



공학박사학위논문

다물리 추진기 모델을 사용한 무인잠수정의 모델기반 정밀운동 제어 연구



부경대학교대학원

무기체계공학협동과정

안 용 석

공학박사학위논문

다물리 추진기 모델을 사용한 무인잠수정의 모델기반 정밀운동 제어 연구

지도교수 백 운 경

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2017년 2월

부경대학교대학원

무기체계공학협동과정

안 용 석

安容奭의 工學博士 學位論文을 認准함.

2017년 2월

위 원	. 장	공학박사	김부일	(인)
위	원	공학박사	김현수	(인)
위	원	공학박사	이연원	(인)
위	원	공학박사	제우성	(인)
위	원	곳한박사	백우경	(o̯])

1. 서론	1
1.1 무인잠수정의 연구동향	1
1.2 추진기의 연구동향	8
1.3 연구방법 및 범위	12
2. 정류형 무인잠수정	13
2.1 형상	13
2.2 모델기반 정밀제어	15
3. 추진기의 다물리 모델	16
3.1 추진기의 형상	16
3.2 추진기의 모터 모델 <mark></mark>	17
3.3 추진기의 유체동역학 모델	21
3.4 추진기 프로펠러의 기하학적 모델	25
4. 프로펠러의 전산유체역학 해석	27
5. 추진기모델의 추진력 시뮬레이션	32
5.1 시뮬레이션 개요	32
5.2 계단입력	34
5.3 삼각파입력	41
5.4 사인파입력	46
5.5 시뮬레이션 결과 고찰	47
6. 추진기의 추진력 실험	48
6.1 실험장치 구성	48

6.2 실험결과	51
6.3 실험결과 고찰	58
 7. 추진기모델을 적용한 Hovering AUV의 수중운동 시뮬레이션 7.1 운동 방정식 7.2 운동 시뮬레이션 7.3 운동 애니메이션 	59 59 63 75
8. Hovering AUV의 기본성능예측	77
8.1 정격속도	77
8.2 배터리 가용시간	77
8.3 순항거리	79
9. 결론	80
References	83
Abstract	89
부록	91

List of Figures

Fig. 1 First UUV(USA)	3
Fig. 2 MIT_RoboPike	7
Fig. 3 Hovering AUV configuration	14
Fig. 4 Hovering AUV component	14
Fig. 5 Thruster(400HFS-L)	16
Fig. 6 Concept mapping of thruster	18
Fig. 7 F.B.D of propeller shaft	18
Fig. 8 F.B.D of motor amature	19
Fig. 9 Fluid flow through out propeller	21
Fig. 10 Propeller dynamics	25
Fig. 11 Fluid velocity component through out propeller	26
Fig. 12 3D scanning scene of propeller	27
Fig. 13 Finite element model of propeller	29
Fig. 14 Velocity field of around propeller	30
Fig. 15 Pressure field of propeller surface	31
Fig. 16 Streamline of around propeller	31
Fig. 17 Block diagram of thruster	32
Fig. 18 Motor model	33
Fig. 19 Hydrodynamics model	
Fig. 20 Propeller geometry model	33
Fig. 21 Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time	34
Fig. 22 Thrust vs. RPM	35
Fig. 23 Thrust vs. Current	35
Fig. 24 Current vs. Time for various propeller radius	
Fig. 25 Thrust vs. Time for various propeller radius	36
Fig. 26 Water speed vs. Time for various propeller radius	37
Fig. 27 Propeller speed vs. Time for various propeller radius	37

Fig.	28	Thrust vs. Time for various $C_L(@C_D 0.282)$	- 38
Fig.	29	Water speed vs. Time for various $C_L(@C_D 0.282)$	- 38
Fig.	30	Current vs. Time for various $C_D(@C_L 0.199)$	- 39
Fig.	31	Thrust vs. Time for various $C_D(@C_L 0.199)$	- 39
Fig.	32	Water speed vs. Time for various $C_D(@C_L 0.199)$	- 39
Fig.	33	Thrust vs. Time for various fluid	40
Fig.	34	Triangular wave type	- 41
Fig.	35	Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@fsw 0.5) -	- 42
Fig.	36	Thrust vs. RPM(@fsw 0.5)	42
Fig.	37	Thrust vs. Current(@fsw 0.5)	- 43
Fig.	38	Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@fsw 0.1) -	- 43
Fig.	39	Thrust vs. RPM(@fsw 0.1)	44
Fig.	40	Thrust vs. Current(@fsw 0.1)	- 44
Fig.	41	Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@fsw 0.02)	45
Fig.	42	Thrust vs. RPM(@fsw 0.02)	- 45
Fig.	43	Thrust vs. Current(@fsw 0.02)	• 45
Fig.	44	Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@sine wave)-	· 46
Fig.	45	Thrust vs. RPM(@sine wave)	- 46
Fig.	46	Thrust vs. Current(@sine wave)	46
Fig.	47	Thruster testing facility	- 48
Fig.	48	Testing facility construction	- 49
Fig.	49	Thruster test rod	- 49
Fig.	50	InstaSPIN-BLDC Program GUI view	- 50
Fig.	51	CatmanAP V3.5.1	- 50
Fig.	52	Thrust vs. Time(@324RPM)	- 51
Fig.	53	Thrust vs. Time(@588RPM)	- 51
Fig.	54	Thrust vs. Time(@764RPM)	- 52
Fig.	55	Thrust vs. Time(@1000RPM 1st)	52
Fig.	56	Thrust vs. Time(@1000RPM 2nd)	- 53
Fig.	57	Thrust vs. Time(@1000RPM 3rd)	- 53
Fig.	58	Thrust vs. Time(@2000RPM 1st)	54

Fig.	59	Thrust vs. Time(@2000RPM 2nd)	54
Fig.	60	Thrust vs. Time(@2000RPM 3rd)	54
Fig.	61	Thrust vs. Time(@3000RPM 1st)	55
Fig.	62	Thrust vs. Time(@3000RPM 2nd)	55
Fig.	63	Thrust vs. Time(@3000RPM 3rd)	56
Fig.	64	Thrust vs. Time(Reverse 1st)	57
Fig.	65	Thrust vs. Time(Reverse 2nd)	57
Fig.	66	Thrust vs. Time(Reverse 3rd)	57
Fig.	67	Hovering AUV coordinate system	59
Fig.	68	Simulink blocks for surge control	63
Fig.	69	Thruster response about surge control	64
Fig.	70	Hovering AUV response about surge control	64
Fig.	71	Simulink blocks for sway control	65
Fig.	72	Thruster response about sway control	65
Fig.	73	Hovering AUV response about sway control	66
Fig.	74	Simulink blocks for heave control	66
Fig.	75	Thruster response about heave control	67
Fig.	76	Hovering AUV response about heave control	67
Fig.	77	Simulink blocks for yaw control	68
Fig.	78	Hovering AUV response about yaw control	68
Fig.	79	Simulink blocks for surge PD control	69
Fig.	80	Thruster response about surge PD control	70
Fig.	81	Hovering AUV response about surge PD control	70
Fig.	82	Simulink blocks for sway PD control	71
Fig.	83	Thruster response about sway PD control	71
Fig.	84	Hovering AUV response about sway PD control	71
Fig.	85	Simulink blocks for heave PD control	72
Fig.	86	Thruster response about heave PD control	72
Fig.	87	Hovering AUV response about heave PD control	73
Fig.	88	Simulink blocks for yaw PD control	73
Fig.	89	Thruster response about yaw PD control	74

Fig. 90 Hovering AUV response about yaw PD control	74
Fig. 91 Distance x vs. Time	75
Fig. 92 Distance y vs. Time	75
Fig. 93 Distance z vs. Time	75
Fig. 94 Yaw angle(ψ) vs. Time	75
Fig. 95 Hovering AUV Animation	76
Fig. 96 Lift force vs. RPM	
Fig. 97 Drag force vs. RPM	97
Fig. 98 Hovering AUV size	98
Fig. 99 Hovering AUV Battery	99
Fig. 100 Current clamp meter	100
Fig. 101 Flowwatch	101
Fig. 102 Water impeller and rod	101
Fig. 103 Tachometer	102
Fig. 104 Load cell	103
Fig. 105 DATA gathering equipment	103
Fig. 106 Motor controller	104
Fig. 107 3D Scanner component	105
Fig. 108 Drawing_BAR	108
Fig. 109 Drawing_BRACKET	109
Fig. 110 Drawing_CENTER LINK	110
Fig. 111 Drawing_BASE	111
Fig. 112 Drawing_PIN	112
Fig. 113 Drawing_SDE LINK	113
Fig. 114 Drawing_SUB	114
Fig. 115 Drawing_THRUSTER HOLDER	115

