

방사선 영상을 이용한 탄약신관 안전상태 자동인식기술 개발

안 지 연^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Automatic Safety Inspection Technique for Ammunition Fuzes using Radiographic Images

Ji Yeon An^{*,1)}

¹⁾ *The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 23 September 2014 / Revised 13 May 2015 / Accepted 22 May 2015)

ABSTRACT

This paper presents the development of the automatic safety inspection technique for the ammunition fuzes using radiography images. The technique inspects 49-ammunition fuze by detecting the X-ray or neutron radiographic images to check whether the fuze is unintendedly armed or/and some major assembled parts are at right place. To execute the program, we loads the image(s) for under test. After reading images, the program conducts a series of pre-image processing, and then starts inspecting input images by using the detection algorithms which are designed distinctively for each fuze. After completing the detection process, the program displays the final result of the fuze status: "safety or danger." Through this program, we can cut off the fuzes which have any doubt about safety, and can only provide absolutely safe fuzes, compared with the current naked eye inspection method.

Key Words : Ammunition Fuzes(탄약신관), Automatic Safety Inspection(안전상태 자동검사), Radiographic Image(방사선 영상)

1. 서론

신관은 탄두의 안전을 보장하고, 탄도 상의 최적위치 또는 최적시간을 판단하여 탄두를 기폭시킴으로써 무기효과를 극대화시키는 장치로서 안전장전장치, 표적탐지장치, 폭발계열로 구성된다. 이러한 신관은 소구

경 탄약에서부터 전술/전략 유도탄에 이르기까지 모든 무장에 적용된다.

탄약에 적용되는 탄약신관은 일반적으로 발사환경 이외의 조건에서는 장전되지 않는 안전한 구조로 설계되어야 하며, 따라서 발사 이전의 수송, 저장, 취급 중의 모든 단계에서는 안전을 보장하고, 발사가 되고 나면 발사환경을 감지하여 장전된다¹⁾.

현재 국내의 탄약신관 제조업체에서는 탄약신관의 안전상태 확인을 위해, 탄약신관 제조과정에서 안전과

* Corresponding author, E-mail: jyan@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

관련된 모든 구성품에 대하여 육안 전수 검사 혹은 X-선 영상의 육안 판독에 의한 안전검사를 수행한 후 최종적으로 탄약신관 완성품을 조립하고 있다²⁾. 그러나 탄약신관 완성품 상태에서는 탄약신관의 다양한 종류 및 크기, 구조의 복잡성, 검사의 난이도에 따른 양산 단가 상승 등의 이유로 안전/위험 상태를 별도로 확인하지 않고 있다. 따라서 구성품 검사 단계에서 검사자의 판단 착오 등으로 인해 불량품이 조립되거나, 혹은 정확히 인지되지 않은 어떠한 이유로 안전에 결함이 있는 탄약신관 완성품이 혼입되었다고 가정할 경우, 현재의 방식으로서는 이를 확인할 방법이 없게 된다. 뿐만 아니라, 검사자가 육안으로 일일이 전수 검사를 수행하므로 개인의 컨디션 및 검사 환경에 따라 오차가 크며 검사 속도 또한 느리다는 단점이 있다. 또한 최근 방산업체의 수출용 탄약신관 수락시험 및 군에서의 사격시험 중 탄약신관의 악 작용에 의한 폭발사고가 보고되고 있어 탄약신관 완성품의 최종 불출 시와 시험, 배치, 운용 전 안전상태 재확인을 통한 안전성 확보가 요구된다.

본 논문에서는 방사선 영상을 이용하여 탄약신관 완성품 안전상태를 외부에서 검사할 수 있는 탄약신관 안전상태 자동인식기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 방사선 영상을 이용한 탄약신관 안전상태 자동인식기술

Fig. 1은 방사선 영상을 이용한 탄약신관 안전상태 자동인식기술의 개념도를 나타낸다.

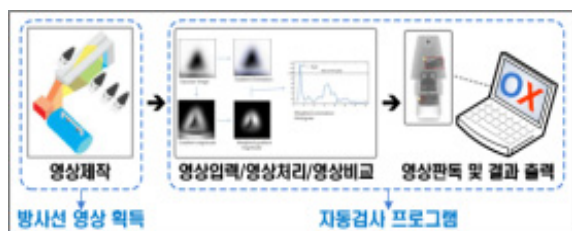


Fig. 1. Conceptual diagram of the automatic safety inspection technique for ammunition fuzes

그림과 같이, 먼저 조립이 완료된 탄약신관 완성품에 대해 X-선 혹은 중성자 빔을 이용한 방사선 영상을 제작한다. X-선과 중성자의 물질 투과특성이 물질

을 구성하는 원소에 따라 다른 것을 이용하여 X-선 비파괴검사와 중성자 비파괴검사³⁾를 통해 국내에서 제조/생산 중인 탄약신관에 대한 방사선 영상을 획득할 수 있다. 다음으로 탄약신관의 안전을 담보하는 각종 정밀 기계부품에 대한 지식을 보유하고 있으면서 안전에 위배된 상태를 발생시킬 수 있는 기계부품 및 화공품의 배열, 형태, 상대적 위치, 부품의 손상, 장전 상태, 모호한 상태 등을 정확히 파악할 수 있는 탄약신관 설계자/전문가의 육안 판독 기술을 바탕으로 획득된 방사선 영상에 대해 적절한 영상처리 수행 및 영상 판독기법을 적용하여 탄약신관의 안전/위험 판단 알고리즘을 개발한다. 이를 자동검사 프로그램으로 구현하여 최종적으로 탄약신관의 안전/위험 상태를 보다 빠르고 정확하게 판별할 수 있도록 한다.

