creative commons

COMMONS DEED

저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

# 무인 반잠수정 시스템의

# 다물체 동역학 모델링 및 제어

# Multibody dynamics modelling and control

# of semi-submersible

# autonomous underwater vehicle

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

박 진 모

# 무인 반잠수정 시스템의

# 다물체 동역학 모델링 및 제어

**Multibody dynamics modelling and control of**

**semi-submirsible**

**autonomous underwater vehicle**

지도 교수 김 낙 완

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015 년 2 월


서울대학교 대학원

조선해양공학과

박 진 모


박진모의 공학석사 학위논문을 인준함

2015 년 02 월

위 원 장 _____ 서 정 천 _____ (인)

부위원장 _____ 김 낙 완 _____ (인)

위 원 _____ 노 명 일 _____ (인)

# 초 록

무인 반잠수정 시스템은 해저 자원탐사 혹은 군사적으로 기뢰 제거등의 목적으로 쓰이는 수중 운동 시스템으로 일반적으로 구성은 수면 근처에서 운동하는 모선(Towing Vehicle), 깊은 심도에서 자체의 추력 없이 탐사 목적을 수행하는 토우피쉬(Tow-Fish) 그리고 이 둘을 연결하는 케이블로 이루어진다. 모선과 토우피쉬의 경우 수중에서 운동을 하게 되므로 이들의 운동은 6자유도로 표현이 되어야 하며, 외력으로 유체력이 반영 되어야 한다. 또한 케이블의 경우 쉽게 굽힘이 일어날 수 있으므로 이에 대한 유연체 동역학을 기반으로한 모델링이 되어야 하며, 수중 운동체 특성상 운동에 유체력 성분이 들어가야한다. 하나의 시스템에 여러 개의 물체가 함께 운동하게 되며, 하나의 요소의 운동에 의해 다른 요소들의 운동이 영향을 받을 수 있으므로 이에대한 다물체 동역학 모델링 또한 필수적이라고 할 수 있다. 또한 운동의 특성상 복잡한 모델링을 운동 제어 시스템에 반영하기 어려운 점이 많다고 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 무인 반잠수정 시스템의 모델링과 그

결과를 통해 나온 운동의 특성을 파악하여, 운동의 제어를 수행하고자 한다. 이를 위해 토우피쉬와 모선의 운동은 유체력을 반영한 6자유도 운동 모델링을 하였으며, 유연체의 특성을 가지고 있는 케이블은 절대마디 좌표계(Absolute Nodal Coordinate Formulation)을 기반으로한 운동 방정식 작성과 수중 운동을 고려하여 유체력을 반영하였다. 모델링의 물리적 타당성을 밝히기 위해 간단한 운동에 대한 오픈루프 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 운동의 제어는 모델링의 불확실성이 클 수 있는 시스템의 특성을 고려하여, 신경회로망 기반 적응제어를 수행하도록한다.

주요어 : Absolute Nodal Coordinate Formulation(ANCF), 무인 반잠수정(Semi Submersible Autonomous Underwater Vehicle), 다물체 동역학(Multibody Dynamics), 유연체 동역학(Flexible body Dynamics), 신경회로망 기반 적응제어 (Neural Network based Adaptive Control)
학 번 : 2013-21070

# 목 차


**1. 서 론 ····· 9**

**2. 무인반잠수정 시스템 모델링 ····· 15**

**2.1. 좌표계 설정 ····· 16**

**2.2. 6자유도 수중체(강체) 운동 방정식 ····· 17**

**2.3. 케이블 모델링 ····· 19**

2.3.1 Absolute Nodal Coordinate Formulation ····· 21

2.3.2 질량 행렬 유도 ····· 22

2.3.3 강성행렬 ····· 23

2.3.4 외력 (보존력) ····· 25

2.3.5 외력 (유체력) ····· 26

**2.5. 전체 운동방정식 및 제약조건 ····· 29**

**2.6. 상호작용력 ····· 30**

**2.7 시뮬레이션 과정 ····· 32**

**3. 오픈루프 시뮬레이션 ····· 34**

**3.1. 직진: Case 1 ····· 35**

**3.2. 유턴: Case 2 ····· 39**

**4. 제어기 설계 ····· 45**

**4.1. 신경회로망 기반 적응제어 기법** ····· **46**
4.1.2 의사제어(Pseudo control)기법 ····· 47
4.1.2 신경회로망 적응제어 ····· 49

**4.2. 제어기 구성** ····· **51**

**4.2.1 모선 제어(종방향, 횡방향)** ····· **51**

**4.2.2 토우피쉬 제어(종방향, 횡방향)** ····· **55**

**5. 시뮬레이션** ····· **58**

**5.2. 신경회로망 기반 적응제어기법을 사용했을 경우** ····· **59**

**5.3. 고전제어기를 사용할때와의 비교** ····· **71**

**6. 결 론** ····· **77**

**참고문헌** ····· **79**

ABSTRACT ····· **83**

# 표 목차

Table 1 Vehicle parameters for computation ····· 19

Table 2 Control gain and adaptation gain ····· 54

Table 3 Control gain and adaptation gain: towfish ····· 57

# 그림목차

Fig 1. Illustration of Semi-Submersible AUV ····· 16

Fig 2 Coordinate systems of vehicles ····· 17

Fig 3 Cable element representation ····· 21

Fig 4 Drag force description ····· 28

Fig 5 Illustration of interaction between towing vehicle and towing cable · 32

Fig 6 Illustration of interaction between towfish and towing cable ····· 32

Fig 7 Simulation Procedure ····· 33

Fig 8 Cable alignment: Case 1 ····· 36

Fig 9 Linear velocity profile: Case 1 ····· 37

Fig 10 Angular velocity profile: Case 1 ····· 37

Fig 11 Euler angle: Case 1 ····· 38

Fig 12 Interaction force of towing vehicle: Case 1 ····· 38

Fig 13 Interaction force of towfish: Case1 ····· 39

Fig 14 Overeview of trajectory of towing vehicle and towfish: Case 2 ····· 41

Fig 15 Linear velocity profile: Case 2 ····· 42

Fig 16 Angular velocity proflie: Case 2 ····· 42

Fig 17 Euler angle: Case 2 ····· 43

Fig 18 Interaction force of towing vehicle: Case 2 ····· 43

Fig 19 Interaction force of towfish: Case 2 ····· 44

Fig 20 Depth variation of towfish during turning motion ····· 44

Fig 21 Structure of neural netwrok with single hidden layer ····· 49

Fig 22 Block diagram for control ····· 52

Fig 23 Illustration of Line Of Sight (LOS) ····· 57

Fig 24 Trajectory of mother ship and towfish in turning motion W/NN ····· 62

Fig 25 Linear velocity profile: W/ NN ····· 63

Fig 26 Angular velocity profile: W/NN ····· 63

Fig 27 Comparison of command angle and actual angle: W/NN (Mother ship) ····· 64

Fig 28 Comparison of command angle and actual angle: W/NN (Towfish) 65

Fig 29 Interaction force to mother ship: W/NN ····· 66

Fig 30 Adaptation signal for mother ship: W/NN ····· 67

Fig 31 Interaction force to towfish: W/NN ····· 68

Fig 32 Adaptation signal for towfish: W/NN ····· 69

Fig 33 Depth variation of mother ship: W/NN ····· 70

Fig 34 Depth variation of towfish: W/NN ····· 70

Fig 35 Trajectory of mother ship and towfish: W/O NN ····· 72

Fig 36 Linear velocity profile: W/O NN ····· 72

Fig 37 Angular velocity profile: W/O NN ····· 73

Fig 38 Interaction force to mother ship: W/O NN ····· 73

Fig 39 Intraction force to towfish: W/O NN ····· 74

Fig 40 Euler angle: W/O NN ····· 74

Fig 41 Depth variation of mother ship: W/O NN ····· 75

Fig 42 Depth variation of towfish: W/O NN ····· 76

# 1. 서 론

무인 반잠수정 시스템은 최근 군사목적의 기뢰제거 혹은 자원 탐사의 목적으로 여러 나라에서 개발 중이며, 운용되고 있는 시스템이다(Buckham, 2003). 반잠수정 시스템은 수면 근처에서 운동을 하며 깊은 심도의 수중에서 운동하는 운동체를 끌고가는 모선(Towing Vehicle) 그리고 깊은 심도에서 자체적인 추력없이 운동을 하며, 자원 탐사 등의 실질적인 목적을 수행하는 토우 피쉬(Tow-Fish) 그리고 이 둘을 연결하는 예인 케이블(Towing Cable)로 이루어져 있다. 이 시스템은 일반적인 단독 무인 수중운동체인 Aotonomous Underwater Vehicle(AUV), Remotely Operated uderwater Vehicle(ROV) 의 운용시간이 짧다는 단점을 극복하기 위해 개발된 시스템으로 기존의 배터리를 이용하여 운용하는 체계가 아닌 모선이 수면근처에서 운동을 하며 내연기관을 사용하므로 운용 시간에서 상당히 큰 이득을 볼 수 있다는 장점이 있다(Griffiths, 2003). 하지만 무인반잠수정 시스템의 운동은 여러 물체가 한꺼번에 운동을 하고 하나의 요소의 거동에 의해 다른 요소들의 거동이 영향을 받을 수 있는 다물체 동역학 시스템

이며, 케이블의 특성상 유연체 운동을 하기 때문에 유연체 동역학이 필요하므로 전체 시스템의 운동 분석 및 제어가 어려운 단점이 있다. 또한 내연기관을 사용하는 모선의 특성상 심도유지가 5m 이내로 유지 되어야 하는 어려움이 있다.

이와 관련된 주된 연구로는 수상선이 예인 케이블과 토우피쉬를 끌 때에 관한 것들이 있다(Grosenbaugh, 2007) (Huang, 1994). Grosenbaugh(2007) 은 수상선이 선회 운동을 할 때 케이블의 운동을 3차원으로 케이블의 심도 변화 그리고 선회 반경의 차이등을 분석 하였으며, Huang(1994) 는 수상선이 끌고가는 케이블의 길이가 변할 때 이를 다물체 동역학적 모델링을 통해 운동을 분석하였다. 위의 연구들의 경우 수상선의 크기가 수중 운동체에 비해 상대적으로 크므로 케이블과 토우피쉬의 운동이 수상선의 거동에 미치는 영향은 거의 없다고 볼 수 있기 때문에 무인반잠수정 시스템과는 달리 모선의 운동을 시스템 동역학적 모델링에 포함 시킬 필요가 없다. 하지만 무인 반잠수정의 경우 모선의 크기가 토우피쉬와 크기의 차이가 크지 않으므로, 모선, 케이블, 그리고 토우 피쉬의 동역학을 시스템 모델링에 포함시켜야 한다. 이와 관련된 연구로는 Buckham et.al(2003)이 캐나다에서 수행한 연구가 대표적이

라고 할 수 있다. 이 연구에서는 케이블을 Lumped mass approximation을 이용해 모델링 하였고 각 요소들을 다물체 동역학으로 모델링 하여 전체 시스템의 거동을 해석하였다. 또한 선회 운동에서 토우피쉬와 모선의 반경이 다르기 때문에 임무수행에서 비효율성을 최소화 하는 선회 운동 최적 궤적을 연구하였다. 시스템의 각 요소들에 대한 연구를 살펴 보면 예인케이블의 경우 수중에서 운동을 하고 그 자체의 거동이 비선형적인 거동을 보이므로 일반적으로 수치해석적 접근 방법을 통해 해석이 이루어졌다. 대표적인 케이블 모델링 방법으로는 Lumped mass approximation(Buckham et al, 2003) (Kamman and Nguyen, 1990) (Kamman and Huston, 2001) 방법과 유한요소 이론에 바탕을 둔 케이블 해석 방법이 있다(Park, 2003) (Wu and Chwang, 2001) (Yuan et al, 2013). Lumped mass approximation 방법은 우선 케이블을 여러 개의 조각으로 나눈 후 각 조각의 질량이 하나의 절점(nodal point) 에 집중되어 있다고 가정 하여 이를 스프링-댐퍼 시스템으로 근사하여 문제를 해결 하는 방법이다. 이 방법에서 케이블의 각 조각은 바-요소(bar element)로 가정되기 때문에 케이블 요소 내에서의 굽힘은 없다고 가정되기 때문에 일반

적으로 생각할 수 있는 유연체의 거동을 완벽하게 표현해내기 어렵다는 단점이 있다. 하지만 모델링이 쉬우며 실제 구현하기가 쉽다는 장점 때문에 널리 쓰이는 방법이다. Lumped mass approximation 방법의 단점인 유연체의 특성을 반영할 수 없다는 점을 극복하기 위하여 유한요소 기반의 케이블 해석법이 도입되었다. 이 방법으로 케이블의 운동중 변형에 대한 표현이 가능하지만, 충분히 정확한 결과를 내기 위해서 케이블을 많은 수의 조각으로 나누어야 한다는 단점이 있으며, 변형 좌표계라는 새로운 좌표계가 도입되어야 하므로 계산시간이 많이 소요 될 수 있다. 다른 방식으로는 최근 유연체의 운동을 표현하기 위한 방법으로 개발된 Absolute Nodal Coordinate Formulation(ANCF)가 있다 (Berzeri and Shabana, 2000) (Gerstmayr and Shabana, 2006) (Gerstmayr et al, 2013) (Shabana and Yakoub, 2001) (Shabana et al, 1998). 이 방법은 절대 절점 좌표계를 도입하여 유연체의 거동을 표현 하였다. 이 방법은 기존의 유한요소 기반의 유연체 해석 방법에서 필요한 좌표계 보다 필요한 좌표계가 하나 줄어들게 되고, 같은 정도의 정확도를 표현하기 위한 케이블 조각의 수가 적어도 된다는 장점이 있다(Berzeri and Shabana, 2000).

또한 이 방법에서는 질량 행렬이 상수로 표현 되기 때문에 물체의 거동에 따라 질량행렬을 계산하여 업데이트 하지 않아도 된다는 장점이 있다. 수중 케이블에서 이 ANCF를 사용한 연구는 현재로서는 Kim et al(2012) 와 Takehara et al(2011)의 연구가 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 이들의 연구는 케이블의 양 끝단이 자유로운 케이블 자체의 거동에 관한 해석이므로 다물체 동역학적 해석과는 거리가 멀다고 할 수 있다. 수중에서 케이블에 의해 예인되는 토우피쉬의 거동과 제어 관한 연구로는 적응제어를 이용하여 토우피쉬의 제어를 수행한 Corado et al(2010)등이 있다.

본 논문의 목적은 무인 반잠수정 시스템의 다물체 동역학 모델링을 수행하고, 오픈루프 결과를 바탕으로 한 동역학 시스템의 제어이다. 이를 위하여 ANCF를 이용하여 유연체 즉, 수중케이블을 모델링 하고, 수중에서 운동하는 두 강체 (모선, 토우피쉬)를 6자유도 모델링을 수행하여 전체 시스템을 다물체 동역학 모델링을 수행한다. 수중에서 운동하는 시스템의 특성을 반영하여 유체력성분을 반영 한다. 또한 운동 제어는 제어 시스템에서 전체 동역학 시스템을 반영하기 어려운 무제가 있으므로, 신경 회로망 기반 적응제어를 통해 모델링의 불확실성을 보상하도록 한다. 본 논문은 크

게 두 가지의 파트로 이루어져 있다. 첫 번째 파트에서는 전체 시스템에 대한 다물체 동역학 모델링으로 이루어 진다. 이 파트에서는 케이블 모델링을 위해 사용되는 방법인 ANCF에 대한 간단한 설명과 모델링 방법에 대한 설명을 하고, 강체 운동 방정식 모델링 과정에 대한 설명과 외력항으로 들어가는 유체력 반영에 대한 논의가 있을 것이다. 또한 시스템 모델링에 대한 검증을 위하여 직진과 유턴 선회에 대한 간단한 오픈루프 시뮬레이션을 수행한다. 두 번째 파트에서는 오픈루프 시뮬레이션을 통해 얻어진 운동의 특성을 고려하여 제어를 수행한다. 이 파트에서는 신경회로망 기반 적응제어기법에 대한 간단한 개념 설명과 제어기 설계를 위한 과정을 다룬다. 제어기 성능 검증을 위하여 앞서 수행했던 케이스에 대한 시뮬레이션을 수행하며, 고전 제어 기법과 성능 비교를 수행하도록 한다.

## 2. 무인반잠수정 시스템 모델링

무인반잠수정은 크게 수면근처 약 3-5m 사이에서 운동하는 모선(Towing vehicle)과 약 100-150m 사이에서 운동하면서 탐사 혹은 기뢰제거의 목적을 수행하는 토우피쉬, 그리고 이 둘을 연결하는 예인케이블로 이루어져 있다. Fig 1. 은 이와 같은 시스템을 간략하게 설명하고 있다. 토우피쉬는 케이블에 의해 예인되므로 자체적인 추력이 없으며, 동체의 중간 부분에 주익(Main Wing)이라고 불리는 큰 날개가 달려 있다. 또한 선미부 부근에 한 개의 타(rudder)와 피치방향 자세를 제어하는 수평타(elevator)가 두개 달려 있는 구조이다. 예인 케이블(Towing cable)은 약 200 미터까지 늘어질 수 있어 토우피쉬가 충분히 깊은 심도에서까지 탐사를 가능하게 한다. 본 논문에서 가정은 예인 케이블은 토우피쉬의 선수부에 부착되어 있으며, 모선의 무게중심에 부착되어 있다고 가정하였다.

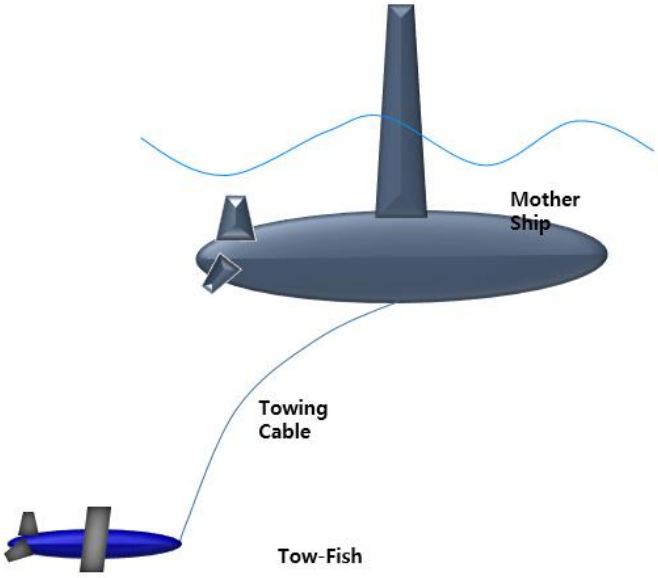


Fig 1. Illustration of Semi-Submersible AUV

## 2.1. 좌표계 설정

본 절에서는 6 자유도 강체 운동방정식을 다루기 위한 좌표계에 대해서 다루도록 한다. 강체 운동을 다루기 위한 좌표계는 각 수중체에 대해서 두개씩의 좌표계가 필요하다. 하나는 각 운동체의 물체 고정 좌표계 그리고 다른 하나는 지구 고정좌표계이다.

Fig 2. 에서 보이는 것 처럼 모선에 대해서 두 개의 좌표계 그리고 토우피쉬에 대해서 두 개의 좌표계가 필요하다. $O-x_m y_m z_m$ 좌표계는 모선에 대한 물체 고정 좌표계 그리고 $O-x_t y_t z_t$ 는 토우피쉬에 대한 물체 고정 좌표계를 뜻한다. $O-X_0 Y_0 Z_0$ 는 지구 고정좌표계를 뜻한다.

