

적외선열화상 시험에서 위상잠금모드 적용에 따른 배관 감육결함 검출능력 개선 평가[§]

김진원*† · 윤경원**

* 조선대학교 원자력공학과, ** 조선대학교 기계설계공학과

Evaluation of Improvement of Detection Capability of Infrared Thermography Tests for Wall-Thinning Defects in Piping Components by Applying Lock-in Mode

Jin Weon Kim*† and Kyung Won Yun**

* Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ.,

** Dept. of Mechanical Design Engineering, Chosun Univ.

(Received March 7, 2013 ; Revised May 7, 2013 ; Accepted June 10, 2013)

Key Words: Infrared Thermography(적외선열화상), Wall-Thinning Defects(감육결함), Detection Capability(검출능력), Lock-in Mode(위상잠금모드), Piping Components(배관기기)

초록: 위상잠금모드가 적용된 적외선열화상 시험법은 열전도도가 큰 재료에서 결함의 검출능력을 향상시키기 위해 개발되었으며, 기존의 적외선열화상 기법에 비해 우수한 결함 검출능력을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 원전 배관 감육결함 검출에서 위상잠금모드 기법의 적용 효과를 살펴보기 위해서, 감육결함이 가공된 배관 시편을 대상으로 위상잠금모드를 적용하여 적외선열화상 시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 감육결함에 대한 위상이미지를 얻고, 이것을 기존의 적외선열화상 시험법으로 구한 열화상이미지와 비교하였다. 비교 결과, 위상잠금모드의 적용이 감육결함에 대한 형상 결정 능력을 향상시키는 것을 확인하였다. 이러한 개선 효과는 폭과 길이가 작거나 경계가 경사진 감육결함에서 뚜렷하였다. 그러나, 깊이가 얇은 감육결함의 검출능력은 크게 향상되지 않았다.

Abstract: The lock-in mode infrared thermography (IRT) technique has been developed to improve the detection capability of defects in materials with high thermal conductivity, and it has been shown to provide better detection capability than conventional active IRT. Therefore, to investigate the application of this technique to nuclear piping components, lock-in mode IRT tests were conducted on pipe specimens containing simulated wall-thinning defects. Phase images of the wall-thinning defects were obtained from the tests, and they were compared with thermal images obtained from conventional active IRT tests. It showed that the ability to size the detected wall-thinning defects in piping components was improved by using lock-in mode IRT. The improvement was especially apparent when detecting short and narrow defects and defects with slanted edges. However, the detection capability for shallow wall-thinning defects did not improve much when using lock-in mode IRT.

1. 서론

유동가속부식 (Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 감육결함의 발생은 원자력발전소 (이하 원전)

탄소강 배관계통의 주요 손상기구로 알려져 있다.^(1,2) 따라서, 탄소강 배관에서 감육결함은 원전의 안전성과 경제성 측면에서 중요한 관리 대상으로 고려되고 있다.⁽³⁾ 원전 배관계통에서 감육결함 관리의 핵심은 신뢰성 있는 두께 검사를 통한 결함의 검출이며,^(1,4,5) 이를 위해 초음파 두께 측정 방법이 널리 사용되고 있다.^(4,5) 초음파 방법은 정확한 두께 측정 결과를 제공하는 것으로 알려져 있으나, 직경

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, jwkim@chosun.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Chemical compositions of the pipe specimens used in the experiment (%)

Spec.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Ti
2.5-inch	0.19	0.56	0.08	0.03	0.25	0.03	0.07	0.01	0.04	<0.01	0.01
4-inch	0.18	0.53	0.016	0.007	0.18	0.13	0.18	0.02	0.09	0.0	0.001

