

論文2000-37SP-11-9

캡스트럼을 이용한 다중 응답신호의 소음원 해석기법

(Noise Source Identification Scheme for Multi-Source Signal using the Cepstrum Technique)

金敬容*, 李章明**

(Kyung-Yong Kim and Jang-Myung Lee)

요 약

선박의 수중방사소음을 최소화하기 위해서는 주요 소음원인 탑재장비, 추진계통 및 구조물의 전달과정 등에 의해 발생하는 각각의 소음특성 규명이 이루어져야 한다. 그러나 선박의 운항시 계측된 신호는 다중의 소음원과 많은 전달경로에 의해 신호가 중첩되어 발생되고, 소음원과 전달함수를 계측할 수 없는 경우가 많다. 이 논문에서는 캡스트럼 신호처리를 이용한 계측된 응답신호로부터 각각의 소음원과 전달함수 특성을 분리 추출할 수 있는 시험분석기법을 제시하고, 제시된 기법을 수치계산 및 가진실험에 적용하여 검증하고, 실제 선박에 적용하여 유용함을 보인다.

Abstract

To reduce the radiated noise of ships, the noises which are generated from onboard machinery, propulsion system and transfer characteristics of structure must be identified. While the ship is operating, however, we can not directly measure each signal of inputs and characteristics of transfer passage, because measured signals are superimposed by multi-source and multi-transfer passage. In this paper, the signal processing method for separating noise sources and transfer functions from the measured response signal by the cepstrum technique is proposed. The proposed method is verified by application of simulated signal and impact test and shows usefulness by application of real ship test.

I. 서 론

선박에 탑재된 개별장비와 추진계통에 의해 발생하는 진동은 선체구조물로 전달되어 수중방사소음의 주요 원인이 되므로 수중방사소음을 최소화하기 위해서는 주요 소음원인 탑재장비, 추진계통 및 전달과정에 의해 발생하는 각각의 소음특성에 대한 규명이 이루어져야 한다^[1].

어떤 시스템에서 발생하는 소음은 크게 두 가지로 구별할 수 있다. 하나는 시스템의 각 부위별 규칙적인 운동에 의해 발생하는 규칙적 소음이고, 다른 하나는 그러한 소음들이 외부로 전달될 때 시스템 전체의 형태에 의해 공진되어 나타나는 전달함수 소음이다. 따라서 방사소음의 특성을 식별하기 위해서는 탑재된 각 개별장비들의 Tonal 특성과 전달경로에 대한 특성의 규명이 필요하다^[2].

선박에 탑재된 기계류 및 선체에서 계측된 신호는 시간영역에서 각각의 소음원과 전달함수에 대한 컨볼루션 연산관계를 갖고, 주파수영역에서는 곱셈 연산관계를 갖는다. 이때, 계측신호로부터 소음원과 전달함수에 대한 특성을 규명하기 위해서는 역컨볼루션 또는 역여과 방법을 적용할 수 있지만 이를 위해서는 전달경로신호나 소음원에 대한 정확한 정보를 알아야

* 正會員, 國防科學研究所
(Agency for Defense Development)

** 正會員, 釜山大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Pusan National University)
接受日字: 1999年12月30日, 수정완료일: 2000年7月25日

한다^[3]. 그러나, 선박의 운항 시에 회전기계류 등에서는 직접적인 소음원 신호를 계측할 수 없고, 동시에 여러 장비가 작동됨에 따라 계측된 신호는 여러 소음원에 의한 주기적 신호가 중첩된 합성음으로써 각 소음원과 전달경로특성을 직접 계측하기가 어렵다. 따라서 계측된 응답신호로부터 소음원과 전달함수의 특성을 추출할 수 있는 방법이 필요하며, 이 논문에서는 cepstrum 변환을 이용하여 전벌루션 관계를 갖는 계측된 응답신호를 덧셈관계로 변환하여 소음원과 전달함수를 중첩신호로 분리한다^[4]. 이때 천이 신호나 규칙적인 운동 특성을 갖는 소음원은 일정한 라모닉스의 특성을 갖으나, 전달함수는 전 cepstrum 영역에서 고르게 분포하는 서로 다른 분포 특성을 이용하여 응답신호로부터 소음원을 제거하여 전달함수를 분리 추출하며, 이때 발생하는 오차는 curve-fitting 방법을 이용하여 보상한다. 분리 추출된 전달함수와 계측된 응답신호로부터 소음원 특성을 추출함으로써, 응답신호로부터 소음원과 전달함수를 분리 추출할 수 있는 분석기법을 제시한다. 제시된 기법을 수치계산과 충격가진 실험에 적용하여 응답신호로부터 가진신호와 전달함수를 분리할 수 있음을 보이고, 실제 선박의 진동시험에 적용하여 제시된 기법의 유용성을 확인한다.

