

배관 구조물의 상시 건전성 모니터링

Real-time Health Monitoring of Pipeline Structures

김 주 원* · 김 태 현** · 이 창 길*** · 박 승 희****
Kim, Ju-Won · Kim, Tae-Heon · Lee, Changgil · Park, Seunghee

요 약

여러 가지 지하시설물 중 국가 주요 자원의 수송망을 책임지는 주요구조물인 수도관, 가스관 등의 배관구조물은 접근이 쉽지 않은 지하공간에 복잡하게 연결되어 있어 그 중요성에 비해 유지, 관리, 보수가 쉽지 않았다. 이러한 배관구조물을 균열, 조인트 풀림 등의 손상으로부터 보다 안전하고 효율적으로 관리하기 위하여 상시적 배관구조물 손상진단기법을 연구하였다. 이를 위해 배관 구조물 시험체에 볼트풀림, notch 등과 같은 손상에 대하여 대표적인 압전센서인 PZT와 MFC를 부착하고 임피던스기법 및 유도 초음파기법을 적용하여 볼트풀림개수, notch 손상개수 증가에 따른 출력신호를 반복 계측하였다. 객관적인 평가를 위해 계측된 신호를 신호처리기법인 웨이블릿 변환을 수행하고, RMSD 및 1-CC의 손상지수를 사용하여 구조물손상을 정량화 시켰으며 이를 토대로 구조물의 건전성의 기준이 되는 임계값을 설정함으로써 임피던스와 유도초음파 두 검색기법을 이용한 상시적 배관구조물 건전성 모니터링의 가능성을 살펴보았다.

keywords : 배관구조물 건전성 평가, 임피던스, 유도초음파, RMSD, 웨이블릿변환

1. 서 론

지하시설물에서 가스관, 수도관 등을 포함하는 배관 구조물은 국가 주요 자원의 수송망을 책임지는 핵심적인 기능을 수행하는 시설물이다. 하지만 우리나라에서 건설된 수많은 배관 구조물이 점차 노후화되고 있는 추세이며, 대부분 도심에 집중적으로 건설되어 있기 때문에, 부식, 균열, 조인트 풀림 등의 손상으로 인한 누출사고 발생 시 막대한 사회·경제적 손실을 초래할 우려가 있다. 하지만 이들은 지하에 배관구조로 복잡하게 연결되어 있어 유지, 관리, 보수가 쉽지 않아 사회적 자원 낭비와 더불어 안전에 심각한 영향을 미치고 있다. 이들의 효과적 유지관리를 위해서는 정기 점검 및 정밀 비파괴 안전진단이 필수적이거나, 이들은 비용도 비싸며 크고 무거운 검사 장비를 접근이 쉽지 않은 현장에 직접 들고가 off-line으로 진행하여 비용 및 시간 면에서 비효율적이므로 배관 구조물의 안전성을 충분히 보장할 수 없다. 즉, 배관의 사용성과 구조적 건전성을 확보하기 위해서는, 운용 중 성능 및 건전성을 평가하는 첨단 구조 건전성 모니터링 및 비파괴 검사기술에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 배관구조물의 손상탐색을 위해 압전센서를 사용한 임피던스 기법과 유도초음파 기법을 이용한 모니터링 기술들을 적용하였고 RMSD, 1-CC등과 같은 손상지수를 통해 정량

* 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 malsi@nate.com
** 성균관대학교 u-City공학과 석사과정 tamasii@gmail.com
*** 성균관대학교 건설환경연구소 tolck81@nate.com
**** 성균관대학교 사회환경시스템공학과 조교수 shparkpc@skku.edu

화해봄으로써 이의 구조물 상태에 따른 일관적이고, 상시적인 모니터링 가능성에 대해 평가해 보았다.

