

열교환기 브레이징 결함의 유형 분류 및 형상 디스플레이

Type Classification and Shape Display of Brazing Defect in Heat Exchanger

김진영*
(Jin-Young Kim¹)
¹Tongmyong University

Abstract: X-ray cross-sectional image-based inspection technique is one of the most useful methods to inspect the brazing joints of heat exchanger. Through X-ray cross-sectional image acquisition, image processing, and defect inspection, the defects of brazing joints can be detected. This paper presents a method to judge the type of detected defects automatically, and to display them three-dimensionally. The defect type is classified as unconnected defect, void, and so on, based on location, size, and shape information of defect. Three-dimensional display which is realized using OpenGL (Open Graphics Library) will be helpful to understand the overall situation including location, size, shape of the defects in a test object.

Keywords: brazing joint, defect type, defect shape, 3D display, heat exchanger, x-ray cross-sectional image

I. 서론

브레이징 접합을 이용한 열교환기에서 브레이징 접합의 품질은 열교환기의 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 요소의 하나이다. 브레이징 접합부에 결함이 존재하게 되면 열효율 하락은 물론 심한 경우 열교환기 파손이 생길 수도 있다. 이러한 브레이징 접합의 결함검사 방법으로는 부품을 직접 절단하여 검사하는 파괴 검사와 비파괴 검사가 있는데, 비파괴 검사방법에는 X-선 등을 이용한 방사선 투과법을 비롯하여 자분 탐상, 초음파 탐상, 음향 탐상, 와류 탐상, 침투 탐상 등의 방법이 있다[1-4]. 이 중에서, X-선 단층영상을 이용한 비파괴 검사방법은 브레이징 결함검사에 적용된 사례가 많지 않으나, 핀과 플레이트들이 층층이 쌓여 있는 열교환기의 접합부 검사에 아주 유용한 방법이다[5].

본 논문에서는 X-선 단층영상을 이용한 방법으로 검출된 열교환기의 브레이징 접합 결함에 대해 위치와 크기, 형상 정보 등에 기반하여 미접합(unconnected defect), 보이드(void) 등의 결함유형을 자동 판별하고, 또한 결함에 대한 3차원(3D) 디스플레이를 구현함으로써 결함 위치 및 크기, 형상 등을 포함한 전체적인 결함 현황을 쉽게 파악할 수 있도록 한다. 이를 위하여 우선 검사대상 시편에 대한 CT (Computerized Tomography) 기반의 X-선 단층영상을 획득하고, 이의 영상처리를 통해 결함검사를 수행한다[5].

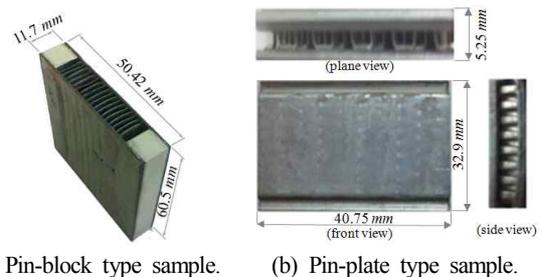
본 논문의 II 장에서는 검사대상 시편과 이에 존재하는 결함에 대해 기술하고, III 장에서는 결함의 유형 분류 방법을, IV 장에서는 결함형상의 3차원 디스플레이 방법을 제안한다. V 장에서는 대상시편에 대한 결함 유형 판별 및 디

스플레이의 실제 구현 결과를 기술하고, VI 장에서 본 논문의 결론을 기술한다.

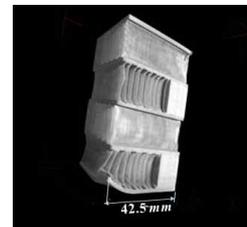
II. 브레이즈형 열교환기의 결함 분석

1. 대상 시편과 단층영상 획득

핀(pin)과 플레이트(plate)의 브레이징 접합을 기반으로 한 브레이징 열교환기에는 핀의 형상과 크기, 접합 형태에 따라 여러 종류가 있는데, 그림 1은 본 연구에서 대상으로 하는 시편들을 보여준다. 그림 1(a)는 얇은 핀으로 만들어진 요철 모양의 핀과 좌우 양 옆의 블록(block)이 위 아래의 플레이트에 브레이징 접합된 핀블록(pin-block)형 시편이며, 그림 1(b)는 핀의 요철면이 깊이 방향에서 서로 어긋나도록



(a) Pin-block type sample. (b) Pin-plate type sample.