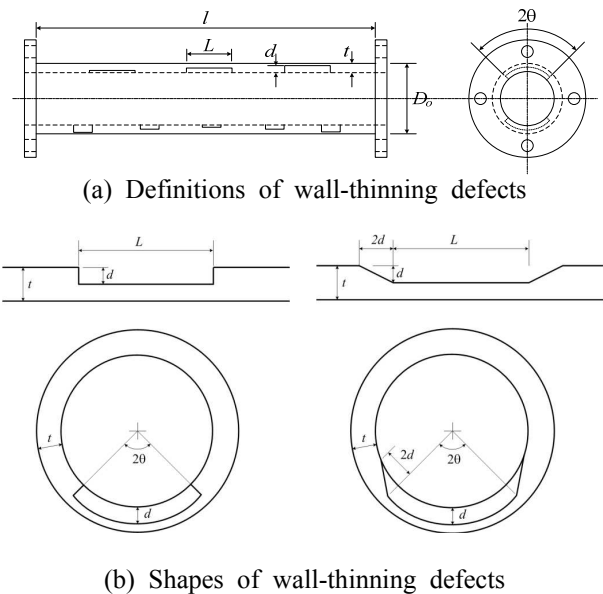


Fig. 1 Pipe specimens and geometries of wall-thinning defects

이 작은 배관에 대해서는 측정 시간과 측정 신뢰도 측면에서 한계를 보인다. 따라서, 최근에는 이를 대체하기 위한 방법들이 제시되고 있는데,⁽⁶⁻¹⁰⁾ 이들 방법 중 하나가 적외선열화상(Infrared Thermography, IRT) 방법이다. IRT 검사 방법은 비접촉이며 검사 속도가 빠르고 인체에 무해하며 취급이 용이하므로, 직경이 작은 배관계통의 감육결함 검출에 적용이 가능할 것으로 판단된다.⁽¹¹⁻¹³⁾

일반적으로 결함 검출에 적용되고 있는 IRT 기법은 크게 능동형 기법과 피동형 기법으로 구분되는데, 검사 대상체가 발열하지 않는 경우에는 능동형 IRT 기법이 적용된다. 이 방법은 검사 대상체의 외부에 열적 자극을 가함으로써 결함부에서 불균일한 열적 특성을 보이게 하고, 이것을 적외선(IR) 카메라를 이용하여 열화상이미지 (Thermal Image) 형태로 측정하는 방법이다. 능동형 IRT 기법은 적용이 용이하므로 다양한 분야에서 결함 검출에 활용되고 있다.^(11,14) 최근에는 배관이나 튜브에서 감육결함이나 부식결함의 검출에 능동형 IRT 기법을 적용하기 위해 다양한 시도들이 이루어지고 있다.^(11,12,15,16) 본

논문의 선행연구에서도 다양한 시험을 수행하여 원전 배관에 존재하는 감육결함의 검출에 능동형 IRT 기법의 활용 가능성을 확인한 바 있다.⁽¹⁷⁾ 최근에는 열전도도가 높은 재료 내에 존재하는 결함에 대한 검출능력을 개선하기 위해 위상잠금모드(Lock-in mode)라고 불리는 첨단 능동형 IRT 기법이 개발되었다. 위상잠금모드를 적용할 경우에 기존의 IRT 방법에 비해 결함의 검출능력이 향상되고 검사 결과가 검사 대상체의 표면 상태와 외부 환경에 덜 민감한 것으로 보고되고 있다.^(14,18,19)

따라서, 본 논문에서는 위상잠금모드 기법의 적용이 배관 감육결함 검출능력을 어느 정도 개선시킬 수 있는지 확인하기 위하여, 다양한 감육결함이 존재하는 배관 시편을 대상으로 위상잠금모드 기법을 적용한 IRT 시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 감육결함에 대한 위상이미지 (Phase Image)를 얻고, 이것을 기존의 IRT 기법으로 측정된 열화상이미지⁽¹⁷⁾와 비교하였다. 비교 결과를 바탕으로 위상잠금모드 IRT 기법의 적용이 원전 배관 감육결함 검출에 어떤 영향을 미치는지 살펴보았다.

2. 시편 및 시험절차

2.1 배관 시편

시험에는 내부에 다양한 형상의 감육결함이 존재하는 6개의 배관시편 (S2-1~S2-5, S3-3)이 사용되었다. 이들 시편은 2.5 - inch와 4.0 - inch, Sch. 80인 배관으로 제작되었으며, 이들 배관은 모두 원전 2차측 배관계통에 주로 사용되는 ASTM A106 Gr. B 탄소강이다. Table 1은 이들 배관의 화학조성을 정리한 것이다. S2-1 ~ S2-4 시편의 길이 (l)와 직경 (D_0)은 각각 500 mm와 113 mm이며, S2-5 시편의 길이와 직경은 각각 1,200 mm와 113.0 mm이다. 또한, 2.5 - inch 시편인 S3-3의 길이와 직경은 각각 700 mm와 72.5 mm이다. Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 모든 시편은 배관 내부에 다양한 크기의 감육결함이 가공되어 있으며, 결함의 길이와 원주방향 폭, 그리고 깊이는 각각 $L/D_0 =$

