

회전식 수문의 최적 설계

Optimum Design of Radial Gate

권영두* 권순범** 박창규*** 윤영중****
Kwon, Young-Doo Kwon, Soon-Bum Park, Chang-Gyu Yoon, Young-Joong
(논문접수일 : 2000년 2월 24일 ; 심사종료일 : 2001년 6월 20일)

요 지

이 논문은 회전식 수문(radial gate)의 구조해석에 근거하여 지지점 위치에 따른 모멘트 분배를 최적화하는 것에 관심을 두고 있다. 회전식 수문(radial gate)의 경제적인 관점에서의 중요성에도 불구하고 이의 지지점 위치에 따른 최적 설계에 관한 자료를 찾기 어려운 실정이다. 그래서 본 연구에서는 주판(skin plate)의 곡률 반경, 수심, 동압 등의 주어진 자료를 이용하여 지지점(gate arm)의 수가 2개인 경우와 3개인 경우에 대하여 곡선형태의 주판(skin plate)에서 지지점(arm)의 최적 위치를 얻어서 설계자료에 의한 것들과 비교한다. 그 결과 최적 설계에 의한 회전식 수문(radial gate)의 치수가 설계자료에 의한 것에 비해 현저히 감소되는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 회전식 수문, 2-arm type, 3-arm type, 최적화, DFP법, 유전자 알고리즘

Abstract

On the basis of structural analysis of the radial gate(that is, Tainter gate), this paper focuses on the optimization of the moment distribution according to the location of the arm of the radial gate. In spite of its importance from economical view point, we could hardly find the study on the optimum design of radial gate. Accordingly, the present study identifies the optimum section modulus for a radial arm along with the optimum position for 2 or 3 radial arms with a convex cylindrical skin plate relative to a given radius of the skin plate curvature, pivot point, water depth, ice pressure, etc. These optimum measurements are then compared with previously constructed radial gates. The results indicate that the optimum section modulus value for a radial arm was appreciably smaller than the previously constructed examples.

Keywords : radial gate(tainter gate), 2-arm type, 3-arm type, optimization, DFP method(Davidon-Fletcher-Powell method), Genetic algorithm

1. 서 론

최근 산업의 발달과 생활 수준의 향상은 대량의 물을 지속적으로 요구하게 되었다. 특히, 국내의 경우 국토의 균형적인 개발과 효율적인 이용이라는 측면에서

대형 강의 하구에는 댐의 길이가 수 km에 달할 정도의 대형 하구언이 축조되고 있는 실정이다. 댐에는 필연적으로 방수량을 조절하는 수문(gate)이 설치된다. 수문에는 각 특성을 가진 여러 종류가 있다. 그 중 회전식 수문(radial gate, tainter gate라고도 함)은

* 정회원 · 경북대학교 기계공학부, 교수
** 경북대학교 기계공학부, 교수
*** 경북대학교 대학원, 석사과정
**** 현대중공업 플랜트 사업본부, 부장

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

방수량 조절의 정확성, 수문 개폐의 용이성 및 내구성 등의 이유 때문에 대형 댐의 방수조절용 수문으로 많이 이용되고 있다.

이에 대한 연구로는 Yan¹⁾이 민감도 해석과 실험적 모드해석법등을 이용하여 동특성 최적설계를 연구한 바 있고, Jiang²⁾은 모델 시험법 등으로 유동야기 진동에 대한 연구를 수행한 바 있다. Golliard³⁾는 안전수문(fusegate)을 사용하여 회전식 수문의 작동 및 안전을 개선한 바 있고, Anami⁴⁾는 회전식 수문의 진동 및 감쇠특성을 해석한 바 있다. 회전식 수문(radial gate)의 설계시 지지점의 위치의 선정의 중요성에도 불구하고 아직까지 국내외적으로 경험에 의해 구해진 지지점(radial arm)의 위치에 대하여 최적화된 설계가 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 지지점(radial arm)의 위치를 고려한 최적화를 수행하여 이 결과를 기존의 임의로 설계된 결과와 비교하고, 지지점(radial arm)의 위치를 고려한 최적화의 중요성을 밝히고자 한다. 전술한 내용을 지지점(radial arm)의 수가 2개인 경우(이하 2-지지점식)와 3개인 경우(이하 3-지지점식)에 대하여 수행한다. 본 연구에서 사용한 최적화 기법은 변화 메트릭법(variable metric method)중에서 DFP(Davidon-Fletcher-Powell method)법^{5)~8)}과 유전자 알고리즘을 사용하였다.⁹⁾ DFP법은 기존의 최적화 방법으로 시작점에 따라 최적화의 방향이 결정되어 국부적인 탐색과정을 가지는 반면에, 유전자 알고리즘은 생물 진화의 원리와 유전학에 바탕을 둔 확률론적 탐색의 요소에 방향성 탐색의 요소를 결합한 전역 탐색 방법으로 연속-불연속의 혼합, 불연속, non-convex 영역 등을 포함하는 최적화 문제를 해결 할 수 있어 최근에 구조 최적화 문제들에도 활발히 적용되고 있다.

