

## 소형 로켓 모터의 결함 자동 판독 프로그램 개발

### A Development of Automatic Defect Detection Program for Small Solid Rocket Motor

임수용\*<sup>†</sup>, 손영일\*, 김동륜\*

Sooyong Lim\*<sup>†</sup>, Youngil Son\* and Dongryun Kim\*

초 록 본 연구에서는 소형 로켓 모터의 3차원 단층촬영 영상을 자동 판독하는 프로그램을 개발하고자 하였다. 신속경화현상을 보정한 화소값 비교 방식으로 결함을 검출하였고, 정확한 결함의 임계값 설정을 위하여 모의결함시편을 제작하였다. 개발된 자동 판독 프로그램은 미접착, 균열, 이물질 및 기공을 검출할 수 있었으며, 150기에 대한 비교 판독한 결과 미접착과 균열은 육안 판독 결과와 동일한 결과를 나타냈고, 기공과 이물질은 판독자보다 많은 결함을 신속하게 검출할 수 있었다.

주요용어: 고체 로켓 모터, 3차원 단층촬영, 자동 결함 검출

**Abstract** This paper presents the development of automatic defect detection program using 3D computed tomography image of small solid rocker motor. We applied the neighbor pixel comparison algorithm with beam hardening correction for the recognition of defect. We made the artificial defect specimen in order to decide a standard CT value of defect. The program was tested with 150 small solid rocket motors and it could detect the disbond, crack, foreign material and void. The program showed more reliable and faster results than human inspector's interpretation.

**Keywords:** Solid Rocket Motor, 3D-CT, Automatic Defect Detection

#### 1. 서 론

방사선투과검사는 로켓 모터의 품질 보증 방법으로써 일반적으로 적용되고 있는 비파괴시험 방법으로써 높은 신뢰성과 결함 검출 능력을 보여 왔다. 그러나 고성능 소형 로켓 모터에 요구되는 높은 신뢰성을 만족시키기 위해서 방사선투과검사로 쉽게 검출할 수 없는 수준의 50  $\mu\text{m}$  폭의 미접착과 균열의 검출이 필요하였다. 이런 미세한 결함을 검출하기 위해서는 미세 초점 엑스선 발생장치 장비를 이용한 3차원 단층촬영(3 dimensional computed tomography, 3D-CT)이 적합하였으나, 소형 로켓

모터의 고해상도 3차원 단층촬영을 통해 만들어지는 전산화 단층촬영 영상 데이터는 약 5,000장의 단면 사진이 생성되는데 로켓 모터는 전수검사가 필요한 검사물로서 대용량의 3차원 단층촬영 데이터를 판독하는 것이 시험 방법으로 채택하기 어려운 큰 장애 요인이었다. 이 문제를 해결하기 위해서 시험 결과를 자동 판독하는 프로그램의 개발이 필요하였으나 현재까지 로켓 모터의 방사선투과검사 분야에서 결함 자동 판독 프로그램을 개발하였다는 것은 미국에서 Minuteman 로켓 모터의 전산화 단층촬영 데이터를 판독하는 ANDES (automated non-destructive evaluation system)을

개발하여 사용하고 있다는 것이 보고되어 있으나 이 프로그램의 세부적인 성능에 대해서는 알려진 것이 없으며, ARIAN V 로켓 모터의 실시간 방사선투과검사(real time radioscopy)에서 원주 방향 미접착 결함에 대해 자동 판독 기술을 개발하여 사용하고 있는 것으로 보고되고 있다[1,2].

본 연구에서는 로켓 모터에서 발생될 수 있는 미접착, 균열, 기공 및 이물질과 같은 여러 종류의 결함을 모두 검출할 수 있는 결함 자동 판독 프로그램(automatic defect detection program, ADDP)을 개발하고자 하였다. 또한 자동 판독 프로그램은 결함의 종류를 식별하고, 형상을 측정하여 검사자는 검출된 결함이 실제 결함인지 여부만 확인을 하면 판독이 완료되도록 개발하고자 하였다. 이를 위해 검사자는 프로그램에게 결함에 대한 간단한 임계치와 검사 구역을 GUI(graphical user interface)를 사용하여 편리하게 입력할 수 있도록 하였고, 검사자가 결함의 확인을 용이하기 위하여 결함의 형상과 위치를 표시할 수 있는 2차원 단면 형상창과 3차원 위치 표시창을 사용하였다. 또한 검출된 결함은 목록화하였고, 결함의 목록과 2차원 단면 형상창과 3차원 위치 표시창은 모두 연결되어 표시되도록 설계하였다.

