

초음파 검사법을 이용한 STS304 배관재 내부 균열 측정 방법에 대한 연구

A study on the detection method of inner's crack of STS304 pipe using Ultrasonic Testing

황웅기** 이경민* 우영관* 서덕희* 이보영***

Hwang Woonggi**, Lee kyungmin*, Woo Youngkwan*, Seo Duckhee*, Lee Boyoung***

Abstract

Thermal fatigue is one of the life-limiting damage mechanisms in the nuclear power plant conditions. The turbulent mixing of fluids of different temperatures induces rapid temperature changes to the pipe wall. The successive thermal transients cause varying cyclic thermal stresses. These cyclic thermal stresses cause fatigue crack nucleation and growth similar to the cyclic mechanical stresses.

The aim of this study was to fulfil the need by developing an real crack manufacturing method, which would produce realistic cracks. The test material was austenitic STS 304, which is used as pipelines in the reactor coolant system of a nuclear power plants. In order to fabricate thermal fatigue crack similar to realistic crack, successive thermal transients were applied to the specimen. Thermal transient cycles were combined with heating (60sec) and cooling cycle (30sec).

And, In order to identify ultrasonic characteristic, it was performed the ultrasonic reflection measuring method for the fabricated specimen. From the results of ultrasonic reflection measuring testing, it was conformed that A-scan results(average 83% of real crack depth) for the TFC reference specimen was more enhanced NDT reliability than results(average 38% of real crack depth) for the EDM notch reference specimen.

keywords : Thermal Fatigue Crack, Non-Destructive Testing, Ultrasonic Testing, EDM

1. 서 론

원전의 가동 중 검사(in-service inspection)는 검사자의 접근가능성이 극히 제한적이고, 수명 예측 및 기기의 안전성 평가에 중요한 결과를 제공하기 때문에 균열 탐지 능력을 실증하고 높은 신뢰도를 가지는 초음파 검사 방법의 적용이 요구된다.

특히, 배관부 파손의 주요 원인으로 알려진 배관 내부의 열성층 현상에 의한 열피로균열인 경우 실제 구조재에 발생된 균열과 유사한 형상을 갖는 모의 시험편에 대해 기량 훈련을 통한 검사 기술의 인증이 필요하다. 하지만 아직까지 국내에는 실제 균열을 모사할 수 있는 모의시험편 제작기술을 보유하고 있지 않아 시험재의 대부분을 외국에서 고가의 돈을 들여 수입해야 하는 실정이다.[1-3]

이로인해, 국내에서는 실제균열이 발생되어 있는 시험편은 고가이기 때문에, 대부분 기량 검증을 위해 초음파 검사자들에게 제공되는 시험편은 방전가공된 것으로 그 폭이 최소 150 μ m 이상이다. 그러나 실제 원전에 발생하는 균열의 폭은 10 μ m 이하이고, 형상 또한 EDM노치와 다르기 때문에, 실제 원자력 발전소의 구조재 내에 발생된 균열의 크기 및 형상을 정확히 예측하기에는 상당한 어려움이 따르고 있다.[4-5]

이에 본 연구에서는 실제 원전에서 발생하는 열피로균열을 모사하고, 이를 이용하여 균열 크기 예측의 신뢰성을 향상시키기 위하여, 실제 원자력 발전소에서 발생하는 열피로균열을 제작하기 위한 연구와 제작된 균열 시험편을 이용하여, 기존 초음파 검사 방법보다 신뢰성을 향상시킬 수 있는 초음파 검사 방법에 대한 연구를 수행하였다.

* 한국항공대학교 기계공학과 석사과정
** 한국항공대학교 기계공학과 박사과정
*** 한국항공대학교 기계공학과 교수

2. 시험 및 결과

2.1 열피로균열 제작 장치 및 실험 방법

실험에는 외경(OD)이 89.1mm 이고, 두께(t)가 7.6mm인 STS 304 seamless 파이프를 시험편으로 사용하였으며, STS 304 배관재의 화학조성 및 기계적 물성치는 표 1, 2 와 같다. 실험장치는 10톤 용량의 기계식 압축 시험기, 20kW급의 고주파 유도가열기(HF induction heater), 하중·변위·온도 컨트롤러 및 실험 결과 기록계 등으로 구성되었다(그림 1).

