

5 축 초음파 검사장비의 기구학 해석

Kinematics Analysis of a 5-Axis Ultrasonic Inspection Equipment

한명철¹, 성창민^{2,✉}

Myung-Chul Han¹ and Chang-Min Sung^{2,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National University)

² 부산대학교 기계공학부 대학원 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National University)

✉ Corresponding author: cmsung@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-3033

Manuscript received: 2014.1.13 / Revised: 2014.9.30 / Accepted: 2014.11.27

In this paper, it is studied that kinematic analysis of a 5-axis ultrasonic inspection equipment. The equipment is comprised of three straight axes and two rotary axes. With features of ultrasonic, the transmitter and receiver of the equipment are vertical to a test surface, operating at regular intervals. To perform this well, the motions of every link should be found on the basis of kinematic analysis of the equipment. We chose starting point for testing and defined relations among all links through transformation of coordinates. For double curvature-shaped test object, we generated test paths. To follow these, we found motions of all links using inverse kinematics. By using Matlab/Simulink, simulator was developed, so that we could find out desired trajectories of main axes for a scan.

Key Words: Kinematics analysis (기구학 해석), Ultrasonic system (초음파 시스템), 5-Axis manipulator (5 축 매니플레이터), Double curvature (더블 곡률), Path generation (경로 생성)

기호설명

a_i = the distance from Z_i to Z_{i+1} measured along X_i

d_i = the distance from X_{i-1} to X_i measured along Z_i

β = index angular variation of single curvature

β_1 = scan angular variation of double curvature

β_2 = index angular variation of double curvature

δ = the distance from end-effector to test object

θ_i = the angle from X_{i-1} to X_i measured along Z_i

ρ = the density of a material

C = the velocity of sound

P_i = acoustic pressure of incident wave

P_o = acoustic pressure of penetrated wave

R = the radius of single curvature test object

R_1 = the scan radius of double curvature test object

T = transmission coefficient

Z_a = the acoustic impedance of a medium

Z_{a1} = the acoustic impedance of medium 1

Z_{a2} = the acoustic impedance of medium 2

${}^n P_{m_org}$ = the vector that locates the origin of the m-frame

${}^n R_m$ = a rotation matrix describing m-frame relative to n-frame

${}^n T_m$ = a homogeneous transform describing m-frame relative to n-frame

0T = the homogeneous transform describing 0-frame relative to zig-frame

1. 서론

최근 비파괴 검사의 중요성이 점점 커져가는 가운데, 그 중에서도 초음파를 이용한 검사가 그 특성에 의해서 비파괴 분야에 많이 활용되고 있다. 현재 초음파를 이용한 비파괴 검사 시스템 분야의 기술 수준은 초음파 두께 측정기, 초음파 펄서/리시버(pulsar/receiver), 휴대용 초음파 탐상기등을 제작할 수 있는 수준이며, 물탱크 내에 시험체를 넣고 이를 초음파로 검사하는 펄스 반사(pulse echo) 방식의 수침 초음파 시험법(immersion type ultrasonic c-scanner)이 개발되어 사용되고 있다.¹⁻⁵ 그 검사 대상도 다양하며, 특히 항공기 관련 부품소재의 검사 또한 초음파 검사를 통해 이뤄지고 있다. 항공기의 동체부를 이루는 소재는 다양한 재료를 적층하여 복합재를 연구 개발하고 있는 추세이다. 그러나 여러 재료가 적층된 복합재는 제조 및 사용 중에서 층간 분리가 일어날 수 있으므로, 이런 결합에 대한 신뢰성이 사전에 보장되어야 한다. 이런 복합 소재는 최대한 물에 영향을 받지 않으면서, 빠른 시간에 대량 및 대형의 소재 검사가 이루어져야 한다.

