

## 시간-주파수 해석법을 이용한 선박용 디젤엔진 배기밸브의 열화도 평가에 관한 기초적 연구 (II)

김현수\* · 심규현\*\* · 안석환\*\*\* · 남기우\*\*\*\*

\*부경대학교 대학원 재료공학과, \*\*부산해사고등학교  
\*\*\*부경대학교 기계공학부, \*\*\*\* 부경대학교 재료공학부

## Fundamental Study on Degradation Evaluation of Marine Diesel Engine Exhaust Valve by Time-Frequency Analysis Method (II)

HYUN-SOO KIM\*, KYU-HYUN SIM\*\*, SEOK-HWAN AHN\*\*\* AND KI-WOO NAM\*\*\*\*

\* Graduate School of Material Science and Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

\*\* Pusan National Maritime High School, Pusan 606-072, Korea

\*\*\* School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

\*\*\*\* Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**KEY WORDS:** Ultrasonic 초음파, Degradation time 열화시간, Exhaust valve 배기밸브, Nondestructive test 비파괴검사 Marine diesel engine 선박용 디젤엔진

**ABSTRACT:** The ultrasonic method, which is well known as nondestructive test method, is widely used to evaluate the material damage due to degradation. However, this method is just used for measuring the crack size and the thickness loss of the tube. The purpose of this study is to investigate the application of the ultrasonic technique for the evaluation of marine diesel engine exhaust valve and to suggest the correlation between the ultrasonic characteristics and valve degradation. From the evaluation of the results obtained, the technique of using the ultrasonic property was found to be an efficient method to evaluate the degree of marine diesel engine exhaust valve by nondestructive test.

### 1. 서 론

선박을 포함한 내연기관이 계속적으로 고출력화 되는 시대적 배경에서 흡·배기밸브와 관련부품은 그 기능상 반복된 가혹한 조건에서 사용되므로 내구성이 가장 요구되어진다. 저속 대형 디젤 기관은 대부분 2사이클로서 높은 효율을 위하여 uniflow 소기방식 중 밸브배기공 소기형을 채용하고 있다. 이들 엔진은 열효율을 높이기 위해서 고온·고압의 연소 분위기에서 운전되어 배기밸브는 통상 500℃~600℃ 정도이나 압축비, 회전수 등의 증대에 기인하여 작동온도는 더욱 높아지는 경향이 있고, 특히 최근에 사용되는 연료유가 저질화 됨으로써 배기밸브는 더욱 가혹한 환경에서 사용되고 있다(박 등, 1994; 이 등, 1998).

대형 단일 밸브의 사용으로 인한 밸브의 대형화는 밸브 개폐시의 관성력이 증대되고 그 충격에 의하여 시트페이스와 밸브시트의 손상이 발생하기 쉽고 열에 의한 밸브의 단형상태가 불완전하여 손상을 촉진하게 된다. 이와 같이 배기밸브는 엔진 부품 중에서 가장 손상이 심한 부품중의 하나이다.

초음파는 주파수에 따라 다른 응답을 나타내므로, 초음파를

주파수 등으로 분해시켜 해석·평가하거나, 음파물성론에 기초하여 음파와 결합과의 상호작용 및 미세조직과의 상호작용을 수학적으로 모델링하여, 음파의 산란현상 및 흡수현상의 기본적인 메커니즘을 통하여 결합, 미세조직의 기하학적인 형상, 크기와 그 분산을 해석적, 수치적으로 구함으로써, 명료하게 그 재료의 상태를 알아 낼 수 있어서 다른 비파괴 검사방법에 비해 기술적 신뢰도 면에서 우수한 방법이다(이 등, 1999; 김 등, 1998; Matsumoto *et al.*, 1985; Cho *et al.*, 1996).

