

수중운동체의 목표추적시스템에 적합한 유도론 선정에 대한 연구

윤근항^{†*}, 이기표^{**}, 여동진^{**}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}
서울대학교 조선해양공학과^{**}

A Study on the Guidance Law Suitable for Target Tracking System of an Underwater Vehicle

Kun Hang Yun^{†*}, Key Pyo Rhee^{**} and Dong Jin Yeo^{**}

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering^{*}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University^{**}

Abstract

To determine a guidance law which is suitable for Target Tracking System(TTS) of an underwater vehicle, the performance (hitting probability) of TTS were calculated with four different guidance schemes, considering underwater vehicle's manoeuvrability and characteristics of seeking equipment such as sonar. To evaluate the performance of TTS with each guidance law, numerous target-tracking simulations of underwater vehicle were performed under the condition of target's various motion scenario. Furthermore, the effect of sonar characteristics to the performance of guidance law in TTS was studied by changing parameters of sonar such as frequency of ping and detecting error of target. The pursuit-tail guidance law showed the best performance among four different guidance laws. Complex motion of target from straight line to turning circle and zigzag movement, low frequency of sonar ping and large detecting error of target decreased the hitting probability.

※Keywords : Underwater vehicle(수중운동체), Target tracking system(목표추적시스템), Guidance law(유도론), Sonar parameters(소나특성), Pursuit guidance law(추적유도)

1. 서론

수중운동체의 목표추적시스템(Target Tracking System)이란 차세대수중체계의 운용개념 중의 하나로, 움직이는 목표물을 적절한 유도론과 제어론을 통하여 추적하는 체계를 말한다. 수중운동체의

접수일: 2005년 2월 23일, 승인일: 2005년 5월 18일

† 주저자; E-mail: gnangi@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7283

목표추적시스템을 효과적으로 운용하기 위해서는 수중운동체에 기대되는 성능을 충분히 파악하고 더욱 향상된 성능을 갖추도록 하는 것이 필요하다. 성능파악을 위해서는 수중운동체의 운동 특성에 대한 체계적인 연구 및 운용조건에 관련된 연구가 수행되어야 하며, 성능향상을 위해서는 운항 및 제어방법에 대한 연구가 수행되어야 한다.

수중운동체의 운동특성은 주어진 운동모델, 유체력미계수를 이용한 조종시뮬레이션으로부터 확인할 수 있다. 김찬기(1998)는 물수체의 모형 구조 및 유체력계수에 대한 연구를 수행하였고, 강주년(2001)은 잠수함의 부가물 형상이 조종성능에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다. 운항 및 제어 방법에 관련된 연구로 손남선 등(2001)은 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)를 대상으로 미리 주어진 고정된 목표점을 이용한 궤적 제어 및 충돌회피에 대한 연구를 수행하였다. 운항 조건 중 본 논문에서 다루고자하는 목표추적-유도 문제는 항공비행체를 중심으로 하여 공개된 연구와 개발 자료가 많이 존재한다(Garnell and East 1997). 김기석(2003)은 미사일을 대상으로 하여 기존의 개발된 유도법칙의 개념을 검토하고, 이를 통합할 수 있는 유도법칙설계에 관한 연구를 수행하였다.

항공분야의 목표추적-유도문제를 수중운동체에 적용하기 위해서는 운항속도, 선회능력과 같은 대상체의 운동특성과 탐색장비, 목표물에 대한 정보와 같은 운항환경이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 수중운동체의 목표추적시스템을 조종부, 유도부, 탐색부로 구성하여 접근하였다. 각 구성에 대한 파악 및 모델링을 통하여 조종부에서는 수중운동체의 운동특성을, 유도부 및 탐색부에서는 운항환경을 고려하였다. 이와 함께 추적유도, 비례항법유도, 혼합유도, 예측유도를 적용한 시뮬레이션과 소나특성에 변화를 준 시뮬레이션을 수행하고, 유도성공확률과 빗맞침거리를 비교함으로써 유도론의 성능우위를 평가하였다.

2. 수중운동체의 목표추적시스템 개요

수중운동체의 목표추적시스템은 크게 수중운동체와 목표물로 그 대상을 구분할 수 있다.

