위상잠금 적외선 열화상 기법을 이용한 각도별 원전 감육 배관의 결함 검출

Application Angle of Defects Detection in the Pipe Using Lock-in Infrared Thermography

윤경원*, 고경욱*, 김진원**, 정현철***, 김경석***†

Kyung-Won Yun*, Gyeong-Uk Go*, Jin-Weon Kim**, Hyun-Chul Jung*** and Kyung-Suk Kim***†

초 록 위상잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여 원전 배관의 결함 검출 및 각도별 결함 검출 조건에 관한 연구를 수행하였다. 결함의 가공은 감육 길이, 원주방향 각도, 감육 깊이를 변화시켜 결함조건을 가공하였다. 사용된 장비는 적외선 열화상 카메라와 1 kW용량의 halogen lamp 2개를 사용하였으며, halogen lamp와 대상 배관과의 거리는 2 m로 고정시켜 실험을 수행하였다. 실험결과의 분석을 위하여 온도분포, 위상 데이터를 확보하고, 이를 분석하여 결함 길이를 측정하였다. 이 연구를 통해 각도별로 나타나는 감육 결함의 검출 형태를 파악함으로써 실제 발전소의 배관에 나타나는 다양한 각도의 결함의 분석이 가능하다. 적외선 열화상 데이터보다 위상잠금 적외선 열화상 데이터가 측정 결과의 신뢰도가 높았다.

주요용어: 위상잠금 적외선 열화상 기법, 원전배관, 배관 감육, 감육 평가

Abstract This perform research of angle rated defect detection conditions and nuclear power plant piping defect detection by lock-In infrared thermography technique. Defects were processed according to change for wall-thinning length, Circumference orientation angle and wall-thinning depth. In the used equipment IR camera and two halogen lamps, whose full power capacitany is 1 kW, halogen lamps and target pipe's distance fixed 2 m. To analysis of the experimental results ensure for the temperature distribution data, by this data measure for defect length. Reliability of lock-In infrared thermography data is higher than Infrared thermography data. This through research, Shape of angle rated defect is identified industry place. It help various angles defect detection in the nuclear power plant in operation.

Keywords: Lock-in Infrared Thermography, Nuclear Power Plant Piping, Pipe Defects, Pipe Assessment

1. 서 론

원자력 발전소 배관의 감육 및 파손을 방지하기 위해 가동 전 및 가동 중의 비파괴검사가 이루어지고 있다. 비파괴검사의 배관의 감육 및 파손확률이 미치는 영향을 평가하기 위해선 비파괴검사의 주기를 짧게 하거나 배관의 품질을 결정하는 것이 매우 중요한 요소 중 하나이다.

현재 원전의 발전설비 가동 횟수가 증가하여 빠르게 노후화됨에 따라 비교적 안전하면서 빠르고 쉽게 검사할 수 있는 비파괴검사의 방법이 증대되고 있다. 또한, 원자력 발전소 배관의 경우 장기간동안 사용함으로써 피로, 부식, 감육 결함 등과 같은 여러가지 종류의 열화손상을 받는 위험성이 있다. 그 중 유동가속부식(flow accelerated corrosion)에 의해 발생하는 배관의 두께 감소 현

[접수일: 2013. 6. 10, 수정일: 2013. 8. 20] 게재확정일: 2013. 8. 22] *조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, **조선대학교 원자력공학과, ***조선대학교 기계설계공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea (E-mail: gsckim@chosun.ac.kr)

상 측 감육 결함(wall-thinning defect)현상이 원전 배관의 건전성을 저하시키는 주요 원인 중 하나이다[1,2]. 감육 결함은 누설과 같은 사전 징후가 없이 손상이 진행되며, 용접부가 아닌 모재부에서도 흔히 발생되기 때문에 기존의 가동중검사를 통해 발견하기 어려운 특징이 있어 원전에서는 배관의 감육 결함 관리를 위한 별도의 프로그램을 운영하고 있으며, 이에 따라 감육 결함의 발생 가능성이 높은 부위를 선정하고 두께 검사를 시행하고 있다[3,4].

배관 두께검사에 초음파시험이 가장 보편적으로 적용되고 있으나, 초음파검사는 모든 격자점에서 두께를 측정하기 때문에 검사에 많은 시간이 소요된다. 또한, 소구경 배관의 경우에는 결함 검사인 방사선투과검사를 사용하고 있으나 결함에 대한 정량성이 떨어지며 검사 시 결함 검사자의 피폭 등의 문제로 인하여 현장에서 적용할 수 있는 한계가 있다[5,6].

