

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.2.525>

JCCT 2024-3-62

환경 모니터링을 위한 무인 호버크라프트 시스템 개발

Development of unmanned hovercraft system for environmental monitoring

유성구*, 임진택**

Sung-goo Yoo*, Jin-Taek Lim**

요약 환경정보를 실시간으로 획득하여 정보를 제공하는 환경 모니터링 시스템 필요성이 확대되고 있다. 특히 공공수역 수질관리의 경우 법적으로 수동측정과 자동측정을 통해 상시 관리를 진행해야 하며, 대기오염도 탄소중립 실현과 관련하여 미세먼지, 배기가스 저감을 위한 상시 측정 및 관리가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 수질오염 및 대기오염 정보를 실시간으로 측정하여 모니터링을 할 수 있는 시스템을 구현하였다. 측정을 위한 도구로 육상과 수상을 동시에 이동 가능한 호버크라프트를 활용하였다. 호버크라프트 본체에 수질측정 및 대기오염측정 센서를 장착하고 그 정보를 실시간으로 모니터링 시스템으로 전송할 수 있는 통신 모듈을 장착하였다. 환경측정용 호버크라프트의 구조를 설계하였으며, 실시간 정보전달 통신 모듈로는 저전력 장거리 통신이 가능한 LoRa 모듈을 적용하였다. 실제 하드웨어 구현을 통해 제안한 시스템의 동작 성능을 확인하였다.

주요어 : 환경 모니터링, 호버크라프트, 동작 제어, 실시간 측정, 무선통신

Abstract The need for an environmental monitoring system that obtains and provides environmental information in real time is increasing. In particular, in the case of water quality management in public waters, regular management must be conducted through manual and automatic measurement by law, and air pollution also requires regular measurement and management to reduce fine dust and exhaust gas in connection with the realization of carbon neutrality. In this study, we implemented a system that can measure and monitor water pollution and air pollution information in real time. A hovercraft capable of moving on land and water simultaneously was used as a measurement tool. Water quality measurement and air pollution measurement sensors were installed on the hovercraft body, and a communication module was installed to transmit the information to the monitoring system in real time. The structure of a hovercraft for environmental measurement was designed, and a LoRa module capable of low-power, long-distance communication was applied as a real-time information transmission communication module. The operational performance of the proposed system was confirmed through actual hardware implementation.

Key words : Environmental monitoring, hovercraft, motion control, real-time measurement, wireless communication

*정회원, 전주비전학교 전기공학과 조교수 (제1저자)
**정회원, 전주비전학교 전기공학과 조교수 (교신저자)
접수일: 2024년 1월 2일, 수정완료일: 2024년 1월 25일
게재확정일: 2024년 1월 31일

Received: January 2, 2024 / Revised: January 25, 2024

Accepted: January 31, 2024

**Corresponding Author: jtl31223@naver.com

Dept. of Electric Engineering, Vision College of Jeonju, Korea

1. 서 론

대기오염, 수질오염, 토양오염 등 모든 환경오염은 인류의 생존을 위협하고 있으며, 다양한 기관 및 매체에서 그 위험성을 경고하고 있다. 특히 우리나라는 제조업 중심의 경제발전과 함께 고도성장을 이루어 왔으나, 업종이나 시설 특성에 따른 변화를 반영하지 못하고 수질, 대기, 폐기물 등 오염 매질별 환경오염 방지시설의 개선을 통해 오염물질 발생량 및 농도를 저감시키다 보니 투자에 비해 환경개선 효과가 미비한 실정이다 [1, 2].

EU 및 미국과 같은 선진국의 경우 환경허가시스템을 통한 통합적 오염물질 관리(BATNEEC : Best Available Technology Not Entailing Excessive Cost)를 시행하여 효율적으로 환경오염물질에 대한 관리를 이행하고 있다. OECD는 우리나라도 통합환경관리제도와 허가갱신제도 등 선진적인 환경규제제도와 관련 시스템의 도입을 권고하고 있다. 이에 우리나라도 2015년 ‘환경오염시설의 통합관리에 관한 법률’을 통해 이를 수행하고 있다[3, 4].

