

산업현장 침전물 청소작업용 수중청소로봇 제어 알고리즘 기술 개발

Development of Underwater Cleaning Robot Control Algorithm for Cleanup Efforts in Industrial Area

이정우* · 이종득* · 최영호* · 한경룡** · 서진호*†
Jung-Woo Lee*, Jong-Deuk Lee*, Young-Ho Choi*,
Kyung-Lyong Han** and Jin-Ho Suh*†

(Received 17 March 2017, Revision received 13 June 2017, Accepted 13 June 2017)

Abstract: In this paper, we developed a control algorithm to maximize the cleaning performance and the cleaning efficiency of the underwater cleaning robot platform which has been developed for various cistern environment in the industrial field. Through these research and development, we have presented the operation and application of underwater cleaning robots that have been developed, and contributed to commercialization. Finally, this results were verified the effectiveness through actual field experiments.

Key Words : Underwater Cleaning Robot, Hierarchical Automatic Control Algorithm, Current Control, Attitude and Heading Reference System(AHRS)

1. 서 론

수중청소로봇(Underwater cleaning Robot)은 깨끗한 수질 관리를 위하여 수중 내에서 물을 오염시키는 이물질 혹은 침전물(Sludge) 등을 제거하는 로봇으로 정의될 수 있다. 이러한 로봇은 수영장, 수족관, 물놀이 공원 등의 일반적 수중청소 작업뿐만 아니라 산업현장 내 다양한 수조 등에서 오염이 심하여 사람이 직접 청소작업을 수행하기 어려운 환경 등에서도 유용하게 활용될 수 있다.¹⁾ 그러나 이러한 수중청소로봇은 주로 수질 오염도가 높지 않은 환경에서 활용되는 형태이므로 산

업현장 내에서 사람이 작업하기 어려운 다양한 수조 시설 내에서는 활용하기가 불가능하며, 산업현장 내에서 활용될 수 있는 수중청소로봇은 아직까지도 자율주행 기능이 존재하지 않고 대부분 작업자에 의한 원격조작 작업이 이루어지고 있다.

이러한 실제적 작업현장 및 수조환경은 Fig. 1 과 같이 기존 청소방법으로는 주어진 짧은 작업 시간 내에 다량의 침전물을 청소하기는 불가능하고, 침전물 성분이 인체에 유해하거나 생산성 효율을 위하여 시간의 제약 없이 수시로 청소작업이 이루어져야 하는 경우에도 불가능한 작업방법임을 확인할 수 있었다.

*† 서진호(교신저자) : 한국로봇융합연구원 필드로봇연구본부
E-mail : suhgang@kiro.re.kr, Tel : 054-279-0402
*이정우 : 한국로봇융합연구원 필드로봇연구본부
*이종득 : 한국로봇융합연구원 필드로봇연구본부
*최영호 : 한국로봇융합연구원 필드로봇연구본부
**한경룡 : 포스코 기술연구원

*† Jin-Ho Suh(corresponding author) : Field Robotics R&D Division, Korea Institute of Robotics and Convergence(KIRO).
E-mail : suhgang@kiro.re.kr, Tel : 054-279-0402
*Jung-Wook Lee : Field Robotics R&D Division, KIRO.
*Jong-Deuk Lee : Field Robotics R&D Division, KIRO.
*Young-Ho Choi : Field Robotics R&D Division, KIRO.
**Kyung-Lyong Han : POSCO Technical Research Lab.



