

# 작동력을 최소화시키는 순차작동-유압실린더식 수문의 설계

이 성래<sup>†</sup>

## Design of the Sequentially Operated-Hydraulic Cylinders Type Sluice Gate Minimizing the Operating Force

Seong-Rae Lee

**Key Words:** Sluice Gate(수문), Hydraulic Cylinders(유압실린더), Sequential operation(순차작동), Complex Method(컴플렉스법)

### Abstract

The hydraulic cylinder is used for actuating a sluice gate which controls the volume of water in the reservoir. Generally, the one cylinder type is used to operate the sluice gate. In order to reduce the required cylinder force to operate the sluice gate significantly, the sequentially operated-hydraulic cylinders type is designed and the optimal locating points of cylinders are searched using the complex method that is one kind of constrained direct search method.

### 기호설명

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

$l_{cm}$ : 수문 회전한지점 O 에서 수문 무게중심점 까지의 길이  
 $l_{cp}$ : 수문 회전한지점 O 에서 수압중심점까지의 길이  
 $l_{CA}$ : 한지점 C 에서 한지점 A 점까지의 길이  
 $l_{OA}$ : 한지점 O 에서 한지점 A 점까지의 길이  
 $l_{OC}$ : 한지점 O 에서 한지점 C 점까지의 길이  
 $M_{gate}$ : 수압과 수문 자중에 의해 시계방향으로 수문에 가해지는 전체 모멘트  
 $M_p$ : 수압에 의해 시계방향으로 수문에 가해지는 전체 모멘트  
 $M_{Hg}$ : 수문 자중에 의해 시계방향으로 수문에 가해지는 전체 모멘트  
 $N$ : 파라미터 벡터의 요소수  
 $O$ : 수문의 회전점  
 $p$ : 수압력  
 $R_{cyl1}$ : 지지실린더 반력  
 $R_{cyl2}$ : 슬라이딩실린더 반력  
 $s$ : 물이 찬 수문 상단점으로부터 수문 회전한 지점 O 까지의 길이 좌표

<sup>†</sup> 정회원, 건양대학교 기계공학과

E-mail : srlee@konyang.ac.kr

TEL : 041-730-5191

FAX : 041-736-4079

$W$ : 수문 폭

$W_g$ : 수문 자중

$x$ : 목적함수의 파라미터 벡터

$$x = [x_C \ y_C \ x_{A'}]^T$$

$(x_C, y_C)$ : 힌지점 C 점의 좌표

$(x_{A'}, 0)$ : 힌지점 A' 점의 좌표

$\alpha$ : 선분OA'와 선분OC의 사이각

$\gamma$ : 선분AO와 선분AC의 사이각

$\rho$ : 물의 밀도

$\theta$ : 수문 회전각(수평면에서 시계반대방향으로의 각도)

### 1. 서론

농수원이나 식수원으로 사용되는 담수보의 물을 효과적으로 관리하기 위해 보수문이 사용되며 보수문의 작동을 위해 유압실린더가 주로 사용된다. 현재 사용되는 유압동력식 보수문의 종류는 Fig. 1과 Fig. 2와 같다. Fig. 1은 유압실린더 끝이 직접 수문에 힌지로 연결되어 있다. 유압실린더가 팽창하면 수문은 반시계방향으로 회전하여 보수문이 닫히며 유압실린더가 수축하면 수문은 시계방향으로 회전하여 보수문이 열리게 된다. Fig. 2는 유압실린더 끝과 지지링크가 힌지롤러로 연결된 상태로 물러는 수문면에 접촉하면서 회전한다. Fig. 1과는 반대로 유압실린더가 수축하면 수문은 반시계방향으로 회전하여 보수문이 닫히게 되며 유압실린더가 팽창하면 수문은 시계방향으로 회전하여 보수문이 열린다. Fig. 1과 Fig. 2에서 C점의 위치가 오른쪽으로 이동할 수 있다면 선분 OA와 선분 CA의 각도가 커지므로 그만큼 수문을 작동시키는데 필요한 실린더력이 감소한다. 그러나 실린더의 길이 변화에는 제한이 따르기 때문에 C점의 위치를 오른쪽으로 이동시키는 데는 제한이 따른다. 이러한 제한을 완화시키기 위해 Fig. 3에 나타난 순차작동-실린더식 수문을 설계하였다. 순차작동-실린더식 수문에서 유압실린더에 작용하는 최대반력값이 최소가 되는 실린더의 설치위치를 결정하기 위해 직접탐색기법의 일종인 콤플렉스 방법(complex method)<sup>(1)</sup>을 적용하였고 최적설치위치에서의 실린더력을 구하였다.

