

<논 문>

## 비최소 위상을 갖는 외팔보에서 SVD를 이용한 역변환 문제에 관한 연구

### A Study on the Application of SVD to an Inverse Problem in a Cantilever Beam with a Non-minimum Phase

이 상 권<sup>†</sup> · 노 경 래\* · 박 진 호\*\*

Sang-Kwon Lee, Kyoung-Rae Noh and Jin-Ho Park

(2001년 7월 10일 접수 ; 2001년 11월 5일 심사완료)

**Key Words** : SVD(singular value decomposition), Singular Value(특이값), Non-minimum Phase(비최소 위상), Inverse Problem(역변환 문제), Ill-conditioning(불량조건), Noise Reduction(잡음제거)

#### ABSTRACT

This paper presents experimental results of source identification for non-minimum phase system. Generally, a causal linear system may be described by matrix form. The inverse problem is considered as a matrix inversion. Direct inverse method can't be applied for a non-minimum phase system, the reason is that the system has ill-conditioning. Therefore, in this study to execute an effective inversion, SVD inverse technique is introduced. In a Non-minimum phase system, its system matrix may be singular or near-singular and has one more very small singular values. These very small singular values have information about a phase of the system and ill-conditioning. Using this property we could solve the ill-conditioned problem of the system and then verified it for the practical system(cantilever beam). The experimental results show that SVD inverse technique works well for non-minimum phase system.

#### 1. 서 론

역변환 문제(inverse problem)는 여러 공학분야에서 복잡하고 매우 중요한 문제로 이에 대한 관심도는 높아지고 있다. 또한 현재 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 방법과 연구결과들이 나오고 있다.<sup>(1,2)</sup> 일반적으로 많은 상황에서 측정된 데이터의 변수들과 관계된 시스템은 선형 또는 선형화 되어 질 수 있는

것들이다. 따라서 이러한 선형적이고 인과적 시스템의 입력과 출력의 관계는 행렬형태로 공식화 할 수 있다. 행렬형태는 시간과 주파수상에서 발생하는 수치적 관계를 조직화하는데 매우 편리하며 선형적 역변환 문제는 행렬의 역변환 문제와 동일하게 볼 수 있다. 일반적으로 역변환 과정은 켈스트럼 스무싱(cepstrum smoothing)을 이용하면 구조 변화성에 유용하다. 하지만 어떤 환경에서는 이것이 적절하지만<sup>(3,4)</sup> 만약 시스템이 비최소 위상 시스템일 경우에는 이러한 과정은 다른 과정을 포함하지 않고는 인과적이고 안정적인 역변환 필터를 가지는 것은 불가능하다. 비최소위상 시스템일 경우 그 시스템 행렬은 근사특이(near-singular)행렬 또는 특이(singular)행렬이 되고 하나 이상의 최소 특이값(smallest singular value)을 가지

† 책임저자, 정회원, 인하대학교 기계공학과  
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr  
TEL : (032)860-7305 FAX : (032)868-1716

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 한국원자력연구소

며 시스템은 불량조건(ill-conditioning)을 가진다. 또한, 시스템 행렬의 특이값은 시스템의 위상에 대한 정보와 불량조건에 대한 정보를 가진다. 비최소 위상을 갖는 시스템의 불량 조건인 역변환 문제를 해결하기 위해서 SVD 기법이 소개되었다.<sup>(5, 6)</sup> 이 경우에 이론적으로 그 과정을 설명했으나 실제 실험적으로 검증되지 못했다. 본 연구는 이 기법을 실제적인 문제에 적용하고 필요한 검증을 위해서 비최소 위상을 갖는 외팔보에 대해서 실험을 수행하였으며 이 과정에서 문제점에 대해 알아보고 해결하는 방법에 대해서 연구하였다.

## 2. 이론

### 2.1 시스템의 입·출력 관계

인과적이고 선형적 시스템의 입·출력 관계는 행렬 형태로 공식화될 수 있다.

이러한 행렬 공식화는 승적(convolution) 형태의 입·출력 관계로부터 유도될 수 있다.

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

여기서 \*는 승적(convolution),  $x(n)$ 은 입력,  $h(n)$ 은 충격응답함수, 그리고  $b(n)$ 은 잡음항이다. 따라서 식 (2)와 같이 표현될 수 있으며

$$y(n) = \sum_{k=0}^n x(k)h(n-k) + b(n) \tag{2}$$

입·출력의 관계는 식 (3)과 같이 행렬형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \dots \\ y(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(0) & 0 & \dots & 0 \\ h(1) & h(0) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ h(m) & h(m-1) & \dots & h(m-n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \dots \\ x(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b(0) \\ b(1) \\ \dots \\ b(m) \end{bmatrix}$$

또는  $y = Ax + b$  (3)

여기서,  $y$ 는 출력벡터,  $x$ 는 입력벡터,  $A$ 는 시스템 행렬,  $b$ 는 잡음 벡터이다.

