

위상잠금 열화상장치 제어용 랩뷰 프로그램 개발

Development of LabVIEW Program for Lock-In Infrared Thermography

민태훈*, 나형철*, 김노유*[†]

Taehoon Min*, Hyungchul Na* and Nohyu Kim**[†]

초 록 위상잠금 적외선 열화상장치를 제어하기 위한 랩뷰(LabVIEW) 프로그램을 기본적인 적외선 열화상 하드웨어와 함께 개발하였다. 개발된 열화상 제어 프로그램은 열화상 카메라와 할로겐램프를 임의의 주기함수로 동기화 시키면서 사이리스터 회로를 기반으로 랩뷰 소프트웨어에 의해 제어가 가능하도록 설계하였다. 개발된 프로그램은 스크린 메뉴 방식으로 구성되어 컴퓨터 화면에서 열원의 주기와 에너지, 적외선 카메라의 동작과 이미지 취득을 사용자가 자유롭게 변경하고 그 결과를 화면에서 확인할 수 있도록 제작되었다. 개발된 열화상 제어 프로그램과 장치를 이용하여 판재 내부의 원형인공결함의 이미지를 검사하여 광학 이미지와 비교하였다.

주요용어: 위상잠금 적외선 열화상장치, 랩뷰, 주기적인 열 자극, 비접촉 검사

Abstract A LabVIEW program has been developed together with simple infrared thermography(IRT) system to control the lock-in conditions of the system efficiently. The IR imaging software was designed to operate both of infrared camera and halogen lamp by synchronizing them with periodic sine signal based on thyristor(SCR) circuits. LabVIEW software was programmed to provide users with screen-menu functions by which it can change the period and energy of heat source, operate the camera to acquire image, and monitor the state of the system on the computer screen. In experiment, lock-in IR image for a specimen with artificial hole defects was obtained by the developed IRT system and compared with optical image.

Keywords: Lock-In Thermography, LabVIEW, Periodic Heat Excitation, Non-Contact Inspection

1. 서 론

1.1. 연구의 배경

위상잠금 적외선열화상기술(infrared thermography: IRT)은 능동적으로 열원의 에너지를 제어하여 입사파와 대상체의 복사에너지가 동시에 측정함으로써 검출된 복사량과 온도의 상관관계로부터 대상 물체의 결함을 검사한다. 이러한 열화상 기술은 물체 표면의 열 패턴을 2차원 이미지

로 손쉽게 생성할 수 있으며 이를 해석하여 원하는 결함부의 형상이나 위치를 영상으로 만들어 낼 수 있다. 그러므로 이 기술은 그동안 검사가 용이하지 않았던 미소결함이나 크랙, 내부 박리, 부식 등의 측정에 적용이 확대되고 있으며, 특히 표면 형상이 복잡하여 초음파검사가 불가능한 2차원 혹은 3차원 복합재료나 콘크리트 구조물 등에 유용하게 활용되고 있다[1-4].

하지만 국내에서 널리 사용되고 있는 위상잠금 열화상장치는 기본적으로 유럽의 열화상 카메라

제조회사에서 상용화하여 제공하는 회로장치와 부품을 이용하는 형태로써, 전문적인 연구개발을 위해 장비의 하드웨어나 사양을 변경하는데는 여러 가지 제약이 따르는 것이 현실이다. 예를 들어, 위상 잠금 기능을 위해 사용하는 조화파 동기신호를 다양한 형태로 생성하기 위해서는 적외선 영상장치의 하드웨어는 물론 소프트웨어 제어 기능을 손쉽게 변형하고 개선할 수 있어야 하는데 현재 수입되어 사용되고 있는 열화상장치로서는 그 작업이 용이하지 않다. 또한 경제적인 측면에서도 현장에서 필요한 특수목적의 열화상 기반 비파괴검사 장비를 개발하는 경우에도 적합하지 못한 경우가 많다. 그러므로 위상잠금 적외선 기술의 적용분야 확대와 시장성에 비추어 열적외선검사 장치나 운용시스템 자체에 대한 국내 개발이 필요하다고 하겠다.

