

## X-ray 후방산란 기술을 이용한 항공기용 복합재료의 다중 층간 박리 평가

### Assessment of Multiple Delamination in Laminated Composites for Aircrafts Using X-ray Backscattering

김노유

Nohyu Kim

초 록 항공기용 복합재료 내부 여러 층에서 발생하는 박리를 정량적으로 평가하기 위한 X-ray 후방산란 검사장치를 개발하였다. 복합재료 두께방향으로의 역산란 밀도변화로부터 층간 박리를 검사하는 슬릿 방식의 카메라와 컴퓨터로 제어되는 X-ray 선원, 그리고 센서로 구성되는 X-ray 후방산란장치를 제작하여 그 성능을 충격하중에 의해 만들어진 인공결합시편을 이용해 검증하였다. 결함평가를 위해 복합재료내 산란장의 크기를 이론적으로 계산하는 수학적 해석 모델을 볼츠만 방정식을 이용하여 제안하였으며 적응필터 알고리즘을 사용하여 산란 노이즈를 최소화 하였다. 다중 박리 결함을 X-ray 후방산란장치를 통해 효과적으로 검출하였으며, 박리 위치와 박리 상태를 모두 정확하게 검사할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

주요용어: 충격손상, 다중층간박리, X-ray 산란, 항공기, 복합재료, 카프론 산란

**Abstract** A Compton X-ray backscatter technique has been developed to quantitatively assess impact damage in quasi-isotropic laminated composites made by a drop-weight tester. X-ray backscatter imaging system with a slit-type camera is constructed to obtain a cross-sectional profile of impact-damaged laminated composites from the electron-density variation of the cross section. A nonlinear scattering model based on Boltzman equation is introduced to compute Compton X-ray backscattering field for the defect assessment. An adaptive filter is also used to reduce noises from many sources including quantum noise and irregular distributions of fibers and matrix in composites. Delaminations masked or distorted by the first delamination are detected and characterized effectively by the Compton X-ray backscatter technique, both in width and location, by application of error minimization algorithm.

**Keywords:** Impact Damage, Multiple Delamination, X-ray Scattering, Aircraft, Composite Material, Compton Scattering

#### 1. 서 론

항공기용 적층복합재료(laminated composite)에서 발견되는 대표적인 파손 형태는 층간 박리(delamination)로서 재료에 가해진 충격에너지와 복

합재료의 적층 구성(layer-up)상태에 따라 특유한 패턴이 발생한다. 두꺼운 복합재료 판재에서의 파손은 주로 충격(impact)에 의한 압축응력 때문에 충격지점 근처에서 가장 심하게 발생하는 반면 박판의 경우에는 이와 대조적으로 충격지점에서 가장

적은 파손상태가 나타나고 충격지점에서 깊이 방향으로 파손의 정도는 심해져서 충격 받은 복합재료의 뒷면에서 가장 큰 파손(failure)이 발생한다. 이러한 상이한 파손패턴은 충격에 의해 발생하는 압축성 충격파(stress wave)가 복합 재료판에 전파되면서 복합 재료판의 뒷면에서 인장형 충격파(stress wave)로 모드 변환하면서 발생하는 것으로 복합재료 강도와 수명에 큰 영향을 주게 된다. 이 같은 층간 박리는 복합재료에 공구를 떨어뜨린다고 하는 정도의 가벼운 외부로부터의 충격에 의해서도 발생할 수 있다는 점과 충격 지점의 표면에서는 눈으로 확인하기 힘들다는 점에서 그 검사가 용이하지 않다. 그러므로 충격하중에 의해 재료 내부에 발생한 층간 박리의 위치와 파손 면적 및 그 정도를 평가하는 것은 복합재료의 잔존강도와 수명을 예측하는데 중요성이 크다고 할 수 있다[1,2].

복합재료의 박리결함은 국부적으로 작게 발생된 것보다 광범위하게 발생한 박리가 재료수명에 지배적인 역할을 하지만 심하게 발생한 층간 박리일수록 재료표면에서 깊이 떨어져 있고 또 그것들이 여러 층에서 발생함으로써 인해 다른 박리 층에 의해 가려지기 때문에 전통적인 비파괴 평가 방법으로는 그 정량적인 평가가 어렵다.

