

수중항만공사 기계화 시공을 위한 로봇 개발

박근우[†] · 김태성^{*} · 정진욱^{*} · 김용희^{*} · 이민기^{**}

Development of Robot for the Mechanized Construction of Underwater Harbor

K. W. Park, T. S. Kim, J. W. Chung, Y. H. Kim and M. K. Lee

Key Words: Armor stone(피복석), Breakwater (방파제), Excavator(굴삭기), Harbor construction(항만공사), Parallel mechanism robot (병렬기구)

Abstract

This research develops a robot as the device which constructs underwater harbour. This construction is to build a breakwater, which is dangerous and difficult. The hydraulic parallel mechanism-typed robot is developed to mechanize the construction by operating of a stoneworker (or diver) through a joystick. The six-dof robot is able to carry 2-3 tons' heavy stone and put it on the surface of breakwater. This paper presents the mechanical design of a miniature robot, its control and application for the breakwater construction.

1. 서 론

본 연구는 항만공사 중 방파제 피복작업에 적용이 가능한 로봇의 개발에 관한 것이다. 피복작업은 사석의 유실을 방지하기 위해 방파제 겉면에 2-3ton의 돌을 쌓는 작업으로 육상뿐만 아니라 수중에서도 이루어진다. 따라서 해상의 날씨와 파랑·조석 등이 공사 진행에 절대적인 지배요소로 작용하고 있다. 특히, 수중 작업은 오로지 작업자인 잠수부의 판단에만 의존하고있어, 원근감이 떨어질 뿐 아니라 혼탁하여 사실상 공사 품질 관리·확인이 불가능하다.

방파제 피복작업은 무거운 돌을 체인으로 감고, 쌓는 과정에서 손가락이 돌 사이에 끼어 다치는 사고가 자주 발생하므로 기계화에 대한 요

구가 절실하다. 지금까지는 굴삭기 끝단에 장착해 돌을 집고, 거치할 수 있는 간단한 집게 개발에 주력하고있다[1]. 그러나 굴삭기에 장착된 집게는 상하좌우 이동과 상하각도 변화만 가능하므로 피복석의 면을 짜맞추는 정밀작업은 불가능하다. 또한, 집게자체의 운동이 없으므로 굴삭기로부터 분리되어 작업해야하는 수중항만공사에는 적용할 수 없다.

본 연구에서는 중량물인 피복석을 정밀하게 다룰 수 있는 병렬기구 로봇과 집게 및 주변기기를 개발한다. Stewart-Gough Platform(SGP)[2]을 이용해 6자유도의 로봇 암을 개발하고, 플랫폼에 집게를 장착해 피복석을 집어 방파제 표면에 쌓도록 한다. 로봇 구동은 유압시스템으로 행해지며, 조이스틱으로 집게의 위치(3자유도)와 자세(3자유도)를 자유자재로 생성해 원하는 위치/자세에서 피복석을 집고 거치할 수 있도록 한다.

2. 방파제 피복작업을 위한 로봇 암

기존의 방파제 피복작업은 석공(잠수부) 및 보

[†] 국립창원대학교

E-mail : kwoopark@sarim.changwon.ac.kr

TEL : (055)275-7553 FAX : (055)262-5064

^{*} 국립창원대학교 (원)

^{**} 국립창원대학교

조수, 중장비 운전원이 한 조가 되어 수작업으로 수행하고있다. 보조수가 체인으로 피복석을 묶으면 중장비 운전원이 쌓을 근방에 갔다놓고 석공(잠수부)이 피복석을 짜맞추기 위한 운동을 운전원에게 지시한다. 이를 스피커를 통해 들은 운전원은 세밀한 운전조작으로 체인에 묶인 피복석을 원하는 위치에 내려놓고 석공(잠수부)이 체인을 풀어 작업을 완료한다.

기존의 피복 작업의 문제점은

- 1) 감은 체인이 끊어지거나 헐거워 피복석이 떨어질 위험이 있고,
- 2) 피복석을 상하좌우로만 이동이 시킬 수 있으므로 회전운동이 요구되는 경우 체인을 다시 걸어 끌어당기는 번거로움이 있으며,
- 3) 피복석을 육안으로 직접 보고있는 석공(잠수부)이 위치조정을 하지 못하고 중장비 운전원이 간접적으로 조정하므로 효율이 떨어지고,
- 4) 피복석을 다루는 과정에서 석공(잠수부)의 손가락이 끼어 다치거나 운전원과 통신오류에 의해 산재가 발생한다.

