

항만구조물 최적설계 시스템 Optimum Design System of Port Structures

이 상 호*
Lee, Sang-Ho

ABSTRACT

These days much efforts have made all over the world in order to develop the integrated optimum structural design system that performs automated design process composed of the analysis, optimum design, drafting, and reporting. However, these types of design systems oriented extensively to port structures are rarely found. In this paper, the integrated optimum design system applied to gravity type port structures such as quay walls and breakwaters will be briefly presented. Highly sophisticated facilities necessary in optimum structural design including analysis and optimization are integrated into one system. Several types of gravity type port structures can be designed using this system. The application to the real ports and the efficiency of this system will be finally shown.

1. 서론

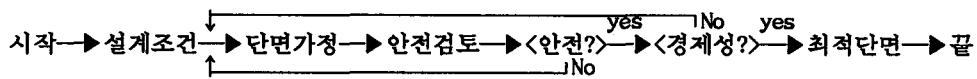
오늘날 전세계적으로 구조물의 설계시 안전성과 경제성을 동시에 고려하는 최적설계 개념을 도입하여 구조물의 기초 디자인 단계에서부터 구조해석, 최적설계, 도면제작, 보고서작성에 이르는 설계 전과정을 컴퓨터와 대화식으로 일괄 처리할 수 있는 통합 전산설계 시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 항만구조물은 그 규모가 매우 커서 적절한 설계가 되지 않으면 안전을 위주로한 과도한 설계로 공사비 낭비가 커질 우려가 높은 구조물이기 때문에 위와 같은 통합설계시스템을 도입하여 안전성과 경제성을 동시에 고려한 최적설계(Optimum Design)가 절실히 요구되고 있다. 그러나 우리나라의 항만구조물 설계 분야에서는 최근 몇 년 전부터 안전계산에 컴퓨터를 도입하기 시작하여 설계업무의 효율을 높이고 있으나, 아직 여러 형식의 항만구조물의 최적단면 결정에서부터 도면제작에까지 이르는 통합 구조설계 소프트웨어

* 해운항만청 개발국 건설과, 공학박사

어가 전무한 실정에 있다. 본고에서는 이와같은 통합전산설계시스템의 개발의 필요에 부응하여 방파제, 안벽, 호안 등 주요 중력식 항만구조물 설계에 이용될 수 있는 항만구조물 전산설계 시스템 PDS(Port Design System)에 대하여 소개하고자 한다.

2. 대화식 최적설계 시스템

구조물의 최적설계는 구조물이 외부 하중에 대하여 안전하여야 할 뿐아니라 경제적이여야 하므로 아래 그림과 같이 안전성과 경제성이 동시에 만족될 때까지 수많은 반복과정을 거쳐 설계가 완성되어진다.



PDS는 위와 같은 최적설계법을 도입하여 개발되었기 때문에 사용자는 설계조건만을 준비하여 입력하여 주면 그 이후의 모든 과정은 PDS에 의하여 이루어지게 된다.



이와같이 주어진 설계 조건에 따라 컴퓨터에 의하여 최적 설계결과가 나오면 설계자는 이를 검토하여 다시 설계조건들을 변경시켜 가면서 설계를 완성해 가게 되므로 PDS에서는 모든 시스템을 사용자와 대화형식(interactive)으로 구성하였다. 사용자는 중간 설계결과를 화면상에서 도형화하여 바로바로 확인하여 풀다운메뉴(Pull-down Menu)나 팝업윈도우(Pop-up window)를 이용하여 설계조건을 직접 화면상에서 입력하거나 수정을 할 수 있고 필요시 구조를 변경할 수 있는 등 구조물 설계에 필요한 자료입력기능, 모델링기능, 해석기능, 최적설계기능, 그래픽표시기능 등 모든 기능을 한 시스템내에서 모두 이용할 수 있는 방식으로 설계되어 설계효율을 극대화 할 수 있도록 하였다(그림 1). 특히, 구조형식별로 설계에 필요한 각종 설계제원이 시스템 내에 구축되어 있어 사용자는 화면의 표시에 따라 자료만 입력하거나 수정하면 된다. 따라서 사용자는 구조형식별 설계조건 입력방법만 숙지하면 설계에 경험이 없는 사람도 쉽게 설계업무를 수행할 수 있다.