전통적으로 복합재료의 충격손상을 평가 하는데 가장 널리 쓰여 온 초음파 기술은 아직도 가장 효과적인 방법이지만 초음파의 음영 효과(shadow effect)에 의해 복합재료와 같은 층 구조체에서 발생하는 다중 층간박리를 측정하는데 한계가 있다. 이를 일부 극복하기 위한 방법으로 재료의 앞뒤면 모두에서 측정을 하기도 하지만 많은 경우 뒷면에서의 접근이 불가능하고 또 그렇다 하더라도 여러 개의 층간 박리 사이에 발생한 결함을 검출할 수 없다. 복합재료의 결함평가를 위해 또한 많이 사용되는 X-ray 투과법(transmission)은 이러한 재료 표면과 평행하게 발생하는 층간 박리를 완전하지는 않지만 특수한 침투제(opaque penetrant)를 사용하지 않고는 검출이 불가능하다[3].

본 논문에서는 항공기 분야에서 많이 쓰이는 적층 복합재료에 발생하는 층간 박리를 X-ray의 역산란장을 측정함으로써 검사하고, 복합재료 내부의 손상 정도와 그 위치를 정량적으로 결정하는 방법을 제시하였다. X-ray가 재료내부를 통과하면서 발생시키는 역산란의 주요 요소인 콤프톤 산란(Compton scattering)은 재료의 원자번호, 즉 재료

의 종류와 밀접한 관계가 있는데 이러한 역산란장을 측정하여 복합재료 내부에 발생한 여러 층의 층간 박리를 검사하였다. 측정된 역산란장의 변화로부터 층간 박리의 위치와 손상정도를 평가하기 위해 볼츠만 방정식에 기반한 이론 모델을 개발하였다. 실험 데이터로부터 층간 박리 위치와 박리 정도를 계산하기 위해 이론 모델로부터의 역변환(inversion)을 수행하였으며 이 과정은 비선형 최소자승법을 통해 이루어졌다. 검사 실험은 16장으로 만들어진 준 등방형 복합재료를 대상으로 스틸볼 낙하시험(drop-tester)을 이용해 충격손상을 재료내부에 만든 후 실행되었다. 파손단면을 절단하여 얻어진 광학 이미지와 비교한 결과로부터 본 논문에서 개발된 방법이 복합재료와 같이 층 구조를 가진 재료 내의 여러 층에서 발생한 박리 결함(손상)을 효과적으로 검출해 낼 수 있음을 입증하였다.

## 2. X-ray 역산란

X-ray 광자(photon)가 재료 내부의 원자와의 충돌에 의해 발생하는 산란(scattering)은 크게 광자 에너지(50-200 KeV)와 재료의 종류에 따라 세 가지의 유형으로 분류된다. 콤프톤 산란(Compton scattering), 광전산란(photoelectric scattering), 그리고 탄성산란(Rayleigh scattering)이 그것인데 원자번호가 낮은 항공기용 알루미늄이나 탄소계통 재료, 즉 복합재료 등에서 가장 중요한 산란 형태는 콤프톤 산란이며 높은 원자번호를 가지는 재료나 고에너지 양자에 의해 발생하는 산란의 형태는 광전산란과 탄성산란으로 나타난다[4]. 예를 들어 몇 가지 대표적 재료에 대해 전체 질량 감쇄계수(mass attenuation coefficient)에서 콤프톤 산란이 차지하는 영향 정도는 100 KeV에서 Table 1과 같다.

Table 1 Compton scattering effect on total attenuation

Material	Compton fraction of total attenuation
Carbon	94 %
Oxygen	91 %
Aluminum	80 %
Iron	40 %
Barium	7 %

재료 내에서의 X-ray산란이 모두 콤프톤 산란에 의해 결정된다고 가정하면 광자는 입사된 광자 에너지보다 훨씬 결속력이 약한 재료원자 내부의 자유전자들과 충돌하면서 광자 에너지의 일부가 소실되면서 튀어나가고 이때 튀어나가는 각도에 따른 산란장의 분포  $\kappa$ 와 에너지 변화는 Klein-Nishina식에 의해 다음과 같이 정의된다[5].

$$\kappa = \frac{d\sigma}{d\Omega} = \gamma \left(\frac{E'}{E}\right)^2 \left(\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - \sin^2 \theta\right) \quad (1)$$

