

# 압력센서를 이용한 수중항만공사 로봇의 실린더 변위 추정에 관한 연구

김치효\* · 김태성\*\* · † 이민기

\*창원대학교 대학원, \*\*창원대학교 메카트로닉스 연구원, † 창원대학교 교수

Study on the estimation of the cylinder displacement of an underwater robot for harbor construction using a pressure sensor

Chi-Hyo Kim\* · Tae-Sung Kim\*\* · † Min-Ki Lee

\*Graduate school of Changwon National University, Gyeongnam, 641-773, Korea

\*\*Research Institutes of Mechatronics, Changwon National University, Gyeongnam, 641-773, Korea

† Department of Control and Instrumentation Eng., Changwon National University, Gyeongnam, 641-773, Korea

**요 약** : 수중 방파제 피복작업은 사석의 유실을 방지하기 위해 방파제 겉면에 2-3ton의 돌을 쌓는 작업으로 현재 잠수부에 의해 수작업으로 시공을 하고 있다. 수중에서의 사야문제와 작업의 특성상 잠수부의 육감에 의해 공사가 시행되며 작업 과정에서 산업재해가 빈번히 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 수중 방파제 피복작업을 위한 수중항만공사 로봇을 개발하였다. 로봇의 유압 실린더 제어를 위해 위치 센서가 필요한데 기존 센서는 구동축에 부착되어 방수가 어렵고 건설현장에서 사용하기에는 내구성이 좋지 못하다. 하지만 압력센서는 유압라인상의 임의의 위치에 부착이 가능하므로 방수박스 내부에 설치할 수 있어 방수가 용이하고 내구성을 높일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 압력센서를 이용하여 수중항만공사 로봇의 유압 실린더 변위를 간접적으로 측정하는 관측기를 설명한다.

**핵심용어** : 압력센서, 수중로봇, 유압 실린더, 항만공사, 관측기

**Abstract** : This paper presents an observer to estimate the displacement of hydraulic cylinders of an underwater robot for harbour construction using a pressure sensor. In harbour constructing, we place heavy armour stones weighing over 2~3 tons on the surface of the bank to protect it from storming wave. This work typically done by a diver is difficult and dangerous so that we have developed Stone Diver which is the underwater robot for harbour construction. The robot needs a displacement sensors to control the position of hydraulic cylinders. The position sensors mounted outside the cylinders cause poor durability in construction site where shock and dust usually occur. However, the pressure sensor mounted inside a waterproof box improves the durability. Based on the dynamic parameters and the pressures in the cylinder, the observer estimates the cylinder's position. This paper presents the positional accuracy of the pressure based observer and the performance of the underwater robot to assemble the armour stones.

**Key words** : pressure sensor, underwater robot, hydraulic cylinder, harbor construction, observer

## 1. 서 론

수중 방파제 피복작업은 사석의 유실을 방지하기 위해 방파제 겉면에 2-3ton의 돌을 쌓는 작업으로 현재 잠수부에 의해 수작업으로 시공을 하고 있다. 우리나라 해안의 수중은 대부분 1m 이내의 사물도 볼 수 없을 정도로 탁도가 높아 잠수부는 피복석을 손으로 더듬어 가며 작업을 한다. 이러한 과정에서 산업재해가 빈번히 발생하고 잠수부의 고령화로 인한 인력난이 심각하므로 기계화가 요구된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 수중 방파제 피복작업을 위한 수중항만공사 로봇을 Fig. 1과 같이 개발하였다(창원대학교, 2008). 수중항만

공사 로봇은 직접 피복석을 쌓는 스톤다이버와 수중영상을 보여주기 위한 수중촬영장치로 구성되며 중량물을 핸들링하기 위해 유압시스템을 적용하였다.

스톤다이버는 방파제 면에 피복석을 차곡차곡 쌓기 위해 가반중량이 크고 조립성이 뛰어난 2자유도 병렬기구 로봇과 이동 틀을 조합해 6 자유도로 개발하였다. 병렬기구는 두 개의 유압 실린더와 중앙축으로 구성되어 두 개 실린더가 플랫폼을 밀고, 당기면 중앙축이 운동을 구속해 요(yaw), 피치(pitch) 운동을 생성하고 이동 틀이 X, Y, Z 방향으로 병렬기구를 이동시킨다. 또한, 프로펠러를 이용하여 로프에 매달린 스톤다이버를 회전시킨다. 수중촬영장치는 투명박스 내부에

