

## 보치환법에 의한 등가 유체력계수 산정 Estimation of Equivalent Hydrodynamic Coefficients by Beam Permutation Technique

박한일\* · 박춘군\*\*

Han-Il Park\* and Chun-Jun Piao\*\*

**요 旨** : 설치수심이 점차 깊어짐에 따라 해양구조물들의 형상비가 세장해지므로 이에 대한 동적해석이 더욱 중요하다. 해양구조물중에는 프레임구조로 된 것이 많은데 이들의 자유도수가 많아 동적해석에 있어서 많은 계산시간과 컴퓨터 용량이 필요하다. 본 논문에서는 프레임 구조물의 자유도수를 현저히 감소시킬 수 있는 보치환법을 개발하는 일환으로 동적 해석을 수행할 때 필요한 3차원 등가 유체력계수들을 산정하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 검증하기 위하여 2가지 모델 예를 사용하였으며 보치환기법에 의한 등가 보의 해석결과와 상용해석 프로그램인 ANSYS와 SACS에 의한 프레임 구조의 해석결과를 아주 만족스럽게 일치하였다.

**핵심용어** : 등가 유체력계수, 보치환법, 해양구조물, 자유도수 감소

**Abstract** □ For offshore structures, dynamic analysis becomes increasingly important as the water depth increases and the structural configuration becomes slenderer. In this study, an estimation method for equivalent three dimensional (3D) hydrodynamic coefficients is introduced as a part of beam permutation technique development. The beam permutation technique is being developed for obtaining an equivalent beam to a frame structure in order to reduce the degrees of freedom and thus the analysis time significantly. Two 3D structures are used in order to verify the obtained equivalent 3D hydrodynamic coefficients. Two commercial softwares, ANSYS and SACS, are used for the verification. The results of the present analysis are found to be satisfactory in comparison with those by the two softwares.

**Keywords** : equivalent hydrodynamic coefficients, beam permutation technique, offshore structures, reduction of degrees of freedom

### 1. 서 론

가이드 타워나 파이프라인 설치용 스타거(stinger) 등과 같이 해양구조물에서는 프레임구조로 된 것들이 많으며 이러한 구조물들은 자유도수가 많아 동적해석을 수행할 때 많은 시간과 비용이 든다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 여러 가지 근사적인 방법들이 연구되어 왔다. Noor(1988), Sun and Juang(1986)은 에너지 등가원리에 근거하여 반복 격자모델에 대해 등가의 연속체모

델을 제시하였다. 그러나 이들의 모델은 복잡한 운동학적 가정과 수식을 사용하므로 그 과정이 복잡하다. 또한 선박의 진동해석(Skaar and Carlsen, 1980; Weng *et al.*, 1995)과 고층빌딩의 해석(Chajes *et al.*, 1996)에도 유사한 연구가 수행되었다.

최근 본 논문의 저자들은 다른 접근방법에 의해 등가 구조특성을 얻는 보치환법을 개발하였다(Park and Piao, 1997; Piao and Park, 1999). 이 방법에서는 반복되는 구조로 구성된 프레임구조물을 하나 하나의 부분구조로

\*한국해양대학교 해양개발공학부(Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, 1#, Dongsam-dong, Youngdo-ku, Pusan 606-791, Korea)

\*\*한국해양대학교 대학원 해양공학과(Department of Ocean Engineering, Graduate School of Korea Maritime University, 1#, Dongsam-dong, Youngdo-ku, Pusan 606-791, Korea)

나누고 이 부분구조를 프레임구조물과 동일한 구조특성(강성, 질량 그리고 감쇠)을 지닌 하나의 등가 보 요소로 치환하였다. 이 방법은 유한요소 모델보다 자유도수를 훨씬 감소시켜 계산시간과 컴퓨터용량을 현저하게 감소시킬 수 있었다.

