

Article

수중항법 알고리즘을 위한 미네로 운동학 파라미터 예측

여태경 · 윤석민 · 박성재 · 홍섭* · 최종수 · 김형우 · 김대원 · 이창호

한국해양연구원 해양시스템안전연구소
(305-343) 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 32

Estimation of MineRo's Kinematic Parameters for Underwater Navigation Algorithm

Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Soung-Jea Park, Sup Hong*, Jong-Su Choi, Hyung-Woo Kim, Dae-Won Kim, and Chang-Ho Lee

Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI
Daejeon 305-343, Korea

Abstract : A test miner named MineRo was constructed for the purpose of shallow water test of mining performance. In June of 2009, the performance test was conducted in depth of 100 m, 5 km away from Hupo-port (Korean East Sea), to assess if the developed system is able to collect and lift manganese nodules from seafloor. In August of 2010, in-situ test of automatic path tracking control of MineRo was performed in depth of 120 m at the same site. For path tracking control, a localization algorithm determining MineRo's position on seabed is prerequisite. This study proposes an improved underwater navigation algorithm through estimation of MineRo's kinematic parameters. In general, the kinematic parameters such as track slips and slip angle are indirectly calculated using the position data from USBL (Ultra-Short Base Line) system and heading data from gyro sensors. However, the obtained data values are likely to be different from the real values, primarily due to the random noise of position data. The aim of this study is to enhance the reliability of the algorithm by measuring kinematic parameters, track slips and slip angle.

Key words : underwater navigation, extended kalman filter (EKF), track slip, slip angle, USBL (ultra-short base-line) system, test miner, MineRo

1. 서 론

수심 5,000 m 해저면 퇴적표층에 부존하는 망간단괴는 대표적인 심해저 광물자원이지만, 그 상용화를 위해서는 매우 복잡한 기술이 요구된다. 고압조건(500기압 이상)과 해수의 부식성을 견딜 수 있는 재료 및 구조기술, 장비기술을 기반으로 해저 연약지반에서의 주행기술, 광물단괴 채집기술, 해저면 주행항법기술, 실시간 제어·계측기술,

통합거동 제어기술, 통합운용 시스템 기술 등 상업적 채광시스템을 구성하는 핵심기술들은 다학제적이고 융합적이다.

우리나라는 1994년 이후, 심해저 망간단괴 채광기술의 독자적 개발을 목표로 국가연구개발 사업을 수행해오고 있다. 심해저 채광기술의 핵심기술인 집광기술은 해저면에 산재되어 있는 망간단괴를 수중의 중간저장소(버퍼)까지 모으는 기술이다. 이를 위해서 해저면 위를 사전 계획된 경로를 따라서 움직이는 주행장치, 퇴적물로부터 망간단괴를 효율적으로 분리·수거하는 채집장치, 그리고 채집

*Corresponding author. E-mail : suphong@moeri.re.kr

된 망간단괴를 버퍼까지 이송하는 송출장치 등이 요구된다. 본 연구개발의 최종 목표는 다금속 단괴의 상업생산에 필요한 집광시스템 및 채광운용기술 개발로서, 2015년 파일럿 채광시험을 거쳐 2020년 수심 5,000 m 급의 상업채광시스템 개발을 계획 중에 있다(홍 등 2009).

2007년 심해저 집광기술 실용화의 첫 단계로서 상용생산의 1/20 규모의 자주식 시험집광기가 개발되었으며, 공모를 통하여 “미내로(MineRo)”로 명명되었다. 2009년 6월, 동해 후포항 근해 수심 약 100 m 해역에서 첫 번째 근해역 성능실증 시험을 수행하였다. 이것은 근해역 시험 개념에 의거하여 갑판면적이 충분한 바지선을 기반으로 선상지원체계를 구축하고, 수심 100 m 해역에 해저면을 인공적으로 조성하여 집광시스템과 양광시스템을 결합한 통합 채광시스템 모델의 성능 시험을 수행하였다. 본 시험에서는 개발된 슬러리 양광펌프의 설계 사양을 기준으로 직경 19 mm 유리구슬로 대체한 인조단괴 45톤과 단괴살포기 및 자동공급장치를 이용하여 폭 30 m, 길이 100 m의 면적에 평균 피복율 15 kg/m²의 해저면을 인공적으로 조성하였다. 그리고 장비 핸들링은 바지선의 크레인(양광)과 진·회수장비 LARS(Launch and Retrieval System)(집광)를 사용하는 이원화 방식을 채택하였으며, 항법(수상/수중) 체계는 DGPS(Differential Global Positioning System)와 수심(100m)를 고려한 USBL(Ultra Short Base-Line) 시스템을 이용하여 구축하였다. 최종적으로는 상기의 바지선(수상시스템)-양광펌프/유연관-미내로로 구성된 통합채광시스템 모델을 이용하여, 해저면에 살포된 인공단괴를 채집하여 수상의 바지선까지 이송함으로써 개발된 시스템의 채광 가능성을 확인하였다. 본 시험을 통하여 미내로의 해저에서의 수밀/내압, 그리고 구조적 안정성 등의 기계적 성능과 센서-액추에이터의 계측/제어 및 통신의 기본 성능이 검증되었고, 단기적 또는 장기적으로 보완해야 할 문제점 등을 파악하게 되었다.