(c) Jig-plate type sample.

그림 1. 브레이즈형 열교환기 시편.

Fig. 1. Test samples of brazing joint-based heat exchangers.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 9. 1., 수정: 2013. 1. 2., 채택확정: 2013. 1. 8.

김진영: 동명대학교 메카트로닉스공학과(kjy97@tu.ac.kr)

※ 본 연구는 국토해양부 LNG플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

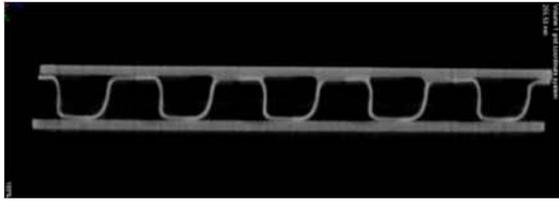


그림 2. X-선 단층영상의 예.
Fig. 2. Example of the X-ray cross-sectional image.

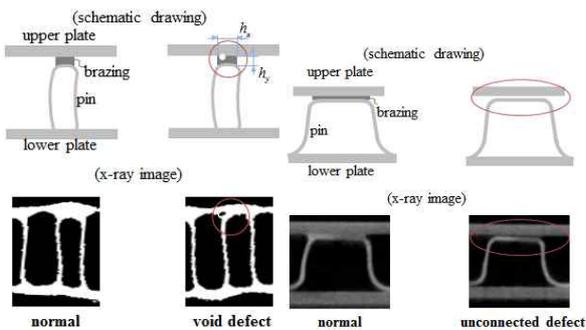
배치되어 위 아래의 플레이트에 접합된 핀플레이트 (pin-plate)형 시편이다. 그림 1(c)는 아랫단과 윗단의 핀의 방향이 서로 직교하도록 배치되어 총 4단으로 이루어진 지그플레이트(jig-plate)형 시편이다.

이들 시편에 대해 내부의 결합검사를 위해 CT를 이용하여 단층영상을 얻었는데, 검사 단면의 깊이 방향으로 핀블록형은 200장, 핀플레이트형은 120장, 지그플레이트형은 202장을 획득하였다. 이 중에서 핀플레이트형 시편의 X-선 단층영상의 한 예가 그림 2에 보여진다.

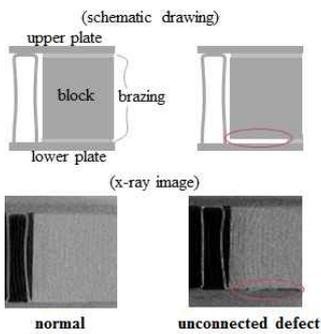
2. 브레이징 결함

검사대상 시편에 존재하는 브레이징 결함의 예가 그림 3에 보여진다. 그림 3(a)는 핀블록형 시편의 브레이징 접합부에 발생한 보이드 결함의 도해 및 X-선 영상을 보여준다. 브레이징 접합부가 완전히 채워지지 못하고, 기포 등으로 인해 내부에 빈 공간이 생긴 것으로, 이는 X-선 영상에서 검게 나타남으로써 결함이 확인될 수 있다.

그림 3(b)의 핀플레이트형 시편에서는 상부 플레이트와 핀 사이의 브레이징 접합이 제대로 되지 않은 미접합 결함



(a) Pin-block type sample. (b) Pin-plate type sample.



(c) Jig-plate type sample.

그림 3. 브레이징 접합의 결함 예.
Fig. 3. Examples of the brazing joint defects.

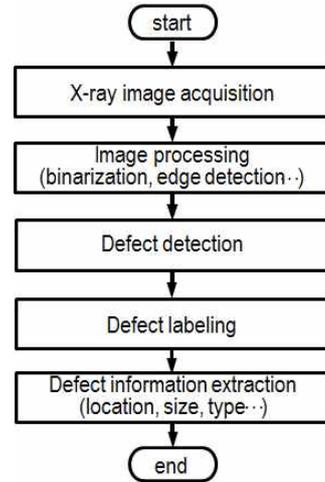


그림 4. 결합검사 과정의 흐름도.
Fig. 4. A flow chart of the defect inspection process.