II. cepstrum를 이용한 소음원 추출

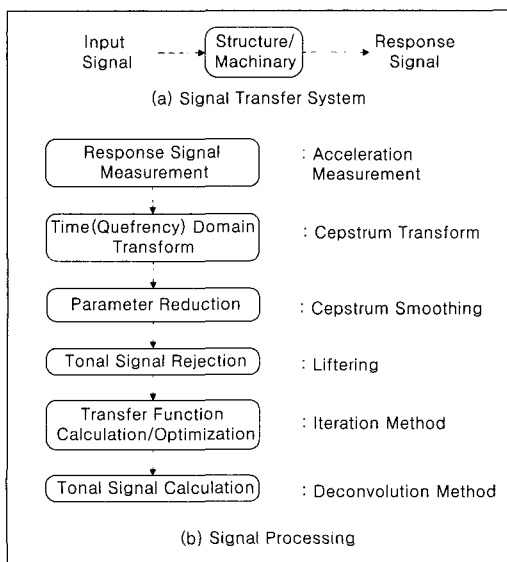


그림 1. 다중신호로부터 소음원 식별 알고리즘
Fig. 1. Source identification algorithm from multi-source signal.

계측된 응답신호는 가진신호와 구조물의 전달경로 특성으로부터 구해진다. 그러나, 가진신호를 직접 계측하지 못하고, 다만 센서로부터 출력응답신호만을 계측할 수 있을 때 계측된 응답신호로부터 가진신호와 전달경로 신호를 간접적으로 분리 해석할 수 있는 소음원 해석방법은 그림 1과 같다.

1. 응답신호로부터의 전달함수 추출

어떤 주기적 소음원이 구조물에 전달되어 방사될 때 cepstrum 분석을 이용한 계측신호 $y(n)$ 으로부터 소음원 성분을 제거하고 구조물의 전달특성을 추출하는 과정은 그림 2와 같다.

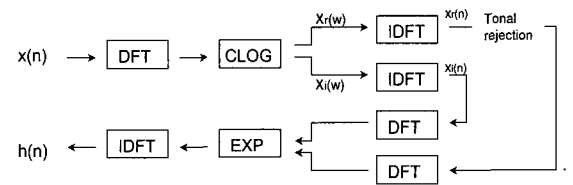


그림 2. 신호분리를 위한 cepstrum 변환 과정
Fig. 2. Process of cepstrum transform in signal separation.

1. 응답신호로부터의 전달함수 추출

어떤 주기적 소음원이 구조물에 전달되어 방사될 때 cepstrum 분석을 이용한 계측신호 $y(n)$ 으로부터 소음원 성분을 제거하고 구조물의 전달특성을 추출하는 과정은 그림 2와 같다.

천이 입력신호 $x(n)$ 가 시스템 $h(n)$ 에 가해질 때 출력신호 $y(n)$ 은 식 (1)과 같다.

$$y(n) = x(n) * h(n) \tag{1}$$

$y(n)$ 의 주파수 스펙트럼 $Y(w)$ 는 식 (2)와 같다.

$$Y(w) = X(w)H(w) = |Y(w)|\exp(j\phi(w)) \tag{2}$$

식 (2)에 대수를 취하면 식 (3)과 같이 진폭과 위상성분으로 분리된다.

$$\log Y(w) = \log |Y(w)| + j\phi(w) \tag{3}$$

이때, 천이 신호의 위상 값은 0이므로 식 (3)에서 천이 입력신호의 진폭성분만을 제거하고 역변환하면 구조물의 전달특성에 대한 성분 $h(n)$ 을 추출할 수 있다.