$$E' = \frac{m_0 c^2}{1 - \cos\theta + (m_0 c^2 / E)} \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$ 는 비례상수이며  $E$ 는 충돌전 광자의 에너지,  $E'$ 는 충돌후 광자의 에너지이다. 이 식의 좌변( $\kappa$ )은 비례 단면(differential cross section)이라고 정의하며 특정 방향으로 광자가 반사될 확률을 의미한다. 그러므로 Klein-Nishina식은 특정 산란 각에 대한 X-ray의 산란강도(beam intensity)의 변화를 나타낸다. 이 식으로부터 역 산란각(90-180도)에서의 X-ray산란이 진행 방향(0-90도)에서 만큼 크지는 않지만 유용한 정도의 강도(intensity)를 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 실용적인 측면에서 중요한데 고전적인 투과법과는 달리 X-ray 선원(source)과 같은 방향에서 신호를 측정할 수 있는 일방향 검사(one-side inspection)이 가능함을 의미한다. 그런데 이러한 역방향 산란장의 강도(intensity)는 재료 원자 내의 모든 자유전자들과 충돌시 발생하는 개개의 산란장의 합으로 표시될 수 있으므로 전체 역 산란장의 강도는 재료 원자 내의 전자밀도와 선형적으로 비례하며 이 전자밀도( $\rho_e$ )란 재료의 고유 물성치로서 다음처럼 표시된다[5,6].

$$\rho_e = \rho ZN / A \quad (3)$$

여기서,  $\rho$ 는 물리적 밀도  $z$ 는 원자번호  $N$ 은 아보가드로 상수(Avogadro's constant), 그리고  $A$ 는 원자량을 각각 표시한다. 낮은 원자번호를 가진 재료( $Z < 20$ )에 대해서는  $Z/A$ 가 상수이기 때문에 전자 밀도는 물리적인 밀도와 선형비례의 관계를 가진다. 이 점이 콤프톤 산란과 재료의 물성치(특히 밀도)와의 밀접한 관계를 맺어주며 이를 이용한 역산란 기술이 공학 및 의료 분야에 널리 활용되고 있다.

### 3. 산란장 해석 모델

X-ray 빔이 3차원 고체 내부에서 발생시키는 산란장은 연속 방정식으로부터 다음과 같은 볼츠만 방정식(Boltzmann equation)으로 표현된다[7,8].

$$(\bar{\Omega} \cdot \nabla + \mu(\lambda))f(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda) = Lf(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda) + S(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda) \quad (4)$$

여기서  $f(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda)$ 는 위치  $\bar{\mathbf{r}}$ 에서 파장  $\lambda$ 의 광자가  $\bar{\Omega}$ 방향으로 진행하는 산란양이며  $S(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda)$ 는 재료 내에 존재하는 음원(source)을 의미하며  $\mu(\lambda)$ 는 해당주파수에서의 감쇠 계수이다.  $L$ 은 산란을 표시하는 연산자로서  $L \cdot f(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda)$ 는  $f(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda)$ 가 재료와 충돌하여 만들어내는 산란장을 의미하며 다음처럼 정의된다.

$$Lf(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda) = \iint \kappa(\bar{\Omega}, \lambda, \bar{\Omega}', \lambda') f(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}', \lambda') d\bar{\Omega}' d\lambda' \quad (5)$$

$\kappa(\bar{\Omega}, \lambda, \bar{\Omega}', \lambda')$ 는  $\bar{\Omega}'$ 방향으로 입사한 파장의 광자가 산란 후  $\bar{\Omega}$ 방향으로 파장  $\lambda$ 의 광자가 되어 진행할 산란 확률함수이며 이로부터 위치  $\bar{\mathbf{r}}$ 에서의 산란장은  $f(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\Omega}, \lambda)$ 와 산란 확률함수  $\kappa(\bar{\Omega}, \lambda, \bar{\Omega}', \lambda')$ 와의 곱에 의존함을 알 수 있다. 위의 볼츠만 방정식에서 재료 내에 입사하는 X-ray가 완전하게 직선 형태의 델타함수(delta function)로 가정되고 재료 깊이 방향의 위치  $z$ 에서  $\theta_0$ 의 각도로 재료에 입사될 경우 X-ray 광자가 재료 내에서  $n$ 번 충돌하여 만들어지는  $\theta_{(n)}$  방향으로의 산란장  $f^{(n)}$ 는 다음처럼 표현된다[9].

$$f^{(n)}(z, \bar{\Omega}, \lambda) = \frac{1}{2|\eta^{(n)}|} \int d\tau \int d\lambda' \int d\Omega' \kappa(\bar{\Omega}, \lambda, \bar{\Omega}', \lambda') \cdot \exp\left[-\frac{|z - \tau| \mu}{|\eta^{(n)}|}\right] f^{(n-1)}(\tau, \bar{\Omega}', \lambda') \quad (6)$$