본 논문에서는 집중과라메터법에 기초하여 프레임 해양구조물의 동적해석에 필요한 등가 보 요소의 3차원 등가 유체력 계수를 산정하는 방법을 제시하고자 한다. 이러한 등가 보의 등가 유체력계수는 이미 개발된 보치환법(Park and Piao, 1997; Piao and Park, 1999)에서 얻은 등가 보 요소의 등가 구조특성들과 함께 해양구조물의 동적해석을 하는데 사용된다.

## 2. 등가 유체력계수 행렬식

### 2.1 개별 부재의 유체력계수

세장형 부재에 작용하는 유체력을 계산할 때 주로 Morison 방정식을 사용하는데, 이 경우 반드시 유체력의 방향성을 고려하여야 한다. 아래 그림(Fig. 1)과 같이 O점에서 임의의 방향의 세장재 요소 OA와 임의의 방향의 흐름 OC를 고려한다.

Morison 방정식을 이용하여 단위길이당 세장재에 작용하는 유체력은 다음과 같은 항력과 관성력의 합으로 표시할 수 있다.

$$f = f_D + f_I \tag{1}$$

$$f_D = \frac{1}{2} \rho D C_D U_n |U_n| \tag{2}$$

$$f_I = \frac{1}{4} \pi \rho D^2 C_M \dot{U}_n \tag{3}$$

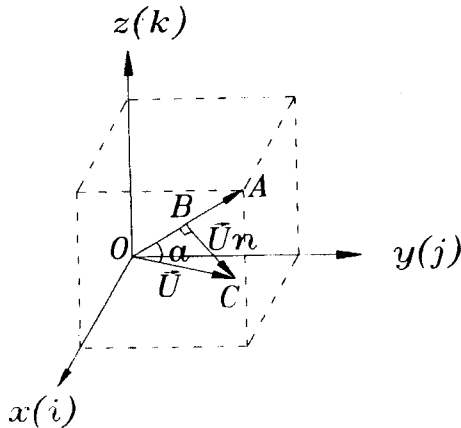


Fig. 1. Normal component of a velocity.

여기서  $U_n$ 와  $\dot{U}_n$ 는 부재의 법선방향의 상대속도와 상대가속도,  $D$ 와  $\rho$ 는 부재의 직경과 유체의 밀도,  $C_D$ 와  $C_M$ 는 부재의 항력계수와 관성력계수를 나타낸다.

먼저 항력계수의 경우에서 흐름의 속도벡터  $U$ 와 부재축의 방향벡터  $OA$ 를 다음과 같이 표시한다.

$$U = u \ i + v \ j + w \ k \tag{4}$$

$$OA = \Delta x \ i + \Delta y \ j + \Delta z \ k \tag{5}$$

이 두 벡터의 사이 각은

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{U \cdot OA}{|U| |OA|} \right\} \tag{6}$$

흐름 속도벡터  $U$ 의 부재의 방향벡터  $OA$ 방향에서의 투영은

$$OB = |U| \frac{OA}{|OA|} \cos \alpha = \frac{(U \cdot OA)}{|OA|^2} \cdot OA \tag{7}$$

그러면 흐름 속도벡터  $U$ 의 부재 방향벡터  $OA$ 에 대한 법선방향 성분은

$$U_n = BC = U - OB = U - \frac{(U \cdot OA)}{|OA|^2} \cdot OA \tag{8}$$

$$= Q \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\Delta x^2}{d^2} & -\frac{\Delta x \Delta y}{d^2} & -\frac{\Delta x \Delta z}{d^2} \\ -\frac{\Delta x \Delta y}{d^2} & 1 - \frac{\Delta y^2}{d^2} & -\frac{\Delta y \Delta z}{d^2} \\ -\frac{\Delta x \Delta z}{d^2} & -\frac{\Delta y \Delta z}{d^2} & 1 - \frac{\Delta z^2}{d^2} \end{bmatrix} \tag{7}$$