통합관리 시스템 구성에 있어 실시간으로 환경오염 정보를 측정하고 이를 데이터화하는 기술개발이 필요한 실정이다. 현재 대기오염의 경우는 드론을 활용하는 다양한 기술이 개발되고 있다. 하지만 드론의 경우는 배터리 한계와 날씨의 영향에 따라 운용의 어려움이 있다[5, 6]. 그리고 수질오염의 경우에는 수질자동측정소를 지정하여 수동측정과 자동측정을 포함하여 상시측정을 진행하고 있다. 일반적으로는 고정장치를 통해 오염정보를 상시 측정하고 있으며, 필요시 유인보트를 이용해 수동 측정하고 있다. 하지만 기상문제나 다양한 환경에 따라 유인보트는 운용상 제약이 따르고, 고정장치는 유실의 문제점이 있다[7, 8].

본 연구에서는 공간 및 비·안개·눈과 같은 대기환경에 영향을 적게 받으며 실시간으로 오염정보를 수집할 수 있는 시스템을 제안하고자 한다. 이를 위해 넓은 구역 및 실시간으로 정보를 획득할 수 있도록 호버크래프트를 적용하였으며, 실시간 정보전달을 위해 LoRa 무선통신 모듈을 활용하였다. 호버크래프트는 부력용 2개의 팬, 주행용 2개의 팬으로 구성하였으며 4개의 모터 제어를 통해 전후좌우 이동제어가 가능하도록 설계하였다. 자율주행이 가능하도록 GPS 센서를 장착하였으

며, 무선 수동 제어는 RF 수신기를 적용하였다. GPS와 환경정보를 실시간으로 전달하기 위해 최대 10Km이상 통신이 가능한 LoRA(Long Range) 모듈을 사용하였다.

호버크래프트 구조 설계와 모델링을 통해 시제품을 제작하였으며, 실제 운용 시험을 통해 개발된 시스템의 성능을 검증하였다.

II. 무인 호버크래프트 모델

1. 호버크래프트 동역학 모델

본 연구에서 적용한 호버크래프트는 부력용으로 2개의 추진기관을 이용하며, 2개의 추진기관을 이용하여 자세 및 이동제어를 진행한다. 호버크래프트 동역학 모델 방정식을 도출하기 위해 그림 1과 같은 형태를 적용하였다. 여기서 호버크래프트는 부양상태라고 가정한다.

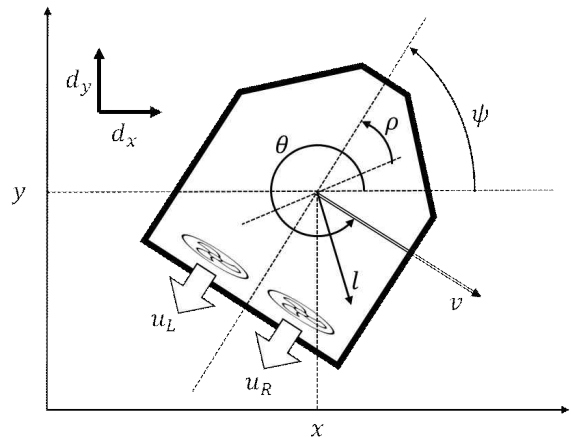


그림 1. 호버크래프트 동역학 요소
Figure 1. Hovercraft Dynamics Elements

여기서, x, y : 위치좌표, ψ : 자세각, ρ : 무게중심에서 정면 방향과 추진체 사이의 각도, v, θ : 선속도의 크기와 방향, l : 무게중심과 추진체 사이의 거리, u_L, u_R : 추진체에서 발생하는 각각의 추진력, d_x, d_y : 외부 외란이다[9, 10, 11, 12].

뉴턴-오일러 방법[13]을 통해 동역학 방정식을 유도하면

$$\begin{bmatrix} F \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mI_3 & 0 \\ 0 & I_{cm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{cm} \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \times I_{cm} \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

이고, 여기서 F 는 무게중심에 발생하는 힘의 합력이며, m 은 호버크래프트의 질량, I_3 은 단위행렬, a_{cm} 은

무게중심에서의 선가속도, τ 은 무게중심에서 발생하는 회전힘의 총합, I_{cm} 은 무게중심에서의 관성모멘트이며, α 는 각가속도, ω 는 각속도이다.

