

## X선 비파괴시험에 의한 내부 기공의 3차원 측정 연구

임수용, 최용규  
국방과학연구소 비파괴실험실

**요 약** 본 연구는 X선 비파괴시험법을 활용하여 피사체 내부에 존재하는 기공의 3차원적 형상, 위치 및 크기를 측정하고 검사 조건에 따른 오차를 최소화하는 계산기법을 제시하였다. 제시한 계산기법을 실용화하기 위하여 기공측정전산코드(PEVACA)를 개발하고 다양한 형상의 모의 기공을 적용한 검증시험과 실제 피사체를 검사후 절단하여 측정비교시험을 통하여 본 계산기법의 신뢰성을 검토하였다. 본 연구를 통하여 개발된 PEVACA는 작도법에 의한 기존의 수작업보다 측정 신뢰도( $\pm 0.5\text{mm}$  이내의 오차 범위)를 향상시켰을 뿐만 아니라 작업시간 단축과 자료전산화에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

### 1. 서 론

인공위성과 미사일 발사체의 에너지원을 제공하는 추진기관의 주장약으로 널리 사용되고 있는 추진제는 연소될 때까지의 구조체로서의 기능이 요구된다. 이러한 추진제는 압출이나 충전(casting) 공법에 의해 제작되는데, 제작과정에서 기공과 균열 및 미접착 등의 결함이 불가피하게 발생되므로 이에 대한 구조체로서의 기능을 확보하기 위해서는 결함에 대한 검사와 규제가 필수적이다.

추진기관 분야에서의 X선 비파괴시험은 추진제 제조공정시 발생된 결함들을 검출하여 그 종류, 위치, 크기 및 형상 등을 판독함으로써 생산된 제품의 불량여부를 최종적으로 판단하는 중요한 품질검사 항목으로 규정되어 있다. 따라서 최종 제작물에 대한 불량 여부의 판정은 제작자와 사용자간의 관심이 집중되는 사항으로 X선 비파괴검사의 정밀성이 요구된다.<sup>1)~4)</sup>

추진제의 결함중에서 미접착은 추진제-내열제-연소관 사이의 접착 경계면에서 발생하는 현상으로

서 X선과 평행한 위치에서 검출되므로 결합 존재 유무와 판독이 용이하며, 균열은 추진제 응력 분포에 의해 표면으로부터 발생되므로 육안 및 내시경 검사로 존재 유무를 판단할 수 있다. 참고로 추진제 제작직후 상기 두 결함의 발생 가능성은 거의 희박하며 결합 유무가 불량 여부의 기준이 되므로 판정이 용이하다. 그러나 기공은 거의 모든 제품에서 발생되며 발생 위치, 형상, 크기도 매우 다양하다. 따라서 기공에 대한 비파괴적 검사와 판독은 추진기관 수락의 불/합격 판정의 주요 인자이다.

기존에 사용되어온 기공의 판독은 작도법에 의한 수작업방식으로서, 3차원적 기공을 판독하기에는 수년간의 기능적 기술이 요구되며, 정확도와 작업자 실수에 대한 검증에 많은 시간이 소요되어 왔다.

본 연구는 필름이나 모니터에서 측정된 기공의 위치, 크기 및 형상에 대한 정확성을 확보하고 판독 오차를 최소화할 수 있는 기공측정전산화코드(program for evaluation of cavity : PEVACA)를 개발하고자 한다. 이를 위하여 기존의 작도법에 의한 수작업과정을 검토하고 수작업시 고려하기 어려웠던 비

파괴검사상의 문제점과 오차 원인들을 분석하여 수식화함으로써 기공 측정의 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 추진기관에 모의 기공을 부착하고 X선 비파괴시험을 수행한 후, 기존의 작도법에 의한 수작업방법과 본 연구에서 개발한 컴퓨터 코드 PEVACA의 결과를 실제 측정된 기공 자료와 비교하였다. 또한 실제 추진기관에 대한 신뢰성을 입증하기 위하여 로켓 모터를 비파괴시험한 후 모터를 절개하여 실제 기공의 위치, 형상 및 크기를 확인하고 본 연구에서 개발한 컴퓨터 코드 PEVACA의 결과를 실제 측정된 기공 자료와 비교하였다. 또한 실제 추진기관에 대한 신뢰성을 입증하기 위하여 로켓 모터를 비파괴시험한 후 모터를 절개하여 실제 기공의 위치, 형상 및 크기를 확인하고 본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램과 기존 작도법의 결과치를 비교 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 기공의 중심점 위치 계산

