

# Caisson식 방파제의 손상 모니터링 기법

박재형\*, 이병준\*\*, 이용환\*\*, 김주영\*\*, 김정태\*\*\*

## Damage monitoring scheme of caisson-type breakwaters

KEY WORDS : Caisson-type breakwaters 케이슨식 방파제, Damage monitoring 손상모니터링, Damage mechanism 손상 메커니즘

ABSTRACT : 최근 국내외에서 국제무역 물량의 증대에 따라 대규모 항만 건설 공사가 진행되고 있으며, 이에 경제성, 시공성이 뛰어난 Caisson 형식의 구조물이 많이 사용되어지고 있다. 특히 항만 및 어항의 외곽시설인 방파제는 계류선박의 안전과 하역 및 적화를 용이하게 하는 중요한 구조물이다. 따라서, 본 연구에서는 Caisson식 방파제에 태풍, 충격력과 같은 몇 가지 외력 조건에 대하여 구조 해석을 실시하여 손상 메커니즘을 분석하였다. 이러한 손상 메커니즘에 따라 손상을 인위적으로 발생시켜 손상 위치 탐색을 수행하였다.

### 1. 서론

최근 국내외에서는 국제무역 물동량의 증대에 따라 해양공간의 활용을 늘리기 위해 대규모 항만 건설 공사뿐만 아니라 컨테이너 부두 확장공사, 신항만 건설계획 등이 신속하게 진행되고 있으며, 이것은 국가 경제 발전에 상당히 기여를 해왔다. 대규모 항만건설을 하기 위해서는 대형 Caisson이 필요하며, 이것은 수십 개의 소형 Caisson보다 수개의 대형 Caisson이 훨씬 경제적이다. 뿐만 아니라 깊은 수심이나 연약지반에서도 시공이 가능해 시공적인 측면, 품질적인 측면 그리고 공사기간 단축이 가능하다는 측면 등 여러 가지 측면에서 유리해 최근 대규모 항만건설에서 그 활용이 더욱 증가하고 있다.

특히, 항만 및 어항의 외곽시설인 방파제는 항내 정온도의 확보차원에서 계류선박의 안전 및 하역과 적화를 용이하게 하는 중요한 구조물이다. 이에 따라 방파제의 안전성을 확보하고, 방파제에 손상 발생에 따라, 신속하고, 적절한 대처를 하기 위해서는 손상을 모니터링 하여 조기에 손상을 발견하는 것이 중요하다고 할 수 있겠다.

이를 위해, 본 연구에서는 먼저, Caisson식 방파

제의 2D, 3D 모델을 통해, 방파제에 파력이나 선박에 충돌이 발생하였을 경우, 응력의 분포 및 거동 해석을 통해 파괴 메커니즘을 분석하고, 구조물의 손상을 모니터링을 위한 모델을 정하여 동적 응답 특성을 분석하여 고유진동수 기반 손상 위치 검사를 실시하여 손상 발생시 그 위치를 발견하였다.

### 2. 손상 메커니즘 분석

#### 2.1 유한 요소 모델

Caisson식 방파제의 외력에 의한 응력 분포 및 거동을 살펴보기 위하여 Fig. 1에 보는 것과 같은 부산 신항만의 Cassion식 방파제의 설계자료를 이용하였다.

충돌하중의 위치에 따른 Caisson식 방파제의 거동과 응력해석을 위하여 Fig. 2에 보여지는 것과 같이 3D 모델을 사용하였으며, 태풍과 같은 큰 파압이 작용할 경우에 대하여 2D 모델을 사용하여 MIDAS /Civil 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 해석하였다.

대상 케이슨 구조물은 Fig. 2와 같이 각각의 구조부는 plate요소를 사용하여 모델링 하였으며, Table 1과 같은 재료 물성치를 사용하여 모델링 하였다.