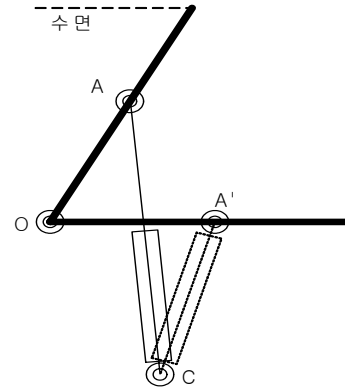


Fig. 1 Schematics of the water gate using a cylinder

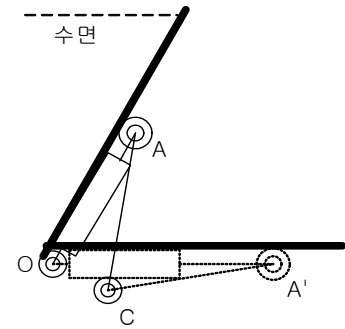


Fig. 2 Schematics of the water gate using a cylinder and a support link

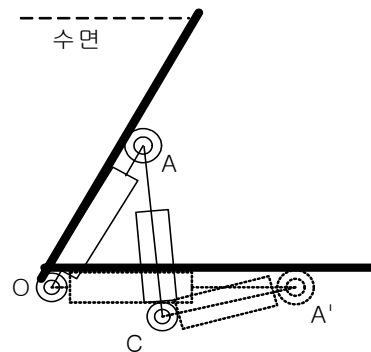


Fig. 3 Schematics of the water gate using the sequentially operated two cylinders

### 2. 순차작동-유압실린더식 수문의 수학적 모델<sup>(2)</sup>

Fig. 4는 2개의 유압실린더로써 순차작동되는 수문의 유압회로도를 보여준다. Fig. 4에 나타난 유압회로도에서 수문의 상승(닫힘)시에는 지지실

린더가 먼저 완전히 전진하여 수문을 0도에서 중간각도까지 상승시키고(시계반대방향으로 회전) 다음에는 슬라이딩 실린더가 완전히 후퇴함으로써 수문을 중간각도에서 60도 정도까지 상승시킨다(시계반대방향으로 회전). 반대로 수문의 하강(열림)시에는 슬라이딩 실린더가 먼저 완전히 전진함으로써 수문을 60도에서 중간각도까지 하강시킨다(시계방향으로 회전). 다음에는 지지실린더가 완전히 후퇴하여 수문을 중간각도에서 0도까지 하강시킨다(시계방향으로 회전). 여기서 중간각도는 설계자에 의해 임의로 설정된다.

Fig. 5는 수문의 기하학적 구조도를 나타내며 Fig. 6은 수문 평판과 힌지핀에 대한 자유물체도를 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.

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

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.

$$M_{gate} = \frac{1}{6} \rho \cdot g \cdot W \cdot H_s^3 \cdot \sin \theta + W_g \cdot l_{cm} \cdot \cos \theta \quad (7)$$

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

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

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

수압 및 수문 자중에 의해 발생하는 롤러 접촉

점 A에서의 반력의 접선 성분은 0이다.

$$F_T = 0 \quad (10)$$

식(9)와 Fig.6의 자유물체도에서 지지실린더(선분CA)에 작용하는 압축력과 슬라이딩실린더(선분OA)에 작용하는 인장력은 각각 식(11), 식(12)로 표현된다.

$$R_{cyl1} = \frac{F_N}{\sin \gamma} = \frac{W_g l_{cm} \cos \theta + F_p l_{cp}}{l_{OA} \cdot \sin \gamma} \quad (11)$$

$$R_{cyl2} = \frac{F_N}{\tan \gamma} = \frac{W_g l_{cm} \cos \theta + F_p l_{cp}}{l_{OA} \cdot \tan \gamma} \quad (12)$$

식(11), 식(12)에 나타난 각도  $\gamma$ 는 수문회전각  $\theta$ 의 변화에 따라 변하며 다음과 같이 구한다. 먼저 수문회전각이 0도~중간각도인 범위에서는 길이  $l_{OA}$ 는 고정되며 가변길이  $l_{CA}$ 를 식(13), 식(15)에 의해 구한다. 수문회전각이 중간각도~60도인 범위에서는 길이  $l_{CA}$ 는 고정되며 가변길이  $l_{OA}$ 를 식(14)에 나타난 2차방정식을 풀어서 구한다.

