



공학석사 학위논문

초공동 수중운동체의 천이구간 특성을 고려한 모델링 및 제어 연구

Study on Hydrodynamics and Modeling for a Supercavitating Vehicle in Transition Phase

2013 년 8 월

서울대학교 대학원

산업·조선공학부

김 선 홍

초공동 수중운동체의 천이구간 특성을 고려한 모델링 및 제어 연구

Study on Hydrodynamics and Modeling for a Supercavitating Vehicle in Transition Phase

지도 교수 김 낙 완

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함 2013 년 8 월

서울대학교 대학원

산업·조선공학부

김 선 홍

김선홍의 공학석사 학위논문을 인준함

2013 년 08 월

위 원 장 _____(인)

부위원장 (인)

위 원_____(인)

초 록

초공동 수중운동체는 물과의 마찰저항을 획기적으로 줄일 수 있는 기술이다. 수중운동체를 기포로 감싸게 되면 물과의 접촉면이 줄어들어 마찰저항이 감소한다. 초공동기술은 이러한 기포를 인위적으로 크게 만들어 운동체와 물의 접촉을 완전히 제거함으로써 마찰저항에 의한 추력손실을 없애는 기술이다. 이러한 초공동기술을 통해 수중운동체는 기존의 수중속력한계를 뛰어넘게 된다.

초공동 수중운동체는 발사초기단계부터 천이영역을 거쳐 초공동상태에 이르게된다. 천이영역에서는 공동이 운동체를 완전히 감싸지 않은 상태인 부분공동상태로 존재하게 된다. 부분공동으로 인해 운동체는 물과 접촉하는 액침이 생기게 된다. 완전한 공동의 발달전까지 운동체의 몸체뿐 아니라 캐비테이터, 핀 등에 생기는

i

액침은 계속해서 변하게 되고 이로인한 유체력역시 불안정하게 작용하게 된다.

천이구간에서 작용하는 불안정한 힘을 적절하게 제어하지 않으면 운동체의 상태가 발산하게 되어 목표한 임무를 달성할 수 없게 된다. 따라서 천이구간에서 운동체가 받는 힘을 모델링하는 것과 그 힘을 적절하게 제어하여 운동체를 안정시키는 것이 필요하다. 또한 가능하다면 불안정한 힘을 받는 천이구간 자체를 줄이는 노력이 필요하다.

본 연구에서는 초공동수중운동체의 천이구간 특성을 고려한 모델링을 수행하고 이를 바탕으로 천이구간에서 운동체의 자세 및 심도를 유지할 수 있는 제어기를 설계하였다. 수중운동체의 모델링을 수행하기 위해 6자유도 비선형방정식 이용하였다. 천이구간에서 운동체가 받는 힘은 액침에 의한 유체력, 중력, 캐비테이터 및 핀에 의한 힘이 있다. 각각에 대한 모델링을 수행하고 이를 바탕으로 운동체의 심도 및 자세를 유지하는

ii

제어기를 설계하였다. 제어기는 PID 제어를 이용하였고 이중루프구조를 통해 자세뿐 아니라 심도제어도 가능하게 하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 초공동 수중운동체의 천이구간 특성을 고려한 모델링이 물리적으로 타당함을 확인하였고 제어기를 사용한 제어 시뮬레이션을 통해 초공동 수중운동체가 천이구간에서의 심도유지 및 안정화구간에서 심도변경명령을 추종하는 것을 확인하였다.

주요어: 초공동 수중운동체, 천이영역, 유체력 모델링, 동역학 모델링, 부분공동, 환기공동, 심도제어

학 번 : 2011-23455

목 차

1. 서 론1	
2. 초공동 수중운동체 모델링6	
2.1. 좌표계 설정6	
2.2. 6자유도 운동방정식8	
2.3. 공동 모델링11	
2.4. 캐비테이터 모델링17	
2.5. 핀 모델링19	
2.5.1. 핀 액침 깊이23	
2.6. 운동체 몸체에 작용하는 유체력27	
2.7. 마찰저항 감소 모델링	
3. 제어기 설계35	
4. 시뮬레이션40	
4.1. Open-loop 시뮬레이션42	

4	4.2. Closed-loop 시뮬레이션	. 45
5.	결 론	. 58
6.	참고문헌	.62
AE	BSTRACT	.66

표 목차

Table 1	1. System	n parameters	5	 	9
Table 2	2. Trim v	alues		 	50

그림 목차

Fig.1	Coordinate system	. 7
Fig.2	Supercavitating vehicle	10
Fig.3	Cavity profile according to cavitation nember varying	16
Fig.4	Fin coordinate notation	19
Fig.5	Fin angle of attack and deflection angle	21
Fig.6	Relative position of vehicle and cavity centerline	24
Fig.7	Buoyancy effect causing by time delay	25
Fig.8	Supercavitating underwater vehicle	29

Fig.9 The percentage of drag reduction versus the volumetric gas injection rate per unit span. Figure taken from Elbing et Fig.10 The gas injection rate versus free-stream speed. Fig.12 Open-loop time response of position and pitch angle.. 42 Fig.13 Open-loop time response of velocity and pitch rate 43 Fig.14 Closed-loop time response of position and pitch angle 46 Fig.15 Closed–loop time response of velocity and pitch rate. 48 Fig.16 Cavity radius at fin and cavity maxium radius/length ... 51 Fig.17 Fin immersion depth and frictional drag reduction....... 52 Fig.19 Forces and moment generated by cavitator in body

Fig.20	Forces	and	moment	generated	by	fin	in	body	fixed
frame									57

1. 서론

기존의 어뢰와 같은 수중운동체는 물과 완전히 접촉한 상태로 운동하게 된다. 물속에서 운동체에 작용하는 마찰저항은 속도의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 속도를 증가시키기 위해 필요한 추진력도 속도의 제곱에 비례해서 증가하게 된다. 이러한 이유 때문에 수중운동체는 운동속력의 한계가 존재한다. 하지만 군사적 작전에서의 임무수행능력은 수중에서의 운동속력이 좌우하기 때문에 높은 속력을 얻기 위한 추진장치에 대한 연구와 더불어 수중운동체가 받는 항력을 줄이는 연구가 전세계적으로 활발하게 수행되어 왔다. 1970년대 이전에는 수중운동체의 속력을 증가시키기 위한 방법으로 추진력의 증가를 주로 연구하였다. 프로펠러를 이용한 추진방법에서 로켓추진을 이용한 방법까지 추진력을 향상시키는 방법들이 개발되어 왔지만 강한추진력을 낼수록 속도는 빨리지지만 에너지소모는 커지게되고 결과적으로

1

수중운동체가 이동할 수 있는 거리는 줄어들게 되었다. 1970년대에 들어 러시아과학자들은 수중운동체의 속력을 높이기 위한 새로운 접근방법을 제시하였다. 추진시스템의 향상이 아닌 물과의 접촉으로 인한 항력 자체를 줄이는 방법이다. 수중운동체를 공동(cavitation)으로 감싸 물과의 접촉면을 줄이면 마찰저항 역시 줄어들게 된다. 이러한 공동을 인위적으로 크게 만들어 물과의 접촉면을 완전히 제거하는 현상을 초공동(supercavitation)이라고 한다. 초공동 현상을 이용하면 기존의 수중운동체가 갖는 운동속력의 한계를 극복할 수 있어 군사선진국들을 중심으로 초공동 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 실제로 러시아에서 개발한 초공동 수중로켓 Shkval 은 운동속도가 100 m/s 에 이르는 것으로 알려져 있다(나영인, 2011).

초공동 수중운동체는 완전유체접촉(fully-wetted)상태에서 천이영역을 거쳐 초공동상태로 전환하게 된다. 천이영역에서는 물과의 접촉이 부분적으로 이루어 지고 저항, 부가질량, 부력 등이 비대칭적으로 작용하기 때문에 운동체가 받는 유채력을 적절히 제어하지 않으면 초공동 상태에 도달하기 전에 운동체가 발산할 수 있다.

