

비파괴 검사 응용을 위한 기구부의 3차원 기구학적 해석

김형국*, 안희태*, 이동철*, 박재휘**, 이만형***

*부산대학교 지능기계공학과, **한국전기안전공사, ***부산대학교 기계공학부

3-Dimensional and Kinematic Analysis of a System for NDE(Nondestructive Examination)

Hyung Kuk Kim*, Dong Hwal Lee*, Hee Tae Ahn*, Jae Whe Park**, Man Hyung Lee***

*Dept. of Intelligent & Mechanical Engineering, Pusan National Univ. **Korea Electrical Safety Corporation

***Pusan National University. School of Mechanical Engineering

Abstract - The 3-dimensional measuring machine by using an ultrasonic sensor is used one of the NDE(Nondestructive Examination). It is applied to the inspection of pipelines, boreholes, pressure vessel and tank, and so on. In particular when a harsh environment prohibits the use of moving mechanical parts. The 3-dimensional measuring machine by using an ultrasonic sensor, which measure 1-dimensional information and 2-dimensional information simultaneously from a target of inspection, and then reembody 3-dimensional information. So we can find the situation in progress and predict remaining life and corrosion without destructive examination. It's a point of excellence that the 3-dimensional measuring machine is portable.

1. 서 론

최근에 초음파를 이용한 검사가 산업 전반에 걸쳐 활발하게 진행되고 있고, 그에 따른 계속적인 연구와 개발의 결과로 인해 응용 범위가 넓혀가고 있다. 특히 국내에 건설되어 있는 대형 건물, 석유화학 플랜트, 발전 설비 플랜트 등은 지난 급속한 경제성장기에 목표 지향적으로 조급하게 시공되어 구조물들 전체의 안전성에 직·간접적으로 문제가 되어 왔다. 최근에는 이들 구조물들의 상당수가 노후화 되었고 사후 관리가 소홀하여 대형사고가 계속 발생되었으며, 검사하려는 대상에 손상을 주지 않고 안전성을 검사하는 방법이 중요시되고 있다. 압력 용기나 배관처럼 압력을 받는 구조물들은 가동압력을 고려하여 그에 알맞은 두께로 설계·제작하지만 사용시간이 증가함에 따라 부식, 침식 등에 의해 두께가 줄어들어 구조물이 견딜 수 있는 압력이 점차 줄어든다. 따라서 압력용기 및 배관과 같은 구조물의 안전 진단을 위해서 두께 측정이 하나의 방법으로 사용된다. 이러한 안전성 확보와 지속적인 사용여부를 결정하기 위해서 구조물의 두께 변화를 측정하는 것은 재질 평가와 아울러 매우 중요한 일로 자리잡아 가고 있다. 특히, 여러 산업분야에서 중요한 비파괴검사 기술로 많이 이용되어 온 초음파 검사는 고정설비 및 가동 전·역에 실시하는 비파괴검사 방법 중에서 상당히 중요한 역할을 하고 있으며 재료의 물성을 평가하는 기술로 더욱 발전하게 되었다. 산업 설비를 새로 구축하거나 현재 가동 중에 있는 설비들에 대해 안전성 및 향후 수명 예측을 위한 고감도, 고정밀도에 의한 정량적 비파괴검사가 강하게 대두되고 있다. 부식 및 침식에 의한 두께 감소를 측정하기 위해서는 방사선에 의한 방법, 액체 침투 탐상에 의한 방법, 자분 탐상에 의한 방법, 초음파에 의한 방법 등을 들 수 있다. 이중 방사선에 의한 방법은 단일장은 단열재가 있는 상태에서 넓은 영역을 한번에 검사 할 수 있는 장점 때문에 산업 현장에서 비파괴검사의 90% 이상을 차지 할 정도로 의존도가 높다. 그러나 두께 변화에 의한 분해능이 낮고 용접부의 두께가 두껍고 파이프의 직경이 크면 선원 노출 시간의

