

논문 2008-45SP-5-12

## 고강도매질 CR 영상의 잡음 모델링

(Noise Modeling for CR Images of High-strength Materials)

황 중 원\*, 황 재 호\*\*

(Jung Won Hwang and Jae Ho Hwang)

## 요 약

이 논문은 고강도매질 CR(Computed Radiography) 영상의 잡음을 모델링하는 적절한 접근법을 제시한다. 잡음 유형의 통계적이고 비선형적 특성이 구체적으로 고안되었다. CR영상은 컴퓨터 처리에 의해 코드화되기 이전 이미 훼손된다. 다양한 형태의 잡음은 비록 디지털화된 상태로 검출된다 하더라도 통상 방사선 영상을 오염시킨다. 양자 방출시의 포아송 분포는 CR 영상판에서의 광자 분포에서 포아송 잡음 분포를 항상 유지하지 않는다. 그 통계적 특성은 재질 특성에 의해 상대적이며 경우의 존적이다. 통계적 잡음모델링 과정에서 통상적인 포아송, 이항 내지는 가우스 통계분포의 가정이 고려되었으며 아울러 비선형 효과 또한 포함시켰다. 이는 잡음 영역의 고저 전 방사선량에 걸쳐 추정하는 해석적 모델을 구현한다. 그리고 이 분석적 접근은 고강도 강판튜브 스텝웨지의 방사선측정실험을 통해 관측한 CR 영상데이터에서 구현되었다. 그 결과는 매질의 두께변화에 따른 잡음의 일관성, 잡음분포특성, SNR 및 비선형 보간을 측정하는 상호비교의 파라미터연구에 유용하다.

## Abstract

This paper presents an appropriate approach for modeling noise in Computed Radiography(CR) images of high strength materials. The approach is specifically designed for types of noise with the statistical and nonlinear properties. CR images are degraded even before they are encoded by computer process. Various types of noise often contribute to contaminate radiography image, although they are detected on digitalization. Quantum noise, which is Poisson distributed, is a shot noise, but the photon distribution on Image Plate(IP) of CR system is not always Poisson process. The statistical properties are relative and case-dependant due to its material characteristics. The usual assumption of a distribution of Poisson, binomial and Gaussian statistics are considered. Nonlinear effect is also represented in the process of statistical noise model. It leads to estimate the noise variance in regions from high to low intensity, specifying analytical model. The analysis approach is tested on a database of steel tube step-wedge CR images. The results are available for the comparative parameter studies which measure noise coherence, distribution, signal/noise ratios(SNR) and nonlinear interpolation.

**Keywords :** CR image, Noise model, Steel-tube, Distribution

## I. 서 론

방사선영상취득 기술 분야에 종래의 필름감광방식을 대체하는 디지털기법이 도입되면서 컴퓨터 분석제어 시스템과 연계한 DR(direct radiography) 및 CR 방식이 개발되었다. 그 가운데 DR방식은 평면 영상판에 디지털로 검출한 영상 데이터를 컴퓨터에 직접 전송함으로써

중간 과정과 부수처리 없이 고해상도 영상을 취득할 수 있는 반면, 방사선입력장치의 필수요건인 현장 측정의 이동성, 영상판의 유연성(flexibility)과 영상판 크기 임의조정 및 방사선 노출시간 단축 면에서 한계가 있다. 이에 비해 CR 방식은 기존의 필름이나 DR 방식의 평판 스크린 대신 휘진성 형광물질이 도포된 IP(image plate)를 사용하여 방사선 영상을 취득한 후 레이저 스캐너로 IP 표면에 축적된 에너지를 가시광선으로 변화시켜 디지털 데이터화된 영상 정보를 컴퓨터에 전송 처리한다. 실제 현장에서 방사선 선원을 대상체의 측정환경에 따라 자유롭게 이동 배치시킬 수 있는 동시에 IP도 대상체 유형에 맞게 크기와 형태를 임의 조정할 수 있는 장점이 있다. DR 방식과는 달리 오프라인으로 측정

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

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

접수일자: 2008년1월25일, 수정완료일: 2008년7월30일

하지만 노출시간이 기존 방식에 비해 십분의 일 내지는 오분의 일 정도로 짧고 1분 이내에 레이저 스캐너 판독 장치로부터 고해상도의 영상 판독이 현장에서 가능하여 의료영상분야를 비롯한 비파괴 검사에 적합하다<sup>[1~3]</sup>.

CR 방식에 의한 디지털 영상 취득의 편의성은 일차적으로 방사선 선원과 대상체 및 IP 에 이르는 광자 방출과 흡수, 투과 및 IP 표면 형광물질에의 에너지 흡수 과정에 있다. IP에 축적된 에너지 검출과 디지털 영상화는 다음 단계이다. 선원에서는 포아송 분포(Poisson distribution)의 예측 불가능한 이산(discrete) 형태의 광자군(photons)을 방출하고 방출된 광자군은 대상체를 통과하면서 매질 특성에 의한 에너지 흡수율의 차이를 보이며, 그 결과가 대상체 이면에 위치시킨 IP 검출판에 취득된다. 방출된 광자군은 방출, 흡수, 투과 및 검출의 과정을 거치면서 통계적 특성을 보이나 그 형태는 과정에 따라 일정하지 않다. 최종 IP에 검출될 때에는 방출시와는 다른 통계적 유형을 갖고 판독장치의 스캐닝에 의해 디지털 데이터화한다<sup>[3]</sup>.