의 도해와 X-선 영상을 보여준다. 정상적인 경우에는 핀과 플레이트 사이에 빈 공간이 없이 서로 밀착한 상태로 접합되어 있어야 하지만 미접합 결함의 경우에는 핀과 플레이트 사이에 빈 공간이 존재하고, 이는 X-선 영상에서 검게 나타나게 된다.

그림 3(c)의 지그플레이트형 시편에서는 블록과 플레이트 사이에 발생한 미접합 결함을 보여주는데, 브레이징 접합이 제대로 되지 않아 블록과 아래 플레이트가 떨어져 있음을 알 수 있다.

브레이징 접합의 결함에는 미접합, 보이드 이외에 크랙 (crack)도 발생할 수 있으나[6], 본 논문의 검사대상 시편에서는 나타나지 않았다.

III. 결함의 유형 분류

1. 결함 검출 및 레이블링

획득된 X-선 단층영상에 대해 영상 이진화 등의 영상처리를 거쳐 결합검사를 수행함으로써 열교환기 시편 내부에 존재하는 결함들이 검출될 수 있다[5]. 검사 과정은 그림 4와 같은데, 이를 통해 시편에 존재하는 결함 개수와 각 결함들의 위치, 크기, 형상정보, 유형 등을 파악할 수 있다.

본 연구에서 개발된 결합검사 시스템에서, 그림 5는 시

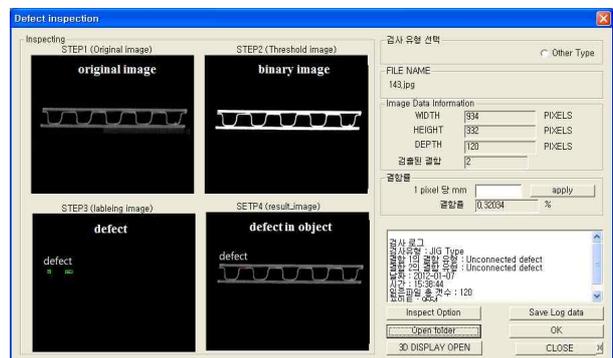


그림 5. 결합검사 시스템의 진행 화면.
Fig. 5. A window of the defect inspection system.

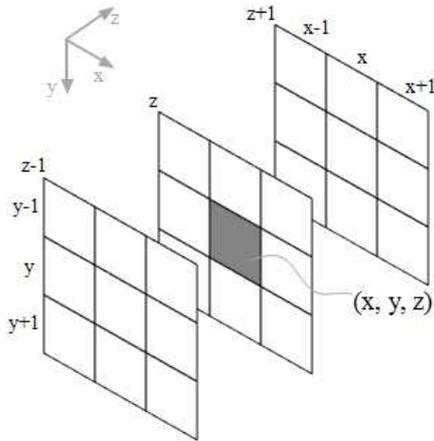


그림 6. 결함 영역의 레이블링 방법.
Fig. 6. Labeling of defect region.

편의 X-선 원영상에 대해 영상처리 및 결함검사가 진행되는 과정과 검출된 결함의 영상 및 관련 정보 등 검사 결과를 보여주는 한 화면이다. 결함 영역의 위치는 우선 한 장의 단층영상에서 결함에 해당하는 화소의 x, y 좌표를 얻을 수 있고, 단층면의 깊이 정보로부터 z 좌표를 얻음으로써 3차원 좌표를 모두 알 수 있다. 결함에 해당하는 화소들이 모두 검출되고 나면 인접해 있는 결함 화소들을 하나의 결함으로 묶고, 떨어져 있는 결함 영역은 또 다른 결함으로 구분한다. 이와 같이 하여 얻어진 구분된 결함 영역의 개수가 시편에 존재하는 결함의 개수인데, 각 결함에 대해서는 x, y, z 방향의 화소 수로부터 결함의 위치와 크기, 형상 등을 구할 수 있다.