수중운동체 모델은 운동 모델링과 그 운동 특성을 다루는 '운동모델'부, 목표물로의 추적, 유도, 제어에 필요한 '제어 및 유도 알고리즘'부, 소나부의 설계와 목표물에 대한 탐색 상황을 다루는 '소나모델'부로 구성된다. 목표물 모델은 목표물의 운동을 기술하기 위한 '운동모델'부와 목표물의 운항 상황이 되는 '운동시나리오'부로 구성된다.

Fig. 1은 수중운동체와 목표물의 모델 구성부를 수중운동체의 운용단계 면에서 도시화한 그림이다. 목표물의 위치는 목표물의 운동모델과 운동시나리오로부터 결정된다. 수중운동체의 소나모델에서 목표물의 위치가 탐색되며, 이를 기반으로 하여 제어 및 유도 알고리즘에서 목표물로의 유도 명령이 계산된다. 실제 수중운동체를 움직이게 하는 것은 조종명령으로 이는 수중운동체의 운동모델과 제어 및 유도 알고리즘으로부터 계산된다.

따라서 수중운동체의 목표추적시스템은 Fig. 2와 같이 탐색부, 유도부, 조종부 3가지로 그 시스템을 구성할 수 있다.

▶ 탐색부 - 목표물의 위치를 소나를 이용하여 탐색하는 부분으로, 탐색기 관련모델이 탐색부에 해당된다.

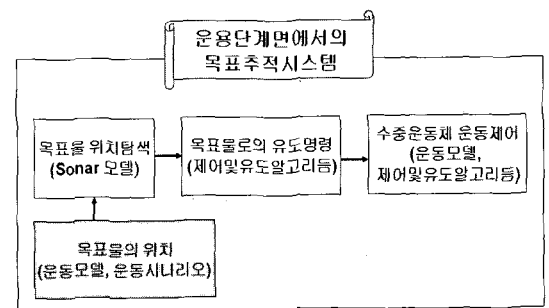


Fig. 1 Operation procedure of target tracking system

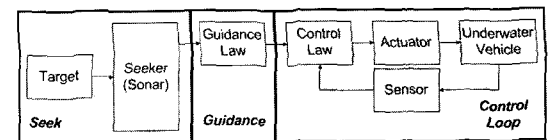


Fig. 2 Structure of target tracking system

▶ 유도부 - 탐색부에서 얻어진 위치정보를 바탕으로 수중운동체에서는 주어진 유도론에 따라 유도명령이 계산되는데, 이부분이 목표물을 추적하게 하는 유도부에 해당된다.

▶ 조종부 - 수중운동체는 유도명령에 따라 운동을 하게 되는데, 이는 방향타와 승강타에 가해지는 조종명령에 따라 이루어지게 된다. 이부분이 실제 수중운동체를 움직이는 조종부에 해당된다.

본 논문에서는 조종부에서부터 유도부, 탐색부 순으로 모델링을 하여, 수중운동체의 목표추적시스템을 구성하기로 한다.

3. 조종부

3.1 운동방정식

수중운동체의 조종운동을 기술하기 위하여 Fig. 3과 같이 지구고정좌표계(XYZ)와 수중운동체의 선수, 우현, 아랫방향을 x,y,z로 하는 물체고정좌표계(xyz)를 정의하였다.

수중운동체의 운동방정식은 무게중심을 원점으로 기술하고, 수직면과 수평면이 분리된 선형운동방정식을 사용하였으며, 목표물의 운동방정식은, 6자유도가 연성된 비선형운동방정식을 사용하였다 (Gertler and Hagen 1967).

3.2 수중운동체 및 목표물의 제원

조종 및 유도 시뮬레이션에 사용될 수중운동체와 목표물의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Principal dimension of target and underwater vehicle

구분	수중운동체	목표물
배수량	960kg	1114ton
길이	5.6m	50m
속도	35knots	18knots
타정보	최대각 15도 각속도 5도	최대각 30도 각속도 3도

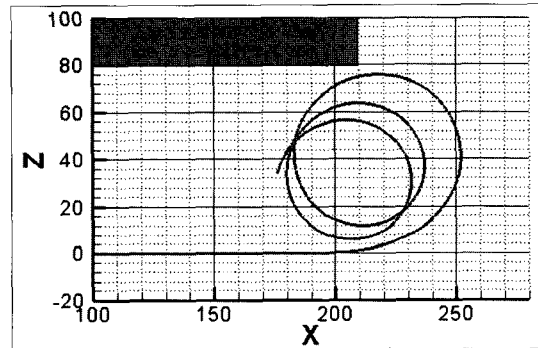


Fig. 4 Simulated trajectory of 3° elevator turning - underwater vehicle

3.3 조종시뮬레이션

승강타 변화에 대한 조종시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4와 같이 수중운동체의 경우, 좌우승강타를 3도로 변화시켰을 때의 선회직경은 약 75m이고, 최대각인 15도로 변화시켰을 때의 선회직경은 약 30m이다.

