

적응필터를 이용한 적층 복합재료에서의 역산란 X-Ray 신호처리 및 복원

Reconstruction and Deconvolution of X-Ray Backscatter Data Using Adaptive Filter

김노유*
 Nohyu Kim*

초 록 충격에 의해 복합 재료 내에 발생하는 층간 박리를 정량적으로 평가하기 위한 비파괴 방법중에서 Compton X-ray 역산란 기술은 초음파에 비해 비접촉식이며 박리 층간의 상호간섭이 없어 복합재료 단면의 박리 층의 위치와 크기를 검사하는데 효과적인 방법으로 사용되어 왔다. 그러나 X-ray 역산란 기술에 있어서 복합재료의 박리 층과 같은 미세한 결함의 측정을 위해 측정 정도를 높이면 역산란 양의 감소로 인해 신호 대 잡음 비(SNR)가 급격히 감소하여 결함검출 가능성이 크게 저하된다. 본 논문에서는 복합재료의 특성을 고려한 X-ray 역산란 모델을 기초로 적응필터를 사용하여 결함신호를 비선형 감쇄, 빔 경화(X-ray hardening), 비균질 특성과 같은 잡음 신호로부터 분리, 추출하는 방법을 제시하였다. 이렇게 분리된 결함신호로부터 정량적인 결함(박리)의 위치와 크기를 수학적 산란 모델과의 비교를 통해 최소 자승법을 이용하여 결정하였다.

주요용어: X-ray 역산란, 복합재료, 박리, 적응필터, 복원변환, 균속도

Abstract Compton X-ray backscatter technique has been used to quantitatively assess the impact damage in quasi-isotropic laminated composites and to obtain a cross-sectional profile of impact-damaged laminated composites from the density variation of the cross section. An adaptive filter is applied to the Compton backscattering data for the reconstruction and noise reduction from many sources including quantum noise, especially when the SNR(signal-to-noise ratio) of the image is relatively low. A nonlinear reconstruction model is also proposed to overcome distortion of the Compton backscatter image due to attenuation effects, beam hardening, and irregular distributions of the fibers and the matrix in composites. Delaminations masked or distorted by the first few delaminations near the front surface are detected and characterized, both in width and location, by application of an error minimization algorithm.

Keywords: X-ray backscattering, composite material, delamination, adaptive filter, deconvolution

1. 서론

X-ray 역산란 기술은 재료의 종류와 밀도에 민감한 특성으로 인해 고체 내에 존재하는 기공이나 이 물질(inclusion)을 구별하는데 탁월한 검출성능을 가지고 있으며 재료 내의 광범위한 공기 층이나 불규칙한 경계면에

방해 받지 않기 때문에 여러 분야에서 연구되어 왔다 [1-5]. X-ray 역산란 기술의 장점은 첫째로 단면만 검사(one-side inspection)가 가능한 점이 될 수 있는데 X-ray 역산란 장치에서 생성된 X-ray를 한쪽 면에서 재료 내로 입사시킨 후 반사된 X-ray를 같은 면에서 측정하기 때문에 대상 구조물을 검사하는데 커다란 유연성과 활용

가능성을 제공하며 비접촉 측정이 가능하므로 측정 물과 센서 사이에 접촉매질이 필요 없다는 점도 중요한 특징이다. 두 번째로 X-ray 역산란 기술에서는 초음파 측정에서 관찰되는 음영효과(shadow effect)가 없다. 초음파가 임피던스의 차가 현저한 여러 경계층을 통과하는 경우에는 투과계수가 작아져 통상 첫번째의 결합 층에 대한 정보는 좋은 민감도를 가지고 검출될 수 있으나 그 이후의 결합층에 대해서는 그 측정이 어려운데 특히 부식층이 여러 층으로 내재되었다거나 여러 박판이 결합되어 구성된 재료 사이에 공기 층이 있게 되면 두 번째 층, 세 번째 층과 같은 내부의 결합 층에 존재하는 결합을 찾는 것은 불가능하다. 더구나 대부분의 검사대상물이 외부, 혹은 내부 한 쪽에서 만이 접근할 수 없는 경우가 많기 때문에 양면에서의 검사가 용이치 못한 것이 현실이며 설명 양쪽 면에서의 접근이 가능할지라도 여러 층으로 이루어진 재료의 경우에는 큰 효과가 없다고 할 수 있다. 그러나 역산란 X-ray는 이러한 내부의 경계 층에서의 불연속성이나 재료 변화에 방해받지 않고 진행하며 오히려 그러한 변화에 대해 산란양이 민감하게 나타나므로 초음파에서와 같이 첫번째 결합에 의한 내부의 다른 결합으로부터의 신호를 왜곡시키는 문제점은 없다. 그러므로 층 구조물의 경계층이나 각 층 내부에 발생하는 결합, 특히 서로 상하에 겹쳐 발생하는 평면형 결합을 검출하거나 평가하는데 있어 X-ray 역산란 기술이 효과적으로 이용될 수 있는 것으로 여러 연구 결과들에서 발표되고 있다[2-4]. 항공분야에 중요하게 응용되는 적층 복합재료는 이러한 층 구조물의 대표적인 예라고 할 수 있는데 복합재료에서의 지속 충격하중에 의한 대표적인 재료 파손 형태인 층간 박리(delamination)는 가벼운 외부로부터의 충격에 의해서도 발생할 수 있다는 점과 충격지점의 표면에서는 눈으로 확인하기 어렵다는 점에서 충격하중에 의해 재료 내부에 발생된 박리 층의 위치와 파손 면적 및 그 정도를 평가하는 것은 복합재료의 잔존강도와 수명을 예측하는데 중요성이 크다고 할 수 있다[6-7].

복합재료의 박리결합이 다른 금속 층 구조물에서의 결합과 다른 점은 금속 박판으로 이루어진 층 구조물에서의 부식이나 박리 층에 비해 그 두께가 상당히 작기 때문에 고강도의 X-ray 역산란 장치가 요구되며 복합 재료를 구성하는 각 층(ply) 자체가 매우 얇고(5-15 μm) 섬유성분(fiber)과 에폭시 성분(matrix)으로 이루어져서 균질하기 않기 때문에 측정신호의 왜곡현상이 발생한다는 것이다. 특히 X-ray 역산란 장치의 정밀도를 높이는

경우 산란 초점부의 크기가 작아져서 신호 대 잡음비(SNR)가 감소함으로써 그 왜곡 현상이 증폭될 수 있다. 그러므로 복합재료의 박리검사에서는 X-ray 빔경화(hardening)현상에 의한 감쇄계수의 비선형성과 복합 재료내 불균질성에 따른 재료 자체 물성의 변화, 검사장치의 진동과 X-ray 신호잡음(quantum noise)들이 상대적으로 커져서 박리결합에 의한 신호변화에 영향을 증대시키므로 이들을 고려해 주어야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 적응필터를 이용하여 적층 복합재료(laminated composites)의 충격에 의한 층간 박리결합을 정량적으로 평가하기 위한 새로운 신호 처리 기법이 제시되었다. 재료 내에서의 비선형 감쇄, 재료의 불균질성에 의한 영향을 고려한 수학적 산란 모델에 대해 적응필터를 적용함으로써 복합재료의 박리 결합신호를 잡음신호로부터 분리하였으며 최적화 기술에 의한 역변환(inversion) 작업을 통해 결합의 위치와 간극의 크기를 결정하였다.