여러 가지 감육 결함을 빠르고 간편하게 찾아낼 수 있는 비파괴검사 중 하나로 적외선 열화상 기법(IRT, infrared thermography)을 적용하기 위한 연구들이 이루어지고 있다[7,8].

본 연구에서는 위상잠금 적외선 열화상 기법(lock- in IRT)을 이용한 시험 조건을 적용하고 4 inch 배관의 결함검출을 위한 조건을 파악하고자 한다.

2. 장비 및 대상

2.1. 위상잠금 적외선 열화상 카메라

본 연구에서 사용되고 있는 적외선 열화상 카메라는 Fig. 1과 같으며 적외선 열화상 카메라의 사양은 Table 1과 같다. 위상잠금 적외선 열화상 기법은 기계 구조물에 있어 열에 대한 변화로 인해 온도변화가 미세하여 미세한 온도변화를 측정하기 위한 분해능을 높여 신호처리를 통하여 획득하고자 하는 위상, 진폭을 구하는 방법이다. 또한, 본 연구에서는 원전이 정기 점검을 위해 정지되어 있는 상태를 가정하여, 상온 상태의 배관을 외부에서 열적으로 자극하여 검사하는 경우를 고려하였다.

Table 1 Specification of Infrared camera

Infrared camera(FLIR, SC 5000)	
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	Stirling Cooler
Spectral Response(um)	3.7 ~ 5.0
Number of Pixels	320 × 256
Pitch(um)	30 × 30
NETD	25mK@25℃
Measure range(℃)	-15 ~ 1500
Frame rate(Hz)	5 ~ 400

Fig. 1 Infrared camera

Table 2 Specification of halogen lamp

Halogen lamp	
Lamp	230V, Max 1 kW
Max room temp.	25℃
Outside surface temp.	310℃

2.2. Halogen Lamp

4 inch 배관과 2개의 halogen lamp와의 거리, 4 inch 배관과 적외선 열화상 카메라와의 거리를 연구를 통하여 고려하여 조사하였으며, 정격 용량(1 kW)의 70%로 설정하여 실험을 수행하였다. 자세한 halogen lamp의 사양은 Table 2와 같다.

2.3. 4인치 감육배관 시험편

본 실험을 수행하기 위하여 원자력발전소에서 실제로 사용되고 있는 재료의 ASTM A106 Gr.B 탄소강 4 inch 배관을 사용하였으며, 내부에 결함

Fig. 2 Dimensions of defects in 4 inch pipe

Fig. 3 Infrared thermography system

을 다음과 같은 조건으로 가공하였다. 4 inch 배관은 두께(t) 7.5 mm, 전체길이(L)는 500 mm로 외경(D_o)이 113 mm이며, Fig. 2와 같이 결함의 길이를 배관 직경의 배관 1의 경우 $L/D_o = 0.5$ (56.5 mm)로 배관 2의 경우는 $L/D_o = 0.25$ (28.5 mm)로 변화시켰다. 또한 원주방향으로 결함의 가로중심선과 적외선 카메라가 수평이 되는 부분을 0°로 하여 Fig. 2(b)와 같이 변화시켰으며, 결함의 깊이를 배관 두께 대비 일정하게 변화시켰다.

3. 실험 방법

결함이 가공된 4 inch 배관을 halogen lamp 2개를 이용하여 가열하는데, 이때 빛의 반사를 막기 위해 방사페인트(KRYLON 4290 Ultra Flat Black)를 도포하여 완벽한 흑체가 아닌 대상물의 방사율을 임의로 최대 0.97을 유지시켰다.

Fig. 3과 같이 실험 시스템은 적외선 열화상 카메라, halogen lamp, function generator, 제어기로 구성하였다. 실험 시스템 주변의 온도는 25°C로 일정하게 유지하여 실험을 수행하였다.

