한국해양공학회지 제28권 제6호, pp 560-565, 2014년 12월 / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

Original Research Article

Journal of Ocean Engineering and Technology 28(6), 560-565 December, 2014
http://dx.doi.org/10.5574/KSOE.2014.28.6.560

수심 제한을 고려한 수중 글라이더 경로 최적화

윤석민* · 김진환*
*해양시스템 공학전공, 카이스트

Trajectory Optimization for Underwater Gliders Considering Depth Constraints

Sukmin Yoon* and Jinwhan Kim*
*Division of Ocean Systems Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Unmanned underwater vehicle 무인 수중 운동체, Trajectory optimization 경로 최적화, Two-point boundary value problem 이점 경계치 문제

ABSTRACT: *In this study, the problem of trajectory optimization for underwater gliders considering depth constraints is discussed. Typically, underwater gliders are controlled to dive and climb in a saw-tooth pattern at constant gliding angles. This approach is effective and close to optimal for deep water applications. However, the optimal path deviates from the saw-tooth path in shallow water conditions. This study focuses on finding more efficient gliding paths that can minimize the traverse time in the horizontal plane when the water depth is limited. The trajectory optimization problem is formulated into a minimum time control problem with inequality path constraints and hydrodynamic drag effects. A numerical approach based on the pseudo-spectral method is adopted as a solution approach, and the simulation results are presented.*

1. 서　　론

해양 환경의 중요성이 부각되면서 과학용, 산업용, 군사용을 아우르는 광범위한 응용 분야에서 무인 수중로봇의 활용이 점차 구체화 되고 있으며 특히 자율수중로봇(AUV, Autonomous underwater vehicle)의 활용 가능성이 크게 주목받고 있다.

수중 글라이더는 부력 및 중력을 이용한 추진 방식을 사용하는 새로운 형태의 AUV로써 기존의 프로펠러 추진 방식의 AUV에 비해 경제성 및 운용지속성 측면에서 월등하다는 장점이 있다. 그에 따라 전 세계적으로 시스템 개발과 관련된 다양한 연구들이 진행 중이며 국내에서도 2000년대 중반 이후부터 수중 글라이더 운용 및 개발과 관련된 연구가 진행되어오고 있다. 무인 운동체의 자율 운용 알고리즘을 구현 하는 데 있어 경로 최적화는 중요한 부분이며 해양 운동체의 경우 운용성 향상을 위한 기존의 경로 최적화 관련 연구들은 주로 조석류 및 해류와 같은 환경외란이 있는 경우에서 수평면상의 운동체 이동경로를 최적화하는데 초점을 맞추고 있다(Garau et al., 2009; Smith et al., 2010; Isern-Gonzalez et al., 2011).

그러나 현재까지 개발된 수중 글라이더의 대부분은 대양 심해 환경에서의 운용을 위한 저속 플랫폼 기반이어서 수심이 얕고 조류의 영향이 큰 우리나라 근해에서는 운용에 적합하지 않은 측면이 크며 이를 감안할 때 우리나라 연안에서의 수중 글라이더의 효과적인 활용을 위해 제한 수심에서 수평면 이동 속도를 높이는 연직면에서의 경로 최적화 기법에 대한 연구가 필요하다고 하겠다(Ericksen et al., 2001; Sherman et al., 2001; Graver et al., 2001).

현재 운용 중인 대부분의 수중 글라이더는 연직면 상에서 일반적으로 35도 내외의 하강각을 사용하는데 이는 정상상태에서의 수평방향 이동속도를 최대로 하기 위한 것으로서 정상상태 운용 시간이 전체 운용 시간에서 많은 비중을 차지하는 심해용 글라이더에 적합한 운용 방식이다.

그러나 우리나라 연안과 같이 수심제한에 의해 정상상태 운용시간이 상대적으로 짧고, 하강과 상승의 반복이 잦은 경우에 수중 글라이더의 수평방향 평균 이동속도를 최대로 하는 연직면의 최적 경로가 달라진다(Yoon and Kim, 2013).