2. Compton X-ray 산란

X-ray가 재료내부의 원자와의 충돌에 의해 발생하는 산란은 크게 X-ray의 에너지(50-500keV)와 재료의 종류에 따라 3가지의 유형으로 분류된다. Compton 산란, 광전 산란, 그리고 Rayleigh 산란이 그것인데 원자번호가 낮은 알루미늄이나 탄소등에서 가장 중요한 산란형태는 Compton산란이며 높은 원자번호를 가지는 재료나 고에너지 X-ray에 의해 발생하는 산란의 주요 형태는 광전 산란과 Rayleigh 산란으로 나타난다[1-3].

복합재료와 같이 낮은 원자번호의 재료 내에서의 X-ray산란이 모두 Compton scattering에 의해 결정된다고 가정하면 X-ray는 입사된 X-ray 에너지보다 훨씬 결속력이 약한 재료원자내부의 자유 전자들과 충돌하면서 X-ray 에너지의 일부가 소실되면서 산란되고 이때 산란 각도에 따른 에너지의 분포는 Klein-Nishina식에 의해 정의된다[4-5]. 이 식으로부터 역산란각(90-180도)에서의 X-ray산란이 진행방향(0-90도)에서 만큼 크지는 않지만 유용한 정도의 강도(intensity)를 가지고 있음을 알 수 있는데 이것은 고전적인 투과법과는 달리 X-선원(source)과 같은 위치에서 신호를 측정할 수 있는 단일면 검사가 가능함을 의미한다. 이러한 역방향 산란장의 강도는 재료 원자 내의 모든 자유 전자들과 충돌시 발생하는 개개의 산란장의 합으로 표시될 수 있으므로 전체 역 산란장의 세기(strength)는 재료 원자내의 전자밀도와 선형적으로

비례한다. 이 전자밀도는 재료의 고유 물성치로서 낮은 원자번호를 가진 재료에 대해서는 전자밀도는 물리적인 밀도와 선형비례의 관계를 가진다[4-5]. 이로부터 Compton 산란을 측정함으로써 재료내부의 불연속적인 결함 검사가 가능하게 된다.

3. 균질재료 내에서의 X-ray Compton 산란

X-ray 빔(beam)이 3차원 고체내부에서 발생시키는 산란장은 Fig. 1에서 나타난 원통형 요소에서의 연속 방정식인 Boltzmann equation으로 표현된다[8].

$$(\Omega \cdot \nabla + \mu(\lambda))f(r, \Omega, \lambda) = L \cdot f(r, \Omega, \lambda) + S(r, \Omega, \lambda) \quad (1)$$

여기서 $f(r, \Omega, \lambda)$ 는 위치 r 에서 Ω 방향으로 생성되는 파장 λ 의 X-ray 산란양(photon flux 또는 intensity)이며 $S(r, \Omega, \lambda)$ 는 재료 내에 존재하는 X-ray원(source)을 의미하며 $\mu(\lambda)$ 는 X-ray 파장에 관계된 감쇠계수 이다, L 은 산란(scattering) 연산자로서 $Lf(r, \Omega, \lambda)$ 는 입사된 파장 λ 의 X-ray 양자 $f(r, \Omega, \lambda)$ 가 위치 r 에서 재료와 충돌하여 Ω 방향으로 만들어내는 산란장을 의미하며 다음처럼 정의된다.

$$L \cdot f(r, \Omega, \lambda) = \int \int k(\Omega, \lambda, \Omega', \lambda') f(r, \Omega, \lambda) d\Omega' d\lambda' \quad (2)$$

식(2)에서의 $k(\Omega, \lambda, \Omega', \lambda')$ 는 Ω' 방향으로 입사한 파장 λ' 의 X-ray 양자(photon)가 산란 후 Ω 방향으로 파장 λ 의 양자로 변화되어 진행할 산란 확률 함수이다[8-9].

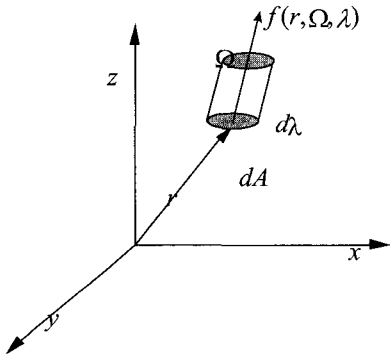


Fig. 1 Infinitesimal cylinder element of scattering flux

위의 Boltzmann equation은 X-ray 산란장을 표현하는 일반식이며 1차원의 X-ray 빔이 재료깊이 방향 x 에 대해 일정한 각도로 재료에 입사된다면 X-ray빔이 재료 내에서 n 번 충돌하여 만들어지는 n 차 산란장의 강도 $f^{(n)}$ 는 다음처럼 주어진다[8-9].

$$f^{(n)}(x, \Omega, \lambda) = \frac{1}{2|\eta^{(n)}|} \int d\tau \cdot d\lambda' \cdot \int d\Omega' k(\Omega, \lambda, \Omega', \lambda') \cdot \exp\left[-\frac{|x-\tau|}{|\eta^{(n)}|}\right] f^{(n-1)}(x, \Omega', \lambda') \quad (3)$$

이 식에서 $\eta^{(n)}$ 는 재료의 깊이 방향인 x 축에 대한 n 차 산란 방향의 코사인 각을 표시하며 우변의 지수 함수항은 X-ray빔의 감쇄를 나타내고 $f^{(n-1)}$ 는 $(n-1)$ 차 산란장을 표시한다. 이 식은 산란장의 강도(intensity)가 산란 확률계수 k , 감쇄효과 μ , 그리고 입사 빔의 강도로 결정됨을 표현하고 있다. 일반적으로 X-ray 역산란 실험에서 지배적 산란장이 1차 산란이므로 단파장 X-ray가 균질한 재료 내에서의 산란을 가정할 때 식(3)은 다음처럼 3개의 항으로 간단히 표시할 수 있다.

