

취수 갑문 설계 자동화 개발

이후광*, 최재승*, 황석환*

Development of the Automatic Design System for Hydraulic Gate

Hoo-Gwang Lee*, Jae-Seung Choi* and Suk-Hwan Hwang*

ABSTRACT

An automatic design system for a hydraulic gate has been developed to cut down the time for the design calculation and to optimize its design. It is oriented to the radial gate which is the simplest, most reliable, least expensive and most widely used hydraulic gate. This system is composed of data input, strength computation and result display modules with databases of the properties of components and materials. In this development, the existing intricate design procedure has been changed to the straightforward procedure without assumption of weight. With this code, the design time of the radial gate could be reduced below one thirtieth in comparison with manual work and the optimum design could be accomplished easily.

Key Words : Hydraulic gate (취수 갑문), Radial gate (회전식 갑문), Optimum design (최적 설계), Automatic design system (자동 설계 시스템)

1. 서론

전 세계적으로 수자원의 고갈이 중요한 문제로 대두될 뿐만 아니라, 산업 기반 조성 및 유지에 있어서도 수자원 개발은 세계 각국의 중요한 문제로 인식되고 있으며, 우리나라 또한 수력, 화력, 원자력 발전소 및 다목적 댐, 하구언, 폐수 처리장 등 이미 활발한 수자원 개발이 추진되고 있다. 취수 갑문(hydraulic gate)은 이러한 수자원 개발에 필수적으로 공급되는 장치이다. 특히, 취수 갑문 중에서도 회전식 갑문(radial gate)은 구조의 단순성, 경제성, 신뢰성 및 방류 특성이 뛰어나 가장 널리 활용되고 있다. 회전식 갑문은 댐의 상층부에 설치되어 홍수 시 수위조절을 담당하거나 댐의 내부나 하류면에 설치되어 방류관의 역할을 수

행하는 중요한 장치로 많은 제작이 이루어지고 있다. 이와 관련된 연구도 활발하여 진동 특성에 대한 연구⁽¹⁾, 방류 성능을 향상시키는 연구⁽²⁾ 등이 수행되어왔다. 또한, 최근에는 지지점의 반력과 모멘트를 중량과 연관시키는 기초적인 중량 최적화 연구⁽³⁾가 수행되었다. 그러나, 이러한 시설의 제작, 공급의 측면에서 보다 중요하게 여겨지는 사항은 설계 최적화와 신속한 설계 계산서 작성이다. 이는 제작 업체의 경쟁력과 관련된 중요한 요소이지만 뚜렷한 연구 성과는 없는 상황이다. 현재 일반적인 갑문 제작 업체의 설계 및 제작 과정에서 설계 계산서의 작성은 기존의 설계 절차를 따라 한 명의 엔지니어가 수 계산으로 반복적인 시행착오를 거쳐 설계 계산서를 완성하는 전통적인 방법을 사용하고 있다. 따라서, 계산서의 작성에 많은 시

간이 소요되고 설계 오류 발생 소지가 많으며 설계자의 경험에 따라 산출 물량의 차이가 크게 나타나기도 한다.

이러한 문제점의 해결을 위하여는 복잡한 기존의 설계 절차에 대한 개선이 필요하며, 컴퓨터를 활용한 자동화 시스템을 구축하는 방법이 가장 타당하다. 이에 본 연구는 기존 회전식 갑문의 설계 절차를 분석 및 개선하고, 세부 계산을 자동으로 처리할 수 있는 설계 시스템을 개발하여 현장에서 활용할 수 있도록 하였다.

2. 시스템 개발 전략

2.1 표준화

자동 계산 시스템 제작을 추진하기 위하여 우선적으로 요청되는 것은 대상물에 대한 표준화이다. 취수 갑문에는 다양한 종류의 갑문이 존재하며 회전식 갑문에서도 주 보와 보조 보의 배치 형태에 따라서 다양한 종류가 있다. 각각의 갑문에 대한 구조 분석 계산식이 다르게 구성되므로 자동 계산 시스템의 제작을 위해서는 대상을 선정하여야 된다. 따라서, 본 개발 작업에서는 설계 부서와의 협의를 통하여 다양한 형태의 회전식 갑문 중에서 제작 실적을 기준으로 하여 당사 표준 회전식 갑문 형식을 결정하였고 그 형상은 Fig.1 과 같다.

