

타격음 주파수 분석법에 의한 원통 병렬 구조물의 파손 여부 식별에 관한 연구

A Study on the Detection of Defects from Parallel Cylindrical Objects Using Spectral Analysis of Acoustic Impact Signal

방 호 균*, 조 철 우*
(H. K. Bang*, C. W. Cho*)

요 약

본 논문은 충격 음향법에 의한 원통형 물체의 결함 검출 방법에 관한 원리와 실험 결과를 기술한다. 원통형 물체가 가지게 되는 공진 주파수는 물체의 직경, 길이 등의 물리적 크기에 따라 결정되며 이러한 원통형 물체를 자유 공진 시킬 경우 구조물 고유에 주파수 및 고조파 성분이 내포된 음향을 발생시킨다. 결함이 존재하는 물체에 충격이 가해질 경우 발생하는 음향은 정상인 경우와 구별되며, 주파수 성분 분석을 통해 보다 명확한 식별이 가능하다. 본 연구에서 적용된 음향 충격법에 의한 결함 검출 기법은 연구 대상 물체의 경우 결함 유무를 완벽하게 판정할 수 있었으며, 차후 유사한 형태의 구조물에 대한 결함 검출에도 응용될 수 있다.

ABSTRACT

This paper describes principles and experimental results in conjunction with examining the possibility of the detection of defects from a cylindrical objects.

Cylindrical objects have its own resonance frequency. The frequency varies according to the diameter, length etc. And acoustic sound, whose frequency and the harmonic components corresponding to resonance frequency, is radiated from the object.

When an object have defect in itself, the radiated acoustic sound is different from normal one. So we can detect its defect by analysing frequency components of acoustic sound.

We proved that detection of defective objects by acoustic signal analysis is possible automatically. Also the result can be applied to other kinds of objects.

I. 서 론

*창원대학교 제어계측공학과
접수일자: 1994년 10월 1일

물체에 충격이 가해지면 구조물 고유의 진동으로
방사음이 발생된다. 이러한 공진음을 이용한 실험으로

철도 검수원이 바퀴의 파손을 검사하는 다음진단과 자동차 정비공의 엔진 이상 진단은 오래전부터 실행 끝에 적용되어왔다. 이런 경우 숙련공의 경우 대상물의 파손, 이상 유무뿐 아니라 녹의 두께까지 인지가 가능하며, 이러한 음색의 특이성을 이용하여 제측 시스템 및 자동화를 구현할 수 있다. 그러나 아직 이러한 비파괴검사에 의한 물체의 결함검사나 제측방법의 자동화에 관해서는 별로 잘 알려져 있지 않다[1][2][3].

대상 물체를 분해하거나 손상시키지 않고 물체의 이상 및 파손 여부를 판별하는 비파괴 검사법은 그 원리에 따라 여러가지 방법이 있으나, 그 중에서도 음향학적인 방법은 현재 초음파를 이용한 방법과 음향 충격법을 사용한 방법이 많은 관심을 모으고 있다. 초음파 검사법은 기지의 주파수, 진폭, 위상으로 구조물에 대한 세밀한 추정이 가능하다는 장점이 있으나 제측의 자동화에는 어려움이 있다. 음향 충격법은 다시 가속계를 이용한 방법[4][5]과 방사 공진음을 채집하는 방법으로 나뉘는데, 방사 공진음의 주파수와 진폭은 대상물의 형상에 관한 정보를 내포하고 있다[6]. 현재 방사되는 음향의 정보를 분석하여 물체의 특성을 추정하는 방법이 널리 연구되고 있다[6][7][8]. 이러한 방법은 다른 방법에 비해 비교적 자동화가 용이하다.

본 연구에서는 물체에 충격을 가했을 때 발생하는 공진음의 특성변화를 이용하여, 기존의 수작업에 의한 평가 식별로 행해지고 있는 결함 검출법을 대신하여 자동으로 식별하는 방법을 개발하여 대상 물체 검사의 자동화에 적용 가능성을 확인하였다.