방사선영상취득의 이러한 측정 및 검출 특성은 비단 CR 방식에만 국한하지 않고 종래의 필름이나 DR 방식에도 유사하다. 문제는 각 방식이 영상화를 포함한 방사선방출과 검출 메커니즘의 차이로 최종 취득영상의 해상도나 잡음특성에 차이가 발생한다는 점이다. 동일한 방식이라 하더라도 대상체의 매질 특성이나 측정부위 그리고 그에 따른 조사(照射) 에너지와 강도 및 시간에도 영향을 받는다<sup>[4~5]</sup>. 더욱이 대상체 매질별로 최적 측정조건을 설정하는 일은 이론보다는 실제로 작업자의 오랜 실무 경험과 시행착오에 의존하거나 제작사의 시험성적서에 의존하는 것이 대부분이다. 최근 몇 년 사이에 CR 방식이 급속히 보급되면서 편의성과 신속성 및 고해상도의 선명한 화질취득에 관심이 집중되고는 있으나 방사선 영상 본래의 비선형성 특성이나 잡음의 이론적이고 해석적인 특성 연구는 미진한 상태이다.

방사선영상의 정량적 연구는 영상복원과 재구성을 통한 정확한 진단 면에서 매우 중요하다. 비선형 효과나 잡음의 수학적 모델링과 그 모델 파라미터 추정 측정 부위에서의 특징 추적과 추출, 패턴분류 및 이상 징후 진행 상태의 정량적 예측에 불가결한 요소이다. 그러나 이러한 시도는 종래의 필름방식을 비롯한 엑스레이 영상 전반에 걸친 기술 분석보고서 수준에 머물러 있었고 그나마 의료영상 분야에 치중되어 있다<sup>[6~8]</sup>. CR 영상연구에는 1993년 신호, 잡음 및 전달특성에 관

한 장치 차원의 정량적 분석 연구 결과<sup>[9]</sup>가 나온 이래 현재까지 학술연구가 부진하다. 더욱이 산업 플랜트의 비파괴분야에서는 최근에는 CR 방식이 보급되고 있고 측정 매질과 부위별로 최적 측정조건을 나름대로 구축하여 단순 진단용으로 사용하고 있다. 우리나라에는 2년 전부터 CR 장비가 도입되어 플랜트의 금속투브나 후판의 비파괴진단에 활용되고 있으며 타사 제품은 일부 품목에 국부적으로 사용되거나 현재 시험 중일 뿐 고강도 매질에 관한 CR영상의 국내 학술연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 방사선측정실험을 통해 초고압보일러 강관튜브 스텝웨이 시편의 CR 영상을 분석하여 영상에 내재된 잡음 특성을 규명하고 그 수학적 모델을 제시한다. 방사선영상 취득 장치는 일본 FUJI사의 FCR XG-1 NDT를 사용하였고 취득한 영상으로부터 모델링에 필요한 국부 방사선영상 데이터를 구축하였다. 이들 샘플 영상들을 통계적 접근법과 취득데이터의 함수부합(function fitting) 및 비선형 보간으로 처리하여 관련 특성을 수식화하고 파라미터를 추정한다. 이하 제 II 장에서는 CR 영상에서의 잡음특성과 모델링, III 장에서는 방사선측정실험을 통해 특성을 규명하고 IV장에서는 결론을 맺었다.

## II. CR 영상의 잡음 특성과 모델링

### 1. 잡음 형성과 특성

CR 영상의 잡음은 방사선영상취득시스템에서의 영상형성과 함께 생성된다. 오프라인으로 진행되는 디지털영상화는 영상취득 전 과정에 걸쳐 궁극적으로는 IP에 귀착한다. IP에 아날로그 영상 정보를 수록함과 레이저 판독장치에 의해 읽혀져 컴퓨터상에 데이터 형태의 화소배열을 구성하는 두 단계를 거친다. 전 단계에서는 방사선 선원과 대상체 및 IP표면에 이르는 양자(quantum)의 흐름, 다음 단계에서는 장치와 컴퓨터 시스템에 의해 잡음이 생성되고 유입된다. 잡음 성격 면에서 방사선의 물리적 특성과 취득시스템에서의 신호형성과 입력, 변환 및 전송 등이 잡음을 일으키는 요인들이다.