최근까지 초공동 수중운동체의 모델링과 그에 관련된 많은 연구들이 진행되어 왔다. 초공동 수중운동체에 관련된 대표적인 분야는 동역학 모델링과 제어에 관한 분야이다. Vanek (Vanek et al., 2007), Dzielski (Dzielski et al., 2003, 2011), Hui (Hui Fan, 2011) 등은 공동이 형성될 수 있는 충분한 속력을 가지고 초공동상태에 도달해 있는 수중운동체의 모델링 및 제어와 관한 연구를 수행하였다. 하지만 발사부터 시작하여 천이영역을 거쳐 초공동상태로 진행하는 과정을 포함한 모델링은 수행되지 않았다. 또다른 분야는 초공동 수중운동체의 유동에 관한 연구이다. Axisymmetric body 에 생성되는 부분공동(partial cavity)에 대한 연구가 Varghese 에 의해 이루어졌다(Varghese, 2003). 이 연구에서는 steady potential-flow boundary-element 방법을 용하였다. 최근 중국에서는 천이영역에서 환기공동(인위적으로 공동을 형성하는 방법)에 대한 수치해석 연구가 활발히 진행되었다.

3

Wang 은 비정상류에서 환기공동의 가스누수율에 과한 실험식을 개발하고 이를 실험과 비교하여 타당성을 증명하였다(Wang Zou, 2010). 또한 Xiang 은 환기로 인한 부분공동이 마찰저항감소를 일으키는 메커니즘을 수치해석적인 방법을 통해 연구하였다(M.Xiang, 2011). 초공동 유동에서뿐만 아니라 기포가 발생하는 일반적인 유동 상황에서 마찰저항감소에 관한 연구가 Elbing 에 의해 수행된바 있다(Elbing et al., 2008).

본 연구에서는 천이영역의 특성을 고려한 초공동 수중운동체의 모델링 및 제어에 관한 연구가 수행되었다. 천이영역에서의 초공동 수중운동체의 모델링은 크게 공동의 모델링, 공동을 발생시키는 캐비테이터의 모델링, 운동체 후부에 위치하여 제어력을 발생시키는 핀의 모델링 그리고 유체에 의하여 운동체가 받는 유체력 모델링으로 나눌 수 있다. 공동의 모델은 비교적 낮은 속도구간인 천이영역에서도 공동을 형성할 수 있는 환기공동모델을 사용하였고 공동의 동역학 모델링을 통해 운동체와 물의 접촉 및 접촉부위에 작용하는 유체력을 모델링하였다.

4

천이영역을 지나 초공동 상태에 도달하기까지 운동체가 발산하지 않게 하기 위하여 운동체의 심도 및 자세를 유지하도록 제어기를 설계하였다. 제어기는 PID 제어기를 사용하였으며 캐비테이터를 제어입력으로 사용하였다.

2. 초공동 수중운동체 모델링

초공동 수중운동체의 운동방정식은 6자유도로 표현이 된다. 초공동 수중운동체가 받는 힘과 모멘트를 결정하기 위하여 운동체를 구성하는 주요한 부분들에 대한 모델링이 선행되었다. 모델링에는 초공동 수중운동체의 가장 중요한 특징이라고 할 수 있는 공동의 모델링과 초공동 수중운동체의 제어판인 핀과 캐비테이터의 모델링이 수행되었다. 또한 천이구간에서 부분공동에 의하여 침수된 부분에 작용하는 마찰저항에 대한 모델링이 고려되었다.

2.1. 좌표계 설정

본 연구에서는 Fig. 1 와 같이 관성좌표계인 지구고정좌표계 $O-X_FY_FZ_F$ 와 비관성좌표계인 몸체고정좌표계 $O-X_BY_BZ_B$ 를 사용한다. 지구고정좌표계를 기준으로 운동체가 X,Y,Z 축을 기준으로 회전한 Euler angle 을 각각 φ, θ, ψ 로 정의한다. 몸체고정좌표계는 운동체의 전진방향이 +X 축, 연직 아래 방향이 +Z 축, Z 축과 X 축의 외적 방향을 +Y 축으로 두었다. 지구고정좌표계는 X 축과 Y 축이 수면과 일치하게 두었으며 수심이 깊어지는 연직 아래방향을 +Z 축으로 두었다. 지구고정좌표계와 몸체고정좌표계 사이의 좌표변환은 다음의 식을 따른다.



Fig.1 Coordinate system

 $\dot{\eta} = J(\eta)v$

(1.1)

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta & 0 & 0 & 0 \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\theta & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\phi c\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\phi / c\theta & c\phi / c\theta \end{bmatrix}$$
(1.2)

s,c,t,는 각각 sin,cos,tan 함수를 나타내며 η와 ν는 각각 6자유도 위치벡터와 속도벡터이다. η 는 지구고정좌표계를 기준으로 기술되었고 ν는 몸체고정좌표계를 기준으로 기술되었다.

$$\eta = \begin{bmatrix} x & y & z & \phi & \theta & \psi \end{bmatrix}^T$$
(1.3)

$$\boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} & \boldsymbol{v} & \boldsymbol{w} & \boldsymbol{p} & \boldsymbol{q} & \boldsymbol{r} \end{bmatrix}^T \tag{1.4}$$

2.2. 6자유도 운동방정식

본 연구에서는 Dzielski 와 Kurdila(2003)의 초공동 수중운동체 제원을 사용하였고 이를 Table1에 나타내었다. 운동체의 밀도는 일정한 값인 ρ_b 이고 물의 밀도 ρ 와의 비율을 $m=\rho_b/\rho$ 으로 정의한다. 운동체의 질량 M 및 관성모멘트와 무게중심의 위치는 다음과 같이 표현된다.

$$M = \frac{7}{9}(m\rho\pi)R^2L \tag{2.1}$$

$$I_{yy} = \frac{11}{60} (m\rho\pi) R^4 L + (m\rho\pi) R^2 L^3$$
(2.2)

$$x_g = -\frac{17}{28}L$$
 (2.3)

Parameters	Description	Value and Units	
g	Gravitational	9.81 m/s^2	
	acceleration		
т	Density ratio ($ ho_b$ / $ ho$)	2	
R_n	Cavitator radius	0.0191 m	
R	Vehicle radius	0.0508 m	
S_{f}	Fin span length	0.1 <i>m</i>	
L	Vehicle Length	1.8 <i>m</i>	
$C_{_{x0}}$	Drag coefficient	0.82	

Table 1. System parameters

초공동 수중운동체의 제어판은 전반부에 위치한 캐비테이터와 운동체 후부에 위한 4개의 핀으로 이루어져 있다. 캐비테이터는 피치축 방향으로 1자유도 운동을 할 수 있고 4개의 핀 역시 각각의 축을 중심으로 한 1자유도 운동을 할 수 있다. 초공동 수중운동체의 형상을 Fig.2에 나타내었다. 초공동 수중운동체가 받는 힘과 모멘트는 캐비테이터와 핀에서 발생된 제어력과 Thruster 에 의한 힘, 중력 및 물에 잠긴 몸체에 작용한 유체력 등이 있다. 초공동 수중운동체의 비선형 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.



Fig.2 Supercavitating vehicle

$$M\begin{bmatrix} \dot{u} + qw - vr\\ \dot{v} + ur - pw\\ \dot{w} + pv - uq \end{bmatrix} = F_{Thrust} + F_{Cavitator} + F_{Fins} + F_{gravity} + F_{wet}$$

$$\begin{bmatrix} I_x \dot{p} + qr(I_z - I_y)\\ I_y \dot{q} + qr(I_z - I_z)\\ I_z \dot{r} + pq(I_y - I_x) \end{bmatrix} = M_{Thrust} + M_{Cavitator} + M_{Fins} + M_{wet}$$
(3)

여기서, F_{Thrust} 는 추력, $F_{Caviator}$ 는 캐비테이터에 의한 힘, F_{Fins} 는 핀에 의한 힘, $F_{gravity}$ 는 중력, F_{wet} 는 운동체의 침수된 부분에 작용하는 힘을 의미한다. 또한 모멘트 역시 같은 첨자를 갖는다.