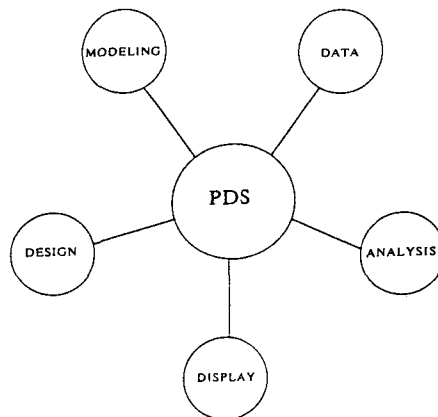


그림 1. PDS 구성도

3. 중력식 항만구조물의 안전검토

중력식 항만구조물은 외력에 대하여 주로 구조물의 자중에 의하여 저항하는 단순구조로서 본고에서는 항만구조물중 가장 대표적인 방파제 및 안벽에 한하여 기술코자한다. 중력식 방파제 및 안벽의 구조형식은 주로 구조물을 구성하고 있는 부재의 형식에 따라 분류되며 대표적인 구조형식으로는 블록식, 셀블록식, 소파블록식, 케이슨식 등이 있다 (그림 2). 이들 중력식 안벽 및 방파제는 구조형식은 크게 다르나 구조계산시 적용하는 구조개념은 동일하다. 즉, 구체는 각 형식 별로 자중 계산방법이 다르나 저항력이라는 관점에서는 형식에 관계없이 동일하며, 안벽과 방파제는 작용하는 하중의 형태는 다르지만 작용하는 힘의 관점에서는 전도 수평력이라는 점에서는 동일한 것으로 볼 수 있다. 따라서 안전검토는 구조물의 형식에 관계없이 동일한 방법으로 처리할 수 있다. 다음은 구조형식에 관계없이 안전검토시 고려하여야 하는 안벽 및 방파제에 작용하는 수평력과 수직력 중에서 주요한 것만 정리한 것이다.

작용력	안 벽	방 파 제
수평력	토압, 잔류수압, 계선주 수평력 야적장 상재하중	파 압
수직력	토압, 구체의 자중, 계선주 수직력 구체에 작용하는 소하중	파압의 수직성분(uplift-force) 구체의 자중

방파제나 안벽의 안전검토는 크게 구체의 활동 및 전도에 대한 안전검토, 기초마운드의 지지력에 대한 안전검토와 기초지반의 지내력에 대한 안전검토로 이루어 진다. 즉, 서로 다른 종류로 가해지는 수평하중에 대하여 중력에 의한 구조물의 자중 또는 안벽의 경우 뒷채움재료의 자중에 의한 수직력으로 전도와 활동에 저항할 수 있는 지를 검토하고, 기초마운드에 가해

