

컴플렉스법에 의한 수문 유압실린더의 최적 설치점 설계

이 성 래*

건양대학교 기계공학과

Design of Optimal Locating Points of the Hydraulic Cylinder Actuating a Sluice Gate Using the Complex Method

Seong-Rae Lee*

Department of Mechanical Engineering, Konyang University, Chungnam 320-711, Korea

(Received 10 June 2005 / Accepted 13 August 2005)

Abstract : The hydraulic cylinder is used for actuating the sluice gate which controls the volume of water in the reservoir. The locating points of hydraulic cylinder are restricted to limited space and determined to minimize the cylinder force necessary for actuating the sluice gate. Generally, the head end point of cylinder is fixed at underground and the rod end point of cylinder is connected to the gate plate when it is fully opened. Therefore there exist three parameters to be determined to minimize the cylinder force in the operation range of sluice gate. The optimal locating points of hydraulic cylinder are obtained using the complex method that is one kind of constrained direct search method.

Key words : Sluice gate(수문), Hydraulic cylinder(유압실린더), Complex method(컴플렉스법), Constrained direct Search(제약직접탐색)

Nomenclature

A : 실린더와 수문의 연결점
 A' : 수문회전각이 0도일 때의 실린더와 수문의 연결점
 C : 지지실린더나 지지링크의 지면고정 회전 점
 $f(x)$: 목적함수
 F_N : A점 편에서의 반력의 법선성분
 F_p : 수압에 의해 수문에 가해지는 전체 힘
 F_T : A점 편에서의 반력의 접선성분
 g : 중력가속도
 H : 수문 높이
 H_s : 물이 찬 수문 상단점에서 수문선을 따라

수문 회전한지점 O까지의 길이
 l_{cm} : 수문 회전한지점 O에서 수문 무게중심점까지의 길이
 l_{cp} : 수문 회전한지점 O에서 수압중심점까지의 길이
 l_{CA} : 한지점 C에서 한지점 A까지의 길이
 l_{OA} : 한지점 O에서 한지점 A까지의 길이
 l_{OC} : 한지점 O에서 한지점 C까지의 길이
 M_{gate} : 수압과 수문 자중에 의해 시계방향으로 수문에 가해지는 전체 모멘트
 M_p : 수압에 의해 시계방향으로 수문에 가해지는 모멘트
 M_{Wg} : 수문 자중에 의해 시계방향으로 수문에 가해지는 모멘트
 N : 파라미터 벡터의 요소수

*To whom correspondence should be addressed.
srlee@konyang.ac.kr

- O : 수문의 회전점
- p : 수압력
- R_{cyl} : 실린더 반력
- s : 물이 찬 수문 상단점으로부터 수문 회전
 힌지점 O 까지의 길이 좌표
- W : 수문 폭
- W_g : 수문 자중
- \underline{x} : 목적함수의 파라미터 벡터
 $\underline{x} = [x_C \ y_C \ x_{A'}]^T$
- (x_C, y_C) : 힌지점 C 점의 좌표
- $(x_{A'}, 0)$: 힌지점 A' 점의 좌표
- α : 선분 OA' 와 선분 OC 의 사이각
- γ : 선분 AO 와 선분 AC 의 사이각
- ρ : 물의 밀도
- θ : 수문 회전각(수평면에서 시계반대방향으
 로의 각도)

1. 서론

농수원이나 식수원으로 사용되는 담수보의 물을 효과적으로 관리하기 위해 보수문이 사용된다. 보수문에는 무동력 자동 보수문과 유압동력식 보수문이 있으나 정확한 물관리를 위해서는 유압동력식 보수문이 주로 사용된다. 현재 사용되는 월류형 유압동력식 보수문의 종류는 Fig. 1과 Fig. 2와 같다.

