

ICA 기법을 이용한 구조물의 진동원 신호 규명

김국현¹ · 권혁민² · 조대승^{2,†} · 김재호³ · 전재진³
동명대학교 조선공학과¹
부산대학교 조선해양공학과²
국방과학연구소³

Vibration Source Signal Identification of Structures Using ICA

Kookhyun Kim¹ · Hyuk-Min Kwon² · Dae-Seung Cho^{2,†} · Jae-Ho Kim³ · Jae-Jin Jun³
Dept. of Naval Architecture, Tongmyong University¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University²
Agency for Defense Development³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Independent component analysis (ICA) technique based on statistical independency of the signals is known as suitable to identify the source signals by measuring and separating mixed signals through transfer paths and has successfully applied in the field of medical care, communications and so forth. In this study, the ICA technique is introduced for the identification of excitation sources from measured vibration signals of structures, which can be done by evaluating negentropy of centered and whitened vibration signals and correlation of separated signals. To validate the method, numerical analyses are carried out for a plate and a cylinder structure. The results show that the method can be applied efficiently to source identification of complex structures. Nevertheless, additional studies would be required to complement problems of occasional inaccuracy.

Keywords : Independent component analysis(독립성분석), Signal processing(신호처리), Vibration source signal identification(진동원 신호 규명), Blind source separation(블라인드 소음원 분리)

1. 서론

선박, 차량, 항공기 등과 같은 복잡한 형상 구조물들의 설계와 제작, 운용 등에 있어서 진동과 소음문제는 매우 중요한 인자로 인식되고 있다. 또한, 대상 구조물의 진동과 소음 발생 원인이 되는 세부시스템들의 소음수준과 기여도를 정확히 파악하고 전달경로를 분석한 후 적절한 제어 대책을 수립하는 것은 성능을 고도화할 수 있는 필수 기술에 해당된다. 특히, 잠수함의 진동과 소음은 은밀성(stealth)의 주요 지표가 되는 수중방사소음(underwater radiated noise) 발생의 직접적 원인이 되며, 이에 대한 제어기술은 고품질의 잠수함 설계와 건조를 위한 핵심기술에 해당된다. 이는 과도한 수중방사소음 발생이 자함에 탑재되는 음탐센서의 성능을 저하시켜 운용성능에 악영향을 미칠 뿐 아니라, 적 음탐센서의 탐지성능을 향상시켜 궁극적으로는 자함의 생존성을 위협하는 주된 요인이 되기 때문이다. 따라서 설계 및 건조에서부터 운용까지 잠수함의 진동 및 소음에 대한 정량적 평가가 요구되며, 그 결과에 따른 적절한 제어대책 수립이 필요하다.

최근 잠수함 소음원 식별 및 소음원 기여도 분석 분야에서 새

로운 기법들이 제안되고 있으며, 그 대표적인 예로 블라인드 소음원 분리(blind source separation: BSS) 기법을 들 수 있다. BSS기법은 소음원 신호와 전달경로 특성에 대한 선행 지식과 정보가 없는 상태에서 측정된 응답신호만을 활용하여 미지 소음원 신호를 복구하는 기법이다 (Siano, 2012). 따라서 잠수함과 같이 소음원에서 응답 지점까지의 정확한 전달특성에 대한 수학적 모델을 구축하기 어려운 경우와 소음원 및 전달에 관한 충분한 데이터 베이스 및 선행 지식을 얻기 어려운 경우에 BSS기법이 대안이 될 수 있다 (Antoni, 2005). 최근 들어 자기공명장치, 음향 분리, 얼굴인식 등의 분야에 있어서 BSS기법이 활용되고 있으며, 그 대표적인 예가 독립성분석(independent component analysis: ICA) 기법이다 (Hyvärinen & Karhunen, 2001).