일반적으로 하나의 트랜스듀서(transducer)를 사용하는 펄스반사 방식^{6,7}은 복합소재를 대상으로 결함 탐지가 매우 어렵다. 금속 소재와는 달리 복합 소재는 더욱 불균질하고 이방성과 비탄성이 크기 때문에 신호대잡음비(SNR)가 낮아 결함의 판정이 매우 어렵다. 따라서 항공용 복합소재는 대부분 투과법(Through Transmission Method)을 사용하여 투과 초음파의 강도를 측정해서 결함의 존재 여부 및 크기를 결정한다. 이는 시험체를 가운데 두고, 송신 탐촉자와 수신 탐촉자가 초음파를 주고 받아야 하므로 시험체의 형상에 따른 두 탐촉자의 움직임을 고려한 기구학적 설계가 필요하다. 초음파 송수신 탐촉자는 검사 장치의 엔드 이펙터(end-effector)에 부착될 수 있으며, 결국 엔드 이펙터까지 기구의 링크 결합에 의해 검사 장치의 자유도 및 검사 범위가 정해지게 된다. 평면 모양의 검사체를 검사하는데 있어서는 최적화된 검사 장치가 많다.⁸ 그러나, 항공기의 동체부는 대부분 곡면으로 이루어져 있으며 이러한 곡면 검사를 위해서는 검사 장치의 기구부가 1개 이상의 회전 조인트를

가지고 있어야 한다. 검사 장치는 회전축의 수만큼 다양한 곡률방향으로 검사가 가능하기 때문에 회전 조인트의 개수가 곡면을 가진 검사체의 검사 여부 및 범위를 결정하게 된다. 또한 검사면이 곡면일 경우, 검사 경로 생성과 이를 추종하기 위한 각 링크의 움직임을 개별적으로 설정해야 한다.

본 연구에서는, 2개의 곡률방향으로 검사가 가능하도록 구성된 5축 초음파 검사 장치에 대한 기구학적 해석을 수행한다. 그리고 이를 바탕으로, 곡률을 가진 검사체의 검사 경로를 추종하기 위한 각각의 링크의 경로를 시뮬레이션을 통해 파악하여 설계된 검사장치의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 초음파 검사의 원리

초음파 검사는 검사체를 가운데에 두고, 송신부에서 보낸 초음파를 반대편 센서에서 수신하게 됨으로 이루어진다. 검사체의 결합검사를 위해 초음파를 매질에 대하여 수직입사(normal incidence) 시키며 이때 초음파는 매질의 경계면에서 투과되는 성분과 반사되는 성분으로 나누어진다. 투과와 반사의 비율은 경계면에 접하는 물질의 음향 임피던스(acoustic impedance)에 따라 정해진다. 특정 매질의 음향 임피던스, Z_a 는 다음과 같이 재료의 밀도에 음속을 곱한 값으로 나타난다.⁹

$$Z_a = \rho C \tag{1}$$

음압(acoustic pressure) P_i 의 초음파가 매질 1의 경계면을 통과하여 매질 2에서 P_o 의 음압을 가질 때, 음압 투과율(transmission coefficient)은 다음의 식으로 표현된다.

$$T = \frac{P_o}{P_i} = \frac{2Z_{a2}}{Z_{a1} + Z_{a2}} \tag{2}$$

만일, 적층된 복합재가 층간 분리가 일어났다면, 금속과 빈 공간간의 음향 임피던스 차이로 인해 투과율은 거의 0%에 가깝게 되며 수신부에서 초음파 수신이 되지 않는다. 투과율의 정확성을 높이기 위해서는 초음파를 검사표면에 대해 수직으로 입사시켜 굴절되는 초음파를 없애야 한다. 따라서 검사체의 표면형상이 변하더라도, 탐촉자를 검사 표면에 대해 수직이 유지되도록 이동시켜야 하며, 이에 따른 각 관절의 기구학적 해석이 필요하다. 또한 곡면형상을 가진 검사체에 대해서

