독립성분분석을 이용한 평판구조물의 진동원 기여도 분석

김국현*

*동명대학교 조선공학과

Vibration Source Contribution Analysis of Plate Structure Using Independent Component Analysis

Kookhyun Kim*

*Department of Naval Architecture, Tongmyong University, Busan, Korea

KEY WORDS: Blind source separation 블라인드소스 분리, Plate structure 평판구조물, Vibration source 진동원, Contribution analysis 기여도분석, Independent component analysis 독립성분분석

ABSTRACT: The independent component analysis (ICA) technique is a source identification method that uses statistical independence to separate source signals from measured signals. It has been successfully applied to various fields such as medical care and communication. In this study, the ICA technique was adopted to analyze the vibration source contribution of plate structures. The theory of the ICA technique is introduced and the procedure of the vibration source contribution analysis based on the ICA technique is proposed. To investigate the applicability of the proposed method to plate structures, numerical examples are presented for a rectangular plate under harmonic force excitations. The results show that the proposed method could become an effective tool for the vibration source contribution analysis of a plate structure.

1. 서 론

선박, 해양플랜트 등과 같은 복합구조물의 설계와 제작, 운용에 있어서 진동은 매우 중요한 성능지표로 인식되고 있다. 따라서 이에 대한 적절한 제어 대책수립은 대상구조물의 성능을 고도화할 수 있는 필수 기술에 해당된다. 일반적으로 복합구조물의 진동 제어대책은 진동원, 전달경로, 수신점 등으로 구분하여 수립되고 적용된다. 이 중에서 진동원에 대한 제어대책은 대상구조물에 탑재되는 엔진, 펌프 등 기기류 진동에 의해 직접적으로 입력되는 진동에너지 자체를 줄이는 방법을 말한다. 따라서 수신점에 가장 크게 영향을 미치는 진동원을 정확히 파악할 수 있다면 가장 효과적인 제어대책이 될 수 있다. 이를 위해 복합구조물의 진동원들에 대한 기여도를 정도 높게 평가할 수 있는 기법에 대한 연구가 요구된다.

최근 음향, 전자기, 통신, 의료 등 다양한 분야에서 원신호(Source signal) 식별 및 기여도 분석을 위한 기법들이 제안되고 있다. 그 대표적인 예로 블라인드소스 분리(Blind source separation: BSS)기법을 들 수 있다. BSS기법은 원신호와 전달경로 특성에 대한 선행 지식과 정보가 없는 상태에서 응답신호만을 활용하여 미지의 원신호를 복구하는 방법이다. 따라서 선박, 해양플랜트 등과 같이 구조가 복잡하여 진동원에서 수신점까지의 정확한 전달특성에 대한 수학적 모델 구축이 어렵거나 진동원 및 전달에 관한 충분한 데이터 베이스 및 선행 지식을 얻기 어려

울 경우에 BSS기법이 효과적인 대안이 될 수 있다(Antoni, 2005). 최근 들어 BSS 기법의 대표적인 예로 독립성분분석(Independent component analysis: ICA)기법이 자기공명장치, 음향분리, 얼굴인식 등의 다양한 분야에서 각광받고 있다(Hyvärinen and Karhunen, 2001). ICA기법은 측정 등을 통해 확보한 한정된 신호정보를 이용해 통계적 독립성(Statistical independency)을 갖는 신호군들을 분리하는 기법이다.

선박, 잠수함 등의 복합구조물의 진동소음 문제에 대해서도 ICA기법 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 박용엔진과 발전기 가동조건 하에서 횡격벽으로부터 측정한 진동신호에 대해 ICA기법을 적용함으로써 진동원 신호를 분리하고 진동원에 근접한 위치에서의 측정결과와의 상관성 분석을 통해 진동원 기여도 분석을 수행한 바 있다. Kim et al.(2012)은 ICA기법을 이용해 평판, 원통 등의 단순 구조물에 대한 진동원 신호를 복원하고 분리된 신호와 진동원 신호와의 상관성을 분석하였다.

본 연구에서는 복합구조물에 적용 가능한 진동원 기여도 분석기법 개발의 기초연구로, ICA기법 기반의 평판 구조물 진동원 기여도 분석기법을 제안한다. 이를 위해 본 논문에서는 일반적인 구조물의 진동원 신호 분리를 위한 ICA기법의 이론을 소개하고 분리된 진동원 신호와 원신호 간의 상관성을 이용한 기여도

분석 방법과 절차를 정리한다. 제안된 방법의 진동원 기여도 분석 성능과 실제 구조물로의 적용가능성을 살펴보기 위해 다양한 주파수를 갖는 조화기진력을 받는 직사각형 평판구조물에 대한 진동원 기여도 분석을 수행하고 그 결과를 고찰한다.

