

# 항만공사용 수중건설로봇의 기구설계 및 제어에 관한 연구

김태성\* · 김치효\*\* · † 이민기

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

## Study on the design and the control of an underwater construction robot for port construction

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

\*, \*\* Research institutes of Mechatronics Changwon National University, Kyungnam 641-240, Korea

† Department of Control and Instrumentation Eng., Changwon National University, Kyungnam 641-240, Korea

**요약** : 열악한 작업환경 때문에 수중항만공사를 기계화하려는 많은 노력들이 시도되고 있다. 본 논문은 수중항만공사 중 사석 고르기 작업을 수행하는 수중건설로봇에 대해 기술한다. 로봇의 블레이드는 울퉁불퉁한 지형에서도 사석 마운드를 기준면에 대해 평편하게 고르고, 다목적 암은 사석을 파고, 채울 수 있게 설계되었다. 본 연구는 로봇에 설치된 위치 및 방위 센서와 동기를 이루면서 주행과 스윙운동이 포함된 다목적암과 블레이드의 기구학을 해석한다. 기준수심센서에 부여된 월드좌표에 대해서 블레이드와 다목적암의 위치와 방위를 나타내고, 기준면과 나란한 고르기 작업을 위한 형상을 찾는다. 고르기 작업을 위한 유압제어시스템을 개발하며, 로봇에 의한 육상 및 수중 사석 고르기 작업을 실시해 실험결과를 보인다. 로봇의 작업속도는 잠수부보다 8배 정도 빠르며 작업품질도 우수한 것으로 평가된다. 잠수부가 작업할 수 없는 대수심에서는 효율성이 더 좋을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 수중건설로봇, 수중항만공사, 사석 고르기, 블레이드, 다목적암, 유압제어시스템

**Abstract** : There are many efforts to mechanize the process for underwater port construction due to the severe and adverse working environment. This paper presents an underwater construction robot to level rubbles on the seabed for port construction. The robot is composed of a blade and a multi-functional arm to flatten the rubble mound with respect to the reference level at uneven terrain and to dig and dump the rubbles. This research analyzes the kinematics of the blade and the multi-functional arm including track and swing motions with respect to a world coordinate assigned to a reference depth sensor. This analysis is conducted interfacing with the position and orientation sensors installed at the robot. A hydraulic control system is developed to control a track, a blade and a multi-functional arm for rubble leveling work. The experimental results of rubble leveling work conducted by the robot are presented in land and subsea. The working speed of the robot is eight times faster than that of a human diver, and the working quality is acceptable. The robot is expected to have much higher efficiency in deep water where a human diver is unable to work.

**Key words** : underwater construction robot, underwater port construction, rubble leveling, blade, multi-functional arm, hydraulic control system

### 1. 서론

수중항만공사는 열악한 작업환경 때문에 작업의 일부 또는 전부를 기계화하려는 노력들이 시도 되고 있다. 본 논문은 수중항만공사 중 사석 고르기 작업을 수행하는 수중건설로봇(UCR, Underwater Construction Robot)의 기구설계와 제어에 대해 기술한다. 수중 사석 고르기 작업은 수중구조물을 지지하는 기초사석을 평탄하게 고르는 작업으로 대부분 잠수부들에 의해 수작업으로 이뤄진다. 잠수병과 같은 산재를 예방하고, 생산성을 높이기 위해 일부 공정을 기계화하려는 시도를

하고 있으나 수중건설로봇을 개발한 사례는 많지 않다. 일본에서 8족 보행로봇을 개발해 사석 고르기 작업에 적용했고(Naruse et al., 1988), 상용 굴삭기를 개조해 고르기 작업에 활용하고 있다(Hirabayashi et al., 2006). 국내에서는 방파제 피복작업을 할 수 있는 스톤다이버를 개발한 사례가 있고(Kim et al, 2012; Kim and Lee, 2014), 최근에는 수중 사석 고르기를 효율적으로 수행할 수 있는 로봇을 개발해 실용화 단계에 있다(Kim et al., 2014).

UCR은 일반 굴삭기와 동일한 형태이나 블레이드가 추가되어 있다. 굴삭기의 제어에 대한 연구는 많이 이뤄졌으나 블레

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

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

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

(주) 이 논문은 “Underwater Construction Robot for rubble leveling on the seabed for port construction”란 제목으로 “2014th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 1657-1661”에 일부가 발표되었음.

이드까지 포함된 경우는 찾아볼 수 없으며 수중로봇으로 개발되어 항만공사에 적용된 연구는 최초라고 볼 수 있다. UCR을 수중에 투입하고 원격제어를 수행하기 위해 기구학이 해석되어야 한다.

일반 굴삭기는 운전자가 수동으로 조작해 작업하므로 기구학해석에 대한 필요성을 느끼지 못했으나 무인원격조종을 위해 기구학해석이 시작되었다. Vaha and Skibniewski(1993)가 동역학 모델링을 위해 굴삭기에 좌표를 부여해 기구학을 해석했으나 두 좌표사이의 변환행렬을 표현한 것으로 완벽하지 않고, 순기구학, 역기구학해석에서도 명확한 답을 주지 못했다. Koivo(1994)가 스윙모터의 운동을 제외한 3-자유도의 기구학을 해석했고, Bhaveshkumar and Prajapati(2013)가 스윙모터까지 포함된 굴삭기의 기구학해석을 완성했으나 트랙의 이동과 블레이드 기구까지 포함된 것은 아니다.

본 논문은 로봇에 설치된 위치 및 방위 센서와 동기를 이루면서 주행과 스윙운동을 포함한 블레이드 및 다목적암의 기구학을 해석한다. 기구학 해석을 위해 링크와 조인트를 정의하고, 좌표를 부여해 기준면에 대한 블레이드와 버킷의 위치와 방위를 찾아 기준면에 대해 나란한 고르기 작업이 되도록 한다. 유압서보 시스템을 설계하고 주행, 블레이드 및 다목적암 서보제어기를 개발해 고르기, 굴삭/채우기 작업을 실시한다. UCR을 육상 및 수중 고르기 작업에 투입해 작업결과를 보이고, 성능을 분석한다.