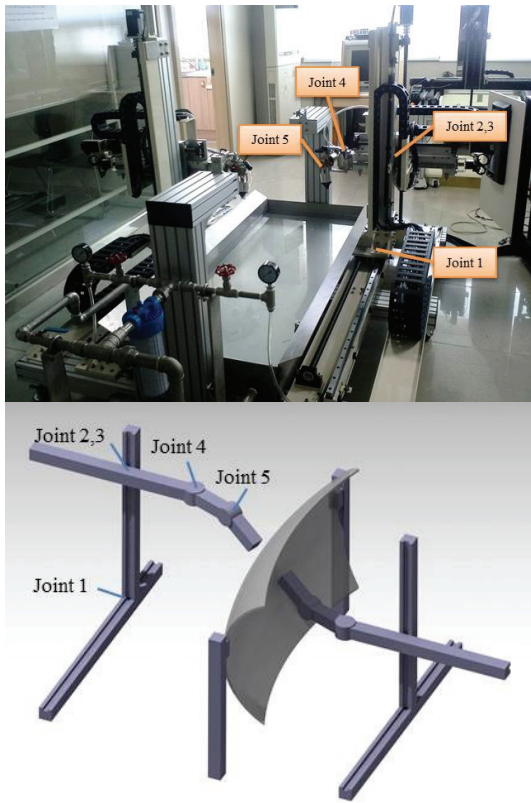


Fig. 1 5-Axis ultrasonic inspection equipment

초음파 검사 경로를 설정하고, 이를 추종하기 위한 메커니즘 분석이 필요하다.

3. 기구학 해석

3.1 좌표변환

Fig. 1은 세이프텍(주)사가 개발한 5축 초음파 검사 장치와 그 개략도를 나타낸다. 본 검사 장치는 크게 초음파를 송·수신하는 기구부와 검사체를 고정시키는 지그부로 나눌 수 있다. 지그에 의해 검사체가 고정되면, 송·수신부가 검사체를 가운데 두고, 검사 표면에서 수선을 유지하며 정해진 검사 경로를 따라 움직인다. 검사 장치는 총 10개의 축을 가지고 있지만, 초음파 송신부의 위치 선정에 의해 구속적으로 반대편 수신부의 위치가 결정되므로, 그 구속에 의해 5개의 자유도만 가지게 된다. 각 링크의 결합은 PPPRR (Prismatic-Prismatic-Prismatic-Revolute-Revolute) 결합으로써, 3개의 수직 조인트와 2개의 회전 조인트로 이루어져 있다.

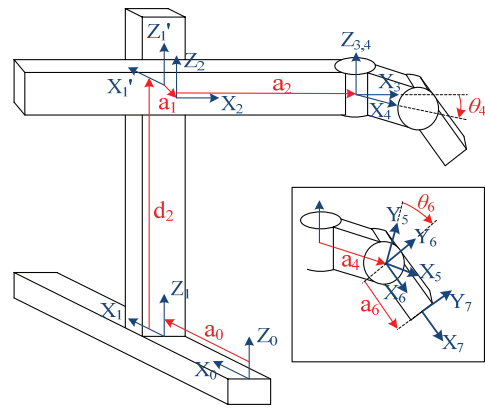


Fig. 2 Coordinate axis of each joint

초음파가 검사면에 대해 수직 입사되고 송·수신부는 서로 직선상에 위치해야 하므로, 송신부의 위치와 각도가 정해지면, 수신부의 위치와 각도 또한 결정된다. 따라서, 한쪽 기구부의 기구학적 해석을 통해 전체 검사장치의 기구학적 해석이 가능하다.

각 관절에 X, Y, Z 좌표축으로 된 7개의 프레임 (frame)을 Fig. 2와 같이 부착한다. 0-프레임은 고정된 기준 좌표계, 1-, 2-, 3-프레임은 직선운동 조인트, 4-, 5-, 6-프레임은 회전운동 조인트, 그리고 7-프레임은 초음파센서의 송수신부에 각각 부착되어 있다. 그러면, 각각의 변환행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$${}^n T_m = \begin{bmatrix} {}^n R_m & {}^n P_{m_org} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

그러면, 0-프레임과 7-프레임사이의 관계는 다음과 같이 정리된다.

$${}^0_7 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T {}^6_7 T = \begin{bmatrix} \sin\theta_4 \cos\theta_6 & -\sin\theta_4 \sin\theta_6 \\ -\cos\theta_4 \cos\theta_6 & \cos\theta_4 \sin\theta_6 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 \\ 0 & 0 \\ \cos\theta_4 & a_6 \sin\theta_4 \cos\theta_6 + a_4 \sin\theta_4 - a_1 + a_0 \\ -\sin\theta_4 & -a_6 \cos\theta_4 \cos\theta_6 - a_4 \cos\theta_4 - a_2 \\ 0 & a_6 \sin\theta_6 + d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

