

반응표면법 및 비지배 분류 유전자 알고리즘을 이용한 취배수문의 응력 및 변형 최적화

김동수* · 이종수** · 최하영***

*한국선급엔지니어링 항만해양사업부

**연세대학교 기계공학부

***동양미래대학교 기계공학부

Optimization of Stress and Deformation of Culvert Gate by using RSM and NSGA-II

Dong Soo Kim*, Jongsoo Lee** and Ha-Young Choi***

*Port · Marine Department, KR Engineering Co., Ltd., Seoul, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Yonsei University, Seoul, Korea

***Department of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Response surface method 반응표면법, Design of experiments 실험계획법, Central composite design 중심계획법, Non-dominated sorting genetic algorithm II 비지배 분류 유전자 알고리즘, Culvert gate 취배수문

ABSTRACT: A valve is a marine structure that is subjected to multiple seawater loads. Therefore, it is necessary to define the kind of loads applied to it to confirm whether the structure has sufficient strength. In this research, we aimed to find the optimal solution for the stress and deformation of valves under various loads. We first selected design variables and implement a finite element analysis according to changes in the thickness of each component of a valve based on a central composite design. Next we developed a regression model of the response surface. Using this model, we calculated the optimal objective value based on NSGA-II. Finally, to confirm the correspondence between the optimal objective value and the real FEM value, we compared the optimal result and structural analysis result to verify the performance of NSGA-II.

1. 서 론

항만시설은 외력(파랑, 태풍, 지진에 의한 동수압 등)이 크게 작용하기 때문에 대형 구조물로 이루어진다. 파랑, 태풍 또는 지진 등은 실험이 불가능하기 때문에 대부분 전산 프로그램을 이용해서 구조물의 안전성을 평가한다(Hur et al., 2005). 그러나 대형 구조물의 전산구조해석을 수행할 경우 많은 해석 시간과 비용이 소요되기 때문에 최소의 구조해석 작업으로 최적화하는 것이 필요하다.

항만시설의 하나로써 취배수문(Culvert gate)은 잠문(Lock-gate)을 이용해서 해측과 내측의 수위를 일정하게 유지하기 위해서 물이 지나가는 통로에 설치되는 장비이다. 일반적인 해양 장비와 같이 취배수문 또한 여러 종류의 하중이 동시에 작용하게 되므로 각각의 개별하중 및 하중 조합은 구조해석 시 중요한 요소가 된다. 해수의 유동운동에 의해 하중이 작용하기 때문에 동적

유동해석은 반드시 필요하다. 그러나 대형 구조물에 대한 유동해석은 상당한 시간과 노력을 필요로 하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해서 동적 운동을 정적운동으로 근사화하는 방법들이 제시되고 있다. Naudascher et al.(1986)은 취배수문이 닫혀 있다가 상승할 경우 바닥과 상부의 해수유동의 압력차이에 의해서 발생하는 견인력(Downfull force)을 정적하중의 식으로 근사화하였고, Westergaard(1933)는 지진에 의해서 발생하는 지진 동수압을 등가정적(Equivalent-static) 해석법을 이용하여 근사화한 식을 제공하고, 구조해석 시 유한요소해석을 수행하였다.

취배수문과 같은 구조물의 안전성을 평가함에 있어서 응력과 변형은 아주 중요한 요소이기 때문에 본 논문에서는 취배수문에 작용하는 응력과 변형의 근사최적화를 수행함으로써 많은 시간과 비용을 줄이고자 하였으며 근사 최적화를 수행 후 얻은 결과값을 유한요소해석 결과값과 비교하였다.

Received 31 October 2012, revised 28 January 2013, accepted 19 April 2013

Corresponding author Ha-Young Choi: +82-2-2610-5168, hychoi@dongyang.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSME 2012 in Jeju.

본 논문에서는 다양한 하중이 작용하는 조건에서 취배수문의 무게 증감이 한계 범위를 벗어나지 않도록 응력과 변형을 최적화하고자 한다. 응력과 변형은 목적함수로 정의하고 제한조건은 무게로 정하였다. 먼저 중심합성계획을 통해 2차 회귀모형의 반응표면을 생성하고, 생성된 근사식들은 다중목적 함수 최적화를 수행하기 위해서 다양한 분야에서 사용되어 그 유용성이 증명된 NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II)에 적용되었다.

