

대형 수중구조물 보수를 위한 부유식 섹터케이슨

이중우* · 이승철** · 이정수*** · 박승규**** · † 김기담**

*한국해양대학교 토목환경공학부 교수 **한국해양대학교 토목환경공학과 대학원
*** (주) 국제항만개발 전문이사 **** (주) 강동산업개발 대표이사

Floating Sector Caisson for Maintenance of the Large Underwater Structures

Joong-Woo Lee* · Seung-Chul Lee** · Jung-Su Lee***

Seung-Kyu Kwak**** · † Ki-Dam Kim*****

*Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

***International Port Development Co., Ltd. Dong-Bang B/D 305 Chung-ang Chung-gu, Busan 600-010, Korea

****Kangdong Ind. & Eng. Co., Ltd. Woojoo B/D Cho-ryang Chung-gu, Busan 601-010 Korea

***** Graduate School of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 최근 건설구조물의 하자보수기간은 5년에서 10년으로 연장되었고 건설품질 및 유지관리에 대한 인식의 변화에 따라 교량, 댐, 항만 구조물의 수중부 은폐된 부분에 대한 유지관리를 위해 반영구적인 공법의 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 지금까지 대형 강관 및 교각의 수중시공에서는 잠수부들의 기술능력부족과 수중에서의 작업조건의 까다로움 등으로 임시적인 작업이 되었던 현 실정을 고려하여 수중구조물 유지관리에 실용화 될 수 있는 공법으로 부채식 섹터케이슨을 제안하였다. 특히, 상부구조물이 수면에 가까운 경우 및 구조물간 간격이 좁은 경우 보수기간의 접근성과 교각과 같은 대형 수중구조물 유지·보수 시 드는 고비용의 문제 등으로 전체 구조체를 설치하는 대신 섹터케이슨을 개발하여 도입함으로써 비상시 이동과 장래 신속한 작업수행 및 작업수준 향상에 획기적인 역할이 기대 된다.

핵심용어 : 반영구적 공법, 수중시공, 부채식 섹터케이슨, 대형 수중구조물, 유지관리

Abstract : Recently, the defect maintenance period of the new construction structure was extended from 5 years to 10 years. And according to change of realization on the quality of construction and maintenance, a development of semi-permanent method of construction is required for maintenance of blind parts of underwater structure, such as bridge, dam, harbor, etc. In this study, we proposed a floating type sector dry caisson, which is effective to the maintenance of submerged large structures. These large structures were being maintained incompletely, partly due to unskilled divers and difficult working condition. Considering the easiness of access to the maintenance area and the cost for set up the working structure, especially for the case of structure slabs close to the sea surface and harrow pile span structures, we developed and introduced a sector dry caisson instead of the full caisson structure. By doing this, it is easy to move out the caisson rapidly in emergence case. Therefore, we expect that the floating sector caisson will contribute to reduce working time and improve the quality of underwater work in future days.

Key words : Semi-permanent method of construction, Submerged method of construction, Floating sector caisson, Large underwater structure, Maintenance

1. 서 론

1.1 연구의 배경

근래 국내 건설 산업의 추세를 살펴보면 신항만의 건설로 인한 물류수송로를 확보하기 위해 연육교와 해안도로인 해상 교량 등이 건설되고 있으며, 인천국제공항과의 연결로를 건설하기 위해 영종도와 인천송도국제도시를 잇는 인천대교, 에너지난을 해소하기 위한 해상풍력발전단지 건설 계획 등이 진행

중이다.

이러한 해양구조물의 경우 조수간만의 차로 인해 구조물의 기저부인 대형콘크리트와 대형 강관파일의 비탈대 부분은 부식현상이 심각하게 발생하고 이로 인해 구조물의 수명에 악영향을 미치고 있다. 부식현상의 대책으로 다양한 유지·보수 공법들이 개발되었는데 그 예로서 육상도장, 전기방식, 테이프, 수중페인트, 가물막이 Sheet pile공법이 있다 (PTI, 1988). 이와 같은 공법은 작업의 신뢰도가 다소 떨어지며 비용이 많

* 대표저자 : 이중우(중신회원), jwlee@hhu.ac.kr 051)410-4461

** kmaritime99@nate.com 051)410-4981

*** ipd0050@hanmail.net 051)468-0050

**** kgs2702@korea.com 051)442-2702

† 교신저자 : 김기담(정회원), allyesyou@hanmail.net 051)410-4981

이 드는 문제점이 남아 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 건식 환경의 제공에 대한 연구는 Cassiere (1931)의 수중둥지형에서 기원을 두어 Andersen (1982)과 Tate (1991)이 수중구조물과 일체화 시킨 작업공간을 소개하였지만 작업의 기동성이 떨어지고 자체 부양능력이 없는 결점으로 인해 상업적 이용은 불가능했다.