## 2. 수중건설로봇의 기구설계

UCR은 Fig. 1과 같이 수중 바닥에 투하된 사석면을 주행할 수 있는 트랙, 사석을 평탄하게 고르는 블레이드, 굴삭/채우기 작업을 수행할 수 있는 다목적암으로 구성되어있다. 트랙이 설치된 하부 플랫폼에 대해 블레이드와 다목적암이 설치된 상부 플랫폼은 360° 회전한다. 블레이드 밑에는 수심센서가 장착되어있고, 상부 플랫폼에는 3축-자이로 센서와 트랜시버가 설치되어있다.



Fig. 1 Underwater construction robot for rubble leveling

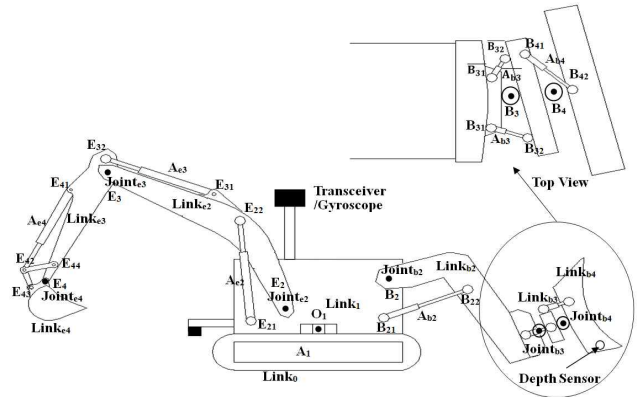


Fig. 2 Links and joints of robot's arm and blade

### 2.1 링크와 조인트의 정의

기구학 해석을 위해 링크와 조인트를 Fig. 2와 같이 정의한다. 하부 플랫폼을 링크  $Link_0$ , 상부 플랫폼을  $Link_1$ 으로 정의하고, 블레이드와 다목적암의 링크를 각각  $Link_{bi}$ 와  $Link_{ei}$ (for  $i=2,3,4$ )로 한다. 여기서 아래첨자 b는 블레이드의 링크를 나타내고, e는 다목적암의 링크를 나타내며 변수  $i=2,3,4$ 는 직렬로 연결된 링크의 순서를 표시한다. 블레이드의 링크는 실린더  $A_{bi}$ 의 길이조절에 따라 조인트  $Joint_{bi}$ 을 중심으로 회전하고, 다목적암의 링크는 실린더  $A_{ei}$ 의 길이조절에 따라 조인트  $Joint_{ei}$ 을 중심으로 회전한다. 조인트  $Joint_{bi}$ 와  $Joint_{ei}$ 의 중심에 각각 점  $B_i$ 와  $E_i$ 를 부여하고, 실린더  $A_{bi}$ 를 점  $B_{i1}$ 과  $B_{i2}$ 로 연결하고, 실린더  $A_{ei}$ 를 점  $E_{i1}$ 과  $E_{i2}$ 로 연결한다. 스윙모터에 의해 상부플랫폼이 회전되는 중심점에  $O_1$ 을 부여한다.

$Link_{i2}$ 는 사석의 높이에 따라 블레이드의 높이를 조절하는 링크이고,  $Link_{i3}$ 는 블레이드를 좌우로 회전시키는 링크로 두 개의 실린더  $A_{i3}$ 과  $\overline{A}_{i3}$ 가 서로 반대방향으로 길이를 조절해 구동된다.  $Link_{i4}$ 는 상하 틸팅 링크로 기준면에 대해 틀어진 블레이드의 각도를 나란하게 맞춰준다. 다목적암의  $Link_{e2}$ 는 붐이고,  $Link_{e3}$ 는 암이며,  $Link_{e4}$ 는 버킷으로 평면 4관절기구에 의해 회전된다. 위에서 정의한 점들의 설계치수와 실린더의 길이는 Table 1과 같다.

Table 1 Design parameters of blade and arm

Blade [mm]	Multi-Func. Arm [mm]
$\overline{B_2B_{21}}=635, \overline{B_2B_{22}}=1496$ $1250 \leq A_{i2} \leq 1580$	$\overline{E_2E_{21}}=704, \overline{E_2E_{22}}=2081$ $1560 \leq A_{e2} \leq 2602$
$\overline{B_3B_{31}}=235, \overline{B_3B_{32}}=694$ $505 \leq A_{i3} \leq 715$	$\overline{E_3E_{31}}=2244, \overline{E_3E_{32}}=634$ $1640 \leq A_{e3} \leq 2736$
$\overline{B_4B_{41}}=619, \overline{B_4B_{42}}=440$ $470 \leq A_{i4} \leq 640$	$\overline{E_4E_{44}}=1583, \overline{E_4E_{44}}=500$ $\overline{E_{42}E_{43}}=380, \overline{E_4E_{44}}=350, \overline{E_4E_{43}}=284$ $1375 \leq A_{e4} \leq 2256$
$\overline{O_1B_2}=1122, \overline{B_2B_3}=2668$ $\overline{B_3B_4}=90$	$\overline{O_1E_2}=808, \overline{E_2E_3}=4600$ $\overline{E_3E_4}=2100$