Fig. 1은 유압실린더 끝이 직접 수문에 힌지로 연결되어 있다. 유압실린더가 신장하면 수문은 반시계방향으로 회전하여 보수문이 닫히며 유압실린더가 수축하면 수문은 시계방향으로 회전하여 보수문이 열리게 된다. Fig. 2는 유압실린더 끝과 지지링크가 힌지롤러로 연결된 상태로 롤러는 수문면에 접촉하면서 회전한다. Fig. 1과는 반대로 유압실린더가 수축하면 수문은 반시계방향으로 회전하여 보수문이 닫히게 되며 유압실린더가 팽창하면 수문은 시계방향으로 회전하여 보수문이 열린다. 수문의 폭이 2.5m, 수문의 높이가 2.0m, 수문의 자중이 13720N(1400kgf), 수문이 0도~60도인 범위에서 회전하는 경우, 수압 및 수문 자중에 의한 최대회전모멘트는 수문의 회전각이 60도일 때 35153N·m(3587 kgf·m)이다. 유압실린더의 설치점인 C점과 A점의 위치에 따라 수문의 회전작동 중 유압실린더

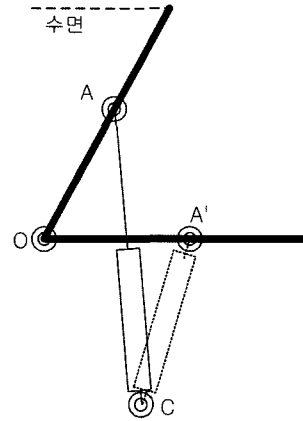


Fig. 1 Schematics of the water gate using a cylinder

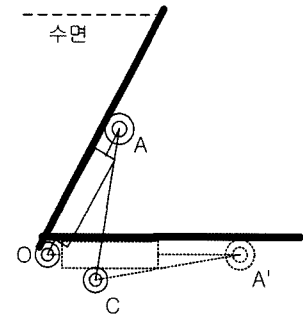


Fig. 2 Schematics of the water gate using a cylinder and a support link

에 작용하는 최대반력값이 결정된다. 유압실린더에 작용하는 최대반력값이 최소가 되는 C점과 A점의 위치를 결정하기 위해 직접탐색기법의 일종인 컴플렉스법(complex method)을 적용하였다.^{1,2)}

2. 유압작동식 수문의 수학적 모델

2.1 유압실린더 1개를 사용한 경우³⁾

Fig. 3은 1개의 유압실린더로써 작동되는 수문의 기하학적 구조도를 보여주며 Fig. 4는 수문 평판과 힌지핀에 대한 자유물체도를 나타낸다. Fig. 3에서 선분 CA' 는 실린더가 수축된 상태를 나타내며 선분 CA 는 실린더가 신장된 상태를 나타낸다.

수문 평판에 작용하는 수압은 다음 식으로 표현된다.

$$p(s) = \rho \cdot g \cdot s \cdot \sin\theta \quad (1)$$

수압에 의해 수문에 가해지는 전체 힘은 다음과 같이 구해진다.

$$F_p = \int_0^{H_s} p(s) \cdot W \cdot ds = \frac{1}{2} \rho \cdot g \sin \theta \cdot W \cdot H_s^2 \quad (2)$$

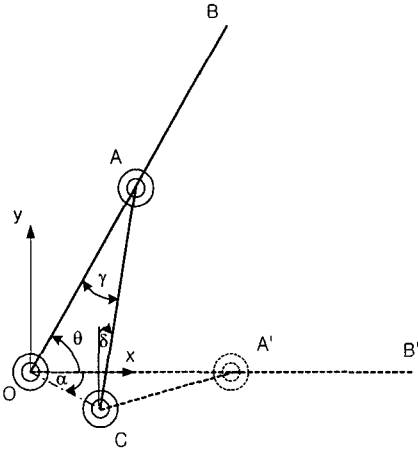


Fig. 3 Geometrical structure of the water gate using a cylinder

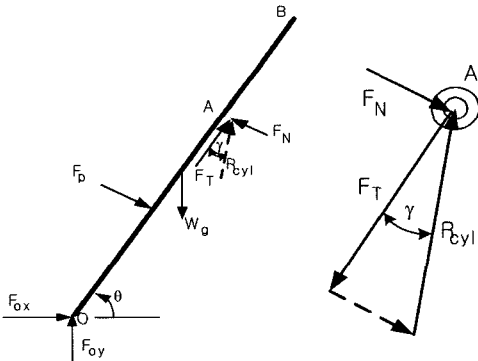


Fig. 4 Freebody diagram of the water gate using a cylinder (a) gate plate (b) pin