전 단계인 IP에의 방사선영상 정보 수록에는 전기적, 신호적 또는 시스템의 잡음이 배제된다. 선원에서 방출하는 광자의 흡수 및 투과 기록이 IP에 수록되므로 양자잡음이 잡음생성의 주요인이다. 이 양자잡음에 상호비상관관계(uncorrelated)인 다음 단계의 잡음이 더해져

식 (1)의 CR 영상잡음이 생성된다.

$$\nu_i = q_i + e_i + a_i \quad (1)$$

여기서  $q_i$ :양자잡음,  $e_i$ :전기적 잡음,  $a_i$ :시스템 잡음,  $i = 1, 2, \dots, n$  으로서  $n$ (개)의 화소로 구성된 영상의 공간배열이다. 식 (1)의 성분 가운데 양자잡음을 제외한 나머지 두 성분은 그 양과 영향이 양자잡음에 비해 미약할 뿐만 아니라 전자회로의 발달과 장치의 개선으로  $q_i \gg (e_i + a_i)$ 와 같이 무시할 수 있어, 식 (1)은  $\nu_i \approx q_i$  이다<sup>[10]</sup>.

이러한 양자잡음은 이산(discrete) 광자흐름의 방사선 조사빔(radiation beam)에 기인한 방출한 조사량과 검출된 광자량에 의존한다. 선원에서 방출하는 광자분포는 랜덤한 이산형태의 방출 광자수  $n_e$ 의 포아송 확률 분포이다<sup>[9-10]</sup>. 방사선 검출기 IP 상에는 방출량이 모두 도달하지 못하므로 검출되는 광자수  $n_d$ 와 관련한 방출량에 대한 검출량의 확률  $P(n_d|n_e)$ 는 이항분포(binomial distribution)로 근접한다<sup>[11]</sup>. 결국 IP에 검출되는  $n_d$ 의 확률분포  $P(n_d)$ 는  $\rho = n_e p$ , ( $p$ 는 검출광자의 확률)에 대하여 식 (2)와 같다.

$$P(n_d) = \sum_{n_e} P(n_d|n_e)P(n_e) = \frac{\rho^{n_d}}{n_d!} \exp(-\rho) \quad (2)$$

식 (2)에서  $n_e \rightarrow \infty$  임에 따라  $p \ll 1$  이고  $\rho = n_e p$ 로 고정되므로  $n_e$ 나  $p$ 에 대한 정확한 정보가 없다 하더라도  $P(n_d)$ 는 포아송분포로 근접한다. 이 때  $\rho$ 가 커질수록 포아송분포는 가우스분포로 근접한다<sup>[12]</sup>. 이러한 사실은 방사선측정 공간에서 양자잡음의 통계적 특성은 상대적이며 경우의존적임을 의미한다.

방사선측정에 따른 방사선 노출시간, 인가에너지, 인가전압 및 전류 그리고 측정의 구조 및 환경이 대상체의 물리 내지는 재질 특성에 따라 다를 뿐만 아니라, 그에 수반하는  $n_e$ ,  $p$  및  $\rho$ 가 불확실한 상태이기 때문에 CR의 IP에 검출되는 잡음형태를 어느 한 유형으로 고정시키는 것은 무리이다. 더욱이 저에너지와 짧은 노출시간에서 측정되는 인체나 유기체, 경량금속, 복재 및 플라스틱 등과는 달리 본 연구에서 실시하고자 하는 고강도, 고밀도의 보일러 강판 튜브는 100KV를 넘는 고전압 하에서 노출시간만 30분을 초과하는 경우가 허다하여  $n_e \rightarrow \infty$ 에 해당하므로 잡음유형은 포아송 분포 또는 가우스 분포 형태라고 할 수 있다. 그 정확한 특성

은 측정실험을 통한 분포함수의 부합여부로 규명할 수 밖에 없다.

## 2. 잡음 모델링

CR 영상의 잡음은 방사선영상취득시스템에서 원영상과 함께 관측된다.  $n$ (개) 화소의 공간 배열에서 원영상의 화소값을  $x_i$ , 관측영상  $S$ 의 화소값을  $y_i$ 라고 할 때,  $y_i$ 는  $x_i$ 와 잡음  $\nu_i$ 가 포함된 식 (3)이다.

$$y_i = f(x_i + \nu_i) \quad (3)$$

여기서  $f(\cdot)$ 는 방사선영상화 과정에서 발생하는 비어의 법칙(Beer's law)<sup>[11, 13]</sup>에 의한 비선형왜곡을 나타내는 함수이다.  $x_i$ 와  $\nu_i$ 는 본질적으로 상호독립이므로 비선형변화는  $x_i$ 와  $\nu_i$ 에 독립적으로 작용하여  $f(x_i + \nu_i) = f(x_i) + f(\nu_i)$  이다. 원영상과 잡음 각각에 비선형 왜곡이 발생한다. 영상정보의 왜곡이 잡음에도 동일하게 생성되어  $\xi_i = f(\nu_i)$ 로서 관측된다.