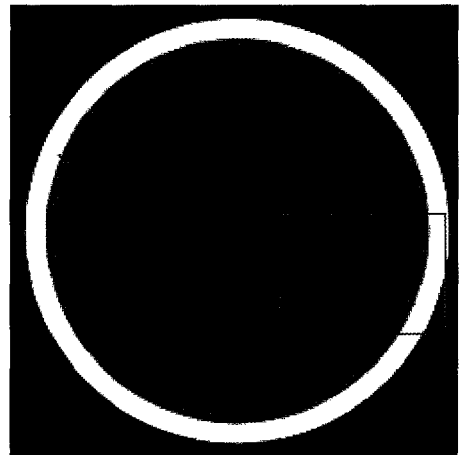
## 2. 프로그램 개발

로켓 모터는 축 대칭형 실린더 형상의 금속 연소관 내면에 접착성 라이너를 도포한 후 추진제를 충전하여 제작하고 있는데, 로켓 모터의 연소관-라이너-추진제의 접착계면에서 발생하는 미접착과 추진제 내부와 외면에서 발생하는 균열은 작은 크기의 결함이라도 로켓 모터의 폭발까지 이를 수 있는 치명적인 결함들로서 반드시 비파괴검사를 통해 검출하여야 하는 결함이다. 또한 로켓 모터의 배치후 장기 보존으로 추진제에 노화가 발생하여 기공이나 이물질 주변에서 균열을 생성할 수 있기 때문에 기공과 이물질들도 규제되어야 하는 결함들이다.

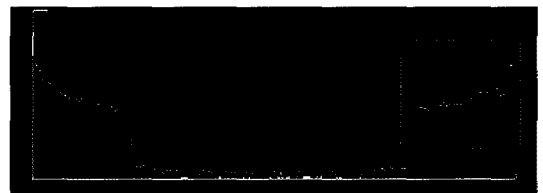
기공의 경우, 주물과 같이 단일 재료로 구성된 검사물에서 Volume Graphic사의 VG Studio Max 2.0의 automatic defect detection module이 좋은 검출 능력을 보여주고 있으나, 기공을 제외한 미접착과 균열, 이물질 등은 검출 능력이 미흡하였는데 이것은 VG Studio Max가 단일 물질로 제작된 제품의 닫힌 기공(closed cavity) 검출에 최적화 되어

있어, 표면과 연결된 기공, 균열과 같은 열린 결함(open defects)과 접착계면에 존재하는 미접착의 결함에 대해서는 검출할 수 있는 알고리즘이 없기 때문이다.

또한 로켓 모터의 전산화 단층촬영 데이터에서는 같은 물질인 추진제 속에서도 반경 방향의 중심부로 갈수록 선형흡수계수 값이 낮아지는 선속경화현상이 Fig. 1과 같이 크게 나타나는데 이 현상으로 인해 자동 판독 프로그램의 결함 임계값이 선속경화현상을 따라 변화되어야 결함을 검출할 수 있게 된다. 선속경화현상은 전산화 단층촬영에 사용되는 엑스선원이 다색광 선원(polychromatic source)인 방사선 발생장치를 사용하기 때문에 검사물의 투과 경로가 증가할수록 낮은 에너지의 엑스선들은 차단되고 높은 에너지의 엑스선들은 상대적으로 많이 투과하여 검출된 엑스선 평균 에너지가 증가하여 영상을 재구성(reconstruction)할 때 검사물의 중심부가 밀도가 낮은 것으로 계산되어 나타나는 현상이다. 단일 물질로 구성된 단순한 형상의 검사물은 간단한 연산을 통해 보정을 할 수 있으나 로켓 모터와 같이 복합재료와 복잡한 내부 형상을 갖고 있는 검사물에는 보정하는 것이 용이하지 않다.



(a)



(b)

Fig. 1 Typical slice view and profile of solid rocket motor (a) slice view, (b) profile

전산화 단층촬영에서 결함의 CT 값은 결함의 위치뿐만 아니라 결함의 형상에서도 영향을 받는데, 미접착이나 균열과 같은 면적형 결함의 폭이 Voxel(volume element) 크기에 근접하거나 그 보다 작을 경우, 결함 CT 값과 인근의 정상적인 물질의 CT 값이 하나의 Voxel 속에 함께 기여하는 partial volume effect가 나타난다. 따라서 결함의 임계치 설정에 이러한 효과를 반영하기 위해서는 모의결합시편을 제작하여 3차원 단층촬영을 통해 결정하는 것이 필요하다.

