



2014년 8월 석사학위논문

위상잠금 적외선열화상을 이용한 원전배관 감육결함 검사기술 개발

조 선 대 학 교 대 학 원 원자력공학과

유 쾌 환

위상잠금 적외선열화상을 이용한 원전배관 감육결함 검사기술 개발

Development of Inspection Technology of Wall-thinned Defects in NPP Piping Using Lock-in IR Thermography

2014년 8월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

원자력공학과

유 쾌 환

위상잠금 적외선열화상을 이용한 원전배관 감육결함 검사기술 개발

지도교수 나 만 균

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 4월

조선대학교대학원

원자력공학과

유 쾌 환



유쾌환의 석사학위 논문을 인준함

위육	신장	조선대학교	교	수	김 진 원	(인)
위	원	조선대학교	교	수	나 만 균	(인)
위	원	조선대학교	고	수	송 종 순	(인)

2014년 5월

조 선 대 학 교 대 학 원

그림 목차	iii
표 목차	v
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론과 원리	2
제 1 절 Planck's Law	2
제 2 절 Stefan-Boltzmann's Law	2
제 3 절 위상잠금 적외선열화상 기술	3
게 9 자 시청자키 서게 미 개바	G
제 5 경 실험경지 실제 옷 개월 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	0
세 I 실 매관 시임원 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	6 7
2. 2.5 위치 결합시험편	8
제 2 절 가열장치(할로겐램프)	14
1. 필립스 PAR 64(1000W) ······	14
2. 가열장치 개발(1000W)	15
3. 가열장치 거치대 개발	17
제 3 절 냉각장치(Fan)	21
1. 냉각장치 개발	21
2. 냉각장치 거치대 개발	23



제 4 장 실험 방법	····· 25
제 1 절 연속적인 가열 및 냉각 방법	····· 26
제 2 절 위상잠금을 이용한 가열 및 냉각 방법	29
제 3 절 Mock-up Loop에서 가열 및 냉각 방법	30
제 5 장 실험 결과	32
제 1 절 연속적인 가열 및 냉각실험 결과	····· 32
제 2 절 위상잠금을 이용한 가열 및 냉각실험 결과	····· 36
제 3 절 Mock-up Loop에서 가열 및 냉각실험 결과	39
제 6 장 결론	44
참고 문헌	····· 45



- ii -

그림 목차

그림	2.3.1 위상, 진폭, 위상잠급	금 열화상 이미지 계산 원리	4
그림	3.1.1 4인치 직관부 결함	형상(500mm)	7
그림	3.1.2 4인치 직관부 결함/	시험편(500mm)	7
그림	3.1.3 2.5인치 직관부 결혼) 형상(350mm) ······ 1	10
그림	3.1.4 사각결함과 경사결함	함 형상 1	10
그림	3.1.5 2.5인치 직관부 결함) 형상(700mm) 1	1
그림	3.1.6 2.5인치 복합배관 곁	년함 형상······ 1	1
그림	3.1.7 2.5인치 복합백관 즈	관부 결함 형상(350mm)	12
그림	3.1.8 2.5인치 복합배관 츽	·면부 결함 형상 ······ 1	12
그림	3.1.9 2.5인치 복합배관 외	호부 결함 형상	13
그림	3.1.10 2.5인치 복합배관	내호부 결함 형상	13
그림	3.2.1 필립스 PAR 64(100	00W)	15
그림	3.2.2 개발한 가열장치(10	00W) 1	16
그림	3.2.3 개발한 가열장치와	필립스 PAR 64 조도 및 조사범위 비교(1000W) 1	17
그림	3.2.4 가열장치 거치대 설	계도 1	19
그림	3.2.5 가열장치 거치대의	레이져 거리측정기	20
그림	3.2.6 가열장치 거치대의	거치봉	20
그림	3.3.1 냉각장치 설계도 …		22
그림	3.3.2 냉각장치(Fan)		22
그림	3.3.3 풍속 측정계		23
그림	3.3.4 냉각장치 거치대(Fa	un) 2	24
그림	4.1.1 가열 원리(할로겐램	<u></u>)	26
그림	4.1.2 가열장치를 이용하여	여 감육결함 검출을 위한 장치 구성	27
그림	4.1.3 냉각 원리(Fan)		27
그림	4.1.4 배관시험편 내부 가	·열장치 ······ 2	28



그림	4.1.5	배관내부 가열장치의 온도 분포	28
그림	4.1.6	냉각장치를 이용한 냉각실험	29
그림	4.3.1	Mock-up Loop 설계도 ·····	30
그림	4.3.2	Mock-up Loop 배관 가열 ·····	31
그림	4.3.3	Mock-up Loop 배관 냉각	31
그림	5.1.1	4인치 배관 시험편 연속적인 가열	34
그림	5.1.2	4인치 배관 시험편 연속적인 냉각	35
그림	5.2.1	4인치 배관 시험편 위상잠금을 이용한 가열	37
그림	5.2.2	4인치 배관 시험편 위상잠금을 이용한 냉각	38
그림	5.3.1	2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(350mm)	40
그림	5.3.2	2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(700mm)	40
그림	5.3.3	2.5인치 복합배관 결함검출 결과	40
그림	5.3.4	2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(350mm)	42
그림	5.3.5	2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(700mm)	42
그림	5.3.6	2.5인치 복합배관 결함검출 결과	42
그림	5.3.7	2.5인치 복합배관 외호부 결함검출 결과	43



- iv -

표 목차

표.	1	1 4인치 배관 시험편 결함 치수	 8
표.	2	2 2.5인치 복합배관 시험편에 가공된 결함 치수	 9
표.	3	3 가열장치 조도 비교(거리, 2m)	 17
표.	4	4 냉각장치 치수(mm)	 22
표.	5	5 냉각장치 풍속 측정(m/s)	 23



초 록

위상잠금 적외선열화상을 이용한 원전배관 감육결함 검사기술 개발

유 쾌 환 지도 교수 : 나 만 균 원자력공학과 조선대학교 대학원

Recently, the safety problem of nuclear power plants (NPPs) has emerged as a global concern. As a result, NPP safety problems have become a global concern. Piping of aged NPPs has wall-thinned defects due to corrosion and fatigue. Wall-thinned defects have often been found in carbon steel pipes. These wall-thinned defects are a major cause of reduced pipe integrity. Serious accidents can occur when the integrity of a pipe is damaged by wall-thinned defects. Therefore, it is important to inspect piping in advance to detect defects before damage occurs. For these reasons, NDT for checking the integrity of the secondary system equipment is performed. The infrared (IR) thermography is one of the NDT. Among them, Thermal imaging technology through real-time imaging temperature changes detected by a copy of the object surface energy is a technology that can determine the presence of defects. IR thermography has been applied to many areas of defect inspection for composite structures, the deterioration diagnosis of power equipment, and military fields. However, it has not been applied to the piping systems of NPPs. IR thermography inspection is expected to show a higher utilization in the field of NPPs. In particular, IR thermography using a lock-in technique for inspection is expected to be able to clearly detect the boundaries between non-defective parts and defective parts, which will allow it to be extensively utilized in industrial fields.

In this study, we developed a lock-in infrared (IR) thermography technique to



- vi -

detect wall-thinned defects in the small diameter pipes of a NPP's secondary systems during normal operation. For experiments, a mock-up loop was constructed that contained artificially generated defects. The fluid inside the loop was maintained at a temperature similar to the operating conditions of a NPP. Based on the results of experiments where lock-in IR thermography was applied, it is expected to be possible to detect wall-thinned defects in piping during normal operation, shorten the maintenance time of NPPs, and improve the work efficiency of the inspector.



제1장서론

최근 원자력발전소의 발전정지사례가 빈번하게 발생함에 따라 원전의 건전성에 대한 문제가 세계적인 관심사로 부각되고 있다. 감육결함은 원전의 건전성을 저하시키는 요 소 중 하나로 탄소강 배관이 사용되는 가압경수로형 원전의 2차측 배관과 가압 중수로 형 원전의 1차측 배관에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 배관계통에서 감육결함 은 유동가속부식이 자주 일어나는 곡관, 연결관 인접부, 밸브 등에서 발생된다[1]-[3].