우선 각각의 결함을 분리하기 위하여 레이블링(labeling) 기법을 이용한다. 레이블링이란 같은 연결 성분의 화소에 같은 레이블(번호)을 부여하고, 다른 연결 성분의 화소에는 다른 레이블을 부여함으로써 서로 떨어진 객체들을 구분하는 방법이다[7,8].

3차원 공간 상의 결함 영역 레이블링을 위하여 본 논문에서는 그림 6에 보여지는 바와 같이 (x, y, z) 의 결함 화소에 대해 같은 단면(z) 내의 주변 8개 화소와 전($z-1$), 후($z+1$)의 단면에서 각각 9개의 화소를 검색하여 이들 중에 결함이 존재한다면, 그 화소도 (x, y, z) 의 결함 화소와 연결된 것으로 보고 같은 레이블을 부여함으로써 결함들의 레이블링을 완성하였다. 부여된 레이블의 수가 곧 결함 개수가 되고, 하나의 결함에 대해 그 위치는 결함 영역의 도심(centroid)으로부터 구할 수 있다. 즉 x, y, z 축 방향의 총 화소수가 p, q, r 일 때 도심의 x, y, z 좌표 C_x, C_y, C_z 는 다음과 같이 된다.

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^p i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^p l_i}, C_y = \frac{\sum_{j=1}^q j \cdot m_j}{\sum_{j=1}^q m_j}, C_z = \frac{\sum_{k=1}^r k \cdot n_k}{\sum_{k=1}^r n_k} \quad (1)$$

여기서 l_i, m_j, n_k 는 각각 $x=i, y=j, z=k$ 인 화소들에 존재하는 결함 화소의 개수이다.

2. 결함의 유형 판별

앞에서 기술했듯이 보이드 결함은 브레이징 접합부 내부에 기포 등으로 인해 작은 빈 공간이 생긴 것이며, 미접합 결함은 핀과 플레이트 사이에 브레이징 납이 채워지지 않아 개방된 빈 공간이 생긴 것이다. 이에 기반하여 본 논문의 검사대상 시편에서는 결함의 외부가 모두 브레이징으로 채워져 있는 내부 빈 공간일 때 보이드로 판정하고, 결함부의 주위가 브레이징으로 전부 채워져 있지는 않은 개방된 상태일 때 미접합으로 판정하였다. 단 보이드의 크기가 브레이징 접합부 자체의 크기보다 클 수는 없다. 따라서 결함의 외부가 막혀있는 내부 빈 공간이라 할지라도 검사 단면에서 결함의 높이인 y 방향의 크기 s_y 가 핀과 플레이트 사이의 빈공간 높이 h_y 보다 작지 않다면 이는 미접합 결함으로 판정한다. 또한 결함의 폭인 x 방향의 크기 s_x 가 브레이징 접합부의 x 방향의 크기 h_x 보다 작지 않으면 역시 미접합 결함으로 판정한다. 이들 결함 크기 조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{If } s_x \geq h_x \text{ or } s_y \geq h_y, \text{ then it is unconnected defect} \quad (2)$$

IV. 결함의 3차원 디스플레이

1. 결함 데이터

결함의 위치와, 크기, 유형 등 결함정보를 파악하는 것 이외에 결함을 검사대상 시편의 외형과 더불어 3차원 그래픽으로 보여준다면 위치와 형상 등 결함 상황을 더욱 명확하고 빠르게 알 수 있을 것이다. 화면 상의 그래픽 디스플레이(graphic display)를 위해서는 대상물의 외형을 비롯한 주요 부분의 형상 데이터(shape data)와 더불어 결함부 화소의 x, y, z 위치 좌표로 이루어진 결함 데이터(defect data)가 필요하다.

시편의 형상 데이터는 그래픽에서 시편 내부의 결함 상대위치를 용이하게 알 수 있도록 하는데, 시편의 에지(edge) 영상에서 외형에 해당하는 부분의 화소 좌표로부터 얻을 수 있다.

2. 그래픽 디스플레이 화면 구성

본 연구에서 개발된 그래픽 디스플레이 프로그램은 MFC API (Application Program Interface) 환경에서 OpenGL 라이브러리를 이용하여 제작되었다[9,10]. 디스플레이 화면에 대상물의 형상 데이터와 결함 데이터를 불러와 3차원 그래픽 디스플레이를 구현한다. 또한 각각의 결함에 대해서 결함의 중심 위치, 크기, 체적, 유형 등 요약된 결함정보(defect information)도 함께 보여준다. 그림 7은 결함의 디스플레이 과정과 각 단계에 관련되는 데이터를 보여준다.