Table 2 Dimensions of the specimens and wall-thinning defects

Spec. I.D.	Dimensions of specimen			Dimensions of wall thinning defect				
	Length, [mm]	Diameter, D_o [mm]	Thickness, [mm]	Location	Thinning length, L/D_o	Max. thinning depth, d/t	Circ. thinning angle, θ/π	No. of defects
S2-1	500	113.0	7.5	side A	0.5	0.75	0.0625,0.125,0.25	3
				side B	0.5	0.5	0.0625,0.125,0.25	3
S2-2	500	113.0	7.5	side A	0.25 0.5	0.75 0.25	0.0625,0.125,0.25 0.125	4
				side B	0.25 0.5	0.5 0.25	0.0625,0.125,0.25 0.0625	4
S2-3	500	113.0	7.5	side A	0.125 1.0	0.75 0.75	0.0625,0.125,0.25 0.0625	4
				side B	0.125 1.0	0.5 0.5	0.0625,0.125,0.25 0.0625	4
S2-4	500	113.0	7.5	side A	0.5 1.0	0.25 0.25	0.0625,0.125 0.25	3
				side B	1.0	0.25	0.0625,0.125	2
S2-5	1,200	113.0	7.5	side A	0.5 0.5 0.125,0.25,0.5	0.25,0.5,0.75 0.75 0.75	0.25 0.0625,0.125,0.25 0.125	9 (slant edge)
				side B	0.25 0.5 0.125,0.25,0.5	0.25,0.5,0.75 0.5 0.5	0.25 0.0625,0.125,0.25 0.125	9 (slant edge)
S3-3	700	72.5	6.5	side A	0.125 0.25 0.5	0.25,0.5,0.75 0.25,0.5,0.75 0.25,0.5,0.75	0.125 0.125 0.125	9
				side B	0.125 0.25 0.5	0.25,0.5,0.75 0.25,0.5,0.75 0.25,0.5,0.75	0.0625 0.25 0.25	9

0.125 ~ 1.0, $\theta/\pi = 0.0625 \sim 0.25$, $d/t = 0.25 \sim 0.75$ 의 범위를 갖는다. Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 S2-1 ~ S2-4 시편과 S3-3 시편에는 원주방향과 축방향 향상이 사각형인 결함이 고려되었으며, S2-5 시편에는 원주방향과 축방향 형상이 경사진 결함이 고려되었다. 즉, 결함 저면의 깊이는 일정하지만, 결함과 건전부의 경계가 경사지도록 가공되었다. Table 2는 시험에 사용된 시편의 형상과 각 시편에 포함된 결함의 형상을 정리한 것이다.

2.2 시험 절차

모든 IRT 시험에는 위상잠금모드가 적용되었다. 기존의 능동형 IRT 기법에서는 검사 대상체를 연속적으로 가열하면서 IR 카메라로 열화상을 측정함으로써 결함에 대한 이미지를 얻는다. 이에 반해, 위상잠금모드를 적용하는 경우에는 검사 대상체를 조화함수 형태로 주기적으로 가열하면서 일정한 간격으로 열화상 이미지를 취득하고,

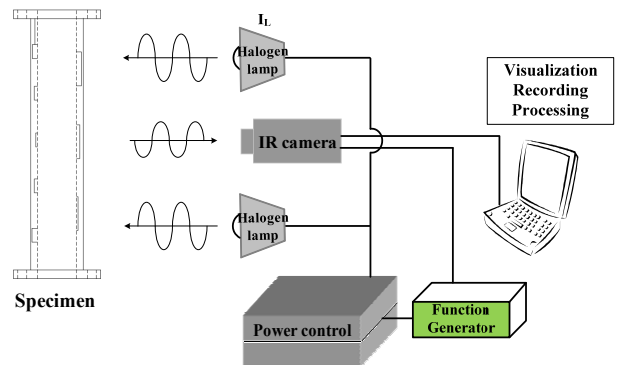


Fig. 2 Configuration of the lock-in mode IRT tests on wall-thinned pipe specimens

취득된 일련의 열화상 이미지를 다시 조합하여 결함에 대한 위상 이미지를 얻는다.^(14,19) 따라서, 시험 장치는 IR 카메라 (Silver 480), 가열장치, 이미지 취득 장치, 그리고 함수발생기로 구성된다. 앞서 언급한 바와 같이 IRT 시험에 위상잠금모드 기법을 적용하기 위해서는, 일정한 주기로 시편을 가열하여야 하며 각 주기마다 일정한 간격으로