표 1 Chemical composition of specimen

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Comp. (Wt %)	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	18.0~20.0	8.0~10.5

표 2 Mechanical properties of specimen

	Yield strength	Tensile strength	Elongation	Hv
STS304	410MPa	669MPa	66.5%	200

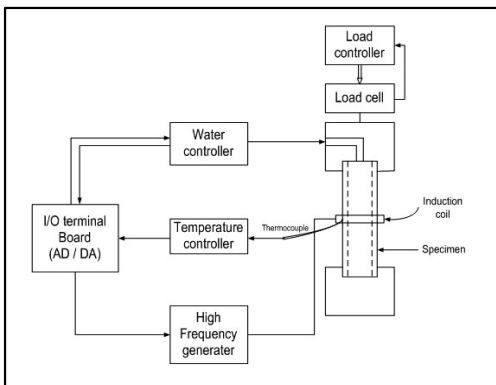


그림 1 Mechanism formation of thermal fatigue crack

초기 균열 발생 위치의 제어와 응력집중을 용이하게 하기 위해 배관의 정중앙 부위의 내면에 원주방향으로 깊이 0.3mm 화학적 노치를 제작한 후, 열피로균열은 급격한 온도변화를 가지는 열성층 효과가 발생 시 이에 따른 응력의 변화에 의해 발생하므로[6-9], 배관의 부에서 유도가열기를 이용하여 60초 동안 국부가열 후, 23°C의 냉각수를 24l/min의 유량으로 배관내부의 70% 높이까지 30초간 공급하여 냉각하였으며, 이를 반복하여 열성층 발생 환경을 모사하였다. 이 때 가열과 냉각 시 배관 내부 온도분포를 그림 2 에 나타내

었으며, 냉각수가 접촉하는 지점, 즉 냉각수 높이가 70%인 지점인 경우 $\Delta T=320^{\circ}\text{C}$ 로써 실제 열피로 균열이 발생하는 원자력 발전소의 가동 시 조건과 유사하게 하여 실험을 실시하였다.

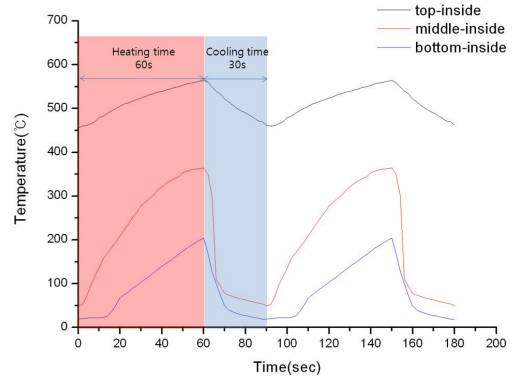


그림 2 Temperature variable depend on time

2.2 초음파 검사 방법 및 평가

2.2.1 기존 비파괴 검사 방법

그림 3 은 실제 원전에서 초음파 검사를 이용하여 구조재내에 균열이 발생하였을 때 균열의 위치와 크기를 예측하는 초음파 방법으로, 구조재내에 초음파를 입사시켜 균열의 tip(그림 3의 1번 위치)과 root(그림 3의 2번 위치)에서 반사되어 돌아오는 초음파를 위치를 식 1과 같이 계산하여 예측하는 방법이다.

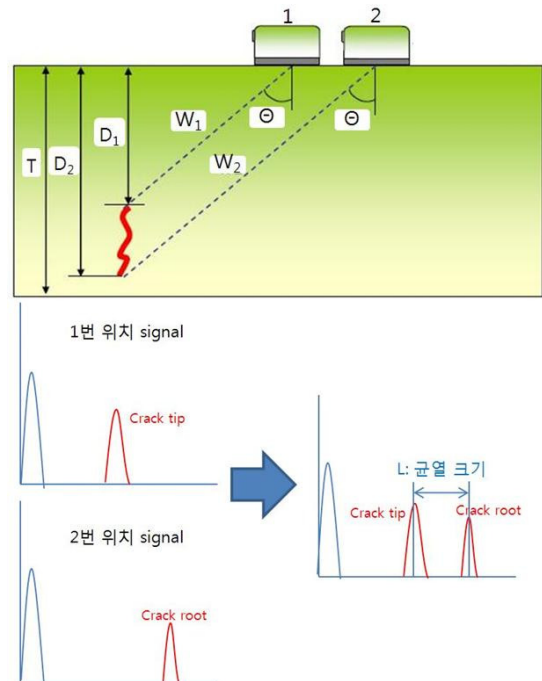


그림 3 Location and depth detection method of crack

$$D_1 = W_1 \cos \theta$$

$$D_2 = W_2 \cos \theta$$

$$L = D_2 - D_1 = W_2 \cos \theta - W_1 \cos \theta \text{ (식 1)}$$

그러나 이 방법을 통한 균열 크기 예측 결과에 대한 신뢰성이 상당히 낮으며, 그 예로, 국내 원자력 발전소의 안전성 규제 기관인 한국원자력안전기술원과 국외 규제기관들이 공동으로 20여개의 국내외 초음파검사 업체에 의뢰하여 균열 크기 예측에 대한 신뢰성 평가를 수행한 결과에서, 검사시간들이 대체로 100%로 신뢰도를 보였을 경우와 크게 상이하다는 것을 알 수 있다. 또한, 균열이 존재하지 않을 경우에도 균열이 있는 것으로 예측되었고, 초기균열 및 미세균열에 대한 예측에서도 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