† 교신저자 : 종신회원, minkilee@changwon.ac.kr 055)213-3663

\* 일반회원, chkim@changwon.ac.kr 055)275-7553

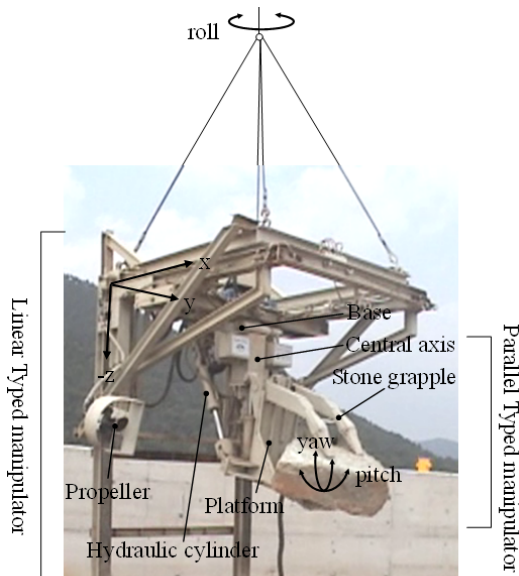
\*\* 일반회원, tskim@changwon.ac.kr 055)275-7553

깨끗한 물을 넣어 탁도가 높은 수중에서도 박스 위에 설치된 카메라를 통하여 넓은 영역의 영상을 볼 수 있도록 하였다. 이동 틀이 투명박스를 X, Y, Z 방향으로 이동시켜 원하는 위치에서 촬영을 하게 한다.

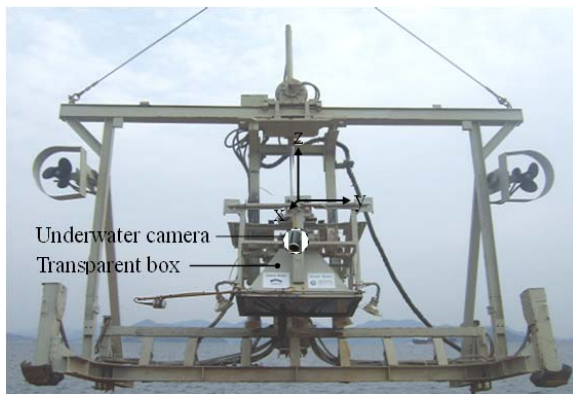
수중항만공사 로봇을 이용한 수중 피복석 작업은 Fig. 2와 같이 이루어진다. 피복석을 쌓을 위치에 기중기를 이용하여 수중촬영장치를 먼저 거치 시킨다. 이후 스톤다이버가 육상에서 피복석을 파지하면 기중기는 피복석을 쌓을 위치에 스톤다이버를 적당히 안착시킨다. 운전실의 작업자는 수중촬영장치와 스톤다이버에 설치된 카메라 영상을 보면서 로봇을 제어하여 피복석을 쌓는다.

이러한 수중항만공사 로봇의 수중운동에 있어서 문제가 되는 것은 전기장치의 방수이다. 각종 유압 밸브는 방수블록 내에 설치하여 방수가 쉽고 간단하다. 하지만 실린더 변위를 측정하기 위한 센서(Stinson et al., 2002)는 구동축에 직접 장착

되어야 하므로 방수처리가 어렵고 외부에 노출되어 파손 가능성이 높다. 반면 압력센서는 압력을 측정하고자 하는 유압 라인 상에 설치하여 방수와 파손문제를 쉽게 해결할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 압력센서를 이용하여 수중로봇의 실린더 변위를 간접적으로 측정하는 관측기를 개발한다.



(a) Stone diver(SD)



(b) Underwater filming equipment(UFE)

Fig. 1 Underwater harbour construction robot

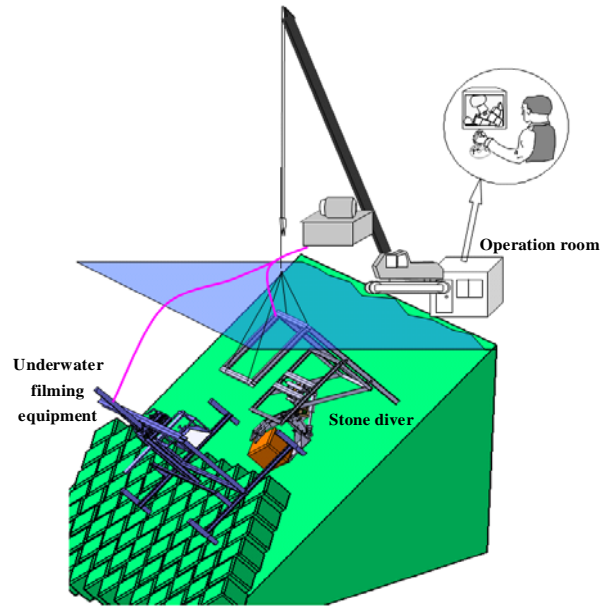


Fig. 2 System of underwater harbour construction robot

## 2. 유압서보 실린더의 모델링

서보밸브와 유압 실린더를 이용한 유압시스템은 Fig. 3와 같이 구성된다. 스톤의 변위  $x_s[cm]$ 에 따라 실린더 헤드부로 유입되는 유량  $Q_H[cm^3/s]$  또는 실린더 로드부로 유입되는 유량  $Q_R$ 이 결정된다. 실린더 헤드부와 로드부의 압력은 각각  $P_H, P_R$ 이며 공급 압력과 리턴 압력은 각각  $P_S$ 와  $P_T$ 이다.