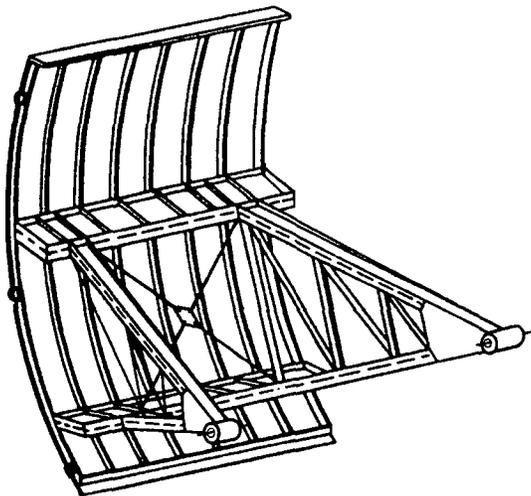


Fig. 1 Schematic diagram of radial gate

2.2 설계 절차의 분석 및 개선

다음으로 기존의 작업 절차를 분석하여 그 설계 절차를 개선하였다. 현업 설계자가 참고하여 왔던 기존의 설계 계산서 작성 절차⁽⁴⁻⁶⁾는 Fig.2 에서 보는 바와 같다. 설계 수압의 계산을 마친 후 각 부재별로 반력, 전단력과 응력을 계산한다. 각 부재별 계산식은 계산 결과와 변수들이 얽혀 있으며 갑문의 자중을 필요로 하고 있다. 계산의 복잡성으로 인하여 전체 부재에 대한 고려가 곤란하므로 개별 부재에 대하여 독립적으로 힘과 응력을 계산한다. 이 때 개별 부재에 대한 구조 계산을 독립적으로 수행하므로 전체 갑문의 자중은 각 단계에서 파악할 수 없다. 따라서, 최초 단계에서 전체 자중을 가정하여 계산에 이용할 수 밖에 없다. 각 개별 부재에 대한 구조 계산을 마친 후, 가정한 자중과 계산된 부재의 합을 비교 검토하여 그 오차를 줄이는 방향으로 자중의 가정부터 반복 계산하는 시행착오를 거치게 된다. 설계자는 시간적 제한이 있으므로 이러한 시행착오를 3 회 정도 수행하여 구조를 결정하고, 가정된 자중을 의식하여 다양한 부재 선택의 기회에 제한을 받아 최적 설계가 불가능하다.

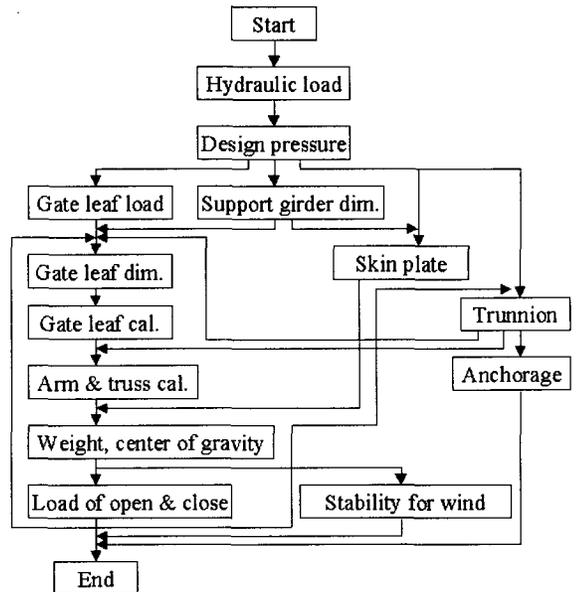


Fig. 2 Conventional design procedure of radial gate

기존의 설계 절차에서 개별 부재의 계산식 간의 관련성을 검토하면 변수와 중간 결과들을 공유함을 발견할 수 있다. 따라서, 자동 계산 시스템의 활용을 전제로 각 부재에 적용되는 계산식들을 공유 변수와 중간 결과들에 대하여 정리하면 복잡하지만 연관성을 갖는 순차적인 수식들로 정리할 수 있으며, 코드에서 하나의 단위 절차로 구성이 가능하다. 이 과정에서 수 계산에 적합하게 작도법을 활용한 트러스(truss) 구조 계산 방법을 좌표계를 이용하는 수식으로 정리하고, 라멘(rahmen) 구조 계산식을 코드로 작성할 필요가 있다⁽⁷⁾. 또한 힘과 응력의 계산 전 단계에 부재의 길이와 단면을 이용하여 자중을 계산하는 방법을 적용하면 설계 계산 절차는 Fig.3 와 같이 단순화 될 수 있다. 따라서, 설계자는 다양한 부재의 선정과 치수의 변경을 통하여 최적 설계를 할 수 있다.

