

논문 2009-46SP-6-15

비선형 구도해석에 의한 강관 CR영상의 기하학적 영역복원

(Geometric Region Reconstruction of Steel-tube Computed Radiography Using Nonlinear Structural Analysis)

황 재 호*

(JaeHo Hwang)

요 약

강관튜브를 엑스레이 선원의 방사선에 노출 시, 투과방사선은 통상 필름이나 근래 많이 사용되는 CR의 영상판 등에 검출된다. 검출된 방사선은 대상체의 양면 영역을 중복하여 관통하여 방사선 영상에는 내외부 매질 상태가 겹쳐서 나타나며 동시에 방사선 투과와 기하학적 배치에 기인한 비선형 왜곡이 영상에 반영된다. 본 논문에는 강관튜브 CR영상으로부터 영상을 복원하는 해석적 접근법을 제시한다. 방사선 강도, 매질에서의 흡수 및 방사선 입사에 따른 시준(視準)성분들과 연관된 기하학적 사양 등으로부터 특정 파라미터를 추출하여 원형인 강관튜브의 두 영역에서의 영상을 복원한다. 보정절차를 통해 실제 튜브에 근접한 영역 복구를 설계한다. 이러한 접근법을 CR영상에 적용하여 유용성을 확인한다.

Abstract

The steel-tube is exposed to a radiation from X-ray source. The transmitted radiation is detected by a detector, usually film or more recently an imaging plate(IP) of Computed Radiography(CR). The detected radiation overlaps the region of both sides of the object. The radiographic images reflect the projections of the rays, passing twice through both external and internal tube material. Nonlinear distortion due to the radioactive transmission and geometric disposition also appears on images. In this paper, an analytical approach is presented to achieve image reconstruction from the steel-tube CR images. Parameters related to radiation and measuring structure, such as intensities, absorption in material and geometric specifications linked with the collimating components, are calculated and identified in order to construct the removal images for twofold regions of circle-type steel tubes. A correction procedure for region recovery most similar to the true tube is designed. The application of this approach on CR images is shown and reconstructed results are discussed.

Keywords : Computed Radiography, Image reconstruction, Steel-tube, Measuring structure

I. 서 론

일정두께의 원형강관을 방사선 선원과 검출판의 사이에 위치시키고 방사선을 매질로 입사하면 입사방향과 수직으로 놓여진 검출판에 방사선 투과 및 흡수와 관련된 정보가 영상화되어 관측된다. 측정시 통상 감광판은 매질에 거의 밀착시키고 선원은 매질의 크기나 두께, 밀도 및 재질을 고려하여 이격거리를 둔다. 산업용으로

주로 사용하는 강관튜브는 탄소강이나 합금으로서 재질이 매우 단단하고 고온고압에 견디도록 제작하여 대형 발전소 보일러 수냉벽 튜브나 재열기 및 과열기 등의 초고압 조건에 적합하다. 이러한 강관의 재질 특성이나 상태를 관측하기 위해 종래까지는 필름 방식의 엑스레이 투과기법이 사용되었으나, 필름현상의 불편함과 시간지연, 필름영상의 낮은 선명도와 저해상도 및 작업자의 장시간 방사선 노출 위험 등의 문제로 근래에는 컴퓨터와 레이저스캐너판독기를 이용한 디지털 방식의 CR(Computed Radiography) 기법이 점차 확대 보급되고 있다^[1~2].

강관튜브의 방사선 영상판독은 투과결과가 영역화됨

* 정희원, 한밭대학교 전자공학과
(Dept. of Electronic Engineering,
Hanbat National University)

접수일자: 2009년3월21일, 수정완료일: 2009년10월26일

으로 가능하다. 일차적으로는 방사선에 전량 노출되는 바탕부와 매질이 위치했던 부분의 두 영역으로 나누어진다. 바탕부는 판독에서 배제시키고 투과부분은 두께부와 튜브내부로 구분하여^[3] 전자에서는 강관튜브의 두께를 정량적으로 산출하고^[4], 후자에서는 매질특성을 정성적으로 판독한다. 매질에서의 방사선 투과와 흡수과정을 거치면서 출력된 방사선은 검출되어 영상화하는데, 그 과정에서 잡음이 생성되고 왜곡현상이 나타난다^[5]. 또한 튜브내부는 방사선이 매질을 이종으로 통과한 결과가 중첩되어 하나의 영역을 구성하기 때문에 선원 인접 영역과 검출판 인접 영역을 영상에서 구분하는 것은 현실적으로 어려웠다.