가속도 벡터에 대해서도 상응하는 관계식은 속도벡터의 경우인 위의 식 (9)과 동일하다. 그러면 식 (2)와 식 (3)은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$f_D = \frac{1}{2} \rho D C_D U_n |U_n|$$

$$= \frac{1}{2} \rho D C_D Q \begin{Bmatrix} u^2 \\ v^2 \\ w^2 \end{Bmatrix} = B \begin{Bmatrix} u^2 \\ v^2 \\ w^2 \end{Bmatrix} \tag{10}$$

$$f_I = \frac{1}{4} \pi \rho D^2 C_M \dot{U}_n$$

$$= \frac{1}{4} \pi \rho D^2 C_M Q \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} = B \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} = M_H \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} \tag{11}$$

여기서  $B$ 와  $M_H$ 는 유체력 감쇠계수와 유체력 질량 행렬식(3×3), 그리고 식 (10)의  $Q_i Q_i^T$ 는 행렬식  $Q_i$ 의 개개의 성분들에 대해 그 성분의 값과 성분 값의 절대치를 곱하는 방식으로 계산된다.

**2.2 부분 구조물의 등가 유체력계수**

앞 절에서처럼 개별 부재의 유체력계수 행렬식을 얻은 다음 여러 개의 개별부재들로 구성된 부분 구조를 대체할 수 있는 등가 보 요소의 등가 유체력계수 행렬식은 이들 개별 부재들의 유체력계수 행렬식들을 부분 구조물 양 끝단 중심에 뒀으로써 얻을 수 있다.

$$B_{eq} = \sum_{member}^{individual} B_i \tag{12}$$

$$M_{H,eq} = \sum_{member}^{individual} M_{H,i} \tag{13}$$

만일 입사파의 파장에 비해 구조물의 폭이 상대적으로 크다면(예를 들어 약 0.25배 이상) 구조물의 앞뒤에 작용하는 파랑하중은 비교적 큰 위상차를 갖게 되어 단순히 합산하면 큰 오차를 발생시킨다.

그러나 대부분의 프레임형 해양구조물을 설계할 때 고려되는 파의 파장은 구조물의 폭에 비해 상대적으로 크므로 파형의 위상차를 고려하지 않아도 된다.

**3. 계산결과 및 고찰**

본 절에서는 위에서 얻은 부분 구조의 등가 항력계수와 등가 관성력계수의 타당성을 검증하고자 한다. 프레임구조물의 이산화된 유한요소 모델에 대한 ANSYS와 SACS에 의한 응답과 앞에서 제시된 방법에 의한 등가 유체력 계수를 이용하여 얻은 등가모델의 응답을 비교한다.

사용된 두 모델 A와 B는 Fig. 2와 같이 수심 30 m의 물속에 외팔보 모양으로 직립상태에 있으며 그 단면들은 모두 직사각형이고 부분 구조의 개수는 10개이며 모델들의 바깥 표면에서 모두 비대칭으로 보강되었다. 모델 A는 균일한 단면형상으로서 그 단면치수는 1×1 m이고, 모델 B는 단면치수가 선형으로 변화하는데 최상단의 단면과 최하단의 단면 치수는 각각 1×1 m과 2×2 m이다. 그리고 두 모델의 부재들은 모두 외경이 89.1 mm이고 두께가 3.5 mm인 파이프 부재로 이루어졌다.

저자들의 최근 연구에서는(Piao, C.J. and Park, H.I.,

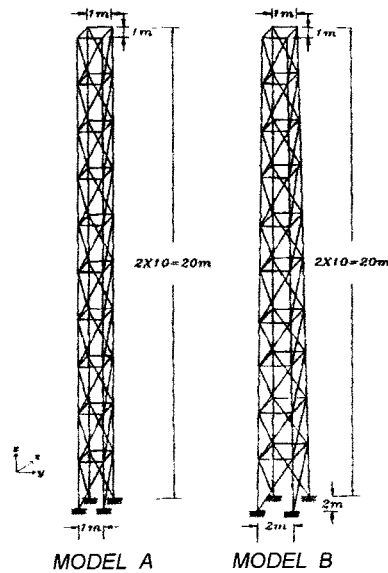


Fig. 2. Sketch of the models.