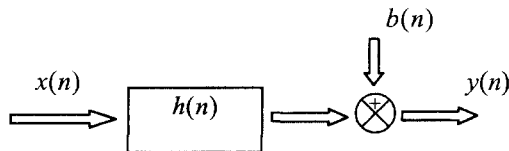


Fig. 1 Input-output relationship

### 2.2 비최소 위상 시스템의 역변환

일반적으로 시스템이 최소 위상 시스템일 경우 시스템행렬의 역행렬이 항상 존재하며 안정적이다. 하지만  $z$ -영역에서 영점이 단위원 밖에 존재하는 비최소 위상시스템에서의 시스템행렬은 근사특이행렬 또는 특이 행렬이므로 역변환이 존재하지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 SVD(singular value decomposition)를 이용한다. 먼저 시스템행렬,  $A$ 의 특이값(singular value)의 성질을 알아보면 시스템이 최소 위상 시스템일 경우와 비최소 위상 시스템일 경우 시스템 행렬의 특이값의 분포를 살펴보면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2(a)와 같은 최소 위상 시스템에서는 Fig. 2(b)와 같이 특이값의 분포는 변화가 작고 Fig. 2(c)와 같은 비최소 위상 시스템에서는 Fig. 2(d)와 같이 다른 특이값들과 구별되는 매우 작은 특이값을 가진다. 그리고 매우 작은 특이값의 개수는 Fig. 2(d)에서  $z$ -영역에서 단위원밖의 영점의 개수와 동일하며<sup>(5)</sup> 최소한 하나 이상의 매우 작은 특이값을 가진다. 시스템행렬에 대해 조건(conditioning)을 판단하는 데 상태수(condition number),  $k(A)$ 가 사용되며 이것은 다음과 같이 정의된다.<sup>(7)</sup>

$$k(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| \tag{4}$$

여기서  $\|\cdot\|$ 는 행렬 정규(norm)이다. 상태수는  $y = A \cdot x$ 의 역변환 문제에서 해의 민감도

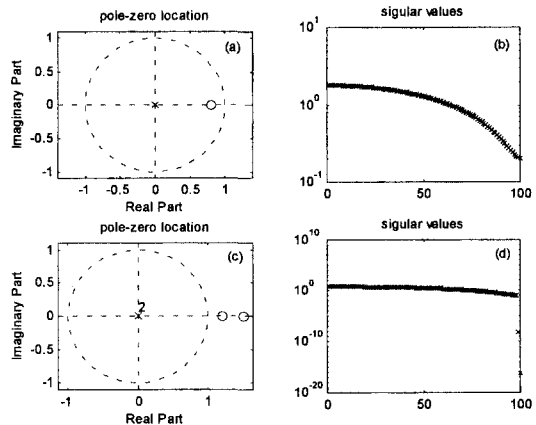


Fig. 2 Distribution of singular values of the minimum phase system and non-minimum phase system

(sensitivity)를 측정하는 기준이다. 만약 상태수가 매우 크다면 시스템행렬( $\mathbf{A}$ )은 불량조건이다. 2-정규(2-norm)를 사용하면 상태수는 최대 특이값과 최소 특이값의 비로서 나타내어질 수 있으며 식 (5)와 같다.

$$k(\mathbf{A}) = \frac{s_{\max}(\mathbf{A})}{s_{\min}(\mathbf{A})} \quad (5)$$

따라서 시스템행렬에 대한 상태수는 특이값으로 표현되며 Fig. 2에서 비최소 위상 시스템에서 최소 특이값이 0일 경우는 시스템행렬이 특이행렬이 되며 0이 아닌 매우 작은 값일 경우는 시스템행렬이 근사특이행렬이 되며 불량 조건을 발생시킴을 알 수 있다. 따라서 시스템행렬의 특이값은 시스템 위상에 대한 정보를 가지며 시스템의 불량조건을 판별할 수 있다. 이러한 비최소 위상 시스템에 대해서 식 (6)과 같은 직접적인 역변환이 불가능하다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{y} \quad (6)$$

따라서, 이러한 시스템의 불량조건 문제를 해결하기 위해 SVD기법을 이용하여 시스템의 매우 작은 특이값을 적당한 양의 값으로 대체 시킨다. 이러한 일련의 과정은 SVD( $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$  여기서  $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ : 직교행렬,  $\mathbf{S}$ : 대각행렬)를 이용하여 시스템행렬의 특이값을 계산한 다음 특이값을 대각선 항으로 가지는 행렬  $\mathbf{S}$ 에서 불량조건을 유발시키는 작은 특이값을 분리하고 적당한 양의 값으로 대체시켜 특이값으로 구성된 대각행렬  $\hat{\mathbf{S}}$ 을 만든다.  $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{U}\hat{\mathbf{S}}\mathbf{V}^T$ 을 이용하여 시스템 행렬  $\hat{\mathbf{A}}$ 을 계산한다. 새롭게 구해진 시스템행렬  $\hat{\mathbf{A}}$ 은 불량조건화 되지 않으며 근사적인 역변환 과정에 용이하다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{y} \quad (7)$$