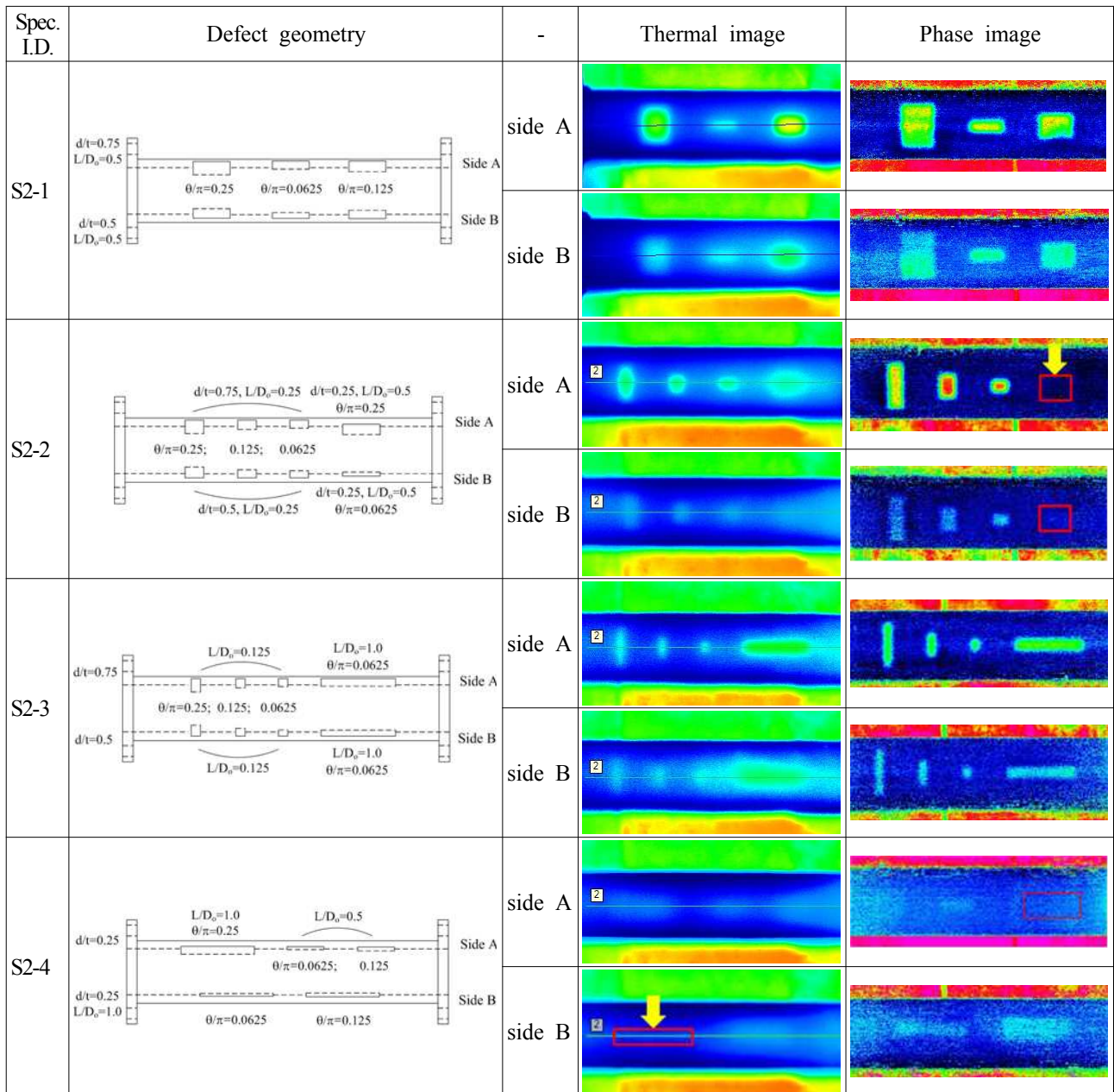


Fig. 3 Comparison of wall-thinning defect images obtained by conventional and lock-in mode IRT tests for specimens S2-1 to S2-4

로 열화상이미지를 취득하여야 한다. 이를 위해서 함수발생기를 사용하여 가열장치 제어기와 IR 카메라를 동기화하였다. 가열장치로는 1 kW 용량의 할로겐 램프 2개와 제어기가 사용되었다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 시험장치의 구성도를 개략적으로 나타낸 것이다.

시편 표면에서 방사율을 균일하게 유지하기 위해서, 시험에 앞서 모든 시편의 표면은 무광택의 검은색 페인트로 도포되었다. 시편에서 감속결함

을 검출하기 위해서 일정한 거리에서 일정한 세기로 시편을 주기적으로 가열하였다. 시험에 적용된 가열 주기는 0.1 Hz이며, 배관 시편의 직경에 따라 2.5 - inch 시편은 1.5 m, 4.0 - inch 시편은 2.0 m의 가열거리 (시편과 램프의 거리, L_0)를 유지하였다. 시험에서 램프의 최대 세기는 정격 용량의 70 %로 설정되었다. IR 카메라와 가열 램프는 시편의 정면에 설치되었으며, IR 카메라와 시편 사이의 거리는 가열거리와 일치하도록 설치하