$$f^{(1)}(x) = I_0 \cdot k_0 \cdot \exp\left[-\frac{\mu_0 \cdot x}{|\eta^{(0)}|}\right] \quad (4)$$

여기서 I_0 는 입사 빔의 강도이며 k_0 는 재료의 산란계수를, 마지막 지수 함수 항은 X-ray 빔의 감쇄를 나타내는데 이때의 감쇄계수 μ_0 는 균질한 재료에서 빔 경화 (beam hardening) 현상이 없다고 가정할 때 상수로 표현될 수 있다. 또한 $\eta^{(0)}$ 는 재료의 깊이 방향인 x 축에 대한 입사 빔의 입사 코사인 값을 나타낸다. 이렇게 균질한 재료에 단일 주파수 성분의 X-ray빔이 입사 되어 산란될 경우에는 식(4)로부터 쉽게 알 수 있듯이 측정된 1차 역산란양 $f^{(1)}(x)$ 에서 선형 감쇄효과 μ_0 를 보상해 주면 쉽게 재료의 산란계수 k_0 를 구할 수 있어 재료의 밀도 변화(결함)를 구할 수 있다. 그러나 복합재료에서와 같이 재료가 균질하지 않고 산업용 X-ray 튜브와 같이 광대역의 주파수범위를 가진 X-ray를 사용할 경우에는 빔 경화 현상과 비선형 감쇄의 영향으로 인해 식(4)와 같은 선형 감쇄 모델은 많은 오차를 유발할 수 있다.

4. 비균질 재료에서의 X-ray 산란모델

복합 재료에서와 같은 비균질 특성을 가지는 재료에서의 역산란장에 대한 1차원 Boltzmann equation은 산란계수와 감쇄계수가 재료의 불균질성에 의해 깊이(x)에 따라 변화하기 때문에 Boltzmann equation은 더 이상 해석적으로 해를 구할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 재료의 불균질성과 X-ray빔의 비선형 감쇄에 의해 나타나는 영향을 수학적으로 모델링하기 위해 앞장에서 구한 균질 재료 내에서의 1차원 Boltzmann equation의 해를 기본으로 새로운 모델을 제시하고자 한다.

식(4)에서 산란계수가 위치에 따른 변수이고 또한 감쇄계수도 위치 x에 따른 함수라고 하면, 즉 $\mu = \mu(x)$, $k = k(x)$ 이라고 가정하여 비균질 재료 내에서의 비선형 감쇄를 표현한다면 식(4)의 1차 산란장은 다음처럼 표현될 수 있다.

$$f^{(1)} = I_0 \cdot k(x) \cdot \exp\left[-\frac{\mu(x) \cdot x}{|\eta^{(0)}|}\right] \quad (5)$$

산란계수 k의 변화는 우선 복합재료의 섬유와 에폭시(fiber/matrix)의 부피 비(volume ratio)가 위치에 따라 변동하는 것과 같은 비균질성에 의해 발생할 수 있으며 두 번째는 재료 내 결함(delamination)에 의한 변화에 의해 만들어질 수도 있고 그 외에 X-ray 신호잡음(quantum noise)이나 전기 잡음등 다양한 원인으로 인한 noise성분에 의해 발생된다고 가정할 수 있는데 이들의 영향을 수학적으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k(x) = \overline{C_s} + p(x) + d(x) + n(x) \quad (6)$$

여기서 상수 $\overline{C_s}$ 는 이상적인 복합 재료 내에 전혀 결함이 없는 경우의 평균 산란계수를 나타내며 $p(x)$ 는 이 평균산란 계수에 부가되어 변동하는 재료의 불균질성에 의한 산란계수의 변동을, $d(x)$ 는 재료의 결함(delamination)에 의한 산란계수의 변화를, 그리고 $n(x)$ 는 그 외의 원인에 의한 noise성분을 표시한다. 또한 감쇄계수의 위치에 따른 비선형성을 기술하기 위해 평균 재료의 선형 감쇄계수 $\overline{\mu}$ (상수)와 비선형 감쇄효과 $\mu(x)$ 를 분리해서 표현하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mu(x) = \overline{\mu} + a(x) \quad (7)$$

식(6)과 (7)을 식(5)에 대입하면 결함이 있는 비균질 재

료 내 임의의 위치 x에서의 1차 산란량 $f^{(1)}(x)$ 를 $I(x)$ 라고 편의상 표기할 때 그 표현은 다음처럼 얻어진다.

$$\begin{aligned} I(x) &= f^{(1)}(x) \\ &= I_0 \cdot \left[\overline{C_s} + p(x) + d(x) + n(x) \right] \\ &\quad \cdot \exp\left[-\frac{x \cdot \left[\overline{\mu} + a(x) \right]}{|\eta^{(0)}|}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 비선형 $\mu(x)$ 를 분리해서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I(x) &= I_0 \cdot \left\{ \overline{C_s} \cdot e\left[-\frac{x \cdot \overline{\mu}}{|\eta^{(0)}|}\right] + p(x) \cdot e\left[-\frac{x \cdot \overline{\mu}}{|\eta^{(0)}|}\right] \right. \\ &\quad \left. + d(x) \cdot e\left[-\frac{x \cdot \overline{\mu}}{|\eta^{(0)}|}\right] + n(x) \cdot e\left[-\frac{x \cdot \overline{\mu}}{|\eta^{(0)}|}\right] \right\} \cdot e\left[-\frac{x \cdot a(x)}{|\eta^{(0)}|}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)의 세 번째 항을 검토해보면 결합신호 $d(x)$ 는 결함(delamination)이 있는 위치에서만 값이 존재하고 결함이 없는 곳에서는 제로(zero)인데 반해 비선형 감쇄효과 $\mu(x)$ 는 결함이 있는 곳에서는 결함을 전공의 상태로 가정한다면 제로이며 결함이 없는 다른 재료 내에서만 값을 가지므로 $d(x)$ 에 영향을 전혀 주지 못한다. 그러므로 1차 산란장 $I(x)$ 는 식(9)로부터 다음처럼 표현될 수 있다.

$$I(x) = I_0 \cdot \left[\overline{C_s} + P(x) + d(x) + N(x) \right] \cdot e\left[-\frac{x \cdot \overline{\mu}}{|\eta^{(0)}|}\right] \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} P(x) &= \overline{C_s} \cdot \left(e\left[-\frac{x \cdot a(x)}{|\eta^{(0)}|}\right] - 1 \right) + P(x) \cdot e\left[-\frac{x \cdot a(x)}{|\eta^{(0)}|}\right], \\ N(x) &= n(x) \cdot e\left[-\frac{x \cdot a(x)}{|\eta^{(0)}|}\right] \end{aligned} \quad (11)$$