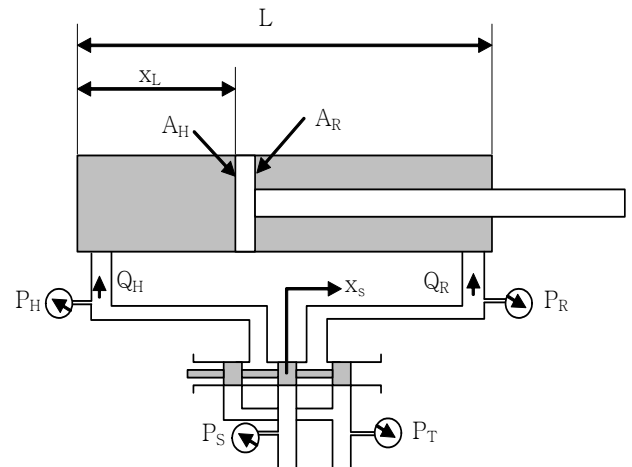


Fig. 3 Hydraulic cylinder driven by a servo valve

벌크상수가 포함된 압력( $P[kgf/cm^2]$ )과 부피( $V[cm^3]$ )의 관계를 나타내면

$$\dot{P} = -\frac{\beta}{V_0} \dot{V} \quad (1)$$

과 같다. 여기서  $\beta[kgf/cm^2]$ 는 벌크상수이며  $V_0$ 는 초기 부피이다. 식 (1)을 유압서보 실린더에 적용하여 헤드부와 로드부의 압력 동특성 모델을 나타내면 다음과 같다(Conrad et al., 1987).

$$\dot{P}_H = \frac{\beta}{V_H(x_L)} (-A_H \dot{x}_L + Q_H) \quad (2a)$$

$$\dot{P}_R = \frac{\beta}{V_R(x_L)} (A_R \dot{x}_L + Q_R) \quad (2b)$$

여기서 아래첨자  $H$ 와  $R$ 은 각각 헤드부와 로드부의 파라미터를 나타낸다.  $\dot{P}$ 는 압력 변화율,  $V$ 는 실린더 내부 및 관로상의 부피,  $A$ 는 실린더 단면적,  $x_L$ 은 실린더 변위,  $\dot{x}_L$ 은 실린더의 속도,  $Q$ 는 실린더로 유입되는 유량으로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Merritt, 1967).

$$Q_H = K_H x_s \sqrt{|P_S - P_H|} \quad (x_s \geq 0) \quad (3-1a)$$

$$= K_H x_s \sqrt{|P_H - P_T|} \quad (x_s < 0) \quad (3-1b)$$

$$Q_R = -K_R x_s \sqrt{|P_R - P_T|} \quad (x_s \geq 0) \quad (3-2a)$$

$$= -K_R x_s \sqrt{|P_S - P_R|} \quad (x_s < 0) \quad (3-2b)$$

여기서  $K$ 는 밸브의 유량 유출상수이다. 실린더가 움직일 때 실린더 헤드로 유입되는 유량과 실린더 로드로 유출되는 유량은 동일하므로 스톱의 변위가 (+)일 때 유량은 식 (3-1a) 또는 식 (3-2a)을 이용하여 구할 수 있다. 마찬가지로 스톱의 변위가 (-)일 때 유량은 식 (3-1b) 또는 식 (3-2b)을 이용하여 구할 수 있다. 헤드부의 총 부피  $V_H(x_L)$ 와 로드부의 총 부피  $V_R(x_L)$ 는 실린더 내부 부피와 관로상의 부피를 합한 것으로

$$\begin{aligned} V_H(x_L) &= A_H x_L + V_{dH} \\ V_R(x_L) &= A_R (L - x_L) + V_{dR} \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 여기서  $V_{dH}$ 와  $V_{dR}$ 은 각각 서보밸브에서 실린더 헤드와 로드까지 관로상의 부피를 나타내며  $L$ 은 실린더의 행정(stroke)을 나타낸다.