2. 회전식 수문(Radial gate)의 구조와 지배방정식

2.1 회전식 수문(Radial gate)의 구조

회전식 수문(radial gate)에서 수압 및 수면의 동결과 관련된 동압(ice pressure)가 직접 작용하는 부분은 주판(skin plate)부분이다. Fig. 1은 동압과 정수압(hydro-static pressure)이 동시에 작용하는 주판(skin plate)를 2개의 지지점(arm)으로 지지하는 회전식 수문(radial gate)의 구조를 나타낸 그림

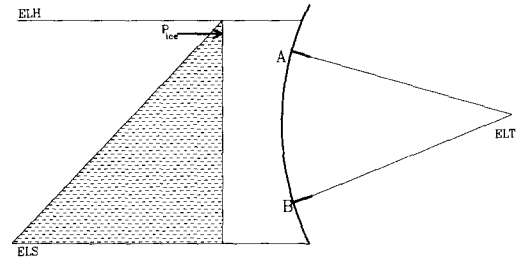


Fig. 1 Radial gate with 2-arm

이다.

Fig. 1에서 ELH, ELS 및 P_{ice} 는 각각 수면과 주판(skin plate)최하부의 고도 및 동결기 수면의 결빙에 관련된 동압이다. 주판(skin plate)을 지지하고 있는 각 지지점의 힘을 계산하기 위해서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 전술한 P_{ice} , 정수압 외에 주판(skin plate)의 자중도 고려하여야 한다. 그림에서 수심 h 는 $ELH-ELS$ 이다. 수심의 깊이와 비례 관계가 있는 정수압에 의한 주판(skin plate)에 작용하는 수평방향 혹은 수직방향 성분의 힘을 계산하는 경우에 사용되는 주판(skin plate)의 면적은 수평 혹은 수직방향의 투사면적(projected area)을 사용해야 한다. 여기서는 주판(skin plate)은 원형이기 때문에 직선형태로 가정하여 수압이 직선 주판(skin plate)에 수직으로 작용한다고 하여 계산하였다.

회전식 수문(radial gate)는 수직거더(vertical girder)를 사용하여 하중을 일차적으로 지지한다. 이 수직거더는 수평거더(horizontal girder)와 지지점(arm)에 연결되어 주판(skin plate)을 열고 닫을 수 있도록 설계된다. 회전식 수문(radial gate)은 지지점(arm)의 개수에 따라 2-지지점식과 3-지지점식으로 구분한다. 2-지지점식은 정적인 평형식으로 풀 수 있으나 3-지지점식은 부정정 문제가 된다.

2.2 2개의 지지점(arm)으로 지지하는 경우

Fig. 2는 회전식 수문(radial gate)의 주판(skin plate)부를 2개의 지지점(arm)으로 지지하는 경우에 작용하는 수압¹⁰⁾을 나타낸 그림이다. 주판(skin plate)을 지지하는 수직거더는 곡선보로 취급하여야 하나, 보의 두께의 곡률직경에 대한 비가 20이 넘을 때는 직선보로 취급할 수 있고, 이 경우 80정도이므로 직선보로 취급한다.^{11)~13)}

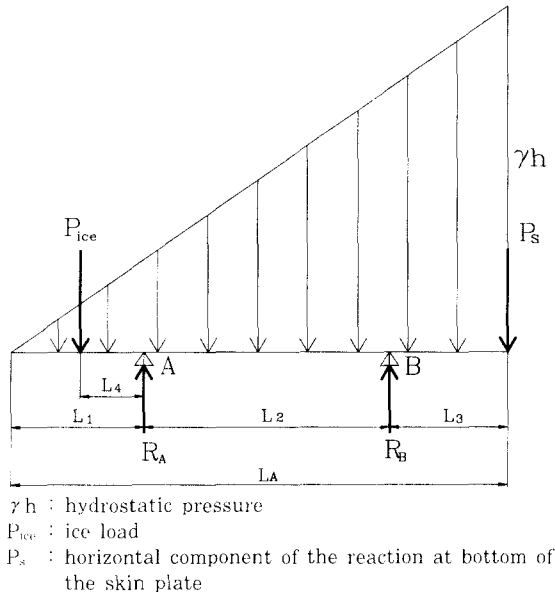


Fig. 2 Free body diagram of radial gate with 2 arms

평형방정식으로부터 다음의 식(1)과 식(2)를 얻을 수 있다.

$$\sum F = 0 ; R_A + R_B - P_{ice} - \frac{1}{2} \gamma L_A H_3 - P_s = 0 \quad (1)$$

$$\sum M_A = 0 ; P_{ice} L_4 + \frac{1}{6} \gamma L_1^2 H_1 - \frac{1}{3} \gamma (L_2 + L_3)^2 (H_3 - H_1) - \frac{1}{2} \gamma (L_2 + L_3)^2 H_1 + R_B L_2 - P_s (L_2 + L_3) = 0 \quad (2)$$

위의 식(1)과 식(2)를 이용하여 A, B 각 지점에서의 반력은 식(3), 식(4) 그리고 모멘트는 식(5), 식(6)이 된다.

$$R_B = \frac{\frac{1}{3} \gamma (L_2 + L_3)^2 (H_3 - H_1) + \frac{1}{2} \gamma (L_2 + L_3)^2 H_1 - P_s L_1 - \frac{1}{6} \gamma L_1^2 H_1 + P_s (L_2 + L_3)}{L_2} \quad (3)$$

$$R_A = P_{ice} + \frac{1}{2} \gamma L_A H_3 + P_s - R_B \quad (4)$$

$$M_A = -P_{ice} L_4 - \frac{1}{6} \gamma L_1^2 H_1 \quad (5)$$

$$M_B = -P_{ice} (L_4 + L_2) - \frac{1}{6} \gamma (L_1 + L_2)^2 H_2 + R_A L_2 \quad (6)$$