수압에 의해 수문을 시계방향으로 회전시키는 모멘트는 다음 식으로 표현된다.:

$$M_p = \int_0^{H_s} (H_s - s) \cdot p(s) \cdot W \cdot ds \quad (3)$$

$$M_p = \frac{1}{6} \rho \cdot g \cdot \sin \theta \cdot W \cdot H_s^3 = l_{cp} \cdot F_p \quad (4)$$

$$l_{cp} = \frac{1}{3} H_s \quad (5)$$

수문자중에 의해 수문을 시계방향으로 회전시키는 모멘트는 다음과 같다.

$$M_{Wg} = W_g \cdot l_{cm} \cdot \cos \theta \quad (6)$$

따라서 수압 및 수문자중에 의해 수문을 시계방향으로 회전시키는 전체 모멘트는 다음과 같다.

$$M_{gate} = l_{cp} \cdot F_p + W_g \cdot l_{cm} \cdot \cos \theta \quad (7)$$

힌지점 O를 기준으로 수압 및 수문 자중에 의해 발생하는 모멘트와 힌지점 A에서의 반력의 법선 성분 F_N 에 의한 모멘트는 평형을 이루며 다음 식으로 표현된다.

$$l_{cp} F_p + W_g l_{cm} \cos \theta = l_{OA} F_N \quad (8)$$

$$F_N = \frac{W_g l_{cm} \cos \theta + F_p l_{cp}}{l_{OA}} \quad (9)$$

수압 및 수문 자중에 의해 발생하는 힌지점 A에서의 반력의 접선 성분은 다음 식으로 표현된다.

$$F_T = R_{cyl} \cos \gamma \quad (10)$$

식 (9) 및 식 (10)에 의해 유압실린더에 작용하는 압축력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$R_{cyl} = \frac{F_N}{\sin \gamma} = \frac{W_g l_{cm} \cos \theta + F_p l_{cp}}{l_{OA} \cdot \sin \gamma} \quad (11)$$

식 (11)에 나타난 각도 γ 는 수문회전각 θ 의 변화에 따라 변화하며 다음과 같이 구한다. 먼저 각도 θ 의 변화에 따른 길이 l_{CA} 를 식 (12), 식 (13)으로 구한다.

$$l_{CA}^2 = l_{OA}^2 + l_{OC}^2 - 2l_{OA}l_{OC}\cos(\theta + \alpha) \quad (12)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(-\frac{y_C}{x_C} \right) \quad (13)$$

그리고 식 (14)에 의해 각도 γ 를 구한다.

$$\cos \gamma = \frac{l_{OA}^2 + l_{CA}^2 - l_{OC}^2}{2l_{OA} \cdot l_{CA}} \quad (14)$$

2.2 유압실린더 1개와 지지링크를 사용한 경우³⁾

Fig. 5는 1개의 유압실린더와 1개의 지지링크로써 작동되는 수문의 기하학적 구조도를 보여주며 Fig. 6은 수문 평판과 힌지핀에 대한 자유물체도를

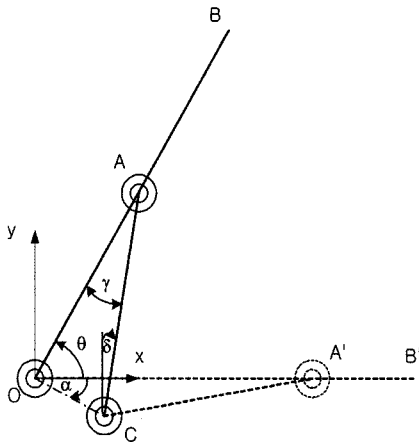


Fig. 5 Geometrical structure of the water gate using a cylinder and a support link