2.3. 공동 모델링

공동은 초공동 수중운동체의 동역학적 특징을 나타내는 가장 중요한 요소이다. 수중운동체 주변의 공동으로 인해 핀과 운동체의 액침이 결정된다. 운동체 앞쪽에 달린 캐비테이터에 의해 생성된 공동은 캐비테이터의 운동방향과 수직인 방향으로 원을 그리며 형성된다. 공동의 전체적인 형태는 이 원을 캐비테이터 궤적에 따라 적분하여 얻어진다. 중요한 사실은 공동은 생성된 이후에는 운동체의 상태와 독립적으로 팽창/수축한다는 점이다. 따라서 공동의 동역학을 이해하기 위해서는 캐비테이터의 현재 상태뿐 아니라 과거의 상태 또한 고려해야한다는 점이다. 공동의 동역학적 특징을 결정하는 중요한 parameter 는 2가지가 있다. 첫 번째는 공동수 *σ_c*이고 두 번째는 Froude number *Fr*이다. 이는 다음의 식으로 정의된다.

$$\sigma_c = \frac{p_\infty - p_c}{0.5\rho V^2} \tag{4.1}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gd_c}} \tag{4.2}$$

p_∞ 와 *p_c* 는 각각 ambient preesure 와 공동내 압력이다. *d_c* 는 캐비테이터의 지름이고 *V* 는 운동체 속도의 크기이다. 공동수는 공동이 얼마나 잘 형성되는지에 대한 지표가 된다. 낮은 속도와 공동내 압력이 작은 경우, 즉 공동수가 비교적 큰 값을 가질 때에는 공동은 잘 형성되지 않으며 그 크기또한 작다. 반대로 높은 속도와 공동내 압력이 큰 경우에는 공동수는 작아지고 공동의 크기나 길이는 큰 값을 가진다. 따라서 공동수는 공동이 얼마나 잘 일어나는지에 대한 지표라고 할 수 있다. Froude number 는 공동에 미치는 중력의 영향을 나타낸다. 공동은 물 안에 존재하기 부피만큼의 부력을 받게 된다. 이 때문에 공동은 형성된 이후 -Z 축 방향으로 올라가게 된다. 운동체의 속력이 큰 경우에는 공동이 부력에 의해 영향을 받는 시간이 줄어들기 때문에 중력의 영향이 작아지게 된다. 자연적으로 발생하는 공동 현상은 수중운동체에서 흔히 볼 수 없는 비교적 빠른 속력에서 일어난다. 수중운동체가 빠른 속력에 도달하기 위해서는 물에 의한 마찰저항을 줄여야 하기 때문에 공동의 형성이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 비교적 낮은 속도에서도 신속하게 공동을 형성하기 위하여 환기공동(ventilated cavitation)모델을 도입하였다. 환기공동은 캐비테이터 부근에서 가스 또는 공기를 인위적으로 분사하여 공동을 형성시키는 것이다. 가스의 분사로 인하여 공동의 압력이 올라가고 이는 공동수의 크기를 작게 하여 공동을

13

발달시킨다. 공동의 profile 에 대한 모델링은 Logvinovich(1972), Garabedian(1956), Savchenko(1998), May(1975) 등 여러 과학자에 의해 행해졌다. 본 논문에서는 Savchenko 의 공동 모델을 이용하였고 이 모델은 낮은 속도 영역에서도 공동의 반지름을 표현할 수 있다. Savchenko 의 공동모델은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{c}(x) = R_{n} \left(2 \sqrt{\frac{c_{x0}}{\ln(1/\sigma_{c})}} \frac{x}{R_{n}} - \frac{\sigma_{c}}{\ln(1/\sigma_{c})} \frac{x^{2}}{R_{n}^{2}}\right)^{1/2}$$
(5)

여기서, *R*는 캐비테이터 궤적에 수직인 방향으로 형성되는 공동의 반지름이며 이는 캐비테이터의 현재 위치로부터 떨어진 거리 x 에 따라 변화한다. 4 가지 모델에 대하여 공동수의 변화에 의한 공동의 profile 을 Fig.3에 나타내었다. 공동수는 0.05, 0.1, 0.2의 값을 가진다. 4가지 모델 모두 비슷한 궤적을 보여준다. 다만 Logvinovich 의 모델의 경우만 공동의 가장 앞부분의 반지름이 다른 모델에 비하여 큰 값을 가진다. 공동의 profile 을 구하기 위해서는 식(5)에서 보듯이 공동수가 필요하다. 환기공동의 경우 공동수를 구하는 식은 Logvinovich(1975)의 식을 따랐고 이를 식(6)에 나타내었다.

$$\overline{Q}_{in} = \frac{0.27}{\sigma_c(\sigma_c F r^4 - 2)} \tag{6.1}$$

여기서 \bar{Q}_{μ} 은 가스공급율계수이며 식 (6.2)로 정의된다.

$$\overline{Q}_{in} = \dot{Q}_{in} / 4(VR_n^2) \tag{6.2}$$

Q_m는 가스공급율을 나타내며 단위는 m³/s 이다. 가스공급율을
정해주므로써 공동수가 식(6.1)에 의해 결정되고 식(5)에 의하여
공동의 profile 을 계산할 수 있다. 만약 속도가 일정한 경우
Froude number 역시 일정하고, 이 때 가스공급율이 커질수록
공동수는 작아져 공동의 크기는 증가하게 된다.



Fig.3 Cavity profile according to cavitation nember varying

캐비테이터는 디스크 형태로 피치축(x-z 축)으로만 움직이는 1자유도 운동을 한다. 캐비테이터는 기본적으로 물과의 접촉을 통해 항력 및 양력을 발생시켜 운동체를 제어하고 공동을 발생시키는 역할을 한다. 캐비테이터에 의한 항력계수는 공동수에 의해 결정되며 본 논문에서는 Kirschner(2002)에 의한 실험값인 0.82를 사용하였다. 캐비테이터에 의한 항력은 받음각 에 의해 바람좌표계에서의 항력과 양력으로 나누어 지고, 바람좌표계와 운동체 몸통좌표계의 좌표변환을 통해 운동체가 받는 힘으로 변환된다. 캐비테이터가 받는 유체력을 식(7)에 나타내었다.

$$F_{c} = \frac{1}{2} \rho V_{c}^{2} A_{c} C_{x0} (1+\sigma)$$

$$F_{cav} = \begin{bmatrix} -F_{c} \cos(\alpha_{c}) \\ 0 \\ -F_{c} \sin(\alpha_{c}) \end{bmatrix}$$

$$(7.1)$$

$$\alpha_c = \tan^{-1}(\frac{w}{V}) + \delta_c \tag{7.3}$$

F_{cav}는 캐비테이터가 받는 유체력을 몸체고정좌표계에서 표현한 것이다. A_c는 캐비테이터의 면적이고 V_c는 캐비테이터의 속도이다.
α_c은 캐비테이터의 받음각이고 이는 캐비테이터 명령각 δ_c 와 heave 속도 w 에 의해 결정된다. 따라서 캐비테이터의 명령각이
0이더라도 운동체의 상태에 따라 받음각이 생기게 되면 양력이 발생할 수 있다. 캐비테이터에 걸리는 Added mass 와 damping 에
의한 영향은 Uhlman 의 계수(Uhlman, 2001)를 사용하였다.

핀은 Fig.4처럼 수중운동체 뒷부분에 열 십자(+)모양으로 4개가 달려있으며 수평축 핀을 elevator, 수직축 핀을 rudder 로 명명한다. 핀은 물과의 접촉으로 인해 양력과 항력을 발생시켜 수중운동체를 제어하는 역학을 한다. 운동체의 무게중심으로부터 핀의 뿌리까지 거리는 l_f 로 표현되며 그 길이는 $l_f = 10/28L$ 이다.



Fig.4 Fin coordinate notation

핀은 물과의 접촉이 부분적으로 일어난다. 핀의 액침 깊이는 공동의 크기 및 길이, 즉 공동의 형상에 다라 좌우된다. 핀에 의한 힘과 모멘트는 식(8)과 같이 표현된다. 힘과 모멘트계수는 Kirschner 의 data(Kirschner, 2002)를 보간법을 사용하여 구하였다.

$$F_{f} = \frac{1}{2} \rho V_{f}^{2} S_{f}^{2} \begin{pmatrix} C_{x}(\alpha_{f}, d_{f}) \\ C_{y}(\alpha_{f}, d_{f}) \\ C_{z}(\alpha_{f}, d_{f}) \end{pmatrix}$$

$$M_{f} = \frac{1}{2} \rho V_{f}^{2} S_{f}^{3} \begin{pmatrix} C_{mx}(\alpha_{f}, d_{f}) \\ C_{my}(\alpha_{f}, d_{f}) \\ C_{mz}(\alpha_{f}, d_{f}) \\ C_{mz}(\alpha_{f}, d_{f}) \end{pmatrix}$$

$$(8.1)$$

여기서 V_f는 핀고정좌표계의 중심에서의 속도벡터, S_f는 핀 span length 이다. 핀고정좌표계의 중심은 핀이 받는 유체력의 압력중심에 위치한다. Fig.4는 수직핀 Rudder 의 경우 핀고정좌표계와 몸체고정좌표계와의 관계를 나타낸다. Z 축은 서로 일치하지만 핀 명령각(δ_f)이 있는 경우에는 X 축과 Y 축은 Z 축을 기준으로 δ_f 만큼 회전하게 된다. 4개의 핀은 모두 핀고정좌표계를 가지고 있으며 명령각이 없는 경우 몸체고정좌표계와 동일한 좌표계를 갖는다. 핀에의한 힘과 모멘트는 좌표변환을 통해 핀고정좌표계에서 몸체고정좌표계로 변환된다. 식(8)에서 볼 수 있듯이 핀에 작용하는 힘과 모멘트는 핀의 받음각(α_f)과 액침깊이(d_f)에 의해 결정된다.