2. 취배수문의 구조 및 하중 종류

2.1 취배수문의 구조

400TEU 이상의 큰 용량의 배가 내항으로 들어 올 경우 내항과 외항의 수위차를 일정하게 유지시키기 위해서 워터펌프(Water pump)를 이용해서 수위를 조절한다. 이 때 취배수문은 해수가 드나드는 통로 중간에 감문과 함께 설치되는 장비로써, 수위가 달라질 경우에는 해수 통로를 막고 있던 취배수문이 리프팅(Lifting)되어 해수가 지나들게 되고, 시간이 지난 후 수위가 일정해지면, 다시 하강하게 되어 통로를 막게 되는 구조이다. 형상은 설치 조건에 따라서 다르지만 설치형태는 대체로 Fig. 1과 같다.

2.2 취배수문의 하중조건

취배수문에 작용하는 개별 하중은 정수압, 동수압, 지진동수압, 지진하중 등이 있다. 정수압은 작업 시와 유지보수 시 작용하는 수압이 달라지므로 세분화하였다.

2.2.1 개별하중의 종류

① 작업 시 정수압(Hydrostatic force, operating)

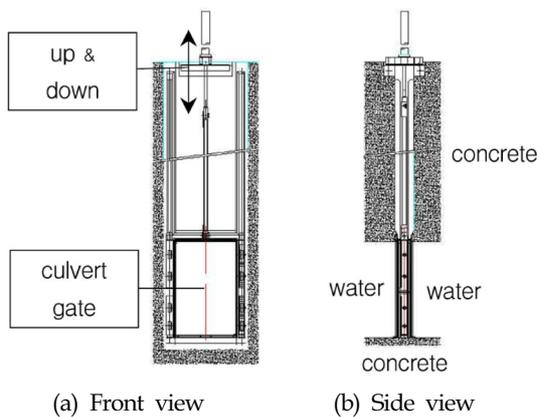


Fig. 1 Layout drawing of valve

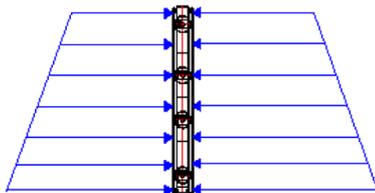


Fig. 2 Hydrostatic pressure in service

작업 시 취배수문을 중심으로 좌우 다른 수압이 작용하기 때문에, 최종적으로 문비에 작용하는 외력은 좌우 수압의 대수적인 차이만큼 작용하게 되며, 수압은 Fig. 2와 같다.

$$P = W_1 \times h_1 - W_2 \times h_2 \tag{1}$$

여기서 P 는 작업 시 취배수문에 작용하는 최대 수압이고, W 는 해수의 단위체적당 중량을 나타내며, h 는 문짝의 상·하류에서의 파랑을 고려한 수위에서 정수압이 작용하는 하부수심까지의 거리를 나타낸다.

② 유지보수 시 정수압(Hydrostatic force, maintenance)

수문(Lock-gate)의 유지보수 시 한쪽 면의 해수는 모두 배수되어야 하므로, 수압은 한쪽 문비(Skin plate)에 대해서만 작용하게 되며, 수압은 Fig. 3과 같다.

$$P = W \times h \tag{2}$$

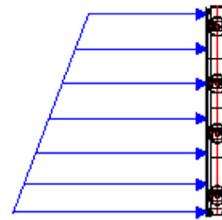


Fig. 3 Hydrostatic pressure out of service

③ 동수압(Hydraulic downpull force)

동수압이 발생하게 되는 원인은 취배수문을 중심으로 좌우 다른 수압이 작용하고 있을 때, 취배수문이 올라가게 되면 해수의 유동에 의해서 위아래 수압차가 발생하고 순간적으로 아래로 당기는 힘이 발생한다. 동수압 발생에 영향을 미치는 인자는 취배수문 하부의 기하학적 형상과 상부를 지나는 유량에 의해서 결정된다(Naudascher et al., 1986; Weaver and Martin, 1980).