현재, 초음파 기법을 도입한 경년열화평가는 고온·고압 상태에서 발생하는 크리프 결합검출에만 주로 한정되어 있고, 선박용 배기밸브 재질열화의 정략적 평가에 관한 연구보고는 거의 없는 실정이다(Chen *et al.*, 1992; 武捨 *ら*, 1991; 井上, 1997; Raymond, 1974; Jeff *et al.*, 1997).

전보에서는 선박용 배기밸브의 스템부분에 대해서 비파괴적으로 평가하였다(심 등, 1999). 본 연구에서는 전보에 이어서 선박용 디젤엔진 배기밸브의 시트부분을 사용시간에 따른 재질의 열화정도를 평가하고자 초음파의 주파수특성을 이용한 비파괴 방법의 적용 및 평가기술의 타당성에 대한 기초적인 연구를 수행하였다.

## 2. 실험방법

본 실험을 위하여 선정된 재료는 선박용 디젤엔진 기관에 사용되는 배기밸브 (스텝부분 : STR 3, 시트부분 : STR 37)로서, 상업용 소재이다. 그 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 그리고, 배기밸브의 열화특성을 조사하기 위하여 시험재를 Table 2에 나타낸 조건으로 인공시효 열처리시켰다. 사용한 배기밸브와 배기밸브의 시트부분에서 초음파 시험을 위하여 제작된 시험편의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.1 조직관찰

시험편은 Marble용액 (4g CuSO<sub>4</sub>, 20mL HCl and 20mL water)을 사용하여 부식시킨 후 광학현미경을 통해 미세조직을 관찰하였다.

### 2.2 경도시험

인공열처리 시간이 배기밸브에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 경도측정은 500kgf의 하중으로 실시하였다. 각각의 시험편에서 측정횟수를 10회로 실시하여 최대·최소값을 제외한 나머지 값들의 평균을 구하여 각 시험편의 경도값으로 하였다.

### 2.3 초음파 시험

시험편의 탐상면은 표면거칠기에 의한 초음파의 산란을 방지하기 위하여 일정수준 연마하였다. 또한, 탐촉자의 접촉압력이나 접촉상태에 따른 영향을 제거하기 위하여 클램프를 사용하여 시험편과 탐촉자를 일정한 압력으로 고정시켰다. 접촉매

Table 1 Chemical compositions of diesel engine exhaust valve used (wt. %)

Material	C	Si	Mn	Cr	Co	Mo	Ni	N	Fe
STR 37	0.20	1.00	1.30	21.0	-	-	11.0	0.40	Bal.
STR 7	0.40	2.29	0.36	10.4	-	0.86	-	-	Bal.
Coating Layer	-	16.6	-	28.8	Bal.	-	-	-	4.31

Table 2 Heat treatment conditions of diesel engine exhaust valve

Specimen	Heat treatment (°C/hr)	Cooling condition
H-0.5	1000/0.5	Air
H-1	1000/1	Air
H-3	1000/3	Air
H-5	1000/5	Air
H-12	1000/12	Air
H-24	1000/24	Air
H-48	1000/48	Air
H-72	1000/72	Air
H-100	1000/100	Air

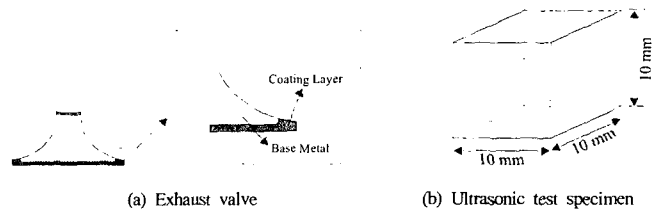


Fig. 1 Schematic diagram of exhaust valve and specimen used

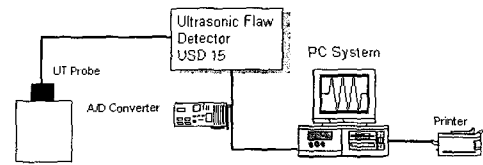


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic measuring system

질은 점성이나 음향 임피던스, 접촉매질의 두께 및 온도 등의 영향에 따른 초음파의 변환 특성을 고려하여 독일 Krautkrämer사의 ZG-F 접촉매질을 사용하였다.