위의 식(6)에서  $f^{(n-1)}$ 는  $(n-1)$ 번 충돌하여 만들어지는 산란장이며  $\eta^{(n)}$ 은 방향 코사인으로서  $\eta^{(n)} = \cos(\Theta^{(n)})$ 이다. 식(6)의 해는 반복기법을 이용하여 구할 수 있는데 입사 X-ray가 주어지면, 즉  $f^{(0)}$ 가 주어지면 식(6)로부터 1차 산란장  $f^{(1)}$ 을 계산할 수 있고 이  $f^{(1)}$ 를 다시 식(6)에 대입하여  $f^{(2)}$ 를 구할 수 있으며 이를 반복하면 지속적으로 다중 산란장의 크기

를 계산할 수 있다. 전체 산란장은 재료 내에서 만 들어지는 1차 산란장, 그리고 2차, 3차 충돌에 의한 2차 산란장, 3차 산란장등 다중 산란 장들을 순차 적으로 무한 개 더함으로써 구할 수 있다. 그러므 로 전체 산란장  $f$ 는 다음처럼 표현될 수 있다.

$$f = f^{(0)} + f^{(1)} + f^{(2)} + \dots + f^{(n)} + \dots \quad (7)$$

그런데 일반적으로 투과 깊이가 크지 않은 박판 복 합재의 경우 1차 산란장  $f^{(1)}$ 이 그 외의 고차 산란 장(multiple scattering)에 비해 지배적이므로 본 논 문에서는  $f^{(1)}$ 에 의한 산란만을 고려하였다.

#### 4. 디지털 역산란 X-ray장치

X-ray 역산란을 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 크게 3부분으로 구 성되는데 X-ray 입사빔을 만들어주기 위한 장치인 X-ray 튜브와 검사재료의 특정위치에 초점을 맞추 어 그 지점으로부터의 역산란되는 X-ray 량(intensity) 을 측정하는 역 산란 카메라 부분, 그리고 재료 내 부를 스캔하기 위한 컴퓨터 이송 및 제어 장치가 그것이다. 산업용 고압 X-ray 튜브로부터 발생하는 X-ray 빔(beam)은 15도 내외로 발산하기 때문에 이 를 두 개의 슬릿(aperture)들을 이용해 직선화 (collimation)하여 매우 작은 빔폭을 가지는 X-ray 로 만들어 재료 내에 수직 또는 특정 각도로 입사 시켰다. 이 입사 빔(beam)이 재료와 충돌하면서 발 생되는 모든 방향의 산란 광자들 중 특정 방향으로 의 산란량을 선택적으로 측정하기 위해 역산란 카 메라가 입사각과 일정한 각도에 위치하여 있으며 카메라 끝단에는 이렇게 분리해낸 산란 X-ray 량을 측정하기 위한 신틸레이터 타입(scintillator NaI)의 검출기(detector)가 장착되었다.

검출기에서 전기적인 신호로 바뀐 역산란 X-ray 는 증폭기와 카운터를 거쳐 그 양이 측정된 후 컴 퓨터에 저장되어지며 한 점에서의 데이터 수집이 끝나면 컴퓨터가 재료를 이송하거나 카메라를 원하는 위치로 이송하여 계속적인 스캐닝을 반복함으로 써 재료 내부의 밀도 변화에 대한 산란장의 변화를 측정하게 된다. 그러므로 1차원적인 A-scan은 물론 2차원 단면, 3차원 영상을 구현할 수 있으며, 입사 빔을 주사하는 같은 위치에서 역산란되는 산란량을 측정함으로써 반대면에서의 신호를 측정할 필요가

없이 유용하다. 역산란 신호에 의한 측정 정밀도는 역산란 카메라가 형성하는 산란 픽셀(scattering voxel)의 기하학적인 체적 크기(volume)에 좌우되는데 이것은 카메라를 구성하는 슬릿들의 간극과 상대 거리를 변경함으로써 조절할 수가 있다. 측정 정 도를 증대시키기 위해서는 산란 픽셀(scattering voxel)을 작게 하는 것이 좋으나 이에 따라 산란 X-ray 강도가 줄어들게 되어 측정시간이 늘게 되므 로 일반적으로 검출하고자 하는 결함의 크기에 따라 최적의 산란픽셀의 크기를 결정하는 것이 보통이다.

실험장치에서 사용된 역산란 카메라의 슬릿 간극 은 측정시간을 고려하여 복합 재료 내의 층간 박리 를 검사하기에 적당한 크기인 25  $\mu\text{m}$ 로 조정되어 실험되었다. 검출기에서 측정되는 X-ray 강도 (intensity)는 단위 시간 내에 검출센서에 입사된 특 정 에너지 이상의 광자수를 계수함으로써 결정되기 때문에 X-ray 역산란 신호의 단위는 검출기에 충돌 한 광자의 수(count)로 표시된다.