### 2.3 잡음 제거

랜덤 잡음의 영향을 받는 출력  $y(n)$ 에 대해 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 잡음의 영향으로 인하여 원하고자 하는 데이터를 얻을 수 없으므로 SVD를 이용하여 잡음의 영향을 제거할 수 있다. 주어진 데이터 행렬에 대해 SVD를 취하면 행렬의 특이값을 구할 수 있다. 즉, 행렬의 특이값은 잡음의 정도, 에

너지 그리고 행렬의 계수(rank) 등과 같은 다양한 정보를 가지므로 이러한 성질을 기반으로 신호와 잡음의 분리에 용이하게 사용할 수 있다.<sup>(8)</sup> 그러므로 SVD는 잡음의 영향을 받은 데이터로부터 신호를 검출할 수 있는 하나의 필터로 간주할 수 있다. 위 식을 행렬형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b} \quad (8)$$

출력  $\mathbf{y}$ 에 대해 신호에 대한 잡음의 영향을 고려하기 위해 데이터 행렬,  $\mathbf{Y}$ 을 만든 후 SVD를 이용한다.<sup>(5, 9)</sup>

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (9)$$

만약 존재하는 신호가 잡음과 비교되어 강하다면 즉, 신호대잡음비(SNR)가 비교적 낮지 않다면 행렬  $\mathbf{Y}$ 의 특이값은 다음과 같이 두 그룹으로 나뉘어 질 수 있다.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_b \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 부행렬(submatrix)  $\mathbf{S}_s$ 는 입력신호와 관련 있는 특이값을 표현하고  $\mathbf{S}_b$ 는 잡음과 관련 있는 특이값을 표현한다. 행렬  $\mathbf{S}$ 에 대응하여 전반부행렬  $\mathbf{U}$ 는 다음과 같이 나뉘어 질 수 있다.

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s, \mathbf{U}_b] \quad (11)$$

또한  $\mathbf{U}_s$ 는 신호영역과 관련이 있으며  $\mathbf{U}_b$ 는 잡음영역과 관련이 있다. 결과적으로  $\mathbf{U}_s$ 의 열(column)의 전장(span)은 신호 부공간(signal subspace)라 하고  $\mathbf{U}_b$ 의 열(column)의 전장(span)은 소음 부공간(noise subspace)이라 한다. 여기서 신호영역  $\mathbf{U}_s$ 와 잡음영역  $\mathbf{U}_b$ 는 서로 직교(orthogonal)한 투영(projection)으로 표현되므로 잡음에 대한 부분은 제거할 수 있다.<sup>(9)</sup> 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}^T \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_s^T \mathbf{Y} \\ \mathbf{U}_b^T \mathbf{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_s \\ \mathbf{X}_b \end{bmatrix} \quad (12)$$

따라서 측정되는 신호에 대해 입력신호의 영향만을 포함하는 행렬  $\hat{\mathbf{Y}}$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{U}_s \mathbf{X}_s = \sum_{i=1}^n s_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (13)$$

여기서  $u_i$  과  $u_i$  는 행렬  $U$  와  $V$  의  $i$  번째 열 (column)이며  $s_i$  는 행렬  $S$  의  $i$  번째 특이값이다.  $n$  은 나머지 특이값과 구별되는 큰 특이값의 개수이다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치 및 실험 방법

본 실험에서 사용된 장치의 개략도는 Fig. 3에 표시하였다.

실험 장치에 사용되는 장치로는 한쪽 부분이 고정된 외팔보(389 mm×25.3 mm×5 mm,  $Al$ )와 신호를 측정하기 위한 가속도계(accelerometer), 신호를 주기 위한 함수발생기(function generator), 주어진 신호를 증폭시키기 위한 증폭기(power amplifier), 가진기(electromagnetic exciter) 또는 충격망치(impact hammer), 입력신호를 측정하기 위한 힘변환기(force transducer)가 있다. 힘변환기와 가속도계를 통한 신호를 받기 위해 전하증폭기(charge amplifier)를 통하여 증폭시키고 DAQ 보드(BNC-2090)를 이용하여 트리거(trigger) 되어진 신호를 PC를 통해서 얻는다.