ICA기법은 측정 등으로부터 구한 한정된 신호정보에 대해 통계적 독립성(statistical independency)을 갖는 신호들로 구분해 내는 기법으로서 수상함, 잠수함 등과 같은 복합구조물에 대한 이의 적용사례가 보고되고 있다. Briolle and Liu (2005)는 ICA기법을 이용해 잠수함 자체소음으로부터 순수 주파수 신호를 분리하였으며, Gelle and Colas (2001)는 ICA 기법을 이용한 순간 혼합 음원을 분리한 바 있다. 또한 Cheng, et al. (2011)은 박용 엔

진과 발전기 가동조건 하에서 황격벽으로부터 측정된 진동신호에 대해 ICA기법을 적용함으로써 진동원 신호를 분리하고 진동원에 근접한 위치에서의 측정결과와의 상관성을 분석한 바 있다.

본 연구에서는 구조물의 진동원 규명에 있어서 ICA기법의 실제 문제로의 적용성을 고찰한다. 이를 위해 일반적인 구조물의 진동원 신호 규명에 대한 BSS문제를 정식화하고 이를 해결하기 위한 ICA기법을 정립한다. 또한, 평판 및 원통 형상의 구조물에 대한 수치해석을 통해 진동원 신호와 제안된 기법에 의한 분리신호의 상관성을 분석하고 그 결과에 대한 고찰을 통해 실제 문제에 대한 적용 가능성을 살펴본다.

2. ICA기법을 이용한 진동원 신호 규명

2.1 BSS문제

기기류에 의한 잠수함 수중방사소음 발생 메커니즘은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 소음원 신호(source signal, s)가 선체구조 등의 전달경로(transmission path, A)를 거쳐 선체 외판에서의 진동신호(outer-shell vibration signal, x)로 나타내며, 그 진동에너지가 다시 수중방사소음(underwater radiated noise signal, p)으로 변환되어 방사되는 것으로 간주할 수 있다.

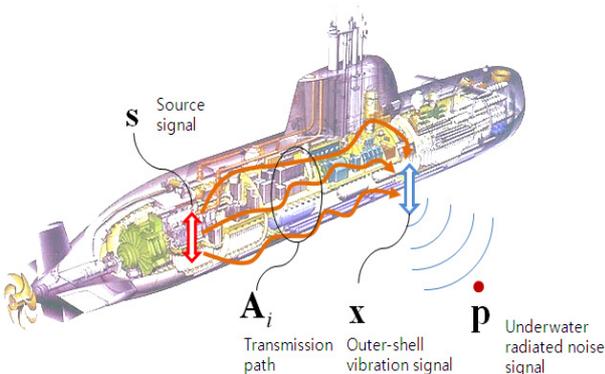


Fig. 1 Structure-borne underwater radiated noise by machinery equipment

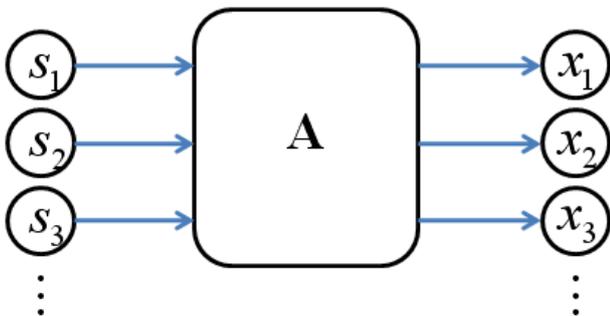


Fig. 2 Correlation diagram of vibration source and measured signals

이러한 수중방사소음 발생 메커니즘을 다수의 소음원 신호와

다수의 선체외판의 진동문제로 단순화하면, Fig. 2와 같은 진동원 신호와 수신된 진동 신호 간의 상관성 다이어그램으로 표현할 수 있다. 또한, 유한개의 진동원과 측정진동응답에 대해 식 (1)과 같은 행렬 방정식으로 표현 가능하다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \tag{1}$$

여기서, \mathbf{x} , \mathbf{A} , \mathbf{s} 는 측정진동응답 신호벡터, 혼합행렬(mixing matrix), 진동원 신호 벡터를 각각 나타내며, 식 (2)~식 (4)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}^T \tag{2}$$

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{s} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}^T \tag{4}$$

여기서, x_i , s_i 는 측정진동응답벡터와 진동원신호벡터의 i 번째 요소를 각각 나타내며, a_{ij} 는 i 번째 진동응답과 j 번째 진동원의 상관성을 나타내는 혼합행렬요소이다. 또한, n 과 m 은 진동원 신호와 측정진동응답신호의 개수이다.