Fig.5 Fin angle of attack and deflection angle

받음각은 핀고정좌표계의 중심에서의 속도를 이용하여 구할 수 있다. 핀고정좌표계의 중심에서의 속도벡터와 받음각은 식(9.1),(9.2)에 의해 구할 수 있다.

$$V_{f} = \begin{bmatrix} u_{f} \\ v_{f} \\ w_{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \vec{l}_{fin}$$
(9.1)

$$\alpha_{f,rudder} = \arctan(v_f / u_f) + \delta_{rudder}$$

$$\alpha_{f,elevator} = \arctan(w_f / u_f) + \delta_{elevator}$$
(9.2)

*i*_{fm} 은 무게중심으로부터 핀고정좌표계중심까지의 위치벡터이다.
Rudder 와 elevator 는 90도만큼 차이가 있기 때문에 받음각이
서로 다른 방식으로 구해진다. Rudder 의 경우 받음각은 양력이
핀고정좌표계의 X-Y 평면에서 발생하며 elevator 는 XZ 평면에서 발생한다.

핀에 의해 발생하는 힘과 모멘트는 앞에서 언급한바와 같이 받음각과 핀의 액침깊이에 따라 결정된다. 핀이 부분적으로 액침이 일어났을 때 핀에서 발생하는 힘과 모멘트는 2가지 특징을 가지고 있다. 물에 잠겨 액침이 일어난 부분은 식 (8.1), (8.2)와 같은 힘과 모멘트를 발생시키는 반면 액침이 되지 않은 부분, 즉 공기에 노출되어 있는 부분은 힘과 모멘트를 발생시키지만 그 크기는 매우 작다. 그 이유는 물에 비하여 공기의 밀도가 현저히 낮고 액침이 완전히 일어나지 않은 부분의 유체의 구성이 대부분 공기 또는 환기에 의한 가스로 이루어져 있기 때문이다. 본 연구에서는 물에 완전히 잠겨있는 부분에서만 핀의 양력과 항력이 발생한다고 가정하였다. 핀의 액침은 캐비테이터의 궤적에 따라 형성되는 공동의 profile 에 의해 결정된다. 캐비테이터의 궤적중에서 핀의 뿌리부분을 지난 궤적에서 생성된 공동의 반지름과 핀의 길이를 비교하면 핀의 액침을 구할 수 있다. 하지만 여기에 더하여 중력의

23

효과를 고려해야 한다. 캐비테이터에서 생성된 공동은 압력에 의해 부력이 발생되고 시간이 지날수록 연직면 위로 상승한다. 따라서 공동의 중심선을 구하기 위해서는 관성좌표계, 즉 지구고정좌표계에서 캐비테이터의 궤적을 구해야 한다. Fig.6은 운동체 뒤에서 바라본 공동의 중심과 부력에 의한 효과를 나타내고 있다. 파란점선은 핀의 뿌리부분에서 바라본 공동의 단면이고 검은실선은 운동체의 몸통이다. 4개의 핀 중에서 공동의 안으로 들어와 액침이 일어나지 않은 부분은 하늘색 선으로, 액침이



Fig.6 Relative position of vehicle and cavity centerline

일어난 부분은 빨간색 선으로 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 핀의 액침은 운동체의 중심과 핀의 중심을 통해 계산할 수 있다.

Fig.7은 캐비테이터에서 생성된 공동이 핀의 뿌리부분에 오면서 부력에 의해 상승하는 모습을 보여준다. 공동의 중심은 캐비테이터의 궤적과 일치한다. 하지만 공동이 생성되어 핀의 뿌리 부분까지 오는데 걸리는 시간 7 가 지남에 따라 공동은 부력의 영향으로 상승하게 된다. 따라서 공동의 중심은 시간 7 초 전의 캐비테이터 궤적에 부력의 효과를 더해준 값이 된다. 이를 식 (10)에 나타내었다.



Fig.7 Buoyancy effect causing by time delay
$$X_{cav,E}(t-\tau) = X_{c.g,E}(t-\tau) + R_{B\to E}(t-\tau) \begin{bmatrix} l_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.5a_{buoy}\tau^2 \end{bmatrix}$$
(10)

여기서 $X_{cav,E}$ 는 핀의 뿌리 부분에 있는 공동의 중심선의 위치이고 $X_{c,g,E}$ 은 무게중심의 좌표이다. 모든 좌표는 지구고정좌표계에서 바라본 것이다. $R_{B\to E}$ 는 몸체고정좌표계와 지구고정좌표계 사이의 변환행렬이다. 공동의 중심선은 시간 τ 초 전의 캐비테이터의 좌표(우변의 1,2번째 항)에 부력에 의한 영향(3번째 항)을 더해준 값이다. a_{buoy} 는 물속에서 공동의 가속도를 나타내는 실험상수로써 그 값은 8.29이다. 식(10)을 통해 공동의 중심선을 구하고 그 때의 공동의 반지름과 핀의 길이를 비교하여 핀의 액침을 구할 수 있다.

2.6. 운동체 몸체에 작용하는 유체력

초공동 수중운동체는 완전유체접촉 상태를 지나 천이영역을 거쳐 초공동상태로 이르게 된다. 이 때 수중운동체는 물과의 접촉이 일어나고 이로 인해 유체력을 받게 된다. 초공동상태에 이르게 되면 캐비테이터를 제외하고는 물과 접촉하는 부분이 완전히 제거되면서 이러한 유체력이 작용하지 않게 된다. 운동체 액침부위에 작용하는 유체력은 크게 부력에 의한 힘과 모멘트, 압력저항 및 마찰저항, 부가저항 및 댐핑에 의한 영향 등이 있다. 압력저항은 운동체 액침 부위의 normal pressure 를 적분하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 액침된 부위에 작용하는 압력저항은 캐비테이터에 걸리는 압력저항에 비해 매우 작기 때문에 무시하였다. 또한 부가저항 및 댐핑에 의한 영향 또한 무시하였다. 따라서 남는 유체력은 부력 및 마찰저항이다. 부력에 의한 힘과 모멘트는 다음과 같이 표현된다.

$$B = \rho g V_{wet}$$
(11.1)

$$F_B = \begin{bmatrix} -B \sin \theta \\ B \cos \theta \sin \phi \\ B \cos \theta \cos \phi \\ y_b B \cos \theta \cos \phi - z_b B \cos \theta \sin \phi \\ -z_b B \sin \theta - x_b B \cos \theta \cos \phi \\ x_b B \cos \theta \sin \phi + y_b B \sin \theta \end{bmatrix}$$
(11.2)

부력의 크기는 B 이고 이는 운동체의 액침 부피와 비례한다. [x, y, z,] 는 무게중심에서 부력중심까지의 거리벡터이다. 천이영역에서는 부력중심이 무게중심보다 뒤에 위치하고 있기 때문에 부력에 의해 음의 종동요 모멘트를 발생시키며 운동체의 안정성을 떨어뜨린다. 따라서 초공동 수중운동체의 천이영역에서는 환기공동을 통해 초공동상태에 신속히 도달하는 것과 적절한 제어를 통해 운동체의 자세를 제어하는 것이 중요하다. 액침 부위에 작용하는 마찰저항은 ITTC Line(Newman, 1977)을 통해 구한 마찰저항계수를 이용하여 계산할 수 있다.

$$D_{F} = \frac{1}{2} \rho S_{wet} V^{2} C_{F}$$

$$C_{F} = \frac{0.075}{(\log_{10} \text{Re} - 2)^{2}}$$
(12)

D_F 는 마찰저항의 크기를 나타내며 C_F 는 마찰저항계수이다. 마찰저항은 속도가 커지면 증가하고 액침부위의 면적이 커지면 역시 증가한다. Re는 Reynold number 이다. 마찰저항은 운동체의 운동방향과 반대로 작용한다. ρ는 마찰이 일어나는 유체의 밀도를 나타내며 여기에서는 물의 밀도이다. Fig.8과 같이 공동 후류의 유체는 완전한 물이 아닌 공기와 물이 섞여있는 형태를 띈다. 따라서 마찰저항은 유체의 성분 변화로 인하여 감소하는 경향을 보이게 된다. 이에 대해서는 다음절에서 다룬다.



