

# 열-기계적 피로하중을 받는 균열시편 제작시간 단축에 관한 연구

## A Study on the Thermo-Mechanical Fatigue Loading for Time Reduction in Fabricating an Artificial Cracked Specimen

이 규 범\*      최 주 호†      안 대 환\*      이 보 영\*\*  
Lee, Gyu-Beom      Choi, Joo-Ho      An, Dae-Hwan      Lee, Bo-Young  
(논문접수일 : 2007년 9월 5일 ; 심사종료일 : 2008년 1월 8일)

### 요 지

원자력발전소에서는 열교환 파이프에서 발생하는 열피로 균열을 비파괴 탐상장비를 이용하여 조기에 발견하는 것이 안전을 위해 매우 필요하며, 따라서 이를 모사한 인공균열시편 제작에 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 이러한 균열은 일반 기계가공으로 제작하는 것이 불가능하여 실제 조건과 유사한 열 반복하중 하에서 제작될 수 밖에 없는데, 이를 위해 많은 시간이 소요된다. 본 연구에서는 크랙성장 시뮬레이션 기법을 이용하여 이러한 균열 제작시간을 단축하기 위한 최적의 열하중 조건을 찾고자 하였다. 이를 위해 임의조건에서 시뮬레이션 및 열피로균열 발생 기초실험을 수행하여 균열 초기수명과 진전수명을 검증하였고, 이를 바탕으로 다양한 가열 및 냉각시간을 시뮬레이션 함으로써 제작시간을 최소화하는 열하중 조건을 구하였다. 시뮬레이션에서는 응력해석을 위해 상용 소프트웨어 ANSYS를 초기균열수명 계산을 위해 수치계산용 소프트웨어 ZENCRACK을 이용하여 코딩을 균열진전수명 평가를 위해 ZENCRACK 소프트웨어를 이용하였다. 그 결과 1mm 균열 제작에 소요되는 시간은 초기의 418시간에서 319시간으로 24% 단축되는 것으로 예측되었다.

**핵심용어** : 열-기계 피로, 균열초기수명, 균열진전수명, 피로수명최적화

### Abstract

In the nuclear power plant, early detection of fatigue crack by non-destructive test (NDT) equipment due to the thermal cyclic load is very important in terms of strict safety regulation. To this end, many efforts are exerted to the fabrication of artificial cracked specimen for practicing engineers in the NDT company. The crack of this kind, however, cannot be made by conventional machining, but should be made under thermal cyclic load that is close to the in-situ condition, which takes tremendous time due to the repetition. In this study, thermal loading condition is investigated to minimize the time for fabricating the cracked specimen using simulation technique which predicts the crack initiation and propagation behavior. Simulation and experiment are conducted under an initial assumed condition for validation purpose. A number of simulations are conducted next under a variety of heating and cooling conditions, from which the best solution to achieve minimum time for crack with wanted size is found. In the simulation, general purpose software ANSYS is used for the stress analysis, MATLAB is used to compute crack initiation life, and ZENCRACK, which is special purpose software for crack growth prediction, is used to compute crack propagation life. As a result of the study, the time for the crack to reach the size of 1mm is predicted from the 418 hours at the initial condition to the 319 hours at the optimum condition, which is about 24% reduction.

**Keywords** : thermo-mechanical fatigue, crack initiation, crack growth, fatigue life optimization

### 1. 서 론

여러 가지 결합 중, 열피로 균열은 배관 내벽의 급격한 온도변화가 일어나는 열교환기(Reactor Coolant System)의

† 책임저자, 정회원 · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수  
Tel: 02-300-0117 ; Fax: 02-3158-2191  
E-mail: jhchoi@hau.ac.kr

\* 한국항공대학교 대학원

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수

· 이 논문에 대한 토론을 2008년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

surge line이나 feed water line에서 주로 발생하고 있다. 이러한 열피로 균열은 배관내 물의 온도 변화에 따라 형성되는 열응력에 의해서 발생한다.

원자력발전소에서는 이러한 균열들의 발생 유무를 판단하기 위해 주기적으로 가동 중 검사(inservice inspection)를 실시하고 있다. 하지만 가동 중 검사의 경우 검사자의 접근성이 제한적이고, 수명 예측 및 기기의 안전성 평가에 중요한 결과를 제공하기 때문에 결함 검출에 있어 신뢰도가 높은 비파괴 검사 방법(NDT)의 적용이 요구된다. 특히, 원자력 배관재 파손의 주요 원인인 열성층에 의한 열피로 균열 및 입계응력부식균열 등의 경우 실제 기기와 유사한 형상을 갖는 모의시편에 대해 실제 검사 시험을 통한 검사기술의 인증이 필요하다.

이에 따라 미국은 2000년도부터 원전기기의 실제 결함과 유사한 모의시편을 사용하여 원전기기에 적용되는 비파괴 검사의 결함검출능력을 검증하도록 기량 검증(Performance Demonstration)을 제도화하여 적용하였고, 우리나라도 2003년부터 초음파탐상검사(UT) 및 와전류탐상검사(ECT) 기량검증을 적용하기 위하여 규제기관과 원전 소유주를 중심으로 "한국형 기량 검증 시스템"을 개발하고 있다(홍재근 등, 2002).

