

논문 2008-45SP-4-8

# 산업용방사선영상의 비선형모델링에 의한 영상복구

( Image Recovery Using Nonlinear Modeling of Industrial Radiography )

황 중 원\*, 황 재 호\*\*

( Jung Won Hwang and Jae Ho Hwang )

## 요 약

이 논문은 산업용 방사선영상을 비선형왜곡의 영향으로부터 복구하는 방법을 제시한다. 비선형 형태의 모델을 구현하기 위해 역자승법칙과 비어의 법칙에 근거한 해석적 방법을 고안한다. 방사선 선원과의 위치설정에 따른 다양성에 기인한 기하학적 영향이 디지털화된 영상에 반영된다. 각도, 위치, 흡수상수, 길이, 너비 및 화소수 산출 등과 같은 파라미터 값으로 표현하는 모델관련 특성을 샘플영상과 일치하도록 모델 내에 수식적으로 규정하였다. 모델과 최근접한 영상으로의 복구를 위한 탄젠트 기울기 기반 보정기법을 고안하였다. 이 방식을 강판튜브 방사선영상에 적용하여 영상을 복구한 결과가 제시되고 논의된다.

## Abstract

This paper presents a methodology for recovering the industrial radiographic images from the effects of nonlinear distortion. Analytical approach based on the inverse square law and Beer's law is developed in order to improve a mathematic model of nonlinear type. The geometric effect due to dimensions of the radioactive source appears on the digitized images. The relation that expresses parameters values(angle, position, absorption coefficient, length, width and pixel account) is defined in this model, matching with the sample image. To perform the search for image recovery most similar to the model, a correction procedure is designed. The application of this method on the radiographic images of steel tubes is shown and recovered results are discussed.

**Keywords :** Industrial radiography, Image recovery, Nonlinear model, Steel-tube

## I. 서 론

산업계의 비파괴분야에서 방사선영상진단은 강판류의 용접부를 비롯한 각종 튜브, 파이프, 금속후판 등의 결합상태나 결합과 부식의 진행정도 및 내부 구조를 파악하고 진단하는데 중요한 시각적 근거를 제시해왔다<sup>[3]</sup>~<sup>[4]</sup>. 최근 몇 년 동안 방사선영상진단 분야에는 디지털 기법이 도입되면서 컴퓨터 분석제어 시스템과 연계한 DR(direct radiography) 및 CR(computed radiography) 방식이 속속 개발 보급되고 있다. 그러나 이를 디지털

방식은 실험실환경 혹은 측정조건이 갖춰진 장소에서 일부 사용되고 있을 뿐 대다수 현장에서는 전통적인 엑스레이 필름감광방식을 고수하고 있다. 디지털방식들이 디지털화된 영상취득이나 직접적인 컴퓨터 분석과 영상 처리가 가능하다는 이점이 있는 반면, 측정 편의성이나 간편함 및 이동측정의 용이성이라는 현장적용 면에서 해결해야 할 문제가 남아있기 때문이다<sup>[1]~[2]</sup>. 필름감광, DR 그리고 CR로 이어지는 진단 방식들의 발전은 결국 보다 광범위한 영상을 신속하고 간편하게 획득하기 위함이라고 할 수 있다.

방사선영상 취득은 일 단계인 대상체로의 방사선투과와 두 번째 단계의 영상의 데이터화로 구분된다. 필름감광방식, DR 및 CR의 세 방식은 두 번째 단계에서는 차이가 있으나 측정 일 단계에서는 기본 구조가 동일하다. 방사선선원(source)-대상체-검출판(detector)의 기본 측정 구조에 의해 매질의 방사선투과 결과가 검출

\* 학생회원, 한양대학교 대학원 전자컴퓨터통신공학과  
(Dept. of Electronics Computer Engin., Hanyang University)

\*\* 정회원, 한밭대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronic Engin., Hanbat National University)

접수일자: 2008년1월31일, 수정완료일: 2008년4월18일

판 표면에 영상화한다. 측정 방식의 차이는 필름방식에서는 필름을, DR에서는 반도체 평판 스크린, CR에서는 휘진성 형광물질이 도포된 IP(image plate)를 사용한다는데 있다<sup>[1~2]</sup>. 어떠한 방식을 선택하든 그 결과는 영상화되어 판독자에게 제시되고 판독자는 자신의 시각적 판별 능력, 경험 그리고 숙련도에 의해 진단하고 판단한다. 판독 결과는 주관적이고 경우의존적이다.