자동 판독 프로그램에서 가장 많이 사용되는 방법은 결함이 없는 표준영상과 검사물의 영상을 비교하고 그 차이를 이진화하여 결함으로 표시하는 것이다. 이러한 방식은 검사물의 형상이 일정한 경우 매우 효과적으로 결함 부위를 찾아 낼 수 있으나, 로켓 모터의 경우 연소관과 추진제를 접착하는데 사용하는 라이너의 도포 상태가 일정하지 않기 때문에 미접착 결함은 검출할 수 없게 된다. 다른 결함 검출 방법으로는 각각의 화소 값을 결함의 임계치와 비교하여 결함으로 인식시키는 방법이 있으나 이것은 결함의 임계치가 정확히 정의될 수 있어야 하고 선속경화현상의 보정이 되어야만 한다.

본 연구에서는 모든 결함 종류를 검출할 수 있는 픽셀값 비교방식으로 프로그램을 개발하였는데, 정확한 결함의 임계치는 모의결합시편을 제작하여 기준값을 설정하였고, 선속경화현상 보정 알고리즘을 개발하였다.

### 3. 실험

미접착 결함의 임계값 설정을 위하여 소형 로켓 모터 연소관에 미접착을 모사할 저밀도 물질을 Fig. 2와 같이 라이너가 도포된 연소관 내면에 부착한 후 비활성 추진제를 충전하여 모의결합시편을 제작하였다. 미접착을 모사한 저밀도 물질은 밀도가  $0.2 \text{ g/cm}^3$ 이고 두께는 각각  $50 \mu\text{m}$ ,  $70 \mu\text{m}$ ,  $90 \mu\text{m}$ 이며 크기는  $3 \times 3 \text{ mm}$ ,  $5 \times 5 \text{ mm}$  였다.

모의결합시편의 3차원 단층촬영은 한국생산기술 연구원에서 수행하였는데, 실험에 사용한 장비는 최대  $225 \text{ kV}$ 의 관전압과  $10 \mu\text{m}$ 의 미세초점(micro focus)을 갖고 있는 3차원 단층촬영 장비를 사용하여 촬영하였다. 촬영된 데이터는 VG Studio Max 2.0을 사용하여 3차원 단층촬영 영상을 Fig. 3과 같이 종단면으로 절개하여 모의결합시편과 라이너면

위에서 histogram을 사용하여 라이너와 저밀도 물질의 CT 값을 측정하였다. Table 1에는 모의결합시편의 3차원 단층촬영 영상에서 측정된 값을 표시하였고 Fig. 4에는  $50 \mu\text{m}$  폭의 저밀도 물질과 라이너의 CT 값을 나타내었다. 일반적으로 방사선 CT 값은 밀도와 선형적으로 비례하므로 실제 결함의 구성하는 공기의 밀도인  $0.0012 \text{ g/cm}^3$ 까지 외삽하면 라이너와 공기의 CT 값의 차이는 각각 3,556과 3,120을 추정되어 미접착 결함의 CT 값은 3,000으로 설정하였다. 한편 균열은 소형 로켓 모터에 비활성 추진제를 충전하여  $50 \mu\text{m}$  폭으로 추진제를

