

# 有限要素 解析을 통한 케이슨 龜裂發生의 原因糾明 事例研究

## A Case Study for the Concrete Caisson Crack Failure Using Finite Element Analysis

박 용 걸\*  
Park, Yong-Gul

.....  
요 약

철근 콘크리트 구조물은 여러가지 복합적인 원인으로 균열이 발생한다. 이러한 균열은 내구성의 저하와 일체식 구조물의 외관을 손상시킬 뿐 아니라 철근이 공기중이나 해수에 노출되어 철근의 부식으로 콘크리트 구조물에 치명적인 구조적 문제를 야기시킨다.

본 연구에서는 서해안 A 항만 건설현장 케이슨 구조체의 일부 균열현상에 대하여, 유한요소법을 이용 Computer Modelling을 하고, 제작 및 진수, 예인, 가거치 등 시공단계별 구조해석을 통해, 균열발생원인을 규명하고, 올바른 시공법을 제안하였다.

Abstract

One of the most serious problems in the concrete structures is cracking failure due to the several complicated reasons. These cracks are not only serious structural problems, but also lower the durability and deteriorate the structural shape, which cause the reinforcement rust in the open air and sea water.

An analytical study was undertaken to investigate the cracking problems in the one of concrete caissons using Finite Element Method. This caisson is modelled with plate elements and truss elements for the walls and lifting cables respectively and analyzed in the every construction stages, such as lifting, moving, sinking, filling, towing, setting, and proposed reasonable construction methods for the concrete caisson structures.

1. 서 론

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸인 해안국가로서, 일찌기 해양 관련산업이 발전하였으며 경제발

전과 더불어 국력이 신장하고 특히 수출산업의 급성장으로 꾸준히 증가하는 해상 물동량을 원활히 처리하기 위하여 항만시설의 확충이 꾸준히 이루어져 왔다. 여기서 항만(harbour)이란 선박이 안

\* 국립대전산업대학교 토목공학과

이 논문에 대한 토론을 1995년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 1995년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

전하게 정박할 수 있는 수역을 가지고 있는 동시에 승객과 화물을 신속하고 안전하게 싣고 내릴 수 있는 시설들을 말한다. 대부분의 건설분야가 그렇듯이 항만건설도 짧은 기간에 비약적인 발전을 하여 우리나라의 주요 항만 뿐만 아니라 세계적인 항만 건설공사의 참여를 통해 국가산업발전에 크게 이바지해왔다. 특히 항만케이슨 구조물의 시공기술은 제작방법 및 진수와 거치방법 등에서 눈부신 기술 개발이 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 케이슨 제작 및 거치과정에서 균열의 발생 또한 큰 문제점으로 지적되고 있다.

콘크리트 구조물에서 발생하는 균열은 심각한 문제를 유발할 수 있고 일체식 구조물의 외관을 손상시킬 뿐 아니라, 철근이 공기중이나 해수에 노출되어 철근의 부식이 진행되어 콘크리트 구조물에 치명적인 영향을 미치는 물론 제기능을 발휘하지 못해 파기시키는 사례가 종종 발생되고 있다. 따라서 본 연구에서는 서해안의 A항만 현장에서 나타난 일부 R/C 케이슨 제작 거치시의 균열에 대하여, 시공과정에 따른 발생원인을 규명하고, 그에 따른 보수공법에 대하여 연구하여 좀 더 안전하고 합리적인 케이슨 제작 및 거치 공법을 통해 항만 건설산업의 발전에 도움을 주고자 한다.

## 2. 케이슨 일반개요

### 2.1 케이슨의 정의 및 진수방법

항만에는 선박이 안전하게 출입하고 계류하기 위한 방파제, 안벽, 호안, 도류제 등 소위 외곽시설 및 계류시설이 필요하며 이러한 시설을 설치함에 있어 대형 콘크리트 구조물인 케이슨을 이용한 공법이 안전성 및 경제성에서 가장 유리한 공법으로 거의 모든 항만현장에서 이용되어지고 있다.