한편, 혼합행렬의 역행렬 $\mathbf{W} (= \mathbf{A}^{-1})$ 를 식 (1)의 양 변에 곱해 주면 식 (5)와 같으며, \mathbf{W} 가 미지인 경우 전형적인 BSS문제가 된다.

$$\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{x} \tag{5}$$

한편, 측정진동응답 \mathbf{x} 만을 이용해 미지의 \mathbf{W} 를 적절한 기법을 이용해 구할 수 있다면, 진동원 신호 \mathbf{s} 를 쉽게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 식 (5)의 BSS문제의 해를 구하기 위해 측정진동응답신호만을 이용해 통계적 독립성(statistically independency) 신호성분을 분리함으로써 진동원 신호를 규명하는 ICA기법을 적용한다.

2.2 ICA기법

ICA기법은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 전처리(pre-processing), 주처리(processing), 후처리(post-processing) 등의 절차를 따른다.

전처리 단계에서는 ICA기법의 효율성을 높이기 위해 각각의 측정 진동응답 신호에 대한 영평균화(zero-mean)와 대각독립화(whitening)를 수행한다. 영평균화란 식 (6)에 나타낸 바와 같이 신호의 평균값이 '0'이 되도록 하는 것이다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}} \quad (6)$$

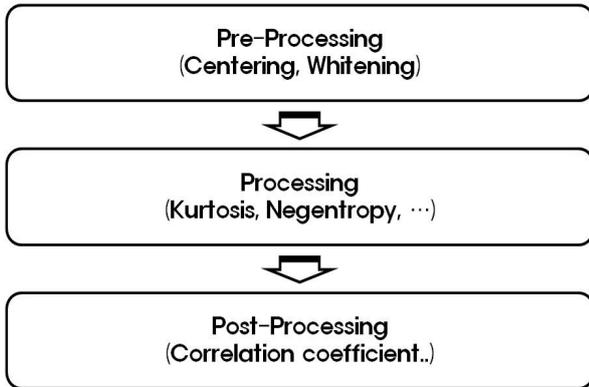


Fig. 3 ICA procedure

여기서, \mathbf{z} 는 영평균화된 진동응답신호벡터이며, $\bar{\mathbf{x}}$ 는 진동응답 신호의 평균벡터를 의미한다.

대각독립화(whitening)는 분석대상신호의 공분산행렬이 단위행렬이 되도록 하는 일련의 과정을 말한다. 이를 위해 본 연구에서는 주요인자분석(principal component analysis: PCA)기법을 적용해 대각독립화된 신호 \mathbf{y} 를 다음 식과 같이 산정하였다.

$$\mathbf{y} = (\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T)\mathbf{z} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{D} 와 \mathbf{E} 는 영평균화 신호 \mathbf{z} 의 공분산행렬에 대한 고유값(eigenvalue)으로 구성된 대각행렬(diagonal matrix)과 고유벡터(eigenvector)로 구성되는 직교행렬(orthogonal matrix)을 의미한다.

한편, 주처리 단계에서는 전처리 단계에서 구한 영평균화, 대각독립화된 신호에 대해 ICA기법을 적용함으로써 통계적 독립성(statistical independency)을 갖는 진동원 신호를 분리하는 단계이다. 통계적 독립성은 해당신호의 비가우스성(nongaussianity)이 극대화 될수록 크게 나타나며, 이에 대한 척도로 첨도(kurtosis), negentropy 등이 적용 (Hyvarinen & Karhunen, 2001) 될 수 있는데 본 연구에서는 후자를 이용하였다. Negentropy는 정보이론(information theory)에 기초하며, 식 (8)과 같이 가우스분포(y_{gauss})와 임의변수분포(y)의 엔트로피(entropy)차이로 정의된다.