하지만, 아직까지 국내에는 실제 결함을 재현한 인공결함 제작기술을 보유하고 있지 않아 시험재의 대부분을 외국에서 수입하고 있는 실정이다. 따라서 대부분 실제 기량 검증을 위해 NDT 검사자들에게 제공되는 모의 시험편은 방전가공(EDM)으로 노치 가공된 시험편으로 그림 1(a)와 같이 그 폭이 최소 150 $\mu$ m 이상이다. 그러나 실제 원전에 발생하는 균열 틈은 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 10 $\mu$ m 이하로 매우 작으며 이를 육안으로 확인하는 것은 사실상 불가능하다. 결과적으로 EDM notch의 경우 결함의 존재를 쉽게 확인할 수는 있으나 실제 결함의 신호를 정확히 모사할 수 없는 단점을 갖기 때문에 손상평가의 신뢰성을 고도화하는데 한계점을 갖고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 구조재 내에 원하는 종류와 형상의 자연결함을 정밀제조하는 기술을 개발하고 비파괴 검사시 나타나는 결함의 신호를 정확히 모

사할 필요가 있다.

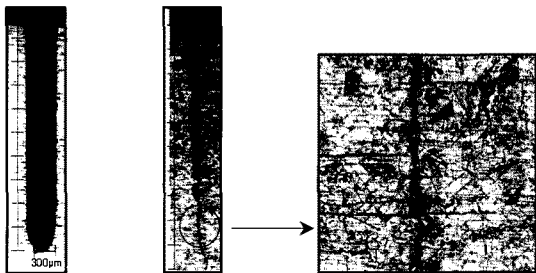
인공결함 제작의 경우 미국, 독일, 일본, 핀란드 등을 중심으로 원천기술을 확보하고 있으며, 특히 핀란드의 경우 자연균열과 유사한 환경에서의 열피로 균열 제작에 대한 지속적인 연구를 진행해왔다(Kemppainen 등, 2003). 최근의 연구에서는 원자력 발전소 열교환기(RCS)의 배관재로 사용되는 STS 304 배관재에 열성층에 의한 열피로 균열을 제작하였으며, NDT 방법을 이용한 현장 열피로 균열과의 차이점을 분석하는 연구를 진행한 바 있다(Lee 등, 2006). 또한 Choi 등(2006)은 기초연구로서 평판재에 대한 유한요소해석 기반의 열피로 수명을 계산하였고, 균열 제작시간 단축에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 Lee 등(2006)의 연구는 배관재에 대한 임의의 온도 조건에서 열피로 균열을 실험하여 균열 제작에 긴 시간이 필요하였다. 또한, Choi 등(2006)은 배관재가 아닌 평판재를 대상으로 열피로 균열 제작시간 최소화를 시뮬레이션 한 연구이다.

본 연구에서는 배관재에 20kN의 하중을 가한 상태에서 임의로 60초 가열과 30초 냉각을 반복하는 열피로 균열 실험 조건을 구성하고 유한요소해석 및 수치적 해석으로 피로 수명을 계산하였으며, 실험결과와 비교함으로써 해석의 신뢰도를 검증하였다. 이를 바탕으로 열피로 균열을 최단기간에 제작할 수 있는 열하중의 조건을 찾는 연구를 진행하였다. 원자력 배관재에 대한 열피로 해석을 위해 실험중인 배관의 부분별 온도 측정 결과를 활용하여 열해석에 사용되는 내부 발열 조건과 대류 조건을 결정함으로써 실험과 해석의 온도 결과 값을 일치시켰으며, 이를 바탕으로 구조해석을 진행하였다. 제작된 미세 균열 크기가 1mm가 될 때까지의 수명을 계산하기 위해서, 균열 초기 수명과 균열 진전 수명으로 나누어 해석을 진행하였다. 균열 초기 수명은 열-구조해석 결과를 바탕으로 변형률-수명 곡선 방법을 사용하여 초기 수명을 결정하였고, 균열 진전 수명을 구하기 위해서는 Paris 방정식을 이용하였다. 열구조해석은 유한요소해석 범용 소프트웨어인 ANSYS를 사용하였으며, 균열초기수명계산을 위해 MATLAB이 사용되었고, 균열 진전을 해석하기 위해서 균열 진전 시뮬레이션용 소프트웨어 ZENCRACK을 사용하였다.

## 2. 열피로 균열 발생 실험

### 2.1 열피로 균열 발생조건과 발생부위

원전에서 열피로 균열의 원인이 되는 열성층(thermal stratification)은 물의 밀도가 온도에 따라 급격히 변화되기 때문에 발생된다고 알려져 있다. 그림 2에서처럼 밀도가 낮