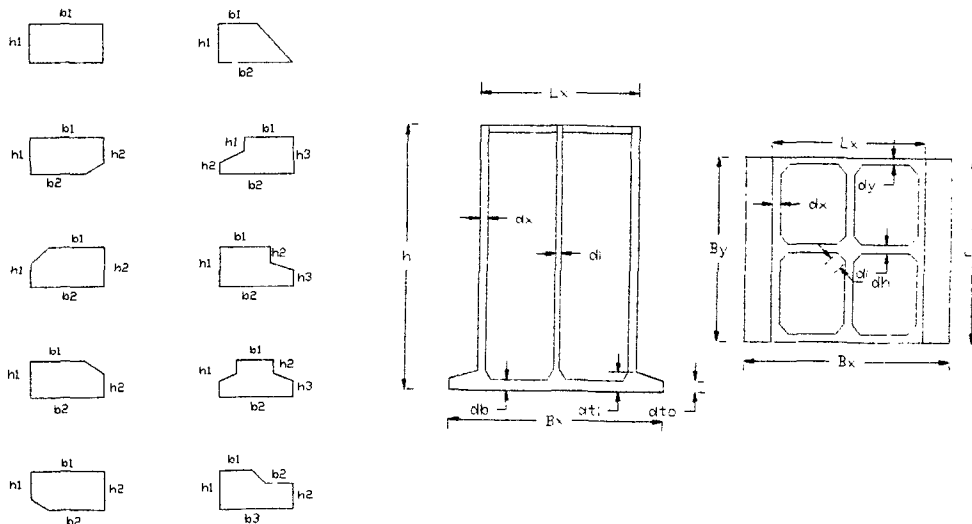


그림 2. 항만구조물에 이용되는 주요 블록 및 케이슨

지는 반력이 마운드 지내력에 대하여 안전한 지를 검토한다. 마지막으로 기초지반의 토질정수와 마운드의 크기에 따라 결정되어지는 지내력을 Terzaghi, Meyerhof, Hansen 등의 지내력 계산식을 이용하여 계산한 후 기초지반에 미치는 상부하중의 반력에 대하여 안전한 지를 검토한다. 이상과 같은 안전검토 이외에도 마운드의 직선활동에 대한 안전검토, 케이슨의 부유시 안정성 검토와 최소층수량 계산 등도 PDS에서 가능하다.

4. 최적단면자동설계

최적단면 자동설계란 주어진 설계조건하에서 컴퓨터에 의해 자동적으로 안전성과 경제성을 동시에 고려하여 최적단면을 만들어 내는 것으로, 이 부분이 PDS의 가장 핵심이 되는 부분이다. 위에서 설명한 것처럼 안전성과 경제성을 동시에 고려한 최적구조물을 설계하기 위해서는 많은 반복계산을 수행하여야 한다. PDS에서는 최적단면결정에 해석적인 방법과 반복법을 이용할 수 있다. 해석적 방법은 안전검토이론을 바탕으로 하여 반복계산을 하지않고도 직접 단면의 크기를 결정할 수 있는 계산식을 유도하여 사용하므로 계산시간축면에서는 우수하나 장방형 블록에 밖에 적용할 수 없는 단점이 있다. 반면에 반복법은 계산시간은 많이 소요되나 모든 블록에 대하여 적용할 수 있는 범용성을 가지고 있다.

최적단면 설계시 고려할 수 있는 설계 제한 조건으로는 Toe의 최소길이, 블록두께, 블록 또는 케이슨의 최대 허용중량, 마운드의 최소 및 최대 허용두께, 상치 콘크리트의 최소 허용폭 등을 들 수 있다.

최적설계단면 결정순서는 그림3 에서 볼 수 있는 바와 같이 먼저 주어진 설계 조건 및 설계제한조건을 가지고 표고 (Elevation)별로 활동에 대하여 안전한 단면을 계산하고, 이어서 전도에 대하여 안전한 지를 검토한다. 이때 안전하지 않으면 다시 안전단면을 계산하여 단면의 크기를 수정한다. 이와 같이 표고별로 모든 블록의 크기를 결정한 다음 기초 마운드에 미치는 반력을 계산하여 허용지내력 범위내에 들어가는 지를 검토한다. 검토 결과에 따라 허용범위를 벗어나는 경우, 모든 블록단면의 크기를 다시 조정하여야