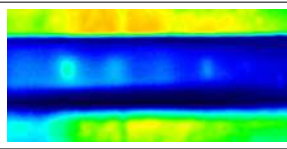
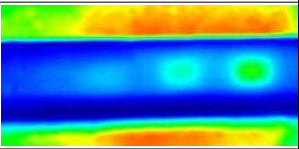
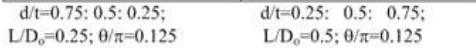
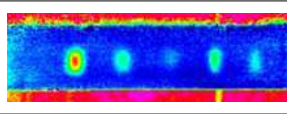
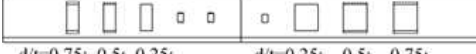
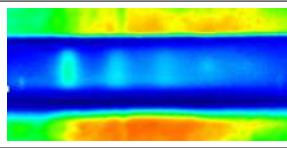
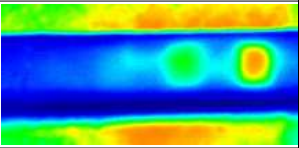
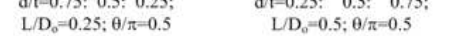
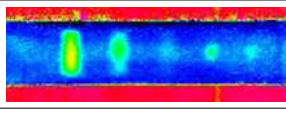
Spec. I.D.	Defect geometry	-	Left	Right
S3-3 side A	$L/D_0=0.125; \theta/\pi=0.125$ $d/t=0.75; 0.5; 0.25$ 	Thermal image		
	$d/t=0.75; 0.5; 0.25;$ $L/D_0=0.25; \theta/\pi=0.125$ 		Phase image	
S3-3 side B	$L/D_0=0.125; \theta/\pi=0.0625$ $d/t=0.75; 0.5; 0.25$ 	Thermal image		
	$d/t=0.75; 0.5; 0.25;$ $L/D_0=0.25; \theta/\pi=0.5$ 		Phase image	

Fig. 4 Comparison of wall-thinning defect images obtained by conventional and lock-in mode IRT tests for specimens S3-3

였다. 각 시편에 대해 60 초 동안 열화상이미지를 취득하였으며, 이것들을 조합하여 위상이미지를 얻었다.

3. 시험결과 및 토의

3.1 사각 결함

Fig. 3은 S2-1 ~ S2-4 시편에 대한 IRT 시험에 위상잠금모드 기법을 적용하여 취득한 위상이미지를 기존의 IRT 기법으로 측정된 열화상이미지와 비교하여 나타낸 것이다. S2-1 ~ S2-4 시편은 원주방향과 길이방향 형상이 사각형인 감육결함(사각결함)이 가공된 4.0 - inch 시편이다. Fig. 3에서 알 수 있는 것과 같이 기존의 IRT 기법으로 측정된 열화상이미지에서 검출된 대부분의 감육결함은 위상이미지에서도 여전히 검출되었다. 깊이가 $d/t = 0.5$ 와 0.75 인 감육결함의 경우, 결함의 길이와 폭에 관계없이 열화상이미지에 비해 위상이미지에서 결함이 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 즉, 열화상이미지와 비교하여 위상이미지에서 결함부와 건전부 사이의 경계가 명확하였고, 검출된 감육결함의 형상이 실제 결함의 형상과 거의 일치하였다. 따라서, IRT 시험에서 위상잠금모드를 적용함으로써 감육결함의 길이와 원주방향 폭을 상당히 정확하게 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 결함에 대한 이미지가 뚜렷하지는 않지만 기존의 IRT 시험에서 검출하지 못한 S2-4

시편의 얇은 결함 ($d/t = 0.25, L/D_0 = 1.0, \theta/\pi = 0.0625$)이 위상잠금모드를 적용함으로써 검출되었다. 그러나, 기존의 IRT 시험에서 검출되었던 S2-3 시편의 얇은 결함들 ($d/t = 0.25, L/D_0 = 1.0, \theta/\pi = 0.0625$ & 0.125)이 위상잠금모드를 적용한 IRT 시험 결과에서 검출되지 않았다. 따라서, 4.0 - inch 배관 시편에 대한 시험 결과에 의하면, 위상잠금모드 기법을 적용함으로써 IRT 시험 결과에서 감육결함의 형상을 보다 정확히 평가할 수 있었다. 그러나, 깊이가 얇은 감육결함에 대한 검출능력이 크게 향상되지는 않는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 사각결함이 가공된 2.5 - inch 직관 시편(S3-3 시편)을 대상으로 위상잠금모드 기법을 적용하여 측정된 위상이미지를 기존의 IRT 시험에서 측정된 열화상이미지와 비교하여 나타낸 것이다. 전체적으로 기존의 IRT 기법으로 측정된 열화상이미지에 비해 위상잠금모드 기법을 적용하여 얻은 위상이미지에서 감육결함이 보다 뚜렷하게 관찰되었으며, 측정된 감육결함의 형상이 실제 배관에 존재하는 결함의 형상과 유사하였다. 또한, Fig. 4의 결과에서 위상잠금모드 기법의 적용이 배관 계통의 일부 감육결함에 대해서 검출능력을 향상시키는 것을 알 수 있다. 기존의 IRT 기법에서 얻은 열화상이미지에서는 검출되지 않았던 길이가 짧고 원주방향 폭이 좁은 감육결함