$$J(y) \approx H(y_{gauss}) - H(y) \quad (8)$$

여기서, $J(y)$ 는 해당신호의 negentropy를 의미하며, $H(y_{gauss})$ 와 $H(y)$ 는 식 (9)에 정의된 가우스분포와 임의변수분포의 엔트로피를 각각 나타낸다.

$$H(y) = - \int p(y) \log p(y) dy \quad (9)$$

한편, 식 (8)에서 정의한 negentropy는 실제에 있어서 편의성과 계산효율을 고려해 식 (10)과 같이 근사할 수 있다 (Hyvarinen & Karhunen, 2001).

$$J(y) \propto [E\{G(y)\} - E\{G(y_{gauss})\}] \quad (10)$$

여기서, $E\{\cdot\}$ 는 기대치를 의미하며, $G(y)$ 는 비차함수(nonquadratic function)로써 본 연구에서는 식 (11)을 적용하였다.

$$G(y) = \frac{1}{a_1} \log \{ \cosh a_1 y \} \quad (1 \leq a_1 \leq 2) \quad (11)$$

마지막으로, 후처리 단계에서는 진동원 신호와 ICA기법을 통해 추출한 신호의 상관성분석을 수행한다. 본 연구에서는 식 (12)에 정의된 상관성계수(correlation coefficient) ρ_{sy} 를 적용하였다. 참고로, ρ_{sy} 가 1에 가까울수록 두 신호벡터들 사이의 상관성이 높다는 것을 의미한다.

$$\rho_{sy} = \frac{\sum_{k=1}^n s(k)y'(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n s^2(k) \sum_{k=1}^n y'^2(k)}} \quad (12)$$

여기서, $s(k)$ 와 $y'(k)$ 는 진동원 신호와 ICA기법을 이용해 구한 신호의 k -번째 값을 각각 나타낸다. 상기 ICA 기법을 이용한 혼합행렬의 역행렬을 산정하는 흐름도는 Fig. 4에 나타내었다.

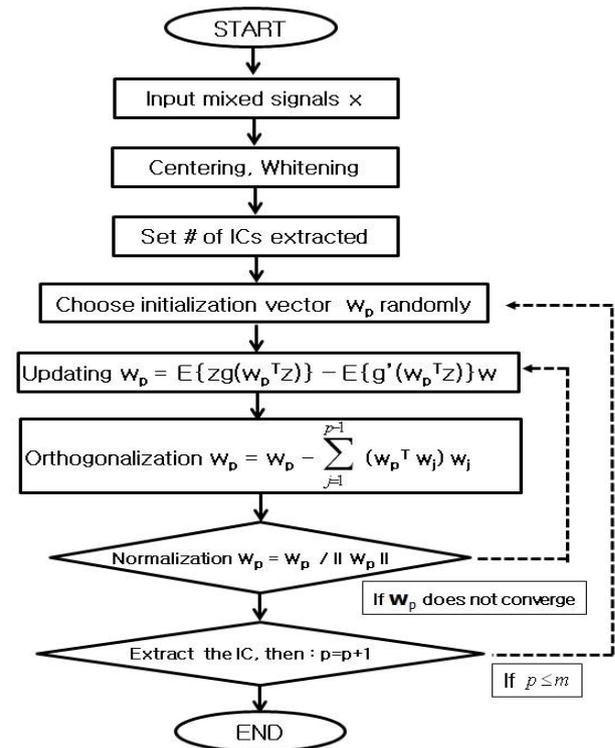


Fig. 4 ICA flowchart

3. 수치해석 및 고찰

구조물 진동원 규명에 ICA기법의 적용 가능성을 살펴보기 위해 평판 및 원통 형상의 구조물에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과를 고찰하였다. 이때, 대상구조물의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 참고로, 수치해석모델의 측정진동응답해석은 MSC/NASTRAN을 이용하였으며, 진동원 규명은 FastICA 프로그램 (Hyvärinen & Karhunen, 2001)을 이용하였다.