시뮬레이션을 통해 계산된 목표물의 선회직경이 약 350m임을 감안할 때, 수중운동체의 선회직경이 목표물보다 작은 것을 알 수 있다.

4. 유도부

유도알고리즘은 목표물을 추적하기 위해 실제 구현하고자 하는 구체적 목표에 따라 다음과 같이 분류할 수 있으며, 4가지 유도법칙을 본 논문에서 구현하였다.

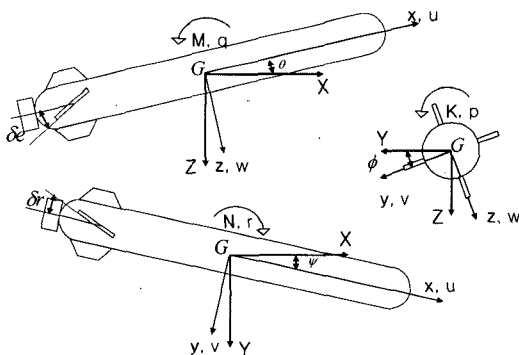


Fig. 3 Coordinate system

- ▶ 시선벡터에 기반을 둔 유도법칙(추적유도)
- ▶ 일정방위경로 유도법칙(비례항법유도)
- ▶ 혼합 유도법칙(비례항법+추적유도)
- ▶ 충돌코스를 예측, 구속조건으로 부과하는 유도법칙(예측유도)

4.1 추적유도

추적유도(Pursuit-Tail Guidance Law)는 수중운동체의 속도벡터를 목표물과의 시선벡터(Line of Sight vector, 탐색기를 내장한 수중운동체에서 목표물까지를 이은 벡터선)상에 위치시키는 유도론이다.

Fig. 5와 같이 수중운동체의 속도벡터를 목표물과의 시선벡터 상에 위치시키려고 제어력을 가하게 되면, 상대거리가 감소함에 따라 결국 목표물과 충돌하게 된다.

추적유도방식은 일반적으로 구성이 간단하고 교란에 강한 특성을 지니지만, 목표물이 회피기동을 할 경우 성능이 떨어진다는 단점이 있다.

4.2 비례항법유도

비례항법유도(Proportional Navigation Guidance Law)는 시선벡터와 기준벡터(지구고정좌표계에서 정해지는 멀리 있는 어느 기준점과 수중운동체를 이은 벡터)가 이루는 사이의 각인, 시선각의 변화율에 비례하는 제어 명령을 줌으로써 충돌지점과 목표물, 그리고 수중운동체 사이의 충돌삼각형을 유지하려는 유도법칙이다. 비례항법유도는 목표물이 등속직선운동을 하게 될 경우, 수중운동체 역시 직선을 유지하며 추적을 하도록 하며, 유도후반부로 갈수록 수중운동체에 요구되는 제어명령의 변화폭이 줄어들어, 목표물의 운동에도 신속히 대응할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나 항공의 유도문제와 달리 수중운동체의 유도문제에서는 지구고정좌표계에서 설정되는 기준벡터를 설정할 수가 없으므로 시선각을 Fig. 6과 같이 수중운동체의 속도벡터와 시선벡터가 이루는 각으로 설정하였다.

