

적외선열화상 카메라를 이용한 원전 소구경 감육배관의 결함 검출

Application Defects Detection in the Small-Bore Pipe Using Infrared Thermography Technique

윤경원*, 김동률*, 정현철**, 홍동표***, 김경석**†

Kyung-Won Yun*, Dong-Lyul Kim*, Hyun-Chul Jung**, Dong-Pyo Hong*** and Kyeong-Suk Kim**†

초 록 선행 연구에서 적외선열화상기법을 이용하여 원전 배관의 감육 결함을 측정하기 위하여, 4 inch 배관에 인공결함을 가공하여 이에 대한 결함 검출을 도출하였다. 본 논문에서는 선행연구에서 도출된 조건을 이용하여 원전 소구경 배관의 결함 검출 조건에 관한 연구를 수행하였다. 결함의 가공은 감육 길이, 원주방향 각도, 감육 깊이를 변화시켜서 결함 조건을 가공하였다. 사용된 장비는 IR camera와 1 kW용량의 halogen lamp 2개를 사용하였으며, halogen lamp와 대상 배관과의 거리를 1 m, 1.5 m, 2 m 순으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험 결과의 분석을 위하여 온도분포데이터를 확보하고, 이를 분석하여 결함 길이를 측정하였다. 4 inch 배관의 인공결함은 2 m에서 측정 결과의 신뢰도가 높았으나, 소구경 배관은 1.5 m에서 결함이 명확하게 검출되었다.

주요용어: 적외선열화상기법, 소구경 배관, 결함 검출, 감육배관

Abstract In the advanced research deducted infrared thermography (IRT) test using 4 inch pipe with artificial wall-thinning defect to measure on the wall-thinned nuclear pipe components. This study conducted for defect detection condition of nuclear small-bore pipe research using deducted condition in the advanced research. Defect process is processed by change for defect length, circumferential direction angle, 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 experiment performed to the distance of the changed 1 m, 1.5 m, 2 m. To analysis of the experimental results ensure for the temperature distribution data, by this data measure for defect length. artificial defect of 4 inch pipe is high reliabillity in the 2 m, but small-bore pipe is in the 1.5 m from the defect clearly was detected.

Keywords: Infrared Thermography, Small-Bore Pipe, Defect Detection, Wall-Thinned Pipe

1. 서 론

현재 원전의 발전설비 가동 횟수가 증가하여 빠르게 노후화됨에 따라 비교적 안전하면서 빠르고 쉽게 검사할 수 있는 비파괴검사의 방법이 중대되고 있다. 또한, 원자력발전소 배관의 경우 장기간동안 사용함으로써 피로, 부식, 감육결함 등과 같은 여러가지 종류의 열화손상을 받는 위험성이 있다. 그 중 유동가속부식 (flow accelerated

corrosion)에 의해 발생하는 배관의 두께 감소 현상 즉 감육결함 (wall-thinning defect)현상이 원전 배관의 건전성을 저하시키는 주요 원인 중 하나이다[1,2]. 감육결함은 누설과 같은 사전 징후가 없이 손상이 진행되며, 용접부가 아닌 모재부에서도 흔히 발생되기 때문에 기존의 가동중검사를 통해 발견하기 어려운 특징이 있어 원전에서는 배관의 감육결함 관리를 위한 별도의 프로그램을 운영하고 있으며, 이에 따라 감육결함의 발생 가

[접수일: 2012. 9. 18, 수정일: 2012. 11. 6, 게재확정일: 2012. 11. 8] *조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, **조선대학교 기계설계공학과, ***전북대학교 기계시스템공학부, †Corresponding Author: Department of Mechanical Design Eng., Chosun Univ., 375 Seosuk dong, Dong-Gu, Gwangju 501-759, Korea (E-mail: gskckim@chosun.ac.kr)
© 2013, Korean Society for Nondestructive Testing

능성이 높은 부위를 선정하고 두께검사를 시행하고 있다[3,4].

