

X선 실시간 영상장치를 이용한 비파괴시험 조건 최적화 연구

나성엽, 최용규
국방과학연구소

요약 본 연구에서는 X선 실시간 영상장치를 이용하여 고체 추진기관과 같은 이질재료 복합구조물의 비파괴시험 조건 최적화 및 관측 가능한 최소 결함의 크기에 대하여 연구하였다. 실험에 사용된 시험편은 모의 결함이 다양한 크기와 형상으로 가공된 steel plate였으며, 방사선 등가 원리를 이용하여 추진기관의 고체 추진제, 내열 고무, 연소관을 steel 등가 두께로 환산하여 설치 실험하였다. 실험 결과, 시험 조건 인자인 확대율과 시험 재료의 등가 두께별 적용 에너지 및 조사선량률의 최적값을 구하였으며, 또한 관측 가능한 결함의 크기와 추진제 두께에 따른 결함의 깊이비와의 상관관계를 구하였다. 이와 같이 모사 시험편을 이용한 모의 실험은 대상 시험물을 검사하기 전 수행되어야 할 예비 과정이며, 모든 이질재료 복합구조물의 비파괴시험에 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

1. 서론

1950년대 이후 산업의 발달로, 제품의 품질보증과 신뢰성 증진을 위하여 사용전 제품의 내부 결함을 보다 정확하고 효과적으로 검출할 수 있는 도구로서 X선 장비와 비파괴시험 기법이 발전되어 왔다. 산업제품의 형상이 다양해지고 구성요소가 이질재료의 복합체로 됨에 따라 내부결함의 정확한 검출은 시간과 비용의 절감이 더욱 요구하게 되었다. 이를 극복하기 위하여 1970년대부터 급속히 발달된 전자산업과의 접목에 의해 실시간 영상법이 개발되어 오고 있다. 실시간 영상법은 현재 촬영중인 물체의 X선 영상을 형광 스크린이나 검출기를 통하여 TV 모니터로 직접 보면서 결함을 검출하는 방법으로서, 시험 시간이 단축되고 연속 작업이 가능하여 산업계에 급속히 활용 전파되고 있다.¹⁾ 본 연구에서는 선형가속기 X선 실시간 영상장치를 이용하여 다

양한 이질재료로 구성된 복합구조물의 내부기공, 크랙, 미접착 등의 결함을 가장 효과적으로 검출할 수 있는 시험 조건(확대율, X선의 에너지, 노출선량률)의 최적화에 대하여 논하였다. 일반적으로 대형 복합구조물은 고가이므로 시험 조건의 최적화를 위하여 내부에 인위적인 결함을 만들어 시험하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 방사선 등가 원리(radiographic equivalent)^{2),3),4)}를 이용하여 실제 검사물에 상응되는 두께 범위의 대체 재료 시험편에 기공과 크랙의 모의 결함을 만들어 실험함으로써 검사물의 재료 특성과 두께에 대한 최적 시험 조건을 제시하고, 관측 가능한 결함의 크기에 있어서 재료 두께에 따른 결함의 깊이비와의 상관 관계를 구하고자 한다.

2. 이론적 배경

X선 실시간 영상장치를 이용하여 이질재료 복합 구조물의 내부결함을 보다 효과적으로 검출하기 위해서는 시험 조건의 최적화가 요구되며 대체시험편 설계를 위한 방사선 등가 원리와 영상 분해능에 관계되는 인자를 고려하여야 한다.

2.1. 방사선 등가 원리

방사선 등가 원리는 재료특성인 X선 흡수계수를 활용하여 실제 검사물의 흡수량과 등가가 되도록 재료두께를 설계하여 스크린에서 동일한 X선 조사선량을 얻고자하는 원리로서 시험 조건의 최적화와 신뢰도 증진을 위하여 필수적이다. 방사선 등가 효과에 대한 관계식은 다음과 같다.^{2),5)}

Fig. 1 및 식 (1)에서와 같이 초기의 X선 조사선량률 I_0 가 n개의 이질 재료로 구성된 복합구조물을 투과하여 나오는 X선 조사선량률을 I_c 라 하고, 대체 재료의 시험편이 강철인 경우 이를 투과하여 나온 X선의 조사선량률을 I_s 라 하면, I_c 와 I_s 가 같을 때 X선 영상에 대한 등가 효과를 얻을 수 있다.

$$I_c = I_0 / (a+b)^2 \cdot \exp(-\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot t_i)$$

$$= I_0 / (a+b)^2 \cdot \exp(-\mu_s \cdot t_s) = I_s \dots\dots\dots(1)$$

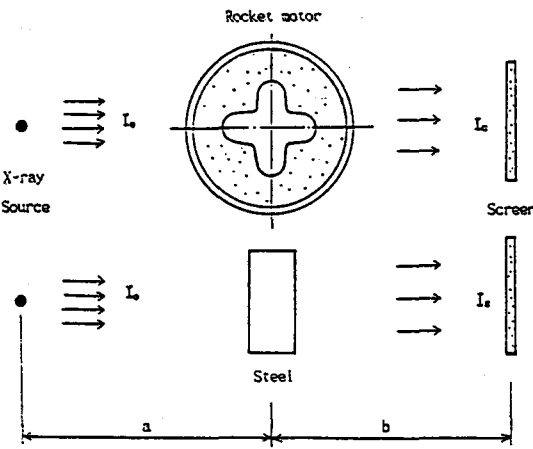


Fig. 1. The radiographic equivalent effect for NDT of solid propellant rocket motor.