Fig.8 Supercavitating underwater vehicle, picture taken from

Wosnik(2003)

마찰저항의 감소는 공동 후류에서 떨어져 나온 기포에 의한 유체의 성분변화로 인해 생겨난다. 공동에서 떨어져나온 기포의 시간당 부피를 가스누수율로 정의하였다. 가스누수율은 Logvinovich 의 실험식(Logvinovich, 1973)을 통해 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_{out} = \gamma V_{\infty} S_c \left(\frac{\beta}{\overline{\sigma}} - 1\right) \tag{13}$$

여기서 γ 는 실험상수로써 0.01~0.02의 값을 가진다. 본 연구에서는 중간값인 0.015를 사용하였다. 또한 S_c 는 공동의 중앙단면의 면적이다. 이는 식(5)를 통하여 구할 수 있다. β 는 공동수의 비를 나타내는 dynamics parameter 이고 식(14)와 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{\sigma_v}{\sigma_c} \tag{14}$$

공동의 크기 및 길이를 정의하는데 이용되는 공동수는 σ_c 이고 σ_v 는 natural cavitation number 로써 식(4.1)의 공동내 압력 P_c 대신 유체의 증기압 P_v 를 이용하여 구할 수 있다. $\bar{\sigma}$ 는 initial cavitation number σ_0 와 공동수의 비를 나타내는 변수로써 $\bar{\sigma} = \sigma_c / \sigma_0$ 로 표현된다. 본 연구에서는 식(13)에 의하여 공동에서 누수되는 기포가 공동의 후류에서 물과 섞여 마찰저항을 감소시키는 요인으로 보았다. 이는 물속에서 운동하는 물체에 기포를 공급하여 마찰저항을 감소하는 것과 동일하고 따라서 공동에서 누수되는 가스누수율은 공동 후류에 공급하는 가스공급율과 같다. 수중운동체에 가스를 공급할 때 일어나는 마찰저항의 감소 모델은 Elbing 의 실험(Elbing et at., 2009)을 통해 구할 수 있다. Elbing 의 연구에서는 마찰저항의 감소율을 공급하는 가스의 양과 물체의 속도에 따라 분류하였다. Fig.9는 공급하는 가스의 부피에 따른 저항의 감소율을 보여준다. Elbing 의 실험은 마찰저항의 감소를 측정하기 위해 물속에 plate 를 넣어 plate 앞에서 기포를 불어주고 저항을 측정하였다. Plate 가 아닌

실린더나 구를 이용하여 측정하면 마찰저항 이외에 다른 저항성분이 섞여서 측정되기 때문에 plate 를 이용하였다. 따라서 plate 의 단위길이에 공급되는 가스의 양을 표현하기 위하여 plate 의 길이로 가스공급율을 나누어주었다. Fig.9의 x 축은 가스공급율을 plate 의 길이로 나눈 값이다. y 축은 마찰저항의 감소를 %로 나타내었다. Elbing 의 연구에 따르면 마찰저항의 감소는 3가지 영역으로 나누어진다.



Fig.9 The percentage of drag reduction versus the volumetric gas injection rate per unit span. Figure taken from Elbing et al.(2008)

첫 번째는 bubble drag reduction zone, 두 번째는 transition zone, 세 번째는 air layer drag reduction zone 이다. Fig.9를 통해 단위 길이당 가스공급율이 커지면 마찰저항 또한 커짐을 확인할 수 있으며 각 영역에서 마찰저항의 감소율은 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 첫 번째 영역인 bubble drag reduction zone 에서는 마찰저항의 감소율이 0%부터 20%까지 일어난다. 두 번째 영역에서는 20%~80%까지의 마찰저항 감소가 일어난다. 마지막 air layer drag reduction zone 에서는 80%~100%까지 마찰저항의 감소가 일어난다. Fig.9를 통해 확인할 수 있는 사실은 각 영역내에서는 마찰저항의 감소가 선형적으로 일어난다는 점이다. 하지만 마찰저항의 감소를 일으키는 원인은 단위길이당 가스공급율 뿐 아니라 속도의 영향도 있다. 속도와 단위길이당 가스공급율에 따른 마찰감소가 Fig.10에 나타나있다. Fig.10을 이용하여 운동체의 속도와 단위길이당 가스 공급율(공동의 가스누수율)로 운동체가 어느 영역에 있는지를 파악할 수 있다. 영역이 결정되면 영역 내에서의 마찰저항 감소를 선형보간을 통해 구할 수 있다.

마찰저항 감소가 0%인 경우 즉, 마찰저항의 감소가 일어나지 않은 경우의 마찰저항은 ITTC line 을 통해 구한 식(12)와 같다.



Fig.10 The gas injection rate versus free-stream speed. Figure taken

from Elbing et al. (2008)

3. 제어기 설계

초공동 수중운동체의 천이영역 모델링이 물리적으로 타당한지 판별하기 위해서는 시뮬레이션이 필요하다. 하지만 시뮬레이션이 수행되는 도중에 운동체가 발산을 하거나 변화가 큰 운동을 하는 경우에는 모델링을 분석하기 어렵다. 따라서 초공동 수중운동체가 천이영역에서 자세를 유지할 수 있도록 제어를 해주어야 한다. 또한 제어를 통해 캐비테이터나 핀 등 제어판의 성능과 모델링을 확인할 수 있다. 본 연구는 천이구간에서의 초공동 수중운동체의 모델링에 초점을 맞추었기 때문에 운동체의 제어는 간단한 PID 제어기를 통하여 수행하였다. PID 제어기는 SISO(Single Input Single Output)시스템에 적용할 수 있기 때문에 제어입력은 캐비테이터만 사용하였고 출력변수는 종동요각으로 정하였다. 핀은 제어명령을 주지 않은 상태로 운동체의 상태로 인한 받음각에 의해 양력 및 항력을 발생시키도록 하였다. 또한 제어기를 통하여 운동체의 자세만을 제어하는 것이 아니라 최종적으로 심도를 추종하는 제어를 하기 위하여 피드백 루프를 하나 더 추가하여 이중루프 구조를 통한 제어를 수행하였다.



Fig.11 Block diagram of double-loop control system

Fig.11은이중루프구조를통한초공동수중운동체제어시스템의블록선도를보여준다.Inner-loop에서는PID제어기를통한종동용각을제어하고Outer-loop에서는PI제어기를이용하여심도명령을종동요각명령으로바꾸어준다.심도명령은outer-loop를지나면서종동요각명령으로바뀌고이명령은inner-loop의input으로작용하여캐비테이터명령각도로바뀌게된다.이중루프구조를통한제어는inner-loop의반응이

outer-loop 보다 빠른 경우에 사용할 수 있다. 종동용각을 변화시키면 운동체의 전진속도 때문에 심도가 변하는 것을 이용한 제어이다. 이중루프 구조를 사용하지 않고 하나의 피드백루프를 통해 곧바로 심도를 제어하는 것은 수행하기 어렵다. 그 이유는 캐비테이터를 통해 발생되는 힘은 z 축으로의 힘과 그로인한 종동요모멘트인데 z 축으로 발생되는 힘으로 인한 심도의 변화보다 종동요모멘트로 인해 바뀐 종동요각에 의한 심도 변화가 훨씬 크기 때문이다. 이는 식(1.2)를 참고하면 쉽게 알 수 있다. 3번째 행은 심도의 변화량이다. 심도의 변화량은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{z} = -u\sin\theta + v\cos\theta\sin\phi + w\cos\phi\cos\theta \tag{15}$$

여기에서 y 축방향 힘은 작용하지 않기 때문에 전진속도와 heave 속도가 심도를 결정한다. 전진방향속도가 heave 속도보다 월등히 크게 때문에 종동용각의 증가로 인한 심도의 변화량이 z 축방향 힘에 의한 심도의 증가보다 크다. 이는 선박의 조종과 흡사하다. 선박의 러더각도를 변화시키서 얻는 양력은 y 축방향 위치를 직접적으로 변화시키는 것보다 선박의 yaw angle 을 변화시켜 y 축으로의 위치를 변화시킨다. 제어판을 캐비테이터만 사용하지 않기 핀을 동시에 사용하는 경우에는 모멘트 평형을 이루어 z 축방향으로의 힘만을 발생시킬 수 있기 때문에 하나의 루프로 심도를 제어하는 것이 가능하다. 하지만 이 방법은 반응속도가 느리고 제어력이 많이 필요하기 때문에 좋은 방법이라고 할 수 없다. Inner-loop 에서 캐비테이터 명령은 다음과 같이 정해진다.