한편, 미내로가 해저면에 조성된 단괴의 채집효율을 높여 상업적 채산성을 맞추기 위해서는 사전에 주어진 경로를 적절한 속도로 움직이는 주행제어기술이 우선적으로 확보되어야 한다. 이를 위해, 2010년에는 2009년도 시험에서 확보된 기술 및 데이터를 토대로, DP(Dynamic Positioning) 기능을 갖춘 전용선박을 이용하여 기초적인 해저주행제어시험을 수행하였다. 본 시험은 개발된 항법 알고리즘과 주행제어 알고리즘을 기반으로 하여, 미리 설정된 경로를 따라 미내로가 추종하도록 제어하는 것이 목표이다. 이를 위해서는 수중에서의 미내로 위치를 실시간으로 결정하는 위치 인식(Localization) 알고리즘이 기본적으로 구현되어야만 한다.

수중에서의 위치를 측정하기 위하여, USBL 또는 LBL(Long Base-Line) 시스템과 같은 수중항법 시스템이

널리 사용된다. 그러나 수중 소나를 이용하는 이러한 시스템은 수온, 농도, 깊이 등과 같은 환경적 인자에 의해 많은 영향을 받으며, 이로 인하여 측정되는 위치 정보는 항상 오차를 가지게 된다. 이런 문제를 해결하기 위하여, 지금까지 많은 수중항법 알고리즘 관련 연구들이 제안되고 있다(Kinsey 2006). 여기에는 소나 장비만을 이용하는 것에서부터 DVL(Doppler Velocity Logger), IMU(Inertial Measurement Unit) 등의 여분의 센서 정보까지 포함시키는 융합(Fusion) 항법, 그리고 Kalman filter와 같은 예측 알고리즘을 접목시킨 방법 등이 널리 제안되고 있다.

여 등 (2009)은 2009년도 근해역 시험에서 취득한 위치 정보를 이용하여 미내로 수중항법 알고리즘에 대한 기초 연구 결과를 발표하였다. 그는 USBL로부터 얻어진 원 위치 정보를 선필터링(Pre-filtering)한 후, 이것을 확장칼만 필터(Extended Kalman Filter) 알고리즘에 적용시킴으로써 위치를 최종적으로 결정하는 방법을 제안하였다. 여기서의 확장칼만필터 알고리즘은 미내로 운동학 모델을 기반으로 선필터링한 위치 정보와 방위각 정보만을 가지고 나머지 운동학 파라미터를 예측하여 위치를 결정한다. 그러나 이를 통해 예측된 운동학 파라미터는 실제 값과는 비교적 큰 오차를 가지므로 그 성능은 기대만큼 좋지 못하였다.

본 논문에서는 상기의 문제점을 개선하기 위해, 미내로 운동학 파라미터를 내부 센서를 통해 직접적으로 계산하여 확장칼만필터 알고리즘에 적용하는 새로운 방법을 제안한다. 이를 위해, 먼저 미내로 내부 센서를 활용하여 필요한 운동학 파라미터를 계산하는 공식을 유도한다. 유도된 공식에 따라 실시간적으로 운동학 파라미터를 계산하여 확장칼만필터 알고리즘에 대입함으로써, 일반 알고리즘보다 우수한 성능을 보임을 근해역 시험 데이터를 활용하여 증명하고자 한다.

2. 근해역 시험 장비 및 항법센서 구성

2010년 미내로의 경로주행제어 시험을 위해 구성된 시스템은 Fig. 1과 같다. 해저면상에서의 미내로 자율주행을 지원하기 위해서는 DP 기능과 윈치-케이블 시스템을 갖춘 전용 선박이 절대적으로 요구된다.

이를 위해, 본 시험에서는 KT서브마린사의 세계로호(8,500톤급)를 임차하였다. 여기에는 45 ton에 달하는 수중장비를 진·회수할 수 있는 A-프레임과 3,000 V 고전압과 광신호를 동시에 전달하는 전용 케이블 및 윈치 시스템이 갑판에 설치되어 있다. 또한, Simrad 400 시리즈의 USBL 시스템과 DGPS 장비가 선박에 고정·설치되어 있으며, 상용 항법(Navigation) S/W인 WinFrog를 통해 선박의 DP 시스템과 함께 통합·운용된다. 이로써 수중 미내로와



Fig. 1. Concept of tracking control test (2010)

의 거리 오차를 최소 3 m 이내까지 유지하며 추종 (Tracking)이 가능하다.

해저면에서의 경로 제어를 위해 미내로에 적용된 센서는 2009년 통합성능 시험과 동일하다. 여기에는 도플러 속도계(DVL), 자세 및 방위각센서(AHRS: Attitude and Heading Reference System), 유량계(Flow-meter) 그리고 트랜스폰더(Transponder)로 구성된다. 특히, DVL 센서는 지면에 대한 속도 정보와 더불어 방위각, 수온, 깊이 정보까지 동시에 제공한다. 이에 대한 자세한 사양은 Table 1 과 같다.