여기서 케이슨이란 “수중 구조물 또는 상부하중을 깊은 지지 지반에 전달하기 위하여 미리 지상에서 만들어 놓은, 주로 철근 콘크리트제의 구조물”을 말하며 육상에서 제작하여 최종위치에 거치한 후 내부에 모래, 자갈, 혹은 콘크리트를 채운 후 상판 Block과 상판 또는 Deck콘크리트를 현장에서 타설하여 공사를 완료하는 공법으로 케이슨 진

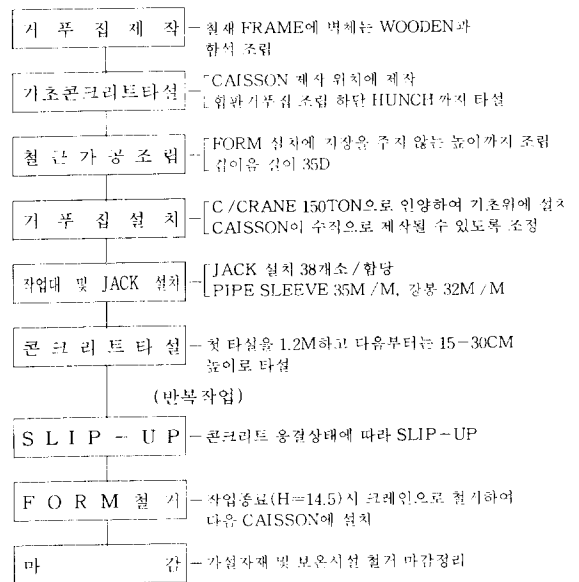
수방법에 따라 다음과 같이 분류한다.

- 1) 사로(Slipway)를 이용하는 방법
- 2) 평면사로에 의하여 진수하는 방법
- 3) 드라이 독크(Dry dock) 내에서 제작하는 공법
- 4) 육안부 근처에서 제작하는 방법
- 5) 사상에서 제작하여 진수하는 공법 등이 있다.

### 2.2 케이슨 제작 및 거치 방법

케이슨을 제작하는 방법은 일반 합판거푸집에 의한 방법과 슬립폼(Slip form) 공법이 있으며, 슬립폼 공법이란 거푸집을 Steel Rod로 지지되는 Yoke Frame에 부착되어 있는 유압잭으로 밀어 올리면서 연속적으로 콘크리트를 타설하여 구조물을 형성하는 공법으로 단면이 일정하고 높이가 높은 구조물의 시공에 적합하다. 슬립폼을 이용한 케이슨 제작공법의 순서는 표 1과 같다.

표 1. Slip-way을 이용한 케이슨 제작방법



서해안 A항만 현장의 콘크리트 케이슨은 그림 1에 보인바와 같이 가로, 세로 12m×9m와 13m×10m의 2종류이고, 높이는 14.5m와 17.5m인 6개의 방을 갖는 대형 철근콘크리트 구조물로서 설계

기준강도  $\sigma_{ck}=240\text{kg}/\text{cm}^2$ 이고, Slip form을 이용하여 제작장에서 시간당 20~30cm/hr로 타설하였으며 살수양생후 Lifting frame을 이용하여 2000Ton 해상 크레인(실악호)으로 진수, 예인하여 케이슨의 최종위치에 기지하였다.

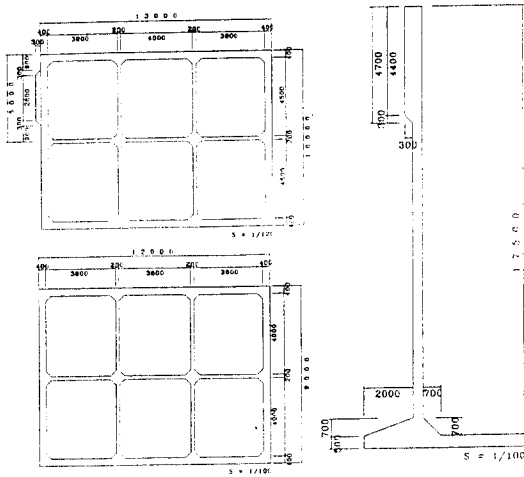


Fig. 1. 서해안 A현장의 케이슨의 일반도

### 3. 케이슨의 균열현황

콘크리트가 굳고 난 후에 발생하는 균열에는 여러가지 종류가 있다.

그것은 콘크리트가 제작된 후 사용중에 일어나는 균열이므로 실제로 그 발생원인도 다양하고 구조물에 미치는 영향도 크다. 굳은 콘크리트에 일어나는 균열로는 건조수축균열, 열응력으로 인한 균열, 화학적 반응으로 인한 균열, 철근 부식으로 인한 균열, 시공 불량으로 인한 균열, 시공시 초과 하중으로 인한 균열, 설계 잘못으로 인한 균열, 외부의 하중으로 인한 균열 등 실로 많은 원인들에 의하여 균열이 일어난다.

