

# 환경 외란을 고려한 다중 자율잠수정의 제한적 기법 기반 주행 계획기

An Constraint Based Approach to Planning Collision-Free Navigation  
of Multi-AUVs with Environmental Disturbances

지상훈\*      고우현\*\*      정연수\*\*\*      이범희\*\*\*  
Ji, Sang-Hoon      Ko, Woo-Hyun      Jung, Yeun-Soo      Lee, Beom-Hee

## ABSTRACT

This paper proposes the qualitative method for planning the operation of multi-AUVs with environmental disturbances, which is considered to be a very difficult task. In this paper we use an extension collision map as a collision free motion planner. The tool was originally developed for the multiple ground vehicles with no internal/external disturbance. In order to apply the method to a water environment where there are tides and waves, and currents, we analyze the path deviation error of AUVs caused by external disturbances. And we calculate safety margin for the collision avoidance on the extension collision map. Finally, the simulation result proves that the suggested method in this paper make multi-AUVs navigate to the goal point effectively with no collision among them.

주요기술용어(주제어) : Multi-AUV(다중 자율잠수정), Collision-Map(충돌지도), Motion Planner(주행 계획기), Environmental Disturbances(환경외란)

## 1. 머리말

해역 수중탐사와 해저 지도 제작은 인접 국가 간 외교 분쟁으로 확대될 정도로 국가의 안보와 경제에 매우 중요한 일이다. 해저 작업의 중요도가 높아짐에 따라 수중 로봇은 한 대가 원격 조정되는 수준을

벗어나, 다수의 자율 잠수정(Multi-AUV : Multiple Autonomous Underwater Vehicle)이 공동 작업을 하는 수준을 요구하게 되었다.

다수의 이동 로봇들에 대한 동작 계획(Motion Planning)은 비결정적 다항식 문제(NP-Problem : Non-deterministic Polynomial Problem)로 판명되었기에, 연구자들은 수치적인 방법으로 문제 해결을 시도하였다<sup>[1]</sup>. 특히 집중형 주행 계획기(Centralized Motion Planning)는 제어 로봇 수의 증가에 따른 계산 량이 폭발적으로 증가하는 단점은 있지만, 오프라인 상에서 최적의 해를 제시할 수 있기 때문에, 많은 연구들에서 제한적으로 실용 가능한 계획기들

† 2008년 1월 18일 접수~2008년 3월 7일 게재승인

\* 두산인프라코어(Doosan Infracore)

\*\* 한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)

\*\*\* 서울대학교(Seoul National University)

주저자 이메일 : sanghoon.ji@doosan.com

을 제시하였다. 두 대의 로봇에 대한 궤적 정보를 2차원 그림으로 보여주고, 이 그림을 이용하여 충돌 회피를 시도하는 충돌 지도방법도 이러한 범주에 속해 있다<sup>[2,3]</sup>.

제한적 기법에 바탕을 둔 충돌 지도 방법을 현실에 적용하기 위한 시도가 최근에 시도되었다. 우선 반복적 계산방법에 의거하여 3대 이상의 임의의 수의 로봇에 확대 적용될 수 있는 방법이 최근에 제시되었다<sup>[4]</sup>. 그리고, 로봇의 환경적 또는 시스템적 문제로 인하여 발생하는 주행 경로에서의 이탈 문제, 즉 경로 오차의 발생으로 생겨나는 두 로봇 사이의 충돌 특성의 변화가 분석되었다<sup>[5]</sup>.

그러나 수십 대의 육상로봇의 동작 계획에 사용되던 방법들을 multi-AUV에 적용하기는 힘든 측면이 있다. 특히 해양환경의 유체 및 동력학적인 비선형성 때문에, 이제까지 개발되었던 Yoerger and Slotine 슬라이딩 모드, Healey and Lienard의 다 변수 슬라이딩 모드 등의 비선형 기법의 AUV 제어기들조차 아직까지 복잡하고 다양한 해양 환경의 특성을 반영하지는 못하였다<sup>[6~12]</sup>. 그리고 이로 인하여 AUV의 외란이 있는 환경에서의 AUV의 동적 특성과 경로 오차를 정확히 예측할 수 없었으며, multi-AUV의 안전 주행을 계획하기 어려웠다.

이에 본 연구는 해양 환경의 외란과 AUV의 동적 특성을 고려한 실제의 운항정보를 가지고, 다수의 AUV에 대한 무 충돌 안전 운항을 계획하는 주행 계획을 제안하고자 한다. 이를 위하여 선정된 AUV 및 해류 모델로서의 외란을 모델링하고, 이 모델을 기반으로 경로 이탈치(Cross Tract Error)를 계산하고, 그 결과를 충돌 지도에 적용했을 때의 충돌 영역 동특성을 분석한다.

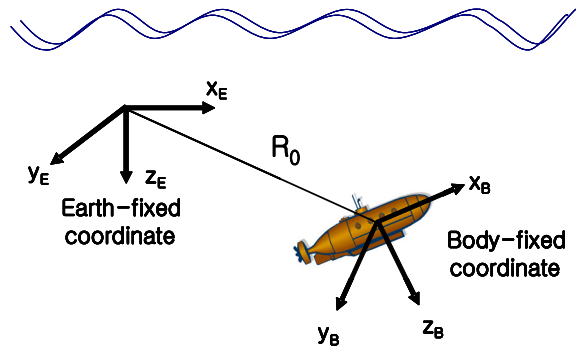
## 2. 다중 AUV의 운용모델

이 장에서는 다중 AUV의 운용모델을 도출하기 위해, 우선 AUV의 동역학 모델과 자세제어를 위한 제어기를 설명 한다. 그리고 다중 AUV 운용에서 충돌 회피 계획을 위해 사용할 충돌 지도에 대해 설명한다.

### 가. AUV 동역학 모델

AUV의 위치 및 자세는 지표고정 좌표계(Earth-fixed Coordinate)와 선체고정 좌표계(Body-fixed Coordinate)로 표현된다. 지표고정 좌표계에서 AUV의 위치와 자세는  $\eta_1 = [x, y, z]^T$ ,  $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ 로 표현되고, 선체고정 좌표계 상에서 각축 방향의 속도와 각속도는  $\nu_1 = (u, v, w)^T$ ,  $\nu_2 = (p, q, r)^T$ 로 표현 된다.

그림 1은 지표고정 좌표계와 선체고정 좌표계의 관계를 보여 주고 있다. AUV의 속도에 관한 두 좌표계 사이의 상관관계는 두 좌표계 간에 정의된 자코비안 행렬을 이용해서 정의된다. 이 자코비안 행렬은 두 좌표계 사이의 회전행렬(Rotation Matrix)로부터 구한다.