X선원-원통형 피사체-필름의 배치를 Fig. 1과 같이 하였을 때 X선은 X선원에서 필름이나 모니터상의 기공의 중심을 연결하는 직선으로 간주할 수 있다.<sup>1)</sup> 이때 피사체의 중심을 가상의 좌표축의 원점에 일치시키면 X선원과 필름에 나타난 기공의 위치 좌표를 결정할 수 있다. X선원을 고정하고 시험물을 임의의 각도  $\alpha$ 만큼 회전시켜 또다른 X-ray 필름에 의해 결함 위치를 구하였다고 하면, 피사체를 고정시키고 좌표축을 각도  $\alpha$ 만큼 회전시킨 것과 같으므로, X선원의 좌표( $x_s, y_s$ )와 기공의 좌표( $x, y$ )는 좌

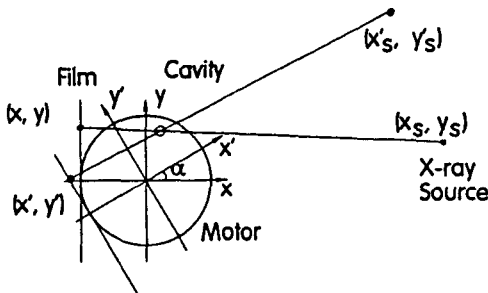


Fig. 1. Concept of X-ray radiographic test.

표 변환을 통하여  $\alpha$ 만큼 회전된 새 좌표축에서의 좌표( $x'_s, y'_s$ )와 ( $x', y'$ )가 된다. 따라서 기공의 중심을 통과하는 직선의 식이 결정되며, 하나의 기공이 n번에 걸쳐 검출되었다면 n개의 직선을 얻을 수 있으며, 이 직선들의 교점( $x_{int}, y_{int}$ )도 쉽게 결정할 수 있다.<sup>5)</sup>

한편 필름상에서 측정된 기공의 중심점은 필름 판독 오차로 인하여 정확히 한 점에서 일치하지 못하므로 기공의 중심점 ( $x_c, y_c$ )는 최대  $C(n, 2)$ 의 교점 ( $x_{int}, y_{int}$ )들을 산술 평균하여 얻을 수 있다. 따라서 원통형 피사체의 중심에서 기공 중심까지 거리 r은 X축과 기공의 사이각은 다음과 같다.

$$r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}, \theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{y_c}{x_c} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

2.2. 기공의 모터 길이 방향 위치 계산

X선원과 수직되는 필름상의 선을 필름의 중심선이라고 정의하면, 피사체의 회전각  $-\alpha$ 에서 검출된 기공에 대한 필름 중심선으로부터 거리는 Fig. 2와 같이 된다.

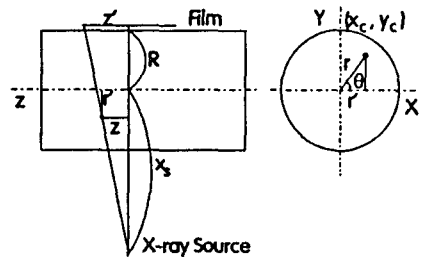


Fig. 2. Configuration of X-ray radiographic test in axis direction.

피사체의 내부에 존재하는 기공이 X-Y축상에서 거리 r과 각도  $\theta$ 에 위치하여 있을 경우, X축상에서 피사체 중심으로부터 기공까지의 거리 r'은 r의 사영인  $r' = r \cos \theta$ 이 되므로 X선원 상에서의 실제 기공 위치 z는 피사체의 회전각  $-\alpha$ 가 고려된 식 (2)로 표현된다.

$$z = \frac{\{x_s - R - r \cos(\theta - \alpha)\}}{x_s} z' \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $R$ 은 모터의 반경,  $x_s$ 는 X선원에서 모터의 중심까지의 거리이다.  $n$ 번 검출된 길이 방향의  $z$ 는 산술 평균하여 얻는다.