이러한 균열은 보수에 앞서 균열의 위치와 범위, 균열의 원인, 보수의 필요성 등에 대한 평가가 이루어져야 한다. 도면이나 특기 시방서 또는 시공과 유지 관리 기록도 검토하여 보수계획에 이용한다.

균열이 구조물의 강도, 강성 및 내구성을 허용 기준 이하로 감소시킬 것이 예상되는 경우에는 보

수가 요망되며, 균열로 인해 구조기능이 떨어지거나 콘크리트 표면의 미관을 개선하기 위해서도 보수가 행해진다. 크기등은 육안검사나 비파괴검사 또는 코어채취 시험으로 알아낼 수 있다.

현장에서 제작시공된 기의 모든 케이슨이 완벽하게 시공되어, 2000Ton 해상 크레인으로 진수시켜 최종위치에 잘 기지되었으나, 한개의 케이슨에서 제작시 발견되지 않은 균열이 가거치후 발견되어 케이슨을 인양하여 균열확대경 및 내시경을 통해 균열조사를 한 결과 그림 2의 균열현황도와 같다. 균열의 폭은 0.2~0.5mm 정도이고, 균열의 형상은 표면상에서 서로 대각선 방향의 벽체 모서리 주변에 집중하고 있으며, 케이슨 상부에서는 거의 연직방향으로 발달해 내려가다가, 하부로 갈수록 모서리에서 벽체 중앙부를 향해 약  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$  방향으로 진행하고 있다.

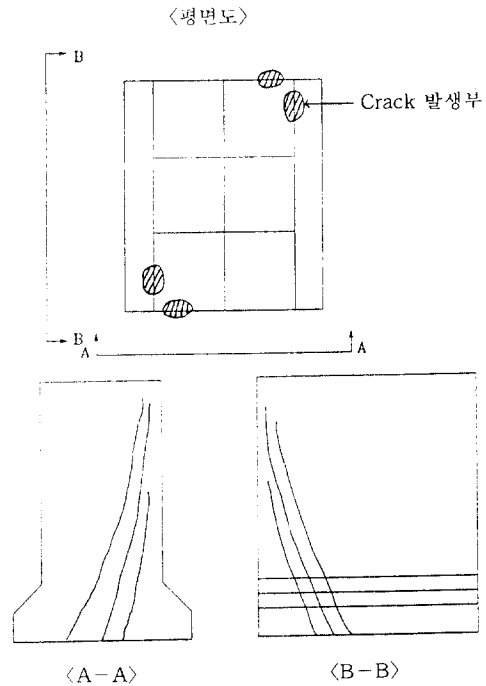


Fig. 2. 케이슨 균열 현황도

일반적으로 선진제국에서 허용하는 콘크리트 구조물의 기능별, 중요도별, 보수 가능성 여부 등으로 분류하여 제시한 최대 허용균열폭 및 균열밀도 규정은 아래와 같다.

4. 콘크리트 강도조사

콘크리트의 강도를 조사하기 위하여 비파괴 시험법인 Schmidt Hammer를 이용한 반발 경도법을 사용하였다. 반발경도법은 콘크리트 구조물의 압축강도를 비파괴시험으로 판정하는 방법의 하나로 슈미트 햄머(Schmidt Hammer)를 이용하여 콘크리트 표면의 반발경도를 측정하고 이 결과로부터 압축강도를 추정한다.

일본 재료학회의 지침안에서는 표준편차가 평

표 2. 각 국별 최대 허용균열폭

국명	규정	허용 최대 균열 폭(mm)		
일본	운수성	항만 구조물 0.20		
	일본공업	원심력철근콘크리트 기둥 0.25		
	규격	설계하중, 설계휨모멘트 작용시 0.25		
	(J.I.S)	설계하중, 설계휨모멘트 개방시 0.05		
프랑스	BROCARD	0.40		
미국	ACI	건조공기중 또는 보호층이 있는 경우 0.41		
	COMITTEE	습기있는 공기중 또는 흡수 0.30		
	224	동결방지에 접해있는 경우 0.18		
		해수, 조풍으로 건습이 반복되는 경우 0.15		
소련	콘크리트	수밀을 요하는 경우 0.10		
	기준	0.20		
유럽	CEB-FIP 지침	조건	영구하중과 장기로 작용하는 하중	영구하중과 변동 하중의 불리한 조합
			유해한 노출 조건하의 부재	0.1
		보호되지않는부재	0.2	0.3
		보호된 부재	0.3	미관상 CHECK