본 연구에서는 LabVIEW 기반으로 위상함수를 생성하고 디지털전환장치를 통해 이를 송신/수신함과 동시에 할로겐램프와 열화상 카메라를 컴퓨터로 제어하는 기본적인 위상잠금 적외선 열화상장치를 개발하였다. 또한 개발된 시스템을 이용하여 금속 판재에 인위적으로 만들어진 원형 결함을 영상화함으로써 성능을 확인하였다.

2. 램뷰 기반 위상잠금 열화상장치

2.1. 위상잠금 열화상 이론

위상잠금 열화상기술에서는 변동 주기를 가지는 열부하를 대상체에 가하면서 입사열 부하에 의한 대상체의 복사에너지의 변화를 기준신호와 함께 측정하는데, Fig. 1의 할로겐램프가 $T = T_0 [1 + \epsilon \cos(\omega t)]$ 의 조화함수로 대상체를 가진할 때($\epsilon < 1$) 대상체로부터의 방사에너지 $I(x, t)$ 는 열전달 방정식과 스테판-볼츠만 법칙으로부터 다음과 같이 주어진다[5,6].

$$I(x, t) = \frac{8\epsilon\pi^5 f^4 T_0^4}{15c^2 h^3} e^{-\frac{x}{\mu}} \cos(\omega t - \frac{x}{\mu}) \quad (1)$$

식(1)에서 k 는 열전달 계수, C_p 는 비열, f 는 주파수, h 는 플랑크 상수, c 는 광속, ω 는 각속도,

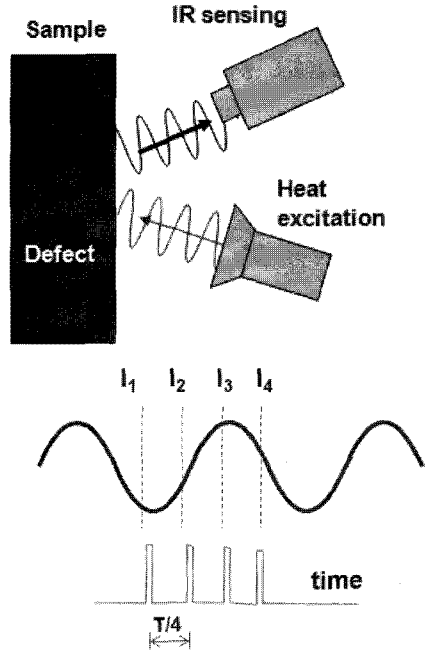


Fig. 1 Concept of lock-in IR thermography

$\mu = \sqrt{\frac{1}{2\pi f} \frac{k}{\rho C_p}}$ 는 열 침투깊이를 나타낸다. 이제 식(1)로부터 특정위치 x 에서의 에너지 $I(x, t)$ 는 열침투 깊이 μ 에 의해서 결정되므로, 만약 결함이 있는 부위라면 이 값의 변화로부터 방사 에너지가 달라지게 되고 이 변화를 측정하면 결함을 검출할 수 있다. 그런데 식(1)에서 이 μ 의 변화를 측정하는 방법은 두 가지인데 하나는 cosine함수 내에 있는 위상($\frac{x}{\mu}$)을 측정하거나, 지수함수의 크기, $e^{-\frac{x}{\mu}}$ 의 변화를 측정하여 구할 수 있다. 우선 위상($\frac{x_0}{\mu}$)을 측정하기 위해서는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 열원과 동기된 조화함수로 변화하는 방사에너지 $I(x, t)$ 를 변화 주기(T)의 1/4간격으로 $I_1(x, t), I_2(x, t + \frac{T}{4}), I_3(x, t + \frac{2T}{4}), I_4(x, t + \frac{3T}{4})$ 를 차례대로 측정하여 다음과 같이 결정할 수 있다[7].

$$\frac{x}{\mu} = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (2)$$

또한 이들 신호로부터 $I_0 e^{-\frac{x_0}{\mu}}$ 의 크기를 결정하는 것도 다음과 같이 가능하다.

$$I_0 e^{-\frac{x}{\mu}} = \frac{1}{4} \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2} \quad (3)$$