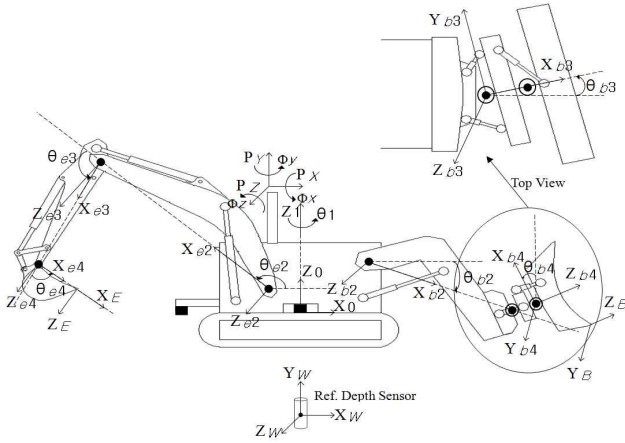


Fig. 3 Coordinate frames assigned at robot's arm and blade

### 2.2 좌표의 정의

위에서 정의한 링크와 조인트에 Fig. 3과 같이 직각좌표를 부여한다. 우선 고르기 작업의 기준이 되는 기준수심센서를 작업면에 설치하고, 월드좌표 {W}를 정의한다. 이동 트랙 플랫폼에 {0}좌표를 부여하며, 좌표 {0}과 원점은 같고 스윙모터  $A_1$ 에 의해 회전하는 좌표 {1}을 정의한다. 좌표 {1}은 좌표 {0}에 대해  $\theta_1$ 만큼 회전한다. 다음으로 블레이드의  $B_i$ (for  $i=2,3,4$ )를 원점으로 하는 좌표  $\{B_i\}$ 를 링크  $Link_{bi}$ 에 부여한다. 좌표  $\{B_2\}$ 는 좌표 {1}의 X-축 방향을 기준으로  $\theta_{b2}$  각도로 회전하고, 좌표  $\{B_i\}$ (for  $i=3,4$ )는 좌표  $\{B_{i-1}\}$ 에 대해  $\theta_{bi}$ 만큼 회전한다. 다목적암에도 블레이드와 같이 점  $E_i$ (for  $i=2,3,4$ )을 원점으로 링크  $Link_{ei}$ 에 부여된 좌표  $\{E_i\}$ 를 정의한다. 좌표  $\{E_2\}$ 는 좌표 {1}의 X-축 방향을 기준으로  $\theta_{e2}$ 의 각도를 이루며, 좌표  $\{E_i\}$  for  $i=3,4$ 는 좌표  $\{E_{i-1}\}$ 에 대해  $\theta_{ei}$ 만큼 회전한다. 마지막으로 블레이드와 다목적암의 끝단에 각각 좌표  $\{B\}$ 와  $\{E\}$ 를 부여한다.

### 3. 기구학 해석

위에 정의한 좌표의 위치벡터가 동차행렬에 의해 변환된다. 즉,  $\{i+1\}$ -좌표계의 위치벡터,  ${}^{i+1}P$ 가  $\{i\}$ -좌표의 위치벡터,  ${}^iP$ 로 아래와 같이 변환된다.

$${}^iP = {}^i T_{i+1} {}^{i+1}P \quad (1)$$

여기서  ${}^i T_{i+1}$ 는  $\{i\}$ -좌표와  $\{i+1\}$ -좌표의 동차행렬이다. 식(1)의 관계를 이용해 버킷의 위치벡터,  ${}^B P$ 와 블레이드의 위치벡터,  ${}^E P$ 를 기준좌표 {W}로 나타낼 수 있다.

$${}^W P_B = {}^W T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_{B2} {}^2 T_{B3} {}^3 T_{B4} {}^4 T_B {}^B P \quad (2a)$$

$${}^W P_E = {}^W T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_{E2} {}^2 T_{E3} {}^3 T_{E4} {}^4 T_E {}^E P \quad (2b)$$

모든 동차행렬은 조인트의 회전각도에 의해 결정되며,  ${}^W T_0$ 는 자이로, LBL 및 수심센서로부터 얻어진다. Fig. 3과 같이 트랜시버 위치에 좌표 {P}를 부여하면 좌표 {W}에 대한 {P}의 위치와 방향을 아래와 같은 동차행렬로 나타낼 수 있다.

$${}^W T_P = [ {}^W R_P ({}^W \phi_x, {}^W \phi_y, {}^W \phi_z), [{}^W P_{px}, {}^W P_{py}, {}^W P_{pz}]^T ] \quad (3)$$

UCR이 X-방향으로 주행하면  ${}^W \phi_z$ 은 선회각도,  ${}^W \phi_y$ 은 등판각도이며,  ${}^W \phi_x$ 는 주행방향에 대한 경사각으로 자이로 센서가 측정한다. 좌표 값  ${}^W P_{px}$ 와  ${}^W P_{py}$ 은 LBL 센서로부터 얻은 수평면의 위치로 기준면에 설치된 2개의 트랜스폰더와 트랜시버 사이의 거리로부터 구해진다. 좌표 값  ${}^W P_{pz}$ 는 블레이드 밑에 설치된 수심센서로부터 측정된 값과 블레이드로부터 트랜시버 설치위치까지의 높이를 감안해 구해진다. 좌표 {0}에 대한 {P}의 관계로부터 {W}에 대한 {0}의 동차행렬은

$${}^W T_0 = {}^W T_P {}^0 T_P^{-1} \quad (4)$$

이다. 여기서  ${}^0 T_P = {}^0 T_1 {}^1 T_P$ 으로  ${}^0 T_1$ 는 스윙모터에 의해 상부 플랫폼이 하부플랫폼에 대해 회전한 것을 나타내며,  ${}^1 T_P$ 은 트랜스폰더가 상부 플랫폼에 대해 설치된 위치를 나타내는 것으로 고정 값이다.

좌표 {W}에 대한 {0}좌표의 관계가 구해지면 장비의 모든 위치를 {W} 좌표로 나타낼 수 있어 지형과 장비 모델을 조합해 수중에서 작업하는 상황을 그래픽으로 나타낼 수 있다.

### 4. 유압 서보 제어기

UCR은 사석 고르기와 같은 중작업을 해야 하므로 유압으로 구동된다. 유압 시스템은 Fig. 4와 같이 유압공급장치(Hydraulic Power Unit), 유압밸브, 유압 액추에이터로 구성되어 있다. 유압공급장치는 유압펌프와 이를 구동하는 전동기,