본 연구에서는 산재예방, 생산성향상, 공사감독을 도모하기 위해 방파제 피복작업을 기계화·자동화할 수 있는 시공장비를 개발한다. 위 작업을 수행하기 위한 로봇 암의 조건은

- 1) 2-3톤의 피복석을 집고 운반할 수 있는 강성을 가져야 하며,
- 2) 피복석의 위치 (3자유도) 뿐아니라 자세(3자유도)까지도 자유자제로 생성할 수 있는 자유도(6자유도)를 가져야한다. 본 연구에서는 SGP형 병렬기구 로봇을 개발한다. SGP형 병렬기구 로봇은 6개의 실린더가 베이스에서부터 플랫폼에 병렬로 연결되어있다. 따라서 플랫폼에 부과되는 힘/모멘트가 6개의 실린더에 분산되므로 가반 중량이 크고, 넓은 공간에서 지지하므로 강성이 크다. 또한, 실린더의 길이 조절에 의해 플랫폼의 위치와 자세를 자유자제로 생성할 수 있다. 병렬기구 로봇은 높은 강성과 다 자유도의 장점 때문에 기계 가공 작업[3], CNC 공작기계[4]등에 적용해왔다. 그러나 작업공간이 작고, 제어할 수 없는 특이점이 여러 곳에 존재한다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 위와 같은 문제를 해결하면서 2가지 적용범위에 맞춰 시공장비를 개발한다. 즉,

- 1) 로봇 암이 굴삭기의 부속물(attachment)로 버

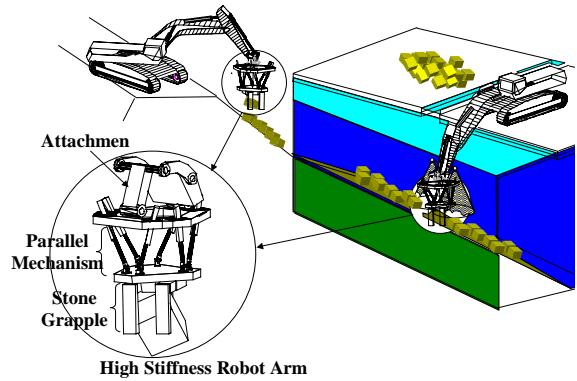


Fig. 1a Robot work in ground and undersea (less than 10 m).

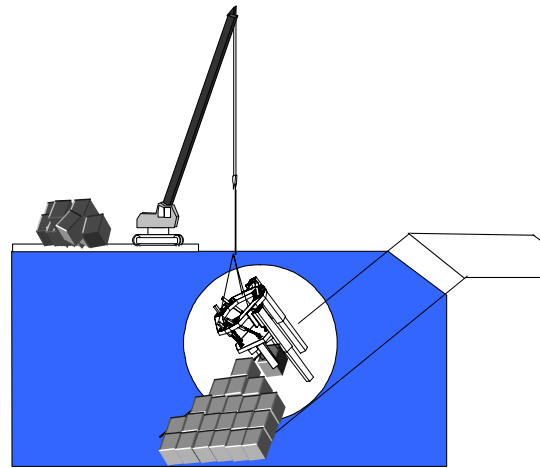


Fig. 1b Robot work undersea (over 10 m).

킷(bucket)과 같이 끝단에 장착되어 방파제 피복 작업을 한다. 위 작업은 육상이나 저수심 (10m 이하)과 같이 작업위치가 굴삭기로부터 비교적 가까운 거리에 있을 때 행한다(Fig. 1a). 굴삭기로부터 로봇 암을 파지 또는 거치 근방에 갔다 놓으면 로봇 암이 플랫폼에 설치된 집계를 정밀 조작해 피복석을 집고, 쌓는다. 이러한 시스템을 구성하기 위해 로봇과 굴삭기의 전기·유압 시스템을 통합한다.

2) 작업위치가 중장비로부터 멀리 떨어진 경우 굴삭기로부터 로봇을 분리해 단독으로 작업을 수행하도록 한다(Fig. 1b). 원거리까지 작업이 가능한 기중기 끝단에 로봇을 매달고 2개의 다리가 로봇을 지지한다. 기중기가 로봇을 파지 또는 거치 근방에 갔다 놓으면 다리가 로봇을 지지하면서 집계를 정밀 조작해 피복석을 집고, 쌓는다. 위 작업은 대수심 (10m이상)의 수중작업에 적용하도록 한다.