표 3. 보수가 필요한 균열 폭(일본 콘크리트공학 협회)

구분	내구성을 고려한 경우			방수성을 고려한 경우	
	심한 경우	중간	약한 경우		
보수를 필요로 하는 균열폭(MM)	대	0.4 이상	0.4 이상	0.6 이상	0.2 이상
	중	0.4 이상	0.6 이상	0.8 이상	0.2 이상
	소	0.6 이상	0.8 이상	1.0 이상	0.2 이상
보수를 필요로 하지않는 균열폭(MM)	대	0.1 이하	0.2 이하	0.2 이하	0.05 이하
	중	0.1 이하	0.2 이하	0.2 이하	0.05 이하
	소	0.1 이하	0.3 이하	0.3 이하	0.05 이하

표 4. 보강 필요여부 판정의 기준

구분	구조 의력	알칼리 골재 반응	철근 부식
구조 계산을 행하는 전제 조건	휨 균열폭 $\geq 0.3mm$ 또는 전단 균열 폭 $\geq 0.2mm$	gel이 확인되어 전팽창량 $\geq 1000$ 또는 균열밀도 $\geq 1m/m^2$	달개 콘크리트의 박리가 있고 또한, 철근에 변상이 있다.
보강을 필요로 하는 경우	허용응력을 초과할 때		
정기적인 관측을 필요로 할 경우	0.3mm 휨균열폭 $\geq 0.15mm$ 또는 0.2mm 전단균열폭 $> 0$	gel이 확인되고 전팽창량 $\geq 1000$ 또는 균열밀도 $\geq 1m/m^2$	달개 콘크리트의 부상, 녹물이 있다.
보강을 요하지 않는 경우	상기에 해당되지 않을 때		

\* 균열밀도란 단위면적당의 균열(RC 구조물에서 0.3mm 이상, PC 구조물은 0.2mm 이상)의 총연장을 말한다.

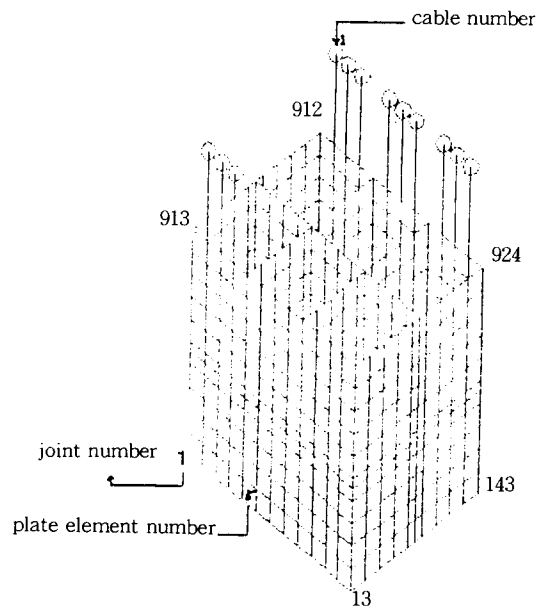


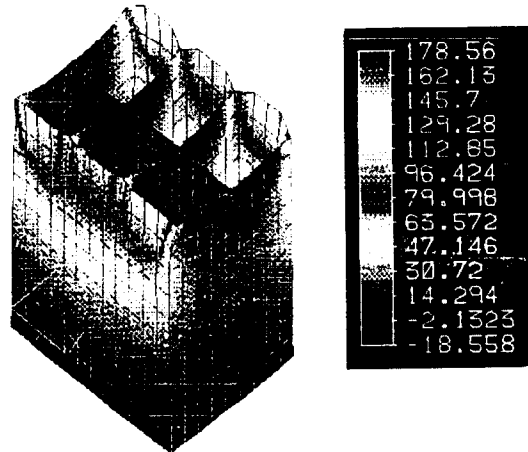
Fig. 3. Input modeling

균치의  $\pm 20\%$  이상되는 경우 그 자료는 채택되지 않으며, ASTM의 방법에 의하면 반발 수치가 평균치의  $\pm 7\%$  이상인 자료는 채택되지 않게 되었다.