이후 이 등 (2006)은 부유식 건식원형케이슨 DPCC (Dry Processing Circular Caisson)를 개발하고 이를 현장에서 적용하여 비말대 구간의 구조물 건설 및 유지·보수에 혁신적인 관심을 불러일으켰다(Fig. 1 참조). 이는 작업구간을 쉽게 이동하고 취급이 용이하며, 유지보수비용 및 방식작업시간을 현저하게 줄여주었다. 특히 기존 항만이나 신규 항만에서 부두의 강관파일의 직경이 일정하고 그 수량이 많을 시 조립식 가물막이 공법이나 잠수부를 이용한 보수보다는 건식원형케이슨을 이용한 보수가 공사기간 단축은 물론 공사의 신뢰도를 향상시키는데 기여하게 되었다.

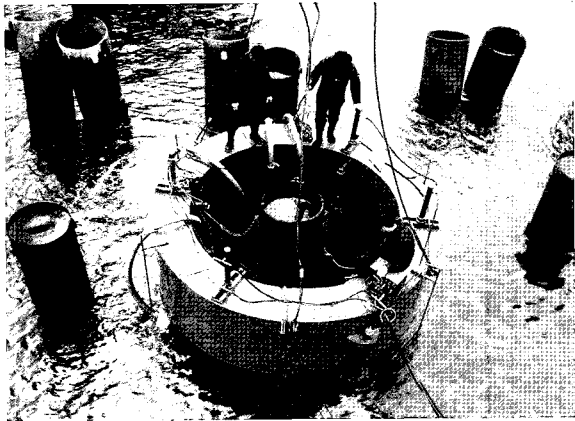


Fig. 1 Steel pile Maintenance work using a Dry Processing Circular Caisson (DPCC)

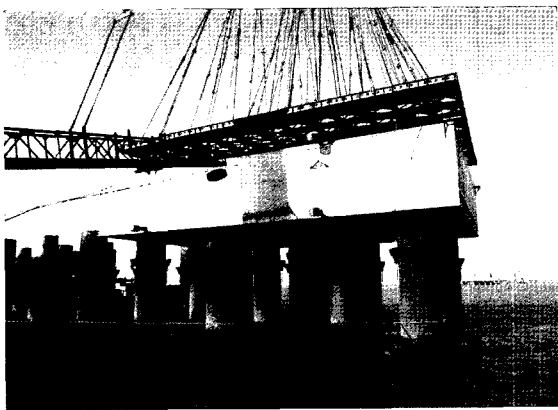


Fig. 2 An example of corrosion to the large steel pile bridge foundation at the splash zone

그러나 이는 대형 구조물인 해상교량의 교각기초부와 비말대에 타설된 강구조물을 보강하기에는 보수장비의 규모가 너무 커져서 초기비용의 증가와 태풍도래 및 화재와 같은 비상시

속한 이탈이 어려우며, 또한 이는 구조물에 경사하여 작용하는 하중을 지지하기 위한 사항에 대해서는 적용이 불가능하다(Fig. 2 참조). 따라서 새로운 유지·보수를 위한 설계가 필요하게 되었고, 이를 해결하기 위한 섹터형 디자인을 도입하게 되었다.

1.2 연구의 목적

건식원형케이슨의 경우 동심원상의 점대칭 발라스트 탱크를 이용하여 내부 구조체의 비대칭 하중을 고려하여 단순 발라스트 작업을 통해 부유안정성 및 작업실 배수를 통한 강파일 구조체에 설치 및 작업상 안정성을 확보할 수 있었으며, 모형실험에 이은 실물제작 이후 현장적용에서 인력 및 작업시간이 30% 이상 절감되는 것으로 나타났고, 작업품질 면에서도 탁월성이 입증되었다. 그러나 인천대교, 거가대교 등 항만 및 공항을 연결하는 해상구조물의 대형화로 수중작업을 위한 건식케이슨이 가진 기동성과 교각기초부의 강관사이의 간격이 좁아서 원형케이슨의 적용에는 한계점이 발견되었으며, 특히, 경사된 강관기초부에 대해서는 더욱 적용이 어려운 애로점을 안고 있었다. 따라서, 기존의 부채식 케이슨의 장점을 살리면서 대형구조물에 대해서도 적용이 가능한 새로운 형태의 부유식 케이슨을 개발하게 되었고, 다양한 수리모형실험 및 계산을 통해 비대칭형 부유식 섹터케이슨 (Dry Processing Sector Caisson, DPSC)의 설계에 이르게 되었다.