$$F = (\alpha_T - \alpha_B) B d \rho (V^2 / p^2) \tag{3}$$

여기서 F 는 Downpull force가 되며, α_T 는 취배수문 상부의 Downpull 계수이고, α_B 는 취배수문 하부의 Downpull 계수, B 는 취배수문의 폭, d 는 취배수문의 깊이, ρ 는 밀도 그리고 V 는 취배수문의 하부를 지나는 유체의 속도를 나타낸다. 식 (3)의 계수들을 구

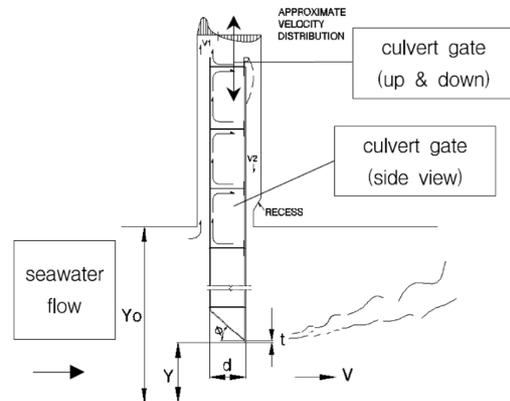


Fig. 4 Diagram of tunnel valve under submerged flow condition (Naudascher et al., 1986)

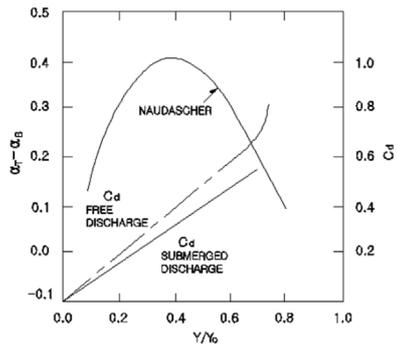


Fig. 5 Resultant downpull and discharge coefficients versus gate opening (Weaver and Martin, 1980)

하기 위해서 Naudascher et al.(1986)의 실험그래프를 사용하고자 한다. Fig. 4는 일반적인 취배수문 구조도를 나타내고 있다. Y 는 유체가 흐르는 통로이므로 고정값이 되고 Y_0 는 취배수문이 상하운동을 하면서 변하는 값이 된다. 유체 유속은 취배수문의 기하학적 요소(d, t, θ)들에 의해서도 영향을 받지만, 여기서는 고려하지 않았다. Fig. 5는 취배수문의 상하운동에 대한 Downfull force계수($\alpha_T - \alpha_B$)변화를 보여주고 있다. 취배수문이 약 40% 정도 개방되었을 때 가장 높은 계수값이 나타내기 때문에 Y/Y_0 가 0.4일 때 Downfull force의 계수 0.4를 이용하여 동수압을 구하였다.

④ 지진동수압(Seismic hydrodynamics)

지진동수압은 지진에 의한 지반운동에 의해서 해수가 동적 움직임을 발생시켜 취배수문에 수압을 발생하므로 동적응답해석(Dynamic response analysis)방법을 수행하여야 한다. 그러나 동적응답해석 시 상당한 시간이 소요되므로 본 논문에서는 이러한 방법대신 동적운동을 정적운동으로 근사한 등가정적방법(Equivalent static method)을 사용해서 외력을 구한다. 이러한 근사화 방법은 Westergaard(1933)에 의해서 제안이 되었으며 식은 (4)와 같다.

$$P_y = \frac{7}{8} \alpha w \sqrt{Hy} \quad (4)$$

여기서 P_y 는 수면으로부터 깊이 y 까지의 수압을 나타내며, α, w, H, y 는 각각 수평지진가속도, 해수의 단위중량, 해수와 접촉하고 있는 취배수문의 높이, 수면으로부터의 깊이를 나타낸다. 식 (4)는 댐(Dam)과 같이 연성(Flexibility)이 거의 없는 물체(Body)에 적용이 되는 식이므로 철 구조물로 이루어진 취배수문에 바로 적용할 수 없다. 그래서 연성을 고려하여 수정된 식 (5)를 사용하며, 이 식은 Westergaard(1933)에 의해서 제시 되었다.