본 연구에서는 이러한 차이점에 주목하고 수심 제한이 존재하는 경우에 있어 수중 글라이더의 수평 거리 이동시간을 최소화 하는 최적화된 연직면 경로에 대한 이론 연구를 수행함으로써 천수역에서의 수중 글라이더 운용기법과 수중 글라이더 설계 파라미터 결정에 도움이 되는 정보를 제공하고자 한다.

Received 9 July 2014, revised 4 December 2014, accepted 15 December 2014
Corresponding author Jinwhan Kim: +82-10-6711-4152, jinwhan@kaist.ac.kr
ⓒ 2014, The Korean Society of Ocean Engineers
It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE 2014 in Busan.

다음의 2장에서는 수중 글라이더의 최적경로에 대한 직관적인 파악과 해석을 위해 이상적인 조건 하에서의 최속강하곡선(Brachistochrone curve)에 대한 해석해를 고찰한다. 3장에서는 수중 글라이더의 유체저항을 고려한 운동 모델을 소개하고 수평면 이동시간을 비용 함수로 하는 최적경로 문제로의 정식화와 수치 해석을 통해 최적해를 도출하고 4장에서 수심제한이 있는 경우에 있어 수중글라이더의 연직방향 최적경로를 구하고, 기존의 운용방식과의 시간비교를 통해 최적경로의 효용성을 검증한 후에 최종적으로 결론을 제시하기로 한다.

2. 중력장에서의 최소시간 이동경로

수중 글라이더가 정상 상태일 때 수평 이동 속도는 식 (1) ~ (2)와 같이 양력(L)과 항력(D)으로 표현된 힘 평형 관계식으로부터 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 식 (3)에서 경로각(θ)을 제외한 부력엔진의 용량(m_b)과 중력 가속도(g), 단면적(A), 항력 계수(C_d) 및 물의 밀도(ρ)를 상수로 생각한다면, 수중 글라이더의 수평 이동 속도는 $\sin\theta^{1/2}\cos\theta$의 크기에 따라 결정되며 경로 각이 35도 일 때 수평 이동 속도가 최대가 되는 것을 그림 1을 통해 확인할 수 있다(Sherman et al., 2001; Graver et al., 2001).

$$L sin\theta - D cos\theta = 0 \tag{1}$$

$$L cos\theta + D sin\theta = m_b g \tag{2}$$

$$\dot{x} = V cos\theta = \sqrt{\frac{2 m_b g sin\theta}{\rho A C_d(\alpha)}}\, cos\theta \tag{3}$$

하지만 우리나라 연안과 같은 경우는 얕은 심도 제한에 의해서 수중 글라이더가 정상상태로 운용하는 시간이 심해용 글라이더에 비해 짧기 때문에 수중 글라이더의 수평 이동 속도를 최대로 하는 연직면의 경로가 달라질 수 있다.

본 장에서는 수중 글라이더와 같이 중력과 부력을 이용하여 추진하는 운동체의 운동 특성을 고려하여 이상적인 경우 중력장에서의 최적경로문제에 대해 소개하고 심도제한이 있는 경우 운동체의 수평거리 이동시간을 최소화하는 최적화된 경로에 대한 해석해를 고찰함으로써 이후의 수중 글라이더 최적 경로에 대한 직관적 해석을 돕고자 한다.

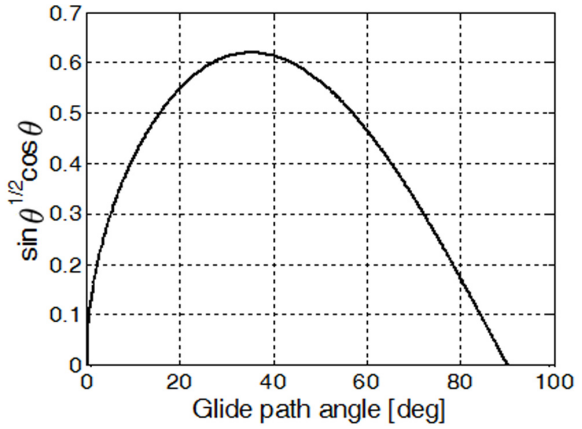


Fig. 1 Component of Horizontal Glide Speed Equation, $\sin\theta^{1/2}\cos\theta$

2.1 최속강하선 (Brachistochrone curve)