현재 배관 두께검사에는 초음파시험이 가장 보편적으로 적용되고 있으나, 초음파 두께측정은 검사 부위에 격자를 그리고 모든 격자점에서 두께를 측정하기 때문에 검사에 많은 시간이 소요된다. 소구경 배관의 경우에는 결함 검사인 방사선투과 검사를 사용하고 있으나 결함에 대한 정량성이 떨어지며 검사 시 결함 검사자의 피폭 등의 문제로 인하여 현장에서 적용할 수 있는 한계가 있다[5,6].

이러한 감육결함을 빠르고 간편하게 찾아낼 수 있는 비파괴검사 방법 중 하나로 적외선열화상 기법 (IRT, infrared thermography)을 적용하기 위한 연구들이 이루어지고 있다[7,8].

1960년대에는 단순 온도 측정으로만 활용되던 적외선열화상기법은 열화진단, 비파괴검사, 공정감시, 화재감시, 공학검역, 두께측정, 응력해석, 의료진단, 결함검사 등으로 점차 확대되고 있다.

본 연구에서는 선행 연구에서 적외선열화상기법을 이용한 시험 조건을 적용하고 원전 소구경 배관의 결함 검출을 위한 조건을 파악하고자 한다.

2. 장비 및 대상

2.1. 적외선열화상 카메라(IR Camera)

본 실험에서 사용되고 있는 IR camera는 Fig. 1과 같으며 IR camera의 사양은 Table 1과 같다. 적외선열화상기법을 적용한 결함 검출 방법에는 검사 대상체가 발열하여 시험체로부터 자체 방출되는 적외선을 측정하는 방법과 검사 대상체를 외부에서 열적으로 자극하여 방출되는 적외선을 측정하는 방법이 있다. 여기서는 원전이 정기점검을 위해 정지되어 있는 상태를 가정하여, 상온 상태의 배관을 외부에서 열적으로 자극하여 검사하는 경우를 고려하였다.

2.2. Halogen Lamp

소구경 배관과 halogen lamp와의 거리, 소구경 배관과 IR camera와의 거리를 고려하여 조사하였으며, 정격 량 (1 kW)의 70%로 설정하여 실험을 수행하였다. 자세한 halogen lamp의 사양은 다음 Table 2와 같다.



Fig. 1 Infrared camera

Table 1 Specification of infrared camera

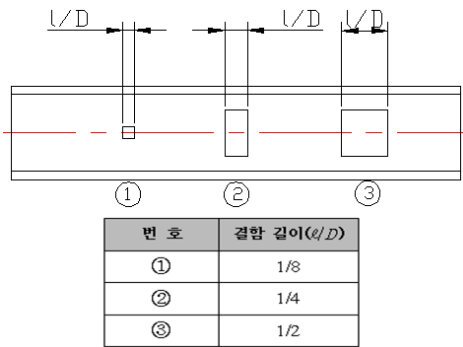
Infrared camera (FLIR, Sliver 480M)	
Detector Materials	InSb (indium antimonide)
Cooling method	Stirling Cooler
Spectral Response (um)	3.7 ~ 5.0
Number of Pixels	320 × 256
Pitch (um)	30 × 30
NETD	25mK@25 °C
Measure range (°C)	-15 ~ 2000
Frame rate (Hz)	5 ~ 380

Table 2 Specification of halogen lamp

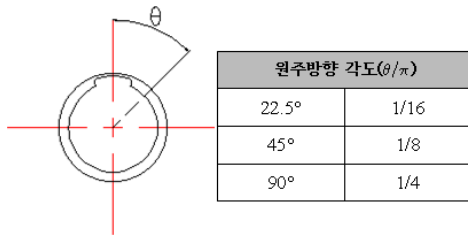
Halogen lamp	
Lamp	230V, Max 1kW
Max room temp.	25 °C
Outside surface temp.	310 °C

2.3. 감육배관

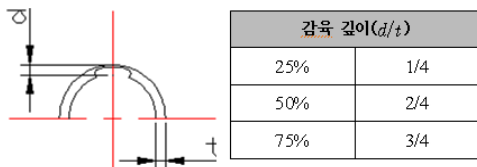
본 실험을 수행하기 위하여 원자력발전소에서 사용되고 있는 ASTM A106 Gr.B 탄소강 2.5 inch의 배관을 사용하였으며, 내부에 결함을 다음과 같은 조건으로 가공하였다. 소구경 배관은 두께 (t) 6.5 mm, 전체길이 (L)는 700 mm로 외경 (D_o)이 72.5 mm이며, Fig. 2와 같이 결함의 길이를 배관 직경의 1/8, 1/4, 1/2로 변화시켰다. 또한 원주방향으로 결함의 각도를 Fig. 2(b)와 같이 변화시켰으며, 결함의 깊이를 배관 두께 대비 일정하게 변화시켰다.