2. ICA기법을 이용한 진동원 기여도 분석

선박 및 해양플랜트에 탑재되는 기기류에 의해 발생한 진동 에너지는 다양한 전달경로를 거쳐 수진점에 전달된다. 진동원과 수진점이 복수인 경우, 다중입출력(Multi-input multi-output: MIMO) 문제가 된다. 이를 환경에 의한 노이즈 성분이 없는 이상적인 선형시스템으로 가정하면, 식 (1)과 같은 행렬 방정식으로 표현할 수 있다(Hyvärinen and Karhunen, 2001).

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(t) \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{x}(t)$ 와 $\mathbf{s}(t)$ 는 수진점에서의 진동응답과 진동원에 대한 이산신호 벡터, $\mathbf{A}$ 는 진동원과 진동응답 간의 상관관계를 나타내는 혼합행렬(Mixing matrix)이며 식 (2)에서 식 (4)까지 정의한 바와 같다. 또한, t 는 시간이다.

$$\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{s}(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)\}^T \quad (4)$$

여기서, $x_i(t)$, $s_i(t)$ 는 수진점 진동응답과 진동원에 대한 이산신호 벡터의 i -번째 요소를 각각 나타내며, a_{ij} 는 i -번째 진동원 신호와 j -번째 수진점 진동응답 신호 간의 상관관계를 나타내는 혼합행렬요소이다. 또한, m 과 n 은 진동원과 수진점 개수이다.

한편, 혼합행렬의 역행렬을 $\mathbf{W}(\mathbf{A}^{-1})$ 라 하고 이를 식 (1)의 양변에 곱을 취해 정리하면 식 (5)이 된다. 이 때, $\mathbf{W}$ 가 미지인 경우 전형적인 BSS문제가 되며, 만약 측정진동응답만을 이용해 미지의 $\mathbf{W}$ 를 적절한 기법을 이용해 구할 수 있다면 진동원 신호 추정이 가능하다.

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (5)$$

본 연구에서는 식 (5)의 BSS문제의 해를 구하기 위해 측정진동응답신호만을 이용해 통계적 독립성(Statistical independency)을 갖는 신호성분으로 분리함으로써 진동원 신호를 규명하는 ICA기법을 도입하고(Kim et al. 2012), 그 과정에서 추출된 혼합행렬을 이용한 진동원 기여도 분석방법을 제안한다.

ICA기법을 이용한 진동원 기여도 분석은 전처리(Pre-processing), 주처리(Processing), 후처리(Post-processing) 등의 절차를 따른다. 전처리 단계에서는 각각의 측정 진동응답 신호에 대한 영평균화(Zero-mean)와 대각독립화(Whitening)가 수행된다. 영평균화란 신호의 평균값이 '0'이 되도록 하는 일련의 과정을 말하며, 식 (6)을 이용한다.

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

여기서, $\mathbf{z}(t)$ 는 영평균화된 수진점 진동응답 신호벡터이며, $\bar{\mathbf{x}}$ 는 수진점 진동응답신호 평균벡터를 의미한다.

대각독립화(Whitening)란 분석대상신호의 공분산행렬이 단위행렬이 되도록 하는 일련의 과정을 말한다. 이를 위해 본 연구에서는 식 (7)과 같이 주요인자분석(Principal component analysis: PCA)기법을 적용한다.

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

여기서 $\mathbf{D}$ 와 $\mathbf{E}$ 는 영평균화 신호 $\mathbf{z}(t)$ 의 공분산행렬에 대한 고유치(Eigenvalue)들로 구성된 대각행렬(Diagonal matrix)과 고유벡터(Eigenvector)들로 구성되는 직교행렬(Orthogonal matrix)이다.

주처리 단계에서는 전처리된 신호에 대해 ICA기법을 적용함으로써 통계적 독립성(Statistical independence)을 갖는 진동원 신호를 분리한다. Hyvärinen and Karhunen (2001)에 따르면, 통계적 독립성은 해당신호의 비가우스성(Nongaussianity)이 극대화 될수록 크게 나타난다. 비가우스성에 대한 척도로 첨도(Kurtosis), 네겐트로피(Negentropy) 등이 적용될 수 있으나, 본 연구에서는 네겐트로피를 적용하되 계산 효율을 고려하여 식 (8)에 정의된 네겐트로피 근사식을 이용한다.

$$J(y(t)) \approx E\{G(y(t))\} - E\{G(y(t)_{gauss})\} \quad (8)$$

여기서, $J(y(t))$ 는 네겐트로피를, $E\{\cdot\}$ 는 기대치를 의미한다. $G(y(t))$ 는 식 (9)에 정의된 비이차함수(Nonquadratic function)이며, $G(y(t)_{gauss})$ 는 이에 상응하는 가우스 신호에 대한 비이차함수이다.

$$G(y) = \frac{1}{a} \log\{\cosh ay\} \quad (9)$$

이 때, a 는 1과 2 사이의 값을 갖는 적정 상수(Suitable constant)이며, 본 연구에서는 1을 사용하였다.