본 실험 진행 방법은 다음과 같다. 먼저 시스템(외팔보)에 대해 알고 있는 입력신호와 출력신호를 이용하여 시스템 함수, 시스템 행렬을 구한 다음 이 시스템에 대해 다른 입력신호 즉, 미지(未知)신호를 가하여 출력신호를 측정한다. 마지막으로 구한 시스템행렬과 측정된 출력신호를 이용하여 다른 입력신호를 판단하였다.

#### 3.2 시스템 규명(System Identification)

실험에서 먼저 시스템 함수 즉, 시스템행렬을 구하기 위한 충격응답함수에 대해 알아보고 다음 시스템

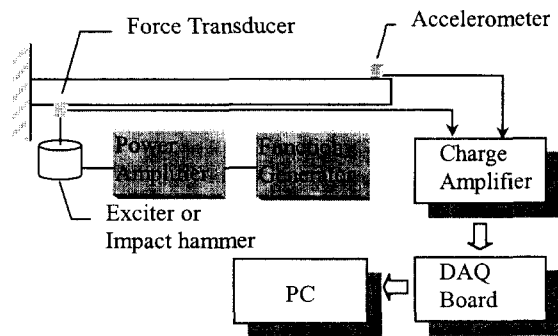


Fig. 3 Experimental set-up

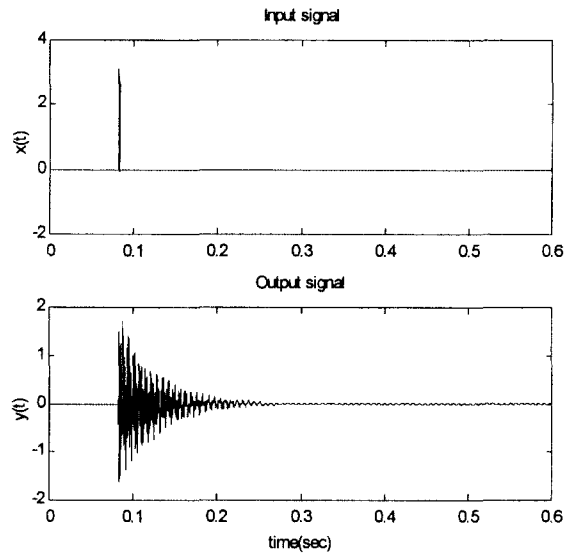


Fig. 4 Input  $x(n)$  and response  $y(n)$

에 대한 위상정보를 알아보자.

#### (1) 충격 응답 함수

시스템에 대한 충격응답함수를 구하기 위하여 실험에서는 두가지 방법을 사용하였다. 첫째, 충격망치를 이용한 충격실험(impact testing)으로 충격응답함수,  $h(n)$ 를 구한다. 충격실험에서의 시스템의 입력신호  $x(n)$ , 출력신호  $y(n)$ 는 Fig. 4와 같으며 두 신호를 이용하여 충격응답함수를 구한다. 둘째, 가진기(exciter)를 이용한 랜덤실험(random testing)을 통해 충격응답함수를 구한다. 먼저 가진된 랜덤신호와 출력신호 즉, 알고 있는 입·출력 신호를 이용하여 주파수 응답 함수(frequency response function)을 구한다. 주파수 응답 함수 평가는 식 (14)와 같다.

$$\hat{H}(f) = \frac{\hat{G}_{xy}(f)}{\hat{G}_{xx}(f)} \tag{14}$$

여기서  $\hat{G}_{xx}(f)$ 는 자기 스펙트럼 밀도 함수(auto-spectral density function),  $\hat{G}_{xy}(f)$ 는 상호 스펙트럼 밀도 함수(crossspectral density function)이다. 일반적인 기여도 함수(coherence function)의 평가는 다음과 같다.

$$\hat{\gamma}^2(f) = \frac{|\hat{G}_{xy}(f)|^2}{\hat{G}_{xx}(f)\hat{G}_{yy}(f)} \tag{15}$$

주파수 응답 함수를 구함에 있어서 발생하는 여러가지 오차를 완전히 없애기는 매우 힘들다. 주파수 응답 함수 평가 과정의 편향, 확산에 따른 시간 지연의 편향, 시스템 변수의 비선형적 영향, PSD(power spectral density)와 CSD(cross spectral density)의 평가치의 편향 그리고 입력 신호의 측정 잡음 등의 영향으로 인하여 편향오차(bias error)가 발생한다.<sup>(11)</sup>

이러한 오차를 완전히 없애기는 매우 힘든 문제이다. 따라서 오차의 영향을 최소화함으로써 즉, 충분한 평균화 작업, 기여도 함수의 평가 등을 이용하여 주파수 응답 함수를 구한다. 이러한 과정을 통해 가진된 랜덤 신호와 출력 신호를 통해 자기 스펙트럼 밀도 함수와 상호 스펙트럼 밀도 함수를 이용하여 주파수 응답 함수 평가는 Fig. 5와 같다.