식 (4)를 식 (3-1a)와 식 (3-2b)에 대입하면 관측기의 속도  $\dot{x}_L$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{x}_L = -\frac{\dot{P}_H}{\beta} x_L - \frac{V_{dH}}{\beta A_H} \dot{P}_H + (K_H/A_H) x_s \sqrt{|P_S - P_H|} \quad (x_s \geq 0) \quad (5a)$$

$$\dot{x}_L = -\frac{\dot{P}_R}{\beta} (L - x_L) + \frac{V_{dR}}{\beta A_R} \dot{P}_R + (K_R/A_R) x_s \sqrt{|P_S - P_R|} \quad (x_s < 0) \quad (5b)$$

식 (5)로부터 얻어진  $\dot{x}_L$ 를 적분하여 실린더의 변위를 구할 수 있다.

### 3. 압력센서를 이용한 관측기 설계

#### 3.1 실린더 운동에 따른 압력 변화

Fig. 4는 피스톤이 전진하여 최장 리미트에 도달 후 다시 후진하여 최단 리미트에 도달할 때 압력 변화 및 실린더 변위를 나타낸다. 피스톤이 전·후진 할 때 공급 압력  $P_S$ 는 유체의 흐름에 의해 압력 강하가 일어난다. 또한 헤드부의 단면적이 로드부의 단면적 보다 크므로 길이변화에 따른 체적변화가 커 실린더가 후진할 때 보다 전진할 때 압력강하가 더 크게 일어난다. 또, 피스톤이 리미트에 도달하면 실린더 헤드 및 로드로 유량이 유입되지 못하므로 최장 리미트 일 경우  $P_H = P_S$ ,  $P_R = 0$ 이 되고 반대로 최단 리미트 일 경우  $P_R = P_S$ ,  $P_H = 0$ 이 된다. 따라서 이러한 압력 관계를 이용하여 실린더가 리미트에 도달했는지 알 수 있고 이때 관측기의 오차를 알 수 있다. 이 오차를 이용하여 파라미터를 갱신하고 관측기가 예측한 변위를 초기화하여 실린더 변위를 측정한다.

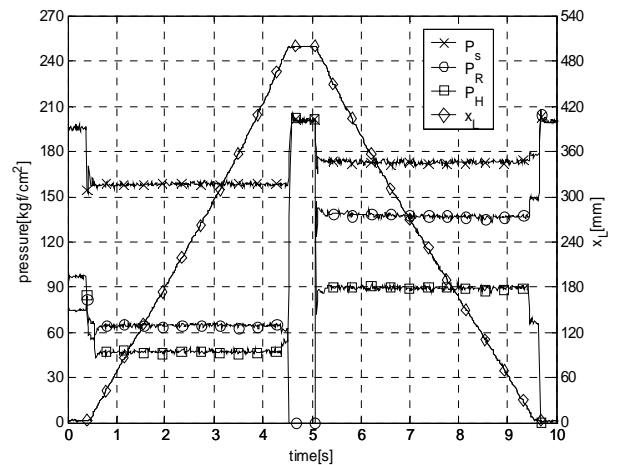


Fig. 4 Pressure profile of  $P_s$ ,  $P_H$  and  $P_R$  while a piston rod of hydraulic cylinder is sliding forward and backward

#### 3.2 Least Square를 이용한 파라미터 인식

압력으로부터 실린더 변위를 예측하기 위해 식 (5)에 포함된 동적 파라미터를 Least Square(이후 LS로 약칭)(Hayes, 1996) 방법으로 찾는다. 동특성 파라미터로 이뤄진 벡터를 실린더 전진과 후진의 경우로 각각 분리하여

$$\begin{aligned} B_1 &= [1/\beta \quad V_{dH}/\beta \quad K_H]^T_{3 \times 1} \\ B_2 &= [1/\beta \quad V_{dR}/\beta \quad K_R]^T_{3 \times 1} \end{aligned} \quad (6)$$

으로 정의하고 측정 변수로 이뤄진 벡터를

$$\begin{aligned} S_1 &= [-\dot{P}_H x_L \quad -\dot{P}_H/A_H \quad x_s \sqrt{|P_S - P_H|/A_H}]^T \\ S_2 &= [-\dot{P}_R(L-x_L) \quad \dot{P}_R/A_R \quad x_s \sqrt{|P_S - P_R|/A_R}]^T \end{aligned} \quad (7)$$

로 정의한다. 압력 변화율은 압력을 시간으로 미분해 구한다. 초기에 파라미터를 찾을 때는 실린더 외부에 LVDT를 설치해 실린더 변위를 측정하고 이를 미분해 실린더 속도를 구한다. 실린더의 모든 속도 영역을 고려하여 파라미터를 찾기 위해  $x_s = 5\sin(2/5\pi t)$ 가 되도록 서보밸브에 전압을 인가하였다. 이때 측정된 데이터를 이용하여 파라미터를 구하면 Table 1과 같다. 유압시스템은 비선형 특성을 가지며 환경에 따라 파라미터가 변하기 때문에 실린더가 전진 할 때와 후진 할 때 파라미터 값에 차이가 있다. 따라서 LS를 이용하여 구한 파라미터는 초기값으로 사용하고 파라미터는 시스템의 변화에 따라 갱신되어야 한다.