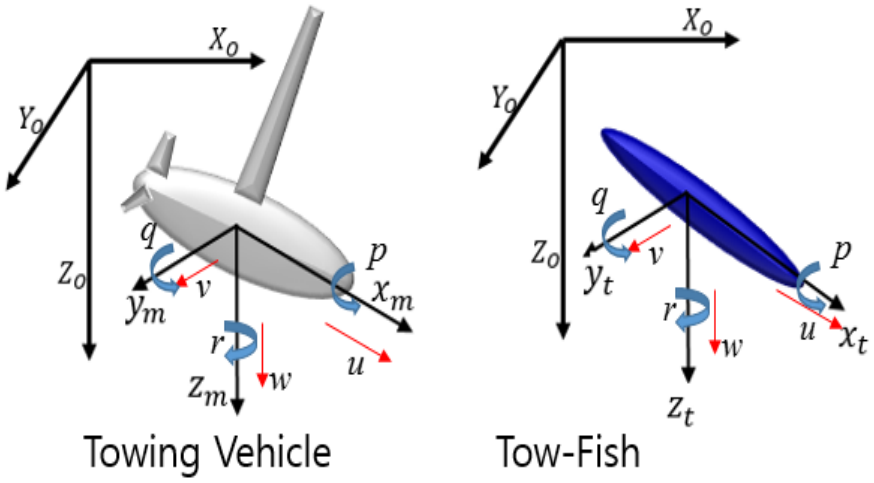


Fig 2 Coordinate systems of vehicles

## 2.2. 6자유도 수중체(강체) 운동 방정식

모선과 토우피쉬에 대한 6 자유도 운동 방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&m_m[\dot{u}-vr+wq-x_{Gm}(q^2+r^2)+y_{Gm}(pq-\dot{r})+z_{Gm}(pr+\dot{q})]=X_{hyd}+X_{prop}+X_{\text{int}}\\
&m_m[\dot{v}-wp+ur-y_{Gm}(r^2+p^2)+z_{Gm}(qr-\dot{p})+x_{Gm}(pq+\dot{r})]=Y_{hyd}+Y_{prop}+Y_{\text{int}}\\
&m_m[\dot{w}-uq+vp-z_{Gm}(p^2+q^2)+x_{Gm}(rp+\dot{q})+y_{Gm}(rq+\dot{p})]=Z_{hyd}+Z_{prop}+Z_{\text{int}}\\
&I_{xm}\dot{p}+(I_{zm}-I_{ym})qr+m_m[y_{Gm}(\dot{w}-uq+vp)-z_{Gm}(\dot{v}-wp+ur)]=K_{hyd}+K_{prop}+K_{\text{int}}\\
&I_{ym}\dot{q}+(I_{xm}-I_{zm})rp+m_m[z_{Gm}(\dot{u}-vr+wq)-x_{Gm}(\dot{w}-uq+vp)]=M_{hyd}+M_{prop}+M_{\text{int}}\\
&I_{zm}\dot{r}+(I_{ym}-I_{xm})pq+m_m[x_{Gm}(\dot{v}-wp+ur)-y_{Gm}(\dot{u}-vr+wp)]=N_{hyd}+N_{prop}+N_{\text{int}}
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

$$
\begin{aligned}
&m_t[\dot{u} - vr + wq - x_{Gt}(q^2 + r^2) + y_{Gt}(pq - \dot{r}) + z_{Gt}(pr + \dot{q})] = X_{hyd} + X_{\text{int}} \\
&m_t[\dot{v} - wp + ur - y_{Gt}(r^2 + p^2) + z_{Gt}(qr - \dot{p}) + x_{Gt}(pq + \dot{r})] = Y_{hyd} + Y_{\text{int}} \\
&m_t[\dot{w} - uq + vp - z_{Gt}(p^2 + q^2) + x_{Gt}(rp + \dot{q}) + y_{Gt}(rq + \dot{p})] = Z_{hyd} + Z_{\text{int}} \\
&I_{xt}\dot{p} + (I_{zt} - I_{yt})qr + m_t[y_{Gt}(\dot{w} - uq + vp) - z_{Gt}(\dot{v} - wp + ur)] = K_{hyd} + K_{\text{int}} \\
&I_{yt}\dot{q} + (I_{xt} - I_{zt})rp + m_t[z_{Gt}(\dot{u} - vr + wq) - x_{Gt}(\dot{w} - uq + vp)] = M_{hyd} + M_{\text{int}} \\
&I_{zt}\dot{r} + (I_{yt} - I_{xt})pq + m_t[x_{Gt}(\dot{v} - wp + ur) - y_{Gt}(\dot{u} - vr + wp)] = N_{hyd} + N_{\text{int}}
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

식 (2.1) 과 (2.2) 에서 아래첨자 $m$ 과 $t$ 는 각각 모선과 토우피쉬를 뜻한다. $m$ 은 각 운동체의 질량 그리고 $[I_x, I_y, I_z]^T$ 는 각각 $xyz$ 축 방향으로의 질량 2차 모멘트를 뜻하고 $[x_G, y_G, z_G]^T$ 는 각 운동체의 무게중심의 위치를 뜻한다. 각 식의 우변에 위치한 아래첨자 $hyd$ 는 수중 운동체에 가해지는 유체력을 뜻하고 아래첨자 int 는 케이블과 각 수중 운동체 사이에 작용하는 상호 작용력을 뜻한다. 이에 관한 자세한 논의는 2장 4절에서 다루도록 한다. 모선의 우변에 위치한 $prop$ 항은 모선의 프로펠러 추력에 의해 생기는 힘과 모멘트를 뜻한다. 주목할 것은 토우피쉬의 경우 자체 추력이 없으므로, 이 추력 항이 없다는 것이다. 토우피쉬에서 운동을 실제로 강제하는 힘은 케이블에 의한 상호작용력으로 해석할 수 있다. 또한 이 방정식이 기술되는 좌표계는 각 운동체의 물체 고정 좌표계이므로 전체 운동을 해석하기 위해서는 지구 고정 좌표계로 변환해야 한다. 본 논문에서 사용된 모선과 토우피쉬의 제원은 다음과

같다.

Table 1 Vehicle parameters for computation

| Item | Value | Unit |
|---|---|---|
| Density of Cable | 1300 | $kg/m^3$ |
| Length of Cable | 200 | $m$ |
| Young's Modulus of Cable | $7\times10^8$ | $N/m^2$ |
| Diameter of Cable | 0.041 | $m$ |
| Length of Towing Vehicle | 8.2 | $m$ |
| Mass of Towing Vehicle | 6950 | $kg$ |
| Moment of Inertia of Towing Vehicle | [397.04, 3969.8, 3069.1] | $kg\cdot m^4$ |
| Center of Mass of Towing Vehicle | $[0,0,0.2]$ | $m$ |
| Length of Towfish | 3.3 | $m$ |
| Mass of Towfish | 416 | $kg$ |
| Moment of Inertia of Towfish | [28.64, 286.35, 301.47] | $kg\cdot m^4$ |
| Center of Mass of Towfish | $[1,0,0.12]$ | $m$ |

## 2.3. 케이블 모델링

무인 반잠수정 시스템에서 예인 케이블은 모선과 토우피쉬를 연결하는 역할을 하며 궁극적으로는 토우피쉬를 예인하는 역할을 한다. 케이블의 특성상 유연체의 성질을 가지며 큰 변형이 일어날 수 있고, 모선 혹은 토우피쉬의 거동에 영향을 받으므로 본 논문에서는

큰 변형을 가질 수 있는 유연체에 적용될 수 있는 ANCF 를 적용하도록 한다. ANCF는 큰 변형 혹은 큰 비틀림이 있는 경우에도 모델링이 가능한 방법으로 케이블 요소들은 전역 위치 벡터(global position vector)와 기울기 벡터로 표현이 된다. 특징은 기존의 유한요소 기반의 유연체 모델링에서는 케이블 요소의 회전 혹은 비틀림을 오일러 각으로 표현한 것에 비해 이 방법에서는 기울기 벡터로 표현한다는 것이다. 또한 이 방법에서는 케이블 각 요소들의 질량 행렬이 상수로 표현된다는 장점이 있다. 무인 반잠수정 수중 케이블 특성상 비틀림의 효과가 거의 없다고 볼 수 있으므로 본 논문에서는 케이블을 저차수 모델 (Lower Order Model)을 사용하여 케이블의 거동을 표현하도록 한다. 저차수 모델을 사용함으로써 얻는 효과는 케이블 요소를 표현하기 위한 좌표의 수가 줄어들기 때문에 계산시간에서 효과를 볼 수 있으며, 비틀림 강성 행렬을 구하기 위한 복잡한 과정 또한 생략할 수 있다는 것이다. ANCF를 기반으로 한 저차수 모델에서는 케이블 각 요소의 절점들이 각 $XYZ$ 축 방향의 위치 벡터와 케이블 요소 중심선을 기준으로하여 각 방향으로 편미분하여 얻어진 기울기 벡터로 표시된다. Fig 3. 은 이와 같은 저차수 모델의 케이블 요소 표현을 설명하고 있다.

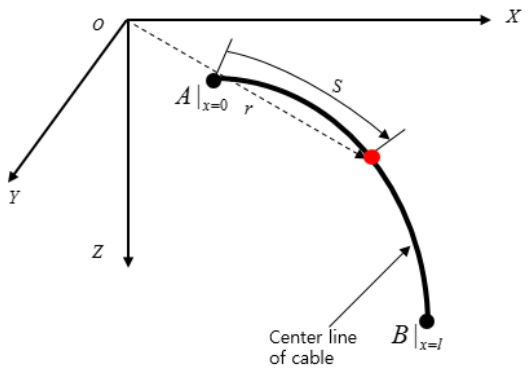


Fig 3 Cable element representation

### 2.3.1 Absolute Nodal Coordinate Formulation

2장 3절에서 언급된 바와 같이 3차원 공간에서 케이블의 각 절점들은 위치벡터와 기울기 벡터로 표시될 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{e} = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}, e_{12}]$$
$$e_1 = r_X|_{x=0}, e_2 = r_Y|_{x=0}, e_3 = r_Z|_{x=0}, e_4 = \left.\frac{\partial r_X}{\partial x}\right|_{x=0}, e_5 = \left.\frac{\partial r_Y}{\partial x}\right|_{x=0}, e_6 = \left.\frac{\partial r_Z}{\partial x}\right|_{x=0} \quad (2.3)$$
$$e_7 = r_X|_{x=l}, e_8 = r_Y|_{x=l}, e_9 = r_Z|_{x=l}, e_{10} = \left.\frac{\partial r_X}{\partial x}\right|_{x=l}, e_{11} = \left.\frac{\partial r_Y}{\partial x}\right|_{x=l}, e_{12} = \left.\frac{\partial r_Z}{\partial x}\right|_{x=l}$$

여기서 $r_i$ $(i = X, \mathrm{Y}, \mathrm{Z})$ 는 각 절점의 이치 벡터이며, 다른 요소들은 케이블의 중앙선에 대한 편미분으로 얻어지는 기울기 벡터이다. $l$ 은 케이블 요소의 길이이며, $x$ 는 변형되지 않은 케이블 요소 내의 임의의 점을 절점을 기준으로 하였을때의 거리이다. 케이블 요소 내의 임의의 점의 좌표는 3차 스플라인 기반의 형상함수를

통해 얻어질 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{r} = [r_X \ r_Y \ r_Z]^T = S\vec{e} \tag{2.4}$$

여기서 $S$ 는 절대 절점 좌표계에서 지구고정 좌표계로 변환시켜 주는 형상 함수로 스플라인 기반의 함수이다. 이 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = [S_1 I \ S_2 I \ S_3 I \ S_4 I] \tag{2.5}$$

여기서 $I$ 는 3×3 단위 행렬이며 여기서 표현되는 각 요소 $S_i (i = 1,2,3,4)$ 는 다음과 식 (2.6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} S_1 &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \qquad & S_2 &= l(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) \\ S_3 &= 3\xi^2 - 2\xi^3 \qquad & S_4 &= l(\xi^3 - \xi^2) \end{aligned} \tag{2.6}$$

여기서 $\xi$ 는 무차원화된 양으로 이 값은 $\xi = x/l$ 로 정의 되어 항상 0과 1사이의 값을 가지게 된다.

### 2.3.2 질량 행렬 유도

일반화 된 절대 절점 좌표계에서 질량 행렬은 운동에너지 식을 통해 얻을 수 있다. 운동에너지의 식은 다음과 같이 쓰여 질 수 있다.

$$T = 1/2 \int_V \rho \dot{\vec{r}}^T \dot{\vec{r}} dV \tag{2.7}$$

위치 벡터는 식 (2.4)로 표현 될 수 있으므로, 일반화된 속도 벡터는 다음 식 (2.8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\vec{r}} = S\dot{\vec{e}} \tag{2.8}$$

그로므로 운동에너지 식은 아래 식으로 표현될 수 있다.

$$T = \frac{1}{2}\int_V \rho \dot{\vec{r}}^T \dot{\vec{r}} dV = \frac{1}{2}\dot{\vec{e}}^T (\int_V \rho S^T S dV)\dot{\vec{e}} = \frac{1}{2}\dot{\vec{e}}^T M \dot{\vec{e}} \tag{2.9}$$

식 (2.9)를 통해 일반화된 질량 행렬은 다음과 같다.

$$M = \int_V \rho S^T S dV \tag{2.10}$$

여기서 $\rho$ 는 케이블 요소의 질량을 뜻하며, $V$ 는 케이블 요소의 부피를 뜻한다. 앞서도 언급했듯이 ANCF에서 유도된 질량행렬은 상수로 표현 되기 때문에 한번 구하면 다시 업데이트를 할 필요가 없다.

### 2.3.3 강성행렬

케이블 요소는 큰 변형과 변위를 가질 수 있기 때문에 우리는 케이블을 모델링할 때 탄성력을 고려해야 한다. 2장 3절에서 언급된 것처럼 케이블 요소의 꼬임에 의한 효과는 미미하기 때문에 여기서는 길이방향의 탄성력 그리고 굽힘방향의 탄성력만을 고려하기로 한다. 탄성력은 변형에 의한 에너지 식을 통해 유도될 수 있다.

변형에 의한 에너지는 다음 식 (2.11)로 표현될 수 있다.

$$U = U_a + U_b = \frac{1}{2}\int_l (EA\varepsilon^2 + EI\kappa^2)dx \qquad (2.11)$$

여기서 $U_a$ 는 길이방향의 변형에 의한 에너지 그리고 $U_b$ 는 굽힘에 의한 에너지를 뜻한다. $\varepsilon$ 는 길이방향의 변형률을 뜻하며 $\kappa$ 는 굽힘에 의한 곡률을 뜻한다. 탄성력은 변형에 의한 에너지를 위치 벡터에 대한 편미분을 통해 구할 수 이쓰기 때문에 탄성력은 당음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{elastic} = F_a + F_b = \frac{\partial}{\partial \vec{e}}\int_l EA\varepsilon^2 dx + \frac{\partial}{\partial \vec{e}}\int_l EI\kappa^2 dx = K_a\vec{e} + K_b\vec{e} \qquad (2.12)$$

여기서 $K_a$ 는 길이 방향의 변형에 대한 탄성행렬이고 $K_b$ 는 굽힘에 대한 탄성 행렬이다. 이제 우리가 할 것은 변형률 $\varepsilon$ 와 곡률 $\kappa$ 를 절대 절점 좌표계로 표현하는 일만 남았다. Green 변형 텐서에 의해 길이방향의 변형률은 다음 식 (2.13)으로 표현 될 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\frac{\partial \vec{r}}{\partial x}^T \frac{\partial \vec{r}}{\partial x} - 1) \qquad (2.13)$$

또한 여기서 다음과 같은 행렬을 정의 하자 $S_l = S'^T S' = \frac{1}{l^2} S_\xi{}^T S_\xi$ 여기서 $S' = \frac{\partial S}{\partial x}$, $S_\xi = \frac{\partial S}{\partial \xi}$ 이다. 위치 벡터는 $\vec{r} = S\vec{e}$ 이고 $\partial \vec{r} / \partial x = (\partial S / \partial x)\vec{e}$ 이므로, 길이방향의 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\vec{e}^T S_l \vec{e} - 1) \tag{2.14}$$

그로므로, 길이방향에 대한 강성행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K_a = \int_l EA\varepsilon_l S_l dx = \frac{1}{2}\int_l EA(\vec{e}S_l\vec{e} - 1)S_l dx \tag{2.15}$$

여기서 주목해야 할 것은 강성행렬이 절대절점 좌표계 벡터 $\vec{e}$ 로 표현 되기 때문에 비선형 효과가 생길 수 있다는 것이다. 이제 마지막으로 굽힘에 의한 강성행렬을 구해 보자. 곡률은 변형된 물체의 법선 벡터의 크기로 정의 된다 $\kappa = |r_{ss}|$. 연쇄 법칙에 의해 $r_s = \partial r / \partial s = \partial r / \partial x \cdot \partial x / \partial s$ 이므로 $r_s = r_x(\partial x / \partial s) = r_x / |r_x|$ 으로 표현할 수 있다. 작은 길이방향의 변형에 대해서 곡률은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\kappa = \left| \frac{\partial r}{\partial x^2} \right| = \vec{e}^T S''^T S'' \vec{e} \tag{2.16}$$

그러므로 굽힘에 대한 강성 행렬은 다음과 같다.

$$K_b = \int_l EIS''^T S'' dx \tag{2.17}$$

### 2.3.4 외력 (보존력)

이 절에서는 케이블에 작용하는 외력 중 보존력 즉 부력과 중력에 대해 다루도록한다. 외력들은 가상 일 이론에 의해 유도될 수 있다.