두 지지점 A, B 뿐만 아니라 지지점 사이에서 작용하는 최대 모멘트와 작용점의 위치를 구한다. X가 수판(skin plate)의 임의 위치를 나타낼 때 X지점에서의 모멘트는 식(7)과 같다.

$$M_{AB} = -\frac{1}{2} \gamma L_1 \frac{H_1}{2} \left(\frac{L_1}{3} + X \right) - P_{ice} (L_4 + X) + R_A X - \frac{1}{2} \gamma X^2 H_1 - \frac{1}{6} \gamma \frac{(H_2 - H_1)}{L_2} X^3 \quad (7)$$

최대 모멘트를 구하기 위해 $\frac{dM_{AB}}{dX} = 0$ 으로부터 최대 모멘트가 발생하는 지점 X_{max} 는 식(8)과 같이 된다.

$$X_{max} = \frac{L_2 \left\{ -H_1 + \sqrt{H_1^2 + \frac{2(H_2 - H_1)}{\gamma} \left(R_A - \frac{1}{2} \gamma L_1 H_1 - P_{ice} \right)} \right\}}{H_2 - H_1} \quad (8)$$

식(8)의 X_{max} 를 식(7)에 대입하여 지지점 A, B 구간내에서의 최대 모멘트를 구할 수 있다. 여기서 수직 거더에 발생하는 최대 모멘트는 M_A , M_B 또는 $M_{X_{max}}$ 중의 하나이고, 이 최대모멘트에 대한 수직거더의 단면 계수가 결정된다.

2.3 3개의 지지점(arm)으로 지지하는 경우

3개의 지지점(arm)으로 지지하는 경우에는 지지점이 3개이므로 단순 지지보 문제로는 풀 수가 없다. 방정식은 2개이지만 미지수가 3개이므로 부정정(不靜定) 해석을 해야 한다.

Fig. 3은 3-지지점식에서의 하중과 반력의 관계를 나타내는 그림이다.

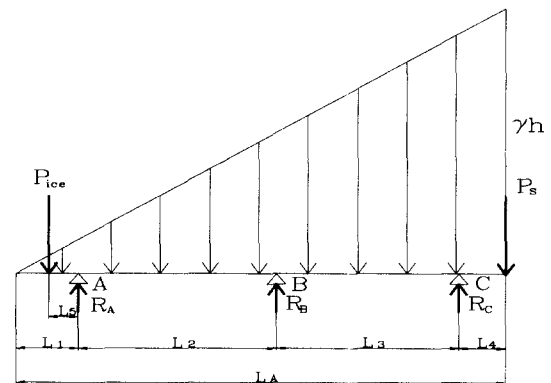


Fig. 3 Radial gate FBD with 3-arm

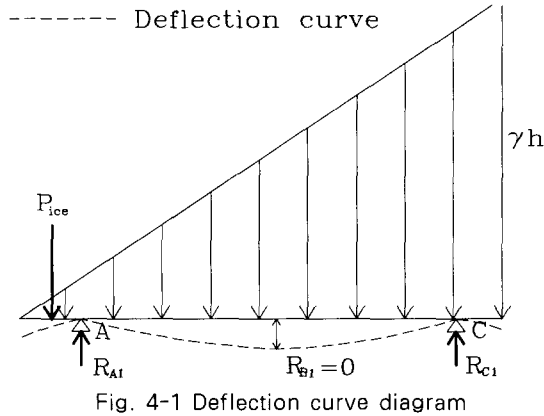


Fig. 4-1 Deflection curve diagram

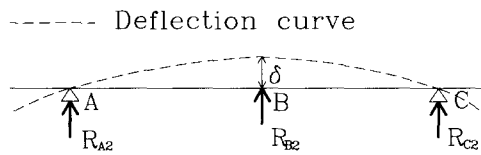


Fig. 4-2 Reaction curve diagram

위의 부정정 문제를 풀기 위해 Fig. 3을 Fig. 4-1과 Fig. 4-2로 나누어 생각한다.

부정정 보의 해는 특이함수법을 이용하여 구한다.

먼저, 그림 4-2의 양단 지지보에 하중이 작용할 때 그 처짐을 구한다.

$$V_{B2} = \delta = \frac{R_{B2}L_3L_2}{6EI(L_2L_3)} \{ (L_2 + L_3)^2 - L_2^2 - L_3^2 \} \quad (9)$$

Fig. 4-1의 분포하중이 작용하는 양단 지지보에 특이함수를 적용하여 B점의 처짐을 구한다. 적용된 특이함수는 식(10)과 같이된다.

$$q = -P_{ice} \langle X - (L_1 - L_5) \rangle^{-1} + R_{A1} \langle X - L_1 \rangle^{-1} + R_{C1} \langle X - L_1 - L_2 - L_3 \rangle^{-1} - \gamma \langle X \rangle^1 \quad (10)$$

처짐을 구하기 위해 식(10)을 적분하면 식(11)이 된다.