문제는 어떠한 측정 방식을 선택하든지 방사선 영상은 매질을 투과한 광자의 분포특성이 검출판에 반영되어 영상이 생성되는 것일 뿐 대상체의 기하학적 구조와 비례가 보존되거나 실체가 투영되는 것은 아니라는 점이다. 측정상의 기하학적 요인과 방사선 방출, 흡수 및 투과에 따른 양자특성에 의해 관측된 영상에는 본래 대상체가 갖고 있는 구조 정보에 비선형 왜곡이 발생한다. 이러한 비선형성이 다양적으로 나타나기 때문에 판독자는 영상으로부터 정확한 정량적 판별보다는 경험에 의존한 정성적 판단을 내릴 수밖에 없었다. 수치적 정확도보다는 영상의 선명도가 먼저 해결해야 할 과제였다.

방사선영상의 정량적 연구는 영상복구 및 재구성을 통한 진단의 정확도 향상 면에서 매우 중요하다. 더욱이 비선형 특성의 수학적 추정은 측정 부위에서의 정량적 추적과 추출, 패턴분류 및 이상 징후 진행 상태의 정량적 예측에 필수이다. 그러나 종래까지의 산업용방사선 영상에 관한 연구는 주로 고화질이나 선명도향상, 에지 처리 및 잡음제거에 치중해 있었다. 측정에 따른 왜곡 현상은 정확한 수치적 접근이 아닌 제품 개발시 제작사에서 제공하는 영상생성에 관한 기술시험 분석보고서 정도이다. 영상왜곡에 관해서는 측정의 기하학적 인자인 거리와 조사(照査)각도를 고려하여 엑스레이영상으로부터 강판 튜브 두께를 역으로 계산하는 방식<sup>[6~8]</sup>이 소개되었을 뿐이다. 측정구도의 역학적 구조와 방사선 방출, 흡수 및 투과에 따른 영상생성에 관한 수치적 학술연구는 거의 전무하다.

본 연구에서는 대용량발전소 초임계압보일러 수벽(water wall) 강판튜브의 방사선영상을 대상으로 하였다. 평판과 원형튜브로 구분하여 방사선 조사, 흡수 및 투과에 따른 역자승법칙(inverse square law)<sup>[9]</sup>과 비어의 법칙(Beer's law)<sup>[10~11]</sup>을 결합한 방사선영상 생성특성을 규명하고 그 수학적 모델을 제시한다. 그리고 수치적으로 처리된 비선형 모델과 영상화소의 배열을 근거로 물리적 내지는 기하학적 파라미터들과 함께 비선형성에 의해 왜곡된 영상의 복구를 시도한다. 측정된

방사선영상은 일반적인 영상처럼 대상체의 시각반영이 아니므로 원영상으로의 영상복원은 불가능하다. 이러한 경우 영상에 내재된 비선형 왜곡을 선형적으로 회복시키는 의도로서 영상복원(reconstruction)보다는 영상복구(image recovery)라는 용어를 사용함이 적절하다.

방사선투과 실험을 위해 평판 및 강판튜브시편을 제작하였다. 실험실환경에서 엑스레이조사장치를 통해 필름감광 또는 CR 방식을 사용하여 방사선영상을 취득한다. CR장치로는 일본 FUJI사의 FCR XG-1 NDT를 사용하였다. 이하 제Ⅱ장에서는 비선형모델링과 영상복구기법, Ⅲ장에서는 방사선측정실험을 통해 특성을 확인하고 영상복원을 시도하며 Ⅳ장에서는 결론을 맺었다.