그림 1의 d_x, d_y 를 고려하면, 호버크래프트 시스템 동역학 모델은 식 1로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{\cos\psi}{m}(u_R + u_L) + \frac{d_x}{m} \\ \ddot{y} &= \frac{\sin\psi}{n}(u_R + u_L) + \frac{d_y}{m} \\ \ddot{\psi} &= \frac{I\sin\rho}{I}(u_R - u_L) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 I 는 관성모멘트이다.

실제 호버크래프트 구현시 설계를 간소화하기 위해 선가속을 위한 제어입력 $u_1 = u_R + u_L$ 로 정의하고, 각가속을 위한 제어입력 $u_2 = (u_R - u_L)$ 로 정의하여 식 3의 비선형 함수를 도입하면 식 4와 같이 동역학 모델식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(\psi, u_1) &= u_1 \cos\psi \\ F_y(\psi, u_1) &= u_1 \sin\psi \\ \tau_\psi(u_2) &= u_2 I \sin\rho \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_x(\psi, u_1) + d_x \\ m\ddot{y} &= F_y(\psi, u_1) + d_y \\ I\ddot{\psi} &= \tau_\psi(u_2) \end{aligned} \quad (4)$$

이때, $F_x(\psi, u_1)$ 과 $F_y(\psi, u_1)$ 은 호버크래프트로부터 발생하는 x 방향 추진력과 y 방향 추진력을 의미하며, 호버크래프트가 생성하는 회전힘은 $\tau_\psi(u_2)$ 이다.

2. 무인 호버크래프트 시스템 구성

그림 2에 본 연구에서 제안한 시스템 구성도를 나타내었다. 호버크래프트는 총 4개의 모터를 장착하여 팬 1, 2는 부력용으로 적용하며, 팬 3, 4는 추진용이다.

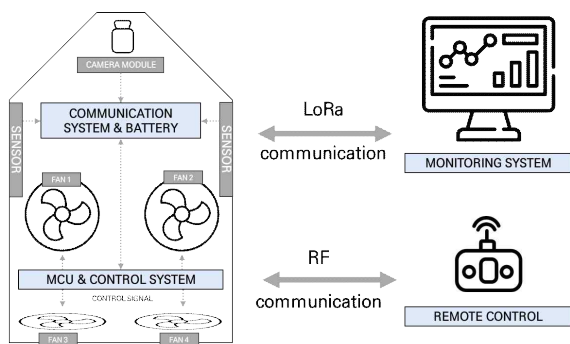


그림 2. 환경모니터링용 무인 호버크래프트 구성도
 Figure 2. Configuration diagram of unmanned hovercraft for environmental monitoring

호버크래프트 상단부 앞단에는 카메라 모듈을 장착하여 실시간으로 영상정보를 제공할 수 있도록 하였으며, 수질센서와 대기센서를 호버크래프트 본체에 장착하였다. 중앙에는 모터제어와 센서데이터 전송을 위한 메인프로세서를 적용하였으며, 배터리는 중대형 드론용으로 많이 사용하는 12셀 16,000mAh를 장착하였다. 센서 정보와 GPS 정보는 LoRa 통신을 이용하여 실시간으로 전달할 수 있게 구성하였으며, RF통신을 통해 무선 수동 제어할 수 있도록 하였다.

3. LoRa 무선 통신 모듈 모니터링

모니터링 통신시스템을 구축하기 위해 LoRa를 적용하였다. LoRa는 Long Range의 약자로 원거리통신이 가능하며 저전력으로 동작이 가능한 통신모델 중의 하나이다. 특히 다중센서기능과 암호화(AES128)기능을 제공하여 보안이 가능한 대규모 네트워크 구성이 가능하다는 장점이 있다[14, 15].

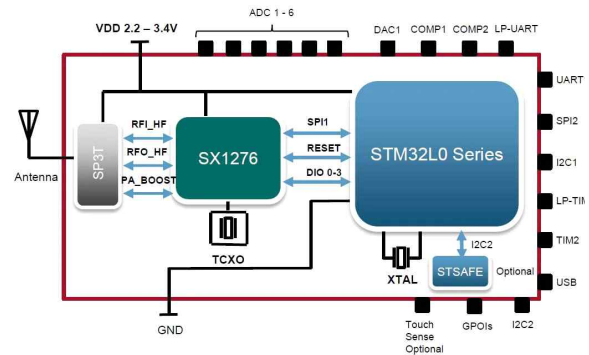


그림 3. LoRa 모듈 내부 구성도
 Figure 3. LoRa detailed structure

표 1. 안테나 사양

Table 1. LoRa antenna specifications

Item	Spec.
Frequency range	824~960MHz
Gain	3dbi±0.7dbi
Standing wave ratio	≤ 2
Impedance	50Ω
Connector Model	IPX13
Length	12cm