Table 1 Material properties of objective structure

Elastic Modulus	E	21,000 kg/mm^2
Poisson Ratio	ν	0.3
Density	ρ	7.85E-06 kg/mm^3
Damping ratio	ζ	0.03

3.1 평판

평판에 대한 유한요소해석 모델과 기진원/수진원의 위치는 Fig. 5에 보인 바와 같다. 평판의 크기와 두께는 각각 2,000 x 1,000mm, 50mm이다. 3 번은 단순지지, 1 번은 자유단 조건으로 모델링하였으며, Fig. 5에 나타낸 S1과 S2 위치에 각각 10Hz 와 20Hz의 주파수에서 단위 조화기진력이 작용하는 것으로 가정하였다. 또한, R1, R2, R3의 진동응답점에서의 가속도 값 (mm/s^2)을 1초간 2,000Hz의 샘플링 주파수(sampling frequency)로 구하였으며, 실제의 ICA분석에는 신호가 안정화되는 0.5초에서 1초 사이에서 추출한 1,000개의 데이터를 사용하였다.

Fig. 6는 S1과 S2 위치에 작용한 조화기진력을 나타낸 것이며 Fig. 7은 측정진동응답의 위치인 R1, R2, R3에서의 가속도 신호와 이에 대한 주파수분석의 결과를 보인 것이다. 또한, Fig. 8은 R1, R2, R3에서의 진동응답신호에 대해 본 연구에서 제시한 방법으로 진동원 신호를 분리한 결과와 그 주파수 분석결과이다. 이로부터 ICA 기법으로 분리한 신호는 진동원 신호(Fig. 6)와 비교할 때 진폭에서는 차이가 있으나 신호 패턴은 부합성이 매우 높음을 확인할 수 있다.