2. 수중구조물의 보수

해상구조물에 대한 수중점검의 수행 횟수가 늘어나면서 수중구조물의 유지·보수의 횟수나 규모도 늘어나는 추세에 있다. 해상구조물의 결함으로는 세굴(Scour), 부재의 열화작용(Deterioration), 구조적인 손상, 구조적인 파괴(Failure), 기초의 손상 등으로 나눌 수 있다(수자원공사, 2004). 특히 부재의 비말대 부분의 결함인 부재의 열화작용에 의한 손상 및 구조적 파괴의 보수를 위한 해상조건에서 안정된 수단을 확보하는 것이 관건이다.

대부분의 보수는 수면에서 이루어지지만 일부는 수중에서 이루어지고, 수중에서의 보수는 많은 시간과 노력이 필요하며 특수한 장비가 사용된다. 즉, 건식작업과 수중작업을 둘 수 있다. 건식작업은 물막이 댐 혹은 물막이 벽체를 설치하여 육상작업과 동일한 조건을 만들어서 실시하며, 일상적인 점검 및 유지·보수가 동시에 실시된다. 수중작업은 보수공사의 품질판리가 어렵고 잠수부에 의한 확인 및 점검이 필요하며 많은 시간이 소요되고 있는 실정이다. 수중작업은 대체로 건식작업에 비하여 소규모 단위로 이루어지는 것이 현실이다.

3. 섹터케이슨의 설계

대형 수중구조물의 제원을 파악함으로써 섹터 케이슨의 설계에 기초가 되는 규격 및 형상을 결정할 수 있다. 최근에 활

발하게 이루어지고 있는 해양구조물의 개발 예로 인천대교(직경 3.0m), 거가대교, 광안대교(2.5m)와 같은 대규모 해상교량과 '룬스코예'와 같은 부유식 해양플랜트, 해상호텔, 해양친수공원 등 대형 수중구조물들이 있다. 하지만 그에 따른 유지·보수 대책은 기존의 방법 이외에는 아직 제대로 구축되고 있지 못한 실정이다.

건식 원형케이슨의 문제점인 강관의 간격이 좁은 수중구조물에 적용의 한계점, 평면 보수 불가능, 사향에 적용불가 등을 보완하는 형태여야 하며, 크기 및 중량도 고려하여 정해야 한다. 따라서 섹터형은 해상에서 자체 부유상태를 유지하면서 대형구조물, 사향, 벽체나 사각형 교각의 평면에서 적용이 가능한 형태로 최적화된 디자인이 되어야 한다.

이는 Fig. 1과 같은 건식원형케이슨이 대형 구조물이나 사향에 적용될 시 발생하는 문제점인 크기에 비례하여 증가하는 중량과 케이슨 내부직경의 한계를 다음과 같이 보완하여 새롭게 디자인하였다.

첫째, 대형 해양구조물을 유지·보수하는데 사용되는 대형장비를 최소한의 크기로 개발하여 대상구조체에 장비를 설치·해체하는 시간을 단축하고자 한다. 최근 해상 교량에서 교각의 규모가 대형화 되고 강관파일의 수가 다량이므로 보수장비의 크기가 대형 해양구조물의 크기에 비례하여 커진다면 장비의 설치 및 해체하는데 많은 시간이 소요될 것은 물론, 현장수송 및 보관에도 많은 애로점을 야기하게 된다. 아울러 보수장비 자체의 체적이 증가함으로 인해서 태풍 내습 등의 비상시에 장비의 신속한 이탈이 어려워지고 부가적으로 장비에 손상을 입는 경우가 종종 발생한다. 또한 보수장비의 제작 및 설치 등 운영에 있어서도 고비용이 발생하므로 비경제적이라 할 수 있다.