Table 1 Parameters by LS

forward			backward		
$\beta$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$V_{dH}$ (cm <sup>3</sup> )	$K_H$	$\beta$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$V_{dR}$ (cm <sup>3</sup> )	$K_R$
36302.1	2419.7	3.21	42368.3	2251.8	3.39

### 3.3 Recursive Least Square를 이용한 파라미터 갱신

실제 로봇에는 LVDT 센서가 장착되지 않으므로 실린더의 정확한 변위를 알 수 없다. 하지만 압력 센서로부터 리미트에 도달한 것을 알 수 있으므로 최상, 최단 리미트에서 각각  $x_L = L$ 와  $x_L = 0$ 으로 초기화하고 관측기에서 예측한  $\hat{x}_L$ 과의 오차를 이용하여 Recursive Least Square(이후 RLS로 약칭)(Smallwood et al., 2003) 방법으로 파라미터를 아래와 같이 갱신한다.

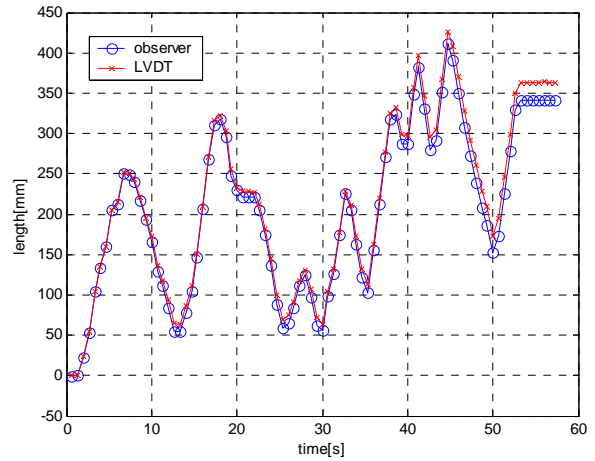
$$\begin{aligned} B_i(k+1) &= B_i(k) + \frac{P_i(k)S_i(k+1)}{(1+S_i(k+1)^T P_i(k)S_i(k+1))} (\hat{x}_L(k) - x_L(k)) \\ P_i(k+1) &= P_i(k) - \frac{P_i(k)S_i(k+1)S_i(k+1)^T P_i(k)}{(1+S_i(k+1)^T P_i(k)S_i(k+1))} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 k는 실린더가 리미트에 도달할 때 샘플링 시간을 나타내며  $P_i(k)$ 는 3x3 공분산 행렬이다. 파라미터 벡터는 관측기의 오차에 따라 갱신되고 공분산 행렬은 측정변수 벡터에 의해 갱신된다.

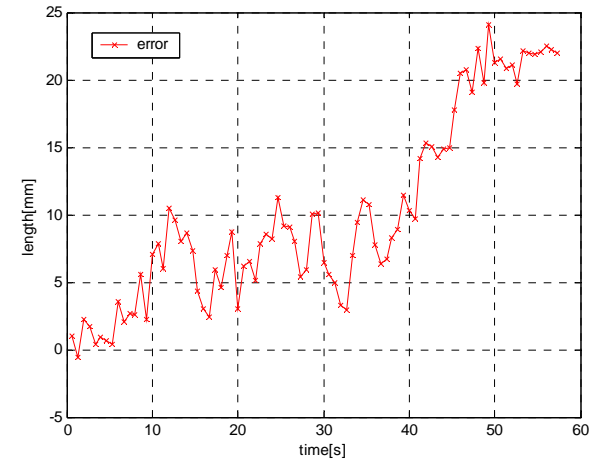
## 4. 관측기 성능실험

관측기의 성능을 실험하기 위해 LVDT를 임시로 장착하고 관측기가 예측한 변위를 이용하여 병렬기구의 유압실린더를

무부하 상태에서 PI제어 하였을 때 결과를 관찰한다. Fig. 5는 관측기의 파라미터가 수렴한 상태에서 임의의 제어 목표로 제어하였을 때 LVDT 및 관측기의 변위를 나타낸다. 이때 실린더는 리미트에 도달하지 않도록 하여 파라미터가 갱신되지 않도록 하였다. 초기 40초 동안 관측기의 오차는 약 12mm 이내지만 시간이 지나면서 오차가 증가하여 50초 일 때 약 25mm가 된다. 관측기는 실린더의 속도를 시간으로 적분해 변위를 예측하므로 시간이 지날수록 오차가 누적되어 증가하게 된다. 하지만 실제피복작업 시 병렬기구를 구동하는 시간은 30초 내외이므로 약 12mm 오차로 제어가 가능하다.