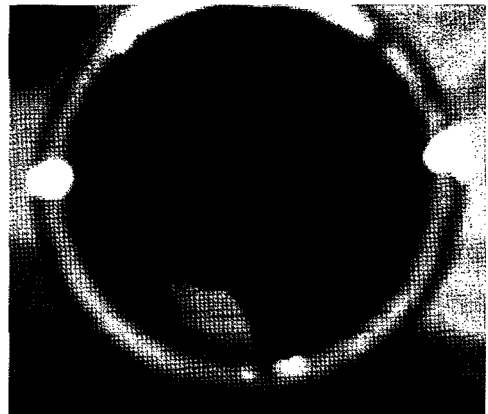


Fig. 2 Artificial defect specimen

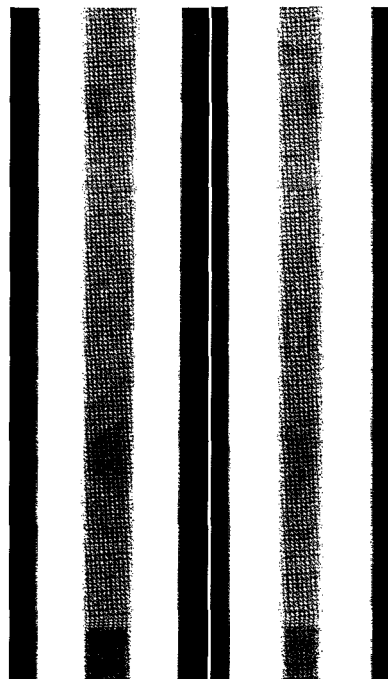


Fig. 3 Vertical slice of artificial defect specimen

절단한 후 CT 촬영하여 균열의 CT 값은 2,000으로 설정하였다. 기공은 균열보다는 큰 체적을 갖기 때문에 CT 값도 균열보다는 큰 차이를 보여 균열의 임계값으로도 충분히 기공을 검출할 수 있을 것으로 예상되었다. 또한 이물질의 경우에는 추진제 속에 연료로써 포함된 알루미늄 입자를 고려하여 9,000이상의 값을 갖는 것을 이물질로 정의하였다.

자동 판독 프로그램은 판독자가 직관적으로 사용할 수 있도록 Fig. 5와 같이 1개의 메인창과 5개의 하위 창으로 구성되었다.

4. 결과 및 분석

본 연구를 통해 개발된 자동 판독 프로그램을 사용하여 모의 결함 시편 및 추진제가 충전된 소형

Table 1 CT value of artificial defect specimen

Material	50 μm (3×3 mm)	50 μm (5×5 mm)
Low Density Material	21,371	19,129
Liner	23,971	22,092

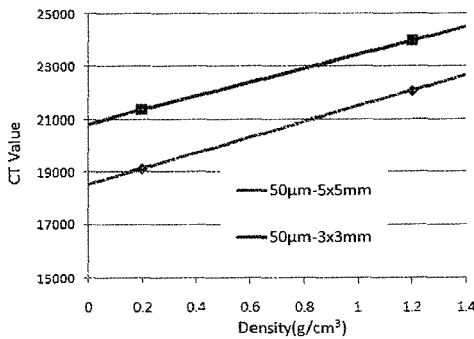


Fig. 4 CT value vs. density

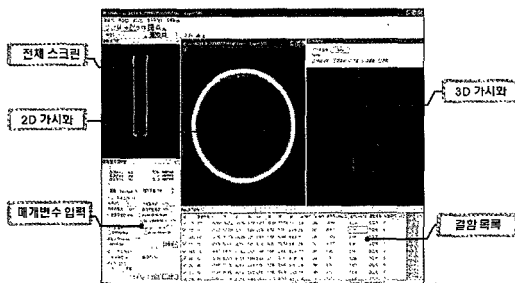


Fig. 5 Automatic defect detection program

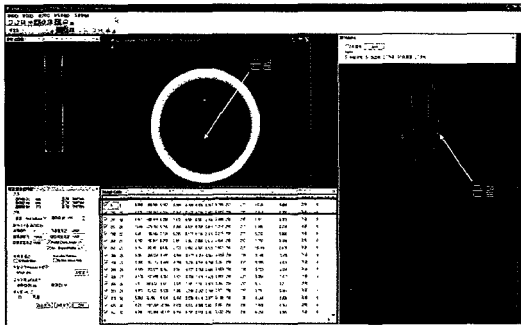
로켓 모터에서 검출된 대표적인 결함들을 Fig. 6에 도시하였다. 자동 판독 프로그램은 Fig. 6에 보이는 바와 같이 기공 및 이물질, 균열과 같은 추진제 내부에 존재하는 결함뿐만 아니라 추진제와 라이너의 접착계면에서 발생하는 미접착도 검출되는 것을 확인할 수 있었다.

한편 소형 로켓 모터 150기에 대하여 3차원 단층 촬영 검사를 수행한 후 판독자의 판독 결과와 자동 판독 프로그램으로 판독한 결과를 비교하였다. Table 2에는 비교 결과를 정리하였는데, 미접착과 균열은 판독자와 동일한 검출 능력을 보여주었으며, 기공과 이물질에서는 판독자보다 많은 결함을 검출하였다. 기공은 85개를 자동 판독 프로그램이 더 검출하였는데 작은 크기의 기공은 명암의 차이가 작아 희미하게 표시되기 때문에 CT 값으로 판정하는 자동 판독 프로그램이 더 정확히 결함을 찾아내기 때문에 나타난 결과이다. 그러나 명암의 차이가 큰 기공들에서도 검출 개수의 차이가 발생한 것은 Fig. 7의 왼쪽에 보이는 바와 같이 판독자의 기공의 측정은 대체적으로 기공의 최소값 근방에서 측정하지만 자동 판독 프로그램은 Fig. 7의 오른쪽과 같이 기공의 최소 CT 값의 70%값을 기준으로 크기를 측정하기 때문에 자동 판독 프로그램이 판독자 보다는 기공의 크기를 크게 측정하는 것으로 판단된다.