조건 1: 관측  $y_i$ 와  $x_i$ 의 인접화소들로 구성된 집합을  $W_i$ , ( $W_i \subset S$ ,  $1 \ll |W_i| < n$ ,  $|\cdot|$ 는  $W_i$ 의 원소수), 구역  $W_i$  내에 존재하는  $x_i$ 와  $\nu_i$  및 그 인접화소군(畫素群)의 집합을 각각  $X_i$ 와  $\Xi_i$ 라 할 때,  $X_i$ 의 원소들의 값과 그 함수값  $f(X_i)$ 는 상수로서 일정하고 잡음의 기대치  $E(\Xi_i) = 0$ , 분산  $\text{Var}(\Xi_i) = \sigma_i^2$  이다.  $f(X_i) = c_i$ 에 대하여  $E(\Xi_i) = 0$  이므로  $E(W_i) = c_i$  및  $\text{Var}(W_i) = \sigma_i^2$  이다.

잡음 모델링을 위해서는 관측영상으로부터 원영상 정보를 제거하여 잡음성분만을 추출함이 필요하다. 조건 1을 만족하는 구역  $W_i$ 에서는 기대치  $c_i$ 를 중심으로 잡음이 분포하고  $W_i$ 의 화소값  $w_i$ 에 대하여  $w_i - E(W_i) = \xi_i$ 가 성립한다. CR 관측영상에서 조건 1을 만족하는 경우는 IP가 방사선에 전량 노출되는 배경영역이거나 측정실험시 두께와 밀도가 일정하고 균일한 매질의 대상체에서 영상을 취득한 경우이다. 이러한  $w_i$  또는  $\xi_i$ 에 대하여 잡음 특성과 관련 파라미터를 규명한다.

### 가. 일관성

조건 1을 만족하는  $W_i$ 들 상호의 일관성  $\gamma_{pq}$ 는 잡음 유형의 형태적 특성을 제시한다. 식 (4)와 같이 두 후보

구역영상데이터의 자기상관함수와 상호상관함수로 정의한다.

$$\gamma_{pq} = \frac{|\Phi_{pq}|}{\sqrt{\Phi_{pp}\Phi_{qq}}}, \quad 0 \leq \gamma_{pq} \leq 1 \quad (4)$$

여기서  $p, q = 1, 2, \dots, n$ ,  $p \neq q$ ,  $\Phi_{pp}, \Phi_{qq}$ 는 자기상관함수 그리고  $\Phi_{pq}$ 는 상호상관함수이다.

$\gamma_{pq}$ 는  $W_i$ 들 가운데 상호 비교하는 두 구역영상데이터의 형태적 유사관계를 보여준다.  $\gamma_{pq}=1$ 은 완전 일치이고  $\gamma_{pq}=0$ 은 완전불일치이다. CR관측영상으로부터  $W_i$ 를 설정하고  $\xi_i$ 에 대하여 모든 경우의 수에서 상호의  $\gamma_{pq}$ 를 통계적으로 산출함으로 영상에 내재적으로 산재하는 잡음형태의 유사성(similarity)을 판별한다.

#### 나. 가우스 효과(Gaussian effect)

II.1에서 고찰하였듯이 강판튜브 CR영상 잡음은 포아송 분포 또는 가우스 분포이다. 조건 1을 만족하는  $W_i$ 의 히스토그램을 구하고 식 (5)의 가우스(Gauss) 함수로 부합(fitting)을 실시한다.

$$g(t) = e_1 \exp\left\{-\left(\frac{t - e_2}{e_3}\right)^2\right\} \quad (5)$$

여기서  $e_1, e_2, e_3$ 는 함수 형태를 결정하는 계수이고  $t = 1, 2, \dots, 256$  로서 화소값의 개수이다.

함수부합에 따른 오차의 정도는 식 (6)의 최소자승오차합(least square error summation)  $e_r$ 을 사용한다<sup>[14]</sup>.

$$e_r = 1 - \frac{\|H_s - G\|^2}{\|H_s - \mu_g\|^2} \quad (6)$$

여기서  $H_s$ 는  $W_i$ 의 히스토그램,  $g(t)$ 의 행렬을  $G$ , ( $H_s, G \in R^{1 \times 256}$ ) 그리고  $\mu_g = \text{mean}(H_s)$ 이다.  $e_r$ 이 1이면 가우스 분포에 완전부합이고 1에 가까울수록 부합 정도가 높다.

정의 1: 조건 1을 만족하는  $W_i$ 의  $e_r$ 들의 집합  $K = \{e_r\}$ 에서 K의 통계적 기대치  $\mu_e = E(K)$ , 표준편차  $\sigma_e$ 에 대하여 가우스 효과  $G_e = (\mu_e, \sigma_e)$ 로 정의한다.

$G_e$ 의 파라미터  $\mu_e \rightarrow 1, \sigma_e \rightarrow 0$  일 때, 잡음은 가우스 분포에 근접한다. 가우스 효과  $G_e \rightarrow (1, 0)$  인 경우는 CR영상 잡음을 가우스분포로 단정할 수 있다.