5. 역산란 신호의 복원(reconstruction)

앞장의 식(10)에서 구한 $I(x)$ 는 복합재료의 임의의 깊이 x에서 측정된 역산란량(intensity)이라고 할 수 있는데 이 데이터로부터 결함신호 $d(x)$ 를 추출하기 위해서 본 논문에서는 크게 3가지 단계의 신호처리 과정을 통하여 역산란 신호를 복원하였다. 첫 번째 단계는 식(10)의 선형 감쇄계수 $\overline{\mu}$ 의 영향을 제거하는 작업인데 선형 감쇄계수 $\overline{\mu}$ 의 영향이 제거된 복원 역산란 신호를 $\overline{I}(x)$ 라고 하면 $\overline{I}(x)$ 는 다음 식과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{I}(x) &= I(x) \cdot \exp\left[\frac{x \cdot \bar{\mu}}{|\eta^{(0)}|}\right] \\ &= I_0 \cdot [\bar{C}_s + P(x) + d(x) + N(x)] \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식에서 상수 $\bar{\mu}$ 는 측정된 역산란양 $I(x)$ 에서부터 감쇄 평균값으로 구하거나 적당히 가정될 수도 있으나 본 연구에서는 전자의 방법을 택하였다. 식(12)는 측정된 역산란양 $I(x)$ 에서 평균 감쇄계수에 의한 영향을 보상한 것을 나타내는데 선형 감쇄계수 $\bar{\mu}$ 의 영향이 제거된 복원 역산란 신호 $\bar{I}(x)$ 는 결함의 크기가 크고 비균질성이 무시할 만하고 측정 신호의 SNR이 충분히 크면 식(11)에서의 재료의 비균질성이나 비선형 감쇄의 영향을 나타내는 $P(x)$ 나 $N(x)$ 가 결함신호 $d(x)$ 에 비해 매우 작으므로 $\bar{I}(x)$ 가 결함정보 $d(x)$ 를 직접적으로 나타낸다고 할 수 있다. 즉 식(11)은 $\bar{I}(x) = I_{(0)} \cdot [\bar{C}_s + d(x)]$ 으로 표현될 수 있으므로 $d(x)$ 를 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 복합재료의 결함(박리)이 작아서 $P(x)$ 나 $N(x)$ 가 $d(x)$ 에 비해 무시할 수 없을 경우, $\bar{I}(x)$ 는 비균질성이나 비선형 감쇄효과에 의해 왜곡되어, 이를 사용하여 $d(x)$ 를 구하면 역산란 이미지의 대비도(contrast)가 나빠지며 이 결과로 결함의 정량적인 평가에 오차가 증가하게 된다.

이러한 문제점을 보완하기 위해서는 비선형 감쇄효과와 재료의 비균질성, 노이즈의 영향들을 제거 또는 감소시켜야 하는데 이를 위해 본 논문에서는 복합재료의 역산란 특성과 X-ray 신호특성에 대한 실험적 고찰로부터 다음과 같은 가정을 통해 그 영향들을 추출하였다. 재료의 불균질성이나 비선형 감쇄효과를 나타내는 $P(x)$ 는 층간 박리와 같은 불연속적인 급속한 변화를 기술하는 $d(x)$ 나 noise를 나타내는 $N(x)$ 에 비해 그 변화의 비율이 매우 완만하므로 주파수 영역에서 볼 때 상대적으로 저주파 대역에서 지배적인 반면 $d(x)$ 와 $N(x)$ 는 상대적으로 고주파 대역에서 지배적인 역할을 한다고 가정할 수 있다. 이 신호특성을 전제로 1차로 평균 감쇄계수 $\bar{\mu}$ 에 의한 영향만을 보상한 역산란 신호 $\bar{I}(x)$ 로부터 적응 필터를 이용하여 재료의 불균질성이나 비선형 감쇄효과를 나타내는 $P(x)$ 의 영향을 분리할 수 있다. 이것이 역산란 신호를 복원하는 두 번째 과정인데 이를 위해 우선 역산란 신호 $\bar{I}(x)$ 를 가상적인 두 주파수 대역의 두 성분으로 나누어 저주파 성분을 $IL(x)$, 고주파 성분을 $IH(x)$

라고 표시하면 $\bar{I}(x)$ 는 다음처럼 표현된다.

$$\bar{I}(x) = IL(x) + IH(x) \quad (13)$$

그리고 $\bar{I}(x)$ 의 저주파 대역에서, 즉 $IL(x)$ 신호에서는 상수인 \bar{C}_s 를 포함해 $P(x)$ 가 지배적인 영향을 미치며 고주파 대역 $IH(x)$ 에서는 $d(x)$ 와 $N(x)$ 가 지배적인 인자라고 가정할 때 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} IL(x) &\approx I_0 \cdot [\bar{C}_s + P(x)] \\ IH(x) &\approx I_0 \cdot [d(x) + N(x)] \end{aligned} \quad (14)$$

또한 $d(x)$ 에 노이즈 $N(x)$ 가 혼합된 신호를 $g(x)$ 라고 하면 식(13)과 식(14)로부터 신호 $g(x)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_0 \cdot [d(x) + N(x)] &= I_0 \cdot g(x) \\ &\approx \bar{I}(x) - IL(x) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $IL(x)$ 는 $\bar{I}(x)$ 를 저주파 대역 통과 필터(low-pass filtering)에 통과 시켜서 얻어지는 신호인데 그 구체적인 주파수 대역폭(low-pass band)은 일반적으로 정의할 수 없고 복합재료의 특성이나 결함(delamination)의 크기와 검사시스템의 정밀도 및 노이즈의 성격에 따라 복합적으로 결정될 수 있다. 예를 들어 측정 데이터의 SNR이 매우 클 경우, 즉 박리가 심하게 발생되었을 경우나 재료의 비균질성이 미약하게 나타날 경우, $d(x)$ 가 $P(x)$ 에 비해 상대적으로 지배적인 영향을 가지므로 저주파 대역 통과 필터의 주파수 대역은 넓게 설정되어야 할 것이다. 반면에 SNR이 작아 노이즈가 많고 비균질성과 비선형 감쇄효과가 증대될 경우에는 사용 필터의 주파수 대역은 좁아져야 할 것이다. 물론 $[d(x) + N(x)]$ 도 저주파 대역 통과 필터에 의해 발생하는 저 주파수 성분의 제거로 신호가 부분적으로 왜곡될 수 있기 때문에 적절한 대역의 선택이 중요하다고 할 수 있다. 이러한 주파수 대역의 능동적 변화를 주기 위해 본 논문에서 사용한 방법이 적응 필터이다.