이 경우 목표물이 등속직선운동을 하게 될 경우, 수중운동체가 직선을 유지하면서 추적을 하게 된다는 장점은 그대로 유지되나, 유도후반부로 갈

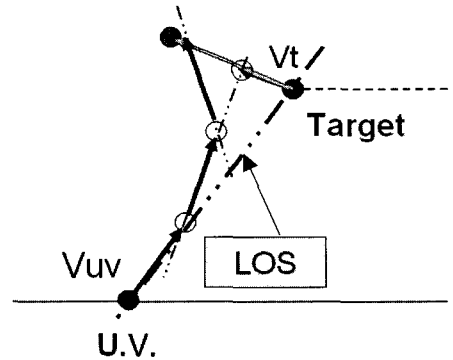


Fig. 5 Pursuit-tail guidance law

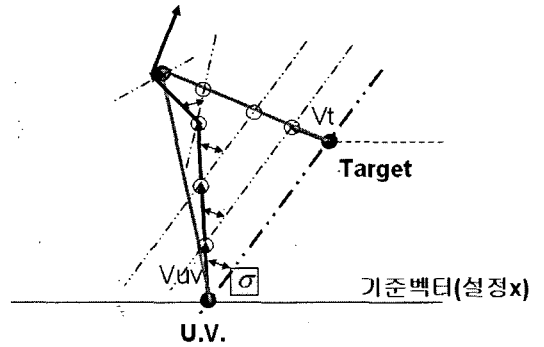


Fig. 6 Modified proportional navigation guidance law

수록 수중운동체에 요구되는 제어명령이 많아진다는 단점이 생긴다.

4.3 혼합유도

본 논문에서 사용된 혼합유도(Mixed Guidance Law)는 비례항법유도와 추적유도를 결합시킨 방식이다. 목표물이 등속직선운동을 하게 될 경우 비례항법유도에서 얻게 되는 시간적인 이점을 유도초반부에 적용하였다. Fig. 7과 같이 탐색 시작 시 고정된 시선각을, 충돌거리 350m전 까지 목표물과의 거리가 줄어들며 따라 선형적으로 0까지 변화하도록 설정하였다. 여기서, 설정값 350m는 0m에서 50m간격으로 500m까지 시뮬레이션을 수행한 후 가장 우수한 성능을 보이는 값을 택하였다.

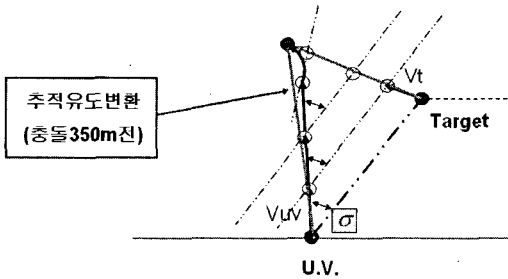


Fig. 7 Mixed guidance law

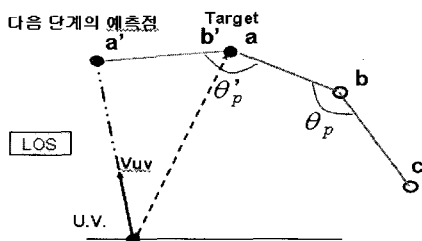


Fig. 8 Predictive guidance law

4.4 예측유도

본 논문에서는 목표물의 현재, 과거 위치를 기하학적으로 고려하여 예측점을 계산하는 예측유도 법칙(Predictive Guidance Law)을 사용하였다. 수중운동체는, 소나핑을 고려할 때 목표물의 위치를 Fig. 8과 같이 c, b, a 순인 불연속적인 점으로 탐지하게 된다. 목표물의 현재위치 a를 기준으로 하여 a-b사이의 거리 및 a, b, c 가 이루는 각 (θ_p)을 현재위치인 a에 적용하여(a'-b', θ_p') 예측점(a')을 계산하였다. 수중운동체는 이 예측점을 목표물로 간주하고 추적유도를 하게 된다.

5. 탐색부

5.1 소나모델링

목표물의 위치를 추정하게 되는 탐색부의 소나는 Table 2와 같은 특징을 가진다. 계측범위는 거리에 관계없이 25도이며, 핑 주기는 목표물과의 거리가 가까울수록 짧아진다. 해양상태, 장비특성 등에 따라 목표물의 위치추정 시 오차가 존재하는데, 본 논문에서는 거리의 0.5% 내로 설정하였다.

Table 2 Modeling of sonar

계측 범위	25도
핑 주기	2.8초~0.6초
목표물인식지점	목표물 표면
위치추정 오차범위	0.5%내

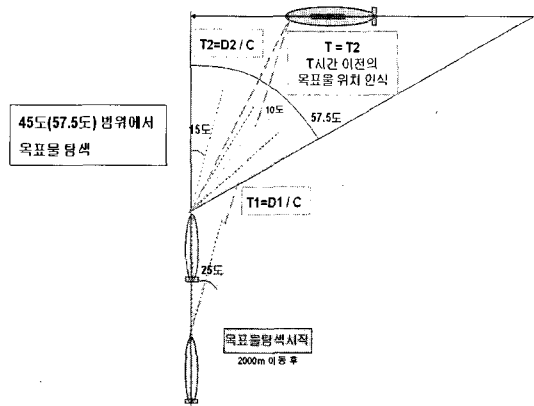


Fig. 9 Modeling of seeking part

5.2 탐색상황모델링

소나를 이용한 목표물 탐색은 Fig. 9에서처럼, 소나부는 45도 범위 내에서 회전이 가능하며, 15도 간격으로 회전한다. 이렇게 탐색할 시 수중운동체는 전방 115도 범위 내를 탐색할 수 있다. 목표물 탐색 중 소나의 핑 주기는 2.8초로 고정된 것으로 한다.