$$EI_2V = C_1X + C_2 - \frac{P_{ice}}{6} \langle X - (L_1 - L_5) \rangle^3 + \frac{R_{A1}}{6} \langle X - L_1 \rangle^3 + \frac{R_{C1}}{6} \langle X - L_1 - L_2 - L_3 \rangle^3 - \frac{\gamma}{120} \langle X \rangle^5 \quad (11)$$

여기서, E는 탄성계수, I₂는 관성모멘트를 나타낸다. 상수 C₁과 C₂를 구하기 위해 지지점 A, C에서의 변위는 0이라는 경계조건을 적용하면 식(12)와 식(13)이 된다.

$$\text{Point A : } C_2 + C_1L_1 = \frac{P_{ice}}{6} L_5^3 + \frac{\gamma}{120} L_1^5 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Point B : } C_2 + C_1(L_1 + L_2 + L_3) &= \frac{P_{ice}}{6} (L_2 + L_3 + L_5)^3 + \frac{R_{A1}}{6} (L_2 + L_3)^3 \\ &+ \frac{\gamma}{120} (L_1 + L_2 + L_3)^5 \end{aligned} \quad (13)$$

식(11)에서 X=L₁+L₂을 대입하여 B 지점에서의 변위 V_B를 구한다.

$$\begin{aligned} EI_2V_B = C_1(L_1 - L_2) + C_2 - \frac{P_{ice}}{6} \langle L_2 - L_5 \rangle^3 \\ + \frac{R_{A1}}{6} \langle L_2 \rangle^3 - \frac{\gamma}{120} \langle L_1 - L_2 \rangle^5 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 구한 V_B를 식(10)에 대입하여 R_{B2}를 구할 수 있다.

Fig. 4-2에서 힘과 모멘트와의 관계를 이용하여 R_{A2}와 R_{C2}를 구하면 각각 식(15)와 식(16)이 된다.

$$R_{A2} = -\frac{R_{B2}L_3}{(L_2 + L_3)} \quad (15)$$

$$R_{C2} = -R_{B2} - R_{A2} \quad (16)$$

Fig. 4-1에서 힘과 모멘트와의 관계를 이용하여 R_{A1}와 R_{C1}을 구하면 각각 식(17)과 식(18)이 된다.

$$R_{A1} = \frac{P_{ice}(L_1 + L_2 + L_3) + \frac{1}{2} \gamma L_A^2 \left(\frac{L_A}{3} - L_4 \right)}{(L_2 + L_3)} \quad (17)$$

$$R_{C1} = \frac{1}{2} \gamma L_A^2 + P_{ice} - R_{A1} \quad (18)$$

위의 식(15), (16)과 식(17), (18)의 관계들을 이

용하여 지지점 A, B, C에서의 반력을 구하면 다음과 같다.

$$R_A = R_{A1} + R_{A2} \tag{19}$$

$$R_B = R_{B1} + R_{B2} \tag{20}$$

$$R_C = R_{C1} + R_{C2} \tag{21}$$

그리고 각 지점에 작용하는 모멘트는 다음과 같다.

$$M_A = -P_{ice}L_5 - \frac{\gamma}{6}L_1^3 \tag{22}$$

$$M_B = -P_{ice}(L_2 + L_5) + R_AL_2 - \frac{\gamma}{6}(L_1 + L_2)^3 \tag{23}$$

$$M_C = -P_{ice}(L_2 + L_3 + L_5) + R_AL_2 + R_BL_3 - \frac{\gamma}{6}(L_1 + L_2 + L_3)^3 \tag{24}$$

이때 수직거더에 발생하는 최대 굽힘모멘트는 M_A , M_B , M_C 또는 A~C 사이의 최대 굽힘모멘트 중의 하나이고, 이의 크기에 따라 수직거더의 단면계수가 결정된다.

3. 회전식 수문(Radial Gate)의 지지점 위치에 따른 최적설계

회전식 수문(radial gate)은 지지점(arm)의 위치에 따라서 지지점에서의 모멘트가 변하기 때문에 지지점(arm)의 위치설정이 매우 중요하다. 수압에 의해

작용하는 거더에 발생하는 응력은 굽힘 응력이고 이는 모멘트에 의해 발생한다. 그러므로 2-지지점식이나 3-지지점식에서 지지점(arm)의 위치를 조절함으로써 모멘트 분배를 최적화 시킬 수 있다. 회전식 수문(radial gate)의 최적 설계는 수직거더에 작용하는 모멘트 중 최대 모멘트 값이 최소가 되도록 하는 지지점(arm)의 위치를 구하는 것이다. 그리고 강도 구속 조건에 만족하도록 비제약 최적화 문제로 바꾸었다.

여기에 필요한 변수는 2개 이상이 되기 때문에 일차원 최적화 방법으로는 불가능하므로 다차원 최적화 방법을 사용해야 한다. 비제약 비선형 다차원 함수(unconstrained nonlinear multi-dimensional function)를 최적화하는 기존의 방법으로는 직접법(direct search methods)과 강하법(descend methods)의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 직접법(direct search method)은 함수 자체를 필요로 하지만 미분은 필요로 하지 않는 특징이 있는 것으로 비경사도법(nongradient methods) 또는 영계법(zeroth-order methods)이라고도 한다. 주로 간단한 함수를 최적화 하는데 사용되지만 강하법(descend methods)보다 효율면에서 뒤떨어진다. 강하법(descend methods)은 목적함수뿐만 아니라 그 함수의 미분된 값도 필요로 한다. 그래서 이 방법을 경사도법(gradient methods)이라고도 한다.