\* 부경대학교 해양공학과 박사과정

\*\* 부경대학교 해양공학과 석사과정

\*\*\* 부경대학교 해양공학과 부교수

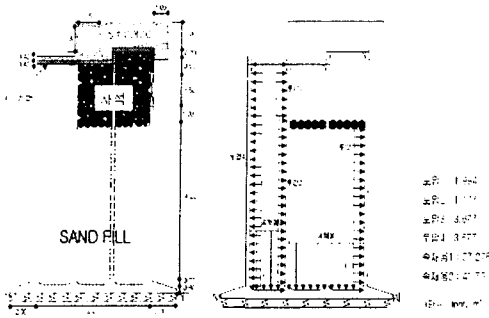


Fig.1 케이슨의 단면

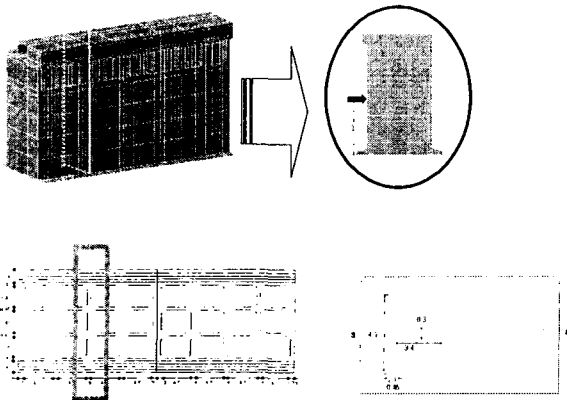


Fig.2 해석 모델

Table 1 재료의 물성치

	상치부	케이슨부	SAND FILL	사석	반무한지반
Modulus of Elastic (tonf/m <sup>2</sup> )	2.86*10 <sup>6</sup>	2.86*10 <sup>6</sup>	-	1.09*10 <sup>4</sup>	-
Poisson Rati	0.20	0.20	0.43	0.4	0.45
Weight Density (tonf/m <sup>3</sup> )	2.5	2.5	2.0	2.2	2.4
전단파속도 (m/sec)	-	-	250	-	400

## 2.2 경계조건

3D 모델의 경우 Fig. 3과 같이 케이슨과 케이슨을 Rigid link를 사용하여 연결하였으며, y축 변위만을 구속시켜 y축 방향으로 서로 동일한 변위가 생기도록 하였다. 그리고 케이슨부와 상치콘크리트는 Elastic link를 이용하여 연결하였다.

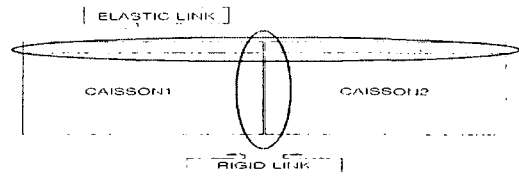


Fig. 3 Rigid link와 elastic link

케이슨과 저면의 경계조건은 지반반력계수를 산정하여 Spring supports를 이용하였다.

지반반력계수는 운동방향에 따라 식을 달리 사용하는데 각각 수평방향(Dx, Dy)과 수직방향(Dz)운동에 대해 (1)~(3)식과 같이 산정하였고, 그 결과가 Table 2에 보여진다.

$$Kx = 2(1 + \nu)G\beta_x(BL)^{1/2} \quad (1)$$

$$Ky = 2(1 + \nu)G\beta_y(BL)^{1/2} \quad (2)$$

$$Kz = \frac{G}{1 - \nu}\beta_z(BL)^{1/2} \quad (3)$$

여기서,  $G = \text{전단탄성계수} = \frac{V_s^2 * \gamma t}{g}$

$\gamma t = \text{사석의 단위 중량}$

$g = \text{중력가속도}$

$V_s = \text{전단파속도}$

$\beta_x, \beta_y, \beta_z = \text{여러 가지 B/L 값에 대한 상수}$

$\nu = \text{프와송 비}$

Table 2 사석마운드의 탄성계수

운동방향	지반반력계수(tonf/m)
수평방향(Dx)	2,389,351.803
수평방향(Dy)	2,389,351.803
수직방향(Dz)	3,661,841.844

## 2.3 설계 선박의 선정 및 충돌력 산정

설계 선박의 선정은 항로와 관련하여 항로의 폭과 수심, 조류의 속도, 항로의 굴절각도등을 종합적으로 고려해 선정한다. 그러나 본 연구에서는 이러한 조건을 종합적으로 고려하여 예상선박을 선정하였다.