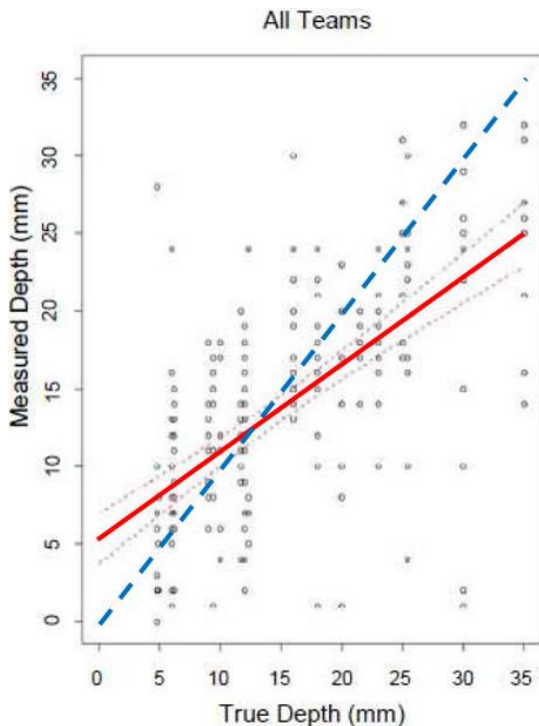


그림 4 Comparison with true and measured depth results of cracks
(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)

2.2.2 신뢰성 향상 방법 고안

이에 본 연구실에서는 초음파 검사를 이용한 국내의 균열평가 기술수준의 향상 및 신뢰성을 향상시키기 위해 기존 초음파 검사 방법인 균열의 root와 tip의 신호를 검출하여 그 크기를 예측하는 방법이 아닌, 그림 5와 같이 초음파가 직진성을 가지고 있으나 진행하면서 일정한 범위(θ)로 퍼지는 현상을 이용하여 초음파 빔을 균열 전체에 입사시켜 이에 반사되어 되돌

아오는 초음파 빔의 반사량 경향 분석을 통한 균열 예측의 신뢰성 평가를 수행하였다.

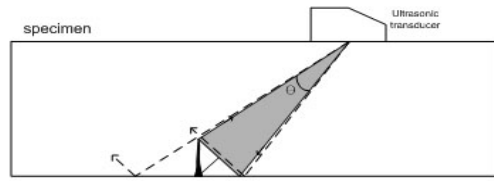


그림 5 Expecting method of crack's depth

3. 실험 결과

총 4벌의 열피로균열 배관의 균열 크기를 측정하기 위한 대비시험편으로 열피로균열 제작에 사용된 배관의 재질 및 두께(7.6mm)가 동일한 STS 304 평판 시험편에 깊이가 각각 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm의 EDM notch(폭 0.3mm)를 가공하였으며, 기존에 제작된 균열의 깊이가 각각 1.5mm, 2mm인 실제 열피로 균열 시험편을 대비시험편으로 사용하였다. 그림 6 및 그림 7는 대비시험편으로 사용된 EDM notch 및 실제 열피로균열에 대한 초음파 반사량을 보여주고 있으며, 노치 및 열피로균열에 대한 초음파 검사 후 신호의 경향성을 파악하여 실제 열피로균열이 제작된 배관에 대한 균열 크기 예측에 이용하였다.

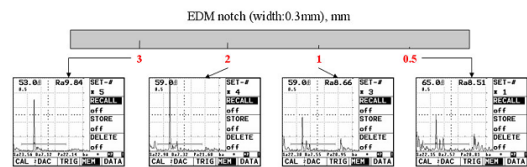


그림 6 A-scan result for EDM notch

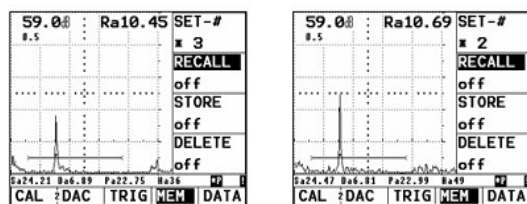


그림 7 A-scan result for thermal fatigue crack

표 3, 그림 8은 본 연구실에서 제작한 열피로균열 시험편을 EDM notch 대비시험편과 TFC 대비시험편을 이용하여 균열의 크기를 예측한 후, 균열 부위를 파단하여 실제 열피로균열의 크기를 실측하여 초음파 검사와 비교하였다. 표 3에서 확인할 수 있듯이 EDM notch를 대비 시험편으로 이용한 균열의 측정 결과(실제 균열 크기 대비 평균 : 38%)에 비하여 실제 열피로균열을 대비시험편으로 이용한 균열의 측정 결과(실제 균열 크기 대비

평균 : 83%)가 매우 신뢰성이 높아진 것을 확인할 수 있다. 이에, 미세균열의 크기 예측에 있어, 기존 균열의 root와 tip의 위치 정보를 근거로하여 균열의 크기를 예측하였던 초음파 방법 보다 반사량을 이용한 방법이 신뢰성이 높은 것으로 확인하였다.