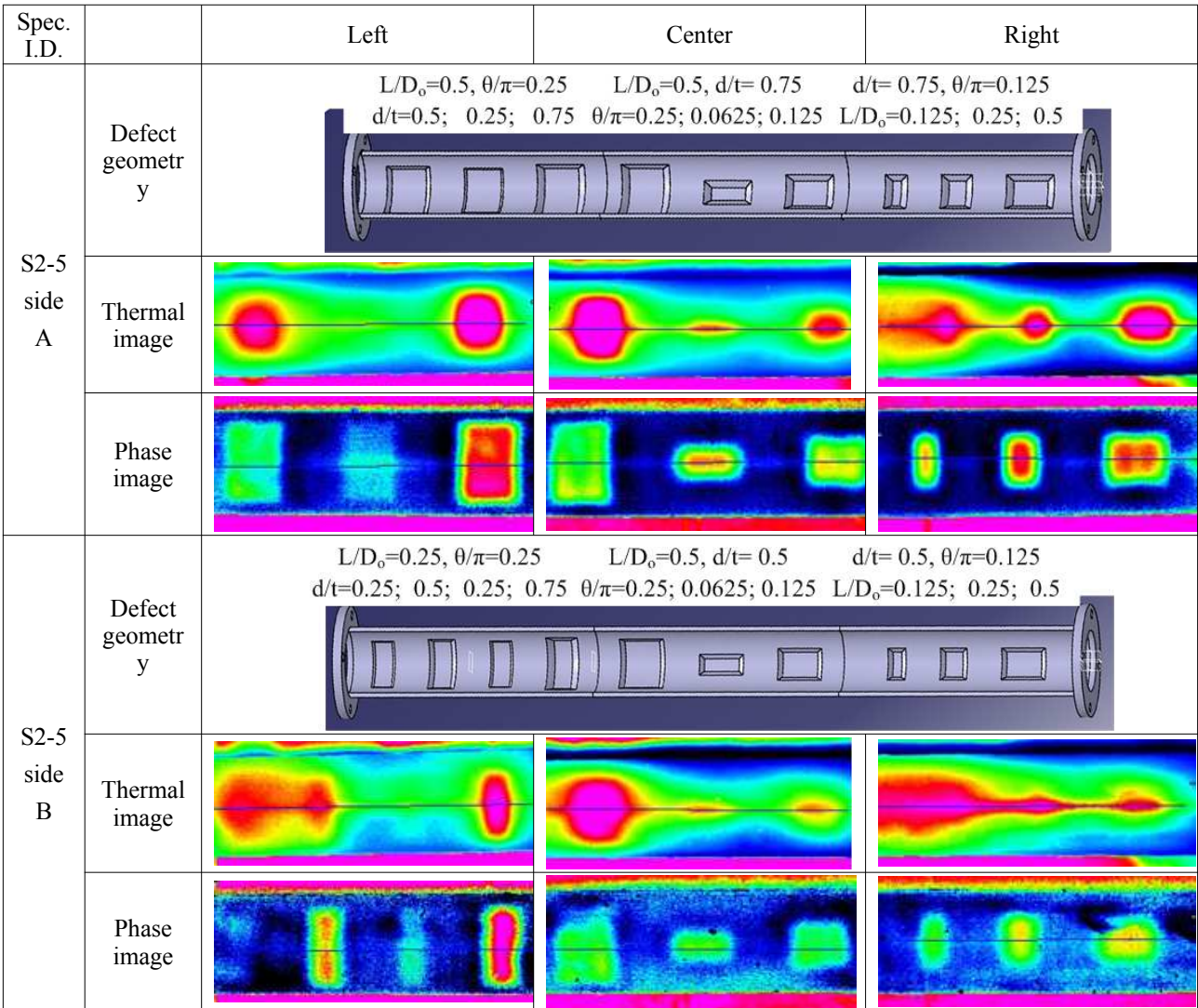


Fig. 5 Comparison of wall-thinning defect images obtained by conventional and lock-in mode IRT tests for specimens S2-5 containing defects with slanted edges

들 ($d/t = 0.5, L/D_0 = 0.125, \theta/\pi = 0.0625$ & 0.125) 이 위상이미지에서는 뚜렷이 검출되었다. 그러나, 결함의 길이와 원주방향 폭에 관계없이 전체적으로 깊이가 얇은 감육결함 ($d/t = 0.25$)은 열화상이미지 뿐 아니라 위상이미지에서 명확하게 관찰되지 않았다. 따라서, 2.5 - inch 시편에서는 위상잠금모드 기법의 적용이 감육결함에 대한 형상 평가능력 뿐 아니라 결함 검출능력도 개선시키는 것을 확인하였다. IRT 시험에서 위상잠금모드 기법의 적용에 따른 이러한 개선 효과는 감육결함의 길이가 짧고 원주방향 폭이 좁은 경우에 더욱 뚜렷하였다.