## II. 비선형 모델링

방사선투과는 매질과 매질이 위치한 자연공간에서 진행한다. 방사선의 광자속(flux of photons)은 자연공간에서는 역자승법칙에 의해 식 (1)과 같이 선원으로부터의 거리의 자승에 반비례하다. 방사선이 투과하는 매질 전후의 방사선량은 식 (2)로 표현하는 비어의 법칙에 의존한다.

$$I_{ir} = \frac{I_i}{4\pi r^2} \quad (1)$$

$$I_{out} = I_{in} \exp(-\mu\lambda) \quad (2)$$

여기서  $I_i$ : 선원방출 방사선량,  $r$ : 선원으로부터의 거리,  $I_{ir}$ : 거리  $r$ 에서의 방사선량,  $\lambda$ : 대상체 매질의 두께,  $\mu$ : 흡수계수(absorption coefficient),  $I_{in}$ : 매질의 입사 방사선량 그리고  $I_{out}$ : 매질 통과 직후의 방사선량이다.

**측정조건 1:** 방사선 선원은 점선원이다.

**측정조건 2:** 대상체가 내경과 외경에 의한 두께를 갖는 원통형으로서 길이  $l$ , 외경  $r_o$ 에 대하여  $l \gg r_o$ 가 성립한다. 평판인 경우 너비  $w$ 에 비해  $l \gg w$  이면 비선형 왜곡은 길이방향으로만 발생한다.

**측정조건 2가 성립하기 위해서는** 선원에서의 방사선방출 조사각도  $\theta$ 가 평판 대상체 너비의 범주 내에서  $\theta \rightarrow 0$  이어야 한다. 이는 선원과 대상체와의 거리를 충분히 이격시켰을 때 가능한 현상이다.

방사선선원-대상체인 매질-검출판의 일련의 측정구조는 자연공간에서 설정되며 선원으로부터의 방사선 조사는 입사각  $\theta$ 를 수반한다.  $\theta$ 는 모델링 전 과정에서 영

상의 기하학적 생성에 기여하는 중요한 변수이다. 자연 공간에서의 방사선량 계산은 역자승법칙, 매질에서는 비어의 법칙을 적용하여 선원에서의 방사선량에 대한 검출판에 도달하였을 때의 방사선량을 산출한다. 본 연구에서 영상형성은 일정두께의 평판매질과 원형튜브라는 두 대상체에서 고찰한다. 전자를 통해 두께 변화에 따른 비선형인자를 추출하고 입사각에 의한 영상화소값 변형의 보정요소가 추정된다. 후자에서는 전자보다 더 복잡한 기하학적 해석으로 매질의 원형굴곡과 입사각에 의한 영상변형을 고려한다.

### 1. 일정 두께 평판매질의 영상형성

일정 두께  $\lambda$ 인 평판매질이 그림 1과 같이 방사선선 원과 검출판 사이에 위치한다.

#### 가. 비선형 구도

식 (1)과 (2)를 적용하여 입사각  $\theta$ 에 따른 매질과 자연공간에서의 방사선량 변화  $I_o$ 와  $I_d$ 를 식 (3)과 (4)와 같이 구한다.

$$I_o = \frac{I_i}{(4\pi d_1 d_2)^2} \exp(-\lambda\mu) \quad (3)$$

$$I_d = \frac{I_i}{(4\pi d_3 d_4)^2} \exp\left(-\frac{\lambda\mu}{\cos\theta}\right) \quad (4)$$

측정환경의 입사각에 의해  $I_o \neq I_d$ ,  $I_o > I_d$ 이고  $I_o$ 와  $I_d$ 가 도달하는 검출판 상의 영상변환에 의한 화소값  $d_0$ 와  $d_d$ 도  $d_0 \neq d_d$ 가 성립한다.  $\theta \approx 0$ 인 경우는  $I_o \approx I_d$ 이다. 여기서  $d_o$ 는 방사선이 검출판과 수직으로 입사한 경우로서 대상체 매질의 정확한 투과 영상 화소값이다. 반면에  $d_d$ 는 매질의 방사선 투과영상을 정

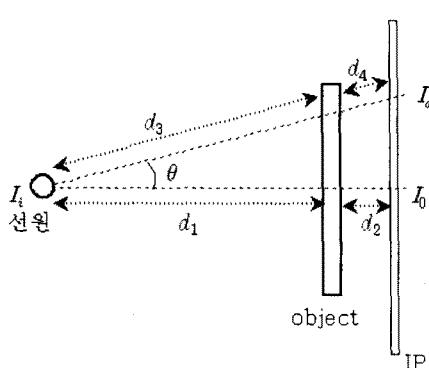


그림 1. 평판매질 측정 구조

Fig. 1. Measuring structure for flat object.