다음에서 각 단계에 대해 상세히 기술하도록 한다.

2.1 탄약신관 방사선 영상 획득

방사선 영상을 이용한 탄약신관 안전상태 자동인식 기술의 구현을 위해서는 우선 각 탄약신관에 대한 방사선 영상이 필요하다. 현재 국내에서 생산되는 탄약신관은 총 55종으로, 이들에 대한 방사선 영상 획득을 위해 비파괴검사를 실시하여 영상을 획득하였다. 먼저 다음에서 비파괴검사에 대하여 기술하고, 탄약신관에 대한 방사선 영상 제작 결과를 기술한다.

2.1.1 비파괴검사

2.1.1.1 X-선/ γ -선 및 중성자의 투과특성

일반적으로 현재 육안으로 가장 빠르게 판별이 가능한 비파괴검사는 X-선/ γ -선 비파괴검사이다. X-선/ γ -선은 전자기파이므로 원자의 궤도전자와 반응한다. 전자기파는 궤도전자 수가 적은 가벼운 원소(수소, 탄소, 산소 등)는 투과할 확률이 높고, 궤도전자의 수가 많은 무거운 원소(텅스텐, 납, 우라늄 등)는 투과할 확률이 낮다. 즉, X-선/ γ -선은 원소의 원자번호가 클수록 반응확률이 높다. 한편, 중성자는 원자의 원자핵과 반응하는데, 원자핵의 크기와 관계없이 즉, 원자번호에 관계없이 투과력이 매우 불규칙하여 많은 실험에 의해 결정된다.

일반적으로 X-선/ γ -선 비파괴검사와 중성자 비파괴검사는 상호 보완적으로 이용될 수 있다. 왜냐하면 중성자는 X-선이 투과력이 강한 수소, 붕소, 물 등 가벼운 물질에 대한 투과력은 매우 약하고, X-선이 투과력이 약한 납, 우라늄 등의 무거운 물질에 대한 투과력

은 매우 강하기 때문이다. 이러한 특성을 이용하여 중성자에 의한 방사선 영상은 항공기 부품의 수소로 인한 결함 등의 관찰에 이용되기도 한다³⁾.

2.1.1.2 X-선/ γ -선 및 중성자 빔의 선형흡수계수
일반적으로 X-선/ γ -선 및 중성자 빔의 물질에 대한 투과량은 아래 (1)의 투과식으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

위 식의 유도과정을 간략히 설명하면 다음과 같다. 빔(X-선/ γ -선 혹은 중성자 빔)이 같은 원소로 구성된 두께 x 의 시료를 투과할 때, 세기가 I 인 빔이 검사물의 미소 두께 dx 에 대하여 감소되는 비율은 아래와 같다.

$$-\frac{dI}{dx} = I\sigma N \quad (2)$$

여기서 I : 단위시간 당 단위면적 당 빔의 세기 (cm^2s^{-1}),
 σ : 검사물의 미시적 반응단면적(cm^2),
 N : 검사물의 단위부피 당 원소 수.

위 식 (2)는 식 (1)의 I 에 대한 미분방정식으로 그 해를 구하면 아래와 같다.

$$I = I_0 \exp(-N\sigma x) \quad (3)$$

여기서 $\Sigma = N\sigma$ 를 검사물의 거시적 반응단면적 (cm^{-1})으로 놓으면 식 (3)은 식 (4)가 된다.

$$I = I_0 \exp(-\Sigma x) \quad (4)$$

다시 $\Sigma(\text{cm}^{-1}) = \mu_m(\text{cm}^2\text{g}^{-1}) \rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 로 놓으면 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (5)$$

여기서 μ_m 은 질량흡수계수(mass absorbtion coefficient)이다. 우리가 거시적으로 느낄 수 있는 검사물 두께 x 를 투과하는 빔의 투과량은 검사물의 단위 길이 당 빔

이 물질에 흡수되는 비율 $\mu(\text{cm}^{-1}) = \mu_m(\text{cm}^2\text{g}^{-1}) \rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 이라 하면, 최종적으로 (1)과 같은 투과식을 얻을 수 있다. 여기에서 $\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 는 물질의 밀도이며, 선형흡수계수 μ (mass absorbtion coefficient)는 질량흡수계수 μ_m 에 밀도 ρ 를 곱한 값이다.

중성자 비파괴검사는 X-선/ γ -선 비파괴검사와 비교하여 측정되는 contrast가 매우 높다. 즉, 중성자 비파괴검사는 X-선/ γ -선 비파괴검사 보다 더 세밀하게 관찰된다. 그 외에 중성자 비파괴검사는 X-선/ γ -선 비파괴검사가 어려운 분야인 방위산업의 화약 충전상태에 매우 유용하나, 중성자가 수소에 대한 투과력이 약하므로 생물학적 연구에는 X-선/ γ -선 비파괴검사와 비교하여 현저하게 취약점을 갖는다. X-선 영상에 의한 탄약신관 안전검사는 육안에 의한 검사방법과 자동검사 방법으로 대별될 수 있는데, 대량 생산되는 제조공정에 적합한 자동검사 방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며, X-선으로 영상제작이 용이한 특정 탄약신관에 국한되어 있다⁴⁾.

