

DAM 水門의 最適設計에 關한 考察

최상훈* · 한응교** · 양인홍***

(1991년 6월 4일 접수)

A Study on the Optimal Design of the Gate Leaf of a Dam

S. H. Choi, E. K. Han and I. H. Yang

Key Words : Gate Leaf(수문 본체), Optimal Design(최적 설계), Stress Analysis(응력 해석), Skin Plate(스킨 평판), Stress Diagram(응력 선도)

Abstract

The design theory of roller gate has been systematized laying more emphasis on practical formulas than theoretical ones and the design procedure of the existing gate facilities is reviewed and analyzed on economical viewpoint and safety factor. The design theory of Timoshenko, the technical standards for hydraulic gate and penstock of Japan, and the design standards for waterworks structures of Germany are applied to the study of optimal design of a gate leaf.

In this study, gate leaf which is now being operated for water control at the seadike, estuary dam and reservoir dam are adopted as a model, and a new design method by the computer is proposed through the variation of design elements within practical ranges.

As a result, safety factor and economical design can be made by using T-beams to the horizontal and vertical beam of the gate leaf instead of H-beams used in the existing seadike roller gate at Asan, and total weight of gate leaf is reduced by the present optimization.

* 정회원, 건국대학교 공과대학 기계설계학과

** 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계과

*** 정회원, 건국대학교 대학원 기계공학과

Nomenclature

- HHWL ; High high water level
- AHHWL ; Approximate high high water level
- FWL ; Full water level
- NWL ; Normal water level
- DWL ; Dead water level
- H₁ ; Height of HHWL
- H₄ ; Height of FWL
- H₅ ; Height of gate
- H₆ ; Height of NWL
- P₁ ; Wate pressure of normal loading
- P₂ ; Wate pressure of special loading
- P₃ ; Wate pressure of exceptional loading
- P₄ ; Wate pressure of operating loading
- a ; Short span
- b ; Long span
- B ; Clear height
- K ; Timoshenko constant
- L_c ; Clear span
- L_s ; Supporting span
- r ; Specific weight of sea water
- p ; Pressure
- h₁ ; (H₁ - H₅)
- h₂ ; Height of AHHWL.
- σ ; Bending stress
- t ; Thickness

1. 緒 論

最近 우리나라에서 水門은 水資源 利用을 效果的으로 하기 위하여 多目的 dam, 貯水地, 河口堰, 防潮堤에서 使用되고 있고 水門扉는 發電用, 治水用 댐(dam)이나 河口堰(Estuary barrage), 防潮堤, 上下水 處理場 등의 水路에 設置되어 流量調節用으로 使用되고 있으며, 水門의 形式에는 크게 4가지로 分類될 수 있는데 roller gate形式, hinge gate形式, slide gate形式, 기타형식 등이 있다. 그리고 모든 수문은 各各 水門本體(gate leaf), 案内

裝置(guide frame), 開閉裝置(hoisting unit)로 構成되어있다.

水門本體의 設計理論은 日本 水門 鐵管 技術 基準"을 中心으로 해서 Timoshenko의 設計理論을 導入, 應用하여 體系化했다. 上記의 水門 鐵管 技術 基準은 아직까지도 동남아시아 產業界의 좋은 指針書가 되고 있고, 우리나라에서도 dam, 河口堰, 防潮堤의 gate를 設計 施工할때에 日本書籍이나 외국 技術 제휴선에서 단편적으로 제공된 자료를 기준으로 事業施行을 하고 있다. 따라서 dam, 河口堰, 防潮堤 등에서 水位調節및 貯水用으로 使用되고 있는 roller gate를 모델로 채택하여 gate구조인 水門本體의 構造物에 對해 最適設計를 考察하였다.

2. 設計理論

2.1 設計에 필요한 基礎理論

Roller gate는 水門本體, 案内裝置, 開閉裝置로 構成되어 있고 roller wheel이 案内裝置 사이를 수직으로 上下運動 및 水壓을 유지하면서 水門의 開閉를 하며 設計條件은 바다측의 最高 設計首位인 高극조위(HHWL)에 도달하고 강측의 最低設計水位인 사수위(D. W. L)로 되었을 때가 最惡設計條件이므로 이때 水門에 作用하는 압력을 最大設計 水壓으로 計算한다.