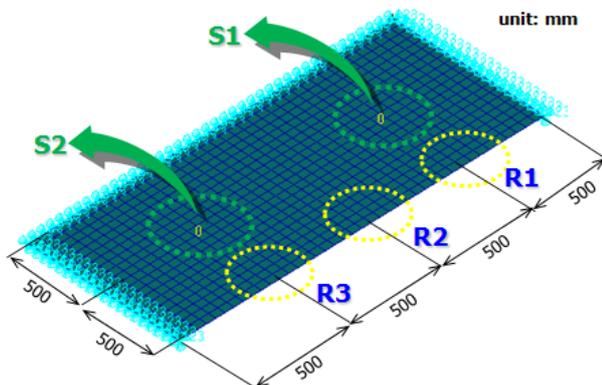


Fig. 5 Finite element model of plate

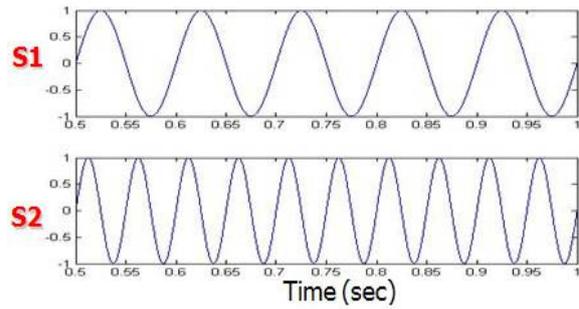


Fig. 6 Input force signal

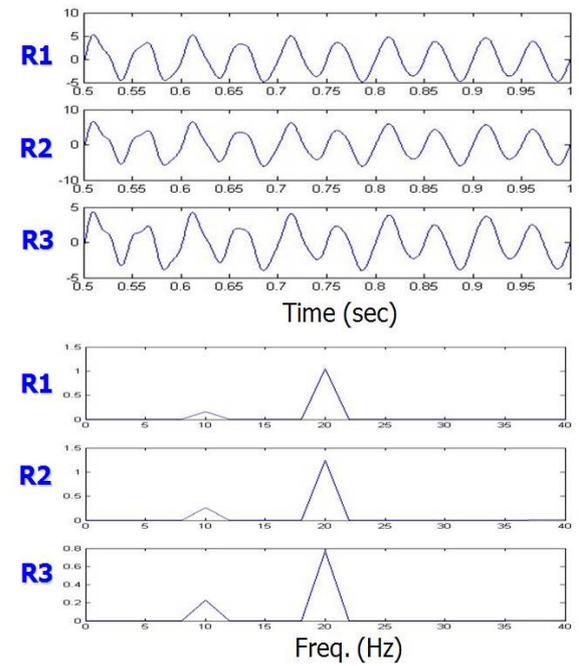


Fig. 7 Accelerations in receiver location of plate

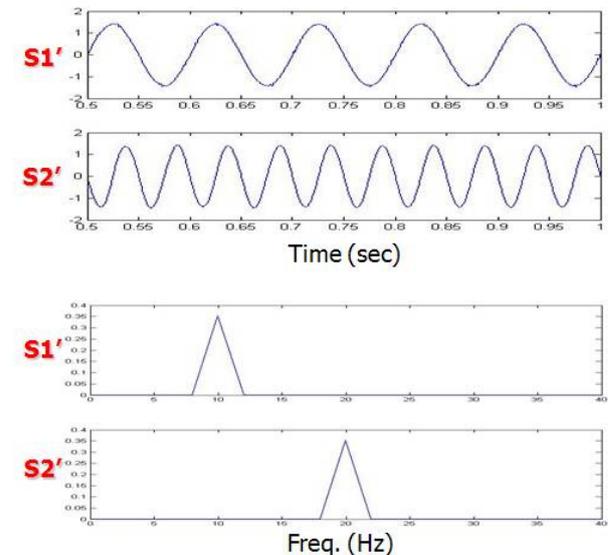


Fig. 8 Separated source signals of plate

3.2 원통

원통에 대한 유한요소해석 모델과 기진원/수진원의 위치는 Fig. 9에 보인 바와 같다. 원통은 길이 500mm, 지름 250mm, 두께 20mm이고, 한 끝단이 단순지지, 다른 끝단은 자유단 조건으로 설정하였다. 진동원 위치 S1, S2에서의 기진력은 평판의 경우와 동일하게 적용하였으며, 수신점 R1, R2, R2에서의 진동 응답 신호 추출 시간 및 간격도 평판의 경우와 동일하게 설정하였다.

Fig.10는 R1, R2, R3에서의 진동응답 신호와 그 주파수분석의 결과를 보인 것이며, 이를 이용해 ICA기법으로 진동원을 분리한 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 평판에 대한 결과와 마찬가지로 패턴에서는 높은 유사성을 보이고 있으나, 분리된 신호와 진동원 신호의 순서가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 신호간의 상관성 분석을 통해 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