외력은 다음과 같은 식으로 일반적으로 유도될 수 있다.

$$F^T \delta r = F^T S \delta e = Q_e \delta e$$
$$\therefore Q_e = F^T S \tag{2.18}$$

여기서 $Q_e$ 는 ANCF에서 일반화된 외력 벡터를 뜻하며 $F$ 는 지구 고정 좌표계를 기준으로 할 때 외력 벡터를 뜻한다. 이 식을 이용하면 중력은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$Q_{Gravity} = \int_V [0\ 0\ \rho_c g] S dV \tag{2.19}$$

여기서 $\rho_c$ 는 케이블 요소의 밀도를 뜻하고, $g$ 는 중력 가속도를 뜻한다. 비슷한 과정으로 부력도 다음과 같이 구해 질 수 있다.

$$Q_{Buoyancy} = \int_V [0\ 0\ -\rho g] S dV \tag{2.20}$$

### 2.3.5 외력 (유체력)

수중에서 운동하는 케이블의 특성상 유체력이 필수적으로 반영되어야 한다. 본 논문에서는 유체력으로 항력과 부가질량에 의해 생기는 힘을 고려하도록한다. 항력은 법선방향의 항력과 접선 방향의 항력 두 가지로 이루어져 있다. 임의의 케이블 요소의 점에 작용하는 법선방향과 접선방향의 항력은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$F_{Dn} = -\frac{1}{2} C_{Dn} \rho_w d \,|\vec{V}_n|\, \vec{V}_n$$
$$F_{Dt} = -\frac{s_c}{d} \mu \vec{V}_t Nu(Rn) \qquad (2.21)$$

여기서 $F_{Dn}$ 은 지구고정 좌표계에서 법선 방향에 대한 단위 길이당 항력을 뜻하고, $F_{Dt}$ 는 접선방향에 대한 항력을 뜻한다. 또한 $C_{Dn}$ 는 법선방향에 대한 항력 계수, $Nu(Rn)$ 은 일반적으로 레이놀즈 수의 함수로 표현되는 너쎌(Nusselt) 수를 뜻한다. $\rho_w$ 는 물의 밀도를, $d$ 는 케이블 요소의 직경을 뜻하고, $s_c$ 는 케이블 요소의 원주, 그리고 $\vec{V}_n$ 과 $\vec{V}_t$ 는 각각 법선방향과 접선방향의 속도 성분을 뜻한다. 여기서 법선방향의 항력은 다음 식 (2.22)에서 제시되는 레이놀즈 수에 의해 결정된다(Choc and Casarella, 1971).

$$C_{Dn} = \frac{8\pi}{RnS_d}(1 - 0.87S^{-2}) \quad (0 < Rn \le 1)$$
$$C_{Dn} = 1.45 + 8.55Rn^{-0.9} \quad (1 < Rn < 30) \qquad (2.22)$$
$$C_{Dn} = 1.1 + 4Rn^{-0.5} \quad (30 \le Rn \le 10^5)$$

여기서 $Rn$ 는 레이놀즈 수를 의미하며 $S_d$ 는 $S_d = -0.07721 + \ln(Rn^{-1})$ 으로 정의된다. 접선방향의 항력을 위해서 레이놀즈수와 평균적으로 구해지는 너쎌수 사이의 관계는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$Nu(Rn) = 0.55Rn^{1/2} + 0.084Rn^{2/3} \qquad (2.23)$$

아래 Fig 4. 에서 제시되는 그림에서 법선방향의 속도와 접선 방향

의 속도는 벡터들의 관계에 의해서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\vec{V}_n = \vec{V} - (\vec{V} \bullet \vec{a})\vec{a}$$
$$\vec{V}_t = (\vec{V} \bullet \vec{a})\vec{a} \qquad (2.24)$$

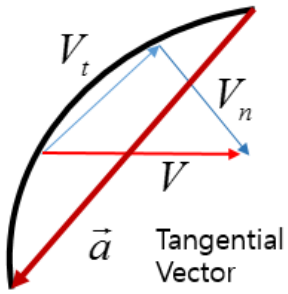


Fig 4 Drag force description

여기서 $\vec{V}$ 는 케이블 벡터의 전체 속도 벡터를 뜻하고 $\vec{a}$ 는 접선 방향의 단위 행렬을 뜻한다. 앞서 중력과 부력의 유도에서처럼 ANCF에서 사용되는 항력은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$Q_{Drag} = \int_V F_{Dn}{}^T S dV + \int_V F_{Dt}{}^T S dV \qquad (2.25)$$

마지막으로 부가질량에 의한 힘을 고려할 수 있다. 여기서 부가질량에 의한 힘은 법선방향으로만 작용한다고 가정한다. 법선 방향에 대한 가속도는 앞서 언급된 속도의 관계에서와 같이 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\vec{V}}_n = \dot{\vec{V}} - (\dot{\vec{V}} \bullet \vec{a})\vec{a} \qquad (2.26)$$

여기서 $\dot{\bar{V}}$ 는 지구 고정좌표계에서 기술되는 가속도 성분이다. 마지막으로 식 (2.25)의 과정을 거쳐 부가질량에 의한 힘은 다음과 같다.

$$Q_{Ad} = -\int_V \rho_w \dot{\bar{V}}_n S dV \tag{2.27}$$

## 2.5. 전체 운동방정식 및 제약조건

본 논문에서 케이블과 수중운동체 사이의 연결은 구형 조인트(revolute joint)로 연결 되었다고 가정한다. 그렇기 때문에 이 조인트는 연결부위의 병진방향의 위치만 관여한다. ANCF에서 사용되는 제약조건 식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi(e^m, e^{c1}) &= r^m - r^{c1} = S^m e^m - S^{c1} e^{c1} = 0 \\ \Phi(e^t, e^{cn}) &= r^t - r^{cn} = S^t e^t - S^{cn} e^{cn} = 0 \end{aligned} \tag{2.28}$$

제약조건 식에서 첫 번째 식은 모선과 케이블사이의 관계 그리고 두 번째 식은 토우피쉬와 케이블 사이의 관계를 뜻한다. 방정식에서 $e^m$ 은 모선의 지구 고정좌표계에서 위치를 뜻하고, $e^{c1}$ 은 케이블의 첫 번째 조각의 첫번째 절점의 위치를 뜻한다. 또한 $e^t$ 는 토우피쉬의 위치를 뜻하며, $e^{cn}$ 은 케이블의 마지막 조각의 마지막 절버의 좌표를 뜻한다. 이 제약 조건은 경계조건으로 해석될 수 있다.

이제 전체적인 운동방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$M\ddot{\vec{e}} + K(\vec{e})\vec{e} = Q_{Drag} + Q_{Ad} + Q_{Gravity} + Q_{Buoyancy} \tag{2.29}$$

여기서 $Q_{Buoyancy}$ 는 ANCF에서 쓰이는 일반화된 좌표계에서의 부력을 뜻한다. 앞서 나온 제약조건 방정식 (2.28)을 포함시키기 위하여 라그랑지 승수를 도입하면 전체 전체적으로 풀어야 할 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_e^{\ T} \\ \Phi_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\vec{e}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_q \\ \gamma \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

여기서 $\lambda$ 은 라그랑지 승수로 뒷절에 언급될 수중운동체와 케이블 간의 상호작용력으로 해석될 수 있다. $\Phi_e$ 는 제약조건에 대한 자코비안 행렬이다. $\gamma$ 는 가속도 수준의 동역학적 제약조건으로 이 값은 $\Phi_e\ddot{e} = -\Phi_{tt} - (\Phi_e\dot{\vec{e}})_e\dot{\vec{e}} - 2\Phi_{et}\dot{\vec{e}} \equiv \gamma$ 으로 정의 된다. 또한 $Q_q$ 는 탄성력 성분이다. 안정적인 수치 해를 얻기 위해서 본 논문에서는 Newmark 적분 방법을 사용하도록 한다.

## 2.6. 상호작용력

상호작용력은 각 수중 운동체의 추력 성분에만 영향을 준다. Fig 5와 6에서 보이듯이 일단 모선 혹은 토우피쉬의 운동방정식이 풀리면 케이블의 경계조건이 결정된다. 이 때 케이블의 상호작용력은

모선과 토우피쉬의 거동에 영향을 준다. 식 (2.30)에서 언급된 것처럼 라그랑지 승수 $\lambda$ 는 상호작용력으로 해석될 수 있다. 그러므로 모선의 경우 추력과 상호작용력은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{prop}+X_{\text{int}} \\ Y_{prop}+Y_{\text{int}} \\ Z_{prop}+Z_{\text{int}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{prop} \\ Y_{prop} \\ Z_{prop} \end{bmatrix} + R_{IV}{}^{T} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} K_{prop}+K_{\text{int}} \\ M_{prop}+M_{\text{int}} \\ N_{prop}+N_{\text{int}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{prop} \\ M_{prop} \\ N_{prop} \end{bmatrix} + r_{attatch} \times R_{IV}{}^{T} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \tag{2.31}$$

여기서 $R_{IV}{}^{T}$ 는 지구 고정좌표계와 물체고정좌표계를 연결시켜주는 변환 행렬이다. 또한 아래첨자 $prop$ 는 모선 자체의 추력과 추력으로 인한 모멘트를 뜻하고, $r_{attatch}$ 모선의 물체고정 좌표계에서 케이블이 부착된 위치를 뜻한다. 토우 피쉬의 경우 자체적인 추력이 없기 때문에 케이블의 예인력 즉, 상호작용력이 토우피쉬의 추력으로 작용한다. 그러므로 이때 토우피쉬의 상호작용력은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{\text{int}} \\ Y_{\text{int}} \\ Z_{\text{int}} \end{bmatrix} = R_{IV}{}^{T} \begin{bmatrix} \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} K_{\text{int}} \\ M_{\text{int}} \\ N_{\text{int}} \end{bmatrix} = r_{attatch} \times R_{IV}{}^{T} \begin{bmatrix} \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

토우피쉬는 자체 추력이 없으므로 케이블의 부착된 위치 $r_{attatch}$ 값이 토우피쉬의 거동에 아주 중요한 역할을 할 수 있다.

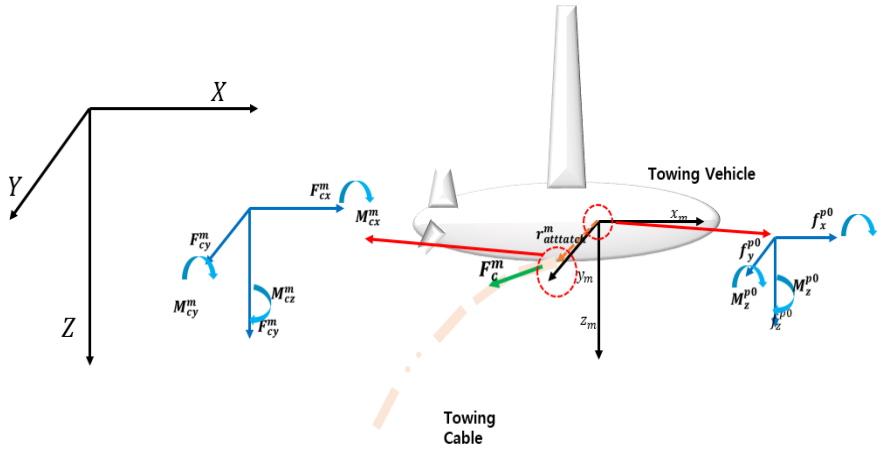


Fig 5 Illustration of interaction between towing vehicle and towing cable

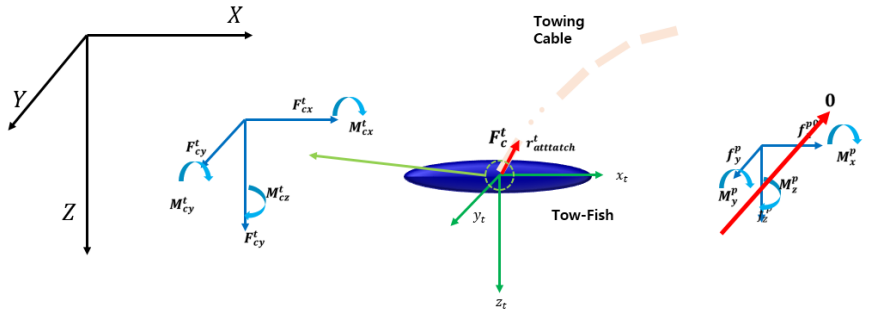


Fig 6 Illustration of interaction between towfish and towing cable

## 2.7 시뮬레이션 과정

Fig 7. 은 전체적인 시뮬레이션 과정을 설명하고 있다. 순서대로 풀어 설명하면 다음과 같다.

Step1. 파라미터초기화 (위치, 속도, 가속도, 상호작용력)

Step2. 모선과 토우피쉬 운동방정식 풀이

Step3. Step2의 결과를 이용하여 케이블의 경계 조건 적용, 케이블 운동 방정식 풀이

Step4. 모선 토우피쉬 그리고 케이블의 상태 업데이트

Step5. Step2-4를 정해진 시간이 될 때까지 반복

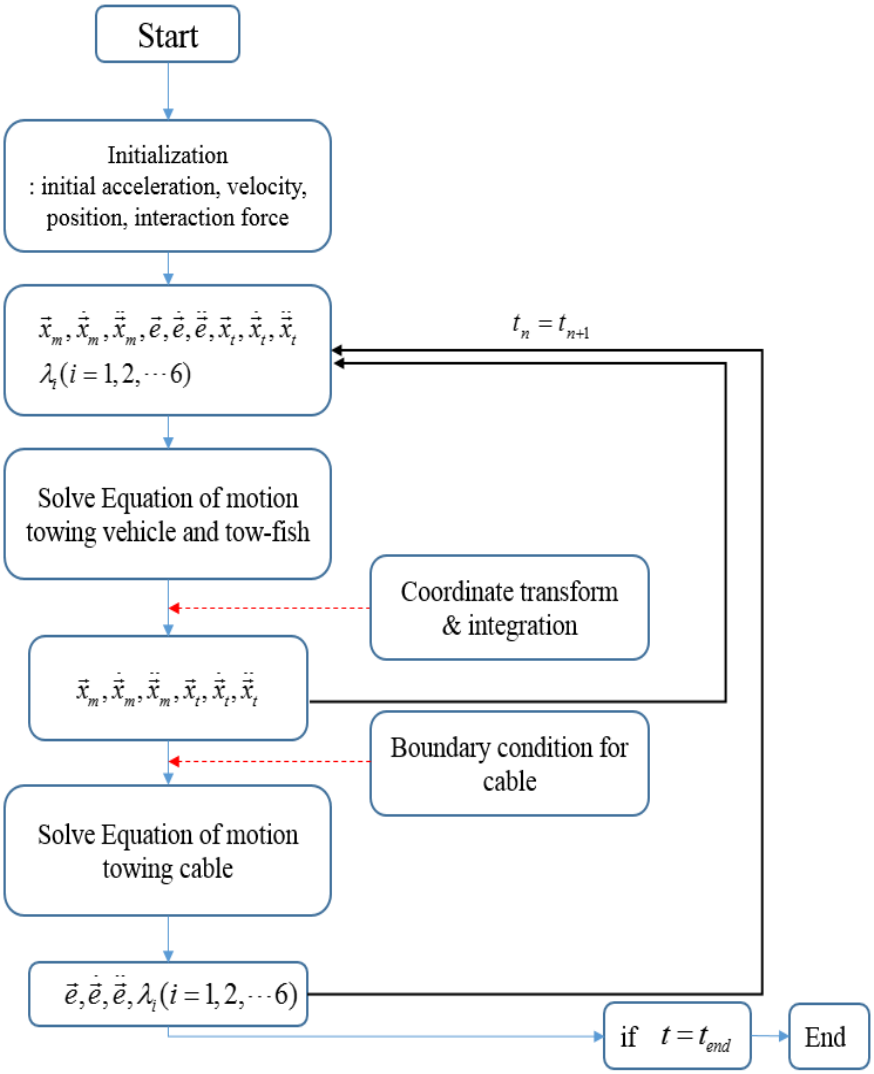


Fig 7 Simulation Procedure

# 3. 오픈루프 시뮬레이션

앞서 2장에서는 무인반잠수정 시스템의 동역학 모델링을 수행하였다. 3장에서는 이 모델링의 물리적 타당성을 검증하기 위하여 두 가지 경우에 대해서 간단한 시뮬레이션이 수행된다. 첫 번째 시뮬레이션은 모선의 추력을 상수로 두고 직진을 할 때 전체 시스템의 거동을 관찰하는 것이다. 그리고 두번째는 유턴에 관한 시뮬레이션이다. 이 시뮬레이션은 직진에서 충분히 전체 시스템이 정상상태에도 모선의 타각을 20도로 하여 유턴을 수행한다. 첫 번째 시뮬레이션을 통해 우리는 케이블과 모선 그리고 토우피쉬의 가속 구간 그리고 정상상태에서 거동을 살펴볼 수 있다. 두 번째 케이스에서는 선회 운동에서 전체 시스템의 거동을 살펴볼 수 있다. 시뮬레이션에서 초기 상태 모선의 수심은 3.5m로 설정 하였고 초기 가속도와 속도는 모두 0으로 설정하였다. 케이블의 길이는 200m로 설정하였고 토우피쉬의 속도와 가속도는 모선과 마찬가지로 0으로 설정 하였으며 초기 심도는 203.5m로 설정하였다. 토우피쉬에 케이블이 부착된 위치는 직진운동의 안정성을 위하여 선수부에 부착하였으며, 모선에 부착된 위치는 무게중심으로 하였다. 유체력 반

영을 위하여 유체력 미계수는 KRISO에서 개발된 IsiMI(Jn et al, 2009)와 서울대학교에서 개발된 수중글라이더 SNU Glider(Seo, 2009)의 것을 사용하였다. 케이블의 밀도는 $1300kg/m^3$ 으로 설정하였으며, 케이블 단면의 직경은 $4.1cm$ 으로 설정하였다. 계산을 위한 자세한 파라미터는 Table1. 에 제시되어있다.

## 3.1. 직진: Case 1

Fig8-13 은 총 100 초간의 직진운동에 대한 결과이다. Fig 8 은 매 15 초 간의 케이블의 모양을 도시한 것이다. 이 그림에서 우리는 가속구간에서의 케이블의 배열을 관찰 할 수 있다. 모선 근처에 달려있는 케이블의 상부의 경우, 토우피쉬 근처에 있는 케이블 보다 상대적으로 속도가 빠르기 때문에 초기 가속 구간에서 케이블의 배열은 위로 볼록한 포물선 형태를 가지게 된다. 또한, 가속 구간에서 케이블의 아래쪽 끝 즉, 토우피쉬에 가까운 부분은 뒤쪽으로 치우쳐져 있는 것을 관찰 할 수 있다. 이것은 토우피쉬가 아직 정상상태에 도달하지 않았기 때문으로 해석 할 수 있다. 또한 초기 가속 구간이 지난 후 케이블의 모양은 거의 직선에 가깝게 변하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 전체 시스템이 정상상태에 도달했음을 알 수 있다. Fig 9 와 10 에서 운동 시작 후 약 50 초 이후에 정상상태에 도달 했으며 이때의 속도는 약 $6m/s$ 정도임을 보여주고 있다. 흥미로운 것은 토우피쉬는 모선에 비해 약 30 초정도 정상상태에 늦게

도달한다는 것이다. 이것은 토우피쉬가 모선과 케이블에 의해 예인되기 때문으로, 모선의 상태가 케이블을 타고 토우피쉬에 전달되는데 시간이 소요 되기 때문이다. Fig 12 와 13 은 각각 모선과 토우피쉬에 작용하는 상호작용력을 보여주고 있다. 거의 정상상태에 도달하는 시간인 50 초 이후부터는 Y 방향과 Z 방향의 상호작용력은 거의 없어지고 X 축방향의 상호작용력만 남는 것을 알 수 있다. 직진 케이스에 대한 시뮬레이션을 통해 무인 반잠수정에 대한 동역학적 시스템 모델링이 물리적으로 타당하다고 판단 할 수 있다.