원전 정상운전 중 감육결함으로 인한 배관의 손상은 발전소 정지사례를 초래하며 심 각한 경우 사고로 이어질 수 있다. 현재는 배관내부에 감육결함을 검사하기 위해 원전 정비기간에 초음파검사를 이용하여 검사하고 있다. 초음파를 이용한 감육결함 검출방 법은 매우 정확하게 두께를 측정할 수 있어서, 결함의 유무를 쉽게 판단할 수 있지만 소구경 배관, 곡관 등의 검사 시에는 탐촉자의 접촉 불량으로 인하여 검사의 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 또한, 검사시간이 길어 발전소 정비기간에 결함이 자주 발생하 는 모든 배관을 검사하기 어렵다. 이러한 문제들 때문에 최근에는 초음파검사를 대신 할 수 있는 비파괴검사방법들이 제안되고 있다. 적외선열화상 검사는 물체가 방출하는 적외선 영역의 광선을 측정하여 이미지로 변화하여 온도 값을 읽을 수 있도록 하는 기 술이다. 적외선열화상 검사는 비접촉식 검사로서, 안전성이 높고 검사 시간이 빨라 원 전 배관의 감육결함 검사에 적합할 것으로 판단된다[4]-[7].

본 연구에서는 원전 소구경 배관의 감육결함을 검사하는데 가장 적합한 검사기법들 을 연구하였다. 적외선열화상 검사에 최적화된 검사장비와 조건을 연구하기 위해 다양 한 방법으로 실험을 수행하였으며, 실제 가동 중인 원자력발전소의 배관을 모사하기 위해 Mock-up Loop를 구성하여 실제 원전 정상운전과 동일한 조건으로 실험하였다. 적외선열화상 카메라를 이용하여 정상 운전 중에 배관내의 감육결함을 검사하면, 발전 소 운전 중에 배관의 건전성의 유무를 판단할 수 있어서, 배관 파단에 의한 사고를 예 방할 수 있을 것이다. 또한 운전 중에 배관 감육결함의 위치와 크기를 정확하게 알 수 있으므로, 발전소 정비시간을 단축시킬 수 있을 것이다. 본 논문에서는 적외선열화상 검사를 이용하여 가장 효율적으로 배관의 감육결함을 검사하는 것을 목적으로 하였으 며, 실험을 통해 최적화된 검사 장비와 실험 방법들을 연구하였다.

- 1 -

제 2 장 이론과 원리

제 1절 Planck's Law

모든 물체는 절대적인 온도를 가지고 있고, 흡수한 에너지와 방출한 에너지가 열적 평형을 이루어 일정한 온도를 유지한다. 적외선열화상 기술은 물체가 열적 평형을 이 루기 위해 방출하는 에너지양을 측정하여 에너지양과 온도의 상관관계를 이용한다. 플 랑크의 흑체복사이론은 플랑크상수와 볼츠만 상수, 빛의 속도를 계산하여 파장과 온도 의 관계를 나타내는 법칙이며, 식 1은 플랑크의 흑체복사이론이다[8].

$$M_{\lambda}(\lambda,T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [e^{hc/\lambda kT} - 1]} \tag{1}$$

플랑크상수 $h = 6.626 \times 10^{-23} J \cdot s$ 볼츠만상수 $k = 1.380658 \times 10^{-23} J K^{-1}$ 광속 $c = 2.998 \times 10^{-8} m s^{-1}$

위의 식 1에서 M_{λ} (in units of $Wm^{-1}\mu m^{-1}$)는 물체에 조사된 에너지양을 나타낸 다.

제 2 절 Stefan-Boltzmann's Law

스테판 볼츠만 법칙은 플랑크 법칙을 통해 물체에서 흡수된 파장과 에너지의 관계를 구할 수 있다 $(0 \le \lambda \le \infty)[8]$.

$$R = \sigma T^4 \tag{2}$$

스테판 볼츠만 상수 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^2)$

식 2는 플랑크의 흑체 복사이론과 관계가 있다. 스테판 볼츠만 법칙은 흑체의 단위 표면적으로부터 단위시간에 방사되는 방사에너지는 절대온도 T의 4승에 비례한다는 이론이다. 적외선열화상 카메라는 플랑크의 법칙과 스테판 볼츠만의 법칙을 통하여 물 체의 온도를 측정한다[8].

제 3 절 위상잠금 적외선열화상 기술

위상잠금을 이용한 적외선열화상 검사는 대상체 표면의 국부적인 온도변화를 검출 할 수 있는 방법이다. 가열 장치 및 냉각장치 등을 이용하여 조화함수형태로 대상체에 온도 변화를 주고 이때 발생하는 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화 를 구하는 방법이다. 위상잠금 적외선열화상 기법을 이용하면 시간에 따른 주파수 변 조를 통해 정상운전중인 원전 배관의 감육결함을 검사할 수 있다. 정상운전 중 원전 배관에 감육결함을 검사할 때, 주기적으로 배관에 열을 가하거나 냉각하면 결함부분이 국부적으로 온도가 변하게 된다. 특정 주파수 대역에서 주기적으로 발생하는 온도변화 를 평균화하면 정확한 온도변화를 알 수 있다[9]-[10].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{3}$$

위의 식 3에서 ρ는 밀도, c_p는 비열, k는 열전도 계수이다. T는 온도에 따른 결과이 며, z는 열 유동 방향으로의 거리, 시간은 t이다. 열적 자극으로 인한 온도변화는 식 4 와 같이 표현할 수 있다.

$$T(z,t) = T_0 e^{-z/\mu} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right)$$
(4)

여기서 광원의 침투깊이는 μ이고, 식 5와 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho c_p}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$$
(5)

열확산 길이는 열파동의 감쇄율을 결정한다. 배관에 열확산계수 α는 재료의 특성에 따라 다르며, 열파장 λ는 식 6과 같이 광원의 침투깊이를 이용하여 표현할 수 있다.

 $\lambda = 2\pi\mu$

(6)

식 7에서 위상 *ϕ*는 결함깊이 *z*와 관계가 있으며, 결함의 깊이가 선형적이라는 것을 보여준다.

$$\phi(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \tag{7}$$



그림 2.3.1 위상, 진폭, 위상잠금 열화상 이미지 계산 원리



위상잠금 적외선열화상 기법은 주파수 응답특성을 통해 설명할 수 있다. 정상상태에 서 정현파 입력 주파수는 ω이고 진폭은 E_i 이다. 선형시스템에서는 입력에 따라 출력 이 변하고, 진폭이 E_o 일 때 위상 φ을 갖는다. 조화함수 형태의 입력신호 E_o 는 그림 2.3.1의 상단에 보여주고 있다. 조화함수 형태의 입력 주파수와 출력 주파수는 위상 변 화와 진폭 변화를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\phi = atan \frac{E_1 - E_3}{E_2 - E_4} \tag{8}$$

$$E_o = \sqrt{(E_1 - E_3)^2 + (E_2 - E_4)^2} \tag{9}$$

식 8과 식 9에서 E_1, E_2, E_3, E_4 는 한 주기 동안 배관 표면에서의 픽셀에 따른 온도데 이터를 기록한 것이다[11].



- 5 -

제 3 장 실험장치 설계 및 개발

적외선열화상 카메라를 이용하여 배관의 감육결함을 검사할 때, 배관을 가열하거나 냉각하는 장비는 매우 중요하다. 적외선열화상 이미지는 배관에 온도분포를 해석하여 배관의 결함의 유무, 형상, 위치를 측정하는 기술이다. 감육결함이 발생한 배관의 경우, 외부로부터 가열하거나 냉각하면 배관 내부 결함의 유무에 따라 열확산이 방해를 받게 되어, 많은 온도차를 발생시킨다. 냉각장치와 가열장치의 성능은 적외선열화상 검사 시 결함을 판단하는데 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 배관 내부의 감육결함 검출을 위해 배관의 온도 변화를 발생하게 하는 냉각장치와 가열장치를 개발하였다.