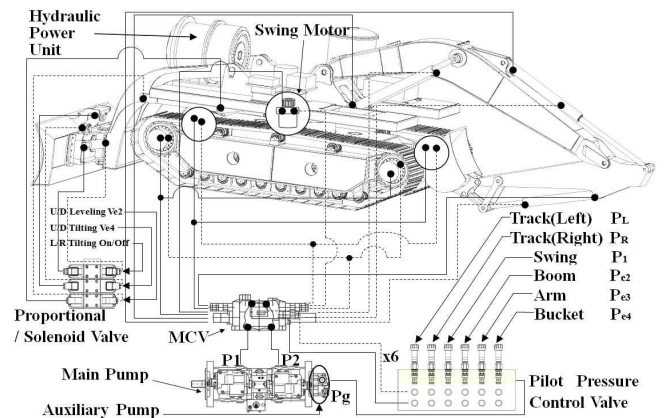


Fig. 4 Hydraulic circuit of UCR

유압탱크로 구성되는데 방수 처리된 용기 속에 내장되어 상부 플랫폼에 설치된다. 메인 펌프는 MCV(Main Control Valve)의 압력원인 P1과 P2를 생성하고, 보조 펌프는 파일럿 압력 제어 밸브의 압력원인 Pg를 생성한다. 유압제어 밸브는 MCV, 파일럿 압력 제어밸브, 비례제어밸브, 솔레노이드 밸브 등으로 구성되어있다. MCV는 스톱의 이동량에 따라 유량을 가변시키는 밸브로 밸브블록에는 트랙, 스윙, 다목적암 및 블레이드 제어모듈 등이 포함되어 있다. MCV의 스톱은 파일럿 압력에 비례하여 이동되는데 파일럿 압력은 제어기의 전류에 따라 가변된다. 제어기는 Fig. 5와 같이 주행, 블레이드, 암 제어로 구성된다.

4.1 주행 제어

주행 제어는 지형의 경사 및 주행부하에 의해 주행방향이 틀어지는 것을 바로잡는 것으로 주행속도,  $V_x$ 를 운전자가 조이스틱으로 지령하면 파일럿 제어밸브에 제공할 전류를 결정한다.

$$I_d = K_v V_x \tag{5}$$

여기서  $I_d$ 는 UCR이 똑바로 진행할 때 좌우 주행모터를 제어할 전류이고,  $K_v$ 는 주행속도를 전류로 변환하는 비례상수이다. 자이로 센서에서 측정된  ${}^W\Phi_z^d$ 가 설정한 주행방향  ${}^W\Phi_z^d$ 에서 벗어나면 오차  $\Delta {}^W\Phi_z = {}^W\Phi_z^d - {}^W\Phi_z^u$ 를 구하고, 좌우 파일럿 제어밸브에 제공할 전류

$$I_L = I_d + K_\phi \Delta {}^W\Phi_z \tag{6a}$$

$$I_R = I_d - K_\phi \Delta {}^W\Phi_z \tag{6b}$$

구한다. 여기서  $K_\phi$ 는 주행오차를 파일럿 밸브의 전류로 변환

하는 비례상수이다. 파일럿 밸브는 전류에 따라 MCV에 압력  $P_L$ 과  $P_R$ 를 인가시켜 스톱을 열고, 유량  $Q_L$ 과  $Q_R$ 에 따라 좌우 주행모터의 회전속도를 조절해 주행방향을 교정한다.

4.2 블레이드 제어

블레이드 제어는 스윙모터  $A_1$ 과 실린더  $A_{bi}$ (for  $i=2,3,4$ )를 구동하여 블레이드 상하높이, 좌우 회전 및 상하 틸팅 작업을 수행한다. 사석을 밀 때 회전부하에 의해 상부 플랫폼이 회전하는 것을 방지하기 위해 유압구동식 잠금 핀으로 상부 플랫폼을 하부 플랫폼에 고정시킨다. 스윙모터의 각도를 엔코더로부터 읽고 원하는 각도를 생성하기 위해 PID 제어기가 파일럿 제어 밸브에 전류  $I_1$ 를 제공한다. 주행제어와 같이 파일럿 밸브의  $P_1$ 과 MCV의  $Q_1$ 에 의해 스윙모터가 회전하고, 상부 플랫폼이 하부플랫폼과 나란하면 잠금 핀을 밀어 올려 고정시킨다.

조인트  $\theta_{bi}$ 와  $\theta_{ei}$ (for  $i=2,3,4$ )는 피동 조인트로 각 실린더가 연결된 점들과 조인트 점이 이루는 삼각형의 기구학적 구속운동에 의해 구동된다. 블레이드의 경우 점  $B_{i1}$ 와 점  $B_{i2}$  사이에 연결된  $A_{bi}$ 의 길이( $\overline{B_{i1}B_{i2}}$ )는 초기 길이( $\overline{B_{i1}B_{i2}}^0$ )와 제어 길이( $l_{bi}$ )를 합한 것이다. 실린더  $A_{bi}$ 의 길이가 변하면  $\Delta B_i B_{i1} B_{i2}$ 의 기하학적 구속조건에 의해 피동조인트는 아래와 같이 회전한다.

$$\theta_{bi} = \cos^{-1} \left( \frac{B_i B_{i1}^2 + \overline{B_i B_{i2}}^2 - \overline{B_{i1} B_{i2}}^2}{2 B_i B_{i1} \overline{B_i B_{i2}}} \right) + \xi_{bi} \tag{7}$$

여기서 첫 항은  $\angle B_{i1} B_i B_{i2}$ 이고,  $\xi_{bi}$ 는  $l_{bi}=0$  일 때 초기각도로  $\theta_{bi} = \theta_{bi}^0$ 를 구하기 위해 보상해주는 고정된 각도이다. 블레이드와 다목적암의 피동조인트의 운동범위는 Table 2와 같다.

고르기 작업에서  ${}^W P_{Bx}$ 와  ${}^W P_{By}$ 는 주행제어에 따라 결정되므로 블레이드의 제어 대상이 아니며,  ${}^W\Phi_{Bz}$ 는 주행방향으로  ${}^W\Phi_{Bz} \neq 0$  이더라도 사석을 평탄하게 고르는데 영향을 주지 않는다. 그러나 방위  ${}^W\Phi_{By}$ 는 등관각도로  ${}^W\Phi_{By} > 0$  이면 블레이드를 올려야하고,  ${}^W\Phi_{By} < 0$  이면 블레이드를 내려야한다. 블레이드를 올리거나 내리면 블레이드의 높이가 또한 변하게 된