최속강하선 문제는 그림 2와 같이 마찰이 없고 일정한 중력장 안에서 질량체가 원점으로부터 목표지점 (x_f, z_f)까지 갈 때 최단시간에 목표지점에 도달할 수 있는 경로를 찾는 문제로 정의된다. 이를 바탕으로 식 (4) ~ (7)과 같이 질량체의 운동 모델을 구성할 수 는데, 질량체는 식 (4)와 같이 마찰이 없는 보존계(Conservative field)에 놓여있기 때문에 접선방향 속도 v는 식 (5)와 같이 z에 관한 함수로 나타낼 수 있으며 g는 중력가속도, θ는 x축에 대한 경로의 각도로 제어입력을 나타낸다. 이 문제의 해는 일찍이 Bernoulli에 의해 연구된 바 있으며 최적해가 일정한 하강각을 유지하는 직선 형태가 아닌 사이클로이드 곡선 형태가 된다고 알려져 있다(Lewis et al., 2012).

$$\frac{1}{2}mv^2(t) - mgz(t) = \frac{1}{2}mv^2(t_0) - mgz(t_0) = 0 \tag{4}$$

$$v = \sqrt{2gz} \tag{5}$$

$$\dot{x} = v\cos\theta \tag{6}$$

$$\dot{z} = v\sin\theta \tag{7}$$

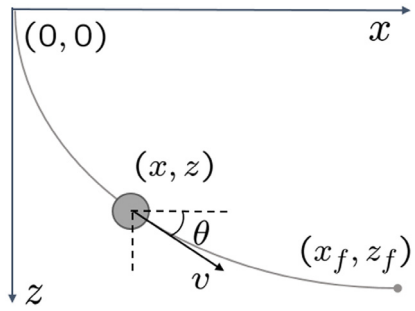


Fig. 2 Brachistochrone curve

2.2 심도 제한이 있는 경우의 최소시간 이동경로

2.1절에서 얻어진 운동 모델에 대해 시간을 목적 함수(performance index)로하고 경로 제한(path constraints)과 고정되지 않은 종단점을 가지는 경우에 대해 문제를 정의하면 식 (8) ~ (16) 과 같이 문제를 정식화할 수 있다(Bryson and Ho, 1975).

Performance Index,

$$J = h(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t)\, dt = \int_{t_0}^{t_f} 1\, dt \tag{8}$$

Hamiltonian,

$$H(t) = 1 + \lambda_x(t)\, V(t)\cos\theta(t) + \lambda_z(t)\, V(t)\sin\theta(t) + \mu(t) S(z,t) \tag{9}$$

where,

$$\mu \begin{cases} > 0 & , S(z,t) = 0 \\ - & \\ = 0 & , S(z,t) < 0 \end{cases}$$

Euler equation,

$$-\dot{\lambda}_x = \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \tag{10}$$

$$-\dot{\lambda}_z = \frac{\partial H}{\partial z} \equiv \begin{cases} \frac{g}{V}(\lambda_x \cos\theta + \lambda_z \sin\theta) - \mu & , S(z,t) = 0 \\ \frac{g}{V}(\lambda_x \cos\theta + \lambda_z \sin\theta) & , S(z,t) < 0 \end{cases} \tag{11}$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial \theta} = -\lambda_x \sin\theta + \lambda_z \cos\theta \tag{12}$$

Boundary condition,

$$x(0) = 0, x(t_f) = x_f \tag{13}$$

$$z(0) = 0, z(t_f) = free \tag{14}$$

$$\lambda_z(t_f) = -\frac{\partial h(x(t_f), t_f)}{\partial z} = 0 \tag{15}$$

Inequality path constraints,

$$S(z,t) = z - d_p \leq 0 \tag{16}$$

위 식에서 μ는 부등식 제한조건(Inequality constraints)에 대한 영향함수(Influence function)로 식(9)에 그 특성이 나타나 있으며, d_p는 설정된 깊이(Predetermined depth)로 심도 제한을 나타낸다. 이 때, d_p는 최적의 깊이방향 종단지점 $z_{f,opt}$보다 낮은 경우를 고려한다. 여기서 $z_{f,opt}$는 깊이 방향의 목표지점 z_f에 대한 경계 조건이 사라짐에 따라서 대체된 경계조건인 식(15)를 통해서 구할 수 있으며, 수평방향의 목표지점에 따라 $z_{f,opt} = 2x_f/\pi$의 값을 가지고 그림 3을 통해 결과를 확인할 수 있다(Mertens and Mingramm, 2008).