2.2. 하드웨어 장치

2.2.1. 장치의 구성

본 연구에서 개발한 실험 장치는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 크게 다섯 부분으로 나뉜다. 첫째는 대상으로부터 방사하는 열에너지를 감지하는 장치인 적외선 열화상 카메라이며 둘째는 대상체에 열원을 가하는 할로겐램프, 세번째는 할로겐램프의 교류 전력을 증폭/제어하는 SCR 사이리스터, 네번째는 할로겐램프와 카메라를 제어하고 데이터를 수집하는 인터페이스, 그리고 마지막으로 열화상 이미지 신호로부터 위상신호를 추출하고 이로부터 용접부의 결함을 검출해주고 모니터링 할 수 있는 소프트웨어부로 나누어진다. 이 다섯 부분은 전체적으로 LabVIEW에서 통제되고 운영되는데 IEEE-1394를 통하여 할로겐램프의 열가진 주기를 조절함과 동시에 적외선 카메라의 화상인식 타이밍을 동기시켜 대상체로부터의 신호를 수집함으로써 신호의 위상차 혹은 에너지 분포 변화를 구하는 위상장급 열화상 기법을 구현하였다.

할로겐램프는 LabVIEW와 NI사의 DAQ Board를 통하여 생성된 조화함수 형태의 AC 전압에 따라 디지털 전력조정기(SPR-D)에서 입력전력이 제어되었다.

2.2.2. 적외선 열화상 카메라

본 연구에서 사용된 열화상 카메라는 스웨덴 FLIR사의 Thermovision A20M이다. 이 열화상 카메라는 7.5~13 μm의 렌즈가 장착되어 있으며 측정범위는 -20~250℃이고 센서의 민감도는 +25℃에서 90~120 mK, 민감도는 0.12℃ at 30℃, 공간 해상도는 160×120 pixels, 비냉각식이며 IEEE 1394를 이용하여 PC와 연결가능하다. 카메라 디텍터 타입은 FPA microbolometer이며 최소 초점

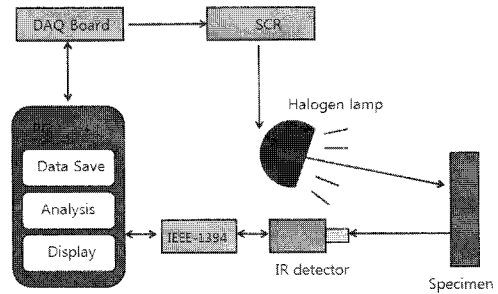


Fig. 2 Configuration of IR thermography

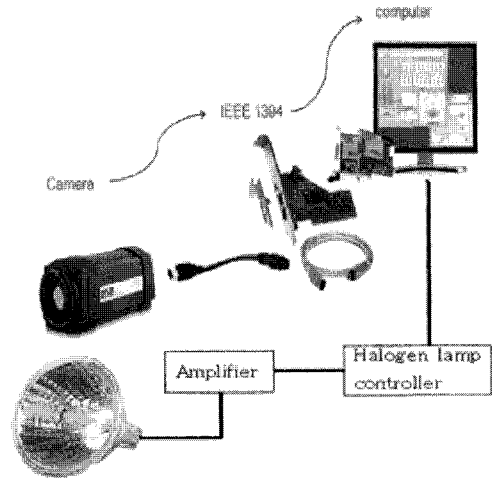


Fig. 3 Hardware structure of the developed IRT

거리는 30 cm, 이미지는 8-bit 칼라로서 60 Hz의 실시간 이미지 획득이 가능하고 이미지 전송은 firewire/ethernet으로 이루어진다. 이 카메라는 TTL 레벨에서 디지털 입출력 단자를 통해 외부 컴퓨터로 기능을 제어하거나 이미지를 실시간으로 전송받을 수 있으며 비교적 저가여서 본 연구에서 사용하였다. 그리고 카메라를 연결한 전체 시스템을 Fig. 3과 같이 구성하였다.