Table 2 Joint ranges of the blade and the arm

Blade [degree]	Arm [ degree]
$4.2^\circ \leq \theta_{i2} \leq 34.4^\circ$	$83.5^\circ \leq \theta_{e2} \leq 175.5^\circ$
$-21.1^\circ \leq \theta_{i3} \leq 21.1^\circ$	$35.7^\circ \leq \theta_{e3} \leq 156.5^\circ$
$-9.7^\circ \leq \theta_{i4} \leq 13.2^\circ$	$-9.1^\circ \leq \theta_{e4} \leq 172.3^\circ$

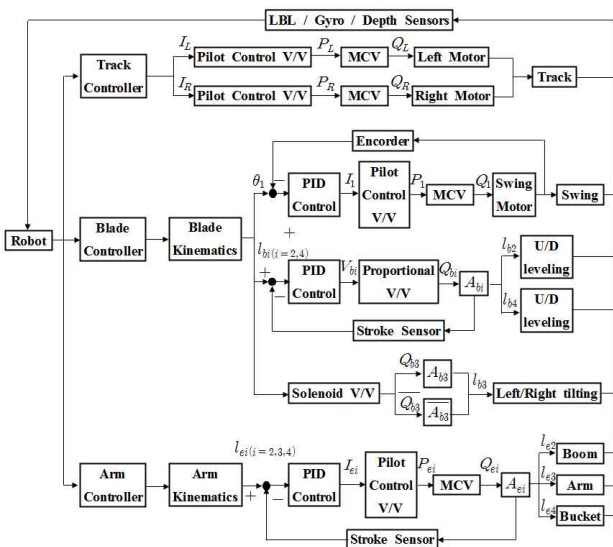


Fig. 5 Hydraulic control schematics of UCR



다. 높이와 등관각도 중 하나만 만족시키면 기준면과 나란한 고르기 작업이 되므로 본 연구에서는 높이를 제어하도록 한다. 마지막으로 방위  ${}^W\Phi_{Bz}$  는 주행방향에 대한 UCR의 경사각으로  ${}^W\Phi_{Bz} \neq 0$  이면 블레이드를 반대방향으로 회전시켜 기준면과 나란히 맞춰야한다. 따라서 블레이드가 제어할 대상은  ${}^WP_{Bz}$  와  ${}^W\Phi_{Bz}$  으로 조인트  $\theta_{b2}$  와  $\theta_{b4}$  를 사용한다. 식(2a)을 이용해 두 조인트 값과 제어대상의 관계를

$$({}^WP_{Bz}, {}^W\Phi_{Bz}) = \text{Forward\_blade}(\theta_{b2}, \theta_{b4}) \quad (8)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\text{Forward\_blade}(\cdot)$  는 블레이드의 순방향 기구학 식이다. 역으로  $({}^WP_{Bz}, {}^W\Phi_{Bz})$  이 주어질 때 조인트 값은

$$(\theta_{b2}, \theta_{b4}) = \text{Inverse\_blade}({}^WP_{Bz}, {}^W\Phi_{Bz}) \quad (9)$$

으로  $\text{Inverse\_blade}(\cdot)$  는 역기구학 식이다.

위식 (8)과 (9)이 블레이드 제어에 구현되어 Fig. 6의 흐름도와 같이 고르기 작업을 수행한다. UCR을 주행시키기 전 고르기 깊이를  ${}^WP_{Bz}^d$  를 결정하고, 자이로, LBL 및 수심센서들로부터 트랜시버가 설치된 좌표 {P}의 위치와 방위를 측정한다. 스윙모터의 회전각도,  $\theta_1$  을 읽어 상부플랫폼의 위치와 방위인  ${}^WT_0$  를 구하고,  $\theta_1 = 0^\circ$  또는  $\theta_1 = 180^\circ$  일 때 상부플랫폼을 하부플랫폼에 고정시켜 나란하게 한다. 스트로크 센서로부터 측정된  $l_{bi}^a$  로부터  $\theta_{bi}^a$  를 역학적으로 계산하고, 블레이드의 실제 길이

이와 방위인  ${}^WP_{Bz}^a$  와  ${}^W\Phi_{Bz}^a$  을 순방향 기구학해석으로 구한다.  ${}^WP_{Bz}^d = {}^WP_{Bz}^a$  이고,  ${}^W\Phi_{Bz}^a = 0$  이면 트랙을 이동시켜 고르기 작업을 실시하고, 만족하지 않으면 식(9)의 역방향 기구학해석을 이용해 제어 길이  $\theta_{bi}^d$  (for  $i=2,4$ )를 결정한다. 여기서 위치 입력은 설정한 고르기 깊이가  ${}^WP_{Bz}^d$  이며 방위는 UCR의 경사를 보상하기 위해  $-{}^W\Phi_{Bz}^a$  이다. 피동조인트 각도  $\theta_{bi}^d$  (for  $i=2,4$ )을 만족시킬 제어길이  $l_{bi}^d$ 는 기구학적 구속식  $l_{bi}^d = f(\theta_{bi}^d)$ 에 의해 구해지고, 역으로 제어길이에 대한 피동조인트 각도는 역구속식,  $\theta_{bi}^a = f^{-1}(l_{bi}^a)$ 로 구해진다. 길이 오차( $l_{bi}^d - l_{bi}^a$ )를 줄일 전압  $V_{bi}$  (for  $i=2,4$ )을 비례 밸브에 제공되면 전압에 비례해 스펴을 열어 실린더  $A_{bi}$  (for  $i=2,4$ )에 유량  $Q_{bi}$  (for  $i=2,4$ )을 흘려보내 길이를 조절한다.

마지막으로 두 개의 실린더  $A_{b3}$ 과  $\overline{A}_{b3}$ 는 사석을 한 쪽 방향으로 밀어낼 때 사용하는 것으로 서로 반대방향으로 길이를 조절해 블레이드를 회전시킨다. 제어기의 온/오프 신호에 의해 두 개의 솔레노이드 밸브가 스펴을 반대방향으로 열어  $Q_{b3}$ 와  $\overline{Q}_{b3}$ 의 유량을 해당 실린더에 보내 좌우로 최대각도로 회전시킨다.