이처럼 미내로 항법 센서는 IMU와 같은 고정밀 센서를 채택하지 않고, 분해능이 비교적 높은 센서들로 구성되어 있다. 이것은 상용의 육상용 센서의 수중 적용에 대한 환경적 제약과 천해 시험용 집광기 특성상 고가의 센서를 장착할 수 없었기 때문이다. 따라서 비교적 정밀도가 낮은 센서들의 적절한 융합(Fusion)을 통해 수중 항법 성능을 극대화할 수 있는 방법이 요구된다.

3. 미내로 운동학 방정식

USBL 또는 LBS와 같은 수중항법 장비를 통해 측정되는 위치 데이터에는 환경적 요인으로 인하여 많은 잡음이 포함된다. 이로 인하여, 신호 자체에 대한 필터링 기법들은 한계를 보인다. 따라서 측정된 위치 정보와 미내로의 동적 특성을 접목한 위치 필터링 방법이 보다 효

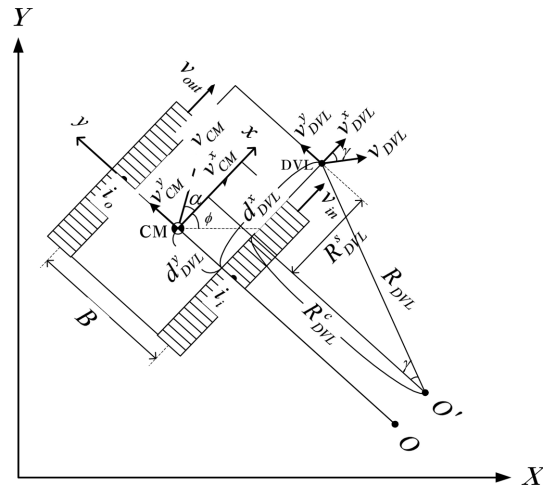


Fig. 2. Coordinates systems of MineRo

과적이다.

미내로와 같은 무한궤도형 차량(Tracked vehicle)은 지반과 트랙 사이의 상호 작용에 의해 발생하는 견인력에 의하여 움직인다. 특히, 연약지반에 대한 미내로의 운동 (Dynamics)은 매우 복잡하며 많은 비선형 요소를 포함한다. 따라서 실험적 시험용으로 제작된 미내로에서 그 요소를 직접적으로 예측하기란 거의 불가능하기 때문에, 간단한 운동학적(Kinematic) 특성을 고려하는 것이 보다 현실적인 해결책이다. 아울러, 지면 위를 주행하는 미내로의 경우는 수중을 수영하는 ROV(Remotely Operated Vehicle) 및 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 달리, 해류와 같은 유체의 영향을 비교적 적게 받기 때문에 무시할 수 있다.

미내로에 대한 일반화 좌표계는 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다. 여기서, X, Y 는 전체 좌표계(Global coordination), x, y 는 미내로 차량 좌표계(Vehicle coordination)를 각각 나타낸다. 또한, ϕ 는 방위각(Heading angle), $\dot{\phi}$ 는 각속도(Yaw velocity), V_{out}, V_{in} 은 바깥쪽과 안쪽 트랙의 지령속도, i_o, i_i 는 바깥과 안쪽 트랙 중심에서의 평균 슬립을 각각 표시한다. α 는 슬립각(Slip angle), B 는 좌·우 트랙 중심 사이의 거리를 의미한다.

Le (1999)는 트랙 차량에 대하여 다음의 운동학방정식을 제안하였다.

Table 1. MineRo sensors for navigation

	Instrument	Model	Manufacture	Update rate	Range	Accuracy
MineRo	Transponder	Combatt 5	Sonardyne	-	3,000 m	± 3 cm
	DVL	WHN1200	RDI	5 Hz	0.5~30 m	$\pm 0.2\%$
	AHRS	AHRS-S305	Watson Industries	10 Hz	0~360°	$\pm 1^\circ$
	Flow-meter	TM0075	Turbines	10 Hz	7~56[LPM]	$\pm 1\%$

$$\begin{aligned}
\dot{X}(t) &= \frac{1}{2} \{ V_{out}(t)(1-i_o(t)) + V_{in}(t)(1-i_i(t)) \} \\
&\quad \{ \cos\phi(t) - \sin\phi(t)\tan\alpha(t) \} \\
\dot{Y}(t) &= \frac{1}{2} \{ V_{out}(t)(1-i_o(t)) + V_{in}(t)(1-i_i(t)) \} \\
&\quad \{ \cos\phi(t) - \sin\phi(t)\tan\alpha(t) \} \\
\dot{\phi}(t) &= \frac{\{ V_{out}(t)(1-i_o(t)) - V_{in}(t)(1-i_i(t)) \}}{B}
\end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\dot{X}(t), \dot{Y}(t)$ 는 X, Y 축 방향의 속도를 의미한다. 식 (1)은 다음의 일반화된 비선형 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= f(x(t), V_{out}(t), V_{in}(t)) + w_p(t) \\
z(t) &= Hx(t) + w_m(t)
\end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $x(t) = [X(t), Y(t), \phi(t), \bar{i}_o(t), \bar{i}_i(t), \alpha(t)]^T$, $w_p(t)$ 는 프로세스 잡음(Process noise), $w_m(t)$ 은 측정 잡음(Measurement noise), 그리고 $z(t)$ 는 출력변수, H 는 출력행렬을 각각 나타낸다. 또한, $\bar{i}_o(t) = 1 - i_o(t)$, $\bar{i}_i(t) = 1 - i_i(t)$ 이다.