$$l_{CA}^2 = l_{OA}^2 + l_{OC}^2 - 2 \cdot l_{OA} \cdot l_{OC} \cdot \cos(\theta + \alpha) \quad (13)$$

$$l_{OA}^2 - 2 \cdot l_{OA} \cdot l_{OC} \cdot \cos(\theta + \alpha) - l_{CA}^2 + l_{OC}^2 = 0 \quad (14)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{y_C}{x_C}\right) \quad (15)$$

그리고 식(16)에 의해 각도  $\gamma$ 를 구한다.

$$\cos \gamma = \frac{l_{OA}^2 + l_{CA}^2 - l_{OC}^2}{2 l_{CA} \cdot l_{OA}} \quad (16)$$

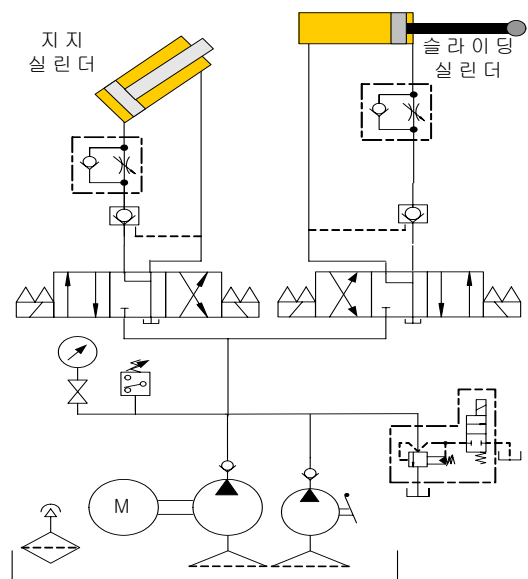


Fig. 4 Freebody diagram of the water gate using the sequentially operated two cylinders

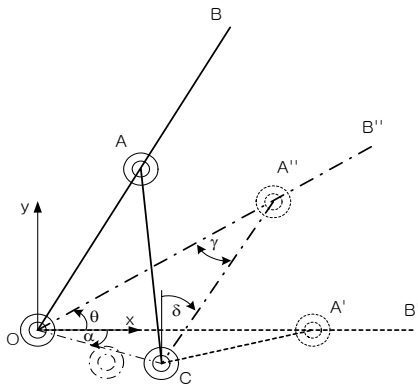


Fig. 5 Geometrical structure of the water gate using the sequentially operated two cylinders

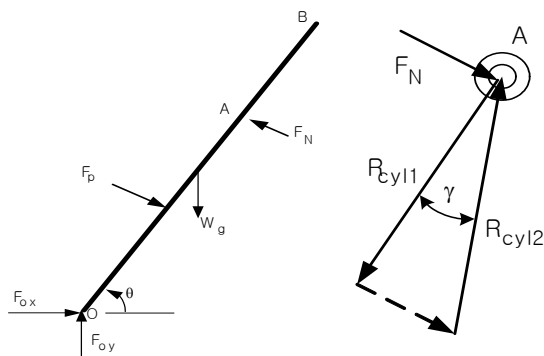


Fig. 6 Freebody diagram of the water gate using the sequentially operated two cylinders  
(a) gate plate (b) pin

### 3. 유압실린더의 최적설치점 설계

Fig. 3과 Fig. 5에 표시된 유압실린더의 설치점인 C점과 A'점의 위치, 수문의 회전각  $\theta$ 에 따라 유압실린더에 작용하는 반력값이 결정된다. 수문 회전각이 0도~중간각도인 범위에서는 지지실린더의 최대반력값을 구하고 수문회전각이 중간각도~60도인 범위에서는 슬라이딩실린더의 최대반력값 구하여 둘 중에서 가장 큰 값이 최소가 되도록 C점과 A'점의 위치를 결정하기 위해 직접탐색법의 일종인 콤플렉스법(complex method)을 적용하였다.<sup>(1)</sup> 여기서 수문회전각 중간각도는 임의로 설정한 것이며 지지실린더와 슬라이딩실린더의 작동교대각도를 의미한다. 물론 이 작동교대각도에 따라 최대반력값이 변하며 탐색프로그램의 수회 또는 십수회의 반복실행에 의해 최대반력값이 최소가 되는 교대각도를 구할 수 있다. 유