2.3 사용자 편의 환경 구축

자동 계산 시스템은 현업 작업자의 작업 능력 향상과 결과 검토의 용이성을 증진할 수 있도록 사용자 편의 환경으로 제작하며, 이를 위한 개발 도구로 MS Visual Basic 6.0 을 채택하고⁽⁸⁾ 부재와 재질에 대한 정보를 MS Access 를 이용한 데이터베이스로 정리하여 반복적인 작업의 효율성을 늘릴 수 있다.

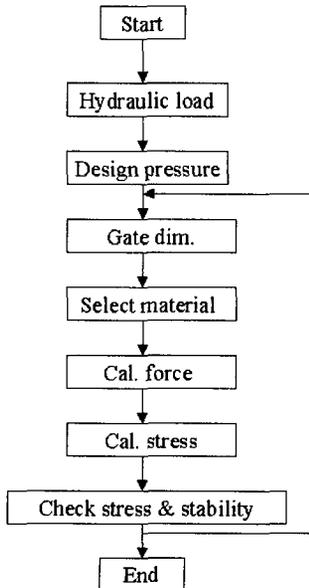


Fig. 3 Proposed design procedure of radial gate

3. 시스템의 구성 및 기능

본 시스템은 주 수행 화면에서 설계 조건 입력 단계, 부재 선정 및 응력 계산 단계, 그리고 계산 결과 표시 단계를 순서대로 선택할 수 있도록 구성되어 있으며, 부속된 데이터베이스를 갖추고 있다. 주 수행 화면은 Fig.4 와 같으며 설계 절차를 도식적으로 표현한 명령 버튼들로 구성하였다. 버튼의 순서와 화살표를 따라 설계 계산을 진행하며, 화살표의 반복 구간은 최적 설계를 위한 계산 및 결과 확인 구간이다.

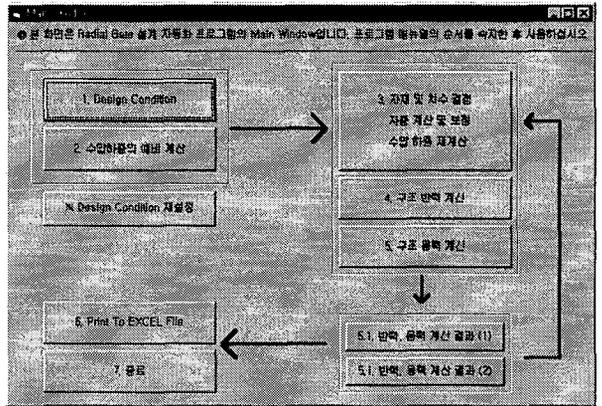


Fig. 4 Main window of the design program

3.1 설계 조건 입력 단계

설계 조건 입력 단계(Fig.5)에서는 갑문의 설치 환경과 규모 등에 대한 기본적인 설계 조건들을 입력하고 설계 수압을 계산한다. 설계 조건에서는 갑문의 설치 환경과 부대 시설에 따라 과도 수위(surge water level)와 동결기 수면 동결 하중(ice load)이 선택적으로 포함될 수 있고 그에 따른 구조 계산식을 별도로 포함하였다. 또한, 과거의 제작 실적을 조사하여 만들어진 갑문의 규모와 중량의 관계식을 포함하여 사용자가 설계하는 갑문의 규모를 미리 짐작할 수 있도록 하였다. 설계 조건의 입력이 끝나면 정상 수위, 과도 수위 및 설계 홍수위 등의 조건과 지진 여부에 대한 수압을 계산하고 최대 수압을 선정하여 이를 설계 수압으로 결정한다.