선박의 충돌력을 산정하는 과정은 극도의 비선형성을 요구하며, 충돌속도와 충돌하는 구조물과의 상대적인 강성, 충돌강도, 충돌면의 마찰계수 등의 수많은 인자들에 의해 지배되어진다. 그래서 여러 연구자들은 다양한 조건에 대해서 여러 가지의 충돌력에 의한 식을 제시하였다. 그 중에서 널리 사용되어지고 있는 식은 Woison의 실험결과에 기초하여 제안된 AASHTO방법(AASHTO, 1991)과 선수부의 붕괴거동을 고려한 각종 수식들을 통합한 경험적 식을 제시한 Pederson의 경험식(P.T. Pederson 등, 1993) 등이 있는데, 그 중에서 가장 보편적으로 사용되어지고 있는 식(4)와 같이 AASHTO방법에 의해 산정된 충돌력을 적용하여 케이슨 방파제의 응력 분포 및 거동을 살펴보고자 한다. 충돌 대상 선박은 DWT 8,000톤급 선박과 DWT 32,000톤급 선박을 대상으로 하여 충돌거동을 분석해보았다. 여기서 충돌시 속도는 각각 1.32m/sec, 1.89m/sec로 하였으며, 선박은 케이슨구조물에 직각방향으로 충돌하는 것으로 가정하였다. 각각에 대한 충돌력을 산정한 결과를 Table 3에 나타내었다.

$$P = 220\sqrt{DWT} \frac{V_{imp}}{27} \quad (4)$$

여기서, DWT = 설계선박의 재하중량톤수  
Vimp = 충돌속도

Table 3 선박의 충돌력

재하중량톤(DWT)	선박충돌속도 (m/sec)	충돌력(tonf)
8,000	1.32	1,431.48
32,000	1.89	4,099.24

## 2.4 파력의 선정

본 연구에서 사용된 파랑의 제원은 태풍 매미 내습시 부산 신항만에서 관측된 자료로 Table 4와 같이 이용하였고, 파압은 Goda식을 적용하여 계산하였다. Fig. 4는 Goda에 의해 제시된 파압 분포를 나타내고 식(5)~식(8)은 Goda에 의해 제시된 파압을 산정하는 식을 나타낸다. 파압을 계산한 결과가 Table 5에 나타내었다.

Table 4 파랑의 제원

	Hmax(m)	Tmax(sec)	L(m)
태풍매미	10.84	21.36	216.7607

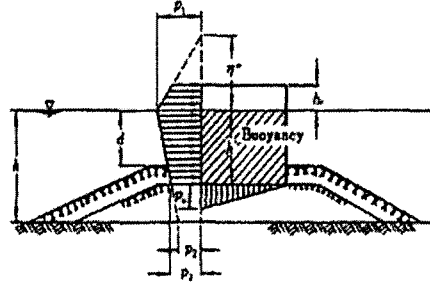


Fig. 4 파압분포(Goda)

$$\eta^* = 0.75 (1 + \cos\beta) \lambda_1 \times H_b \quad (5)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2\beta) \lambda_1 w_0 H_b \quad (6)$$

$$P_3 = \alpha_3 p_1 \quad (7)$$

$$p_4 = \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*}\right) p_1 \quad (8)$$

Table 5 Goda식에 의한 파압

	태풍“매미”의 파압
P1(tonf/m)	10.846
P3(tonf/m)	9.216
P4(tonf/m)	8.150

## 2.5 손상 시나리오

2D, 3D 모델에 있어 선박의 충돌에 의한 Caisson 구조물의 손상 시나리오를 Table 6과 Fig. 5와 같이 충돌력을 적용하였다. 일반적으로 선박에 의한 충돌하중은 선박의 길이 방향으로 전달되어지며, Caisson구조물의 경우에는 수평력으로 작용하였다.

Table 6 선박 충돌 하중의 작용 위치

	충돌위치
CASE1	케이슨 끝부분 (H : 10.65)
CASE2	케이슨의 격벽과 격벽 경계부 (H : 10.65)
CASE3	케이슨의 격벽과 격벽 사이 (H : 10.65)
CASE4	케이슨과 케이슨의 연결부 (H : 10.65)

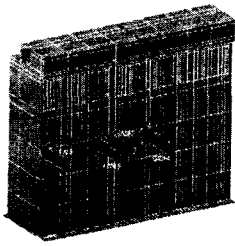


Fig. 5 선박 충돌 하중의 작용 위치

2D 해석 모델에 있어 손상은 충격 하중 이외에 파압에 의한 구조 해석과 지반의 유실(지지력 감소)에 대하여 구조 해석을 실시하였다.