7-프레임의 원점은 초음파 센서의 송수신부이며, 이로부터 δ 만큼 떨어진 거리를 0-프레임에 대한 좌표값으로 나타내면 다음과 같다.

$${}^0P = {}^0T[\delta \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (5)$$

시편의 초음파 스캔을 위해서는 먼저 스캔의 시작점(starting point)을 설정하여야 한다. 시편은 검사 장치의 지그(zig)에 고정되며, 검사장치의 원점에 대한 시작점의 위치는 검사장치의 원점, 지그, 시작점 간의 좌표변환으로 나타낼 수 있다.

$${}^0P = {}^0T {}^zP$$

$${}^0T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^zP = \begin{bmatrix} {}^z p_{sx} & {}^z p_{sy} & {}^z p_{sz} & 1 \end{bmatrix}^T$$

검사장치의 원점 프레임에서 지그 프레임 원점으로의 이동은 수직 이동만으로 변환이 가능하며, p_x, p_y, p_z 는 지그 설계시 결정되는 값이다. zP 는 지그 원점에서 나타낸 시작점의 위치 좌표값이다.

그러면, 식 (5)와 (6)이 같으므로, 다음의 정리를 통해 시작점에서의 이동을 위한 각 관절의 움직임을 알 수 있다.

$${}^0T \begin{bmatrix} \delta \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^z p_{sx} + p_x \\ {}^z p_{sy} + p_y \\ {}^z p_{sz} + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} (\delta + a_6) \sin \theta_4 \cos \theta_6 + a_4 \sin \theta_4 - a_1 + a_0 \\ -(\delta + a_6) \cos \theta_4 \cos \theta_6 - a_4 \cos \theta_4 - a_2 \\ \delta \sin \theta_6 + a_6 \sin \theta_6 + d_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^z p_{sx} + p_x \\ {}^z p_{sy} + p_y \\ {}^z p_{sz} + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, a_1, a_4, a_6 은 검사장치 설계에 따라 정해지는 상수값이므로, 변수는 $\theta_4, \theta_6, a_0, a_2, d_2$ 로 총 5개가 된다. 결국, θ_4, θ_6 에 따라 a_0, a_2, d_2 가 결정된다. 하지만 싱글 곡률을 가진 검사체를 대상으로 할 경우에는 $\theta_4 = 0$ 으로 고정이 되며, 식 (8)은 다음과 같이 축소된다.

$$\begin{bmatrix} -a_1 + a_0 \\ -(\delta + a_6) \cos \theta_6 - a_4 - a_2 \\ \delta \sin \theta_6 + a_6 \sin \theta_6 + d_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^z p_{sx} + p_x \\ {}^z p_{sy} + p_y \\ {}^z p_{sz} + p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

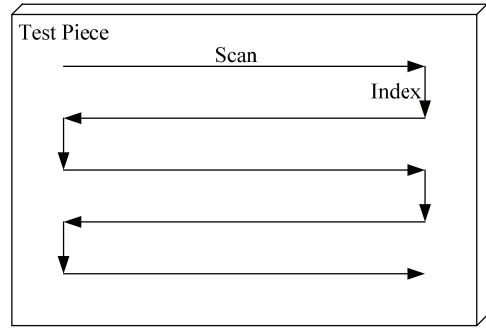


Fig. 3 Path generation of flat surface

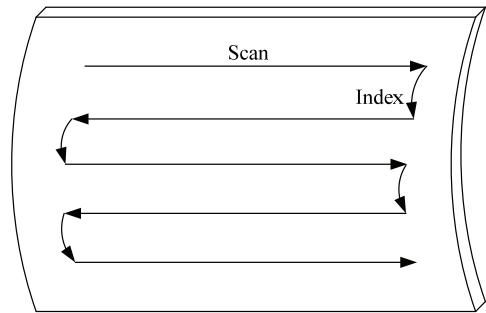


Fig. 4 Path of single curvature test object

따라서, a_0 는 자동으로 결정이 되고, 결국 θ_6 에 따라서 a_2 와 d_2 가 결정되는 것을 알 수 있다.