[그림 1] 지표고정 좌표계와 선체고정 좌표계

AUV의 속도에 관한 두 좌표계 사이의 상관관계는 식 (1)과 같다.

$$\frac{dR_0}{dt} = \begin{pmatrix} \dot{X}_E \\ \dot{Y}_E \\ \dot{Z}_E \end{pmatrix} = T^{-1}(\phi, \theta, \psi) \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (1)$$

지표고정 좌표계 상에서 AUV의 속도는 선체고정 좌표계의 원점의 시간에 대한 미분으로 구한다. AUV의 병진 운동과 회전 운동 관계는 식 (2), (3)과 같다.

$$m \left( \frac{d\nu_1}{dt} + \nu_2 \times \rho_G \right) + m (\nu_2 \times \nu_2 \times \rho_G + \nu_2 \times \nu_1) \quad (2)$$

$$-f_g = \begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{pmatrix}$$

$$I_0 \dot{\nu}_2 + \nu_2 \times (I_0 \nu_2) + m(\rho_G + \dot{\nu}_1 + \rho_G \times \nu_2 \times \nu_1) - m_g \begin{pmatrix} K_f \\ M_f \\ N_f \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $m$ 은 선체의 질량,  $\rho_G$ 는 선체 고정좌표계에 서 무게중심의 위치,  $I_0$ 는 관성모멘트행렬,  $m_g$ 는 중 력 모멘트,  $X_f, Y_f, Z_f, K_f, M_f, N_f$ 는 외부 힘이다.

병진운동 방정식과 회전운동 방정식으로부터 도출 된 AUV의 6자유도 비선형 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] + (W - B)\sin\theta = X_f \quad (4)$$

$$m[\dot{v} + ur - wp - x_g(pq + r^2) - y_g(p^2 + r^2) + z_g(qr - \dot{p})] - (W - B)\cos\theta\sin\phi = Y_f \quad (5)$$

$$m[\dot{w} - uq + vp + x_g(pr - \dot{q}) + y_g(qr + \dot{p}) - z_g(p^2 + q^2)] + (W - B)\cos\theta\cos\phi = Z_f \quad (6)$$

$$I_x \dot{p} + (I_x - I_y)qr + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{yz}(q^2 - r^2) - I_{xz}(pq + \dot{r}) + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} + ur - wp)] - (y_g W - y_b B)\cos\theta\cos\phi + (z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi = K_f \quad (7)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr - I_{xy}(qr + \dot{p}) - I_{yz}(pq - \dot{r}) + I_{xz}(p^2 - r^2) - m[x_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{u} - vr + wq)] + (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi + (z_g W - z_b B)\sin\theta = M_f \quad (8)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - I_{xy}(p^2 - q^2) - I_{yz}(pr + \dot{q}) + I_{xz}(qr - \dot{p}) + m[x_g(\dot{v} + ur - wp) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] - (x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi - (y_g W - y_b B)\sin\theta = N_f \quad (9)$$

여기서,  $W$ 와  $B$ 는 무게와 부력이다. 6자유도 운동 방정식으로부터 외력에 따른 선체고정 좌표계 상에서 AUV의 속도 및 각속도가 정해지게 된다.

AUV가 임계속도 이하의 속도로 심도 유지 항해

시, 수평면 운동은 수직면 운동과 분리 될 수 있으며, AUV는 중성부력을 가지며, 관성모멘트 행렬은 대칭 이 된다. 따라서 전진속도가 일정하다는 가정 하에서 AUV의 수평면 운동 방정식은 다음과 같이 선형화 되어 표현된다.

$$u_r = U_0 \quad (10)$$

$$m \dot{v}_r = -m U_0 r + \Delta Y_f(t) \quad (11)$$

$$I_{zz} \dot{r} = \Delta N_f(t) \quad (12)$$

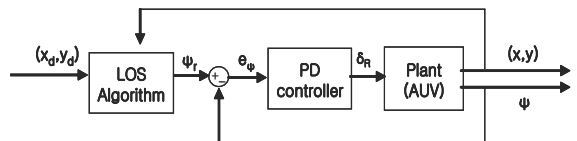
$$\dot{x} = U_0 \cos\psi - v_r \sin\psi \quad (13)$$

$$\dot{y} = U_0 \sin\psi - v_r \cos\psi \quad (14)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (15)$$

#### 나. AUV 제어기 모델

본 논문에서는 그림 2와 같이 AUV의 자세 제어기 로 이동 상태에 대한 관찰이 용이한 PD 제어기를 이 용하고, AUV가 정해진 경로를 따라 이동하도록 하 기 위해 시선(LOS : Line of Sight) 제어기를 사용 하였다. LOS 제어기는 AUV의 현재 위치와 이동할 경로의 기하학적 관계를 이용하여 경로추적을 위한 목표방향과 기준 속도를 설정한다<sup>[6]</sup>.



[그림 2] AUV 제어기 블록도

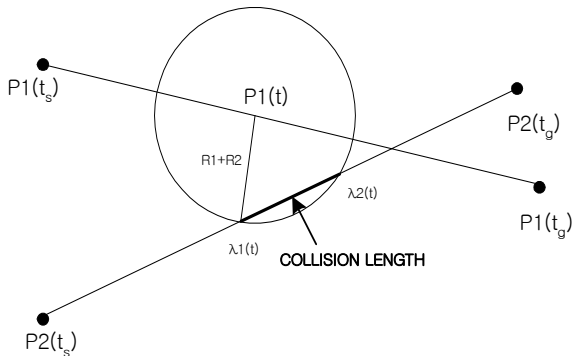
AUV의 수평면 운동방정식을 선형화 시킨 식 (10), (11), (15)와 제어 입력을 이용하여 이를 상태방정식 으로 표현하면 아래 식 (16)과 같다. 상태변수는  $y$ 축 속도( $v_r$ ),  $z$ 축 각속도( $r$ ),  $z$ 축 각도( $\psi$ )이고, 제어입력( $\delta_r(t)$ )은 AUV의 수평방향타의 각도이다.

$$\begin{bmatrix} m - Y_{v_r} & 0 & 0 \\ 0 & I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{v_r} & Y_r - m U_0 \\ N_{v_r} & N_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r(t)$$

다. 다중 AUV의 무 충돌 주행 계획기 모델

본 논문에서는 다중 AUV의 주행 계획기로 충돌 지도 기법을 사용한다. 충돌 지도 기법의 두 개체들에 대한 무 충돌 동작 계획의 주요 개념은 다음과 같다. 계산 편의를 위하여 그림 3에서의 두 AUV를 다음의 두 원으로 정의하였다. AUV1을 시간 t에서의 중심 위치가 P1(t)이고 반경이 R1인 원으로, AUV2는 반경이 R2이고 중심 위치가 P2(t)인 원으로 각각 표현하였다. 그리고 AUV1이 AUV2보다 우선 순위가 높다고 가정 한다.



[그림 3] AUV의 주행 경로와 충돌 거리

충돌 지도 기법에서 하위 순위의 AUV가 상위 순위의 AUV를 회피해야 하기에, 두 AUV의 무 충돌 주행 계획을 위하여 AUV2의 장애물 공간을 이용한다. AUV의 장애물 공간에서 AUV1은 R1+R2의 반경을 가진 이동 장애물로, AUV2는 중심점 P2(t)에 놓인 점으로 표현된다. 점으로 표현된 AUV2가 반경 R1+R2를 가지는 AUV1의 주행 경로를 지나간다면, 두 개체는 충돌될 가능성이 있다.