2.3. 타원형 기공의 변수 계산

충전된 추진기관에서 발생하는 기공들은 표면에 너지의 최소화해 기인하여 대부분 구형의 모양을 나타내므로, 기공의 단면 형상을 타원으로 가정하면 기공은 아래와 같은 중심이 좌표축의 원점에 있는 타원식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $X=x-x_c$ ,  $Y=y-y_c$ 이다. 그런데 식 (3)으로 나타낸 타원은 장축과 단축이 좌표축  $X, Y$ 에 평행한 경우로  $X'$ 축에 대하여 장·단축이  $\beta$ 만큼 기울어져 있는 타원은 좌표 변환을 통하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left\{ \frac{\cos^2\beta}{a^2} + \frac{1-\cos^2\beta}{b^2} \right\} X'^2 + 2 \left\{ \frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right\} X' Y' \cos\beta \\ \times \sqrt{(1-\cos^2\beta)} + \left\{ \frac{1-\cos^2\beta}{a^2} + \frac{\cos^2\beta}{b^2} \right\} Y'^2 - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $\beta$ 는  $X$ 축과  $X'$ 축 사이의 각이다. 이 때  $1/a^2 = A$ ,  $1/b^2 = B$ ,  $\cos\beta = C$  라 하면 식 (4)는 다음과 같다.

$$\{AC^2 + B(1-C^2)\} X'^2 + 2(B-A)C \sqrt{1-C^2} X' Y' \\ + \{BC^2 + A(1-C^2)\} Y'^2 - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)를 간단히 하기 위해

$$AC^2 + B(1-C^2) = AA \\ 2(B-A)C \sqrt{1-C^2} = BBBC^2 + A(1-C^2) = CC \quad \dots (6)$$

라 놓으면, 식 (5)는

$$AA X'^2 + BB X' Y' + CC Y'^2 - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

로 표현할 수 있다. 이 식 (7)에서  $AA, BB$ 와  $CC$ 는 미지수로서 필름이나 모니터에서 측정된  $n$ 개의

표면의 좌표값( $X_i, Y_i$ )를 사용하여 최소제곱법을 적용하여 구한다.<sup>6),7)</sup>

이를 위하여 식 (7)의 양변을 제곱한 후에 변수  $AA, BB, CC$ 에 대하여 각각 편미분하면

$$\sum_i^n (-2X_i^2 + 2AA X_i^4 + 2BB X_i^3 Y_i^3 + 2CC X_i^2 Y_i^2) = 0 \\ \sum_i^n (-2X_i Y_i + 2AA X_i^3 Y_i + 2BB X_i^2 Y_i^2 + 2CC X_i Y_i^3) = 0 \\ \sum_i^n (-2Y_i^2 + 2AA X_i^2 Y_i^2 + 2BB X_i Y_i^3 + 2CC Y_i^4) = 0 \\ \dots\dots\dots (8)$$

이 된다. 여기서  $X'_i$ 는 타원케도상의  $i$ 번째  $x$  좌표값,  $Y'_i$ 는 타원케도상의  $i$ 번째  $y$  좌표값,  $n$ 는 타원케도의 데이터 수이다. 위의 세 식으로부터  $AA, BB, CC$ 를 연립방정식으로 구한다. 이때 연립방정식의 계산은 Gauss소거법을 사용하여 전산기로 결정한다.<sup>6),7)</sup> 이렇게 구한  $AA, BB, CC$ 값을 식 (6)에 대입하여  $A, B, C$ 를 계산하면

$$A = (AA + CC - \frac{AA^2}{\sqrt{RT}} + \frac{2AACC}{\sqrt{RT}} - \frac{CC^2}{\sqrt{RT}}) - BB * \\ \sqrt{\frac{RT - CC \sqrt{RT} + AA \sqrt{RT}}{RT}} * \sqrt{\frac{RT + CC \sqrt{RT} + AA \sqrt{RT}}{RT}} / 2 \\ B = (AA + CC + \frac{AA^2}{\sqrt{RT}} - \frac{2AACC}{\sqrt{RT}} + \frac{CC^2}{\sqrt{RT}}) + BB * \\ \sqrt{\frac{RT - CC \sqrt{RT} + AA \sqrt{RT}}{RT}} * \sqrt{\frac{RT + CC \sqrt{RT} - AA \sqrt{RT}}{RT}} / 2 \\ C = \sqrt{\frac{1 + \frac{CC}{\sqrt{RT}} - \frac{AA}{\sqrt{RT}}}{2}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