강도 측정 결과표를 인용하여, 9.5m 높이의 4면

표 5. Caisson의 강도측정 결과

위 치	측 정 치	평 균	추정강도값 (Kg/cm <sup>2</sup> )
외향측 외벽	30,31,32,33,31,30,32,35	31.55	238
	29,31,30,33,30,31,31,30 32,32,32,33,35,32		
내향측 외벽	36,35,33,31,35,36,28,34	33.15	250
	36,35,36,32,27,36,33,39 34,29,29,34,32,30		
측벽 위	31,29,32,31,30,27,32,24	31.8	238
	30,26,35,33,33,30,36,33 30,38,33,32,36,37		
측벽 아래	30,31,36,36,32,38,36,32	32.4	238
	31,38,36,37,28,31,34,34 6,38,31,34,28,38		



max principal stress = 151.8 t/m<sup>2</sup>

Fig. 5. stress profiles on vertical lifting.  
scale = 5000 times

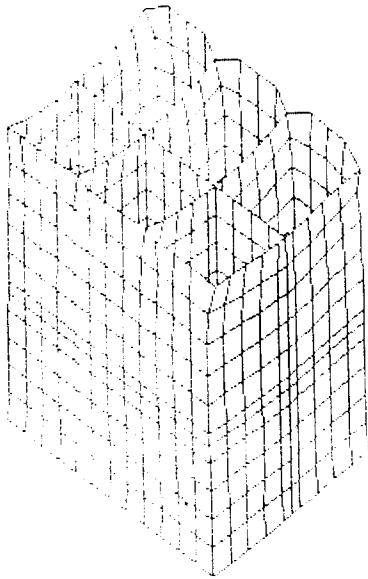


Fig. 4. deflection profiles on vertical lifting.  
scale = 5000 times

중앙에서 균열이 발견된 호안 케이슨 21#의 Schmidt hammer 강도측정결과는 표 5와 같으며 가거치된 상태에서 표면에 물기가 젖어있고, 표면이 거친 상태를 고려할 때 콘크리트 강도는 품질이 양호한 것으로 판단된다.

5. 구조해석

케이슨의 균열 발생상태가 일정한 형상을 갖는

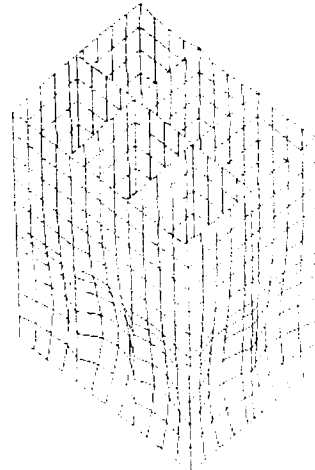


Fig. 6. deflection profiles subjected to 8.5m hydrostatic pressure  
scale = 1000 times

점과 그 크기가 일반적인 hair crack의 수준을 상회하며, 균열 주변의 콘크리트 표면이 파손된 상태로 미루어 볼 때 이는 구조적 균열인 것으로 판단되는 바 균열의 구조적인 원인을 규명하기 위해 유한요소법을 이용한 Plate element와 Truss element를 이용하여 부록과 같이 Input modeling 하였다.

하중조합은 케이슨 구조물의 시공단계별 하중 상황을 고려할 때 제작후 2,000ton crane으로 들어올릴때 특히 출렁거림에 의해 대각선 방향의 두

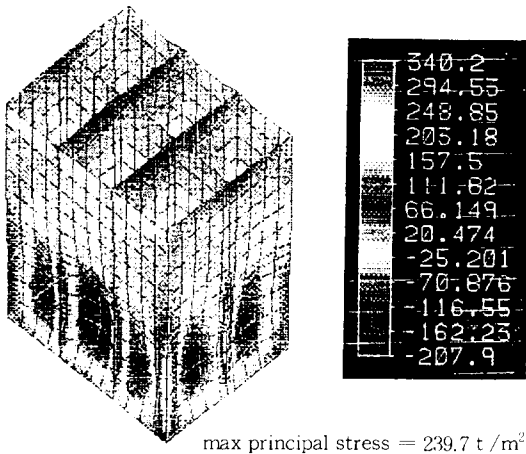


Fig. 7. stress profiles subjected to 8.5m hydrostatic pressure  
scale = 1000 times