3.2 경로 생성

초음파 검사를 위한 시작점의 위치를 설정한 다음, 스캔의 경로를 Fig. 3과 같이 설정할 수 있다.¹¹

이때, X, Z축 방향으로의 이동을 각각 스캔(scan), 인덱스(index)라 하면, X축 방향으로 설정된 구간만큼 스캔이 이루어지고, Z축 방향으로 설정된 구간만큼 다음 스캔을 위한 인덱스 이동이 이루어진다.

검사체가 싱글 곡률(single curvature) 및 더블 곡률(double curvature)의 형상을 가지는 경우에 대해 경로 생성과 이에 따른 각 관절의 움직임을 살펴보고자 한다.

싱글 곡률을 가진 검사체의 경우, 스캔 및 인덱스의 경로는 Fig. 4와 같으며, 스캔은 1번 조인트만으로 이동이 가능하며, 그 속도와 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_0 &= a_0 \\ \dot{x}_0 &= \dot{a}_0 \end{aligned} \quad (10)$$

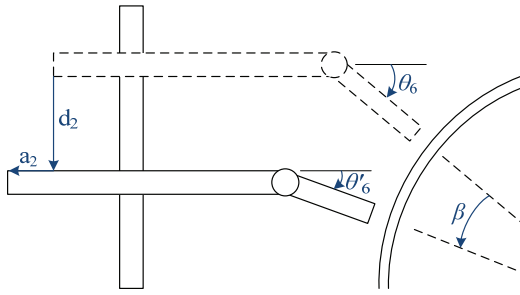


Fig. 5 Index moving of single curvature test object

인덱스 이동은 Fig. 5와 같이 2, 3, 5번 조인트를 함께 움직여서 이동이 가능하다.

인덱스 중의 각도변화를 β 라 하면, 2, 3, 5번 조인트와 β 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta &= \theta_6 - \theta_6' \\ a_2 &= (a_6 + 2\delta + t + R)\cos(\theta_6 - \beta) \\ &\quad - (a_6 + 2\delta + t + R)\cos(\theta_6) \\ d_2 &= (a_6 + 2\delta + t + R)\sin(\theta_6) \\ &\quad - (a_6 + 2\delta + t + R)\sin(\theta_6 - \beta) \end{aligned} \quad (11)$$

이를 다시 다음과 같이 β 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \beta &= \theta_6 - \arccos\left(\frac{a_6}{A} + \cos\theta_6\right) \\ \beta &= \theta_6 - \arcsin\left(\frac{-d_2}{A} + \sin\theta_6\right) \\ A &= a_6 + 2\delta + t + R \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 6은 더블 곡률을 가진 검사체의 경우, 스캔 및 인덱스의 경로를 나타내고 있다. 스캔 이동은 1, 2, 4번 조인트의 움직임으로 이루어진다. 스캔중의 각도변화를 β_1 이라 할 때, β_1 과 각 조인트와의 관계는 다음과 같다.

$$\beta_1 = \theta_4 - \theta_4' \quad (13)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= (a_4 + a_6 \cos\theta_6 + 2\delta + t + R_1)\sin\theta_4 \\ &\quad - (a_4 + a_6 \cos\theta_6 + 2\delta + t + R_1)\sin(\theta_4 - \beta_1) \\ a_2 &= (a_4 + a_6 \cos\theta_6 + 2\delta + t + R_1)\cos(\theta_4 - \beta_1) \\ &\quad - (a_4 + a_6 \cos\theta_6 + 2\delta + t + R_1)\cos\theta_4 \end{aligned} \quad (14)$$

이를 다시 다음과 같이 $\beta_1, \dot{\beta}_1$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

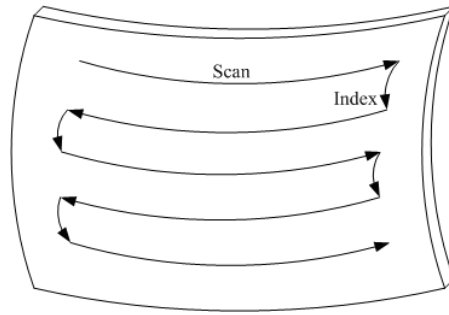


Fig. 6 Path of double curvature test object

$$\beta_1 = \theta_4 - \arcsin\left(\sin\theta_4 - \frac{a_0}{A_1}\right) \quad (15)$$

$$\beta_1 = \theta_4 - \arccos\left(\cos\theta_4 + \frac{a_2}{A_1}\right)$$

$$\dot{\beta}_1 = \frac{1}{A_1 \sqrt{1 - \left(\sin\theta_4 - \frac{a_0}{A_1}\right)^2}} \dot{a}_0 \quad (16)$$

$$\dot{\beta}_1 = \frac{1}{A_1 \sqrt{1 - \left(\cos\theta_4 + \frac{a_2}{A_1}\right)^2}} \dot{a}_2$$