$$\tilde{\theta} = \theta_d - \theta$$

$$K_p \tilde{\theta} + K_D \dot{\tilde{\theta}} + K_I \int_0^T \tilde{\theta}(t) dt = \delta_c$$
(16)

여기서 θ_d 는 outer-loop 에서 나온 종동요각명령이고 θ 는 운동체의 종동요각이다 $\tilde{\theta}$ 는 종동요각 오차이다. 제어기의 목적은 오차를 0으로 만드는 명령을 생성하는 것이다. K_p, K_p, K_l 는 각각 비례, 미분, 적분 gain 이다. 오차가 클수록 캐비테이터 명령은 커지고 gain 이 클수록 캐비테이터 명령은 역시 커진다. PID gain 을 적절히 조절하여 오차를 0으로 만들면 운동체의 종동요각은 종동요각명령과 같아지게 된다. Outer-loop 의 PI 제어기는 심도오차와 종동요각의 전달함수와 같은 역할을 한다. 주파수영역에서 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\tilde{z} = z_d - z$$

$$\frac{\theta_d(s)}{\tilde{Z}(s)} = \frac{K_{P,out}s + K_{I,out}}{s}$$
(17)

 z_d 와 z 는 심도명령과 운동체의 심도이고 \tilde{z} 는 그 오차이다. $\theta_d(s)$ 와 $\tilde{Z}(s)$ 는 종동요각과 심도오차의 라플라스변환이다. 전달함수는 비례 gain $K_{P,out}$ 과 적분 gain $K_{I,out}$ 으로 구성되어 있다. 이를 시간영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$\theta_d = K_{P,out} \tilde{z} + K_{I,out} \int_0^T \tilde{z}(t) dt$$
(18)

4. 시뮬레이션

초공동 수중운동체의 천이구간 모델링 및 제어기의 성능검증을 위해 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션을 통해 모델링의 물리적 합리성과 운동특성을 파악할 수 있다. 시물레이션은 MATLAB/SIMULINK R2013a 버전을 이용하였다. 시뮬레이션은 Open-loop 와 closed-loop 에 대해 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 추력의 크기는 3000N 이다. 이는 수중운동체와 같은 반지름을 갖는 실린더의 질량 $\pi
ho R^2 mL$ 으로 표준화하면 100(N / πρR²mL) 이 된다. 즉, 약 10G 에 해당하는 가속도를 낼 수 있는 추력의 크기라고 할 수 있다. 추력의 크기는 운동체의 추력 시스템의 종류와 성능에 따라서 달라지는 값이기 때문에 가정을 통해 결정하였다. 환기공동의 생성을 위하여 공급하는 환기가스공급율은 $\dot{Q} = 0.0146(m^3/\text{sec})$ 이고 이는 추력과 마찬가지로 같은 반지름을 갖는 실린더의 부피로 표준화하면

1(Q/πR²L) 이 된다. 환기가스공급율 역시 환기시스템의 성능에
따라 결정되기 때문에 운동체의 부피에 해당하는 가스를 환기시킬
수 있다고 가정하였다.

4.1. Open-loop 시뮬레이션

Open-loop 시뮬레이션은 시스템의 기본적인 특성을 분석하는데 필수적이다. 만약 시스템의 open-loop 반응이 안정하다면 그 시스템은 제어를 하지 않은 상태에서도 안정한 시스템이 된다. 물론 제어의 목적이 안정화뿐만 아니라 시스템의 운동성능을 증가시키는 것이 될 수도 있기 때문에 안정한 시스템도 목적에 따라서 제어를 수행하기도 한다. Fig.12는 x,z 방향 위치와 종동요각의 open-loop 결과를 보여준다. 초기 심도는 10m이다.

x,z,θ



Fig.12 Open-loop time response of position and pitch angle

x 방향 위치는 계속해서 증가하고 있고 심도는 10m에서 시작하여 깊이지고 있다. 종동요각은 음의 값을 가지고 증가한다. 결과를 통해 nose down 현상이 일어남을 알 수 있다. 이는 운동 초기에 음의 종동요모멘트가 발생하기 때문이다. 음의 종동요모멘트는 공동이 운동체를 완전히 감싸지 않은 상태에서 물과의 접촉으로 인하여 생겨난다. 천이영역을 지나 물과의 접촉이 사라지게 되면 부력에 의한 음의 종동요모멘트는 사라진다. Fig.13에 전진속도와 상하동요속도 및 종동요각의 변화율을 나타내었다.



u,w,q

Fig.13 Open-loop time response of velocity and pitch rate

예상대로 반응초기에 종동요각의 변화가 큰 값을 가지다가 1초가 넘어가는 시점에서는 기울기가 매우 작아지면서 줄어드는 모습을 보인다. 상하동요속도 역시 반응초기에 큰 값을 가지고 줄어드는 경향을 보인다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 앞에서 언급한바와 같이 부력에 의한 영향이 사라지는 것과 캐비테이터와 핀이 운동체의 자세를 복원하는 모멘트를 발생시키기 때문이다. 하지만 제어를 하지 않은 상태에서는 핀과 캐비테이터에 의한 양의 종동요모멘트는 운동체를 안정하게 하기에는 부족하며 운동체의 자세가 안정되기까지 시간이 매우 오래 걸릴리게 된다. 또한 자세가 안정되더라도 중력에 때문에 상하동요 속도는 0이 될 수가 없어 운동체의 심도는 계속해서 깊어지게 된다. Open-loop 결과를 통해 천이영역에서의 운동체에 작용하는 힘과 모멘트의 모델링이 물리적으로 합당하게 수행되었음을 확인할 수 있고 운동체를 안정시키기 위해서는 제어기의 설계가 필요함을 알 수 있다.

4.2. Closed-loop 시뮬레이션

Open-loop 결과를 통해 초공동 수중운동체가 안정된 자세로 천이영역을 지나 초공동상태에 이르기 위해서는 제어기가 필요함을 알 수 있었다. 3절에서 서술한 이중루프 PID 제어를 이용하여 초공동 수중운동체의 천이구간 및 초공동구간까지의 심도제어 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시나리오는 다음과 같다.

- (1) 초기심도 : 10m
- (2) 1차제어 : 천이구간에서 작용하느 힘과 모멘트를 제어하여

초기심도 10m를 유지

(3) 2차제어 : 천이구간을 지나 운동체의 자세 및 심도가

안정되면 목표심도 5m를 추종하는 제어 수행

(4) 추력 및 환기가스공급율은 open-loop 와 동일한 값을 사용하고 핀은 제어판으로 사용하지 않음

1차제어시기와 2차제어 시기를 나누어 제어를 수행한 이유는 1차제어시기에는 공동이 완전히 생성되지 않기 때문에 무리한 심도 변경은 오히려 비효율적인 제어가 될 수 있고 실제로 초공동 수중운동체의 활용에 있어 목표심도는 초기심도에서 크게 벗어나지 가능성이 높기 때문이다. 2차제어를 않는 범위일 통해 심도변경제어를 수행하는 것은 안정화된 상태에서 운동체의 조종성능을 확인하기 위해서이다. 시뮬레이션 시나리오를 적용하여 closed-loop 시뮬레이션을 한 결과는 다음과 같다.



x,z,θ



Fig.14 Closed-loop time response of position and pitch angle

Fig.14는 수중운동체의 위치와 종동용각의 시간에 따른 변화를 보여준다. 파란실선은 심도명령과 종동요각명령을 나타낸다. 시나리오에서 언급한 것처럼 운동체가 운동을 시작한 후 약 3초까지는 1차제어가 수행된다. 1차제어에서는 초기심도를 유지하고 있다. 심도의 변화를 보면 1차제어구간에서는 openloop 의 초기반응처럼 종동요각이 음의 값을 가지면서 심도역시 깊어지는 경향을 보인다. 하지만 캐비테이터에 의한 제어가 이루어지면서 운동체는 종동요각명령을 추종하면서 초기심도를 다시 찾아가게 된다. 3초 이후에는 2차제어가 시작되면서 심도명령이 5m 로 변경되면서 종동요각명령도 양의 값을 가지게 된다. 즉, 현재심도보다 낮은심도로 가기 위하여 nose up 명령을 주는 것이다. 심도명령이 outer-loop 의 PI 제어기를 통과하여 종동요각명령으로 바뀌어 inner-loop 의 input 즉, 종동요각명령으로 바뀌게 되는데 이 명령이 종동요각반응 그래프에서 파란실선으로 나타난다. Fig15는 수중운동체의 속도 및 종동요각변화율을 보여준다. 서지속도의 경우 초기에는 가파른