압실린더의 설치점인 C점의 좌표는  $(x_C, y_C)$ 로 정의되는 지면에 고정된 좌표이며 A점의 좌표는 수문의 회전각이 0도일 때  $(0, x_{A'})$ 로 정의된다. 결국 지지실린더와 슬라이딩실린더의 최적설치점을 설계하는 것은 3개의 파라미터,  $x_C, y_C, x_{A'}$ 를 구하는 것이 된다. 수문에 대한 상수값은 표1과 같다.

Table 1 System constants of the sluice gate

$$H=2m, W=2.5m, W_g=1400kgf$$

$$H_s=2m, \rho=1000kg/m^3, g=9.8m/s^2$$

콤플렉스법(complex method)은 제약직접탐색법(constrained direct search method)의 일종으로서 목적함수의 도함수를 필요로 하지 않기 때문에 비선형성이 심한 목적함수를 최소화시키는 파라미터를 구하는데 적합하다.<sup>(1,3)</sup> 본 논문에 적용한 콤플렉스법의 알고리즘을 간단히 설명하면 다음과 같다.

1)  $P=6$  개의 유용한 점들(feasible points)을 구한다. 각 점은  $N=3$  개의 원소로 구성되며  $N$  은 파라미터의 개수를 의미한다. 여기서 점은 식(17)과 같이 3개의 파라미터를 성분으로 하는 벡터를 의미한다.

$$x=[x_C \ y_C \ x_{A'}]^T \tag{17}$$

일반적으로  $P=2N$  이다. 유용한 점이란 그 점의 모든 원소들이 상한경계와 하한경계 사이에 있고 또한 그 점에 대한 제약함수값이 제약함수의 상한경계와 하한경계 사이에 있어야 한다. 각 파라미터의 하한치와 상한치는 다음과 같다.

$$0.1 \leq x_C \leq 2.0 \ [m] \tag{18}$$

$$-1.0 \leq y_C \leq -0.1 \ [m] \tag{19}$$

$$0.2 \leq x_{A'} \leq 1.8 \ [m] \tag{20}$$

제약함수는 수문회전각이 0도~60도인 범위에서 유압실린더가 작동할 때 각 실린더의 최대길이와 최소길이의 비가 1.6 이하이도록 파라미터를 제약하는 것이다.

2)  $P$  개의 점 중에서 목적함수값이 최대인 점을 찾고 그 점의 목적함수값이 나머지  $P-1$  개의 각 점에 대한 목적함수값보다 작아질 때까지 그 점을 나머지  $P-1$  개의 평균점 건너편으로 이동시키며 이동된 점이 유용한 점이 아니면 유용한 점으로 만들면서 이동시킨다.

3)  $P$  개의 점이 모두 기준 미소반경 이내에 있고  $P$  개의 점 각각에 대한 목적함수 값의 차이가 미소기준값 이내에 있으면 종료시킨다. 종료조건이 만족되지 않으면 2)로 간다.

컴플렉스법에 사용된 목적함수는 식(21)과 같다.

$$f(x) = \{ \text{수문회전각}(0 \sim \text{중간각도}) \text{에 따른 지지실린더 반력중에서 가장 큰 값, 수문회전각}(\text{중간각도} \sim 60 \text{도}) \text{에 따른 슬라이딩 실린더 반력 중에서도 가장 큰 값, 위 두 값 중에서 최대값} \} \quad (21)$$

목적함수를 최소화시키기 위해 총 3개의 파라미터값을 변화시켰으며 해당 파라미터는 식(17)에 나타난  $x_C, y_C, x_{A'}$ 이다. 파라미터의 탐색과정에서 파라미터가 변할 때마다 식(21)에 나타난 목적함수값을 구해야 한다. 파라미터의 탐색프로그램은 터보 C 언어<sup>(4)</sup>로 작성하였으며 중간각도가 31도인 경우 탐색 결과 최적 파라미터값은 다음과 같다.  $x_C = 0.974m, y_C = -0.304m, x_{A'} = 1.777m$

이 경우에 수문의 작동 중 발생하는 최대 실린더 반력은 수문회전각 0도~31도인 범위에서는 최대 지지실린더 반력은  $R_{cyl} = 2880kgf$ 가 되며 수문회전각 31도~60도인 범위에서는 최대 슬라이딩 실린더 반력은  $R_{cyl} = 2881kgf$ 가 된다. 수문이 0도~60도인 범위에서 회전할 때 지지실린더의 최대길이와 최소길이의 비는 1.56이며 슬라이딩 실린더의 최대길이와 최소길이의 비는 1.59이다.

