

효과적인 크랙 검사 자동화 장치를 위한 기반 기술 연구

최군호^{*†}

^{**}경성대학교 전기공학과

Research on Foundation Technology for Crack Inspection Automation Device with Effective Performance

Goon-Ho Choi^{*†}

^{*†}Dept. of Electrical Eng., KyungSung Univ.

ABSTRACT

Numerous pipe lines can be found on various plant-based industrial sites. These pipelines should be periodically checked for defects. Most of these pipelines are internally inaccessible and difficult to visually inspect. Therefore, the inspection is being carried out with the help of non-contact inspection equipment such as ultrasonic flaw detection equipment. The use of ultrasonic flaw detection equipment can raise time and efficiency issues. In order to solve this problem, we will study the basic technology necessary for the development of automated inspection system equipped with ultrasonic measuring equipment and verify the validity through the fabrication of the demonstration device.

Key Words : Crack Inspection, Ultrasonic Testing, Pipeline Inspection

1. 서 론

육해상 플랜트 등에 사용되는 파이프 형태의 배관의 경우, 시간이 지날수록 부식으로 인한 크랙이나 파손이 발생한다. 이러한 크랙 또는 파손은 결과적으로는 내부의 유, 기체의 누수로 인하여 환경오염과 폭발 사고의 원인이 될 수 있으므로 반드시 배관의 사후 관리가 반드시 필요한 사항이다[1]. 이러한 문제는 배관 외부만 아니라 내부에서도 발생하는데 이렇게 내부에서 발생하는 문제는 외부와 달리 육안으로 검사가 불가능한 경우가 대부분이기 때문에 초음파 탐상 장비 등을 이용한 비접촉 검사를 사용하고 있다. 문제는 이러한 검사 방법이 시간과 작업자의 숙련도를 요구한다는 것이다. 이러한 이유로 검사장비의 자동화 또는 로봇화를 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다[2,3].

본 논문에서는 이러한 자동화 과정에서 발생할 수 있

는 탐측 오류나 검사 속도의 개선 등을 위한 새로운 형태의 기반 기술을 제시하고자 한다. 제시된 내용은 모의 실험 장치를 제작하여 그 유용성을 검증하고자 한다.

2. 관련 이론 및 연구

2.1 배관 자동화 및 로봇화 연구

현재 많은 건설과 플랜트 및 조선에서는 다양한 기체와 액체들이 이동하기 때문에, 많은 배관들이 설치가 되고 이로 인하여 배관들이 복잡하게 얽혀 있거나 교차되는 부분이 많이 존재한다. 때문에 건축된 지 오래된 건물이나 플랜트 및 선박에 존재하는 배관들의 사후 관리가 제대로 이루어지지 않아 곳곳에 크랙과 부식이 일어나고 결과적으로는 내부의 유,기체의 누수로 인하여 환경오염과 폭발사고까지 일어나고 있다. 이러한 이유로 배관의 사후 관리가 반드시 필요한 데, 지금까지는 작업자가 직접 검사장비를 사용하여 크랙과 부식 등의 결함을 검사하는 것이 일반적이었다. 때문에 이 작업을 자동화하고자

[†]E-mail: goonho@ks.ac.kr

하는 연구가 많이 수행되어 왔다[2-5].

Fig 1과 같은 간이형 배관 자동 검사 장비 이외에 현재 출원된 관련 특허들을 살펴보면 배관을 이동하며 검사하는 여러 형태의 로봇들이 제시되어 있지만 대부분이 복잡한 배관을 이동하면서 측정하기에는 부피가 크고, 설계 및 제작에 고난도의 기술들이 많이 사용되고 있기에 실제 산업현장에 투입에는 어려운 점이 있다. 따라서 배관으로 인한 다양한 문제와 사고를 방지하기 위해서는 고난도의 기술과 부피가 큰 로봇이 아닌, 쉽게 접근이 가능한 기술로 산업현장에 즉시 투입 가능하고, 복잡하거나 공간이 협소한 배관을 쉽게 이동시킬 수 있는 구조가 요구되고 있다[5-9].



Fig. 1. Example of plant piping inspection using automated equipment.