작용하는 hydraulic load에는 4가지 수위조건의 이론식을 사용하였다.

(1) 정규부하상태



Fig. 1 Normal loading case

$$P_1 = \frac{L_s r (H_1^2 - h_1^2)}{2} \dots\dots\dots (2-1)$$

(2) 특수부하상태

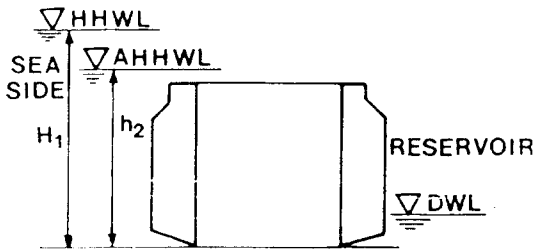


Fig. 2. Special loading case

$$P_2 = \frac{r L_s H_1^2 - (H_1 - h_2)^2}{2} \dots\dots\dots (2-2)$$

(3) 예외적인 부하상태

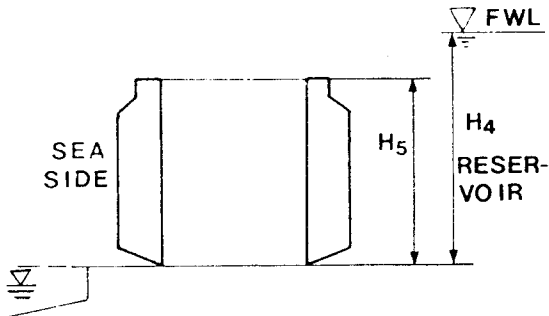


Fig. 3 Exceptional loading case

$$P_3 = \frac{r L_s (H_4^2 - H_5^2)}{2} \dots\dots\dots (2-3)$$

(4) 작동부하상태

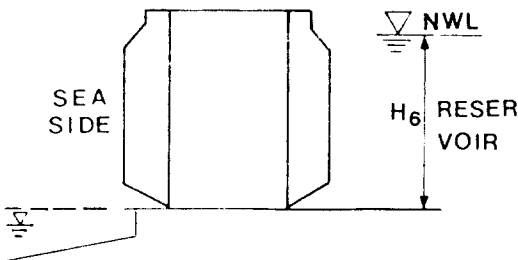


Fig. 4 Operating loading case

$$P_4 = \frac{r L_s H_6^2}{2} \dots\dots\dots (2-4)$$

여기서 L_s 와 r 은 각각 Supporting span과 Specific weight를 나타낸다.

2.2 SKIN 평판의 응력

(1) 水壓作用荷重

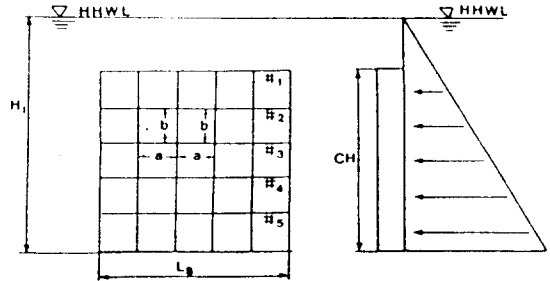


Fig. 5 Hydraulic loading of skin plate

Skin 평판의 가로방향의 폭을 a , 세로방향의 폭을 b , 굽힘응력을 σ 라 하고 Timoshenko 이론을 적용하면 아래와 같다.

$$\sigma = \frac{6Ka^2p}{t^2} \dots\dots\dots (2-5)$$

여기서 K 는 Timoshenko 상수, t 는 두께이다. 그리고 Fig. 6은 Skin 평판의 응력선도²⁾이고 Timoshenko 상수 K 는 균일 하중이 작용하는데 따른 굽힘 모멘트의 계수 값들이며 Table 1과 같다.