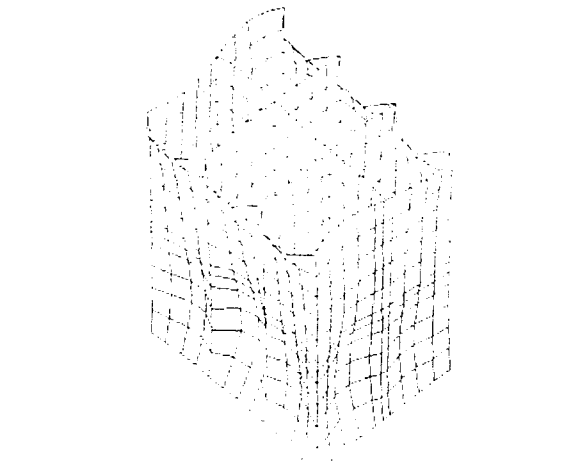


Fig. 8. deflection profiles subjected to 8.5m inclined hydrostatic pressure  
scale = 1000 times

표 6. Caisson 구조물의 시공단계별 하중 조합

Construction Stage		하중 조합
lifting	lifting frame 이용	수직으로 들어올릴 경우 : 수직 상태
		조금 출렁거릴 경우 : 경사상태 10°
moving		조금 출렁거릴 경우 : 경사상태 10°
sinking	lifting frame 부력작용	수직상태+최대과압
		경사상태+최대과압
filling	물채움	수직상태(물채우는 순서)
towing		
setting		

모서리쪽에 케이슨의 하중이 집중되는 현상과, 가거치시 침강중의 수압과 부력 위험상태, 가거치시 바닥이 고르지 못하여 대각선 방향의 두 모서리부가 지지된 상태로 만조시 케이슨 내부에 물이 가득차기전 최대 과압상태에서 구조해석을 실시하였다.

1) 구조해석 결과

케이슨 제작 및 가거치 경위를 고려하고, 균열발생원인 추정에 따라 지점 조건을 설정하여 FEM 해석을 통하여 simulation한 결과 시공단계별 최대 주응력도는 부록에 보인바와 같이 다음과 같다.

① 케이슨을 들어 올릴 경우

케이슨을 제작완료하여 Lifting Frame을 이용해서 수직방향으로 들어 올릴경우 케이슨 상부에서 콘크리트에 15.2Kg/cm<sup>2</sup>의 인장응력이

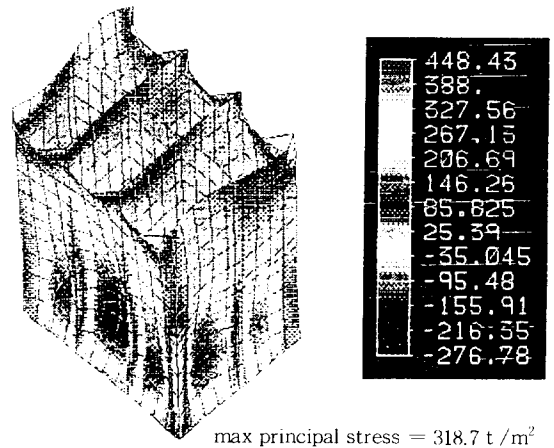


Fig. 9. stress profiles subjected to 8.5m inclined hydrostatic pressure  
scale = 1000 times

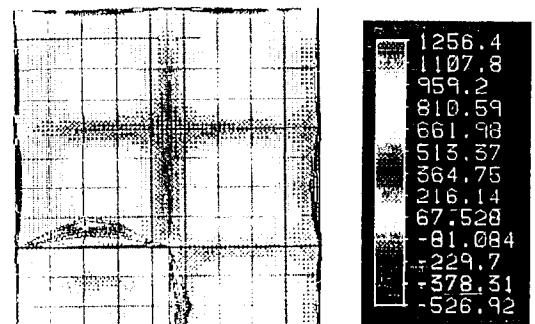


Fig. 10. deflection and stress profiles subjected to one-corner room water fillings.  
scale = 1000 times

발생하였으나 예기치 못한 상태에서 케이슨이 출렁기런 경우 10°의 경사 상태를 고려한 상태에서 15% 정도의 주응력의 증가를 보이고 있다.

② 케이슨을 침수시킨 경우

케이슨을 최종위치까지 예인하기 위하여 침수 시키는 과정에서 안전 흡수심을 유지하기 위해 물을 채우기 이전 단계에서 최대 수압상태가 발생하므로 8.5m의 수압으로 케이슨이 수직 평형된 상태와 10° 정도 경사진 상태에서 구조해석을 실시한 결과, 수직 평형된 상태에서 24Kg/cm<sup>2</sup>의 콘크리트 인장응력이 발생하고, 예기치 못한 조건으로 10° 정도 기울어진 경우 콘크리트의 인장응력이 30% 증가함으로써 32Kg/cm<sup>2</sup> 정도의 인장응력이 발생하여 콘크리트의 인장강도(파괴계수)  $2.0\sqrt{\sigma_{ck}}$ (=31Kg/cm<sup>2</sup>) (ACI 기준)를 초과하여 균열이 발생함을 알 수 있다.