3.2 경사 결함

원전 배관계통에서 실제 감육결함은 결함부와

건전부 사이의 경계가 명확하지 않고, 결함부에서 두께가 완만하게 변화한다. IRT 기법을 적용한 감육결함 검출의 기본 원리는 감육부와 건전부 사이의 두께 차이에 기인한 열적 특성 차이를 측정하는 것이다. 따라서, 실제 감육결함에서 완만한 두께 변화는 IRT 기법을 적용한 감육결함 검출을 어렵게 하는 요인으로 작용할 수 있다. 여기서는 실제 감육결함의 형상적 특징을 고려한 경사결함이 존재하는 배관 시편 (S2-5)을 이용하여 IRT 시험을 수행하였다.

Fig. 5는 경사결함을 갖는 S2-5 시편을 대상으로 위상잠금모드를 적용한 IRT 시험과 기존의 IRT 시험법으로 구한 감육결함에 대한 위상이미지와 열화상이미지를 함께 나타낸 것이다. 먼저,

기존의 IRT 기법을 적용하여 구한 열화상이미지를 살펴보면, 결함의 길이방향 크기에 관계없이 깊이가 $d/t = 0.25$ 인 경사결함은 검출되지 않았다. 또한, 결함의 원주방향 폭이 좁거나 길이가 짧은 경우에는 깊이가 $d/t = 0.75$ 일지라도 경사결함에 대한 이미지가 뚜렷하지 않았다. 특히 결함과 건전부 사이의 경계가 구분되지 않아서 열화상이미지로부터 결함의 형상과 크기를 평가하는 것이 거의 불가능했다. 앞서 살펴본 S2-1 시편의 사각결함과 비교하면, S2-5 시편에서 경사결함 이미지의 선명도가 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 기존의 IRT 기법의 결함 검출능력과 형상 평가능력이 사각결함에 비해 경사결함에서 크게 감소하는 것을 의미하며, 결함의 경계에서 완만한 두께 변화로 인한 완만한 온도 분포 변화에 기인하는 것으로 판단된다.

반면, 위상잠금모드를 적용한 IRT 시험에서 주어진 위상이미지에서는 기존의 IRT 기법으로 검출되지 않았던 깊이가 $d/t = 0.25$ 인 경사결함이 검출되었다. 또한, 모든 경사결함들이 서로 분리된 이미지로 관찰되었으며, 깊이가 $d/t = 0.5$ 이상인 결함에 대해서는 위상이미지에 나타난 결함의 원주방향 폭과 길이가 실제 결함의 형상과 거의 일치하였다. 특히 깊이가 $d/t = 0.75$ 이상인 경사결함에 대해서는 원주방향 폭과 길이에 관계없이 결함의 저면과 경사면이 뚜렷이 구분되었다. 따라서, 기존의 IRT 기법에 비해 IRT 시험에 위상잠금모드를 적용함에 따라 경사결함에 대한 검출능력과 형상 평가능력이 크게 향상되는 것을 확인하였다. 또한, 위상잠금모드 기법을 적용할 경우에 IRT 시험을 통해 경계가 명확하지 않은 감육결함도 신뢰성 있게 검출할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 감육결함이 가공된 배관 시편을 대상으로 위상잠금모드 (Lock-in mode)를 적용하여 적외선열화상 (Infrared Thermography, IRT) 시험을 수행하였다. 시험 결과로 주어진 위상이미지 (Phase Image)를 기존의 IRT 시험에서 주어진 결함에 대한 열화상이미지 (Thermal Image)와 비교하였다. 이들 결과로부터 다음 결론을 얻었다.

(1) IRT 시험에 위상잠금모드를 적용함으로써

배관 감육결함의 길이와 원주방향 폭에 대한 형상 평가능력이 크게 향상되는 것을 확인하였다.

(2) 위상잠금모드 적용에 따른 결함 형상 평가능력과 결함 검출능력의 향상은 길이와 원주방향 폭이 각각 $L/D_0 = 0.125$, $\Theta/\pi = 0.0625$ 이하로 작거나 경계가 명확하지 않은 감육결함에서 더욱 뚜렷하였다.