(a) Pipe according to defect length



(b) Pipe according to circumferential direction



(c) Pipe according to wall-thinning depth

Fig. 2 Dimensions of defects in small-bore pipe

3. 실험 방법

결함이 가공된 소구경 배관을 halogen lamp를 이용하여 가열하는데, 이때 빛의 반사를 막기 위해 방사페인트(KRYLON 4290 Ultra Flat Black)를 도포하여 대상물의 방사율을 0.97로 유지시켰다.

Fig. 3와 같이 실험시스템은 IR camera, halogen lamp, function generator, power supply로 구성하였다. 실험 시스템 주변의 온도는 25 °C로 일정하게 유지하여 실험을 수행하였다.

1 kW 용량의 halogen lamp 2개를 이용하여 가열하였으며, 소구경 배관이 가열되는 동안 IR camera(FILR 사 Silver 480M)를 이용하여 소구경 배관의 표면을 측정하였다. 본 실험의 목적에 따라 선행 연구에서 도출된 조건을 이용하는 것이므로 IR camera와 halogen lamp의 거리를 1 m, 1.5 m, 2 m로 고정하여 실험을 수행하였다.



Fig. 3 Infrared thermography system

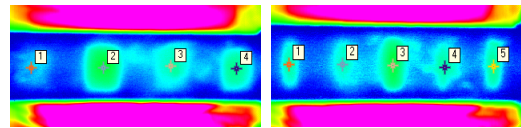


Fig. 4 Peak temperature at defect in pipe specimens

4. 선행 연구 결과

선행 연구에서 적외선열화상기법을 적용하여 4 inch 배관의 감육결함 검출 조건을 파악하기 위해 결함이 인공으로 가공된 배관을 제작하여 적외선열화상기법을 통해 실험을 수행하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다 [9].

- 1 kW 용량의 halogen lamp 2개를 이용하여 4 inch 배관을 가열할 때 배관과 halogen lamp 및 IR camera의 거리를 1 m, 2 m로 유지하고 halogen lamp의 조사율을 60% 이상 유지하면, 적외선열화상기법은 적어도 1회 촬영을 통해 500 mm 길이의 4 inch 배관 내에 존재하는 원주방향 폭(2θ)이 90°이고 깊이와 길이가 각각 $d/t=0.5$ 와 $L/D_0=0.25$ 인 모든 감육 결함을 검출하였다.
- 4 inch 배관에서 감육결함은 배관과 halogen lamp 및 IR camera의 거리가 2 m보다 1 m일 때 명확히 검출되었다.
- 4 inch 배관에서 적외선열화상기법을 통해 검출된 결함의 크기를 정확히 파악하기 위해서는 배관을 균일하게 가열할 수 있는 가열 장치의 개발이 필요한 것을 확인하였다.

5. 실험결과 및 고찰

여러 가지 변수에 따른 실험 조건에서 결함이

이미지로 관찰되었으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 하지만 결함 깊이가 25% ($D/4$)인 깊이는 결함 길이 변화와 결함의 원주방향 각도 변화와 무관하게 결함이 측정되지 않았다.