List of Tables

Table 1 외국의 주요 ROV 모델 및 제원	4
Table 2 국내 수중로봇의 주요모델 및 제원	6
Table 3 프로펠러 실물/스캐닝형상	28
Table 4 계단입력에 대한 시뮬레이션 결과	35
Table 5 삼각파 생성을 위한 입력 파라메터	41
Table 6 추진력 실험결과(@1,000RPM 이하)	52
Table 7 추진력 실험결과(@1,000RPM)	53
Table 8 추진력 실험결과(@2,000RPM)	55
Table 9 추진력 실험결과(@3,000RPM)	56
Table 10 추진력비교(실험 vs. 시뮬레이션)	56
Table 11 추진력 실험결과(@후진)	58
Table 12 6자유도 운동변수	60
Table 13 PD-gain	69
Table 14 Hovering AUV 정격속도	77
Table 15 장치소비전류	79
Table 16 예상되는 운항거리	79
Table 17 모터 토크상수	93
Table 18 모터의 저항 및 인덕턴스	94
Table 19 프로펠러의 속도별 양력/항력	
Table 20 프로펠러의 속도별 양력/항력 계수	97
Table 21 모터의 전력소모량	98
Table 22 전장 전원부의 전력소모량	99
Table 23 모터용 배터리의 사양	99
Table 24 3D 스캐너 본체사양	105
Table 25 Cross flow drag	107
Table 26 투영면적	107
Table 27 항력계수	107

Nomenclature

a	Acceleration $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	
В	Hovering AUV Buoyancy [N]	
B_m	Linear friction coefficient of motor [N.m.sec]	
B_p	Linear friction coefficient of propeller [N.m.sec]	
C_{L}	Lift coefficient	
C_D	Drag coefficient	
i_a	Armature current [A]	
Ixx	Body moment of inertia [kg.m ²]	
Iyy	Body moment of inertia [kg.m ²]	
Izz	Body moment of inertia [kg.m ²]	
J_m^{-1}	Motor rotor mass moment of inertia [kg.m ²]	
J_p^{-1}	Propeller mass moment of inertia [kg.m ²]	
K_{b}	Back electromotive force constant $\left[\frac{volt}{rad.sec}\right]$	
K_T	Motor torque constant $\left[\frac{Nm}{Amp}\right]$	
L_a	Electric inductance [H]	
$P1 \sim P4$	Pressure of water $\left[\frac{N}{m^2}\right]$	
P_{∞}	Pressure of water $\left[\frac{N}{m^2}\right]$	
Q	Hydrodynamic torque [Nm]	
R	Propeller radius $[m]$	
R_a	Electric resistance [ohms]	
ρ	Water density $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	

T	Thrust [N]		
T_m	Motor torque [<i>N</i> . <i>m</i>]		
U_{a}	Linear wheel velocity of water $\left[\frac{m}{s}\right]$		
U_p	Tangential velocity of water $\left[\frac{m}{s}\right]$		
V_{a}	Motor voltage [v]		
V_b	Back electromotive force [v]		
W	Hovering AUV weight $[N]$		
x_g	x axis distance of center of gravity [m]		
${y_g}$	y axis distance of center of gravity [m]		
z_g	z axis distance of center of gravity [m]		
$\dot{\omega_m}$	Angular acceleration of motor $\left[\frac{rad}{s^2}\right]$		
ω_m	Angular velocity of motor $\left[\frac{rad}{s}\right]$		
ω_p	Angular velocity of propeller $\left[\frac{rad}{s}\right]$		
$\dot{\Omega}$	Angular acceleration of propeller $\left[\frac{rad}{s^2}\right]$		
Ω	Angular velocity of propeller $\left[\frac{rad}{s}\right]$		
α	Blade angle of attack [rad]		
β	Blade pitch angle [rad]		
θ_m	Rotation angle of motor shaft [rad]		
θ_p	Rotation angle of propeller [rad]		
$ au_{k1}$	Torque of motor shaft [N.m]		
$ au_{B\!m}$	Torque due to friction force [Nm]		

1. 서론

1.1 무인잠수정의 연구동향

세계 각국은 해양 및 수중에서 활동가능하며 자율 작업이 가능한 무인로 봇 개발을 진행하고 있다. 무인잠수정(UUV ; Unmanned Underwater Vehicles) 은 민수용으로는 해양과학탐사, 수중생태계 감시/보호 등으로 활용될 수 있고 또한 음향 및 자기신호 발생이 거의 없고 은밀성이 뛰어나서 군수용 으로는 모함과 협동으로 정찰/감시, 대기뢰전, 대잠전, 통신 및 항해지원, 무장공격 등 다양한 임무를 수행할 수 있다. 특히, 한반도 주변의 해상환경 은 일본과의 독도영유권 문제, 남.북한 간의 군사적 대치상황, 중국과의 해 양관측기지 등의 문제로 외교적 마찰이 예상되고 있다. 한국의 수출량은 2016년 현재 세계 7위 수준에 이르렀고, 해상통로를 적대세력으로부터 보 호해야 하는 상황에 있다. 현재의 시대적인 배경이 이러한 바, 향후 우리나 라의 자산과 이익보호를 위하여 무인잠수정에 대한 수요가 늘어나고 소요 기술이 고급화.첨단화 되리라 예상되는 가운데 무인잠수정에 대한 기술적 인 부분들을 검토하고자 한다.

육상 또는 수상의 운용시스템과 케이블로 연결되어 인간의 조종을 받는 수중로봇을 원격조종 무인잠수정(ROV ; Remotely Operated Vehicle)이라 고 한다. ROV는 운동과 데이터, 제어 및 전원공급을 위하여 케이블을 갖 고 있으며, 일부 ROV는 자체전원을 탑재하는 경우도 있다. 이러한 수중로 봊 중에서는 카메라만 탑재하여 수중촬영 등 단순 작업을 수행하는 소형에 서부터 케이블 매설이나 파이프 설치 등을 수행하는 대형의 수중로봇이 있

- 1 -

다. 대부분의 ROV는 여러개의 추진기를 가지고 있으며 형상은 사각형의 상자모양 이외에도 어뢰형상 등 다양하며, 운용속도는 대부분 4노트(Knot) 미만이다. 인간의 조종 없이 자율적으로 운용되는 수중로봇을 자율무인잠수 정(AUV; Autonomous Under water Vehicle)이라고 한다. AUV는 모선과 연결되는 케이블이 없으며 자체 전원을 탑재하고 있고 자율능력 기능 부여 를 위하여 컴퓨터와 다양한 센서를 내장하고 있다. 수중에서의 통신은 음 향모덲을 이용하여 통신을 할 수 있으며 음파저달에 소요되는 시간지연 및 전달손실을 고려해야 하는 등 해양환경에 따라 통신거리가 제하되다. AUV는 심해 또는 모선이 들어가기 어려운 천해의 탐사작업에 매우 효과 적이며, 해저에 매설한 케이블이나 파이프 배관 검사에도 매우 유용하다. 또한 AUV는 ROV로써 탐사가 불가능한 북극 지역과 같은 빙하 밑 해저 탐사도 가능하다. AUV는 어뢰나 잠수함과 같은 실린더 형상뿐만 아니라 물고기나 가재의 형상을 모방한 해양생체 모방형 등이 있다. 그러나 어떤 형상이든지 설계시 유체저항을 최소화하는 선형설계를 고려해야 한다. 이 는 탑재된 제한된 에너지원으로 가능한 최대의 수중임무를 수행해야 하기 때문이다. AUV 및 ROV의 중간 형태로 운용되는 수중로봇을 반자율 무인 잠수정(SAUV; Semi-Autonomous Underwater Vehicle)이라고 한다[1].