Fig. 1 General cleaning work methods and cistern environments

이러한 산업현장 내 침전물 청소작업의 효율적 수행을 위하여 고효율 수중청소로봇 플랫폼을 개발하여 현장 실증실험을 통하여 실제적 활용성을 확인하였다.^{5,8)} 그러나 개발되어진 로봇 플랫폼으로 수동조작을 통한 현장적용에서는 로봇에서 발생하는 각종 제어 변수(Parameters)에 대하여 운전자가 직접 육안으로 확인 후 수동조작에 의해 제어가 이루어지고 있기 때문에 정밀제어를 수행하기에는 한계가 있었고, 안전작업을 위한 효율성 향상을 위해서는 이러한 제어 알고리즘 개발이 추가적으로 필요하게 되었다. 또한 개발되어진 로봇 플랫폼에 대한 각종 구동기별 전류제어 추종방식의 자동제어 알고리즘을 구현하여 제어의 안정성 및 침전물의 청소효율 향상과 구동부의 안정성 확보가 필요함이 대두되었다.

따라서 본 연구에서는 산업현장 내 다양한 수조환경에 대하여 기존의 청소작업으로는 불가능한 밀폐형 수조 또는 물을 빼지 않고 청소해야 하는 수조의 환경에 적용할 수 있도록 개발된 고효율 수중청소로봇 플랫폼의 활용성을 높이기 위하여 추가적으로 요구되는 제어 알고리즘 기술 개발을 제안하고자 한다.

2. 연구목적 및 연구개발 접근방법

본 연구개발에서도 기존의 수중청소로봇 플랫폼 개발 관련한 연구목적과 동일한 현장작업자의

실제적 요구조건을 반영하여 진행하였다.⁸⁾ 특히, 개발되어진 로봇 플랫폼 운영에 있어서 청소작업의 효율성 향상을 위하여 수조 조건 및 침전물 상태 등을 자동 인지하여 침전물 흡입과 주행을 자동으로 조절할 수 있는 제어 시스템 개발과 사용자의 원활한 로봇 운전과 수조 내에서 로봇의 위치 및 방향 설정 등을 위한 방향 제어 시스템 개발을 목적으로 하였다. 본 연구개발 수행에서 기존의 로봇 플랫폼 기술개발과 연계한 연구개발 추진내용은 Fig. 2와 같이 요약되어진다.

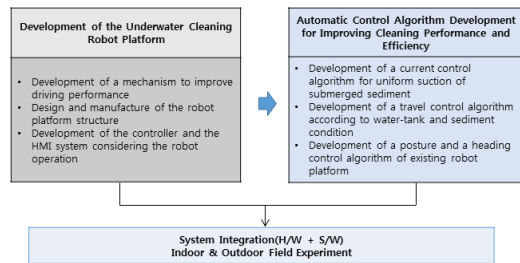


Fig. 2 R&D propulsion plan

기 개발된 수중청소로봇 플랫폼은 인체에 유해한 점성형태의 침전물을 흡입하여 제거함과 동시에 고부하 상태인 현장 환경에서 적용하도록 개발되어졌지만, 수중청소 작업진행 방법이 탁도가 낮은 맑은 수질에서 사람이 직접 접근하여 청소작업이 가능한 형태이다. 이러한 경우에는 수중환경을 실시간으로 확인할 수 없는 환경에서는 사용할 수 없을 뿐 아니라 로봇이 수중 장애물과의 접촉, 이물질에 의한 회전부 잠김에 의한 과부하 상황에 노출되었을 때 모터 드라이버가 허용하는 최대 전류값까지 상승하게 되어 로봇 본체의 기구부 파손 및 모터 코일의 손상까지 발생할 위험을 내포하고 있다. 또한 수동 조작에서는 이러한 시스템 손상을 막고 작업효율을 높이기 위하여 사용자가 지속적으로 구동부에서 소비되는 전류 및 과전류 신호를 모니터링하면서 속도를 조정해야 하므로, 작업자의 숙련도에 따라서 시스템의 안전성과 성능이 크게 좌우되며 지속적 조작에 의한 피로도 누적이 발생할 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는, 산업현장 내 다양한 수조환경에 활용하기 위하여 개발 완료한 수중청소로봇 플랫폼 상용화를 위해서는 작업자의 숙련도에 상관없이 시스템의 안전성과 성능을 일정수준으로 유지시키기 위한 기능이 필요하다고 판단하였다. 따라서 작업자가 지속적이고 반복적으로 구동부의 소비전류 형태를 모니터링하면서 조작할 수 있는 사용자 편의성 및 작업자의 부주의에 의한 시스템 손상을 최소화할 수 있는 자동제어 기능을 도입할 필요가 있다고 판단하였다.