그림 8은 결함 디스플레이 시스템의 GUI (Graphic User Interface) 화면을 보여주는데, ①번 영역은 결함 및 대상물이 디스플레이 되는 메인뷰(main view)이고, ②번 영역은 빠른 명령 수행을 위한 툴바(tool bar) 모음이다. ③번 영역은 다양한 디스플레이 구현을 위한 기능제어 버튼들이 배치되어 있어서 디스플레이 형상의 확대, 축소, 이동, 회전, 색상 변경 등이 가능하도록 되어 있다.

특히 x, y, z 임의의 축에 대해 임의의 각도로 회전하

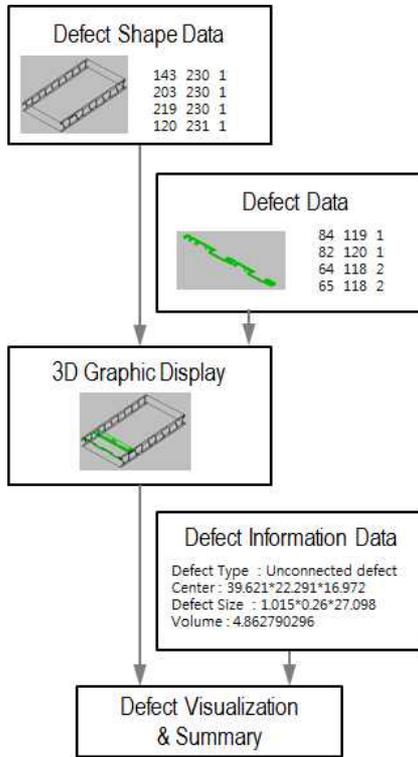


그림 7. 결함 디스플레이를 위한 과정과 데이터.
 Fig. 7. Procedure and data for defect display.

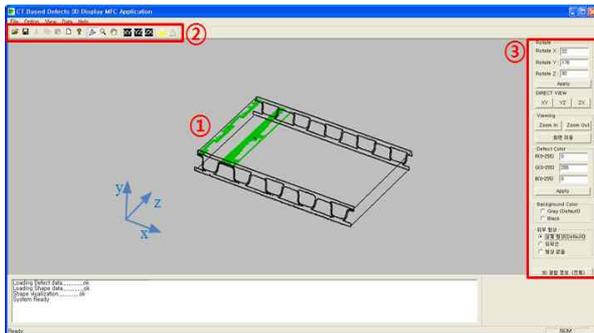


그림 8. 결함 디스플레이 시스템의 GUI.
 Fig. 8. A GUI of the defect display system.

는 것이 가능하고, 이는 마우스의 드래그(drag)만으로도 이루어질 수 있도록 하였다. 또한 결함을 클릭하면 해당 결함의 요약 정보가 보여진다.

V. 유형 판별 및 디스플레이 실험 결과

검사대상 시편들에 대해 결함유형의 자동 판별 및 3차원 영상 디스플레이 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 영상은 모두 비트맵 형식(bmp format)의 파일이며, 실제 시편과 획득된 영상의 대응 부위 비교를 통해 영상좌표를 실제 값으로 변환함으로써 결함의 크기를 측정하였다[5]. 그림 1(a)의 핀블록형 시편에서 가로 길이 50.42 mm는 573화소에서 대응하고, 따라서 1화소당 실제 시편의 길이는 0.088 mm가 된다. 그림 1(b)의 핀플레이트형 시편에서는 40.75 mm가 905화소이어서 1화소당 실제 길이는 0.045 mm, 그림

표 1. 핀블록형 시편의 검출 결함.

Table 1. Detected defect of a pin-block type sample.