이러한 특성을 바탕으로 하여, 방사선 영상을 이용한 탄약신관 안전상태 자동인식기술에서는 국내 생산 중인 탄약신관 55종에 대한 안전성 확보를 극대화하기 위해 X-선과 중성자가 물질을 투과하는 투과특성이 서로 다른 것을 이용하여 X-선 영상과 중성자 빔에 의한 영상을 상호 보완적으로 사용한다.

2.1.2 방사선 영상 제작 결과

탄약신관 55종에 대해 X-선 및 중성자 빔을 이용하여 방사선 영상을 제작하였다. X-선 영상제작에 사용된 장비는 Techvally 사의 TVX-IL3205로서 최고전압은 320 kV이며 전류는 20 mA로 작동된다. 중성자를 통한 영상제작은 한국원자력연구원의 연구용 원자로 “하나로”에 설치된 중성자 비파괴검사 장치를 이용하였다. 하나로 원자로의 중성자 비파괴검사 장치의 열중성자 속은 $\sim 1 \times 10^7 \text{ n/cm}^2\text{s}$ 으로서 디지털 영상 1장을 얻기 위한 조사시간은 1분 이하(20초 ~ 1분)이며 약 20분의 cooling 시간이 소요된다.

Table 1에 관독에 사용하는 영상종류를 표시하였다. 중성자 비파괴검사는 현재 특정장소에서만 이용 가능하여 X-선 비파괴검사에 비해 상대적으로 제약이 있기 때문에 중성자 비파괴검사 수행을 최소화 하고자 하였다. 총 55종의 탄약신관에 대해 먼저 X-선으로 영상 제작을 수행하여 육안 관독 수행 후, X-선 영상으로 관독이 어려울 것으로 예상되는 7종의 탄약신관에

대해서는 중성자 비파괴검사를 통해 중성자 빔을 이용한 영상을 제작하였다. 그러나 6종의 탄약신관에 안전/위험 판단을 위한 특징이 X-선 및 중성자 영상 모두에 나타나지 않아 판독이 불가능하였다.

Table 1. Classification of the domestic-made 55 ammunition fuzes by radiographic image type

신관형식번호		영상종류	비고
K### 외 41종		X-선	판독 가능
KO## 외 6종		중성자	
K### 외 5종		-	판독 불가
계	55종	49(X-선: 42, 중성자: 7)	판독가능
		6	판독불가

방사선 영상은 1차로 안전(정상)상태에서 제작한 후, 2차적으로 안전과 관련한 구성품의 배열, 위치 등을 고의적으로 바꾸어서 위험(장전)상태로 만들어 제작한다. 추가로, 일부 탄약신관에 대해서는 안전과 직결되는 주요 부품의 누락여부 또한 함께 검사하기 위해 검사 대상으로 삼을 부품을 제거한 후 위험상태의 영상을 제작하였다. 1차로 제작한 안전상태의 영상은 55종 각각의 탄약신관에 대해 각 신관을 1° 간격으로 회전시켜 해당 신관마다 180개(단, 단면 촬영 시 1개 제작)의 영상을 제작하였으며, 이를 레퍼런스 영상 데이터베이스로 활용한다. 위험상태의 영상은 특정각도(30° 또는 45°) 간격으로 회전시켜가며 영상을 제작하여 안전상태 영상과 비교/분석함으로써 판독 알고리즘 수립에 이용하도록 한다. 아래에 방사선 영상 제작 결과를 나타내었다. Fig. 2는 탄약신관 #1에 대한 결과로, X-선의 단면 영상으로 제작되었다. 왼쪽부터 차례로 실물, 안전상태, 장전상태, 부품누락상태의 영상을 나타낸다. Fig. 3은 탄약신관 #2에 대한 X-선 영상 제작 결과이며, 마찬가지로 왼쪽부터 차례로 실물, 안전상태, 장전상태, 부품누락상태의 영상을 나타낸다. Fig. 4는 탄약신관 #3에 대한 영상으로 X-선 영상(Fig. 4의 두 번째 영상)으로는 내부 판독이 불가능하여 중성자 빔을 이용하여 영상을 제작하였다. 탄약신관 #3는 특정 각도에서 일관되게 영상 제작이 가능한 형태여서 해당 각도에서 제작한 영상을 기준으로 비교 및 판독

을 수행하며, 특정부품의 위치 이동을 바탕으로 안전/장전 여부를 판단하는데 이 과정에서 부품 누락 여부가 확인되므로 추가적인 부품 누락 검사는 적용하지 않는다. 그림은 왼쪽부터 실물, 안전상태(X-선 영상), 안전상태(중성자), 장전상태(중성자)를 나타낸다.