(a)EDM노치 (b)열피로 균열 (c) 열피로 균열 미세조직  
그림 1 EDM 노치와 열피로 균열의 단계

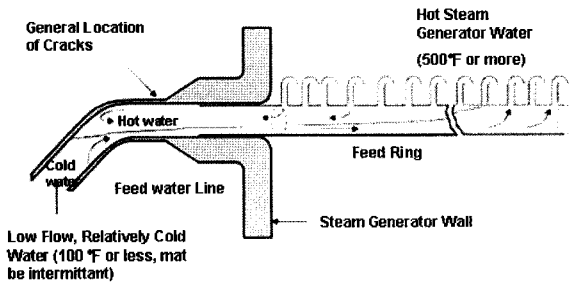


그림 2 feed-water line 에서 발생하는 열성층의 계략도

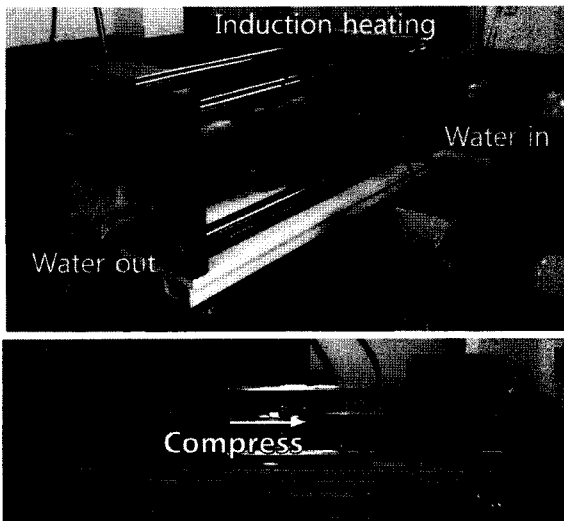


그림 3 열 피로 균열 발생 장치

은 뜨거운 물은 배관의 상단에 위치하려 하는 반면에 밀도가 큰 차가운 물은 배관 하단에 그대로 존재하려고 한다. 또한 물은 열전달이 어렵고 열용량이 큰 특성 때문에 서로 섞이지 않아 열성층이 쉽게 일어날 수 있다. 배관에서는 서로 다른 온도의 물이 섞이는 과정에서 배관 내벽에 급격한 온도 변화가 나타나게 되고, 이러한 고르지 않은 온도 분포는 배관 내벽의 열팽창을 막고 열응력을 발생시킨다. 또 지속적인 열교환은 다양하고 주기적인 열응력을 발생시켜 균열의 생성 및 성장의 원인이 된다.

## 2.2 실험 조건 및 결과

본 실험에는 원전의 조건과 유사한 실험조건을 구성하기 위해 그림 3에서 보는바와 같이 실험기구를 구성하였다. 배관재로는 외경(OD)이 89mm, 두께(t)가 7.7mm인 STS 304 stainless 배관을 500mm 길이로 절단하여 사용하였다. 중심부는 유도가열기를 사용하여 가열시 배관상단의 온도가 최고 650°C까지 상승하도록 조건을 설정하였으며, 냉각시 일정시간 냉각수로 배관의 하단부를 냉각함으로써 열성층 발생 조건을 설정하였다.

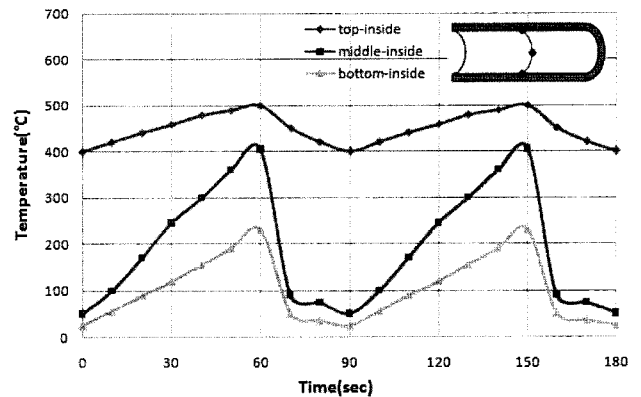
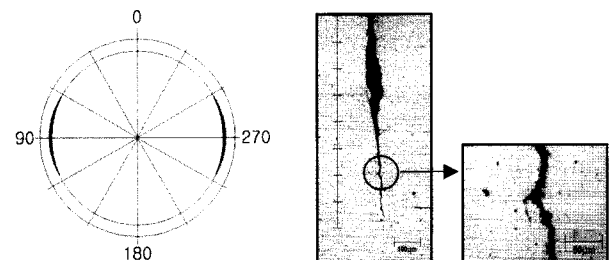


그림 4 배관 내벽의 온도 그래프



(a) 균열 발생 지점 (b) 균열 단면사진과 확대사진  
그림 5 16000사이클에서 열피로 균열 발생지점과 균열 모습

또한 원전에서 배관 설치시 발생하는 구조적 하중을 구현하기 위해서 20kN의 축방향 압축하중을 가하였다. 열피로를 가속화시키기 위한 가열과 냉각 사이클은 각각 임의로 60초, 30초 주기로 반복하도록 설정하였다. 그 결과 배관내벽의 온도는 그림 4처럼 반복적 정상상태의 사이클을 가지게 되며 배관내벽 중심부에서 온도 편차가 가장 크다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 실험조건에서 10,000사이클 후 0.2mm정도 깊이의 초기 균열이 배관내부중심 지점에서 탐상되었으며, 16,000사이클에서는 균열이 약 1mm까지 성장하였다. 그림 5(a)는 16,000사이클에서 균열이 발생된 부위이며, 그림 5(b)는 광학현미경으로 촬영한 균열단면을 보여주고 있다. 이는 실제 원전 열피로 균열인 그림 1과 매우 유사하다.