증가로 방사능 피폭이 증가하여 촬영시 방사선 관리구역의 설정이 필요하게 되고, 따라서 다른 작업과의 병렬성이 어려워 보통은 야간에 실시하는 등의 많은 문제점을 내포하고 있다. 액체 침투 탐상에 의한 방법은 표면 및 표면적하의 결함 검출에 한정되어 있고, 자분 탐상에 의한 방법은 표면적하 5mm 정도에 대해서만 가능하여 적용 범위가 제한된다. 이에 반해서 초음파에 의한 방법은 두께 측정, 결함의 크기, 위치뿐만 아니라 형상까지 검출할 수 있으며, 특히 검사결과 자체를 실시간으로 처리하는 장점을 갖고 있다. 외국의 경우에 있어서는 초음파 센서의 개발 및 자동화를 통하여 기존의 방사선에 의한 방법과 액체 침투 탐상에 의한 방법으로 검사가 어려운 소켓 용접부의 크랙이나 용입 부족에 대하여 초음파를 이용하여 검사하는 시스템을 개발하여 상용화시킨 단계에 있으며 국내 여러 검사업체들도 막대한 투자를 통해 구입한 검사기로 검사하고 있는 실정이다. 국내의 경우 초음파에 관한 연구는 이전부터 활발히 이루어져 왔으나 대부분이 실험성을 띤 세부적이고 단편적인 것에 관한 것이며, 산업체에 적용을 목적으로 한 실용화된 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 초음파 검사 시스템이 대형인 것을 소형으로 만들어 운반이 용이하게 하여 어떠한 장소에서도 손쉽게 검사가 가능하게 하여 산업체의 적용을 목적으로 한다. 검사 시스템에 초음파센서와 엔코더를 사용하여 검사 대상의 1차원 정보와 2차원 정보를 동시에 수집하여 3차원 정보로 재구성하는 하드웨어와 소프트웨어 프로그램을 개발하여 산업체에 적용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 초음파센서의 원리

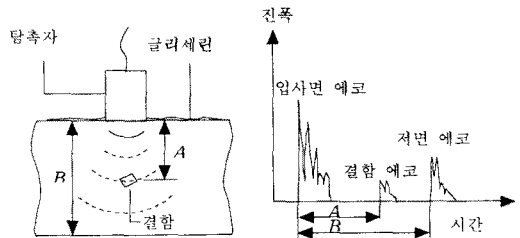


Fig.1. A fundamental theory of ultrasonic inspection

압전재료 디스크를 접촉매질(굴리세린 복합물)을 써서 강에 부착시키고 고전압의 전기적 펄스를 압전 디스크에 가하면, 초음파 에너지의 펄스가 디스크에서 발생되어 강 내부로 전파된다. 이 파동의 펄스 일부는 퍼지고, 일부는 감쇠되면서 급속 내를 진행하며 어떤 표면이나 시험편의 내부결함과 같은 내부 불연속에서 반사 또는 산란된다. 이 반사 또는 산란된 에너지는 금속표면에 적절

하게 놓여진 두 번째 압전 디스크에서 검출되고, 이 압전 디스크에서 전기적 에너지의 펄스를 발생시킨다. 투과된 펄스와 반사된 펄스 사이의 시간간격은 표면에서 불연속까지의 거리최도로, 되돌아온 펄스의 크기는 결합크기의 척도가 된다. 이것이 초음파 결합검출 및 두 계측정의 원리이다.