(a) Length estimated by observer and length measured by LVDT

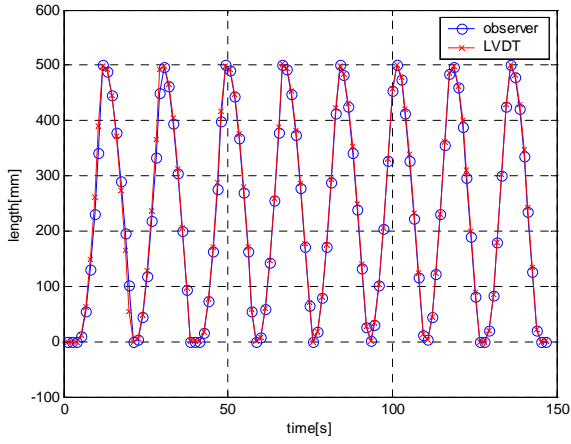


(b) Observer error

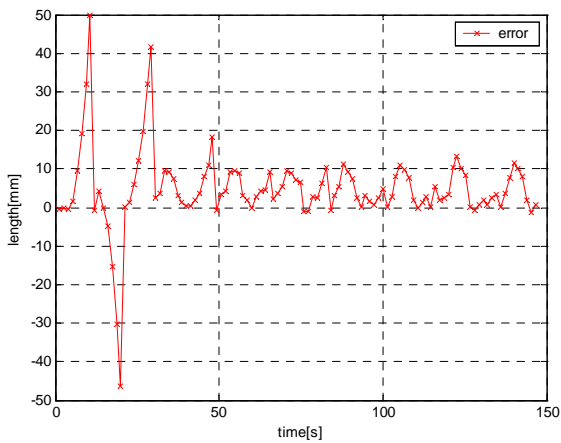
Fig. 5 The performance of pressure observer while no dynamic parameter is updated

Fig. 6은 피스톤이 리미트에 도달하여 파라미터를 업데이트 할 경우 오차가 줄어들음을 보여준다. 피스톤이 리미트에서 도달하면 RLS를 이용하여 파라미터를 업데이트하고 관측기가 예측한 변위를 초기화 하였다. 최초 리미트에 도달했을 때 오

차는 50mm로 크지만 시간이 지날수록 파라미터는 현재 시스템에 점점 수렴되어 50초 후에는 13mm까지 오차가 감소한다. 따라서 RLS를 이용하여 파라미터를 업데이트하면 약 13mm 이내의 오차로 변위를 측정할 수 있다.



(a) Cylinder length



(b) Observer error

Fig. 6 The lengths and errors when dynamic parameters are updated by RLS

### 5. 압력 관측기를 적용한 수중항만공사 로봇의 제어

스톤다이버의 유압실린더 제어는 Fig. 7과 같이 이루어진

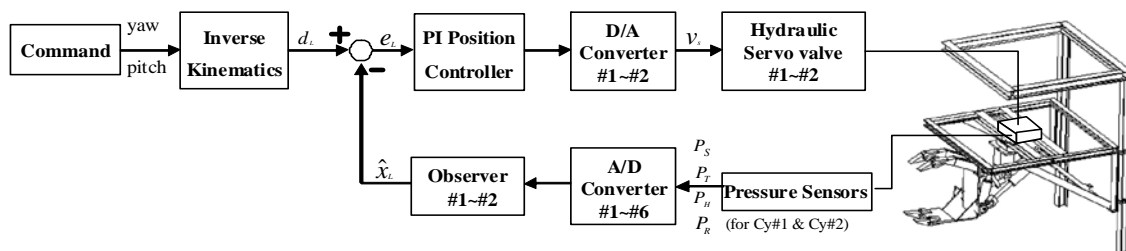
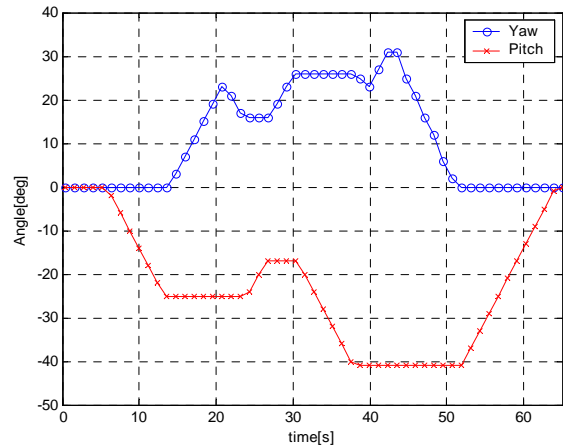
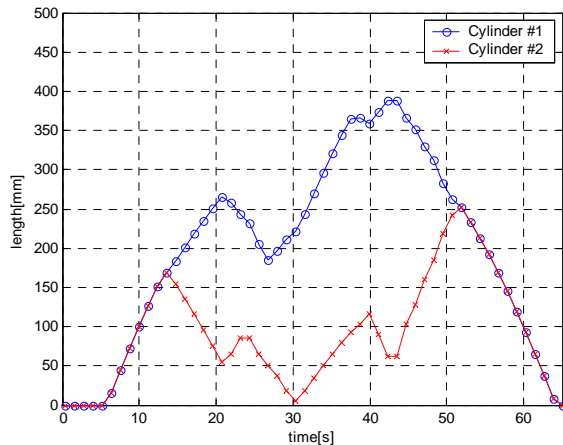