최근 강관튜브의 필름영상작업에서 탈피하여 CR방식에 의한 영상의 디지털화가 진전되면서 IP의 스캐닝에 의한 고해상 처리된 CR영상을 정량적으로 분석하는 연구가 진행되어 왔다. 높은 방사선 에너지와 전압강도를 동반하는 강관튜브의 방사선 투과 실험을 통해 CR방식으로 취득한 영상에서 잡음이 가우시안 분포를 하고 있음이 규명되었고^[5], 측정 메커니즘 속에서 강관튜브의 기하학적 형태와 함께 측정패턴이 정량적으로 분석되고 분류되었다. 이를 토대로 방사선 투과와 측정에 따른 오차의 보정과 왜곡현상의 수학적 규명이 가능해졌고 영역의 특성분할과 추출이 이루어졌다^[6].

강관튜브 CR영상 연구는 궁극적으로 영상으로부터 영역을 분리하고 그 영역화된 영상에 내재된 매질의 정보를 추출, 복원하여 판독자의 시각적 내지는 수치적 근거를 제공함에 있다. 지금까지의 연구는 평면 관측되는 영역중복 영상을 대상으로 한 판독과 분석에 제한되어 있었다. 영상을 본래 대상체의 형태로 복원하기 위해서는 일차적으로 중복영상의 각 영역을 분리하는 작업이 선행되어야 한다. 이를 효과적으로 수행하려면 영상자체 처리로는 불가능하다. 검출판에 관측되는 영상데이터는 방사선 흡수, 투과 및 측정구도에 따른 측정자의 임의성과 에너지 강도, 노출시간을 비롯한 제반 비선형 왜곡과 잡음생성 요인들이 강관 내외경 두께의 이중 통과와 함께 혼재되어 있기 때문이다. 본 연구에서는 측정구도와 방사선 입사, 투과 및 흡수의 물리적, 수학적 해석을 통해 입사각과 각 위치에서의 방사선 강도를 수학적으로 규명하고 변환인자를 추출하여 영역 재구성에 수반되는 기하학적 구도를 형성함으로써 영역분리와 함께 영상을 복원하고자 한다.

II. 강관 CR영상의 해석적 접근

방사선 영상은 방사선선원-대상체-검출판의 측정 구도에 의해 내/외경의 원형구조가 평면 형태로 영상화하면서 영역들이 형성된다. 그림 1은 측정구도와 투영되어 영역화된 영상을 보여준다. 영역은 세 부분으로 나누어진다. 최외곽은 방사선에 전량 노출되는 바탕부로서 방사선 영상 회색도의 최하위에 위치하며 균일한 회색도를 유지하고 다른 영역과는 회색도 면에서 차별되므로 문턱치에 의해 손쉽게 영역분리가 가능하다. 바탕부는 분석에서 제외한다.

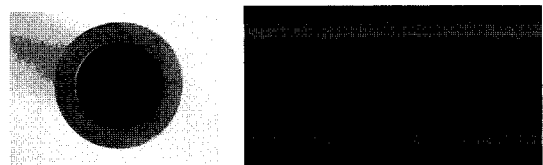


그림 1. 강관튜브와 CR방사선 영상 및 영역형성
Fig. 1. Steel-tube, CR image and its regions.

바탕부를 제외한 튜브영상은 다시 바깥 밝은 부분의 두께부와 양편의 두께부 사이에 위치한 튜브내부로 구분한다. 밝기 정도가 큰 두께부는 방사선 입사에 따른 두께 상승이 일어나는 영역으로서 영상복원시 튜브의 실제 두께 정보를 제공하나^[4] 그 외의 다른 정보는 없으므로 영역분석에서는 역시 고려하지 않는다. 영역해석의 대상은 튜브내부이다. 이 영역은 튜브의 용접, 균열, 침식, 부식 및 파열 등의 상태 파악을 위한 정보를 갖고 있다. 방사선 선원에서 방출된 방사선이 원형인 튜브를 통과하여 영상판(IP, imaging plate)에 도달하므로 튜브의 양편 두께층이 자연공간 사이에서 중첩되어 하나의 영상을 형성한다.