본 연구에서는 호버크래프트에 장착된 다중 센서와 GPS 정보를 실시간으로 전송해야 하므로 최적의 통신 방법으로 LoRa를 선정하였다. 구현에 사용된 모듈은 Murata LoRa를 사용하였으며[14], 메인 통신칩은 SX1276이고 STM32L0 MCU가 적용된 모듈이다[15]. 그림 2에 Murata LoRa 모듈의 내부 구조를 나타내었

다. 통신 주파수는 922.1MHz를 적용하였으며 암호화는 AES128가 기본적으로 포함된다. 그리고 모듈에 장착한 안테나 사양은 표 1과 같다.

LoRa 모듈을 적용하여 통신하기 위한 기본 설정으로 SF(Spreading Factor)를 설정해야 한다. SF는 통신의 거리와 데이터 속도를 조절할 수 있는 확산계수로서 7부터 12까지 조절할 수 있다. SF7은 가장 짧은 시간 안에 데이터를 전송할 수 있고, SF12는 전송하는데 가장 시간이 오래 걸린다. 대신 SF12는 가장 멀리까지 신호 전달이 가능하고 SF7은 가장 짧은 거리 통신이 가능하다. 즉, SF가 증가함에 따라 데이터를 안전하게 보낼 수 있는 거리가 늘어나고 반면 초당 전송할 수 있는 데이터는 1/8로 줄어든다. 따라서, 데이터를 보낼 거리와 사용할 데이터의 양에 따라서 설정이 필요하다. 각 확산계수에 따른 대역폭과 전송속도는 표 2와 같다.

표 2. 확산요소에 따른 대역폭과 전송율

Table 1. Bandwidth and Transmission Rate According to Spreading Factor (SF)

SF	Bandwidth	Bit rate(bps)
7	128	5469
8	256	3125
9	512	1758
10	1024	977
11	2048	537
12	4096	293

본 연구에서는 호버크래프트가 넓은 구역에서 제어해야 하며 센서정보만을 전달하기 위해 SF12를 적용하여 실험을 진행하였다.

III. 호버크래프트 구현 및 동작실험

1. 호버크래프트 시스템

환경오염 모니터링을 위한 호버크래프트를 제작하였다. 크기는 1.5m×1m이며, 무게는 약 10kg이다. 부력과 추진력 발생용 모터는 Hobbywing社의 X6 plus를 사용하였으며, 프로펠러의 크기는 10cm이고, 피치는 4.7°이다. 중앙제어 프로세서는 라즈베리파이 4.0 알파를 활용하였으며, 전면부 상단에 와이파이를 이용하여 연결이 가능한 웹캠을 장착하였다. 센서는 온도, pH, 용존산소량, 미세먼지, 이산화탄소를 측정할 수 있도록 장착하였으며, 위치센서로 GPS 모듈을 장착하였다. 그림 4에 제작된 호버

크래프트의 외형 및 하드웨어 구성요소를 나타내었다.

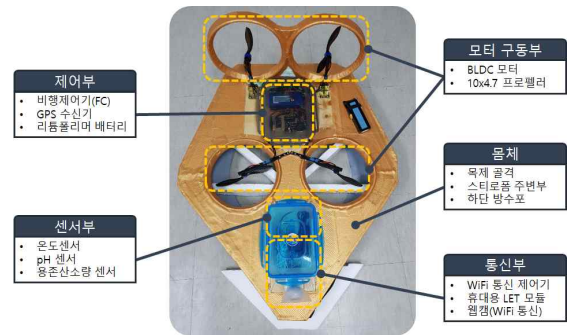


그림 4. 호버크래프트 구성
Figure 4. Hovercraft configuration

그림 5는 육상과 수상에서의 동작테스트 결과를 나타내었다. 이동속도는 육상에서 최대 2m/s 정도를 나타내었으며, 수상에서는 최대 1.5m/s를 보였다.