II. 이 론

1. 관의 진동 주파수 해석

탄성을 가진 봉에 강한 충격이 가해지면, 그 충격의 에너지에 따라 봉은 탄성 한계내에서 변형되며, 외력에 대항하여 평형의 위치에 있으려는 작용 때문에 미소한 진동이 발생한다. 이러한 미소 진동은 변위가 봉의 길이 방향으로 발생하는 종진동과 복원력과 관성력에 의해 발생하는 횡진동으로 나뉘어진다. 일반적으로 관의 단면이 봉의 길이에 비해 작은 경우, 충격에 의해 발생하는 공진은 횡진동이 종진동에 비해 안정된다. 자유공진 상태에서 횡진동을 하는 막대의 경우 그 진동수는 다음과 같이 표시된다[6][9].

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{Y}{\rho_0}} \quad (1)$$

여기서 l 은 관의 길이, $Y(N/m^2)$ 는 재료의 Young 스텔 그리고 밀도 $\rho_0(kg/m^3)$ 를 의미한다.

2. 타격음에 의한 주파수 분석방법

공진 주파수에 의한 파손여부의 추정을 위하여 일반적으로 알려진 시간-주파수 변환 방법인 고속 푸리에 변환을 이용했으며, 음향특성을 분석하기 위하여 스펙트로그램을 사용하였다. 스펙트로그램의 가로축은 시간을 나타내며 세로축은 고속푸리에 변환된 주파수 성분을 나타내므로 이를 이용하면 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 한눈에 관찰할 수 있다. 이 해석방법은 시간에 따른 주파수의 변화를 쉽게 관측할 수 있게 해주고 과도음과 여러가지의 공진음을 시각적으로 변별할 수 있게해 준다.

III. 실험 방법 및 결과

1. 구조물

구조물의 형상은 병렬 원통 파이프 3 개가 병렬 연결된 형태로 외각의 두 관의 크기가 같다. 재질은 강철합금이며 타격시 강한 금속성의 공진음이 발생된다. 각 파이프 양단은 동일 형상의 2개의 강철 지지대로 고정되어 있다. 용접 부위의 파손을 크랙으로 정의한다. 주어진 구조물은 타격을 받을 경우 기본적으로 관의 물리적 성질에 따른 고유 진동이 일어나는



그림 1. 구조물의 형상

데, 구조물에 이상이 있을 경우 정상적인 구조물과는 다른 공진주파수 성분과 공진음의 지속시간의 변화를 보여준다.

구조물에서 좌우의 파이프는 외경 4.7 cm, 내경 4.0 cm 그리고 총 길이는 27.5 cm이며, 중앙의 관은 외경 3.15 cm, 내경 2.5 cm로 좌우 관에 비해 조금 작고 외경과 동일한 길이를 가지고 있다. 파이프의 양단을 고정해주는 강철 지지대는 좌우 길이 17.3 cm, 두께 1.8 cm, 폭 5.35 cm이며 지지물의 중앙에 하나의 파이프를 그리고 지지물의 좌우에 두 개의 파이프가 배치되어있다.

시료로 사용된 구조물은 총 7 개로, 정상적인 2 개의 구조물과 이상이 있는 구조물 5 개였다. 이상 구조물은 정상적인 구조물이 사용도중 외부로부터의 힘에 의해 천공, 크랙, 뒤틀림등이 발생한 것이다. 이들 시료들은 강한 충격에 의해 3 개의 파이프 중 한 개 이상이 휘 경우, 세 개의 파이프를 연결하는 관과 파이프와의 용접부가 파손된 경우등 실제 발생할 수 있는 이상 구조물의 대표적인 형태를 지니고 있다.

이상 구조물에 대한 자세한 설명을 첨가하면, 구조물 2의 경우, 구조물이 좌우 상하 대칭 형태를 띄고 있으므로 구조물에 붙여진 식별표지를 중심으로 단지 우측 상단만이 파이프와 지지물 사이의 용접에 균열이 발생한 결함 형태를 지니고 있다. 구조물 3의 경우 좌측 하단에 관의 상하로 길이 5 cm, 폭 0.5 cm 정도가 파열되어 있었으며, 중앙의 관의 중심점에서 좌상 우하로 10 도 정도의 뒤틀림이 있다. 구조물 4는 중간 원통의 하단 1/3 지점에 깊이 2 cm 정도의 함몰로 완전한 관의 형태는 상실했다. 구조물 5는 하단의 용접이 완전히 파괴되어 강철 지지물의 관의 상하로 움직일 정도로 매우 심한 이상 상태를 지니고 있으며 구조물 6은 중앙의 관의 1/2 지점에 깊이 2 cm 정도

의 함몰과 1/3 지점에 관의 상하로 길이 2.5 cm, 폭 3.5 cm 가량의 구멍이 발생한 구조물이다.