여기서 t_i 는 X선이 투과하는 각 물질의 두께이며, μ_i 는 각 물질의 X선 선형 흡수계수(linear absorption coefficient)로서, $\mu_i = \mu_{mi}$ (질량 흡수 계수) $\cdot \rho_i$ (밀도)로 표현된다. 따라서 식 (1)을 철의 두께에 대하여 정리하면 식 (2)와 같으며, 이는 곧 등가 효과를 가져올 수 있는 대체 재료의 두께이다.

$$t_s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot t_i}{\mu_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{mi} \cdot t_i}{\mu_{ms} \cdot \rho_s} \dots\dots\dots(2)$$

2.2. 영상 분해능

X선 실시간 영상 장치의 영상 분해능은 관측 가능한 최소결함의 크기와 직결되며, 이에 영향을 주는 인자로는 기하학적 비선명도, 스크린 비선명도, 확대율, X선의 에너지가 있다. 따라서 최상의 영상 분해능을 얻기 위해서는 각각의 영향인자를 이론정립하고 최적화하는 과정이 요구된다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 기하학적 비선명도 U_g 는 X선원의 초점크기(focal spot size) ϕ , X선원과 시험 물체간의 거리(S.O.D.) a , 시험 물체와 스크린 사이의 거리(O.S.D.) b 의 함수로서 다음과 같다.

$$U_g = \phi \cdot b/a = \phi (V-1) \dots\dots\dots(3)$$

여기서 확대율 $V = 1+b/a$ 이고, d 인 결함이 스크린에서는 D 의 크기로 확대되며, 확대율이 클수록 기하학적 비선명도 U_g 도 커지므로 최상의 영상 분해능을 위한 최적확대율이 요구된다.⁶⁾ 스크린 비선명도 U_T 는 X선이 형광 스크린을 투과하면서 발생하는 가시 광선이 분산됨에 따라 나타나는 현상으로서 스크린에 코팅한 형광 물질의 종류 및 두께에 따라 결정되는 고유한 값이다. 일반적으로 스크린 비선명도는 형광 물질의 코팅 두께가 두꺼울수록 크며 얇을수록 작은 경향이 있다.⁷⁾ 총 비선명도 U_T 는 Klasen의 방식에 의해 식 (4)와 같이 주어지고 따라서 결함이 관측 가능하려면 $V \cdot d$ 의 값이 총 비선명도 U_T 보다 커야 한다. 그러므로 결함 관측의 임계조건($V \cdot d = U_T$)과 식 (3)을 식 (4)에 대입하여 결함크기와 확대율의 관계식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$U_T = (U_g^3 + U_f^3)^{1/3} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{d}{U_f} = \frac{1}{V} [(V-1)^3 \cdot \frac{\phi^3}{U_f^3} + 1]^{1/3} \dots\dots\dots(5)$$

따라서 식(5)를 미분하여 최적확대율을 구하면 식(6)과 같다.

$$V_m = 1+(U_f/\phi)^{3/2} \dots\dots\dots (6)$$

따라서 관측가능한 최소 결함의 크기 d_m 은 식(5) 및 (6)으로부터,

$$d_m = U_f / V^{2/3} \dots\dots\dots (7)$$

과 같이 주어진다.⁶⁾ 또한 d_m 은 Fig. 2에서와 같이 형광 스크린에서의 영상 밝기 차이에 의한 콘트라스트 감도 $\Delta x/X$ 와 함수관계에 있을 것으로 예측되며 따라서 식(7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d_m = U_f / V^{2/3} \cdot f(\Delta x/X) \dots\dots\dots (8)$$

영상 분해능에 영향을 주는 또 하나의 중요한 인자는 시험 물체의 두께에 따라 사용되는 X선의 에너지 및 조사선량률의 최적값이다. X선의 에너지 및 조사선량률이 영상분해능에 영향을 미치는 이유는, 영상의 선명도는 시험 물체를 투과하여 스크린에 도달하는 X선의 선량률과 관계가 있는데, 선량률이 너무 작으면 영상을 형성할 수 없으며, 너무 세면 노이즈가 심해져 영상의 선명도가 떨어지기 때문이다. 따

라서 스크린에 도달하는 X선 선량률의 최적값 I_{ms} 가 실험치 또는 장비의 특성값으로 주어진다면 식(1)에 의하여 시험물체의 구성재료 및 두께에 따른 초기 조사선량률의 최적값 I_{mo} 를 구할 수 있다.

$$I_{mo} = I_{ms} \cdot (a+b)^2 \cdot \exp(-\sum_i^n \mu_i \cdot t_i) \dots\dots\dots(9)$$

여기서 μ_i 는 물질의 종류 및 에너지와 함수관계에 있으므로 시험물질의 종류 및 두께와 에너지에 따른 초기 조사선량률의 최적값을 구할 수 있다.