구해진 주파수 응답 함수로부터 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 이용하여 충격 응답 함수(impulse response)를 구한다. 이를 통해 구해진 충격 응답 함수는 Fig. 6과 같으며 잡음의 영향, 측정오차 및 주파수 응답 함수를 구함에 있어서 오차로 인하여 실제적인 시스템에 대해 근사적인 측정치이다.

(2) 극점과 영점의 도시(Pole-Zero Plot)

$z$ -변환을 이용하여 영점의 위치를 파악하여 시스템 즉, 외팔보에 대한 위상정보를 쉽게 알 수 있다. 시스템의 극점과 영점의 도시에서 영점이 단위원 밖에 존재할 경우 이 시스템은 비최소 위상 시스템이며

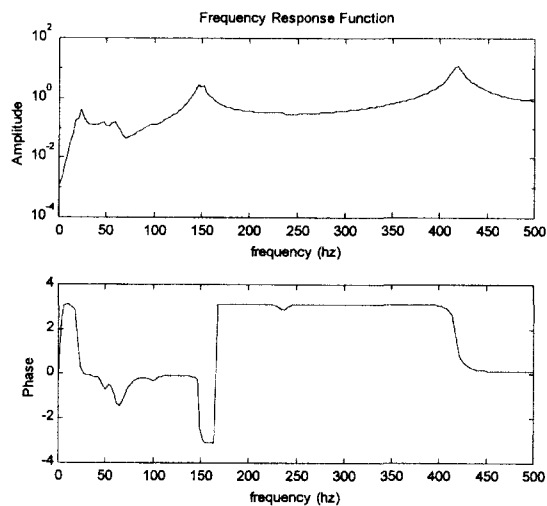


Fig. 5 Magnitude and phase of estimated frequency response

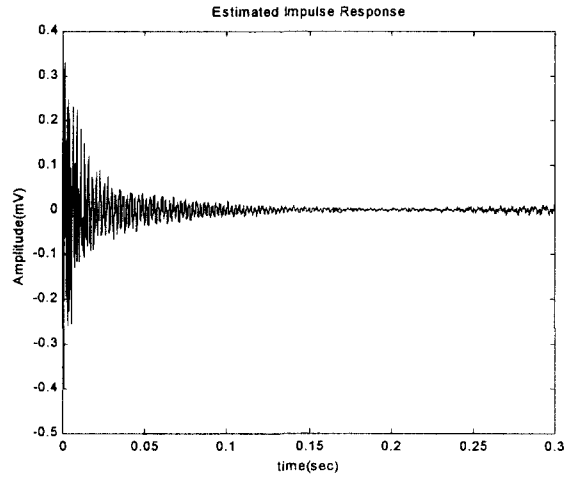


Fig. 6 Estimated impulse response

시스템 행렬은 불량조건을 가지므로 직접적인 역변환이 불가능하다. 또한 단위원 밖에 존재하는 영점의 개수를 통해 시스템 행렬의 특이값의 분포를 예측할 수 있으며 매우 작은 특이값의 개수를 파악할 수 있다. 이러한 정보를 알기 위해 한정된 길이의 충격 응답 함수,  $h(n)$ 을  $z$ -변환하여 수치적으로 근을 계산하여 시스템의 영점과 극점을 도시하면 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서의 극점과 영점의 도시를 보면 이 시스템은 영점이 단위원 밖에 존재하는 비최소 위상임을 알 수 있다. 또한 주어진 계수 즉, 충격 응답 함수가 정확한 것이 아니므로 시스템의 실제적인 극점, 영점과는 다를 수 있으며 이러한 계수들의 오차가 크다면 시스템의 원하는 정보를 얻을 수 없다.

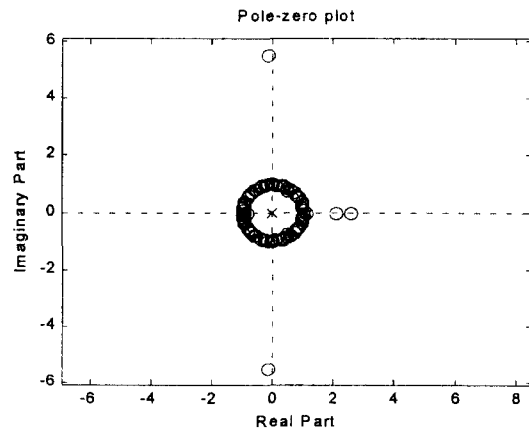


Fig. 7 Pole-zero plot of  $z$ -transform of the finite impulse response

### 4. 결과 및 해석

본 실험에서는 비최소 위상 시스템의 역변환 문제에 대해 직접적인 역변환을 통해 구한 신호와 SVD 역변환 기술을 이용하여 구한 신호를 비교, 분석하였다. 일반적으로 비최소 위상 시스템에서 불량조건이 존재하므로 직접적인 역변환이 불가능하다. 따라서 이러한 문제의 해결을 위해 SVD역변환 기술을 이용하였다. 알고 있지 않은 입력신호에 대한 출력을 측정하고 이에 대한 SVD역변환 기술을 이용하여 입력 신호를 판단하고 잡음제거를 위해 SVD필터를 이용하였다. 이러한 일련의 역변환 과정은 Fig. 8과 같다.