마지막으로, 후처리 단계에서는 주처리단계에서 구한 진동원 신호벡터와 혼합행렬을 이용해 수진점 진동응답에 대한 진동원 기여도 분석을 수행한다. 전처리 및 주처리단계를 거치면서 구한 진동원 신호들은 그 순서가 변경될 수 있으므로 추출된 진동원 신호와 원신호의 상관성 분석을 통한 진동원 신호벡터 및 혼합행렬 요소의 재배치(Ordering)를 수행한다. 이 때, 신호의 재배치 순서는 식 (10)에 정의된 상관성계수(Correlation coefficient) ρ_{sy} 를 이용한다. 참고로, 상관성계수는 1에 가까울수록 두 신호벡터들 사이의 상관성이 높다는 것을 의미한다.

$$\rho_{sy} = \frac{\sum_{k=1}^n s_k y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^n s_k^2 \sum_{k=1}^n y_k^2}} \quad (10)$$

여기서, s_k 와 y_k 는 진동원 신호와 ICA기법을 이용해 구한 신호의 k -번째 시간에 해당하는 값을 각각 나타낸다.

한편, 수진점에서의 진동응답에 대한 진동원 기여도는 재배치된 혼합행렬 요소를 이용해 식 (11)과 같이 분석한다.

$$c_{ij} = \left| \frac{\hat{a}_{ij}}{\sum_{k=1}^m \hat{a}_{ik}} \right| \times 100 (\%) \quad (11)$$

여기서, c_{ij} 는 i -번째 수신점 진동응답에 대한 j -번째 진동원의 기여도를, $\hat{a}_{ij}$ 는 상관관계수를 참고해 재배치된 혼합행렬의 (i , j) 요소를 의미한다.

3. 수치해석 및 고찰

제안된 방법의 진동원 기여도 분석 성능과 실제 구조물로의 적용성을 고찰하기 위해 복수의 조화기진력을 받는 직사각형 평판 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 대상구조물의 크기와 두께는 각각 $2\text{m} \times 1\text{m}$, 0.02m 이며, 재질은 강으로, 탄성계수는 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 밀도는 7850 kg/m^3 , 프아송비는 0.3, 감쇠계수는 0.03으로 가정하였다. 또한, 경계조건으로 긴 두 개의 변과 짧은 한 개의 변에 대해 단순지지(Simply supported) 조건을, 나머지 한 개의

변에 대해 자유단(Free edge) 조건을 가정하였다. 진동원 기여도 분석을 위해 Fig. 1에 도시한 바와 같이 두 개의 진동원 위치(S1, S2)와 세 개의 수신점(R1, R2, R3)을 선정하고 MSC/NASTRAN(MSC, 2010)을 이용해 진동원 위치에 단위 조화기진력이 작용하는 경우에 대한 과도강제진동응답해석을 수행하였다. 이 때, 대상구조물에 대한 유한요소모델은 $0.05\text{m} \times 0.05\text{m}$ 크기의 CQUAD4 요소를 이용해 구성하였다.

Table 1 Natural frequencies of $2\text{m} \times 1\text{m}$ rectangular plate model

Mode number	Natural frequency (Hz)
1	20
2	58
3	93

Table 2 Excitation frequencies of vibration sources

Case No.	Excitation frequency (Hz)		Remark
	S1	S2	
1	5	10	Non-resonant
2	10	20	Non-resonant+Resonant
3	20	30	Resonant+Non-resonant
4	30	40	Non-resonant
5	40	58	Non-resonant+Resonant
6	58	70	Resonant+Non-resonant
7	70	80	Non-resonant
8	80	93	Non-resonant+Resonant

Fig. 1 Schematic of $2\text{m} \times 1\text{m}$ rectangular plate model

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 2 Vibration signal (acceleration) at receiving point (R1, R2, R3)

Fig. 2 Vibration signal (acceleration) at receiving point (R1, R2, R3) (Continued)

진동원 신호 및 수신점 진동응답으로는 0.5sec부터 1.0sec까지의 정상상태(Steady-state) 가속도 값을 과도강제진동해석으로부터 구하되, 데이터 샘플링은 250 μ sec 간격(샘플링 주파수 4000Hz)으로 설정하였다. 진동원 S1과 S2 위치에는 단위 조화기진력으로서 다른 주파수로 각기 작용하는 것으로 가정하였다. 이 때, 기진 주파수는 대상구조물의 고유진동수(Table 1)를 참조하여 공진 및 비공진 기진 주파수를 총 여덟 개의 Case로 조합하여 선정하였으며, 그 결과는 Table 2에 정리한 바와 같다.