광자검출의 이산속성(discrete nature)에 의해 광자의 존성이 높은 방사선영상은 포아송 잡음을 생성한다. 가우스 잡음과는 달리 포아송 잡음은 신호로부터 잡음을 제거하기 어려운 신호의존적(signal-dependent)이므로 잡음이 포아송 분포에 근접하다고 인식될 때, 차후 잡음처리 편의성이나 잡음제거 측면에서 포아송분포  $I_{r,s} \sim \text{Poisson}(\epsilon_{r,s})$ , ( $\epsilon_{r,s}$ : 광도)를 식 (7)의 안스콤베 변환(Anscombe transform)을 사용하여 분산  $\sigma^2 = 1$  인 가우스 분포로 변환할 필요가 있다<sup>[15]</sup>.

$$J_{r,s} = 2\sqrt{I_{r,s} + \frac{3}{8}} \quad (7)$$

여기서  $J_{r,s}$ 는 변환 결과이고  $\epsilon_{r,s} \rightarrow \infty$  에서 보다 가우스 분포로의 변환 정확도가 높아진다. 가우스효과가 낮은  $W_i$ 의 잡음을 안스콤베 변환함으로 CR영상 잡음 특성의 통계적 신뢰성 향상을 도모한다.

#### 다. SNR(signal-to-noise ratio)

방사선 빔은 양자구조를 갖고 있고 양자잡음의 SNR은 통계적으로  $n_e$ 와 잡음의 분산에 의존한다. 잡음이 이상적인 포아송 분포인 경우, 기대치와 분산이 동일하기 때문에 표준편차  $\sigma = \sqrt{n_e}$  로서  $\text{SNR} = \sqrt{n_e}$ 가 되나 제 II 장 1 절과 가우스 효과에서 살펴본 바와 같이 항상 포아송 분포라고 단정할 수 없으므로 일반적으로 알려져 있는 방사선 영상의  $\text{SNR} = \sqrt{n_e} = 1/\sigma$ 을 일반적으로 채택하는 것은 무리이다. 더욱이  $n_e$ 는 방사선 노출시간과 전류의 곱의 평방근에 비례하는 양인 동시에  $n_e$ 와 방사선원 에너지의 곱에 의해 영상의 조명도(intensity)가 결정되므로<sup>[9]</sup> 방사선 노출시간과 전류 및 방사선원 에너지가 상당히 큰 값을 갖는 보일러 강판튜브 방사선영상 형성에서는 이점들을 고려해야 한다.  $n_e \rightarrow \infty$  이므로 조건 1을 만족하는 구역  $W_i$ 에서의 조명도와 잡음의 표준편차로 신호와 잡음의 관계를 설정함이 타당하다. IP상에서의 조명도는 결국 영상에서의 화소값이므로  $W_i$ 의 측정기대치  $M_i = E(W_i)$ 와 잡음의 측정표준편차  $\sigma_i$ 로서 식 (8)과 같이 SNR을 정의한다.

$$\text{SNR}_i = \frac{M_i}{\sigma_i} \quad (8)$$

식 (8)은 CR방사선영상취득시스템에서 조명도의 결정요소인 노출 시간, 전류 및 방사선원 에너지를 일정하

게 유지시킨 측정조건하에 대상체의 두께에 따라 변하는 값이다. 검출기에 추출된 광자량이 조도도를 결정하므로 그에 따른 잡음의 표준편차도 변하여 결국은 두께에 의해 SNR값은 가변한다. 그 값은 실험을 통해 규명해야한다.

라. 비선형성

원영상과 마찬가지로 방사선영상정보의 비선형왜곡은 잡음에도 동일하게 발생하여 검출기상에 화소값으로 관측된다. 방사선의 광자속(flux of photons)은 역자승 법칙(inverse square law)<sup>[16]</sup>에 의해 선원으로부터의 거리의 자승에 반비례하며 방사선이 투과하는 매질 전후의 방사선량은 식 (9)로 표현하는 비어의 법칙에 의존한다.

$$I_{out} = I_{in} \exp(-\mu\lambda) \tag{9}$$

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

식 (9)로 알려져 있는 비어의 법칙은 실제 측정실험에 그대로 적용하기는 어렵다.  $I_{in}$  이나  $I_{out}$  는 이론값이고 실제측정값이 아닐 뿐만 아니라 흡수계수는 조사에너지에 의존하는 수치이고, 방사선이 흡수되는 물질에 의해 생성되는 산란방사선의 영향이 매질 내부에서 발생하기 때문이다. 현재 보급되고 있는 CR장비에서 사용하는 IP가 종래의 필름엑스레이에 비해 뛰어난 선형검출 특성을 갖고 있기 때문에 동일 매질의 서로 다른 두께의 두 방사선량은 IP 상에서 관측되는 화소값의 평균과 두께 차이에 의한 상대값으로 식 (9)의 표현이 가능하다<sup>[5]</sup>. 즉 조건 1을 만족하는 동일한 밀도의 매질의 구역  $W_j$ 와  $W_k$ , ( $j \neq k$ )에서  $W_j$ 와  $W_k$ 의 두께 차이를  $\Delta\lambda$ , 동일 방사선원과 거리에서 검출된 IP 상의 화소값 평균을  $D_j$ ,  $D_k$ 라 할 때, 식 (9)의 매질에서의 비선형특성은 실제로 식 (10)이 되고 측정 가능한  $\Delta\lambda$ ,  $D_j$  및  $D_k$ 에 의해 매질의 흡수계수는 식 (11)로서 이 값은 측정에 의해 산출한다.