충돌 지도 기법에서 이동 경로는 변경되지 않기에, 시간 t에서 AUV2의 위치 P2(t)는 식 (17)과 같다.

$$P_2(t) = P_2(t_s) + \lambda(P_2(t_g) - P_2(t_s)) \quad (17)$$

여기서, 0 ≤ λ ≤ 1 이고 P2(ts)와 P2(tg)는 AUV2의 출발 위치와 도착 위치이다. 그림 3의 λ1(t)과 λ2(t) 사이의 영역과 같이 AUV1의 경로와 겹치는 AUV2의 경로 부분을 ‘충돌길이(Collision Length)’라고 명명한다.

시간 t에서 P1(t)과 P2(t) 사이의 거리가 두 AUV 반경의 합인 (R1+R2)보다 크면 두 개체는 충돌하지 않으며, 식 (18)과 같이 표현된다.

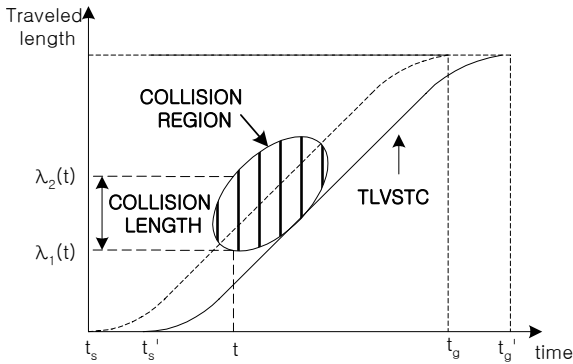
$$(R_1 + R_2)^2 \leq \|P_1(t) - P_2(t)\|^2 \quad (18)$$

AUV1의 동작 계획이 변경되지 않는다고 가정하였기에, 모든 샘플링 시간 t에서의 P1(t)은 미리 결정된다. 식 (17)을 이용하여 식 (18)을 정리하면 식 (19)와 같은 λ의 2차 부등식이 된다.

$$\lambda^2 \|P_2(t_g) - P_2(t_s)\|^2 - 2\lambda (P_1(t) - P_2(t_s))^T \cdot (P_2(t_g) - P_2(t_s)) + \|P_1(t) - P_2(t_s)\|^2 - (R_1 + R_2)^2 \geq 0 \quad (19)$$

따라서 두 개체의 무 충돌 조건은 식 (19)의 좌변 항이 음수가 되는 λ의 영역과 0과 1사이의 영역 사이에 교집합이 없어야 한다는 것으로 표현된다. 두 개체 사이의 충돌은 그림 4를 이용하여 추상화시킬 수 있다. 그림 4에서 수직 축은 AUV2의 정규화 된 이동 거리(Normalized Traveled Length)를 나타내고, 수평 축은 개체의 제어 시간이다. 매 샘플링 시간 마다 검사된 충돌 길이들이 형성하는 영역을 충돌영역(Collision Region)이라고 한다. AUV2에 대하여 계획된 주행 특성 곡선(TLVSTC : Traveled Length Versus Servo Time Curve)이 AUV2와 AUV1 사이에 형성된 충돌 영역을 지나간다면 두 AUV의 충돌이 예상된다.

두 AUV의 충돌을 회피하기 위해서는 낮은 순위인 AUV2의 속도 프로파일을 변경하거나 AUV의 출발 시간을 지연시킬 수 있는데, 본 논문에서는 AUV2의 출발시간을 지연시키는 방법을 이용한다.



[그림 4] 경로계적(TLVSTC)과 충돌 영역

### 3. AUV의 경로오차

이 장에서는 외란에 의해 발생하는 AUV의 경로 오차로 인하여 유발될 수 있는 AUV 간 충돌에 대해 살펴본다. 이를 위하여 AUV의 경로오차의 발생요인들을 살펴보고, 이로 인해 발생하는 충돌은 기존의 충돌 지도를 이용하여 회피 될 수 없음을 설명한다.

#### 가. 경로오차 발생요인

AUV의 경로오차에 영향을 주는 요인은 AUV 내부 요인과 환경에 의한 외부요인으로 나뉜다. 내부요인으로는 제어기와 센서가 갖고 있는 잡음, 제어주기, 센싱 주기 등이 있다. 외부 요인으로는 해류, 파도, 바람, 해수의 온도, 밀도 등이 있다. 이러한 요인의 복합적인 작용으로 인해 AUV는 예정된 경로를 정확히 따라가지 못하고 경로를 벗어나게 된다.

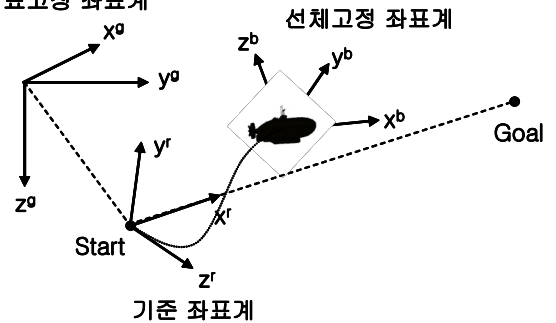
특히 AUV가 항행 도중에는 유체의 미세한 진동에도 지대한 영향을 받을 수 있다. 따라서 수중 외란 모델은 AUV의 운동을 분석하는 데 중요한 요소이다. 수중 외란은 해류의 형태로 작용하며 해류발생의 원인은 조석차, 바람, 파동 등이 있다. 일반적으로 대양의 경우 바람에 의해 대규모 해류 흐름이 발생한다. 깊은 심해저의 경우, 바람과 파동에 의한 해류의 발생은 미비하며, 대양에서 발생된 해류조차도 일정 심도 이하에서는 존재하지 않게 된다. 반면에 연안에서의 수중상태는 다양한 원인에 의해 여러 종류의 해류가 발생 되며, 이들은 해저 지형에 의해 속도와 방

향이 변하여 복합적으로 AUV에 작용하게 된다.

#### 나. 경로오차의 순시적 분석

AUV의 경로 오차의 순시적 변화를 분석하기 위하여 기준 좌표계( $x_r, y_r$ ), 지표고정 좌표계( $x_g, y_g$ )와 선체고정 좌표계( $x_b, y_b$ )를 그림 5와 같이 설정한다. 기준 좌표계는 출발 지점에서 목표 지점으로 향하는 방향으로 AUV를 놓은 후, 진행 방향을 X축으로, 출발 지점을 원점으로 설정해 놓은 좌표계이다.