## 2.6 해석결과

### (1) 2D 해석 결과

2D 해석 결과 Fig. 6에서 보는 것과 같이 태풍매미 응력분포의 형태는 토우부근에 응력집중을 보이고 충격하중 시에는 충격하중의 위치와 토우 부근에 응력집중형태를 보이며 파괴가 예상되어진다. 그 결과를 Table 7에 나타내었다.

Table 7 각 하중 조건에 대한 해석 결과(2D)

	태풍매미	수평지 력강성 50%감소	지반지지력 50%감소	CASE1 충돌력:1431.48 (tonf)	CASE2 충돌력:4099.24 (tonf)
최대수평변위 (cm)	0.09646	0.101	0.1354	0.9268	2.754
최대수직변위 (cm)	0.1683	0.1693	0.2336	0.2986	0.5925
최대응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	36.3842	36.7427	41.2655	113.079	342.707

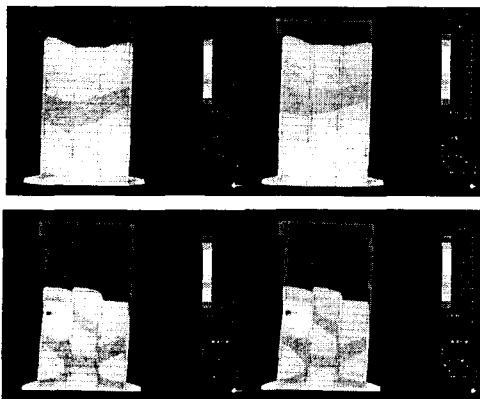


Fig.6 2-D 해석결과

### (2) 3D 해석 결과

3D 해석 결과 변형 형상 및 응력 분포가 Fig. 7에 나타나고, Table 8에 그 결과를 정리 하였다. 3D 해석 결과로부터 충돌 하중 위치에 큰 응력이 발생하며 전면과 후면의 toe부분에 응력이 크게 나타나 파괴가 예상되어진다.

Table 8 선박 충돌에 각 시나리오별 대한 해석 결과

DWT 8,000	응력(kgf/cm <sup>2</sup> )			DWT 32,000	응력(kgf/cm <sup>2</sup> )		
case	최대응력	전면부 toe	후면부 toe	case	최대응력	전면부 toe	후면부 toe
1-1	67.166	54.992	61.080	1-2	185.127	168.313	168.313
2-1	109.961	30.251	30.251	2-2	307.311	84.228	56.343
3-1	842.364	-	-	3-2	2420.340	-	-
4-1	35.194	25.678	32.159	4-2	93.335	76.434	84.880

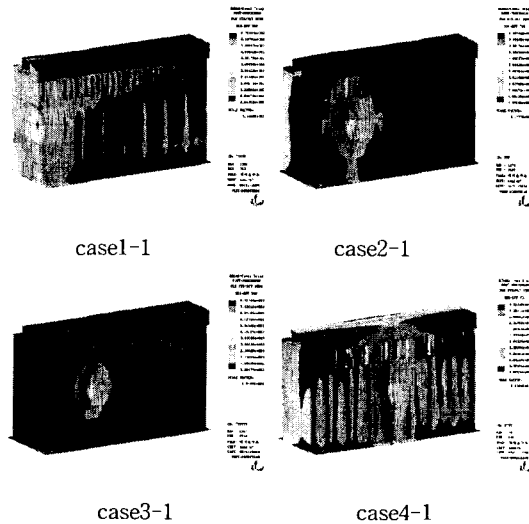


Fig. 7 3-D 해석결과

## 3. 케이스 구조물의 손상 모니터링

케이스 구조물의 손상 모니터링을 수행하기 위해 Fig. 7과 같이 케이스의 전면벽을 단순화한 유한 모델을 사용하였다.