### 4.3 다목적암 제어

다목적암의 조인트 운동은 블레이드와 같이 구속운동에 의해 구동된다. 즉, 점  $E_{i1}$ 와 점  $E_{i2}$  (for  $i=2,3,4$ ) 사이에 연결된 실린더  $A_{ei}$ 의 길이가 변하면  $\Delta E_i E_{i1} E_{i2}$ 의 기하학적 구속조건에 의해  $\angle E_{i1} E_i E_{i2}$ 가 변한다. 각도  $\theta_{ei}$  (for  $i=2,3$ )는 실린더의 길이변화에 의해 직접적으로 변화되나  $\theta_{e4}$ 는  $\square E_{i2} E_{i3} E_4 E_{i4}$ 으로 이뤄진 4관절기구를 통해 증폭된다. 다목적암의 조인트 값이 주어지면 버킷의 위치( ${}^WP_E$ )와 자세( ${}^WR_E$ )가 다목적암의 순기구학으로 계산되고, 역기구학으로 위치와 방위를 만족시킬 조인트 값을 구한다. 운전자가 조인트 모드 또는 버킷 모드로 다목적암을 조종하면 Fig. 5의 Arm Kinematics가 제어 길이  $l_{ei}$  (for  $i=2,3,4$ )를 생성하고, 실제 길이와 비교해 오차를 계산한다. PID 제어기가 오차를 줄이기 위해 파일럿 제어 밸브에 제공할 전류  $I_{ei}$ 를 제공하고 파일럿 제어 밸브가 전류에 비례해 붐, 암, 버킷의 MCV에 각각 파일럿 압력  $P_{e2}$ ,  $P_{e3}$ ,  $P_{e4}$ 을 제공한다. 압력에 비례해 MCV가 스펴을 열어 실린더  $A_{ei}$ 가 제어된다.

## 5. UCR의 육상 및 수중실험

UCR의 성능을 평가하기 위해 육상실험을 실시했다. Fig. 7(a)는 블레이드로 사석을 고르는 장면이며 Fig. 7(b)는 다목적암으로 사석을 파는 장면이다.

실험을 위해 중간크기의 사석(20cm×20cm×15cm)으로 이

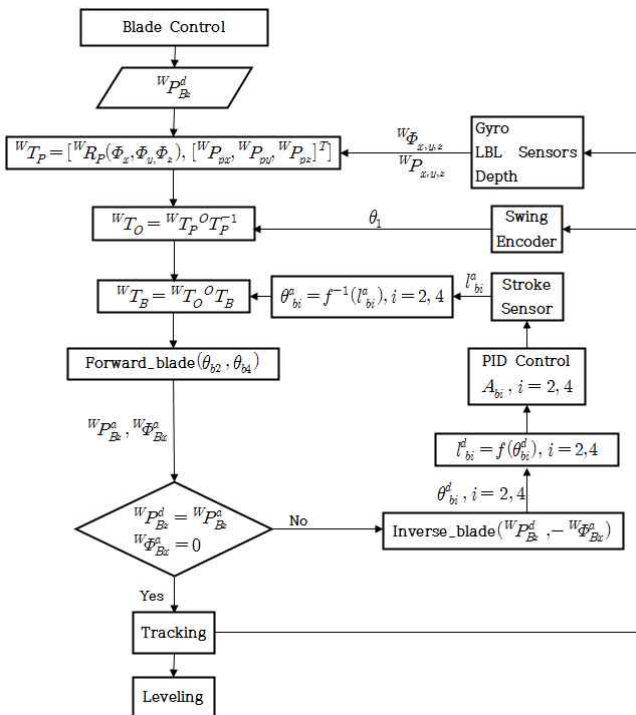
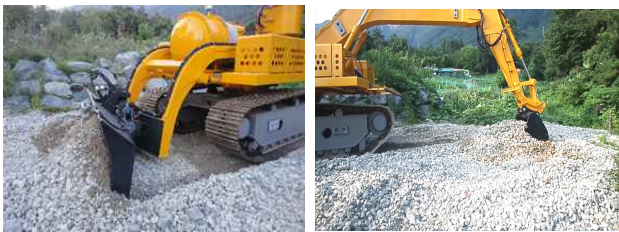
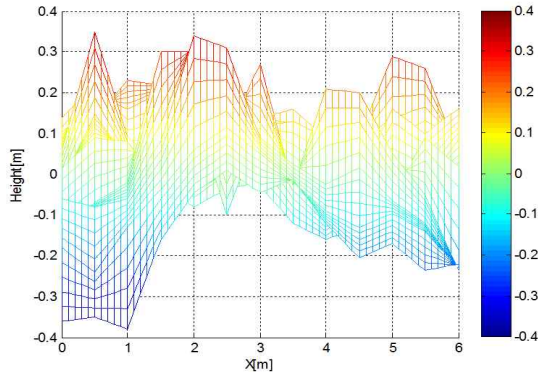


Fig. 6 Flow chart of leveling work by the blade

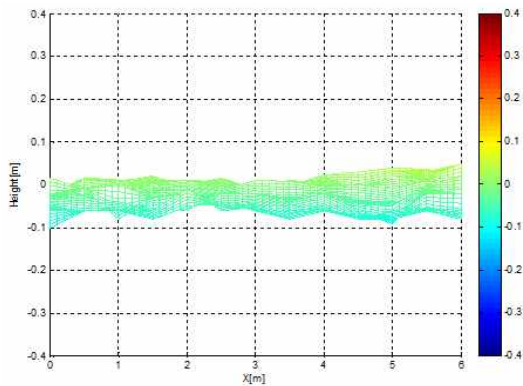
루어진 6m×6m 크기의 실험장을 조성했다. 작업 전 0.5m간격으로 높이를 측정한 결과 Fig. 8(a)와 같이 지형의 고저차는 최대 73cm정도로 기준면에 대해 약 -38cm ~ +35cm의 높이차를 보인다. 실험은 UCR를 초기위치에 정렬시키고 3m폭의 블레이드로 사석을 밀면서 실험장 끝까지 6m를 주행하여 고르기 작업을 수행하였다. 1차 작업 후 UCR을 후진하여 약 2m 좌로 이동하고 주행방향을 정렬 후 다시 2차 작업을 진행하는 방식으로 총 3차 작업을 수행하여 전체 실험장의 고르기 작업을 완료하였다. Fig. 8(b)는 고르기 작업 후 지형 측량 결과이다. 지형의 고저차는 최대 15cm로 기준목표 면에 대해 약 -10cm ~ +5cm의 높이차로 골라져 만족스러운 결과를 보였다. 다목적암 제어도 성공적으로 수행되어 사석을 파고, 메우는 작업을 원활히 수행했다.