#### 지표고정 좌표계



[그림 5] 기준 좌표계

경로 오차는 기준 좌표계에서 계산되는 것이기에, 선체고정 좌표계에서의 순시적 운동을 기준 좌표계에서 표현해야 한다. 이를 위하여 그림 3과 같이 AUV의 좌표계들이 정의되어 있을 때, 선체고정좌표계에서의 속도를 기준 좌표계로 변환해 주는 자코비안 행렬은 식 (20)과 식 (21)로 정의된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}^r(k) &= u^b(k)\cos(\psi^g(k) - \psi_d^g) \\ &\quad - v^b(k)\sin(\psi^g(k) - \psi_d^g) \end{aligned} \quad (20)$$

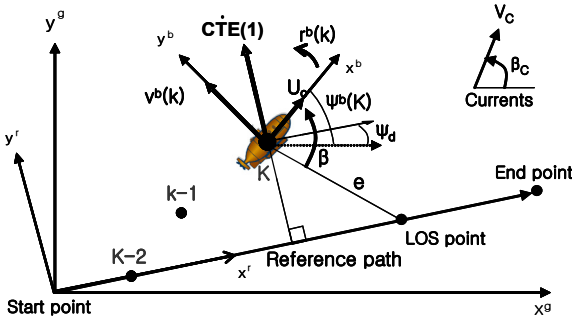
$$\begin{aligned} \dot{y}^r(k) &= u^b(k)\sin(\psi^g(k) - \psi_d^g) \\ &\quad + v^b(k)\cos(\psi^g(k) - \psi_d^g) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,  $u^b(k)$ 와  $v^b(k)$ 는 샘플링 시간 k에서의 선체고정 좌표계 상에서 X축 방향 속도와 Y축 방향 속도이며,  $\psi^g(k)$ 와  $\psi_d^g$ 는 샘플링 시간 k에서의 지표고정 좌표계 기준으로 AUV의 진행 방향과 목표 경로의 방향이다. 그리고  $\dot{x}^r(k)$ 와  $\dot{y}^r(k)$ 는 샘플링 시간 k

에서의 기준 좌표계 상에서의 AUV의 X방향으로의 속도와 Y 방향으로의 속도이다.

AUV의 샘플링 시간 k에서 진행 경로와 수직된 위치 값인  $y^r(k)$ 가 샘플링 시간 k에서의 경로오차(CTE : Cross Track Error)가 되고, 이를 CTE(K)로 표시한다.

AUV가 목표 경로를 추종하도록 하는 LOS 제어기는 순시적 CTE를 이용하여 정의된다. 이 LOS 제어기는 목표 주행 경로 상에 예비목표지점(LOS Point)를 선정한다. 예비목표지점은 그림 6에서와 같이 AUV의 현 위치로부터 지정된 거리 e만큼 떨어진 목표 주행 경로 상에서 지점으로 설정하며, 식 (22)~식 (25)와 같이 정의된다.



[그림 6] AUV의 순시적 경로오차

$$e = constant \tag{22}$$

$$y^r(k) = -e \cdot \sin(\beta - (\psi^g(k) - \psi_d^g)) \tag{23}$$

$$x^r(k) - x_{los}^r = -e \cdot \cos(\beta - (\psi^g(k) - \psi_d^g)) \tag{24}$$

$$\beta - (\psi^g(k) - \psi_d^g) = \tan^{-1} \left( \frac{-y^r(k)}{-(x^r(k) - x_{los}^r)} \right) \tag{25}$$

여기서,  $\beta$ 는 그림 6에서와 같이 현재위치에서 예비 목표지점으로서의 회전각이고,  $x^r(k)_{los}$ 은 기준 좌표계에서의 예비목표지점의 X축 위치 값이다.

일정한 해류에 의해서 경로오차가 발생되면, AUV는 수직타의 각도를 이용하여 방향을 제어해 줌으로써 목표 경로로 복귀하려고 시도한다. 경로오차에

대한 AUV의 운동 방정식은 식 (26)과 식 (27)과 같다.

$$\dot{y}^r = -(u \cos(\beta) + v \sin(\beta)) \sin(\beta - (\psi - \psi_d)) - V_c \sin(\beta_c - \psi_d) \tag{26}$$

$$\dot{\beta} = \frac{\sin(\beta)}{e} u - \frac{\cos(\beta)}{e} v - r + \frac{V_c \sin(\psi - \beta_c - \psi_d)}{e} \tag{27}$$

$$\dot{\psi} = r \tag{28}$$

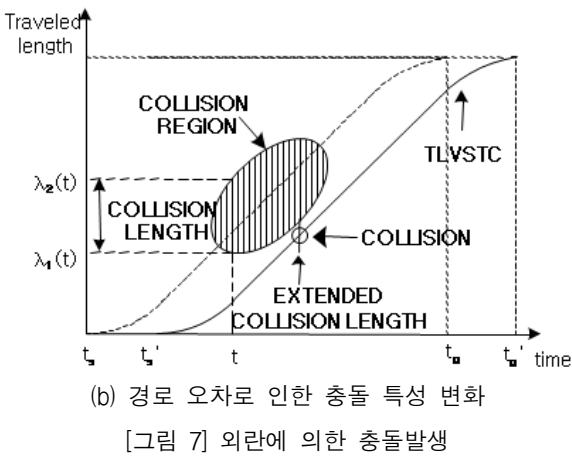
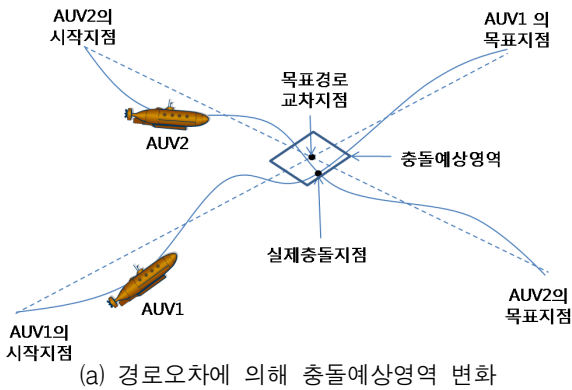
여기서 v, r,  $\psi$ 는 각 제어 주기에서의 sway 속도, yaw rate, yaw를 나타낸다. 그리고  $V_c$ 와  $\beta_c$ 는 기준 좌표계에서의 해류의 속도와 방향각이다.

다. 외란에 의한 충돌 발생

교차점에서의 AUV 간 충돌 특성은 AUV가 경로 오차를 가지며 주행될 경우 변하게 된다. AUV가 일정한 범위의 경로오차를 가지며 운행될 경우에 충돌 예상지점은 예정되었던 충돌 가능 지점의 일정 범위 안에서 나타나게 되며, 이 지점은 AUV의 속도 및 해류의 속도, 경로의 기하학적 관계에 의해 결정된다. 따라서 교차지점이 한 점으로 가정된 기존 충돌 지도를 이용해서는 충돌 여부를 정확히 판단할 수 없다.

그림 7(a)는 외란에 의한 경로오차로 인해 두 AUV사이에 충돌 예상 지점이 일정 영역으로 확장됨을 보여 주고 있다. 그리고 그림 7(b)에서와 같이 충돌 예상 지점의 확대로 인하여 충돌 지도 상의 충돌 길이가 기존보다 늘어나게 된다. 이 때 그림 7(b)에서와 같이 기존의 충돌 지도를 이용하여 충돌 회피를 시도할 경우에는, 최적의 충돌 회피를 위하여 최소한 변경된 TLVSTC는 확장된 충돌 길이에 의해 정의된 충돌 영역을 지나가게 되며, 두 AUV는 충돌하게 된다.