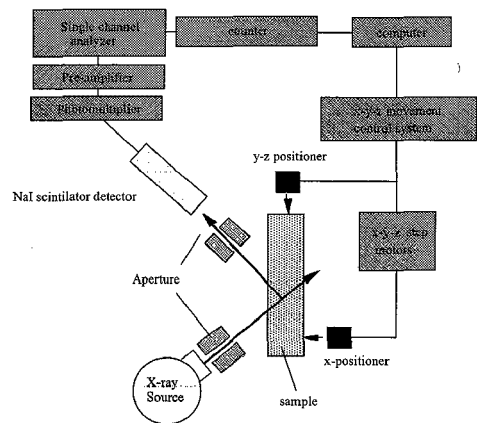


Fig. 1 Configuration of Compton X-ray back-scatter imaging system

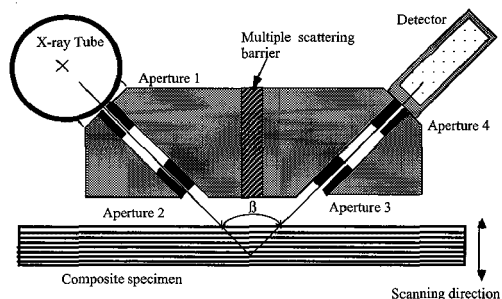


Fig. 2 Scanning camera of Compton scattering system

## 5. 최적화 기법을 이용한 층간 박리의 평가

측정된 역산란 X-ray는 직접 재료의 물성치(전자 밀도)와 관계가 분명해서 이 산란량의 변화를 측정하면 대략의 박리 위치를 파악할 수 있다. 즉, X-ray 산란량이 재료의 밀도와 직접적 관계가 있으므로 박리가 없는 부분에서의 산란량은 큰 반면, 박리가 일어난 부분은 공기나 진공상태이므로 산란량이 매우 작게 되어 이 변화를 측정하면 박리 유무를 어느 정도 확인할 수 있다. 하지만 그 관계식이 식(6)에서와 같이 비선형 미분방정식의 관계로 나타나기 때문에 그 산란량으로부터 재료의 결함에 대한 정량적 평가를 위해서는 관계 인자들의 영향을 고려하여 신호를 복원하는 작업(reconstruction)이 필요한데 대표적인 것은 식(5)에 나타난 감쇄 현상에 대한 보상이며, 측정장치의 전달함수 특성이 재료물성 변화와 결합되어서 나타나는 신호의 왜곡(blurring)현상을 보완하는 일이다. 후자의 작업은 통상 측정 신호로부터 재료밀도의 변화를 추출하는 역변환 과정을 통해 수행된다[9].

일반적으로 X-ray 빔의 감쇄는 분산특성이 있으며 비선형적이어서 두께가 두꺼운 후판의 검사나 분산이 심한 재질에서는 지수함수적인 감쇄로 가정하는데 문제가 많으나 본 논문에서 다루고 있는 박판 복합재료에서는 지수함수적으로 감소한다는 가정이 타당하다. 이러한 감쇄특성은 식(5)의 감쇄계수를 상수로 가정할 수 있게 하며 이 감쇄계수를 실험적으로 측정된 후 역으로 이 효과를 보상해 주면 원하는 캄프톤 산란효과만을 추출할 수 있다. 또한 X-ray 측정시스템을 통하여 측정된 값으로부터 원하는 재료 물성치 변화(산란계수의 변화)를 추출하는 역변환 작업도 측정장치 특성의 전달함수를 실험적으로 측정하여 이루어질 수 있다. 감쇄가 없는 특정 주파수의 단색 X-ray에 대해 측정시스템의 PSF(point spread function)을  $H(z)$ 라고 표시하면 깊이  $z$ 에서 반사되는 이론적 산란장  $F_c(z)$ 는 식(6)에서 계산되는 1차 산란장  $f^{(1)}(z)$ 과  $H(z)$ 와의 컨볼루션 합인 다음 식으로 표현될 수 있다[9].

$$F^c(z) = f^{(1)}(z) \otimes H(z) \quad (8)$$

위 식(8)에서  $H(z)$ 는 스텝함수에 대한 측정시스템의 응답이므로 매끄러운 금속면(knife-edge)을 이용하여 측정하면 얻을 수 있다. 만약  $F^c(z)$ 값을 실험