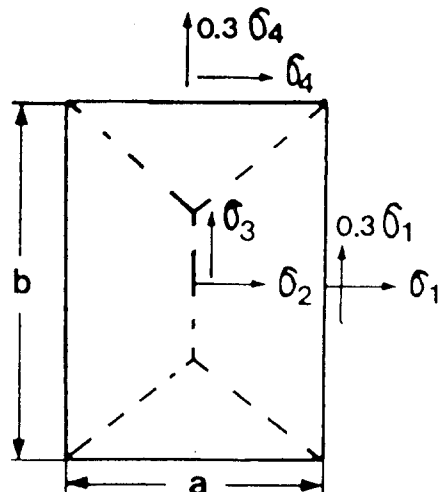


Fig. 6 Stress diagram of skin plate

Table 1 Timoshenko constant K

b/a	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
1.00	30.9	13.8	13.7	30.9
1.25	40.3	18.8	13.5	33.9
1.50	45.5	22.1	12.2	34.3
1.75	48.4	23.9	10.8	34.3
2.00	49.9	24.7	9.5	34.3
2.50	50.0	25.0	8.0	34.3
3.00	50.0	25.0	7.5	34.3

2.3 合成應力 및 처짐율

同一 軸方向 應力만이 아닌 경우는 그 合成應力을 다음 式에 따라 計算하여 허용치 以內에 있어야 하고 平板應力式 DIN 19704³⁾(수공구조물의 設計 基準 等式)에 따라 구한다.

二軸方向의 合成應力은 다음 式으로 계산한다.

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_{bs}^2 + \sigma_s \sigma_{bs} + 3\tau^2} \dots\dots\dots (2-6)$$

여기서 σ_r 는 合成應力, σ_{bs} 는 보의 인장(압축)단 應力과 skin 평면보와의 동방향 응력, σ_s 는 Skin 평판 보와 直角方向 應力, τ 는 전단력을 받는 경우에 있어서 보의 剪斷應力을 나타낸다.

처짐량은

$$\delta = \frac{P}{48EI} \left(L_s^3 - \frac{L_s L_c^2}{2} + \frac{L_c^3}{8} \right) \dots\dots\dots (2-7)$$

그리고, 海水에 의한 부식을 防止하기 위하여 SMA 50을 사용 하였고 특성은 내후성이 優秀하고 부식에 강한 열간 압연재이며, 불순물 C가 0.2%의 저탄소강으로서 Cu, Cr, Mo, V 등의 元素가 含有되어 있고 性質은 아래와 같다.

Table 2 Mechanical properties of SMA 50

Material	Tensile strength (kgf/m ²)	Yield strength (kgf/m ²)	Elongation (%)
SMA 50	6.265×10 ⁶	5.153×10 ⁶	19

수문의 設計條件에는 여러가지가 있으나 現在 全國에 施工된 수문 構造物의 常時使用狀態에 있

는 水門扉의 경우가 본 연구의 대상 이므로 許容應力, 축방향壓縮應力, 굽힘應力, 剪斷應力을 採擇하여 適用하였다.

3. 最適設計

本 研究에서 이용한 水門은 아산단의 防潮堤에 설치되어 있는 것으로, 이러한 문제를 해결하기 위하여 水門製作에 있어 經濟性을 고려하여 最適設計를 위한 optimal program을 開發하였으며, 또한 既存의 水門에서 horizontal 및 vertical 보에 horizontal 보를 사용하였던 것을 T-beam으로 대체 사용하였다.

3.1 水壓荷重條件

작용수압은 식(2-1), (2-2), (2-3), (2-4)에 海水 條件을 대입하여 가장 큰 水壓을 最惡 條件으로 하여 모든 計算에 사용하였다. 각 경우의 수압이 Table 3에 표시되어 있으며 특수부하상태시에 작용하는 수압이 가장 크므로 이 수압을 계산에 사용하였다.

Table 3 Total water load

Loading	Water load ×10 ³ [kgf]
Normal loading	324.089
Special loading	386.843
Exceptional loading	285.198
Operating loading	158.124

3.2 수평보및 수직보 간의 간격

수평 보는 당초에는 6개의 보를 사용하였으나 本 論文에서는 最適設計를 하기 위하여 보의 개수가 3개에서 8개로 分類하여 最適 개수를 찾고자 하였다. 수평 보의 간격은 水壓(특수부하상태시)이 작용 하였을 때 수압을 받는 면적을 수평 보수에 따라 均等分割해서 수압중심에 수평 보를 배치했을 때의 수평 보 간의 간격을 계산한 것이다. Fig. 7에서 알수 있듯이 수평 보 및 수직 보의 수가 증가할 수록 보 사이의 간격이 짧아짐을 알 수 있는데 이것은 전체수압을 균등히 분할하여 간격을 구하였기 때문이다.