둘째, 케이슨의 형태를 Fig. 3과 같이 섹터형으로 설계하여 대형 교각을 3회 정도 나누어 부분 보수를 수행하면, 전체를 가물막이 시설로 보수하는 것보다 비용 및 시간을 절감할 수 있다. 섹터형은 공간 활용 및 접근성이 양호하고 건식환경을 위해 요구되었던 체적의 1/3로 체적 및 자중감소를 통해 설치 시간 및 부재의 부담을 줄일 수 있어서, 원통형구조체로 작업이 어려운 사향(경사파일)의 경우에도 원활히 작업을 진행할 수 있다. 기존의 건식 원형케이슨 공법과 비교하여 설치·이탈 횟수는 늘어나지만, 자중부담을 줄이고 좁은 곳까지 장비의 설치를 가능하게 하여, 설치·이탈이 용이하며 세밀한 부재까지 작업이 이루어져 보다 능률적이고 경제적이라 할 수 있다.

셋째, 강파일, 교각 등의 수중구조물 보수 시 케이슨의 물막이 장치로 육상 건식환경과 동일한 작업조건을 형성하므로 조수간만이나 수면의 제약을 받지 않는다. 아울러 원통형 건식 케이슨과 같이 보수 장비 자체의 부력으로 인해 별도의 이동 장비 없이 이동이 용이하므로 비상시 안전한 곳으로 이동이 쉽게 이루어지는 장점을 그대로 지니게 된다. 특히, 기존공법에서 철판거꾸집 및 잠수부를 동원한 작업 등 불안전, 고비용, 장기간의 공사 등의 문제점을 해결할 수 있으며, 수질오염과 콘크리트의 조기 부식과 철의 산화 등의 문제도 함께 해결할 수 있다는 점에서 유리하다.

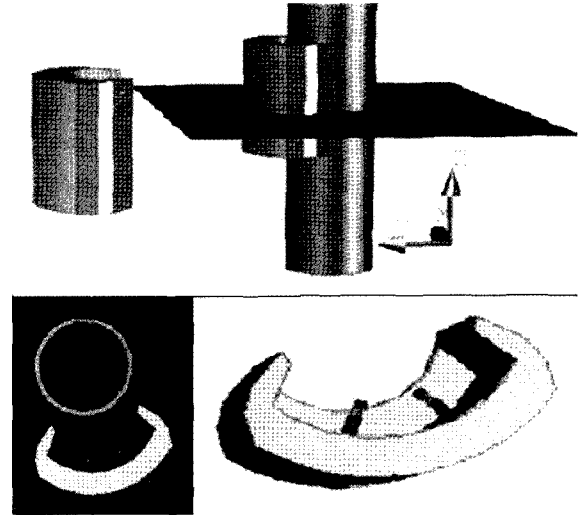


Fig. 3 Image of a Dry Processing Sector Caisson to the large steel pile structure

4. 섹터케이슨의 안정성 검토

디자인, 구조물 제작 및 현장 적용성 등 다양한 시행착오를 거쳐 섹터케이슨의 최종설계 및 모형은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 작업공간확보, 보수작업구간의 중복성, 부유식 안정성을 고려하여 발라스트 탱크(Fig. 4 및 Fig. 5에서 ●)를 각각 5개 및 4개를 확보하였고, 섹터의 중심각을 160도로 하였다.

케이슨의 전수압 및 부력을 계산하여 안정성을 검토한 후 캐드를 이용하여 구체적인 도면을 제작하였다. 모형의 중량 및 면적 계산은 모형제작에 사용한 아크릴을 기준으로 하였으며, 제작한 모형으로 수행한 수조실험 결과와 비교하였다. 아크릴 모형은 제작과정에서 설계부분과의 차이점을 바로 수정·보완하였으며, 방수에 주의하여 Fig. 7과 같이 제작하였다.

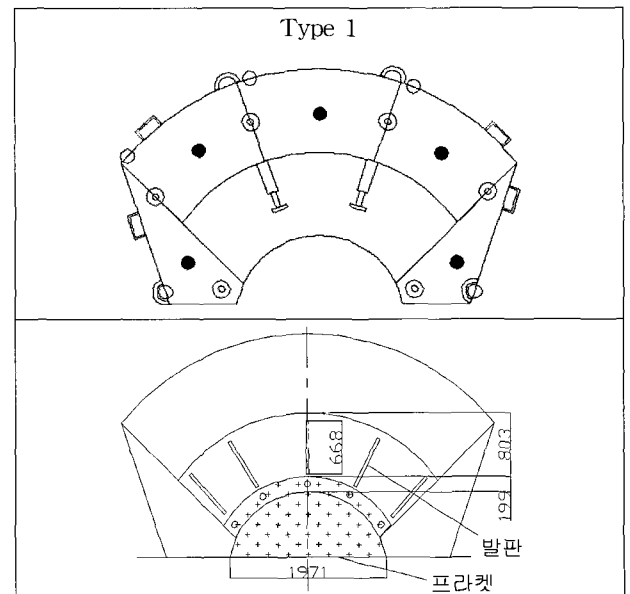


Fig. 4 Design diagram of sector caisson type 1 (DPSC-1)