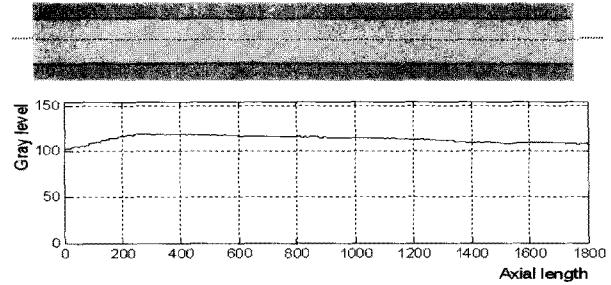


그림 2. 길이변화에 따른 영상 화소값 변화(예)  
Fig. 2. Image gray level variation for axial length(sample).

확히 형성하고 있지 않다. 실제 대상체 매질의 밀도와 두께가 일정함에도 불구하고 이와 같은 비선형적 차이는 보정을 통해 균일하게 처리해야 한다.

그림 2는 평판금속매질의 방사선측정실험시 생성된 측정조건 1과 2를 충족하는 영상과 한 축 방향 화소의 회색도 변화의 관측 예이다. 그림의 점선은 영상의 가로축 방향으로 하나의 화소배열을 추출함을 의미한다.

그림 2에서 길이방향의 1/6 지점에  $d_0$ 가 위치하고 이를 기점으로 좌우 화소값들이 증가, 감소하고 있다. 그림에서 좌우 대칭이 아닌 것은 측정시 대상체와 검출판의 간격이 일정치 않은 측정 오차에 기인한다.

#### 나. 데이터 보정과 영상복구

식 (3)과 (4)의  $I_d$ 와  $I_o$ 사이의 편차는  $\theta$ 에 의해 발생한 측정오차이다.  $\theta \neq 0$ 의 영향이 그림 2의 예에서와 같이 관측되는 방사선영상에서 위치에 따른 차이로 나타난다. 방사선영상 형성과정에서 잡음이 유입된다 하더라도 일정 두께의 매질을 통과한 결과는 잡음혼입 범위 안에서 일률적인 값을 가져야한다. 이를 위해  $I_o$ 를 기준으로 위치에 따른 결과 값들을 보정할 필요가 있다.

$I_d$ 와  $I_o$ 의 영상변환 화소값을  $d_d$ 와  $d_0$ , 그 때의 입사각  $\theta_d$ 에 대해 이들 사이에는 식 (3)과 (4)로부터 유도한 식 (5)의 관계가 성립한다.

$$\frac{I_d}{I_o} = \frac{d_d}{d_0} = \exp[\lambda\mu(1 - \sec\theta_d)] \cos^4\theta_d \quad (5)$$

여기서  $\mu$ 는 실험을 통한 추정값<sup>[5]</sup>이고  $\lambda$ 는 측정값으로서 일정하다.  $d_d$ 와  $d_0$ 는 관측값으로서  $d_0$ 는 고정값이고  $d_d$ 는 영상에서의 화소배열 위치상 지점별로 값이 변한다. 방사선측정실험에서 이들 인자를 산출한 후 식 (5)로부터 각각의  $d_d$ 에서의  $\theta_d$ 를 계산한다. 그리고  $d_0$

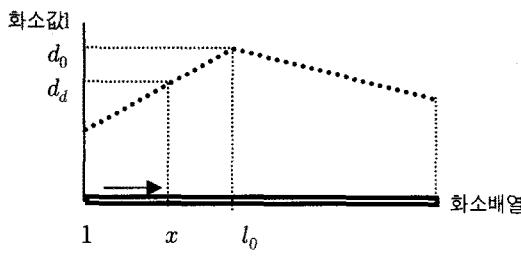


그림 3. 화소배열과 보정원리  
Fig. 3. Pixel array and correction principle.

와  $d_d$ 의 화소값 배열에서의 거리를 각각  $l_0$ 과  $x$ , 보정된 화소값을  $d_x$ 라고 할 때,  $d_x$ 는 그림 3의 기하학적 원리에 의해 식 (6)과 같다.

$$d_x = d_d + |l_0 - x| \tan \theta_d \quad (6)$$

식 (6)은 그림 2 예의 그래프에서 보는 바와 같이  $x$ 의 변화에 따른 화소값의 상승과 하강 모두에 적용 가능하다. 수식의 절대값은 그림 3에서 보는 바와 같이  $(l_0, d_0)$ 를 향하여 상승시는  $(l_0 - x), (l_0, d_0)$ 부터 하강시는  $(x - l_0)$ 에 해당한다.