3. 전류 추종방식 제어 알고리즘 개발

본 연구에서는 산업현장 수조환경 내 대량의 침전물을 균일하게 흡입할 수 있도록 수중청소로봇의 요소별 전류제어 알고리즘 개발과 다양한 산업현장 수조환경 구조 및 침전물 용량 특성에 따른 주행제어 알고리즘 개발을 제안하고자 한다.

다양한 산업현장 내 수조환경 내에서 동일한 부하 조건에서는 상용 모터 드라이버가 지원하는 정속 제어기의 입력 속도값을 낮출수록 모터 드라이버에서 소비되는 전류값 즉, 모터에서 소비되는 전류값이 감소하는 점에 착안하여 상용 정속 제어기 기반의 전류 제어기 개발 개념을 도출하였고, 전류 제어 유무에 따른 기존 제어 시스템과의 성능변화는 Fig. 3과 같이 비교하여 나타내어 질 수 있다.

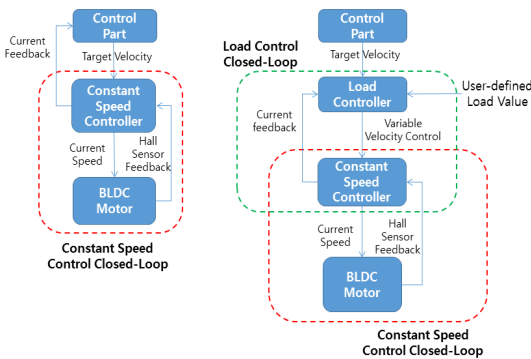
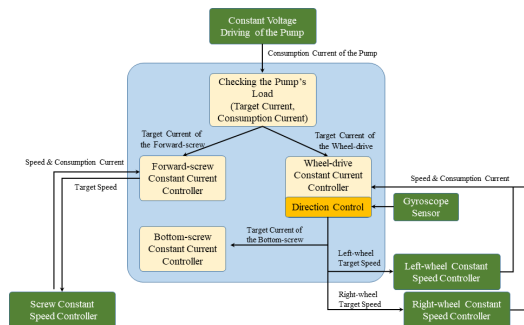


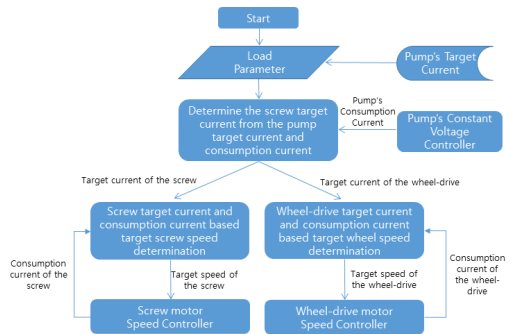
Fig. 3 Performance variation of control systems

3.1 계층형 자동 제어 알고리즘

일반적으로 펌프의 소비전류는 유입되는 침전물의 양과 비례관계가 있고 유입되는 침전물 양은 스크류의 회전속도 및 소비전류와 상관관계가 있으며, 스크류의 소비전류는 트랙 구동부의 속도 및 전류와 상관관계가 있다는 점을 고려하여 펌프가 최대 소비전류 80~90% 수준에서 일정하게 펌핑을 유지할 수 있도록 스크류와 트랙 구동부의 전류를 자동으로 조작하기 위한 계측기 개념 설계를 도출하였다. 또한 비정상 및 비상 상황에서는 과부하에 의한 스크류와 트랙 구동부의 손상을 막고 로봇의 구동 동작에 의한 급작스러운 전류상승 상황발생을 최소화하기 위한 자체 보호 기능 및 효율성 유지를 위한 기능을 함께 반영하였다. 따라서 수조환경 내 다양한 침전물에 대한 균일한 흡입을 위한 각 요소별 전류제어 알고리즘을 개발하였으며, 펌프전류 제어기를 최상위 감독자로 하는 계층형 자동 제어 알고리즘 (Hierarchical automatic control algorithm)은 Fig. 4와 같은 구조로 설계되었다.