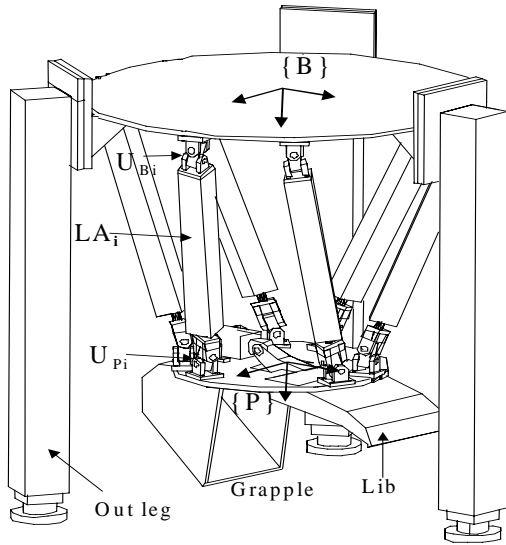


Fig. 2 Kinematic structure of robot arm and grapple.

상기 작업의 자동화 범위는 단계별로 구현할 수 있다. 첫 단계로 기존 작업과 같이 중장비 운전원과 석공(잠수부)을 투입해 중장비 운전원은 로봇을 파지 또는 거치할 근방에 갔다 놓고, 석공(잠수부)이 로봇을 정밀 조작해 피복석을 집고, 거치 하도록 한다. 피복석을 집게로 집고, 석공(잠수부)이 손을 대지 않고 조이스틱으로 육안으로 보면서 직접 피복석을 다루므로 기존의 문제를 해결할 수 있다. 자동화 단계를 높여 로봇에 카메라를 설치함으로써 피복석을 쌓은 장면을 영상으로 보면서 중장비 운전원이 피복작업을 수행할 수도 있다. 이 경우 석공(잠수부)이 투입할 필요가 없으나 수중공사의 경우 특수한 작업특성을 고려해 잠수부를 투입한다 할지라도 잠수정 속에서 로봇을 조작해 작업할 수 있으므로 잠수병이라는 난제를 해결할 수 있다. 또한, 작업장면을 모니터로 확인할 수 있으므로 기존의 잠수부 판단에 의존하던 것과 달리 공사관리 감독을 효율적으로 수행할 수 있다.

3. 병렬기구 로봇 암 개발

일반적인 직렬기구 타입으로 6자유도의 로봇 암을 설계할 경우 6개의 링크가 베이스에서부터 그레플까지 직렬로 연결되는 긴 외팔보 구조가 된다. 따라서 일반 다관절형 기구로는 강성이 큰 6자유도의 로봇 암을 설계하는데 한계가 있다.

강성을 높이고, 2-3톤의 가반중량을 갖기 위해 베이스와 플랫폼 사이에 6개의 리니어 액추에이터를 병렬로 설치한 병렬기구 로봇 암을 설계한다. 이를 위해 역방향 기구학(1)과 순방향 기구학 그리고 자코비안(2)을 해석한다. 병렬기구 로봇 암을 Fig. 2와 같이 구성한다. 리니어 액추에이터

LA_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)는 양단에 유니버설 조인트 U_{Bi} 와 U_{Pi} 가 설치되어 베이스와 플랫폼에 각각 연결되어 있다. 각 유니버설 조인트는 베이스와 플랫폼에 각각 $\alpha=90^\circ$ 와 $\beta=30^\circ$ 의 각도로 반복되어 설치되며 베이스에 로봇 암을 지지하는 3개의 다리가 장착되어 있다. 그레플은 플랫폼 밑에 설치되며 덮개를 실린더가 열고 닫아 피복석을 집는다. 기구학을 해석하기 위해 좌표계 {B}를 베이스 중앙에 부여하고 좌표계 {P}는 플랫폼 중앙에 부여한다. 플랫폼의 위치/자세가 $x=[\Omega^T, P^T]^T$ 으로 주어질 때 역기구학은 아래와 같이 LA_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)의 길이를 구한다.

$$L_i = P + {}^B_P R P_i - B_i \tag{1}$$

여기서 Ω 는 오일러(Euler) 각도로 X_B, Y_B, Z_B 축에 대한 플랫폼의 회전 각도이며, P 는 좌표계 {B}의 원점에서부터 좌표계 {P}의 원점까지의 거리 벡터이다. 반대로 순방향 기구학은 L_i 가 주어질 때 플랫폼의 위치/자세를 구한다[5]. 속도 제어를 위해서는 플랫폼의 속도를 액추에이터의 속도로 변환하는 자코비안을 구해야 한다. 병렬기구의 속도 자코비안은

$$\dot{L}_i = J \dot{x} \tag{2}$$

으로 J 는 6×6 행렬로 얻어진다. 위에서 구해진 순방향 기구학과 자코비안을 이용하면 로봇 끝단의 속도를 제어할 수 있다.