각각의 입력신호 즉, 충격신호 Fig. 9(a)와 두 충격신호 Fig. 10(a) 및 시스템에 대한 출력신호 Figs. 9, 10(b)는 다음과 같다.

각기 다른 입력신호에 대한 출력신호 Figs. 9, 10(b)와 구해진 시스템행렬을 이용하여 직접적인 역변환을

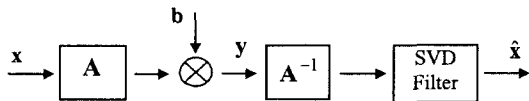


Fig. 8 Stages of the inversion

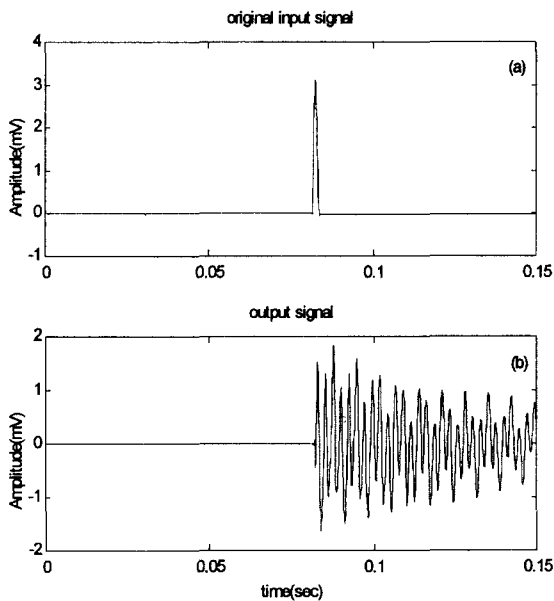


Fig. 9 Original input(impact) signal (a) and output(response) signal (b)

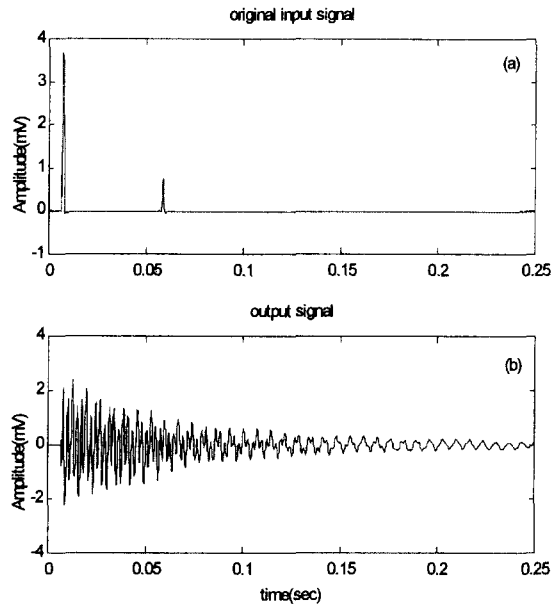


Fig. 10 Original input (double impact) signal (a) and output (response) signal (b)

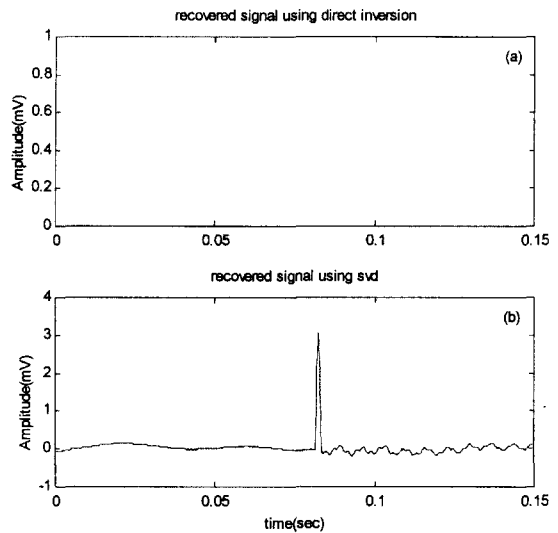


Fig. 11 Recovered signal using direct method (a) and recovered signal using SVD inverse technique (b)

통해 구한 입력신호와 SVD역변환 기술을 이용하였을 때 구한 입력신호를 서로 비교해 본 것이 Figs. 11, 12와 같다. Figs. 11, 12(a)에서 보듯이 비최소 위상 시스템에서 불량조건으로 인하여 직접적인 역변환으로 입력신호를 전혀 찾을 수 없음을 알 수 있다.