여기서, $A_1 = a_4 + a_6 \cos\theta_6 + 2\delta + t + R_1$ 이다.

더블 곡률의 인덱스 이동은 싱글 곡률의 인덱스 이동에서 4번 조인트의 움직임이 추가된다. 인덱스 중의 각도변화를 β_2 라 할 때, 각 조인트와의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} a_2 &= A\cos(\theta_6 - \beta_2) - A\cos\theta_6 + \cos\theta_4' - \cos\theta_4 \\ d_2 &= A\sin(\theta_6) - A\sin(\theta_6 - \beta_2) \end{aligned} \quad (17)$$

4. 시뮬레이션

검사 경로에 대한 주요 링크의 움직임을 도출하기 위해, Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이터를 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 검사장치의 링크 설계 매개변수 값을 Table 1과 같이 적용시켰다.

Fig. 7은 더블 곡률 ($R=500, R_1=1000$)을 가진 검사체의 스캔이동 (a_0 값의 변화)에 따른 β_1 의 각도 변화와 그 속도변화를 나타낸다. 즉, Fig. 7(a)와 같이 검사장치에서 0~1600mm범위의 scan검사명령을 내린다면, β_1 은 Fig. 8(b), (c)와 같이 링크 4의 각도

Table 1 Parameters of ultrasonic inspection equipment

a_1 (mm)	175
a_4 (mm)	99
a_6 (mm)	155
t (mm)	10
δ (mm)	10

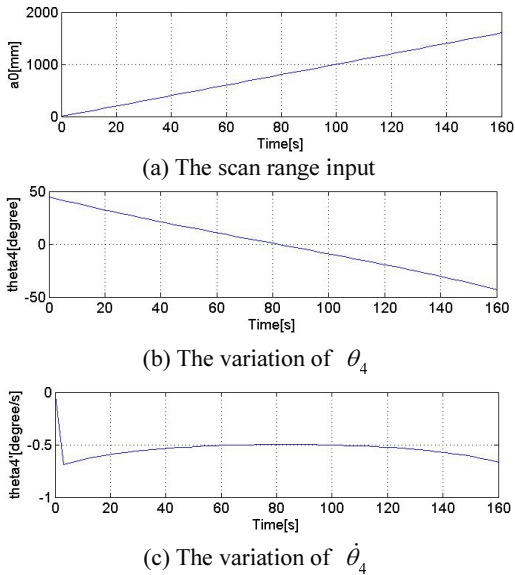


Fig. 7 The variations of β_1 according to a_0 of double curvature test object

와 각속도변화가 일어난다. a_0 의 값이 선형적으로 변화하도록 설정되었으므로 직선방향으로는 일정하게 움직이지만, 스캔 평면은 곡면이기 때문에 스캔의 속도는 Fig. 8(c)와 같이 일정하지 않게 된다. Fig. 8(a), (b), (c), (d)는 각각 더블 곡률을 가진 검사체의 스캔속도가 검사곡면을 따라 1°/s로 일정하게 될 때의 a_0 , a_2 의 변위와 속도변화를 나타낸다. 따라서, Fig. 8(a), (c)와 같이 a_0 , a_2 의 변위를 함께 설정한다면 더블 곡면을 가진 검사체에 대해서도 검사 표면을 따라 일정한 간격으로 스캔을 수행할 수가 있다.

Fig. 9는 더블 곡률 ($R=800$, $R_1=300$)을 가진 부품의 초음파 검사를 위한 경로 추종의 한 예를 나타낸다. 이는 역기구학을 바탕으로 구성된 시뮬레이터를 통해 도출된 결과이다. 우선, 검사의 시작 점을 (1200, -500, 800)으로 설정하였다면, 식(8)에 의한 a_0 , a_2 , d_2 의 초기값은 다음과 같다.