Fig. 7 PI position control scheme of Stone diver

다. 작업자에 의해 로봇의 위치 명령이 주어지면 기구학 해석을 통해 각 실린더의 변위를 구하고 관측기에서 제공하는 변위와 비교해 오차를 구한다. PI 위치제어기는 오차를 줄이기 위해 D/A 컨버터를 통해 유압 서보밸브에 전압을 인가한다. 인가된 전압에 따라 오일이 실린더에 유입되어 압력변화가 발생한다. 관측기는 압력센서로부터 측정된 공급압력, 헤드 및 로드압력, 리턴 압력을 이용해 실린더 변위를 예측하고 PI 제어기의 제환값으로 제공한다.



(a) Command



(b) Cylinder lengths

Fig. 8 PI control of Stone diver

관측기를 이용한 로봇의 PI제어 성능을 관찰하기 위해 LVDT의 방수문제로 육상에서 실험을 수행하였다. 피복석을 파지한 상태에서 실제 피복 작업을 실행할 때 로봇의 요, 피치 명령은 Fig. 8(a)와 같다. 병렬기구를 구동한 시간은 약 65초이며 이 때 Fig. 8(b)는 역기구학을 이용하여 계산된 각 실린더의 제어 길이이다.

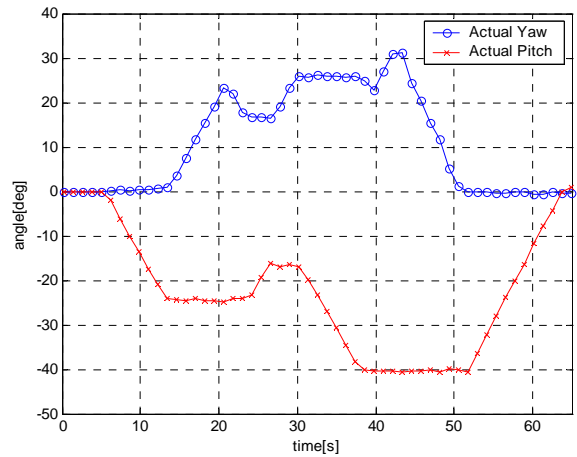
Fig. 9는 관측기의 예측된 변위 정보를 이용하여 Fig. 8의 명령을 제어하였을 때 실린더의 변위 오차를 나타낸다. 최대 오차는 약 18mm로 무부하 상태에서의 실험 결과인 Fig. 5보다 오차가 빨리 증가한다. 이는 피복석을 파지한 부하상태에서 발생하는 유압시스템의 비선형적인 현상에 기인한 것이다.

Fig. 10은 LVDT로부터 얻은 변위로 순방향 기구학 해석을 하여 구한 실제 로봇의 자세와 자세오차이다. 요 오차는 최대 1.0도이며 피치 오차는 최대 약 1.8도이다. 일반 유압로봇의 오차에 비해 오차가 상대적으로 크지만 1,000mm 이상의 피복석을 쌓는 항만공사 현장에서는 허용될 수 있는 오차이다. 특히, 오차가 발산하지 않고 일정 범위 안에 있으며 실린더가 리미트에 도달할 때마다 동적 변수가 갱신되고 변위가 초기화되므로 실제 작업에서는 문제가 되지 않는다. 작업자는 수중 카메라 영상을 보고 스톤다이버를 조작하게 되므로 이러한 오차는 작업자의 조작으로 해결될 수 있다.