2.2.3. 할로겐램프 및 사이리스터 장치

원거리에서도 대상체에 높은 복사열을 가하기 위해서는 높은 광 강도를 가진 할로겐램프가 적합하다. 본 연구에서는 국내 제작된 할로겐램프 (23V, 1KW, PAR64 CP61 EXD) 1개를 가진 열원으로 사용하였다. 이 할로겐램프의 발열량을 임의의 함수형태로 조절하기 위해서 사이리스터 (SCR) 회로를 사용하였다. 사이리스터는 대용량

의 부하에 교류전력의 양을 제어하기 위해 사용되는 회로인데 본 장치에서 사용된 사이리스터(SCR)는 디지털 전력조정기(SCR-D series, 성완전기)로서 Fig. 4에 램프와 함께 나타내었다.

개발된 사이리스터는 컴퓨터에서 생성된 파형이 DAQ board에서 0~5V AC 전압 출력으로 입력되면 SCR로 승압된 위상제어를 함으로써 할로겐램프의 전력입력을 원하는 주기와 에너지로 컨트롤 하였다. 사용된 SCR의 정격전류는 5A, 제어 입력신호는 0~5V, 부하 종류는 고정 저항부하, 제어 방식은 위상제어(phase angle)방식이며 단상(single phase)을 사용할 수 있는 장치로 구성되었다.

2.2.4. 디지털-아날로그 입출력장치

할로겐램프를 임의의 가진 함수로 가진하기 위해서는 우선 컴퓨터(LabVIEW)에서 원하는 함수를 생성한 후 이 함수신호를 디지털 신호에서 아날로그로 변화하여 출력하여야 한다. 또한 동시에 카메라에서의 영상 신호를 컴퓨터에서 수집하기 위해서는 디지털 I/O, 아날로그 I/O 및 DAC기능이 가능한 회로가 필요하다. 이와 같은 신호입출력을 위해 NI사의 USB-6221 DAQ장치를 사용

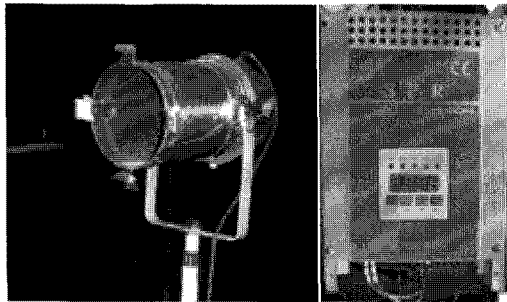


Fig. 4 Halogen lamp and thyristor(SCR)

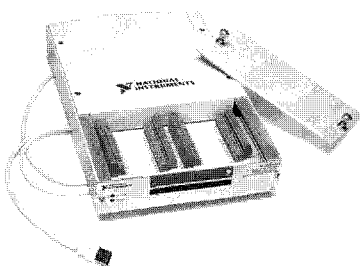


Fig. 5 Digital-analog data acquisition board (NI USB-6221)

하였다. 이 부품은 USB포트로 PC와 연결이 가능하고 제어가 간편하며 16개 아날로그 입력(16bit, 250 kS/s)과 2개의 아날로그 출력(16bit, 833 kS/s), 24개의 디지털 I/O(8개 clock)이 가능한데 본 연구에서는 1개의 디지털 I/O와 1개의 아날로그 출력을 사용하였다. LabVIEW 프로그램을 이용하여 DAQ board에서 1개의 디지털 신호를 생성하고 PC로 입력받아 열화상 적외선 카메라를 제어하였으며 1개의 아날로그 출력은 SCR를 통해 할로겐램프를 제어하였다.