신호 $I_0 \cdot [d(x) + N(x)]$ 가 결정되면 마지막으로 노이즈 성분인 $N(x)$ 를 제거 또는 감소시키는 신호처리 과정이 필요한데 이것 역시 본 논문에서는 노이즈 신호 $N(x)$ 에 대한 적절한 통계적 모델의 선택과 국부적 신호의 통계적 특성을 고려한 적응필터를 사용하여 노이즈를 감소시켰다. 노이즈 신호 $N(x)$ 를 평균(mean)값이 제로

이고 분산(variance)이 σ^2 인 가우스(Gaussian)분포의 랜덤신호로서 가정할 때 신호 $I_0 \cdot [d(x) + N(x)]$ 가 가지는 국부적 통계인자(local statistics), 즉 국소평균(local mean)과 국소분산(local variance)값을 이용하여 결합신호 $d(x)$ 를 크게 왜곡시키지 않으면서 효과적으로 $N(x)$ 를 줄일 수 있다. 이 적응 필터의 원리는 측정신호로부터 국소 평균값과 국소 분산값을 구하여, 미리 가정하거나 알고 있는 노이즈 신호 $N(x)$ 의 평균값과 분산 값과의 비교를 통해 선택적으로 저주파 대역 통과 필터의 주파수 밴드를 조절함으로써 노이즈의 영향력이 클 경우에는 주파수 대역폭을 작게 하고 노이즈가 상대적으로 작은 곳에서는 주파수 대역 폭을 넓게 하여 고주파 성분을 통과시킴으로써 필터 자체가 스스로 신호에 적응하도록 하여 신호의 SNR을 높임으로써 구하고자 하는 신호 $d(x)$ 를 보다 정확하게 결정할 수 있다. 이 적응필터 개념은 앞서 설명한 평균 감쇄계수를 보정한 역산란 신호 $\bar{I}(x)$ 로부터 결합신호 $[d(x) + N(x)]$ 를 추출하기 위해서도 사용되었다.

6. 디지털 역산란 X-ray장치(digital X-ray backscatter imaging system)

X-ray 역산란 양을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 크게 3부분으로 구성되는데 X-ray 입사 빔을 만들어주기 위한 장치인 X-ray 튜브와 측정하고자 하는 특정 위치에 초점을 맞추어 그 지점으로부터 역산란 되는 X-ray 양을 측정하는 역산란 카메라(backscatter camera)부분, 재료 내부를 스캐닝하기 위한 이송 장치 및 컴퓨터 제어장치로 이루어져 있다. 산업용 고압 X-ray 튜브로부터 발생하는 빔을 두개의 슬릿(aperture)들로 조절(collimation)하여 폭이 매우 가는 빔(약 $2.5 \mu\text{m}$)을 만들어 재료 내에 수직 또는 특정각도로 입사시키고 이 빔이 재료와 충돌하면서 발생하는 특정 방향으로의 산란량을 측정하기 위해 역산란 카메라가 입사각과 일정한 각도에 위치하여 있다. 이 카메라 끝단에는 선택된 특정 산란각도에서의 X-ray 역산란량을 측정하기 위해 고체형 X-ray 측정 장치(scintillator type NaI detector)를 장착하였다. 전기적인 신호로 바뀐 역산란 양은 증폭기와 분석기를 거쳐 컴퓨터에 저장되어지며 한 점에서의 데이터 수집이 끝나면 컴퓨터가 재료를 이송하거나 카메라를 원하는 위치로 이송하여 계속적인 스캐닝을 반복함으로써 재료 내부의 밀도변화에 대한 이미지를

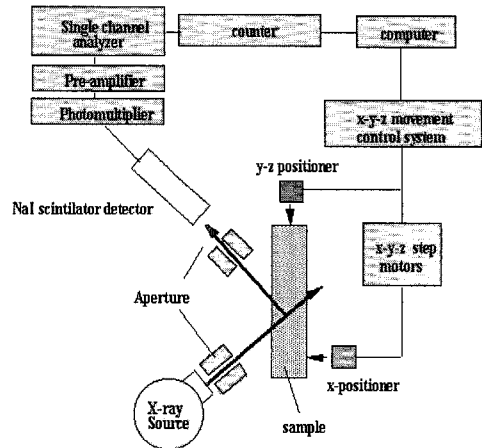


Fig. 2 Configuration of Compton X-ray backscatter imaging system

만들게 된다. 그러므로 1차원적인 A-scan은 물론 2차원 단면, 3차원 영상을 구성할 수 있으며 입사 빔을 주사하는 위치에서 검사와 측정이 동시에 수행된다.

역산란 이미지의 해상도(resolution)는 역산란 카메라가 형성하는 초점부(scattering voxel)의 기하학적인 크기에 좌우되는데 이것은 카메라를 구성하는 슬릿들의 간극과 거리를 변경함으로써 조절 할 수가 있다. 측정정도를 증대시키기 위해서는 초점부 크기를 작게 설계하는 것이 좋으나 이에 따라 역산란양이 줄어들게 되어 측정시간이 늘게 됨으로 결함의 크기에 따라 최적의 크기를 결정하는 것이 보통이다. 본 논문에서 사용된 실험장치는 복합재료 내의 주박리 층들을 검사하는 목적으로 최대 0.0001 inch ($2.5 \mu\text{m}$)의 해상도로 역산란 카메라가 조정되어 실험되었다. X-ray 측정장치에서 측정되는 X-ray 빔의 강도(intensity)는 단위 시간 내에 측정기에 입사된 특정에너지 레벨이상의 X-ray 양자 수를 계측함으로써 결정되기 때문에 X-ray 역산란량의 단위는 단위 시간당 측정된 양자의 수(count)로 표시된다.