초음파시험에 사용된 장비로서는 독일 Krautkrämer Branson사의 Model USD 15 디지털 초음파 탐상기를 사용하였으며, GAGE사의 Model CS2125 고속 A/D변환기를 이용하여 실시간적으로 초음파 신호를 계측하였다. 계측시 사용한 탐촉자는 중심주파수가 5MHz인 광대역 센서를 사용하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 측정시스템의 개략도를 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 모재의 조직관찰 및 경도측정

Fig. 3는 본 실험에 사용된 배기밸브 재료의 미세조직을 나타낸 것이다. 그림에서 A부분은 코팅층과 모재의 접합경계부분으로 접합에 의하여 조직이 조대해졌다고 판단된다. B부분은 밸브의 가운데 부분으로서 조직이 상당히 미세함을 알 수 있다. 즉, A부분의 마지막 부분이 B부분의 시작부분이므로 접합경계면에서 멀어질수록 조직이 미세화되고 있음을 알 수 있다. C부분은 밸브시트의 한 가운데 부분으로서 제조공정상의 문제로 내부조직이 일정한 방향으로 연신되어 있고, 조직자체도 다른 부분에 비하여 조대화 되었음을 알 수 있다. 스텝부분(D)는 열영향을 전혀 받지 않은 B부분과 유사한 형태의 조직을 나타내고 있다.

Fig. 4는 배기밸브 시트부위별 경도측정값을 나타낸 것이다. 코팅층은 코발트가 주성분으로 이루어져 있으며 경도값은 약 Hv 650정도로 높게 나타났다. 이것은 배기밸브는 고온에서 사용 중에 실린더 헤드부분과 계속 접촉하기 때문에 고온 내마모성을 위한 것이다. A 부분은 코팅층과의 경계부분으로서, 코팅층을 접합하는 공정에서 발생하는 열에 의하여 조직이 상당히 조대해져 경도값이 다른 부분에 낮게 나타나고 있다. B 부분은 시트의 가운데 부분으로 약 Hv 450정도이다. C부분은 배기밸브의 가운데 부분으로 B 부분보다 조직이 조대하게 나타

