K.H., 2015, "Burst Test on The Steam Generator Tube with Multiple Part-Through-Wall Flaws", ASME, PVP2015-45273

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[13] EPRI, “Steam Generator Tubing Burst Testing and leak Rate Testing Guidelines”, Final Report-1006783, 2002.

[14] USNRC, 2002, "Validation of Failure and Leak-Rate Correlations for Stress Corrosion Cracks in Steam Generator Tubes," NUREG/CR-6774,ANL-01/34

[15] Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Song, M.H., Choi, Y.H., 2007, "Determination of failure pressure for tubes with two non-aligned axial through-wall cracks," International Journal of Fracture Vol. 144, Issue 2, pp.91-101.

[16] S. Majumdar, 1999, "Prediction of structural integrity of steam generator tubes under severe acciednt conditions," Nucl. Eng. & Design, Vol. 194, pp31-55.

[17] ABAQUS/Standard User's Manual, Ver6.14, 2015

Collection @ chosun