7. 적응필터를 이용한 신호처리

적응필터에 의한 신호처리는 복합재료의 박리결함을 검사하는 경우 일반적인 X-ray 역산란 양의 감소로 인해 SNR이 낮아지기 때문에 주파수 영역에서보다 공간영역(spatial domain)에서 수행하였다. 복합재료의 두께 방

향(x축)으로 역산란 양을 측정하여 얻어지는 A-scan 데이터 수를 N 개라 할 때 위치 x_i 에서 측정된 역산란 양을 식(15)에서 정의된 $g(x_i)$ 에 해당하는 g_i 라고 하자. 이때 $g(x_i) = d(x_i) + n(x_i)$ 이므로 $g_i = d_i + n_i$ 라고 간단히 표현된다. 이 관계로부터 구하고자 하는 결합 신호 d_i 는 다음과 같은 적응필터의 알고리즘으로부터 결정될 수 있다[10].

$$d_i = \bar{d}_i + k_i (g_i - \bar{d}_i), \quad k_i = \frac{Q_i}{Q_i + \sigma^2} \quad (16)$$

여기서, 노이즈 신호의 분산값을 표시하며 σ^2 는 \bar{d}_i 와 Q_i 는 신호 d_i 에 대한 priori평균과 분산값을 나타내는 데 이 값들은 다음처럼 신호 g_i 로부터 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{d}_i &\cong E [g_i - n_i] \\ &= E [g_i] - E [n_i] = E [g_i] = \bar{g}_i \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Q_i &\cong E [(d_i - \bar{d}_i)^2] \cong E [(g_i - n_i) - \bar{g}_i]^2 \\ &= E [(g_i - \bar{g}_i)^2] + \sigma^2 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 E 는 기대값을 나타내는 연산자이며 노이즈 신호는 평균값이 제로인 가우스(Gaussian)분포로 가정하였다. 식(16)에서 나타난 보정 계수(gain) k_i 는 Q_i 와 σ^2 가 모두 양수이므로 제일 작을 경우 0에서 최대값 1사이의 값을 취하게 됨을 알 수 있는데 이 값이 Q_i 와 σ^2 의 비에 따라 변동하면서 필터의 특성을 변화시킨다. 예를 들어 노이즈가 심한 구간에서는, 즉 노이즈의 분산(σ^2)이 신호 d_i 의 분산(Q_i)보다 지배적이면 k_i 는 작아져서 0에 가깝게 되어 $d_i = \bar{d}_i$ 가 얻어지므로 필터링된 신호는 d_i 의 평균값이 되고 이는 식(17)로부터 바로 측정된 신호 g_i 의 평균값으로 결정된다. 반면에 노이즈의 분산(σ^2)가 신호 d_i 의 분산(Q_i)보다 매우 작으면, 즉 노이즈가 거의 없는 영역에서는 k_i 가 1에 가깝게 되어 $d_i = g_i$ 가 되어 x_i 에서 측정된 신호 g_i 그 자체가 필터의 출력 값이 된다.

그러므로 적응필터는 국부적 통계특성(local statistics)에 따라 저주파 대역 통과 필터의 차단 주파수(cut-off frequency)를 변경하여 때로는 저주파 대역 통과 필터로 때로는 고주파 대역 통과 필터처럼 작용하게 되어 노이

즈가 클 경우에는 신호를 평탄(smooth)하게 만들며, 노이즈가 작을 경우 신호를 급변(sharp)하게 만들어 준다. 국부적 통계특성(평균값과 분산)을 구하기 위해 신호처리에 사용되는 윈도우 크기(window size)는 바로 국부적 통계특성에 영향을 미치기 때문에 적절히 선택되어야 할 중요한 변수인데 윈도우 크기가, 즉 평균값과 분산 값을 계산하기 위해 사용되는 연속적인 데이터 갯수(pixel 수)가 너무 작으면 적응필터의 기능이 효과적이지 못하며 또 너무 큰 윈도우 크기를 사용하면 필터링 도중 미세한 정보의 누락이 생겨 문제가 발생한다. 그러므로 추출하고자 하는 신호의 특성과 노이즈에 따라 적절한 윈도우 크기가 결정되어야 한다.

앞장에서 설명된 수학적 모델인 식(10)으로부터 박리결합신호 $d(x)$ 를 구하기 위해 충격하중에 의해 손상된 복합재료의 한 지점에서 깊이 방향으로 역산란 신호를 Fig. 2의 X-ray 역산란 장치를 이용하여 측정하였다. 이 신호를 Fig. 3에서 보여주고 있는데 이것이 식(10)에서 표현된 1차 산란장 $I(x)$ 이며 이 신호에서 평균 감쇄효과를 보상한 신호 $\bar{I}(x)$ 가 Fig. 5에 나타나 있다. 이때 사용된 평균 감쇄계수는 실험에서 얻어진 복합재료 시편의 역산란 데이터인 Fig. 4로부터 커브 피팅(curve-fitting)하여 구하였는데 평균 감쇄효과를 보정한 후에도 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 비선형적인 감쇄효과와 비균질 특성의 영향은 여전히 많이 남아 있음을 알 수 있다. 이 영향을 보상하기 위해서는 식(15)에서 기술된 바와 같이 $\bar{I}(x)$ 의 저주파 성분을 추출해야 하는데 이것은 식(16)의 적응필터를 저주파 대역 통과 필터로 작동시켜서(즉,

$k_i = 1$) $\bar{I}(x)$ 의 저주파성분을 구하였으며 이것이 Fig. 5의 점선으로 나타나 있다. 이 성분을 식(13)-(15)에 의해 $\bar{I}(x)$ 에서 분리해주면 감쇄효과와 비균질 특성이 보상된 신호 $I_0[\bar{C}_s + d(x) + N(x)]$ 가 식(15)로부터 결정될 수 있는데 Fig. 6은 이 신호를 나타내고 있다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교해 보면 비선형 감쇄효과와 비균질 특성이 보완된 신호 Fig. 6가 그렇지 않은 Fig. 5의 데이터에 비해 결합신호의 대비도가 우수함을 알 수 있다. Fig. 6에서 다시 평균 산란계수 \bar{C}_s 를 제거해주면 잡음신호가 실린 결합신호 $[d(x) + N(x)]$ 가 얻어지는데 이것을 Fig. 7의 점선이 표시하고 있다. Fig. 7의 신호를 적응필터를 이용하여 잡음을 저감시킨 후 얻어지는 결합신호 $d(x)$ 는 Fig. 7의 실선과 Fig. 8에 표시되어 있다. 이 과정에서 사용된 윈도우 크기는 박리결합의 크기와 측정시