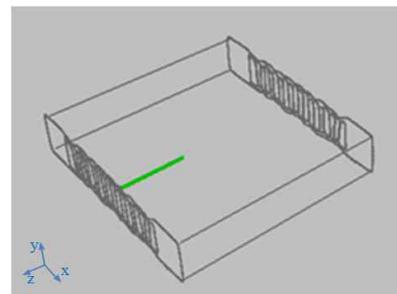
No	Actual size (n_a , mm)	Detected value (n_d , mm)	Accuracy(%) $\frac{n_a - n_d}{n_a} * 100$	Type
	$x * y * z$	$x * y * z$	x, y, z	
1	0.089*0.104*5.290	0.088*0.105*5.280	1.1, 1.0, 0.2	void

1(c)의 지그플레이트형 시편에서는 42.5 mm가 525화소에 대응하여 1화소당 실제 길이는 0.081 mm이다. 한편 실제 결함 개수와 각 결함들의 실제 크기 등은 X-선 영상의 수작업 관찰을 통해 얻어질 수 있고, 이들을 본 논문의 자동 검사 프로그램 결과와 비교함으로써 검사 프로그램의 유효성을 확인한다.

1. 핀블록형 시편 실험 결과

핀블록형 시편에서 확인되는 결함은 1개소의 보이드 결함 뿐이다. 존재하는 1개의 결함을 올바르게 찾았는데, x, y, z 방향의 가로, 세로, 깊이에 대한 크기 측정 결과는 표 1과 같다. 실제 값과의 비교를 통해 계산된 세 방향의 측정 정도 평균은 0.76 %이며, 200장의 모든 단층영상에 대한 검사완료 시간은 42.4sec이다.

결함유형의 판별도 브레이징 접합부의 내부에 존재하면서, 식 (2)의 크기 조건에도 위배되지 않는 보이드 결함으로 올바르게 판정되었다. 그림 9(a)는 시편 외형 및 결함을 디스플레이한 결과인데, 결함부를 선택하면 별도의 화면에서 그림 9(b)와 같이 해당 결함만을 디스플레이하고, 결함 유형 및 중심위치, 크기, 체적 등의 결함정보를 보여준다.



(a) 3D display.



(b) Detail information of each defect.

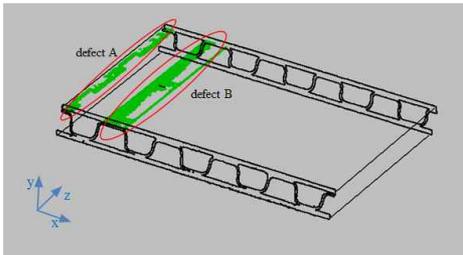
그림 9. 핀블록형 시편의 결함 디스플레이.

Fig. 9. Defect display of a pin-block type sample.

표 2. 핀플레이트형 시편의 검출 결함.

Table 2. Detected defects of a pin-plate type sample.

No	Actual size (n_a , mm)	Detected value (n_d , mm)	Accuracy(%) $\frac{n_a - n_d}{n_a} * 100$	Type
	$x * y * z$	$x * y * z$	x, y, z	
1	1.03*0.27*27.135	1.015*0.26*27.098	1.4, 3.7, 0.1	unconnected
2	1.35*0.16*27.135	1.337*0.154*27.095	0.9, 3.7, 0.1	unconnected



(a) 3D display.



(b) Detail information of each defect.

그림 10. 핀플레이트형 시편의 결함 디스플레이.

Fig. 10. Defect display of a pin-plate type sample.

2. 핀플레이트형 시편 실험 결과

핀플레이트형 시편에서 존재하는 결함은 2개소인데, 표 2는 검출된 결함의 크기 측정 결과를 보여주고, 여기서 측정 정도의 평균은 1.69 %이다. 또한 120장의 모든 단층영상에 대한 검사완료 시간은 30.2 sec이다. 그림 10(a)는 시편 외형 및 결함을 디스플레이한 결과이며, 그림 10(b)는 2개의 결함 중 결함 A의 상세 정보를 보여준다. 결함유형은 2개소 모두 핀과 플레이트 사이의 브레이징 접합이 제대로 되지 않은 미접합 결함이며, 둘 다 올바르게 판정되었다.