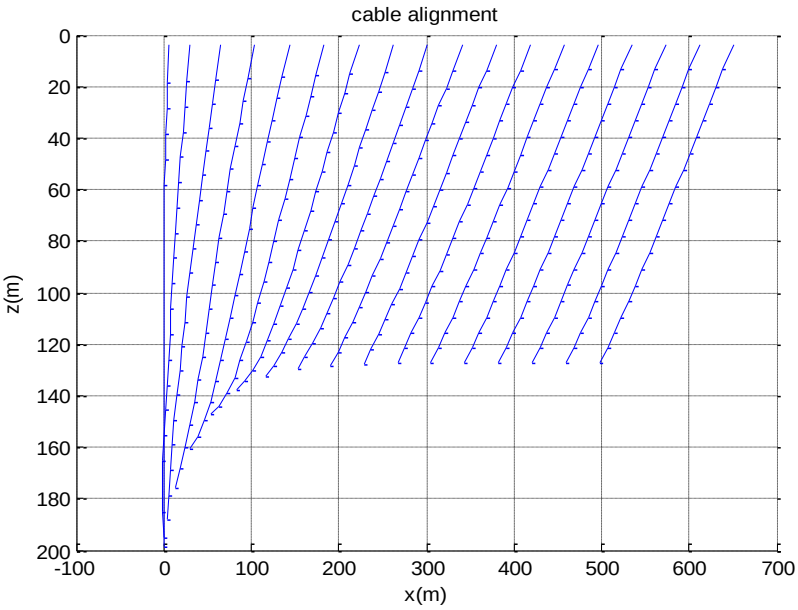


Fig 8 Cable alignment: Case 1

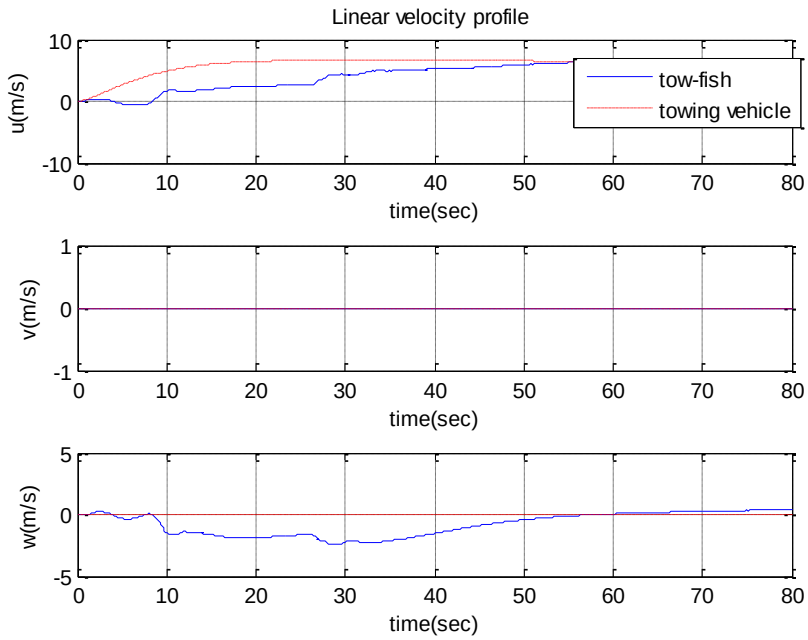


Fig 9 Linear velocity profile: Case 1

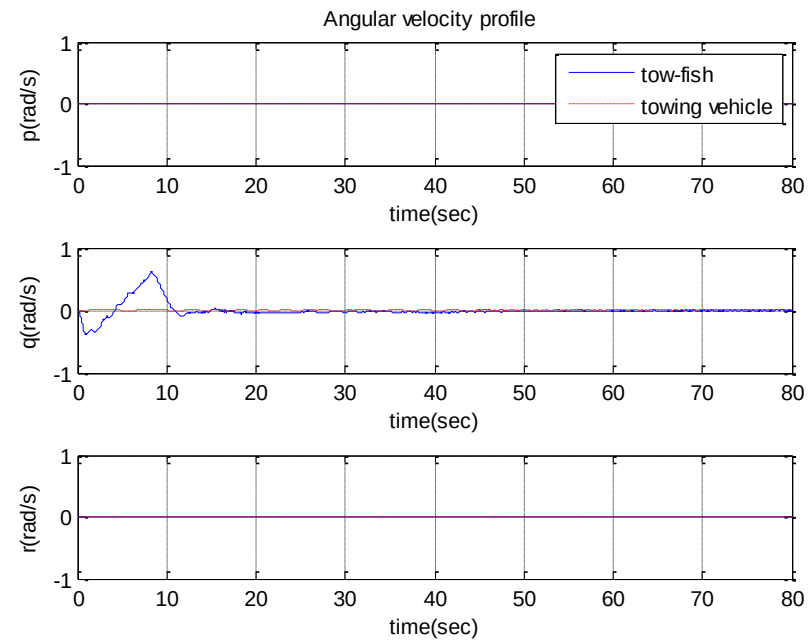


Fig 10 Angular velocity profile: Case 1

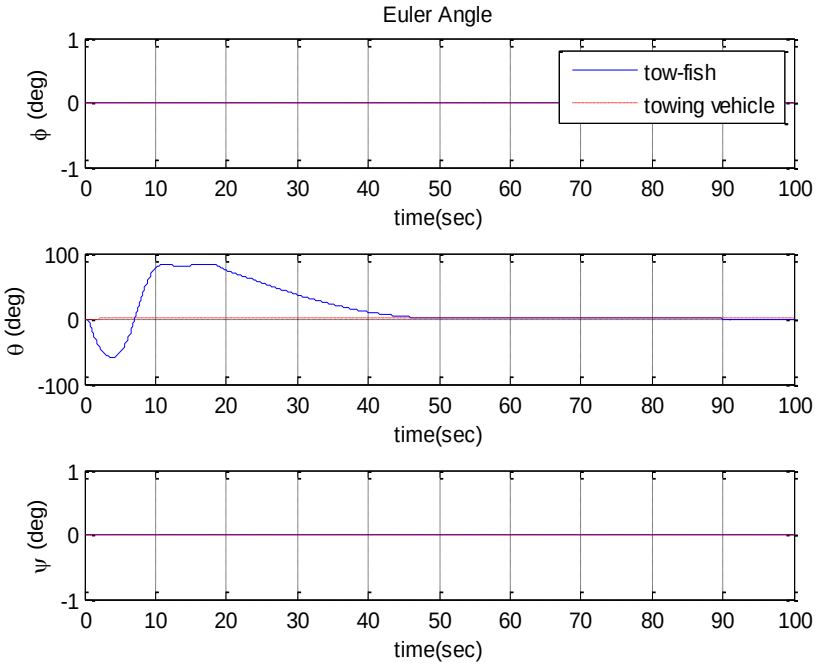


Fig 11 Euler angle: Case 1

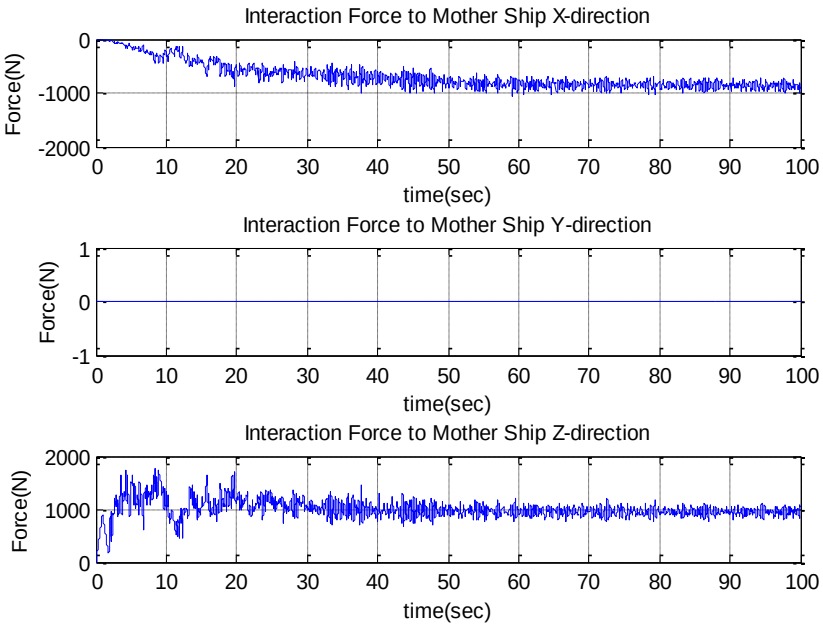


Fig 12 Interaction force of towing vehicle: Case 1

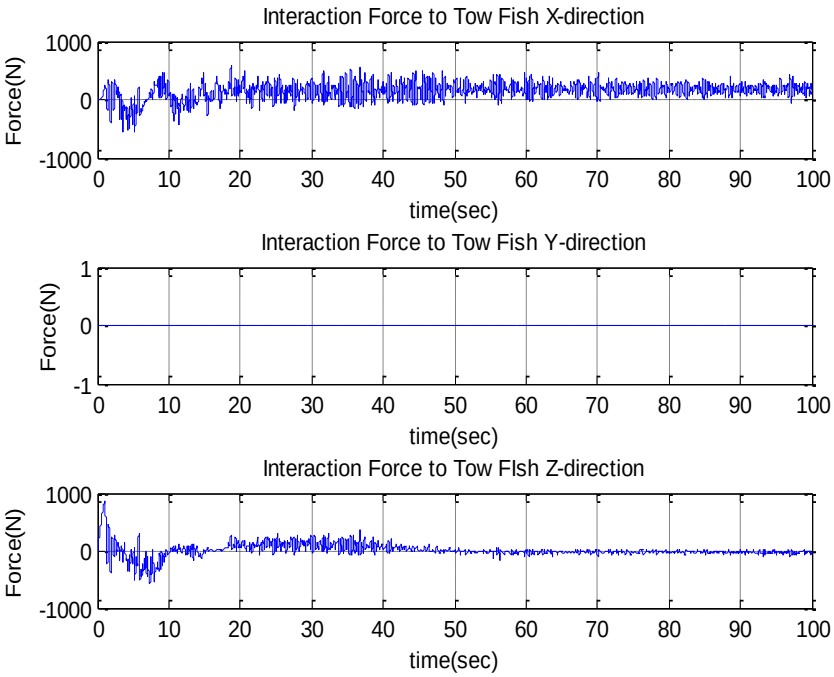


Fig 13 Interaction force of towfish: Case1

## 3.2. 유턴: Case 2

이 시뮬레이션은 무인반잠수정 시스템이 유턴을 수행할때의 거동을 보기 위해 수행되었다. 최초 55 초의 시간동안 충분히 시스템이 정상상태에 도달한 이후 모선의 타각을 20 도로 하여 모선의 선수각이 170 도가 되었을 때 타각을 다시 0 도로 설정하여 모선의 거동이 U 자 모양을 하도록 하였다. Fig 14-20 은 시뮬레이션의 결과를 보여주고 있다. Fig 14 에서 보이듯이 모선과 토우피쉬의 선회 반경이 많이 다른 것을 알 수 있다. 그

이유는 모선의 거동이 토우피쉬에 전달되는데 약간의 시간지연을 가지고 전달되고, 토우피쉬 자체의 거동에서 나타나는 비선형성 때문으로 해석할 수있다. 토우피쉬의 반경이 모선의 그것과 다른 것은 Grosenbaugh(2007)의 연구에서 밝혀진 바와 비슷하다고 할 수 있다. 또한 토우피쉬의 심도가 선회도중에는 깊어지다가 다시 위로 올라오는 것 또한 비슷한 점이라고 할 수 있겠다. Grosenbaugh(2007)의 연구 결과와 달리 선회 궤적이 다른 것은 케이블에 의해 예인되는 물체의 동역학이 다르기 때문으로 판단할 수 있다. Grosenbaugh(2007)의 연구에서는 간단한 실린더 형상의 예인체를 사용하였으며, 본 연구에의 예인체는 비선형성이 반영되어야 하는 복잡한 모양의 토우피쉬를 사용했다. Fig 16 에서 토우피쉬의 종방향 각속도가 약 80 초 이후부터 진동하는 것을 관찰 할 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig 15 에서 토우피쉬의 종방향 속도양상을 통해 나타난다. Fig 15-17 에서 나타나는 토우피쉬의 거동과 오일러 각은 Case 1 에서의 양상과는 상당히 다르게 나타난다. 갑작스런 속도와 오일러각의 증가 혹은 감소가 약 80 초 부근부터 나타나는데, 이를 통해 80 초 부근에 모선의 상태가 토우피쉬로 전달되었다는 것을

추측할 수 있다. 이러한 근거는 상호작용력을 보여주는 Fig 18 과 19 에서도 나타난다. 또한 모선의 운동 상태가 토우피쉬에 전달되는 시간 지연의 크기가 직진운동을 할때와 거의 비슷하다는 것을 관찰 할 수 있다. 또한 선회 운동을 할 때 토우피쉬의 거동이 매우 불안정한 것을 알 수 있다. 이를 통해 선회운동시 전체 시스템에 적절한 제어기 설계가 필요함을 알 수 있다.