1. 영상 형성의 비선형 구도해석

방사선 투과측정의 기하학적 구도해석을 위해 다음의 조건을 설정한다.

- 조건 1 : 대상체인 원형 강관튜브의 내경, 외경 및 두께가 일정하다.
- 조건 2 : 매질의 밀도가 전범위에서 균일하고 균열, 파열, 용접 등의 결함요소가 없다
- 조건 3 : 방사선 선원은 점선원이다.

이상의 조건 1~3을 만족하는 원형강관튜브를 대상체로 CR방식에 의해 방사선 투과 측정을 실시하여 획득한 영상에 비선형 모델링에 근거한 영역구도 형성의

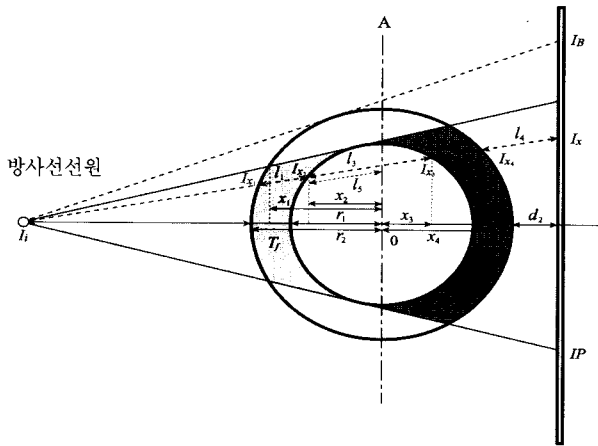


그림 2. 원형강관튜브 방사선영상 측정구조
Fig. 2. Measuring structure for circular steel-tube radiography.

해석적 접근을 시도한다. 조건 1~3을 설정한 이유는 영상으로부터 결함요소 추출판독에 앞서 정상 매질에서의 해석적 모델을 구현하고자 함이다. 정상매질 해석 모델을 근거로 한 비파괴시험을 위한 결함상태 판독은 후속연구과제로서 본 연구는 전자로 국한한다.

내경 r_1 , 외경 r_2 인 조건 1과 2를 만족하는 원형강관 튜브가 방사선 강도 I_i 인 선원으로부터 거리 d_1 의 측정 간격을 유지하고 그 반대편에 대상체와 거리 d_2 에 위치한 IP에서 방사선 영상을 취득한다. 그림 2에 측정구조를 보이고 있다. 점선원으로부터의 투과에 따른 기하학적 투영계적과 튜브내부의 양측 두께부가 영역으로 처리되어 있다. 전면 두께부 T_f 의 방사선 영역영상이 가상검출면 A에 나타나고 전후면 두께부 T_f 와 T_R 의 영역영상이 중복되어 IP에서 검출된다.

방사선 강도(intensity)는 자연공간에서는 식 (1)의 역자승법칙(inverse square law)과 매질에서는 비어의 법칙(Beer's law)에 의해 결정되므로^[7-8] 그림 2의 튜브내부 두께부 T_f 와 T_R 에 대한 방사선 영상영역형성을 고찰한다.

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{4\pi d^2} \tag{1}$$

$$I_{out} = I_{in} \exp(-l\mu) \tag{2}$$

여기서, I_{in} :투과 전 방사선 강도, I_{out} :투과 후 방사선 강도, d :거리, μ :흡수상수, l :매질의 두께

가. 두께부 T_f 의 영상영역 형성

그림 2의 측정구조에 식 (1)과 (2)의 역자승 법칙과 비어의 법칙을 적용하여 입사각 θ 에 대한 IP에서의 방사선강도 I_x 를 산출한다.

$$I_x = \frac{I_i}{a_1} \exp(-2l_1\mu) \tag{3}$$

$$\text{여기서 } a_1 = (4\pi)^3 \left(\frac{x_d l_3 l_4}{\cos \theta} \right)^2,$$

$$x_d = d_1 + r_2 - [2(d_1 + r_2)\tan^2\theta + \cos^2\theta \sqrt{r_1^2 \tan^2\theta - \tan^2\theta(d_1 + r_2)^2 + r_2^2}]$$

식 (3)에서 $l_1\mu$ 를 산출한다.

$$l_1\mu = -0.5 \ln(a_1) + \ln \sqrt{\frac{I_i}{I_x}} \tag{4}$$

바탕부의 방사선 강도를 I_B 라 할 때 θ_{max} 에서의 I_B 로부터 I_i 를 산출한다.