2. cepstrum 창문함수를 이용한 변수감소

응답신호의 캡스트럼은 전달과정에서의 복반사, 분산 등으로 인해 복잡한 다자유도계로서 많은 변수를 가지므로 그림 3과 같이 캡스트럼 창문함수를 이용하여 복잡한 변수들을 줄여 유용한 성분만을 추출한다.^[5] 그림 3(a)는 입력신호 $x(t)$ 가 시스템 $h(t)$ 에 가해질 때 복잡한 출력신호 $y(t)$ 를 보여주며, 그림 3(b)는 $y(t)$ 를 캡스트럼 영역으로 변환한 결과이고, 여기에 캡스트럼 창문함수를 적당한 대수시간영역에 씌워 잡음 등에 의한 성분을 제거하면, 그림 3(c)와 같이 변수가 줄어든다.

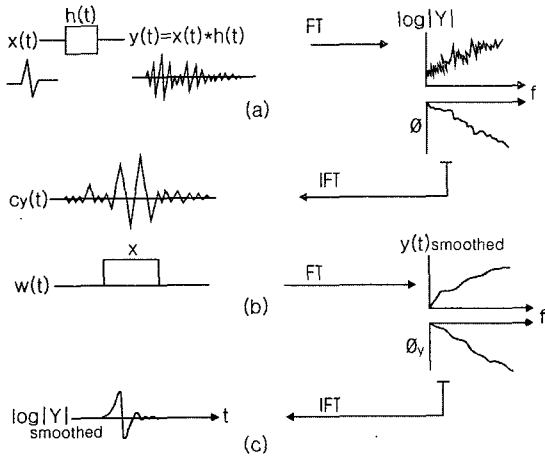


그림 3. 캡스트럼 스무딩 알고리즘
Fig. 3. Cepstrum smoothing algorithm.

3. 전달특성 추출 및 오차 보상

천이 신호나 충격신호와 같은 가진신호는 캡스트럼 영역에서 짧은 시간영역에 집중 분포하고, 전달경로를 통한 신호의 캡스트럼 성분은 대부분 전 시간영역에 분포한다^[6]. 따라서 전달함수의 특성은 응답캡스트럼 영역에 적당한 대역폭의 단역통과리프터를 사용하여 가진신호 성분을 제거함으로써 구해지고, 응답신호가 여러 주기적 신호로 중첩되었을 경우에는 빗 리프터를 이용하여 각각의 특성성분의 캡스트럼을 제거하여 추출한다.

계측된 응답신호로부터 리프터링에 의해 구한 전달 경로 성분은 가진신호 성분을 제거시 같은 영역의 성분이 동시에 제거되어 복원된 신호에 진폭크기 오차를 발생하므로 그림 4와 같은 Curve-fitting 방법을 이용한다^[7]. 계측신호의 대역폭을 $2w$ 로 제한하였을 때의 함수 $f(x)$ 가 $2B$ 의 표본비로 표본화되어 m 개의 데이터를 갖고 있다. 이때, 0 지점의 데이터를 제거하

였을 때의 함수를 $g(x)$ 라하면 $f(x)$ 는 $g(x)$ 가 되고, 초기값 $f_0(x)$ 는 $g(x)$ 이다. N 번째 반복결과의 함수를 $f_N(x)$, 푸리에변환 결과를 $F_N(w)$, 저대역통과 결과를 $H_N(w)$, 역푸리에변환 결과를 $h_N(x)$ 라고 할 때, 알고리즘의 첫 단계는 $f_m(x)$ 를 푸리에변환하고, 둘째로 $2w$ 의 대역폭을 갖게 저대역 필터링한다. 셋째로는 $h_N(x)$ 를 얻기 위해 역푸리에변환을 하여 $f_m(x)$ 의 값을 재형성한다. 이때 잃어버린 데이터는 $h_N(x)$ 의 값을 취하고, 그 밖의 나머지 데이터는 원래의 $f(x)$ 를 취해 $f_m(x)$ 을 재형성하고, 위의 과정을 반복하여 최적의 값을 도출한다.