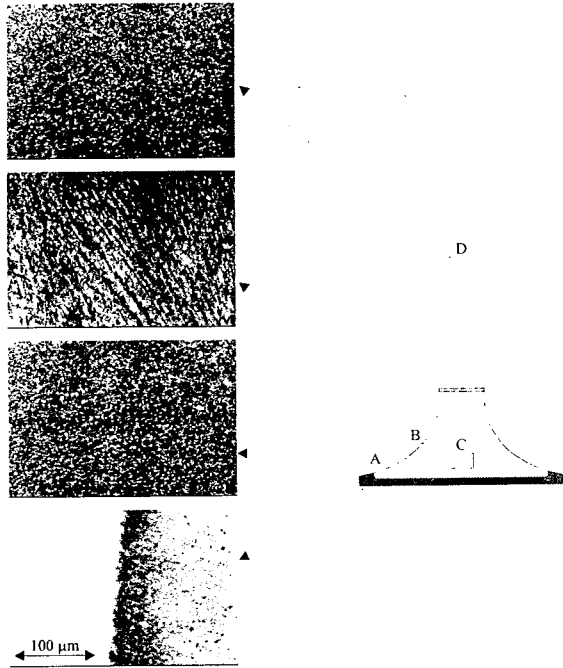


Fig. 3 Microstructure at locations A, B, C and D(stem) for exhaust valve

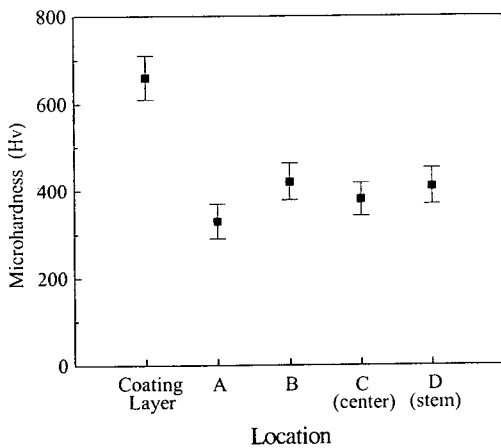


Fig. 4 Microhardness for each part of exhaust valve

났고, 경도값 또한 약 Hv 400 정도로 낮게 나타났다. 스템부분 (D)은 B부분과 거의 비슷하게 Hv 450으로 나타났다.

### 3.2 열화재의 조직관찰 및 경도측정

Fig. 5은 인공시효 열처리시간에 따른 조직변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 나타나는 것처럼 0.5시간 및 1시간은 Fig. 3에 나타낸 모재의 결정립 크기 및 형태가 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 1시간에서 3시간으로 증가할 때 마르텐사이트 상에서 페라이트 상으로 변태가 시작되고 있고, 5시간 열처리된 시험편에서는 페라이트 상이 거의 대부분을 차지하고 있다. 5시

간에서 12시간으로 열화시간이 증가할 때는 결정립 크기가 많이 증가하는 것으로 나타났다. 12시간 열화처리한 시험편부터는 거의 비슷한 형태의 조직으로 나타났다. 이것은 각 시간별로 재료의 열화 정도가 다름에서 기인한 것이라고 판단된다.

즉, 본 실험에서 사용한 재료의 경우는 1000°C에서 사용되었을 때, 먼저 3시간 사용 후에 재료가 열화된다고 예상할 수 있으며, 12시간 정도에서는 열화정도가 심하다는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 6에 열화시간에 따른 경도값의 변화를 나타내었다. 먼저 모재의 경도값(B부분)과 비교해 보면, 열처리 후 경도값이 증가함을 알 수 있다. 이것은 벨트가 제품화되어 출시될 때 어닐링 처리를 하여 출시되기 때문에, 열처리 후 공랭시킴으로 인하여 경도값이 상승한다고 판단된다. 3시간 미만의 열화처리를 실시한 시험이 모재보다 경도값이 높게 나타난 것은, 결정립 크기가 증가함으로써 감소하는 경도값보다 열처리에 의해 증가하는 경도값이 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 3시간 이상 열화처리를 실시한 시험은 열처리에 의해 증가하는 경도값보다 결정립 크기의 증가에 의해 감소되는 경도값이 더 크기 때문에 경도값이 감소된다고 판단된다. 전체적으로, 열화시간이 증가할수록 점차 경도값이 감소함을 알 수 있다. 그러나, 열화시간이 24시간 이상의 시간에서는 조직의 조대화 정도가 거의 없고, 거의 일정한 수준으로 계속되고 있기 때문에 경도값이 거의 일정하게 나타난다고 판단된다.

### 3.3 주파수 분석

본 실험에서는 각 시험편의 제 1저면에코의 주파수 변화를 시간-주파수해석법을 이용하여 분석하였다. 주파수가 높을수록 열화 손상에 따른 결정립의 조대화와 석출물 등에 의한 산란 및 감쇠의 영향을 받기 쉽다. 보통 초음파 펄스는 어느 유한의 대역폭을 가지며 그 대역에 포함된 여러 종류의 주파수 성분으로 구성되기 때문에, 재료의 조직변화에 따른 에코 파형에 포함된 각 주파수 성분은 영향을 받기 쉽다. 따라서, 에코파형에 포함된 각 주파수 성분의 조직변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 모든 시험편에 대해서 제 1저면에코를 기준으로 각 주파수성분의 변화를 측정하였다. 본 논문에서는 모재와 3시간, 48시간 및 100시간 동안 인공 열화시킨 시험편에 대해서 나타내었다.