식 (2)와 같은 비선형 방정식을 S/W 알고리즘에 적용시키기 위해서는 편미분과 Taylor 급수 전개를 통해 선형근사화하는 것이 일반적이다. 이를 위해, 식 (2)를 예측된 상태변수, \hat{x} 을 이용하여 편미분한다면, 다음과 같은 특성행렬 F 가 얻어진다.

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} \\ 0 & 0 & F_{23} & F_{24} & F_{25} & F_{26} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{B}(-V_{out}) & \frac{1}{B}(-V_{in}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $V_{cx} = \frac{1}{2} [V_{out}(1-i_o) + V_{in}(1-i_i)]$ 이며,

$$\begin{aligned}
F_{13} &= V_{cx} [\cos\phi - \sin\phi \tan\alpha], \\
F_{14} &= 0.5 V_{out} [\sin\phi + \cos\phi \tan\alpha], \\
F_{15} &= 0.5 V_{in} [\sin\phi + \cos\phi \tan\alpha], \\
F_{16} &= \frac{V_{cx}(\cos\phi)}{\cos^2\alpha}, \\
F_{23} &= V_{cx} [-\sin\phi - \cos\phi \tan\alpha], \\
F_{24} &= 0.5 V_{out} [\cos\phi - \sin\phi \tan\alpha], \\
F_{25} &= 0.5 V_{in} [\cos\phi - \sin\phi \tan\alpha], \\
F_{26} &= \frac{V_{cx}(-\sin\phi)}{\cos^2\alpha}
\end{aligned}$$

다음으로, 식 (3)을 Taylor 급수 전개를 통해 아래와 같이 이산화(Digitalizing)한다.

$$\Phi_k(k) = e^{F\Delta T} = I + F\Delta T + \frac{1}{2!} F^2 (\Delta T)^2 \quad (4)$$

여기서, ΔT 는 취득 시간간격(Sampling time)을 나타내며, 3차 이상의 고차항은 무시한다.

일반 칼만필터 접근법을 적용한 항법알고리즘에서는 식 (3)의 특성 행렬 F 를 예측된 상태변수를 이용하여 반복적으로 갱신한다. 이때, 상태변수는 수중항법장비로부터의 위치와 AHRS 센서로부터의 방위각 정보로부터 예측되는 것이 일반적이다. 그러나 USBL로부터 측정된 정보에는 많은 외란이 포함되기 때문에, 이를 통해 예측된 값은 그 신뢰성이 낮다. 따라서 신뢰성을 향상시키기 위해선 위치 정보, 뿐만 아니라 $\bar{i}_o, \bar{i}_i, \alpha$ 까지 내부 센서를 통해 직접적으로 예측하는 것이 보다 효과적일 것이다.

4. 운동학 파라미터 예측

일반적으로, 트랙의 슬립, \bar{i}_o, \bar{i}_i 은 트랙의 속도와 차량의 지면 속도로부터 계산되며, 차량 선회 시 발생하는 슬립각, α 는 차량의 무게중심에서 x 축 속도 성분과 y 축 속도 성분이 이루는 각으로써 얻어진다. 상기의 파라미터를 정확하게 계산하기 위해서는 미내로 무게중심에 대한 DVL 센서의 위치보정이 우선적으로 필요하다.

트랙의 지면 교란에 의해 발생하는 미세 알갱이의 영향을 최소화하도록 DVL 센서는 미내로 앞쪽의 채집장치부에 설치되었으며, 무게 중심점(CM)에서 x 방향으로 2.6 m, y 방향으로 -1.06 m에 위치한다. 따라서 미내로 직진주행에서는 중심에서의 속도와 DVL로부터 예측되는 x, y 축 방향의 속도가 일치하지만, 선회주행에서는 그렇지 않다. 또한, 미끄럼 조향을 기본으로 하는 트랙 차량은 선회 시 각 트랙에서 서로 다른 슬립이 발생하며, 이로 인하여 순간적으로 회전 중심이 이동하는 현상이 발생한다.