2.2. 초음파 탐상 원리

초음파를 시험체 내로 전달하여 매질 내부에 존재하는 불연속 상태를 검출하는 방법으로, 시험체 내의 불연속부로부터 반사되는 초음파의 에너지량, 반사되어 되돌아올 때까지의 시간, 초음파가 시험체를 투과할 때 감쇄되는 양의 차이를 표준 자료와 비교하여 결함의 위치 및 크기 등을 측정하는 비파괴검사이다. 초음파는 금속 등의 물체 속을 쉽게 전파하고 서로 다른 물질과의 경계면에서는 반사하는 특성이 있다. 이러한 초음파의 특성을 이용하여 기계 진동 형태의 고주파 음파를 시험할 부분으로 주사하면 재료를 통과하던 음파가 결함 또는 경계에 부딪치게 되면 음향 진동의 반사가 발생한다. 이 반사파를 검출하여 반사파에 대한 정보를 음극선관(CRT) 또는 다른 기록 장치에 나타내고, 이를 분석하여 결함의 유무와 위치, 크기 등을 판별 할 수 있도록 한 것이 비접촉 초음파 탐상의 원리이다[10,11]. 이러한 초음파 탐상은 방사선 투과 시험이 곤란한 조인트 부분까지도 시험이 가능하나 펄스 에코시그널을 해석하는데 상당한 기술이 요구된다. 검사

방식으로는 투과법, 반사법, 공진법, 수직 탐사법 등이 있다. 이중 많이 사용되는 방법이 반사법이고 이것은 다시 수직탐상과 경사탐상으로 나눈다. 이 각각은 Fig 2에서 보는 바와 같이 기본적으로 매질에 초음파를 발사할 때의 방향에 따른 구분이다. 수직탐상은 결함의 위치를 정확히 판단할 수 있다는 장점이 있지만 매질의 경계면 사이의 거리가 짧아 여러 개의 반사파가 발생하여 결함 여부의 판단이 어렵고, 상대적으로 측정범위가 넓다는 단점이 있다. 반면에 경사 탐상은 반사파를 줄여 결함을 발견하기는 쉽지만 결함의 정확한 위치를 판단하기 어렵다는 단점이 있다[9,10].

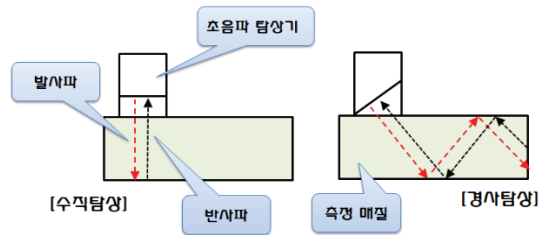


Fig. 2. The concept of the vertical and tilting inspection.

경사 탐상에 대하여 좀 더 명확한 설명을 위해 Fig 3과 Fig 4을 살펴보자. Fig 3은 초기 발사파가 매질의 끝에 도달하여 반사파를 만들어 내고 이 값이 최초의 초음파 탐상기로 돌아와 인식된다. (물론 끝이 아닌 위, 아래 표면에서도 반사파가 발생하지만 이 반사파는 매우 작아 장비 내부의 필터 및 소프트웨어 처리를 통해 제거할 수 있다). 이 경우 매질의 두께와 초음파 탐상기의 초음파 발사 각도 등을 고려하여 최종적으로 초음파가 어디에서 반사되어 돌아왔는지 측정할 수 있다. 그런데 Fig 4의 그림에서 중간에 결함이 존재할 경우 원래의 매질의 길이에 비해 비교적 짧은 거리에서 반사가 되어서 돌아온 반사파의 거리를 측정하여 현재 위치에서 어느 정도의 거리 앞에 결함이 있음을 예측할 수 있다.

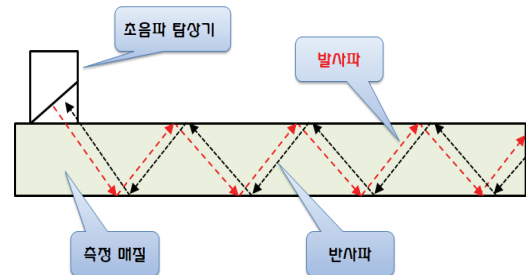


Fig. 3. In case, no defect(or crack) during tilting inspection.