본 연구에서는 실제 현장에 로봇을 적용하기 전에 축소형 로봇을 개발해 모의 방과제 피복작업을 실시한 후 자동화 범위와 공정 프로그램을 개발하는데 목적이 있다. 축소형 로봇은 가반중량이 200kg으로 위치 작업공간은 $\pm 250(L) \times$

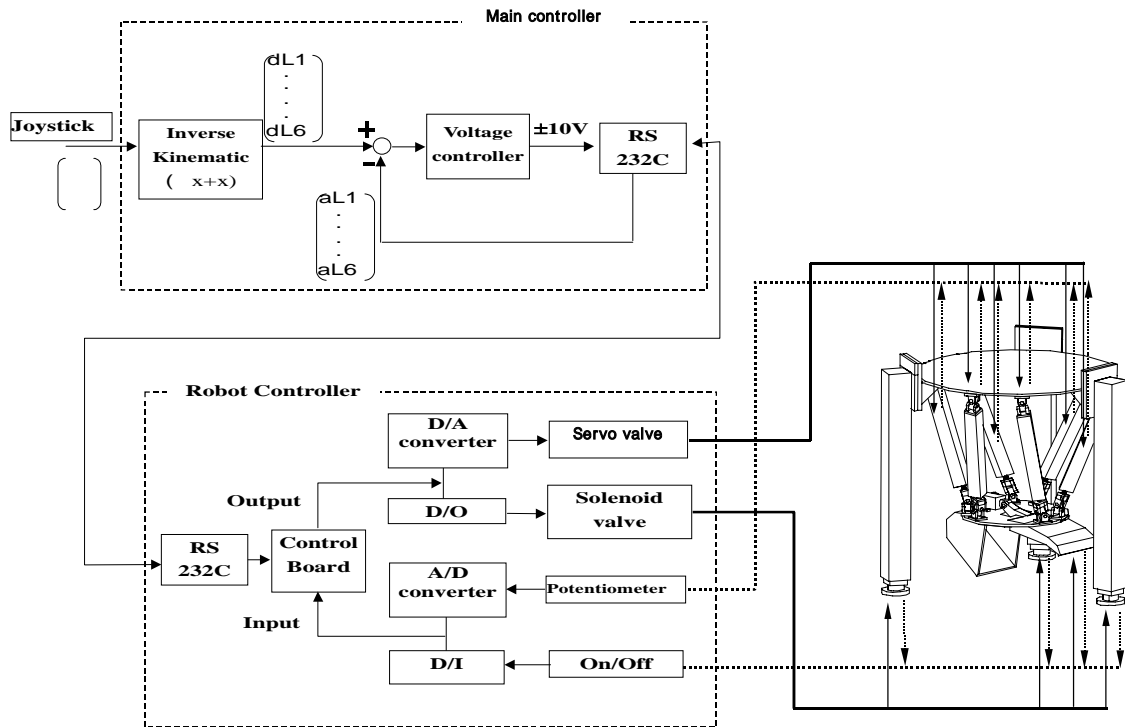


Fig. 3 Control Scheme of Robot System.

Table I. Design Parameters of Robot Arm and Grapple

Hydraulic	Pump		5.8 ~ 237 cm^3/rev
	Electric motor		11 KW
Robot Arm	Hydraulic actuator	Radius	$\phi 30\ mm \times 6$
		Stroke	250 $mm \times 6$
	Servo valve	350 $kg \cdot f/cm^2 \times 6$	
	Pay load		1.5ton
Out leg	Hydraulic actuator	Radius	$\phi 50\ mm \times 3$
		Stroke	500 $mm \times 3$
	Solenoid valve	350 $kg \cdot f/cm^2 \times 3$	
	Pay load		4.0ton
Grapple	Hydraulic actuator	Radius	$\phi 30\ mm$
		Stroke	100 mm
	Solenoid valve	350 $kg \cdot f/cm^2$	
	Pay load		1.5ton