2) 균열폭으로 부터의 검토

케이슨의 균열현황도에 보인바와 같이 0.2~0.5mm의 균열이 발생했고 이 정도의 균열이 발생하기 위해서는 균열폭에 대한 실험공식으로부터 다음과 같은 정도의 철근응력 발생이 예상된다.

$$\sigma_s = \frac{w}{(0.076 \times R \times \sqrt{d_c} \cdot A)} \times 100$$

w = crack 폭 (in) = 0.0197 in

d<sub>c</sub> = 7.5 cm = 2.953 in

A = 15 × 20 = 300 cm<sup>2</sup> = 46.5 in<sup>2</sup>

R = h<sub>2</sub>/h<sub>1</sub> = 29.378/21.878 = 1.343

$$\sigma_s = \frac{0.0197}{(0.076 \times 1.343 \times \sqrt{2.953} \cdot 46.5)} \times 100$$

= 37.4 kips

= 2630 Kg/cm<sup>2</sup> < σ<sub>y</sub> = 3000Kg/cm<sup>2</sup>

이 값은 허용응력을 훨씬 초과하는 값이 되나 아직 항복에 이르지 않고 하중이 제거되면 다시 기능할 수 있는 상태에 있다고 판단된다.

따라서 인장부의 철근이 항복하지 않은 상태이므로 케이슨에 작용하였던 응력을 제거하면 다시 사용이 가능하나 균열 사이로 해수가 침투

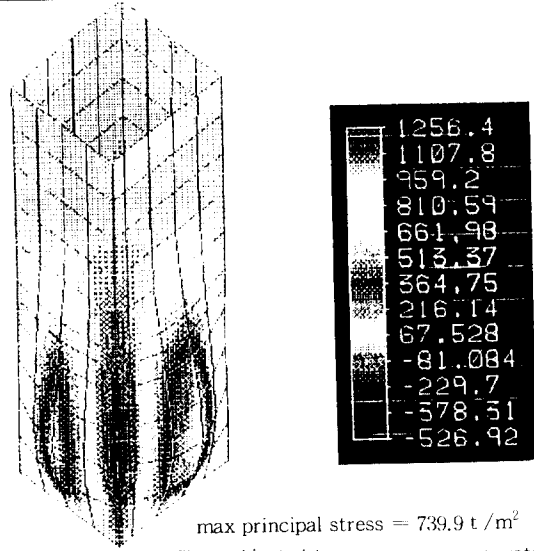


Fig. 11. stress profiles subjected to one-corner room water fillings. scale = 1000 times

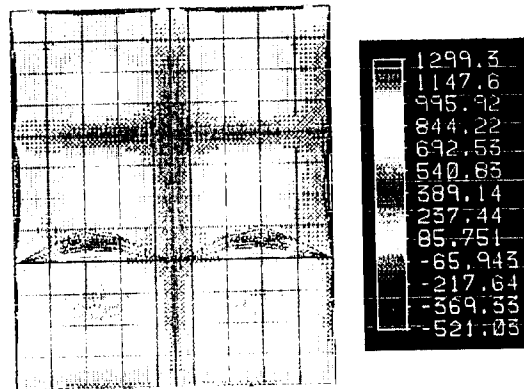


Fig. 12. deflection and stress profiles subjected to two-corner room water fillings. scale = 1000 times

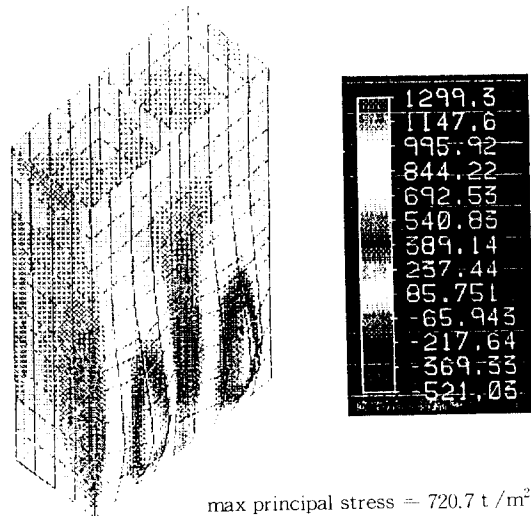


Fig. 13. stress profiles subjected to two-corner room water fillings. scale = 1000 times