무인잠수정의 개발역사를 살펴보면 1960년대 미 해군이 해저에서 분실한 폭탄을 회수하기위해 Fig. 1의 UUV를 최초로 사용하였다. 당시에는 에너 지원, 센서, 제어 및 컴퓨터 등 제반 기술의 부족으로 제한된 용도로만 사 용되었다. 1980년대 이르러 모함으로부터 전원과 제어신호를 공급받고 운 용되는 ROV형태의 UUV가 개발되고 운용되었다. 군사용으로 기뢰 탐색 및 제거를 위한 미 해군의 SLQ-48(MNV : Mine Neutralization Vehicle) 가 대표적인 사례이다. 이장비는 TV, 케이블절단기, 폭파장약 등을 가지고 모함으로부터 1km 떨어진 곳에서 연결줄로 조종되며 기뢰를 탐지하고 폭

- 2 -

파한다. 그러나 모함 간에 연결케이블로 인하여 운용거리 및 기동에 많은 제약을 받는다. 1990년대에 이르러 비로소 제반 기술이 획기적으로 발전되 어 모함 간에 케이블 없이 자율로 운항하는 AUV형태의 UUV가 개발되었 다. 2000년대에는 이러한 UUV의 운용성 증대를 위한 센서소형화, 에너지 원 고밀도화 및 자율수준 고도화 등의 연구에 주력하였다. AUV는 Cruising AUV와 Hovering AUV로 구분할 수 있다. 특히 Hovering AUV 는 특정위치에서 주로 작업을 하기 때문에 자세/위치제어 기능이 매우 중 요하다.



Fig. 1 First UUV(USA)

국외의 연구동향은 Table 1에서와 같이 미국 WHOI(Woods Hole Oce anographic Institute)의 "JASON"을 비롯하여 MBARI(Monterey Bay Aquarium Research Institute)의 "TIBURON" 등 다양한 무인잠수정을 개 발하였으며 연구기관과 산업체 및 대학을 중심으로 ROV, AUV에 대한 연 구가 활발히 진행되고 있다. 일본의 경우 해양과학연구센터(JAMSTEC)에 서 Shinkai 와 KAIKO를 개발하였다. 특히 KAIKO는 세계에서 가장 깊은 마리아나 해구 10,911m에 도달하였다.

모델	제원 및 특징	
	[JASON(WHOI, 미국)] -제원(L×W×H): 3.4×2.2×2.4m/4,500kg -성능 : 6500m(@1.5kts) -센서 : video camera 등 -기타 : 심해저 탐사, 해양조사	
	[TIBURON(MBARI, 미국)] -제원(L×W×H): 2.7×1.9×1.9m/1,590kg -성능 : 4000m(@1.5kts) -센서 : video camera 등 -기타 : 과학연구용	
	[KAIKO(JAMSTEC, 일본)] -제원(L×W×H): 3.0×2.0×2.1m -성능 : 11,000m(@1.5kts) -센서 : CTD, TV camera -기타 : 과학연구용	

Table 1 외국의 주요 ROV 모델 및 제원

국내의 수중로봇 관련 연구 및 개발현황은 다양한 선박 건조경험을 가진 해양 선진국들에 비해 늦게 출발하였으나 수중로봇 관련 기초 및 핵심기술 이 비교적 신속하게 축적되어 왔다. 그리고 우리나라의 수중로봇 체계개발 은 군사용 수중무기체계의 개발과 더불어 시작되었다고 할 수 있다. 1970 년대부터 국방과학연구소(ADD)를 중심으로 진행된 어뢰체계개발, 잠수함 체계개발, 예인선배열소나체계(TASS ; Towed Array Sonar System)및 선

체고정소나(HMS ; Hull Mount Sonar)등의 수중무기체계 개발 과정에서 수중로봇 관련 기반기술이 확보 되었다. 한국해양과학기술원(KOIST)에서 1987년 수심 250m급 탐사용 유인잠수정 "해양 250"을 동해안에서 성공적 으로 시운전함으로써 해양개발을 위한 수중로봇 연구개발 기반기술을 일부 확보하였다. 1992년에는 자체 개발된 초음파 고도계와 방위각 센서 및 수 심 센서를 내장하고 전방을 관측할 수 있는 카메라와 조명장비가 탑재된 "CROV 300"을 국내에서 최초로 개발하였다. "CROV 300"은 수중에서 4자 유도 운동제어가 가능하고 자동 자세제어 및 Hovering이 가능하도록 설계 되었다. Table 2에서 보는 바와 같이 국내에서 본격적인 무인잠수정 체계 개발은 1990년대 중반부터 이루어지기 시작하였다. 대우조선해양주식회사 와 IMPT(러시아)가 공동으로 1996년 "OKPO-6000"을 국내 최초로 개발하 여 해양탐사에 운용한 바 있으며, 이후 보다 진보된 "OKPO-600"을 개발 하였다. 1997년 한국해양과학기술원은 200m급 AUV Test Bed인 "VORAM 호"를 개발하였다. 국방과학여구소에서는 1998년 잠수함 모형의 시험용 무 인잠수정을 개발하였고, 한국원자력연구소에서도 원자로 내부검사, 가압기 내부의 전열관 검사, 살수탱크 및 사용 후 핵연료 수조의 감시 및 점검 수 행 목적의 ROV를 개발한 바 있다. 2000년대 진입하여서는 한국해양과학기 술원이 대양전기공업과 공동으로 국내 처음으로 군사용으로 활용할 수 있 는 연구용 SAUV를 개발한 바 있다. 2007년에는 한국해양과학기술원이 국 내최초 6000m급 심해탐사용 ROV인 "해미래"를 개발하였다. "해미래"는 길 이 3.3m, 폭 1.8m, 높이 2.2m의 사각형 형태로 중량은 3.660kg이고 8대의 수중카메라, 위치추적 장치 및 탐사에 필요한 각종 계측장비와 2개의 로봇 팔이 달려있으며, 6개의 전동추진기를 이용해 전 방향으로 이동이 가능하 다. 또한 모선에 장착된 선상제어실에서 유선으로 연결된 케이블을 통해 조종하게 된다. 2009년에는 한국해양과학기술원이 천해용 자율무인잠수정

- 5 -

인 "이심이"를 개발하였다. "이심이"는 직경 0.2m, 길이 1.58m, 중량 38kg 으로 본체에 부착된 센서를 통해 수중에서 자체 판단과 자기 위치인식에 따라 수중 200m 이내에서 자율적으로 운항하면서 탐사할 수 있다. "이심이" 는 해양 자원탐사와 함께 우리나라 연근해를 비롯한 수중 오염조사와 정밀 지형도 제작, 해저 침몰 물체 탐색, 연안.항만감시 등의 목적에 활용하기위 해 개발되었다[2~19].