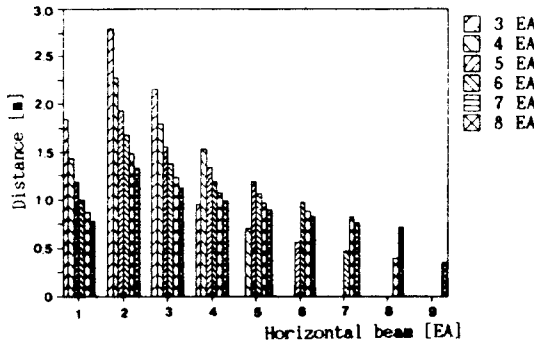


Fig. 7 Distance between horizontal beam

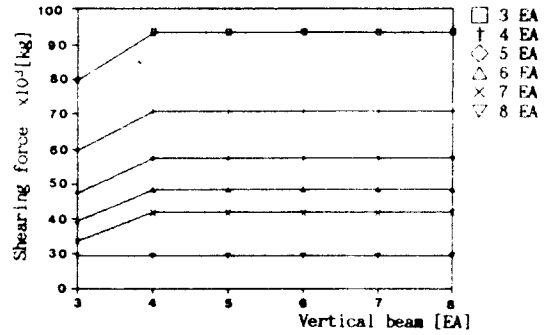


Fig. 10 Shearing force for horizontal beam

3.3 굽힘 모멘트와 전단응력

보의 위치를 3-2의 결과와 같이 배치하였을 때 水壓에 의하여 각각의 수평 및 수직 보에 작용하는 굽힘 모멘트값 들을 Fig. 8과 9에 내었다. 수평 보의 수가 많을 수록 모멘트 값이 減少하였고 수직 빔 수의 增加에 대해서는 모멘트의 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 10과 11은 보의 갯수에 따른 보의

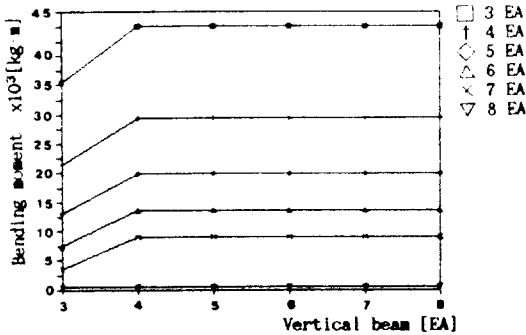


Fig. 8 Bending moment for horizontal beam

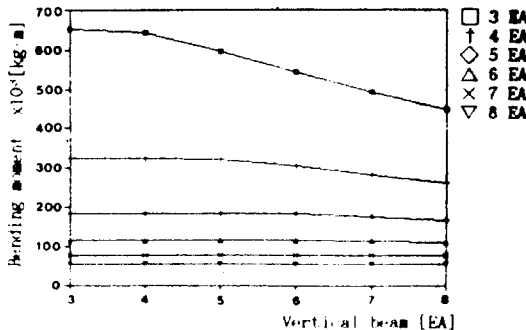


Fig. 9 Bending moment for vertical beam

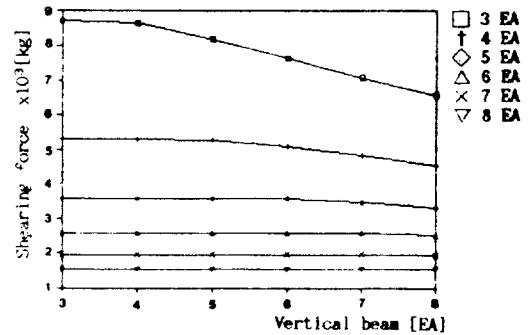


Fig. 11 Shearing force for vertical beam

剪斷力の 크기를 나타낸 것이고, 앞에서 모멘트의 傾向과 같이 수평 보 갯수의 增加에 따라서 작아지고 수직 보 수의 增加에는 변화가 없음을 알 수 있다.