Song (2006)은 위치 및 방위각 정보와 슬라이딩 모드 관측기(Sliding mode observer)를 이용하여 운동학 파라미터를 예측하는 방법을 제안하였다. 그는 측정된 방위각 정보와 트랙 지령 속도로부터 양 트랙의 슬립을, 그리고 위치 정보로부터 슬립각을 각각 예측하였다. 기본적으로 슬립각은 정확한 위치 정보로부터 예측이 가능하다. Hong (2009)과 여 등 (2009)은 위치 및 방향각 정보와 확장칼만필터 알고리즘을 기반으로, 운동학 파라미터의 예측을 통한 항법 알고리즘을 제안하였다. 이 경우, DGPS와 같은 정밀한 센서로부터의 위치 정보를 이용하면 신뢰할 만큼의 파라미터가 예측되지만, USBL과 같은 측정 오차가 큰 경우는 예측된 파라미터가 실제 값과 큰 차이를 가진다.

Gonzalez (2009)는 트랙형 로봇의 운동학 방정식과 레이더컴퍼스(Radar-compass)로부터 얻어지는 위치 정보 사이의 오차로부터 위치를 보정하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 DVL 속도와 방위각 정보로부터 미내로의 무게 중심에서의 속도, 슬립 그리고 슬립각을 직접적으로 예측하여 확장칼만필터 알고리즘에 실시간적으로 적용함으로써, 미내로 수중 위치의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

중심 속도(Velocity at Center of Mass) 및 슬립각(Slip angle)

먼저, 선회 시 미내로의 무게 중심에서의 속도를 예측하는 방법에 대하여 간략히 설명하고자 한다.

Fig. 2와 같이 DVL과 무게 중심사이의 x 축과 y 축 방향 사이의 거리를 각각 d_{DVL}^x, d_{DVL}^y 로 정의하고, x 축 방향 속도와 y 축 방향 속도가 이루는 각을 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma(k) = \tan\left(\frac{V_{DVL}^y(k)}{V_{DVL}^x(k)}\right)^{-1} \quad (5)$$

DVL에서의 속도 성분, $V_{DVL}(k)$ 과 선회각속도, $\dot{\phi}$ 로부터 DVL과 순간중심 O 까지의 거리, $R_{DVL}(k)$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$R_{DVL}(k) = \frac{V_{DVL}(k)}{\dot{\phi}(k)} \quad (6)$$

식 (5), (6)에 있어서, 분모 성분이 0에 가까워질 때 발생하는 노이즈 현상을 제거하기 위해, $|V_{DVL}^x| \leq 0.01$ [m/s] 이면, $\gamma = 0$ 그리고, $|\dot{\phi}| \leq 0.025$ [rad/s]이면, $R_{DVL} = 0$ 으로 한다.

그리고, 식 (5)의 $\gamma(k)$ 에 대한 $R_{DVL}(k)$ 의 COS성분, $R_{DVL}^c(k)$ 과 SIN성분, $R_{DVL}^s(k)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} R_{DVL}^c(k) &= R_{DVL}(k)\cos(\gamma(k)) \\ R_{DVL}^s(k) &= R_{DVL}(k)\sin(\gamma(k)) \end{aligned} \quad (7)$$

그러면, 순간 선회중심 O 으로부터 x 축과의 만나는 점까지의 거리, $R_{ICT}^y(k)$, 그리고 이동된 무게 중심사이의 거리, $R_{ICT}^x(k)$ 는

$$\begin{aligned} R_{ICT}^y(k) &= R_{DVL}^c(k) + d_{DVL}^y \\ R_{ICT}^x(k) &= d_{DVL}^x - R_{DVL}^s(k) \end{aligned} \quad (8)$$

와 같다. 따라서 무게중심에서의 x 방향 속도, $V_{CM}^x(k)$ 와 y 방향 속도, $V_{CM}^y(k)$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} V_{CM}^x(k) &= R_{ICT}^y(k)\dot{\phi}(k) \\ V_{CM}^y(k) &= R_{ICT}^x(k)\dot{\phi}(k) \end{aligned} \quad (9)$$

끝으로, 식 (9)의 x, y 방향의 속도성분이 이루는 각, 즉 슬립각 $\alpha(k)$ 가

$$\alpha(k) = \tan\left(\frac{V_{CM}^y(k)}{V_{CM}^x(k)}\right)^{-1} \quad (10)$$

와 같이 얻어진다. 단, $|V_{CM}^x| \leq 0.01$ [m/s]이면, $\alpha = 0$ 으로 한다.

슬립(Slip)

다음으로, 미내로의 바깥쪽과 안쪽 트랙의 슬립, $i_o(k), i_i(k)$ 을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_o(k) &= \frac{V_{out}(k) - [V_{cx}(k) - \dot{\phi}(k)B]}{V_{out}(k)} \\ i_i(k) &= \frac{V_{in}(k) - [V_{cx}(k) - \dot{\phi}(k)B]}{V_{in}(k)} \end{aligned} \quad (11)$$

이것은 미내로 무게 중심에서 y 축 방향으로의 트랙 중심의 슬립을 의미하며, 각 트랙의 전진 속도는 일정하며 접촉면에서의 슬립은 균일하다고 가정한다.