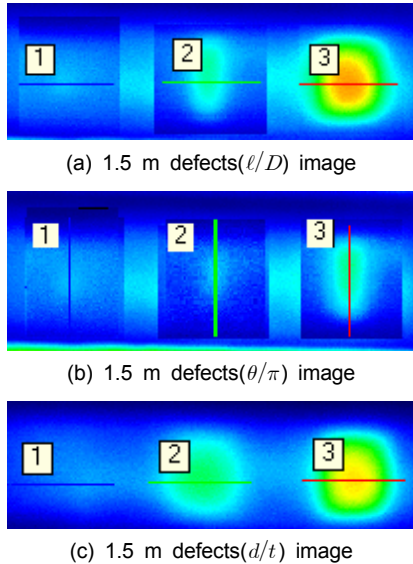
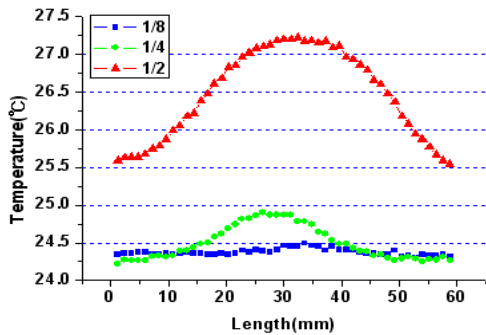
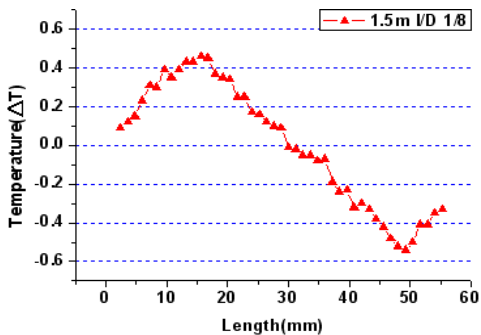


Fig. 5 Infrared thermography image



(a) Defects(ℓ/D) graph($^{\circ}\text{C}$)



(b) Defects(ℓ/D) defect length graph(mm)

Fig. 6 1.5 m temperature at defects(ℓ/D)

각각의 결함 조건에 따른 온도 이미지 프로파일을 이용하여 Fig. 6(a)과 같은 온도 분포를 획득하였다. 온도 분포에 대한 미분을 수행하여 Fig. 6(b)과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 때 미분한 데이터의 변곡점 사이의 거리를 결함의 길이로 가정하였다.

Fig. 6은 결함 길이 변화에 대한 온도분포 측정 결과이며, Fig. 7은 원주방향 각도 변화, Fig. 8은 감속 깊이 변화에 대한 결과이다. 이들 데이터는 거리 1.5 m에서 측정 결과이고, 원주방향 각도 변화에 대한 데이터는 1 m에서 측정한 결과이다.

Table 3은 결함 길이 변화에 대한 측정거리별 결함 측정 결과이고, Table 4는 측정 결과의 정확도이다. Table 5와 Table 6은 감속 깊이에 대한 측정 결과이다.

Table 3 Defects(ℓ/D) defect length(mm)

ℓ/D	1 m	1.5 m	2 m
1/8 (9 mm)	7	8	8
1/4 (18 mm)	16	15	12
1/2 (36.25 mm)	26	29	24

Table 4 Defects(ℓ/D) defect length(%)

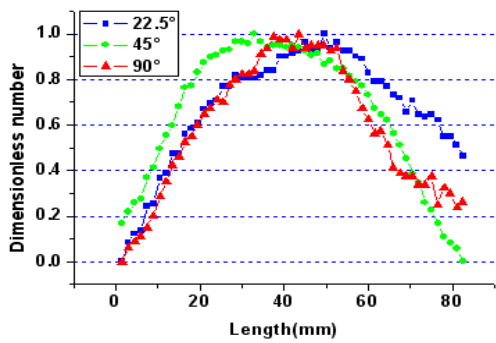
ℓ/D	1 m	1.5 m	2 m
1/8 (9 mm)	77.78	88.89	88.89
1/4 (18 mm)	88.89	83.33	66.67
1/2 (36.25 mm)	71.72	80.00	66.21
Average(%)	79.46	84.07	73.92

Table 5 Defects(d/t) wall-thinning depth(mm)

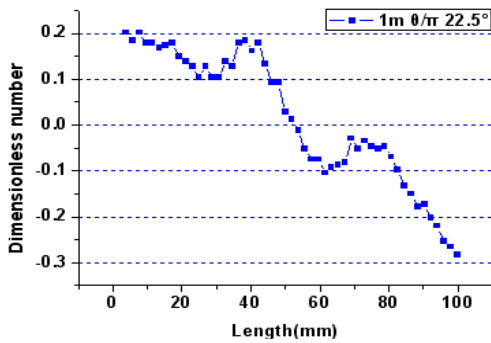
d/t	1 m	1.5 m	2 m
25% (36.25 mm)	×	×	×
50% (36.25 mm)	25	28	23
75% (36.25 mm)	27	29	24