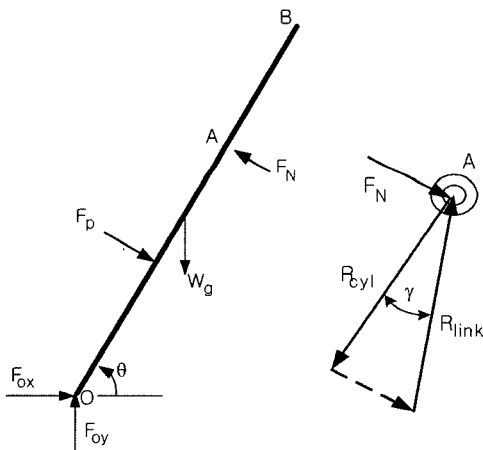


Fig. 6 Freebody diagram of the water gate using a cylinder whose rod end is sliding under the gate plate. (a) gate plate (b) pin

나타낸다. Fig. 5에서 선분 CA'와 선분 CA는 지지링크를 나타내며 선분 OA'와 선분 OA는 각각 실린더의 신장된 상태와 수축된 상태를 나타낸다.

수문 평판에 작용하는 수압, 수압에 의해 수문에 가해지는 전체 힘, 수압에 의해 수문을 시계방향으로 회전시키는 모멘트, 수문자중에 의해 수문을 시계방향으로 회전시키는 모멘트, 수압 및 수문자중에 의해 수문을 시계방향으로 회전시키는 전체 모멘트는 식 (1)~식 (7)에 의해 구해진다.

한지점 O를 기준으로 수압 및 수문 자중에 의해 발생하는 모멘트와 롤러 A 점에서의 반력의 법선

성분 F_N 에 의한 모멘트는 평형을 이루며 평형식에 의해 롤러 A점에서의 반력의 법선 성분은 다음 식으로 표현된다.

$$F_N = \frac{W_g l_{cm} \cos \theta + l_{cp} F_p}{l_{OA}} \quad (15)$$

롤러의 구름저항이 없다고 가정하면 수문 자중과 수압에 의해 발생하는 롤러 A 점에서의 반력의 접선 성분은 0이 된다.

$$F_T = 0 \quad (16)$$

이에 따라 유압실린더에 작용하는 인장력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$R_{cyl} = \frac{F_N}{\tan \gamma} = \frac{W_g l_{cm} \cos \theta + F_p l_{cp}}{l_{OA} \cdot \tan \gamma} \quad (17)$$

식 (17)에 나타난 각도 γ 는 수문회전각 θ 의 변화에 따라 변하며 다음과 같이 구한다. 먼저 각도 θ 의 변화에 따른 길이 l_{OA} 를 식 (18)에 나타난 2차방정식을 풀어 구한다.

$$l_{OA}^2 - 2l_{OA}l_{OC}\cos(\theta + \alpha) - l_{CA}^2 + l_{OC}^2 = 0 \quad (18)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{y_C}{x_C}\right) \quad (19)$$

그리고 식 (20)에 의해 각도 γ 를 구한다.

$$\cos \gamma = \frac{l_{OA}^2 + l_{CA}^2 - l_{OC}^2}{2l_{OA} \cdot l_{CA}} \quad (20)$$

3. 유압실린더의 최적설치점 설계

3.1 유압실린더 1개를 사용한 경우

Fig. 1과 Fig. 3에 표시된 유압실린더의 설치점인 C점과 A점의 위치, 수문의 회전각 θ 에 따라 유압실린더에 작용하는 반력값이 결정된다. 수문회전각 (0~60도)에 따른 실린더 반력 중에서 가장 큰 값이 최소가 되도록 C점과 A점의 위치를 결정하기 위해 직접탐색기법의 일종인 콤플렉스법(complex method)을 적용하였다.^{1,2)} C점의 좌표는 (x_C, y_C) 로 정의되는 지면에 고정된 좌표이며 A점의 좌표는 수문의 회전각이 0도일 때 $(x_A, 0)$ 로 정의된다. 결국 유압실린더의 최적설치점을 설계하는 것은 3개의 파라미

터, x_C, y_C, x_A 를 구하는 것이다.