실제 영상처리과정에서  $(n_1 \times n_2)$ 의 화소배열을 갖는 방사선영상( $n_1 \gg n_2$ )의 경우 길이방향의 배열( $1 \times n_2$ )을 순차적으로 추출하여 식 (6)을 사용하여 값을 보정한 후 이를 너비배열로 확산한 다음 종합하여 복구영상 을 구성한다.

## 2. 원형튜브의 영상형성

내경  $r_1$ , 외경  $r_2$ , 두께  $(r_2 - r_1)$ 인 원형 튜브가 그림 4와 같이 방사선 선원과 검출판 사이에 위치한다.

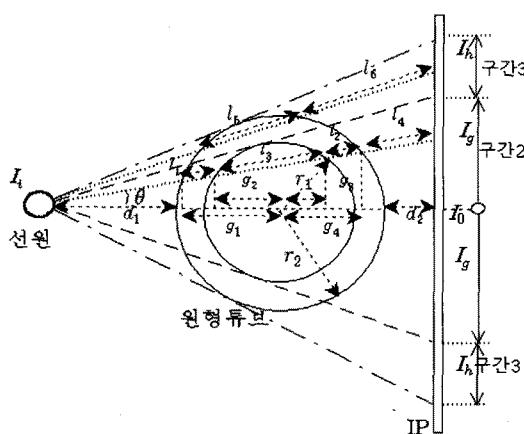


그림 4. 원형튜브 측정 구조  
Fig. 4. Measuring structure for circular tube.

### 가. 비선형 구도

식 (1)과 (2) 및 그림 4의 원과 직선의 도형 관계식으로부터 검출판에서의 방사선량을 구한다. 원형 구조에 의해 방사선 투과 상태가 달라지므로 다음 세 가지 유형으로 나누어 고찰한다.

i)  $I_0$ , 방사선이 검출판과 수직으로 입사

$$I_0 = \frac{I_i}{256\pi^3(d_1 r_1 d_2)^2} \exp[2(r_1 - r_2)\mu] \quad (7)$$

ii)  $I_g$ , 구간 2:  $\theta \neq 0$ , 투과중간에 공간이 존재

$$I_g = \frac{I_i \cos^2 \theta}{(4\pi)^3(g_1 l_3 l_4)^2} \exp(-2l_1\mu) \quad (8)$$

$$\text{여기서 } l_1 = \frac{g_1 - g_2}{\cos \theta}, \quad l_2 = \frac{g_4 - g_3}{\cos \theta}, \quad l_3 = \frac{g_2 + g_3}{\cos \theta}$$

$$l_4 = \frac{r_2 - g_4 + d_2}{\cos \theta}, \quad a_1 = 2\tan^2 \theta (d_1 + r_2)$$

$$g_1 = a_1 + \cos^2 \theta \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta - \tan^2 \theta (d_1 + r_2)^2 + r_2^2}$$

$$g_2 = a_1 + \cos \theta \sqrt{r_1^2 - \sin^2 \theta (d_1 + r_2)^2}$$

$$g_3 = -a_1 + \cos \theta \sqrt{r_1^2 - \sin^2 \theta (d_1 + r_2)^2}$$

$$g_4 = -a_1 + \cos^2 \theta \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta - \tan^2 \theta (d_1 + r_2)^2 + r_2^2}$$

$l_1 \sim l_4$ 와  $g_1 \sim g_4$ 는 측정값인 상수  $r_1, r_2, d_1, d_2$ 에 대해  $\theta$ 의 함수이다.

iii)  $I_h$ , 구간 3:  $\theta \neq 0$ , 매질로만 투과

$$I_h = \frac{I_i \cos^2 \theta}{(4\pi)^2(g_1 l_6)^2} \exp(-l_5\mu) \quad (9)$$

$$l_5 = \frac{g_1 + g_4}{\cos \theta}, \quad l_6 = \frac{r_2 - g_4 + d_2}{\cos \theta}$$

여기서,  $g_1$ 은 외경과 투과선이 만나는 선원에 근접한 점과 중심과의 거리,  $g_4$ 은 외경과 투과선이 만나는 검출판에 근접한 점과 중심과의 거리이다.