수중에서의 탐색상황은 목표물에 대한 위치인식에 있어 시간지연이 나타난다. 수중에서의 소리속도를 C라고 하고, 수중운동체에서 쏘아진 소나 핑이 목표물에 반사될 때까지의 거리를 $D1$, 반사된 소나 핑이 수중운동체에 돌아올 때까지의 거리를 $D2$ 라 하면 소나 핑이 오고 가는데에 있어 $T1 = D1/C$, $T2 = D2/C$ 만큼의 시간이 지연된다. 이 중 목표물의 인식에는 $T2$ 의 시간지연 만큼 오차가 생기게 된다. 인지된 목표물의 위치정보는 다음 소나 핑이 도달하기 전까지 계속 유지된다. 목표물과의 거리가 가까워지게 되면, $T2$ 시간이 0에 가까워지므로 목표물의 위치오차는 작아지게 된다.

6. 시뮬레이션 조건 및 결과

6.1 목표물의 운동시나리오

목표물의 운동은 Table 3에서 보는 것처럼 등속운동, 가속운동, 등속-가속운동으로 구분되며, 각 운동은 다시 직선, 회전, 지그재그운동으로 구분된다. 목표물의 회전, 지그재그 운동은 최대타각인 30도로 이루어지며, 회전운동은 우현선회, 지그재그운동은 초기 정해진 방향으로 진행하도록 타각시나리오를 설정하였다. 회전운동, 지그재그운동의 시점은, 등속운동과 가속운동의 경우는 수중운동체가 목표물을 탐색했을 때로 설정하였으며, 등속-가속운동의 경우는 최대한 충돌시점이 가까우면서도 목표물의 가속, 회전, 지그재그 운동의 영향이 나타날 수 있도록 각각 시간을 설정하였다.

설정된 목표물의 운동은 Fig. 10에서 보는 것처럼 수중운동체에서 목표물로의 방향을 12시로 하여 총 5가지 방향에 대하여 이루어진다. 따라서 총 45가지의 운동으로 목표물의 운동시나리오는 구성된다.

수중운동체의 초기위치는 (0, 0, 0)이고, 목표물의 초기위치는 (4000, 2000, -150)이다. 수중운동체는 초기 목표물의 속도와 방향정보를 이용하여 초기충돌예상지점으로 운항(발사)을 하게 된다. 초기위치로부터 약 2000m를 이동 후 수중운동체는 목표물을 탐색하게 되며, 목표물이 탐색되면 4가지 유도론 중 미리 입력된 유도론을 바탕으로 유도제어를 시작하게 된다.

Table 3 Scenario of target motion 1

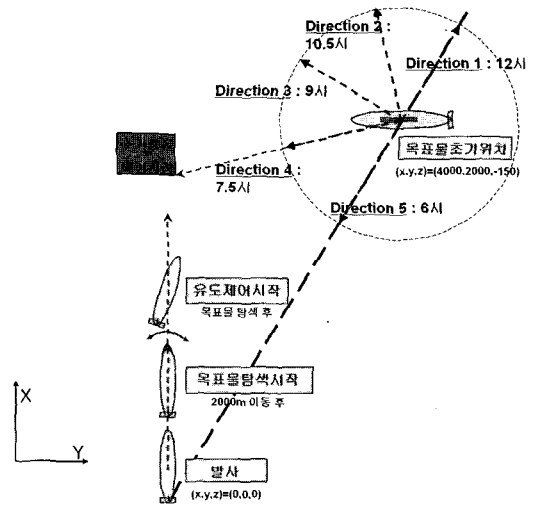
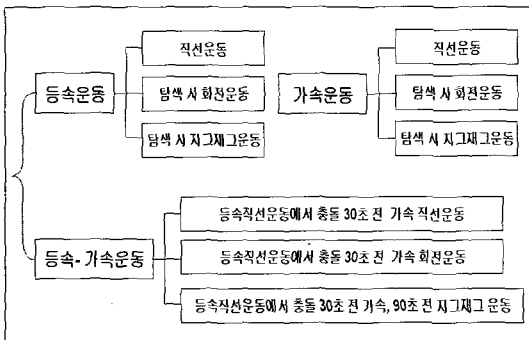