표 1. 구조물의 상태

종 류	상 태
구조물 1	정 상
구조물 2	우측상단용접불량, 균열
구조물 3	좌측하단파열, 뒤틀림
구조물 4	중간 원통 휨
구조물 5	하단 용접 들뜸
구조물 6	중간 원통 파열
구조물 7	정 상

이상과 같은 형상의 구조물들에서는 결함의 종류가 다양하고 규칙적이지 못하며, 결함의 발생 위치가 임의적이기 때문에 결함이 있는 물체와 정상적인 물체의 식별을 구조의 변화에 따른 음향성분 해석법으로 행하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 물체의 외부에서 관찰된 방출되는 신호의 음향적 특성에 의해서만 결함여부를 판단하는 실험을 행하였다.

2. 시스템 구성

가. 방음 및 흡음 장치

구조물에 가해진 충격에 의한 방사음은 강한 금속성의 음향으로 주변 환경의 울림 현상을 유발하며, 이러한 방사음에 의한 울림과 컴퓨터 팬 소음등의 잡음을 줄이기 위하여 흡음 및 방음 장치가 필수적으로 요구된다. 본 실험에서는 합판과 흡음성을 갖는 다공질의 천으로 구성된 간이 흡음 장치를 사용하여 반향음을 줄였다[9].

타격시 대상 구조물에서 발생하는 음향이 순수한 물체만의 진동이 되기 위하여는 주변 환경과의 공진

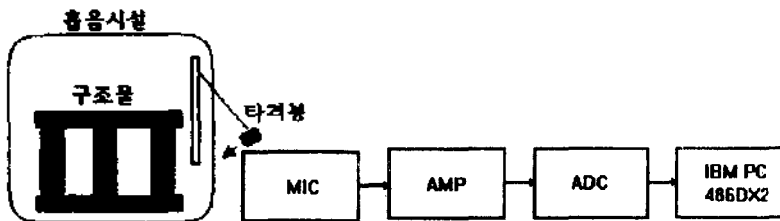


그림 2. 신호 입력 및 처리 장치

현상이나 외부의 영향에 의한 진동주파수의 변형을 막기 위하여 순수한 물체만의 공진이 발생하도록 할 필요가 있다. 이상적 방법은 물체가 공중에서 자유진동하게 하는 것이나 실제 구현이 어려운 관계로 가능한 외부 환경에 의한 상호 간섭을 줄이는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 석고판을 사용하여 물체의 진동이 외부의 영향을 받는 현상을 최대한 줄였다. 이 경우 물론 자체의 진동이 줄어들기는 하나 정상적인 물체와 결합이 있는 물체와의 상대적인 비교에는 충분한 공진음이 발생하였다.

나. 타격봉과 지지대

타격봉은 공진을 균일하게 일으키기 위해 가능한 면 구조물과 접촉 면적이 작은 원형으로 하였다.

지지대는 타격봉의 자루 부분에서 20 cm 떨어진 곳을 고정하여 회전하는 반자동의 기구를 구성하였다. 이러한 상치는 수작업에 비해 균일한 타격 조건을 만들어 줄 수 있으며, 타격 강도의 가변이 가능하다.

만일 이러한 장치를 실제 자동화 과정에 적용한다면 일정한 타격을 만들어 주는 장치를 통하여 보다 정규화된 타격 조건을 만들어 주는 것이 효과적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

다. 마이크

INKEL사의 YM-1500형의 DYNAMIC MICROPHONE으로 600ohm의 임피던스를 가진다. 마이크는 편지향성의 특성을 갖고, 마이크와 대상물체와의 거리는 공진구가 있는 지점의 외측 15cm정도가 적절하다.