모델	제원 및 특징	
	[OKPO6000(대우조선해양)]	
	-제원(L×D): 3.8×0.7m, 950kg	
	-성능 : 6,000m(10시간 @3kts)	
	-센서 : video camera, SSS	
	-기타 : 심해저 탐사, 해양조사	
8	[SAUV(한국해양연구원/대양전기)]	
	-제원(L×W×H): 3.2×0.75×0.99m, 450kg	
	-성능 : 100m(6시간 @3.5kts)	
	-센서 : CCD camera, SSS, 4관절로봇팔	
	-기타 : 연구용, 기뢰제거용	
	[해미래(한국해양연구원)]	
	-제원(L×W×H): 3.3×1.8×2.2m, 3667kg	
	-성능 : 6,000m(@1.5kts)	
	-센서 : CCD camera, 2관절로봇팔	
	-기타 : 연구용	
	[이심이(한국해양연구원)]	
Propeller Rudder Elevator Wireless LaN	-제원(L×D): 1.58 × 0.2m, 38kg	
	-성능 : 20km(@3kts)	
Main Controller Side Scan Sonar Iniettal Sensor DVL Mission DAS	-센서 : DVL, 소나 등	
	-기타 : 천해역 해양조사, 해저지형 맵핑	

Table 2 국내 수중로봇의 주요모델 및 제원

* SSS : Side Scan Sonar

향후 미래에는 물고기의 유영을 본 따 만든 로봇물고기가 바다를 항해하

는 임무를 수행할 것으로 예상된다. 이유는 현재까지의 배터리 기술로는 무인잠수정의 발전에 한계를 가지고 있는 반면 로봇물고기는 추진효율이 좋다. 1995년 미국 메사추세츠공대(MIT)는 세계 최초로 로봇물고기 "찰리 (Charlie)"를 선보였다. "찰리"는 약 1.2m 길이에 3,000개 정도의 부품으로 이루어졌으며 2마력짜리 모터 6개로 움직인다. "찰리"는 물고기 중에서도 참치의 모양과 동작을 모방했는데 이는 물고기 중 추진 효율이 가장 좋은 것이 참치이기 때문이다. MIT는 "로봇 참치 II"와 이를 개선하 Fig. 1의 "RoboPike"도 개발했다. 지느러미는 프로펠러의 날개보다 더 넓은 면적의 물을 밀어내기 때문에 그만큼 더 큰 추진력을 얻는다. 일반적으로 프로펠 러의 에너지 효율은 70% 인데 비해 로봇 참치의 지느러미는 87% 정도 된 다. 로봇 물고기를 실제 물고기에 가깝게 만들기 위해서는 우선 물고기의 몸체, 지느러미, 꼬리 등의 운동을 단독 및 복합적으로 이해해야 하며 물고 기의 움직임과 관련된 힘의 변화도 이해해야 한다. 아울러 직선 및 선회운 동을 동시에 조절할 수 있는 기법과 이를 적용할 수 있는 기계적 장치도 필수적으로 구비해야 한다. 향후 미래에는 이들 필수요소 기술들이 개발될 것으로 예상된다[20~26].



Fig. 2 MIT_RoboPike

- 7 -

1.2 추진기의 연구동향

무인잠수정의 추진 시스템은 배터리, 모터, 프로펠러로 구성된다. 즉 전기 적인 특성과 기계적인 특성, 수중에서의 동역학적인 특성들의 응답을 알면 수중에서의 효과적인 운동제어가 가능하다. Dana R. Yoerger는 추진력 모 델을 에너지법에 근거하여 기본방정식을 유도하였다[27]. 저자는 이 모델을 "Lumped parameter model"이라고 부르며 이는 몇 가지 가정이 전제되는 데 다음과 같다.

- . 저장되는 에너지는 덕트 내부의 유체의 운동에너지 뿐이다.
- . 외부 유체의 운동에너지는 무시한다.
- . 유체는 비압축성이다.
- . 추진기 입/출구의 유체흐름은 평행하고 1차원적이다.
- . 회전흐름의 효과는 무시한다.
- . 중력효과는 무시한다.
- . 흐름방향에 대해 추진기는 완전한 대칭이다.

운동에너지와 모멘텀과의 관계를 에너지의 선형성을 이용하여 표현하면 운동에너지는 압력모멘텀 항으로 표현할 수 있고 이 모멘텀을 이용하여 힘 의 균형에 대한 설명이 가능하다. 즉, 운동에너지를 시간에 대해 미분한 값 은 입력에너지에서 출력에너지의 차이와 같다. 따라서 어떤 관심의 대상이 있을 경우 경계면을 통해 들어오는 에너지에서 빠져나가는 에너지를 빼면 이것이 시스템에 남아 있는 에너지가 된다. 추진기 내부에서 단위체적당 유체모멘텀(Fluid momentum per volume)을 γ라고 하면 추진력은 유체모 멘텀과 체적유량(Volumetric flowrate, Q)의 곱이 된다. 체적유량은 프로펠

러와 추진력의 관계에 따라 변화하고, 이상적인 경우와 실제의 경우는 슬 립(slip, σ) 때문에 추진력 차이가 난다. 이를 체적유량에 적용하여 1계미분 방정식으로 표현되는 프로펰러의 회전속도(Ω)의 함수로 나타내었다. 또한. 추진력은 1개의 변수 즉 프로펠러의 회전속도의 제곱에 비례하는 관계식을 유도하였다. 참고문헌[27]에서는 토크가 3가지(1/4Nm, 1/3Nm, 2Nm)로 변 할때 시간 vs. 추진력의 상승곡선을 표현하였다. 이때 추진력은 Normalized 된 값을 사용하였다. 이 그래프들을 보면 토크 값이 클때 추진력이 정상상 태로 되는 시간이 줄어 듬을 알 수 있다. 또한, 유도된 모델에 대한 타당성 을 증명하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험장치 구성은 유체의 흐름양을 측정하는 Flowmeter, 프로펠러의 각속도를 측정하는 회전속도계, 추진력을 측정하는 Load cell 등으로 구성되어 있다. 이렇게 측정된 실제값들을 Least-squares method를 사용하여 그래프로 나타내었다. 즉 이 직선의 기 울기를 구하면 추진력과 회전력의 관계식에서 비례상수(c)값이 나타난다. 모터의 전압에 해당하는 프로펠러의 속도 값을 구해 보면 직선형태의 그래 프를 얻을 수 있고, 이 직선의 기울기는 $\frac{\beta}{\alpha}$ 가 됨을 이용하면 상수값 인 α, β를 구할 수 있다. 추진력과 프로펠러 속도와의 상관관계에 대해 시뮬레 이션 값과 실험값이 잘 일치함을 보여주었다. 그리고 모터의 입력 전압과 프로펠러 각속도와의 상관관계가 선형함수를 나타내고 있으며, 이 또한 예 측치와 비교하여 일치함을 보여준다[27]. 결론적으로 추진력은 프로펠러의 회전속도(Ω)의 함수식으로 나타남을 유도하였다(One state variables). 그 러나 이 모델은 추진기가 동작시 추진력이나 프로펠러의 회전속도가 정상 상태로 되기전 변이구간에서는 응답특성이 정확하지 않다는 단점이 있다.

A. J. Healey[28]는 유선형의 날개에서 발생하는 양력과 항력을 이용하고 몇개의 가정을 통하여 연구대상인 Pitman Pitmo 14202DC 모터에 대해서 모터, 프로펠러, 유체의 3개의 수학적 관계식을 유도하였다. 첫째, 모터를

- 9 -

전기-기계적인 특성을 가진 시스템으로 모델링하여 1차 선형미분방정식으 로 표현하였다. 이 모델에서는 모터의 아마추어 인덕턴스 값은 무시된다. 둘째, 프로펠러의 유효받음각(effective angle attack, α_{e})은 프로펠러의 기 하학적인 형상데이터인 피치(pitch)와 유체의 접선 및 법선방향 속도성분이 서로 함수관계를 가짐을 보였다. 이를 이용하여 양력(Lift force)과 항력 (Drag force)을 계산하였고, 이를 근거로 추진력과 토크를 구하는 수식을 수립하였다. 셋째, 유체에 대한 모델링은 관심영역(Control volume)을 지나 는 유체의 모멘텀 방정식을 이용하여 유도하였다. 따라서 이상의 3개의 관 계식을 통합하여 추진력은 프로펠러의 회전속도(ω_m)와 유속(U_a) 등 2개의 변수에 대한 함수식으로 나타남을 유도하였다(Two state variables). 제안 된 이론적인 내용을 검증하기위해 실험은 삼각파를 2개의 파형타입(3초, 50초)으로 입력하였다. 실험에서 시간에 대한 추진력과 프로펠러 속도 등 을 계산하였고, 프로펠러의 회전속도에 대한 추진력 곡선을 구하였다. 또 한, C_{LMAX}, C_{DMAX} , 등의 상수 값을 변경하여 비교실험을 수행하였고, 계단 입력인 경우에 대해서도 실험/시뮬레이션 값을 비교하여 프로펠러의 회전 속도만으로 수행한 모델(One state variables)보다 프로펠러의 회전속도와 유속으로 수행한 모델(Two state variables)이 좀 더 실험값에 근접한다는 것을 데이터로 보여주었다[28]. 그러나 이 연구에서 아쉬운 점은 모터모델 에서 인덕턴스 값은 무시되었다는 것이다.