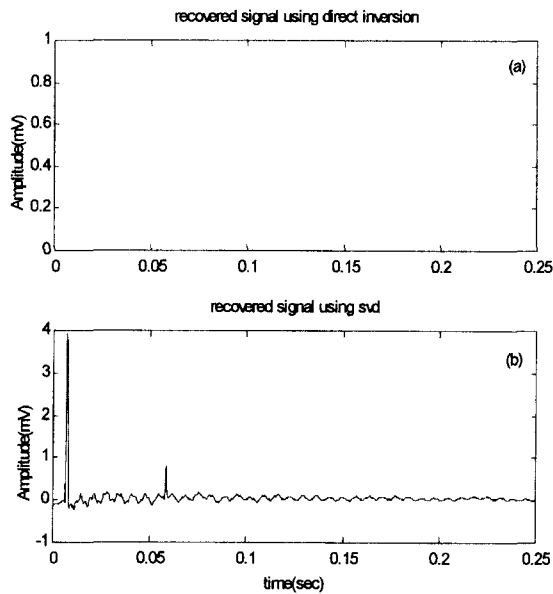


Fig. 12 Recovered signal using direct method (a) and recovered signal using SVD inverse technique (b)

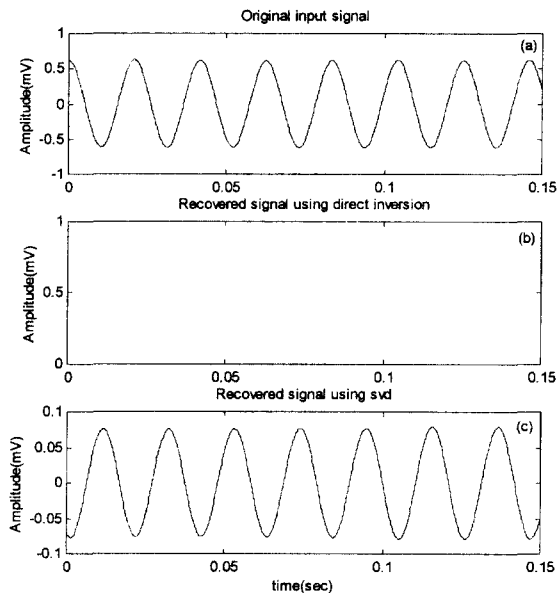


Fig. 13 Original input signal (sine signal) (a), recovered signal using direct method (b) and recovered signal using SVD inverse technique (c)

이는 시스템행렬이 특이행렬 또는 근사특이행렬 이므로 구해진 입력값이 무한대이거나 값을 가질수 없음을 나타낸다. 반면에 Figs. 11, 12(b)의 SVD역변환

기술을 이용하여 구한 입력신호는 원 입력신호에 근사적인 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 12(b)에서 크기가 각기 다른 충격신호에 대해서도 근사적으로 잘 찾아냄을 알 수 있다.

가진기(exciter)를 이용한 정현파신호에 대한 그 출력과 구해진 시스템행렬을 이용하여 직접적인 역변환 과정을 수행하여 구한 입력신호와 SVD역변환 기술을 이용하여 구한 입력신호는 Figs. 13, 14와 같다. 실험에서 사용된 시스템행렬은 각기 다른 방법으로 구하여진 충격응답함수가 사용되었으며 Fig. 13은 충격실험을 통하여 구한 충격응답함수를 이용하였으며 Fig. 14는 랜덤실험을 통하여 구한 충격응답함수를 이용하였다. Figs. 13, 14(a)는 원입력(정현파)신호이며 Figs. 13, 14(b)에서 보듯이 직접적인 역변환을 이용하여 재생된 신호는 각기 다른 방법으로 구하여진 시스템행렬을 이용한 양쪽 모두 재생이 불가능함을 알 수 있다. Figs. 13, 14(c)에서 SVD역변환 기술을 이용하여 재생된 신호이며 Fig. 13(c)에서 재생된 정