에서 얻는다면 식(8)로부터 역변환하여  $f^{(1)}(z)$ 를 구할 수 있으며 이 산란 변화  $f^{(1)}(z)$ 는 재료의 밀도변화를 직접 나타낸다. 본 논문에서 사용한  $H(z)$ 는 연삭된 알루미늄 후판에 대해 측정시스템을 사용하여 역산란장을 측정하여 얻었는데 이에 대한 실험결과가 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3(a)는 물리적인 재료의 밀도변화를 나타내는데 표면에서부터 재료밀도 변화가 계단함수로 나타나는 것을 보여주며 이 대상에 대해 산란장을 측정된 결과가 Fig. 3(b)에 보여지는데 이렇게 결정된 함수가 PSF(혹은 MTF, modulation transfer function)이며 이를 역변환 과정에서 사용하였다. 그러나 실제로는 측정신호의 노이즈 등의 문제로 직접 식(8)으로부터 역변환할 경우 오차가 매우 커지므로 본 논문에서는 이러한 역변환 작업을 최적화기법(error minimization method)를 사용하여 수행하였다. 재료내부로부터 산란되어 측정된 연속적인  $M$ 개 지점의 측정값과

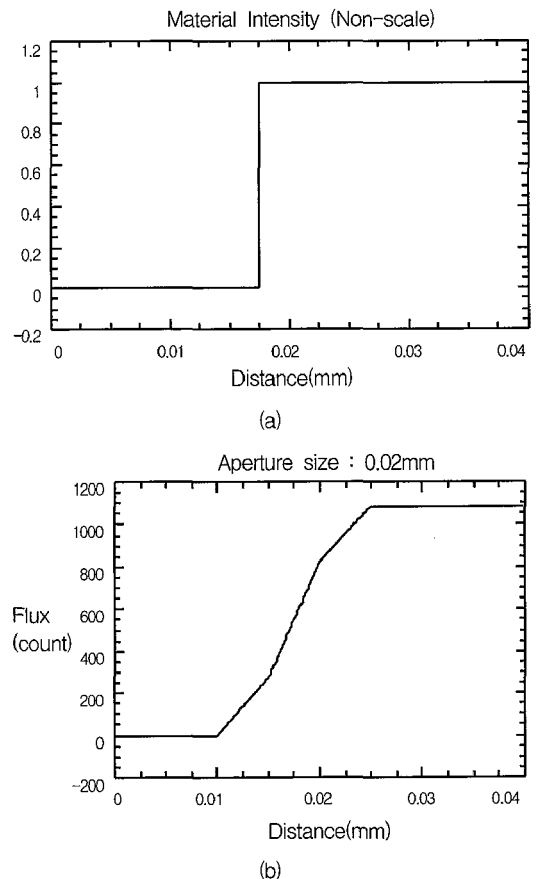


Fig. 3 PSF(point spread function) of X-ray scatter system, (a) step function, (b) response of X-ray backscatter camera to the step input

이론 모델로부터 계산된 역산란 측정값과의 오차를 다음 식(9)와 같은 함수값(least-square function)  $\Phi$  로 정의하고 그 오차를 최소화함으로써 재료변화에 의한 산란장, 즉 재료의 물성(밀도)변화를 산출하였다. 실험 결과에서 최소값을 찾는 방법은 Simplex 방법을 사용하였다[9].

$$\text{Min} \left\{ \Phi = \sum_{k=1}^M [F_k^c(z) - F_k^m(z)]^2 \right\} \quad (9)$$

여기서  $F_k^m(z)$ 은 재료내 깊이  $z=k$ 에서의 실측된 산란장의 크기이며  $F_k^c(z)$ 는 이론 모델로부터 계산된 이론 산란값이다.

### 6. 실험 및 결과

복합 재료 시편은 일방향 Hercules IM7 탄소섬유 복합재 프리프레그를 사용하여  $[0_2/45_2/90_2/0_2]$ 의 준등방성 구조로 16번 적층하여 만들어졌다. 제작된 복합 재료판은 두께가 약 3 mm이고 충격을 주도록 고안된 충격시험기(drop tester)에 시편을 고정시킨 후 스틸볼이 달린 원통형 막대를 일정 높이에서 떨어뜨려 재료 중앙부에 충격을 가하여 재료 내부에 층간 박리를 만들었다. 이 시편을 X-ray 역산란 측정장치를 이용하여 깊이 방향으로의 단면 밀도 변화를 측정한다. 다음, 손상을 입은 부분을 다시 다이아몬드 커터를 이용하여 절단한 후 단면부분에서의 박리 층들을 광학현미경으로 관찰하였다.