$$\frac{D_k}{D_j} = \exp(-\mu\Delta\lambda) \tag{10}$$

$$\mu = \ln\left(\frac{D_j}{D_k}\right) / \Delta\lambda \tag{11}$$

식 (10)과 (11)은 방사선측정실험에 의해 관측된 CR

영상데이터로부터 비선형계수를 추출할 수 있음을 보여준다. 여기에는 실험 데이터인 매질의 두께와 그 변화, 각각의  $W_j$ 에서의 잡음의 평균과 표준편차가 함께 고려된다.

III. CR 방사선 측정실험과 고찰

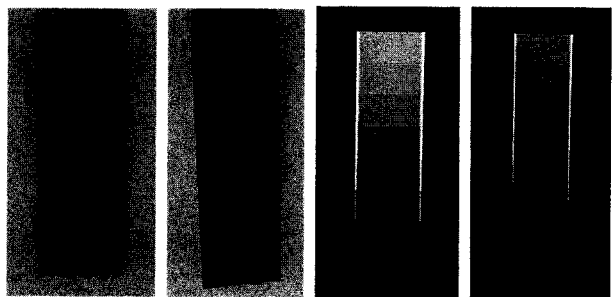
방사선영상 취득 장치는 일본 FUJI사의 FCR XG-1 NDT를 사용하였다.

1. 측정실험 조건과 영상데이터

그림 1은 엑스레이조사측정장치, FCR XG-1 Reader 및 실험에 사용한 스텝웨지(step wedge)시편과 취득영상을 보이고 있다. 스텝웨지는 각각 8 단계와 16단계로서 스텝웨지 각 면은 제 II 장의 조건 1을 만족하도록 제작하였다. 표 1은 스텝웨지 사양이다.



(a) 엑스레이조사측정장치 (b) FCR XG-1 Reader



(c) 스텝웨지 (d) 취득영상

그림 1. 방사선영상취득장치, 시편 및 취득영상  
Fig. 1. Radiography detector, step wedges and images.

표 1. 스텝웨지 사양  
Table 1. Spec. of step wedges.

사양 종류	재질	규격(mm)	최소두께 (mm)	최대두께 (mm)	면수
8면 스텝웨지	보일러 튜브강	25.4X200 X25.0	3.175	25.4	8
16면 스텝웨지			1.565	25.0	16

그림 1의 실험실 환경에서 취득한 스텝웨이 각 면 영상이 동일한 화소수를 갖도록 부분 선별한다. 8면 스텝웨이에서는  $W_1 \sim W_8$ 의 8(개)에 각 영상의 화소수 48,840(픽셀), 16면 스텝웨이에서는  $W_1 \sim W_{16}$ 의 16(개)에 각 영상의 화소수 21,571(픽셀)의 구역별 부분영상 데이터를 구성한다. 여기서  $W_i$ 의  $i$ 값이 1이면 최대두께이고 값이 커질수록 두께가 얇다.

2. 잡음 모델링 파라미터 추출 및 결과

가.  $\gamma_{pq}$

부분영상데이터가 8면 및 16면 스텝웨이 당 각각 8(개)와 16(개)이므로 8면 스텝웨이에서는  $p, q = 1 \sim 8$ , 16면에서는  $p, q = 1 \sim 16$ 이다. 실험 추출한 두 경우의  $\gamma_{pq}$ 를 아래의 3차원그래프로 제시한다.

i) 8면 스텝웨이

추출한  $\{\gamma_{pq}\}$ 의 평균은 0.96, 표준편차는 0.02 이다.

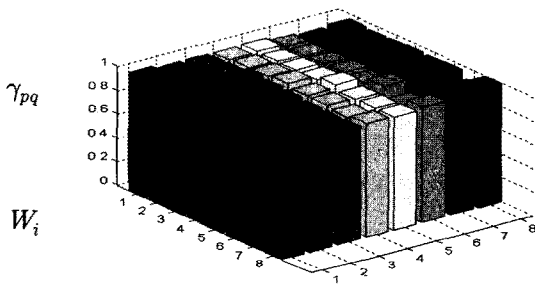


그림 2.  $\gamma_{pq}$  그래프

Fig. 2.  $\gamma_{pq}$  Graph.

ii) 16면 스텝웨이

추출한  $\{\gamma_{pq}\}$ 의 평균은 0.92, 표준편차는 0.06 이다.