2.3. LabVIEW 소프트웨어 개발

2.3.1. 프로그램 체계와 구성

적외선 열화상 시스템의 LabVIEW 소프트웨어의 구성은 다음 Fig. 6과 같다. LabVIEW는 직관

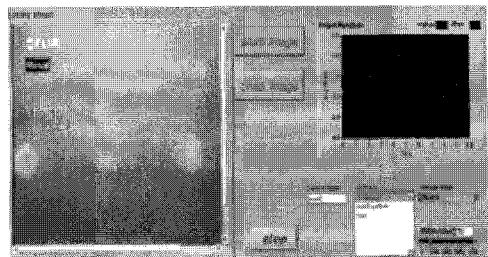
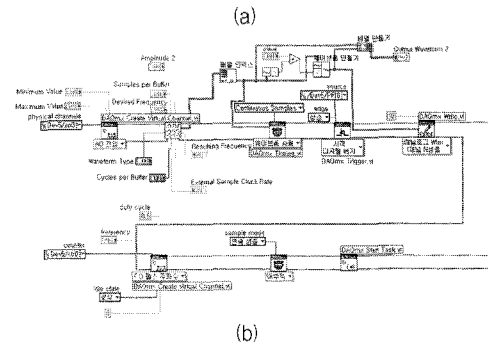
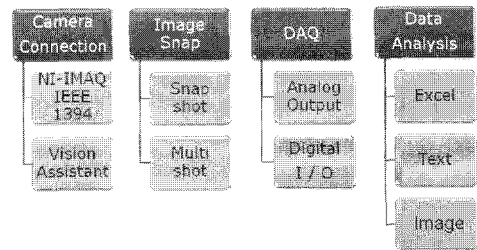


Fig. 6 LabVIEW program, (a) Function structure, (b) Control flow, (c) Front panel of control program

적인 그래픽 아이콘 및 흐름 차트를 이용하는 그래픽기반 언어 프로그램[8]으로서 Fig. 6(a)는 개발된 소프트웨어의 구성을 크게 4개의 기능별로 나타낸 것이다. 첫째는 적외선 카메라와의 인터페이스 부분이고 둘째는 카메라로부터 이미지를 수집(aquisition)하는 부분, 그리고 셋째는 동기된 열 가진원 신호를 생성하고 이를 SCR에 입력하여 제어하는 부분, 그리고 최종적으로 이미지 영상을 아스키 값이나 바이너리 값으로 컴퓨터에 저장하여 위상추출이나 다른 이미지 프로세싱 기능을 수행하는 부분으로 나누어진다. 이 4가지 부분들을 프로그램화하여 다이어그램으로 나타낸 것이 Fig. 6(b)이다. 완성된 LabVIEW 프로그램에 의해서 생성된 프론트 패널의 한 부분을 Fig. 6(c)에서 보여주고 있다. Fig. 6(c)의 프론트 패널은 대화식 사용자 유저 인터페이스이며 블록다이어그램을 통해 프로그래밍된 출력 화면을 직접 시각적으로 확인하고 제어할 수 있다.

프론트 패널에서는 할로겐램프로 공급되는 전원의 파형, 크기, 주파수(Hz)와 적외선 열화상 카메라를 실시간으로 제어할 수 있으며 적외선 열화상 카메라의 실시간 영상 및 결합 진단 영상을 확인할 수 있도록 작성되었는데 그 예시가 Fig. 7에 나타나 있다.

2.3.2. 동기화(Synchronization) 제어

열원(할로겐램프)을 조화함수의 형태로 대상체에 입사하고 적외선 열화상 카메라를 입사한 조화함수에 동기화시켜 조화함수의 위상변화를 복조하기 위해서 LabVIEW에서 아날로그 클럭(clock) 주기 신호를 생성하였다, 기본적으로 클럭 신호는 정현파 주기함수로서 원하는 주파수로 생성한 후 이를 D/A 변환기에서 출력 신호로 출력하여 사이리스터에 공급함으로써 할로겐램프들이 신호 주기에 따라 전력제어가 되도록 컨트롤 하였다. 그리고 LabVIEW에서 만든 이 클럭 신호를 트리거 신호로 열화상 적외선 카메라에 공급하고 제어하는 프로그램을 설계하였다. 이 클럭 신호와 램프 아날로그 신호의 각종 사양을 LabVIEW에서 사용자로부터 입력받아 제어할 수 있도록 팝업창을 만들었으며 이를 Fig. 7에서 보여주었다. 예시로서 LabVIEW에서 클럭 펄스를 4 Hz로 생성한 후 이 신호를 기본으로 할로겐램