1 kW 용량의 halogen lamp 2개를 이용하여 가열하였으며, 배관이 가열되는 동안 적외선 열화상 카메라(FILR사 SC 5200)를 이용하여 배관의 표면을 측정하여 위상과 진폭을 통하여 이미지 데이터를 획득하여 분석하였다. 본 실험의 목적에 따라 도출된 조건을 이용하는 것이므로 적외선 열화상 카메라와 halogen lamp의 거리를 2 m로 고정하여 실험을 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

여러 가지 변수에 따른 실험조건에서 결함이 이미지로 관찰되었으며, 위상에 관련된 실험 결과는 Fig. 4, 5와 같다. 그래프, 이미지로 모든 결함들을 확인할 수 있었다. 하지만 60°이상 각도변화에서는 정확한 결함을 확인할 수 없었다.

각각의 결함 조건에 따른 일반 온도 전체 이미지는 Fig. 6, 위상잠금 적외선 이미지 프로파일을 이용하여 Fig. 7과 같은 온도 분포를 획득하였다. 온도 분포에 대한 미분을 수행하여 결함별로 구분하여 Fig. 8, 9, 10과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 때 미분한 데이터의 변곡점 사이의 거리를 결함의 길이로 가정하였다.

Fig. 4 Infrared thermography image

Fig. 5 Lock-in Infrared thermography image

(a) Pipe 1

(b) Pipe 2

Fig. 6 Infrared thermography graph

(a) Pipe 1

(b) Pipe 2

Fig. 7 Lock-in infrared thermography graph

Fig. 6, 7의 전체 데이터에서 가장 근접하게 나온 데이터를 통하여 미분을 이용한 결과를 도출하였다.

이를 통하여 Fig. 8은 배관 1의 결함 길이 변화에 대한 온도분포 측정 결과 및 감속 깊이 변

화에 대한 결과, Fig. 9는 그에 따른 미분데이터, Fig. 10은 배관 1의 대한 원주방향 각도변화, Fig. 11은 그에 따른 미분데이터에 대한 결과이다. 이들 데이터는 측정 거리 2 m에서 측정 결과이다.

(a) Pipe 1 infrared image defect and depth

(b) Pipe 1 lock-in image defect and depth

Fig. 8 Pipe 1 defect and depth(ℓ/D), (d/t)

(a) Pipe 1 infrared image length graph(mm)

(b) Pipe 1 lock-in image length graph(mm)

Fig. 9 2.0 m defect and depth length

(a) Pipe 1 infrared image angle

(b) Pipe 1 lock-in image angle

Fig. 10 Pipe 1 angle(θ/π)

(a) Pipe 1 infrared image angle length graph(mm)

(b) Pipe 1 lock-in image angle length graph(mm)

Fig. 11 2.0 m angle

Table 3 Infrared ℓ/D , d/t defect length(mm)

ℓ/D , d/t	Pipe 1		Pipe 2	
	75%	50%	75%	50%
0°	51.5	54.3	26.3	29.3
15°	53.2	56.2	24.3	25.2
30°	49.4	56.1	28.2	29.1
45°	59.5	54.2	29.4	28.3
60°	51.3	65.0	25.3	28.5
75°	51.2	47.2	44.4	32.5
90°	41.2	41.3	40.1	28.3
Average(%)	92.3	93.1	108.3	99.2

Table 4 Lock-in ℓ/D , d/t defect length(mm)

θ/π	Pipe 1		Pipe 2	
	75%	50%	75%	50%
0°	54.3	59.2	28.3	28.5
15°	56.4	54.3	27.2	29.2
30°	56.3	59.3	27.3	26.5
45°	56.3	54.4	27.4	26.6
60°	57.2	59.3	26.4	29.6
75°	58.0	53.2	26.6	32.3
90°	60.3	59.3	26.7	29.5
Average(%)	100.2	100.2	93.4	99.4

Table 5 Infrared θ/π defect length(mm)

θ/π	Pipe 1		Pipe 2	
	75%	50%	75%	50%
0°	73.4	75.5	60.7	65.3
45°	45.5	51.7	31.5	41.5
Average(%)	91.4	99.6	68.6	82.4

Table 6 Lock-in θ/π defect length(mm)

θ/π	Pipe 1		Pipe 2	
	75%	50%	75%	50%
0°	73.0	73.3	75.6	78.7
45°	450.2	48.0	48.5	54.8
Average(%)	91.1	95.2	96.5	104.7

Table 3은 일반 적외선 열화상의 결함 길이 변화에 대한 온도분포 측정 결과 및 감육 깊이 변화에 대한 결과, Table 4는 위상잠금 적외선 열화상의 결과이다. 또한, Table 5는 일반 적외선 열화상의 원주방향 각도변화이며, Table 6은 위상잠금 적외선 열화상의 결과 값이다.