3. 실험

3.1. 실험 장치

본 실험에 사용한 장비는 선형 가속기 X선 실시간 영상 장치로서, Fig. 3과 같이 5개의 주요 구성품으로 되어 있으며, 기능적 측면에서 X선 발생장치와 실시간 영상장치로 대별된다. X선 발생장치와 실시간 영상장치로 대별된다. X선 발생 장치는 Table 1과 같은 제원의 선형의 선형 가속기(Linatron 6000 A/HRO, Varian Co.)로서 직경 500~2500 mm의 추진 기관을 실시간 촬영할 수 있다. 실시간 영상 장치(RTIS, Rolls-Royce Co.)의 카메라 부분은 형광 스크린, 반사경, 카메라가 암실 상자내에 한조로 되어 있다.¹⁰⁾ 형광 스크린은 형광 물질(Gd_2O_2S , gadolinium oxysulfide)이 코팅된 알루미늄 판으로서 X선 투과시 파장 $\lambda=544nm$ 의 가시 광선을 발생 시키며, 형광 물질의 코팅 두께에 따라 Thin($100 mg/cm^2$), Medium($150 mg/cm^2$), Thick($200mg/cm^2$) 등 3종류가 있다. X선에 의해 형광 스크린에서 발생된 광학적 영상은 카메라에 입력되어 전기적 신호로 바뀐다. 이 전기적 영상 신호는 영상 처리장치(Shapphire, Quentel Co.)에서 516 column

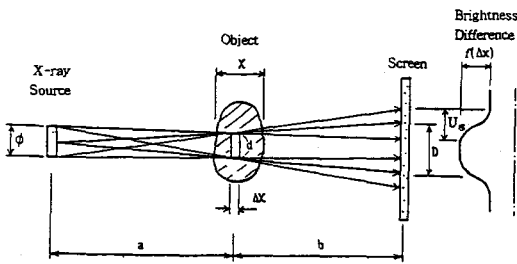


Fig. 2. Geometrical unsharpness and magnification effect of radioscopic image.

Table 1. The specification of Linatron 6000A/HRO X-ray source.

Equipment name	Type of acceleration	Accelerated particle	Radiation	X-ray energy (MeV)	X-ray output (rad/min/m)	Focal spot size(mm)
Linatron 6000A/HRO	Linear acceleration	Electron	X-ray	9	465 930 1395	1.5×1.5
				15	2660 5320 7980	

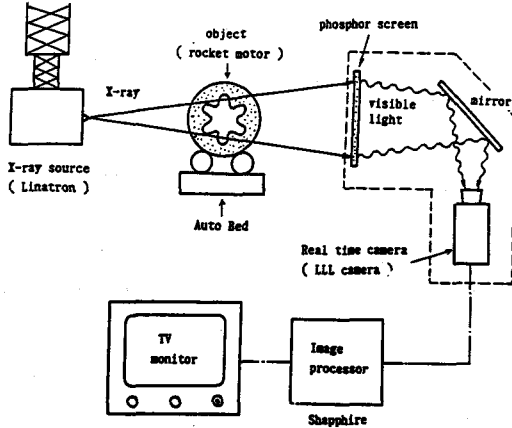


Fig. 3. The schematic diagram of Linatron X-ray real time imaging system for NDT of solid propellant rocket motor.

×486 row에 256 grey-level로 디지털이 되며, 이들 디지털 영상 신호는 “integration”, “averaging”, “shading” 등 영상 처리 과정을 통하여 보다 선명한 영상으로 TV 모니터에 나타난다.¹¹⁾

3.2. 시험편 제작

시험편 제작을 위하여 우선적으로 결정할 사항은 시험편의 재질과 크기 및 형상이다. 본 연구의 실제 검사대상물은 고체 추진기관으로서, steel, 고체 추진제, 내열고무로 구성된 원통형 축대칭 구조물이다. Table 2에는 재질에 따른 선형 흡수 계수와 X선 에너지와의 관계를 나타내었다.¹²⁾ Table 2에서 보는 바와 같이 일반적으로 에너지가 높을수록, 재질의 밀도가 낮을수록 선형 흡수 계수의 값은 작다. 따라서 텅스텐이나 납 등은 두께를 줄일 수 있으나 모의 결함의 가공이 힘들며, 알루미늄, 콘크리트, 고무 등은 상대적으로 두께가 두꺼워질 뿐만 아니라, 제작 가공하기 어려운 단점이 있기 때문에 시험편의 재질을 steel로 결정하였다. 추진 기관에 대한 steel의 등가 두께는 연소관, 내열 고무, 고체 추진제 등의 밀도 및 선형 흡수계수와 각 촬영 부위의 X선 빔이 투과하는 경로 두께를 식 (2)에 적용하여 구하였다. 검사대상 추진기관의 경우 스크린의 크기 제한 및 점선 부위 촬영으로 인하여 Fig. 4와 같이 빔의 중심선을 3부분으로 나누어 촬영해야 하며 steel 등가 두께는 71~120 mm영역이다. 따라서 시

Table 2. The linear absorption coefficients for several X-ray energy and materials¹²⁾

Material	Density (g/cm ³)	Linear absorption coefficient for several X-ray energy (cm ⁻¹)				
		2 MeV	4 MeV	6 MeV	9 MeV	15 MeV
Tungsten	18.0	0.7702	0.6027	0.5776	0.5776	0.6027
Lead	11.3	0.5545	0.4332	0.4415	0.4560	0.5059
Steel	7.85	0.3346	0.2773	0.2476	0.2310	0.2100
Aluminum	2.7	0.1284	0.0924	0.0779	0.0722	0.0630
Concrete	2.35	0.1118	0.0806	0.0680	0.0630	0.0546
Solid propellant	1.7	0.0825	0.0598	0.0502	0.0465	0.0340
Rubber	1.11	0.0546	0.0359	0.0330	0.0284	0.0233

험편은 두께 조절이 가능하도록 설계하였으며, 모의 결함이 없는 steel plate 사이에 모의 결함이 있는 steel plate를 삽입하는 방법으로 구성하였다. 모의 결함 시험편의 결함은 크랙형으로 하였으며 실험의 정확성과 간편성을 위하여 형상을 단순화하였고, 폭 및 깊이를 다양한 크기로 가공하여 Fig. 5와 같이 모델링하였다. 결함 형상은 방전 가공하였으며 ± 0.05 mm 이내의 가공오차를 갖도록 하였다.