Fig. 7은 각 시험편의 제 1저면에코를 시간-주파수 해석법으로 분석한 결과이다. (a)의 모재는 주파수 성분의 진폭이 5MHz, 4MHz 및 6MHz의 순으로 나타나고 있다. (b)의 3시간 열화재에서는 6MHz성분이 많이 감소하고 3MHz 성분이 높게 나타나서 5MHz, 4MHz, 3MHz의 순서로 나타나고 있다. (c)의 48시간 열화재에서 부터는 4MHz 성분이 5MHz 성분보다 높게 나타나서 4MHz, 3MHz, 5MHz의 순서로 나타나고 있다. (d)의 100시간 열화처리한 시험편에서부터는 3MHz 성분이 가장 높게 나타나고 있다. 전체적으로 열화시간이 증가할수록 고주파 성분이 감쇠되기 때문에 상대적으로 저주파 성분이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 열화에 따른 조직의 조대화와 결정립계의, 석출물 등에 의하여 고주파 성분의 감쇠가 저주파보다 더 크게 일어나기 때문이라고 판단된다.

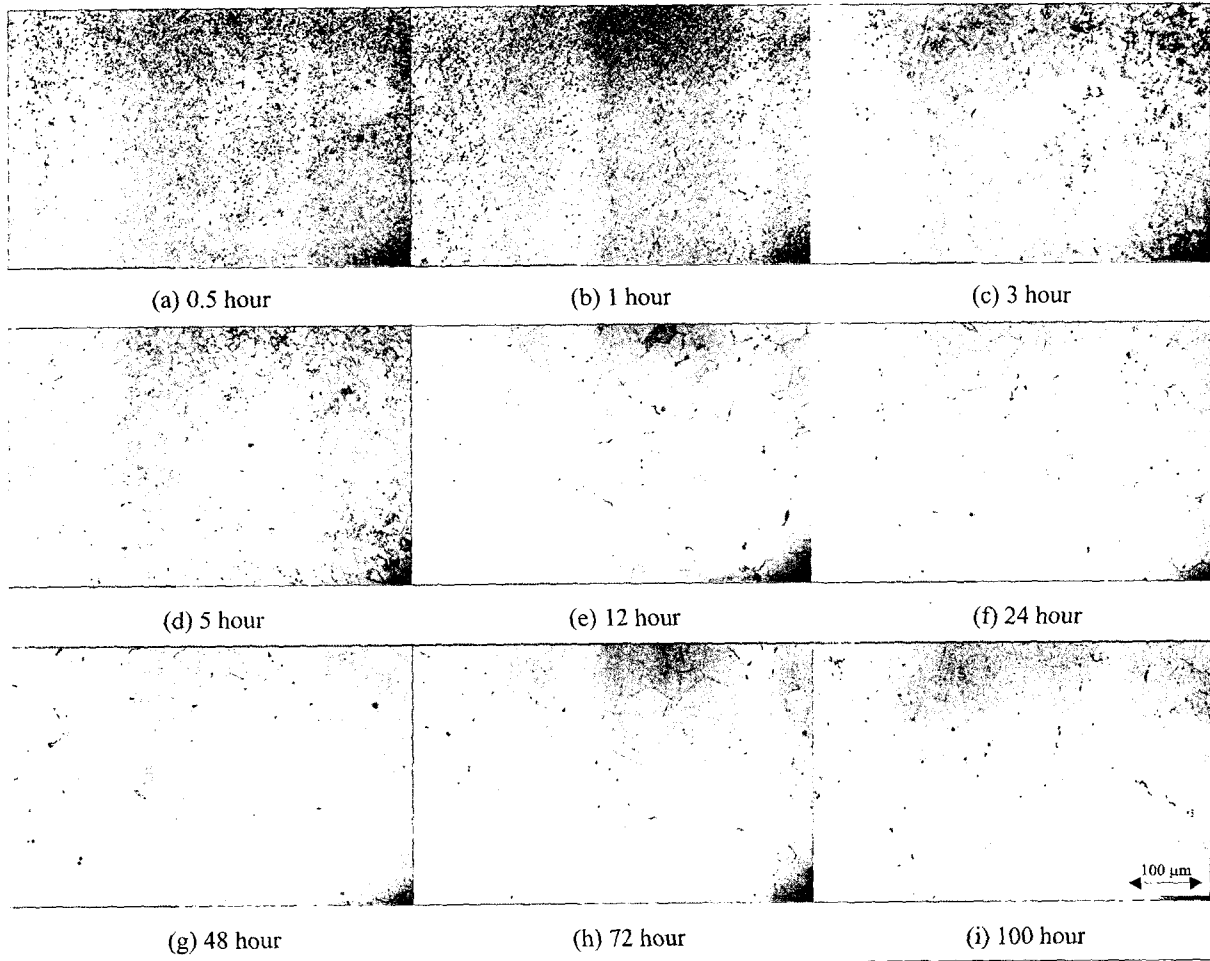


Fig. 5 Microstructure with different degradation time

#### 4. 결 론

본 연구는 선박용 디젤엔진 배기밸브의 시트부분을 열화시켜, 열화시간에 따른 초음파 신호의 주파수 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열화시간이 증가할수록 점차 경도값이 감소함을 알 수 있다. 특히, 열화시간이 24시간 이상 일때는 경도값이 거의 일정하게 나타나고 있는데, 이것은 열화시간이 24시간 이상에서는 조직의 조대화가 더 이상 진행되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 초음파 신호의 각 주파수 성분의 진폭변화를 측정된 결과, 열화손상이 클수록 고주파 성분의 감쇠가 크기 때문에 상대적으로 저주파 성분이 높게 나타남을 알 수 있었다.

(3) 초음파의 주파수 특성을 이용하여 선박용 디젤엔진 배기밸브 소재의 열화손상 정도를 정량적으로 분석 가능하였으며, 다양한 비파괴 검사법을 적용하면 보다 신뢰성 있는 열화특성 평가가 가능할 것으로 기대된다.