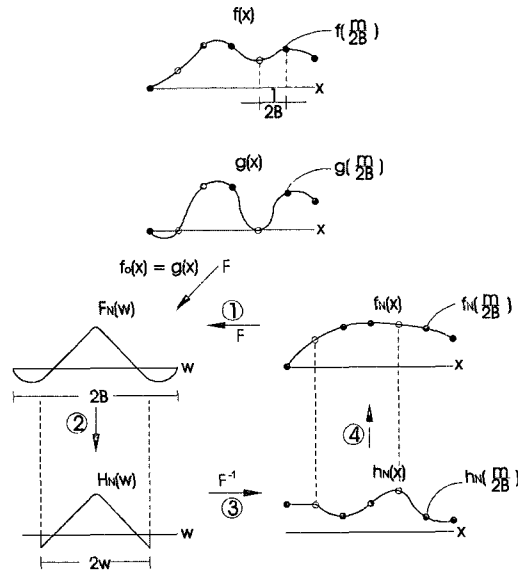


그림 4. 커브-피팅 알고리즘
Fig. 4. Curve-fitting(Interpolation) algorithm.

4. 가진신호 복원

계측된 응답신호와 위에서 분리 추출된 전달함수로부터 입력 가진신호를 구한다^[3]. 가진신호를 $x(n)$, 전달함수를 $h(n)$, 응답신호를 $y(n)$ 라고 할 때 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} y(n) &= x(n) * h(n) \\ Y(w) &= X(w) H(w) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 전달함수 $H(w)$ 는 식 (5)와 같다.

$$H(w) = |H(w)|e^{-j\phi_s(w)} \tag{5}$$

이때 가진신호 $X(w)$ 는 식 (6)과 같이 구해진다.

$$X(w) = \frac{Y(w)}{H(w)} \tag{6}$$

III. 실험 및 결과고찰

1. 충격응답신호에 대한 수치 계산

입력가진신호 $x(t)$, 전달함수 $h(t)$, 응답함수 $y(t)$ 로써 아래와 같이 시스템을 모델링한다.

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) * h(t) \\ Y(w) &= X(w) H(w) \\ c_y(\tau) &= c_x(\tau) + c_h(\tau) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $Y(w)$, $X(w)$, $H(w)$ 와 $c_y(\tau)$, $c_x(\tau)$ 및 $c_h(\tau)$ 는 각각 $y(t)$, $x(t)$, $h(t)$ 의 주파수 스펙트럼과 캡스트럼을 나타낸다.

입력가진신호 $x(t)$ 는 임펄스 신호로서 시간영역에서 식 (8)과 같이 모델링하고, 전달함수 $h(t)$ 는 식 (9)와 같이 진폭, 감쇠상수, 위상으로 모델링한다.

$$x(t) = Ae^{-\alpha t}(1 - e^{-\beta t}) \quad (8)$$

$$h(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (9)$$

여기서 A_i : 진폭, α_i : 감쇠상수, ω_i : 각 가속도, θ_i : 초기 위상을 의미한다.

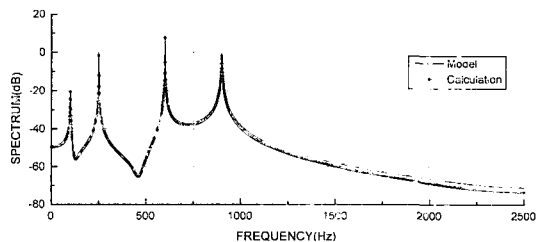


그림 5. 시뮬레이션 시스템에서의 전달함수 비교
Fig. 5. Comparing of transfer functions in simulation system.