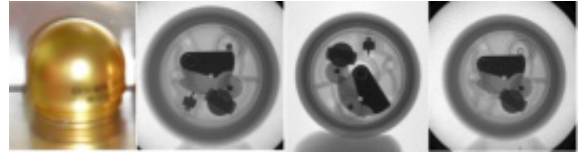


Fig. 2. Radiographic image example #1

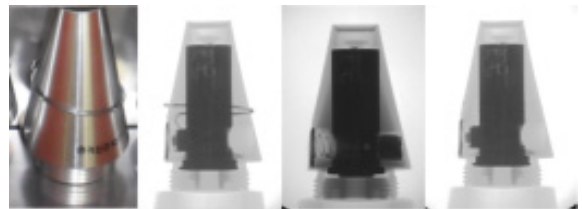


Fig. 3. Radiographic image example #2

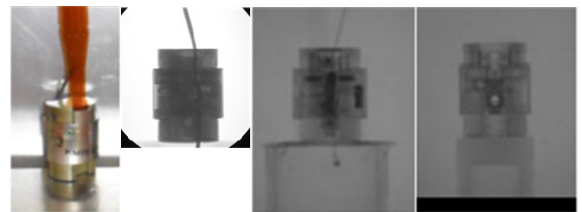


Fig. 4. Radiographic image example #3

2.2 자동검사 프로그램

탄약신관 안전상태 자동검사 프로그램은 크게 세 단계로 이루어지며, 각 단계별 구성모듈은 Fig. 5와 같다.

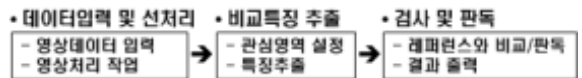


Fig. 5. Structure of the program

먼저 탄약신관 안전검사를 수행하기 위한 대상 탄약신관의 영상을 입력으로 받아 영상처리를 수행한다. 입력되는 영상데이터는 X-선 영상인 경우에는 jpg 포맷, 중성자 빔에 의한 영상인 경우 tif 포맷으로 제공되고 기본 사이즈는 1,000×1,000 pixels이다. 이후, 입력 받은 영상에 대해 프로그램에서 다루기 쉬운 데이터

형식으로의 포맷 변경이나 노이즈 제거, contrast 및 밝기 조정 등의 일련의 과정을 거친 뒤, 입력 영상과 레퍼런스 영상의 일치화를 위해 탄약신관의 특정부위를 참고하여 크기 보정, 회전 보정, 여백 계산 등을 통해 필요한 부분만 잘라내는 등의 선처리 작업을 수행한다. 선처리 과정에 대해서는 다음 절에서 기술한다. 다음은 입력 영상과 레퍼런스 데이터베이스를 비교하기 위해 각 탄약신관별 고유한 특징을 추출하는 부분이다. 해당 탄약신관에 대해 ROI(관심영역, region of interest)를 설정한 후 레퍼런스 영상과의 비교에 사용할 특징 데이터를 생성시킨다. 특징추출은 각 탄약신관의 고유한 장전 메커니즘이나 특정 부품의 누락여부에 따라 탄약신관마다 달리 적용되며, 이를 다음 단계의 판독 알고리즘에 이용한다. 마지막으로 이전 단계에서 생성된 비교특징 데이터베이스와 레퍼런스 데이터베이스를 비교하여 탄약신관의 안전 상태를 판독하는 부분이다. 판독은 각 탄약신관별 적용되는 알고리즘 및 테스트 결과에 따라 결정된 특정 오프셋 값을 기준으로 안전/위험 상태가 가려지게 된다. 적용한 알고리즘은 크게 일곱 가지로 나눌 수 있으며, 다음 절에서 설명한다. 비교를 위해 사용되는 레퍼런스 데이터베이스는 각 탄약신관에 대해 미리 제작된 안전한 상태의 180여 개의 이미지를 지칭하며, 빠른 비교를 가능하게 한다. 이와 같이 세 단계를 거쳐 검사가 완료되면 최종적으로 탄약신관에 대한 안전/위험 상태를 화면에 표시해준다. 이를 순서대로 나타내면 Fig. 6과 같다.

2.2.1 선처리 과정
2.2.1.1 크기 보정

검사 대상 탄약신관의 입력 영상은 레퍼런스 영상과 제작한 환경이 다르므로, 보다 정확한 판독을 위해 먼저 둘의 크기를 일치시켜야 정확한 좌표를 얻을 수 있다. 영상의 사이즈는 1,000×1,000 pixels로 동일하지만, 영상에서 실제 탄약신관이 차지하는 영역이 다르므로 탄약신관의 형태에 따라 다음과 같은 세 가지 방식으로 크기를 보정한다.

1) 원뿔형의 탄약신관

영상의 상단에서부터 스캔하여 가장 긴 직선을 찾은 후, 이들 두 직선의 양 끝점의 좌표를 얻고, 이를 바탕으로 길이를 구하여 레퍼런스 영상과 입력 영상의 크기를 일치화한다. Fig. 7에서 상단 맨 왼쪽이 레퍼런스

영상인데 두 번째와 같은 입력 영상이 들어오는 경우, 크기를 맞춰주기 위해 두 영상 각각에 대해 가장 긴 직선을 찾는다(세 번째, 네 번째 그림의 녹색 선). 이를 바탕으로 입력 영상에 대한 크기 보정을 완료하면, 하단 맨 오른쪽 그림과 같이 불필요한 부분은 잘려지고 레퍼런스 영상(하단 왼쪽)과 크기가 일치된 영상을 얻을 수 있다.