그림 5는 측정조건 1은 충족하나 2는 충족하지 않는 원형튜브금속매질의 방사선측정실험시 생성된 영상과 한 축 방향 화소의 회색도 변화의 관측 예이다. 그림의 점선은 영상의 가로축 방향으로 하나의 선 데이터를 추출함을 의미한다.

그림 5에서 길이방향의 중간 지점에  $d_0$ 가 위치하나

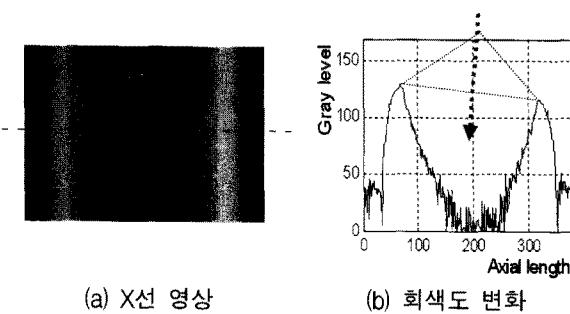


그림 5. 원형튜브 영상 화소값 변화(예)  
Fig. 5. Steel tube image gray level variation for axial length(sample).

곡선이 완전대칭이 아님 점을 미루어 그림의 작도와 같은 입사방향으로 추론된다.

#### 나. 보정요소와 영상복구

구간 2와 3에서  $I_g$ 와  $I_h$ 의 정확한 조사량이 검출판 상에 화소값으로 검출되려면 검출판을 선원방향으로 등 거리가 되도록 기하학적으로 구부려야(bending) 한다. 이 때 각 구간의  $g_4$ 를 고려하였을 때 구부림에 의해 교정된 거리  $l_c$ 는 구부림 전후의 차이로서 식 (10)이다.

$$l_c = g(\theta) = k_1 + h_1(\theta) \quad (10)$$

여기서  $k_1 = d_1 + 2r_2 + d_2$ ,  $h_1(\theta) = -\frac{d_1 + r_2 + g_4}{\cos \theta}$

구간 2에서는  $l_4$ 와 구간 3에서는  $l_6$ 를  $l_c$ 로 보정한다.  $I_0, I_g, I_h$ 의 영상변환 화소값  $d_0, d_g, d_h$ 에 대하여  $d_g$ 와  $d_h$ 의 보정값  $d_{gc}$ 와  $d_{hc}$ 는 식 (8)과 (9)의  $l_4$ 와  $l_6$ 를  $l_c$ 로 대치한 식들 사이의 관계로부터 식 (11), (12)과 같이 구한다.

$$d_{gc} = d_g h_g(\theta), \quad h_g(\theta) = (l_4/l_c)^2 \quad (11)$$

$$d_{hc} = d_h h_h(\theta), \quad h_h(\theta) = (l_6/l_c)^2 \quad (12)$$

여기서  $\theta$ 의 범위는 그림 3의 측정값들로부터 산출한다.

### III. 실험 및 결과

#### 1. 평판 매질

그림 6은 제 II 장 1절의 방식으로 영상을 복구한 결과이다. 복구전영상은 측정조건 1과 2를 충족한다. 결과가 육안으로는 식별하기 쉽지 않으므로 영상 화소배열의 한 가로배열에 대해 복구전후의 결과를 그림 (c)와