제 1 절 배관 시험편

본 연구에서 사용한 배관의 구경은 4인치와 2.5인치이다.

4인치의 배관은 직경이 ø113이며, 길이가 500mm인 직관이며, 배관내부 감육결함의 유무를 판별하기 위하여 배관내부에 인공적으로 결함을 만들었다. 결함크기는 배관 두 께의 50%와 75%로 각각 제작하였으며, 결함은 4개를 만들었다. 본 연구에서 사용된 배관은 ASTM A106 Gr. B 탄소강으로 실제 원자력발전소에서 사용되는 배관과 동일 한 재질의 배관을 사용하였다. 그림 3.1.1은 본 실험에서 사용한 4인치 직관부 결함 형 상을 보여 주고 있으며, 그림 3.1.2는 4인치 직관부 결함시험편을 보여 주고 있다. 표 1 은 4인치 배관의 결함 치수를 보여주고 있다.



- 6 -

1. 4인치 직관부 결함시험편



Top View



그림 3.1.1 4인치 직관부 결함 형상(500mm)





- 7 -

그림 3.1.2 4인치 직관부 결함시험편(500mm)

표. 1 4인치 배관 시험편 결함 치수

배관형태와 크기	배관형태	결함깊이 d/t	결함길이 L/D_0	결함 폭
직관(500mm)	직관부	0.5, 0.75	0.5	90°

2. 2.5인치 결함시험편

2.5인치 배관은 실제 가동 중인 원자력발전소의 배관을 모사하기 위하여 제작하였으 며, 다양한 형태로 결함을 제작하였다. 실험에서 사용한 배관은 2.5인치의 350mm 직관 시험편과 700mm 직관시험편, 그리고 복합배관시험편이다. 2.5인치 복합배관에는 곡관 의 내호부, 외호부, 측면부의 사각결함이 포함된 곡관시험편을 설계·제작하였다. 복합 배관 제작을 통해 직관과 곡관에 감육결함이 모두 존재할 때, 한 번의 적외선열화상 검사를 통해 결함 검출능력을 확인할 수 있도록 하였다. 2.5인치 배관 중 350mm 직관 은 배관내부에 5개의 결함을 인공적으로 제작하였으며, 결함의 깊이는 두께 대비 75%. 50%, 75%, 50%, 75%로 제작하였다. 그림 3.1.3은 2.5인치 직관부 결함 형상(350mm)을 보여주고 있다. 700mm의 직관은 배관내부에 8개의 결함을 인공적으로 제작하였으며, 결함의 깊이는 75%, 25%, 50%, 25%, 75%, 75%, 75%, 75%로 제작하였다. 700mm의 직관은 4개의 경사결함과 4개의 일반결함의 형태로 제작하였다. 실제 원전 배관에서의 감육결함과 유사하도록 제작하기 위해 결함의 길이 방향과 원주방향으로 경사결함을 제작하였다. 또한 적외선열화상 검사를 이용하여 감육결함 검출 시, 경사결함과 사각결 함의 차이를 확인하기 위하여 동일한 크기의 배관에 적용하였다. 그림 3.1.4는 일반결 함의 모습과 경사결함의 모습을 비교하여 보여주고 있으며, 그림 3.1.5는 2.5인치 직관 부 결함 형상(700mm)을 보여주고 있다. 복합배관은 배관 왼쪽 곡관 측면부에 50%의 결함을 제작하였으며, 직관부는 75%, 50%, 25%의 결함을 제작하였다. 오른쪽 곡관 내 호부에는 중앙에 50%의 결함 1개를 제작하였으며, 곡관 외호부에는 50%의 결함 3개 를 제작하였다. 그림 3.1.6은 2.5인치 복합배관 결함 형상을 보여주고 있고, 그림 3.1.7



은 2.5인치 복합배관 직관부 결함 형상(350mm)을 보여 주고 있다. 그림 3.1.8은 복합배 관의 왼쪽 복합배관 측면부 결함 형상을 보여 주고 있으며, 그림 3.1.9는 복합배관 외 호부 결함 형상을 보여주고 있다. 마지막으로 그림 3.1.10은 복합배관 내호부 결함 형 상을 보여주고 있다. 표 2는 실험에 사용된 2.5인치 배관의 결함 치수를 정리하여 보여 주고 있다. 복합배관의 경우, 정면에서 가열 및 냉각방법을 통해 배관내부의 감육결함 을 검출하였다.

배관형태와 크기	형태와 표기 배관형태		결함깊이, <i>d/t</i>	길이, <i>L/D</i> 0	결함 폭
직관(350mm) 직독		만부	0.75, 0.5, 0.75, 0.5, 0.75	0.25	90°
지과(700mm)	직관부		0.75, 0.25, 0.5, 0.25 (좌측)	0.25	90°
			0.75, 0.75, 0.75, 0.75 (우측)	0.5	90°
	직관부		0.75, 0.5, 0.25	0.78	90°
	곡관	내호부	0.5	0.5	90°
비귀까기			0.5	0.25	45°
목압배관		외호부	0.5	0.5	90°
			0.5	0.5	90°
		초머ㅂ	0.5	0.25	45°
		- 득번구	0.5	0.5	90°

표. 2 2.5인치 복합배관 시험편에 가공된 결함 형상





그림 3.1.4 사각결함과 경사결함의 형상



- 10 -



그림 3.1.5 2.5인치 직관부 결함 형상(700mm)



그림 3.1.6 2.5인치 복합배관 결함 형상



- 11 -



그림 3.1.7 2.5인치 복합배관 직관부 결함 형상(350mm)



그림 3.1.8 복합배관 측면부 결함 형상





그림 3.1.9 복합배관 외호부 결함 형상



그림 3.1.10 복합배관 내호부 결함 형상

Collection @ chosun

- 13 -

제 2 절 가열장치(할로겐램프)

적외선열화상 카메라를 이용하여 배관의 감육결함을 검사하기 위해서는 검사에 가장 적절한 파장대역의 램프를 사용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 적외선열화상 검사 시 1000W 할로겐램프의 파장대역이 가장 적절하다고 판단하여, 가열장치로 할로겐램 프를 사용하였다. 가열장치의 성능을 실험하기 위해 상용제품인 필립스 PAR 64 1000W 할로겐램프와 개발한 할로겐램프로 실험하였다. 본 절에서는 상용제품인 필립 스 PAR 64 가열장치와 개발한 가열장치의 성능을 비교하였다. 배관결함검사에 적합한 가열장치를 개발하는 것을 목표로 하여 연구를 수행하였으며, 적외선열화상 카메라를 이용하여 배관의 감육결함 검사 시 최적의 장비와 검사방법을 개발하는 것을 목표로 하였다.

1. 필립스 PAR 64(1000W)

필립스의 PAR 64는 상용 할로겐램프로 무게가 2.5kg으로 가볍고, 내구성이 높은 장 점을 가지고 있다. 1000W의 출력을 가지고 있으며, 램프와 반사판 그리고 렌즈까지 모 두 일체형으로 구성되어 있다. 크기는 가로 250mm/ 세로 300mm/ 폭 400mm이다. 적 외선열화상 카메라를 이용하여 대상체의 결함유무를 판별할 때, 가장 많이 사용되는 제품이다. 그림 3.2.1은 필립스의 PAR 64를 보여 주고 있다. 필립스 PAR 64는 빛이 조사되는 중앙을 중심으로 조도가 높았으며, 주변으로 갈수록 조도가 감소되는 경향을 보인다. 필립스 PAR 64의 경우, 빛의 조사범위를 조절하기 위해서 램프를 직접 이동 하여야 하기 때문에 좁은 공간에서 큰 배관을 검사하기 어려우며, 소구경 배관을 검사 시에 빛을 집중적으로 조사하기 어렵다. 따라서 배관의 감육결함을 검사에 적합한 램 프는 배관에 빛이 골고루 조사되고, 배관 형태에 따라 빛의 조사각도를 조절할 수 있 어야 하며 빛이 배관에 균일하게 조사되어야 한다.