## 3. 응력기반 피로수명 평가

### 3.1 유한요소 해석

#### 3.1.1 배관재의 열 해석

ANSYS를 이용한 열 해석을 위해 표 1의 물성치를 이용하였다(Rothman, 1988). 3차원 유한요소 모델링을 위해 Solid 90 20절점 요소를 사용하였다. 그림 6과 같이 경계조건으로 유도가열기에 의한 열하중은 유도가열기의 효과와 동일한 내부 발열 조건을 주었으며, 냉각시에는 냉각수에 의해

표 1 STS304의 재료 물성치

Properties	Temp(°C)	Value
Specific heat capacity (J/Kg · K)	20	502
	93	525
	316	562
	760	646
Thermal conductivity (W/m · K)	100	16.3
	500	21.5

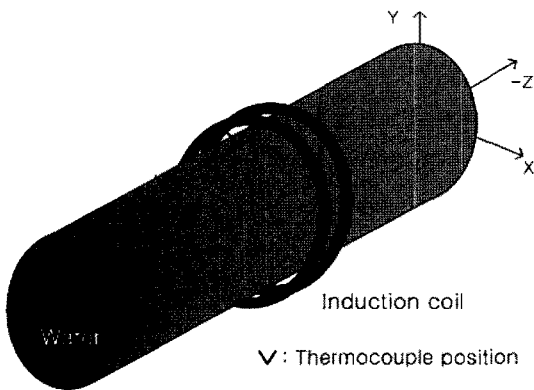


그림 6 해석 모델의 계략도와 온도측정 지점

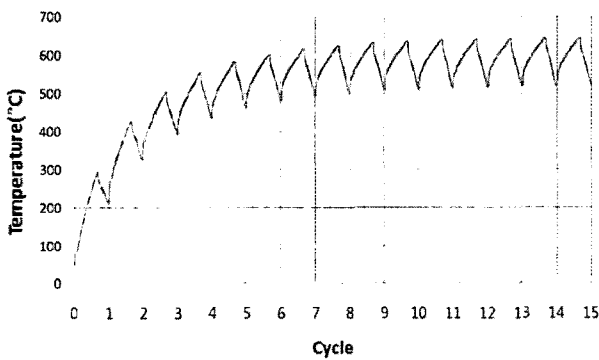


그림 7 배관 외벽 상부의 온도 그래프

서 배관 내부 70%정도의 수위에 해당하는 요소에 대류 조건을 적용하였다. 이러한 조건으로 가열 60초와 냉각 30초의 과도해석을 수행하였으며, 미지의 내부발열조건과 대류조건을 정의하기 위해서 그림 6과 같이 배관상부에서 측정된 가열, 냉각시의 온도와 해석 온도 결과값의 차를 최소화하는 최적화 문제를 정의하고, 이를 해결함으로써 각 계수를 결정하였다. 이러한 과도해석을 반복한 결과, 배관 외벽 상부의 온도가 그림 7과 같이 주기성을 갖으며 수렴되는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 배관외벽 상부의 온도와 해석 결과값을 비교한 그래프로서 해석 결과가 실험과 거의 유사함을 알 수 있다.

그림 9은 배관 내벽의 가열, 냉각시의 온도 분포를 보여준다. 배관 내벽 상부는 항상 하부보다 높은 온도를 가지며 냉각수가 방출되는 냉각시에는 배관 내벽 중부와 하부의 온도

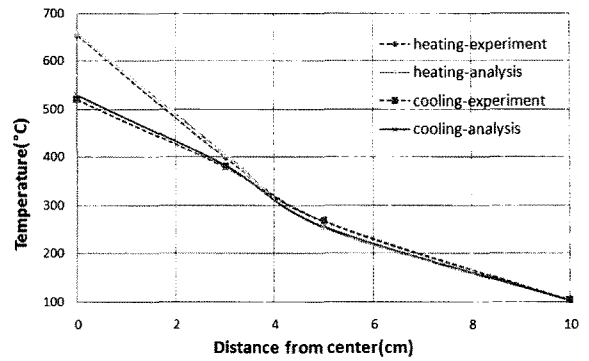
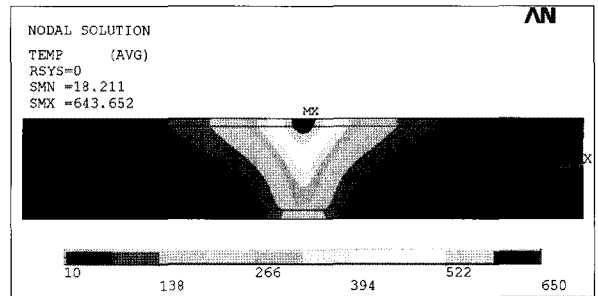
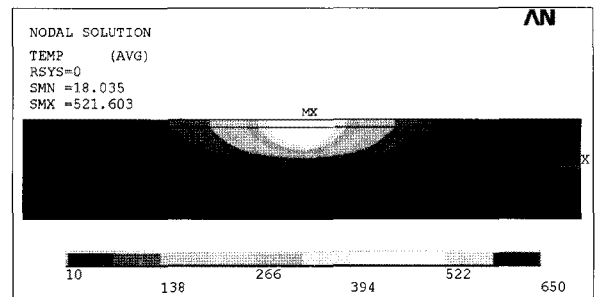


그림 8 배관 외벽 상부의 측정온도와 해석온도의 비교 그래프



(a) 가열시



(b) 냉각시

그림 9 가열과 냉각시 배관 내벽의 온도 분포

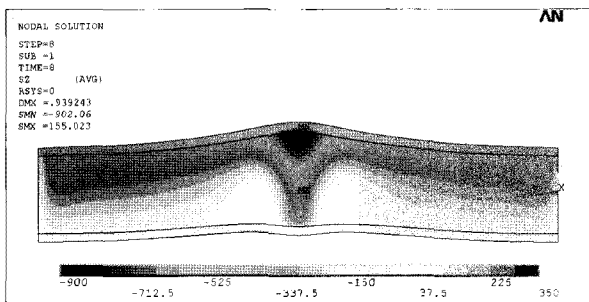
가 급격히 낮아진다. 이러한 현상 때문에 온도층의 깊이가 주기적으로 변하는 열성층이 나타나게 되며, 또한 열 분포를 확인함으로써 배관 내부의 국부적인 영역이 열성층의 영향을 받게 됨을 확인할 수 있다.