가 되고,  $RT$ 는  $AA^2 + BB^2 - 2AACC + CC^2$  이다. 그러므로 우리가 구하고자 하는  $a, b$ 와  $\beta$ 는 다음과 같이 된다.

$$a = 1/\sqrt{A} \\ b = 1/\sqrt{B} \\ \beta = \cos^{-1}(C) \quad \dots\dots\dots (10)$$

한편 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 원통형 피사체의

법선 방향(normal direction)에서 기공의 크기를 표현하는  $\Delta x$ 와 모터의 접선 방향(tangential direction)에서의 기공의 크기를 표시하는  $\Delta y$ 는 식 (1)과 (10)의 결과를 사용하여 타원식과 법선 및 접선의 교점을 계산하여 얻는다. 접선 방향의 좌표 ( $x_t, y_t$ )와 법선 방향의 교점 좌표 ( $x_n, y_n$ )는 식 (11)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned}
 x_n &= \pm \left\{ \frac{ab}{\sqrt{b^2(\cos\beta - \tan\theta\sin\beta)^2 + a^2(\sin\beta + \tan\theta\sin\beta)^2}} \right\} \\
 y_n &= \pm \left\{ \frac{ab\tan\theta}{\sqrt{b^2(\cos\beta - \tan\theta\sin\beta)^2 + a^2(\sin\beta + \tan\theta\sin\beta)^2}} \right\} \\
 x_t &= \pm \left\{ \frac{ab}{\sqrt{b^2(\cos\beta - \tan(\theta+\pi/2)\sin\beta)^2 + a^2(\sin\beta + \tan(\theta+\pi/2)\sin\beta)^2}} \right\} \\
 y_t &= \pm \left\{ \frac{ab\tan(\theta+\pi/2)}{\sqrt{b^2(\cos\beta - \tan(\theta+\pi/2)\sin\beta)^2 + a^2(\sin\beta + \tan(\theta+\pi/2)\sin\beta)^2}} \right\} \\
 \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

고로 구하고자 하는  $\Delta x, \Delta y$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= \sqrt{(x_{n+} - x_{n-})^2 + (y_{n+} - y_{n-})^2} \\
 \Delta y &= \sqrt{(x_{t+} - x_{t-})^2 + (y_{t+} - y_{t-})^2} \dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

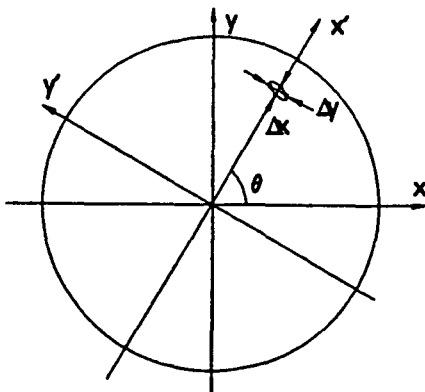


Fig. 3. Interpretation of cavity size,  $\Delta x, \Delta y$ .

2.4. 컴퓨터 프로그래밍

앞 절에서 언급한 기공의 위치, 형상 및 크기에 대한 관계식들을 신속 편리하게 계산하기 위하여

컴퓨터 코드 PEVACA를 개발하였다.

PEVACA는 PC(personal computer) version의 C언어로 작성되었으며, 각각의 기공에 대한 입력자료와 결과치 형상을 PC 모니터에 보여주는 기능도 함께 부가하여 측정과 계산상의 오차를 즉시 검증할 수 있도록 하였다. 또한 기공에 따른 비파괴시험 합격 기준을 자료화(data base)하여 자동적으로 합격 판정을 할 수 있는 기능을 부가하였으며, 불합격시 문제 기공의 위치 형상 및 크기에 대한 계산상의 편차를 출력하여 비파괴검사의 정확성을 검증토록 하였다.