초음파와는 달리 시편 내에 입사된 X-ray 빔은 박리가 발생한 지점을 통과하면서 재료 밀도 변화에 비례하는 산란 신호를 방출하므로 X-ray 역산란 카메라를 고정시킨 상태에서 복합 재료가 고정되어 있는 테이블을 깊이 방향으로 25  $\mu\text{m}$ 씩 이송하면서 각 이송점에서 역산란되어 나오는 X-ray 산란양(photon counts)을 측정하여 컴퓨터에 전송/저장하였다. 이때 얻어지는 실험 데이터를 Fig. 4에서 보여주고 있다. Fig. 4에서 x축은 이송 깊이를 나타내며 y축은 각 깊이에 해당하는 지점에서 측정된 역산란양을 상대적으로 표현한 수로서 물리적으로는 단위 시간에 카메라에 측정된 산란 광자의 수이다. Fig. 4에서 점선으로 표시한 부분은 감쇄효과를 보정하기 위해 사용된 수학적 모델이며 실선은 박리 결합이 있는 실제 측정신호를 나타낸다. Fig. 4의 측정신호로부터 X-ray 빔의 감쇄 효과(점선)를 제

거한 후의 측정신호가 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5에서 표시한 점선부는 최적화된 이론모델에서 계산된 산란패턴이며 실선은 감쇄효과가 보정된 실제 실험데이터를 나타낸다. 이 두 데이터가 매우 잘 일치하는 것으로 보아 최적화 과정이 효과적으로 수행되었음을 간접적으로 확인할 수 있다. 이 그림에서 첫 번째로 나타나는 계단형태의 증가 부분은 X-ray 빔이 처음 시편의 상부 표면에 부딪힐 때 나

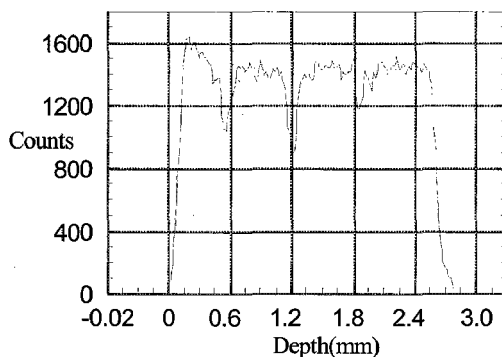


Fig. 4 Raw data of X-ray backscattering in composite plate

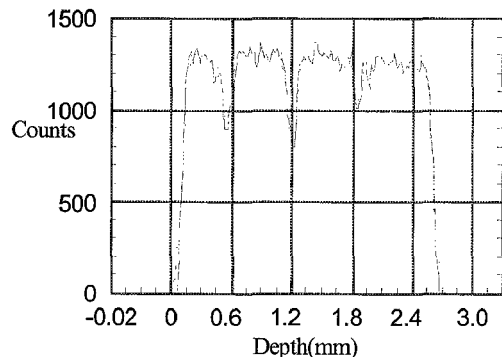


Fig. 5 Reconstructed data of X-ray backscattering in composite plate

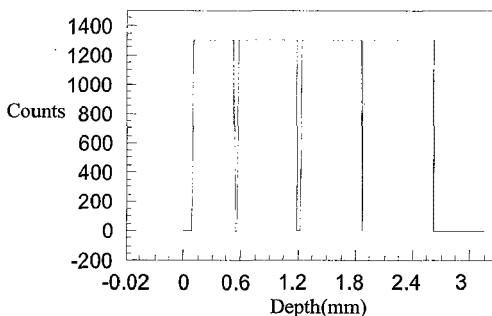


Fig. 6 Restored data of multiple delaminations

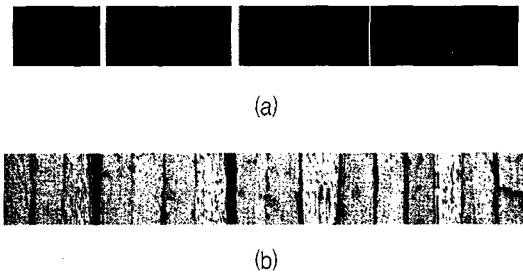


Fig. 7 Location and gap of delaminations, (a) restored Compton backscatter image, (b) optical microscopic image

타나는 산란밀도 변화를 표시하며 두께 3 mm 부근의 마지막 계단 형상은 X-ray 빔이 재료 내부를 통과한 후 시편 뒷면에서 공기로 바뀌면서 급한 밀도 감소가 생기는 것을 보여주고 있다. 이 두 계단면은 시편의 전면과 뒷면을 나타내는 산란량의 크기 변화로서 그 사이의 산란장의 변화는 재료 내부의 밀도 변화를 표시하게 되는 데 본 실험 시편에서의 경우 그 내부에 함몰 부분과 같은 부분이 3개 관찰되는데 이것이 층간 박리를 나타낸다. 실험 결과로부터 내부 층간 박리는 표면으로부터 0.5 mm, 1.2 mm, 1.8 mm 근방에서 3개 발생되었음을 보여주고 있다.