Table 6 Defects(d/t) wall-thinning depth(mm)

d/t	1 m	1.5 m	2 m
25% (36.25 mm)	×	×	×
50% (36.25 mm)	68.97	77.24	63.45
75% (36.25 mm)	74.48	80.00	66.21
Average(%)	71.72	78.62	64.83

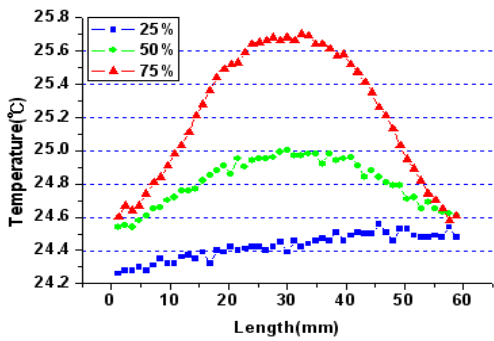


(a) Defects(θ/π) graph($^{\circ}$)

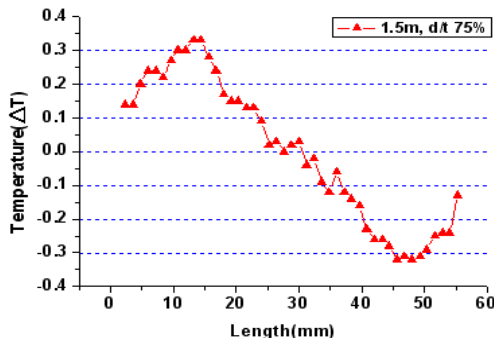


(b) Defects(θ/π) circumferential direction graph(mm)

Fig. 7 1 m temperature at defects(θ/π)



(a) Defects(d/t) graph($^{\circ}$)



(b) Defects(d/t) wall-thinning depth(mm)

Fig. 8 1.5 m temperature at defects(d/t)

이 결과에서 보면 결함 길이 변화에 대한 측정 결과가 비교적 다른 결과에 비해 정확하며, 정확도는 약 84.07%로 측정되었다. 감육 깊이에 대한 측정 결과는 약 78.62%로 결함 길이 변화에 대한 측정 결과보다는 다소 낮게 측정되었다.

원주방향 각도 변화에 따른 결함의 길이는 Fig. 7(b)의 경우를 제외하고는 변곡점을 얻을 수 없었다. Fig. 5의 온도 이미지를 관찰한 결과도 온도 분포 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 소구경 배관이 4 inch 배관보다 상대적으로 직경이 작아서 배관의 중심부에 열이 집중되므로 원주방향 각도 변화에 따른 결함 길이는 측정하는데 어려움이 있었다[10].

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. 또한, 4 inch 배관에 대한 선행 연구 결과와는 다르게 거리 1.5 m에서 보다 선명한 결과를 얻을 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 결함 길이 변화에 대한 측정 결과 거리 1.5 m에서 약 84.07%의 정확도로 다른 거리에서의 측정 결과보다 정확하였다.
- (2) 감육 깊이 변화에 대한 측정 결과 정확도도 거리 1.5 m에서 가장 높게 측정되었으며, 약 78.62%로 측정되었다.
- (3) 결함 깊이가 25% (D/4)인 경우는 본 실험 조건에서는 결함을 측정할 수 없었다.
- (4) 원주방향 각도 변화의 경우는 온도 이미지에서는 결함을 확인할 수 있었지만, 정량화할 수 없었다.

후 기

본 논문은 2011년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

[1] Y. M. Jung, "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., "Standard Technical system development of thinned pipe management 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 #O04-2, 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] J. W. Kim, K. W. Yun, H. C. Jung and K. S. Kim, "Determination of an test condition for IR thermography to inspect a wall-thinning defect in nuclear piping components," *Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing*, Vol. 32, No. 1, pp. 12-19 (2012)
- [10] 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)