(1) 목적함수

수문의 폭이 2.5 m, 수문의 높이가 2.0 m, 수문의 자중이 13720N, 수문이 0도~60도인 범위에서 회전하는 경우, 콤플렉스법에 사용된 목적함수는 식 (21)과 같다. 식 (11)과 식 (21)에서 목적함수가 수식으로 표현되기 어렵다는 사실을 알 수 있다.

$$f(x) = \{\text{수문회전각}(0\sim 60)\text{에 따른 매 각도에서의 실린더 반력 중에서 가장 큰 값}\} \quad (21)$$

(2) 설계 변수

목적함수값을 최소화시키기 위해 총 3개의 설계 변수값을 변화시켰으며 해당 설계변수는 C점의 좌표(x_C, y_C)와 수문의 회전각이 0도일 때의 A점의 좌표($x_A, 0$)로서 설계변수의 변화 범위는 다음과 같이 제한시킨다.

$$0.1 \leq x_C \leq 2.0[\text{m}], -1.0 \leq y_C \leq -0.1[\text{m}]$$

$$0.2 \leq x_A \leq 1.8[\text{m}]$$

(3) 제약함수

수문의 회전 범위에서 실린더의 최대길이와 최소길이의 비가 1.6 이하이도록 설계변수를 제약한다.

$$1.0 \leq \frac{l_{CA_{\max}}}{l_{CA_{\min}}} \leq 1.6 \quad (22)$$

(4) 콤플렉스법의 알고리즘

1) 설계변수의 개수 3의 2배에 해당하는 6개의 유용한 점들로 구성된 점 그룹을 형성한다. 그룹에 속하는 각 점은 식 (23)에 나타난 것처럼 3개의 설계변수로 구성된다.

$$\underline{x} = [x_C \ y_C \ x_A]^T \quad (23)$$

2) 6개의 점 중에서 목적함수값이 최대인 점을 찾는다.

3) Fig. 7에 나타난 것처럼 2)에서 구한 점, \underline{x}^R 을 나머지 5개의 평균점, \bar{x} 의 건너편 점, $\underline{x}^m = \bar{x} + \alpha(\bar{x} - \underline{x}^R)$ 으로 이동시킨다. 여기서 α 값은 1.3을 사용하였다.

4) 이동된 점, \underline{x}^m 의 목적함수값, $f(\underline{x}^m)$ 이 2)에서 구한 최대목적함수값, $f(\underline{x}^R)$ 보다 작지 않으면 최대 목적함수값보다 작아질 때까지 \underline{x}^m 의 현 위치에서

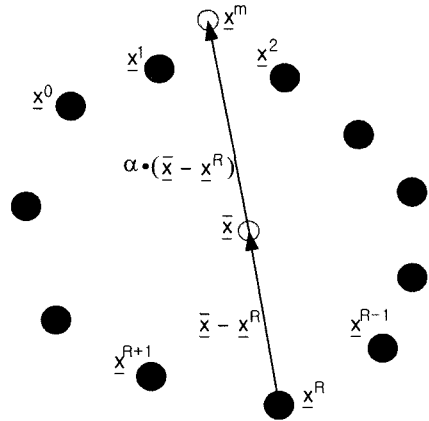


Fig. 7 Search trajectory of complex method

현 위치와 Fig. 7에 나타난 평균점, \bar{x} 의 중간점으로 이동시킨다. \underline{x}^m 의 이동된 점이 유용한 점이 아니면 유용한 점이 될 때까지 \underline{x}^m 의 이동 후 현 위치에서 현 위치와 \bar{x} 의 중간점으로 다시 이동시킨다.

5) 6개의 점이 모두 기준 미소반경, 0.0005 이내에 밀집되어 있고 동시에 6개의 점 각각에 대한 목적함수 값의 차이가 미소기준값, 0.00001 이내에 있으면 종료시킨다. 종료조건이 만족되지 않으면 2)로 간다.