되면 해수의 작용으로 철근이 부식하고 콘크리트의 열화가 발생할 수 있으므로, 내부철근의 부식등을 방지하기 위하여 기 발생된 균열부분 및 균열로 인하여 취약해진 부분을 chipping하여 epoxy주입 및 epoxy mortar 등으로 보수하여 사용함이 바람직하다. 또한 케이슨 거치시에는 반드시 지반 고르기를 확실하게 하여 편평도를 확인후 거치하여 설계와 다른 과대응력이 발생치 않도록 주의하여야 한다.

## 6. 결 론

항만건설 현장의 케이슨 구조물 제작 기치시, 거치방법에 따라 구조적 균열이 발생할 위험이 있으며, 균열 사이로 해수가 침투되면 철근이 부식하고, 콘크리트의 열화가 발생하므로, 이를 피하기 위해서는 시공단계별 위험상황에서 정확한 구조해석을 실시하고 결과에 따라 구조물에 가장 합리적인 정확한 시공방법을 제시해야 할 것이다.

· 본 연구 결과 케이슨 구조물을 유한요소법으로 해석하기 위해 부록에 보인바와 같이 절점 924개를 갖고 시공단계에 따라 평판요소와 트러스요소를 적절히 조합한 입력모델을 개발하였다.

· 시공단계별 위험 하중상태에서 구조해석을 실시한 결과, 케이슨의 인양 거치시 시공부주의나 예기치 못한 파도등으로 인해 케이슨이 경사지거나, 출렁거림으로 인해 Lifting frame의 강선에 경사 인장하중이 걸린 경우 10° 경사에서 약 15%의 주응력 증가가 생기므로 위험상태는 아니더라도 강선과 케이슨이 평형을 유지하도록 주의해야 하며 frame의 대각선 방향으로도 응력이 집중되지 않도록 특별한 주의를 해야 한다.

· 케이슨을 최종위치까지 예인하기 위하여 침수시키는 과정에서, 예기치 못한 조건으로 케이슨이 기울어지는 경우, 10° 정도 경사상태에

서 콘크리트의 인장응력이 허용인장강도(파괴계수)를 초과하여 케이슨의 벽에 균열을 발생할 수 있으므로 케이슨이 평형을 이룬 상태에서 수직으로 침수하여야 한다.

· 케이슨 가거치 및 거치시에는 반드시 기초 고르기를 확실하게 하여 부등침하에 따른 과대응력이 발생하지 않도록 하여야 한다.

그러나 일단 균열이 발생하면, 신뢰성있는 기관의 공인된 안전진단을 거쳐 구조물의 위해 여부를 판단하고, 허용균열 이내에서 손상된 부분의 안전성을 확인할 수 있는 효과적인 보수 방법을 고려하여야 할 것이다. 케이슨의 균열보수 방법에 있어서는 균열을 충전시켜 공기층을 차단하여 철근의 부식을 방지하는 충전효과와 구조물의 강도증진 효과를 기대할 수 있는 에폭시계 수지 주입 보수공법이 적절한 것으로 판단된다.

## 參 考 文 獻

1. Segerlind, Larry J. *Applied Finite Element Analysis*, John Willy & Sons, Inc., 1984
2. Philip H. Perkins, *Repair Protection and Waterproofing of Concrete Structures*, Elsevier Applied Science Publishers, 1986
3. Rockey, K. C., Evans, H. R., *The Finite Element Method*, Granada Publishing Ltd., 1975
4. 長尾義三, “港灣工學” 共立出版株式會社., 1981
5. 심종성, 문일환, “콘크리트 구조물의 유지관리에 관한 체계적 연구”, 한국콘크리트학회 추계학술발표회, 제1권, 1989
6. 小合彬生 “公共施設の管理! と維持補修” 일본항만협회 『항만』 Vol.63, No.11. 1986년
7. Sidney, M.J., *Deterioration, Maintenance, and Repair of structures*, McGraw-Hill Book Co., 1965.
8. 한국콘크리트학회편저 “최신 콘크리트공학” 기문당 1992년

(접수일자 1994. 10. 11)