$$P_y = \frac{7}{8} \alpha w \sqrt{H_1 y} \left[MF - \frac{(MF-1)y}{H_1} \right] - \frac{7}{8} \alpha w \sqrt{H_2 y} \left[MF - \frac{(MF-1)y}{H_2} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T < 0.2 \text{sec} & \quad MF = 1 \\ 0.2 \text{sec} < T < 1.0 \text{sec} & \quad MF = 5T \\ 1.0 \text{sec} < T & \quad MF = 5 \end{aligned}$$

여기서 H_1, H_2 는 물과 접촉하고 있는 취배수문의 높이를 나타내며, 아래첨자 1, 2는 취배수문의 외향편, 내향편을 각각 나타낸다. T 는 진동주기이며, MF (Magnification factor)는 지진에 의

한 연성 구조물에 발생하는 가속도비이다. 구조물은 강체(Rigid body)보다 연성일 경우에 가속도에 의한 동적응답은 연성 구조물이 강체 구조물보다 크기 때문에 MF 값을 고려하여 전체동수압을 증가시키게 된다. 진동주기(T)는 유한요소해석을 수행하여 얻었으며 해석결과는 1.35sec이다. 이 결과값에 의해 MF 값은 5로 설정되었다.

⑤ 지진하중(Seismic inertial force)

지진 하중은 지진에 의해서 구조물이 흔들리는 현상으로 외력은 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 여기서 E_f 는 지진하중이고 R, D, g 는 각각 지진구역계수, 위험도 계수, 중력가속도를 나타내며 각각 0.11, 1.4, 그리고 9.8m/s^2 으로 설정하였다.

$$E_f = R \times D \times g \quad (6)$$

2.1.2 하중 조합

개별 하중들(①~⑤)을 모두 구한 후 각각의 개별 하중을 합리적으로 조합하여 조합 하중을 만들어야 한다. 본 논문은 하중조합을 사용환경의 하중조합에 따라서 적합하게 구성하였으며, 하중 조합을 Table 1과 같이 구성하였다. 하중 조합은 기본적으로 취배수문의 자중(Self-weight)과 정수압이 항상 작용하고 있기 때문에 모든 경우에 대해서 고려하였다. 정수압이 작용하고 있는 상태에서 취배수문이 개방(Opening)되면 동수압이 작용하기 때문에 Case 3과 같이 조합하였으며, 정수압 조건에서 지진이 발생할 경우 지진 동수압 및 지진 관성력이 발생하기 때문에 하중 조합을 Case 4와 Case 5와 같이 구성하였다.

Table 1 Analysis parameters

Loads	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Self-weight (valve)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Hydrostatic (operating)	1.0	-	1.0	1.0	1.0
Hydrostatic (maintenance)	-	1.0	-	-	-
Hydraulic downpull force	-	-	1.0	-	-
Seismic Hydrodynamics	-	-	-	1.0	-
Seismic inertial force	-	-	-	-	1.0

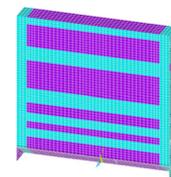


Fig. 6 FEM model using ANSYS (Inman, 2007)

3. 유한요소 해석

Table 1의 5개의 Case에 대해서 유한요소해석을 수행하여 응력값과 변형값을 도출한 후 각 Case 중 가장 큰 값이 나타나는

경우에 대해서 최적화를 진행하였다. 유한요소해석에 사용된 모델은 Fig. 6과 같고, 5개의 Case에 대한 해석결과값(응력과 변형값)은 Table 2와 같다. Table 2에서 Case 4가 응력과 변형값이 가장 크게 발생하였으며 그 결과를 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 7은 정수압+지진동수압(Z dir.)의 하중조합을 이용한 결과를 나타내고 있으며, 유한요소 해석 조건은 피아송비는 0.3, 탄성계수는 2.0904e6kg/cm², 요소(Element)의 종류는 Shell63, 절점(Node)와 요소 수는 각각 8,605개 8,960개로 하였다. 해석결과는 최대응력 2,940kg/cm², 최대변형량(Z dir.) 0.584cm이며 현재 취배수문에 사용되는 재료는 SM490YA로써 항복응력은 3,600kg/cm²이다. 따라서 Case 4의 최대응력이 항복응력을 초과하지 않았기 때문에 취배수문은 탄성변형영역에 존재한다.