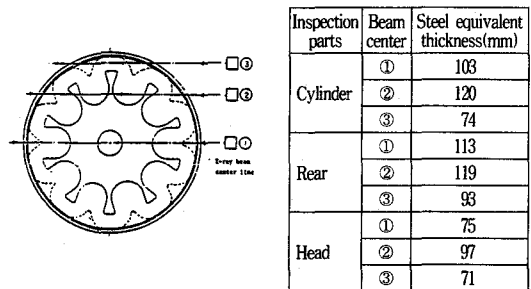


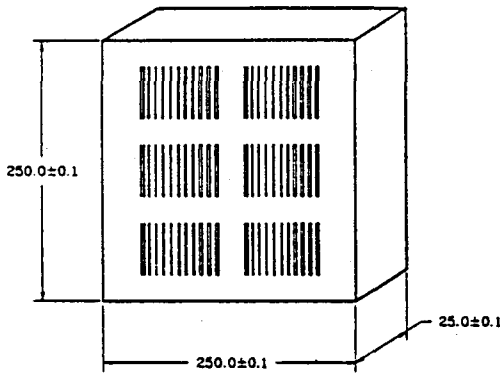
Fig. 4. Steel equivalent thickness for several inspection parts of solid propellant rocket motor.

3.3. 실험 방법

3.3.1. Steel 모사 시험편 실험

Steel 모사 시험편은 무결함 시험편 사이에 결함 시험편을 삽입하여 설치 실험하였다. 먼저 최적 확대율을 구하기 위하여 X선원과 시편 사이의 거리 (S.O.D.) a와 시험편과 스크린 사이의 거리(O.S.D.) b를 변화시키면서 촬영하였다. 시편 두께 및 X선의 에너지, 조사선량률은 식(6)에서와 같이 최적확대률

과 무관하기 때문에 임의로 선택하였으며, 시편두께는 100mm, X선의 에너지 및 조사선량률은 9 MeV, 930 rad/min/m로 하였다. 거리 a는 추진 기관의 크기, X선의 조사선량률 및 빔의 평탄성을 고려하여 추진 기관 비파괴 검사에서 일반적으로 사용하고 있는 3000~4000 mm 범위에서 3000, 3500, 4000 mm로 변화시켰으며, 또한 각각의 a에 대하여 거리 b를 1000, 1500, 2000 mm로 변화시켜 영상의 선명도를 관측 비교하였다. 다음으로 촬영 부위의 steel 등가 두께별로 최적인 X선 에너지 및 조사선량률을 구하기 위하여 앞의 시험에서 구한 X선원-시험편-스크린 사이의 최적 거리 a, b를 고정시킨 뒤, X선의 에너지를 9, 15 MeV, 조사선량률은 465~7980 rad/min/m로 변화시켜 촬영하여 영상의 선명도를 관측 비교하였다. 그리고 최적 확대율에 에너지 및 조사선량률에서 형광 스크린의 두께를 변화시켜 촬영하여 영상의 선명도를 관측 비교하였다.



Species	Defects size(mm)	
Crack	Width	0.4, 0.5, 0.8, 1.0, 1.3, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5
	Depth	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Fig. 5. The steel plate of test object with defect.

3.3.2. 추진 기관 비교 실험

실제 추진 기관을 시험 물체로하여 앞절의 steel 모사 시험편 실험에서와 같은 방법으로 최적 확대율, X선의 에너지 및 조사선량률을 구한 후, steel 시험편 실험에서 구한 값과 비교 확인하였다. 실제 추진 기관 비교 시험에서는 'Plaque type' 투과도계 (MIL-STD-453)를 추진제 그레인에 부착하여 실험하였으며, 각각의 촬영 조건하에서 관측되는 투과도

계의 hole 크기를 비교하여, 가장 작은 hole이 관측될 때의 촬영 조건을 최적의 값으로 선택하였다. 영상의 콘트라스트 감도는 영상 위에서 1T, 2T, 4T의 hole을 관측할 수 있을 경우, 각각 1.4, 2, 2.6%이다.¹³⁾

4. 결과 및 고찰

4.1. Steel 시험편 실험의 촬영 조건 변화

먼저 확대율 변화 시험에 대한 결과는 Fig. 6과 같았다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 각각의 확대율

Source to object distance(mm)	Object to screen distance(mm)	Magnification(V)
3,000	1,000	1.33
	1,500	1.50
	2,000	1.67
3,500	1,000	1.28
	1,500	1.42
	2,000	1.57
4,000	1,000	1.25
	1,500	1.37
	2,000	1.50