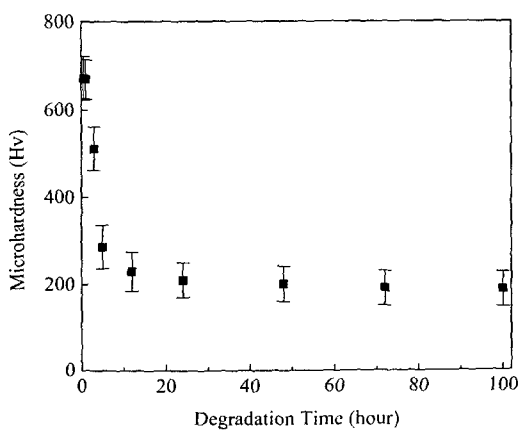


Fig. 6 Microhardness profile according to degradation time

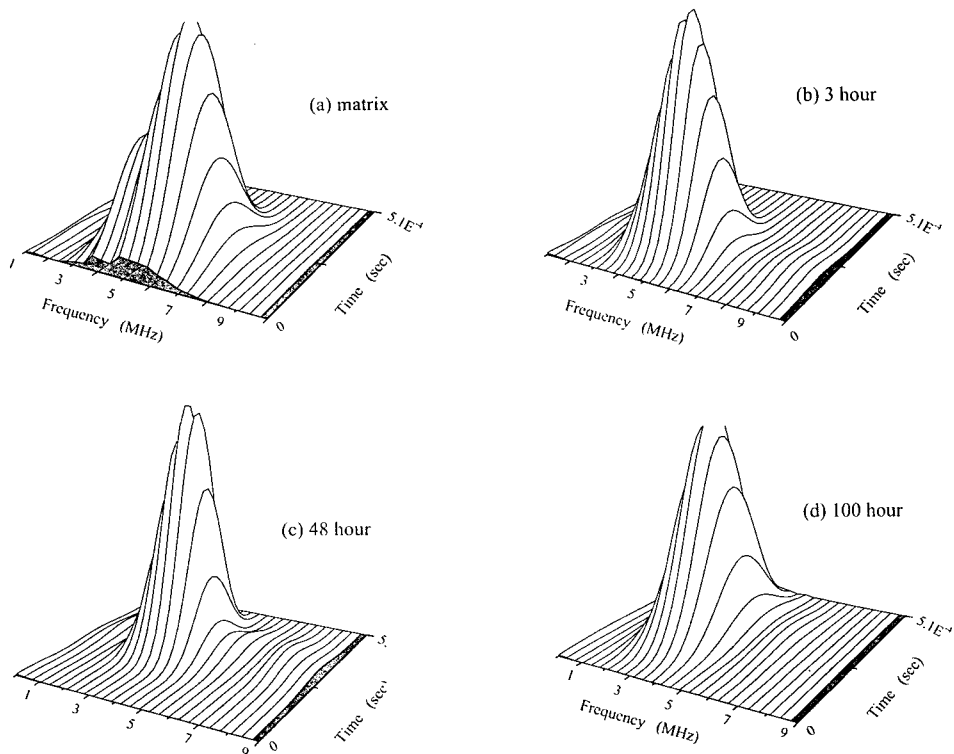


Fig. 7 Full frequency components of back echo according to degradation time

## 참고 문헌

- 김창곤, 김상태, 조경식(1998). “초음파에 의한 열분해관의 침탄 열화도 진단”, 비파괴검사학회지, 제18권, 제5호, pp 381~387.
- 박인태, 전익효, 왕지석, 이춘만(1994). “대형 디젤 기관의 배기밸브 기술전망”, 한국박용기계학회지, 제18권, 제1호, pp 1~10.
- 심규현, 김현수, 남기우(1999). “비파괴법에 의한 선박용 디젤엔진 배기밸브의 열화도 평가에 관한 기초적 연구”, 한국동력공학회지, 제3권, 제4호, pp 51~56.
- 이건찬, 오정환, 남기우, 이주석(1999). “열화된 SUS강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가”, 비파괴검사학회지, 제19권, 제4호, pp 270~276.
- 이병현, 박상보(1998). “Hardfacing 밸브 Seat의 파손에 미치는 미세조직의 영향”, 대한금속학회지, 제36권, 제1호, pp 123~129.
- 이상국, 정민화(1999). “초음파법에 의한 발전소 고온배관재료의 크리프손상 평가”, 한국해양공학회지, 제13권, 제2호, pp 99~107.
- Chen, C. H. and Guey, J. C.(1992). “On the Use of Wigner Distribution in Ultrasonic NDE”, Review of Progress in Quantitative Evaluation, Vol. 11A.
- Cho, K. S., Chang, H. K. and Park, J. H.(1996). “Preceding of Int. Workshop on NDT & SAFETY '96”, pp 241~247.
- Cho, K. S., Chang, H. K. and Park, J.H.(1996). “Preceding of Int. Workshop on NDT & SAFETY '96”, pp 241~247.
- Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S. C. and Pankaj(1997). “Signal Detection and Noise Suppression Using a Wavelet Transform Signal Processor: Application to Ultrasonic Flaw Detection”, IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Vol. 44, No. 1.
- Malik, M. A., Jin, X. M. and San, I. J.(1996). “Joint Time-Frequency Processing of Ultrasonic Signals”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15.
- Raymond R. D.(1974). “Materials Evaluation”, pp 264~268.
- 武捨貴昭, 川浦淳一(1991). “ウィグナー分布とその超音波非破壊評価への應用”, 日本非破壊學會, 第4卷, 第9号, pp 587~591.
- 井上裕嗣(1997). “エコー波形のウェーブレット分析による超音波の速度と減衰”, 非破壊検査, 第46卷, 第3号, pp 206~213.

2000년 8월 17일 원고 접수

2000년 10월 9일 수정본 채택