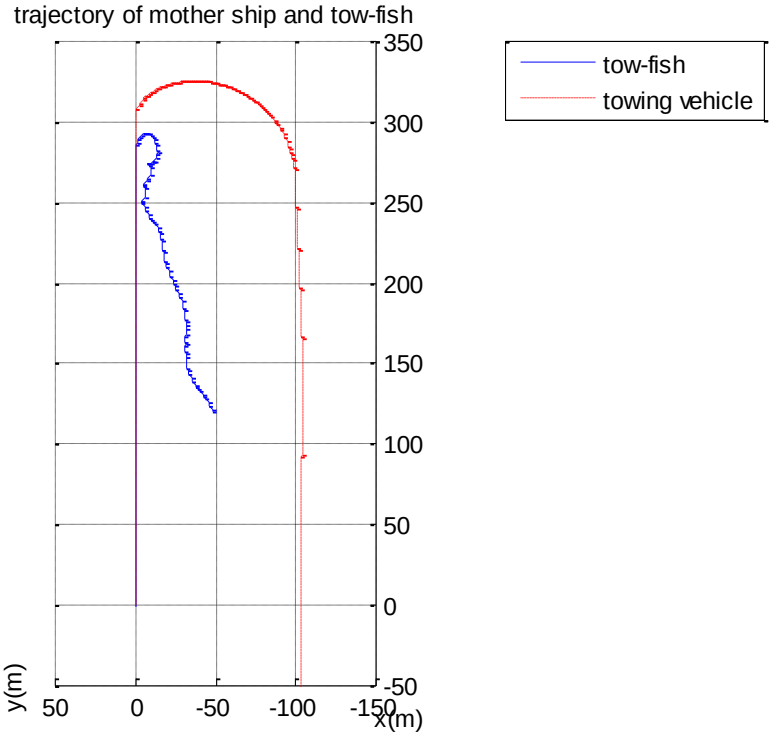


Fig 14 Overeview of trajectory of towing vehicle and towfish: Case 2

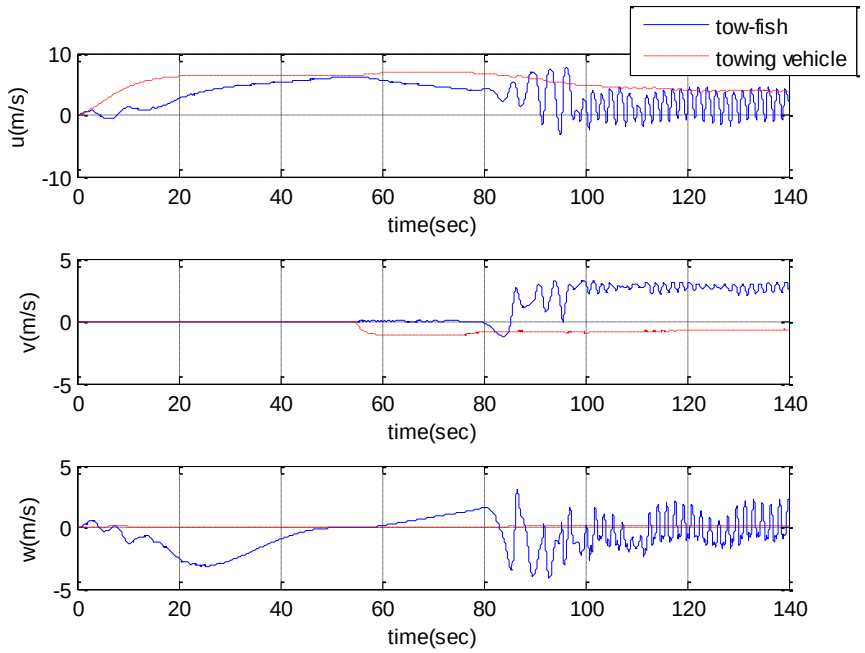


Fig 15 Linear velocity profile: Case 2

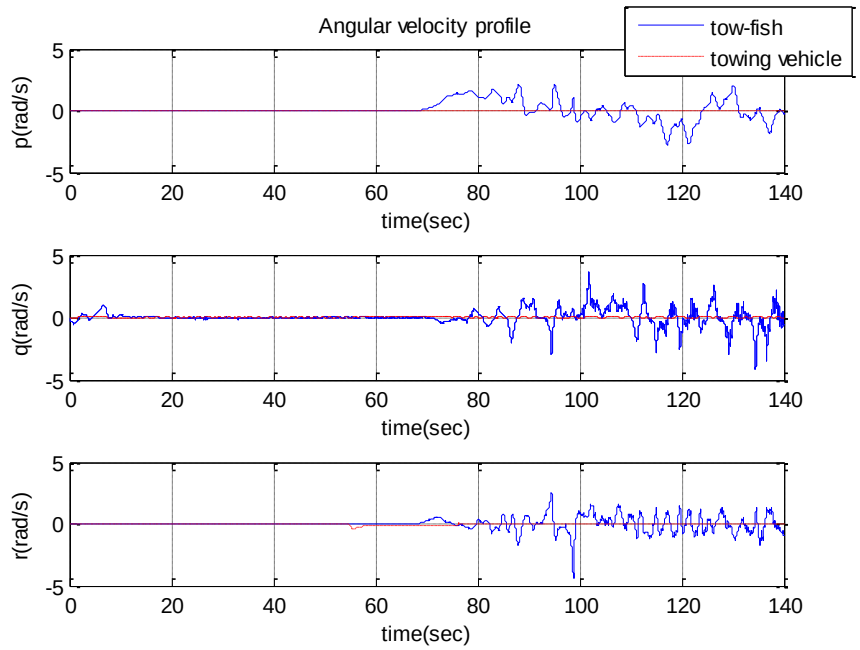


Fig 16 Angular velocity proflie: Case 2

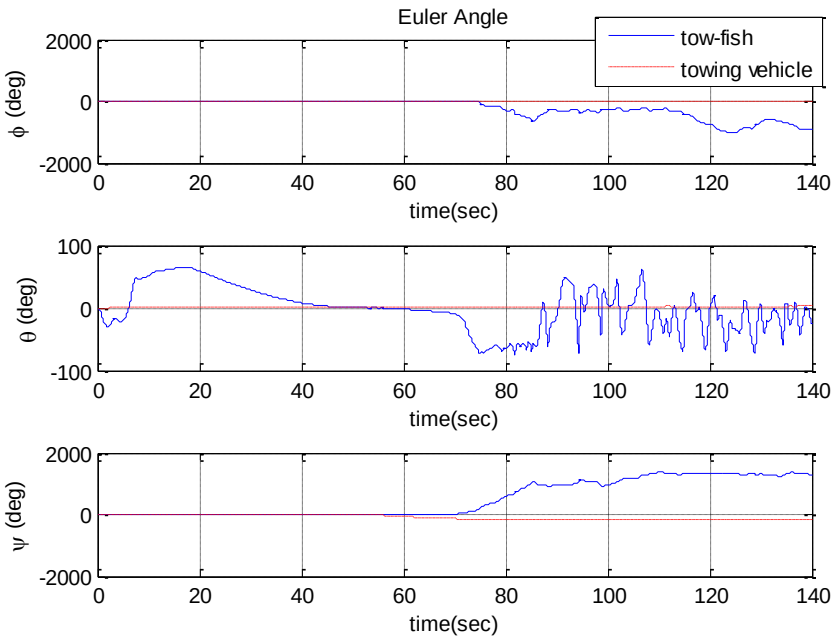


Fig 17 Euler angle: Case 2

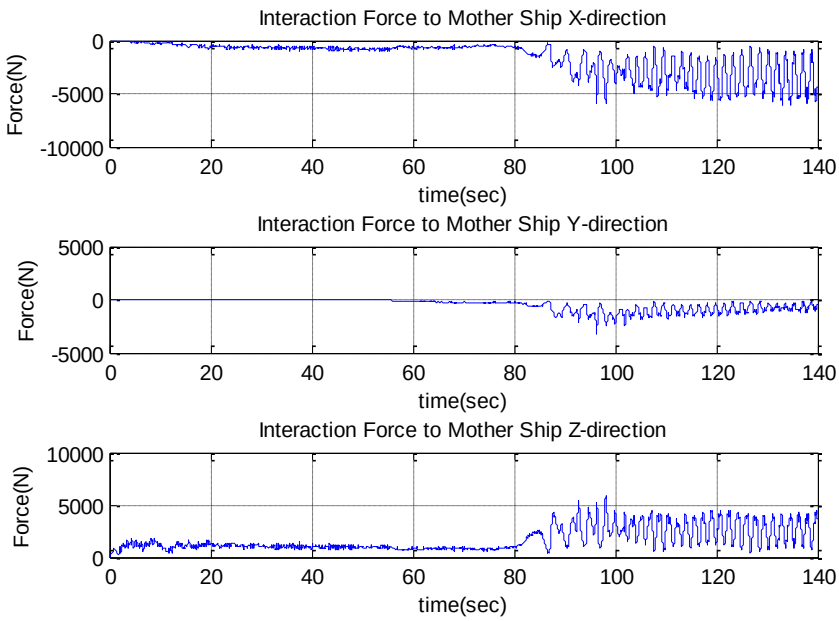


Fig 18 Interaction force of towing vehicle: Case 2

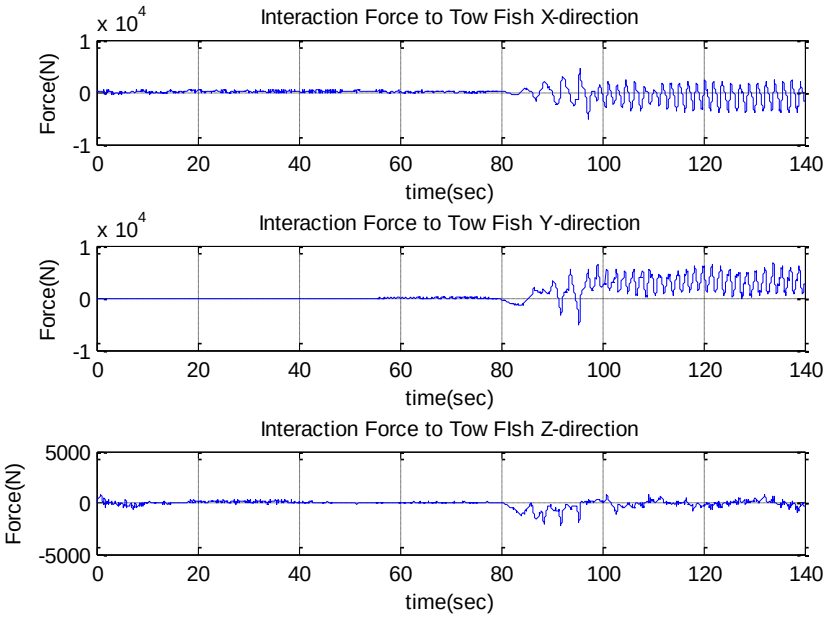


Fig 19 Interaction force of towfish: Case 2

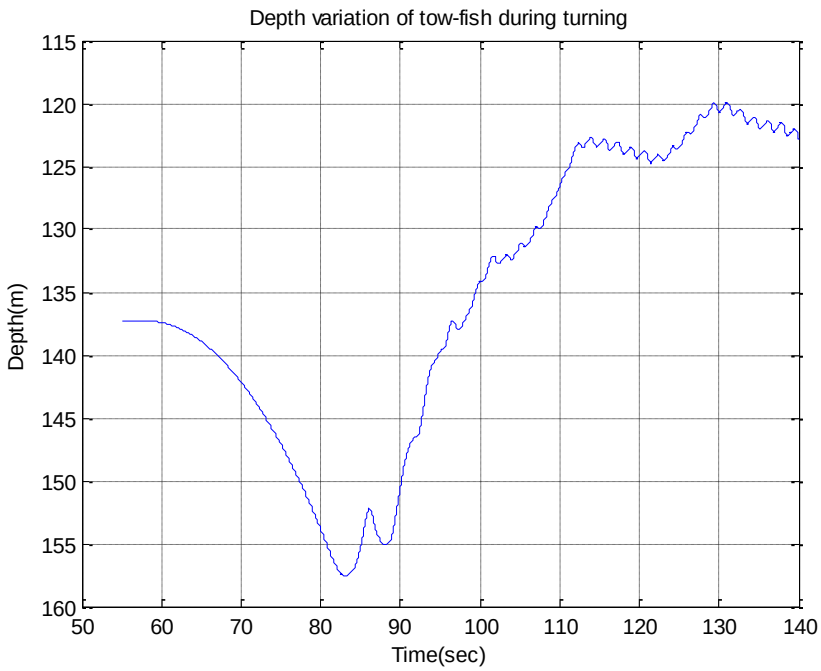


Fig 20 Depth variation of towfish during turning motion

# 4. 제어기 설계

3 장에서의 두 가지 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 무인 반잠수정 시스템의 특성을 이끌어 낼 수 있다. 첫 째는 모선의 운동이 토우피쉬로 전달되는데 운동 전달 시간이 존재한다는 것이다. 그러므로 제어기를 설계할 때 토우피쉬의 제어 명령 입력과 모선의 제어명령 입력의 시간차를 고려해야 할 것이다. 직진 운동에서는 선회 운동에 비해 안정적인 토우피쉬의 거동을 관찰 할 수 있었다ㅏ. 하지만, 수심 5m 를 넘어서 운항하면 안되는 모선의 특성상 모선의 심도제어가 필요한 것을 알았으며, 적정 심도에서 임무 수행을 위해 토우피쉬의 심도제어가 필요한 것을 알 수 있었다. 선회 운동에서는 케이블과 토우피쉬의 불안정한 거동을 보였으므로 이에대한 횡방향 운동에 제어가 필요함을 알 수 있었으며, 토우피쉬의 선회 반경이 모선의 선회반경보다 작음을 알 수 있었다. 또한 상호작용력 계산 결과를 봤을 때 상당히 고주파로 나오는 상호작용력은 수중 운동체의 거동에 큰 영향을 주지 않았음을 알 수 있었다. 하지만 이 모든 것을 제어기 설계에

반영하기는 어려우며, 제어기 설계를 할 때 모델의 불확실성이 증가할 수 있었음을 알 수 있었다.

제 4 장에서는 앞서 수행된 모델링과 오픈루프 시뮬레이션 결과를 바탕으로 안정적인 임무 수행을 위한 수중 운동체의 제어기를 설계하도록 한다.

## 4.1. 신경회로망 기반 적응제어 기법

무인 반잠수정 시스템은 수중 운동체 자체의 비선형성과 제어기 설계를 위한 모델링에서 케이블 전체를 반영하기 어려운점 특히 케이블의 길이와 케이블을 이루는 물질 그리고 수중 운동체와 케이블 연결부의 조인트 변화등 시스템전체의 불확실성으로 인하여 본 논문에서는 신경회로망 기반의 적응제어 기법(Kim et al, 2013)을 이용하여 거동 제어를 위한 제어기를 설계한다. 신경회로망 기반의 적응 제어기법은 플랜트를 모델링이 된 항과 모델링이 되지 않은 항으로 분리하여 모델링이 된 항을 역변환을 통해 피드백 선형화를 하고 나머지 모델링이 되지 않은 항을 신경회로망을 통한 적응 신호로 보상하는 방식이다.

### 4.1.2 의사제어(Pseudo control)기법

여기서 역변환 제어기는 대표적인 비선형 제어기법중의 하나로 운동방정식의 비선형항을 의사제어 (pseudo control)로 치환하여 비선형 운동방정식을 선형화 하는 제어기법이다. 모선의 경우를 예로 들면 모선의 종방향 각운동과 횡방향 각운동 방정식을 다음과 같은 일반적인 비선형 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= f(\mathrm{x},\mathrm{u}) \\ \ddot{\psi} &= f(\mathrm{x},\mathrm{u}) \end{aligned} \tag{4.1}$$

여기서 x 는 종운동 횡운동에 미치는 상태벡터를 의미하며, $u$ 는 제어입력을 의미한다. 두 운동 모두 2 차 시스템이므로, 아래에 제시되는 전개를 통해 이 방법을 설명하고자 한다. 아래와 같은 2 차 비선형 시스템을 생각해 보면,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x,u) \end{aligned} \tag{4.2}$$

비선형 시스템에서 모델링 되지 않은 부분은 모델링의 불확실성으로 간주할수 있고, 이 모델링이 되지 않은 항 또한 상태변수와 제어입력의 함수이다. 여기서 비선형 함수 $f(x,u)$ 를 모델링이 된 항 $\hat{f}(x,u)$ 와 모델링이 되지 않은 부분 $\Delta(x,u)$ 의 합으로 정의 하면 식 (4.2)는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \hat{f}(x,u) + \Delta(x,u) \end{aligned} \tag{4.3}$$

여기서 모델링이 된 부분 $\hat{f}(x,u)$ 을 의사제어 $v$ (pseudo control)로 치환하면 위의 식 (4.3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= v + \Delta(x,u), \qquad v = \hat{f}(x,u) \end{aligned} \tag{4.4}$$

여기서, 모델링이 된 항 $\hat{f}(x,u)$ 의 정확한 모델링이 가능하다면, 이 시스템은 선형화 되므로 일반적인 선형제어기법의 적용이 가능해진다. 의사제어 $v$ 를 오차 방정식의 구성을 위한 가속도항 $\dot{x}_{2d}$ 와 선형제어기 항에 해당하는 항 $v_c$ , 그리고 모델링이 되지 않은 부분에 대한 불확실성을 보상하기 위한 신경회로망을 거친 적응제어 신호 $v_{ad}$ 로 구성하면 의사제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$v = \dot{x}_{2d} + v_c - v_{ad} \tag{4.5}$$

오차를 다음 제시되는 식 (4.6)과 같이 정의 하고 선형제어기를 PD 제어기를 적용하면 오차 방정식은 식 (4.7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e_1 &= x_{1d} - x_1 \\ e_2 &= x_{2d} - x_2 \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -k_d e_2 - k_p e_1 + v_{ad} - \Delta(x,u) \end{aligned} \tag{4.7}$$

식 (4.7)의 오차들을 하나의 상태 벡터로 두고 전체 행렬 식으로 표현 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e} = Ae + B(v_{ad} - \Delta) \tag{4.8}$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_d & -k_p \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$ 를 의미한다.

만약 적응제어 신호가 모델링 되지 않은 항 $\Delta$ 을 완벽하게 보상하고, 행렬 $A$ 가 Hurwitz 하다면 이 시스템은 안정한 시스템이 된다. 이 때 제어 입력값은 의서제어를 다시 역변환 시켜서 얻을 수 있게 되고 이때의 제어 입력은 다음과 같다.

$$u = \hat{f}^{-1}(x, v) \tag{4.9}$$

### 4.1.2 신경회로망 적응제어

신경회로망은 구조를 알 수 없는 함수를 어떤 입력 변수를 이용하여 근사화 하는 역할을 한다. 본 논문에서는 Fig 21에 제시된 것처럼 Single hidden layer(SHL) 을 이용한다. 여기서 $\bar{X}$ 는 신경

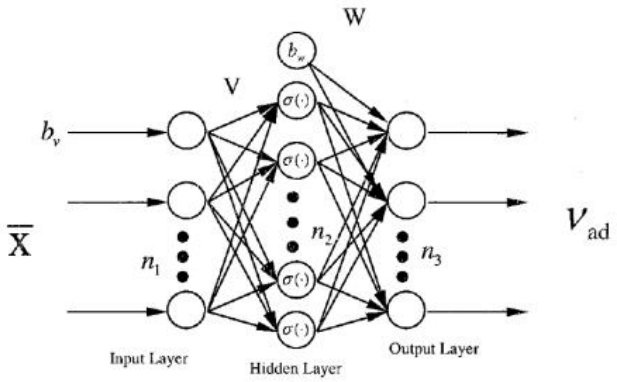


Fig 21 Structure of neural netwrok with single hidden layer

회로망에 들어가는 입력 변수이다. 적절한 변수의 선택을 통해 함

수가 근사화 될 수 있다. 여기서 bias 항 $b_v$ 가 포함되어 최종 입력변수가 결정된다. 입력 변수들은 입력 가중변수 $V$ 에 의해 가중되어 hidden layer로 들어간다. 여기서 hidden layer은 여러 개의 신경회로망 뉴런들로 구성되며, 뉴런의 개수가 많아질수록 신경회로망의 근사정도가 올라간다. 하지만 너무 많은 수의 뉴런을 이용한 신경회로망 구성은 많은 계산 시간이 필요하므로 적절한 수의 뉴런 선택이 요구된다. 각 뉴런에서 활성화 정도에 사용되는 변수 $a$ 를 activation potential 이라고 하며, 이때 사용되는 함수는 시그모이드 함수를 사용하였다. 함수는 다음과 같다.

$$\sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-az}}, \ \ z = V^T \bar{x} \tag{4.10}$$

여기서 activation potential 값은 설계자에 의해 결정되는 값이다. 신경회로망의 뉴런을 거친 값들은 출력 가중변수 $W$ 에 의해 가중되며 적응제어 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ad} = W^T \sigma(z) \tag{4.11}$$

입력 가중변수와 출력 가중변수에 대한 업데이트 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\Gamma_V [\bar{x}\zeta W^T \sigma_z + \lambda V], \ \ \zeta = e^T PB \\ \dot{W} &= -\Gamma_w [(\sigma - \sigma_z V^T \bar{x})\zeta + \lambda W] \end{aligned} \tag{4.12}$$

위의 업데이트 방식은 $\sigma-\text{modification}$ 방식으로 적응제어 신호의

발산을 막아주는 댐퍼 $\lambda$ 를 곱하는 항이 추가 되어있다. 여기서 $P$ 값은 식 (4.8)에 나온 행렬 $A$ 를 이용하여 구한 리아프노프 방정식의 해이다. 또한 $B$ 는 식 (4.8)에서 정의된 입력 행렬을 뜻하며 $\sigma_z$ 는 시그모이드 함수 $\sigma$ 를 $z$ 로 편미분 한 값을 뜻한다. 여기서 리아프 노프 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$A^T P + PA + Q = 0 \tag{4.13}$$

## 4.2. 제어기 구성

제어기는 모선과 토우피쉬에 각각 종방향 횡방향의 운동을 위한 제어기로 구성된다. 각 방향의 운동에 대한 제어기는 선형항 까지만 포함하여 따로 구성되며, 나머지 제어기 설계에 포함되지 않은 항들은 적응제어 신호를 통해 보상을 하게 된다.

### 4.2.1 모선 제어(종방향, 횡방향)

4장 2절에 언급된 것처럼 제어기는 종방향과 횡방향에 대해 각각 따로 구성되며 각 방향에 대해 선형화 된 부분까지만을 포함하여 설계를 수행한다. 모선의 구조상 종방향과 횡방향에 대해서 직접적인 $z$ 방향과 $y$ 방향에 대한 제어는 불가능 하므로 본 논문에서는 2중 루프를 구성하여 제어기를 설계한다. 여기서 Inner loop

는 신경회로망 기반 적응 제어 기법을 통한 자세 제어를 수행하고 Outer loop에서는 자세와 위치에 대한 관계식을 통해 PID 제어기를 이용하여 위치 제어를 수행한다. 제어기에 대한 간략한 블록 선도는 다음 Fig 22와 같다.

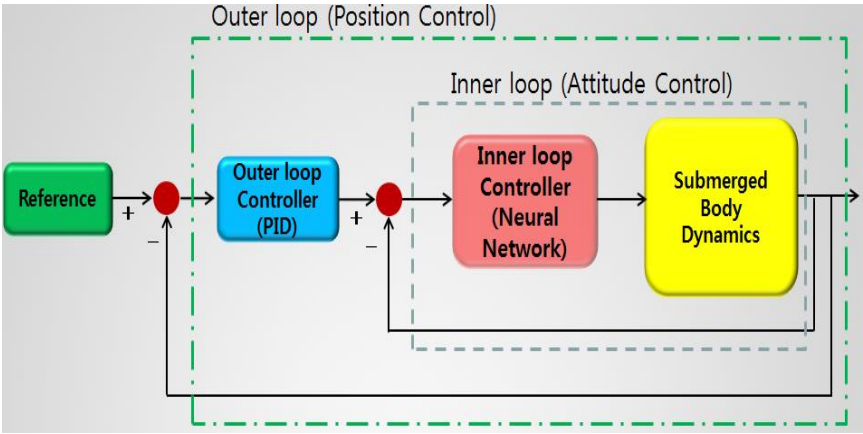


Fig 22 Block diagram for control

모선의 종방향 각운동과 병진 운동에 대한 제어판은 선미부에 위치한 elevator로 한정하였다. 외부 루프의 제어기는 앞서 언급한 대로 PID 제어기를 사용하였다. 이때 모선의 심도 유지 명령은 3.5m와 종방향 병진운동 속도는 0을 기준으로 하였으며, 오픈루프 시뮬레이션에서 나왔던 결과인 전진속도 $6m/s$ 를 기준으로 선형화하여 제어 개인을 반영하였다. 이때 내부 루프에 들어가는 종방향 각 명령은 다음과 같다.

$$\theta_c = -k_p\tilde{z} - k_d\tilde{z} - \int k_i\tilde{z}dt \qquad (4.14)$$

여기서, $\tilde{z} = z_d - z$ 이며, 제어 이득의 값은 각각 $k_p = 0.01,\ k_d = 0.005,\ k_i = 2\times10^{-4}$ 으로 설정하였다. 내부 루프 디자인은 케이블과의 상호작용력을 고려하지 않은 상태에서 종방향 각운동에 대한 모델만을 고려하여 공칭 모델을 구성하였고, 내부 루프에 들어가는 종방향 각에 대한 명령은 (4.14)에서 나온 값을 이용한다. 선형화된 종 방향 각운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = -z_g W\theta + M_q Uq + M_{\delta_s}\delta_s + \Delta(x,u) \tag{4.15}$$

식 (4.15)에서 $W$ 는 모선의 배수량이며, $U$ 는 정상상태에서의 속도를 의미한다. $\Delta(x,u)$ 는 종방향 각 운동에서 모델링 되지 않은 부분을 의미한다. 4.1.2에서 언급된 의사제어로 위의 식을 치환하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = v_{pseudo} + \Delta(x,u) \tag{4.16}$$

의사제어를 가속도 항과 선형제어기 그리고 적응제어 신호로 분리하면 (4.17)과 같이 나타난다.

$$v_{pseudo} = \ddot{\theta}_c + v_l - v_{ad} \tag{4.17}$$

여기서 $\ddot{\theta}_c$ 는 원하는 각가속도 값이고, $v_l$ 은 선형제어기 그리고 $v_{ad}$ 는 적응제어 신호를 의미한다. (4.17)을 (4.16)에 대입하여 오차 방정식으로 구성하면 식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\ddot{\tilde{\theta}} = -v_l - v_{ad} + \Delta(x,u) \tag{4.18}$$

여기서, $\ddot{\tilde{\theta}} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}$ 로 정의 된다. 선형 제어기 $v_l$ 값을 PD제어기로 선택하면 전체 행렬 식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\theta}} \\ \ddot{\tilde{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_{pi} & -k_{di} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\Delta(x,u) - v_{ad}) \tag{4.19}$$

여기서 $k_{pi}$ 와 $k_{di}$ 는 내부루프에서 사용되는 P 이득과 D 이득을 뜻한다. 적은 제어 신호 $v_{ad}$ 가 모델링 되지 않은항 $\Delta(x,u)$ 를 완벽하게 보상해 준다면, 제어 입력 값은 역변환에 의해 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\delta_s = \frac{k_{pi}\tilde{\theta} + k_{di}\dot{\tilde{\theta}} - M_q U\dot{\theta} + z_g W\theta - v_{ad}}{M_{\delta_s}} \tag{4.20}$$

이때 신경회로망에 들어가는 인풋은 $[1, u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi, \delta_s, \delta_r]$ 으로 설정하였으며 신경회로망 뉴런의 수는 총 여섯개로 설정하였다. 같은 방식으로 모선의 횡방향의 제어를 수행하였으며 자세한 제어 이들들은 다음 Table 2 에 제시되어 있다.