라. A/D 변환기

16 bit의 주파수 가변형, 가변 LPF가 내장된 시판 제품을 사용하였다. 내장형으로 PC 탑재가 용이하고 가변 LPF의 내장으로 별도의 부가 장치 없이 실험을 수행할 수 있었다. 본 실험에서는 대상물의 최대공진대역의 2 배 이상인 22kHz로 표본화하였다. 표본화는 실험적으로 구조물의 가장 강한 공진 주파수가 출현하는 주파수 대역이 10kHz정도였으므로 20kHz로 표본화를 잡았으나 본 실험에서는 저렴한 시스템을 구성하기 위하여 A/D 변환기로 상품화된 저가의 신호입력보드(사운드카드)를 사용하였기 때문에 20kHz보다 약간 높은 22kHz로 결정하였다.

마. 컴퓨터

수치연산기가 내장된 INTEL 486DX2-66 CPU가 탑재된 IBM 호환 기종의 컴퓨터를 사용하였다. 제안된 방법에 의하여 별도의 추가 연산장치가 없이도 실시간 판정이 가능하였다.

3. 신호 분석을 통하여 얻은 결과

구조체를 타격할 경우, 구조물의 고유진동수에 따른 공진음향이 발생한다. 그림 3(a)에서 파형의 시작 부분은 타격이 가해지는 순간에 일어나는 음향으로 과도음이라 정의하며, 이러한 과도음은 구조물의 고유특성을 갖는 공진현상이 안정되기 전에 발생하는 음향으로 매우 불안정하고 많은 잡음이 포함되어있다. 이러한 불안정한 상태에서 발생된 공진음은 구조물이 안정된 이후 발생하는 공진음에 비해 구조물 고유에 정보를 도출하기 어렵다. 반면 자유 공진음이 방사 되는 구간에서 발생하는 음향은 매우 안정되어 있으며, 공진 주파수를 추정하기가 용이하다. 본 연구에서는 이러한 이유로 공진음이 존재하는 안정된 구간에서 해석을 시도하였다.

구조물에 대한 이상 판정을 위하여 물체의 서로 다른 6부분에 대하여 각 10 회씩 음향을 수집하여 시간 파형과 스펙트로그램을 이용하여 비교 분석하였다. 스펙트로그램의 가로축은 시간축을 세로축은 주파수축의 눈금을 나타낸다.

시간 파형에서 드러난 특징으로 이상 구조물은 진동 역제 성분의 증가로 신호의 급격한 감쇠가 발생하였다. 스펙트로그램에서는 정상적인 구조물에 비해 공진 주파수의 크기와 길이가 매우 불안정하고 지속 시간이 짧은 특징을 드러냈다. 또한 에너지의 분포 상태가 흩어져있다.

그림 3과 4, 5, 6은 정상 구조물과 결합을 갖고 있는 이상 구조물을 시간영역과 주파수영역의 분석을 통해 얻은 결과를 비교한 것으로 이상 구조물은 에너지의 급격한 감쇠로 방사음의 진폭이 빠르게 줄어들고, 주파수가 분산되어 공진 주파수 및 고조파가 명확하게 드러나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이런 특징들을 종합하여 구조물의 결합을 검출하는 근거로 삼았으며, 본 연구에서는 공진 주파수의 에너지와 전체 에너지의 비를 이용하여 결합 검출을 시도하였다. 그리고 식(1)에 의한 공진 주파수의 개략적 수치해석을 시도하였으나 대상 물체가 특수한 목적에 사용되는 이유로 시료의 재질 상수를 구하는 것이 불가능하

있고 결합물체의 형상도 임의성이 있어서 해석에 의한 시도를 포기하고 유한요소 분석에 의해서만 판정을 시도하였다.

이러한 공진 특성은 구조물의 형상에 따라 달라지므로 다른 형태의 구조물에 적용하기 위해서는 이러한 통계적 분석 과정이 선행되어야한다.