식 (8)에서 $A=100$, $\alpha=2.5$, $\beta=1$ 로, 식 (9)에서 $A_1=0.5$, $w_1=100$, $\theta_1=0$, $A_2=2$, $w_2=250$, $\theta_2=-30$, $A_3=5$, $w_3=600$, $\theta_3=-60$, $A_4=9$, $w_4=900$, $\theta_4=0$ 로 모델링할 때, 모델링에 의한 주어진 전달함수와 제시된 기법에 의해 출력응답신호로부터 분리 복원된 스펙트럼은 그림 5와 같으며 1500Hz 이하에서 일치한다.

2. 충격 가진실험 및 결과 고찰

앞 절의 수치계산에 의해 검증된 기법을 실제 실험에 적용하여 신뢰도 및 유용성을 검증하기 위해 철판 구조물을 대상으로 충격가진실험을 수행한다. 실험장치는

그림 6과 같이 두께 3mm, 길이 50cm의 철판을 외부 지지대에 의해 공중에 매달아 놓고, 충격가진기의 전원공급 및 출력신호의 증폭기는 PCB 482A17 및 B&K 2635 전하증폭기, B&K 3550 신호분석기를 이용하여 신호를 계측 분석한다. 실험방법은 철판구조물의 한쪽끝단에 가속도계를 부착하고 반대쪽 끝단을 충격가진기로 타격하고 10번 평균하여 철판구조물의 전달함수, 입력 가진신호, 가속도응답신호를 계측한다. 가속도계는 자석을 이용하여 부착하고, 사용된 충격가진기의 유효주파수 범위를 고려하여 계측 주파수범위는 3200Hz로 제한하였다.

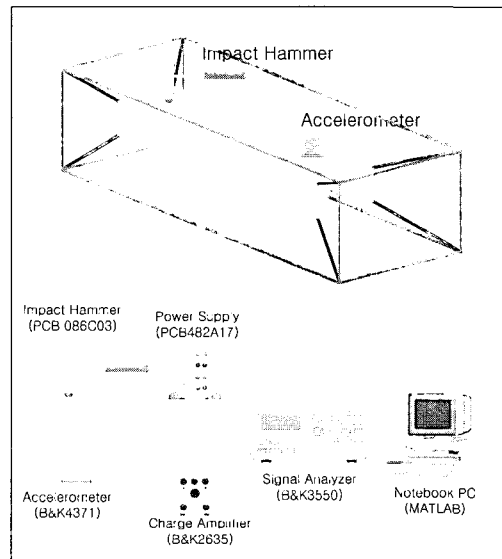


그림 6. 충격 가진 시험시스템
Fig. 6. Impact hammer test system

계측된 출력응답 캡스트럼은 그림 7과 같이 제시된 방법으로부터 얻어진 전달함수 스펙트럼과 계측된 전달함수는 그림 8과 같이 2KHz까지 3dB 이내로 일치한다.

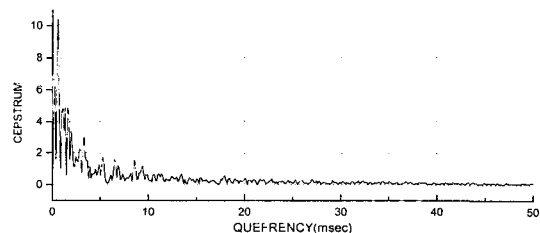


그림 7. 충격가진시험의 세속신호 캡스트럼
Fig. 7. Measurement signal cepstrum of impact hammer test.

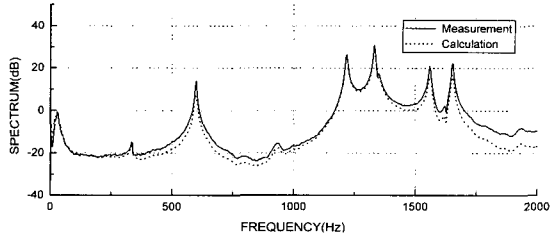


그림 8. 충격가진시험의 전달함수 비교
Fig. 8. Comparing transfer functions of impact hammer test.