Fig.10 Scenario of target motion 2

6.2 유도론 평가요소

유도론의 비교우위를 결정하기 위한 평가요소는 유도성공확률이다. 유도시뮬레이션 중 수중운동체와 목표물 사이의 거리가 10m 이내로 되면, 목표물로의 유도가 '성공'한 것으로 간주된다. 성공한 경우의 수를 이용하여 유도성공확률을 계산하게 된다. '실패'의 경우는 시뮬레이션시간 중 수중운동체와 목표물의 최소 근접 거리인 빗맞침거리를 비교함으로써 유도의 정확도를 비교할 수 있다.

6.3 목표물의 운동에 대한 시뮬레이션

수중운동체의 목표추적시스템을 구성한 후, 시뮬레이션을 통하여 얻은 각 유도론의 유도성공확률을 Table 4로 정리하였다. 추적유도방식을 적용하였을 때 유도성공확률이 64%로 가장 높았다. 목표물의 회피기동에 성능이 떨어진다는 단점이 수중운동체의 운동특성, 즉 선회능력이 목표물 보다 뛰어나다는 점에 의해 보완된 것으로 보인다. 또한 6.4, 6.5에서 소개할 소나특성에 따른 유도 결과에서 보듯이, 추적유도방식이 소나파라미터 변화에 따른 영향이 가장 작으므로, 주어진 소나 조건에서도 유도성공확률이 가장 높게 나온 것으로 생각된다.

Fig. 11은 목표물의 운동(직선, 회전, 지그재그)에 따른 유도성공확률을 나타낸 그래프이다. 목표

Table 4 Probability of hitting target

	추적	비례항법	혼합	예측
성공개수/총개수	30/45	23/45	26/45	25/45
유도성공확률	64%	53%	56%	58%

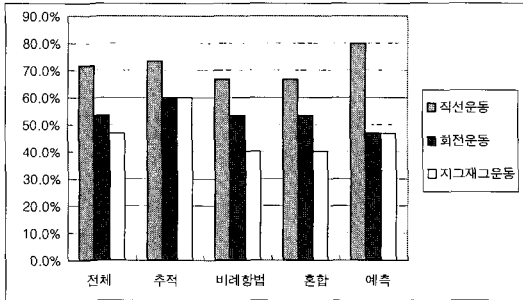


Fig. 11 Probability of hitting target with target's motion

물의 운동이 복잡할수록 유도성공확률이 떨어지는 것을 볼 수 있으며, 추적유도방식이 타 유도방식에 비해 그 편차가 작은 것을 볼 수 있다. 즉 수중운동체의 경우, 추적유도방식이 목표물의 교란운동에도 그 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

6.4 소나 핑 주기에 대한 시뮬레이션

수중운동체의 경우, 소나 핑 주기는 목표물과의 거리가 가까워질수록 2.8초에서 0.6초로 변화하도록 하여 유도 종말 시 목표물 위치추정오차를 줄이도록 설정되어있다. 여기에서는 소나 핑 주기를 기존의 상황인 가변상황과 0.6초, 1.7초, 2.8초의 고정상황을 두고, 소나 핑 주기에 따른 유도론별 빗맞힘거리를 비교하였다.

Fig. 12는 목표물이 9시 방향으로 등속직선운동을 하고 있는 경우, 소나 핑 주기에 따른 유도론별 빗맞힘거리를 나타내고 있다.