(a) Leveling by the blade (b) Digging by the arm  
Fig. 7 Experimental test of UCR in the land



(a) Before



(b) After

Fig. 8 Topography of work area before and after leveling

부산 신항만 케이슨 블록 시공현장에서 Fig. 9와 같이 수중 실험을 수행하였다. 바지선 위에 운전실, 발전기, 케이블릴 등의 선상지원 시스템이 배열되어있고, UCR이 크레인에 의해 수중으로 투입되고 있는 장면이다. 실제 고르기 작업 전에 수중에서의 블레이드 높이 제어 성능을 확인하기 위해 크레인으로 UCR을 수중 1m정도 올렸다 내렸다할 때 제어 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이때 제어 깊이  ${}^W P_{Bz}^d$ 는 수심 5.28m에 고정된 기준수심 센서값을 사용하였다. 크레인에 의해 UCR이 올라갈 때 제어기는  $\theta_{b2}$ 를 10°에서 22°로 블레이드를 내리고, 내려갈 때는 22°에서 4.7°로 올려 원하는 높이를 유지하고 있다. 오차의 범위는 ±5Cm 이내로 고르기 작업에 만족되는 오차이다.

위 실험에서 기준수심센서는 사석면에 고정되어있을 지라도 파고와 조위의 영향을 받아 수심 값이 떨어지고 있음 알 수 있다. 이런 오차를 줄이기 위해 기준수심 센서 값과 블레이드 수심 센서 값의 차이로부터 실제 고르기 깊이를 산출한다. 두 센서가 파고와 조위에 따라 같이 변하므로 두 수심 값의 차이를 이용하여 정확한 고르기 면을 제어한다.

실제 고르기 작업은 수심 약 21m의 사석면에 20m x 20m 크기의 작업공간을 설정한 후 남북방향으로 주행하면서 수행되었다. 작업은 Fig. 11과 같이 운전자가 VR 시스템이 제공하는 작업지형과 UCR의 그래픽 모델을 보면서 원격으로 조

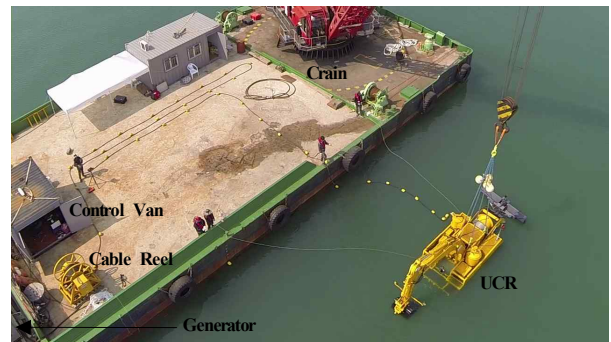


Fig. 9 Arrangement of on-board equipments for rubble leveling work by UCR

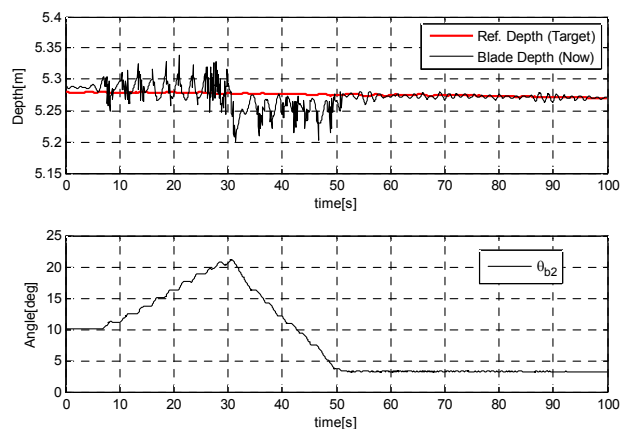


Fig. 10 Blade leveling control in the underwater

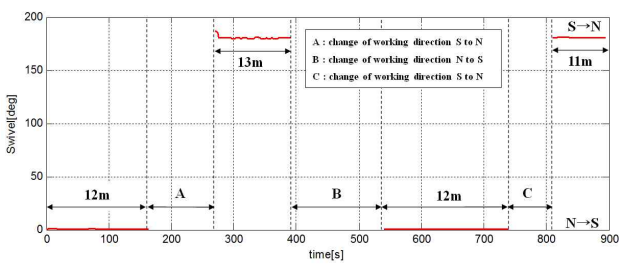
중해 이뤄진다. VR 시스템 주위에는 광학카메라와 소나의 이미지가 제공된다.

Fig. 12(a)는 시간에 따른 로봇의 진행방향과 거리를 나타낸다. 북남과 남북으로 블레이드의 방향을 4차례 변경하면서 고르기 작업을 실시하고 있다. 1차적으로 북남방향 작업 후 스윙으로 180°회전하고 2차로 남북방향 고르기 작업을 수행하는 방식으로 그래프에 나타난 거리만큼 진행하였다. Fig. 12(b)는 블레이드 하부에 장착된 수심센서와 기준 사석면에 설치된 기준수심센서 값의 변화를 나타낸다. 작업이 진행 될수록 블레이드의 수심센서 값이 점점 기준수심센서 값에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 작업이 이뤄지는 동안 기준수심 센서 값은 조위에 의해 140mm 증가하고, 파고에 의해 작은 파형을 이루면서 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 블레이드에 장착된 수심센서 값도 같이 변하므로 두 센서 값의 차이를 바탕으로 작업하는 고르기 작업에는 영향을 미치지 않는다. 1차 작업 시 약 1m의 고저차를 가지는 지형이 작업이 진행될수록 점점 0m로 가까워지는 것을 볼 수 있다. 이것은 블레이드의 높이가 점점 기준 높이와 가까워지면서 고르기 작업이 진행되고 있음을 나타낸다. 마지막 4번째 작업 후 기준수심 센서와 블레이드 수심센서의 차이는 약 ±20cm로 고르기 작업의 정밀도는 약 ±20cm임을 알 수 있다.