(a) structure diagram



(b) data flowchart

Fig. 4 Hierarchical automatic control algorithm

이러한 계층형 자동 제어 알고리즘 구성개념은 다음과 같이 요약되어질 수 있다.

- 스크류 정전류 제어기의 목표전류 설정은, 펌프의 소비전류가 상승하는 주요요인인 스크류가 펌프 흡입구에 공급하는 침전물 양의 증가이며, 펌프의 소비전류가 목표 전류값보다 큰 경우에 스크류 정전류 제어기의 목표 전류값을 낮추고 반대의 경우에 스크류 정전류 제어기의 목표전류를 높여주는 것이다. 따라서 스크류 정전류 제어기의 목표 전류값이 상승하면 스크류의 정속 제어기의 소비전류가 목표 전류값에 도달할 때까지 정속 제어기의 목표속도를 상승시키고 반대로 목표 전류값이 감소하면 목표 전류값에 도달할 때까지 정속 제어기의 목표속도를 낮추는 형태이다.

- 정전류 제어기의 목표전류 설정은, 스크류에 의해 수집되는 침전물의 양은 침전물의 회전속도와 바퀴의 미는 힘에 의해 발생하는 스크류와 침전물 간의 마찰력에 의해 결정되어진다. 바퀴의 미는 힘이 강해지면 스크류와 침전물 간의 마찰력이 강해져 일정량의 침전물을 수집하기 위해 스크류는 속도가 낮아지게 된다. 스크류의 회전속도를 일정범위 내에서 제어하기 위해서는 스크로와 침전물 사이의 마찰력을 통제하기 위하여 바퀴 정전류 제어기의 목표 전류값을 조정할 필요가 있다. 스크류 정전류 제어기의 목표 전류값이 소비되는 전류값보다 크면 바퀴 정전류 제어기의 목표 전류값을 상승시켜 스크류와 침전물 사이의 마찰력을 증가시킴으로써 스크류 정속 제어기의 목표 속도값 상승이 제한되게 함과 동시에 바퀴의 속도는 증가시킨다.

따라서 스크류 정전기 제어기의 목표 전류값이 소비되는 전류값보다 작으면 바퀴 정전류 제어기의 목표 전류값을 감소시켜 스크류와 침전물 사이의 마찰력을 감소시킴으로서 스크류 정속 제어기의 목표 속도값 하강이 제한되게 함과 동시에 바퀴의 속도를 감소시킨다.

3.2 상용 정속 제어기 기반 정전류 제어기

또한 본 연구에서는 동일한 부하 조건에서 상용 모터 드라이버에서 지원하는 정속 제어기의 입력 속도값을 낮출수록 모터 드라이버에서 소비되는 전류값 즉, 모터에서 소비되는 전류값이 감소하는 점에 착안하여 상용 정속 제어기 기반의 전류 제어기 개발 개념을 도출하였고, 각 구동부의 상용 정속 제어기 기반의 정전류 제어기 구조는 Fig. 5와 같이 구성되었다.