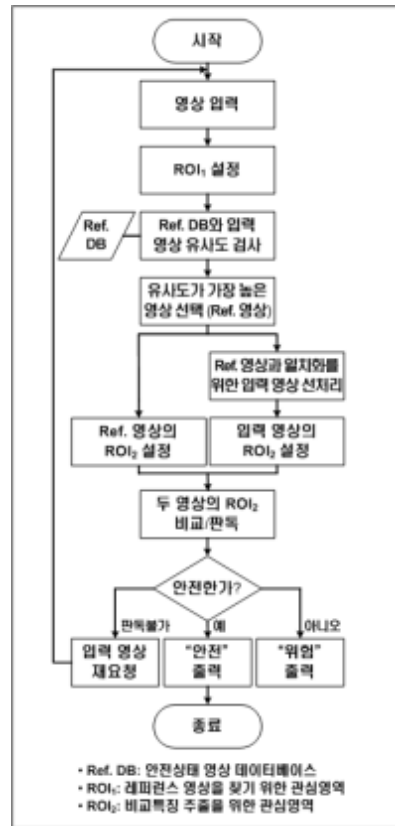


Fig. 6. Flow chart of the program

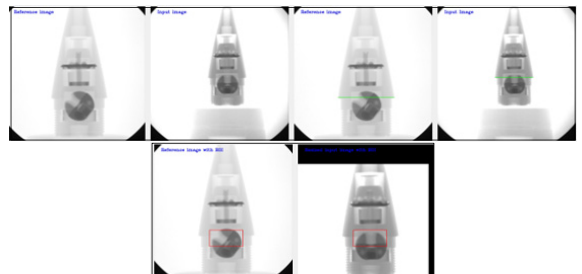


Fig. 7. Size correction by finding the longest straight line

2) 단면의 탄약신관

단면의 영상을 이용하는 탄약신관의 경우, Hough 변환을 이용한 원 탐색 알고리즘을 적용하여 레퍼런스 영상과 입력 영상 각각에 대해 가장 큰 원을 탐색하여 이들 둘의 크기를 일치화한다. Fig. 8의 상단 맨 왼쪽이 레퍼런스 영상인데 두 번째와 같은 입력 영상이 들어오는 경우, 크기를 맞춰주기 위해 두 영상 각각에 대해 가장 큰 원 탐색을 수행한다(세 번째, 네 번째 그림의 녹색 선). 이를 바탕으로 입력 영상에 대한 크기 보정이 완료된 영상이 하단 맨 오른쪽 그림으로, 레퍼런스 영상(하단 왼쪽)과 크기가 일치되었음을 알 수 있다.

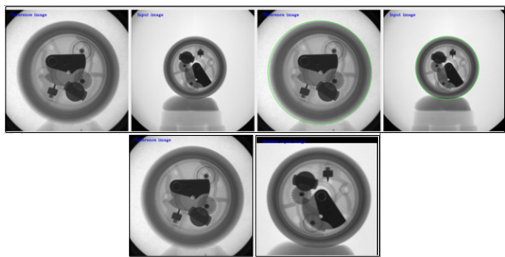


Fig. 8. Size correction by finding a circle

3) 원통형의 탄약신관

1)의 경우와는 달리 원통의 형태이므로 가장 긴 직선을 찾는 방법은 이용할 수 없고, 이 경우는 레퍼런스 영상과 입력 영상 각각에 대해 신관 형태의 가장 에지를 사각형으로 잡아 이들 둘의 크기를 일치화한다. Fig. 9의 상단 맨 왼쪽이 레퍼런스 영상인데 두 번째 그림과 같은 입력 영상이 들어오는 경우, 크기를 맞춰주기 위해 두 영상 각각에 대해 가장 바깥 에지 영역을 잡는다(세 번째, 네 번째 그림의 녹색 선). 이를 바탕으로 입력 영상에 대한 크기 보정이 완료된 영상이 하단 맨 오른쪽 그림으로, 레퍼런스 영상(하단 왼쪽)과 크기가 일치되었음을 알 수 있다.

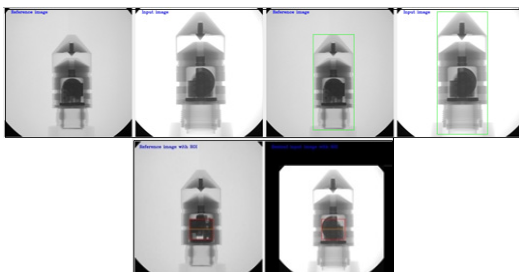


Fig. 9. Size correction by finding a rectangular

2.2.1.2 각도 보정

각도 보정은 단면의 신관을 입력 영상으로 이용하는 경우, 해당 각도 차 만큼 회전시켜 레퍼런스 영상과의 각도를 맞춰주기 위해 수행한다. Fig. 10의 상단 왼쪽이 레퍼런스 영상, 상단 오른쪽이 크기 보정이 완료된 입력 영상이다. 중앙의 로그정보에 나타난 바와 같이 레퍼런스 영상과 크기 보정이 완료된 입력 영상 간에 -1.379025도의 회전각도 차이가 존재하는데, 검사 시 동일한 위치의 ROI를 참조하려면 입력 영상의 각도 보정이 수행되어야 한다. 하단 오른쪽이 회전 각도 보정까지 완료된 입력 영상으로 하단 왼쪽의 레퍼런스 영상과 동일한 각도를 가짐을 확인할 수 있다.