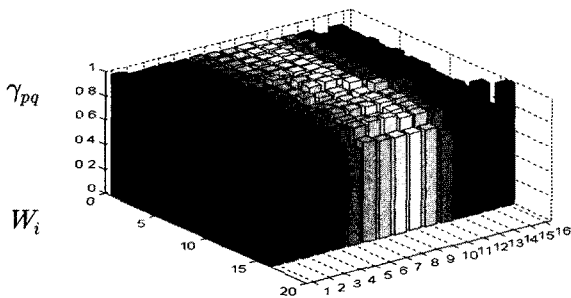


그림 3.  $\gamma_{pq}$  그래프

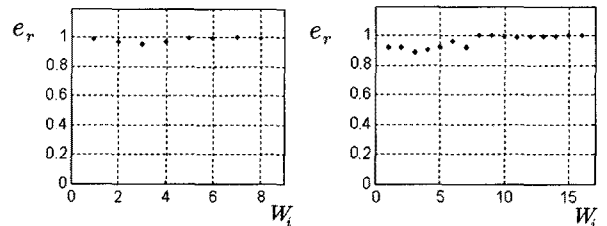
Fig. 3.  $\gamma_{pq}$  Graph.

[결과 고찰]

대상체 매질의 두께 차이가 8면 스텝웨이에서는 8(배), 16면에서는 16(배) 차이가 남에도 불구하고 잡음 형태의 유사성이 두께와 연관이 거의 없음을 보여준다. 고강도 매질의 CR영상에서 잡음 형태의 유사성은 두께와 무관하게 보존됨을 알 수 있다.

나.  $G_e$ 산출

실험결과로 얻은 8면 및 16면 스텝웨이 부분영상데이터 각 8(개)와 16(개)에서 식 (6)에 의해  $e_r$ 을 구하고 가우스 효과  $G_e$ 를 산출한다. 그림 4에 8면 및 16면 스텝웨이의  $e_r$ 을 보였다. 표 2에 산출된  $G_e$ 를 제시한다. 그림에서  $\bullet$  은 측정값이다.



(a) 8면 스텝웨이

(b) 16면 스텝웨이

그림 4.  $W_i$ 에 따른  $e_r$ 의 변화

Fig. 4.  $e_r$  for  $W_i$ .

표 2.  $G_e$

Table 2.  $G_e$ .

유형 인자	8면 스텝웨이	16면 스텝웨이
$G_e$	(0.9982, 0.0172)	(0.9619, 0.0437)

[결과 고찰]

$e_r$ 은 두께가 얇을수록 가우스분포에 보다 근접하여 8면 스텝웨이에서는  $W_5$  이상, 16면 스텝웨이에서는  $W_8$  이상에서 거의 1로 근접한다. 그 변화는 두께변화인 8(배)나 16(배)의 관점에서 볼 때 강관튜브의 CR영상은 두께와 거의 무관하게 가우스분포로 판정할 수 있다.  $G_e$  측정 결과도  $G_e \rightarrow (1, 0)$  임을 보여준다. 따라서 안스콰베 변환에 의해 영상데이터를 무리하게 가우스분포로 변환시킬 필요가 없다.

다. SNR 산출

8면 및 16면 스텝웨이 부분영상데이터 각 8(개)와 16(개)에서 식 (8)에 의해  $SNR_i$ 를 구한다. 그림 5에 8

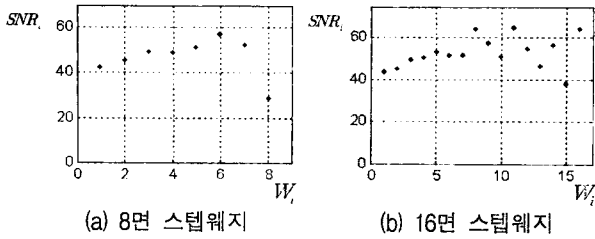


그림 5.  $W_i$ 에 따른  $SNR_i$ 의 변화  
Fig. 5.  $SNR_i$  for  $W_i$ .

면 및 16면 스텝웨지의  $SNR_i$ 를 보였다.

[결과 고찰]

스텝웨이 면의 두께가 감소할수록  $SNR_i$ 의 변동폭이 증가한다. 이는 측정오차일 수도 있으나 그보다는 두께가 얇아질수록 산란방사선 투과량 증가에 의한 영향이 영상에 나타난다.

라. 비선형성

식 (11)을 측정실험으로 구현하여 잡음의 평균에 대해 지수함수부합에 의한 비선형보간법으로  $\mu$ 를 추정한다

표 3.  $\mu$   
Table 3.  $\mu$ .