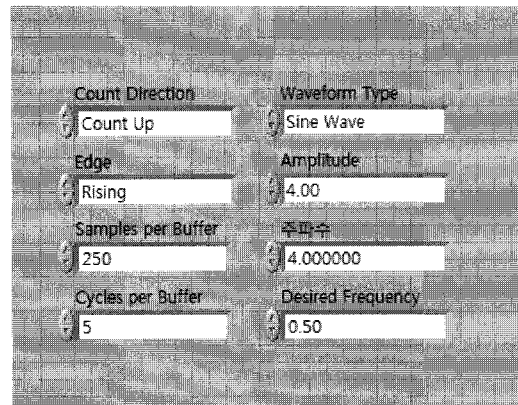


Fig. 7 LabVIEW front panel for the control of lamp and camera

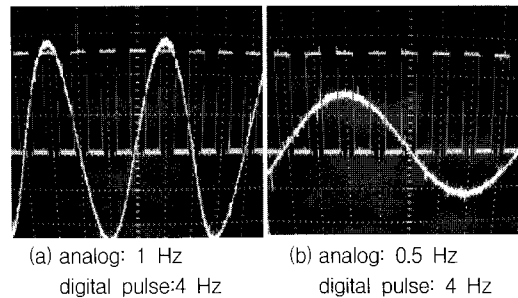


Fig. 8 Synchronization of control signals

프에 0.5 Hz와 1 Hz의 아날로그 신호를 발생시키는 과정과 결과를 Fig. 8에서 보여주고 있다.

2.3.3. 신호 처리 및 저장

본 연구에서 개발한 프로그램은 동기화된 사인 함수 혹은 주기함수에 대해 한 주기 동안 사용자가 지정하는 속도로 열화상 적외선 카메라에서 이미지를 취득하여 IEEE-1394(firewire)를 통해 PC로 전송하고 이를 LabVIEW를 통해 실시간 저장 및 분석할 수 있다. 예를 들어 Fig. 9(a)와 같이 PC로 전송된 한 프레임의 이미지(640×480 픽셀)를 컴퓨터 화면상에 표시하고 각 픽셀의 전압크기 데이터를 2D 배열의 데이터로 변환하여 컴퓨터에 저장할 수 있다.

Fig. 9(b)는 저장된 각 픽셀의 데이터를 아스키 데이터로 표시한 그림인데 데이터는 아스키 외에 binary 포맷은 물론 실험자의 확장자명 선택에 의해서 비트맵 이미지(bmp), 텍스트 문서(txt), 엑셀(xls) 등으로 저장되고 저장 폴더 지정이 가능

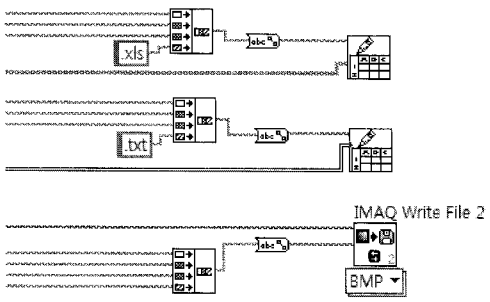


(a)

최소 배열

0	277654	144480	81306	212895	16543	140361	140398	148398	148398	148398	148398	148398	148398	16543
1	148398	16543	148398	148398	148398	148398	17571	83621	17571	17057	16543	148398		
2	277654	404949	212895	212895	212895	212895	16543	148398	17571	83621	17571	17571		
3	148398	16543	148398	148398	18089	18089	17571	17571	17571	83621	16089	18089		
4	148398	148398	17571	17571	17571	17571	148398	16543	148398	148398	17571	17571		
5	20151	20151	18089	17575	148398	148398	17571	83621	18089	215728	19123	18351		
6	19123	19123	18089	17575	17571	17571	17571	83621	17571	19123	17571	17571		
7	18089	18089	17571	17571	17571	17571	18089	215728	19123	19123	18089	17061		
8	18089	18089	18089	18089	8069	8069	17575	18089	18089	18089	18089	18089	17571	17067
9	16543	148398	17571	17571	17571	17571	18089	18089	18089	17575	148398	16543		
10	81306	81306	212895	212895	16543	148398	148398	148398	17571	17571	18089	18089		
11	212895	212895	148398	34580	18089	18089	18089	18089	20151	151738	20151	18351		
12	17571	345793	17571	16206	81306	81306	148398	148398	19123	216501	19123	18351		
13	19123	18351	19123	19123	18089	17575	18089	215728	20151	20151	20151	20151		
14	19123	19123	18089	17061	17571	17571	17571	18089	215728	19123	18351			
15	19123	18351	19123	216501	18089	17061	17571	83621	20151	415168	151738	20151		
16	19123	19123	18089	18089	18089	18089	18089	18089	19123	216501	19123	18351		
17	19123	216501	20151	20151	19123	19123	20151	20151	349634	481221	23243	23243		
18	151738	151738	20151	19381	18089	17575	19123	216501	151738	415168	20670	20670		
19	19123	19123	19123	19123	17571	17067	17571	83621	20151	20151	20151	151738		
20	19123	19123	18089	18089	17571	17067	17571	83621	19123	216501	20151	18351		
21	148398	16543	81306	14496	81306	212895	148398	148398	17571	83621	18089	18089		