3.4 Skin 평판의 두께와 Web의 길이

Skin 평판의 두께는 수평 및 수직 보에 의해 형성된 格子에 水壓이 작용 하였을 경우, 식 2-5를 이용하여 구하였고 각각의 경우중에서 가장 큰 두께를 계산에 사용하였으며 Fig. 12에 腐蝕餘裕, 熔接性 등을 고려했고 계산된 값에 2mm를 더하고 소숫점 2째 자리를 올림하여 표시하였다. skin 평판의 두께는 수평 및 수직 보 수의 增加에 따라 두께가 減少함을 알 수 있고, 수평 보 및 수직 보의 web 길이는 사용재료의 許容應力, 合成應力 및 처짐이 日本 水門 鐵官 技術基準에 의한 허용치를 滿足시키며 그 한계값에 가까운 길이를 선택하였다. flange의 길이는 web 길이의 1/3로 취하였기

때문에 Web의 傾向과 같다고 할 수 있으며, 따라서 여기서는 고려하지 않았다. Fig. 13에서와 같이 보의 두께 및 수평 보의 수가 增加하면 web의 길이가 짧아지고 반대로 수직 보의 수가 증가하면 web의 길이는 길어짐을 알 수 있다.

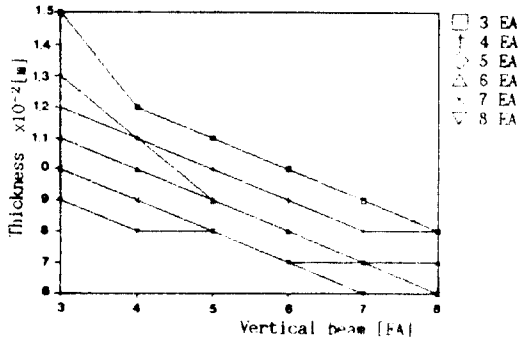


Fig. 12 Thickness of skin plate

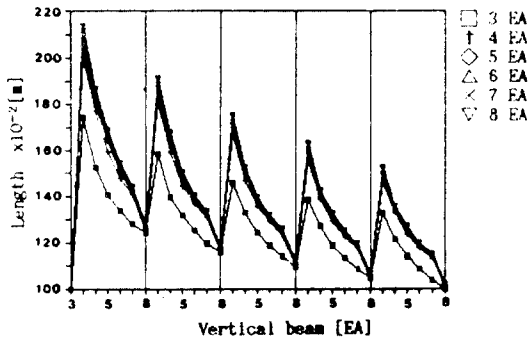


Fig. 13 Length of web

3.5 水門重量

Fig. 14은 水門에서 roller 및 sheave의 重量을 제외한 水門重量을 표시하고 있고, 보의 두께가 얇으면 수평 보의 갯수가 增加할 수록 수문의 重量은 약간 減少하지만 두께가 增加할 수록 수평 보 수의 증가에 따라 重量은 증가한다. 그리고 수직 보의 수가 증가할 때에는 重量은 증가한다.