아래의 Table 1은 기존에 사용되던 각각의 방법에 해당되는 최적화 방법의 종류를 나타낸다.

그러나 기존의 이러한 방법들은 적용하는 범위가 한정되어 있어서 최근에는 확률적 탐색의 요소에 방향성 탐색의 요소를 결합하고 있는 유전자 알고리즘을 많이 사용하고 있다. 유전자 알고리즘은 연산자들의 특성 때문에 확률적인 알고리즘으로 분류되기도 하지만 방향성 탐색을 겸하고 있기 때문에 무작위 탐색법과는 다르다. 또한 방향성 탐색의 요소를 가지지만 동시에 전역

Table 1 Unconstrained Minimization Methods^{8),9)}

Direct Search Methods	Descent Methods	Genetic Algorithm
<ul style="list-style-type: none"> · Random search method · Grid search method · Univariate method · Pattern search methods <ul style="list-style-type: none"> - Powell method - Hooke-Jeeves method · Rosenbrock's method · Simplex method 	<ul style="list-style-type: none"> · Steepest descent(Cauchy) method · Fletcher-Reeves method · Newton's method · Marquardt method · Quasi-Newton methods <ul style="list-style-type: none"> - Davidon-Fletcher-Powell method - Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno method 	<ul style="list-style-type: none"> · Simple genetic algorithm · Micro genetic algorithm · Hybrid genetic algorithm

탐색하는 능력을 가지기 때문에 경사도법과는 또 다른 특징을 가진다. 따라서 본 논문에서는 DFP법(Davidon-Fletcher-Powell method)과 유전자 알고리즘을 사용하여 DFP법으로 얻은 최적치가 전역해임을 보인다.

3.1 DFP법(Davidon-Fletcher-Powell Method)

비제약 비선형 다차원 함수의 최적화 방법 중에서 본 논문에 적용되는 DFP법(Davidon Fletcher-Powell method)에 대한 개략적인 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Initial point} &: \mathbf{X}_i \\ i &= 1 \\ [H_1] &= [I] \text{ for minimization} \\ [H_1] &= -[I] \text{ for maximization} \\ [I] &: \text{identity matrix} \\ \mathbf{S}_i &= -[H_i] \nabla f_i \quad (25) \\ \nabla f_i &: \text{gradient of function at point } \mathbf{X}_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{i+1} &= \mathbf{X}_i + \lambda_i \mathbf{S}_i \quad (26) \\ \lambda_i &: \text{optimal step length in the direction } \mathbf{S}_i \end{aligned}$$

아래와 같은 결정조건(a), (b)를 이용하여 새로운 위치 \mathbf{X}_{i+1} 에서의 최적성 여부를 확인해야 한다.

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & \frac{f(\mathbf{X}_{i+1}) - f(\mathbf{X}_i)}{f(\mathbf{X}_i)} < \varepsilon_1 \\ \text{(b)} \quad & \frac{|\lambda_i \mathbf{S}_i|}{|\mathbf{X}_i|} < \varepsilon_2 \quad (27) \end{aligned}$$

만약 위의 결정조건에 적합한 값이 나온다면 다음단계의 반복계산을 중지하고, 적합하지 않다면 아래의 식을 이용하여 반복계산을 한다.

$$\begin{aligned} [H_{i+1}] &= [H_i] + [M_i] + [N_i] \\ &= [H_i] + \lambda_i \frac{\mathbf{S}_i \mathbf{S}_i^T}{\mathbf{S}_i^T \mathbf{S}_i} - \frac{([H_i] \mathbf{g}_i)([H_i] \mathbf{g}_i)^T}{\mathbf{g}_i^T [H_i] \mathbf{g}_i} \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \mathbf{g}_i &= \nabla f(\mathbf{X}_{i+1}) - \nabla f(\mathbf{X}_i) \\ &= \nabla f_{i+1} - \nabla f_i \end{aligned}$$

앞에서 구한 $[H_{i+1}]$ 을 이용하여 식(25)부터 재계산하여 수렴되게 한다.

3.2 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)

유전자 알고리즘은 자연 진화의 개념을 모방한 확률론적 전역 탐색 방법이다. 알고리즘의 특성 때문에 이 방법의 성공적인 적용이 최적 문제의 해가 이진수로 편리하게 표현될 수 있는 문제에 제한되어 있다. 그러나, 연속 최적 문제에 유전자 알고리즘의 적용에 대한 관심이 증폭되고 있다. 이것은 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)과 같은 다른 확률론적 탐색방법보다 GA의 중요한 장점인 초기값 계산이 필요없기 때문이다. 이러한 특징을 가지고 있는 GA를 활용하여 연속 설계 변수의 최적화인 본 논문에 적용하였다. 본 장에서는 현재 가장 많이 채용되고 있는 단순 유전알고리즘(Simple GA)기법과 본 연구에 채용된 마이크로 유전자 알고리즘(Micro GA)에 대해 간략하게 설명하고자 한다.