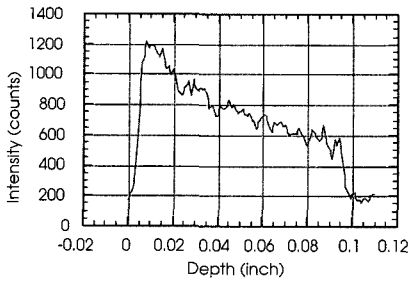


Fig. 3 Compton backscattered X-ray raw data

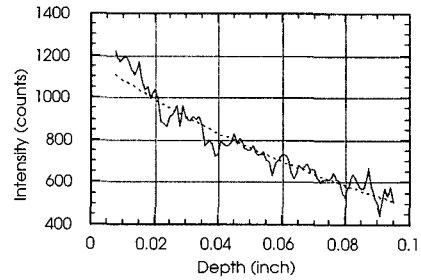


Fig. 4 Average $\bar{\mu}$ attenuation coefficient

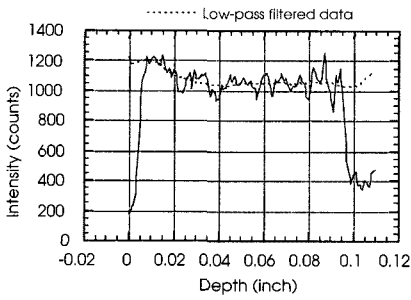


Fig. 5 Data after compensation of $\bar{\mu}$

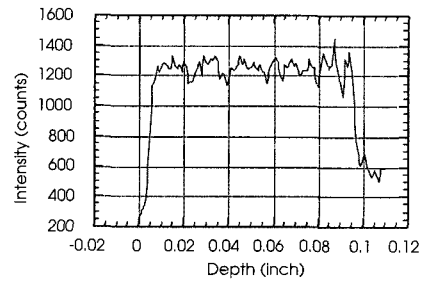


Fig. 6 Reconstructed data

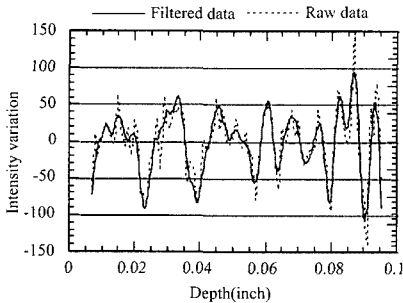


Fig. 7 Noise reduction by adaptive filtering

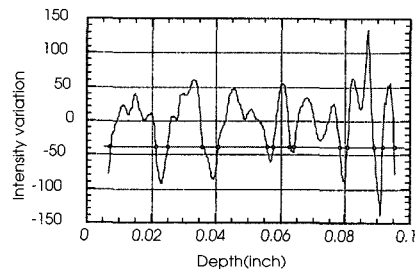


Fig. 8 Threshold for delamination

스텝의 정도를 고려하여 $18 \mu\text{m}$ (7pixels)를 사용하였다.

8. 최적화 기법을 이용한 역변환

다음은 적응필터를 사용하여 Fig.6에서 얻어진 신호 $I_0[\bar{C}_s + d(x)]$ 로부터 박리결함의 위치와 간극의 크기를 정량적으로 결정하기 위하여 역변환(deconvolution)을 수행하였다. 이를 위해 신호 $I_0[\bar{C}_s + d(x)]$ 가 재료의 밀도 변화 $\rho(x)$ 와 역산란 X-ray 측정 시스템의 특

성 함수인 점분포 함수(point spread function, PSF)의 컨볼루션(convolution)에 의해 만들어진 것으로 가정하여 다음과 같은 수학적 모델을 수립하였다.

$$I_0[\bar{C}_s + d(x)] = \rho(x) \otimes PSF \quad (19)$$

여기서 \otimes 는 공간영역(spatial domain)에서의 컨볼루션 적분을 표시한다. 식(19)로부터 이상적인 재료의 밀도 변화 $\rho(x)$ 는 주파수 영역에서 역변환 필터(inverse filter)를 사용하여 쉽게 구할 수 있으나 실제 측정된 신호의

경우에는 측정신호에 잡음이나 에러가 존재하게 되므로 직접적인 역변환은 노이즈를 증폭하기 때문에 사용하기 곤란하다. 이 경우 다음과 같이 측정신호와 수학적 모델과의 에러를 최소화함으로써 밀도변화 $\rho(x)$ 를 구하는 방법이 일반적이다[9,11-12].

$$\text{Minimize [Error = |I}_0 \cdot [\bar{C}_S + d(x)] - \rho(x) \otimes \text{PSF}|^2] \quad (20)$$

이 역변환 과정을 위해서는 역산란 시스템의 PSF를 결정하여야 하는데 PSF는 실제 실험으로부터 얻은 결과를 이용할 수도 있고 측정시스템의 기하학적 구조로부터 계산된 결과를 사용할 수도 있다. 실험으로부터 PSF를 얻기 위해서는 매우 잘 연마된 평면을 스캐닝 함으로써 얻어지는데 본 논문에서는 PSF를 카메라 슬릿의 기하학적 크기의 반에 해당하는 표준편차를 가지는 가우스 분포로 가정하여 사용하였다. 밀도변화 $\rho(x)$ 는 균질한 복합 재료 내에 진공으로 가정된 여러 박리 층이 삽입된 일차원적인 밀도 변화를 가정하였으며 에러함수를 최적화하기 위한 방법으로는 BFGS기법을 사용되었다[11-12].

역변환 과정을 통하여 결정된 박리 층의 위치와 간극(opening size)은 여러 곳에서 다양하게 결정될 수 있는데 박리 층의 간극이 매우 작아지면 이것이 실제 결함인지 아니면 노이즈인지를 판정할 필요가 있다. 이것은 역산란 측정시스템의 변조 전달함수(Modulation Transfer Function, MTF)와 X-ray고유의 노이즈 특성(quantum noise)을 고려하여 결정할 수 있는데 본 실험에서는 시스템의 최대 정밀도 1 μm 보다 작은 경우나 X-ray 고유잡음보다 작은 신호변화는 결함이 아닌 노이즈에 의한 에러라고 판정하였다. X-ray 산란측정에서 일반적으로 관찰되는 고유 잡음은 포아송(Poisson) 분포특성을 가지는데 그 표준편차가 측정된 역산란 양의 제곱근으로 표시되므로 이 값을 기준 값(threshold)으로 하여 이보다 큰 신호의 변화만이 결함(박리)에 의한 것이라고 가정하였으며 이러한 조건을 만족하는 지점들에서만 역변환(BFGS)을 통해 결함의 위치와 크기를 결정하였다. Fig. 8에서 실선으로 나타난 수평 직선은 이 기준 값을 나타내며 이보다 작은 신호 값을 보이는 위치에서 결함(박리)이 발생하였다고 가정하였다. 최종적인 역변환 과정의 결과를 Fig. 9에서는 커브 피팅(curve-fitting)의 모습으로 표현하였고, 최종 역변환 과정을 거쳐 얻어진 재료 내 밀도변화는 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 10에서 수직 좌표축은 역산란 양(intensity)을 나타내는 상대적 값이며 수평축은 A-scan에서의 깊이를 나타낸다. 이 그림에서 첫 번째 약

0.005 inch 근방에서 나타나는 수직선은 복합재료의 표면을 나타내고 마지막 수직선은 뒷면을 표시하는데 이 두 지점 사이에 관찰되는 홈들이 충격에 의해 만들어진 박리층을 나타낸다. 박리층 중에는 그 간극이 크게 관찰되는 것들과 작게 나타나는 것들이 있는데 이들 중 간극이 큰 박리 층들이 재료의 강도에 큰 영향을 미치는 주 박리층이 된다고 할 수 있다.