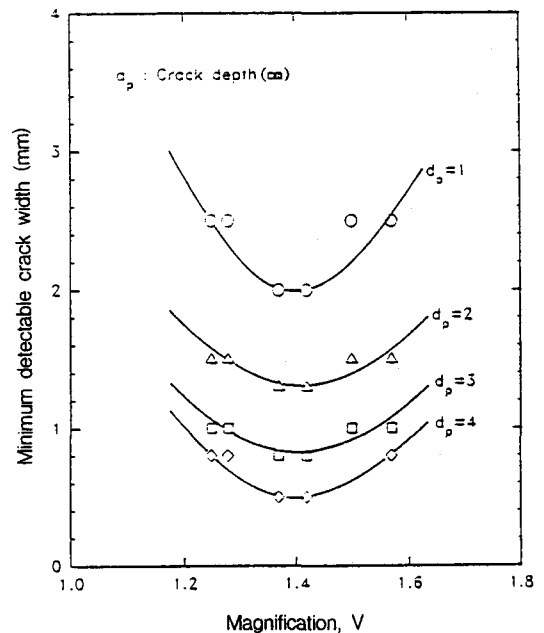


Fig. 6. Minimum detectable defect size with the magnification.

V는 최소 1.25에서 최대 1.67이다. 확대율 $V=1.37\sim 1.42$ 영역에서는 거의 같은 정도의 영상분해능으로 기타 확대율보다 우수하였으며 이들의 평균값 $V=1.39$ 는 식 (5)에서의 이론적 최적 확대율 $V_m=1+(U_i/\phi)^{3/2}=1+(0.7/1.5)^{3/2}=1.40$ 과 근사한 값으로 비교적 잘 일치하였다. 따라서 확대율 $V=1.4\pm 0.03$ 을 최적의 값으로 선택하였다. 추진 기관 각 촬영 부위의 steel 등가 두께 71~120 mm에 대하여 X선 에너지 및 조사선량률을 변화시켜 시험관 결과는 다음과 같다. Fig. 7은 추진기관 실린더 촬영 부위의 steel 등가 두께 103 mm를 시험편으로하여 촬영한 결과를 X선의 조사선량률에 따라 관측 가능한 최소 결함의 크기로 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 930 rad/min/m일 때 가장 좋은 영상 분해능을 나타내었으며, 기타 조사 선량률 영역에서는 비슷한 정도로 나타내었다. 따라서 steel plate 등가 두께 103 mm에 대한 최적 조사선량률은 930 rad/min/m임을 알 수 있었다. 마찬가지로 방법으로 추진기관의 각 촬영 부위별 steel 등가 두께에 대하여 시험한 결과, X선의 에너지는 9 MeV, 조사선량률은 촬영 부위의 steel 등가 두께에 따라 71~75 mm 영역에서는 465 rad/min/m, 93~113 mm 영역에서는 930 rad/min/m, 119~120 mm 영역에서는 1395 rad/min/m가 적합하였다. 따라서 이 결과를 식(1) 및 Table 2에 대입하면 스크린에 도달하는 조사선량률의 최적값 $I_{ms}=I_o/(a+b)^2 \cdot \exp(-\mu_s \cdot t_s) = 3.5\pm 0.2$ rad/min가 되고, 이 값과 Table 2의 데이터를 식(9)에 대입하여 각 에너지에 대한 등가두께별 초기 조사선량률의 최적값을 구하여 그래프로 그리면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보는바와 같이 시험물체의 steel 등가 두께에 따른 초기 조사선량률의 최적값은 지수함수적으로 증가하며 같은 등가두께에 대하여서는 X선의 에너지가 낮을수록 영상의 콘트라스트 감도는 좋아지나 상대적으로 큰 조사선량률이 필요하기 때문에 장비의 에너지 및 출력이 현실적으로 가능한 범위내에서 적용할 수 있다. 다음으로 형광 스크린의 두께에 따른 영상 분해능의 변화는 Fig. 9와 같았다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 영상의 비선명도는 형광 물질의 코팅 두께에 따라 선형적으로 증가하며 시험 물체의 steel 등가 두께가 71~120 mm 영역에서는 영상 분해능이 스

크린의 종류에 따라 Thin > Medium > Thick 순으로 나타났다.

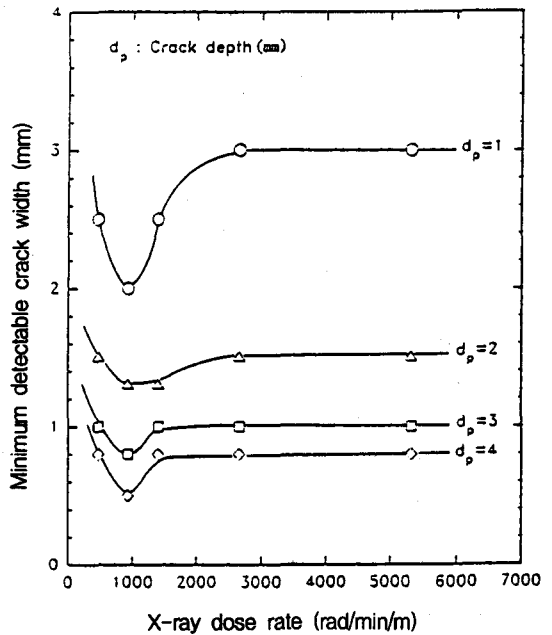


Fig. 7. Minimum detectable defect size with the X-ray dose rate(steel thickness 103 mm).