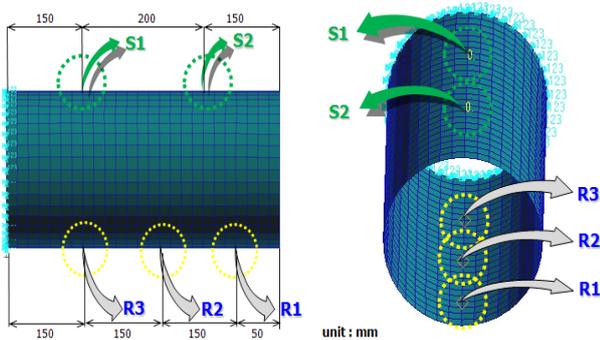


Fig. 9 Finite element model of cylinder

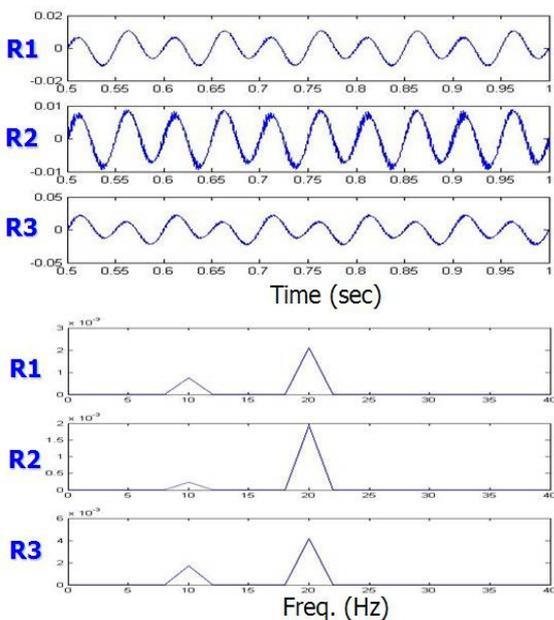


Fig. 10 Accelerations in receiver location of cylinder

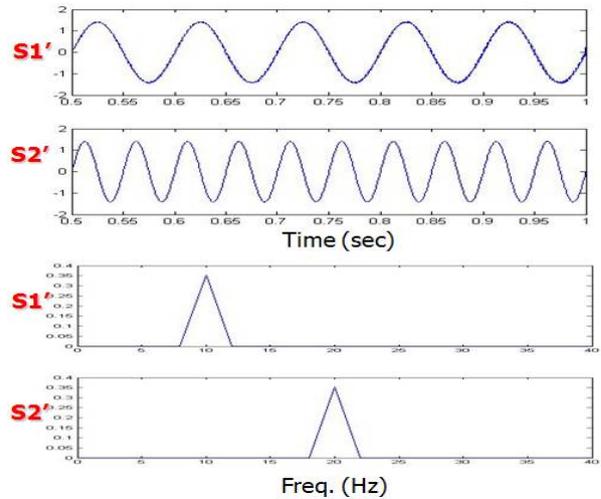


Fig. 11 Separated source signals of cylinder

3.3 상관성 분석

ICA 기법을 이용한 진동원 규명 기법의 수치해석적 안정성을 검토하고자 평판과 원통에 대한 진동원 분석을 각각 4회씩 추가로 수행하고, 원 신호와 분리신호 간의 상관성 계수를 평가한 결과를 Table 2와 Table 3에 정리하였다. 또한, Fig. 12와 Fig. 13에는 원통에 대해 상관성 계수가 가장 높은 경우(Trial 1)와 가장 낮은 경우(Trial 2)에 대한 복원신호를 원 신호와 함께 도시하였다. 상기의 결과로부터 전반적으로 높은 상관성계수를 나타내고 있으나, 원통의 경우엔 2차 시도에서 상관성계수가 매우 낮은 뿐만 아니라 분리된 신호가 원 신호와 매우 다른 패턴을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 혼합행렬의 역행렬 산정에 있어서 초기값 설정에 따라 최적화 결과가 달리 평가되었기 때문이다. 따라서, ICA 기법을 구조물의 진동원 규명에 실용적으로 활용하기 위해서는 이에 대한 보완 연구가 필요하다고 판단한다.

Table 2 Correlation coefficient between original & separated signals, % (plate model)

	Trial_1	Trial_2	Trial_3	Trial_4
S1	99.9	99.8	97.8	99.7
S2	99.9	99.6	99.8	99.9

Table 3 Correlation coefficient between original & separated signals, % (cylinder model)