위 문제에서 수평방향의 목표지점과 경로 제한을 각각 $x_f = 30$과 $d_p = 10$으로 설정하고 해를 구해보았다. (그림 4) 결과를 보면 경로 제한에 맞닿기 전까지는 사이클로이드 형태의 곡선을 따라가지만 경로 제한에 맞닿는 순간인 약 2초 후부터 더 이상 하강할 수 없게 되면서 x축과 평행한 직선 경로를 따라가게 된다. 앞서 설명한 대로 속도는 z에 관한 함수로 나타나며 이 경우에 속도가 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

하지만 중력과 부력을 교대로 활용하며 추진력을 얻어 하강과 상승을 반복하는 수중 글라이더의 운용 특성을 감안하면 질량체가 경로 제한에 맞닿는 순간 다시 상승하는 힘을 받을 수 있는 경우에 대해 생각해 볼 수 있다. 이 경우에 질량체는 경로제한에 맞닿은 후에도 힘을 계속해서 받기 때문에 가속을 할 수 있게 되고, 따라서 속도가 수렴할 때보다 비교적 짧은 시간에 목표 지점에 도달할 수 있을 것이다. 이를 확인하기 위해서 경로제한에 맞닿는 순간의 상태를 초기조건으로 하고 z방향의 상태에 대해 반대 부호를 가지도록 운동 모델을 적용하여 식 (8) ~ (16)을 따라 해석적인 방법을 통해 문제를 푼 결과를 그림 5에 보인다.

그림 4와 그림 5에서의 결과를 비교할 때, 최저 심도에서 상승하는 힘을 다시 받는 경우에 이동 시간은 하강만 하는 경우에 비해 3.4% 정도 단축되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 수중 글라이더와 같이 부력엔진을 이용해 하강과 상승을 반복하되 심도 제한이 있는 경우의 경로 최적화 문제는 최속강하선 문제와 유사한 형태로 문제를 정식화할 수 있고, 이를

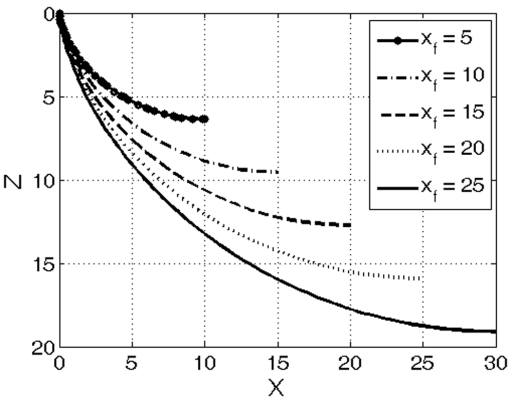
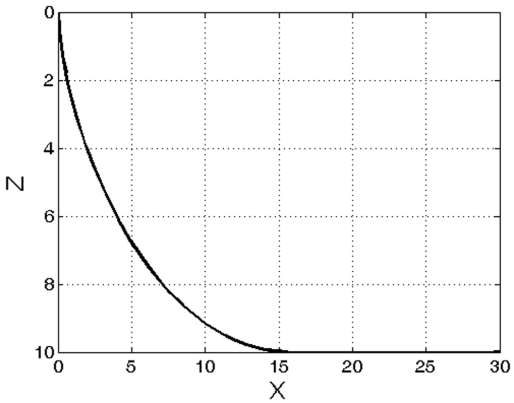
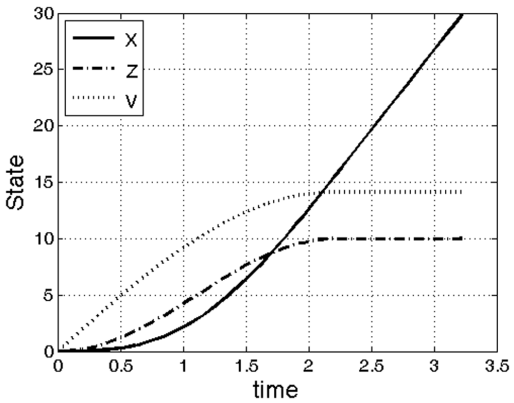