상승을 보이다가 기울기가 점차 감소하여 3초 이후에는 거의 일정한 속도를 보이고 있다. 이는 수중운동체에 작용하는 저항과



u,w,q

Fig.15 Closed-loop time response of velocity and pitch rate

관계가 있다. 핀과 캐비테이터 등 운동체의 침수부에 작용하는 저항은 속도의 제곱에 비례하기 때문에 속도가 낮은 초기구간에서는 그 값이 추력에 비해 작은 값을 가지게 되어 가속도가 비교적 크게 나타난다. 하지만 속도가 증가함에 따라 저항의 크기가 속도의 제곱에 비례하여 커지게 되고 어느 순간

추력과 저항이 평형을 이루어 가속도가 거의 0에 가까워 진다. 이 구간이 3초 이후의 구간이다. 상하동요속도는 open-loop 의 초기 반응과 같이 가파르게 상승하였다가 2차제어가 끝난 뒤 정상상태에 접어든다. Open-loop 반응과 비교하면 정상상태에서의 값이 거의 비슷함하지만 그 원인은 확연히 다르다. Open-loop 의 경우 상하동요속도의 가장 큰 원인은 중력이다. 하지만 Closedloop 에서는 상하동요속도의 가장 큰 원인은 종동요각이다. Closed-loop 에서 중력은 핀과 캐비테이터에 의해서 상쇄되어 가속도를 발생시키지 않는다. 따라서 수중운동체의 2차제어가 끝난 시점에서 운동체의 상하동요속도가 생기기 위해서는 운동체의 종동요각이 작지만 0이 아닌 값을 가져야한다. 즉, 속도와 서지속도의 방향이 정확하게 일치하지 않고 운동체의 종동요각이 트림값을 갖는다. 2차제어 이후 운동체가 정상상태에 도달했을 때 트림값을 Table2에 나타내었다.

States	Description	Value and Units
и	Surge velocity	52.45 <i>m</i> / <i>s</i>
W	Heave velocity	$0.056 \ m/s$
q	Pitch rate	-9.55×10^{-5} deg/s
Ζ	Depth	5.08 m
heta	Pitch angle	0.063 deg

Table 2. Trim values

종동요각은 그래프에서는 0으로 보이지만 시뮬레이션 결과를 확인하면 0.063deg 로 nose up 상태를 정상상태로 갖는다. 종동요각의 변화율인 q 는 반응초기에 음의 값을 가지다가 캐비테이터의 양력에 의한 복원모멘트로 인해 정상상태에서는 거의 이의 값을 갖는다. 다음은 초공동 수중운동체의 가장 특징적인 부분이라고 할 수 있는 공동의 형상에 대한 시뮬레이션 결과이다.





Fig.16 Cavity radius at fin and cavity maxium radius/length

Fig.16의 첫번째 그래프는 핀뿌리부분에서 공동의 반지름이고 두 번째와 세번째 그래프는 공동의 최대 길이와 반지름이다. 핀뿌리부분에서 공동의 반지름을 통해 공동이 핀에 도달할만큼 발달했는지를 판별할 수 있다. 시뮬레이션 시간 약 0.2초정도에 핀뿌리부근에서 공동의 반지름이 0이 아닌 값을 가진다. 즉, 공동이 핀뿌리까지 올만큼 발달했음을 알 수 있다. 또한 이 결과를 통하여 핀의 액침 깊이를 구할 수 있다. 핀의 액침은 2.5절에서 서술한바와 같이 핀에 의한 힘과 모멘트를 계산하는데 필요하다. 두 번째 그래프를 보면 핀뿌리부분에서 공동이 형성되는 순간과 거의 비슷한 순간에 공동의 길이가 운동체의 길이인 1.8*m* 보다 길어지게 된다. 즉, 공동은 0.2초를 전후로 하여 천이영역을 지나 완전히 발달한 상태인 초공동상태에 이르렀음을 알 수 있다. 세 번째 그래프는 공동의 최대반지름이다. 공동의 최대반지름이 운동체의 몸체 반지름보다 적을 경우 마찰저항을 완전히 없애지



Fig.17 Fin immersion depth and frictional drag reduction

못하게 된다. 하지만 시뮬레이션 결과는 공동의 최대 반지름이 운동체 몸체의 반지름보다 커지면서 운동체를 완전히 감싸는 형태로 발달한 것을 확인할 수 있다. Fig.17은 핀의 공동에 의한 액침과 공동후류의 유체성분변화로 인한 마찰저항의 감소비율을 나타낸 그래프이다. 핀의 액침은 핀의 전체길이 중 물에 잠긴 길이를 비율로 나타내었다. 반응 초기에는 핀의 액침이 100%로 모두다 물에 잠겨있다. 이는 Fig.16에서 핀뿌리부분에서 공동의 반지름을 나타낸 그래프 결과와도 같다. 운동체가 초공동상태에 접어들면 핀의 액침은 약 72%가 된다. 마찰저항의 감소율은 많은 변화를 보이면서 정상상태에서는 약 20%로 떨어진다. 반응초기에는 80%까지 올라가지만 속도가 올라감에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 이는 Fig.10의 Elbing 의 연구결과를 통해 이해할 수 있다. 마찰저항의 감소율이 3초 이후에 떨어지는 이유는 공동수의 변화로 설명할 수 있다. 3초 이후에 운동체의 속도는 거의 변화가 없지만 심도가 바뀜에 따라서 ambient pressure 가 급격히 변하게 된다. 따라서 식(13)에 의해

공동에서 누수되는 가스의 양이 줄어들어 마찰저항의 감소율 역시 감소하게 된다.



Fig.18 Cotrol input for closed-loop system

Fig.18은 시간에 따른 제어입력의 변화를 보여준다. δ_c 는 캐비테이터의 deflection angle 이고 δ_e는 수평핀인 elevator 의 deflection angle 이다. 핀은 제어판으로 사용하지 않았기 때문에 deflection angle 에는 변화가 없다. 시뮬레이션시간 0초부터 1초까지는 일정한 기울기를 가지며 증가하고 1초부터 2초가 조금 안되는 시간까지는 음의 기울기를 가지며 감소한다. 이러한 현상이 일어나는 이유는 캐비테이터의 각도 변화율의 제한을 두었기 때문이다. 현실성 있는 모델링을 위하여 캐비테이터 하드웨어의 기계적인 제한을 반영하였다. 운동체의 스펙이 결정되면 더 정확한 모델링을 할 수 있지만 현상태에서는 각도변화율의 제한을 두는 것으로 모델링하였다.

Fig.19와 Fig.20은 각각 캐비테이터와 핀(elevator)에 의해 생성되는 힘과 모멘트를 보여준다. 위에서부터 x 축방향 힘, z 축방향 힘, y 축 모멘트(pitch moment)이다. 힘의 크기는 추력과 마찬가지로 운동체와 같은 반지름을 갖는 실린더의 질량인 $\pi \rho R^2 m L$ 로 모멘트는 $\pi \rho R^2 m L^2$ 으로 표준화하였다. 캐비테이터의 x 축방향 힘은 캐비테이터에 걸리는 항력으로써 음의 값을 가진다. 항력의 크기는 속도의 제곱에 비례하여 커지다가 속도가 정상상태에 이르면 일정한 값을 가진다. z 축방향으로는 캐비테이터의 deflection angle 의 변화에 따라 음의 힘과 양의 종동요 moment 를 생성한다. 반응초기에 나타나는 nose down 현상을 바로잡기 위하여 양의 모멘트를 생성하는 것이다.

