

주파수 및 시간-주파수 분석 기법을 적용한 내압 및 잔압 파이프 이상 진단 시스템 설계에 관한 연구

송제호*, 박의준**

*전북대학교 융합기술공학부(IT응용시스템공학)

**전북대학교 IT응용시스템공학과

e-mail:songjh@jbnu.ac.kr

A Study on the Design of an Internal Pressure and Residual Pressure Pipe Abnormality Diagnosis System applying Frequency and Time-Frequency Analysis Techniques

Je-Ho Song*, Eui-Jun Park**

*Dept. of Convergence Technology Engineering(IT Applied System Engineering), Chonbuk National University

**Dept. of IT Applied System Engineering, Chonbuk National University

요약

산업 설비에서 사용되는 배관은 고온·고압 유체의 운반 경로로 활용되며, 점검 과정에서 배관 내부의 잔류 압력이나 유체의 존재 여부를 정확히 진단하는 것은 작업자의 안전과 설비 보호에 매우 중요한 요소이다. 그러나 기존의 점검 방식은 대부분 시각적 관찰이나 간접적인 계측 방식에 의존하고 있어, 신속하고 정량적인 판단에는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 배관 표면에 인위적인 음향 충격을 가하여 발생하는 진동 신호를 분석함으로써, 비접촉 방식으로 배관의 내압 상태와 잔압 유무를 진단할 수 있는 시스템을 설계하였다. 제안된 시스템은 음향 발생기, 센서 모듈, 신호 분석 회로, 복합 알고리즘 기반 해석기 등으로 구성되며, 웨이블릿 변환, 신호 예측 기반 LPC 분석, LCR 기반 통계 분석, 스펙트럼 비교 등 다양한 해석 방법을 결합하여 이상 유무를 판단한다. 실험은 서로 다른 직경의 금속 배관을 대상으로 내부가 비어 있는 경우와 유체로 가득 찬 경우에 대해 반복 측정되었으며, 상태에 따라 진동 신호의 특성이 뚜렷이 구분됨을 확인하였다. 특히 시간-주파수 영역 분석을 통해 진단 정확도를 높일 수 있었으며, 각 분석 기법은 서로 보완적으로 작용하여 진단의 신뢰도를 향상시키는 데 기여하였다. 본 시스템은 구조 단순성과 안전성, 분석 효율성 면에서 기존 방식 대비 우수한 장점을 가지며, 향후 실시간 상태 모니터링과 자동 경고 시스템과의 연계를 통해 다양한 산업 설비의 스마트 점검 시스템으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

산업 현장에서 사용되는 배관 시스템은 생산 공정의 핵심 설비로서, 다양한 유체를 고온과 고압의 조건에서 안정적으로 운반하는 역할을 수행하고 있다. 특히 플랜트 설비, 제약 공정, 반도체 제조와 같은 정밀 산업에서는 배관의 내부 압력 상태를 실시간으로 정확히 파악하는 것이 시설의 안정성과 직결된다. 하지만 일반적인 유지보수 과정에서는 배관 내부의 잔류 압력이나 잔여 유체의 존재 여부를 외부에서 직접 확인하는 데에 한계가 있으며, 이로 인해 예상치 못한 사고나 작업 지연이 빈번하게 발생하고 있다.[1]

기존에 활용되는 점검 방식은 주로 시각적인 관찰이나 경험에 의존한 판단에 머무르는 경우가 많아, 정량적인 데이터 기반의 이상 진단에는 적합하지 않다. 또한 복잡한 배관 구조나 고위험 환경에서는 검사 자체가 어렵거나, 고비용 장비의 사용이 요구되

어 실효성 측면에서 한계가 존재한다. 따라서, 배관 내부 상태를 안전하고 신속하게 진단할 수 있는 새로운 방법론의 필요성이 제기되고 있다.

본 논문에서는 외부에서의 음향 충격을 활용하여 배관 내 상태를 진단하는 시스템을 설계하고, 이를 통해 내부 압력 또는 잔류 물질의 유무를 정량적으로 판단할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안된 시스템은 시간-주파수 분석 기법을 포함한 다양한 신호 처리 알고리즘을 기반으로 하며, 웨이블릿 분석, 신호 예측 기반 분석, 그리고 진동 반응의 통계적 특징 추출 등을 결합하여 전체적인 진단 정확도를 향상시키는 것을 목표로 한다.

2. 본론

진단 시스템은 음향 신호를 발생시키는 장치, 진동을 감지하는 센서 모듈, 신호를 변환하고 수집하는 하드웨어 회로, 그리고 다

양한 해석 알고리즘이 구현된 분석 소프트웨어로 구성된다. 음향 발생 장치는 배관 표면에 일정한 충격을 가함으로써 공진 음을 생성하며, 이때 발생하는 진동은 배관 내부의 상태나 압력에 따라 고유한 반응 패턴을 보이게 된다.[2] 감지된 진동 신호는 아날로그 형태로 수신되며, 이후 디지털로 변환되어 분석 모듈로 전송된다.