(a)



(b)

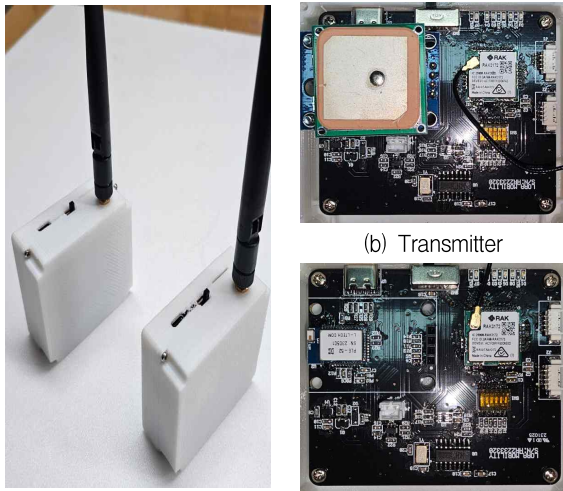
그림 5. 육상·수상 동작 테스트
Figure 5. Movement tests on land and water

장착한 모터와 프로펠러 스펙상으로는 더 높은 속

도를 낼 수 있지만 운용 안전을 위해 속도제어한도를 설정하였다.

IV. 환경 모니터링 시스템

호버크래프트를 통해 측정된 센서 데이터를 실시간으로 전달하기 위해 2장에서 설명한 LoRa 모듈을 적용하여 구성하였다. 송수신이 가능한 통합 모델을 설계하였으며, 그림 6에 제작된 송수신 모듈을 나타내었다. 송신 모듈(b)에는 GPS를 장착하였으며 연결포트를 통해 센서를 장착할 수 있게 구성하였다. 수신모듈(c)은 송신 모듈과 동일하지만 블루투스 4.0 모듈을 장착하여 모바일 장치에서 데이터를 수신할 수 있게 구성하였다.



(a) Data transceiver module (b) Transmitter (c) Receiver
 그림 6. LoRa 통신모듈기반 실시간 데이터 송수신기
 Figure 6. Real-time data transceiver based on LoRa communication module

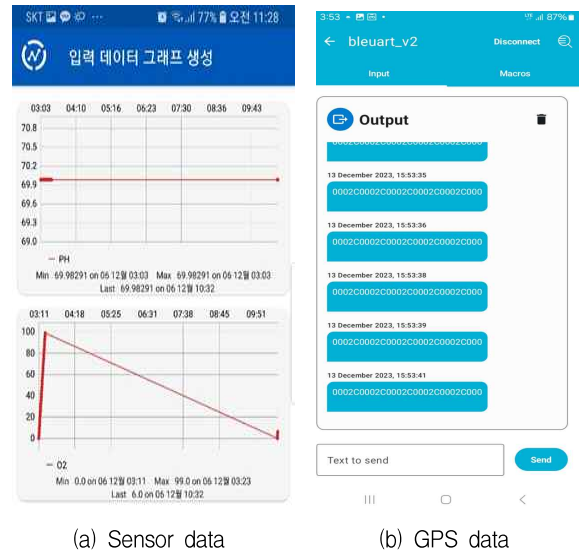


그림 7. 환경데이터 측정 시험
 Figure 2. Environmental data measurement test

통신거리는 약 1km 정도 가능함을 확인하였고, 모듈

내부에 별도의 배터리를 장착하여 호버크래프트와 별개로 데이터 전송은 1시간이상 가능하도록 설계하였다.

그림 7은 제작된 호버크래프트에 실시간 데이터 수신장치를 부착하여 실험을 진행한 코스를 나타내었다. 전북 김제시 능재저수지에서 약 1Km를 운용하였으며 그림 8에 측정된 위치데이터와 센서데이터를 나타내었다. (a)는 수질과 대기오염데이터를 그래프로 측정할 수 있도록 하여 나타낸 그래프이며, (b)는 GPS 정보데이터이다. 1,000ms 단위로 데이터를 송신하도록 설정하였으며 약 20분동안 시험을 진행하여 호버크래프트 제어와 데이터 수신이 잘 되는 것을 확인하였다.