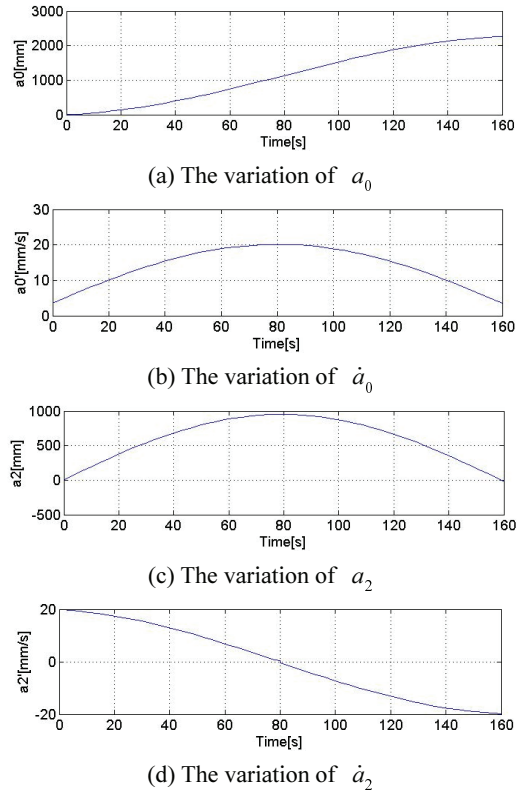


Fig. 8 The variations of a_0 and a_2 at 1°/s of double curvature test object

$$a_0=1448.8, \quad a_2=297.3, \quad d_2=916.7 \quad (18)$$

검사를 위한 스캔범위를 $-20^\circ \sim +20^\circ$, 스캔간격을 1° , 인덱스범위를 $-45^\circ \sim +45^\circ$, 인덱스간격을 30° 로 설정하였다면, a_0 , a_2 , d_2 의 움직임은 Fig. 9(a), (b), (c)와 같이 나타난다. a_0 링크는 스캔 이동방향 축이므로, 일정한 시간을 두고 반복 운동을 하는 것을 알 수 있다. 여기서 일정시간은 다음 스캔을 위한 인덱스 이동시간이 될 것이다. a_2 링크는 스캔이 진행되는 구간에서 왕복운동을 하며, d_2 링크는 스캔이동 시 위치를 유지하고 인덱스 이동시에만 그 위치가 변함을 알 수 있다. 엔드 이펙터가 검사경로를 추종할 때, 검사면에서의 접선에 수직인 방향을 계속 유지해야 하므로, 링크의 위치 해는 1개만 존재한다. 결국, 주어진 조건으로 스캔 검사를 하기 위해서는 a_0 , a_2 , d_2 의 링크를 Fig. 9와 같이 동시에 구동시켜야 한다. Fig. 9의 미분 불가능한 점에서 jerk 현상이 발생하더라도, 송수신부 매니플레이터가 동기화되어 주어진 경로

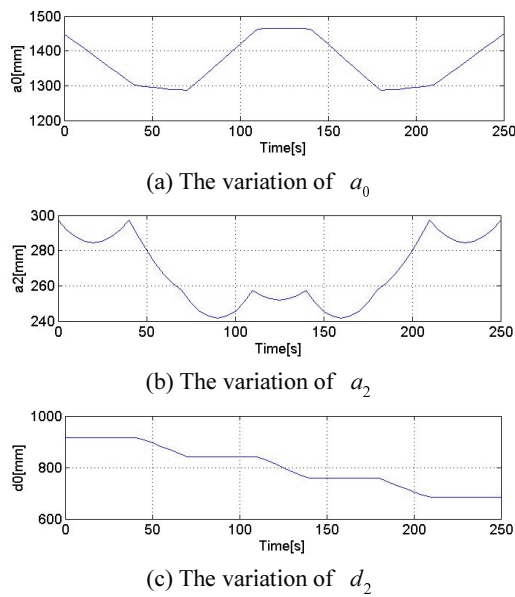


Fig. 9 The desired trajectories of a_0 , a_2 and d_2 for a scan

만 잘 추종하게 되면 초음파 검사에는 문제될 것이 없다.