3. 실험

3.1. 모의 기공시험

본 연구에서 개발된 PEVACA의 정확도를 입증하기 위하여 모의 기공시험을 수행하였다. 모의 기공으로 사용된 재료는 강철 베어링 볼(steel bearing ball)로서 소형 로켓 모터(SRM; small rocket motor)내의 Table 1과 같은 위치에 인위적으로 부착하였다.

X선 촬영에는 Rigaku사 제품인 X선 장비(RF-250 EG-B)를 사용하여 0°, 60°, 120°의 각도로 촬영하였고, 사용 필름은 Kodak사의 AA형으로서 자동현상기(X-OMAT 'B')로 현상하였다. 필름 판독은 2인의 판독자에 의해 개별적으로 수행한 후 기록 결과를 비교 검토하고, 기존 작업방식인 작도법에 의한 수작업을 적용하여 모의 기공의 위치를 1:1 그림위에 작성하였다.

Table 1. Location of the artificial cavities in SRM.

Artificial Cavity	Bearing 1	Bearing 2
Diameter (mm)	$\phi=8.7$	$\phi=10.3$
Distance from nozzle(mm)	$z=1,479$	$z=1,462.5$
Distance from motor center (mm)	$r=18$	$r=18$
Angle between bearing and X axis	30°	150°

또한 원통형 피사체의 크기에 대한 영향을 분석하기 위하여 대형 로켓모터(LRM : large rocket motor) 내부에 모의 기공을 Table 2와 같이 위치하였다.

Table 2. Location of artificial cavities in LRM.

Artificial Cavity	Bearing 1	Bearing 2	Bearing 3
Diameter(mm)	$\phi=8.7$	$\phi=10.3$	$\phi=17.5$
Distance from nozzle(mm)	$z=320$	$z=325$	$z=325$
Distance from motor center(mm)	$r=246$	$r=286$	$r=246$
Angle between bearing and X axis	$88^\circ$	$88^\circ$	$89^\circ$

이때 추진제 그레이의 손상을 방지하기 위하여 모의 기공을 폴리스티렌(styrene foam) 속에 넣어 피사체내에 삽입하였다. X선 촬영에는 Varian사 제품인 15MeV 선형가속 X선 장비와 Rolse-Royce사 제품인 실시간 영상장치(real time imaging system)를 사용하여 비파괴시험을 수행하였고, 영상처리장치는 Quantel사의 Sapphire Image Processor를 사용하였다. 촬영은 36° 간격으로 10회를 실시하였으며, 판독한 결과는 1 : 6.09 축척의 그림 위에 작도하였다.

3.2. 추진기관 절개시험

추진제 내부에 존재하는 미지의 실제 기공에 대한 해석의 정확도를 입증하기 위하여, 소형 로켓 모터를 비파괴시험한 후 절개하여, PEVACA와 수작업으로 구한 각각의 결과들과 비교하였다. 본 실험에 적용된 장비와 시험 방법 및 판독은 소형 로켓 모터의 모의 기공시험과 동일하며, 다만 미지의 기공을 찾기 위하여 길이 방향으로 320mm 간격으로 촬영하였다. 비파괴시험후 판독에 의해 계산 또는 작도된 결함의 위치를 토대로 모터의 절개 위치를 결정하였으며, 모터는 pipe cutter와 쇠틀을 사용하여 절단하여, 모터의 단면에서 확인된 기공의 위치와 크기를 측정 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 모의 기공시험 분석

소형 로켓 모터내에 2개의 모의 기공을 임의로 삽입한 후, X선 비파괴시험을 수행하여 구한 수작업 결과값과 PEVACA의 계산값 및 실측값의 비교표는 Table 3과 같다.

Table 3. Result from artificial cavity test in SRM.