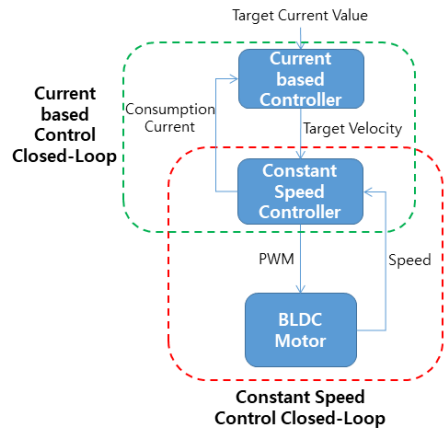


Fig. 5 The structure of constant current controller based on commercial cruise controller

일반적인 상용 정속 제어기의 경우에는 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

- (특성1) 동일한 부하조건에서 목표속도가 증가함에 따라서 일반적으로 소비전류가 증가하며, 목표속도가 감소하면 소비전류가 감소하게 됨
- (특성2) 저속에서도 시스템이 허용범위를 벗어나는 부하조건이 되면 전류가 제어가 허용하는 최대전류까지 상승하여 시스템 파손까지 이루어질 수 있음

따라서 이러한 (특성1) 및 (특성2)를 기반으로, 정속 제어기에서 소비되는 전류를 외부에서 모니터링하여 목표전류보다 높으면 정속 제어기의 목표속도를 낮추고, 소비전류가 목표전류보다 낮으

면 반대로 정속 제어기의 목표속도를 높임으로써 상용 정속 제어기를 활용하여 우회적으로 목표전류를 추종하는 전류 제어기를 구성하였다.

3.3 AHRS 및 자이로스코프 기반 방향 제어 알고리즘

수중청소로봇이 전방으로 진행할 때, 좌/우 바퀴가 동일하더라도 양쪽 트랙에 전달되는 마찰 정도가 산업현장 수조 바닥 상황에 따라서 다르므로, 실제로 양쪽 트랙의 이동속도가 달라지면서 로봇 본체의 방향이 틀어져서 실제적으로 직진하지 못하는 경우가 다수 발생할 가능성이 높다. 따라서 운전자에 의하여 설정된 목표방향과 자세방위측정표시장치(AHRS, Attitude and Heading Reference System) 또는 자이로스코프(Gyroscope)에 의해 수신된 현재 방향과 차이를 이용하여 양쪽 트랙의 속도를 가감속함으로써 로봇이 일정하게 목표방향을 추종할 수 있는 제어 알고리즘을 탑재하였고, 이러한 방향 제어 알고리즘의 개념은 Fig. 6과 같이 나타내어진다.

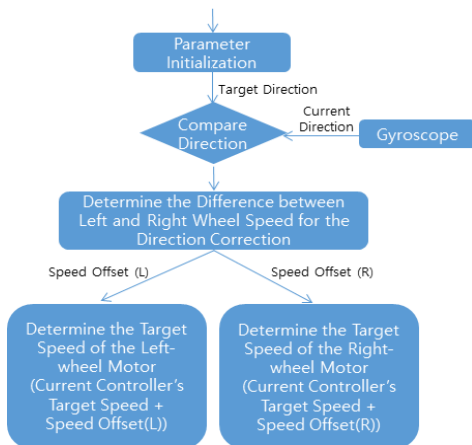


Fig. 6 Concept of direction control algorithm

4. 실험 결과

기존에 개발된 수중청소로봇 플랫폼에 활용하여, 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여, 외부 부하에 따른 전류 제어

기 특성변화 등의 실험진행은 실내 및 현장 실험으로 구분하여 각각 진행하였다.

4.1 실내 실험

실내 실험은 산업현장 내 다양한 수조환경 바닥면을 고려하여 외부 부하조건 변경에 따른 바퀴 구동부 전류 제어기 튜닝 및 각종 부하 조건에서의 제어기 성능 테스트를 진행하였다. Fig. 7과 같이 무부하 및 부하조건을 고려하였으며, 외부 부하는 인력으로 1~3명 내에서 순차적으로 추가 하면서 스크류에 직접적 부하를 증가시킴으로써 스크류와 트랙 구동부의 전류 제어기가 적절히 외부 부하에 추종하는지는 실험하였다.