5. 결론

본 연구 대상인 초음파 검사장비는 3개의 직선 운동과 2개의 회전 운동이 가능한 5축으로 된 검사장비이다. 이는 더블곡률을 가진 검사체를 검사하기 위해 고안된 장비이다. 검사 기구의 기구학 해석을 통해서, 더블 곡률을 가진 검사체의 검사 유용성을 살펴보고, 검사 경로를 추종하기 위한 각 링크의 움직임을 제시하고자 하였다. 기구학 해석을 위해, 기구부의 원점을 설정하여 초음파 송수신부 프레임과의 관계를 좌표변환을 통해 정의하였다. 이로써 모든 엔드 이펙터의 위치에서 좌표값 추출이 가능해졌다. 또한, 검사체의 곡률형상에 따른 스캔 검사 및 인덱스 이동 경로를 선정하고, 이를 추종하기 위한 각 링크의 움직임을 역기구학으로 해석하여, 주요링크와 변수를 도출하였다. Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션에서는 실제 기구의 매개변수 값을 적용하여, 더블 곡률을 지닌 검사체의 검사가 설계된 링크의 범위 내에서 수행이 됨을 확인하였다. 또한, 이를 바탕으로 링크 모션 시뮬레이터를 구성하였으며, 검사체

의 사양과 스캔, 인덱스의 범위를 입력하여 원하는 경로를 추종하기 위한 각 링크의 유일해를 도출할 수 있었다. 결국, 세이프텍(주)의 검사장비가 기구학적으로 해석된 변수의 설정으로 더블곡률을 가진 검사체의 검사경로 생성이 가능했으며, 이를 추종하는 이동이 가능함을 시뮬레이션 해석을 통해 입증하였다. 향후에는 본 연구에 이어서, 검사 대상의 위치 및 자세변화에 따른 자세측정 알고리즘이 포함된 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Kim, D. R. and Kim, J. H., "Study on Thickness Measurement about Insulation Rubber of Steel Motor case Using Ultrasonic Resonance," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 16, No. 5, pp. 89-96, 2012.
2. Moon, J. S. and Kim, O. S., "Thickness Evaluation for Rusting Decayed of Steel Plate using Ultrasonic Meter," Proc. of the KSME, pp. 34-36, 2013.
3. Lee, H. J., Cho, C. H., and Cho, H. J., "Development of a Multi-Channel Ultrasonic Testing System for Automated Ultrasonic Pipe Inspection of Nuclear Power Plant," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 29, No. 2, pp. 145-152, 2009.
4. Baek, S. Y., Lee, H. S., Kim, J. W., and Kang, D. M., "Development of Potable 3D Ultrasonic Inspection Device for Defect Inspection of Molds Materials and Parts," Proc. of KSTP Symposium, pp. 118-123, 2008.
5. Shin, Y. S., Yoon, Y. H., and Kim, Y. H., "Measurement of Longitudinal and Transverse Wave Speed in Solid Materials Using Immersion Ultrasonic Testing," Journal of Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 1, pp. 40-45, 2008.
6. Krautkramer, J. and Krautkramer, H., "Ultrasonic Testing of Materials," Springer-Verlag, pp. 167-221, 1990.
7. Programmed Instruction Handbook, "Nondestructive Testing: Ultrasonic Testing," General Dynamics,

- 1967.
8. Park, E. S., "Automation System Development of Gantry-type 10-axis ultrasonic for Reliability of Aerial Composites," Proc. of KSNT Fall Conference, pp. 197-202, 2012.
 9. Han, C. H. and Park, I. K., "Ultrasonic Testing," Node Media, pp. 27-105, 2012.
 10. Craig, J. J., "Introduction to Robotics, mechanics and Control," Pearson Prentice Hall, pp. 19-134, 2005.
 11. Szilard, J., "Ultrasonic Testing: Non-conventional Testing Techniques," John Wiley & Sons, pp. 25-52, 1982.

부 록

A1. 프레임 간의 변환 행렬

$$\begin{aligned}
 {}^0_1T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^1_2T &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -a_1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2_3T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^3_4T &= \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4_5T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^5_6T &= \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^6_7T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$