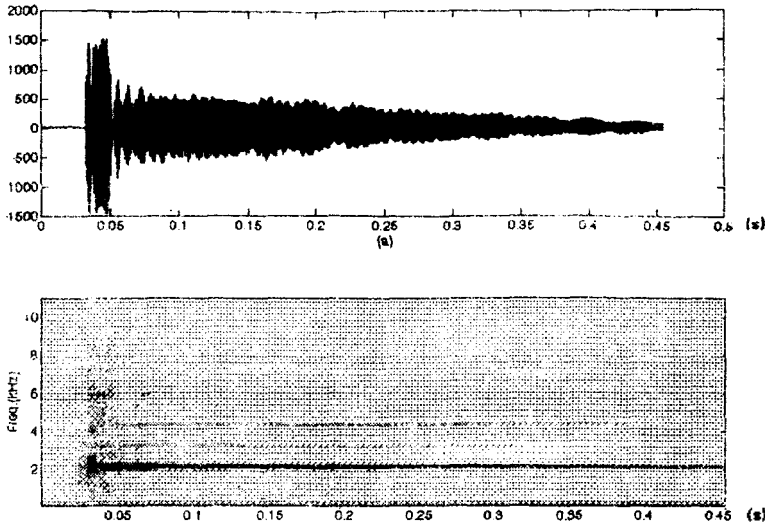


그림 3. 정상 구조물의 시간, 주파수파형 (OBJ1)
(a) 시간파형, (b) 스펙트로그램

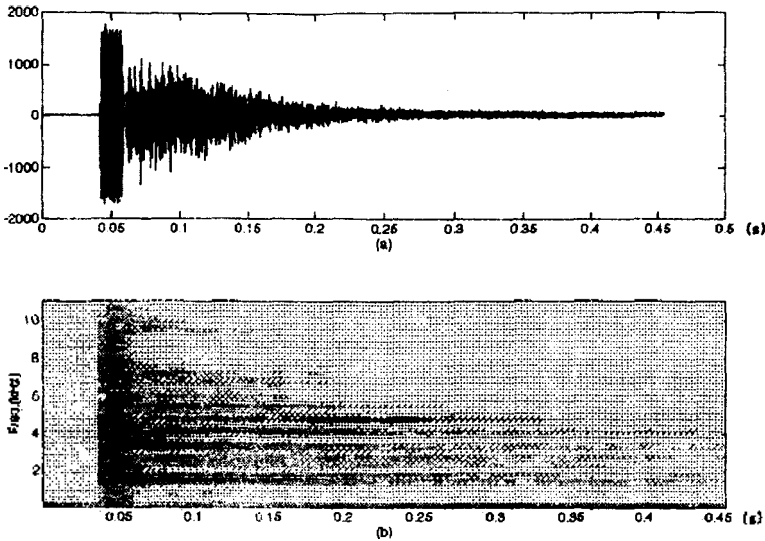


그림 4. 용접이상구조물의 시간, 주파수파형 (OBJ2)
(a) 시간파형, (b) 스펙트로그램

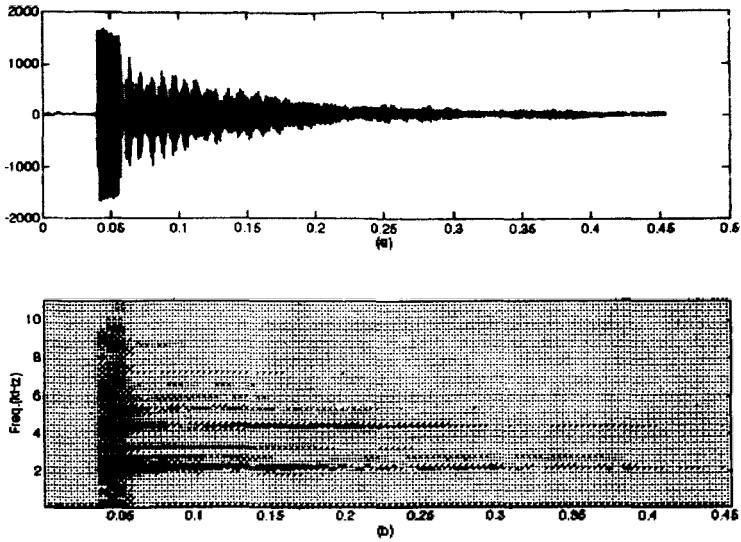


그림 5. 원통 휨 구조물의 시간, 주파수파형 (OBJ4)
(a) 시간파형, (b) 스펙트로그램

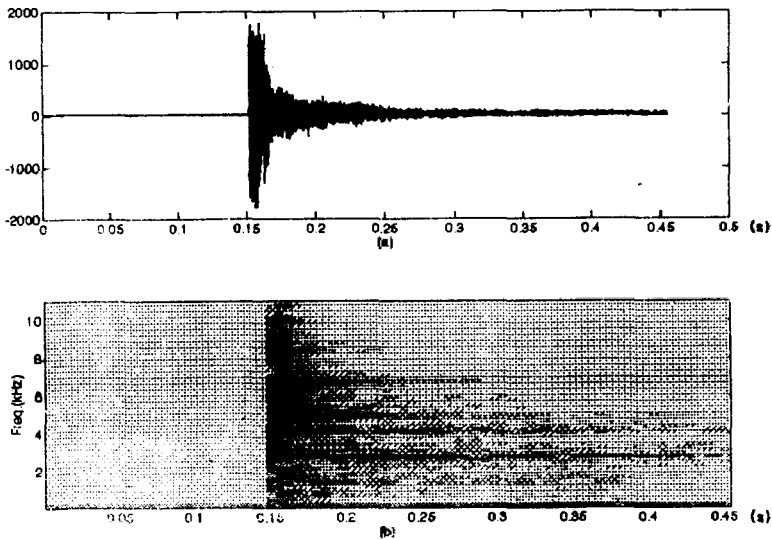


그림 6. 크랙 구조물의 시간, 주파수파형 (OBJ5)
(a) 시간파형, (b) 스펙트로그램

4. 신호 처리 방법

다양한 타격조건에 따라 발생하는 신호의 크기에 따른 변화를 줄이기 위해 입력되어진 신호를 절대 크기를 가지는 값으로 정규화를 해준다.

$$\bar{x}(t) = \frac{x(t)}{\max(x(t))} \quad (t_1 < t < t_2) \quad (2)$$

(t_1 : 신호의 시작, t_2 : 신호의 끝)

위의 식에서 $x(t)$ 는 입력된 신호를 의미한다. 신호가 검출된 구간에서의 최대치로 모든 신호를 나누어 주면 최초 타격신호의 크기가 동일하게 되어 비교가 용이하게 된다.