L. L. Whitcomb과 D. R. Yoerger[29]는 추진기의 동역학 이론을 이용한 3가지 모델에 대해 발표하였다. 이들 이론은 몇 가지 가정을 전제로 한다. 유체는 중력효과를 무시하고 비압축성 흐름, 비점성 흐름, 비회전 등의 성 질을 가진다. 첫 번째 모델은 앞서 연구한 D. R. Yoerger 모델에 대한 것 이고, 둘째는 A. J. Healey 모델에 대한 것이다. 셋째는 A. J. Healey 모델 을 간략하게 변형하여 실험과 유사한 결과를 얻었다고 발표하였다. 그 외

- 10 -

추가로 유사 연구가 수행되었으며 관련 논문이 발표되었다[30~37]. ROV 및 Hovering AUV의 전체시스템과 관련해서도 다수의 논문이 발표되었다 [38~57]. Chin. C. S[43]는 ROV에 대한 동적모델링과 시뮬레이션 도구로써 ROV Design and Analysis(RDA) Toolbox를 제안하였다. 여기서 그는 ROV 와 제어시스템이 실제 제작에 들어가기 전 수학적으로 시뮬레이션 할 수 있음에 의미를 두고 있으며 비선형성으로 인해 발생하는 높은 불확실성을 RDA Toolbox가 효과적으로 제거 할 수 있음을 제안하였다. M. Nahon[45] 은 AUV를 geometry와 양력 및 항력 특성으로부터 유도된 간략화 된 수 학적 모델로 표현하고 식을 유도하였다. 헐(hull)을 포함하는 별도의 콘트 롤 면과 추진시스템으로 분해할 수 있으며 이 시스템에 작용하는 힘과 모 멘트는 시스템에 작용하는 각각의 요소의 합으로 나타난다. 이 모델은 실 험을 통하여 시뮬레이션과 유사한 값을 얻음으로써 검증하였다. T. H. Koh[52]는 간략화된 추진기모델과 일반적인 ROV 운동방정식을 제안하고 ROV의 형상 때문에 자연적으로 발생하는 비선형성과 커플링효과를 연구 하였다. 추진기의 정상상태 비선형 특성을 관찰하고 PID 제어기 설계 및 개발을 추진하였고 작은 각도의 정상상태 오차에 상응하는 필요한 추진력 을 얻기 위한 제어량을 시뮬레이션 하였다.

1.3 연구방법 및 범위

본 연구에서는 참고문헌[27~37]에서 제안한 추진기 모델을 보완/발전시 켰으며 또한, 참고문허[38~57]에서 연구된 ROV. UUV 등의 전체시스템에 대한 운동특성을 살펴보고 이에 대한 제어방법을 연구하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 무인잠수정 및 추진기의 국내.외 연구동향 을 살펴보고 2장에서는 Hovering AUV의 형상과 모델기반 제어(Model based control)에 대한 개념적인 부분을 설명 하였다. 3장에서는 추진기의 다물리 모델을 수립하기위하여 추진기를 3개의 영역으로 구분하였다. 첫째 는 전기-기계로 구성된 모터모델, 둘째는 유체와 프로펠러 사이의 유체동 역학적 모델이며, 셋째는 프로펠러의 기하학적 형상모델이다. 이 3가지의 모델은 서로 상관관계를 갖고 있기 때문에 연립하여야 문제를 풀 수 있다. 시뮬레이션 모델 생성을 위하여 추진기 부품들의 전기적인 특성값을 실험 으로 측정하여 시뮬레이션 입력 파라메터로 사용하였다. 추진기의 3가지 수학적 모델 통합을 위해서는 Matlab(R2014a)/Simulink 프로그램을 사용하 였다. 4장에서는 3D스캐너를 사용하여 프로펠러의 형상을 측정하고 기하학 적 형상모델을 전산파일로 제작하였다. CFX를 사용하여 형상모델에 대한 전산유체역학 해석을 하였고 양.항력 계수를 산출하였다. 5장에서는 3장, 4 장에서 산출된 데이터를 기초로하여 계단입력, 삼각파입력, 사인파입력에 대한 추진력 시뮬레이션을 수행하였고 6장에서는 실험을 실시하여 시뮬레 이션과 비교/분석하였다. 7장에서는 Hovering AUV의 제어하지 않은 상태 와, PD제어된 상태의 운동을 살펴보았다. 8장은 지금까지의 연구결과를 종 합하여 전체시스템에 대한 기본 성능을 예측하였다. 또한, 시뮬레이션 결과 로서 산출된 데이터를 이용하여 애니메이션을 제작하여 물속에서의 동적특 성을 모사하였다. 9장에서는 결론 및 향후 연구방향에 대해 기술하였다.

2. 정류형 무인잠수정

2.1 형상

Hovering AUV의 제원은 다음과 같다. 골격은 알루미늄 프레임으로 제작 되었고 총중량은 56.5kgf이며 크기는 1400mm(L)×400mm(W)×550mm(H)이 다. 4개의 기구부 즉, 메인제어부, RTU(Rotating Thruster Unit), 통신부, 배터리부와 5개의 추진기로 구성된다. 2개의 수평추진기는 주 동력원이며 Hovering AUV의 양측면에 위치하며 RTU를 회전시켜 진행하고자 하는 방향으로 추진기를 정렬하고 작동시켜 수평방향(x축 방향)이나 수직방향(v 축 방향)으로 움직인다. 수직추진기는 선미에 위치하며 피치(pitch)방향 움 직임에 사용된다. 메인 제어부는 선수에 위치하고 통신부는 메인 제어부와 대칭되게 선미에 위치하며, 배터리부는 하단 중심에 위치한다. 메인 제어 부, 통신부, RTU부의 하우징은 아크릴통으로 되어있으며 아크릴통의 양 측면에는 알루미늄 판으로 체결된다. 이 부위의 체결은 아크릴통과 알루미 늄 판 사이의 방수를 위한 O-ring을 삽입하고 볼트로 체결한다. 이때 토크 드라이브를 사용하여 2N.m의 힊으로 체결한다. 수중탐사를 위한 수중카메 라가 하단에 장착된다. 이 수중카메라는 가운데 촬상소자가 있고 주변의 LED가 촬상소자를 둘러싼 형태이다. 그 외 구성품으로는 사용자가 Hovering AUV에 명령하는데 사용되는 Host PC와 사용자의 명령을 받아들이는 모 들인 메인 제어부에 장착된 Main PC가 있으며 이들은 2개의 안테나를 사 용한 이더넷 모듈을 통해 무선 통신한다. GPS, IMU, DVL 등으로부터 데 이터를 받는 센서제어모듈(ATxmega64A1)과 센서제어모듈로부터 받은 데 이터를 보정하는 항법제어모듈(TMS320F28335)이 있다. Main PC는 사용 자의 제어명령에 따라 제어기를 통해 모터 제어부에 신호를 전달하고 모터 제어부는 각 추진기의 추진력과 방향 그리고 서보 모터의 각도를 제어한다 [57]. Fig. 3는 Hovering AUV의 실물사진이고, Fig. 4는 Hovering AUV 의 구성품을 표시하며 우측이 전진방향이다.