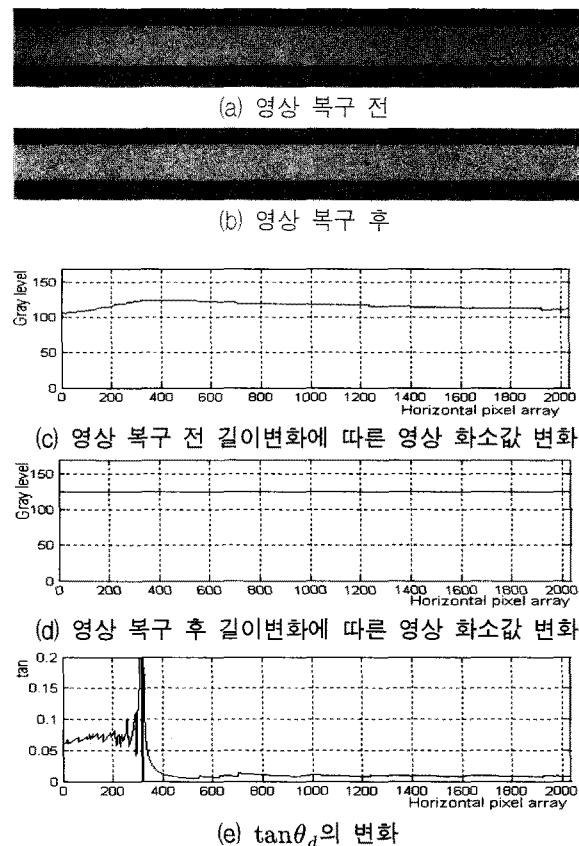


그림 6. 평판강판매질의 영상복구 효과  
Fig. 6. Image recovery effect for flat steel object.

(d)에 제시하였다. 그림 (e)는 복구진행시  $\tan \theta_d$ 의 변화이다. ( $\mu=0.1459$ ,  $\lambda=10.25\text{mm}$ )

#### [결과 고찰]

평판강판 매질의 방사선영상검출 측정에 따른 기하학적 오차가 보정작업에 의해 수정되고 관측영상의 복구가 이루어졌다. 영상복구는 화소별로  $\theta_d$ 산출과 식 (6)의 적용에 의해 순차적으로 진행되어 관측 화소값에 대한 보정을 적용처리함을 확인할 수 있다.

#### 2. 원형튜브 매질

그림 7은 제 II 장 2절의 방식으로 영상을 복구한 결과이다. 복구전영상은 측정조건 1은 충족하나 2는 충족하지 않는다. 본 실험에서는 관측된 원형튜브 방사선영상의 너비방향 부분 선별영상에 대한 영상복구를 실시한다. 결과가 육안으로는 식별하기 쉽지 않으므로 하나의 세로 화소배열 그래프(그림 c, d)로 그 효과를 제시한다. 원형튜브의  $r_1=34.4$ ,  $r_2=48.0$ ,  $d_1=220.0$  (단위, mm)이다.

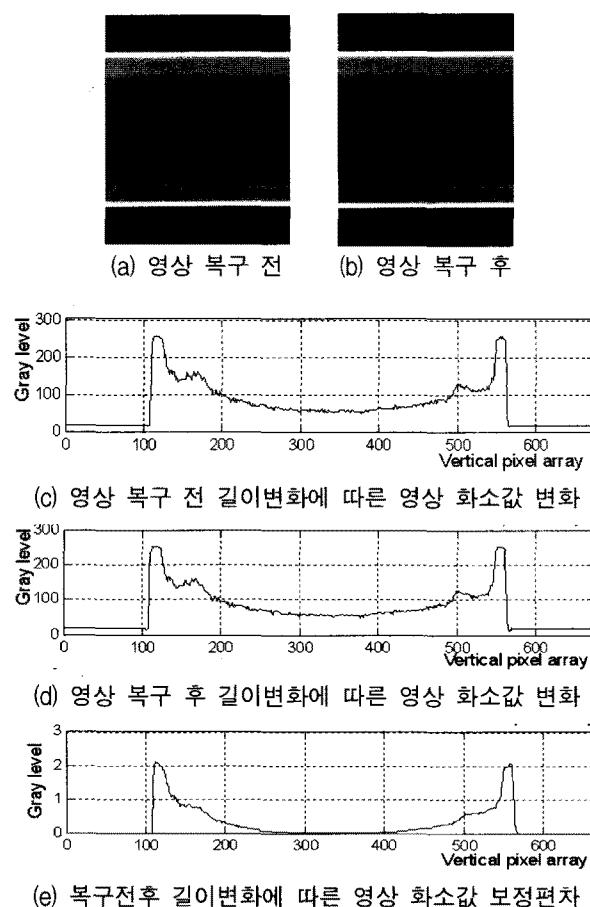


그림 7. 원형튜브 강판매질의 영상복구 효과

Fig. 7. Image recovery effect for steel tube object.