### 3.1.2 배관재의 응력해석

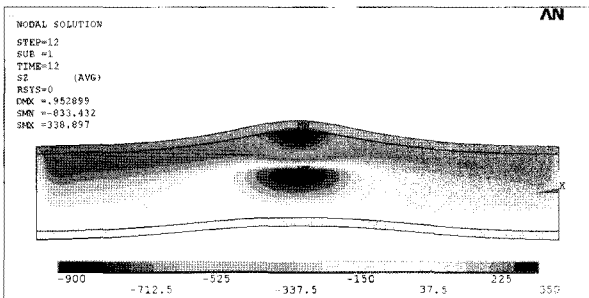
구조해석의 경계조건은 배관에 20kN 압축 하중에 해당하는 강제 변위로 설정하였으며, 열해석 결과 중 정상상태에 도달한 15번째 사이클의 온도 데이터를 8step의 가열구간과 5step의 냉각구간으로 구분하여 사용하였다. 또한 STS 304는 온도에 따라 항복응력이 큰 차이를 갖기 때문에 표 2 (Rothman, 1988)의 온도에 따른 물성치와 재료의 이동경화(Kinematic Hardening) 영향을 고려한 열탄소성해석을 수행하였다. 그림 10은 배관 내벽 균열 발생 지점의 길이방향 응력인 z축 방향의 응력 분포를 보인 것이다.

표 2 STS 304의 재료 물성치

Temp (°C)	Coefficient of thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /K)	Temp (°C)	E (GPa)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>u</sub> (Mpa)
0-100	17.3	25	197	330	585
0-315	17.8	204	183	275	495
0-540	18.4	316	177	255	470
0-650	18.7	427	166	160	440
		649	145	115	305
		760	134	76	200



(a) 가열시



(b) 냉각시

그림 10 가열과 냉각시 배관 내벽의 응력 분포

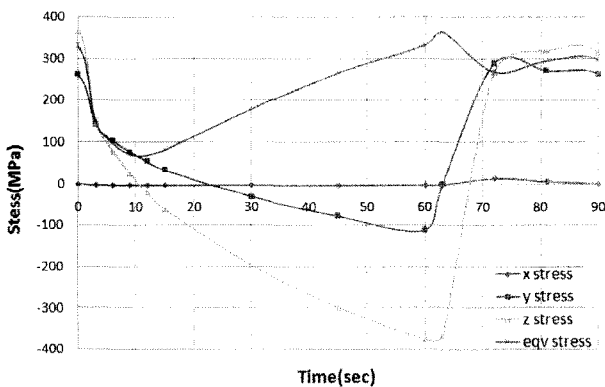


그림 11 한 사이클 동안의 등가 응력과 각 축방향 응력 변화

균열 발생 지점에서 큰 인장 교번 응력이 발생하고 있으며, 이러한 응력이 발생하는 이유는 가열시에서 냉각시로 열하중 조건이 변하는 동안 배관 외벽의 상부와 중부는 고온

팽창에 의한 압축응력 상태를 형성하고, 배관 내벽의 균열 발생부위는 국부적으로 급격히 냉각 수축되기 때문에 국부적으로 큰 인장 응력이 발생한다. 그림 11은 한 사이클 동안 균열 관측지점에서 급격한 압축-인장 교번응력이 발생하는 것을 보여주고 있다.

### 3.2 균열 초기 수명 평가

#### 3.2.1 변형률-수명 곡선 접근 방법

변형률-수명 곡선은 반수명에서 탄성변형률 진폭과 소성 변형률 진폭을 나누어 Basquin의 식과 Coffin의 식의 합으로 아래 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다(Dowling, 1999).

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

여기서  $\Delta\epsilon_e$ ,  $\Delta\epsilon_p$ 는 탄성 성분의 변형률 진폭, 소성 성분의 변형률 진폭을 나타낸다.  $\sigma'_f$ 는 피로강도 계수,  $b$ 는 피로강도 지수,  $\epsilon'_f$ 는 피로연성 계수,  $c$ 는 피로연성 지수,  $2N_f$ 는 파괴시까지의 반복수를 의미한다. 위의 식에 평균 응력 효과를 고려한 Morrow의 수정된 변형률-수명 관계식은 아래와 같다.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right) (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

여기서  $\sigma_m$ 은 평균 응력을 의미한다. 다축피로를 고려한 von Mises criterion은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다. 여기서,  $\epsilon_{eq}$ 는 등가 변형률의 진폭을 나타내며,  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 은 주 변형률의 진폭을 나타낸다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (3)$$

#### 3.2.2 피로 곡선 결정

본 연구에서는 STS304 배관재에 대한 직접적인 피로특성 실험을 진행할 수 없었기 때문에 문헌의 변형률-수명 데이터를 사용하였다(Stephens, 2001). 균열발생시점인 균열초기 수명을 나타내는 피로 물성치는 표 3과 같으며 변형률-수명 좌표에 도시한 결과는 그림 12와 같다.