Fig. 4 Hovering AUV component

2.2 모델기반 정밀제어

Hovering AUV를 제작하기 위해서는 기계/전기/전자 등의 하드웨어와 이 를 작동시키는 각종 제어 알고리즘인 소프트웨어가 필요하다. 기존의 전통 적인 방식에서는 시스템을 설계하고 시제품을 제작하여 실험을 진행한다. 그러나 여기에는 여러 가지 문제점이 있다. 예를 들면 프로세스 진행 중 설계변경이 발생할 경우 계속해서 실험을 진행하기 어렵다. 또한 하드웨어 없이는 소프트웨어의 실험이 불가능하였다. 이러한 문제점을 모델기반 제 어기법에서는 원만히 해결할 수 있으며 다음과 같은 장점이 있다. 하드웨 어나 소프트웨어를 하나의 블록형태로 표현하여 시스템을 구성할 수 있으 며 프로세스 진행 중 수시로 변경되는 설계요구조건이나 구매자의 요구사 항 등에 대해서도 실시간으로 설계를 수정하여 최종적인 결과를 손쉽게 예 상할 수 있고, 하드웨어 없이도 소프트웨어 프로그램의 성능을 예측할 수 있다. 또한 시제품을 제작하지 않고서도 새로운 아이디어를 실험할 수 있 고 후속되는 유사 프로젝트에 적용하여 재사용이 가능하다. 이러한 장점을 살려 본 연구에서는 Hovering AUV의 모델기반 제어에 대한 연구를 하였 고 연구내용은 다음과 같다. 추진기에 대한 수학적 모델을 수립하고 추진 력 발생 과정을 연구하였다. 그리고 발생된 추진력을 Hovering AUV의 전 체 모델에 입력하여 4축(surge, swav, heavy, vaw)방향 운동을 예측하였 다. 운동 시뮬레이션으로부터 산출된 데이터를 이용하여 수중 운동관찰이 가능하도록 애니메이션을 제작하였다. 모델기반 정밀제어는 실제 실험데이 터 축적이 중요하다. 실험에서 획득한 데이터를 시뮬레이션 결과와 비교/ 분석하여 Hovering AUV의 운동 시뮬레이션에 피드백 시킴으로써 모델기 반 정밀 제어에 대한 완성도가 높아지게 된다.

3. 추진기의 다물리 모델

3.1 추진기의 형상

추진기(400HFS-L)는 크게 모터, 프로펠러, Housing, Shroud로 구성된다. 모터는 3상 브러시리스 타입이고 무게는 185g이다. 최대출력 130W이며 기 어의 감속비는 4.28:1이다. 모터의 Housing은 알루미늄 재질로 되어있고 방수를 위해 폴리우레탄을 모터와 Housing 사이에 충진하였다. 프로펠러 회전축과 본체와의 연결부위는 Lip Seal과 그리스를 충진하여 방수문제를 해결하였다. 전선은 3가닥이 모터로부터 나오며 작동 전압은 12V이고 정회 전/역회전 모두 가능하다. 프로펠러는 4개의 날개를 가지며 두께 1.2mm의 황동재질로 된 익형단면이 아닌 얇은 평판을 휘어서 용접하였다. 프로펠러 의 제원은 Pitch 0.0615m, 반경 0.03m, 단면적 0.00335m²이다. Shroud는 길 이 0.05m이며 플라스틱 재질로 되어 있으며 120도의 각으로 3곳에서 본체 와 연결되어 있다. 추진기 전체길이는 15.9mm, Housing의 직경은 42mm, Shroud의 직경(넓은 부위)은 75mm, 프로펠러의 직경은 60mm 이다.



Fig. 5 Thruster(400HFS-L)

-16-

3.2 추진기의 모터 모델

움직이는 물체는 직선운동, 회전운동을 하며 이는 뉴턴의 제2법칙을 사용 하여 아래와 같은 운동방정식으로 표현할 수 있다.

병진 운동 ;
$$\sum F = ma$$
 (1)

회전 운동 ;
$$\sum \tau = J\ddot{\theta}$$
 (2)

모터에 전류를 흐르게 하면, 이 전류와 자계의 자속에 의해 토크가 발생 한다. 자계속에 도선이 있고 그것에 전류가 흐를 때 도선에는 힘이 작용하 며 힘의 방향은 왼손법칙에 의해 정해진다. F=BiL, 여기서, B(자속밀도), i(전류), L(도선의 길이)이며 직류모터는 이 법칙을 응용한 회전기기이다. 마찰력은 물체의 운동방향과 반대방향으로 작용한다. 마찰력은 직선운동일 경우 $f = B \frac{dy}{dt}$, 회전운동일 경우 $\tau = B \frac{d\theta}{dt}$ 이다. 여기서 B는 직선운동일 경 우 감쇄계수이고 회전운동의 경우는 선형마찰계수 이다. 기계운동에서 발 생하는 마찰은 서형마찰 이외에도 속도와 힘의 관계가 비서형 관계를 갖는 비선형마찰도 있다. 쿨롱마찰(Coulomb friction)이 그 대표적인 예이다. 쿨 롱마찰은 두 고체 표면 간에 생기는 마찰력이 외부접촉 면적과는 무관하고 수직하중에 비례하며, 마찰속도와 무관하다는 세가지 조건을 만족하는 경 우의 마찰을 말한다. Fig. 6은 추진기의 개념도이며 추진기의 모터는 회로 에 흐르는 전류, 저항, 인덕턴스, 역기전력 등으로 모델링 할 수 있다. 모터 에 전압이 공급되면 전류가 저항과 인덕턴스를 통과하여 아마추어를 회전 시키고, 모터의 끝부분에 장착된 감속기어를 통해 프로펠러를 회전시켜 추 진력을 발생시킨다.



Fig. 6 Concept mapping of thruster

모터의 회전자와 프로펠러에 대한 자유물체도(F.B.D ; Free body Diagram) 는 아래 Fig. 7 및 Fig. 8과 같으며, 프로펠러 축과 모터샤프트 축사이의 회전각 $\lambda(\theta_p - \theta_m)$ 와 연결축의 탄성계수 (K_1) 를 곱하면 연결축에 작용하는 토오크 (τ_{k_1}) 를 구할 수 있다.

$$\tau_{k1} = K_1(\theta_p - \theta_m) \tag{3}$$

왼쪽으로 회전 할 때를 +로 가정하면, 오른쪽으로 회전하는 토크는 -방향 을 가진다. 따라서 프로펠러에 작용하는 유체의 저항에 의한 운동방정식은 식(5)와 같다.

$$J_p \omega_p = -\tau_{k1} = -K_1 (\theta_p - \theta_m) \tag{4}$$

$$J_p \dot{\omega}_p + K_1 \left(\theta_p - \theta_m \right) = 0 \tag{5}$$



Fig. 7 F.B.D of propeller shaft

전류로 인한 모터 아마추어에 작용하는 운동방정식은 식(8)와 같다. 즉,

- 18 -

프로펠러의 반경이 더 크기 때문에 프로펠러의 회전각(θ_p)은 모터아마추어 의 회전각(θ_m)보다 크다고 가정한다.

$$J_m \,\omega_m = \tau_{k1} + T_m - \tau_{Bm} \tag{6}$$

$$J_m \dot{\omega}_m = K_1(\theta_p - \theta_m) + T_m - B_m \dot{\theta}_m$$
(7)

$$J_m \dot{\omega}_m + B_m \dot{\theta}_m + Q = T_m \tag{8}$$



Fig. 8 F.B.D of motor amature

여기서, ω_m 은 모터 샤프트의 각속도, T_m 은 모터토크, Q는 프로펠러의 토 크, B_m 는 모터 아마추어의 선형마찰계수이며, K_T 는 모터 토크상수이다. 모 터 토크상수(K_T)는 전류 1[A]를 흘려 얼마의 토크를 발생 할 수 있는가를 표시하며 이 수치가 클수록 제어를 위한 전류가 작아도 된다. DC모터에서 는 전류와 토크가 비례하지만 AC모터는 여자전류 등의 영향으로 비례하지 않는다.

Kirchhoff의 2번째 법칙인 Kirchhoff's voltage law(KVL)는 다음과 같다. "회로상의 어떤 closed path를 지나는 모든 전압의 합은 0이다". 따라서 RLC 회로의 각 전압의 합은 회로에 가해진 전체 전압과 같다. 상기내용은 식(9~10)으로 표현할 수 있다.

$$V_{Ra} + V_{La} + V_b - V_a = 0 (9)$$

$$V_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + V_b \tag{10}$$

$$\dot{i}_{a} = L_{a}^{-1} (V_{a} - R_{a}i - K_{b}\omega_{m})$$
(11)

$$T_m = K_T i_a \ (\texttt{E} \texttt{E} \texttt{E} \texttt{E}) \tag{12}$$

$$V_b = K_b \frac{d\theta}{dt} = K_b \omega_m \quad (역기전력) \tag{13}$$



3.3 추진기의 유체동역학 모델

운동량 보존의 법칙은 프로펠러에서 추진력이 발생할 때 유체는 추진력의 반대방향으로 이동한다는 물리적 현상을 근거로 설립된 이론이다. 베르누 이 방정식으로부터 수식을 유도하기 위하여 Fig. 9와 같이 유체가 좌측으 로부터 들어와서 우측으로 빠져나가는 단면적이 동일한 모형을 생각할 수 있다.