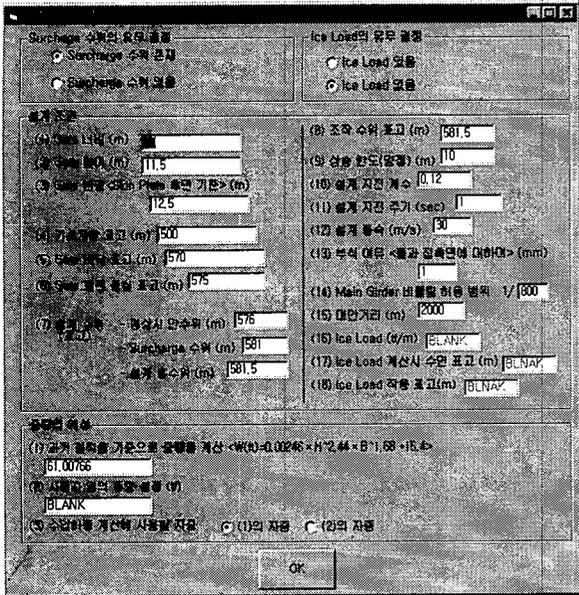


Fig. 5 Design condition input window

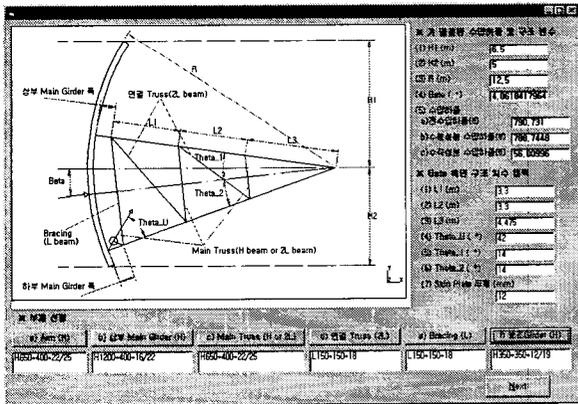


Fig. 6 Structural data input window

3.2 부재 선정 및 응력 계산 단계

본 단계에서는 갑판 각 부분의 치수와 사용 부재를 결정하고 반력, 전단력 및 각종 응력을 계산한다. 치수 입력과 부재의 선정은 사용자의 혼란을 방지하기 위하여 측면도, 평면도 및 각 부분 개념도를 화면에 포함하였고, 필요한 치수를 변수로 입력할 수 있는 환경을 구성하였다. Fig.6은 측

면도를 포함한 데이터 입력 화면이다. 각 부분에서 사용할 수 있는 부재의 종류는 표준화 단계에서 사용 빈도에 따라 제한하여 데이터베이스를 작성하였다. MS Access 로 작성된 부재 데이터베이스는 해당 부재의 성능 계산에 필요한 변수와 계산식을 포함하고 있으며 수정과 침삭이 가능하다.

구조의 치수와 부재가 결정되면 재질 데이터베이스를 이용하여 부재의 재질을 결정한다. 재질 데이터베이스는 Table 1 의 예와 같이 환경, 하중 조건, 크기 등에 따라 다른 허용 응력을 적용할 필요성이 있기 때문에 작성되었다. 재질 데이터베이스 사용 화면은 Fig.7 에서와 같이 필요한 변수와 계산식을 내포하며 신규 재질의 등록에 요구되는 수식을 화면에 포함시켰다.

Table 1 Allowable stresses of SS41 structural steel

	thck.≤ 40mm	> 40mm
Axial tensile stress	1200	
Axial compressive stress	(for gross sectional area) $l/r \leq 20$; 1200 $20 < l/r \leq 93$; $1200 - 7.5(l/r - 15)$ $93 < l/r$; $1000000/[6700+(l/r)^2]$ (for compressive splice plate) 1200	
l : buckling length r : radius of gyration of area		
Bending stress	(for girder's tensile side) 1200 (for girder's compressive side) where, $K < 2 \rightarrow K = 2$ A_w : area of web plate A_c : area of compressive flange l : distance between fixed points of compressive flange b : width of compressive flange	$\times 0.92$
Shearing stress	700	

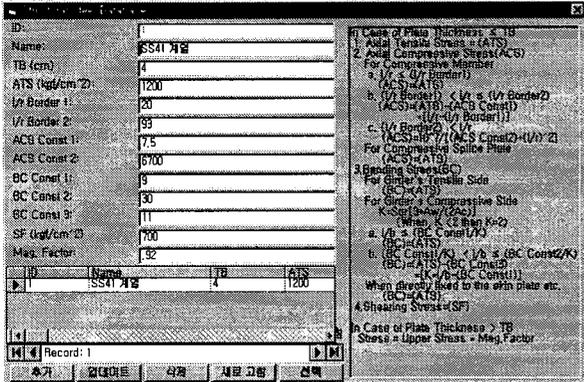


Fig. 7 Material database window

구조에 대한 자료 입력이 완료되면 선정된 부재의 단면과 길이를 이용하여 자중을 계산하고, 개선된 설계 절차에서 정립된 전체 구조 계산식을 순차적으로 거쳐 각 부재의 힘과 응력 성분을 계산한다.