Fig. 3 Minimum-time descent paths given various horizontal goal positions

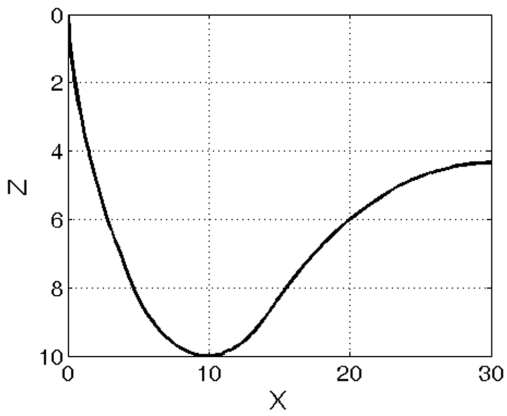


(a) Descent path

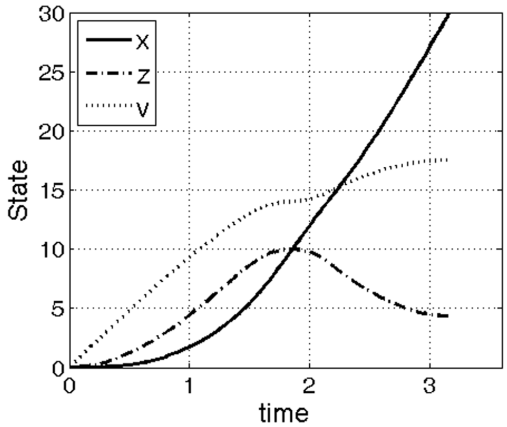


(b) State trajectory

Fig. 4 Minimum-time trajectories with the depth constraints



(a) Descent-Ascent path



(b) State trajectory

Fig. 5 Minimum-time trajectories with the depth constraints

해석함으로써 수중 글라이더의 수평방향 이동속도를 최대로 하는 최적 경로를 구할 수 있다는 것을 짐작할 수 있다.

3. 수중 글라이더 경로 최적화

마찰이 없는 이상적인 경우와는 달리 실제 수중 글라이더 시스템에는 유체저항과 같은 마찰이 작용하기 때문에 속도를 식 (5)와 같이 z에 관한 함수로 단순하게 나타낼 수 없다. 따라서 본 장에서는 단순화된 수중 글라이더의 모델을 기반으로 최적 제어 문제를 정식화하고 수치해석을 통해 글라이더의 최적 경로를 구한다.

3.1 글라이더 운동모델

원칙적으로 수중 운동체는 6자유도의 운동 자유도를 가지나 전역적인 경로를 생성하는 측면에서는 간략화된 모델의 사용이 일반적이며 이를 감안하여 연직면 상에서의 수중 글라이더의 운동 모델을 식 (17) ~ (21)과 같이 나타내었다. 식에서 x,z는 외부 고정 좌표계에서 표현되는 글라이더의 연직면에서의 위치를 나타내며, θ는 피치각을 의미한다. 이 때, 실제 피치각(θ)과 경로각(ξ)은 공격각(α)만큼의 차이를 가지지만, 해석의 편의를 위해 그 차이가 작다고 가정하고 피치각과 경로각은 동일한 θ로

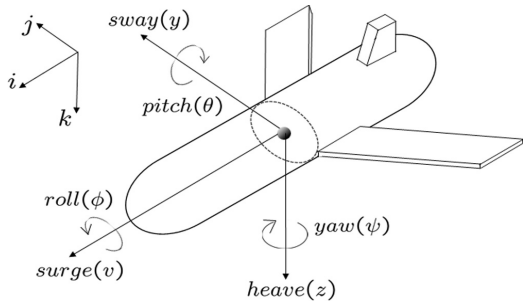


Fig. 6 Coordinate system

나타내었다. 또 m과 m_b는 각각 글라이더의 전체 질량 과 부력 엔진에 의한 질량변화량을 나타내며 피치 변화율(Pitch rate)과 질량 변화율(Mass displacement rate)을 제어입력으로 설정하였다. 유체저항은 동체 고정 좌표계에서 글라이더 이동 방향 속도의 제곱에 비례한다고 가정하였다.