Fig. 9 Fluid flow through out propeller

Fig. 9에서 1지점과 2지점 사이의 베르누이 식은 (14)와 같고, 3지점과 4 지점 사이의 베르누이 식은 (15)과 같다.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \tag{14}$$

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \tag{15}$$

1지점과 4지점에서의 압력은 무한대 $(P_1 = P_4 = P_{\infty})$ 로 가정한다. 2지점과 3지 점에서의 유속은 동일 $(V_2 = V_3 = V_m)$ 하다고 가정한다. 따라서 위 식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P_{\infty} + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_m^2 \tag{16}$$

$$P_3 + \frac{1}{2}\rho V_m^2 = P_\infty + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \tag{17}$$

- 21 -

위 두식을 연립하기 위해 위치이동 및 수식을 정리하면 식(18~19)와 같 다.

$$P_{\infty} + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_m^2 \tag{18}$$

$$P_{\infty} + \frac{1}{2}\rho V_4^2 = P_3 + \frac{1}{2}\rho V_m^2 \tag{19}$$

따라서 위 두식을 연립하여 풀면 식(20)이 된다.

$$\frac{1}{2}\rho(V_4^2 - V_1^2) = P_3 - P_2 \tag{20}$$

Fig. 9에서 1지점에서 유입한 유체는 프로펠러 쪽으로 접근함에 따라 압 력에너지는 감소하는 반면 속도에너지는 증가한다. 그러나 속도는 프로펠 러를 통과하는 동안 변하지 않는다. 뉴턴의 제2법칙에 있어서 *mv*는 선형 운동량이다. 이식을 레이놀즈의 수송정리에 대입하면 변형 검사체적에 대 한 선형운동량식을 얻을 수 있다. 식(21)은 레이놀즈 수송정리를 나타낸다.

$$\frac{d}{dt}(B_{system}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{cv} \beta \rho \, dv \right) + \left(\beta \rho A \, V \right)_{out} - \left(\beta \rho A \, V \right)_{in} \tag{21}$$

$$B_{cv} = \int_{cv} \beta \rho \, dv \tag{22}$$

$$\beta = \frac{dB}{dm} \tag{23}$$

여기서 *ρdv*는 유체의 미소질량이다. 만약, *B*대신 운동량(*mv*)를 대입하면 식(24)와 같다.

$$\beta = \frac{dmv}{dm} = v \tag{24}$$

따라서 식(24)를 식(21)에 대입하면 식(25)와 같이 된다.

$$\frac{d}{dt}(mv_{system}) = \sum F = \frac{d}{dt}(\iiint_{cv} v_m \rho dv) + v_{out} \rho A V_{out} - v_{in} \rho A V_{in}$$
(25)

식(25)의 *ΣF* 를 추진력(Thrust)이라 하고 식(25)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Thrust = \rho AL\dot{V}_m + \rho V_{out}^2 A_{out} - \rho V_{in}^2 A_{in}$$
(26)

여기서 $\dot{V}_m = \frac{d}{dt}(V_m), V_m = \frac{1}{2}(V_4 + V_1), L(\text{Length})$ 이다. 입구와 출구의 단 면적이 동일하다고 가정하면 식(26)은 식(27)과 같이 표현된다.

$$Thrust = \rho AL\dot{V}_m + \rho A \left(V_{out}^2 - V_{in}^2 \right)$$
(27)

$$= \rho A L \dot{V}_m + A \left(\rho \, V_{out}^2 - \rho \, V_{in}^2 \right) \tag{28}$$

Fig. 9에서 2지점과 3지점에서의 압력차는 추진력을 단면적으로 나눈값 이 다. 따라서 식(28)의 2번째 항은 아래 식(29)와 같다.

$$\sum F = A(P_3 - P_2) \tag{29}$$

따라서 식(28)을 정리하면 다음과 같다.

$$Thrust = \rho AL\dot{V}_m + A(P_3 - P_2) \tag{30}$$

식(30)에 베르누이 방정식으로부터 유도된 식(20)을 대입하면 다음과 같다.
$$Thrust = \rho AL \dot{V}_m + \frac{1}{2} \rho A (V_4^2 - V_1^2)$$
$$= \rho AL \dot{V}_m + \rho A V_m (V_4 - V_1)$$
(31)

(32)

(33)

만약,
$$V_1 = 0$$
(무한대 영역)이면 (31)식은 다음과 같이 된다.
$$Thrust = \rho AL\dot{V}_m + \rho AV_m V_4$$

따라서 최종적인 추진력 방정식은 식(33)과 같다.



- 24 -

3.4 추진기 프로펠러의 기하학적 모델

Fig. 10에서는 프로펠러가 ω_p의 속도로 회전할 때 프로펠러를 지나는 유 체와 프로펠러의 역학관계를 도식화 하였다. 여기서 U_a(Linear wheel velocity) 는 유체가 프로펠러 후방으로 빠져나가는 속도이고, U_p(Tangential velocity) 는 횡방향으로 빠져나가는 속도를 말한다. V는 유체의 속도이고, α는 받음 각 이다.



추진방향의 힘(Axial force)은 추진력을 표현하고, 횡방향의 힘(Tangential force)은 토크와 관련된다.

Axial force ;
$$F_a = Liftforce.\cos\theta - Dragforce.\sin\theta$$
 (34)

Tangential force ; $F_t = Liftforce.\sin\theta + Dragforce.\cos\theta$ (35)

또한, 프로펠러 표면에 작용하는 양력(*Lift force*), 항력(*Drag force*)은 식 (36~37)로 나타낼 수 있다.

$$Lift force = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_L \tag{36}$$

$$Drag force = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_D \tag{37}$$

Up는 프로펠러 중심센터에서 반경의 70%인 지점에 작용한다고 가정할 때 식(38)과 같다. 또한, 식(39)는 감속비에 의한 모터 아마추어(또는 샤프 트)와 프로펠러의 회전비를 나타낸다.



Fig. 11 Fluid velocity component through out propeller

따라서 토크(Q)는 아래와 같은 식(40)으로 표현 할 수 있다.

$$Q = 0.7 RF_t \tag{40}$$

식(34)~식(39)을 식(40)에 대입하면 다음과 같다.

$$Q = h \frac{1}{\cos^2 \theta} (C_L \sin \theta + C_D \cos \theta) . \omega_m^2$$
(41)

여기서,
$$h = \frac{1}{2} (0.7R)^3 \rho A \frac{1}{N^2}$$
 이다 (42)

4. 프로펠러의 전산유체역학 해석

전산유체해석만으로도 추진력을 계산할 수 있으나 본 논문의 최종목적은 모델기반 정밀제어에 있기 때문에 추진기 프로펠러의 기하학적 특성을 연 구하여 양력.항력계수를 산출하고 이를 이용하여 추진력을 산출하고자 한 다. 양력.항력계수를 산출하기 위해서 3D Scanner를 사용하여 3차원 영상 을 확보하고, 이 영상데이터를 역설계 프로그램을 사용하여 CATIA 작업 이 가능하도록 stp파일로 전환하였다. Fig. 12와 같이 3D Scanner는 본체 와 자동회전판 그리고 노트북으로 구성되며 사양은 부록 8 과 같다. 3D 스 캐너의 원리는 물체를 스캐닝한 이미지들을 하나의 좌표계로 합친 후 정렬 된 여러 데이터 세트를 하나의 데이터로 통합하여 3D 모델링을 완성한다. 스캐닝 방식은 본체에서 백색광으로된 특정패턴을 물체에 투영하고 그 패 턴의 변형 형태를 파악해 3D정보를 얻는 방식을 사용한다. 또한, 스캐닝시 물체의 난반사 방지를 위해 무광 분말페인트를 대상물체(프로펠러)에 도포 한다.