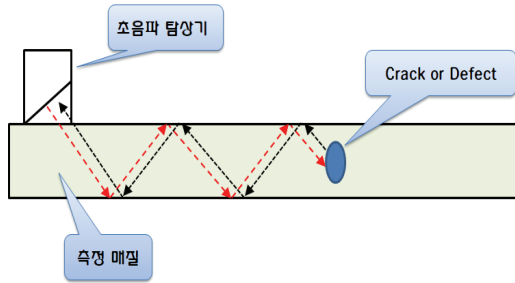


Fig. 4. In case, exist a defect(or crack) during tilting inspection.

초음파 탐상법의 장점은 휴대성, 민감성이 높고 균열의 위치 또는 결함의 공간적인 정보를 얻을 수 있다는 데 있으며, 방사선투과법에 비하여 안전하고 경제적인 비파괴 검사법이다. 최근에는 현장 측정 자료를 컴퓨터 처리와 보고서 작업에 적당한 형식으로 저장할 수 있는 디지털 방식의 보급으로 작업의 효율성이 더욱 우수해졌다. 단점으로는 표면 결함이 함께 있을 경우, 문제가 발생할 수 있다고 알려져 있다[5,10,11].

3. 연구된 배관 검사 자동화 기반 기술

3.1 기구부 설계 제안

본 논문에서는 다양한 크기의 산업용 배관 검사를 가능하게 하고, 배관에서 이탈되지 않는 배관 검사용 시스템의 외형 형태를 고려하고자 하였다. 이를 위해 설계 구조를 첫 째, 둥근 배관 형태에 안정하게 고정될 수 있도록 하는 구조와 둘째, 고정된 틀을 따라 탐측 장비가 이동하며 검사할 수 있는 구조로 나누어 설계하였다.

첫 번째로, 둥근 형태의 배관에 시스템이 이탈 및 이격이 발생되지 않고 단단하게 고정되는 형태를 만들기 위해 배관의 접촉 부위인 다리 부분의 각각의 지지대에 장력을 가지는 스프링을 삽입하여 배관의 일부 변형 또는 크기 변화에도 배관을 단단하게 잡을 수 있도록 하여 정

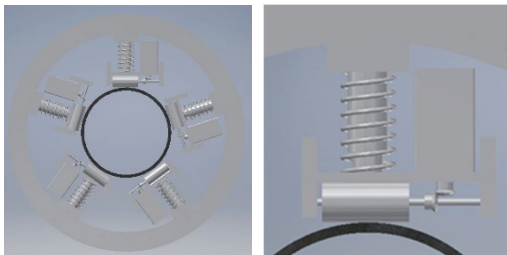


Fig. 5. Mechanism design for external fixation and parallel movement of pipes.

지 및 이동 상태일 때에도 흔들리지 않고 중심을 잡고 배관에 고정되어 움직일 수 있도록 하였다(Fig.5).

이 구조물은 배관의 외곽을 잡고 있는 것 이외에 배관을 따라 종으로 이동할 수 있어야 한다. 따라서 Fig. 5의 우측의 확대 도면에서와 같이 지지대의 끝 부분을 구동 가능한 롤러로 설계하였다. 이 롤러는 구동 모터를 이용하여 움직이며 이와 같은 형태의 5개의 지지대 구조가 배관을 지지하면서 종으로 이동할 수 있도록 설계 하였다.

둘째, 검사를 위해서는 배관의 원주를 따라 검사 장비가 이동할 수 있어야 하는데, 이를 위해서 장비의 외곽부에 검사 장비가 장착된 기구부가 이동할 수 있도록 모노레일 형태를 이용하였다. 즉 ‘I’ 형태의 레일을 배관의 원주를 따라 만들고 그 위를 탐측자를 장착한 ‘J’ 형태의 구조물이 레일을 단단하게 잡고 이를 따라서 움직일 수 있도록 하는 형태이다. 아울러 움직이면서 일정한 속도로 부드럽게 동작할 수 있도록 모터 속도 제어 시스템을 사용하였다(Fig.6).