Cavity number	Symbol	Real value	Hand drawing	PEVACA
1	r	18	18	18
	$\theta$	$30^\circ$	$29^\circ$	$29^\circ$
	z	1,479	1,478	1,479.4
	$\Delta x$	8.7	9	8.6
	$\Delta y$	8.7	9	8.6
	$\Delta z$	8.7	9	8.6
	a	-	-	4.3
	b	-	-	4.3
2	$\beta$	-	-	$29.5^\circ$
	r	18	18.5	18
	$\theta$	$150^\circ$	$150^\circ$	$150.3^\circ$
	z	1,462.5	1,462	1,463.8
	$\Delta x$	10.3	11	10.5
	$\Delta y$	10.3	11	10.5
	$\Delta z$	10.3	11	10.5
	a	-	-	5.3
	b	-	-	5.3
	$\beta$	-	-	$67.1^\circ$

Table 3에서 모의 기공의 위치(r,  $\theta$ , z)는 작도법과 PEVACA로 구한 결과와 실측값이 측정 오차 범위내에서 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 정밀도 측면에서 PEVACA에 의한 계산값이 수작업 결과값보다 실제값에 근접함을 보였다. 특히 모의 기공의 크기에 대한 작도값의 오차는 각각 0.3mm와 0.7mm로서, 이러한 차이는 기공의 r방향 위치에 대한 확대율을 적용하지 않은 결과에 기인한 것으로 판단된다.

따라서 Table 4에 나타난 수작업 결과치에 확대율

Table 4. Comparison of the cavity size after correction of hand drawing value.

Cavity number	Real value	Hand drawing value	Corrected value
1	$\Delta x = 8.7$	$\Delta x = 9$	$\Delta x = 8.6$
	$\Delta y = 8.7$	$\Delta y = 9$	$\Delta y = 8.6$
	$\Delta z = 8.7$	$\Delta z = 9$	$\Delta z = 8.6$
2	$\Delta x = 10.3$	$\Delta x = 11$	$\Delta x = 10.7$
	$\Delta y = 10.3$	$\Delta y = 11$	$\Delta y = 10.7$
	$\Delta z = 10.3$	$\Delta z = 11$	$\Delta z = 10.7$

Table 5. Result from artificial cavity test in LRM.

Cavity number	Symbol	Real value	Hand drawing	PEVACA
1	r	246	243.6	246.6
	$\theta$	$88^\circ$	$87.8^\circ$	$87.2^\circ$
	z	320	319	319.9
	$\Delta x$	8.7	8.5	8.4
	$\Delta y$	8.7	8.5	8.4
	$\Delta z$	8.7	8.5	8.4
	a	-	-	4.2
	b	-	-	4.2
	$\beta$	-	-	$22^\circ$
2	r	286	283.2	285.5
	$\theta$	$88^\circ$	$88^\circ$	$88^\circ$
	z	325	325	325.7
	$\Delta x$	10.3	10	10.5
	$\Delta y$	10.3	10	10.5
	$\Delta z$	10.3	10	10.5
	a	-	-	5.2
	b	-	-	5.2
	$\beta$	-	-	$21.9^\circ$
3	r	246	240.5	245.3
	$\theta$	$89^\circ$	$88.5^\circ$	$88^\circ$
	z	325	325	325.8
	$\Delta x$	17.5	17	17.5
	$\Delta y$	17.5	17	17.5
	$\Delta z$	17.5	17	17.5
	a	-	-	8.7
	b	-	-	8.7
	$\beta$	-	-	$22.9^\circ$

을 보정한다면, 실측값에 최대 0.4mm 차이로 근접할 수 있음을 알 수 있다.

또한 대형 로켓 모터내에 모의 기공을 삼입하여 시험한 결과도 소형 로켓 모터시험과 동일하게 PEVACA에 의한 결과값이 수작업보다 실제값에 근접하게 나타났는데 시험 결과는 Table 5와 같다.