외란에 의해 발생하는 AUV의 경로오차로 인하여 유도된 AUV 간 충돌을 회피하기 위해서 외란에 의해 발생하는 충돌지도의 변화를 분석해야 한다.



#### 4. 확장 충돌지도를 이용한 충돌회피

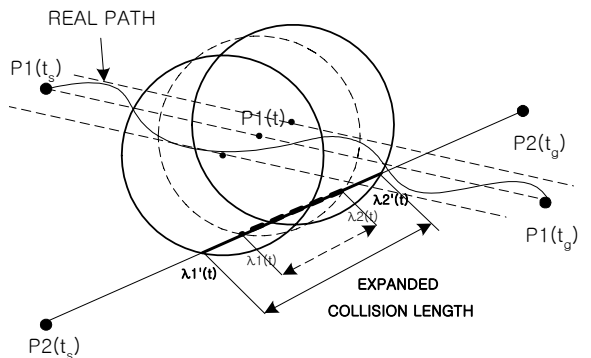
기준 좌표계상의 AUV의 운동방정식은 식 (26)과 같이 비선형 방정식이기에, 경로오차를 수학적으로 계산하는 것은 매우 어렵다.

따라서 이 장에서는 수치 해석적 방법을 사용하여 각 단계에서의 경로오차를 계산하였다. 특히 일정한 방향과 속도를 갖는 해류에 의해 생기는 경로오차를 정확하게 예측하기는 곤란하나 최대 경로오차는 추정될 수 있다. 따라서 최대 경로오차를 추정하여 고려한 확장된 충돌영역을 이용할 하위 순위의 AUV의 주행을 계획할 경우 AUV들 사이의 충돌을 방지할 수 있다.

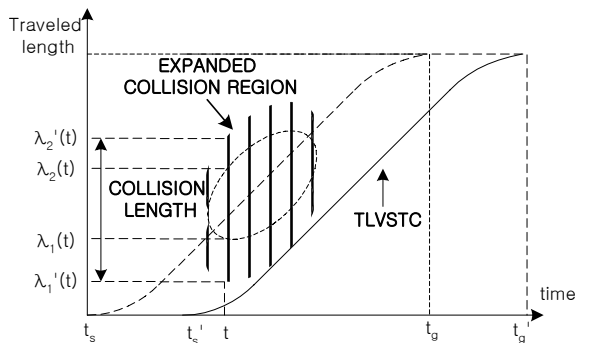
오프라인 상에서 다수의 AUV들을 충돌 없이 운용하기 위한 기법으로 제시된 충돌영역의 경계선은 특

정시간에 대한 충돌거리들의 경계 값의 집합이다. 두 대의 AUV 사이의 충돌영역의 변화는 각 AUV의 경로오차에 따라 다르게 영향을 받는다. 우선순위가 그림 3에서의 상위 순위를 갖는 AUV1의 경로오차는 AUV2에 대하여 작성된 충돌지도에서 충돌 영역의 y축, 즉 충돌영역의 길이확장을 가져오고, 우선순위가 낮은 AUV2의 경로오차는 충돌지도의 x축, 즉 충돌영역의 시간확장을 가져온다.

그림 8은 AUV1의 경로이탈치로 인해 충돌길이 변화되었음을 보여 준다. AUV1의 위치가 AUV2의 시작지점쪽으로 이동될 경우( $\lambda_1'(t)$ ), 충돌영역은 길이축을 따라 아래쪽으로 확장되고, AUV2의 목표지점 쪽으로 이동될 경우( $\lambda_2'(t)$ ), 충돌영역은 위쪽으로 확장된다. 그림 9는 충돌 영역이 AUV1의 경로이탈치에 의해 상하방향으로 확장된 모습을 보여주고 있다. 충돌영역이 확장되었기 때문에 충돌회피를 위해



[그림 8] AUV1의 경로오차로 발생된 AUV2의 충돌 길이의 변화

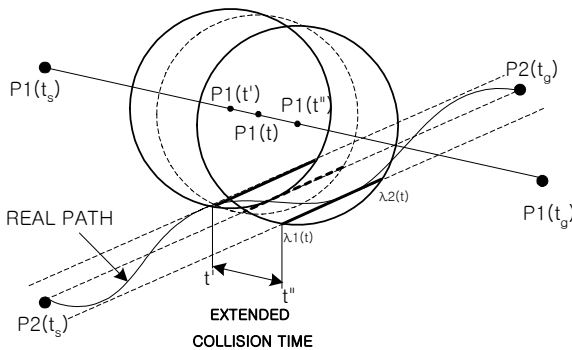


[그림 9] 충돌 영역의 상하확장

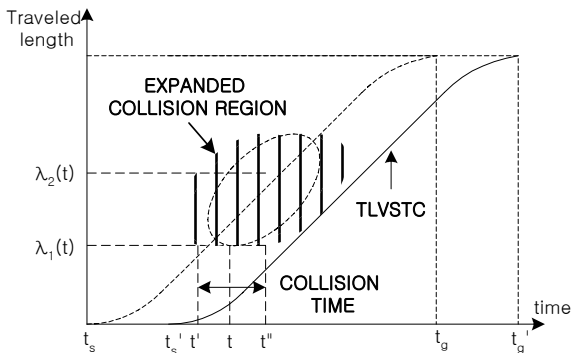
서, AUV2의 궤적이 충돌영역을 완전히 벗어나도록 AUV2의 출발시간을 지연해야 한다.

그림 10은 AUV2의 경로이탈치에 의해 충돌시간이 변화되었음을 보여 준다. AUV2의 위치가 AUV1의 시작지점쪽으로 이동될 경우( $t'$ ), 충돌영역은 시간축을 따라 왼쪽으로 확장되고, AUV1의 도착지점 쪽으로 이동될 경우( $t''$ ), 충돌영역은 오른쪽으로 확장된다. 그림 11에서 보는 바와 같이 AUV2의 경로이탈치에 의해 충돌영역은 좌우로 확장되었고, 따라서, 충돌회피를 위해 AUV2의 궤적이 충돌영역을 완전히 벗어나도록 출발시간을 지연해야 한다.

수중 외란으로 인해 생기는 AUV의 경로오차는 두 대의 AUV간에 충돌을 예측하는 충돌지도를 변화시킨다. 따라서 오프라인에서 AUV특성과 해역의 상황을 파악하면 충돌영역의 변화된 크기를 예상 할 수 있고, 이를 통하여 보다 정확한 주행 계획기가 가능하다.



[그림 10] AUV2의 경로이탈치로 인한 충돌시간의 변화



[그림 11] 충돌 영역의 좌우 확장

## 5. 모의 실험 결과

### 가. 모의실험 시스템 구성

본 장에서는 모의실험을 통하여 본 논문에서 제시된 수치적 기법에 의하여 일정한 해류의 영향을 받고 있는 두 AUV가 서로 간에 충돌 없이 안전하게 주행하는 가를 제시한다. 다음은 모의실험을 위한 가정이다.