$\pm 250(W) \times 250(H)$, 자세 작업공간은 $\pm 30^\circ (\Omega_x)$, $\pm 30^\circ (\Omega_y)$, $\pm 30^\circ (\Omega_z)$ 로 한다. 베이스와 플랫폼의 반경을 각각 400mm, 200mm으로 하고 순/역 기구학 해석을 통해 작업공간을 만족시키는 액추에이터의 스트로크를 250mm로 선정한다. 자코비안 해석과 순방향 기구학 해석을 통해 속도제어를 할 경우 로봇 암을 구동하기 위한 유압 펌프

의 토출량(30 l/min)과 이에 따른 탱크의 용량(150 l)을 결정한다. 플랫폼에 힘/모멘트가 작용할 때 리니어 액추에이터에 부과되는 힘 (F_l)은

$$F_l = J^T \Phi \tag{3}$$

으로 여기서 $\Phi = [W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6]^T$ 는 힘/모멘트를 나타내는 6×1 의 Wrench 벡터이다. 힘 해석결과에서 외력이 중력방향으로 0.5톤의 힘으로 작용하고 있을 때 각 액추에이터에 걸리는 힘은 평균적으로 0.088톤이며 최악의 형상에서 최대 0.554톤 정도의 힘이 액추에이터에 부과된다. 따라서 본 연구에서는 1.5톤의 유압 액추에이터를 선정하였다. Table. I은 해석을 통해 결정된 로봇 암과 집계의 설계 변수를 나타낸다.

4. 로봇 제어기

제어기는 Fig. 3과 같이 주제어기와 로봇 제어기로 나누어진다. 주 제어기는 조이스틱 입력 처리부와 역방향/순방향 해석기, 위치/속도 제어기,

전압 변환기, RS-232C 통신부 등으로 구성되어있고 로봇 제어부는 입/출력 제어보드, D/A 및 A/D 변환기, 입/출력포트 등으로 구성되어있다. 조이스틱으로부터 위치명령(χ)을 주제어기에 입력하면, 위치 입력(χ)을 만족하기 위한 6축 병렬기구 실린더의 길이를 역방향 기구학으로 해석한다. 실린더 길이는 서보 밸브의 인가 전압에 따른 유량의 변화로 이루어지므로 인가될 전압을 계산하기 위해 현재 실린더 길이($aL1, aL2, \dots, aL6$)와 원하는 실린더 길이($dL1, dL2, \dots, dL6$)의 차를 구한다. PI제어기에 의해 실린더에 인가할 전압이 환산되고 미리 정해진 데이터의 형태에 맞춰 데이터 패킷화 과정 후에 RS-232C 통신으로 로봇 제어기로 전달된다. 패킷화 과정은 통신과정에서 발생할 수 있는 오류를 점검할 수 있도록 오류검사 신호와 데이터를 순서대로 나열한다. 로봇 제어기에서는 수신된 데이터의 오류를 검사하고 정상적인 데이터일 때 $\pm 10(V)$ 사이의 전압으로 재생하여 유압 서보 밸브에 인가한다. 유압 서보 밸브는 전압에 따라 스펴을 여닫아 실린더의 유량을 제어함으로써 실린더의 길이를 조절하고 이에 따라 로봇은 원하는 동작을 생성한다. 로봇이 구동되면 각 액추에이터에 설치되어 있는 서보 실린더 계측기에 의해 실린더의 길이가 0~24VDC 전압으로 획득되고 8비트 A/D 변환기에 의해서 양자화과정을 거쳐 디지털 데이터로 변환된다. 변환된 길이 데이터는 주 제어기로 케환되어 펄스 제어 구현한다. 로봇 제어 보드는 6개의 아날로그 입/출력을 통해 로봇 암의 유압 서보 실린더를 제어하고, 4개의 디지털 입/출력포트로 지지다리, 그레플 등의 주변 실린더를 구동한다. 주 제어기와 로봇 제어기와의 통신속도는 19200bps 정도로서 유압 시스템의 위치 제어에 영향을 주지 않을 정도로 설정되어 있다.

5. 모의 실험 및 결과

개발된 축소형 로봇을 모의 방과제 피복작업에 적용하여 시공장비의 타당성을 검토한다. 방과제의 경사도는 실제작업 현장과 같이 1:1.5의 비율로 제작되었으며 피복석으로 0.05m³의 크기 돌을 사용하였다. 모의 실험은 Fig. 4a와 4b와 같이 두가지 시공방법을 모두 수행했다. Fig.4a는 육상작업



Fig. 4a An excavator attaches the robot to its end.

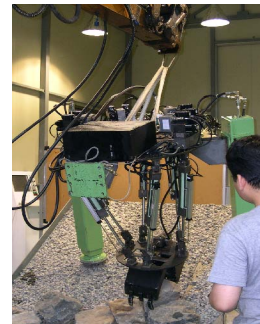


Fig. 4b A crane suspends the robot with a rope.