2. 연구내용

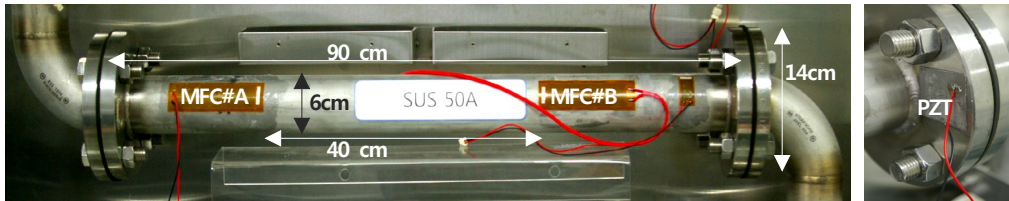
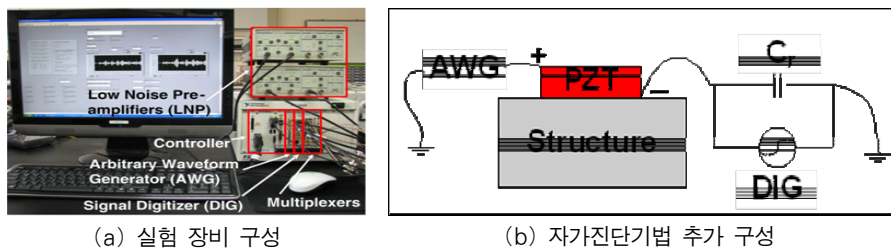


그림 1 배관구조물 시험체 및 센서부착

2.1. 실험세팅 및 방법

실험을 위해 그림1과 같이 시험체를 제작하였다. 관경 6cm, 90cm 길이의 서스관과 동일 관경의 U자관을 지름 14cm 두께 2cm의 연결부에 볼트와 너트 4쌍으로 체결하여 연결하고, 관의 좌측 5cm지점에 P2타입 가로 3.2cm 세로 11cm의 MFC#A를 부착하였고 우측으로 40cm의 거리를 두고 동일한 MFC#B를 부착하였다. 이와 함께 너트 체결부 사이에는 가로세로 3.2cm 정사각형의 PZT 센서를 부착하였다.



(a) 실험 장비 구성

(b) 자가진단기법 추가 구성

그림 2 배관구조물 손상 검색 실험 장비 구성

계측을 위한 장비구성은 그림 2(a)에 나타내었다. 입력신호를 생성해주는 임의 파형 생성기 (AWG), 압전 센서로부터 구조 응답을 측정하는 디지털라이저(DIG), 신호 측정 채널을 자동으로 전환해주는 멀티플렉서 (MUX) 등이 슬롯 형태로 NI-PXI 새시에 삽입되어 작동되어진다. 위 장비들을 제어하기 위해서 내장형 컨트롤러가 위 장비들과 함께 새시에 삽입되며 장비를 구동하기 위한 소프트웨어인 LabVIEW를 이용하여 위 장비들을 제어, 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 센서에서 받은 output신호의 노이즈를 제거하고 신호를 증폭시키기 위한 Low Noise Pre-amplifier(LNP)를 추가적으로 설치하였다. 임피던스기법시에는 그림 2(b)와 같이 추가적으로 센서의 캐패시턴스 값에 대응하는 캐패시터를 병렬로 연결하여 임피던스 값을 계측하였다 (Park, G. et al, 2003). 실험은 크게 연결부 볼트풀림손상 검색, notch 손상 검색의 두 가지 시나리오로 진행되었다. 볼트풀림검색은 연결부의 4개의 볼트 중 0,1,2,3개의 순서로 풀림손상을 증가시켜가며 임피던스기법을 활용하여 계측하였고 배관의 notch 손상검색은 배관에 깊이 2mm, 길이 2.5cm의 notch 손상을 1,2,3개로 증가시키며 임피던스기법과 유도초음파기법 두 가지로 계측하여 정상상태의 신호값과 비교하여 보았다.