Fig. 2는 각각의 Case에 대한 수신점 R1, R2, R3에서의 응답 신호(가속도 시간이력)를 도시한 것이다. 진동원의 기진주파수특성에 따라 수신점에서의 응답신호가 다르게 나타나며, 공진주파수에서 기진력이 작용하는 경우 공진으로 인해 해당 주파수 특성이 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 ICA기법을 이용한 진동원 신호 분리는 FastICA (Hyvärinen and Karhunen, 2001)를 이용하였다. FastICA에 의한 신호 분리성능은 분석할 때마다 다른 정도의 결과를 도출할 수 있다(Kim et al. 2012). 따라서 Case별 진동원 신호 분리를 10회 반복적으로 수행한 후, 가장 양호한 것으로 판단되는 결과를 최종 분리신호로 선택하였다. Fig. 3은 ICA 기법을 이용해 수신점 응답신호로부터 진동원 신호를 분리한 결과(S1', S2')를 도시한 것이다. 각 Case별 기진력 신호 패턴과 비교할 때, 전반적으로 우수한 신호 분리 성능을 보이나 일부 Case에 대해 약간의 신호 왜곡현상이 나타나고 있음을 확인하였다. 특히, Case 5의 S1'과 Case 6의 S2'의 경우, 뚜렷한 신호 왜곡현상이 관찰되었다. 이는 본 연구에서 이용한 FastICA의 알고리즘 특성으로 판단되며, 10회

이상의 추가 계산에서 보다 향상된 결과가 도출될 수 있음을 확인하였다. 이와 관련하여 해당 알고리즘 수정 등 보다 정도 높은 해석을 위한 보완연구가 필요할 것으로 사료된다.

보다 정량적인 결과분석을 위해 식 (10)에 의거 기진력 신호와 분리된 진동원 신호 간의 상관성을 분석하고 그 결과를 Table 3에 정리하였다. Fig. 3에서 신호 패턴 왜곡이 심하게 나타났던 Case 5의 S1'과 Case 6의 S2'에 대해 상관계수가 0.658과 0.610으로 매우 낮게 나타나고 있다. 그럼에도 불구하고, 전반적으로 기진력 신호와 매우 높은 상관성을 보이고 있어 본 연구에서 적용한 ICA기법이 진동원 신호 규명에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 3 Correlation coefficient between excitation force signal and separated vibration source signal

Case No.	Correlation coefficient	
	S1	S2
1	0.995	0.999
2	0.999	0.990
3	0.998	1.000
4	0.999	1.000
5	0.848	0.658
6	0.610	0.936
7	0.999	0.999
8	1.000	0.996

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

(e) Case 5

(f) Case 6

(g) Case 7

(h) Case 8

Fig. 3 Separated vibration source signals ($S1'$, $S2'$) using ICA technique with vibration signals at receiving points (R1, R2, R3)