3.2.1 단순 유전알고리즘(Simple genetic algorithm)

Holland에 의해 개발되고 Glodberg에 의해 체계화된 초기의 알고리즘임에도 불구하고 해를 찾는 능력이 강인하여 아직도 많은 최적화 문제에 응용되고 있다. 이 유전알고리즘의 핵심은 자연의 진화원리를 알고리즘 형태로 모방한 유전 연산자(genetic operator)이고, 이는 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)로 이루어 진다.

3.2.1.1 재생산(reproduction)

적자 생존 또는 자연도태 현상을 모방하려는 인위적인 메커니즘으로 이를 알고리즘으로 구현한 것이 재생산 연산자이다. 이는 각 개체를 적합도의 크기에 따라 다음의 교배연산과 돌연변이 연산에 참여할 확률을 결정함으로써 잠재적인 해 집단이 탐색공간의 유망한 영역으로 향하도록 유도하는 과정이다. 다시 말하면 약한 개체들을 집단에서 몰아내고 강한 개체를 선택함으로써 이들의 유전자들이 이후 세대의 집단에서 넓게 퍼지도록 해준다. 기본적인 방법으로는 룰렛휠선택(roulette wheel selection), 순위에 기초한 선택(ranking-based selection), 토너먼트 선택(tournament selection) 등이 있다.

3.2.1.2 교배(crossover)

탐색공간 상의 가능한 새로운 점을 찾기 위하여 교배급원으로부터 부모 염색체 쌍을 임의로 선택하고, 교배점 이후의 비트들은 서로 교환 결합함으로써 적합도가 우수한 새로운 개체들은 생성한다. 유전자들을 절단하는 교배점은 염색체 내에서 임의로 선택된다. 이러한 연산은 교배된 자손의 수가 아버지 집단 크기와 같을 때까지 반복된다. 기본적인 방법으로는 일점교배(one-point crossover), 이점교배(two-point crossover), 다점교배(multi-point crossover), 균등교배(uniform crossover), 순환교배(cycle crossover) 등이 있다. 어떤 교배를 선택할 것인지는 전적으로 주어진 문제와 사용자에게 의해 결정될 문제이지만 가장 간단하면서도 자주 이용되는 방법은 일점교배이다.

3.2.1.3 돌연변이(mutation)

모의진화가 계속되는 동안 재생산과 교배 연산자는 집단을 더욱 강하게 해주고 이로 인하여 염색체들은 서로 닮아가게 된다. 이러한 현상은 세대 말기에는 바람직하지만 세대 초기에 발생하게 되면 유전자의 다양성 결핍으로 준최적해(suboptimal solution)나 사점(dead corner)에 빠지게 되는 요인이 된다. 재생산과 교배 연산자는 지역해나 사점으로부터 벗어나게 하는 메커니즘을 가지고 있지 않다. 이러한 원치 않는 해로부터 벗어나기 위한 메커니즘이 돌연변이이다.

3.2.2 마이크로 유전알고리즘
(micro genetic algorithm)

Krisnakumar¹⁴⁾는 매우 작은 집단을 취급하는 마이크로 유전알고리즘을 제안하였고, Carroll¹⁵⁾은 다른 연산자를 적용하는 문제를 다루었다. De jong은 마이크로 유전알고리즘이 단순 유전알고리즘보다 초기 성능과 후기 성능을 동시에 개선할 수 있음을 보였다. 이 방법은 유전정보의 다양성을 충분히 유지하기 위하여 집단이 어느 한 점 가까이로 수렴하게되면 집단을 재구성하여 다시 시동하게 하여 작은 집단을 다루면서 발생하게 되는 조기 수렴현상을 피하게 하고 최적 설계에 근접한 설계로 빨리 수렴시키게 하는 특징을 가지고 있다.

본 논문에서는 이 알고리즘을 적용하였으며 사용된 연산자는 다음과 같다. 재생산 연산자로는 토너먼트 선택을 이용하였고 엘리트 전략을 채용하였다. 교배연산

자로는 일점교배를 채용하였으며 개체간의 정보교환이 절실히 요청되므로 아버지 쌍에는 반드시 교배가 일어나도록($P_c=1$)배려하였다. 돌연변이 과정은 생략되었다.

3.3 지지점(Arm)위치에 따른 수직거더내의 모멘트의 최적화

본 논문에서 적용하려는 회전식 수문(radial gate)은 Fig. 5와 같다.^{16)~18)}

Fig. 6은 주판(skin plate)을 지지하는 수직거더의 H형보이다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 단면계수 Z_1, Z_2 가 서로 다른데 이는 수직거더의 상하부의 플랜지 크기가 서로 다르기 때문이다. 수직거더는 주판(skin plate)의 일부분인 플랜지1과 웹, 그리고 수평거더 측의 플랜지2 등이 H형 보를 형성하기 때문에 Z_1, Z_2 가 서로 다르다. 회전식 수문(radial gate)의 지지점(arm)의 위치를 최적화 하려고 할 때 변수로는 주판(skin plate)에서 각 지지점 사이의 길이가 차지하는 비(ratio)를 사용한다. 이를 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