최적 파라미터값을 적용하여 수문이 완전히 열린 상태(수문각 0도)에서 수문이 완전히 닫힌 상태(수문각 60도)로 될 때까지의 유압실린더 반력을 Fig. 7의 상단에 나타냈고 실린더 길이를 Fig. 7의 하단에 나타냈다. 지지실린더의 반력은 수문회전각(0도~31도)에서 2225kgf~2880kgf이며 수문회전각(31도~60도)에서 2880kgf~4315kgf이다. 비록 수문회전각(31도~60도)에서 지지실린더의 반력이 2880kgf~4315kgf으로 나타나지만 이러한 힘을 유지하기 위해 실린더에 유량을 계속 공급하는 것은 아니며 파일럿 체크밸브에 의해 작동유가 갖혀서 압력이 자동으로 형성된다. 따라서 지지실린더를 작동시키기 위해 필요한 최대 공급압력은 2880kgf를 지지실린더의 헤드측 단면적으로 나눈 것이다. 지지실린더의 길이는 수문회전각(0도~31도)에서 0.86m~1.34m이며 수문회전각(31도~60도)에서 1.34m을 유지한다. 슬라이딩 실린더의 반력은 수문회전각(0도~31도)에서 2081kgf~2344kgf이며

수문회전각(31도~60도)에서 2344kgf~2880kgf이다. 슬라이딩실린더의 길이는 수문회전각(0도~31도)에서 1.78m를 유지하고 수문회전각(31도~60도)에서 1.78m~1.12m이다.

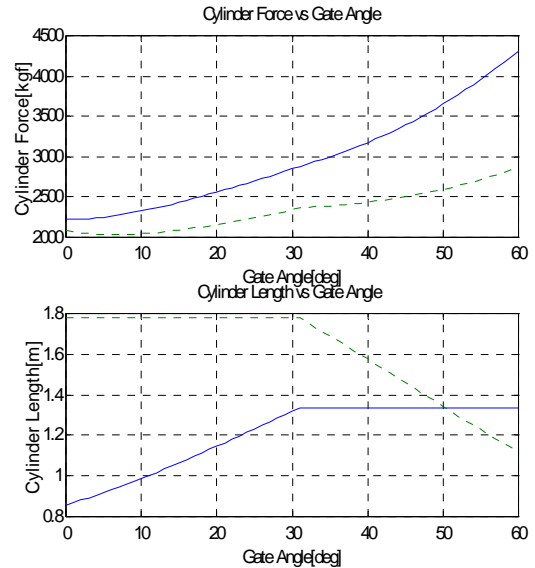


Fig. 7 (1) Cylinder force (2) Cylinder length support cylinder(CA): solid line, sliding cylinder(OA): dotted line

참고적으로 Fig. 8에 수문의 회전각(0~60도)에 대한 수압에 의한 회전모멘트, 수문자중에 의한 회전모멘트, 전체 회전모멘트를 나타냈다. Fig. 8에서 수압에 의한 최대회전모멘트는 수문회전각 60도에서 2887 kgf·m, 수문자중에 의한 최대회전모멘트는 수문회전각 0도에서 1440 kgf·m, 전체 회전모멘트는 수문회전각 60도에서 3587 kgf·m인 것을 알 수 있다.

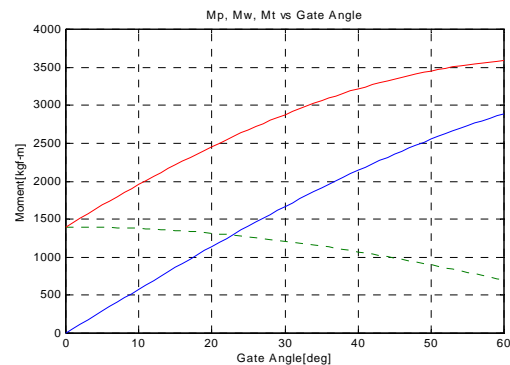


Fig. 8 1) Rotating moment by water pressure(lower solid line) 2) Rotating moment by gate weight(dotted line)