특히 모터의 중심으로부터 기공까지의 거리 r에 있어서 PEVACA의 결과는 0.5-0.7mm의 오차를 나타낸 반면 수작업 결과는 2.4-5.5mm의 큰 오차를 나타내었다. 이러한 오차가 발생된 원인은 작도법에 의한 수작업이 대형 모터인 경우 축소화된 그래프상에서 작업하기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 개발한 컴퓨터 코드 PEVACA는 축척에 의한 오차를 상당히 제거할 수 있음을 제시하고 있다. 피사체 크기에 따른 시험 오차를 고찰하면 대형 모터시험이 상대적으로 큰 오차가 발생하였으며, 이러한 오차의 원인은 1) 실시간 영상처리장치(real time imaging system)의 해상도가 필름의 해상도보다 떨어지므로 생기는 판독 오차, 2) 대형 로켓 모터시험의 확대율이 소형 로켓 모터에 비하여 크기 때문에 생기는 측정 오차에 기인된다.

#### 4.2. 모터 절개시험 분석

로켓 모터 내의 실제의 기공을 X선 비파괴시험을 수행한 후 절개하여 측정한 값과 수작업방법 및 PEVACA로 구한 위치 및 크기를 Table 6에 나타내었다.

우선 길이 방향(z direction)에 대한 기공 위치의 오차는 수작업에서 1~2mm, PEVACA의 결과는 0.2~0.7mm이다. 이는 총길이 845mm와 1,261mm에 비추어 1%이내의 매우 정확한 값이었다.

기공의 크기에 대한 작도값의 오차는  $\Delta x$ 에서 0~0.6mm,  $\Delta y$ 에서는 0.5~0.8mm 보였다.  $\Delta z$ 에서 대해서는 0.3~0.4mm의 범위를 나타내었다.

PEVACA의 오차는  $\Delta x$ 에서 0.2~0.8mm,  $\Delta y$ 에서는 0.6~0.7mm,  $\Delta z$ 에서는 0.3~0.4mm를 나타냈다. 상기에 의하면 PEVACA의 값이 수작업 값보다 작은 편차를 보였다. 두 방법에 의한 오차의 절대치는 작으나 퍼센트 오차는 다른 위치값(r,  $\theta$ , z)의 퍼센트 오차보다 큰 값을 나타냈다. 이는 필름의 선명도에 따른 내재된 판독오차와 판독값에 확대율을 고려하

Table 6. Test result from dissected SRM.

Cavity number	Symbol	Real value	Hand drawing	PEVACA
1	r	46.7	48	46.4
	$\theta$	14.5°	15°	14°
	z	845	847	845.2
	$\Delta x$	3.6	3	3.8
	$\Delta y$	3.2	4	3.8
	$\Delta z$	6	6	5.6
	a	-	-	1.9
	b	-	-	1.9
$\beta$	-	-	23.6°	
2	r	44.3	45	44.8
	$\theta$	63.5°	63°	63.3°
	z	1,261	1,262	1,261.7
	$\Delta x$	4	4	3.8
	$\Delta y$	4.5	4	3.8
	$\Delta z$	6	6	5.7
	a	-	-	1.9
	b	-	-	1.9
$\beta$	-	-	64.8°	

지 않은데서 나온 것으로 평가할 수 있다.

반경 방향의 기공 거리에 r에 대한 수작업 오차는 0.7~1.3mm, PEVACA는 0.3~0.4mm로 PEVACA의 결과치가 더 정확하였다. 이러한 원인은 수작업으로 계산할 때, Fig. 4와 같이 기공을 통과하는 X선을 평행광으로 가정하여 그린 직선과 실제기공을 지나는 X선이 만드는 직선의 차이로 설명할 수 있다. 상기의 평행광 가정에 따른 미세 오차의 크기  $|\Delta r|$  은

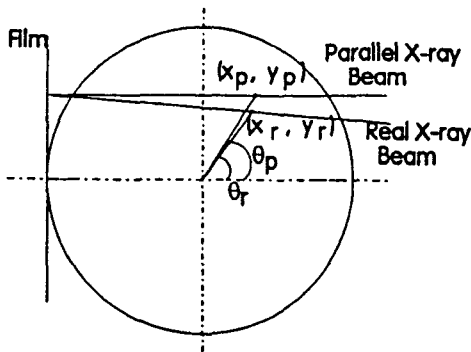


Fig. 4. Interpretation of difference between parallel and real X-ray beam.