본 연구에서는 미내로 선회주행 특성시험을 통해 얻어진 결과로부터 제안된 알고리즘의 성능을 검증하고자 한다. Fig. 3은 케이블 꼬임에 따른 파손을 방지하기 위해, 회전각 360° 내에서 꼬임-풀림을 반복하며 주행시험을 실시한 경로의 일례를 보여준다. 여기서, 미내로의 위치 경로는 초기위치를 원점으로 변환하여 표기하였다.

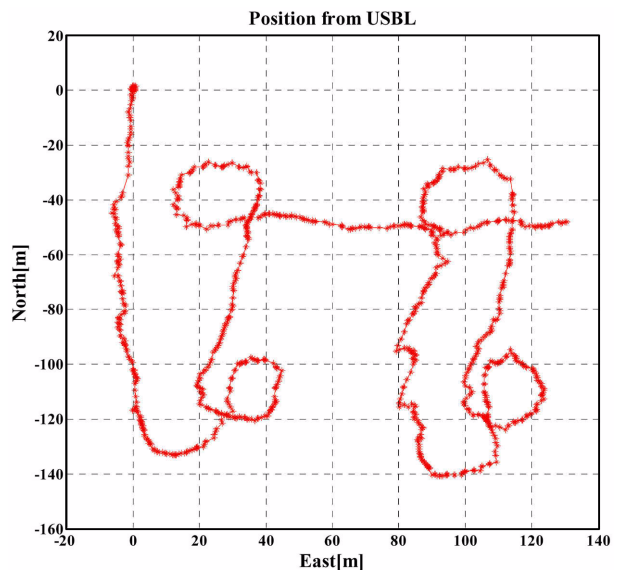


Fig. 3. Positions measured by USBL

Fig. 4는 Fig. 3의 경로를 주행하는 동안, 식 (9)로부터 얻어지는 미내로 무게중심점의 x , y 방향 속도를 나타낸다. 여기서, 실선은 CM(Center of Mass), 즉 무게중심에서의 속도, 점선은 DVL의 속도 정보를 각각 나타낸다.

Fig. 4에서는 미내로가 선회할 때, DVL과 CM의 x 방향 속도와 y 방향의 속도차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 상기의 CM 점에서의 속도 성분, $V_{CM}^x(k)$, $V_{DVL}^y(k)$ 로부터, 식 (10)의 미내로의 슬립각, α 는 Fig. 5와 같이 얻어진다. 본 선회주행시험에서는 약 0.25[rad]까지

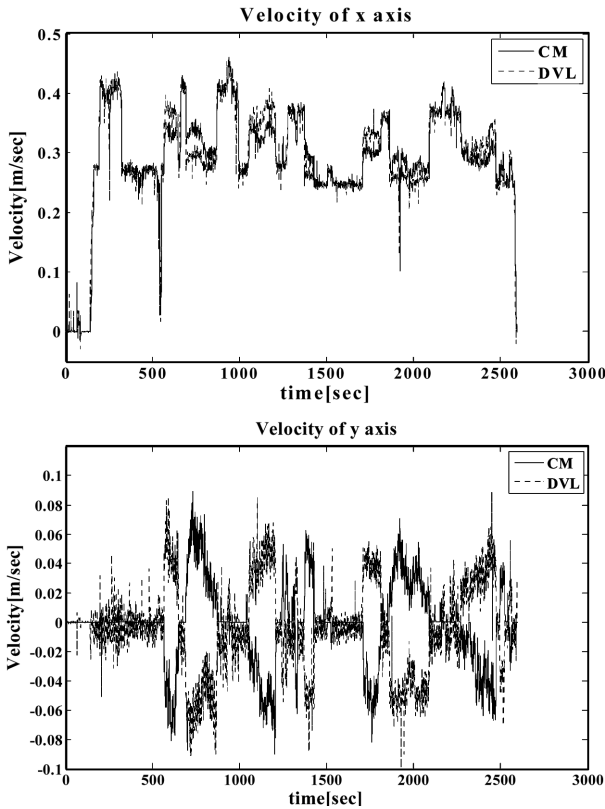


Fig. 4. Velocities (V_{CM}^x, V_{DVL}^x (upper), V_{CM}^y, V_{DVL}^y (down)) of DVL and CM

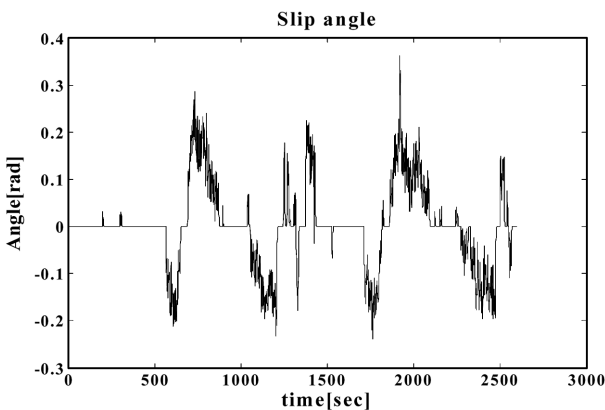


Fig. 5. Slip angle (α) of MineRo

슬립각이 발생하고 있음을 알 수 있다.