결함 판정은 최초 타격지점으로부터 0.1초 지점에서 1024점의 데이터를 취하여 행한다. 이렇게 구간을 택한 이유는 신호의 최초의 타격 위치로부터 동일한 시간이 경과한 뒤의 신호를 분석하여 신호의 감쇠의 정도를 판별하기 위한 것이다. 그림에서의 눈금표시는 단지 시간에 따른 신호의 상대적 위치를 나타내기 위한 것으로 신호의 분석 구간 지정과는 무관하다.

이러한 분석 구간은 타격에 인한 잡음이 배제되고, 구조물에 특성을 명확하게 확인할 수 있는 지점으로 설정했다. 그림 3, 4, 5와 6에서 정상적인 구조물과 이상구조물을 설정된 시간대에서 비교하면 시간과형의 경우 이상 구조물은 신호 자체가 급격히 감쇠되는 특징을 보여준다. 스펙트로그램에서는 정상적인 구조물은 공진주파수가 지속적으로 존재하나, 이상구조물에서는 공진주파수를 매우 빠르게 잃고 공진주파수와 잡음성의 신호와 구분이 어렵다.

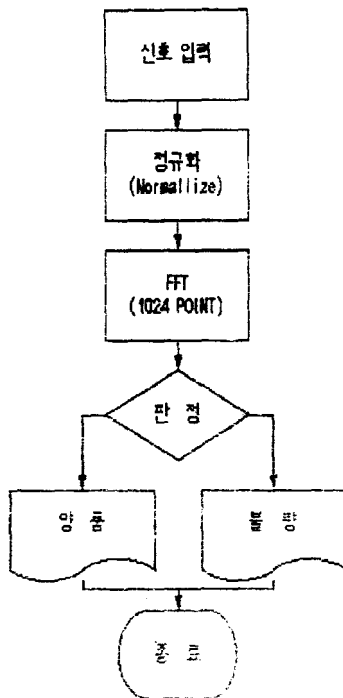


그림 7. 신호처리 흐름도

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_o(n) e^{jk \frac{2\pi n}{N}}, \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$E_R = \frac{E_B}{E_T} = \frac{\sum_{k=m}^{m+N} X(k)}{\sum_{k=0}^{N-1} X(k)} \quad (4)$$