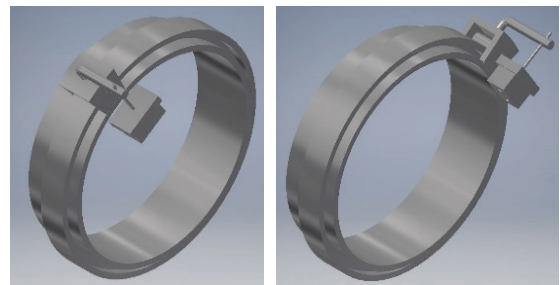


Fig. 6. Design of the detection equipment mechanism moving along the pipe circumference.

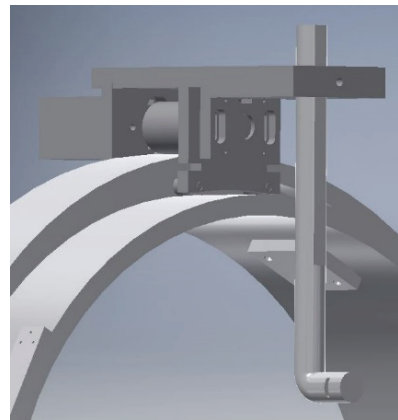


Fig. 7. Mechanical part design equipped with ultrasonic detection equipment.

초음파 탐상 검사를 하려면 검사하려는 배관에 탐촉자가 일정한 압력을 주면서 맞닿은 상태를 유지하면서 이동해야 한다. 그러기 위해서는 탐촉자를 장착한 이동 장비와 배관과의 거리를 일정하게 유지 및 고정할 수 있는 장치가 필요하다. 그 장치는 배관의 크기가 달라짐에 따라 위아래로 움직이며 탐촉자와 배관과의 거리를 일정하게 유지할 수 있도록 설정이 가능해야 한다(Fig. 7).

Fig. 8은 전체 시스템이 조립된 상태에서 배관에 장착되었을 때를 나타내는 3D 설계 도면이다. 아울러 외형 구조는 배관에 설치가능하도록 반원형으로 분리 및 설치가능하도록 설계하였다.

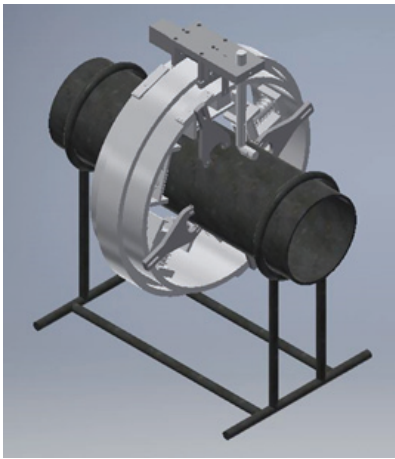


Fig. 8. Full mechanical part 3D design including simulated piping.

3.2 제안된 초음파 탐상 원리

본 논문에서는 파이프 내부의 크랙을 검출하기 위하여 일정 경사를 가진 탐촉자를 이용한 경사 탐상 방식을 사용하였다. 왜냐하면 대상 배관면에 대하여 수직 방향으로 크랙을 검출하고자 할 경우, 대상의 두께가 20mm가 되지 않는 상황에서 (실제는 10mm~15mm) 수직 탐상을 위한 초음파와 크랙에 의한 반사파가 뒤섞이는 물리적인 공간이 적어서 실제 크랙과 두께를 판별하는 것이 어려울 수 있기 때문이다. 2.2절에서 설명한 바와 같이 발사된 초음파는 대상 매질의 형태가 직사각형일 때는 어떠한 경우라도 반사파가 존재한다. 그러나 파이프 형상일 경우 초음파가 매질을 따라 돌기 때문에 반사파가 존재하지 않거나 최소한 아주 먼 거리에서의 값만 존재한다. 따라서 파이프 형상일 경우 이러한 경사 탐상의 반사파의 측정이 비교적 먼 거리에서부터 가능하다는 것을 본 연구에서의 하나의 장점인 비교적 인지가 쉬운 결함의 탐색에