1999) 이러한 두 모델에 대해 고유치 해석을 수행하였다. Table 1~2에서는 보 치환법에 대해 고유진동수를 구한 것(BPM)과 프레임구조물에 대해 유한요소법을 이용하여 고유진동수를 구한 것(Exact)을 서로 비교하고 있

Table 1. Natural frequencies (Hz) of Model A.

Order	BPM	Exact	Dev. (%)
1	2.2117	2.1677	2.0
2	2.2122	"	2.0
3	12.734	12.401	2.7
4	12.734	"	2.7
5	29.172	30.466	-4.3(T)*
6	31.630	30.632	3.3
7	31.630	"	3.3
8	49.683	50.503	-1.6
9	"	"	"

\* T: Torsional vibration mode  
Others: Bending vibration modes

Table 2. Natural frequencies (Hz) of Model B.

Orders	BPM	Exact	Dev. (%)
1	3.8136	3.7302	2.2
2	"	"	"
3	18.0299	17.199	4.8
4	"	"	"
5	34.2096	34.683	-1.4
6	"	"	"
7	41.0744	38.155	7.7
8	"	"	"

으며 좋은 일치율을 보여주고 있다. 이것은 보치환법을 이용해 구한 등가의 강성과 질량이 합당함을 보여주는 결과이다.

### 3.1 항력계수의 검증

등가 보 요소의 등가 항력계수를 검증하기 위하여 균일 속도의 해류흐름에서의 예제모델들의 응답을 비교하였다. 이는 균일 속도 해류에서 구조물의 응답에 대해 단지 Morison의 방정식의 항력항만 작용하기 때문이다. 먼저 두 모델 A와 B에 대해 +y 방향의 해류속도 2 m/s와 5 m/s에 대해 응답을 고찰하였고 다음 +y 좌표축과 이루는 각이 30°, 45° 그리고 60°인 세 가지 흐름방향 해류(흐름속도는 동일)에 대해 그 응답을 고찰하였다.

이 두 모델에 대해 해석결과는 Table 3~6에 제시되고 있다. 변위는 보통 모델 최상단에서 가장 큰 값이 발생하므로 최상단 값을 제시하였다. 해류속도 2 m/s와 5 m/s에 대

**Table 3.** Displacements at the top of Model A for various current speeds.

Current velocity (m/s) (+Y)	Y-Displacement(m)		
	ANSYS	Present	Dev.(%)
2.0	0.1691	0.1709	1.1
5.0	1.201	1.180	-1.7

**Table 4.** Displacements at the top of Model B for various current speeds.

Current Velocity (m/s) (+y)	Y-Displacement (m)		
	ANSYS	Present	Dev.(%)
2.0	0.05569	0.05632	1.1
5.0	0.3480	0.3520	1.1

**Table 5.** Displacements at the top of Model A for various current direction(Current speed is 2 m/s).

Current angle (°)	Dir.	Displacement (m)		
		ANSYS	Present	Dev.(%)
30	Y	0.1387	0.1396	0.65
	Z	0.08868	0.09973	12.5
	Total	0.1646	0.1716	4.3
45	Y	0.1073	0.1095	2.1
	Z	0.1228	0.1305	6.3
	Total	0.1631	0.1704	4.5
60	Y	0.0693	0.0719	3.8
	Z	0.1496	0.1543	3.1
	Total	0.1649	0.1702	3.2

**Table 6.** Displacements at the top of Model B for various current directions (Current speed is 2 m/s).

Current angle (°)	Dir.	Displacement (m)		
		ANSYS	Present	Dev.(%)
30	Y	0.04921	0.05069	3.0
	Z	0.02179	0.02485	14
	Total	0.05372	0.05646	5.1
45	Y	0.04043	0.04252	5.2
	Z	0.03456	0.03712	7.4
	Total	0.05319	0.05644	6.1
60	Y	0.02921	0.03148	7.8
	Z	0.04509	0.04687	4.0
	Total	0.05382	0.05645	4.9

해 두 가지 방법에 의한 최상단의 해류흐름방향 변위 오차는 각각 1.1%와 -1.7%로서 여러 가지 해류속도에 대해 본 연구에서 개발한 등가항력계수는 합리적임을 알 수 있다.