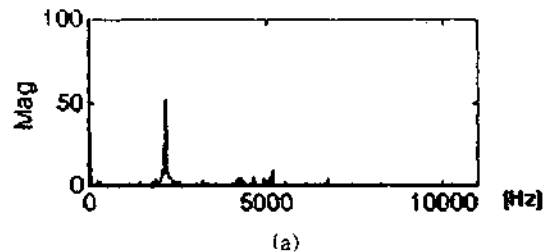
$$\begin{cases} E_R \geq E_{TH} \\ E_R < E_{TH} \end{cases} \quad (5)$$

정규화된 신호는 1024점의 고속푸리에변환을 통해 전체 에너지(E_T)와 공진 대역의 에너지(E_B)로 에너지의 비(E_R)를 구하며 연산 결과는 약 21.5Hz의 해상도를 가지게 된다. 구해진 에너지의 비와 설정된 문턱값(E_{TH})과 비교로 정상 구조물과 이상 구조물을 판정한다.

고속푸리에변환의 점(點)수는 신호의 감쇠율을 반영하고, 주파수오차를 줄이면서 실시간 판정에 적합한 최소 갯수를 선택했다[6][7].

5. 타격 부위에 따른 결과

본 연구에 사용된 시료는 병렬 원통형의 구조물로 타격 부위와 이상이 발생한 부위가 다를 경우에 대한 검증이 필요하였다. 3.3절에서 설명하였듯 본 실험에서는 타격에 의한 운동이 구조물 전체에 진행된 이후의 안정된 구간에 대한 해석을 시도하므로 타격 위치는 큰 영향을 미치지 못한다. 그림 8은 타격 부위에 따른 공진음의 구조를 보인 것으로 그림에서 알 수 있듯이 타격의 위치에 무관하게 유사한 공진특성을 나타내었다. 판의 중심부를 타격할 경우 가장 안정되고 신뢰도 있는 자료를 얻을 수 있으므로 본 연구에서는 판의 중심부를 타격점으로 선정하였다[6][9].



(a)

IV. 결 론

본 연구는 축재 수산업에 의하여 이루어져왔던 비파괴 검사법의 자동화 가능성을 검증하기 위하여 이루어졌던 실험으로, 대상 시료에 대한 완벽한 이상 유부 검증으로 자동화의 가능성을 입증하였다. 본 연구에 사용된 시료는 특수 목적에 사용되는 시료의 특성상 제한된 시료에 의한 실험만을 행할 수 밖에 없었으나 실제 현장에 적용하기 위하여는 보다 많은 통계자료 수집에 의한 자료확보가 필요하다.

본 연구에서 제시한 시스템은 다만 자동화 가능성을 검증하기 위한 실험으로 실제 자동화 시스템에의 적용을 위해서는 타격조건 및 외부 잡음 차단 장치에 대한 보완 및 다수 표본으로부터의 통계적 특성 파악이 필요하다. 앞으로 본 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 다양한 형상의 물체에 대한 음향 신호를 이용한 계측을 자동화하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Hiroshi KOYAMA and Kajiro WATANBE, "音響法によるガスパイプラインの識まりの推定," 計測自動制御學會論文集 Vol. 26, No. 3, pp.259-265, 1990.
2. Kajiro WATANABE, Hiroshi KOYAMA and TANOGUCHI, "音響法によるガスパイプラインのピンホール場所の推定," 計測自動制御學會論文集 Vol. 27, No. 1, pp.5-11, 1991.
3. Junichi SUGIYAMA and Shiro USUI, "打音信號によるマスクメロンの非破壊品質評價," 計測自動制御學會論文集 Vol. 26, No. 4, pp.367-374, 1990.
4. 황병일, "가늘고 긴 파이프의 양단 자유진동 특성에 관한 연구," 아세아기보, 1993.
5. 한윤식 외2, "진동 신호의 방향 파워 스펙트럼을 이용한 엔진의 실화 실린더 탐지," 한국자동차공학회논문집 제 1 권 제 2 호, pp.49-59, 1993.
6. Mitsunobu SATO, Makoto TABELI, Mitsuhiro UEDA and Nobuaki HARA, "打撃音スペクトルによる機械部品の形状識別," 電子情報通信學會論文誌 J71-A No. 6, pp.1333-1336, 1988.
7. Makoto TABELI and Mitsuhiro UEDA, "FFTの用いた高精度周波數決定法," 電子情報通信學會論文誌 J-70A no. 5, pp.798-805, 1987
8. 김정태, "진동 및 음향신호를 이용한 기계의 상태진단에 관한 연구," 한국음향학회지 9 권 1 호, pp.5-14, 1990.