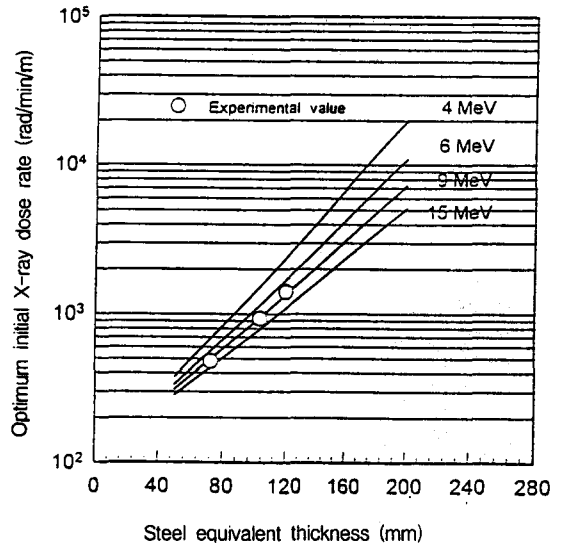


Fig. 8. Optimum X-ray energy & initial dose rate with the steel equivalent thickness(S.O.D.: 3500 mm, O.S.D.: 1500 mm).

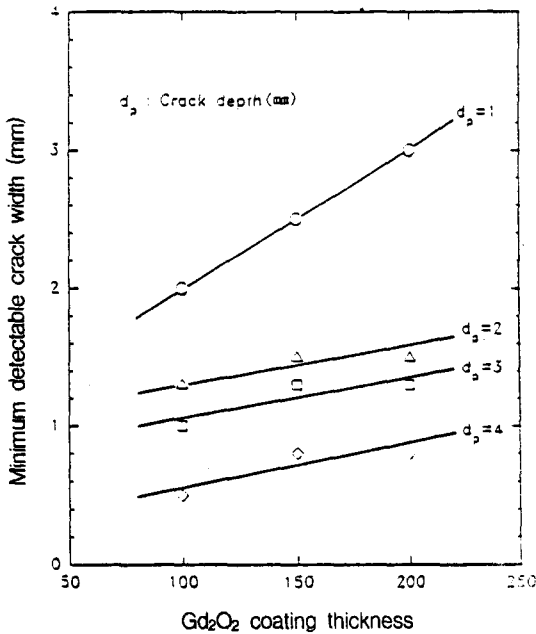


Fig. 9. Minimum detectable defect size with the Gd₂O₂S coating thicknesses of phosphor screen.

4.2. 추진기관 최적 촬영 조건 비교

실제 추진기관의 촬영 조건 변화시험의 결과는 다음과 같다. 먼저 확대율 변화 시험에 있어, 추진기관의 steel 등가 두께 100 mm에 해당하는 촬영 부위에 X선 에너지 및 조사선량률(9 MeV, 930rad/min/m)을 고정시킨뒤, a, b 변화에 대한 실험 결과, 확대율 V=1.37과 V=1.42일 때, 관측 가능한 투과도계의 hole 크기는 1T로써 가장 좋은 영상 분해능을 보였으며, 그 외의 확대율에서는 관측 가능한 hole 크기가 2T로써 영상의 선명도가 비교적 좋지 못하였다. 이는 앞 절의 Steel plate 시험편 실험 결과와 일치하였다. 다음은 추진 기관의 실린더 촬영 부위(steel 등가 두께 103 mm에 해당)에 대한 X선의 에너지 및 조사선량률 변화에 대한 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 보는 바와 같이 9 MeV, 930 rad/min/m에서 관측 가능한 Hole 크기는 1T로 가장 좋은 영상 분해능을 보였으며, 이는 steel plate 시험편의 실험 결과와 일치하였다. 마찬가지로 방법으로 추진기관의 등가 두께별 각 촬영 부위에 대한 X선 에너지 및 조사선량률을 변화시켜

시험한 결과, 에너지는 9 MeV, 조사선량률은 촬영 부위에 따라 steel 등가 두께 71~75 mm에 해당되는 곳은 465 rad/min/m, 93~113 mm에 해당되는 곳은 930 rad/min/m, 119~120 mm에 해당되는 곳은 1395 rad/min/m가 적합하였다. 이는 steel plate를 시험편으로하여 구한 최적 에너지 및 조사선량률의 값과 비교하여 보면 잘 일치하였다. 다음으로 형광 스크린 두께 변화에 대한 실험 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서 보는 바와 같이 steel 등가

Table 3. Minimum detectable hole size of penetrometer for real rocket motor with the X-ray energy and dose rate.

Inspection part of rocket motor	Steel equivalent thickness (mm)	I.D. number of used penetrometer (MIL-STD-453)	X-ray energy (MeV)	X-ray dose rate (rad/min/m)	Minimum detectable hole size
Cylinder	103	4.0	9	465	2T
				930	1T
				1,395	2T
			15	2,660	2T
				5,320	2T
				7,980	2T

Table 4. Minimum detectable hole size of penetrometer for real rocket motor with the Gd₂O₂S coating thickness of phosphor screen.

Inspection parts of rocket motor	Steel equivalent thickness (mm)	I.D. number of used penetrometer	Thickness of Gd ₂ O ₂ S coated on phosphor screen	Minimum detectable hole size
Head	71	3.0	Thin (100 mg/cm ²)	1T
			Medium (150 mg/cm ²)	2T
			Thick (200 mg/cm ²)	2T
Cylinder	103	4.0	Thin (100 mg/cm ²)	1T
			Medium (150 mg/cm ²)	2T
			Thick (200 mg/cm ²)	2T
Cylinder	120	5.0	Thin (100 mg/cm ²)	1T
			Medium (150 mg/cm ²)	2T
			Thick (200 mg/cm ²)	2T

두께가 71, 103, 120 mm인 촬영 부위에서 발견 가능한 hole의 크기는 스크린의 종류가 Thin일 때 1T이며, Medium 및 Thick일 때 2T이다. 그리고 Medium 및 Thick에서는 발견 가능한 hole의 크기가 모두 2T였으나 선명도에 있어서 Medium이 Thick보다 훨씬 선명하였다. 따라서 스크린 종류에 따른 영상 분해능의 Thin > Medium > Thick순으로 좋았으며, 이것은 steel시험편 실험에서의 결과와 일치하였다.