우리는 압력센서를 이용하여 실린더 변위를 간접적으로 측정하여 로봇을 제어함으로 항만공사 중 어려운 수중 피복작업을 기계화하는데 성공하였다. Fig. 11(a)은 부산 감천항의 작업 현장이며, Fig. 11(b)는 수중에서 작업 중인 스톤다이버와 수중촬영장치이다. 수중촬영장치는 맑은 물이 들어있는 투명박스를 통해 촬영하므로 Fig. 11(c)와 같이 넓은 영역의 영상을 획득할 수 있다. 수중 현장투입에서 관측기는 큰 오차 없이 구동되어 원활한 피복작업을 할 수 있었다.

## 6. 결 론

오일을 압축성 매개체로 간주하여 유압실린더의 압력 동특성식을 유도하였으며 이를 이용하여 유압실린더의 변위를 간접적으로 측정하는 관측기를 설계하였다. 피스톤이 최단과 최장 리미트에 도달할 때마다 RLS를 이용하여 파라미터를 갱신함으로써 유압시스템의 특성변화에 적응하도록 하였다. 관측기를 이용한 스톤다이버의 PI 제어 오차는 18mm로 일반 로봇보다 낮은 정밀도를 가지고 있으나 수중항만공사용 로봇과 같이 대형 중량물을 조립하는 공정에서는 만족스런 정밀도이다. 압력센서를 이용한 관측기는 센서를 실린더 몸통에 직접 설치하지 않고 밸브 박스 안에 설치함으로써 방수가 용이하고 충격으로부터 보호를 받을 수 있다. 따라서 압력 관측기는 수중 건설현장과 같이 열악한 환경에 투입되는 유압 로봇의 위치제어에 적용해 볼 수 있는 센서이다.



(a) Actual orientation

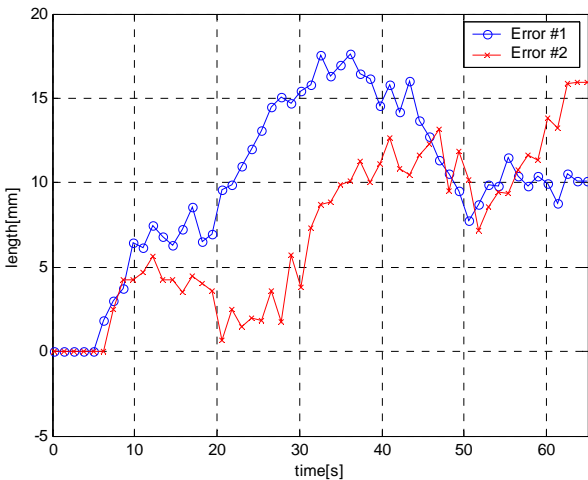
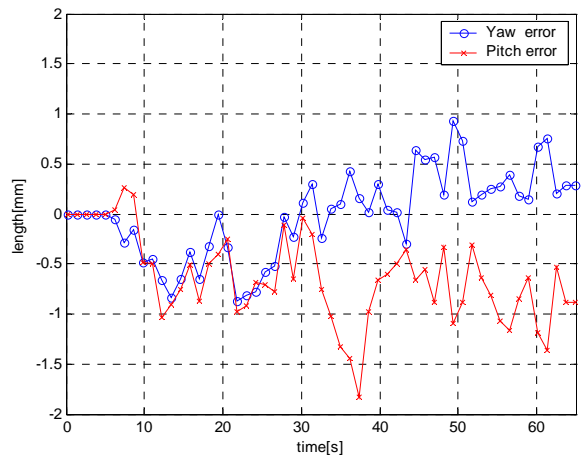


Fig. 9 Position errors of the pressure observer



(b) Orientation error

Fig. 10 Orientation error of SD controlled with pressure observers



## 참 고 문 헌

- [1] 창원대학교 메카트로닉스 연구원(2008), 수중항만공사 기계화 시공 장비 개발 최종연구보고서.
- [2] Conrad, F. and Jensen, C. J. D.(1987), "Design of Hydraulic Force Control Systems with State Estimate Feedback", IFAC 10th Triennial World Congress, Munich, pp. 307-312.
- [3] Hayes, M. H.(1996), Statistical Digital Signal Processing and Modeling, John Wiley & Sons.
- [4] Merritt, H. E.(1967), Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons.
- [5] Smallwood, D. A. and Whitcomb, L. L.(2003), "Adaptive Identification of Dynamically Positioned Underwater Robotic Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 505-515.
- [6] Stinson, R. F. and Sarro, J. A.(2002), "The use of carbon fiber composites in sliding contacts", Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on, pp. 175-183.



(a) Construction site



(b) Live video of assembling scene captured by UFD



(c) Scene of assembled armor stones

Fig. 11 Armour stones assembling by SD in the turbid water

## 후 기

본 연구는 국토해양부 첨단항만건설기술개발사업 연구 과제로 수행된 것임.

---

원고접수일 : 2012년 09월 04일  
심사완료일 : 2012년 10월 10일  
원고채택일 : 2012년 10월 10일