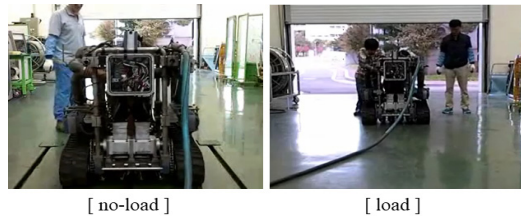


Fig. 7 Experimentation conditions both no-load and load



Fig. 8 Characteristic variations of current controller with external load change

이와 같은 실험조건에서의 실내 실험결과는 Fig. 8 과 같으며, 실내 실험결과는 외부에서 가해지는 부하가 증가하는 상황에서 스크류 전류 제어기가 일차적으로 속도를 낮추면서 일정 전류를 유지함과 동시에 바퀴 구동부의 목표전류를 낮추어 바퀴 구동부의 속도 또한 저하됨을 확인할 수 있었다.

4.2 현장 실험

산업현장 내 실제 수조에서의 실증실험 수행내용은 Fig. 9와 같은 실제 작업현장에서 기존 수동 제어 및 자동제어 기반의 구동부별 전류 형태를 각각 분석하여 개발된 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

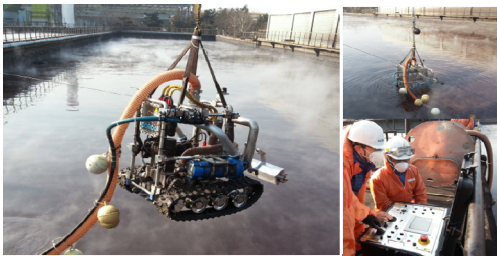
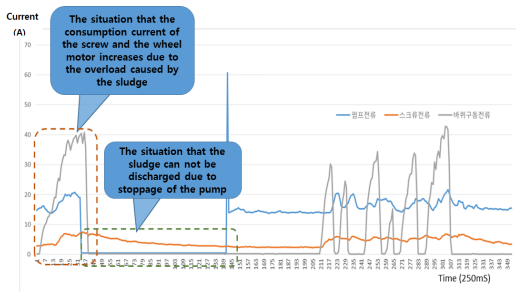
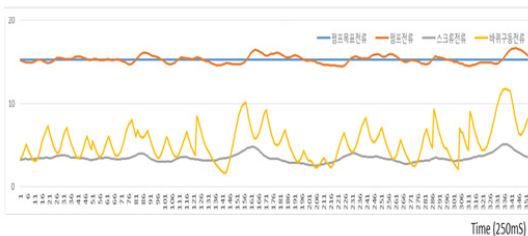


Fig. 9 The field experiment in actual workplace



(a) manual control



(b) automatic control

Fig. 10 Current variations of actuator parts applying manual control and automatic control

Fig. 10과 같은 현장실험 결과는, 수동 조작에서 운전자의 부주위에 의해 과부하 상황에서 급격한 침전물 유입이 발생하고 이로 인해 펌프가 정지되어 이를 해제하기 위해 운전자의 추가적인 개입이 이루어지면서 지속적인 작업이 이루어지지 않아 효율적이지 못한 구간이 발생하게 된다.

반면에, 자동제어 알고리즘 적용의 경우에는 펌프 소비전류가 일정한 값을 유지하도록 제어가 이루어짐으로써 과부하에 의한 펌프 정지 상황이 발생하지 않았으며, 이로 인해 효율성이 증대됨을 확인할 수 있었다.