표 3 STS 304의 피로 물성치

$\sigma'_f$ (MPa)	b	$\epsilon'_f$	c
1267	-0.139	0.174	-0.415

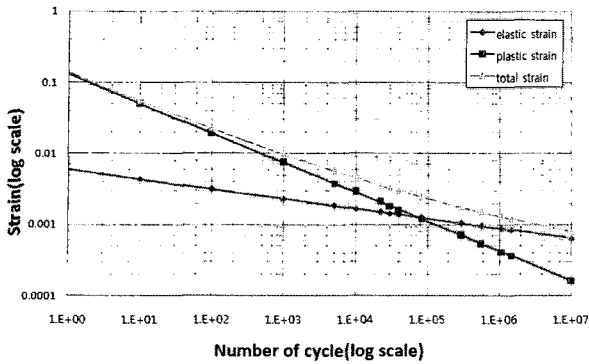


그림 12 STS 304의 변형률-수명 곡선

### 3.2.3 유한요소 해석을 통한 피로수명 평가

균열 초기 수명은 열탄소성 해석결과를 바탕으로 배관내부 중심 절점들의 한 주기 동안의 변형률 변화량을 계산하여 식 (3)과 같이 등가 변형률을 계산하고, 그림 12의 변형률-수명 곡선식에 근거하여 식 (2)의 수정된 변형률-수명 관계식을 수치적인 방법으로 계산하였다. 배관 내벽의 중심 절점들에 대한 수명을 평가한 결과, 초기 균열은 실험 결과와 같은 그림 5(a)의 위치에서 예상되었으며, 균열 예상 시기는 11301 사이클로 예측되었다. 해석결과와 균열 위치와 사이클 수가 균열 제작 실험에서의 위치/사이클 수와 거의 동일함을 확인할 수 있다.

## 3.3 균열진전수명 평가

### 3.3.1 균열 성장 곡선식(Paris 방정식)

균열 진전과 관련된 파괴역학의 주요한 파라미터는 응력확대 계수(stress intensity factor,  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ )와 에너지 해방율(energy release rate,  $G$ )이다. 선형탄성해석에서 에너지 해방율과 응력확대계수의 개념은 연관성이 있다 (Irwin, 1957). 응력확대계수는 균열 선단에서 선형응력장의 크기로 기술 할 수 있으며 응력확대계수의 일반적인 식은 아래와 같다(ZENCRACK manual, 2005).

$$K = f(\text{load, crack length, geometry}) \quad (4)$$

균열의 크기를 계산하기 위해서는 식 (5)가 사용된다. 이 식은 Paris 방정식으로서 응력확대계수와 에너지 해방율로 각각 표현 되어진다.

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m = C'(G_{\max}^{1/2} - G_{\min}^{1/2})^m \quad (5)$$

여기에서  $da/dn$ 은 균열 성장률,  $C, C', m$ ,은 재료상수,  $G_{\max}, G_{\min}$ 은 각각 한 사이클 동안에 최대/최소 변형에너지

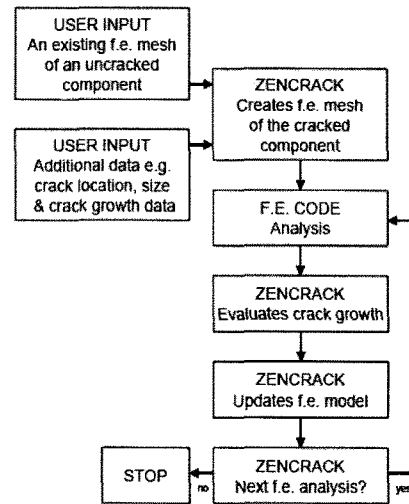


그림 13 ZENCRACK의 균열 시뮬레이션 과정

지 해방율이다.  $G$ 값은 하중형상에 따른 I, II, III mode의 응력확대계수의 식으로 표현할 수 있다.

$$G = \frac{B}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \left( \frac{1+\nu}{E} \right) K_{III}^2 \quad (6)$$

여기에서  $B$ 는 평면 응력에 대해서 1의 값을 갖고, 평면 변형율에 대해서  $1-\nu^2$ 의 형태를 취한다. 그리고 균열의 방향은 응력확대계수에 의해서 구해진다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (7)$$

### 3.3.2 균열 성장 해석과정

균열 성장 해석은 균열 성장에 따른 구조물의 응력확대계수를 계산하여 균열의 형상을 결정해주는 프로그램인 ZENCRACK을 이용하였다. 균열 성장 해석과정은 그림 13과 같다(ZENCRACK manual, 2005). 첫 단계로 균열이 정의되어 있지 않은 ANSYS 유한요소 코드와 초기균열조건(균열크기, 균열 요소(cracked block), 재료상수 등)의 코드를 input으로 작성한다. 다음 단계로 ZENCRACK이 초기균열이 위치할 부분의 요소를 균열 요소(cracked block)로 변환하여 ANSYS input 코드를 작성한다. ANSYS에 의해서 작성된 input 코드로 구조해석이 수행되고, ZENCRACK에서 균열 선단의 변위를 이용하여 응력확대계수와 에너지 해방율을 계산한다. 계산된 값을 가지고 Paris 방정식에 의해 균열의 방향 및 크기가 계산된다. 다음 단계로 ZENCRACK은 균열 진전에 따른 새로운 ANSYS input 코드를 작성하게 된다. 이렇게 한 사이클의 해석이 끝나면 ZENCRACK은 해석의 추가 진행여부를 판단하게 된다.