+y축과의 각도가 30°, 45° 그리고 60°인 세 가지 해류방향에 대해 두 모델의 최상단의 합성된 총 변위는 합리적인 오차 범위내에 있음을 알 수 있다. (Table 5, 6참조). 해류흐름방향 30°인 경우 두 모델의 +z방향에서의 오차는 12.5%와 14%이지만 합성된 총 변위의 오차는 4.3%와 5.1%이다. 그리고 해류방향 45°인 경우 두 좌표방향에서의 변위, 그리고 해류방향 30°과 60°인 경우의 각 방향에서의 변위들은 서로 대칭이 아닌데, 이는 모델들의 보강이 비대칭이기 때문이라고 사료된다.

### 3.2 관성력계수의 검증

이 절에서는 등가 보 요소의 등가 관성력계수를 검증하고자 한다. Morison 방정식(1)에서 단위길이의 보에 작용하는 파랑가진에 의한 유체력은 관성력 계수와 항력계수에 관계됨을 알 수 있다. 따라서 등가 관성력계수는 파랑 가진에 의한 구조물의 응답으로부터 직접 검증할 수 없고 간접적으로 검증할 수밖에 없다. 등가 항력계수가 위 절에서 이미 검증되었기 때문에 본 방법에 의한 파랑하중에 대한 구조물의 시간응답이 상용프로그램에 의한 계산결과와 비교하여 오차가 작다고 한다면 등가 관성력계수는 합당한 것으로 간주된다. 그리고 검증을 위해 본 연구에서 사용된 구조물은 관성력이 지배적인 영역에 위치하고 있으므로 구조물의 응답에서 관성력이 지배적이다( $D/\lambda=0.01$ ,  $K=U_m T/D=6$ )(Patel, 1989). 따라서 만일 구조물의 응답이 만족스럽다면 등가 관성

**Table 7.** Response amplitudes at the top of Model A for various wave periods (Wave direction is +y).

Wave period (sec)	Y-Amplitude (m)		
	SACS	Present	Dev.(%)
3.0	0.178E-4	0.168E-4	-5.6
5.0	0.201E-3	0.204E-3	1.5
8.0	0.336E-3	0.339E-3	0.8

**Table 8.** Response amplitudes at the top of Model B for various wave periods (Wave direction is +y).

Wave period (sec)	Y-Amplitude (m)		
	SACS	Present	Dev.(%)
3.0	0.5927E-5	0.5797E-5	-2.2
5.0	0.6729E-4	0.6963E-4	3.5
8.0	0.1116E-3	0.1154E-4	3.4

**Table 9.** Response amplitudes at the top of Model A for various wave directions (Wave period is 5 s).

Wave angle(°)	Dir.	Amplitude (m)		
		SACS	Present	Dev.(%)
30	Y	0.1788E-3	0.1867E-3	4.4
	Z	0.930E-4	0.1007E-3	8.3
	Total	0.2015E-3	0.2121E-3	5.3
45	Y	0.1489E-3	0.1488E-3	-0.07
	Z	0.1363E-3	0.1459E-3	6.5
	Total	0.2019E-3	0.2084E-3	3.2
60	Y	0.1086E-3	0.1136E-3	4.6
	Z	0.1703E-3	0.1635E-3	-4.0
	Total	0.2020E-3	0.1991E-3	-1.4

력계수도 만족스럽다고 판단할 수 있다.

파랑의 지속시간을 충분히 길게 하기 위하여 90 s로 하였다. 여기에서 사용된 파는 파고 0.1 m인 선형파이며 구조감쇠는 유체점성 감쇠에 비해 작아 무시하였다.

여러 가지 주기의 +y방향의 파랑에 대해 보치환법과 해양구조물해석 전용프로그램인 SACS에 의한 두 모델의 응답을 비교하였다. 또한 주기가 5 s이고 입사방향이 다른 파랑에 대한 두 모델의 응답도 비교하였다.