2.2. 검사부가 원통일 때의 기하학적 모델링

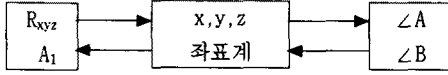


Fig.2 A diagram of coordinates conversion

위의 그림에서 보논바와 같이 $\angle A$, $\angle B$ 를 알면 아래의 식을 이용하여 A_1 , R_{xyz} 를 계산 할 수 있다. 검사부의 기하학적 모델링에 의해서

$$\begin{aligned} x &= (R+r)\sin A_1 & (1a) \\ y &= (R+r)\sin A_1 & (1b) \\ z &= (R+r)(1-\cos A_1) & (1c) \end{aligned}$$

식(1)을 이용하여 R_{xyz} 과 A_1 을 x, y, z 좌표축으로 표현가능하고 기구부 팔의 기하학적 운동에 의해서

$$\angle B = \angle B_1 + \angle B_2 \quad (2)$$

로 표현되며 이때의 $\angle B_1$ 과 $\angle B_2$ 는 식(3)과 같다.

$$\angle B_1 = \tan^{-1}\left(\frac{z}{R_{xy}}\right) \quad (3a)$$

$$\angle B_2 = \sin^{-1}\left(\frac{R_{xyz}}{L}\right) \quad (3b)$$

여기서 L 은 로봇 팔의 길이 200mm이다. 그리고, 직교 좌표계에서 엔코더가 xy 평면으로 이동 할 때 읽어들이 각 $\angle A$ 는 아래와 같다.

$$\angle A = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4)$$

식 (1b)와 식(4)에 의해서

$$\angle A = \tan^{-1}\left(\frac{(R+r)\sin A_1}{x}\right) \quad (5)$$

식(2)에 의해서

$$\begin{aligned} \angle B &= \tan^{-1}\left(\frac{z}{R_{xy}}\right) \\ &+ \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}{2L}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

식(5)를 x 에 관해서 풀면

$$x = \frac{(R+r)\sin A_1}{\tan A} \quad (7)$$

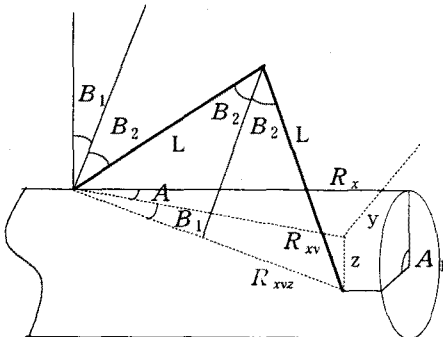


Fig.3. Kinematic analysis of the cylinder surface

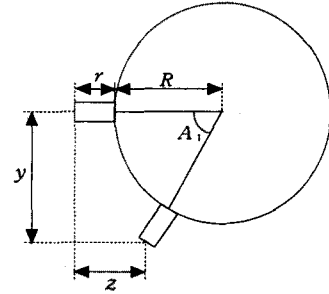


Fig.4. Kinematic analysis of the bottom of the cylinder

Fig.3 과 Fig.4의 기구학적 해석에 의해서

$$R_x = \sqrt{x^2} = x \quad (8a)$$

$$R_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (8b)$$

$$R_{xyz} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (8c)$$

식(6)에 식(1a), (1b), (1c)와 식(8a), (8b), (8c)를 대입하면 식(6)은 $\angle A$ 와 $\angle A_1$ 의 함수로 표현 가능하다.

그러면 $\angle B$ 는 $\angle A$ 와 $\angle A_1$ 에 의해서 결정된다.

우리가 구하고자 하는 $A_1 = f(A, B)$ 의 함수이고,

$x = \frac{(R+r)\sin A_1}{\tan A}$ 인데 $\angle A$ 와 $\angle B$ 가 식(5), 식(6)에 의해 결정되고, A_1 은 $0^\circ \sim 360^\circ$ 사이의 각이므로 수치 해석적으로 풀어 $\angle A, \angle B, \angle A_1, R_{xyz}$ 의 관계를 구할 수 있다.

위와 같은 방법들에 의해 초음파센서의 말단이 원통 표면의 어디에 위치해 있는지 알 수 있다.

종합적으로 엔코더 2개와 기구학적 해석에 의해서 초음파센서를 내장한 검사부의 말단이 검사하려는 대상의 원통 표면의 어느 위치에 있는지 알 수 있고, 초음파 센서로 검사대상의 결합이 어느정도인지 판단 할 수 있다.