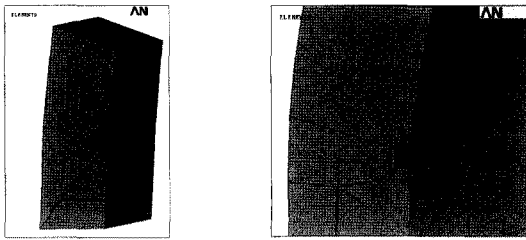


그림 14 균열 요소와 삽입된 요소 모습

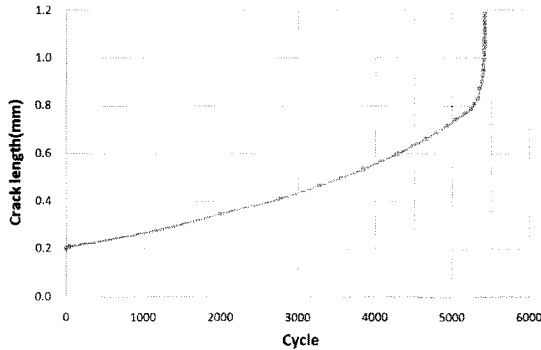


그림 15 균열 성장 예상 곡선

균열 시뮬레이션의 초기 조건으로 STS304의 Paris 상수 ( $C = 5.61e-12 (m/cycle) / (MPa\sqrt{m})^m, m = 3.25$ ) (Stephens, 2001)와 그림 14와 같이 배관 내부 중심부에 깊이 0.2mm의 균열 요소를 정의하여 일련의 열탄소성 해석을 바탕으로한 ZENCRACK의 균열 시뮬레이션을 마친 이후에 그림 15와 같이 균열의 사이클 대비 두께 방향 균열 길이를 확인할 수 있다. 이러한 방법으로 균열이 초기 0.2mm에서 1mm로 성장하기까지 약 5405사이클이 소요됨을 확인하였으며, 1mm 이후에 균열이 급속도로 진전되어 실험과 동일한 국부 관통 균열이 발생하는 것을 보여주고 있다.

지금까지의 해석결과를 바탕으로 1mm의 균열을 제작하는데 소요되는 시간은  $11301 + 5405 = 16706$ 사이클이다. 이 결과는 16000사이클에서 약 1mm의 균열을 확인한 실험과 매우 유사한 것으로 기초실험과 시뮬레이션의 검증을 통하여 다른 실험조건에 대한 피로수명의 경향성을 판단하는 것이 목적이기 때문에 신뢰할 만한 결과라고 판단하였다.

#### 4. 최적의 실험조건

현재의 실험 조건에서는  $16706\text{cycle} \times 90\text{s} = 418$ 시간, 즉 17일이 소요된다. 이러한 장시간의 열피로 균열 제작 시간은 여러 실험변수 중에 일부를 조절함으로써 단축시킬 수 있지만 이러한 가능성을 실험을 통해서 진행하기는 불가능하기 때문에 해석적인 방법으로 진행하였다. 이와 관련된 기초 연구가 평판재 시험편에 대해서 수행된 바 있다(Choi 등, 2006). 균열 제작 시간에 영향을 미치는 변수를 선택하기 위해 파라

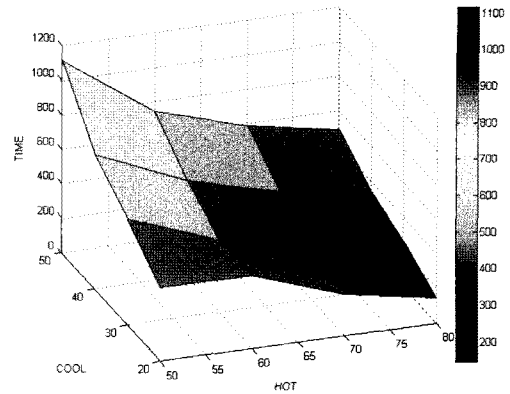


그림 16 균열 성장 예상 곡선

메트릭 해석을 수행하였으며, 가열 시간과 냉각 시간을 설계 변수로 선정하였다. 한편 제한조건으로 원전의 운전온도를 고려하여 균열 시작점인 그림 4의 배관내벽중심부의 최고 온도가  $400 \sim 450^\circ\text{C}$ 에서 수렴하는 조건을 선택하였다.