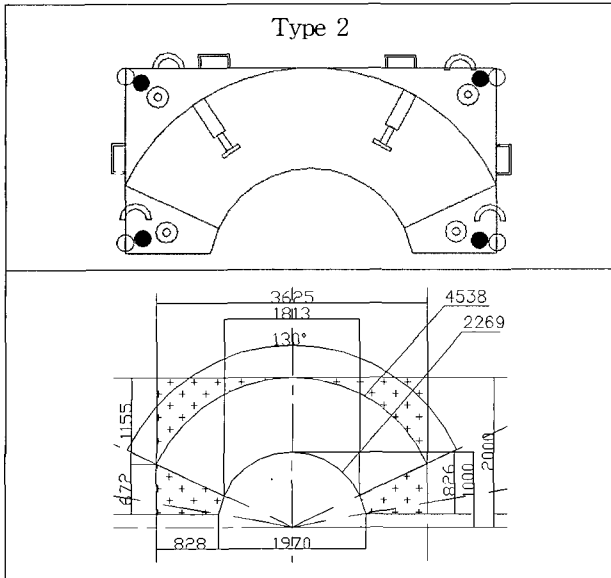


Fig. 5 Design diagram of sector caisson type 2 (DPSC-2)

부유식 섹터케이슨의 중량, 부력이나 안정성에 대한 특성을 파악하기 위하여 실물 제작에 앞서 1/6 축소모형을 제작하여 실제 부력 시험, 이동시험, 거치시험을 실행하였다. 또한 부력 및 전수압을 계산으로 산정하였고 수리모형에서 각 10cm 간격으로 물을 충수하여 각 부력과 전수압을 측정하였다.

4.1 전수압 (Total Pressure Force, Pt) 계산

섹터케이슨 전면에 작용하는 전수압에 의해 케이슨의 구조물에 대한 접착력이 증가하며, 부가적으로 실험제작에서는 교각 및 잔교형부두의 상판슬라브에 유압식 잭을 이용해 부력에 의한 상향력에 저항하도록 한다.

장치의 수압 $P = \omega h_c A$

ω : 물의 단위중량 = $1.0t/m^3$

h_c : 물체의 도심까지 수심

A : 수중에 접하는 물체의 총수직 면적

아크릴의 단위 체적중량 $\gamma' = 1.18t/m^3$

1) 섹터 케이슨의 제원

높이	50cm	외부 직경	60cm
내부 직경	40cm	작업대직경	20cm
아크릴두께	0.8cm		
고정시 수면에 접하는 물체의 가로축 길이			106cm
이동시 수면에 접하는 물체의 가로축 길이			170cm

2) 케이슨 면적 및 부피

하부평면 넓이	0.095m ²
상부평면 넓이	0.064m ²
부력탱크평면 넓이	0.065m ²

작업대평면 넓이	0.029m ²
부력탱크평면 둘레	1.695m
바닥 및 상부 아크릴의 부피	0.001m ³
측면 아크릴의 부피	0.007m ³
작업대 아크릴의 부피	0.001m ³
그 외의 아크릴의 부피(가정)	0.001m ³
총 아크릴의 부피	0.009m ³

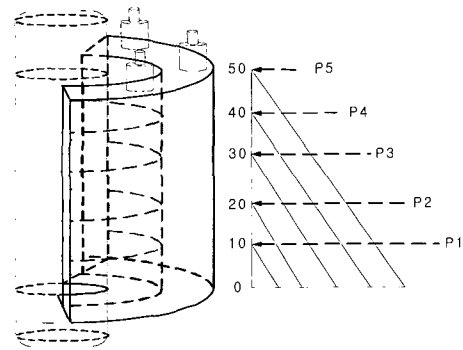


Fig. 6 Schematic diagram for calculation of total pressure force to the sector caisson

3) 전수압 계산

케이슨 흘수(cm)	전수압(kg)	
	거치시	이동시
10	5.3	8.5
20	21.1	33.9
30	47.5	76.4
40	84.5	135.8
50	132	212.1

수중구조물에 섹터케이슨을 거치하였을 경우 수압은 중심 강관접촉부로는 작용하지 않고 가장자리인 수면하의 외단에 만 작용한다. 그러나 이동시에는 내부면에도 수압이 작용하므로 전수압의 크기는 단면의 면적이 늘어나 증가한다. 이는 케이슨을 수중구조물에 정착시키거나 이동시 필요한 부분이다.