$$\dot{x} = v\sin\theta \tag{17}$$

$$\dot{z} = vcos\theta \tag{18}$$

$$\dot{v} = g\frac{m_b}{m}sin\theta - \frac{1}{2m}A\rho C_d v^2 \tag{19}$$

$$\dot{\theta} = u_1 \tag{20}$$

$$\dot{m}_b = u_2 \tag{21}$$

3.2. 이점 경계값 문제(Two-point boundary value problem)

앞 절에서의 운동 방정식을 활용하여 이점 경계값 문제로 정식화하였다. 식 (22)는 목적함수(Performance index)를 나타내며, $\alpha_i = [\alpha_t, \alpha_\theta, \alpha_{m_b}]$와 같이 시간 및 각각의 제어 입력들에 대한 가중치를 줄 수 있도록 하면서 최소시간 및 최소 에너지 문제를 모두 고려할 수 있도록 설정하였다.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \alpha_t + \alpha_\theta u_1^2 + \alpha_{m_b} u_3^2 dt \tag{22}$$

식 (23) ~ (36)는 폰트랴긴 최소원리(Pontryagin's minimum principle)의 적용을 통해 얻어진 일반화된 최적화 문제로의 정식화된 표현이다. 제약 조건으로는 충분히 얕은 수심을 나타낼 수 있는 수심 조건을 적용하고 이외에도 글라이더의 실제적 운용을 감안하여 질량중심 이동속도와 부력양의 변화율 등 제어 입력 최댓값을 고려한 부등식 제약조건을 고려하였다. 그러나 문제의 높은 비선형성과 여러 제약조건으로 인해 해석해의 도출이 가능하지 않은 것으로 판단되었다. 그에 따라 본 논문에서는 수치적으로 해를 구하였으며, 수치 시뮬레이션을 수행하는데 있어 필요한 변수들의 값들은 표 1에 나타내었다.

Hamiltonian,

$$\begin{aligned} H(t) = 1 &+ \lambda_x(t)v(t)\cos\theta(t) + \lambda_z v(t)\sin\theta(t) \\ &+ \lambda_v(g\frac{m_b}{m}sin\theta(t) - \frac{1}{2m}A\rho C_d v^2) \\ &+ \lambda_\theta u_1 + \lambda_{m_0} u_2 \end{aligned} \tag{23}$$

Euler equation,

$$-\dot{\lambda}_x = \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \tag{24}$$

$$-\dot{\lambda}_z = \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \tag{25}$$

$$-\dot{\lambda}_v = \frac{\partial H}{\partial v} = \lambda_x \cos\theta + \lambda_z \sin\theta - \frac{1}{m}\lambda_v \pi r^2 \rho C_d v \tag{26}$$

$$-\dot{\lambda}_\theta = \frac{\partial H}{\partial \theta} = -\lambda_x V \sin\theta + \lambda_z V \cos\theta - \lambda_u g \frac{m_b}{m}\cos\theta \tag{27}$$

$$-\dot{\lambda}_{m_b} = \frac{\partial H}{\partial m_b} = \lambda_v g \frac{1}{m}\sin\theta \tag{28}$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_1} = \lambda_\theta = 0 \tag{29}$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_2} = \lambda_{m_b} = 0 \tag{30}$$

Boundary condition,

$$[x(t_0), z(t_0), v(t_0), \theta(t_0), m_b(t_0)] = [0, 0, 0, 35, 0] \tag{31}$$

$$[x(t_f), z(t_f), v(t_f), \theta(t_f), m_b(t_f)] = [250, free, free, free, free] \tag{32}$$

Inequality constraints,

$$0 \le z(t) \le 10 \quad [m] \tag{33}$$

$$-0.15 \le m_b \le 0.15 \quad [kg] \tag{34}$$

$$-5 \le u_1 \le 5 \quad [\mathrm{deg/sec}] \tag{35}$$

$$-3/130 \le u_2 \le 3/130 \quad [kg/\mathrm{sec}] \tag{36}$$

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value	Unit
mass of vehicle (m)	18.5	kg
density of water (ρ)	1000	kg/m^3
radius of vehicle (r)	0.075	m
drag coefficient (C_d)	0.0437	-