2.2. 실험결과

임피던스기법을 통한 배관구조물의 볼트 풀림 손상 검색실험을 위해 볼트를 다 조였을 때와 1,2,3개 풀렸

을 때의 상황에서 볼트체결부 사이에 부착한 PZT 센서를 통해 임피던스 신호를 계측하였다. 시험체의 공진주파수가 잘 나타난 33KHz~36KHz 주파수 범위에서 반복을 통한 일관성확보를 위해 각 25회씩 계측했고 그 값을 평균하여 풀림상태에 따른 변화를 그림 3a에 나타내었다. 볼트 풀림 개수가 1-3개로 증가할수록 정상상태 그래프와의 형태 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 정량적 평가를 위해 손상지수로 사용되는 RMSD와 1-CC값을 구하였고 RMSD를 그림3b에 그래프로 나타내었다. 25회의 모든 반복계측데이터에서 볼트 풀림 개수가 증가 할수록 RMSD와 1-CC값이 증가하는 일관성 있는 결과를 보여줬다.

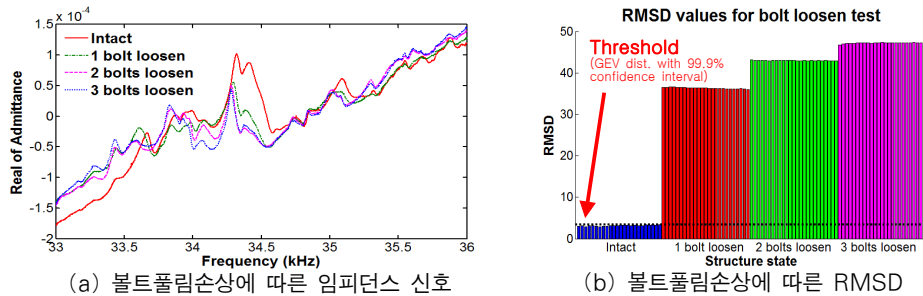


그림 3 임피던스기법을 이용한 볼트풀림손상 검색 결과

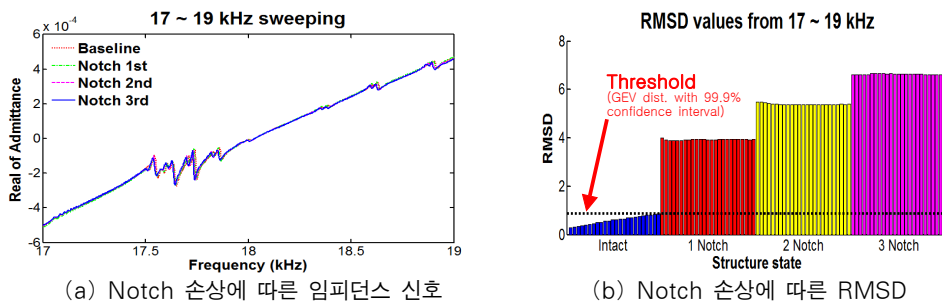


그림 4 임피던스기법을 이용한 notch 손상 검색 결과

배관구조물의 notch 손상 검색을 위해 정상상태와 1,2,3,개의 2mm 깊이 notch 손상상태 4가지 상태에서 임피던스와 유도초음파 두 가지 기법으로 실험을 진행하였다. 임피던스기법을 활용하여 상황별로 25회씩 계측하였으며 17kHz~19kHz 주파수 영역의 정상상태와 notch 손상시 임피던스 그래프의 변화를 그림 4(a)에 나타내었다. 구조물의 공진주파수가 나타나는 17.5kHz~18kHz 영역에서 notch 손상이 증가함에따른 임피던스 그래프의 형태변화를 관찰할 수 있었다. RMSD와 1-CC를 통해 정량적인 분석을 해보았으며 그림 4(b)의 RMSD 그래프를 보면 25회 모두 notch 손상이 증가할수록 RMSD 역시 증가함을 볼 수 있다. 또 다른 주파수 영역인 5kHz~14kHz, 60kHz~70kHz 영역에서도 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