소나 핑 주기가 길어질수록 빗맞힘거리가 커지는 것을 볼 수 있으며, 이는 유도정확도가 낮아지는 것을 의미한다. 유도론 별로 경향을 살펴보면, 추적유도, 예측유도방식이 빗맞힘거리의 편차 및 크기 면에서 소나 핑 주기의 변화에 덜 민감하다는 것을 알 수 있으며, 따라서 유도정확성이 더

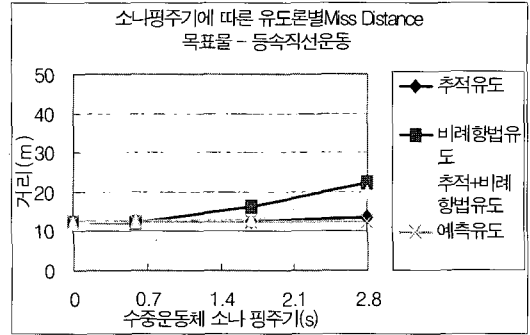


Fig. 12 Effect on miss distance with period of sonar ping

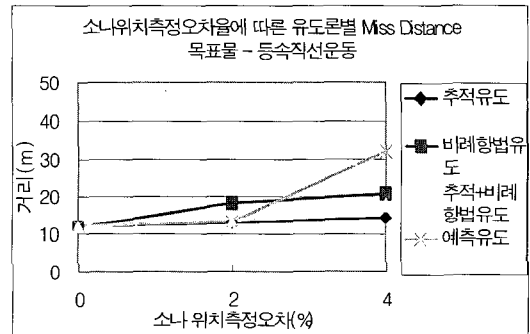


Fig. 13 Effect on miss distance with detecting error of target

높은 것을 볼 수 있다.

6.5 소나 목표물 위치추정오차에 대한 시뮬레이션

수중운동체의 경우, 소나를 이용한 목표물의 위치 추정 시 그 오차를 거리의 0.5%내로 설정하였다. 여기에서는 목표물 위치추정오차를 0%, 2%, 4% 두고 위치추정오차에 따른 유도성능을 비교하였다.

Fig. 13은 목표물이 9시 방향으로 등속직선운동을 하고 있는 경우, 소나의 목표물 위치추정오차에 따른 유도론별 빗맞힘거리를 나타내고 있다. 위치추정오차가 커질수록 빗맞힘거리가 커지는 것을 볼 수 있으며, 이는 유도정확도가 낮아지는 것을 의미한다. 유도론 별로 경향을 살펴보면, 추적유도방식이 빗맞힘거리의 편차 및 크기 면에서 위치추

정오차의 변화에 덜 민감하다는 것을 알 수 있으며, 따라서 유도정확성이 더 높은 것을 볼 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 수중운동체의 목표추적시스템에 적합한 유도론을 도출하기 위하여 추적유도, 비례항법유도, 혼합유도, 예측유도를 적용한 목표추적 시뮬레이션을 수행하고 그 유도성공확률을 비교함으로써, 유도론의 성능우위를 평가하였다.

목표물의 다양한 운동에 대하여, 목표물의 운동이 직선, 회전, 지그재그 운동 순으로 그 상태변화가 많아질수록 유도성공확률이 떨어졌으며, 추적유도방식이 유도성공확률의 크기 및 편차 면에서 가장 우수한 성능을 보여주었다.

소나의 특성을 고려할 때, 소나의 핑 주기가 짧을수록 유도의 정확도가 높아지며, 네 가지 유도론 중 추적유도 및 예측유도방식을 적용하였을 때 수중운동체의 유도정확도가 가장 높은 것을 볼 수 있었다. 또한 소나의 목표물 위치추정오차가 작을수록 유도의 정확도가 높아지며, 네 가지 유도론 중 추적유도방식을 적용하였을 때 수중운동체의 유도 정확도가 가장 높은 것을 볼 수 있었다.

따라서, 수중운동체의 운동특성과 함께 목표물의 다양한 운동과 소나특성의 변화를 고려했을 때, 그 유도정확도가 가장 높은 추적유도방식이 수중운동체의 목표추적시스템에 적합한 유도론인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 서울대학교발전기금(발전04-1)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 강주년, 2001, 잠수체의 부가물 형상에 따른 조종 성능에 관한 실험적 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교.
- 김기석, 2003, 목표각과 충돌각을 이용한 유도법칙 설계에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- 김찬기, 1998, "물수체 모형 시험 해석을 위한 운동방정식의 구조 선택 및 계수 식별 결합법," 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 2호, pp. 20-28.
- 손남선, 이기표, 이상우, 여동진, 2001, "수중물수체의 회피시스템에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 4호, pp. 23-29.
- Gertler, M. and Hagen, G.R., 1967, "Standard Equations of Motion for Submarine Simulation," NSRDC.
- Garnell P. & East, D.J., 1997, Guided Weapon Control Systems, Pergamon Press.



< 윤근항 >



< 이기표 >



< 여동진 >