AUV는 Hydroid사에서 개발된 REMUS를 모델로 선정하여 모델링 하였다. REMUS는 연안에서의 탐사를 목적으로 개발된 AUV로, 크기는 19cm의 지름에 134cm의 길이를 갖고 있으며, 무게는 31kg으로, 저가용의 작고 접근성이 용이하다. 평균 3Knot(1.543 m/s)의 속도로 총 25해리를 이동 할 수 있고, 최고 5 Knot(2.57m/s)의 속도를 가질 수 있다. 본 모의실험에서는 REMUS의 속도를 1.543m/s로 일정하게 유지하였다(Hydroid).

AUV의 운용 장소를 인근 연안으로 고려하여 조류(Tidal)와 Stoke's Drift를 해류 모델로 선정하였다. 해류모델은 2차원의 단층모델을 사용했다. 변수가 적기 때문에 취급이 용이하고 실용적인 모델로 실제 연안 해역의 흐름 예측에 많이 이용되고 있다.

조류의 속도는 깊이에 따라 결정되지만, 실제 해저 환경에서는 다양한 원인으로 인해 조류의 속도가 지역에 따라 변화된다. 따라서 조류모델에 현실성을 부여하기 위해, 난수(Random Number)를 이용하여 조류모델이 일정한 조류속도를 중심으로 정해진 폭으로 불규칙한 변화를 갖게 한다. 또한, Stoke's Drift의 영향을 고려하여 파동의 특성인 주기성을 해류 모델에 적용시켜 연안에서의 해류 모델을 디자인 하였다.

해류 모델은 크기를 최고 0.7m/s, 최저를 0.4m/s로 정하고 변화 주기를 8초로 하였으며, 방향은 지표고정 좌표계에서 양의 Y축 방향으로 가정하였다.

### 나. 해류모델과 그에 따른 경로오차의 변화

본 연구의 모의실험 환경인 연안의 경우 해류의 주된 영향이 조류(조석차), Stoke's Drift(파동)이다. 이를 고려하여, 해류를 최대와 최소 크기가 있으며 변화량이 크지 않는 1차 Gauss-Markov Process를 이



용하여 모델링하였다.

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = w(t) \quad (29)$$

여기서,  $w(t)$ 는 평균이 0인 백색잡음이고,  $\mu_0$ 는 음수가 아닌 상수이다.

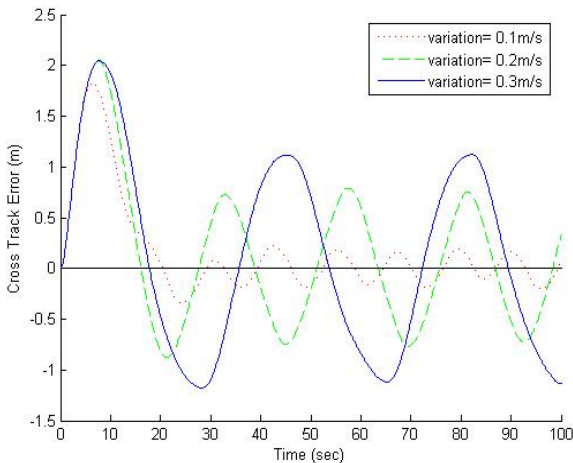
해류에 의해 AUV에 가해지는 힘과 모멘트는 AUV의 운동방정식에서 상대속도로 표현되며, AUV의 방향에 따라 식 (30)과 식 (31)과 같이 선체고정 좌표계 상에서 표현된다.

$$u_c = V_c \cos(\beta_c - \psi) \quad (30)$$

$$v_c = V_c \sin(\beta_c - \psi) \quad (31)$$

여기서,  $V_c$ 는 해류의 크기,  $\beta_c$ 는 해류의 방향이고,  $\psi$ 는 AUV의 방향각이다.

AUV의 경로오차를 해류의 속도와 방향의 변화에 따라 분석하였다. 그림 12에서와 같이 해류 속도 변화로 인해 AUV의 경로오차는 일정한 값을 갖지 못하고, 상태에서의 경로오차가 증가함을 알 수 있다.

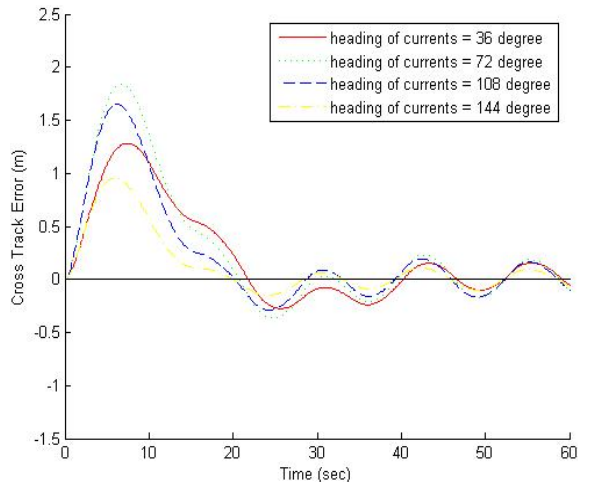


[그림 12] 해류의 속도변화로 인한 경로오차의 시간적 변화

그림 12에서 일정 시간이 지난 후의 정상상태에서는 경로오차의 크기가 해류의 변화량의 크기에 비례

함을 확인 할 수 있다.

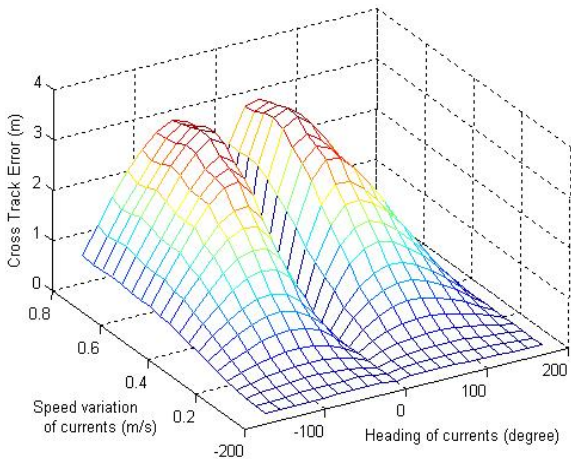
해류의 방향은 크게 목표경로 방향과 둔각을 이룰 때와 예각을 이룰 때로 나누어 분석 될 수 있다. 그림 13은 해류방향과 목표경로 방향의 사이각이 예각일 때와 둔각일 때 경로오차의 차이를 보여 주고 있다. 정상상태에서는 비슷한 경로오차를 가지고 있으나 과도상태에서 최대 경로오차의 차이 및 최대 경로오차 도달 시간의 차이를 보여 주고 있다. 해류의 방향과 목표 경로 방향이 예각일 경우가 둔각일 경우에 비해 더 큰 최대 경로오차를 발생시키고 과도시간 또한 약간 늦는 현상을 볼 수 있다. 해류의 방향과 목표 경로 방향이 예각일 경우 AUV의 진행 방향으로의 속도가 해류에 의해 가속되어 둔각일 때에 비해 과도상태의 영향이 큼을 알 수 있다.