Table 2 FEM analysis results

Loads	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Max. stress (kg/cm ²)	1,284	1,345	2,532	2,940	2,342
Max. deformation (z-dir, mm)	0.212	0.227	0.481	0.584	0.422

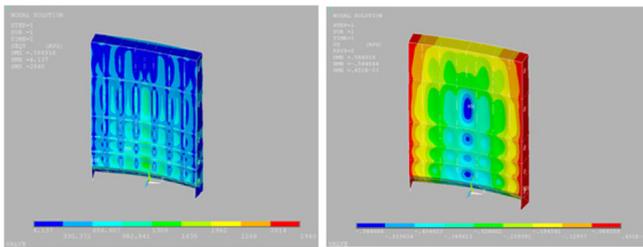


Fig. 7 FEM (finite elements method) analysis result for Case 3 (using ANSYS)

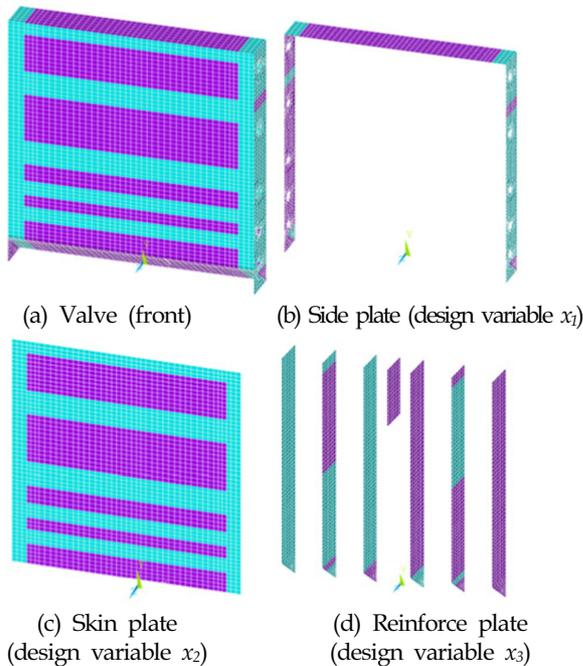


Fig. 8 Design variables

4. 최적 설계

4.1 설계변수 정의

취배수문에는 여러 종류의 플레이트(Plate)가 사용 되지만, 외력에 대한 응력 및 변형이 발생하는 부재는 Fig. 8과 같이 Skin-plate, Reinforce-plate, Side-plate 세가지로 분류할 수 있다. 여기에서, Skin-plate는 취배수문을 중심으로 좌우 수압을 유지하도록 해수 통로를 막는 역할을 하며, Reinforce-plate는 수압을 받고 있는 Skin-plate을 지지하게 된다. 그리고 Side-plate는 휠(Wheel)이 부착되어 있는 부재로써 취배수문이 위아래로 이동할 경우 양측면에 Wheel이 부착된 수직통로를 따라서 이동한다.

4.2 최적설계 정식화

취배수문의 목적함수 및 제한조건함수는 식 (7)과 같이 정의하였다. 아래의 조건식 중 변형량 허용치는 한국수자원공사의 권고치(Korea water resources corporation, 2003)를 참고로 하였다. 그리고 제한조건 최대 무게는 사용 모터의 리프팅(Lifting) 최대 용량인 16ton으로 하였다.