$$I_B = \frac{I_i}{4\pi d_i^2}, \quad d_i = \frac{d_1 + d_2 + 2r_2}{\cos \theta_{max}} \tag{5}$$

$$I_i = I_B 4\pi d_i^2 \tag{6}$$

식 (6)을 식 (4)에 대입하여 $l_1\mu$ 를 산출한다.

$$l_1\mu = -0.5 \ln(a_1) + \ln \left(d_i \sqrt{\frac{I_B}{I_x}} \right) \tag{7}$$

식 (6)과 (7)로부터 가상검출면 A에서의 θ 에 따른 방사선 강도 I_A 를 유도한다.

$$I_A = a_2 \sqrt{I_B I_x} \tag{8}$$

$$\text{여기서 } a_2 = \frac{d_i \sqrt{a_1}}{4\pi x_d^2 l_5^2} \cos^2\theta = \frac{2\sqrt{\pi} d_i l_3 l_4}{x_d l_5^2} \cos\theta$$

[유도과정]

$$I_{x_1} = \frac{I_i \cos^2\theta}{4\pi x_d^2} \tag{1}$$

$$I_{x_2} = I_{x_1} \exp(-l_1\mu) \tag{2}$$

$$I_A = \frac{I_{x_2}}{4\pi l_5^2} \tag{3}$$

식 ①, ②, (6) 및 (7)을 식 ③에 대입하여 정리한다.

나. 두께부 T_B 의 영상영역 형성

식 (6)과 (7)에 의해 방사선이 두께부 T_f 를 통과하지 않고 두께부 T_R 만에 입사되어 투과했을 경우, IP에서의 방사선 강도 I_{x_0} 를 구한다.

$$I_{x_0} = a_3 \sqrt{I_B I_x} \tag{9}$$

$$\text{여기서 } a_3 = \frac{d_l \sqrt{a_1}}{4\pi x_e^2 l_4^2} \cos^2 \theta = \frac{2\sqrt{\pi} d_l x_d l_3}{x_e^2 l_4} \cos \theta$$

[유도과정]

$$I_{x_3} = \frac{I_i}{4\pi \left(\frac{x_e}{\cos \theta}\right)^2}, \quad x_e = d_1 + r_2 + x_3 \quad \dots\dots \text{①}$$

$$I_{x_4} = I_{x_3} \exp(-l_2 \mu), \quad l_1 = l_2 \quad \dots\dots \text{②}$$

$$I_{x_0} = \frac{I_{x_4}}{4\pi l_4^2} \quad \dots\dots \text{③}$$

식 ①, ②, (6) 및 (7)을 식 ③에 대입하여 정리한다.

2. 영역분할과 영상복원

방사선 영상 취득 측정 구도에서의 두께부 T_f 와 T_R 각각의 검출면에서의 방사선 강도가 해당 입사각 범위 내에서 식 (8)과 식 (9)에서와 같은 영역을 형성하였다. 이때 파라미터 a_2 와 a_3 는 입사각 θ 의 함수이고 I_B 와 I_x 는 영상데이터의 화소값으로 측정되므로 입사각 θ 의 변동 범위에서 T_f 의 가상검출면 A와 T_R 의 IP상에서의 방사선강도를 영상데이터로 환산할 수 있다. 방사선 측정시의 기하학적 치수와 검출되는 영상의 화소값을 g_B, g_x 및 g_A 라 할 때, 입사각 θ 의 범위에 해당하는 영상의 영역을 분할 복원한다.

$$\text{두께부 } T_f \text{ 영상영역: } g_A = f_1(\theta) = a_2 \sqrt{g_B g_x} \tag{10}$$

$$\text{두께부 } T \text{ 영상영역: } g_{x_0} = f_2(\theta) = a_3 \sqrt{g_B g_x} \tag{11}$$

3. 실측영상에서의 구도 수정

산업현장의 방사선 실측에서는 $r_2 \ll d_1$ 이고 선원(線

源)이 점형태가 아니므로 방사선선원으로부터 대상 원형 강관튜브에의 방사선 조사(照査)가 수평으로 이루어져 앞에서 이론적으로 제시한 조건 3이 성립하지 않는 경우가 대부분이다. 이러한 수평입사인 경우 조사방향과의 수직 길이 q , ($0 \leq q \leq r_1$)에 대한 기하학적 거리는 다음과 같이 설정한다.