[그림 13] 해류방향과 목표방향 사이각에 따른 경로오차의 변화

해류에 의해 발생하는 경로오차는 해류의 속도 변화크기에 비례해서 증가하며, 해류의 방향에 따라 수직보다 약간 작은 입사각일 때 가장 큰 경로오차를 보이고, 해류의 방향과 AUV의 목표경로방향사이가 예각일 때가 둔각일 때에 비해 더 큰 경로오차를 발생시킨다.

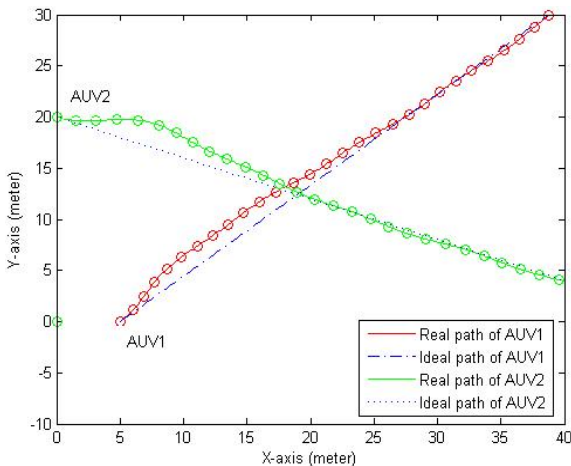
해류의 속도 변화와 해류의 방향을 동시에 고려한 경로오차 그래프는 그림 14와 같다. X축은 해류의 방향 값이고, Y축은 해류의 속도이다.



[그림 14] 해류의 속도변화와 방향에 따른 경로오차 그래프

다. 확장된 충돌지도를 이용한 충돌회피

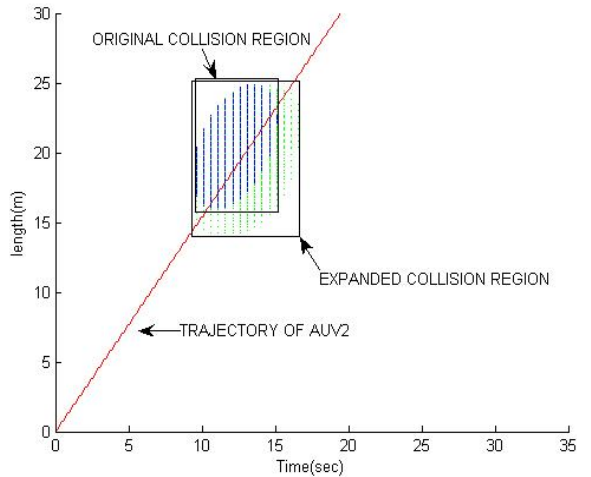
충돌 지도의 변화를 살펴보기 위해 두 대의 AUV를 해류가 존재하는 환경에서 직선 경로를 따라 이동시키는 모의실험을 해 보았다. 그림 15는 해류에 의해 두 대의 AUV가 경로를 이탈해서 목표지점까지 이동하는 모습을 보여 준다. 해류의 입사각이 예각인 AUV2가 AUV1에 비해 해류의 영향을 많이 받아 과도상태 최대 경로 이탈치가 크게 나타났다. AUV1은 목표 방향이 해류의 방향과 둔각을 이루기 때문에 과도 상태에서 해류에 의해 많은 변화를 받지 않았고,



[그림 15] 해류에 의한 두 AUV의 실제 경로변화

경로를 따라 이동하는데 있어서는 경로오차를 또한 AUV2에 비해 적은 것을 알 수 있다.

그림 16은 경로오차로 인해 발생하는 두 AUV 사이의 충돌지도의 변화를 나타낸다. 두 AUV의 경로 오차 변화로 인해 충돌영역 발생시간이 길어지고, 위치도 AUV2의 경로상에서 출발 지점 쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. 결국, AUV2가 충돌 영역에 머무르는 시간이 증가되었다. 즉, 그림 16은 해류에 의해 두 AUV의 주행 상태가 변하여 실제 운행한 경로가 변경되었음을 나타내며, 그 결과 두 AUV간의 충돌 가능 시간이 늘어났음을 나타낸다.

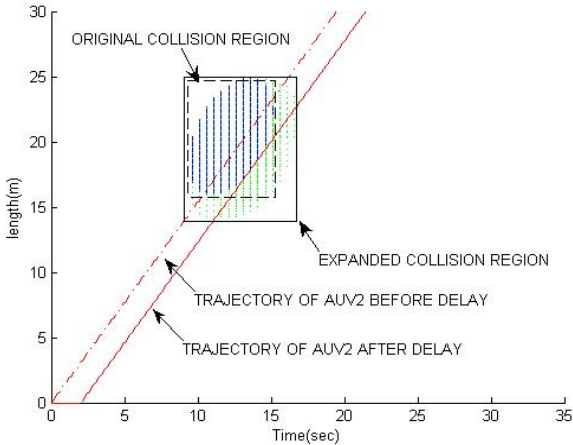


[그림 16] 해류에 의한 충돌지도 변화

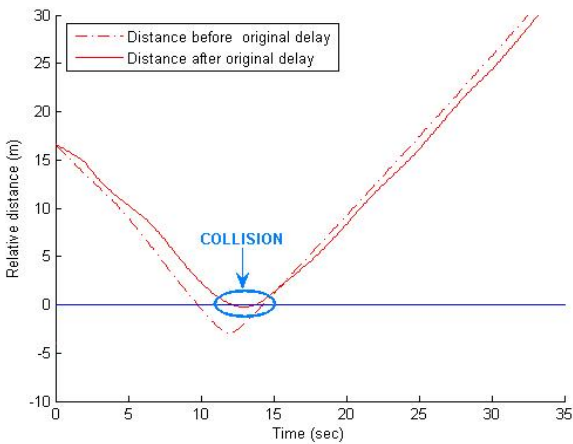
그림 17은 AUV2의 출발 지연에도 불구하고, 경로 오차로 인하여 두 AUV 사이에 충돌이 발생하는 것을 보여 주고 있다. 그림 17 (a)에서 점선으로 그려진 충돌 지역은 AUV들의 경로 오차가 없는 이상적인 주행에서 구해진 것이고, 실선으로 그려진 충돌 지역은 AUV의 경로 오차가 고려된 충돌 거리로부터 구해졌다.

해류로 인해 AUV들의 실제 이동 경로가 해류방향, 즉 Y축 방향으로 이동하였기에, 두 AUV 사이의 충돌지도가 실선과 같이 변화되었다. 기존의 충돌 지도만으로 충돌회피를 위한 최소 지연 시간을 구한다면 그림 17 (a)에서 보는 바와 같이 AUV2의 궤적이 실제 충돌 영역에서 완전히 벗어나지 못하게 된다. 결

과적으로, 그림 17 (b)에서와 같이 두 AUV의 중심간의 거리에서 두 AUV의 반경의 합을 뺀 값인 두 AUV 사이의 상대 거리(Relative Distance)가 음이 되는 지역이 존재하며 이때 두 AUV는 충돌하게 된다.