- 14 -



그림 3.2.1 필립스 PAR 64(1000W)

2. 가열장치 개발(1000W)

본 연구에서 배관결함검사에 최적화된 가열장치를 개발하기 위하여 1000W의 할로겐 램프를 사용하였으며, 반사판의 반사율을 높이기 위하여 석영재질의 반사판을 사용하 였다. 또한 반사판과 램프가 이동 할 수 있도록 제작하여 길이가 긴 배관과 짧은 배관 을 모두 검사할 수 있도록 하였다. 빛의 집중도를 높이기 위해 실린드리컬 렌즈를 사 용하여 검사하고자 하는 대상체에 빛을 집중적으로 조사 할 수 있도록 하였다. 배관의 감육결함 검사 시 휴대성을 높이기 위해 필립스 PAR 64보다 크기가 작은 가로 300mm/ 세로 150mm/ 폭 150mm로 소형화하고, 무게를 경량화 하였다. 그림 3.2.2는 개발한 가열장치를 보여주고 있다. 가열장치의 성능을 측정하기 위해 조도측정기를 이 용하여 필립스 PAR 64와 개발한 가열장치의 조도를 비교 하였다. 조도 측정결과, 개 발한 가열장치가 3850LUX정도 밝은 것을 알 수 있다. 표 3은 거리 2m에서 필립스 PAR 64와 개발한 가열장치의 조도를 비교한 것을 보여주고 있다. 또한 그림 3.2.3은



필립스 PAR 64와 개발한 가열장치의 조도 및 조사범위를 비교한 것을 보여준다. 빛의 조사범위 비교결과, 개발한 가열장치는 빛의 조사각도를 조절하여 소구경 배관과 곡관 에 빛을 집중적으로 조사할 수 있고, 700mm이상의 배관에도 적용이 가능하다. 개발한 가열장치는 조사되는 빛의 중앙 부분과 외곽 부분의 조도가 균일하여 배관에 빛과 열 을 고르게 조사할 수 있어 배관의 감육결함 검사에 적합할 것으로 판단된다. 그림 3.2.3을 통해 개발한 가열장치가 필립스의 PAR보다 조도가 높고, 빛이 배관에 고르게 분포된다는 것을 알 수 있다. 개발한 가열장치는 램프와 반사판을 이동할 수 있도록 하여 빛의 조사범위를 조절할 수 있도록 하였다. 조사범위는 4~64도까지 조절할 있으 며, 빛의 유효 조사 거리는 2-10m로 조사범위가 넓다. 개발한 가열장치는 빛의 조도뿐 만 아니라, 배관의 길이와 두께에 맞추어 빛의 조사 범위를 조절할 수 있어 배관 감육 결함 검사 시, 매우 적합할 것으로 판단된다.



그림 3.2.2 개발한 가열장치(1000W)





그림 3.2.3 개발한 가열장치와 필립스 PAR 64 조도 및 조사범위 비교(1000W)

표. 3 가열장치 조도 비교(거리, 2m)

PAR 64(1000W)	개발가열장치(1000W)		
19872Lux	23730Lux		

3. 가열장치 거치대 개발

원전 배관 내부의 감육결함 검사에서 소구경 배관과 곡률이 큰 곡관의 경우, 지면에 가까운 높이부터 천장까지 다양한 높이에 위치한다. 적외선열화상을 이용하여 결함검 사 시 짧은 시간에 이동하면서 검사를 수행하여야 하기 때문에 가열장치 거치대의 휴 대성과 이동성이 중요하다. 본 연구에서는 무게 경량화를 통해 이동과 휴대가 용이 하 도록 카본파이버 재질의 접이식 삼각대 형식으로 가열장치 거치대를 개발하였다. 배관 위치에 따른 높이 조절이 가능하도록 설계하였으며, 가열장치가 좌·우 간격으로 움직 일 수 있도록 하였다. 또한, 가로직관, 세로직관, 곡관과 같이 다양한 배관형상에 따라 조절이 가능하도록 설계하였다. 그림 3.2.4와 같이 6단 접이식으로 조절가능한 최대 높



이와 최소 높이를 각각 260cm, 17cm로 제작하여 대상체의 위치에 따라 가열장치의 위 치를 조절가능 하도록 하였다. 가열장치 거치대에서 삼각대와 거치봉의 연결은 볼헤드 를 이용하여 대상체의 형태에 따라 360도 회전 가능하도록 설계하였으며, 방향조절과 대상체와의 거리를 정량화 하기 위해서 레이져 거리 측정기를 부착하였다. 레이져 거 리측정기는 거리 측정뿐만 아니라, 결함 검사 시 가열장치가 가열하고자 하는 부분을 정확하게 가열할 수 있도록 하여 검사에 대한 오차를 줄일 수 있도록 하였다. 그림 3.2.5는 정확한 측정과 검사 시 오차를 줄이기 위해 설치된 레이져 거리측정기를 보여 준다. 가열장치 거치대의 무게는 3.41kg으로 경량이면서 지지하중은 45Kg으로 높으며, 가볍고 안전성이 높아 현장에서 사용하기에 적합하도록 제작하였다. 거치봉은 삼각대 와 동일한 제질로 경량이면서 튼튼하고 길이를 조절할 수 있도록 제작하였다. 그림 3.2.6과 같이 접이식으로 최대길이는 120cm이고 최소길이는 80cm이며, 눈금을 표시하 여 거치봉의 길이와 가열장치의 정확한 좌·우 간격을 조절할 수 있도록 제작하였다. 그림 3.2.6(ㄱ)은 거치봉의 최소 길이를 보여 주고 있으며, 그림 3.3.6(ㄴ)은 거치봉의 최대 길이를 보여주고 있다.



- 18 -



그림 3.2.4 가열장치 거치대 설계도



- 19 -



그림 3.2.5 가열장치 거치대의 레이져 거리측정기



(ㄱ) 거치봉의 최소 길이



(ㄴ) 거치봉의 최대 길이그림 3.2.6 가열장치 거치대의 거치봉

- 20 -



제 3 절 냉각장치(Fan)

1. 냉각장치 개발

본 연구에서는 정상운전중인 고온 배관 내부의 감육결함을 검사하기 위해 냉각장치 를 이용하여 배관을 냉각시켰다. 냉각장치로는 Fan을 사용하여 강제 대류방식을 사용 하였다. Fan을 이용한 냉각방법은 배관외부 손상없이 배관을 냉각시킬 수 있어 안정성 이 매우 높다. 실험에 사용된 Fan은 이노택사의 포터블 Fan으로 알루미늄 다이캐스팅 날개를 사용하여 저소음이며, 무게가 가볍고 고성능이면서 휴대성이 높아 배관에 사용 하기에 매우 적합하다. 날개의 크기는 ϕ 270mm이고 6개의 날개를 가지고 있으며, 소비 전력은 325W, 무게는 11kg이다. 그림 3.2.1은 Fan의 설계도를 보여 주고 있으며, 표 4 는 냉각장치의 치수를 보여주고 있다. 그림 3.2.2는 냉각장치의 정면부와 측면부의 모 습을 보여주고 있다. 냉각장치는 성능 실험을 통해 적용성을 확인하였으며, 거리에 따 른 풍속은 표 5에 나타내었다. 그림 3.2.3은 냉각장치의 풍속을 측정하기 위해 사용된 풍속측정 장치이며, 냉각 장치와 배관의 거리에 따른 정확한 풍속을 측정할 수 있다. 냉각장치의 풍속은 1m에서 11m/s, 2m에서 7.5m/s, 3m에서는 6m/s로 배관과의 거리가 멀어짐에 따라 풍속이 감소하였다. 냉각방법을 통해 배관의 감육결함을 검출하기 위해 서는 냉각장치의 풍속과 거리는 매우 중요한 요소가 될 것으로 판단된다.