손상 시나리오는 토우위치와 선박 충돌위치를 고려하여 1번과 12번 요소에 각각 강성을 50%로 감소를 적용하였고, 동시에 발생할 경우에 대해서 적용해 보았다.

Fig. 7과 같이 15번 Node에서 Sensor1로부터 동적응답신호를 계측하였다. Sampling rate는 0.0002초로

하였으며, 12초간 데이터를 획득하였다.

다음으로, 측정된 동적응답신호를 FFT변환을 이용하여 진동수 영역으로 변환한 뒤 각 Mode별 공진 진동수를 추출하였다.

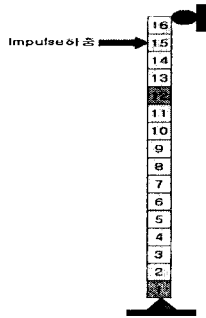


Fig. 7 동적특성 해석 모델

Table 8 모드별 공진 진동수

		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4
자유진동 해석	Undamage	1.61	6.42	14.41	25.50
	Damage1	1.61	6.40	14.30	25.18
	Damage2	1.55	6.09	14.22	25.21
	Damage3	1.55	6.07	14.11	24.92
강제진동 해석	Undamage	1.59	6.41	14.40	25.51
	Damage1	1.59	6.41	14.28	25.21
	Damage2	1.53	6.10	14.22	25.21
	Damage3	1.53	6.10	14.10	24.90

#### 4. 고유진동수 기반 손상위치 검색

고유진동수 기반 손상위치 검색기법은 Kim 의 (2003)에서 제시한 알고리즘을 사용하였다. 다음의 식(1)은 모드  $i$ 와 위치  $j$ 에서 손상위치를 예측하는 식이다. 이때,  $F_{ij}$ 는 모드  $i$ 와 위치  $j$ 의 모드민감도로써 실험적으로 측정된 모드형상 또는 이론적인 수치해석으로부터 구할 수 있다.

한편,  $Z_i$ 는 손상 전후 측정된 모드  $i$ 의 고유치의 변화율이다. 계산된  $e_{ij}$ 를 정규화하고, 통계적인 패턴인식에 의해, 위치  $j$ 에 대한 손상지수를 추정한다. 다음으로, 식(2)를 사용하여 모드  $i$ 에서 무차원의 손상크기  $(a/H)_i$ 를 예측한다. 여기서,  $S_{ik}$ 는 모드  $i$ 의 모드형상 곡률로부터 구한 위치  $j$ 의 민감도이다.

$$e_{ij} = Z_m / \sum_{k=1}^{NM} Z_k - F_{mq} / \sum_{k=1}^{NM} F_{kq}$$

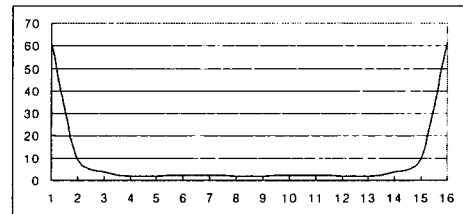
$$F_{ij} = \frac{\{\phi_i\}^T [C_j] \{\phi_j\}}{\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}}$$

$$Z_i = \delta w_i^2 / w_i^2$$

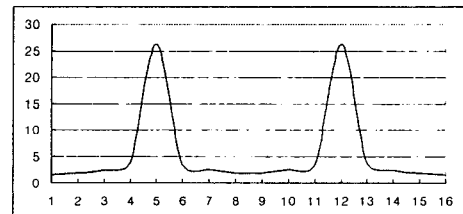
$$\frac{\delta w_i^2}{w_i^2} = \eta S_{ik} \left( \frac{a_k}{H} \right)_i^2$$

$$S_{ik} = \int_k \{\phi_i^n\}^2 dx / \int_0^L \{\phi_i^n\}^2 dx$$

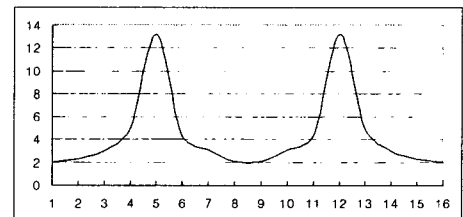
앞서 추출한 각 모드별 공진 진동수를 바탕으로 자유 진동 해석결과와 강제진동 해석결과에 대하여 손상 위치 검색 기법을 이용한 결과가 Fig. 8, Fig. 9에 나타난다. 각 그래프에서 최대점이 손상의 발생 위치를 나타낸다.