- i) $x_2 = x_3 = \sqrt{r_1^2 - q^2}$
- ii) $x_1 = x_4 = \sqrt{r_2^2 - q^2}$
- iii) $l = l_1 = l_2 = x_1 - x_2$

수평입사는 역자승법칙이 적용되지 않으므로 $I_i = I_B$ 이고 식 (3)과 식 (4)에는 거리의 영향이 배제된다.

$$I'_x = I_i \exp(-2l\mu) \tag{12}$$

$$l\mu = \ln \sqrt{\frac{I_B}{I_x}} \tag{13}$$

식 (12)과 식(13)으로부터 가상검출면 A에서의 q 변화에 따른 방사선 강도 I'_A 를 유도한다.

$$I'_A = \sqrt{I_B I_x} \tag{14}$$

마찬가지로 거리나 입사각의 영향이 배제되어 방사선이 두께부 T_f 를 통과하지 않고 두께부 T_R 만에 입사되어 투과했을 경우 두께 변화의 영향만 존재하여, IP에서의 방사선 강도 I_{x_0} 는 I'_A 와 동일하다.

이를 검출되는 영상의 화소값을 g_B, g_x 및 g'_A 와 g_{x_0}' 로 영역을 복원한다.

$$g'_A = g_{x_0}' = \sqrt{g_B g_x} \tag{15}$$

III. 검출 CR영상보정과 복원

측정에 의해 영역을 분할하고 식 (10)과 식 (11) 또는 식 (15)의 해석적 방식으로 영상을 복원하기 위해서는 기하학적 측정구도가 정위치해야 한다. 실제 방사선 측정에 의한 영상획득시 이 원칙을 준수하여 측정오차를 제거하는 것은 현실적으로 어렵다. 설혹 이 원칙을 지켜 원형튜브의 원점과 선원이 일직선상에 놓이고 그 선과 IP가 정확히 수직을 유지한다 하더라도 이는 튜브의

원형방향에만 해당하는 것으로 길이 방향에서의 비선형 왜곡은 불가피하다. 측정에 따른 왜곡이 원형방향과 길이방향에서 동시에 발생하기 때문이다^[9]. 그림 3은 이 두 방향의 왜곡현상과 관련인자들을 보이고 있다.

따라서 영상복원에 앞서 그림 4에 제시하는 바와 같은 보정을 위한 전처리 작업을 시행한다.

방사선 측정실험에 의해 원형강관튜브의 방사선 영상을 취득하고 영상 형성에 따른 원형방향과 길이방향

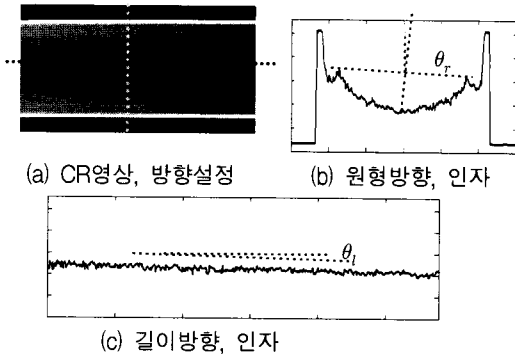


그림 3. 측정시 왜곡현상
Fig. 3. Measuring distortion.

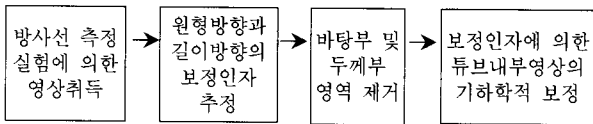


그림 4. 전처리 과정
Fig. 4. Preprocessing.

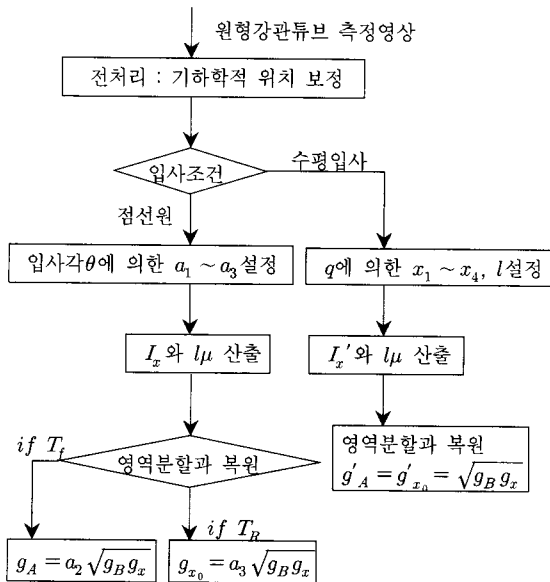


그림 5. 영역 복원 알고리즘
Fig. 5. Algorithm for region reconstruction.