- 21 -



그림 3.3.1 냉각장치 설계도

표. 4 냉각장치 치수(mm)

모델	А	В	С	D	Е	F	G	Н
TIP-300S	325	$\phi 388$	$\phi 285$	$\phi 298$	220	240	218	408



(ㄱ) 냉각장치 측면부

Collection @ chosun

(ㄴ) 냉각장치 정면부

그림 3.3.2 냉각장치(Fan)



그림 3.3.3 풍속 측정계

표. 5 냉각장치 풍속측정(m/s)

생각장치의 수 거리	Fan 1개	Fan 27
1m	10.8m/s	12.6m/s
2m	6.69m/s	8.6m/s

2. 냉각장치 거치대 개발

원전 현장에서 냉각방법을 통해 배관의 감육결함을 검출하기 위해서는 냉각장치뿐만 아니라, 냉각장치를 거치 할 수 있는 거치대의 안정성 또한 중요하다. 냉각방법을 사용 하여 배관의 감육결함을 검출 시 냉각장치가 진동으로 흔들리거나 넘어질 지면 실험의 결과가 달라질 수 있기 때문에 검사의 신뢰성이 떨어지게 된다. 본 연구에서는 적외선

열화상 검사의 신뢰성을 높이기 위해 냉각장치를 거치할 수 있는 거치대를 개발하였 다. 실제 원전에서 현장 적용성을 높이기 위해 휴대가 편리하고 경량인 카본삼각대를 사용하였다. 냉각장치와 삼각대를 고정할 수 있도록 냉각장치의 하단부에 홀더를 장착 하였다. 냉각장치 거치대의 최대높이는 260cm로 높은 배관 검사 시에도 적용이 가능 하며, 삼각대 중앙에 센터컬럼을 설치하여 높이를 정밀하고 쉽게 조절 할 수 있도록 하였다. 냉각장치 무게와 진동을 고려하여 최대 지지하중이 45Kg인 삼각대를 사용하 여 안정성이 높도록 하였다. 그림 3.3.4는 냉각장치를 거치하기 위한 냉각장치 거치대 이다.



그림 3.3.4 냉각장치 거치대(Fan)



- 24 -

제 4 장 실험 방법

적외선열화상 기술을 이용하여 배관의 건전성을 평가하는 방법은 수동적 검사기법과 능동적 검사기법이 있다. 수동적인 검사기법은 대상체가 자체적으로 복사에너지를 방 출하는 경우 사용할 수 있으며, 능동적인 검사기법은 대상체를 냉각, 가열 등의 에너지 원을 대상체에 가하여 그 응답특성을 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 능동적인 검 사기법을 사용하여 배관의 감육결함을 검출하기 위해 냉각장치와 가열장치를 사용하였 다. 배관을 가열시키기 위해서 가열장치는 최대용량이 1000W인 할로겐램프 2개를 사 용하였다. 또한, 배관을 냉각시키기 위해서 냉각장치는 Fan방식을 이용한 배풍기 2개 를 사용하였다. 실험방법은 연속적인 가열 및 냉각방법과 위상잠금을 이용한 가열 및 냉각방법을 사용하였다. 시험에 앞서 시험편의 표면은 방사페인트를 도포하여 시험편 에서 표면 방사율이 0.95가 되도록 하여, 배관시험편에서 빛의 반사율을 최소화하였다. 최종 시험에서는 정상운전 중인 원자력발전소에 배관을 모사하기 위해 Mock-up Loop 를 제작하여 배관내부에 유체가 순환할 수 있도록 하였다. 유체는 높은 온도에서도 안 전성이 높은 실리콘 오일을 사용하였으며, 배관내부에 유체를 가열할 수 있도록 가열 장치를 사용하였다. 또한, 배관내부에 유체가 순활할 수 있도록 펌프를 사용하였으며, 펌프의 속도와 가열장치의 온도를 설정할 수 있도록 컨트롤러를 제작하였다. 실험은 정상 운전 중인 원자력발전소 2차측 온도와 동일한 250도를 유지하였으며, 유체는 펌 프를 통해 순환할 수 있도록 하였다. 위상잠금 적외선열화상기술은 온도변화가 작은 대상체에 사용되며, 검사시간이 빠르고 검사에 신뢰성이 높아 많은 분야에서 사용되고 있다. 고온의 배관인 경우. 냉각을 통하 배관의 감육결함 검출 방법은 온도변화가 작기 때문에 실험에서는 위상잠금 기법을 적용하였다. 본 연구에서는 연속적인 가열 및 냉 각방법과 위상잠금 기법을 사용하여 배관의 감육결함 검사에 최적화된 검사 방법을 개 발하는 것을 목표로 하여 연구를 수행 하였다.



- 25 -

제 1 절 연속적인 가열 및 냉각 방법

가열장치를 이용하며 배관 내부의 감육결함을 검출하기 위해 가열장치와 배관과의 거리, 가열장치의 수, 출력조절이 매우 중요하다. 실험장비는 적외선열화상 카메라, 가 열장치, 배관 시험편, 전원공급기, 컴퓨터 구성하였다. 그림 4.1.1은 가열장치를 사용하 여 배관의 감육결함을 검출하는 시스템을 보여준다. 가열장치를 이용한 배관 감육결함 검출은 발전소 정비기간에 이루어지기 때문에 상온 상태에서 수행된다. 따라서 온도는 상온인 상태를 유지하고, 최적의 검사조건을 찾기 위해 가열장치와 배관과의 거리, 가 열장치의 수, 출력 조절을 통해 배관의 감육결함을 측정하였다. 배관 시험편과 적외선 열화상 카메라와의 거리는 카메라의 해상도와 배관의 크기를 고려하여 약 1m에서 측 정하였으며, 배관 시험편과 가열장치는 1, 2m에서 각각 측정하였다. 가열장치의 수는 1, 2개를 사용하여 각각 측정하였으며, 가열장치의 출력은 60%, 80%, 100%로 조절하 였다. 실험 시간은 배관이 균등하게 가열될 수 있도록 60초 동안 수행하였다. 그림 4.1.2는 가열장치를 이용하여 배관의 감육결함 검출을 위한 장치의 구성을 나타낸다.



그림 4.1.1. 가열 원리(할로겐램프)

- 26 -



그림 4.1.2 가열장치를 이용하여 감육결함 검출을 위한 장치 구성



그림 4.1.3 냉각 원리(Fan)



- 27 -

냉각장치를 이용하여 냉각을 통해 배관 내부의 감육결함을 검출하기 위해서는 배관 내부의 온도를 고온으로 유지시켜야 한다. 본 실험에서는 배관내부를 가열하기 위하여 배관 내부에 가열테이프를 사용하여 내부 가열장치를 만들었다. 배관시험편 내부 가열 장치는 배관 내부를 균등하게 가열하기 위하여 2개의 가열테이프를 사용하였으며, 가 열테이프의 온도는 150도로 유지하였다. 또한 배관 내부에 온도를 고온으로 유지하기 위해 배관 내부에 내부 가열 장치를 삽입하였다. 그림 4.1.3은 냉각장치를 사용하여 배 관의 감육결함을 검출하는 시스템을 보여주고 있으며, 그림 4.1.4는 배관 내부를 가열 하기 위해 사용된 내부 가열 장치를 보여준다. 배관 내부 가열장치의 성능을 실험하기 위해 적외선열화상 카메라를 이용하여 배관의 온도 분포를 측정하였다. 그림 4.1.5는 배관 내부 가열장치의 온도분포를 보여주고 있으며, 그림 4.1.5를 통해 배관 내부 가열 장치의 온도분포가 균등하다는 것을 알 수 있다. 그림 4.1.6은 냉각방법을 사용하여 4 인치 배관 내부의 감육결함을 검출하는 모습을 보여주고 있다.