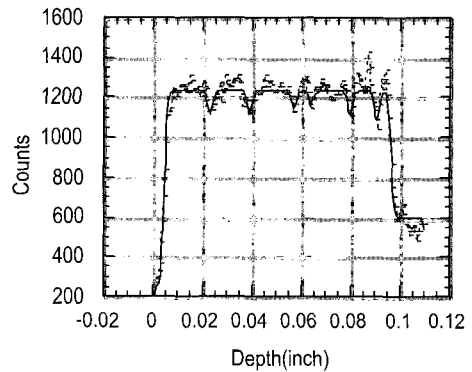


Fig. 9 Curve-fitting by BFGS method

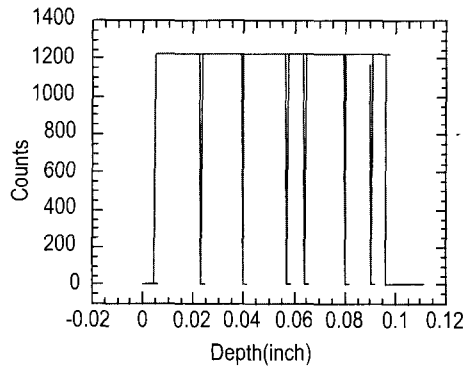


Fig. 10 Restored data of Compton backscatter data

9. 결론

디지털 X-ray 역산란 기술을 이용하여 적층 복합 재료 내에 발생하는 미세한 여러 박리 층(multiple delaminations)을 검사하는데 있어 역산란 이미지의 대비도에 영향을 미치는 인자들에 대해 고찰하였으며 이를 고려한 수학적 X-ray 역산란 모델을 제시하였다. 이 역산란 모델로부터 주요 인자들의 영향을 산출하기 위하여

각 인자들의 통계적 특성을 기초로 한 적응필터를 설계하였으며 이를 이용하여 재료 결함에 의한 역산란 신호 성분을 효과적으로 추출하였다.

X-ray 역산란 양을 재료 내의 임의의 위치에서 측정함으로써 재료밀도의 변화를 구하는 X-ray 역산란 기술에 있어서 박리층과 같은 미세한 결함의 측정을 위해 측정 정도를 높일 경우 역산란 양의 감소로 인해 신호 대 잡음비(SNR)가 급격히 감소하였다. 또한 X-ray 역산란 양이 재료의 밀도에 비례하기 때문에 이중재료가 혼합된 복합재료에서는 재료의 국부적 밀도변화가 상대적으로 심하여 X-ray 역산란 양이 위치에 따라 크게 변화하는데 깊이가 깊어질수록 또한 역산란 측정 장치의 정밀도가 증가할수록 빔경화 현상과 비선형 감쇄가 심화되는 것으로 관찰되었다. 이에 따라 X-ray 역산란 신호의 결함에 대한 민감도가 이러한 영향들에 의해 급속히 저하되는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다. 이러한 역산란 측정 신호의 SNR을 저하시키는 인자들인 복합재료의 불균질성과 빔경화등과 같은 비선형 감쇄효과의 영향을 고려한 모델은 기존의 평균 감쇄영향만을 고려한 모델에 비해 위치에 따른 역산란 양의 변화를 효과적으로 표현하였으며 이를 이용하여 전체 측정 신호로부터 이들의 영향을 제거하는 방법으로서 국부적 역산란 신호의 통계적 특성치(평균값 및 분산값)를 이용한 적응필터를 사용함으로써 X-ray 역산란 신호(이미지)의 SNR 및 대비도(Contrast)를 증대시킬 수 있었다.

X-ray 역산란 기술을 이용하여 고정도의 미세 결함 검사를 수행하는데 있어서 본 논문에서 제시한 적응필터 기법은 실제 검사에서 측정신호의 비선형 감쇄효과를 보상하여 역산란 이미지의 해상도를 개선하고 결함 검출도(detectability)를 증가시키는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] T. S. Jones and H. Berger, "Application of Nondestructive inspection methods to composites", *Material Evaluation*, Vol. 47, pp. 390-400, (1989)
- [2] L. Lawson, N. Kim, "Deconvolution and Detectability in Compton backscatter depth profilometry", *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, Vol. 13b, pp. 1971-1978, (1994)
- [3] G. Harding and J. Kosanetzky, *Scattered X-ray Beam Nondestructive Testing*, *Nuclear Instr. and Methods*. A280, 517, (1989)
- [4] G. Harding, "On the sensitivity and application possibilities of a novel Compton scatter imaging system", *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol. NS-29, No. 3, (1982)
- [5] J. Hall and B. Jacoby, *Analysis of a proposed Compton backscatter imaging technique*, *International Symposium on substance Identification technologies*, (1992)
- [6] X. E. Gros, "Low energy impact detection on carbon fiber reinforced materials", *Material Evaluation*, pp 373-381, (1995)
- [7] F. Buynak, T. J. Moran, and R. W. Martin, "Delamination and crack imaging in graphite-epoxy composites", *Material Evaluation*, Vol. 47, pp. 438-441, (1989)
- [8] Jorge E. Fernandez, "XRF intensity in the frame of the transport theory", *Nuclear Instruments and methods of Physical Research*, A 280, pp 212-221, (1989)
- [9] J. Mackcornick, "Inverse Radiative transfer problems : A review", *Nuclear science and Engineering*, 112, pp 185-198, (1992)
- [10] J. Lee, "Digital Image Enhancement and Noise filtering by use of local statistics", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-2, No. 2, (1980)
- [11] E. Dennis, Robert B. Schnabel, "Numerical Methods for Unconstrained Optimization", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, (1983)
- [12] Nohyu Kim, "Characterization of Delamination and Exfoliative Corrosion using the Ultrasonic Pulse-Echo Method and the Compton Backscattering Technique", Ph.D. thesis, Northwestern University, (1996)