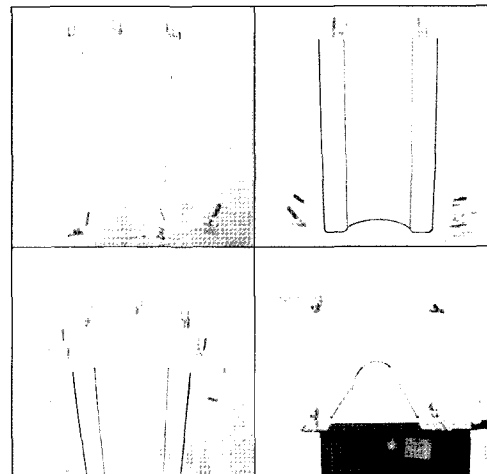


Fig. 7 Two types of Acryl Sector Caisson model

4.2 부력(Buoyancy Force, B) 계산

케이슨의 자중에 대한 부력의 크기를 고려하여 부력탱크의 크기를 조절하고, 파랑 작용시 복원력에 의한 안정성을 확보하기 위해 부력탱크의 위치와 위치에 따른 부력탱크 격실 크기 및 수를 검증하기 위해 계산 및 수리실험으로 수중에서 섹터케이슨의 안정 여부를 검토하여 이상적인 단면의 제원을 확보한다.

1) 케이슨 중량 계산 ($F = Wc + Wb$)

케이슨 자중 $Wc = \text{아크릴의 부피} \times \text{아크릴의 단위체적 중량}$
 $= 0.009\text{m}^3 \times 1180\text{kgf/m}^3 = 10.914\text{kgf} = 0.011\text{tf}$
 기본부력 $B = \text{물의단위중량} \times \text{발라스트탱크 체적}$
 $= 1 \times 0.032 = 32.195\text{kgf} = 0.032\text{tf}$

2) 부유안정시 발라스트 탱크내 홀수 계산 (d)

$B = \text{섹터 케이슨의 중량 } F + \text{케이슨 내부 물의 중량}$
 $0.032 = 0.011 + 1 \times 0.065 \times d$ (발라스트탱크내 홀수)
 $\therefore d = 0.330\text{m} = 33.045\text{cm}$

케이슨 홀수(cm)	발라스트수 중량(tf)	케이슨 홀수(cm)	발라스트수 중량(tf)
10	0.006	40	0.026
20	0.013	50	0.032
30	0.019		