유도 초음파기법을 이용해서도 notch 손상 검색이 가능함을 볼 수 있었다. MFC#A와 MFC#B 사이에 주고받은 파형을 그림 5(a)에서 시간-주파수 영역에 파 에너지양을 색상으로 구분해 그래프로 나타내었다. 시각적으로 손상전과 비교해 손상 후 0.05ms~0.15ms에서 강도가 약해졌음을 볼 수 있다. 여기에서 외부적인 요인으로 인해 발생한 노이즈를 최소화하고 객관적으로 평가하기 위해 Morlet wavelet을 이용한 웨이블릿 변환을 수행하였다(Park, S et al, 2005). 이를 통해 추출한 스케일 45에 대응하는 주파수 90kHz에서의 계측 전압-시간 그래프중 손상정도에 따른 변화가 잘 나타난 0.05ms~0.15ms 구간을 그림5(b)에 나타내었다. notch

손상으로 인해 신호의 진폭이 정상상태보다 감소했음을 볼 수 있다. 손상정도를 정량적으로 보기 위해 각 신호의 에너지값을 나타내는 RMS를 구한 후 손상지수인 RMSD를 구하여 그림 5(c)에 나타내었다. 여기에서 notch 손상의 개수가 증가함에 따라 RMSD 값이 커짐을 볼 수 있다.

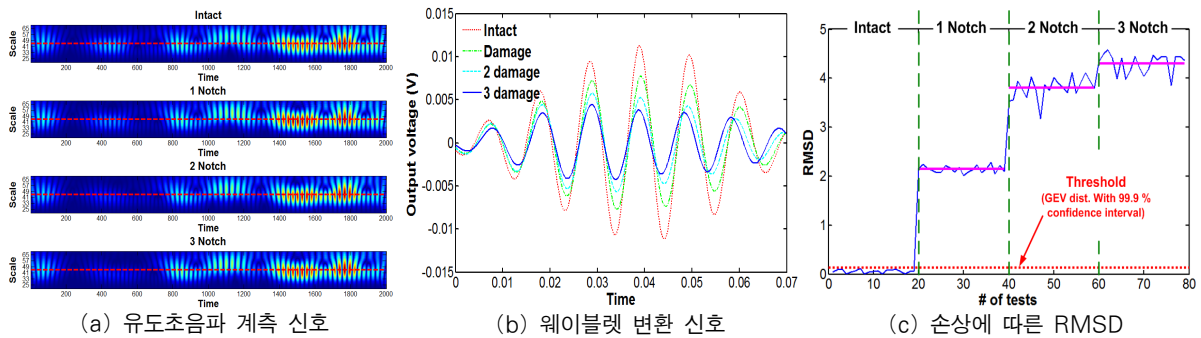


그림 5 유도초음파기법을 이용한 notch 손상 검색 결과

3. 결론

본 연구에서는 압전센서를 사용한 임피던스기법과 유도초음파 기법을 이용하여 볼트로 접합된 배관구조물 연결부의 볼트 풀림과 배관구조물의 notch 손상 검색 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 임피던스기법을 사용한 실험에서 풀린 볼트의 개수와 notch 손상의 개수가 증가함에 따라 임피던스 신호의 공진주파수의 변화가 더 크게 나타났고 신호처리 기법인 RMSD를 통하여 구조물 손상 정도에 따른 임피던스의 차이를 정량적으로 파악할 수 있었다.
2. 유도초음파 기법을 사용한 실험에서 notch 손상 개수가 증가함에 따라 신호 진폭이 감소함을 볼 수 있었고 웨이블릿 변환 후 RMSD를 통해 정량적인 손상정도에 따른 변화를 볼 수 있었다.
3. 본 실험에서는 임피던스기법이 유도초음파 기법보다 배관구조물손상에 따른 계측신호의 변화가 더 일관성 있고 정확하게 나타났다.
4. 추후 유체가 흐르는 실제 환경과 유사한 배관구조물에 적용하여 환경적 변수의 영향에 대한 제어 기법에 관한 지속적인 연구가 수반된다면 배관구조물 건전성 모니터링 기술로서의 적용이 가능할 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 u-City 석·박사 과정 지원사업의 지원과 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(06국토정보C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J. (2003) Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward, *The Shock and Vibration Digest*, 35(6), pp.451~463.
- Park, S., Yun, C., Roh, Y. (2005) Efficient use of Lamb waves and wavelet coefficients for damage detection of steel structures, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(3A), pp.521~530.