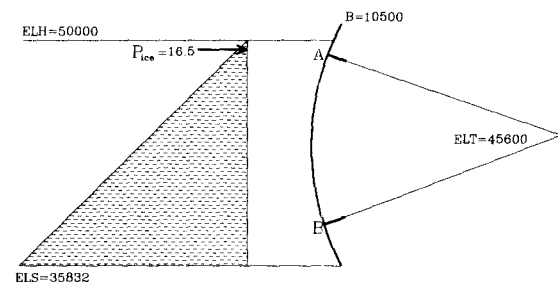


Fig. 5 Model of the radial gate

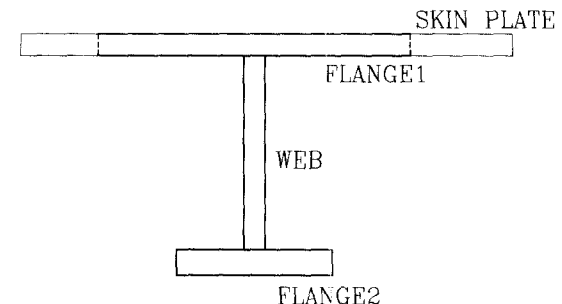


Fig. 6 Vertical girder

Two-arm type

Minimize $f(\mathbf{R}) = \max.$ moment in vertical girder

$$\mathbf{R} = \{R_1 \ R_2 \ R_3\}^T$$

subject to (29)

$$R_1 + R_2 + R_3 = 1$$

R_i : dimensionless lengths

Three-arm type

Minimize $f(\mathbf{R}) = \max.$ moment in vertical girder

$$\mathbf{R} = \{R_1 \ R_2 \ R_3 \ R_4\}^T$$

subject to (30)

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 1$$

R_i : dimensionless lengths

2-지지점식인 경우에는 초기값으로 사용될 각 길이의 무차원화 된 비율 (R_1, R_2, R_3)를 (0.2490, 0.6324, 0.1186)로 하였다. 여기서 사용된 (R_1, R_2, R_3)의 초기값은 설계자료에서 취한 값이다. 그리고 전체 길이 $R_1 + R_2 + R_3 = 1$ 이 되어야 하므로 R_3 의 값은 R_1 과 R_2 에 의해서 자동적으로 정해지는 값이다. 그러므로 최적화에 사용되는 독립변수는 R_1 과 R_2 뿐이다. 하중조건에 의해서 수직거더에 하중이 작용할 때 허용응력을 만족시키는 단면계수를 최적화 전후의 값을 서로 비교함으로써 단면계수의 감소량을 알 수 있다. 따라서 단면계수의 감소량을 알 수 있다. 3-지지점식인 경우에는 독립변수가 3개이다. 여기서도 각 부분의 길이 비의 합은 1이 되어야 한다. 각 부분의 초기 길이 비 ($R_1,$

R_2, R_3, R_4)를 (0.1200, 0.4400, 0.3567, 0.0833)로 하여 최적화를 시작하였다.

Table 2는 2-지지점으로 지지하는 경우 최적화 전후 각각에 대하여 반력과 모멘트, 그리고 허용응력을 만족시키는 최소 단면계수를 나타내었다.

Table 3은 3-지지점으로 지지하는 경우 최적화 전후 각각에 대하여 반력과 모멘트, 허용응력을 만족시키는 최소 단면계수를 나타내었다.

회전식 수문(radial gate)의 최적화에 있어서 각 지지점에 작용하는 모멘트 등에 의해서 응력이 발생하는데 수직거더 전체에 작용하는 모멘트 중에서 최대 모멘트가 최소가 되도록 길이 비 (R_1, R_2, R_3)의 값을 정하였다. Table 2와 Table 3에서 최대 모멘트가 최소가 되는 경우는 최대 모멘트가 각 지지점에 균등하게 분포할 때임을 알 수 있다.

2-지지점식의 경우 최대 모멘트가 최적화 전에는 주판(skin plate) 단위 폭당 $0.4235E+5 \text{kg-mm/mm}$ 이고 최적화 후에는 $0.5515E+5 \text{kg-mm/mm}$ 가 된다. 최적화 후에 지지점 사이에서 나타나는 최대 모멘트 값이 지지점에서의 값보다 작다는 것을 확인할 수 있는데 이는 최대모멘트가 양쪽 지지점에서 동일하게 나타나는 것을 의미한다. 그리고 각 지점에서의 반력의 합을 구하면 두 경우 모두 $0.1421E+3 \text{kg/mm}$ 이다. 그러므로 앞에서 구한 식들이 정확하다는 것을 간접적으로 보여주고 있다.

Table 2에서 알 수 있듯이 2-지지점을 가지는 경우에 최적화를 수행하면 안전율을 만족시키는 수직거더의 단면계수가 초기값의 74%만으로도 안전하게 지지할 수 있으며, Table 3에서 3-지지점을 가지는 경우

Table 2 2-arm으로 지지할 경우

2-arm		초기값	최적값(DFP)	최적값(GA)
길이 비(ratio)	R_1	0.2490	0.1940	0.1938
	R_2	0.6324	0.6764	0.6766
	R_3	0.1186	0.1296	0.1296
반력(kg/mm)	R_A	$0.5888E+2$	$0.5273E+2$	$0.5273E+2$
	R_B	$0.8319E+2$	$0.8934E+2$	$0.8934E+2$
모멘트(kgmm/mm)	M_A	$0.7463E+5$	$0.5525E+5$	$0.5525E+5$
	M_B	$0.4843E+5$	$0.5525E+5$	$0.5525E+5$
단면계수(mm^3)	Z_1	$0.3752E+7$	$0.2780E+7$	$0.2780E+7$
	Z_2	$0.3110E+7$	$0.2304E+7$	$0.2304E+7$