그림 4.1.4 배관시험편 내부 가열장치



그림 4.1.5 배관 내부 가열장치의 온도분포



- 28 -



그림 4.1.6 냉각장치를 이용한 냉각실험

제 2 절 위상잠금을 이용한 가열 및 냉각방법

위상잠금을 이용하여 배관 내부의 감육결함을 검출하기 위해서는 함수발생기와 전원 공급기가 필요하다. 위상잠금 기법은 함수발생기를 통해 출력주파수를 발생시키고, 카 메라와 가열장치 및 냉각장치를 동기화하는 방법이다. 위상잠금을 이용하여 배관의 감 육결함을 검출하기 위해서는 적절한 거리와 주파수를 사용해야 한다. 본 연구에서 사 용된 배관은 4인치 직관 시험편이며, 주파수는 배관의 크기와 두께를 고려하여 주기를 0.1Hz를 사용하였으며, 가열 및 냉각 시간은 30초 동안 측정하였다. 배관과 가열장치 및 냉각장치의 거리는 1m, 1.5m, 2m에서 각각 측정하였다.



- 29 -

제 3 절 Mock-up Loop에서 가열 및 냉각방법

본 연구에서는 실제 운전 중인 원자력발전소 배관을 모사하기 위하여 Mock-up Loop를 제작하였다. Mock-up Loop 내부에는 안정성이 높은 유체로 실리콘 오일을 사 용하였으며, 펌프를 이용하여 배관내부에서 유체가 순활 할 수 있도록 하였다. 배관 내 부 유체의 온도를 고온으로 유지할 수 있도록 가열장치를 사용하여 실제 가동 중인 원 전 2차측 온도인 250도를 유지시켰다. 본 실험에서는 감육결함을 검출하기 위해 Mock-up Loop내의 3개의 배관을 측정하였다. 그림 4.3.1은 Mock-up Loop의 설계 도 면을 보여 주고 있으며, 그림 4.3.2는 Mock-up Loop에서 가열실험을 수행한 모습을 보여주고 있다. 그림 4.3.3은 Mock-up Loop에서 냉각실험을 수행한 모습을 보여주고 있다.



그림 4.3.1 Mock-up Loop 설계도



- 30 -



그림 4.3.2. Mock-up Loop 배관 가열



그림 4.3.3 Mock-up Loop 배관 냉각





제 5 장 실험 결과

제 1 절 연속적인 가열 및 냉각 실험 결과

연속적인 가열방법을 통한 배관결함을 검출한 결과, 4인치 배관두께 대비 75%, 50% 결함이 모두 검출 되었다. 4인치 배관의 경우, 배관두께 대비 50%의 결함보다 75%의 결함이 더 잘 검출 되는 것을 알 수 있다. 또한 가열장치의 거리와 출력에 따라 시험 결과가 다소 차이를 보였다. 가열장치의 거리에 따른 실험한 결과, 1m의 거리보다 2m 의 거리에서 배관의 감육결함이 더 잘 검출되는 것을 알 수 있다. 배관과 가열장치의 거리가 1m인 경우에는 배관 중심에 있는 결함은 명확히 검출되었지만 양쪽 끝에 있는 결함은 명확하게 검출되지 않았다. 하지만 배관과 가열장치의 거리가 2m인 경우에는 램프의 출력과 상관없이 배관 내부의 모든 결함이 명확히 검출되었음을 알 수 있다. 이 실험을 통해 가열장치와 배관과의 거리가 배관내부의 감육결함을 검출하는데 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 한편, 가열장치의 출력변화를 통해 배관의 감육결함을 검 출한 결과, 가열장치의 출력이 60%일 때보다 80%, 100%에서 결함이 더 잘 검출 되는 것을 할 수 있다. 1m의 거리에서 가열장치 2개를 사용하였을 경우에는 배관이 국부적 으로 가열되어 배관 가장 좌측에 있는 50%의 결함 형상이 잘 보이지 않았다. 하지만 2m의 경우는 출력이 80%이상일 경우에 배관내부의 모든 결함을 명확하게 검출 할 수 있었다. 따라서 본 실험을 통해 연속적인 가열방법을 통해 배관의 감육결함을 검출하 기 위해서는 배관과 가열장치의 거리 2m에서 가열장치의 출력을 80%이상으로 설정하 였을 경우, 가장 효과적으로 배관의 감육결함을 검출할 수 있다는 것을 알 수 있다. 연 속적인 가열 실험을 통해 배관내부의 감육결함을 검출하기 위해서 배관과 가열장치의 거리와 출력이 모두 중요하다는 것을 알 수 있다. 그림 5.1.1은 4인치 배관 시험편을 연속적으로 가열한 실험결과이다.



연속적인 냉각방법은 4인치 배관 내부에 내부가열장치를 이용하여 표면온도가 최대 150도인 배관 시험편을 1m, 2m의 거리에서 냉각한 결과이다. 연속적인 냉각방법을 이 용한 배관 내부의 감육결함 검출 결과, 2m의 거리에서도 배관 내부의 모든 결함이 검 출 되었다. 냉각장치 2대를 사용하였을 경우, 냉각장치 1대를 사용했을 때보다 냉각효 과가 클 뿐만 아니라 배관의 50%의 결함까지 모두 선명하게 검출되었다. 하지만 냉각 장치 1대를 사용하였을 경우, 배관 중앙의 50%와 75%의 결함은 선명하게 검출 되었 지만, 배관양쪽 끝부분에 2개의 결함은 내부 가열장치의 온도차이로 인하여 결함이 선 명하게 검출되지 않았다. 배관내부 가열장치의 열이 중앙부분으로 집중되고 측면부분 에서는 열손실이 일어났을 것으로 판단되며, 배관 양쪽 끝부분의 결함이 경우 배관의 수두부와 가깝기 때문에 결함이 선명하게 검출 되지 않는 것으로 판단된다. 그림 5.1.2 는 4인치 배관 시험편을 연속적으로 냉각한 실험결과이다.



- 33 -



- 34 -



그림 5.1.2 4인치 배관 시험편 연속적인 냉각



제 2 절 위상잠금을 이용한 가열 및 냉각실험 결과

가열장치에 위상잠금 기법을 이용하여 배관 내부의 감육결함을 검출하면 배관 내부 의 결함을 모두 검출 할 수 있다. 배관 내부의 결함 위치뿐만 아니라, 크기도 정확하게 검출 할 수 있다. 위상잠금을 이용한 가열방법은 연속적인 배관 가열방법보다 검사시 간이 빠르고, 배관의 정상부와 결함부의 경계를 뚜렷하게 구분할 수 있다. 가열장치에 위상잠금을 이용하여 배관을 가열시켜 배관의 결함을 검출한 결과, 배관과 가열장치의 거리와 수에 상관없이 결함이 선명하게 잘 검출 되는 것을 알 수 있다. 그림 5.2.1은 4 인치 배관시험편을 위상잠금 기법을 이용하여 가열한 실험결과이다.

냉각장치를 이용하여 배관을 연속적으로 냉각시켜 배관의 결함을 검출하면, 결함은 모두 검출되지만, 결함부와 정상부의 경계가 명확하지 않으며, 배관 끝부분의 결함 또 한 명확하게 검출되지 않았다. 냉각장치에 위상잠금을 적용하여 배관을 냉각시켜 배관 의 결함을 검출한 결과, 2m에서 2개의 냉각장치를 사용하였을 경우, 배관 내부의 모든 결함을 검출 할 수 있었다. 1m에서 냉각장치 1개를 사용하였을 경우 노이즈가 발생하 여 결함이 명확하게 검출 되지 않았으나, 1.5m에서는 75%의 결함뿐만 아니라 50%의 결함까지 선명하게 검출되었다. 또한, 연속적인 냉각에서 정상부와 결함부의 경계가 뚜 렷하지 않았던 배관 끝부분의 결함 모두 선명하게 검출 되었다. 2m에서도 75%의 결함 과 50%의 결함이 모두 선명하게 검출 되었다. 위상잠금을 이용한 냉각방법에서 배관 과 냉각장치의 거리가 1.5m 이상에서는 배관의 결함이 잘 검출 되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 위상잠금 방법을 이용한 냉각방법은 냉각장치의 수가 크게 중요하지 않음 을 알 수 있다. 그림 5.2.2는 4인치 배관 시험편을 위상잠금을 이용하여 냉각한 실험결 과이다.