활용하고자 하였다. Fig. 9는 본 연구에서 최종 수행된 로봇과 결합된 결함 탐측 방식의 개념도이다. 그림에서 보듯이 초음파 탐상기는 파이프 외부에 수직 방향으로 장착되어 있고 초음파를 파이프 형상의 원주 방향으로 발사하면 결함의 위치에서 반사파가 되 돌아온다(앞서 설명한 바와 같이 결함이 없으면 반사파는 나타나지 않거나 최소화된다). 이 반사파의 형태는 현재 초음파 탐상기에서부터 거리가 멀수록 작은 값으로 나타나지만, 이 초음파 탐상기가 해당 크랙의 방향으로 이동할 경우 그 크기는 점점 커지게 된다. 이러한 현상은 탐측을 진행하는 작업자가 초기에는 작은 반사 파형이라 인지하지 못할 수도 있지만 시간이 지나면서 점점 가까운 거리로 크게 나타나는 파형을 확인할 수 있고 이것은 아주 효과적인 결함 탐측 방법이라 할 수 있다.

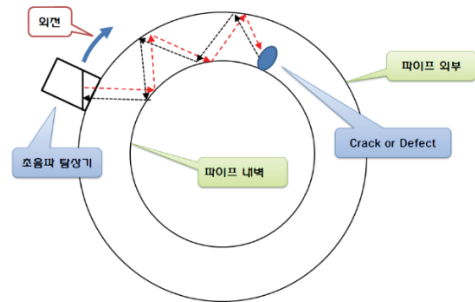


Fig. 9. Conceptual drawing of tilting inspection method applied to pipe shape.

또한 자동 회전형 시스템을 이용하기 때문에 탐촉자를 이동할 때 인간에 비해 일정하고 빠른 속도로 작업을 할 수 있다는 장점도 함께 존재한다. 이것은 초음파 탐상을 하는 데 있어서 작업자의 숙련도가 높아야 하는 단점을 보완할 수 있다는 장점을 함께 가지게 된다.

4. 실험 시스템을 통한 실험 및 결과

4.1 실제 실험 시스템 제작

전체 시스템의 이동을 위해 주 이동 모터로 오토닉스사의 AiS 스텝 모터 시리즈를 사용하였다. 이 스텝 모터 시스템은 다른 스텝 모터와 달리 Closed-Loop 방식을 사용하고 있어서 거리 이동에 대한 신뢰도가 아주 높다. 아울러 마이크로스텝기능을 지원함으로써 원하는 부분의 해상도와 정밀도를 조절할 수 있는 장점도 가지고 있다. AiS-60LA는 회전부의 모터에 사용하였고, AiS-60MA는 5세트를 이용하여 축방향 이동을 구현하였다.



Fig. 12. Conceptual Diagram of Autronics AiS Step Motor Control System.

설계된 시스템의 형태는 레일을 따라서 탐측자가 원주 방향으로 회전하고 이 시스템 전체가 축 방향으로 이동할 수 있도록 되어 있는 구조이다. 따라서 자동화된 형태의 시스템은 원주를 따라 한 바퀴 회전하면서 크랙을 탐측하고 이어서 축방향으로 일정 거리를 이동 후 다시 원주 방향을 한 바퀴 회전하면서 측정을 진행하는 것이 초기에 고려된 일반적인 방식이었다. 그러나 이렇게 할 경우 측정 대상의 지름이 커질 경우 원주 방향으로 회전하는 탐측자의 전선 등이 꼬이는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우선 배관을 전체 원주 중 절반(180°)만을 측정하면서 배관을 따라 이동하고, 끝에 도달하면 다시 되돌아 오면서 나머지 절반을 측정하는 방식을 사용하였다. 전체 시스템의 동작은 ATMEL사의 AVR 시리즈인 ATMegal28 MicroController를 이용하여 제어하였고,

이에 맞는 내부 프로그램을 작성하였다. Fig 10은 위의 제어기와 설계 구조를 모두 포함한 실제 제작된 모의 실험 시스템이다.