이러한 현장실험을 통하여 기존 수동 조작 및 자동제어 알고리즘 적용 시 사용되는 수중 펌프의 누적 작업량을 비교하면 Fig. 11과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

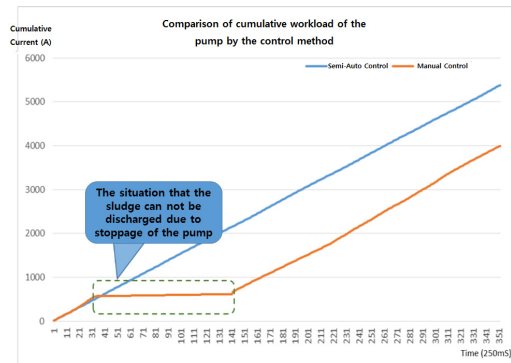


Fig. 11 Comparisons with the amount of work done of pump applying manual control and automatic control

수동 조작방식의 경우에는, 운전자가 펌프, 스크류, 트랙 구동부의 전류를 지속적으로 모니터링하거나 과부하 알람에 지속적인 주의 집중을 하면서 과부하 발생 시 로봇의 이동을 정지함으로써 로봇의 과부하에 의한 정지를 막을 수 있으나, 상기의 실험결과에서 보여지는 것처럼 이러한 행위를 놓쳐서 과부하 상황에 도달해 펌프가 정지하게 되면 이를 복구하는 시간이 필요하므로 그만큼 비작업 영역이 발생해 전체적인 작업 효율이 저하됨을 알 수 있다. 또한 수동 조작방식의 경우, 사용자의 수동 조작에 의해 펌프의 소비 전

류가 크게 변동하면서 작업을 하지만, 반자동 제어 시 펌프의 소비 전류가 일정해지면서 펌프의 과부하에 의해 일시정지도 방지하고 일정한 작업 효율을 유지함으로써 총 누적 작업량에서 수동 조작 방식을 앞서게 됨을 확인할 수 있었고, 수동 조작 및 자동 제어의 특성 비교 결과는 Table 1과 같이 요약되어질 수 있다.

Table 1 The comparison of manual control and automatic control

Item	Manual Control	Automatic Control
User Convenience	<p>Very Uncomfortable</p> <ul style="list-style-type: none"> Continuous speed control of the wheel-drive is required (on/off control) Continuous directional control is required Continuous current consumption monitoring is required to adjust the wheel speed 	<p>Relatively Convenient</p> <ul style="list-style-type: none"> Adjust the target direction value every 2-3 minutes
System Stability	<p>Very Unstable</p> <ul style="list-style-type: none"> Damage to mechanical parts of the screw and the wheel-drive under overload condition The suction pump continues to operate at maximum load level 	<p>High Stability</p> <ul style="list-style-type: none"> Protects the system even under external overload conditions Variable operation of the pump due to the load control prevents shortening of the life of the suction pump part
Energy Efficiency	<p>Very Inefficient</p> <ul style="list-style-type: none"> Energy efficiency is not good due to the large difference of the maximum /minimum consumption of current 	<p>High Efficient</p> <ul style="list-style-type: none"> Low energy loss due to the consumption current control
Work Efficiency	<p>Inefficient</p> <ul style="list-style-type: none"> the skill of the worker has a great effect on the work efficiency 	<p>Efficient</p> <ul style="list-style-type: none"> Maintain the work efficiency regardless of the operator's skill

마지막으로, AHRS 및 자이로스코프 기반의 방향 제어 알고리즘 개발사항에 대한 유효성 확인을 위하여 시행한 현장실험 수행결과는 Fig. 12와 같다. 본 실험 결과에 의하면, 직진 동작 시에 외란이 발생하지 않아도 좌/우 트랙의 특성 차이와 지면과의 마찰 특성 차이에 의하여 시계방향으로 회전력이 발생함을 확인하였다. 이때 제안한 제어 알고리즘을 적용하면, 이러한 특성을 극복하고 초기 방향인 0도를 유지하면서 전진하는 반면에 방향 제어를 적용하지 않고 두 바퀴의 속도를 일정하게 유지함으로써 직진을 하는 경우에는 약 20도 이상 초기 방향과 각도차가 발생함을 확인하였다.