3. 실선 적용시험 및 결과 고찰

그림 9와 같이 선박 디젤엔진룸의 디젤엔진 지지대, 감속기어박스, 축지지베어링, 현축 선체프레임에서 진동신호를 계측 분석함으로써 선박의 수중방사소음의 주요 소음원 추출 및 규명을 위한 적용 가능성을 확인한다.

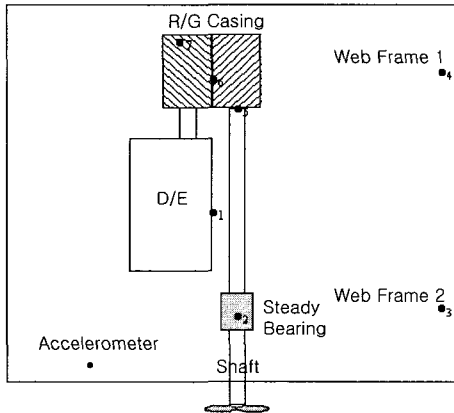


그림 9. 실선 적용 진동시험 측정위치
Fig. 9. Vibration measurement positions for real ship.

그림 10은 사용된 계측체계의 구성을 나타내며, 각 장비의 특성은 그림에 표시되어 있다.

실험은 선박이 일정한 속도를 유지하며 기동할 때, 그림 9의 각 계측위치에서 동시에 가속도 값을 계측하고, 캡스트럼변환을 수행한 다음 주기적 특성성분을 제거하여 구조물의 전달경로 특성을 추출한다. 이때 오차보상을 위해 주파수 대역을 1200Hz로 제한하고 30회 반복 수행한다. 이로부터 구해진 전달함수와 계측된 응답신호로부터 특성성분만을 추출한다. 그림 11~14는 각 계측점에서의 분석결과이다.

각 계측점에서 계측된 가속도 값을 캡스트럼 분석한 결과 엔진 기진력의 회전수에 해당하는 기본주파수 성

분인 105.7ms(9.46Hz)의 캡스트럼 성분이 크게 나타난다. 따라서 위 성분과 잡음신호에 해당하는 영역의 캡스트럼 성분을 제거하고 오차보상을 통해 전달경로의 주파수스펙트럼을 추출한다. 이로부터 얻어진 결과와 계측된 응답스펙트럼과의 역컨볼루션 연산에 의해 105.7 ms의 Tonal 성분만을 추출하여 디젤엔진이 각 계측점에 미치는 영향을 분석하였다.

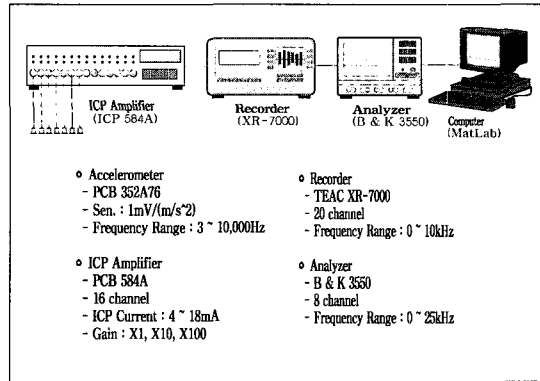


그림 10. D/E 실의 진동계측시험 시스템
Fig. 10. Measurement system of vibration in D/E room.

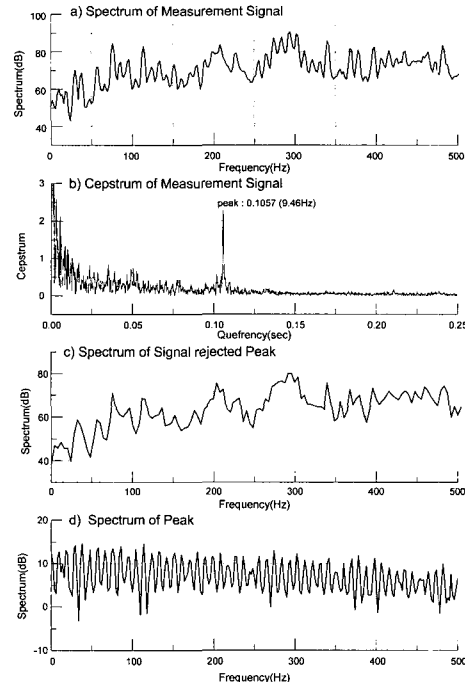


그림 11. 디젤엔진 지지대에서의 해석결과
Fig. 11. Analysis results of diesel engine foundation.