끝으로, 미내로 무게중심에서의 속도, 트랙 속도 그리고 선회각속도로부터, 양 트랙에서 발생된 슬립은 Fig. 6과 같이 얻어진다. 여기서, 실선은 안쪽(오른쪽) 트랙, 점선은 바깥쪽(왼쪽) 트랙의 속도를 각각 나타낸다.

Fig. 6에서, 양쪽 트랙의 슬립이 일치하는 구간이 직진 주행구간, 서로 다른 구간이 선회주행구간임을 짐작할 수 있다. 직진주행에서는 0.1정도, 선회주행에서는 최대 0.5 정도까지 슬립이 발생하고 있음을 알 수 있다.

상기의 Fig. 4-Fig. 6에서 얻어진 운동학 파라미터를, 식 (3)의 특성 행렬, F 에 실시간 대입함으로써 얻어진 위치 필터링 결과는 Fig. 7과 같다.

여기서, '*'은 USBL로부터의 측정 위치, 열은 '...'는 일반 확장칼만필터 알고리즘, 짙은 '...'는 운동학 파라미터를 대입함으로써 개선된 알고리즘의 결과를 나타낸다. 또한, 일반 확장칼만필터 알고리즘과 개선된 알고리즘의 성능을 보여주기 위해, 그 차이가 비교적 뚜렷이 나타나는 선회 구간의 그래프를 상·하에 추가하였다.

각 선회 구간에서의 결과를 보면, 일반 알고리즘으로부터 얻어진 경로는 굴곡에 의해 거칠고 중간 중간 끊어지는 현상이 나타나는 반면, 개선된 알고리즘에 의한 경로는 부드러우며 연속적이다. 이것은 일반 확장칼만필터 알고리즘이 노이즈가 많이 포함된 USBL 데이터에 절대적으로 의존하기 때문인 것으로 분석된다.

실제, Fig. 3의 선회 주행특성 시험에서는 양쪽 트랙의 속도를 매순간 바꾸지 않고, 일정한 속도비로 움직이도록 지령하였다. 따라서 미내로는 수중에서 비교적 부드러운 경로를 그리며 움직였을 것이다.

결국, 내부 센서를 통해 실시간적으로 계산된 운동학 파라미터를 확장칼만필터 알고리즘에 적용한 것이 위치 정보에 대한 필터링 성능의 향상을 가져왔음을 확인할 수 있다.

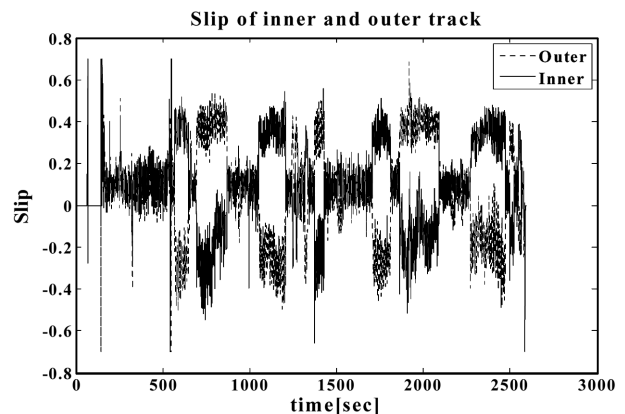


Fig. 6. Slips of outer track (i_o) and inner track (i_i)