여러 가지 주기의 파랑에 대한 모델의 응답비교는 Table 7-8에 제시되어 있는데 파랑 주기 3 s, 5 s, 8 s에 대해 응답의 오차는 허용오차범위에 있음을 알 수 있다. 따라서 위 절에서의 등가 항력계수에 대한 검증결과와 함께 분석해보면 등가 관성력계수는 여러 가지 주기의 파랑에 대해 프레임 구조물의 특성을 대표할 수 있음을

**Table 10.** Response amplitudes at the top of model B for various wave directions (Wave period is 5 s).

Wave angle(°)	Dir.	Amplitude (m)		
		SACS	Present	Dev.(%)
30	Y	0.6013E-4	0.5727E-4	-4.8
	Z	0.3044E-4	0.3090E-4	1.5
	Total	0.6740E-4	0.6509E-4	-3.4
45	Y	0.5020E-4	0.4774E-4	-4.9
	Z	0.4497E-4	0.4433E-4	-1.4
	Total	0.6740E-4	0.6515E-4	-3.3
60	Y	0.3685E-4	0.3496E-4	-5.1
	Z	0.5644E-4	0.5474E-4	-3.0
	Total	0.6740E-4	0.6495E-4	-3.6

알 수 있다.

또한 두 모델에 대해 파랑의 입사각이 각각 30°, 45°, 60°인 경우에 대해서도 비교하였는데 최상단의 응답의 진폭은 합리적인 범위에 들어 있음을 알 수 있다(Table 9, 10참조). 그리고 두 모델 모두 입사각이 45°인 경우 두 횡방향에서의 변위 대칭이 아님을 알 수 있는데 이는 구조물이 비대칭인 것에서 기인된다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자유도 수가 많은 프레임 구조물의 해석에서 계산시간과 저장용량을 대폭 줄일 수 있는 보치환법 개발의 일환으로 해양구조물의 동적해석에 필요한 등가 항력계수와 등가 관성력계수를 구하는 방법을 제시하였다. 두 개의 모델에 대해 검증을 수행하였고 그 결과가 만족스럽다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발된 보치환법은 수중에 위치한 구조물에도 응용가능하며 이 방법은 해양구조물 해석 기술개발에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 핵심과제연구비지원(과제번호: 981-1013-073-2)에 의해 연구되었음.

#### 참고문헌

Chajes, M.J., Zhang, L. and Kirby, J.T., 1996. Dynamic analysis of tall building using reduced-order continuum model,

- Structural Engrg.*, **122**(11), pp. 1284-1291.
- Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics Of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publications. Southampton, Boston.
- Noor, A.K., 1988. Continuum modeling for repetitive lattice structures, *Applied Mech. Rev.*, **41**, pp. 285-196.
- Park, H.I. and Piao, C.J., 1997. Three dimensional dynamic analysis of truss type offshore structures. *Proc. 39th Workshop on Ocean Engrg. in Korea*, pp. 95-103.
- Patel, M.H., 1989. *Dynamics of Offshore Structures*, Butterworths. London.
- Piao, C.J. and Park, H.I., 1999. A study on the beam permutation technique for frame type offshore structures, *J. Ocean Engrg. and Technology*, **13**(1), pp. 23-28.
- Skaar, K.T. and Carlsen, C.A., 1980. Modelling aspects for finite element analysis of ship vibration, *Computers and Structures*, **12**, pp. 409-419.
- Sun, C.J. and Juang, J.N., 1986. Modeling global structural damping in frames using simple continuum models, *Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics J.*, **24**(1), pp. 144-150.
- Weng, W.C., Fann, G.A., Hung, C.F. and Li, C.S., 1995. Dynamic response of superstructure induced by the main engine, *Proc. 9th Technical Exchange and Advisory Meeting, Team-Hiroshima' 95*, Hiroshima, Japan, pp. 49-61.

---

Received March 27, 2000

Accepted May 25, 2000