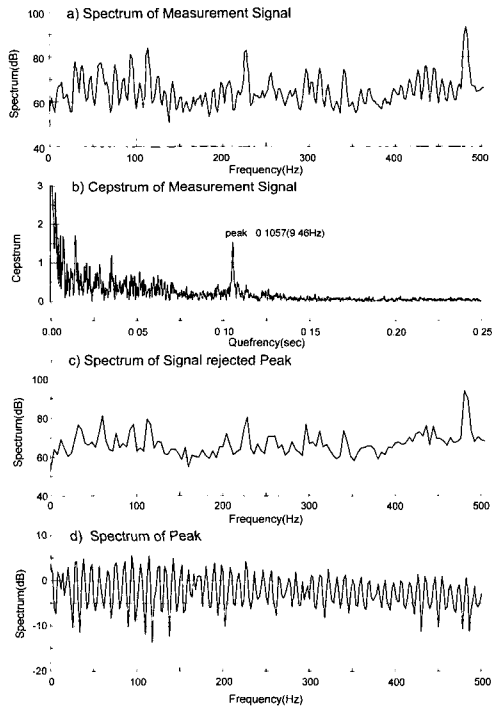


그림 12. 감속기어 박스에서의 해석결과
Fig. 12. Analysis results of reduction gear box.

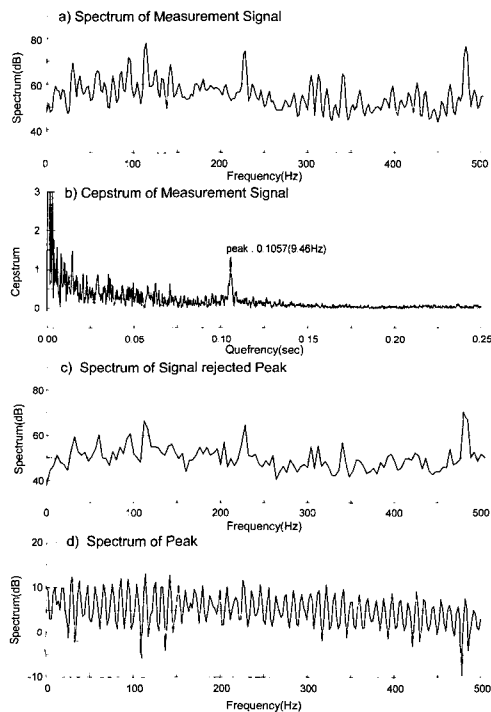


그림 13. 축지지 베어링 부위에서의 결과
Fig. 13. Results of shaft bearing foundation.

그림 11은 디젤엔진 지지대에서의 분석결과로써 계

측된 신호의 켈스트럼으로부터 기진원(디젤엔진)의 기
본주파수 성분(105.7 ms)을 제거시 스펙트럼의 모양
이 단순화되고 전체적인 준위가 작아지므로 엔진 기진
원에 의해 많은 영향을 받고 기진원도 정확히 9.46
Hz의 조화성분의 스펙트럼으로 복원된다. 그림 12는
감속기어박스에서의 결과로써 105.7 ms 성분을 제거
시 스펙트럼이 여전히 많은 Tonal 특성을 보이며, 전
체적인 준위가 계속된 결과와 비슷하므로 감속기어 자
체의 진동이 크게 발생되고 있다. 그림 13의 베어링
지지대와 그림 14의 선수 현측에서는 자체의 기진원특
성 보다는 엔진 기진원 성분이 큰 영향을 미치고 있을
을 판단할 수 있다.