2.3. 검사부가 평면일때의 기하학적 모델링

검사부가 평면일때는 원통형일 때 보다 기구학적 해석이 매우 간단하다. 엔코더에서 측정되는 $\angle A$ 와 $\angle B$ 가 평면에서 r, θ 좌표 평면 위의 한점으로 표시되어 검사부 말단의 위치정보를 얻고, 초음파 센서에 의해 거리정보를 얻어 결합을 찾을 수 있다.

아래 Fig.5는 검사부가 평면일때의 기하학적 모델링을 보여주는데 검사부 말단의 말단부는 r, θ 좌표에 표현할 수 있다.

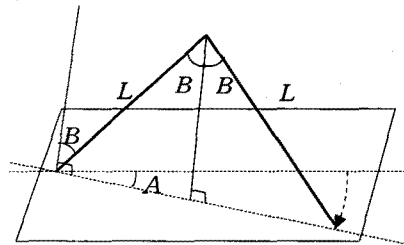


Fig.5 Kinematic analysis of the plane

$\angle A$ 는 엔코더에서 직접 읽어들이 값으로 θ 값을 나타내고, 기구부의 작업반경은

$$R_{xy} = 2L \cos B \quad (9)$$

이다. 그러므로 엔코더에 의해 평면위에 초음파센서가

어디에 위치해 있는지 알 수 있고, 초음파센서에 의해 결함을 찾아냄으로써 1차원과 2차원 정보들의 조합으로 3차원으로 재구현 할 수 있다.

3. 실험

3.1 검사장치

실험장치는 Fig.5에서 보는 바와 같이 초음파센서 검사부, 초음파보드가 내장된 컴퓨터와 위치제어 및 동시 계측보드가 내장된 본체로 구성되어 있다.

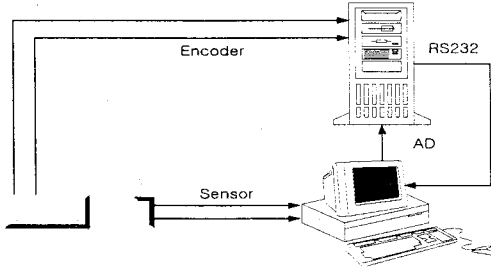


Fig.6 . Schematic diagram of mechanical system

초음파 센서 검사부에는 엔코더 2개가 부착되어 있어서 검사대상의 1,2차원 정보를 획득한다. 엔코더에서 얻은 위치데이터와 초음파에서 얻은 거리데이터를 이용하여 3차원으로 재구현하게 된다. 위치제어 및 동시계측 보드는 실험실에서 개발한 3축 동시 제어 가능한 것으로서 센서에서 검출되는 위치데이터와 거리데이터를 제어한다.

3.2 검사절차

먼저 검사할 대상의 표면 위에 초음파센서가 내장된 원통형 검사부를 초기위치에 두고 컴퓨터의 전원과 위치제어 및 동시계측 보드가 내장된 본체의 전원을 켜고, 초음파센서에서 검출된 거리정보와 엔코더 2개에서 검출된 위치정보를 3차원으로 재구현하는 프로그램을 실행시킨다. 검사하기 전에 검사대상면에 글리세린을 적당량을 골고루 분포시켜 탐촉자로부터 송신된 초음파를 효율적으로 검사체에 전달시키기도록 한다. 엔코더의 원점과 방향을 설정하고 검사대상면을 초음파센서로 스캔한다. 검사 대상은 결함이 있는 평면강판과 원통형 배관을 사용한다.