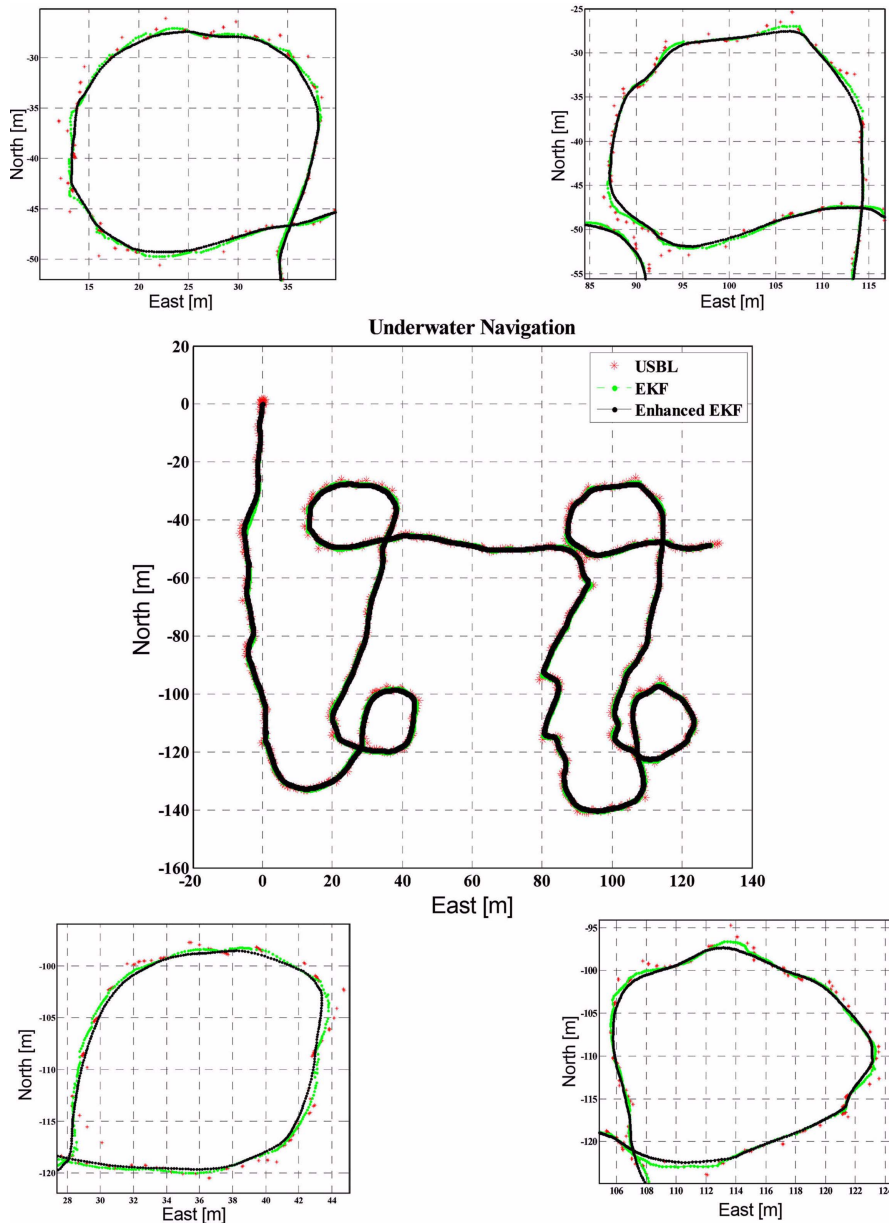


Fig. 7. Paths from enhanced EKF

5. 결 론

미내로 경로 제어를 위해서는, 무엇보다 수중에서의 정확한 위치 정보를 제공하는 위치 인식 알고리즘이 우선적으로 확보되어야 한다. 운동학 모델을 접목한 일반적인 확장칼만필터 알고리즘은 슬립과 슬립각과 같은 운동학 파라미터를 USBL 시스템의 위치 정보와 자세 센서의 방위각 정보만으로 예측한다. 그러나 예측된 위치 정보의 잡음 때문에 그 예측된 값은 실제 값과 상이한 차이를 가지므로 신뢰성이 떨어진다. 이 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 DVL로부터의 속도 정보를 이용

하여 미내로 무게 중심에서의 속도를 계산하고, 이로부터 슬립각과 슬립과 같은 운동학 파라미터를 직접 예측하였다. 그런 다음, 이것을 기존 확장칼만필터 알고리즘에 직접 입력함으로써 보다 우수한 위치 필터링을 실현하였다.

사 사

본 논문은 국토해양부 연구과제인 “심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 홍섭, 김형우, 최종수, 여태경, 홍석원, 이관목, 임용곤, 이종무, 전봉환, 최현택, 김연구, 안종우, 김경열, 최혁진, 이문진, 이승현, 오상우, 김시문, 김선동, 변성훈, 김건도, 박성재, 윤석민, 조재철, 이태희, 김상봉 (2009) 심해저 망간단괴 집광시스템 개발 및 채광운용기술 개발. 한국해양연구원, CRPM54901-2171-5
- 여태경, 박성재, 윤석민, 홍섭, 김형우, 최종수 (2009) 근해역 시험집광기 항법 알고리즘 개발을 위한 기초 연구. In: 2009년도 한국해양공학회 추계 학술대회 논문집, 삼성중공업(주) 기술연구원, 거제, 2009년 10월 22-23일, pp 273-276
- Le AT (1999) Modeling and control of tracked vehicle. Ph.D Thesis, Depart of Mechanical and Mechatronic Eng, University of Sydney, Australia, 208 p
- Grewal MS (2001) Kalman filtering: theory and practice using MATLAB. John Wiley & Sons, 416 p
- Kinsey JC, Eustice RM, Whitcomb LL (2006) A survey of underwater vehicle navigation: recent advances and new challenges. In: Proc of the 7th IFAC Conference of Maneuvering and Control of Marine Craft, Lisbon, Portugal, Sep 2006
- Song Z, Zweiri YH, Seneviratne LD (2006) Non-linear observer for slip estimation of skid-steering vehicles. In: Proc of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, 15-19 May 2006, pp 1499-1504
- Gonzalez R, Rodriguez F, Guzman L, Berenguel M (2009) Localization and control of tracked mobile robots under slip conditions. In: Proc of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, Malaga, Spain, 14-17 Apr 2009, pp 1-6
- Hong S, Choi JS, Kim HW, Won MC, Shin SC, Rhee JS, Park HU (2009) A path tracking control algorithm for underwater mining vehicles. J Mech Sci Technol **23**: 2030-2037

Received Oct. 19, 2010

Revised Feb. 8, 2011

Accepted Mar. 7, 2011