$$\text{Minimize : } \text{von mises stress, deformation} \quad (7)$$

Subjct to :

$$\text{weight} < 16\text{ton}$$

$$\sigma(\text{stress}) < 3,600\text{kg/cm}^2$$

$$D(\text{deformation}) < \text{span}/600 = 12\text{mm}$$

Variables

$$16\text{mm} < x_1 < 22\text{mm}$$

$$14\text{mm} < x_2 < 18\text{mm}$$

$$20\text{mm} < x_3 < 24\text{mm}$$

4.3 최적화 과정

설계변수들과 목적함수, 제한조건함수의 근사식을 생성하기 위해서 먼저, 중심합성계획법을 통해서 설정된 설계변수(두께)들로 유한요소해석을 실행해서 응력과 변형값을 구하게 된다. 반응표면법에 의해 2차 회귀방정식을 구성하고, 이 2차 회귀방정식을 비 지배 분류 유전자 알고리즘(NSGA-II)을 사용하여 목적함수의 최적해를 찾는다. 이 최적해를 유한요소 해석값과 비교하여 정확성을 검증하였다.

4.3.1 중심합성계획법

중심합성계획법은 적은 횟수의 실험으로 곡선을 추정하기 위해서 중심점과 축점을 2^k요인실험에 추가시킨 구조로써, 이 방법의 장점은 2^k요인 실험계획에 의하여 실험을 한 후에 반응표면이 1차 회귀모형으로 적당하지 않을 경우에 2^k요인에 중심점과 축점을 증가시키면 쉽게 2차 회귀모형을 생성할 수 있는 장점이 있다. 총 시험 횟수를 식 (8)에 의해 구할 수 있으며 k는 설계변수이고 n₀은 중심점의 수이다.

$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (8)$$

본 논문에서는 취배수문의 두께 3곳이 설계변수이므로 총 실험횟수는 n=15, 알파값은 1.68로 하였다.

4.3.2 반응표면법

반응표면법은 여러개의 설계 변수가 복합적으로 작용함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 본 논문에서는 2차 회귀모형을 사용하였다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i \leq j} \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

\hat{y} : response $\hat{\beta}$: regression coefficient
 x_i, x_j : design variables

만약, 설계변수(k)가 3개인 경우 추정량에 대한 방정식은 식 (10)과 같다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{33} x_3^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 \quad (10)$$

Table 3과 Table 4을 기반으로 해서 2차 회귀방정식을 만들면 식 (11), (12), (13)과 같다.

① 응력

$$y_{stress} = (5.3846 - 1.3606x_1 - 0.7216x_2 + 0.0497x_3 + 0.1854x_1^2 - 0.2354x_2^2 - 0.1156x_3^2 + 0.2422x_1x_2 + 0.0943x_1x_3 + 0.1783x_2x_3) \times 10^3 \quad (11)$$

② 변위

$$y_{deform} = 4.2513 - 2.4340x_1 - 0.7136x_2 + 0.0464x_3 + 0.0813x_1^2 + 0.0021x_2^2 + 0.0094x_3^2 + 0.4705x_1x_2 + 0.0952x_1x_3 - 0.0197x_2x_3) \times 10^3 \quad (12)$$

③ 무게

$$y_{weight} = (-0.0351 + 2.2184x_1 + 4.9022x_2 + 0.9612x_3 - 4.0391E^{-12}x_1^2 - 3.8036E^{-12}x_2^2 - 8.6759E^{-12}x_3^2 - 0.9212E^{-12}x_1x_2 + 2.3467E^{-12}x_1x_3 - 2.0727E^{-12}x_2x_3) \times 10^3 \quad (13)$$

4.3.3 적합도 평가

중심합성계획법(Na et al., 2005; Park et al., 2005)을 이용하여 반응표면 모델을 구성하였으며, 반응표면 모델의 통계적인 신뢰성을 검증하기 위해서 결정계수 R^2 을 주로 사용한다. 그러나 결정 계수는 그 중요성의 유무와 상관없이 변수가 증가할수록 높아지는 단점을 가지고 있으므로 이를 보완하기 위해 조정결정계수 R^2_{adj} 을 사용한다. 조정결정계수는 불필요한 변수가 추가되었을 때 그 값이 감소함으로써 필요한 변수들만을 선택하는데 유용하게 사용된다. 결정계수는 식 (14)와 같고 n 은 실험횟수이고 p 는 반응표면 모델 계수의 개수이다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (14)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SSE/(n-p)}{SST/(n-1)}$$