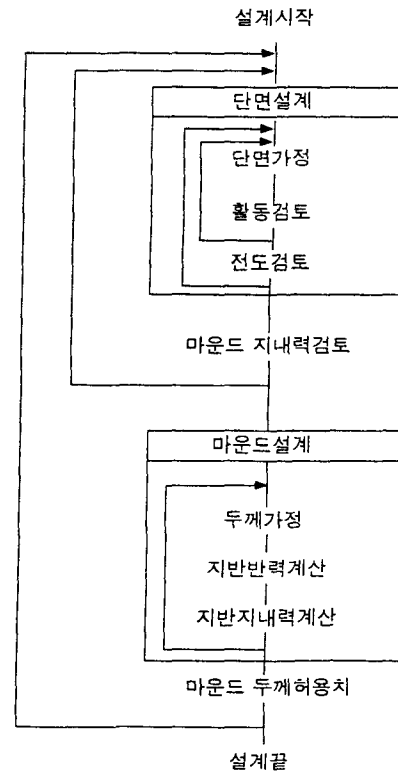


그림 3. 최적설계순서

한다. 마운드에 미치는 반력이 허용범위 내에 들어 올 때까지 위의 전과정을 되풀이 해서 반복하여야 한다. 특별한 경우로서 블록식 안벽의 경우 위 과정을 모든 블록에 대하여 반복 수행하지 않고 블록재료인 콘크리이트에 비하여 안벽 뒷채움재료인 사석이 더 저렴하다는 경제적인 측면과 구조적으로 하단블록에 미치는 저항력을 크게 증가 시킬 수 있다는 구조적인 측면을 고려하여 최하단의 두개의 블록의 길이만을 조정하여 상부 블록의 콘크리이트의 양을 증가시키지 않고 뒷채움재료의 양을 증가시키도록 하여 계산시간을 크게 단축하였다. 경우에 따라서는(보통 소규모부두) 이와 같은 방법이 비경제적일 수가 있으므로 사용자가 재계산의 대상이 되는 블록의 수를 지정할 수도 있도록 하였다.

이상과 같은 계산과정을 거쳐서 모든 블록의 최적단면이 결정되면 다음에는 기초지반 지내력에 대한 안전검토를 수행한다. 먼저 전체 구조물이 마운드에 미치는 반력을 계산한 다음 마운드 두께를 계산하기 위하여 기초지반의 허용지내력을 계산한다. 그러나 이 경우, 기초지반 허용지내력은 마운드 두께의 함수이기 때문에 마운드 두께를 직접 찾아낼 수 있는 계산식은 구할 수가 없고 반복법에 의하여 수치해를 구하여야 한다. 위에서 계산된 기초지반에 미치는 반력이 허용지내력을 초과하거나 마운드 두께가 최대 허용 두께보다 클 경우에는 위의 전과정을 다시 반복하여 허용범위 안으로 들어올 때까지 안전단면을 재계산하여야 한다. 반면에 위의 조건이 만족될 때는 반복계산을 마친다. 이상의 모든 안전검토과정을 거쳐 결정된 최종 단면이 대부분의 경우 최적 단면이 된다.

그러나, 여기서 중요한 것은 위에서 얻어진 단면은 사용자가 제공한 설계조건 및 설계제한조건을 모두 만족하는 경제적인 단면이므로 설계 제한조건을 변경할 경우 또 다른 단면이 만들어 질 수 있다는 것이다. 흔히 컴퓨터에 의하여 최적하게 만들어진 단면이 가장 좋은 것으로 생각하는 경우가 많은데 이것은 컴퓨터 스스로에 의해서만 결정되는 것이 아니고 설계자의 창의적인 설계개념에 따라 최적의 단면이 설계되는 것이고 컴퓨터는 설계자의 설계개념을 실현화시키는 데 필요한 많은 시간이 소요되는 수많은 반복계산과 설계과정을 빠르게 처리해주는 것이다.

따라서 PDS에서는 설계자가 설계를 시작해서 완성단계에 이르는 과정에서 컴퓨터를 최대한 활용하여 대화식으로 쉽게 최적설계를 유도할 수 있는 기본 도구가 될 수 있도록 각종 기능을 설계하였다.

5. 그래픽 설계시스템

PDS는 설계과정에서 사용자가 모든 과정을 화면상에서 직접 보면서 컴퓨터와 대화식으로 설계업무를 처리할 수 있도록 설계되어 있다. 특히, GUI기능이 뛰어난 PC용 MS-Windows 운영체제하에서 작동되므로 그 사용이 매우 쉬우며 개방형 운영체제에서 지원하는 모든 주변 장치를 이용할 수 있어 종래에 특정 주변기기에 의존하여 사용에 많은 제약성이 있었던 문제점이 완전히 해결되었다. 특히, 구조물의 설계는 설계과정에서 중간 설계내용을 직접 눈으로 확인

하는 것이 전체 설계내용을 파악하는 데에 무엇보다도 중요하며 동시에 안전계산의 결과를 수시로 보아 가면서 설계를 수행할 수 있어야 한다. 이러한 필요에 부응하여 PDS에는 구조물 표시 전용 그래픽 윈도우, 안전계산 결과 표시 전용 텍스트 윈도우, 설계조건 등 자료 입출력 전용 윈도우, 메뉴선택 윈도우와 같은 다중화면(Multi-Windows)기능을 가지고 있어 매우 효과적으로 설계업무를 수행할 수 있다. 구조물 표시 전용 그래픽 윈도우는 구조물 전체를 표시하고, 하늘, 해면, 블록, 케이슨, 마운드, 기초, 매립지역 등을 서로 다른 색으로 구분하여 표시하는 기능이 있어 사용자가 현실감있게 설계작업을 할 수 있으며, 외력(토압, 잔류수압, 파압 등)과 지반반력(마운드에 미치는 반력, 기초지반에 미치는 반력 등)을 수치와 함께 그래픽으로 표시하는 기능을 가지고 있다. 또한 3차원 그래픽 기능으로서 투시도, Isometric view, Dimetric view, 각종 평면도 표시 및 애니메이션 기능도 가지고 있다.