(a) Sensor data (b) GPS data
 그림 8. 실시간 데이터 기록 어플리케이션
 Figure 8. Real-time data recording application

V. 결론

본 논문에서는 하천이나 저수지의 수질 및 대기오염을 측정하기 위한 호버크래프트를 제작하였으며, 실시간으로 데이터를 송수신할 수 있도록 LoRa 통신 모듈 기반 송수신기를 제작하여 환경 모니터링 시스템을 구축하였다. 4개 모터 기반으로 부력과 추진력을 발생시켜 육상과 수상을 동시에 이동 가능한 호버크래프트를 설계하여 제작하였으며, 최대 통신거리가 1km까지 가능한 송수신 모듈을 설계하였고, 실시간으로 환경 센서 데이터를 획득할 수 있도록 모니터링 시스템을 구축하였다. 데이터 수신용 전용 앱을 제작하여 센서데이터를 실시간으로 그래프화하여 나타내며 GPS데이터를 수신하여 정확한 호버크래프트 위치를 확인할 수 있도록 시

시스템을 구현하였다. 시제품 제작과 외부시험을 통해 제안한 시스템의 성능을 검증하였다.

현재 수질검사의 경우 전문인력 보트를 이용하여 수상에서 진행하는데 수질 측정이 어려운 지형이 있을 수 있으며, 측정 센서 및 데이터 수집기의 무게가 커 측정에 어려움이 있다. 이에 본 연구개발 결과를 활용하여 위 어려움을 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 차후 연구로는 GPS 데이터와 지도를 매칭하여 자동제어가 가능하도록 시스템을 구현하여 실시간 환경 모니터링 시스템을 구축하고자 한다.

References

- [1] Ullo, Silvia Liberata, and Ganesh Ram Sinha. "Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors." *Sensors*, Vol.20, No. 11, pp 3113, 2020
- [2] Jiang, Peng, et al. "Design of a water environment monitoring system based on wireless sensor networks." *Sensors*, Vol. 9, No.8, pp 6411-6434, 2009
- [3] Weon, Dalsoo "Service Platform Design for Smart Environment Disaster Management." *The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 4, No. 3, pp 247-252, 2018
- [4] Kap Rai Lee, Young Sik Kim. "A Study on the Development for Environment Monitoring System of Micro Data Center." *The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 8, No. 2, pp. 355-360. 2022.
- [5] Sajid, Memoon, et al. "Remote monitoring of environment using multi-sensor wireless node installed on quad-copter drone." *2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*. IEEE, 2016.
- [6] Potter, Brooke, et al. "Environmental monitoring using a drone-enabled wireless sensor network." *2019 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*. IEEE, 2019.
- [7] Kim, Jeong Su. "Data Error Compensation Estimation Technology for Providing High Quality Contents in IoT Environment." *The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 5, No. 3, pp 333-338, 2019
- [8] Wan-Jik Lee, Se-Jin Kim, Jun-Keun Yoon, Ja-Woon Jeong, Seok-Yeol Heo. "Design and Development of IoT-based Indoor Environment Management Platform ." *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)*, Vol. 7, No.1, pp 654-661, 2021.
- [9] R. Ortega, M. W. Spong, F. Gomez-Estern, and G. Blankenstein, "Stabilization of a class of underactuated mechanical systems via interconnection and damping assignment," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 8, pp. 1218-1233, Aug. 2002.
- [10] D. Chwa, "Global tracking control of underactuated ships with input and velocity constraints using dynamic surface control method," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 1357-1370, Nov. 2011.
- [11] D. Chwa, "Fuzzy adaptive output feedback tracking control of VTOL aircraft with uncertain input coupling and state-dependent disturbances," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 23, no. 5, pp. 1505-1518, Oct. 2015.
- [12] X. Huang and Y. Yan, "Output feedback control of underactuated spacecraft hovering in circular orbit with radial or in-track controller failure," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 9, pp. 5569-5581, Sep. 2016.
- [13] W. Khalil, "Dynamic modeling of robots using Newton-Euler formulation", *Informatics in Control, Automation and Robotics*, Springer, Berlin, 2011.
- [14] Alliance, L. "LoRaWAN What is it?-A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN LoRa Alliance.", 2015.
- [15] Murata Innovator in Electronics, 2018, <https://www.murata.com/en-us/products/connectivity/module/lora>

※ 이 연구는 첨단분야 혁신융합대학사업 예코
업(주관:고려대학교(세종), 참여:전주비전대
학교) 연구개발과제 지원에 의한 연구임