분석 모듈은 신호의 전처리를 수행한 후, 시간 영역과 주파수 영역에서의 특징을 동시에 추출하는 구조로 설계되었다. 이를 위해 비정상 신호 분석에 효과적인 웨이블릿 변환이 우선 적용되며, 이와 함께 예측 계수 기반의 신호 구조 분석을 위한 LPC 알고리즘, 기준치를 초과하는 신호 변화의 빈도를 측정하는 LCR 계산 기법 등이 통합적으로 활용된다.[3,4] 추가적으로 유사도 분석을 위한 거리 계산 기법과 스펙트럼 해석도 함께 적용되어, 복합적인 기준에 따라 상태를 판별할 수 있도록 구현되었다.



[그림 1] 내압 및 잔압이 있는 파이프 이상 여부 진단 시스템 설치 모습

그림 1은 파이프의 이상 여부 진단을 위해 파이프에 시스템을 설치한 모습이다. 실험은 서로 다른 직경을 가진 철재 배관을 대상으로 수행되었으며, 각 배관은 내부가 비어 있는 상태와 물이 가득 찬 상태로 나누어 실험이 진행되었다. 음향 충격은 일정한 세기로 반복적으로 가해졌으며, 각 상태에서 수집된 신호는 독립된 기준값으로 저장되었다. 분석은 상태별 반응 차이를 정량적으로 비교하는 방식으로 이루어졌으며, 기준값과 측정값 간의 차이를 기반으로 이상 여부를 판별하였다. 기준값은 파이프가 빈 상태일 때 측정하였으며, 이는 표 1에 나타내었다.

[표 1] 파이프 직경에 따른 Empty 상태 기준값

		30 mm	50 mm	140 mm
Empty	LCR(avg)	13.7	10.8	8.1
	Energy(avg)	88.1	83.1	86.1
	LPC Distance	14.7	10.9	7.6

그 결과, 비어 있는 배관은 상대적으로 고주파 성분이 풍부하고 신호의 패턴이 일정하게 나타난 반면, 내부에 유체가 존재하는 배관에서는 진동의 감쇠가 빠르게 발생하였고, 주파수 응답 범위가 제한되는 경향을 보였다. 특히 신호의 변화 횟수를 정량화한 LCR 분석에서는 두 상태 간의 뚜렷한 차이가 관찰되었으

며, 예측 계수 기반 분석에서도 유사하지 않은 신호 간의 예측 오차가 명확히 증가하는 것으로 나타났다. 웨이블릿 분석의 경우, 시간-주파수 분포의 에너지 밀도와 패턴에서 내부 상태에 따른 구분이 분명히 드러났다.

이러한 실험 결과는 각 알고리즘이 서로 다른 분석 관점을 제 공함으로써 진단의 신뢰도를 향상시키는 데 기여함을 보여주며, 단일 기준이 아닌 복합 조건에 따른 분석이 이상 판단의 정확성을 높일 수 있음을 시사한다.

3. 결론

본 논문에서는 음향 기반 진단 방식을 활용하여 배관 내부의 잔류 압력이나 유체 존재 여부를 파악할 수 있는 내압 및 잔압 파이프의 이상 진단 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 정량적 신호 분석을 통해 기존의 시각적 또는 경험적 판단 방식의 한계를 보완하고, 다양한 배관 조건에 유연하게 대응할 수 있도록 설계되었다.

실험 결과, 주파수 반응 분석과 신호 예측 기반 비교 분석, 시간-주파수 영역 통합 분석을 활용한 복합 진단 기법이 배관 상태 판별에 효과적으로 작용하였으며, 각각의 알고리즘이 보완적으로 진단 성능을 향상시키는 역할을 수행함을 확인하였다. 제안된 시스템은 진단 정확도뿐만 아니라 분석 시간, 적용 용이성 측면에서도 산업 현장에서 실용적으로 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

향후 연구에서는 다양한 재질의 배관이나 고온-고압 환경에 대한 적용 실험을 확대하고, 실시간 모니터링 기능 및 자동 경고 시스템과의 연계를 통해 기술의 실용성과 응용 가능성을 더욱 강화할 계획이다.

참고문헌

- [1] 송제호, 박의준, “고유음향 신호 분석을 통한 내압 및 잔압 파이프와 탱크의 안전 진단 시스템 설계에 관한 연구”, *한국산학기술학회 학술대회 논문집*, 한국산학기술학회, pp.185-187, 2024
- [2] 진성민, “소리 물리학의 기본 개념”, *대한음성언어의학회지*, Vol.22, Issue 2, pp.99-102, 2011
- [3] S. R. Penedo, M. L. Netto and J. F. Justo, “Designing digital filter banks using wavelets”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2019, Vol.2019, pp.1-11
- [4] M. Vetterli and C. Herley, “Wavelets and filter banks: Theory and design”, *IEEE transactions on signal processing*, 1992, Vol.40, Issue ARTICLE, pp.2207-2232