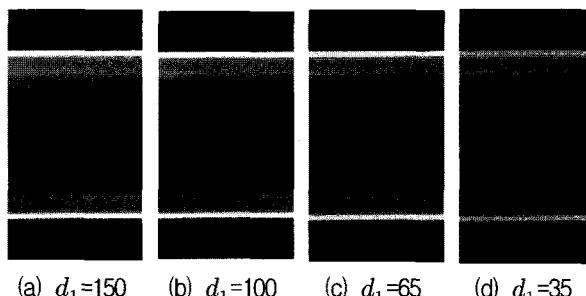


그림 8. 거리변화에 따른 영상복구현상 시뮬레이션 결과

Fig. 8. Simulation results of image recovery on varying distance.

그림 8은 시뮬레이션을 통해 대상체와의 이격거리  $d_1$ 을 변화시킨 경우의 영상복구 현상을 보였다.

#### [결과 고찰]

그림 7에서 수직의 한 축 배열별로 그림 (e)만큼의 보정행위가 순차적으로 발생하여 검출판의 선원으로의 등거리 구부림 효과가 영상복구로 재형성됨을 확인할

수 있다. 그리고 이러한 현상변화와 재연이 시뮬레이션으로 가능함을 그림 8의 결과가 아울러 제시하고 있다.

## IV. 결 론

측정환경의 비선형 원인으로 생성된 산업용방사선영상을 복구하는 방법을 제시하였다. 비선형요소의 복구는 영상의 측정오차보정 차원뿐만 아니라 결합이나 특정 미세 부위의 특징 추적과 추출, 패턴분류 및 이상 징후 진행 상태의 정량적 예측에의 기초기술이다. 영상이 복구되어 있지 않은 채 비선형영상 그대로를 대상으로 한 제반 영상처리와 정보추출의 정확성을 기대하기 어렵다. 본 연구에서는 평판과 원형튜브에 관한 매질 특성과 기하학적 위치와 측정구조에 근거한 수학적 모델을 추론하여 관측된 방사선영상으로부터의 복구가 가능함을 이론적으로 규명하였고 실험과 시뮬레이션을 통해 그 효과를 확인하였다.

## 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] 이의종, 방사선투과검사, 도서출판 골드, 205-214쪽, 2005년.
- [4] 이용, 비파괴검사의 기초, 세진사, 2000년.
- [5] U. Zschepel, Y. Onel and U. Ewert, "Corrosion inspection of pipelines by digital industrial radiology (DIR)," *NDT-net*, Vol. 7, no. 2, Feb. 2002.
- [6] D. Redouane, K. Yacine, A. Amal, A. Farid and B. Amar, "Evaluation of corroded pipelines wall thickness using image processing in industrial radiography," in *Proc. of 15th WCNDT*, Roma, Italy, Oct. 2000.
- [7] Y. Onel, U. Ewert and P. Willems, "Radiographic wall thickness measurement of pipes by a new tomographic algorithm," in *Proc. of 15th WCNDT*, Roma, Italy, Oct. 2000.
- [8] J. Belenkij, C. Müller and M. Scharnach, "A new method for radiographic image evaluation for pipe wall thickness measurement," in *Proc. of 15th WCNDT*, Roma, Italy, Oct. 2000.
- [9] 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.
- [10] C. Melvin and K. Sbdel-Hadi, "A simulated comparison of turnstile and Poisson photons for X-ray imaging," in *Proc. of IEEE CCECE*, pp. 1165-1170, Manitoba, Canada, May 2002.
- [11] H. H. Barrett and W. Swindell, *Radiographic imaging*, Academic Press, 1981.

---

### 저 자 소 개

---



황 중 원(학생회원)  
2006년 경인교육대학교(교육학사)  
2008년 숭실대학교 미디어학과  
(공학석사)  
2008년 3월~현재 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학과  
박사과정

<주관심분야: 컴퓨터비전, 알고리즘개발, 교육미디어>



황 재 호(정회원)  
1982년 아주대학교 전자공학과  
(공학사)  
1986년 서울대학교 전기공학과  
(공학석사)  
1994년 서울대학교 전기공학과  
(공학박사)

1982년~1992년 전력연구원 부장대리  
1992년~현재 한밭대학교 전자공학과 교수  
<주관심분야: 영상신호처리, 비전, DSP, 멀티미디어>