Table 4 Vibration source contribution analysis result

			Vibration source contribution(%)		Difference (%)
			S1	S2	
Case1	R1	Reference	26.37	73.62	2.39
		Estimated	23.98	76.02	
	R2	Reference	24.68	22.51	5.67
		Estimated	19.01	80.99	
	R3	Reference	22.91	77.09	8.10
		Estimated	14.81	85.19	
Case2	R1	Reference	1.37	98.63	2.19
		Estimated	3.56	96.44	
	R2	Reference	1.45	98.55	1.70
		Estimated	3.15	96.85	
	R3	Reference	1.56	98.44	1.32
		Estimated	2.88	97.12	
Case3	R1	Reference	92.80	7.20	4.20
		Estimated	88.30	11.40	
	R2	Reference	94.11	5.89	3.09
		Estimated	91.02	8.98	
	R3	Reference	95.83	4.17	1.18
		Estimated	94.65	5.35	
Case4	R1	Reference	44.44	55.56	14.28
		Estimated	30.16	69.84	
	R2	Reference	53.87	46.13	0.55
		Estimated	54.42	45.48	
	R3	Reference	79.62	20.38	17.43
		Estimated	97.05	2.95	
Case5	R1	Reference	6.89	93.11	5.18
		Estimated	1.71	98.29	
	R2	Reference	43.42	56.58	14.11
		Estimated	57.53	42.47	
	R3	Reference	0.80	99.20	7.86
		Estimated	8.66	91.34	
Case6	R1	Reference	90.98	9.02	0.18
		Estimated	91.16	8.84	
	R2	Reference	39.97	60.03	13.21
		Estimated	26.76	73.24	
	R3	Reference	82.41	17.59	1.53
		Estimated	80.88	19.12	
Case7	R1	Reference	77.60	22.40	16.49
		Estimated	94.09	5.91	
	R2	Reference	36.03	63.97	0.07
		Estimated	35.96	64.04	
	R3	Reference	48.17	51.83	9.22
		Estimated	38.95	71.05	
Case8	R1	Reference	4.88	95.12	36.91
		Estimated	41.79	58.21	
	R2	Reference	22.86	77.14	28.22
		Estimated	51.08	48.92	
	R3	Reference	34.64	65.36	9.69
		Estimated	44.33	55.64	

한편, 각 Case에 대한 진동원 신호 분리과정에서 추출된 혼합 행렬을 이용해 식 (11)에 의거 수진점에서의 진동응답에 대한 진동원 신호별 기여도 분석을 수행하고 그 결과(Estimated)를 Table 4에 “Reference”와 함께 비교하였다. 여기서 “Reference”는 두 개의 기진력을 개별적으로 적용할 경우에 대한 실제 기여도이며, 각각의 기진력이 작용하는 경우 진동응답의 RMS(Root mean square) 값의 상대 비율이다. 대부분의 경우 양호한 기여도 분석결과를 보여주고 있어 본 연구방법이 진동원 기여도 분석에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, Case 8의 R1에 대해 “Reference” 대비 최대 36.91%의 기여도 차이를 보이고 있어 이를 개선하기 위한 보완연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합구조물에 적용 가능한 진동원 기여도 분석 기법 개발의 기초연구로써, ICA기법 기반의 평판 구조물의 진동원 기여도 분석방법을 제안하였다. 이를 위해 본 논문에서는 일반적인 구조물의 진동원 신호 분리를 위한 ICA기법의 이론을 소개하고 이를 바탕으로 한 진동원 기여도분석 방법과 절차를 정리하였다. 또한, 직사각형 평판구조물에 대한 수치해석을 통해 제안된 방법의 진동원 기여도 분석 성능과 실제 구조물로의 적용 가능성을 확인하였다. 일부의 경우를 제외하면, ICA기법을 이용하여 분리한 진동원 신호와 기진력 신호 간의 높은 상관성을 보였다. 또한, 본 연구에서 제안한 진동원 기여도 방법이 대부분의 Case에서 우수한 성능을 보였다. 향후 상관성 및 기여도 분석 성능향상을 위한 보완연구가 필요하며, 이를 통해 본 연구방법이 선박, 해양구조물 등과 같은 복합구조물에 대한 진동원 기여도 분석에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2011년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2011A011).

참 고 문 헌

- Antoni, J. (2005). “Blind Separation of Vibration Components: Principles and Demonstrations”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 19, No 6, pp 1166-1180.
- Briolle, B. and Liu, X. (2005). “Blind Source Separation of Internal Combustion Engine Piston Slap from Other Measured Vibration Signals”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 19, No 6, pp 1196-1208.
- Cheng, W., Zhang, Z. and He, Z. (2011). “Enhance the Separation Performance of ICA via Clustering Evaluation and Its Applications”, Advanced Science Letters, Vol 4, pp 1951-1956.
- Gelle, G. and Colas, M. (2001). “Blind Source Separation: A Tool

for Rotating Machine Monitoring by Vibration Analysis”,
Journal of Sound and Vibration, Vol 248, No 5, pp 865-
886.

Hyvärinen, A. and Karhunen, J. (2001). Independent component analysis, Wiley Interscience Publication.

Kim, K., Kwon, H.M., Cho, D.S., Kim, J.H. and Joen, J.J.
(2012). “Structural Vibration Source Identification Using ICA
Technique”, Proc. of 2012 KAOSTS, pp 1266-1271.

MSC, (2010). MD Nastran 2010 Dynamic analysis user's guide,
MSC Software.

2012년 7월 30일 원고 접수

2012년 8월 8일 심사 완료

2012년 8월 14일 게재 확정