4.3.4 최적화 결과

NSGA-II (Deb et al., 2002)는 빠른 엘리트스트 비지배 분류 유전자 알고리즘(Fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm)으로도 불리며, 기존에 사용되던 비지배 분류 알고리즘

Table 3 Central composite design

	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)
1	1.6	1.8	2.4
2	2.2	1.4	2.4
3	2.2	1.8	2.0
4	1.6	1.4	2.4
5	1.6	1.8	2.0
6	2.2	1.4	2.0
7	1.6	1.4	2.0
8	2.2	1.8	2.4
9	2.4	1.6	2.2
10	1.9	1.94	2.2
11	1.9	1.6	2.54
12	1.4	1.6	2.2
13	1.9	1.26	2.2
14	1.9	1.6	1.86
15	1.9	1.6	2.2

Table 4 FEM results

	Stress(kg/cm ²)	Displacement(cm)	Weight(kg)
1	3,110	0.857	14,631
2	2,826	0.658	14,010
3	2,663	0.582	15,586
4	3,274	0.960	12,676
5	3,010	0.865	14,252
6	2,764	0.667	13,631
7	3,150	0.969	12,297
8	2,712	0.575	15,965
9	2,632	0.569	15,242
10	2,810	0.657	15,793
11	2,991	0.715	14,453
12	3,304	1.120	13,019
13	3,024	0.814	12,469
14	2,862	0.730	13,808
15	2,906	0.722	14,131

Table 5 Fitness

f_1		f_2		f_3	
Stress(kg/cm ²)		Deformation(cm)		Weight(kg)	
R^2	R^2_{adj}	R^2	R^2_{adj}	R^2	R^2_{adj}
0.9999	0.9996	0.9971	0.9919	1.0000	0.9999

(Horn et al., 1994)의 단점(계산의 복잡성, 엘리트즘의 부족, 공유 파라미터 지정의 필요성)을 개선한 알고리즘으로 본 논문에서는 세대수 300, 인구수 150으로 설정하였다. 반응표면법에 의해 생성된 목적함수 응력과 변형, 그리고 제한조건함수 무게의 근사식은 식 (13)과 같다. 다중목적함수 응력(f_1)과 변형(f_2)의 최

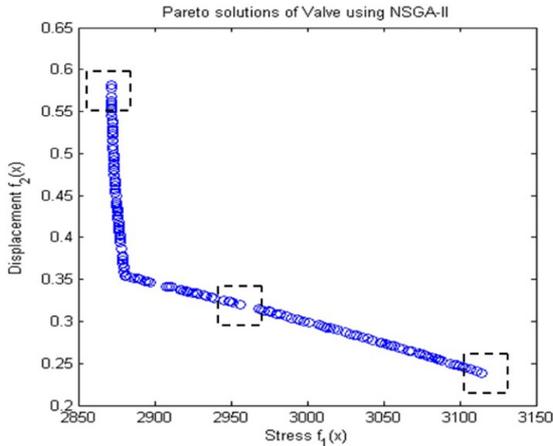


Fig. 9 Result of NSGA-II using Matlab (Attaway, 2009)

Table 6 Compared with NSGA-II and FEM results

	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	f_1 (kg/cm ²)	f_2 (cm)
NSGA-II	Min 1.984	1.812	2.00	2,871	0.581
	Mid 2.140	1.712	2.00	2,938	0.328
	Max 1.684	1.874	2.12	3,114	0.238
FEM	Min 1.984	1.812	2.00	2,914	0.593
	Mid 2.140	1.712	2.00	2,998	0.351
	Max 1.684	1.874	2.12	3,199	0.249

Table 7 Compared with standard and optimization value

	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	Max.Stress (kg/cm ²)	Displacement (cm)	Weight (kg)
Standard	2.20	1.50	2.40	2,940	0.584	14,499
Optimization	2.12	1.78	2.00	2,875 (-2.2%)	0.439 (-24.8%)	15,304 (+5.3%)

적화를 위해 NSGA-II를 적용하였으며, 최적화 결과로 얻은 pareto 해를 Fig. 9에서 보여주고 있다. 이 해의 정확성을 검증하기 위해서 양극점과 중간점을 선택해서 정확성을 비교한 결과는 Table 6과 같이 나타났다.