4.3. 추진제내 관측 가능한 최소 결함크기 예측

앞 절의 실험에서 구한 최적 촬영 조건으로 모의 결함이 있는 steel plate를 등가 두께 별로 촬영하였으며, 이 때 영상에서 관측 가능한 최소 결함 크기를 측정하여 추진제내의 결함의 크기로 환산하였다. Fig. 10은 steel plate 103 mm 시편의 크랙 결함 영상이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 결함의 깊이가

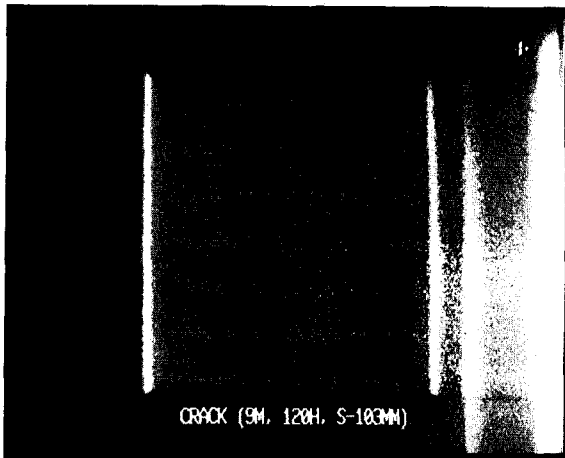


Fig. 10. Real time image of crack-like defects on the steel plate at an optimum condition.

깊을수록 선명하게 관측되며 깊이에 따라 관측할 수 있는 크랙의 폭이 달라짐을 알 수 있다. Steel에서의 결함 크기를 추진제내의 결함크기로 환산함에 있어 크랙의 폭은 Steel에서의 값이 추진제내에서도 그대로 적용되고, 깊이는 steel에서의 값에 환산 인자의 값을 곱하여 적용된다. 왜냐하면, 식 (1)에서와 같이 투과된 X선 빔의 선량률에 영향을 미치는 것은 X선 빔과 평행한 방향의 두께 변화와 재질에 따

른 선형 흡수 계수의 값이기 때문이다. 따라서 steel에서의 결함 깊이를 추진제내의 깊이로 환산하면, 식 (1), (2) 및 Table 2에서와 같이 X선 에너지가 9 MeV일 때 steel 및 고체 추진제의 선형 흡수 계수 비는 $\mu_s/\mu_p=0.2310/0.0465=5$ 이므로 steel의 결함 깊이에 5배의 환산 인자를 곱하면 추진제내 결함의 깊이가 된다. 이러한 결과를 촬영부위의 추진제 등가 두께에 대한 관측 가능한 결함의 크기로 그래프를 그리면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 보는바와 같

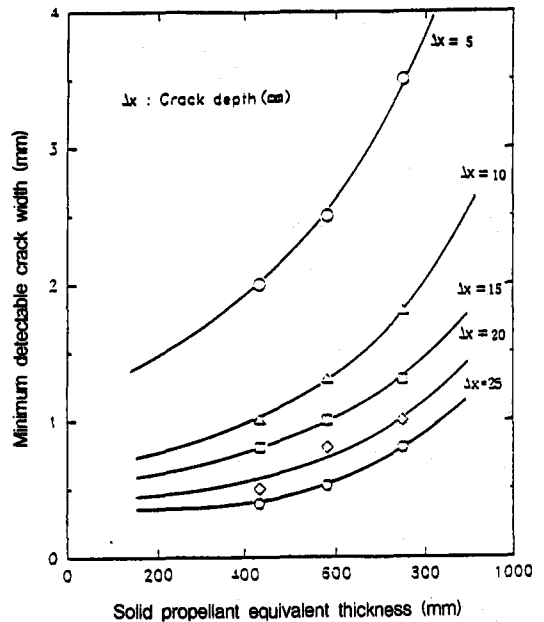


Fig. 11. Minimum detectable defect size with the solid propellant thickness.

이 촬영할 부위의 추진제 등가 두께가 클수록 관측가능한 결함의 최소 크기 d_m 는 점점 커지게 되며, 또한 결함의 깊이 Δx 가 클수록 더 작은 크랙의 폭이 관측 가능하다. 이것을 d_m 과 $\Delta x/X$ 의 관계로 그래프를 그리면 Fig. 12와 같다. 최소 자승법으로 구한 그래프의 관계식은 $d_m=1.94(\Delta x/X-0.2)^{-1}+0.1$ 이 되고, 이것을 식 (8)에 대입하여 $U_f=0.7$ mm, $V=1.4$ 를 적용하여 $f(\Delta x/X)$ 를 구하면 $f(\Delta x/X)=3.5(\Delta x/X-0.2)^{-1}+0.2$ 가 되며, 여기서 $\Delta x/X$ 는 퍼센트 단위이다. 따라서 d_m 에 대한 관계식은 다음과 같다.