의 경사도를 추출하여 보정인자를 추정한 후 영상데이터를 기하학적으로 보정한다^[9].

이때 영상데이터는 바탕부와 두께부가 제거되고 튜브내부 영역 영상데이터만 존재한다. 영상의 실측조건에 따라 식(10)과 (11) 또는 식 (15)를 적용하여 영역을 분할하고 각 영역의 영상을 복원한다. 그림 5는 영역분할과 복원알고리즘을 정리하였다.

IV. 실험과 고찰

FCR XG-1 Reader를 사용하여 원형강관튜브 시료들의 CR영상을 취득하였다.

실험 1: 표 1은 측정조건과 취득영상 및 영상데이터 분석으로 추정된 전처리용 보정인자들을 보이고 있다.

표 1. 측정 데이터와 검출영상들
Table 1. Measuring data and detected images.

강관튜브		시료 1	시료 2	시료 3	
측정조건	d_1	490	480	1100	
	$d_2 = 0$ d_1, r_1, r_2 : [mm]	r_1	19.0	15.0	18.5
		r_2	22.5	21.8	21.3
	θ_{max} : [rad]	θ_{max}	0.0087	0.044	0.024
보정인자	θ_r	0.009	0.048	0.025	
	θ_l	0.004	0.034	0.026	
g_B		66	62	56	
취득영상					

표 1의 측정조건에서 방사선 투과실험을 실시하여 취득한 영상은 실측영상으로서 $r_2 \ll d_1$ 이고 선원(線源)이 점 형태가 아니므로 조건 3이 적용되지 않고 수평입사로 처리한다. 점선원 입사는 현실적으로 실험실 환경이나 현장에서 실측에 의해 구현하기가 곤란하다. 그림 5의 수평입사 알고리즘을 적용하여 분할 복원한 영역 영상을 그림 6에 보였다. 그림 6의 영상은 바탕부와 두께부가 제거된 형태이다.

[결과 고찰] 취득원영상의 색도분포 형태가 복원영상에서 색도분포 폭이 반감되어 보존되어 있으며, 히스토그램

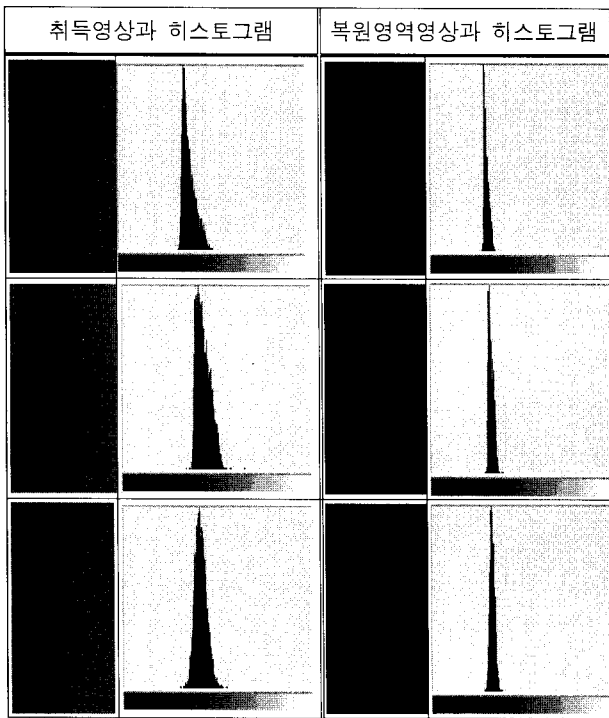


그림 6. 결과
Fig. 6. Results.