(a) Damage 1

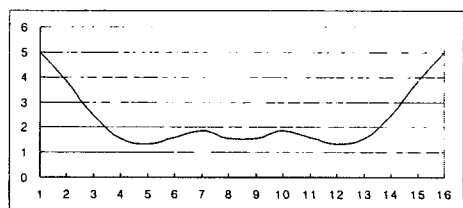


(b) Damage 2



(c) Damage 3

Fig. 8 손상 위치 검색 결과(자유진동해석)



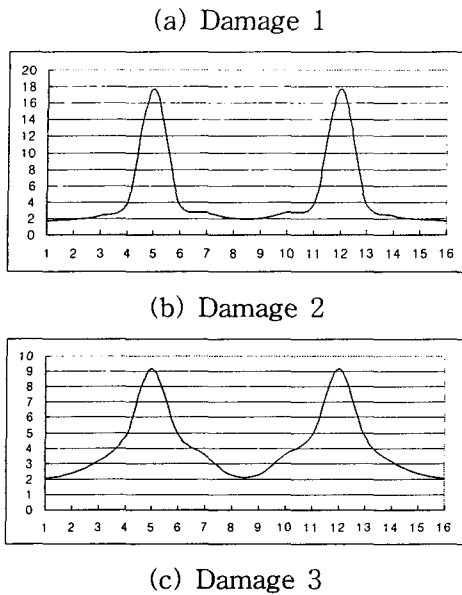


Fig. 9 손상 위치 검색 결과(강제진동해석)

Fig. 8, Fig. 9에서 Damage 1인 경우 자유진동해석과 강제진동해석에 의한 손상위치가 지점부 근처(토우부분)의 최대점을 나타내는 것으로 보아 그 위치를 잘 나타내고 있으며, 충돌 하중이 발생한 Damage 2의 경우에도 element 12번 위치의 손상을 잘 나타내고 있다. 하지만 동시에 발생한 Damage 3의 경우에는 element 12번 위치에서만 나타나고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 케이슨 방파제의 손상 메커니즘을 알아보고, 손상 모니터링을 위한 손상 위치 검색 알고리즘을 이용하여 적용하여 보았다.

그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 케이슨 방파제의 2D, 3D 유한요소 모델로부터 손상 메커니즘을 분석한 결과 충돌하중이 발생하는 위치와 전·후면의 토우부분의 응력이 크게 발생하는 것으로 보아, 파괴가 일어날 것으로 예측하였다.

둘째, 모델의 고유치 해석만으로 구해지는 자유진동 해석결과와 구조물의 응답신호로부터 해석하는 강제진동 해석 결과를 이용하여 고유진동수 기반 손상 위치 검색 알고리즘을 적용하여 손상위치를 검색하였다. 손상의 위치 검색 결과 단일한 손상이 발생

하였을 경우에는 실제 손상 위치와 정확히 일치하였으나, 동시에 발생할 경우 토우부분의 손상 위치를 발견하지 못하였다.

현재의 손상 검색 모델은 전면 벽만을 단순화 하였으나, 앞으로의 연구로는 손상 모델을 실제 모델과 유사하게 작성하여, 모니터링을 수행하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- 1) On impact mechanics in ship collisions, P.Terndrup, Shengming Zhang, Marine Structure 11, 1998, 429-449
- 2) Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method, J.T.Kim, Y.S, Ryu, H.M. Cho, Norris Stubbs, Engineering Structure, vol. 25. 1999, pp. 57-67
- 3) 선박충돌에 대한 방호공의 해석(An analysis of system for vessel collision), 이계희, 2004년 동계 구조연구회(24회)
- 4) 선박과 해양구조물의 충돌해석(Ship Collision Analysis with Offshore Structure), 김종성, 정현, 고재용, 한국전산구조공학회, 2004년도 봄 학술발표회 논문집
- 5) 소수의 고유진동수를 사용하는 비파괴 균열발견 모델의 유도 및 검증”, 김정태, 한국전산구조공학회, Vol. 12, No. 2, 1999, pp. 140-159