표 2 인장시험 별 균열 발생 시간

시험편 NO.	균열 위치	실제 균열 크기	TFC 대비시험편		EDM 대비시험편	
	°	mm	mm	%	mm	%
1	90	3.61	3.36	93	1.5	40
	270	1.76	1.16	66	0.38	22
2	90	4.13	3.92	95	1.78	43
	270	2.66	3.08	115	1.38	52
3	90	3.74	3.04	81	1.34	36
	270	2.43	1.36	56	0.5	21
4	90	5.2	5.0	96	2.5	48
	270	5	4.5	90	2.1	42

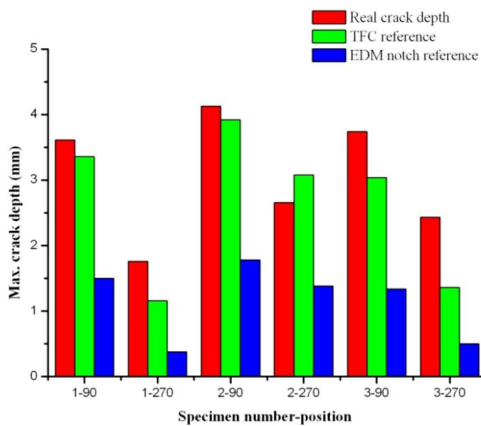


그림 8 Comparison of real crack depth

4. 결론

1) 원자력 발전소에서 발생하는 열피로균열을 제작하기 위해, 실제 균열 발생 환경을 모사하는 장치를 고안 및 제작 하였으며, 이 장치를 이용하여 실제 열피로균열 시험편을 제작하였다.

2) 총 4벌의 열피로균열 시험편을 이용하여 원자력 발전소에서 실제 균열의 크기를 예측하는 초음파 검사 방법이 아닌, 균열에 대한 초음파 빔의 반사량에 대한 경향을 분석한 후, 이를 토대로 균열의 크기를 예측한 결과 신뢰도가 평균 83%로 증가하였음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국가지정연구실 (No.M20604005402- 06B 040040210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고 문헌

IIKKA VIRKKUNEN, "Thermal Fatigue of Austenitic and Duplex Stainless Steels", p.16-19

Mika Kemppainen , Iikka Virkkunen , Jorma Pitkänen , Raimo Paussu, Hannu Hänninen: "Advanced flaw production method for in-service inspection qualification mock-ups", Nuclear Engineering and Design 224 (2003) 105-117

Sang-Chul Kim, Maan-Won Kim, "Crack Growth Analysis of Dissimilar Metal Weld using a Numerical Method", Journal of The Korean Welding & Joining Society, Vol 28, No 1, pp100-106 (2010)

J. O. Lee, W.. H. Yoon, T. H. Lee and J.K.Lee, "Pre-service acoustic emission testing for metal pressure vessel", Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing, Vol 3, No. 3, pp. 280-284

Y. Kim, J. S. Kim and B. Y. Lee, "Development the technique for fabrication of the thermal fatigue crack to enhance the reliability of structural component in NPPs", Journal of The Korean Welding & Joining Society, Vol. 26, No. 2, pp. 141-151, (2008)

J. O. Lee, W.. H. Yoon, T. H. Lee and J.K.Lee, "Evaluation of adhesive bonding quality by acoustic emission", Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing, Vol 16, No. 2, pp. 79-85

S. D. Kim, W. G. Jung, J. O. Lee and Y. J. Jung, "Characterization of acoustic emission signal for welding flaw and stress corrosion of SPPH steels", Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing, Vol 27, No. 2, pp. 97-104 (2007)

L. Virkkunen, M. Kemppainen and H. Hänninen, "Residual stresses induced by cyclic thermal loads", The Sixth International Conference on Residual Stresses, ICRS-6, pp. 529-536 Oxford, UK. (2000)

S. A. Hänninen, H. and Hakala, J., "Pipe failure caused by thermal loading in BWR water conditions", International Journal of Pressure Vessel & Piping, Vol. 9, pp. 445 (1981)