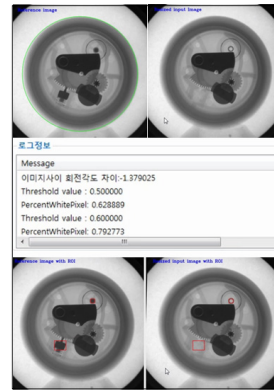


Fig. 10. Angle correction

2.2.2 적용 알고리즘

2.2.2.1 ROI의 차 이미지 이용

ROI는 탄약신관의 안전/위험 상태에 따라 변하는 영역으로 여러 부분이 될 수 있다. 이 중에서 관독이 용이한 부분(들)을 ROI로 설정하고, 레퍼런스와 입력 영상의 차를 구한 후 이진화하여 값을 구하여, 그 값이 미리 설정된 안전/위험 판단의 임계 기준치를 초과하면 위험상태로 판독한다. 부품누락 여부 검사를 추가로 수행하는 탄약신관들의 경우, 모두 이 방식을 이용하게 되며, Fig. 11에 이를 적용한 신관 예를 나타내었다.

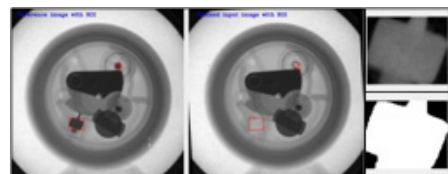


Fig. 11. Example applied to the 1st method

2.2.2.2 Template matching

두 번째는 템플릿 매칭으로, 특정 검사영역 내에서의 ROI의 위치 변화 여부를 판단하기 위한 방법이다. 템플릿 매칭은 어떤 통계적 허용오차 이내에 미리 저장된 템플릿과 입력 영상이 매칭되는지를 판단하는 방법으로, 템플릿으로서 안전상태일 때와 위험상태일 때의 ROI를 각각 받아놓는다. 다음으로 판독하고자 하는 입력 영상의 ROI에 대한 템플릿 매칭을 수행하여 안전 또는 위험상태를 판독한다. Fig. 12에 이를 적용한 신관 예를 나타내었다. 해당 예는 장전되는 경우 특정 부품이 1번 표시 위치에서 2번 표시 위치(중앙부분)로 이동하게 된다. 1, 2번으로 표시한 부분들(작은 사각형)을 템플릿으로 설정하고, 입력 영상에 대해 동일 위치의 두 부분에 대한 템플릿 매칭을 수행한다. 템플릿 매칭 값을 통해 장전에 관여하는 부품의 위치를 파악할 수 있으며, 템플릿 매칭 수행 결과 위험(장전상태)로 판단하게 되면 해당 부분을 녹색으로 표시하여 구분하였다.

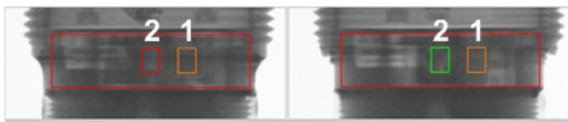


Fig. 12. Example applied to the 2nd method

2.2.2.3 Masked template matching

세 번째는 크게 템플릿 매칭의 한 종류로, 특정 형태의 부품의 모양을 미리 마스크(그림의 파란색 실선으로 표시한 부품)로 만들어 놓고, 입력 영상에 대해 해당 마스크의 위치나 각도 변화 등을 검사하여 안전 또는 위험상태를 판독한다. Fig. 13에 이를 적용한 신관 예를 나타내었다.

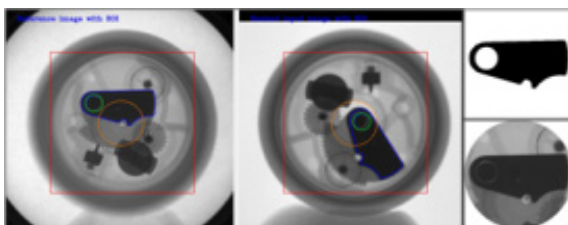


Fig. 13. Example applied to the 3th method

2.2.2.4 ROI의 비율 비교

설정된 ROI에 대해 수평방향으로 절반을 나눴을 때,

상단의 ROI와 하단의 ROI의 값을 구하여, 안전상태일 때의 값과 위험상태일 때의 값 차이를 비교하여 그 값이 미리 설정된 안전/위험 판단의 임계 기준치를 초과하면 위험상태로 판독한다. 이는 장전 시 특정 부품이 회전하는 것을 판독에 이용하기 위한 방법으로, 특정 각도에서 일관되게 영상 제작이 불가능한 즉, 외부에서 방향성을 특정할 수 없는 탄약신관들에 대해 ROI 이미지 차 이용 방법으로는 판독이 어려운 경우에 사용하게 된다. Fig. 14에 이를 적용한 신관 예를 나타내었다.