램 상에서 투과량이 큰 영역복원 효과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

실험 2: Ir192를 방사선선원으로 사용하여 평면입사시 원형강관튜브 CR영상을 그림 7(a)와 같이 취득하였다. 영상에는 양면 두께부와 일면 두께부 통과영역이 동시에 반영되어 있다. 그림 7의 결과에는 양면투과, 일면투과 영상 및 그림 5의 알고리즘에 의한 복원영역영상과 히스토그램들을 제시하고 있다. ($g_B=102$)

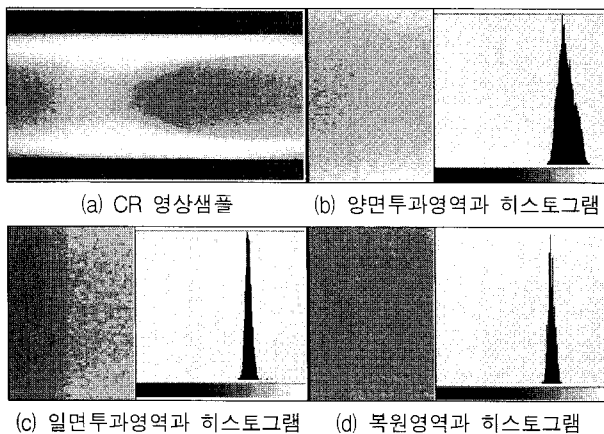


그림 7. CR영상샘플과 결과
Fig. 7. CR Image sample and Results.

[결과 고찰] 알고리즘에 의한 영역복원이 실측영상과 동일한 형태를 유지함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

실제 현장이나 실험실 환경 하에서 측정되는 실측 방사선영상에는 원형튜브 전후면의 두께부가 중첩되어 반영되므로 이를 분리하는 것은 물리적으로 불가능하였다. 본 연구에서는 측정 및 방사선 입사원리의 해석적 구조분석을 통해 입사 및 투과와 관련된 비선형 모델링을 수행하고 관련 인자를 추론함으로써 원형강관튜브 방사선영상에 내재된 영역을 분할하는 기법을 고안하였다. 방사선선원이 점선원인 경우와 평면입사의 두 경우로 나누어 영역분할을 시도하였다. 이론적으로는 점선원에서의 영역복원이 정확하나, 선원이 둥근 튜브형태이고 대상 원형강관도 직경이 크지 않아 방사선 평면입사가 대부분이다. 실험에서 취득한 영상도 후자로서 이들 취득영상에 알고리즘을 적용하여 분할영역영상을 복원하였다. 이 기법은 결함이나 용접부가 있는 원형튜브 방사선영상으로부터 특징을 추출하는 기본 기법으로 활용 가능하며, 동시에 해당 방사선영상의 입체복원에도 적용 가능하다. 이 작업은 후속연구과제로 남긴다.

참 고 문 헌

- [1] R. J. Patei, "Digital applications of radiography," in *Proc. of 3rd MENDT*, Manama, Barain, Nov. 2005.
- [2] E. Deprins, "Computed radiography in NDT applications," in *Proc. of 16th WCNDT*, Montreal, Canada, Aug. 2004.
- [3] 이의중, 방사선투과검사, 도서출판 골드, 205-214쪽, 2005년.
- [4] J. Belenkij, C. Müller and M. Scharmach, "A new method for radiographic image evaluation for pipe wall thickness measurement," in *Proc. of 15th WCNDT*, Roma, Italy, Oct. 2000.
- [5] 황중원, 황재호, "고강도매질 CR 영상의 잡음 모델링", 전자공학회논문지 제45권 SP편, 제5호, 95-102쪽, 2008년 9월
- [6] 황중원, 황재호, "산업용 CR 영상분석과 국부확률 선군집화에 의한 용접특징추출", 전자공학회논문지 제45권 SP편, 제5호, 103-110쪽, 2008년 9월
- [7] E. R. Williams, J. E. Faller and H. A. Hill, "New experimental test of Coulomb's Law: a laboratory upper limit on the photon rest mass,"

Physical Review Letters, Physical Review Letters, Vol. 26, pp. 721-724, March 1971.

- [8] H. H. Barrett and W. Swindell, *Radiographic imaging*, Academic Press, 1981.
- [9] 황중원, 황재호, "산업용방사선영상의 비선형모델링에 의한 영상복구", 전자공학회논문지 제45권 SP편, 제4호, 71-77쪽, 2008년 7월

저 자 소 개



황 재 호(정회원)

1982년 2월 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1986년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1994년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1982년~1992년 전력연구원 부장대리

1992년~현재 한밭대학교 전자공학과 교수

<주관심분야: 영상신호처리, 비전, DSP, 멀티미디어>