4. 결과 및 토의

식 (22)의 가중치를 $[\alpha_t, \alpha_\theta, \alpha_{m_b}] = [1, 0.5, 0.5]$ 다음과 같이 설정하여 최소시간 문제를 정의하였다. 수치해의 안정성 확보를 위하여 제어 입력 사용량에 대해서도 가중치를 설정하였다. 해석적 기법의 적용이 어려운 비선형 문제에 대한 최적해의 도출을 위해 최적제어 분야에서 널리 사용되는 수치해석 프로그

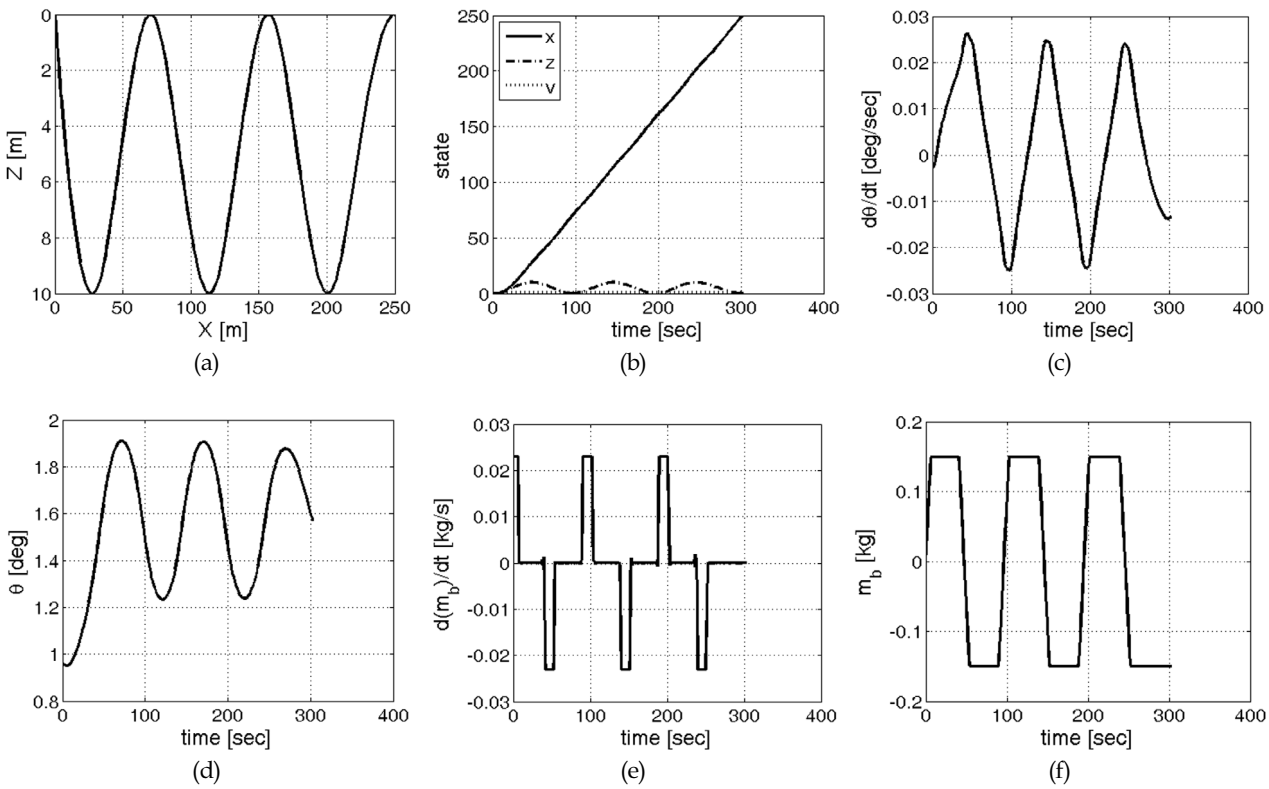


Fig. 7 Simulation result (a) trajectory (b) state (c) pitch rate (d) pitch angle (e) mass displacement rate (f) mass displacement