- 36 -



그림 5.2.1 4인치 배관 시험편 위상잠금을 이용한 가열





그림 5.2.2 4인치 배관 시험편 위상잠금을 이용한 냉각



- 38 -

제 3 절 Mock-up Loop에서 가열 및 냉각 실험 결과

그림 5.3.1(ㄱ)은 Mock-up Loop를 가동하지 않은 상태에서 연속적으로 2.5인치 배관 직관부(350mm)를 가열시켜 결함을 검출한 결과이며, 그림5.3.1(ㄴ)은 위상잠금을 이용 하여 2.5인치 배관 직관부(350mm)를 가열시켜 결함을 검출한 결과이다. 2.5인치 배관 직관부(350mm)의 경우, 연속가열 시 배관의 감육결함이 검출되지 않았으며, 위상장금 을 적용한 경우에는 두께의 50%의 결함까지 검출 되었다.

그림 5.3.2(ㄱ)은 연속적으로 2.5인치 배관 직관부(700mm)를 가열시켜 결함을 검출한 결과이며, 그림 5.3.2(ㄴ)은 위상잠금을 이용하여 2.5인치 배관 직관부(700mm)를 가열 시켜 결함을 검출한 결과이다. 2.5인치 배관 직관부(700mm)의 경우, 연속가열 시 배관 우측의 50%의 사각결함은 검출되었으나 배관 좌측의 경사결함은 검출되지 않았다. 하 지만 위상잠금을 적용한 경우는 배관 좌측의 25% 경사결함까지 모두 검출되었다.

그림 5.3.3(ㄱ)은 연속적으로 2.5인치 복합 배관을 가열시켜 결함을 검출한 결과이며, 그림 5.3.3(ㄴ)은 위상잠금을 이용하여 2.5인치 복합배관을 가열시켜 결함을 검출한 결 과이다. 2.5인치 복합배관의 경우, 연속적인 가열시 배관 직관부의 75%의 결함만 검출 되었지만, 위상잠금 적용할 경우 배관 직관부의 25% 결함과 좌측 곡관의 측면 결함까 지 검출되었다.

Mock-up Loop의 배관은 내부에 유체가 있기 때문에 연속적인 가열방법을 통해 배관 내부 감육결함 검출 시, 온도의 편차가 크지 않아 결함을 정확하게 검출 할 수 없었다. 하지만 위상잠금 기법을 사용한 경우, 영상처리를 통해 이미지를 보여 주기 때문에 배 관내부의 결함의 크기와 위치를 정확하게 알 수 있었다. 이 실험결과를 통해 배관 내 부의 유체가 있는 경우나 온도 변화가 작은 경우에는 위상잠금 기법을 사용하여 배관 내부의 감육결함을 검출하는 방법이 연속적인 가열방법을 통해 감육결함을 검출하는 것보다 더 효과적인 것을 알 수 있다.



- 39 -



(ㄱ) 연속적인 가열(ㄴ) 위상잠금 가열**그림 5.3.1** 2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(350 mm)



(ㄱ) 연속적인 가열
 (ㄴ) 위상잠금 가열
 그림 5.3.2 2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(700 mm)



(ㄱ) 연속적인 가열
 (ㄴ) 위상잠금 가열
 그림 5.3.3 2.5인치 복합배관 결함검출 결과



그림 5.3.4(ㄱ)은 1.5m의 거리에서 연속적으로 2.5인치 배관 직관부(350mm)를 냉각시 켜 결함을 검출한 결과이며, 그림5.3.4(ㄴ)은 위상잠금을 이용하여 2.5인치 배관 직관부 (350mm)를 냉각시켜 결함을 검출한 결과이다. 2.5인치 배관 직관부(350mm)의 경우, 연속 냉각시 감육결함이 검출되지 않았으며, 위상잠금을 적용한 경우에는 두께의 50% 인 감육결함까지 검출 되었다.

그림 5.3.5(ㄱ)은 1.5m 거리에서 연속적으로 2.5인치 배관 직관부(700mm)를 냉각시켜 결함을 검출한 결과이며, 그림 5.3.5(ㄴ)은 위상잠금을 이용하여 2.5인치 배관 직관부 (700mm)를 냉각시켜 결함을 검출한 결과이다. 2.5인치 배관 직관부(700mm)의 경우, 연속 냉각시 감육결함이 검출되지 않았으며 위상잠금을 적용한 경우에는 두께의 25% 의 감육결함까지 검출 되었다. 또한 사각결함 뿐만 아니라 경사결함도 모두 검출 되었 다.

그림 5.3.6(ㄱ)은 1.5m 거리에 연속적으로 2.5인치 복합 배관을 냉각시켜 결함을 검출 한 결과이며, 그림 5.3.6(ㄴ)은 위상잠금을 이용하여 2.5인치 복합배관을 냉각시켜 결함 을 검출한 결과이다. 2.5인치 복합배관의 경우 연속 냉각시 감육결함이 검출되지 않았 으며, 위상잠금을 적용한 경우 배관이 직관부(350mm), 곡관의 내호부, 외호부, 측면부 의 모든 감육결함까지 검출 되었다.

그림 5.3.7은 복합배관 우측곡관의 외호부 결함을 보여 주고 있다. 복합배관 우측곡관 의 외호부 하부 결함은 냉각장치에 직접적인 영향을 받지 않으므로, 배관 정면에서 감 육결함을 검출시 선명하게 검출되지 않는다. 따라서 복합배관 우측곡관은 냉각장치와 적외선열화상카메라의 위치를 조절하여 결함을 검출 하였다. 실험결과, 배관 외호부의 모든 결함이 선명하게 검출 되었다.

냉각장치를 사용하여 연속적인 냉각방법을 통해 Mock-up Loop 내의 배관의 감육결 함을 검출한 모습이다. Mock-up Loop의 배관은 내부에 250도의 고온상태의 유체가 순환하고 있기 때문에 연속적인 냉각방법을 통해서는 배관 내부의 감육결함을 검출 할 수 없었다. 하지만 위상잠금 기법을 사용한 경우, 미세한 온도변화도 영상처리를 통해 보여주므로 배관 내부의 결함의 크기와 위치를 정확하게 알 수 있었다. 이 실험결과를 정상운전 중인 고온의 배관은 위상잠금 기법을 사용하여 배관 내부의 감육결함을 검출 하는 방법이 연속적인 냉각방법을 통해 감육결함을 검출하는 것보다 더 효과적인 것을 알 수 있다.