4.2 모의 배관을 통한 실험 결과

실제와 유사한 실험을 위하여 지름 300mm, 두께 10mm의 강철 재질의 모의 배관을 만들고 이 배관의 내부에 Fig 12와 같이 임의의 크기와 위치의 크랙을 만들어 넣었다. Fig 12의 왼 쪽은 배관 내부의 사진으로 원 안의 군데 군데 임의로 만들어진 결함(Crack)의 모습을 볼 수 있다. 오른 쪽은 그 중에 하나를 확대한 것으로 임의로 만들어진 크랙의 길이는 30~80mm, 깊이는 1~2mm 정도로 이 조건은 비파괴 검사를 통해 외부에서 검출해 내야 하는 최소한의 제한 조건을 기준으로 만들어진 것들이다.



Fig. 12. Mock tubing with random faults.

이 크랙을 본 과제에서 제작한 시스템을 이용하여 배관 외부에서 탐측한 결과이다(Fig. 13). 이동속도는 40mm/sec의 속도로 설정하였다.

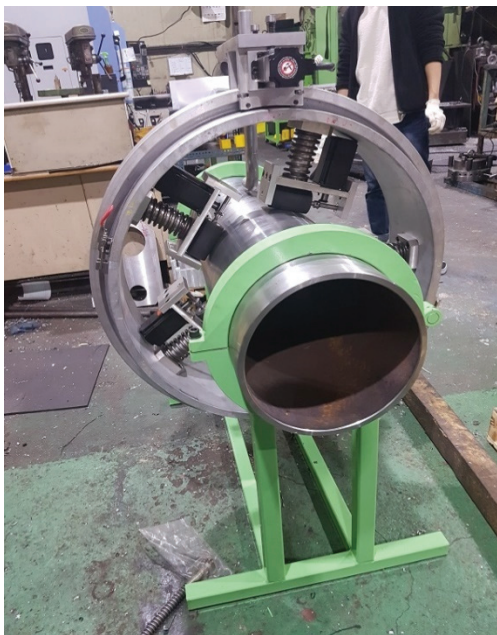


Fig. 11. A photo of the actual production system mounted on the mock pipe.

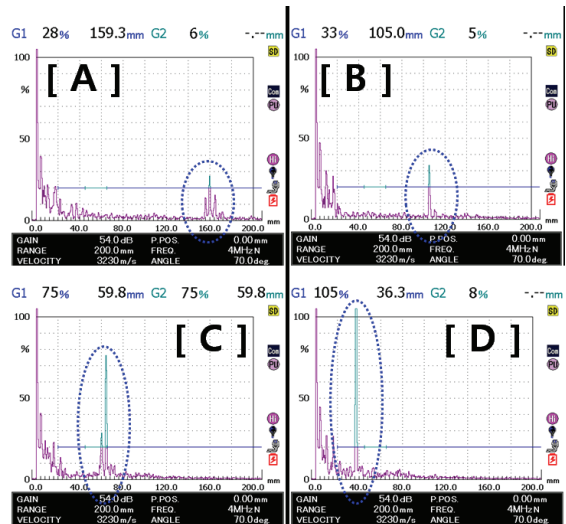


Fig. 13. Variation of Defect Waveform According to Movement of Detection Equipment.

그림에서 [A]-[D]는 실제 장치를 동작하면서 나타나는 실시간 파형을 시간의 순서에 따라 선택한 것이다. 우선 초음파 센서의 최대 탐측 범위를 200mm로 설정하였는데 이것은 탐측자 전방 200mm 이내의 크랙을 검출 대상으로 하는 것을 의미한다. 실제로는 더 먼 거리에서 초기 측정이 가능하도록 할 수 있지만 이렇게 할 경우 근접했을 경우의 데이터가 불안정하게 나타나는 경우가 있기 때문에 이를 고려하여 실험적인 방법을 통하여 200mm 정도를 적절한 값으로 선택한 것이다. Fig. 13-[A]의 파형에서 보면 결함의 위치가 200mm 안쪽으로 들어오자 1차적으로 이상 파형이 감지된 것을 알 수 있다. 그리고 이 파형은 점차 좌측(근접 방향)으로 이동함을 볼 수 있고 ([B], [C]) 최종적으로 [D]의 파형에서 현재 탐측자의 전방 40mm 정도에 결함이 존재함을 최종적으로 인지할 수 있게 된다. 이러한 형태의 로봇 감지 시스템을 이용할 경우 장점은 크랙 인식의 명확성이다. 이것은 [D]의 파형을 보면 작업자가 수동으로 탐측하는 경우 종종 발생할 수 있는 파형이다. 그러나 이 파형만으로는 크랙 여부를 판별하기 어렵지만, 본 논문 구성의 시스템을 이용할 경우 탐측 장치가 이동하면서 [A]→[B]→[C]→[D]의 형태로 파형의 피크점이 이동하는 것과 동시에 실시간으로 그 크기가 점차로 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 형태의 측정은 작업자로 하여금 크랙을 명확하게 인지할 수 있도록 하고 있다.