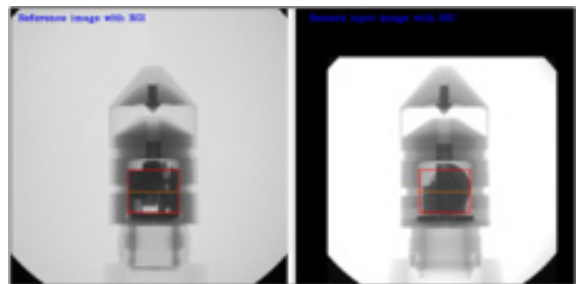


Fig. 14. Example applied to the 4th method

2.2.2.5 ROI간 이미지 차 비교

안전상태일 때의 ROI에 대해 수직방향으로 절반을 나눴을 때, 장전 시 해당 ROI에 포함되는 부품이 회전함으로써 좌우대칭의 모양을 가지는 경우에 사용하는 알고리즘이다. ROI를 수직방향으로 이등분하여 왼쪽 ROI와 오른쪽 ROI로 나누고, 이들을 이진화하여 255레벨의 그레이스케일로 나타낸 후 이미지 차를 비교하면 장전된 경우 그 값이 거의 0에 가깝다. 따라서 미리 설정된 안전/위험 판단의 임계 기준치와 비교하여 안전/위험상태를 판독할 수 있다. Fig. 15에 이를 적용한 신관 예를 나타내었다. 해당 예의 경우, 장전된 입력 영상을 사용하였으므로 ROI간 이미지 차(맨 오른쪽 그림)가 0에 가까워서 전체 영역이 0레벨(흑색)으로 보인다.

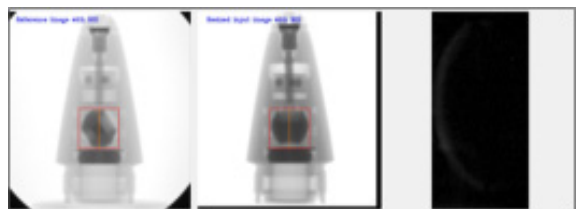


Fig. 15. Example applied to the 5th method

2.2.2.6 원 탐색

Hough 변환을 이용한 원 탐색 방법을 통하여, 안전 상태일 때 관찰되는 원형의 부품이 장전 시 영상에서 보이지 않는 것을 바탕으로 안전 또는 위험상태를 판독한다. Fig. 16에 이를 적용한 신탄 예를 나타내었다.

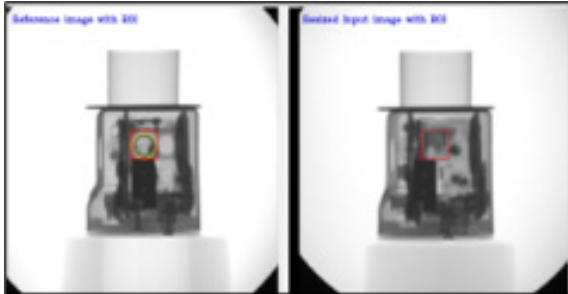


Fig. 16. Example applied to the 6th method

2.2.2.7 ROI 폭 측정

ROI에 포함된 특정 형태의 부품(두 개의 뾰족한 피크 부분을 갖는 부품)이 장전 시 회전하는 것을 특성을 판독에 이용하기 위해, 해당 ROI를 이진화하여 255 레벨의 그레이스케일로 나타낸 후, 피크 지점 사이(그림에서 'd'로 표시된 부분)의 값을 구한다. 그 값이 미리 설정된 안전/위험 판단의 임계 기준치를 초과하면 위험상태로 판독한다. Fig. 17에 이를 적용한 신탄 예를 나타내었다.



Fig. 17. Example applied to the 7th method

3. 방사선 영상을 이용한 탄약신탄 안전상태 자동 검사 기술 구현 결과

앞 절에서 설명한 알고리즘을 바탕으로 탄약신탄 안전상태 자동인식기술을 GUI 프로그램으로 구현하였다. Fig. 18과 19가 프로그램을 실행하였을 때의 메인화면들을 나타낸다. 그림의 상단부에 제목 및 탄약신탄평

을, 좌측 하단부에 해당 탄약신탄의 실패사진과 간략한 기능 및 적용무기체계에 대해 표시한다. 안전상태 검사를 위해 먼저 좌측 상단의 '입력 영상 열기' 버튼을 클릭하여 검사하고자 하는 탄약신탄의 영상을 선택한다. 이 때, X-선 또는 중성자를 이용한 영상이 항상 동일한 방향에서 촬영이 가능한 경우는 하나의 영상으로만 상태 판독이 가능하므로 해당 영상을 한 개만 입력하면 된다. 반대로, 외부에서 내부 부품들의 배열 또는 상태에 대한 방향성을 알 수 없는 경우 네 장의 영상을 입력하여 판독함으로써 안전상태 판독에 대한 신뢰성을 높이도록 하였다.

영상 입력 후, '판독 시작' 버튼을 클릭하고 판독이 완료되면, 우측의 판독 표시부에 세부 판독결과가, 좌측의 최종 판독 결과 표시부에 각 판독결과를 종합한 최종 결과가 나타난다. 판독과정은 탄약신탄의 안전/장전 여부를 검사와 주요 부품 누락 여부를 검사로 이루어진다. 안전/장전 검사에서 탄약신탄이 장전된 것으로 판단되면 부품 누락 검사는 수행하지 않고 바로 최종 결과로서 "위험(장전상태)"의 결과를 출력하며, 안전/장전 검사에서 탄약신탄이 안전한 것으로 판단되면 추가적으로 부품 누락 검사를 수행하여 그 결과에 따라 최종적으로 "안전" 혹은 "위험(부품누락)"의 결과를 출력한다.