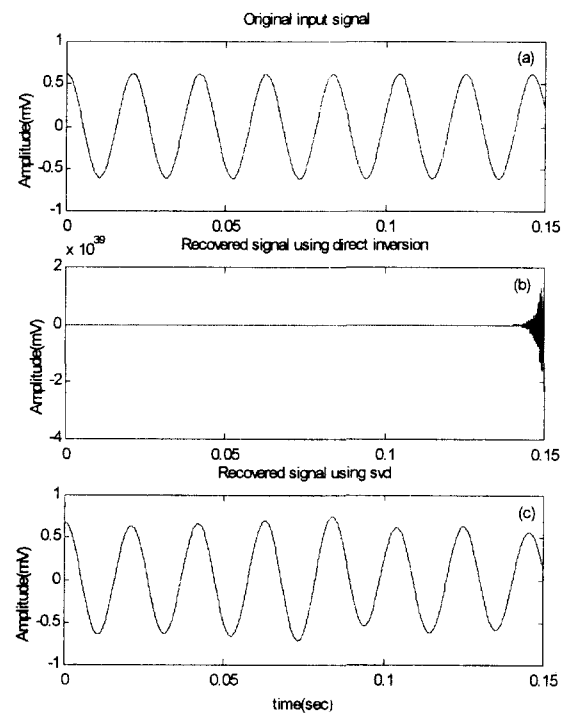


Fig. 14 Original input signal (sine signal) (a), recovered signal using direct method (b) and recovered signal using SVD inverse technique (c)

현과 신호는 원 정현파 신호와 그 크기와 위상차가 다를 수 있다. 하지만 Fig. 14(c)에서 재생된 신호는 원 신호에 근사적인 값을 가짐을 알 수 있다. 즉, 정현파 신호의 재생에서의 시스템행렬은 가진기 설치에 따른 시스템 특성의 변화를 고려하기 위하여 가진기를 이용한 랜덤실험으로 구하여진 충격응답함수를 사용하여야 됨을 알 수 있다. 그러므로 충격신호일 경우에는 충격망치를 이용한 충격응답함수를 구하여야 하며 가진기를 이용한 경우에는 가진기를 이용한 충격응답함수를 구하여야 한다. 따라서 실제 SVD를 응용한 경우에는 충격응답함수를 주의해서 구해야 한다. 본 실험 결과를 살펴보면 다른 종류의 입력신호에 대하여 직접적인 역변환 방법과 SVD역변환 기술을 이용하여 재생된 신호를 볼 수 있으며 비최소 위상 시스템에서의 역변환 문제에 대해 SVD역변환 기술을 이용하여 원 신호에 근사적인 값을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 비최소 위상 시스템상에서의 역변환 과정에서 발생하는 시스템 행렬의 불량조건 및 특이조건 문제를 해결하기 위해 SVD역변환 기술을 이용하여 수행하였으며 또한 잡음의 영향을 제거하기 위해 SVD를 이용하였다. 실험결과를 통해 보듯이 각각의 입력신호(충격신호, 두 충격신호, 정현파)에 대해 출력과 시스템함수를 이용하여 역변환을 통해 재생된 신호를 얻었으며 SVD역변환 기술이 비최소 위상 시스템에서의 역변환 과정에서 유용하지만 실제적으로 응용할 경우에는 충격응답함수를 구하는 방법에 따라서 많은 영향을 받는다. 그러므로 SVD를 응용할 경우에 충격응답함수를 주의해서 구해야 한다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업비의 지원으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) Bertero, M. and Mol, C. D., 1995, "SVD for Linear Inverse Problems : SVD and Signal Processing", Elsevier.
- (2) Van, S. C., 1989, "Inverse Problems : Tutorial Survey, Underwater Data Processing", pp. 393~411.
- (3) Lyon, R. H., 1986, Machinery Noise and Diagnostics, Butterworth.
- (4) Kim, J. T. and Lyon, R. H., 1992, "Cepstral Analysis As a Tool for Robust Processing, Deverberation and Detection of Transients", Mechanical Systems and Signal Processing", Vol. 6, pp. 1~15.
- (5) Hashemi, S. and Hammond, J. K., 1996, "The Interpretation of Singular Values in the Inversion of Minimum and Non-minimum Phase Systems", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 10, No. 3, pp. 225~240.
- (6) 노경래, 이상권, 2001, "비최소 위상 시스템에서 음재생을 위한 역변환 필터의 구현", 한국소음진동학회 춘계학술대회논문집, pp. 997~1002.
- (7) Golub, G. H. and Van Loan, C. F., 1996, Matrix Computation, The John Hopkins University Press.
- (8) Callaerts, D. et al., 1998, "On-line Algorithm for Signal Separation Based on SVD in : E. F. Deprettere, ed. SVD and Signal Processing : Algorithms, Applications and Architectures", Elsevier, pp. 269~276.
- (9) Sadasivan, P. K. and Narayana Dutt, D., 1996, "SVD Based Technique for Noise Reduction in Electro-encephalographic Signal", Signal Processing, Vol. 55, pp. 179~189.
- (10) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2000, Random data: Analysis and Measurement Procedures, John-Wiley & Sons, inc.