Table 2 Control gain and adaptation gain: mother ship

| | Depth & Pitch | Sway & Yaw |
|---|---|---|
| $k_p$ | 0.01 | 0.015 |
| $k_d$ | 0.005 | 0.02 |
| $k_i$ | 0.0002 | 0.00002 |
| $k_{pi}$ | 50 | 4 |

| | | |
|---|---|---|
| $k_{di}$ | 20 | 2.8 |
| Activation potential | [1 2 4 8 16 32] | [1 2 4 8 16 32] |
| $\lambda$ | 0.7 | 0.7 |
| $\Gamma_V$ | 20 | 20 |
| $\Gamma_W$ | 20 | 20 |

### 4.2.2 토우피쉬 제어(종방향, 횡방향)

토우피쉬의 제어기 설계도 모선의 제어기 설계와 같은 과정을 통해 진행된다. 토우피쉬 제어기 설계에서 모델링 되는 부분은 케이블과의 상호작용력과 비선형 항들을 제외시키고 횡방향 그리고 종방향에 대한 선형항만을 남겨둔 채 진행된다. 토우피쉬의 종방향 제어도 모선의 경우와 마찬가지로 선미부에 위치한 stern plane을 통해 자세제어와 심도 제어가 이루어진다. 그러므로 토우피쉬의 제어기 설계에서도 내부루프와 외부루프를 이용한 이중 루프를 통해 제어기가 구성이 되어야 한다. 외부루프에서는 자세와 위치에 관한 관계식을 통해 PID 제어를 수행하고 내부루프에서는 신경회로망 기반 적응 제어기법을 통해 자세 제어가 이루어진다. 하지만 횡방향 제어에서 주목할 점은 3장에서 수행된 오픈루프 시뮬레이션에서 밝혀 진 것처럼 토우피쉬와 모선의 운동 전달에는 시간지연이 존재한다는 것이다. 그러므로 모선의 횡방향 제어와 토우피쉬의 횡

방향 제어 사이에 존재하는 시간 지연을 고려해야할 것이다. 또한 선회 반경이 다른 점을 고려하여 토우피쉬에 적절한 명령을 내려야 한다. 본 논문에서는 토우피쉬의 횡방향 위치제어와 자세제어를 위한 가이던스 방법으로 Line Of Sight(LOS) 방법을 적용하여 단일 루프의 신경회로망 기반 적응제어기를 적용하였다. LOS 방법은 어떤 특정 기준점에 대해 제어 대상이 되는 물체의 선수각과의 차이만큼을 제어명령으로 입력해주는 방식이다. 이 방식은 제어 대상이 되는 물체가 기준점 가까이 갈 때 제어 명령이 발산할 수 있다는 단점이 있다. 하지만 본 논문의 경우는 이 기준점을 모선의 횡방향 위치와 전진방향의 위치로 설정했기 때문에 토우피쉬가 이 기준점과는 겹칠 수 있는 경우가 없기 때문에 LOS 적용이 가능해진다. Fig 23은 위의 LOS 방법을 간략하게 설명하고 있다. 이 기준에 따르면 제어 명령으로 들어가야 하는 값은 다음과 같이 결정된다.

$$\psi_d = \tan^{-1}(\vec{r}_m - \vec{r}_t) \tag{4.21}$$

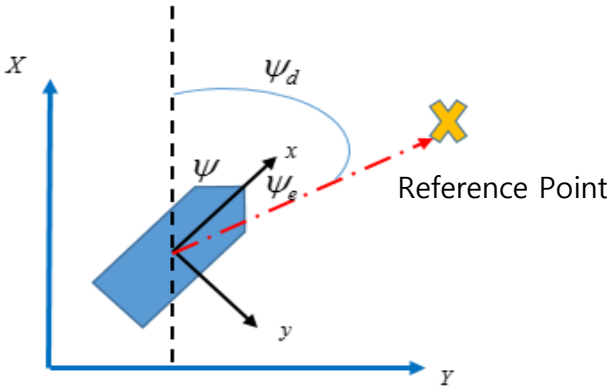


Fig 23 Illustration of Line Of Sight (LOS)

토우피쉬를 제어하기 위한 개인은 다음 Table 3와 같다.

Table 3 Control gain and adaptation gain: towfish

| | Depth & Pitch | Sway & Yaw |
|---|---|---|
| $k_p$ | 0.02 | – |
| $k_d$ | 0.002 | – |
| $k_i$ | 0.00002 | – |
| $k_{pi}$ | 4 | 4 |
| $k_{di}$ | 2.8 | 2.8 |
| Activation potential | [1 2 4 8 16 32] | [1 2 4 8 16 32] |
| $\lambda$ | 0.7 | 0.7 |
| $\Gamma_V$ | 20 | 20 |
| $\Gamma_W$ | 20 | 20 |

# 5. 시뮬레이션

4 장에서 구성된 제어기를 토대로 유턴에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 수행할 때의 가정은 모선과 토우피쉬의 자세 및 위치정보는 수중 케이블을 통해 정보의 전송이 가능하다는 것이다. 모선에 대한 제어명령은 종방향 운동의 경우 운동 시작과 동시에 수심 3.5m 를 유지하도록 했다. 종방향 운동의 경우 운동 시작 60 초 후부터 타각을 10 도로 입력하여 선수각이 $0.95\pi$ 가 되면 현재 모선의 위치로부터 −25 미터를 목표로 기동한다. 이는 토우피쉬와 모선의 선회 반경이 다르다는 점 때문이다. 토우피쉬에 대해 모선의 횡방향 위치를 추종하도록 명령 할 경우 수중 케이블 의 특성상 토우피쉬가 빠른 시간내에 임무를 수행하지 못할 수 있다는 단점이 있으므로 모선을 토우피쉬의 선회 반경 근처로 기동하는 것이 임무 수행을 위해 이득일 수 있다. 그 다음 토우피쉬의 선수각이 $\psi_t = 0.5\pi$ 가 되면 토우피쉬의 추정된 반경 위치인 $y_{command} = y_t\big|_{\psi_t=\pi/2} + R_{est}$, $R_{est} = U_t / r_t$ 을 목표로 기동하게 된다. 마지막으로 $\psi_t = 0.95\pi$ 가 되면 토우피쉬의 횡방향 위치를 목표로 기동을 하도록 명령을 준다.

토우피쉬에 입력되는 명령중 종방향 운동은 운동 시작 55 초 이후부터 목표 심도 130m 를 목표로 제어가 시작된다. 횡방향 운동은 모선과 운동 전달 시간지연이 존재하기 때문에 모선의 횡방향 기동 28 초 이후 모선의 28 초 이전의 선수각을 따르도록 명령이 가해진다. 마지막으로 토우피쉬의 선수각이 $\psi_t = 0.95\pi$ 가 되면 모선의 궤적을 따라가기 위한 LOS 명령이 주어지게된다. 제어기의 성능 비교를 위하여 신경회로망 기반 적응제어기가 적용되었을 경우와 적용되지 않았을 경우 즉, 고전 PD 제어기를 사용했을 때와 비교하였다.

## 5.2. 신경회로망 기반 적응제어기법을 사용할 때

Fig 24- 34 는 4 장에서 구성한 제어기를 이용하여 유턴 시뮬레이션을 했을 때의 결과를 보여주고 있다. Fig 24 에서 보이듯이 전체적인 궤적에서 모선과 토우피쉬가 유턴이 끝나고 난 후 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 토우피쉬와 모선의 상태에 관한 명령 입력이 적절히 입력되었음을 알 수 있다. 또한 Fig 25 에서 유턴 모션이 끝난 후 전진 속도가 토우피쉬와 모선이 거의 일치하게 됨을 알 수 있으며, 전체적인 속도가 안정됨을 알 수 있다. 선회 운동이 끝난 후 정상상태에 도달 했음을 추측할 수

있다. 또한 각속도에서도 안정적인 모습을 보여주고 있다. Fig 27 과 28 은 모선과 토우피쉬에 입력된 제어 명령과 실제 추종 값을 표시하고 있다. 모선의 경우 종방향과 횡방향에 대해서 약간의 정상상태 오차를 가지면서 잘 추종함을 알 수 있다. 그리고 토우 피쉬의 경우에도 약간의 정상상태 오차를 가지면서 추종함을 알 수 있다. 주목할 것은 선회 운동이 시작되었다고 판단 할 수 있는 약 80 초 부근에서 종방향 각운동 제어 명령 입력값과 실제 값이 많이 다른 것을 보이고 있는데, 이는 선회 운동시 토우피쉬의 심도가 깊어지는 현상 때문인 것으로 판단된다. 이는 Fig 34 에서도 보이듯이 심도 유지 명령 값인 130m 에서 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. Fig 29 와 30 은 모선에 작용하는 상호작용력과 이때 들어오는 적응제어 신호를 표시한것이다. 모선에 작용하는 상호작용력이 크게 변하는 구간에서 모선의 동역학에 대한 불확실성이 커지게 되고 이를 보상하기 위해 적응제어 신호가 커짐을 관찰 할 수 있다. 특히 횡방향 운동에서 약 80 초 부근에서 적응제어 신호가 커지는 것을 알 수 있는데 이를 통해 모선의 선회가 완료된 시점에서 시스템의 불확실성이 커진다는 것을 판단할 수 있다. 같은 현상은 토우피쉬의 상호작용력과 적응제어를 표시한 Fig 31 과 32 에서도 관찰 할 수 있는데, 약 100 초 부근에서 적응제어 신호가 커지는 것을 관찰 할 수 있는데 이 때 토우피쉬의 선회가 완료 되었음을 추측할 수 있다. 마지막으로 Fig 33 과 34 는 모선과 토우피쉬의 전체 운동중

심도의 변화 추이를 보여주고 있다. 모선의 경우 심도 범위인 3-5m 사이에서 운동을 안정적으로 수행하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 토우피쉬는 선회 도중에는 심도 유지가 되지 않지만 선회가 완료되면 심도를 잘 유지하는 것을 알 수 있다. 이를통해 신경회로망을 기반으로 한 적응제어기의 설계가 잘 이루어졌다는 것을 판단할 수 있다.

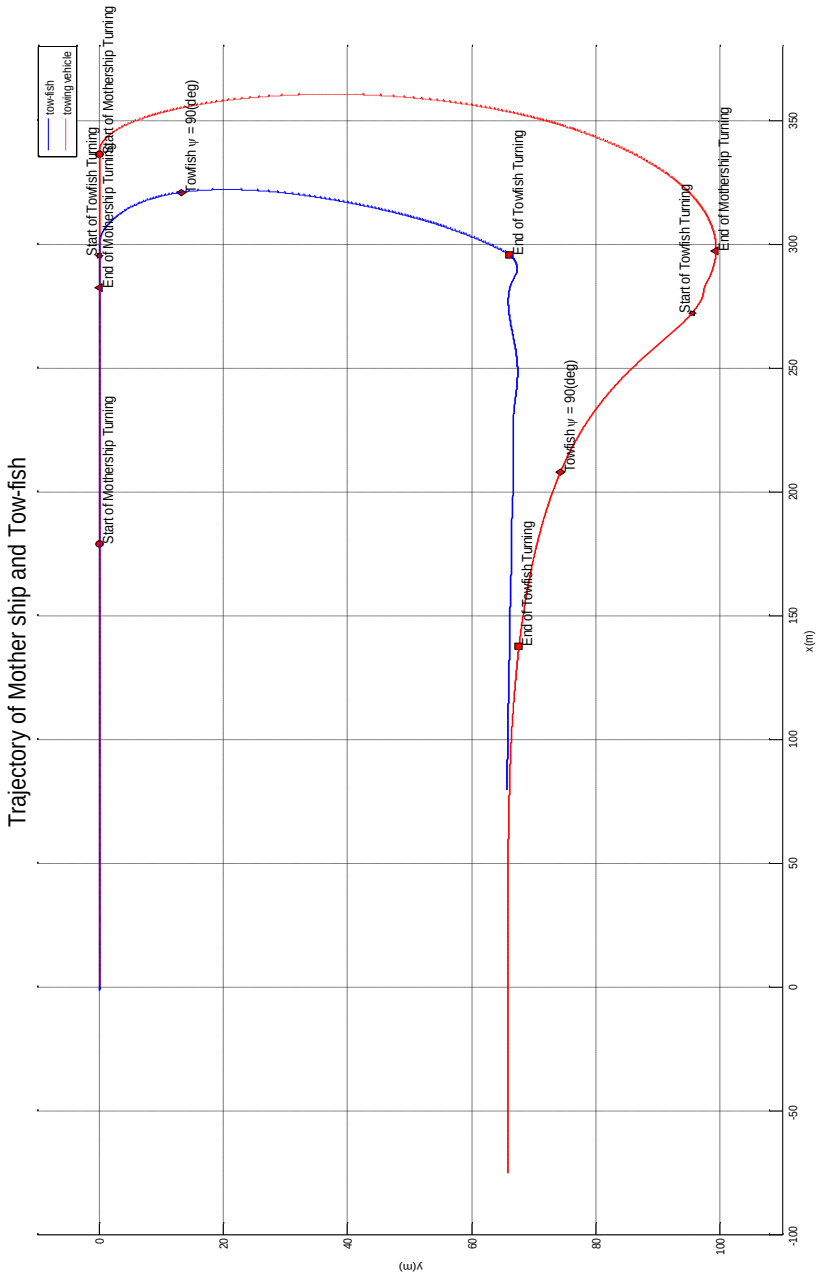


Fig 24 Trajectory of mother ship and towfish in turning motion W/NN

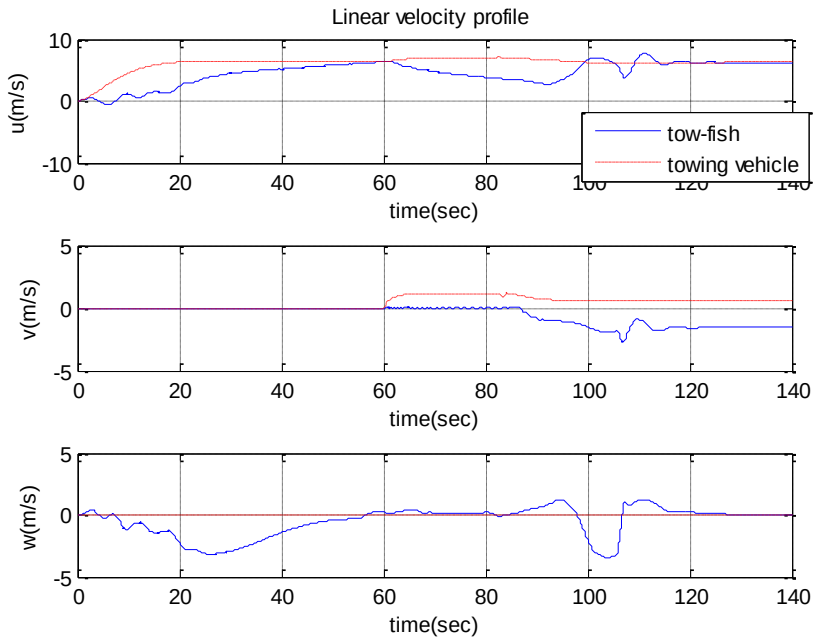


Fig 25 Linear velocity profile: W/ NN

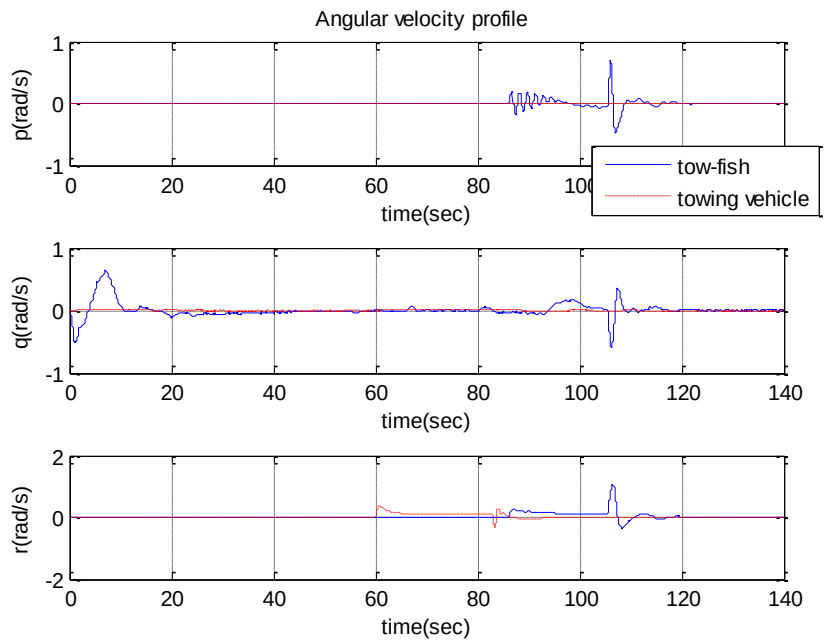


Fig 26 Angular velocity profile: W/NN

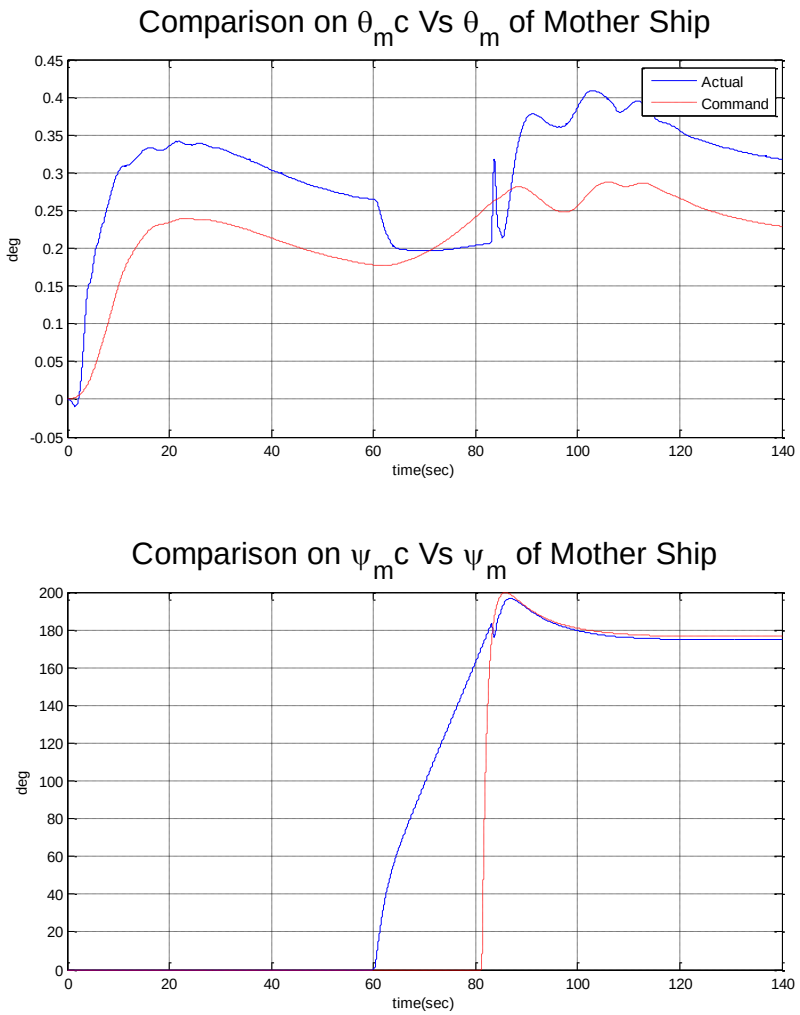


Fig 27 Comparison of command angle and actual angle: W/NN (Mother ship)