3.3 검사결과

3.3.1. 검사 면이 곡면 일 경우

원통면에 150mm × 150mm 모눈종이를 붙여서 검사면을 셋팅한다. 아래의 Fig.7는 이 영역에서 검사한 결과이다. 검사대상은 $\phi=500\text{mm}$, $t=9\text{mm}$ 인 배관을 사용하였으며 프로그램에 의해서 3차원으로 결과를 나타내고 있다. 정해진 영역에서 색채의 차이에 의해서 판의 두께를 시각적으로 도시해 준다.

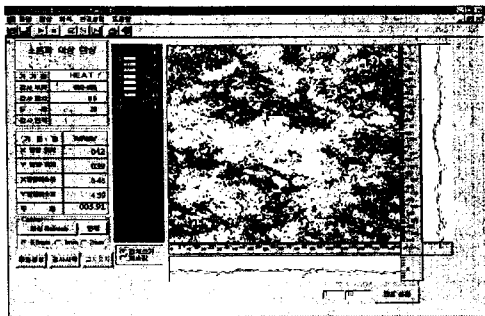


Fig.7 Results of cylinder surface inspection.

3.3.2. 검사면이 평면 일 경우

검사면이 평면일 경우에는 원통일 때와 마찬가지로 150mm × 150mm의 영역을 잡는다. 시험편의 두께는 9mm이고 판의 뒤편에는 각각 지름이 다른 원형 홈을 파서 검사 후 계대로 검사가 이루어 졌는지의 척도가 되도록 한다. 검사면이 곡면일 때와 마찬가지로 150mm × 150mm의 영역에 판의 두께를 입체적으로 나타내고 있다.

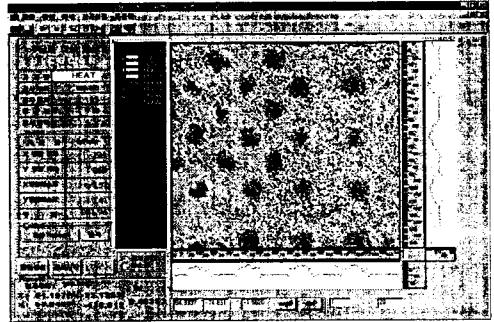


Fig.8 Results of plane surface inspection.

4. 결론

본 논문에서는 엔코더 2개를 가지고 비파괴 검사 90%가 넘는 평면과 곡면으로 이루어진 검사면의 2차원 데이터를 획득하여 초음파 센서의 위치를 정확하게 찾아내고, 초음파 센서 1개를 가지고 검사면에 수직한 방향으로의 거리 데이터를 정확하게 파악하는데 있다.

이렇게 얻어진 엔코더에 의한 1,2차원 위치 정보와 초음파 센서에 의한 1차원 거리 정보를 3차원상의 하나의 윈도우 창에 나타내어 보임으로서 결함이나 부식과 같은 구조물의 치명적인 손상들을 구조물에 대한 파괴 검사 없이 시각적으로 나타낼 수 있다.

이렇게 개발된 검사는 작업자 1명이 모든 장비를 운반할 수 있을 정도로 소형이기 때문에 도시 가스 배관, 상·하수도관 등이 매설되어 있는 곳까지 직접 이동해서 검사할 수 있는 장점이 있다.

[참 고 문 헌]

- [1]이정기, 권진오, 김영환, "Simultaneous Measurement Ultrasonic Velocity and Thickness of Isotropic Homogeneous Solid Using Two Transducers.", Journ the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol.19, 1990
- [2]황영택, "일반 산업분야에 있어서의 초음파검사 기술 개발에 관한 연구", 1999
- [3]Frank Longbottom and Halit Eren, "Ultrasonic M Sensor Solid Level Measurement", IMTC'94, 1994
- [4]Marek Brudka and Andrzej Pacut, "Intelligent Control Using Ultrasonic Measurements", IEEE, 1999
- [5]Hidetoshi Nonaka and Tsutomu Da-te, "Ultrasonic Position Measurement and its Applications to H Interface", IMTC'94, 1994
- [6]이의중, 이주석, "비파괴 검사공학", 도서출판 일진사, pp. 3~225, 1999