(b)



(c)

Fig. 9 Data acquisition from image, (a) Sample image, (b) 2D array data of the sample image, (c) Data storage program

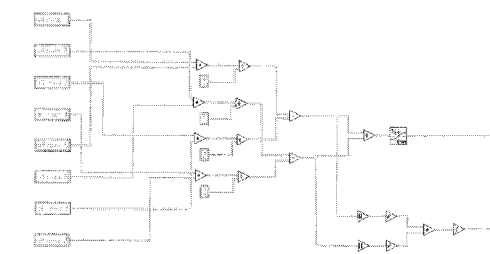


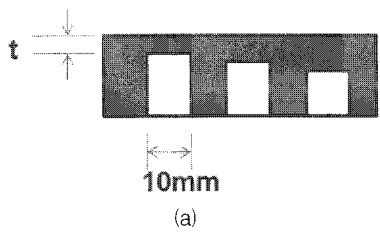
Fig. 10 LabVIEW program for calculation of image phase and amplitude

하고 이를 수행하는 프로그램을 Fig. 9(c)에 나타내었다. 각 데이터 파일은 클락 신호의 주파수에 따라 정확한 주기로 (최소 0.1 msec) 생성이 가능하고 이 주기는 열화상장치의 할로겐램프나 SCR의 제어신호와 동기화되도록 설계되었다. 측정된 각 픽셀에서의 신호값으로부터 식(2)의 I_1 , I_2 , I_3 , I_4 의 계산이 이루어졌으며 이 값들은 다시 이미지의 위상이나 크기 계산하는데 사용되었는데 이를 수행하는 LabVIEW 프로그램이 Fig. 10에 나타내었다.

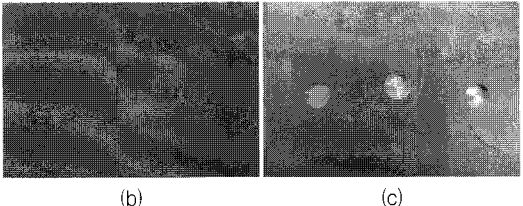
3. 실험 및 결과

개발된 적외선 열화상 시스템의 성능을 확인하기 위하여 Fig. 11과 같은 강판(150 mm × 100 mm × 10 mm)의 뒷면에 앞면에서는 보이지 않는 원형인공결함 3개를 만들었다. 각 홈의 지름은 10 mm로서 표면으로부터의 깊이 t 가 각각 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm 가 되도록 가공하였다. 결함들은 전방 표면으로부터는 결함을 인식할 수 없도록 주의깊게 가공되었으며 검사 표면은 검출을 용이하게 하기 위해 흑색 페인트로 도포하였다. 할로겐램프를 4 Hz 사인함수로 가진하면서 이 신호와 동기된 주파수로 시편에서 방사되는 적외선의 변화를 측정 후 각 이미지 픽셀에서의 위상을 식(2)에 의해 계산한 후 이를 이미지로 생성하였다.