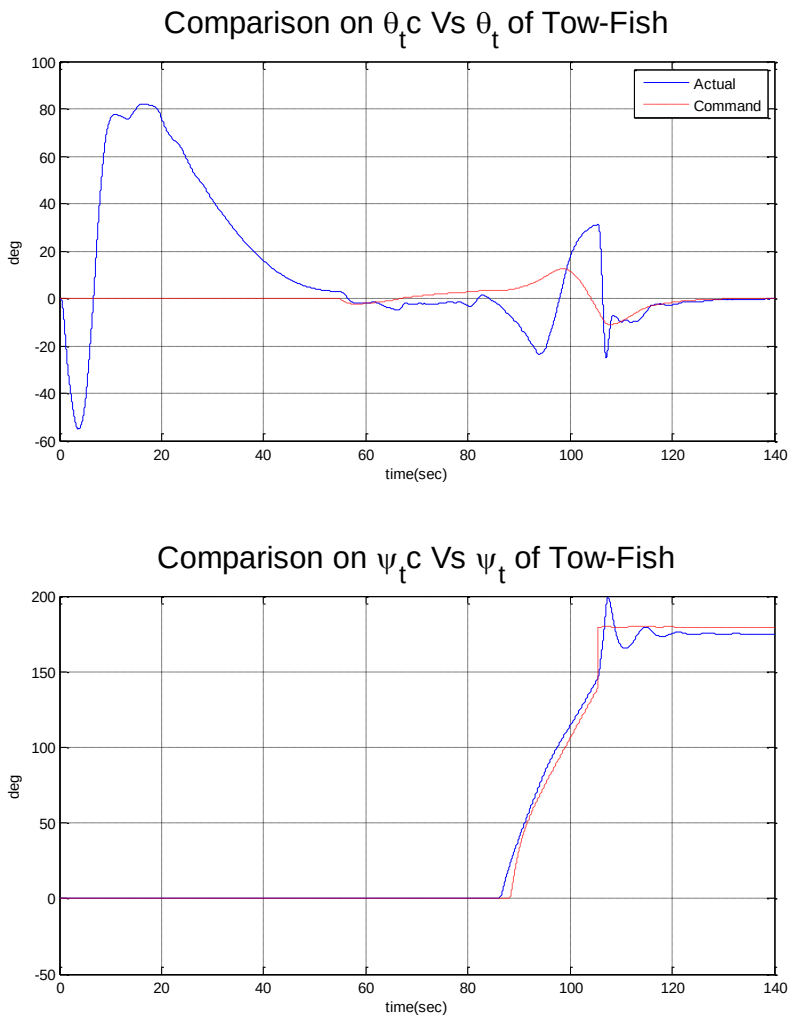


Fig 28 Comparison of command angle and actual angle: W/NN (Towfish)

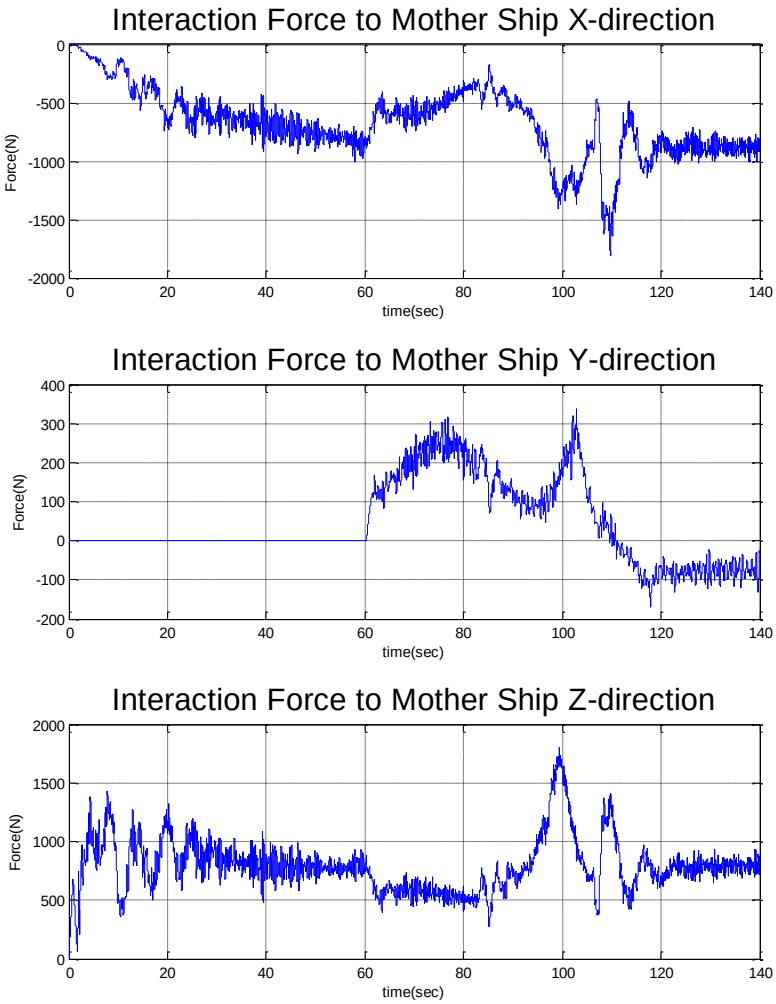


Fig 29 Interaction force to mother ship: W/NN

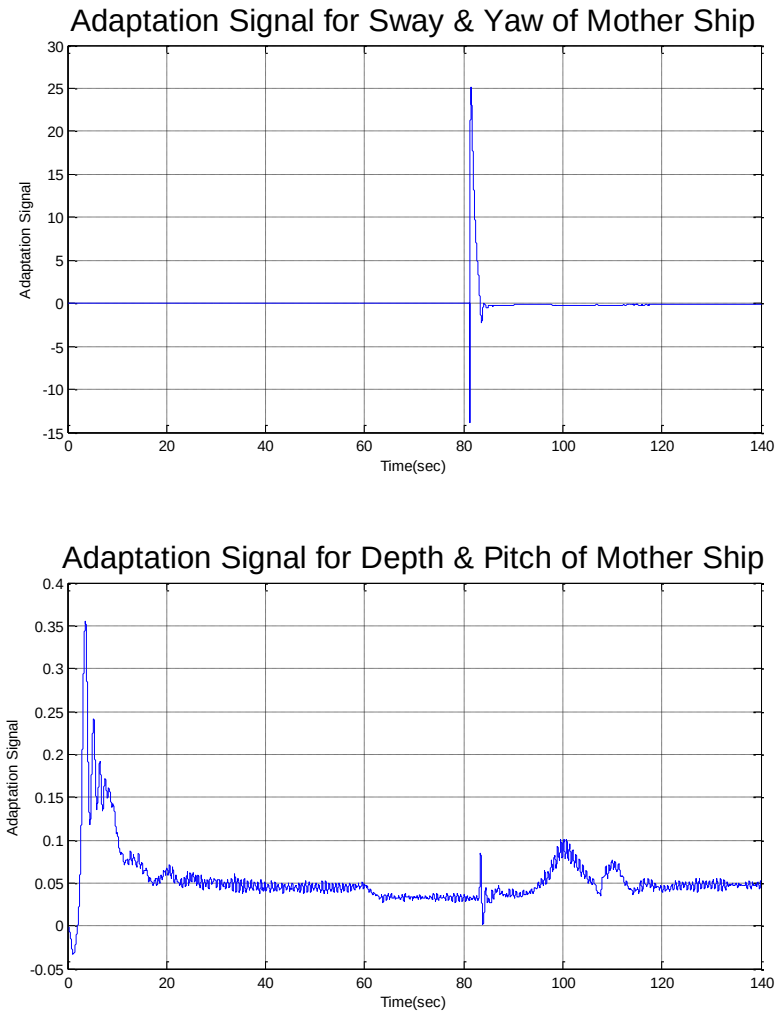


Fig 30 Adaptation signal for mother ship: W/NN

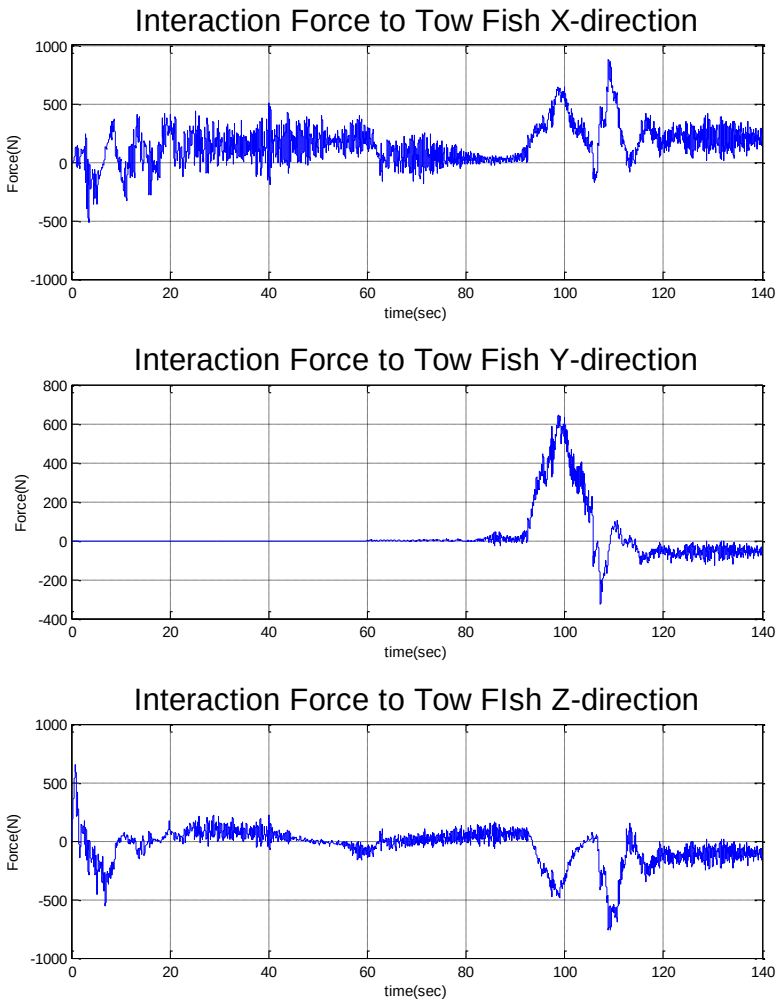


Fig 31 Interaction force to towfish: W/NN

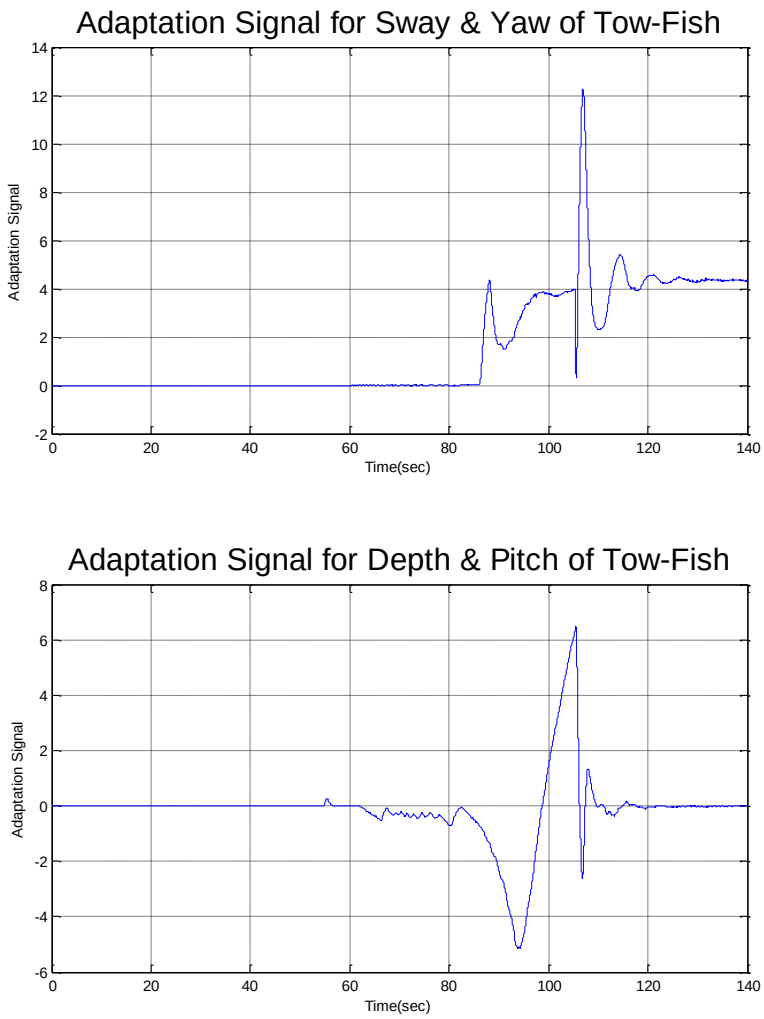


Fig 32 Adaptation signal for towfish: W/NN

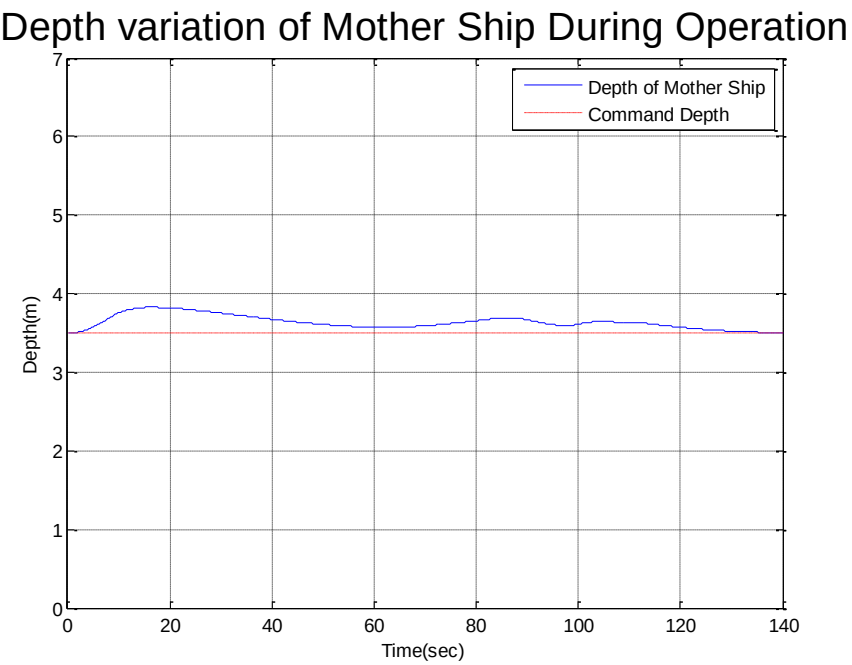


Fig 33 Depth variation of mother ship: W/NN

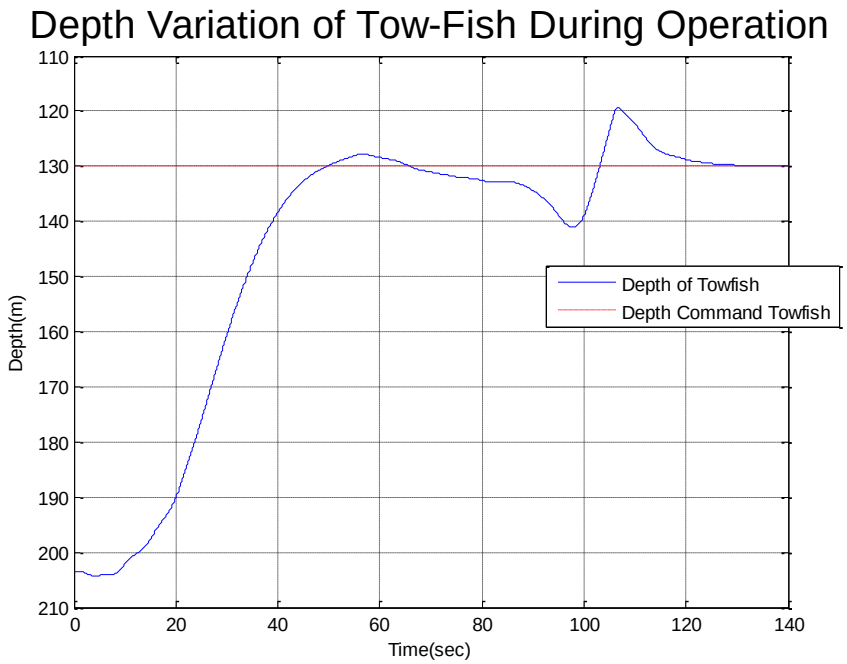


Fig 34 Depth variation of towfish: W/NN

## 5.3. 고전제어기를 사용할때와의 비교

신경회로망 기반 적응제어기와 성능을 비교하기 위하여 적응제어 신호를 0으로 만든 상태에서 시뮬레이션을 수행했다. Fig 35에서 보이듯이 토우피쉬의 거동이 매우 불안정하여 전체적인 궤적이 모선의 궤적을 따라가지 못하는 것을 알 수 있다. 또한 선회가 끝난 이후 병진 속도와 회전속도 (Fig 36 and 37)가 진동하는 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 케이블과 토우피쉬의 상호 작용력에서도 나타나는데 매우 큰 크기의 상호작용령이 토우피쉬의 운동을 강제하는 것을 알 수 있다. 이는 5장 2절에서 다루어진 적응제어 신호의 크기가 매우 커지는 선회가 끝날 때 시스템의 불확실성이 커지는 것에 대해 제어기가 충분히 성능을 발휘하지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 이에 따라 오일러 각의 크기도 매우 커지는 것을 관찰 할 수 있다. 또한 Fig 42와 43에서 보이듯이 적절한 심도제어가 되지 않음을 알 수 있다. 이를 통해 일반적인 고전제어에서 이루어지는 방식으로는 무인 반잠수정의 시스템의 불확실성을 극복할 수 있는 제어기의 설계가 어려움을 알 수 있다.