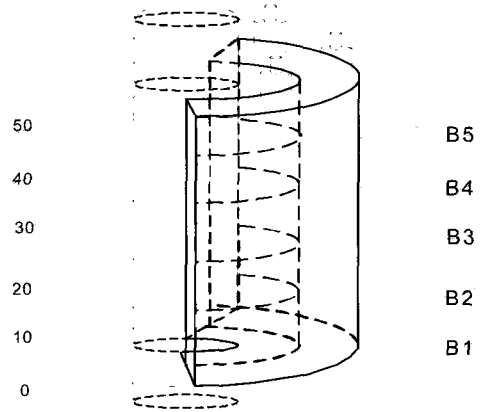


Fig. 8 Schematic diagram for calculation of buoyancy force of the sector caisson

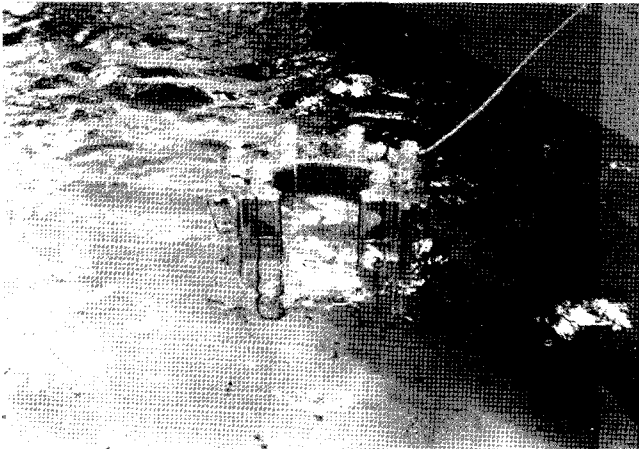


Fig. 9 Floating test of DPSC Type 1

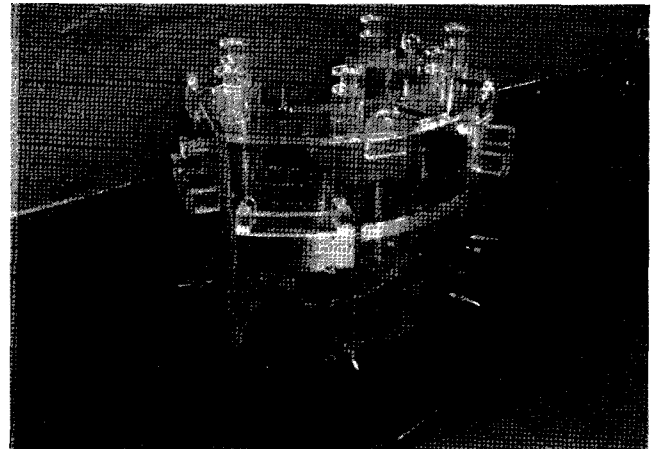


Fig. 10 Holding test of DPSC Type 1

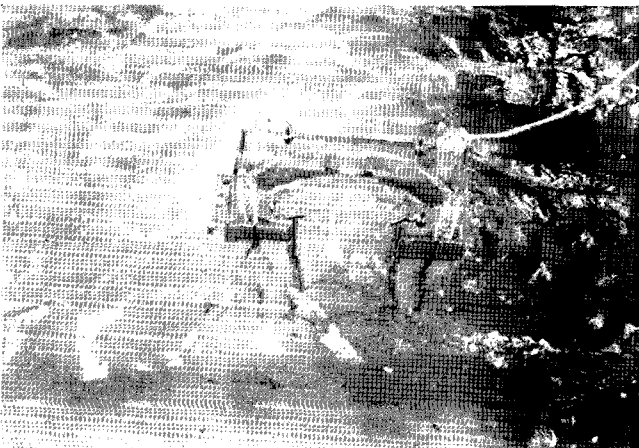


Fig. 11 Floating test of DPSC Type 2

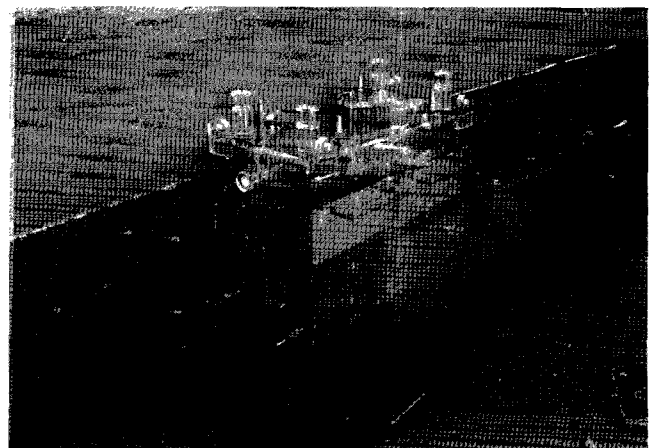


Fig. 12 Holding test of DPSC Type 2

3) 발라스트 탱크 홀수 변화에 따른 총부력 계산

총부력=기본부력-케이슨의 자중-부력 탱크 내 물의 자중

케이슨 홀수(cm)	총부력(t_f)				
	d=10cm	d=20cm	d=30cm	d=40cm	d=50cm
10	-0.008	-0.014	-0.021	-0.027	-0.035
20	0.002	0.005	-0.011	-0.018	-0.024
30	0.011	0.005	-0.002	-0.008	-0.015
40	0.021	0.014	0.008	0.001	-0.005
50	0.030	0.024	0.017	0.011	0.004

발라스트 탱크 내부의 수위가 증가 할수록 자체 자중에 발라스트수의 자중이 추가되므로 케이슨은 더 큰 부력을 요한다. 가라앉은 면적만큼 부력이 증가하므로 어느 정도 가라앉으면 평형을 유지하게 된다. 수치계산결과 탱크내에 수위가 40cm 이상인 경우에는 부력 이외에도 다른 요인으로 인해 침몰될 가능성이 큰 것으로 나타났다. 따라서 케이슨이 부력과 자중의 평형을 이루어야 하며, 안정을 이루는 발라스트 탱크내의 홀수와 케이슨 자체의 홀수에 대한 상관관계를 수리모형실험으로 조사하고 이를 정리해보았다.