'판독 시작' 버튼 클릭 후 최종 결과 출력까지의 전체 소요 시간은 검사 과정과 입력 영상 개수에 따른다. 입력 영상 1개에 대해 안전/장전 검사만 수행하는 경우 약 1~2초, 안전/장전 검사 후 주요 부품 누락 검사까지 수행하는 경우 약 2~3초가 소요되었다(부품 검사 항목 2개 기준). 네 개의 영상을 입력해야 하는 방향성이 없는 탄약신탄에 대해서는 검사 과정에 따라 최대 10~12초가 소요되었다. 단, 이러한 처리 속도는 프로그램을 구현한 하드웨어 성능에 의존적이며, 해당 수치는 다음의 하드웨어 사양에서 프로그램을 실행했을 때 얻은 결과이다: 인텔 2세대 코어 i7-2630 CPU, 4GB RAM, Windows 7 64-bit.

우측 판독 표시부에는 비교에 사용한 레퍼런스 영상, 입력한 영상, 판독 대상 탄약신탄에 대한 로그정보 및 판독 결과가 디스플레이되며, 입력 영상별 상세 결과는 각 영상의 판독 결과 버튼을 클릭함으로써 확인 가능하다. Fig. 18과 19는 네 장의 입력 영상이 모두 "안전"이어서 최종 판독 결과가 "안전"인 경우, 하나라도 "위험"인 결과가 나오면 최종 판독 결과가 "위험"으로 출력되는 것을 보여준다.



Fig. 18. Main display I



Fig. 19. Main display II

다음 그림이 메인화면에서 우측 판독 결과(버튼)를 클릭하면 팝업되는 상세화면들로, 입력한 영상, 판독 전 선처리 수행내용, 사용한 알고리즘 등을 포함하고 있으며, 장전상태일 때와 부품누락일 때의 결과를 차례로 나타내었다.



Fig. 20. Detailed display I



Fig. 21. Detailed display II

이와 같은 탄약신관 안전상태 자동인식기술 프로그램 구현에 있어 프로그램의 신뢰도를 최대화하기 위해, 각 탄약신관마다 제작된 모든 영상들(안전상태, 장전상태, 부품 누락 상태)에 대해 프로그램을 수행하여 검증하였으며, 안전/위험 검사 항목을 적게는 4개에서 많게는 최대 8개까지로 잡아 판독에 대한 기준을 강화하였다. 예로써 Fig. 22에 나타난 바와 같이, 해당 탄약신관은 그림에 표시된 8개의 ROI(청색 부분)에 대한 검사에서 모두 안전한 것으로 판단이 되어야만 최종적으로 “안전”의 결과를 출력하게 된다.

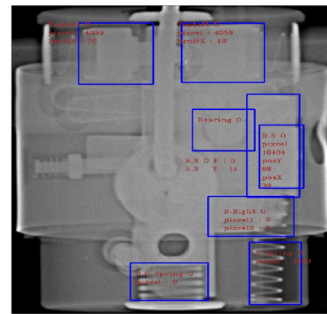


Fig. 22. Example of the inspection items(8 ROIs)

4. 결론

본 논문에서는 방사선 영상을 이용한 탄약신관 안전상태 자동인식기술에 대해 기술하였다. 본 기술은 현재 국내 생산 중인 탄약신관 55종 중 X-선 또는 중성자 빔을 이용하여 영상을 제작할 수 있는 49종에 대하여 각 탄약신관의 장전상태 확인 및 안전과 직결된 주요 부품의 누락여부를 확인하여 안전/위험상태에 대한 검사를 자동으로 수행한다. 탄약신관 안전검사 프로그램의 실행은 사용자에게 의해 판독하고자 하는 탄약신관의 영상을 입력받고, 일련의 이미지 선처리 과정을 거친 후, 각 탄약신관 고유의 장전 메커니즘에 적합하게 개발된 알고리즘에 따라 판독을 수행한 후 최종적으로 안전/위험 상태를 출력해준다. 본 기술을 통하여 현재의 구성품 육안 전수검사 또는 X-선 영상의 육안 판독 방식과 비교하여, 안전에 조금이라도 의심이 가는 탄약신관의 생산을 원천적으로 차단하고 안전한 탄약신관만을 공급할 수 있을 것이라 예상되며, 일부 방산업체에서는 본 기술을 탄약신관 제조 공정의 안전검사 절차에 적용하거나 적용 예정 중에 있다.

References

- [1] MIL-STD-1316E, "Fuze Design, Safety Criteria for," Department of Defense Design Criteria Standard, 1998.
- [2] 김완주 외, "방사선 영상에 의한 탄약신관 안전검사," 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011.
- [3] W. J. Lewis & L. G. I. Bennett, "The Use of Neutron Radiography in the Inspection of Aircraft Composite Flight Control Surface," Proc. of the 1st Pan American Conference for Nondestructive Testing, 1998.
- [4] R. E. Zirkle, "Automatic Fuze Radiograph Inspection Device," Proc. of the International Electron Devices Meeting, 1969.
- [5] 국방과학연구소, "제조된 탄약신관 안전상태 자동 검사방법," 국내특허 10-1436145, 2014.