각 층간 박리의 정확한 위치와 손상 정도(opening size)는 앞에서 설명한 Simplex 방법을 이용한 역변환(inversion procedure)과정에 의해 산출되는데 이 결과를 Fig. 6이 보여주고 있다. 이 결과를 실제 비교 검증하기 위하여 손상 단면에 대한 광학현미경 사진을 X-ray 산란데이터(A-scan)와 같은 비율로 나타낸 그림이 Fig. 7에 표현되어 있는데 이 두 이미지로부터 X-ray 산란장의 측정 결과가 실제 충격 손상과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 시편을 절단하면서 발생하는 박리층 두께나 위치의 변화로 인해 광학이미지와 X-ray 역산란 데이터가 완전히 동일한 단면을 나타낸다고 단정하기 어려워서 두 방법에 의한 완전한 비교분석에는 약간의 오류가 있을 수 있음을 밝혀둔다.

## 7. 결론

X-ray 역산란을 이용하여 복합재료의 충격 파손을 평가하는 방법이 제시되었으며, 이론적인 산란장에 대한 볼츠만 방정식을 사용하여 1차원 형상의

재료내 임의의 위치에서 산란되는 산란장을 계산하는 이론식을 유도하였다. 디지털 X-ray 역산란 측정 장치를 개발하여 특정 각도에서의 역산란양(flux)을 실험적으로 측정함으로써 충격에 의한 복합 재료내 다중 층간박리의 위치와 손상 정도를 정량적으로 예측하였다. X-ray 빔의 재료내 감쇄 현상을 보상에 주고 최적화 기법을 이용한 역변환(inversion)과정을 통해 층간 박리의 위치와 폭을 효과적으로 결정하였다. 수행된 이론 및 실험 결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) X-ray 역산란(Compton scattering)은 재료의 전자밀도와 밀접하게 관계되어 재료에 따라 그 산란 정도가 민감하게 변하므로 얇은 복합 재료 내의 다중 박리 층들과 같이 급격한 재료 밀도의 변화를 쉽게 검출할 수 있음을 확인하였다.
- 2) X-ray 역산란 장치의 측정 정도는 산란픽셀(scattering voxel)의 3차원 크기에 직접적으로 비례하므로 그 크기를 작게 하면 정도가 향상된다. 그러나 역산란양 역시 이 크기에 따라 줄어들어 쿼텀 노이즈(quantum noise)가 증가하면서 S/N비가 작아져 신뢰성이 떨어지므로 X-ray 용량, 카메라 형상, 재료두께, 결함 크기, 검사시간 등을 고려하여 최적화되어야 한다.
- 3) 완전 비접촉 검사와 일방향 검사(one-side inspection)가 가능하여 재료 표면의 상태나 기하학적 복잡성에 무관하게 비파괴검사가 가능하다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 방사선기술개발사업과 한국기술교육대학교 E<sup>2</sup> 반도체 장비 인력양성센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] T. S. Jones and H. Berger, "Application of nondestructive inspection methods to composites," *Material Evaluation*, Vol. 47, pp. 390-400, (1989)
- [2] 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)
- [3] A. Lloid, "Ultrasonic system for imaging delaminations in composite materials," *Ultrasonics*, Vol. 27, pp. 8-17, (1989)
- [4] L. Lawson and N. Kim, "Deconvolution and detectability in comptonbackscatter depth profilometry," *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, Vol. 13b, pp. 1971-1978, (1994)
- [5] G. Harding and J. Kosanetzky, "Scattered X-ray beam nondestructive testing," *Nuclear Instr. and Methods. A280*, pp. 517-521, (1989)
- [6] 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, pp. 178-184, (1982)
- [7] James Hall and B. Jacoby, "Analysis of a proposed Compton backscatter imaging technique," *International Symposium on substance Identification technologies*, (1992)
- [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] Nohyu Kim and S. Yang, "Detection of second-layer corrosion in aging aircraft," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 6, pp. 591-602, (2009)