5. 결 론

앞서의 실제 실험 결과를 통하여 사람이 아닌 자동화된 배관 검사 시스템의 구현 가능성을 보여주었다. 기존의 크랙 검출은 작업자의 숙련도와 집중도가 요구되는 비교적 고난도의 기술이었다. 그러나 42절의 결과를 보면 이동하면서 크랙이 있을 경우 단발성 파형이 아닌 크랙의 변화 형상을 실시간으로 보여줄 수 있으므로 운용자가 초보자라도 쉽게 크랙이 있음을 인지하고 대응할 수 있도록 하고 있다. 또한 작업 속도 및 안정성 부분에 있어서도 일반 작업자 보다 빠르고 안정되게 탐측할 수 있으리라 예상할 수 있다.

본 과제의 결과물은 상업적인 형태의 자동화된 초음파 탐상 장비를 구현하는 데 도움이 될 수 있으리라 예상되며 향후 이동 속도의 개선, 영상 처리를 통한 결함 자동 인식, 그리고 태양광 발전 설비 플랜트의 로봇 무인 유지 보수 기술[12] 등을 포함하면 더욱 완전한 형태의 자동화 장비로 발전할 수 있으리라 생각한다.

감사의 글

본 연구는 한중산업테크(주)와 함께 2018년도 중소기업청의 산학연 협력 기술개발사업의 하나인 연구마을 사업의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. D.J. Park, A Study on the Method of Structural Integrity Assessment for Piping System in Process Plant, Ph.D Thesis, JoongAng Univ., 2015.
2. H.S. Choi, W.H. Na, D.W. Kang, H.S. Kang, J.G. Jeon, and H.S. Kim, "Development of an In-Pipe Inspection and Cleaning Robot," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 5, pp. 662-671, Jul. 2009.
3. S.G. Roh, and H.R. Choi, "Automated Technology for Pipelines Inspection Using Inpipe Robot," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, v.22 no.3, pp.261-266, 2002.
4. S.H. Hong, Design and Implementation of Embedded Control System for Untethered In-pipe Inspection Robot, Master Thesis, HanYang Univ., 2017.
5. T.H. Kang, Development of a Rotating Type Ultrasonic Device for Pipe Inspection, Master Thesis, JeonNam Univ. 2015.
6. H.P. Moon, S.C. Han, and K.W. Lee, MOVING ROBOT FOR INSPECTING PIPELINES, KOR Patent, NO.10-1281255, 2013.
7. J.G. Ahn, S.C. Han and H.P. Moon, ROBOT FOR INSPECTING PIPELINES," KOR. Patent, NO. 10-1430251, 2014.
8. S.C. Han, Research of climbing robot system for pipe inspection, Master Thesis, SungKyunKwan Univ., 2012.
9. H.S. Choi, W.H. Na, D.W. Kang, H.S. Kang, J.G. Jeon, and H.S. Kim, "Development of an In-Pipe Inspection and Cleaning Robot," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 5, pp. 662-671, Jul. 2009.
10. C.H. Han and I.K. Park, *Ultrasonic Testing*, NODEMEDIA, 2012.
11. I.K. Park, Introduction to Nondestructive Testing, NODEMEDIA, 2012.
12. H.K. Lee and S.S. Lee, "Development of Unmanned Cleaning Robot for Photovoltaic Panels," Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol.18, no.3, pp.144-149, Sep.2019.

접수일: 2019년 12월 24일, 심사일: 2019년 12월 26일, 게재확정일: 2019년 12월 27일