(3) IRT 시험에 위상잠금모드 기법을 적용할지라도 감육결함의 깊이가 배관 두께의 25 % 이하로 얇은 경우에는 결함의 검출능력이 크게 향상되지 않았다.

후 기

본 논문은 2010년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과입니다

참고문헌

- (1) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C. and Jones, R., 1998, Flow-accelerated Corrosion in Power Plant, EPRI/TR-106611-R2.
- (2) Michel, F., Reck, H. and Schulz, H., 2001, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Aging-Related Aspects," *Nuclear Eng. Design*, Vol. 207, pp. 307~316.
- (3) NRC Information Notice 2006-08, 2006, Secondary Piping Rupture at the Mihama Power Station in Japan, May.
- (4) Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), Management Program for Thinned Pipe in NPP Secondary System, Interim Report/ TM.00NJ12. M2001.189.
- (5) Knook, T., Persoz, M., Trevin, S. and Friol, S., 2010, "Pipe Wall Thinning Management at Electricite de France (EDF)," *E-J. Advanced Maintenance*, Vol. 2, pp. 1~13.
- (6) Edalati, K., Rastkhah, N., Kermani, A., Seiedi, M. and Movafeghi, A., 2006, "The Use of Radiography for Thickness Measurement and Corrosion Monitoring in Pipes," *Int. J. Pressure Vessels Piping*, Vol. 83, pp. 736~741.
- (7) Ryu, K.H., Whang, I.S., Lee, N.Y., Oh, Y.J., Kim, J.H., Park, J.H. and Sohn, C.H., 2008,

- “Screening Method for Piping Wall Loss by Flow Accelerated Corrosion,” *Nuclear Eng. Design*, Vol. 238, pp. 3263~3268.
- (8) Liu, L. and Ju, Y., 2011, “A High-Efficiency Nondestructive Method for Remote Detection and Quantitative Evaluation of Pipe Wall Thinning Using Microwave,” *NDT & E International*, Vol. 44, pp. 106~110.
- (9) Vertesy, G., Tomas, I., Uchimoto, T. and Takagi, T., 2012, “Nondestructive Investigation of Wall Thinning in Layered Ferromagnetic Material by Magnetic Adaptive Testing,” *NDT & E International*, Vol. 47, pp. 51~55.
- (10) Zayicek, P. and Shepard, S.M., 1997, “Investigation of an IR Technique for Detection of Wall Thinning in Service Water Piping,” *Proc. of SPIE Conf. thermosence XIX*, Vol. 3056, pp. 242~247.
- (11) Ammirato, F. and Zayicek, P., 1999, *Infrared Thermography Field Application Guide*, EPRI/TR-107142.
- (12) Maldague, X., 1999, “Pipe Inspection by Infrared Thermography,” *Materials Evaluation*, Vol. 57, No. 9, pp. 899~902.
- (13) Shen, G. and Li T., 2007, “Infrared Thermography for High-Temperature Pressure Pipe,” *Insight*, Vol. 49, No. 3, pp. 151~153.
- (14) Hung, Y.Y., Chen, Y.S., Ng, S.P., Liu, L., Huang, Y.H., Luk, B.L., Ip, R.W.L., Wu, C.M.L. and Chung, P.S., 2009, “Review and Comparison of Shearography and Active Thermography for Nondestructive Evaluation,” *Materials Science Eng. R*, Vol. 64, pp. 73~112.
- (15) Grinzato, E., Vavilov, V., Bison, P.G. and Marinetti, S., 2007, “Hidden Corrosion Detection in Thick Metallic Components by Transient IR Thermography,” *Infrared Phys. & Technology*, Vol. 49, pp. 234~238.
- (16) Vageswar, A., Balasubramaniam, K., Krishnamurthy, C.V., Jayakumar, T. and Raj, B., 2009, “Periscope Infrared Thermography for Local Wall Thinning in Tubes,” *NED & E International*, Vol. 42, pp. 275~282.
- (17) Kim, J.W., Yun, K.W. and Jung, H.C., 2012, “Application of an IR Thermography Technique to the Inspection of Local Wall-Thinning Defects in Nuclear Piping Components,” *Proc. of PVP2012*, PVP2012-78503.
- (18) Kim, K., Jeon, S. and Jung, H., 2011, “Defect Detection of Impacted Composite Tubes by Lock-in Photo-Infrared Thermography Technique,” *J. Korean Soc. Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 2, pp. 139~143.
- (19) Choi, M, Kang, K., Park, J., Kim, W. and Kim, K., 2008, “Quantitative Determination of a Subsurface Defect of Reference Specimen by Lock-in Infrared Thermography,” *NDT & E International*, Vol. 41, pp. 119~124.