Cavitator force



Fig.19 Forces and moment generated by cavitator in body fixed frame

핀(여기서는 elevator)에 의한 힘은 deflection angle 이 아닌 운동체의 자세 및 속도변화에 따른 받음각에 의해 생성된다. 캐비테이터에 비하여 항력은 더 작지만 축방향 힘과 Ζ 종동요모멘트는 비슷하거나 크기가 더 크다. コ 이유는 캐비테이터는 형상이 disk 형태이고 면적도 핀에 비하여 작기 때문이다. 핀의 모양은 쐐기형태로 항력의 크기는 줄이면서 양력의 발생이 용이한 형태이다. 따라서 deflection angle 이 없는 상태임



Fig.20 Forces and moment generated by fin in body fixed frame

에도 불구하고 핀에 의한 힘과 모멘트는 캐비테이터와 비슷한 값을 갖는다. 핀에 의한 종동용모멘트는 캐비테이터와 반대로 음의 값을 갖는다. 운동체가 초공동상태에 도달하면 몸체의 액침부위가 없어지고 부력에 의한 모멘트가 사라진다. 이 때 운동체에 작용하는 모멘트는 캐비테이터에 의한 종동요모멘트만 존재하게 되고 이를 받음각에 의해 생성된 핀의 모멘트가 상쇄시켜 정상상태에 도달하게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 초공동 수중운동체의 천이영역 및 정상상태 모델링과 자세제어 및 심도제어에 관한 연구를 수행하였다. 모델링을 수행하기 위하여 초공동 수중운동체의 비선형 운동방정식을 구성하였다. 초공동 수중운동체가 받는 힘과 모멘트는 공동의 동역학, 캐비테이터 및 핀 등 제어판의 동역학, 운동체의 액침에 의해 발생하는 유체력에 의해 발생되고 이를 천이영역에서의 운동특성에 맞게 모델링하였다. 공동의 동역학은 천이구간에서도 신속하게 초공동상태에 도달하기 위해 환기공동모델을 통해 구성하였고 운동체 몸체의 액침부위에 작용하는 마찰저항은 공동후류의 가스누수율에 의한 저항감소모델을 적용하였다.

초공동 수중운동체의 모델링을 수행한 후에는 제어기설계를 통한 운동체 심도제어를 수행하였다. 제어기는 PID 제어기를 사용하였고 캐비테이터를 이용한 이중루프구조 제어시스템을 적용하여 심도제어를 수행하였다. 초공동 수중운동체의 제어는 천이구간에서 심도를 유지하는 1차제어와 운동체가 안정된 이후에 심도를 변경하는 2차제어로 나누어 수행하였다.

시뮬레이션을 통해 다음의 사실들을 확인할 수 있었다.

- (1) 초공동 수중운동체의 천이구간 모델링이 물리적으로타당하게 수행되었다.
- (2) Open-loop 결과를 통해 천이구간의 운동특성 및 제어의 필요성을 확인하였고 closed-loop 결과를 통해 이중루프구조를 적용한 천이구간제어 및 심도변경제어가 가능함을 확인하였다.
- (3) 비교적 낮은 속도구간에서도 환기공동을 통해 공동의
 신속한 생성이 가능하다.
- (4) 공동의 발달 및 공동과 운동체의 상호작용으로 인한
 유체력 효과를 확인하였다.

(5) 초공동 수중운동체는 천이구간 및 초공동상태를 지나 정상상태에 도달한 후 일정한 트림값을 가진다.

초공동 수중운동체의 모델링을 수행하는 과정에 있어 가정 및 한계점은 다음과 같다.

(1) 핀 액침시 유체의 성분은 공기방울이 섞이지 않은

순수한 물로 간주하고 항력/양력 계수를 계산하였다.

- (2) 환기가스공급율은 천이구간에서 신속한 초공동의 형성이
 가능한 수치로 결정하였고 운동체의 상태와는 무관한
 일정한 상수값을 가진다.
- (3) 캐비테이터를 제외한 수중운동체의 침수부에 작용하는부가저항 및 뎀핑에 의한 힘은 무시하였다.
- (4) 제어기설계 시 모델링의 불확실성은 무시하고 제어기를 설계하였다.

본 연구에서는 캐비테이터만을 이용한 제어를 수행하였다. 차후 천이구간의 과도응답개선을 위하여 핀과 추력벡터를 모두 사용한 제어를 수행할 수 있다. 본 연구의 모델링을 바탕으로 신경회로망을 이용한 적응제어기법, LQR 제어, 백스테핑제어 등 다양한 제어방식을 적용할 수 있다. 또한 캐비테이터와 핀 및 운동체의 기본제원을 결정하는 최적형상설계와 환기, 추진시스템 등을 결정하는 최적설계를 위한 기초연구로 이용될 수 있다.
6. 참고문헌

나영인, 2011, 초공동화 로켓 어뢰체계의 핵심시굴 및 개발 동향, 2011년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 부산, BEXCO. Abraham N. Varghese., 2003. HIGH-SPEED BODIES IN PARTIALLY CAVITATING AXISYMMETRIC FLOW, *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November 1-4.

A.May, 1975. NAVSEA Hydrodynamics Advisory Committee, Water entry and the cavity-running behavior of missiles, Rep.TR 75-2.

Balint Vanek, Jozsef Bokor, Gary J. Balas and Roger E.A. Arndt., 2007. Longitudinal Motion Control of a High-Speed Supercavitation Vehicle, *Journal of Vibration and Control*, 13(2), pp.159. Brian R. Elbing, Eric S. Winkel, Keary A. Lay, Steven L. Ceccio, David R. Dowling and Marc Perlin, 2008. Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to airlayer drag reduction, *Jounal of Fluid Mechanics*, Vol.612, pp. 201-236.

Dzielski, Andrew Kurdila, 2003. A Benchmark Control Problem for Supercavitating Vehicles and an Initial Investigation of Solutions, *Journal of Vibration and Control*.

Dzielski., 2011. Longitudinal Stability of a Supercavitating Vehicle, *Journal of Oceanic Engineering*, Vol.36, No.4, October.

G. Logvinovich, V V Syeryebryakov, 1975. On Methods of
Calculations of Slender Asisemetric Cavities. Gidromenhanika,
32: 47-54 [in Russian].

G. Logvinovich, 1972. Hydrodynamics of free-boundary flows, translated from Russian(NASA-TT-F-658), US Department of Commerce, Washington D.C. Hui Fan, Yuwen Zhang, Xiaoning Wang., 2011, Longitudinal Dynamics Modeling and MPC Strategy for High-speed Supercavitating Vehicles, IEEE.

J. N. Newman, 1977, Marine Hydrodynamics, MIT Press, Massachusetts, pp. 31.

J. S. Uhlman, N. E. Fine, D. C. Kring, 2001, Calculation of the Added Mass and Damping Forces on Supercavitating Bodies, *Fourth International Symposium on Cavitation*, June 20-23, California Institute of Technology, Pasadena, CA USA, Kirschner, I. N., Kring, D. C., Stokes, A. W., Fine, N. E., and

James S. Uhlman, J., 2002. Control Strategies for Supercavitating Vehicles, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 8, pp. 219-242

M.Xiang, S.C.P. Cheung, J.Y.Tu, W.H.Zhang., 2011. Numerical research on drag reduction by ventilated partial cavity based on two-fluid model, *Ocean Engineering*, VOL.38, 2023-2032

P.Garabedian., 1956. Calculation of axially symmetric cavities and jets, *Pacific Journal of Mathematics*, vol. 6.

Savchenko, Y.N., 1998. Investigation of high speed supercavitating underwater motion of bodies, In: High-speed Motion in Water. AGARD Report 827, 20-1-20-12.

Wanh zou, Kai-ping Yu, Xiao-hui Wan., 2010. Research on the gas-leakage rate of unsteady ventilated supercavity, *9th International Conference on Hydrodynamics*, October 11-15, Shanhai, China.

Wosnik, M., Schauer, T., Arndt, R.E.A., 2003, Experimental Study on a Ventilated Supercavitating Vehicle, *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan.

Abstract

Study on Hydrodynamics and Modeling for a Supercavitating Vehicle in Transition Phase

Seon Hong Kim

Department of Industrial Engineering and Naval Architecture The Graduate School

Seoul National University

A supercavitation is modern technology that can be used to reduce the frictional resistance of the underwater vehicle. In the process of reaching the supercavity condition which cavity envelops whole vehicle body, a vehicle passes through transition phase from fully-wetted to supercaviting operation. During this phase of flight, unsteady hydrodynamic forces and moments are created by partial cavity. In this paper, analytical numerical investigations into the dvnamics and of supercavitating vehicle in transition phase are presented. The ventilated cavity model is used to lead rapid supercavity condition, when the cavitation number is relatively high. Immersion depth of fins and body, which is decided by the cavity profile, is calculated to determine hydrodynamical effects on the body. Additionally, the frictional drag reduction associated by the downstream flow is considered. Numerical simulation for depth tracking control is performed to verify modeling quality using PID controller. Depth command is transformed to attitude control using double loop control structure.

Keywords : Supercavitating vehicle, transition phase, hydrodynamical modeling, dynamics modeling, partial cavity, ventilated cavity, depth control

Student Number : 2011-23455