(5) 최적 설계 결과

콤플렉스법에 의한 최적설계변수의 탐색 프로그램은 MATLAB⁴⁾으로 작성하였다. 물론 MATLAB 내에는 콤플렉스법에 관련된 내장함수가 없으며 모든 탐색 프로그램은 자체적으로 작성하였다. 최적 설계변수의 탐색과정이 Fig. 8에 잘 나타나 있으며 탐색회수는 294회이며 탐색 결과는 다음과 같다.

$$x_C = 0.725\text{m}, y_C = -0.175\text{m}, x_A = 1.800\text{m}$$

실린더의 최적설치 위치에서 수문의 작동 중 발생하는 최대 실린더 반력은 $R_{cyl} = 47559\text{N}(4853\text{kgf})$ 이 되며 수문회전각(0~60도)에 대한 실린더의 최대길이와 최소길이의 비는 1.60이다. 최적 파라미터값을 적용하여 수문이 완전히 열린 상태(수문각 0도)에서 수문이 완전히 닫힌 상태(수문각 60도)로 될 때까지의 유압실린더 반력을 Fig. 9의 상단에 나타냈고 실린더 길이를 Fig. 9의 하단에 나타냈다.

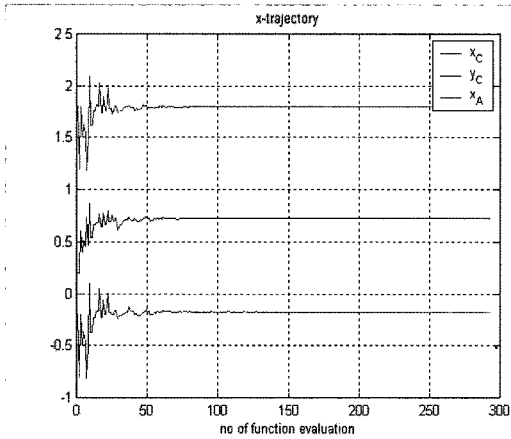


Fig. 8 Trajectory of design parameters

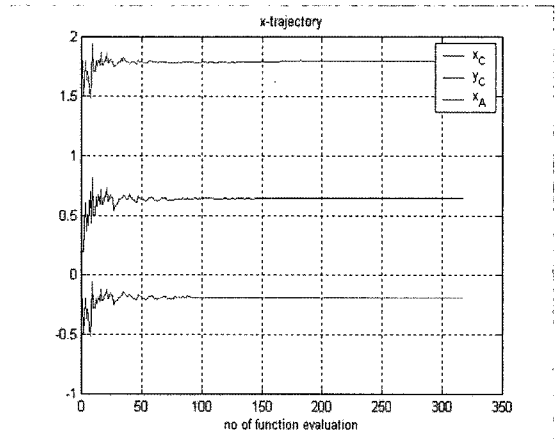


Fig. 10 Trajectory of design parameters

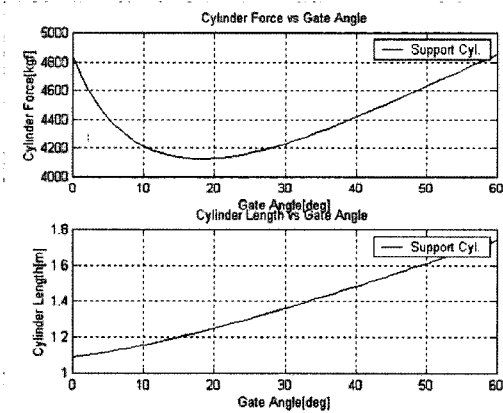


Fig. 9 (1) Cylinder force (2) Cylinder length

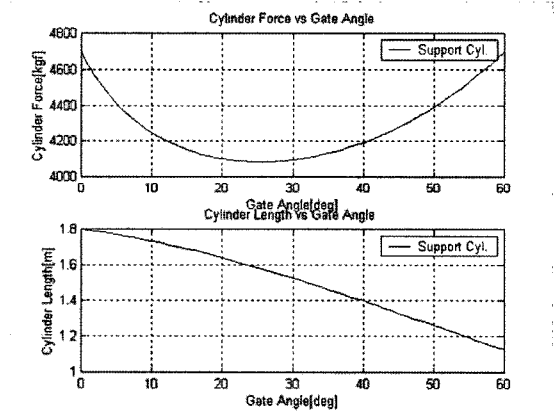


Fig. 11 (1) Cylinder force (2) Cylinder length

3.2 유압실린더 1개와 지지링크를 사용한 경우

Fig. 2와 Fig. 5에 표시된 지지링크의 설치점인 C 점과 A점의 위치, 수문의 회전각 θ 에 따라 유압실린더에 작용하는 반력값이 결정된다. 3.1절과 마찬가지로 수문회전각(0~60도)에 따른 실린더 반력 중에서 가장 큰 값이 최소가 되도록 C점과 A점의 위치를 결정하기 위해 직접탐색기법의 일종인 컴플렉스법 (complex method)을 적용하였다.^{1,2)} C점의 좌표는 (x_C, y_C) 로 정의되는 지면에 고정된 좌표이며 A점의 좌표는 수문의 회전각이 0도일 때 $(x_A, 0)$ 로 정의된다. 결국 유압실린더 및 보조링크의 최적설치점을 설계하는 것은 3개의 파라미터, x_C, y_C, x_A 를 구하는 것이다.

목적함수, 설계변수, 제약함수, 컴플렉스법의 알고리즘은 3.1절과 동일하며 최적설계결과 최적설계변수의 탐색과정이 Fig. 10에 잘 나타나 있으며 탐색 회수는 318회이며 탐색 결과는 다음과 같다.

$$x_C = 0.647m, y_C = -0.191m, x_A = 1.800m$$