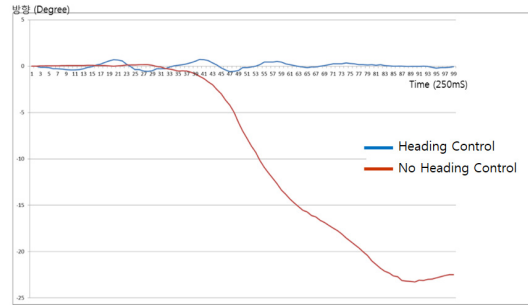


Fig. 12 Experimental results both heading control and no heading control

5. 결론

본 논문에서는 산업현장 내 다양한 수조환경에 활용하기 위하여 개발되어졌던 수중청소로봇 플랫폼에 대한 연구결과에서 발생하는 청소성능 및 청소효율 극대화를 위한 제어 알고리즘을 개발하였다. 이러한 연구개발을 통하여 기존에 개발되어진 수중청소로봇 운영 및 활용 방안을 제시하여 상용화 실현에 기여하였고, 이러한 결과는 실제 현장실험을 통하여 효용성을 검증하였다. 특히, 기존 산업현장 내에서 물을 뺄 수 없는 다양한 수조환경에서 기존 수중청소로봇 플랫폼에 제어 알고리즘 적용을 통하여 상시 수중청소 작업이 가능하게 되어 현장조업에 지장을 주지 않으면서 수질 개선을 가능하게 하여 생산성 향상에 기여하였고, 로봇을 활용한 상시 청소작업이 안정적으로 가능하기에 수질관리가 가능하여 활용성 측면에서도 매우 효과적이라는 결론을 도출할 수 있었다.

후 기

본 연구는 ‘산업체 기술개발 위탁과제 (POSROBOT Research Project)’ 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

1. Y. J. Hong, M. J. Lee and J. H. Suh, 2009,

- "Underwater Cleaning Robot", Journal of Korea Robotics Society, Vol. 6, No. 2, pp. 10-15.
2. J. H. Suh, Y. J. Hong and S. K. Park, 2010, "The Commercialization of Underwater Robot using convergence Technologies", In Proceedings of Korea Unmanned Underwater Vehicle, pp. 41-45.
 3. I. S. Choi, G. Shin and J. H. Suh, 2013, "Development of Underwater Cleaning Robot for Industrial Sludge Cisterns", Journal of the Korea Robotics Society, Vol. 10, No. 4, pp. 33-39.
 4. A. Suzuki, K. Kumakura, D. Tomizuka, Y. Hagiwara, Y. B. Kim and Y. W. Choi, 2013, "Positioning Accuracy on Robot Self-localization by Real-time Indoor Positioning System with SS Ultrasonic Waves", Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 100-111.
 5. Robot Issue Brief, Korea Institute for Robot Industry Advancement(KIRIA), 2014, "Industrial Status and Prospect of Underwater Robot", Vol. 2.
 6. J. W. Park, J. G. Kim, J. W. Lee, Y. H. Choi, J. H. Suh, J. D. Lee, H. J. Lee and S. S. Oh, 2015, "Design and Structural Analysis of Track-based Underwater Robot Intake Module for Various sludge Suction", In Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering, pp. 612-613.
 7. J. G. Kim, J. W. Park, Y. H. Choi, J. D. Lee, J. W. Lee, H. J. Lee, S. S. Oh and J. H. Suh, 2015, "Development of Driving Reducer for Underwater Cleaning Robot", In Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering, pp. 756-757.
 8. S. W. Park, M. S. Kim, J. H. Sohn and W. K. Baek, "Study on the fluid resistance coefficient for control simulation of an underwater vehicle", Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 24-29.
 9. Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion(KIMST), Vol. 10, 2016, Ocean Insight, pp. 4-5.
 10. Jin-Ho Suh, Jung-Woo Lee, Jong-Geol Kim, Young-Ho Choi and Il-Seop choi, 2017, "Development of the Underwater Cleaning Robot Platform for a Higher Efficiency", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, To be submitted(2017.03).