본 연구의 목적은 균열 제작시간을 단축시키는 것이다. 균열 제작시간 단축을 위해서 충분한 가열과 냉각시간으로 배관 내벽의 열응력을 크게 함으로서 사이클 수를 최소화 시킬 수 있다. 하지만 제작시간은 사이클 수와 단위 사이클 시간의 곱이기 때문에 사이클 수의 단축이 제작 시간의 단축을 의미하지 않는다. 그래서 가열시간을 50, 60, 70, 80로 구분하였고 냉각시간을 20, 30, 40, 50으로 구분함으로써 16개의 실험군을 형성하였으며, 각각의 경우에 대해서 균열수명해석을 수행하였다. 그 결과는 그림 16으로서 1mm의 균열을 제작하는데 소요되는 시간은 가열시간이 길수록 그리고 냉각시간이 짧을수록 가속화됨을 확인할 수 있다. 그 결과는 80/20 조건으로 147시간(6.1일)만에 균열 생성이 가능하다. 하지만 이 결과는 배관내벽 중심점의 온도를 고려하지 않은 결과이다. 표 4를 이용하여 온도 조건을 만족하는 결과로 6개 조건이 선택가능하며 60/30조건보다 균열제작시간이 단축되는 조건으로 2가지 조건을 선택하였다. 배관내벽중심부 온도를 고려한 결과 균열제작시간이 가장 짧은 조건은 60초 가열에 20초 냉각조건으로서 10초의 냉각 시간만을 줄였음에도 불구하고 열피로 균열을 제작시간은 418시간(17.4일)에서 319시간(13.3일)으로 24% 감소하였다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 열-기계적 피로 균열의 제작시간을 최소화 할 수 있는 조건을 제시하였다. 실제 실험 조건을 모사한 열응력을 해석함으로써 배관 내벽 중심부에 인장 교번 응력이 발생하는 것을 확인하였고, 이를 바탕으로 변형률-수명 곡선을 이용한 균열초기수명을 계산하였으며, ZENCRACK을 활

표 4 다양한 실험군에 대한 열피로 균열 해석 결과

Condition(time)		Crack initiation		Crack growth		Total fatigue life	
heating	cooling	cycle	hour	cycle	hour	total time	temperature
50	20	18101	352	3635	71	423	405
50	30	17801	396	9851	219	614	366
50	40	12401	310	18675	467	777	345
50	50	10001	278	30266	841	1119	331
60	20	12301	273	2061	46	319	449
60	30	11301	283	5405	135	418	408
60	40	9001	250	10800	300	550	385
60	50	6501	199	17904	547	746	370
70	20	8301	208	1315	33	240	488
70	30	8401	233	3294	92	325	445
70	40	7201	220	6468	198	418	421
70	50	5401	180	12234	408	588	405
80	20	4201	117	1083	30	147	522
80	30	6501	199	2154	66	264	479
80	40	6001	200	4132	138	338	453
80	50	4901	177	8724	315	492	437

용하여 균열진전수명을 계산하였다. 일련의 해석 결과는 실험 결과와 비교 했을 때 유사했으며, 일정크기의 균열이 생성되는데 가열 시간이 지속될수록 그리고 냉각시간이 짧아질수록 균열 제작 시간이 짧아짐을 확인하였다. 이러한 과정을 바탕으로 16개의 다양한 실험 조건을 설정하고 피로 수명을 계산하였다. 그 결과 배관의 중심점의 온도가 현재 실험조건과 유사한 범위 내에서 열피로 균열 제작시간을 최소로 할 수 있는 가열 냉각 조건을 찾았다. 최적의 조건은 가열 60초, 냉각 20초로서 냉각시간을 기존 실험에서 10초를 줄였음에도 불구하고 총 제작시간은 418시간에서 319시간으로 24%단축 되었다. 이 조건을 실제 제작실험에 적용할 경우 시간과 효율 면에서 큰 의미가 있을 것으로 예상된다. 차후 과제로 본 연구에서 진행한 성장 속도 계산 방법과 실제 실험에서의 균열 성장 속도를 비교하고 또한 최적의 실험 조건으로 제작 실험을 진행하여 해석결과의 신뢰성을 검증하려고 한다.

감사의 글

본 연구는 국가지정연구실(No.M20604005402-06B0400-40210). 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

홍재근, 송상우, 박반욱 (2002) 초음파 탐상 실증을 위한 피로 결합 시험편 제조법 기계와 재료, 14(3), pp.85~86.  
 Choi, J.H., Lee, G.B., Lee, B.Y. (2006) A Study on

the Thermo mechanical Fatigue Loading for Attaining Minimum Cycles in Fabrication an Artificial Cracked Specimen, *The Fourth China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, Kunming, Nov. 6-9, 2006, China, pp.575~580.  
 Dowling, N.E. (1999) *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, p.830.  
 Irwin, G.R. (1957) Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate, *J. Appl. Mech.*, 24, pp.361~364.  
 Kemppainen, M., Virkkunen, I., Pitkanen, J., Paussu, R., Hanninen, H.(2003) Advanced flaw production method for in-service inspection qualification mock-ups, *Nuclear Engineering and Design*, 224, pp.105~117.  
 Lee, B.Y., Jin, H.K., An, D.H., Ryu, D.H., Kim, J.S., Lee, J.H. (2006) Study on the Control and Fabrication of Thermal Fatigue Crack for Reliability Enhancement of NDT in Reactor Coolant System, *Engineering Materials*, Vols. 321-323, pp. 739~742.  
 Rothman, M.F. (1988) *High-Temperature Property Data: FERROUS ALLOYS*, ASM international  
 Stephens, R.I. (2001) *Metal Fatigue in Engineering*, A Wiley-Interscience Publication, New York, p.471.  
 ZENCRACK Manual, (2005) Zentech International Ltd.