이 경우에 수문의 작동 중 발생하는 최대 실린더 반력은 $R_{cyl} = 46021N(4696kgf)$ 가 되며 수문회전각 (0~60도)에 대한 실린더의 최대길이와 최소길이의 비는 1.60이다.

최적 파라미터값을 적용하여 수문이 완전히 열린 상태(수문각 0도)에서 수문이 완전히 닫힌 상태(수문각 60도)로 될 때까지의 유압실린더 반력을 Fig. 11의 상단에 나타냈고 실린더 길이를 Fig. 11의 하단에 나타냈다.

4. 결론

수문의 폭이 2.5 m, 수문의 높이가 2.0 m, 수문의 자중이 13720N(1400kgf)인 답수보 수문을 0도~60도 인 범위에서 회전시키는 경우, 수압 및 수문자중에 의한 최대회전모멘트는 수문의 회전각이 60도일 때 35153N·m(3587 kgf·m)가 된다. 수문을 회전시키기 위해 유압실린더가 사용되는데 유압실린더의 설치 위치에 따라 유압실린더에 작용하는 최대반력값이 크게 변한다. 유압실린더에 작용하는 최대반력값이 최소가 되도록 하는 유압실린더의 설치 위치를 결정하기 위해 직접탐색기법의 일종인 콤플렉스법(complex method)을 적용하였다.

실린더 1개를 사용하는 수문작동방식에서는 실린더의 최적설치위치에서 실린더에 작용하는 최대반력값이 47559N(48535kgf)로 나타났으며 실린더 1개와 지지링크 1개를 사용하는 수문작동방식에서는 실린더와 지지링크의 최적설치위치에서 실린더에 작용하는 최대반력값이 46021N(4696kgf)로 나타났다.

유압실린더의 최적설치점을 탐색하는 방법은 유

압실린더를 사용하는 중장비 차량(적재함 로더, 덤프트럭 등)에서 유압실린더에 작용하는 최대반력값이 최소가 되도록 유압실린더의 설치 위치를 결정하는데 적용될 수 있다.

References

- 1) G. V. Reklaitis, A. Ravindran and K. M. Ragsdell, *Engineering Optimization Methods and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp.261-286, 1983.
- 2) S. R. Lee, "Lead-Lag Controller Design of Direct Drive Servo Valve Using Complex Method," *Transactions of the KSME*, Vol.28, No.11, pp.1719-1726, 2004.
- 3) S. R. Lee, "Design of Hydraulic Cylinder Type Sluice Gate," *Industry-University Consortium Research Report*, 2004.
- 4) B. Shahian and M. Hassul, *Control System Design Using MATLAB*, Prentice Hall, pp.189-192, 1993.