3.3 계산 결과 표시 단계

계산 결과는 각 부분별, 성분별로 변수에 저장되며 총 7 개의 화면에 걸쳐서 상세하게 표시된다. Fig.8 은 계산 결과 화면의 하나로 상부 구조물에 대한 반력, 전단력, 모멘트 및 발생 응력과 허용 응력을 보여주고 있다. 발생 응력과 허용 응력의 비교를 통하여 설계자는 특정 위치의 응력 과부족 상태를 파악할 수 있으며, 치수와 부재 부분적인 변경과 계산을 반복 수행함으로써 최적의 설계 조건을 구할 수 있다. 코드에서 조건문과 반복 계산 명령문을 이용하여 최적 설계 조건을 자동으로 획득하는 방법도 고려할 수 있으나 400 개 이상의 상관 변수에 대한 최적화 절차 개발에 어려움이 있다. 또한, 제작 현장의 제약 조건이 설계에 영향을 미쳐 설계자의 현장 경험에 따른 대처가 필요한 경우에는 설계자의 의도를 충분히 발휘할 수 있는 이와 같은 시스템이 적합하다.

반복적인 계산을 수행하여 최적의 설계 조건을 구성한 후에는 설계 계산서의 작성이 필요하다. 설계 계산서에는 절차에 따라 입력 데이터와 각종 계수, 계산 결과를 포함하여야 한다. 본 개발 시스템은 필요한 모든 데이터를 파일로 출력할 수 있도록 하여 미리 작성된 보고서 품과의 연결을 통하여 설계 계산서의 작성 시간도 단축할 수 있다

록 하였다.

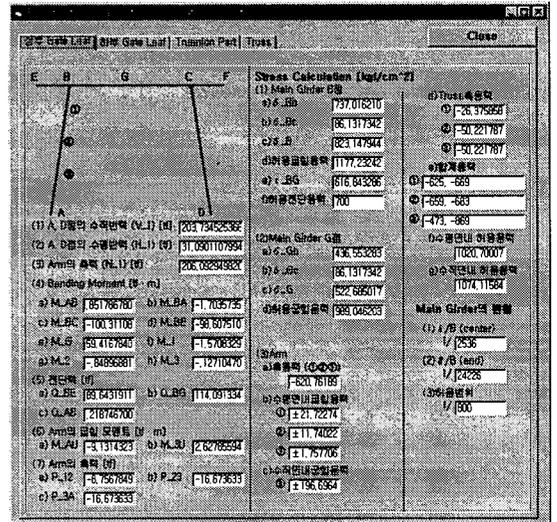


Fig. 8 Calculation results of upper gate leaf

Table 2 Comparison of material specifications between conventional and optimized gate

	Conventional gate	Optimized gate
Arm	H650×400×22/25	H650×400×18/22
Upper main girder	H1200×400×16/22	H1200×400×15/19
Lower main girder	BOX 1200×400×19×32	BOX 1200×400×16×25
Vertical support girder	H350×350×12/19	H350×350×12/18
Arm main bracing	H650×400×22/25	L150×150×18
Arm bracing	L150×150×10	L150×150×10
Gate weight	65 ton	56.4 ton

4. 효과 검증

개발 시스템의 계산 결과에 대한 검증은 기 제작된 제품의 설계 계산서를 적용하여 동일 입력 내용에 대한 출력을 비교하여 확인하였다. 또한, 기 제작 설계 계산서에 대하여 본 개발 시스템을 이용한 결과 Table 2 에서 보는 바와 같이 부재의 변경으로 13%의 물량 절감 효과를 거두었다. 그리고, 설계 계산서의 작성에 투입되는 시간은 현업 부서에서의 적용 결과 기존 투입 시간의 1/30 로 단축되는 것으로 나타났다.

5. 결론

당사 표준형 회전식 갑문의 설계 계산서 작성 소요 시간을 획기적으로 단축하고 최적 설계를 가능하도록 하는 설계 시스템을 개발하였다. 또한, 기 제작된 제품에 대하여 개발 시스템을 적용하여 계산 결과의 유효성을 검증하였고, 최적화 및 소요 시간 단축의 효과를 검증하였다.

참고문헌

1. Shi-Wu Yan, "Dynamic Characteristics of Tainter Gates and Their Optimization," Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 11, pp. 3261~3273, 1991.
2. D. Golliard and S. Chevalier, "An Innovative Solution to a Safety Problem at Montsalvens Dam," Hydropower & Dams, Issue 2, pp. 63~65, 1998.
3. 권영두, 권순범, 구남서, 진승보, "회전식 수문의 중량 최소화에 대한 지지점 위치의 최적 설계," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 492~497, 2000.
4. Technical Standards for Gates and Penstocks, Hydraulic Gate and Penstock Association Japan, 1976.
5. 강제설비설계기준, 산업기자기개발공사 발전부, 1987.
6. 水門鐵管技術基準 第 4 改正版, 日本 水門鐵管協會, 1998.
7. 이성태, 윤태진, 원영수, 박주호, 신제구조역학, 이우출판사, 1988.

8. Mastering Microsoft Visual Basic 6 Development, Microsoft, 1998.