Table 2 Traveling time comparison

Type ($d_p = 10$)	$x_f = 250$		$x_f = 300$		$x_f = 350$	
	Traveling time [sec]	Ratio [%]	Traveling time [sec]	Ratio [%]	Traveling time [sec]	Ratio [%]
Optimal path	321.91	88.30	324.95	88.01	422.12	83.5
Straight path	364.60	100	434.18	100	505.40	100

램인 GPOPS-II (Next-generation general purpose optimal control software)를 사용하였다. 그림 7(a)의 경로를 보면 심도 제한에 맞닿은 후 다시 상승하는 경로가 나타남을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 7(c)와 7(e)를 통해 제어 입력인 피치 변화율과 질량 변화율을 나타내고 있으며 최소시간 문제들의 일반적인 해와 유사하게 bang-bang 제어의 형태를 유사하게 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그리고 표 2에 다양한 수평방향의 목표지점(x_f)에 대해 기존의 직선 운용경로를 따랐을 때와의 시간비교 결과를 나타내었다. 결과를 보면 제안된 최적경로를 따를 때 운용 시간이 기존의 경로를 따를 때에 비해 단축된 것을 확인할 수 있으며 목표 지점이 멀어짐에 따라서 최적 경로를 따를 때의 효과가 커지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 수심제한에 의해 정상상태 구간의 운용 시간이 심해용 글라이더에 비해 짧은 경우에 대해 수중 글라이더의 최적 경로를 구하였다. 유체 저항을 고려한 수중 글라이더의 운동 모델을 제시하였으며, 최적 경로를 구하기 위한 이점 경계치(Two-point boundary value)문제로 정식화하고 수치 시뮬레이션을 통해 수중 글라이더의 수평방향 이동 속도를 최대로 하는 최적 경로를 구하였다. 최종적으로 최적경로와 기존 경로와의 운용시간 비교를 통해 수심제한이 있는 경우 최적경로의 유용성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2012R1A1015307).

References

Bryson, A.E., Ho, Yu-Chi, 1975. Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control. Revised Edition, Hemisphere Publishing Corporation, USA.

Ericksen, C.C., Osse, T.J., Light, R.D., Timothy, W., Lehman, T.W., Sabin, P.L., Ballard, J.W., Chiodi, A.M., 2001. Seaglider: A Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research. Journal of Oceanic Engineering, 26(4), 424-436.

Garau, B., Bonet, M., Alvarez, A., Ruiz, S., Pascual, A., 2009. Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Realistic Oceanic Current Fields: Application To Glider In The Western Mediterranean Sea. Journal of Maritime Resarch, 4(2), 5-22.

Graver, J.G., Bachmayer, R., Leonard, N.E., Fratantoni, D.M., 2001. Underwater Glider Dynamics and Control. Proceedings of 12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology(UUST). Durham UK, 1710-1742.

Isern-Gonzalez, J., Hernandez-Sosa, D., Fernandez-Perdomo, E., Cabrera-Gamez, J., Dominguez-Brito, A.C., Prieto-Maranon, V., 2011. Path Planning for Underwater Gliders Using Iterative Optimization. Proceedings of Robotics and Automation, Shanghai China, 1538-1543.

Lewis, F.L., Vrabie, D.L., Syrmos V.L. , 2012. Optimal Control. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Mertens, S., Mingramm, S., 2008. Brachistochrone with Loose Ends. European Journal of Physics, 29(6), 1119-1129.

Sherman, J., Davis, R.E., Owens, W.B., Valdes, J., 2001. The Autonomous Underwater Glider “Spray”. Journal of Oceanic Engineering, 26(4), 437-446.

Smith, R.N., Yi, Chao, Li, Peggy P., Caron, D.A,, Jones, B.H., Sukhatme, G.S., 2010. Planning and Implementing Trajectories for Autonomous Underwater Vehicles to Track Evolving Ocean Precesses Based on Predictions from a Regional Ocean Model. Journal of The International Journal of Robotics Research, 29(12), 1475-1497.

Yoon, S.M., Kim, J.W., 2013. System Design and Path Optimization of a Shallow-water Underwater Glider. Proceedings of the Annual Autumn Meeting the Korea Society of Ocean Engineers, Seoul Korea, 34-37.