화면상에서 설계완료된 구조물의 도면은 레이저 프린터, 자동제도기 등으로 출력을 할 수 있고 화면에서와는 달리 해상도가 훨씬 좋은 상태로 각종 치수 및 도형이 도면으로 출력된다. 자동제도기를 사용하면 여러 색으로도 출력이 가능하며 큰 도면으로 출력이 가능하다. 따라서 종래에 수작업으로 설계할 경우 안전계산 이외에도 도면제작에 많은 시간이 소요되던 문제점을 완전히 해결할 수 있다.

한편으로, 안전계산결과 표시 전용 윈도우에는 블록 또는 케이슨의 단면규격 및 중량, 표고(Elevation)별로 외부하중 종류별로 구분하여 전도력 및 저항력, 전도모멘트 및 저항모멘트, 표고별 활동 및 전도에 대한 안전율표시, 안전 또는 불안전에 대한 판단기능, 기초마운드에서 지내력에 대한 안전율, 최대 및 최소 반력, 전합력의 편심량, 반력의 작용폭, 마운드의 두께 및 면적 표시기능, 기초지반에서 지내력에 대한 안전율, 최대 및 최소 반력, 반력의 작용폭의 표시기능 등을 가지고 있다. 또한, 최종설계단면에 대한 각종 설계조건 및 안전계산 결과를 프린터를 통하여 출력할 수도 있다.

6. 적용사례

PDS는 많은 검증을 걸쳐 실제 설계에 이용되고 있다. 안전하고 동시에 경제적인 설계로 많은 공사비 절감효과를 거두고 있을 뿐만아니라 설계를 신속하게 처리할 수 있어 인력 및 시간 절감에 있어서 그 효과가 상당히 크다고 할 수 있겠다. 여기에서는 기존안벽의 설계단면을 동일한 조건하에서 PDS로 설계한 단면과 비교하여 보기로 한다.

o 설계조건

- 대상선박 : 5,000DWT

- 조위조건

H.W.L. = 6.640m, M.S.L. = 3.623m, L.W.L. = 0.0m, R.W.L. = 2.213m

- 해수단위중량 : 1.03ton/m³

- 콘크리트
공기중 단위중량 : 2.3ton/m³, 수중 단위중량 : 1.3ton/m³
- 뒷채움사석
공기중 단위중량 : 1.8ton/m³, 수중 단위중량 : 1.0ton/m³
내부마찰각 : 40도, 벽면마찰각 : 15도
- 마운드 허용지내력 : 50ton/m²
- 야적장 경사 : 2%, 상재하중 : 2ton/m²
- 계선주 : 50ton (2.5ton /m)
- 안전율 활동 : 1.2, 전도 : 1.2
- 천단고 : 8.0m, 소요수심 : 7.5m
- o 설계단면비교

구 분	기 존 설 계			PDS이용 최적설계		
1m당 소요 콘크리트	92.55m ³			73.36m ³		
블록단면 (m)	EL+6.0 +4.0 +2.0 0.0 -2.0 -4.0 -6.0 -8.1	3.5 x 2 4.0 x 2 4.5 x 2 5.0 x 2 5.5 x 2 7.0 x 2 4.5 x 2, 4.5 x 2 8.0 x 2.1		EL+5.9 +3.9 +1.7 -0.1 -2.1 -4.1 -6.1 -8.1	2.5 x 2.1 2.5 x 2 2.5 x 2 3.1 x 2 4.0 x 2 4.9 x 2 7.3 x 2 7.3 x 2	
안전율	표 고	활 동	전 도	표 고	활 동	전 도
	EL+6.0 +4.0 +2.0 0.0 -2.0 -4.0 -6.0 -8.1	1.75 2.54 2.65 2.08 1.71 1.74 1.89 2.01	3.38 3.94 3.81 3.12 2.53 2.76 2.21 3.00	EL+5.9 +3.9 +1.7 -0.1 -2.1 -4.1 -6.1 -8.1	1.22 1.58 1.49 1.28 1.21 1.21 1.51 1.64	1.76 1.62 1.27 1.24 1.32 1.37 2.13 2.11
마운드 (ton/m ²)	최대반력 35.66 최소반력 20.68			최대반력 49.43 최소반력 0.84		