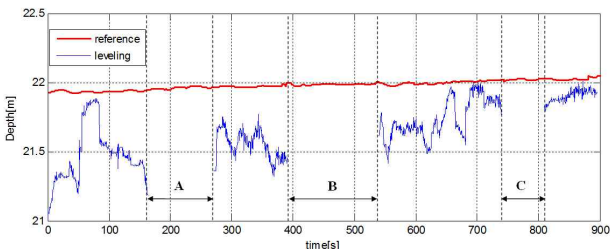


(a) VR system (b) operating room

Fig. 11 Operation of UCR

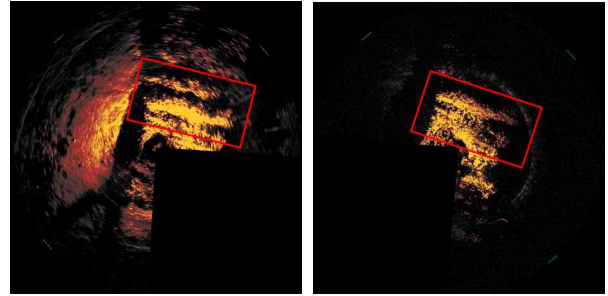


(a) Working process



(b) Leveling depth versus reference depth

Fig. 12 Underwater rubble leveling by UCR



(a) Before (b) After

Fig. 13 Scanning sonar images of rubble leveling mound before and after the work

Fig. 13은 고르기 작업 전후에 스캔 소나가 사석을 마운드를 촬영한 것이다. Fig. 13(a)와 같이 사석에 의해 두 개의 산 사이에 깊은 골이 패여 있으나 고르기 작업 후 Fig. 13(b)와 같이 대부분 평탄화된 것을 확인할 수 있다. 위 작업을 분석하면 약 15분 동안 3m 폭의 블레이드가 10m 이상을 전후진하면서 20m<sup>2</sup>의 고르기 작업을 수행하였다. 따라서 작업속도는 80m<sup>2</sup>/h으로 작업준비 및 블레이드의 정렬시간을 감안하더라도 40m<sup>2</sup>/h이 될 것으로 추측된다. 일본에서 개발한 수중굴삭기가 관리기준 ±30cm의 사석초벌 고르기에서의 시공능력이 35.4m<sup>2</sup>/h으로 잠수부의 시공능력 4.3m<sup>2</sup>/h 보다 8배 이상인 것으로 평가되었다(KIMST, 2014). 개발된 UCR은 다목적암 뿐 아니라 블레이드까지 부착되어 일본 수중굴삭기보다 우수한 작업속도를 가질 것으로 판단된다.

## 6. 결론

수중항만공사 중 사석 고르기 작업을 위해 수중건설로봇을 개발했다. 개발된 로봇은 블레이드와 다목적암으로 구성되어 사석을 밀고, 매꾸어 고르기 작업을 실시했다. 로봇에 설치된 위치 및 자이로 센서와 동기를 이루면서 블레이드와 다목적암을 제어할 수 있는 기구학을 해석하였다. 주행, 블레이드 및 암 제어에 이뤄진 유압 서보 제어 시스템을 개발해 기구학을 적용하고, 육상 및 수중실험을 실시해 로봇의 성능을 검증했다. 육상 실험에서 고르기 작업 후 지형 측량 결과 -10cm ~ +5cm의 높이차를 보여 우수한 고르기 시공성을 보였다.

수중실험에서 로봇을 남북으로 방향을 바꾸면서 10m씩 고르기 작업을 실시했다. 작업이 진행되면서 약 1m의 고저차를 가지는 지형이 점점 0m로 가까워지는 것을 블레이드에 장착한 수심센서로 확인할 수 있었다. 작업속도는 40m<sup>2</sup>/h으로 작업준비 및 블레이드의 정렬시간을 감안하더라도 잠수부의 시공능력 보다 8배 이상일 것으로 평가된다. 개발된 로봇은 잠수부가 투입될 수 없는 대수심에서 더 효율이 높을 것으로 예상되며, 수중건설로봇의 개발로 생산성 향상 뿐 아니라 잠수병 등의 산재를 예방하고, 열악한 작업환경을 개선할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부 첨단항만건설기술개발사업으로 연구 되었으며, 부분적으로 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

---

Received 31 January 2015

Revised 8 June 2015

Accepted 15 June 2015

## References

- [1] Bhaveshkumar, P. P. and Prajapati, J. M.(2013), "Kinematics of Mini Hydraulic Backhoe Excavator", International journal of mechanical engineering and robotics research, Vol. 2, No. 1, pp. 166-182.
- [2] Hirabayashi, T., Yamamoto, T., Yano, H., Iwata, H.,(2006) "Experiment on teleoperation of underwater backhoe with haptic information", International Association for Automation and Robotics in Construction, Proceedings 23rd Int. Sym. ISARC, pp. 36-41.
- [3] Kim, C. H., Kim, T. S. and Lee, M. K. (2012), "Study on the estimation of the cylinder displacement of an underwater robot for harbor construction using a pressure sensor", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 10, pp. 865-871.
- [4] Kim, C. H. and Lee, M. K.(2014), "Development of armour stone covering robots for breakwater construction", 14th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 1652-1656.
- [5] Kim, T. S., Jang, I. S., Shin, C. J. and Lee, M. K.(2014), "Underwater Construction Robot for rubble leveling on the seabed for port construction", 14th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 1657-1661.
- [6] KIMST(2014), Development of unmanned automated equipment for underwater construction of ports, Oceans and Fisheries R/D report.
- [7] Koivo A.(1994), "Kinematics of Excavators (Backhoes) for Transferring Surface Material", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 17-32.
- [8] Naruse, T., Sawano, T. and Iida, K.(1988), "Rubble leveling robot in underwater construction", The 5th international symposium on robotics in construction, 5th ISARC, pp. 727-735.
- [9] Vaha, P. K. and Skibniewski, M. J.(1993), "Dynamic Model of Excavator", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 148-158.