3) total rotating moment(upper solid line)

아울러 Fig. 1에 나타난 수문인 경우 실린더의 최적설치위치에서의 실린더 반력은 Fig. 9와 같으며 Fig. 9에서 수문의 작동 중 발생하는 최대 실린더 반력은  $R_{cyl}=4935kgf$  임을 알 수 있다. Fig. 2에 나타난 수문인 경우 실린더의 최적설치위치에서의 실린더 반력은 Fig. 10과 같으며 Fig. 10에서 수문의 작동 중 발생하는 최대 실린더 반력은  $R_{cyl}=4799kgf$  으로 나타난다.

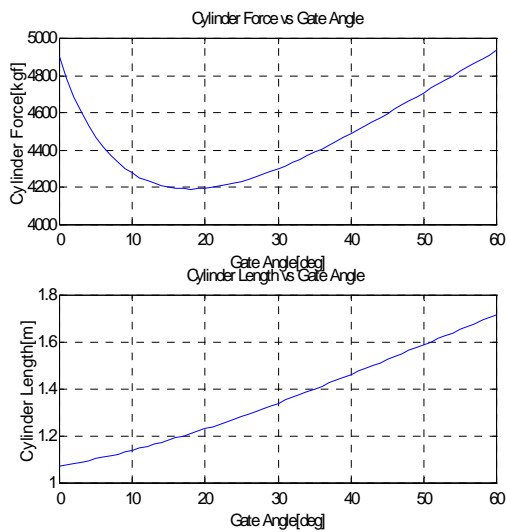


Fig. 9 (1) Cylinder force (2) Cylinder length (for the sluice gate shown Fig. 1)

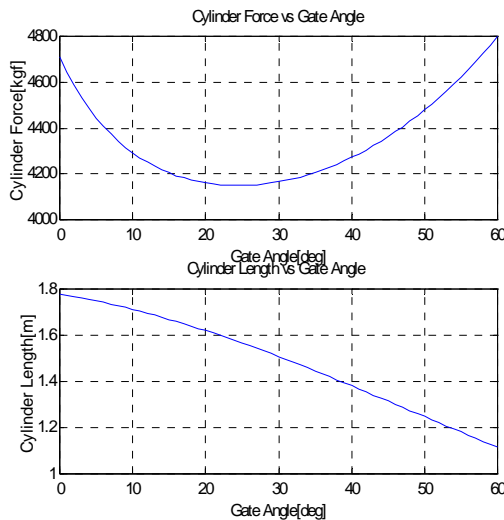


Fig. 10 (1) Cylinder force (2) Cylinder length (for the sluice gate shown Fig. 2)

4. 결 론

수문의 폭이 2.5 m, 수문의 높이가 2.0 m, 수문의 자중이 1400kgf인 담수보 수문을 0도~60도인 범위에서 회전시키는 경우, 수압 및 수문 자중에 의한 최대회전모멘트는 수문의 회전각이 60도일 때 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.

지지실린더 1개를 사용하는 수문작동방식에서는 실린더의 최적설치위치에서 실린더에 작용하는 최대반력값이 4935kgf로 나타났으며 슬라이딩실린더 1개와 지지링크 1개를 사용하는 수문작동방식에서는 슬라이딩실린더와 지지링크의 최적설치위치에서 실린더에 작용하는 최대반력값이 4799kgf로 나타났다. 슬라이딩실린더 1개와 지지실린더 1개를 순차작동시키는 수문작동방식에서는 슬라이딩실린더와 지지실린더의 최적설치위치에서 지지실린더의 로드가 움직이는 동안에 작용하는 최대반력값은 2880kgf이며 슬라이딩실린더의 로드가 움직이는 동안에 작용하는 최대반력값은 2881kgf으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Reklaitis, G. V., Ravindran, A., Ragsdell, K. M., 1983,, *Engineering Optimization Methods and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp.268~277.
- (2) S. R. Lee, 2004, "Design of Hydraulic Cylinder Type Sluice Gate," Industry-University Consortium Research Report.
- (3) S. R. Lee, 2003, "Lead-Lag Controller Design of Direct Drive Servo Valve Using Complex Method," Proceedings of the KSME 2003 Fall Annual Meeting, pp.1590~1595.
- (4) J. W. Kim, 1995, C Libray, Information & Culture, Inc.