다음과 같다.

$$|\Delta r| \approx \sqrt{(x_p - x_r)^2 + (y_p - y_r)^2} \dots\dots\dots (13)$$

실제 필름상에 발생하는 오차는 각도 오차  $|\Delta \theta| = \theta_p - \theta_r$ 가 고려되어야 하나,  $\Delta \theta < 1$ 이므로 절대치는 무시할 수 있다.

본 실험의 수작업 결과치에 대하여 식 (13)을 적용하여 오차를 계산하면 Table 7과 같이 오차가 줄어들음을 확인하였다.

Table 7. Comparison of r position of cavity.

Cavity number	Real value	Hand drawing	$\Delta r^*$	Corrected value
1	46.7	48	1.37	46.6
2	44.3	45	0.88	44.1

\*  $\Delta r$  was calculated by eq. (13) with the values of Table 6

따라서 이상과 같은 실험의 비교를 통하여, 본 연구에서 적용한 직선의 교점을 통한 기공의 위치 계산법과 기공의 형상으로 가정한 타원식을 사용하면, 기공의 위치를 얻기 위해 작도하면서 발생하는 축척에 의한 오차와 X선을 평행광으로 작도한 오차, 그리고 확대율을 적용하지 않은 오차 등을 제거하였기 때문에 정확한 기공의 위치를 얻을 수 있었다.

### 5. 결 론

추진기관 그레이의 주된 결함인 기공의 공간 위치 및 크기를 계산하는 수식을 프로그램화하였으며, 이 컴퓨터 코드 PEVACA를 모의 기공삽입시험과 실제 로켓 모터 절단시험에 적용하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존의 작도법에서 수반되는 축척과 확대율 및 X선을 평행광으로 간주하여 발생하는 오차가, 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용했을 때 현저하게 줄어들음을 알 수 있었으며, 기공이 위치 및 크기 계산시  $\pm 0.5\text{mm}$ 이내의 정확한 결과를 얻을 수 있었다.
2. 본 연구에서 개발된 컴퓨터 코드 PEVACA를 사

용함으로써 기존 수작업에 의한 작도법에 비하여 기공의 위치, 크기 및 형상을 계산하기 위하여 소요된 수작업 작도시간을 현저히 1/6이하로 줄일 수 있었으며 판독과 수작업에 따른 작업자의 실수를 신속히 검증할 수 있는 도구를 개발하였다.

3. 따라서 본 연구에서 개발한 PEVACA는 개발 및 양산 추진기관의 비파괴시험에도 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 자료의 보관 및 관리에 대한 효율성을 확보하였다.

#### 참 고 문 헌

- 1) R. Halmshaw, Physics of Industrial Radiology, American Elsevier (1966)
- 2) High-Energy X-ray Applications for Nondestructive Testing, Varian Associates Inc. (1988)
- 3) Michael J. Dennis, Industrial Computed Tomography, ASM International (1989)
- 4) ASTM E-03.03 1441-92a, Standard Guide for Computed Tomography(CT) Imaging, ASTM (1992)
- 5) William H. Beyer, CRC Standard Mathematical Tables, CRC Press (1982)
- 6) 김창효, 수치해석과 전산 프로그래밍, 교학사 (1990)
- 7) David S. Huang, Regression and Econometrics, John Wiley & Sons (1970).

## A Study on the Three Dimensional Measurement of Internal Cavity by Using X-Ray NDT Method

Soo-Yong Lim and Yong-Kyu Choi  
NDT Lab., Agency for Defense Development

**Abstract** The three dimensional measuring method with minimizing operational errors for the arbitrary shaped-internal cavity based on the information of the X-ray nondestructive test is presented. Two experimental tests using artificial cavities were considered in order to verify the availability of PEVACA. In these tests, X-ray NDT was conducted for detecting cavities, and the comparison between the calculating values from PEVACA and the real values from measuring the cavities was performed. As a result of this study, three dimensional cavities information using PEVACA are in good agreement with the real measured values within  $\pm 0.5\text{mm}$ . The computer code, "PEVACA", contributes not only to improvement of data accuracy but also to saving of the work time and data documentation.

---

(Received : May 31, 1994)