4.3 안정성 검토 실험

수조실험 Fig. 9 ~ Fig. 12를 통하여 아크릴 모형의 안정성을 검토하였다. 이는 실제 해양환경 조건을 연출하고자 평상시의 파랑의 분포인 6sec~12sec 및 항내파고 조건 1m를 적용하여 부력 및 균형 능력을 테스트하였다. 섹터케이슨은 원형 케이슨과 달리 비대칭구조이므로 각각의 발라스트 탱크에 물의 높이를 다르게 하여 균형을 맞추었다.

본 연구의 현 성과는 실물을 제작하기 위한 전단계로서 아크릴 모형을 제작하여 수조 실험을 마쳤다. 아크릴 모형은 발라스트 탱크의 조절로 쉽게 부유안정성을 확보할 수 있었으며, 아크릴 모형파일 및 수조내 벽체와의 거치시 실물과 같이 펌프장치를 부착할 수 없었으므로 누수에 따른 실험에 제약이 다소 있었으나 실제 현장적용을 위한 실험의 제작에서는 유압 및 특수고무 팩킹재를 통해 이점은 극복될 것으로 보며 이와 같은 사례는 원통형 건식케이슨 개발과정(이 등, 2006)에서도 확인한 바 있다.

5. 결 론

최근 수중구조물 유지 및 보수를 위한 건식환경을 제공하는 공법으로 원통형케이슨이 소개되어 직경 1.0m정도의 직항에 대해서 비말대 구간에서의 수중공사가 용이해졌다. 그러나 아직까지는 경사지게 설치된 사항, 거대직경의 강관 및 콘크리트 교각 직육면체 부재 등의 부식에 대해서는 대책이 없으므로 본 연구에서 좀 더 경제적이고 신속하며 안전한 시공방법

으로 현장적용이 가능한 건식 섹터케이슨을 제시하였다.

본 연구에서는 기존 장비가 요구하는 크기의 1/3 수준으로 설계되었으며, 섹터형의 이점을 활용하면 1/3 수준 이하의 크기로도 작업이 가능하다. 거대직경의 강관파일의 경우에 130° 이상의 각도로 3회에 걸쳐 나누어 유지·보수 작업을 수행하여 강관의 직경에 무관하게 적용 할 수 있도록 하고, 콘크리트 교각과 같은 넓은 폭을 가지는 구조물의 경우에는 1회의 장비 설치시 발생하는 과도한 설치비와 시간적인 손실을 최소화시키기 위해서 곡면부와 직선부를 섹터케이슨을 적용하여 장비 설치비용과 시간의 손실을 최소화 할 수 있도록 하였다.

또한 자력으로 해상에서 이동 가능하도록 부유 및 거치 안정성을 수압과 부력 계산을 통한 설계를 수리모형실험으로 확인하였다. 건식섹터케이슨은 테이프 공법, 플라스틱 보드 공법 등과 비교할 때 대형 구조물의 점검 및 수중보수를 위해서는 시공성, 경제성, 안정성 등 다양한 관점에서 유리한 것으로 분석되어 장래 그 활용성이 높아질 것으로 전망한다.

후 기

본 연구는 2006년도 산학연공동기술개발사업으로 이루어진 결과이며 이를 위해 지원해준 부산울산지방중소기업청 및 부산광역시에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] 이중우, 오동훈, 광승규, 김성태 (2006), “수중 항만구조물의 유지보수를 위한 건식케이슨 공법 개발”, 한국항해항만학회지, 제30권 제6호. p.447
- [2] 한국수자원공사 수자원 연구원 (2004), 수중구조물의 진단 및 보수보강 연구
- [3] Andersen, H. (1982), “Working chamber”, United Kingdom Patent, No. 2114636A
- [4] Cassiere, A. T. (1931), “Marine cage”, United States Patent, No. 1807962
- [5] PTI (1988), Port Technology International, No.7
- [6] Tate, S. H. (1991), “Work enclosure for servicing marine structures”, United States Patent, No. 4991996

원고접수일 : 2007년 4월 6일

원고채택일 : 2007년 6월 30일