- 41 -



(¬) 연속적인 냉각
 (∟) 위상잠금 냉각
 그림 5.3.4 2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(350 mm)



(¬) 연속적인 냉각
 (∟) 위상잠금 냉각
 그림 5.3.5 2.5인치 배관 직관부 결함검출 결과(700 mm)



1) 연속석인 냉각 (ㄴ) 위상잠금 그림 5.3.6 2.5인치 복합배관 결함검출 결과





그림 5.3.7 2.5인치 복합배관 외호부 결함검출 결과



제 6 장 결 론

이전의 많은 연구에서는 가열장치에 위상잠금 기법을 사용하여 배관 내부의 감육결 함을 검사 하였다. 본 연구에서는 정상운전중인 원자력발전소 배관 내부의 감육결함을 검출하기 위해서 적외선열화상 기술을 이용하여 냉각장치에 위상잠금 기법을 적용하였 다. 가열 및 냉각장치의 수, 거리, 출력을 조절하여 가장 최적화된 검사방법들을 연구 하였다. 실제 원자력발전소를 모사하기 위하여 Mock-up Loop를 만들었으며, 내부에 유체를 유입하고 펌프를 통해 순환시켰다. 원자력발전소의 2차계통 운전온도와 동일한 조건에서 실험하기 위하여 가열장치를 이용하여 유체의 온도를 250도로 유지한 상태에 서 실험하였다. 연속적인 냉각방법과 위상잠금 기법을 사용하여 냉각방법을 적용한 결 과, 연속적인 냉각방법으로 검출되지 않았던 배관 내부의 감육결함이 위상잠금 기법을 적용하였을 경우에는 검출되었다. 연속적인 냉각방법으로는 실제 유체가 순환하고 있 는 고온의 배관의 감육결함을 검출 할 수 없었다. 2.5인치 복합배관에 위상잠금 기법을 사용하면 내호부, 외호부, 측면부의 결함까지 모두 검출 할 수 있었다. 고온의 배관의 경우, 냉각장치를 이용하여 배관을 냉각하여도 온도변화가 적기 때문에 연속적인 냉각 방법으로는 감육결함을 검출 할 수 없다. 위상잠금을 적용한 검사는 극소의 온도변화 에도 이미지 처리와 열화상카메라와의 위상동기화를 통해 가장 최적화된 검사결과를 보여준다. 따라서 건전부와 결함부의 경계를 뚜렷하게 보여주어 결함의 크기와 위치를 정확하게 알 수 있다. 배관은 냉각된 후 다시 가열될 때에 순간적인 온도 차이를 보이 게 되고, 이러한 온도변화는 배관 내부의 감육결함을 검출하는데 매우 중요한 요소가 된다. 연속적인 가열이나 냉각방법은 검사시간이 위상잠금을 이용한 검사보다 시간이 길고, 장시간 배관을 가열하거나 냉각하였을 때 배관손상을 가져올 수 있다는 단점이 있다. 적외선열화상 기술에 위상잠금 기법을 사용한 방법은 결함이 자주 발생하는 원 자력발전소 2차계통의 감육결함을 검사하는데 매우 유용하게 사용될 것이다. 이러한 검사방법들은 원자력발전소의 배관뿐만 아니라 고온인 대상체의 결함을 검출하는데 사 용될 수 있다. 정상 운전 중에 배관의 감육결함을 검사하면 배관 파단에 의한 사고를 사전에 예방할 수 있으며, 발전소 정비기간에 작업자들의 정비시간을 단축시킬 수 있 을 것으로 예상한다.

- 44 -

References

[1] M. Frank, R. Hans, and S. Helmut, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Ageing–Related Aspects," Nucl. Eng. Des., vol. 207, pp. 307–316 (2001).

[2] P. K. Rastogi and D. Invalid, Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection. Elsevier Science, 2000.

[3] C. J. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation. New York: McGraw-Hill, 2003.

[4] K. H. Yoo, J. H. Kim, M. G. Na, J. W. Kim, H. C. Jung, and K. S. Kim, "Utilization of Lamp Lock-in for Wall-Thinned Defects Detection Using IR Thermography" Proc. of KNS Spring Mtg, Geangju, Korea, May, 30–31, 2013.

[5] K. H. Yoo, J. H. Kim, M. G. Na, and J. W. Kim, "In-Service Inspection of Wall-thinned Defects Using a Lock-in Technique of IR Thermography," Proc. of KNS Autumn Mtg, Gyoungju, Korea, Oct. 24–25, 2013.

[6] K. H. Yoo, J. H. Kim, G. U, Ko, M. G. Na, J. W. Kim, and K. S. Kim, "On-power Detection of Wall-thinned Defects in NPPs Using Lock-in IR Thermography", KPVP Autumn, Daejeon, Korea, Nov, 21–22, 2013.

[7] Ju Hyun Kim, Jae Hwan Kim, Sim Won Lee, Man Gyun Na, Jin Weon Kim, Hyun Chul Jung, and Kyeong Suk Kim., "On-power Detection of Wall-Thinned Defects Using IR Thermography in NPPs", Transaction of Korea Nuclear Society, pp. 1145–1146, 2012

[8] X. P. V. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. pp. 21–30, New York: John Willy & Sons, 2001.

[9] O. Breitenstein, W. Warta, and M. Langenkamp, Lock-In Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials. pp. 7–26, 2nd Ed., New York: Springer, 2010.

[10] K. S. Kim, H. S. Chang, D. P. Hong, C. J. Park, S. W. Na, K. S. Kim, and H. C. Jung, "Defect Detection of the Wall Thinning Pipe of the Nuclear Power



- 45 -

Plant Using Infrared Thermography," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 30, pp. 85–90 (2010).

[11] X. P. V. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. pp. 343–362, New York: John Willy & Sons, 2001.



감사의 글

실험실에 들어온 지가 엊그제 같은데 별서 졸업이라니 시간이 참 빠른 것 같습니다. 심험실에 들어와 처음 맡았던 과제가 적외선열화상을 이용하 원전 배관 결함 검사기술 개발 과제였습니다. 과제를 진행하면서 어려운 점도 많았지만 적외선열화상 검사에 대 해서 많은 것을 알게 되었고, 많은 사람들과 알게 되었습니다. 장비 개발을 위해 청계 천을 여러 번 다녀왔고, 광주에 있는 업체들 여러 곳을 다녀온 것 같습니다. 적외선열 화상 프로그램을 개발하기 위하여 밤을 새는 일도 많았으며, LABVIEW 자문을 위해 서 호남대학교(랩마스) 황보승교수님 자문도 구했으며, 며칠 동안 서울 한국내쇼날인스 트르먼트(주)에서 교육도 다녀왔습니다. 15층 실험실에서 실험하면서 실리콘 오일 냄새 를 많이 맡았고, 15층에서 민원이 들어와 모두가 퇴근한 후에 실험한 적도 있었습니다. 가열장치의 무게를 줄이기 위해 그램 단위의 저울을 구입하여, 나사 하나하나까지 무 게를 측정하여 최대한 가볍고 내구성이 높도록 제작 하려고 노력하였으며, 제어기 개 발과 장비들 개발을 위해 많은 고민을 했습니다. 열화상카메라 정비와 테스트를 위해 표준과학 연구원에 여러 번 갔었습니다. 과제가 마무리되어 교수님들과 에너지기술평 가원에 갔었던 기억도 남니다. 지금 생각해 보니 일을 하면서 참 즐겁게 했던 것 같습 니다. 연구를 하면서 저에게 도움을 주셨던 분들께 진심으로 감사드립니다. 먼저 램프 개발을 위해 도움을 주신 청계천의 영특수조명 사장님께 감사드리며, 램프 조도 측정 장비와 램프에 관해 조언해주신 광기술공학과 권민기교수님께도 감사드립니다. 과제를 공동으로 참여 하셨던 표준과학연구원에 박희상박사님께도 진심으로 감사드립니다. 이 외에도 기계설계공학과 김경석교수님과 정현철 박사님 그리고 같이 실험했던 기계설계 공학과 대학원생들에게도 감사드립니다. 저와 실험실 생활을 같이 했던 원전계측실험 실 재환이형, 박순호, 김주현, 김동영, 백주현 동료들에게도 너무 감사합니다. 열화상 과제 총괄책임자이신 김진원교수님께도 감사드립니다. 저를 열심히 지도해주신 조선대 학교 원자력공학과 김숭평교수님, 정운관교수님, 이경진교수님, 송종순교수님께도 감사 드립니다. 마지막으로 저의 지도교수님이신 존경하는 나만균교수님께 진심으로 감사드 립니다. 부족한 점이 많은 저를 항상 열심히 지도하여 주셔서 감사합니다. 끝으로 본 연구를 수행하면서 도움을 주신 모든 분들에게 감사드리며 항상 열심히 노력하는 사람 이 되도록 하겠습니다.



- 47 -