인자 \ 유형	8면 스텝웨이	16면 스텝웨이
평균값들의 $\mu$	0.1459	0.2065
표준편차들의 $\mu$	0.0463	0.1011

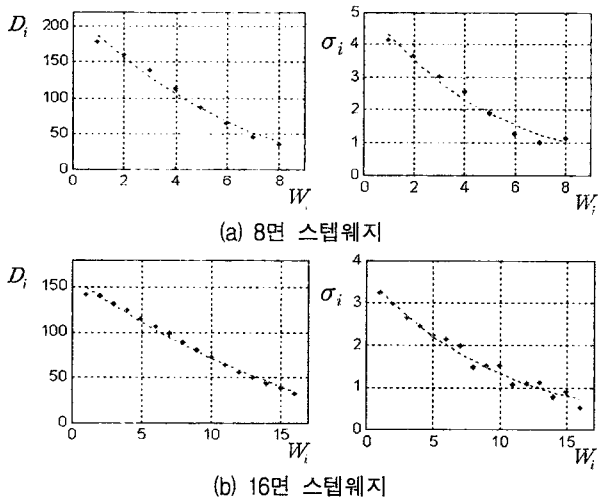


그림 6.  $W_i$ 에 따른 비선형추정  
Fig. 6. Nonlinear estimation for  $W_i$ .

다. 8면 및 16면 스텝웨이 각각의 두께변화에 따른 결과를 잡음의 표준편차에 관한 결과와 함께 표 3에 제시한다. 그림 6은 8면 및 16면 스텝웨이에서 실험 결과와 지수함수적 비선형 특성을 적용하여 구한 결과를 비교하고 있다. 그림의 점선은 지수함수로 추정된 부합선(fitting line)이다.

[결과 고찰]

매질의 두께변화에 따른 잡음의 평균값과 표준편차의 변화추이에 지수함수적 비선형 특성이 나타나는 동시에 또한 측정된 CR영상데이터가 산출된 추정선을 비교적 정확히 추적하고 있음을 보여준다.

IV. 결 론

방사선측정실험을 통해 고강도 금속의 CR 방사선 영상에서 생성되는 잡음을 모델링하였다. 이를 위해 원영상정보를 상수로 규정한 정밀급 스텝웨지를 실험시편으로 사용하여 8면 및 16면의 두 시편에 방사선을 투과하여 CR장비의 IP 상에서 각 단계별 영상을 취득하고 데이터화하였다. 영상데이터를 근거로 잡음모델링 파라미터인 일관성, 가우스효과, SNR 및 비선형성 인자를 추출하였다. 모델링 파라미터를 근거로 CR 장비로 고강도 금속의 방사선 영상 취득시 생성되는 잡음은 상대적으로 두께가 얇아질수록 산란방사선의 영향으로 SNR의 변동폭이 증가하나 가우스분포의 잡음 형태는 매질의 두께와 무관하게 그 유사성이 보존되는 동시에 지수함수적 비선형성을 정확히 추적하고 있음이 밝혀졌다. 이러한 사실은 고강도매질의 CR영상으로부터 잡음을 제거하고 원영상을 복원하는데 중요한 근거를 제공한다. 아울러 기하학적 측정 메커니즘에 의한 영상의 비선형 왜곡관측이나 실제 현장 적용은 후속 연구과제로 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] 이용, *비파괴검사의 기초 제 1 권*, 세진사, 2000년.
- [5] U. Zscherpel, Y Onel and U. Ewert, "Corrosion Inspection of Pipelines by Digital Industrial Radiology (DIR)," *NDT-net*, Vol. 7, no. 2, Feb. 2002.
- [6] P. Gravel, G. Beaudoin and J. A. D. Guise, "A Method for modeling noise in medical images," *IEEE Trans. Medical imaging*, Vol. 23, no. 10, pp. 1221-1232, Oct. 2004.
- [7] N. Scharfed and P. R. Pascual, "INES noise model," INES Document 4.2, 1998.
- [8] P. M. Goebel and A. N. Belbachir, "Noise estimation in panoramic X-ray images: an application analysis approach," in *Proc. of 13th Workshop on Statistical Signal Processing*, pp. 996-1001, Bordeaux, France, July 2005.
- [9] A. Workman and A. R. Cowen, "Signal, noise and SNR transfer properties of computed radiography," *Phys. Med. Biol.* Vol. 38, pp. 1789-1808, 1993.
- [10] O. Alekseychuk, *Detection of crack-like indications in digital radiography by global optimization of a probabilistic estimation function*, PhD Thesis, BAM-Dissertationsreihe, Band 18, Berlin, Germany, 2006.
- [11] H. H. Barrett and W. Swindell, *Radiographic imaging*, Academic Press, 1981.
- [12] A. Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1994.
- [13] 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.
- [14] C. Daniel and F. S. Wood, *Fitting Equations to Data*, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- [15] C. Kervrann and A. Trubuil, "An adaptive window approach for Poisson noise reduction and structure preserving in confocal microscopy," in *Proc. of IEEE ISBI2004*, Vol. 1, pp. 788-791, Arlington, VA, USA, April 2004.
- [16] 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.

---

 저자 소개
 

---



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>