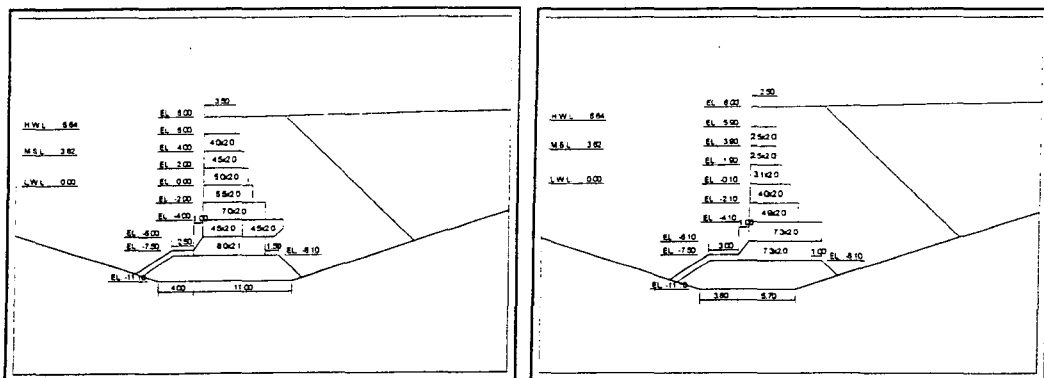


그림 4. 기존설계(좌) 와 PDS설계(우)단면 비교

위 표에서 보는 바와 같이 PDS로 설계된 단면에서는 1m당 블록제작에 소요되는 콘크리트 양이 기존설계보다 약 20m³ 적게 소요되고, 최대 블록길이가 0.8m작아서 뒷채움 사석량이 줄어들게 되어 기존 설계에 비해 크게 경제적인 설계가 되었다. 구조적인 측면에서도 기존설계 단면에서 EL. (-)6.0m에 2개의 블록이 설치되도록 되어있는 것에 비하여 PDS 설계단면은 하나의 블록을 설치하므로써 구조적으로 보다 안전한 설계가 되어졌다고 볼 수 있다 (그림 4). 한편으로 설계에 소요되는 시간도 불과 PC로 10초정도 밖에 소요되지 않고 도면제작도 동시에 이루어지므로 설계비용을 크게 줄일 수 있는 효과가 있다.

7. 결론

PDS는 많은 검증을 걸쳐 실제 설계에 이용이 되고 있다. 안전하고 동시에 경제적인 설계로 많은 공사비 절감효과를 거두고 있을 뿐아니라 설계를 신속하게 처리할 수 있어 인력 및 시간 절감에 있어서 그 효과가 상당히 크다고 할 수 있겠다. 현재까지 중력식 구조물을 대상으로하여 안벽 및 방파제의 안전검토, 블록식 및 케이슨식 안벽의 최적설계, 케이슨식 방파제 최적설계 등과 구조물의 모델링에 필요한 그래픽 CAD기능을 개발하여 사용한 결과 그 효과가 기대 이상으로 크게 나타나고 있어, 앞으로도 계속해서 3차원 구조물 설계 및 배치계획, 원호활동 안전검토, 잔교식 안벽 등 보다 복잡한 항만 구조물 설계를 단계적으로 이 시스템에 통합할 계획이다.

참고문헌

1. 이 상호, 항만구조물 전산 설계시스템, 항만 Vol.17/2, 한국항만협회, 1993.6
2. 이 상호, 항만구조물 전산 설계시스템, '94정기학술강연회 초록집
한국해안. 해양공학회, 1994
3. 항만시설물설계기준서, 해운항만청, 1993