이 이미지를 Fig. 12(a)에서 보여주고 있으며 Fig. 12(b)에서는 이 위상이미지에서 배경 노이즈 성분을 제외시킨 결함의 영상을 다시 보여주고



(a)



(b)

(c)

Fig. 11 Steel plate with circular defects, (a) Section view, (b) Front view, (c) Rear view

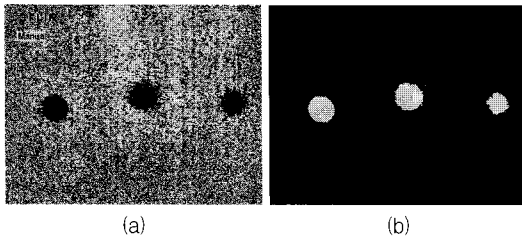


Fig. 12 Defect image of steel plate, (a) Phase image in lock-in thermography, (b) Filtered image

있다. 이 적외선 열화상 이미지로부터 결함의 위치는 물론 크기도 정량적으로 측정이 가능한 것으로 확인되었다. 다만 표면으로부터 결함의 깊이가 깊어질수록 결함의 크기가 작게 평가되는데 Fig. 12에서 결함의 깊이가 제일 작은 제일 왼쪽의 결함(깊이 0.5 mm)의 경우에는 실제의 결함 크기와 흡사한 정도로 화상이 얻어졌으나 제일 오른쪽에 위치한 결함(깊이 1 mm)은 오차가 상대적으로 크게 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 본 논문에서는 LabVIEW 기반 열화상장치의 개발에 주안점이 있으므로 결함의 검출 성능이나 신뢰성 등은 향후 연구과제에서 수행할 예정이다. 실험을 통해 결론적으로 본 연구에서 개발한 위상잠금 적외선장치가 성공적으로 인공결함의 이미지를 생성할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

위상잠금 적외선 열화상 시스템을 LabVIEW를 기반으로 하여 개발하였다. 사용자가 위상과 열원을 프로그램 상에서 손쉽게 제어하고 변경할 수 있도록 제작하였는데, 할로겐램프의 자동제어와 적외선 열화상 카메라간의 동기화, 주기 제어, 이미지 추출, 위상 추출을 LabVIEW의 프론트 패널 화면상에서 용이하게 수행할 수 있었다. 국외에서 제작된 상용 위상잠금 적외선 열화상장치에 비해 속도나 검출성능에서 뒤떨어지기는 하지만 본 연구에서는 LabVIEW를 사용하여 적외선 카메라와 할로겐램프를 제어하고 영상이미지를 구현할 수 있는 인터페이스를 자체 설계하여 위상잠금 열화상장치를 개발함으로써 열화상기술의 이해와 추후 연구의 기초를 마련하였다. 개발된 시스템을 이용하여 인공시편 실험을 통해 적외선 열화상기술이 표면 근처의 결함에 대해 전면적, 실시간, 온라인 검사가 가능함을 확인하였다. 본

연구에서 구축된 적외선 열화상기술을 통해 초음파-적외선기술 융합이나 다양한 비파괴검사 분야의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 한국기술교육대학교와 능력개발교육원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 장치 개발에 도움을 주신 강기수 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. Huth, O. Breitenstein, A. Huber, D. Dantz, U. Lambert and F. Altmann, "Lock-in IR-thermography-A novel tool for material and device characterization," *Solid State Phenomena*, Vol. 82-84, pp. 741-746 (2002)
- [2] 최만용, 김원태, "적외선 열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결함 진단", *비파괴검사학회지*, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531 (2004)
- [3] 최만용, 박희상, 박정학, 강기수 "위상잠금 초음파 적외선 열화상에 의한 겹치기 마찰교반 용접부의 결함 평가", *비파괴검사학회지* Vol. 30, No. 2, pp. 104-109 (2010)
- [4] 김재열, 양동조, 김창현, 송격석, 안재신, "적외선 열화상 카메라를 이용한 열적 결함부 자동 검출 모니터링 시스템 개발", *한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집* pp. 273-278 (2004)
- [5] 한용기, 최만용, 박정학, 김원태 "적외선 열화상을 이용한 금속재료 내부의 비파괴 결함 진단", *한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집*, pp. 157-163 (2004)
- [6] 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석 "위상잠금 광-적외선 열화상기술을 이용한 내부 결함의 위치 및 크기 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 27, No. 4, pp. 322-327 (2007)
- [7] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Lock-in thermography: basics and use for functional diagnostics of electric components," Springer, ISBN 3-540-43439-9, pp. 18-23 (2003)
- [8] 곽두영, "LabVIEW - 컴퓨터 기반의 제어와 계측", Ohm사, pp. 78-127 (2004)