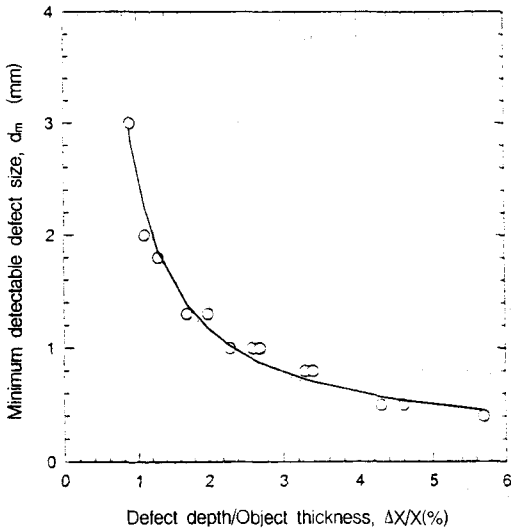


Fig. 12. Minimum detectable defect size with the ratio(defect depth/object thickness).

$$d_m = U_t/V^{2/3} \cdot f(\Delta x/X) = U_t/V^{2/3} \cdot \{3.5(\Delta x/X - 0.2)^{-1} + 0.2\} \dots\dots\dots (10)$$

상기 관계식은 Δx/X의 범위가 0.9% ≤ Δx/X ≤ 100% 영역에서 유효하며, 최대 결함의 깊이비 Δx/X = 100%에서 관측가능한 결함의 크기는 d_m=0.1 mm로 예측된다.

5. 결 론

추진 기관 비파괴 검사는 추진 기관의 성능과 안전도를 판정하는 중요하고 필수적인 시험이다. 본 연구는 이질재료 복합구조물인 추진 기관을 대상으로 하여 모의 결함이 다양한 크기와 형상으로 가공된 steel plate 시편을 설계하여 X선 비파괴 검사시 적용되는 확대율, X선의 에너지 및 조사선량률 등의 최적값을 구하였고, 이를 실제의 추진 기관에 적용 시험하여 검증하였다. 실험 결과, 최적 촬영 조건은 확대율이 1.42였으며, 추진제 등가두께가 350~600 mm의 시험대상 추진기관에는 X선의 에너지가 9 MeV, 조사선량률은 약 450~1400 rad/min/m의 영역에서 촬영 부위의 등가 두께에 따라 적용되

며, 기타 영역의 추진제 등가두께에 따른 에너지, 조사선량률을 예측할 수 있었다. 그리고 추진제내에서의 관측 가능한 최소 결함의 크기는 추진제 두께에 따른 결함의 깊이비 Δx/X와 함수관계에 있었으며 그 관계식을 구하였다. 이와 같이 시험편을 이용한 모의 실험은 대상 시험물을 검사하기전 수행되어야 할 예비 과정이며, 모든 이질재료 복합구조물의 비파괴 검사에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. "Standard Guide for Radioscopy", ASTM E1000-92 (1992), pp. 394.
2. Frank. A. Iddings, "Radiographic Equivalents", Materials Evaluation, Vol. 44, No. 8 (1986), pp. 888-890.
3. Halmshaw. "Physics of Industrial Radiology" (American Elsevier 1966), pp. 260-262.
4. Poul D. Tonner and J. H. Stanley, "Super-voltage Computed Tomography for Large Aerospace Structures" Materials Evaluation, Vol. 50, No.12 (1992), pp. 1434-1438.
5. H. E. Peck, "Equivalent-Inspection Concept for Evaluating Radiographic Techniques", Materials Evaluation, Vol. 48, No.6 (1990), pp. 721-724.
6. "Fluoroscopy and X-ray Image Devices", ASNT Hand Book, Section 19 (ASNT, 1959), pp. 1-7.
7. "Standard Guide for Radioscopy", ASTM E1000-92 (1992), pp. 387-400.
8. Garrett & Bracher, "Real-time Radiologic Imaging : Medical and Industrial Applications", (ASNT, 1980), pp. 12-21.
9. "Linatron 6000 Maintenance Course Answer Book", Vol. 1. Section 3(Varian Pacific Inc., 1986), pp. 1-18.
10. "Rolls-Royce Real time X-ray Imaging System Instruction Manual and Drawing", (Rolls-Royce MatEval LTD Co., 1992), pp. 1-10.
11. "Sappire Operator's Manual Instruction

- Operating Software Version V5.05,"(Quentel Ltd., 1990), pp. 1-82.
12. "High-Energy X-ray Applications for Nondestructive Testing"(Varian Pacific Inc., 1986),
13. "Military Standard Inspection, Radiographic", MIL-STD-453C(1984), pp. 19.

The Optimization of NDT Method for Real Time X-ray Imaging

Sungyoub Na and Yongkyu Choi
Agency for Defence Development

Abstract This study has investigated the optimization of NDT method and the minimum detectable defect size for complex structures such as the solid propellant rocket motor using real time X-ray imaging system. Test specimens were made of steel plates with various defect size, and installed with proper thickness for which solid propellant, rubber, and case converted to the steel equivalent thickness according to the radiographic equivalent theory. As the results, this examination obtained optimum magnification and X-ray energy, dose rate according to steel equivalent thickness, also, obtained the relationship between minimum detectable defect size and the ratio(defect depth/object thickness). Thus, this simulated test is the preliminary procedure before performing NDT for real objects, and is possibly applied for NDT of other complex structures.

(Received : August 25, 1995)