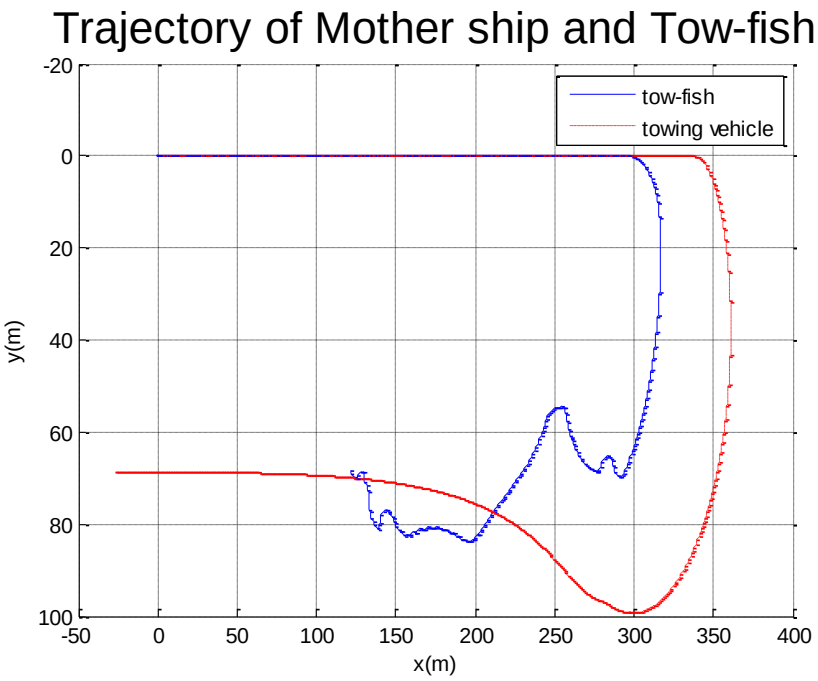


Fig 35 Trajectory of mother ship and towfish: W/O NN

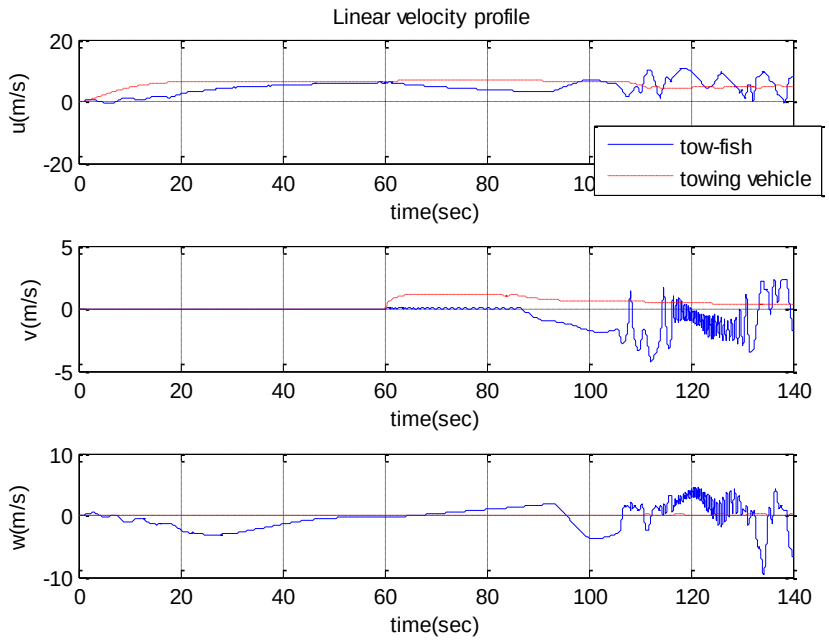


Fig 36 Linear velocity profile: W/O NN

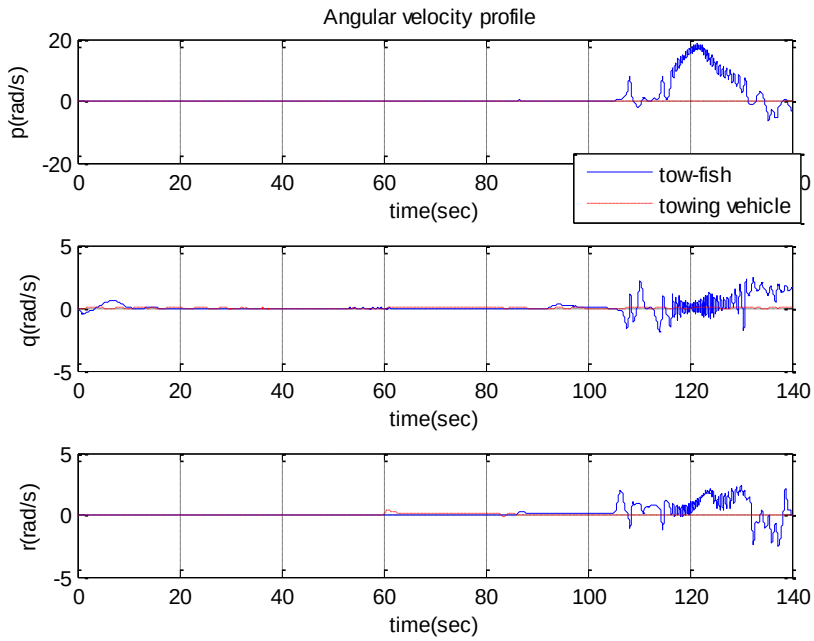


Fig 37 Angular velocity profile: W/O NN

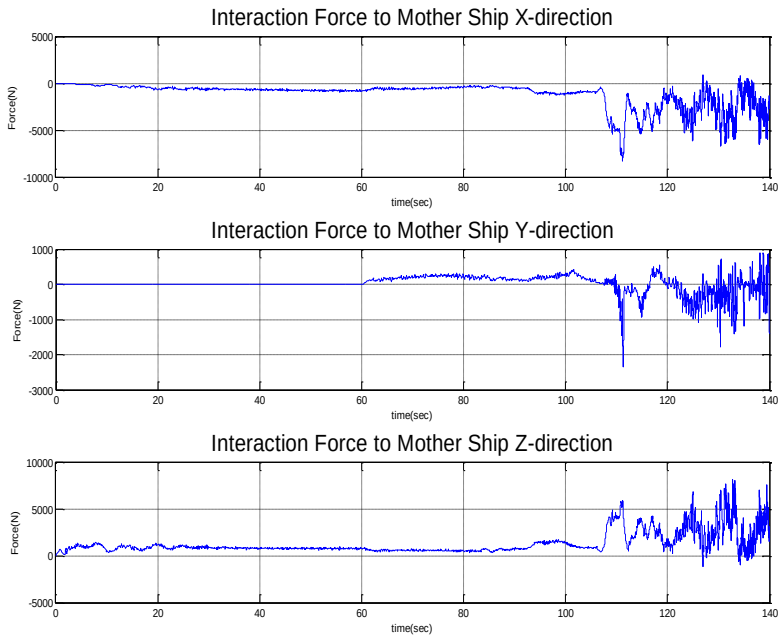


Fig 38 Interaction force to mother ship: W/O NN

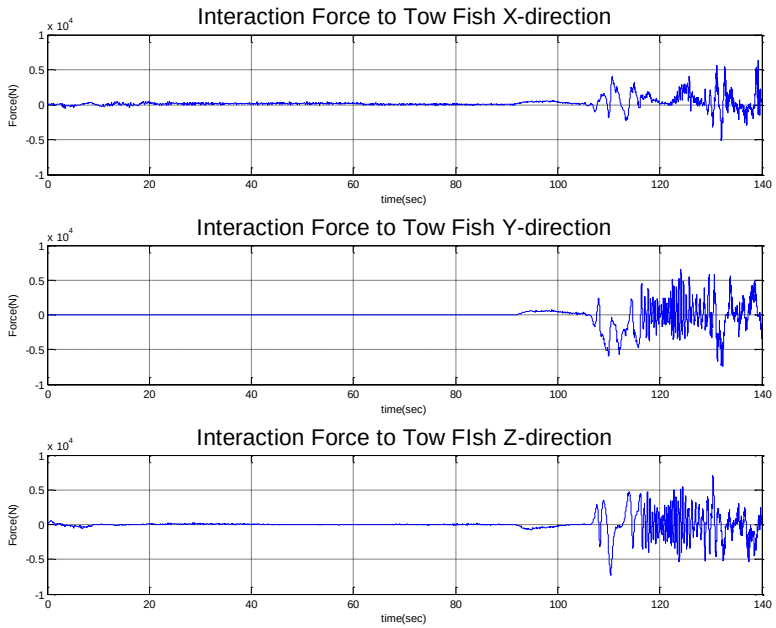


Fig 39 Intraction force to towfish: W/O NN

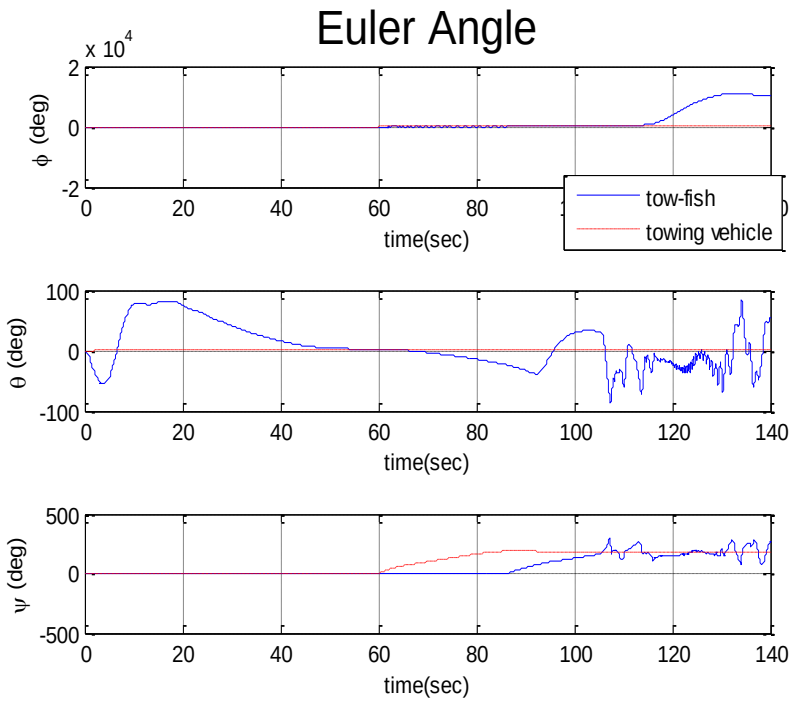


Fig 40 Euler angle: W/O NN

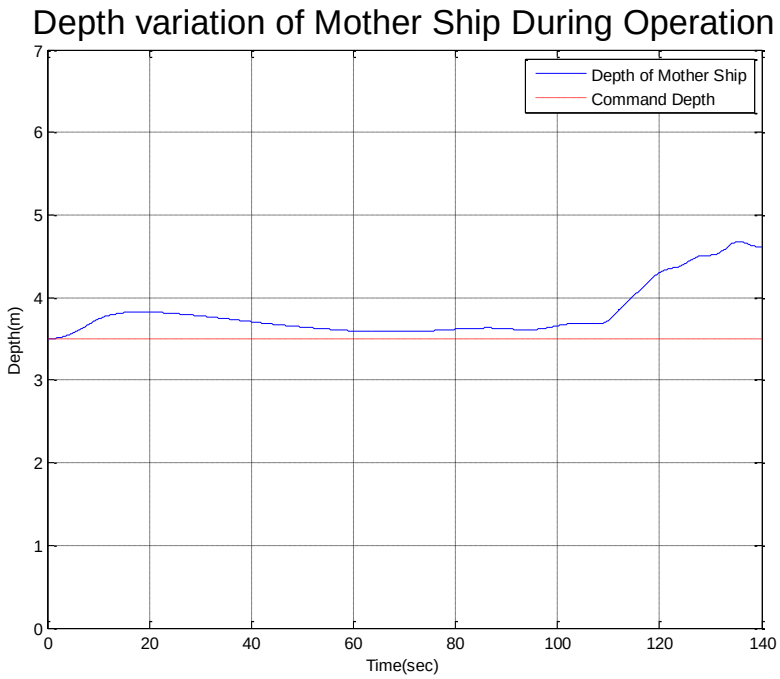


Fig 41 Depth variation of mother ship: W/O NN

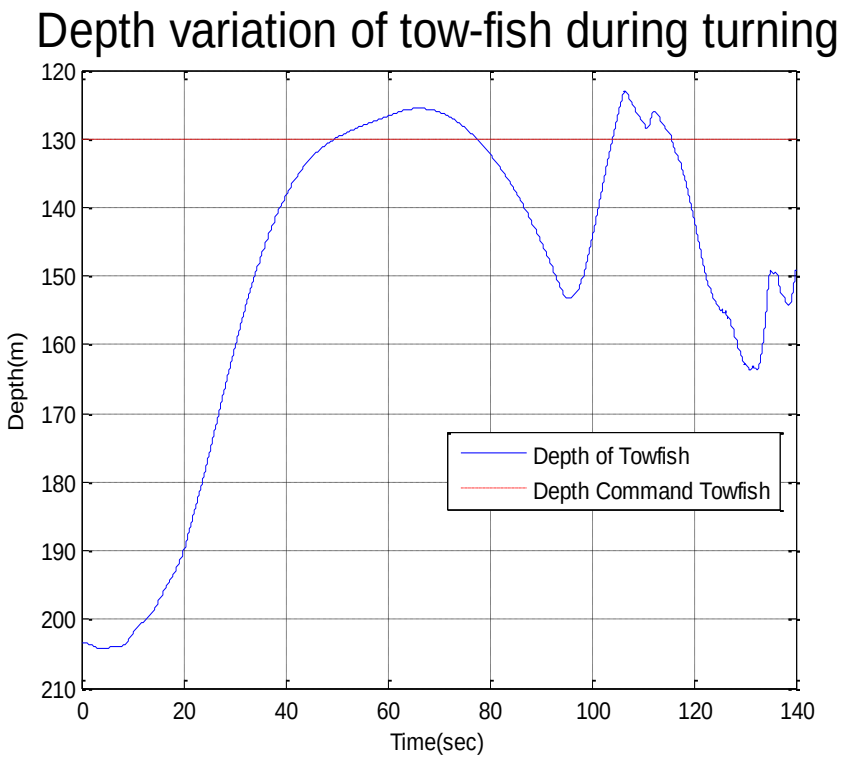


Fig 42 Depth variation of towfish: W/O NN

# 6. 결 론

본 논문에서는 6 자유도 수중 무인 반잠수정 시스템의 다물체 동역학적 모델링과 제어를 다루었다. 모델링 파트에서는 모선과 토우피쉬에 작용하는 유체력을 반영하여 6 자유도 모델링을 수행하였다. 또한 케이블은 ANCF 기반의 케이블 모델링을 수행하였으며, 수중에서 운동하는 케이블의 특성을 고려하여 유체력을 반영하였다. 오픈루프 시뮬레이션 결과 각요소들이 비선형적인 거동을 보였으며, 안정적인 임무 수행을 위한 제어기 설계의 필요성을 알 수 있었다. 또한 케이블을 타고 모선의 운동이 토우피쉬로 전달되는데 약간의 시간 지연이 있었음을 알 수 있었다.

제어 파트에서는 상호작용력과 케이블의 특성등을 제어기 설계에 반영하기 어려운 시스템 특성을 고려하여 신경회로망 기반의 적응제어기법을 사용하여 제어기를 설계하였다. 제어기 설계에서 Inner loop 와 Outer loop 를 구성하여 위치 및 자세를 제어하였으며, 토우피쉬의 위치 제어를 위해 Line of Sight 의

가이던스 기법을 적용하였다. 제어 결과 고전제어에 비해 시스템의 불확실성이 커지는 부분에서 충분히 좋은 성능을 보였다.

# 참고문헌

[1] Berzeri, M & Shabana, AA 2000, Development of simple models for the elastic forces in the absolute nodal co-ordinate formulation, *Journal of Sound and Vibration*, *235*(4), pp. 539-565.

[2] Buckham, B, Nahon, M, Seto, M, Zhao, X, & Lambert, C 2003, Dynamics and control of a towed underwater vehicle system, part I: model development, *Ocean Engineering*, *30*(4), pp. 453-470.

[3] Choc, YI & Casarella, MJ 1971, Hydrodynamic resistance of towed cables, *Journal of Hydronautics*, *5*(4), pp. 126-131.

[4] Curado Teixeira, F, Pedro Aguiar, A, & Pascoal, A 2010, Nonlinear adaptive control of an underwater towed vehicle, *Ocean Engineering*, *37*(13), pp. 1193-1220.

[5] Gerstmayr, J & Shabana, AA 2006, Analysis of thin beams and cables using the absolute nodal co-ordinate formulation. *Nonlinear Dynamics*, *45*(1-2), pp. 109-130.

[6] Gerstmayr, J, Sugiyama, H, & Mikkola, A 2013, Review on the absolute nodal coordinate formulation for large deformation analysis of multi-body systems. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, *8*(3),

[7] Grosenbaugh, MA 2007, Transient behavior of towed cable systems during ship turning maneuvers, *Ocean engineering*, *34*(11), pp. 1532-1542.

[8] Huang, S 1994, Dynamic analysis of three-dimensional marine cables, *Ocean*

*Engineering*, *21*(6), pp. 587-605.

[9] Jun, B.H, Park,J.Y., Lee,F.y., Lee, P.M., Lee,C.M., & Oh, J.H 2009, Development of the AUV 'ISiMI' and a free running test in an Ocean Engineering Basin. *Ocean engineering, 36(1)*, pp.2-14.

[10] Kamman, JW & Nguyen, TC 1990, *Modeling towed cable system dynamics* (No. NCSC-TM-492-88), Naval Coastal Systems Center, Panama City, FL.

[11] Kamman, JW & Huston, RL 2001, Multi-body dynamics modeling of variable length cable systems, *Multi-body System Dynamics*, *5*(3), pp. 211-221.

[12] Kim, DH, Kim, NW, Suk, JW, Kim, BS, 2013, Neural network based adaptive control for a fliying-wing type UAV with wing damage, *Journal of the Korean society for aeronautical and space science*, 41(5), pp. 342-349 (In Korean)

[13] Kim, KW, Lee, JW, & Yoo, WS 2012, The motion and deformation rate of a flexible hose connected to a mother ship. *Journal of mechanical science and technology*, *26*(3), pp. 703-710.

[14] Park, HI, Jung, DH, & Koterayama, W 2003, A numerical and experimental study on dynamics of a towed low tension cable, *Applied Ocean Research*, *25*(5), pp. 289-299.

[15] Shabana, AA & Yakoub, RY 2001, Three-dimensional absolute nodal coordinate formulation for beam elements: theory, *Journal of Mechanical Design*, *123*(4), pp. 606-613.

[16] Shabana, AA, Hussien, HA, & Escalona, JL 1998, Application of the absolute

nodal coordinate formulation to large rotation and large deformation problems, *Journal of Mechanical Design*, *120*(2), pp. 188-195.

[17] Suh, D.C. (2009) *A study on the underwater glider design method based on stability analysis and motion behavior*, A Thesis Submitted in partial fulfilment of the Requirements of Seoul National University for the Degree of Doctor of Philosiphy. Seoul: Seoul National University

[18] Takehara, S, Terumichi, Y, & Sogabe, K 2011, Motion of a submerged tether subject to large deformations and displacements, *Journal of System Design and Dynamics*, *5*(2), pp. 296-305.

[19] Vaz, MA & Patel, MH 1995, Transient behaviour of towed marine cables in two dimensions, *Applied Ocean Research*, *17*(3), pp. 143-153.

[20] Wu, J & Chwang, AT 2001, Investigation on a two-part underwater manoeuvrable towed system, *Ocean Engineering*, *28*(8), pp. 1079-1096.

[21] Yakoub, RY & Shabana, AA 1999, Use of Cholesky coordinates and the absolute nodal coordinate formulation in the computer simulation of flexible multi-body systems, *Nonlinear Dynamics*, *20*(3), pp. 267-282.

[22] Yakoub, RY & Shabana, AA 2001, Three dimensional absolute nodal coordinate formulation for beam elements: implementation and applications, *Journal of Mechanical Design*, *123*(4), pp. 614-621.

[23] Yuan, Z, Jin, L, Chi, W, & Tian, H 2013, Finite difference method for solving the nonlinear dynamic equation of underwater towed system. *International Journal*

*of Computational Methods*.

# Abstract

## Multibody Dynamics Modelling and Control of Semi-Submersible Autonomous Underwater Vehicle

Jinmo Park
Naval Architecture and Ocean Engineering
The Grudate School
Seoul National University

In this paper, we employ a dynamics modeling method for investigating a multi-body dynamics system of semi-submersible autonomous underwater vehicles consisting of a towing vehicle operated near the water surface, a tow cable, and a towfish. The towfish, which is towed by a marine cable for the purposes of exploration or mine hunting, is modeled with a six-degree-of-freedom (6-DOF) equation of motion that reflects its hydrodynamics characteristics. The towing cable, which can experience large displacements and deformations, is modeled using an absolute nodal coordinate formulation. To reflect the hydrodynamic characteristics of the

cable during motion, the hydrodynamic force due to added mass and the drag force are imposed. To verify the completeness of the modeling, a few simple numerical simulations were conducted, and the results confirm the physical plausibility of the model. Based on open loop simulation result, neural network based adaptive controller is designed. In order to show performance designed controller, U-turn motion simulation is conducted. Also, to give appropriate command to towfish, line of sight(LOS) guidance law is applied. The result shows good performance of controller compared classical PD controller's performance.

**Keyword** : Absolute Nodal Coordinate Formulation(ANCF), Semi Submersible Autonomous Underwater Vehicle (Semi submersible AUV), Multibody Dynamics, Flexible body Dynamics, Neural Network based Adaptive Control

**Student Number** : 2013-21070