기존의 취배수문의 기본 두께인 경우와 최적해의 중간값의 두께인 경우를 비교하였으며 Table 7과 같다. 두께의 변화는 x_1 의 경우 2.2cm의 두께에서 2.12cm로 감소, x_2 의 경우는 1.50cm에서 1.78cm로 증가, 그리고 x_3 의 경우 2.40cm에서 2.00cm로 변경되었다. 부재 두께에 따른 응력과 변형량을 비교해 보면 기존의 기본 두께에서는 2,940kg/cm²와 0.584cm로 나타났으며, 최적화를 통해서 나온 값은 각각 2,875kg/cm²와 0.439cm로 나타났다. 그리고 취배수문의 전체 무게 변화량은 기본 두께에서 14,499kg, 최적화가 이루어진 상태에서 15,304kg으로 나타났으며, 제한조건을 만족하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 취배수문의 응력과 변형을 최적화하기 위해서

응력과 변형을 다중목적함수로 설정하고 무게를 제한조건함수로 설정하여 근사최적설계를 하였다. 중심합성계획법을 이용하여 반응표면을 생성하였으며 목적함수, 제한조건함수 모두 99%이상의 높은 적합도를 나타내었다. 반응표면법에 의해 구한 2차 근사모델과 NSGA-II를 이용하여 다중목적함수를 최적화하여 Pareto 해를 얻었으며, 이 Pareto 해 중에서 중간에 해당하는 해를 FEM 해석 결과와 비교하였다. 응력과 변형은 각각 98.5%, 97.9% 정도의 좋은 일치를 보여 주었으며 제한조건을 만족하면서 취배수문의 응력과 변형량을 각각 2.2%와 24.8%를 감소시켰다. 본 연구는 취배수문과 같은 대형 구조물의 다중목적 최적설계에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다. 해양 구조물은 한번 설치된 후 교체시까지 약 20~30년을 사용하므로, 본 연구를 통한 응력 및 변형량 감소는 구조물의 사용 수명을 연장에 영향을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

Attaway, S., 2009. Matlab : A Practical Introduction to Programming and Problem. Elsevier Science & Technology Books.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., 2002. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transaction On Evolutionary Computation, 6(2), 182-197.

Horn, J., Nafploitis, N., Goldberg, D., 1994. A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. Proceeding of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, 82-87.

Hur, D.S., Kim, C.H., Yeom, G.S., Kim, D.S., 2005. Nonlinear Dynamic Responses among Wave, Submerged Breakwater and Seabed. Journal of Ocean Engineering and Technology, 19(6), 35-43.

Inman, D.J., 2007. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS : Thoery and Application with ANSYS. 3th ed., Pearson Higher Education.

Korea Water Resources Corporation., 2003. Design Standard of Steel Facilities.

Na, S.Y., Song, J.H., Huh, H., Kim, H.S., 2005. Design Optimization of Auto-body Member for Crashworthiness Enhancement with the Response Surface Method. Transactions of KSAE, 13(4), 81-89.

Naudascher, E., Rao, P.V., Richter, A., Vargas, P., Wonik, P., 1986. Prediction and Control of Downpull on Tunnel Gates. Proc. of the ASCE Journal of Hydr. Engineering, 112(5), 392-416.

Park, J.S., Lee, D.J., Im, B., 2005. The Study for Construction of the Improved Optimization Algorithm. Proc. of KSAE, 13(3), 22-33.

Weaver, D.S., Martin, W.W., 1980, Hydraulic model study for the design of the Wreck Cove control gates, Proc. of the Canadian Journal of Civil Engineering, 7(2), 304-314.

Westergaard, H.M., 1933. Water Pressure on Dam During Earthquake. Transactions of ASCE, 98(2), 418-433.