3. 지그플레이트형 시편 실험 결과

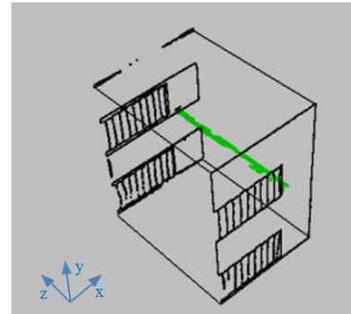
지그플레이트형 시편에서 존재하는 결함은 1개소이고, 표 3은 검출된 결함의 크기 측정 결과이다. 여기서 측정 정도 평균은 1.13 %이며, 202장의 모든 단층영상에 대한 검사완료 시간은 64.4 sec이다. 그림 11(a)는 시편 외형 및 결함을 디스플레이한 결과이며, 그림 11(b)는 검출된 결함만의 상세 정보 및 디스플레이 결과이다.

결함유형은 핀과 플레이트 사이의 브레이징 접합이 제대로 되지 않은 미접합 결함이며, 이는 올바르게 판정되었다.

표 3. 지그플레이트형 시편의 검출 결함.

Table 3. Detected defect of a jig-plate type sample.

No	Actual size (n_a , mm)	Detected value (n_d , mm)	Accuracy(%) $\frac{n_a - n_d}{n_a} * 100$	Type
	$x * y * z$	$x * y * z$	x, y, z	
1	3.871*0.164*27.785	3.807*0.162*27.702	1.6, 1.2, 0.5	unconnected



(a) 3D display.



(b) Detail information of each defect.

그림 11. 지그플레이트형 시편의 결함 디스플레이.

Fig. 11. Defect display of a jig-plate type sample.

VI. 결론

본 논문에서는 핀블록형, 핀플레이트형, 지그플레이트형 등 다양한 브레이즈형 열교환기 시편을 대상으로 하여 X-선 단층영상을 획득하고, 이로부터 결함 검출 및 검출된 결함에 대한 미접합, 보이드 등의 결함유형을 자동으로 판별하였다. 또한 대상 시편과 결함의 형상에 대한 3차원 디스플레이를 구현함으로써 결함 현황을 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 실험 결과 대상 시편에서 결함의 검출 및 유형 판정이 모두 올바르게 이루어졌고, 결함의 상세 정보와 더불어 3차원 디스플레이를 통해 결함의 위치 및 형상을 쉽게 파악할 수 있었다.

참고문헌

[1] D. Robinson, "Identification and sizing of defects in metallic pipes by remote field eddy current inspection," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 17-27, 1998.
 [2] T. D'Orazio, M. Leo, A. Distanto, C. Guaragnella, V.

- Pianese, and G. Cavaccini, "Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials," *NDT & E International*, vol. 41, no. 2, pp. 145-154, 2008.
- [3] Z. Han, H. Luo, J. Cao, and H. Wang, "Acoustic emission during fatigue crack propagation in a micro-alloyed steel and welds," *Materials Science and Engineering*, vol. 528, no. 25-26, pp. 7751-7756, 2011.
- [4] I. Valavanis and D. Kosmopoulos, "Multiclass defect detection and classification in weld radiographic images using geometric and texture features," *NDT & E International*, vol. 38, no. 7, pp. 522-528, 2005.
- [5] J. Y. Kim and S. W. Seo, "Defect detection of brazing joint in heat exchanger using X-ray image," *Journal of Control, Automation and System Engineering*, vol. 17, no. 10, pp. 1044-1050, 2011.
- [6] J. Y. Kang, "Brazing defect," *J. of the Korean Welding Society*, vol. 18, no. 2, pp. 11-13, Dec. 2000.
- [7] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2008.
- [8] L. He, Y. Chao, and K. Suzuki, "An efficient first-scan method for label-equivalence-based labeling algorithms," *Pattern Recognition Letters*, vol. 31, no. 1, pp. 28-35, 2010.
- [9] M. P. Baker and D. Hearn, *Computer Graphics with OpenGL*, Prentice Hall, 2004.
- [10] E. Lengyel, *The OpenGL Extensions Guide*, Charles River Media, 2003.



김진영

1985년 서울대학교 기계설계학과 졸업.
 1988년 KAIST 생산공학과 석사. 1999년 KAIST 자동화및설계공학과 박사.
 1999년~현재 동명대학교 메카트로닉스 공학과 교수. 관심분야는 생산자동화, 로보틱스, 메카트로닉스.