Table 3 3-arm으로 지지할 경우

3-arm		초기값	최적값(DFP)	최적값(GA)
길이 비(ratio)	R ₁	0.1667E+0	0.9417E-1	0.9418E-1
	R ₂	0.4167E+0	0.4631E+0	0.4595E+0
	R ₃	0.3333E+0	0.3675E+0	0.3711E+0
	R ₄	0.8330E-1	0.7520E-1	0.7522E-1
반력(kg/mm)	R _A	0.3893E+2	0.3048E+2	0.3032E+2
	R _B	0.3917E+2	0.4921E+2	0.4910E+2
	R _C	0.6397E+2	0.6238E+2	0.6265E+2
모멘트(kgmm/mm)	M _A	0.4655E+5	0.2523E+5	0.2523E+5
	M _B	0.1381E+5	0.2523E+5	0.2523E+5
	M _C	0.2909E+5	0.2523E+5	0.2523E+5
단면계수(mm ³)	Z ₁	0.1940E+7	0.1269E+7	0.1269E+7
	Z ₂	0.2340E+7	0.1051E+7	0.1051E+7

에는 초기값의 65%만으로도 가능하다. 이 때 사용된 초기값은 경험에 의해 합리적으로 사용되고 있는 값을 근거로 하였다. 그러나 처음부터 이 값을 모르고 각 길이의 무차원화 된 비율을 2-지지점인 경우 0.5 : 1 : 0.5, 3-지지점인 경우 0.5 : 1 : 1 : 0.5 가 되게 나누어서 이것을 초기값으로 사용했을 시 각각의 경우 수직거더의 단면계수가 초기값의 36%, 31%만으로도 안전하게 지지할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수압과 동압에 의한 하중이 작용하는 회전식 수문(radial gate)에 대하여 수력학적인 하중을 바탕으로 구조해석을 수행하였다. 그리고 2-지지점식과 3-지지점식 각 경우에서의 설계법을 연구하였으며, 이를 최적화 기법을 사용하여 수직거더의 단면계수를 최소화 할 수 있었다. 최적화 기법은 지지점의 수가 2개인 경우와 3개인 경우 모두 DFP법과 유전자 알고리즘을 사용하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 2-지지점식과 3-지지점식 회전식 수문(radial gate)의 각 경우에 있어서 수직거더에 대한 구조해석을 수행하여 하중과 굽힘모멘트와의 관계를 유도하였다.
- 2) 회전식 수문의 설계에 있어서 지지점의 위치를 설계변수로 하고 수직거더의 최대굽힘모멘트를 암시적 목적함수(implicit objective function)로 하

는 최적화 문제를 정식화 하였다.

- 3) 최적화를 통해서 2-지지점을 가지는 경우에는 수직거더의 단면계수가 초기값의 74%만으로도 안전하게 지지할 수 있으며, 3-지지점을 가지는 경우에는 초기값의 65%만으로도 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 두뇌한국 21사업의 과학기술분야 대학원 육성 사업에 의하여 지원되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Shi-Wo Yan, "Dynamic Characteristic Optimization Tainter Gates and Their Optimization", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, pp.3261~3273, 1991
2. Jiang, N., et al. "Experimental Study of Radial Gate Vibration in Spill Way of Dongfeng Arch Dam Hydraulic Power Station in Wu River", *Journal of Dalian University of Technology*, Vol. 34, No. 1, 1994
3. Golliard, D. and Chevalier, S., "Innovative Solution to a Safety Problem at Montsalvens

- Dam", *International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 5, No. 2, pp.63~65, 1998
4. Anami, K. and Ishii, N., "In-water Streamwise Vibration of Folsom Dam 'Radial Gates' in California", *Flow-Induced Vibration and Transient Thermal-Hydraulics American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, ASME, Fairfield, NJ, USA, Vol. 363, pp.87~94, 1998
 5. Arora, J. S., *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, Inc., 1989
 6. Luenberger, D. G., *Introduction to Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1973
 7. Himmelblau, D. M., *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, 1972
 8. Rao, S. S., *Engineering Optimization-Theory and Practice*, Third Edition, A Wiley-Interscience Publication, 1996
 9. Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, 1989
 10. Munson, B. R. and Young, D. F., Okiishi, Theodore H., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1990
 11. Juvinall, R. C., *Fundamentals of Machine Component Design*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1991
 12. Fred. B. and Seely, M. S., *Advanced Mechanics of Materials*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1952
 13. Ugural, A. C., *Advanced Strength and Applied Elasticity*, Third Edition, Prentice-Hall, Inc., 1995
 14. Krishnakumar, K., "Micro-genetic Algorithms for Stationary and Non-stationary Function Optimization," *SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems*, Vol. 1196, pp.289~296, 1989
 15. Carroll, D. L., "Genetic Algorithms and Optimizing Chemical Oxygen-Iodine Lasers", *Developments in Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 18, 1996, pp.411~424
 16. 현대중공업(주), 연천댐 자료
 17. 현대중공업(주), 합천댐 자료
 18. 현대중공업(주), 충주댐 자료