	Trial_1	Trial_2	Trial_3	Trial_4
S1	99.9	99.9	99.8	99.9
S2	99.9	0.04	99.4	96.7

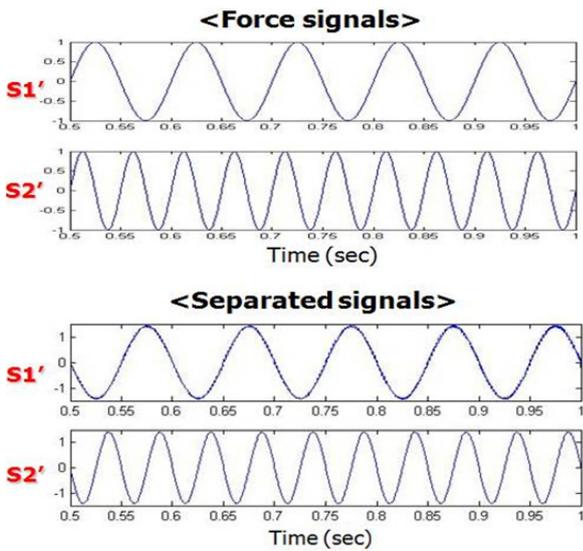


Fig. 12 Input force signals and separated signals of cylinder (trial_1)

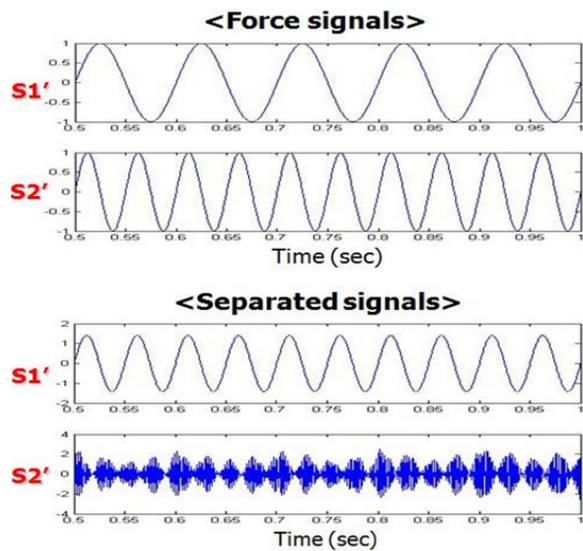


Fig. 13 Input force signals and separated signals of cylinder (trial_2)

4. 결론

본 연구에서는 구조물의 진동원 규명을 위해 소음원 분리 (blind source separation) 문제를 정식화 하고, ICA기법을 이용한 신호 분리 절차를 수립하였다. 또한, 평판 및 원통 형상의 구조물에 대해 제안된 수치해석기법을 적용하여 진동원 신호를 분리하고 원신호와의 상관성을 분석하였다. 이를 통해 제안된 ICA 기법이 구조물의 진동원 규명에 있어 충분히 적용 가능하다는 것을 확인하였다. 다만, 동일한 수치해석모델에 대해 제안된 ICA기법을 반복적으로 적용해 본 결과, 혼합행렬의 역행렬 최적화 결과에 따라 분리된 신호와 원신호간의 상관성이 극히 낮게 추정되는 경우가 발생함을 확인하였다. 따라서, ICA 기법을 구조물의

진동원 규명에 실용적으로 활용하기 위해서는 이에 대한 보완 연구가 필요하다고 판단한다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 재원 2011년도 핵심기술 위탁연구 과제와 2011년도 교육과학기술부 재원 한국연구재단의 지원 연구과제(NO. 2011-0030669)로 수행되었습니다. 본 논문은 2012년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에서 발표한 내용을 수정·보완하여 작성한 것임을 밝힙니다.

참고 문헌

Antoni, J., 2005. Blind Separation of Vibration Components: Principles and Demonstrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(6), pp.1166-1180.

Briolle, B. & Liu, X., 2005. Blind Source Separation of Internal Combustion Engine Piston Slap from Other Measured Vibration Signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(6), pp.1196-1208.

Cheng, W. Zhang, Z. & He, Z., 2011. Enhance the Separation Performance of ICA via Clustering Evaluation and Its Applications. *Advanced science Letters*, 4(6-7), pp.1951-1956.

Gelle, G. & Colas, M., 2001. Blind Source Separation: A Tool for Rotating Machine Monitoring by Vibrations Analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 248(5), pp.865-886.

Hyvärinen, A. & Karhunen, J., 2001. *Independent component analysis*. Wiley Interscience Publication.

Siano, D., 2012. *Noise control, reduction and cancellation solutions engineering*. Intech.