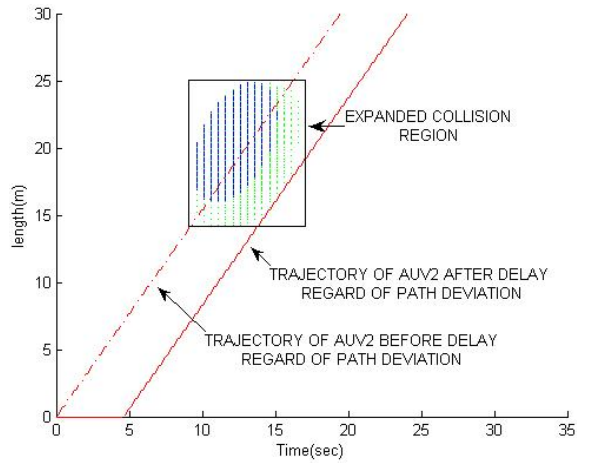
(a) 충돌지도



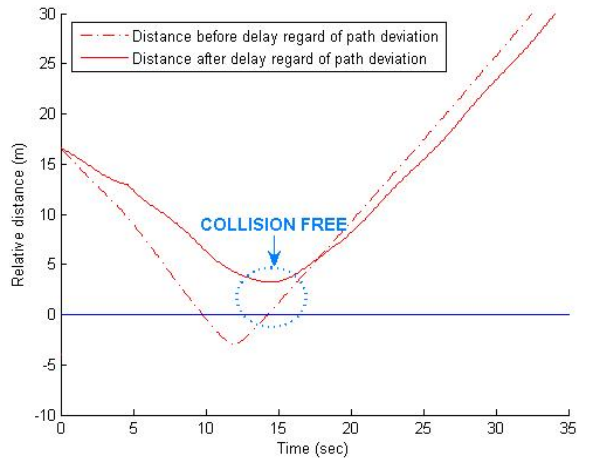
(b) 두 AUV 사이의 거리

[그림 17] 경로오차를 고려하지 않은 충돌지도적용

따라서 해류가 존재할 때 두 AUV의 충돌을 피하려면, 경로오차가 고려된 출발 지연이 요구 된다. 그림 18 (a)는 경로오차를 고려하여 충돌지도에 이를 적용시키고, 그에 따라 변화된 충돌 지도를 바탕으로 AUV 2의 최소 출발 지연 시간을 계산해, 두 AUV 사이의 충돌을 회피하였다.



(a) 충돌지도



(b) 두 AUV 사이의 거리

[그림 18] 경로오차를 고려한 충돌지도 적용

해류에 의해서 AUV1의 실제경로가 AUV2의 출발 지점 쪽으로 이동하였기 때문에 충돌 지도에서 두 AUV 간의 충돌 영역은 아래쪽으로 확장되었다. 또한, AUV2의 경로오차로 인해 충돌 영역은 우측으로 확장 되었다. 즉, 두 AUV의 경로 오차로 인해 충돌은 기존 보다 좀더 빠른 시각에, AUV2의 경로상에서 출발지점에 가까운 위치에서 발생하게 되었다. 충돌 회피를 위해 AUV2의 직선 궤적을 평행 이동시켜 충돌 영역 밖으로 벗어나게 하는 AUV2의 최소 출발 지연시간을 계산하였다. 그 결과 AUV2가 AUV1과

의 충돌을 확실하게 회피하였음을 그림 18(b)를 통해 확인 할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서 해류나 조류와 같이 AUV의 동작에 영향을 주는 외란이 존재하는 환경에서도 두 대의 AUV가 충돌 없이 안전하게 운행하도록 하는 무 충돌 주행 계획기를 제안하였다. 이를 위하여 해류에 의한 AUV의 경로오차를 수치적 방법을 이용하여 모델링하였고 이를 기반으로 두 대의 AUV 사이에 존재하는 충돌영역의 변화를 정의하고, 낮은 우선 순위를 갖는 AUV의 속도 프로파일을 변경하도록 하였다.

본 논문에서는 충돌 영역의 변화 설정을 위한 경로 오차로 수치적 방법으로 도출된 최대 경로 오차를 사용하였다. 이 방법은 AUV들의 안전 주행을 확실하게 보장하지만, 주행의 효율성을 떨어뜨릴 것으로 예상된다. 이에 추후 연구에서 확률론적 방법에 의하여 경로 오차를 추정하고, 이를 기반으로 충돌 영역의 변화를 정의한다면 주행의 효율성이 향상될 것으로 예상된다.

근본적으로 3대 이상의 육상 주행 로봇에 적용된 충돌지도 기법을 이용하여 도출된 본 연구 결과는 3대 이상의 AUV의 무 충돌 주행 계획에 응용 가능하다. 따라서 본 논문의 다수 AUV에 대한 무 충돌 주행 계획 방법은 다양한 기능을 가지는 많은 수의 AUV들을 이용하여 지역 지리 정보가 알려진 넓은 해저 지형을 탐색 및 수색하는 역할에 유용할 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

[1] S. Akella and S. Hutchison, "Coordinating the motions of multiple robots with specified trajectories", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington DC, May, 2002.

[2] Lee, B. H. and Lee, C. S. G., "Collision-free motion planning of two robots", IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-17, No. 1, 1987.

[3] Chang, C. Chung, M. J. and Lee, B. H., "Collision Avoidance of Two General Robot Manipulators by Minimum Delay Time", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 24, No. 3, pp. 517~522, 1994.

[4] Ji, Sang Hoon, Choi Jung Sick, and Lee, Beom Hee, "A Computational Approach to Multi-Agent Motion Planning", International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 5, No. 3, pp 295~306, 2007.

[5] Park, Seung Hwan and Lee, Beom Hee, "Analysis of robot collision characteristics using the concept of the collision map", Robotica, Vol. 24, pp. 295~303, 2006.

[6] Fossen, T. I., Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, New York, 1994.

[7] Kangsoo KIM, Taku SUTOH, Tamaki URA, Takashi OBARA, "Route Keeping Control of AUV under Current by using Dynamics Model via CFD Analysis", OCEANS, 2001, MTS/IEEE Conference and Exhibition, Vol 1, 5-8 Nov, 2001, pp. 417~422. Vol 1., 2001.

[8] Feijun Song, P. Edgar An and Andres Folleco, "Modeling and Simulation of Autonomous Underwater Vehicles : Design and Implementation", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 28, No. 2, April 2003.

[9] Filoktimon Repoulas and Evangelos Papadopoulos, "Trajectory Planning and Tracking Control of Under-actuated AUVs", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April, 2005.

[10] Timothy Prester, "Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the

- REMUS Autonomous Underwater Vehicle”, University of California at Davis, 2001.
- [11] Danicl J. Stilwell, Aditya S. Gadre, Caleb A. Sylvester, Christopher J. Cannell, “Design elements of a small low-cost autonomous underwater vehicle for field experiments in multi-vehicle coordination”, 2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, 2004.
- [12] Lynn Renee Fodrea, “Obstacle Avoidance Control for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle”, Naval Postgraduate School, Monterey, California., 2002.