이 결과에서 보면 결함 길이 변화에 대한 측정 결과가 비교적 다른 결과에 비해 정확하며, 정확

도는 일반 적외선 열화상의 정확도 배관 1의 경우는 92.3%, 배관 2는 103.5%로 측정되었다. 위상잠금 적외선 열화상은 배관 1의 정확도는 100.2%, 배관 2의 경우는 96.5%로 측정되었다. 또한, 일반 적외선 열 영상보다 위상잠금 적외선 열 영상이 더 선명한 것으로 확인할 수 있었다. 일반 적외선 열화상의 배관 2의 75%로 결함 길이에 대한 측정 결과는 약 108.3%로 결함 길이 변화에 대한 측정결과보다는 다소 높게 측정되었다. 원주방향 각도변화에 따른 결함의 길이는 정확하게 변곡점을 얻을 수 없었다. 또한, 배관의 직경이 halogen lamp보다 작아서 배관의 중심부에 열이 집중되므로 원주방향 각도변화에 따른 결함 길이는 측정하는데 어려움이 있었다[9].

이러한 결과를 종합하면 결함 길이 변화와 감육 깊이 변화에 대한 측정 결과는 감육 깊이 25%(D/4)의 경우를 제외하고는 결함을 육안으로 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 결함 길이 변화, 감육 깊이에 대한 측정 결과 거리 2 m에서 일반 적외선 열화상은 배관 1 92.3%, 배관 2 103.5%이며, 위상잠금 적외선 열화상은 배관 1 100.2%, 배관 2 96.5%의 정확도로 위상잠금 적외선 열화상 결과 값이 더 정확하였다.
- 2) 결함 길이 변화 및 결함 깊이가 75%, 50%인 경우 각도가 60°를 넘어갈 시 본 실험 이미지 처리 조건에서는 결함을 측정할 수 없었다.
- 3) 하지만 온도데이터, 미분데이터를 통하여 위상잠금 적외선 열화상에서는 각도가 60° 이상이 되더라도 그래프에서 결함을 확인할 수 있었다.
- 4) 원주방향 각도변화의 경우는 온도 이미지에서는 결함을 확인할 수 있었지만, 곡률을 통한 데이터 정량화는 할 수 없었다.
- 5) 본 연구에서는 배관의 결함을 찾기 위한 연구로써 실제 배관은 온도가 높으므로 냉각실험을 통한 기초연구자료로써 사용될 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2012년도 지식경제부 재원으로 한국 에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과입니다.

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 방사선기술개발사업으로 수행된 연구임 (NRF-2012M2A2A9035705).

참고문헌

- [1] Y. M. Cheong, "Experimental evidence and analysis of a mode conversion of guided wave using magnetostrictive strip transducer," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 2, pp. 93-97 (2009)
- [2] M. Y. Choi, "The utilization of nondestructive testing and defects diagnosis using infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531 (2004)
- [3] Korea Hydro & Nuclear Power Co., "Management program for Thinned Pipe in NPP Secondary System," Final Report - 00NJ12 (2003)
- [4] S. H. Lee, T. R. Kim, S. C. Jeon and K. M. Hwang, "Thinned pipe management program of Korean NPPs," *Transaction of SMiRT-17*, Paper #004-2, Prague, Czech Republic, Aug. 17-23 (2003)
- [5] IAEA, "Development of protocols for corrosion and deposits evaluation in pipes by radiography," IAEA-TECDOC-1445 (2005)
- [6] T. Knook, M. Persoz, S. Trevin, S. Friol, M. Moutrille and L. Dejoux, "Pipe wall thinning management at Electricite de France (EDF)," *E-Journal of the Advanced Maintenance*, Vol. 2, pp. 1-13 (2010)
- [7] K. J. Lee, H. S. Jang, H. C. Jung and K. S. Kim, "Quantitative out-of-plane deformation measurement of pressure vessel with the defect using shearography," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 23, No. 10, pp. 36-42 (2006)
- [8] X. P. V. Maldague, "Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection," P. K. Rastogi, D. Ibaudi, Editors Elsevier Science, Switzerland (2000)
- [9] K. S. Kim, H. J. Jung, C. J. Park, D. S. Kim, D. W. Jung and H. S. Jang, "A study on measuring the temperature and revising the result when measuring the temperature of NPP pipes using infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 5, pp. 421-426 (2009)