의 타당성을 검토한 것으로 0.3m³ 급의 굴삭기에 로봇 암을 장착해 피복작업을 수행했다. 파쇄기용으로 제공되는 굴삭기 유압을 로봇 유압원으로 사용하고 굴삭기 전원을 사용함으로써 굴삭기와 로봇이 하나로 통합된 시공장비가 되었다. Fig. 4b는 중장비로부터 멀리 떨어진 작업을 로봇 단독으로 수행할 수 있는지를 검토하는 실험이다. 로봇 암을 중장비에 매달고 2개의 다리로 로봇을 지지해 돌을 잡고 쌓은 작업을 수행했다.

두 작업 모두 가능했으며 피복석을 파지해서 거치하는데 걸리는 시간을 기존 작업과 비교했다. 기존방식의 공정시간은 약6~10분이고 모의 실험을 통한 결과는 굴삭기 끝단에 장착했을 경우 약 3~4분, 체인에 매달았을 경우에는 약 4~5분 정도의 시간이 소요되었다. 이로 볼 때 각각 50%~60%의 향상을 보였으나 실제 작업에서는 피복석의 규격, 작업환경, 작업자의 숙련도 등이 공정시간을 결정하는 요소들이 될 것이다. 실험을 통해 장비의 타당성은 입증되었지만 실제 현장에 적용되기 위해서는 해결해야할 문제가 많다. 즉

- 1) 피복석을 쉽게 집을 수 있는 그레플의 톱니 개발
- 2) 원하는 피복석 면을 짜 맞출 수 있도록 피복석을 자유자재로 뒤집을 수 있는 로봇 암 개발

3) 피복석을 거치할 때 그래플의 틈니와 옆 피복석 사이의 간섭방지

4) 기존 작업보다 2~3배의 생산성을 높일 수 있는 방안

위의 문제를 해결하기 위해 병렬기구의 단점인 작업공간을 최대한 극대화하고, 돌을 집어 자유자재로 다룰 수 있는 그래플 개발이 필수적이다.

6. 결론

방파제 피복작업을 기계화하기 위한 로봇 시스템 개발을 하였다. 피복작업은 2-3 톤의 중량물을 다룰 뿐 아니라 다자유도를 요하는 작업으로 표준화/규격화도 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 기존 작업의 공중 분석을 통해서 문제점을 파악하고 이를 해결할 수 있는 병렬기구 로봇을 제안하였다. 기구학적 해석을 통하여 축소형 로봇 암을 설계·제작하였으며 유압서보 제어기를 구성하여 실제 작업과 유사한 조건에서 기구의 성능을 검증했다. 실험은 굴삭기의 끝단에 로봇을 장착하는 방법과 체인을 이용하여 권양하는 방법으로 수행되었으며 기존의 방법에 비해 50~60%의 작업능률을 향상시킬 수 있음을 보였다. 향후 과지를 더 효율적으로 할 수 있는 그래플을 개발함으로써 작업능률을 더욱 더 향상시킬 것으로 기대된다.

병렬기구 로봇이 항만분야에는 적용한 사례는 아직 없으나 중량물을 다 자유도로 다루는 항만공사에 매우 적합함이 입증되었다. 특히, 병렬기구 타입의 중장비는 국·내외적으로 초보 단계임을 감안할 때 본 연구의 결과를 통해 건축·토목·조선 분야에 확대 적용되길 기대한다.

후 기

본 연구는 2003년도 해양수산부 항만국 연구과제로써 수행된 것임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1]이재영, "굴삭기용 조경, 석축장비", pat no. 20-0253890-0000, 2001. 10

[2] Stewart, D., 1965, "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proc. Instn. Mech. Engrs*, London, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp.371-386

[3] Lee, M. K. and Park, K. W., 1999, "Kinematic and Dynamic Analysis of a Double Parallel Manipulator for Enlarging Workspace and Avoiding Singularities", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.15, No.6, pp. 1024- 1034.

[4] Lee, M. K. Kim, T.S, Lee W.C, 2001, "Study on Parallel-Typed Robot and Machining Tool", *J of KSPE*, Vol. 18, No. 7, pp. 9-18

[5] Raghavan, M., 1991, "The Stewart platform of general geometry has 40 configurations", *Advances in Design Automation*, G. A. Gabriele. Ed., ASME Press, New York, pp. 397-402.