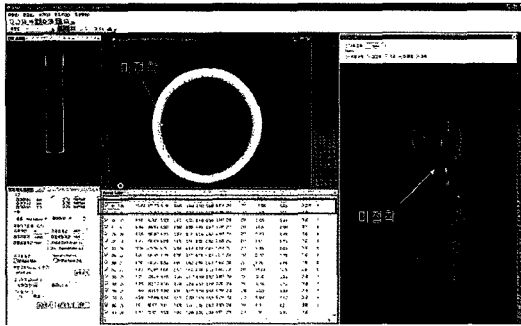
한편 로켓 모터 1기를 검출하는데 자동 판독 프로그램은 쿼드코어 프로세서를 사용한 PC를 사용하였을 때 검사조건 설정과 연산 및 2차 판독을 포함하여 총 10분 이내의 시간이 소요되었는데, 이는 판독자의 평균 판독 시간 80분에 비하여 8배 이상 빠른 것으로 측정되었다.

Table 2 Defect detection results of ADDP and human inspector for small solid rocket motor

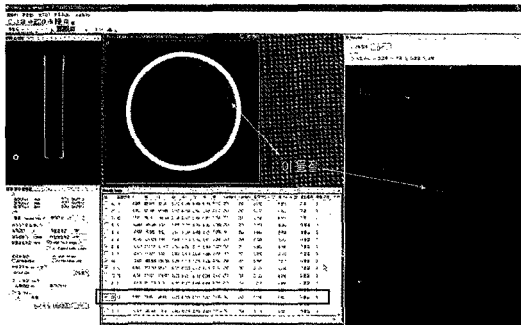
Defect Type	Inspector	ADDP
Disbond	0	0
Crack	4	4
Foreign Material	64	83
Void	0.2~0.5 mm	379
	0.5~1 mm	91
	> 1.0 mm	53
	Total	438
Total	438	523



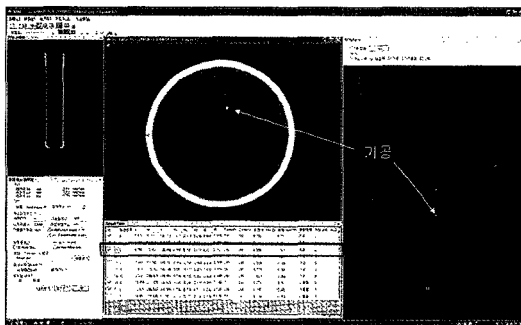
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Detected defects (a) crack, (b) disbond, (c) foreign material, (d) void

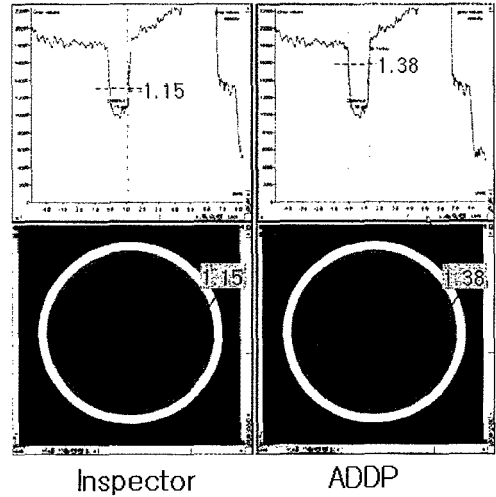


Fig. 7 Comparison of measurement for void size

5. 결론

소형 로켓 모터의 고해상도 3차원 단층촬영 영상을 자동 판독하는 프로그램을 개발하기 위하여 결함 인식 방법으로는 화소 단위의 CT 값 비교 방식을 채택하였고 선속경화현상을 보정하는 알고리즘 채택하였다. 또한 정확한 결함의 임계값을 설정하기 위하여 50 μm 폭의 모의결함시편을 제작하였다.

150기의 소형 로켓 모터를 대상으로 한 비교 판독실험에서 자동 판독 프로그램은 판독자보다 더 정확하고 신뢰성있는 판독 결과를 나타냈으며, 판독 시간은 8배 이상 빠른 것으로 측정되었다.

참고문헌

[1] Ward D. Rummel and Michael Foley, "The application of an automated nondestructive evaluation system to Minuteman III, Stage III solid rocket motor acceptance," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 13, pp. 725-729, (1994)

[2] V. Rebuffel and S. Pires, "Automatic delamination defects in radiographic sequences of rocket boosters," Proceedings BB 84-CD International Symposium on Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology, pp. 109-116, (2003)