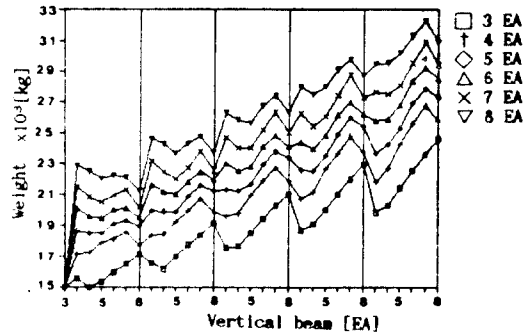


Fig. 14 Weight of gate

4. 考 察

국가관리 방조제로 이미 설치되어 있는 아산만의 dam에서 수위조절 및 저수용으로 사용되고 있는 roller gate를 model로 채택해서 dam 수문에 관한 최적 설계 계산을 행하였는 바, 수문의 수평 보 설치시 보 수가 증가할 수록 보의 간격을 짧아지고 수직 보의 수가 증가할 수록 굽힘 모멘트 및 전단력은 감소하였다. 또한 수직 보의 굽힘 모멘트 및 전단력은 수평 보의 수가 증가할 수록 감소하였고 수직 보 수의 증가와 무관하게 일정하였는데 이는 수평 보의 위치 선정시 수압을 균등히 분포하도록 선정하였기 때문으로 생각된다. 또 skin 평판의 두께는 수평 보 및 수직 보 수가 증가할 수록 감소하고 web의 길이는 수평 보 수의 증가 및 두께의 증가에 따라 감소하며 수직 보 수의 증가에 따라 증가한다. 그리고 Table 4는 기존 설계와 최적 설계를 비교 한 것이다. 여기에서 알 수 있듯이 평판의 두께가 1mm 얇아지고 roller 및 sheave를 제외한 수문 重量이 9.2% 감소함을 알 수 있다. Fig. 15는 최적 설계점을 찾기 위한 그래프로 web의 길이와 수문 重量을 무차원화 시킨 그래프이고 모든 설계 조건을 만족시키면서 수문의 重量이 가장 적은 조건이 최적점이라는 것을 알 수 있다.

Table 4 Comparison of existing and optimal design

Items		Unit	Existing design	Optimal design
Thickness	Skin plate	<i>m</i>	10^{-2}	8.0×10^{-3}
	Web of horizontal beam	<i>m</i>	10^{-2}	12.0×10^{-3}
Length	Web of horizontal beam	<i>m</i>	1.121	1.231
Weight	Skin plate	<i>kgf</i>	0.493	0.506
	Horizontal beam	<i>kgf</i>	1.024	1.161
	Vertical beam	<i>kgf</i>	0.251	0.304

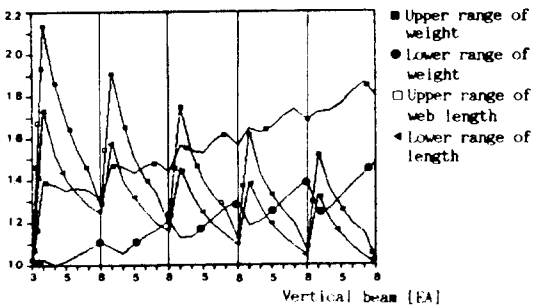


Fig. 15 Optimal range of weight of length of web

5. 結 論

防潮堤에 設置한 gate leaf의 horizontal beam과 vertical beam에 作用하는 剪斷應力과 굽힘應力 그리고 合成應力을 考慮하여 最適設計를 한 結果 다음과 같은 結果를 얻었다.

- 1) horizontal beam을 T-beam으로 한 結果 材料의 重量을 9.2% 까지 節約할 수 있다.
- 2) beam의 두께와 horizontal beam 갯수 및 vertical beam수가 增加할 수록 gate의 總重量은 增加한다.

- 3) gate 自重의 減少로 인한 材料의 節減으로 경제적인 效果를 볼수 있고 土木 構造物(pier 및 deck)에서도 소형화시킬 수 있다.

參考文獻

- 1) 日本 水門 鐵管 協會, “水門鐵管 技術 基準”, 1985
- 2) Timoshenko, S. P. and S. W. Krieger, “Theory of Plate and Shells”, 2nd ed., McGraw-Hill, pp. 105-258, 1976
- 3) Deutsche Industrie Normen, “Stahl Wasserbau-teniß Crechnungs Grundlagen”, DIN 19704, 1976. 9
- 4) 日本 規格協會, “銲接構造用 내구성 열간 압연 강재”, JIS 3114, 1977. 1
- 5) Timoshenko, S. P., “Strength of Materials”, 3rd ed., McGraw-Hill, pp. 76-201, 1970
- 6) Ugural, A. C., “Stresses in plates and shells”, McGraw-Hill, pp. 59-94, 1981
- 7) 農業振興公社, “아산만 준공도면”, 1988
- 8) 日本 建設部 設計課, “鋼構造物 計劃 技術 指針”, 1985, 11