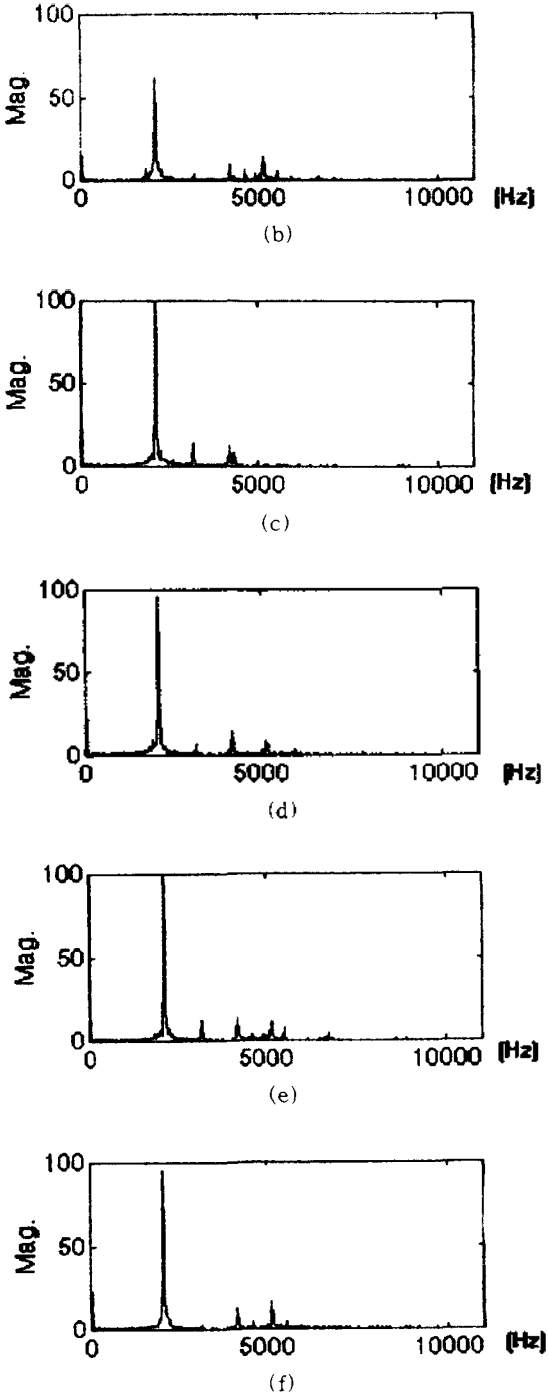


그림 8. 타격부위에 따른 방식음(OBJ7)
 (a) 좌측상단, (b) 우측하단, (c) 좌측중앙,
 (d) 우측중앙, (e) 좌측하단, (f) 우측하단

9. 차일환, "음향공학개론," 전영사, pp.52-54, pp.113-114, pp.285-286, 1987

▲방 호 균



1970년 8월 13일생

1994년 2월 : 국립 창원대학교 공과대학 제어계측공학과 졸(공학사)

1995년 3월~현재 : 국립 창원대학교 제어계측공학과 연구조교

※주관심분야 : 음성의 규칙합성, 음향에 의한 결합 검출, 그외 음성 및 음향신호처리에 관심 있음

▲조 철 우



1961년 9월 12일생

1983년 2월 : 고려대학교 공과대학 전자공학과 졸(공학사)

1985년 2월 : 고려대학교 대학원 전자공학과 졸(공학석사)

1989년 2월 : 고려대학교 대학원 전자공학과 졸(공학박사)

1985년 8월~1986년 11월 : 전자통신연구소 음향연구실(위촉연구원)

1992년 2월~1993년 2월 : 영국 Keele University Department of Communication and Neuroscience(Visiting Research Fellow)

1989년 3월~현재 : 국립 창원대학교 제어계측공학과 부교수

※주관심분야 : 음성의 규칙합성, 합성음성의 평가, 음향에 의한 결합 검출, 그외 음성 및 음향신호처리에 관심있음