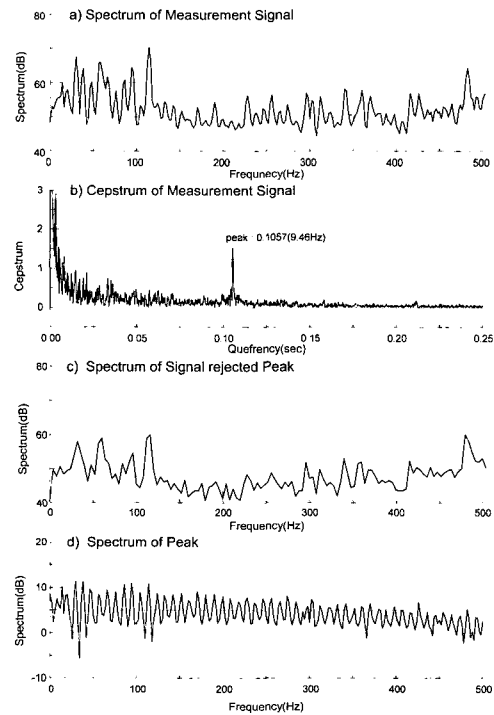


그림 14. 현측프레임 1에서의 결과
Fig. 14. Results of web frame1.

IV. 결 론

이 논문에서는 수중방사소음 등의 소음원 규명을 위
한 진동시험에서 소음원과 구조물의 전달함수 특성을
직접 계측하지 못하는 경우에 계측된 진동응답신호로
부터 중첩되어 있는 각각의 소음원 특성 및 전달경로
특성을 분리 해석하기 위하여 켈스트럼 신호처리를 이
용한 특정소음성분을 제거하거나 특정소음성분만의 고
유특성을 분리하여 평가할 수 있는 시험분석기법을 제

시하였다.

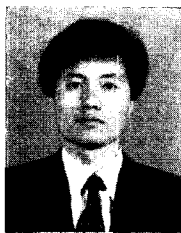
제시된 기법을 이용하여 수치계산과 가진실험을 수행하여 응답신호로부터 소음원과 전달함수를 분리할 수 있음을 확인하였고, 실제 선박에서 측정된 자료에 적용하여 선박의 소음원 특성규명에 유용함을 확인하였다.

이 연구결과는 다중 소음원의 소음특성규명 및 기계류의 진단을 위한 시험평가에 응용이 가능하며, 가진 신호와 전달함수를 직접 측정할 수 없는 경우에 유용하리라고 생각한다. 앞으로 분리된 신호의 보상시 주파수의 제한 없이 보상할 수 있는 curve-fitting 방법에 대한 연구가 필요하리라 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] Naval Ship Systems Command, "Ship Acoustical Surveys", NAVSHIPS 0900-LP-004-3000, 1967.
- [2] Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 332-341, 1983.
- [3] R. B. Randall, B. Tech. and B. A., "Frequency Analysis", Bruel and Kjar, pp. 49-53, Sept. 1987.
- [4] J. S. Bolton and E. Gold, "The Application of Cepstral Techniques to the Measurement of Transfer Functions and Acoustical Reflection Coefficients", Journal of Sound and Vibration, Vol. 93, no. 2, pp. 217-233, 1984.
- [5] R. H. Lyon, "Propagation of Transients in Complex Structures", Noise-Con 87, pp. 495-499, 1987
- [6] M. Q. Wu and M. J. Crocker, "Restoration of the Spectrum of a Steady Noise Overlapped by an Impulse," Inter-noise 88, pp. 39-42, 1988.
- [7] B. R. Musicus, Iterative Algorithm for Optimal Signal Reconstruction and Parameter Identification Given Noisy and Incomplete Data, Massachusetts, Institute of Technology Research Laboratory of Electronics Cambridge, Technical Report 496, Sept. 1982.

저 자 소 개



金敬容(正會員)

1990년 2월 아주대학교 전자공학과 학사. 1990년 3월~현재 국방과학연구소 선임연구원. 주관심분야는 음향신호처리 및 소음원 해석, 계측 제어



李章明(正會員)

第36卷 S編 第1號 參照
현재 부산대학교 전자공학과 부교수.
부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 전자기술부장