Fig. 12 3D scanning scene of propeller

스캔형상의 정확도를 위해 1회 보다 2회 스캐닝하면 좀 더 정확한 형상데 이터를 얻을 수 있으나 데이터 용량은 이에 비례하여 커진다. Table 3에서 는 프로펠러의 실물형상과 3차원 스캐닝형상 그리고 해석을 위해 stp 파일 로 변환한 상태의 그림을 나타낸다.

구분	측면도	정면도
o 프로펠러 실물형상		
○ 3차원 스캐닝 형상		×
ㅇ stp파일로 변환		

Table 3 프로펠러 실물/스캐닝 형상

프로펠러의 양력/항력계수 산정을 위하여 ANSYS ICEMCFD 15.0을 사용 하여 해석격자를 생성하였다. 유동공간에 대해서는 사면체 그리고 고체벽 면에서는 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 프리즘형태의 격자를 사용하 였다. Fig. 13은 프로펠러의 유한요소 모델을 보여준다.



Fig. 13 Finite element model of propeller

해석에 사용된 상용코드는 ANSYS CFX 16.2이고 해석에 사용된 격자수 는 약 576,000개이며 경계조건은 프로펠러 및 허브가 1,500RPM으로 회전 하는 것으로 설정하였다. 회전효과를 얻기 위하여 CFX가 제공하는 Frozen Rotor 기법을 적용하였고, k-ɛ난류모델을 사용하여 유동장을 해석하였으며 수렴조건은 평균 잔차 값(RMS residual)이 10⁻⁴ 이하가 되는 것으로 하였 다. 경계조건은 Fig. 14와 같이 프로펠러 주변의 경계면에 대해서 유동이 Inlet, Outlet 할 수 있는 조건인 열린면으로 처리하였다. 계산과정은 전체 항력을 구한 후 날개수 4로 나누면 1개의 날개에 대한 항력이 계산되며 이 때 양력은 자동으로 계산된다. 속도장 해석결과 회전수가 증가하면 프로펠 러로 유입되는 유체의 속도와 유출되는 속도가 선형적으로 증가한다. 이는 유출부 질량유량과 동일한 경향을 보인다. 유입면과 유출면의 프로펠러 속 도별 압력분포는 3,000RPM_72,000Pa, 2,500RPM_50,000Pa, 2,000RPM_32,000Pa, 1,500RPM_18,000Pa, 1,000RPM_8,000Pa 와 같다. Fig. 15에서는 날개 첨단부 분에서 압력차가 큼을 알 수 있다.

상기 해석결과를 바탕으로 구해진 추진력 및 항력을 식(36~37)에 대입하 여 계산하면 프로펠러의 양력계수(C_L)는 0.199이고 항력계수(C_D)는 0.282 이라는 결과를 얻었다(부록 5 참조). Fig. 14와 Fig. 15는 각각 프로펠러 회전시 속도장과 압력장을 나타내며 Fig. 16은 수중에서 유선의 움직임을 나타낸다. 그림의 회색음영 부분은 프로펠러를 보호하는 shroud를 표시한 다.



Fig. 14 Velocity field of around propeller



Fig. 16 Streamline of around propeller

5. 추진기모델의 추진력 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 개요

추진력을 시뮬레이션 하기위한 프로그램은 Matlab/Simulink를 사용하였 다. Fig. 17은 추진기의 블록 다이아그램을 나타낸다. Simulink를 사용하여 프로그래밍하는 요령은 운동방정식의 최고차항을 좌변으로 옮기고 계수를 1로 만든다. 그리고 나머지 모든 항은 우변으로 넘긴다. 또한 미분차수와 동일하게 여러개의 적분블럭을 순서대로 배열하여 프로그래밍 한다. Matlab/Simulink의 장점은 복잡한 다물리 시스템(Multiphysics system)에 대한 해석을 쉽고 편리하게 프로그래밍 할 수 있다는 것이다.



Fig. 17 Block diagram of thruster

추진기 전체시스템은 3개의 영역으로 구분된다. 첫째는 Fig. 18에 표시된 전기-기계모델(Electro-Mechanical Model)인 모터 모델이고, 둘째는 Fig. 19의 유체동역학 모델(Hydroynamics Model) 부분이며, 셋째는 Fig. 20에 나타낸 프로펠러의 기하학적 모델 부분으로 나눌 수 있다.



Fig. 18 Motor model



Fig. 20 Propeller geometry model

5.2 계단입력

추진기의 추진력 시뮬레이션을 위한 입력은 계단입력(Step input)과 삼각 파입력(Triangular wave input), 사인파입력(Sine wave input)을 사용하였 다.

1) 계단입력 #1

Fig. 21은 전압 12V, 전류 10A 입력시 시간(가로축)에 대한 추진기의 응 답특성인 전류/프로펠러 RPM/추진력/토크/유속(세로축)을 나타낸다. Fig. 22는 추진력(세로축)과 회전수(가로축)와의 관계를 Fig. 23은 추진력(세로 축)과 전류(가로축)와의 관계를 나타낸다.



Fig. 21 Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time



Fig. 22 Thrust vs. RPM



계단입력 #1의 경우에서 추진기로 유입되는 전류값이 변할때 이에 해당하는 추진력, RPM, 유속이 변하게 된다. 시뮬레이션 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 계단입력에 대한 시뮬레이션 결과

입력전압/전류	추진력[N]	RPM	유속[m/s]
12V, 1A	1.51	1,037	0.64
12V, 3.5A	5.99	2,065	1.27
12V, 10.0A	12.87	3,025	1.87

Fig. 24~Fig. 27는 프로펠러의 반지름(R)을 0.01씩 증가시키면서 시간(가 로축)에 대한 전류, 추진력, 유속, 프로펠러 RPM(세로축)의 변화를 나타내 었다. 프로펠러의 반경이 클수록 전류량, 추진력, 유속은 커짐을 알 수 있 다. 그러나 프로펠러의 반경이 클수록 프로펠러 RPM은 작아짐을 알 수 있 다.



Fig. 24 Current vs. Time for various propeller radius



Fig. 25 Thrust vs. Time for various propeller radius



Fig. 26 Water speed vs. Time for various propeller radius



Fig. 27 Propeller speed vs. Time for various propeller radius

Fig. 28~Fig. 29는 항력계수(C_D)를 고정시키고 양력계수(C_L)를 0.1씩 증 가시켰을 때의 시간(가로축)에 대한 추진력, 유속(세로축)의 변화를 나타내 었다. 양력계수가 커짐에 따라 추진력과 유속은 커짐을 알 수 있다.



Fig. 28 Thrust vs. Time for various $C_L(@C_D 0.282)$



Fig. 29 Water speed vs. Time for various $C_L(@C_D 0.282)$

Fig. 30∼Fig. 32는 양력계수(*C_L*)를 고정시키고 항력계수(*C_D*)를 0.1씩 증 가시켰을 때 시간(가로축)에 대한 전류/추진력/유속(세로축)의 변화를 나타 낸다. Fig. 30는 항력계수가 증가하면 전류값이 커짐을 나타낸다. 또한 Fig. 31∼Fig. 32는 항력계수가 높아질수록 추진력과 유속은 작아짐을 나타낸다.



Fig. 30 Current vs. Time for various $C_D(@C_L 0.199)$



Fig. 31 Thrust vs. Time for various $C_D(@C_L 0.199)$



Fig. 32 Water speed vs. Time for various $C_D(@C_L 0.199)$

Fig. 33은 민물과 해수의 추진력 차이를 나타낸다. 해수의 밀도[1,025
kg/m³(@ 염분 20%, 0℃)]가 민물[1,000 kg/m³(@ 0℃)]보다 높기 때문에 추진
력도 높게 나타남을 알 수 있다.



5.3 삼각파입력

삼각파의 입력조건을 Table 5와 같이 할 경우, Fig. 34와 같은 파형 (Wave Form)이 생성되며, 이때 Table 5의 입력 파라메터의 의미는 다음 과 같다. Duration Time(시뮬레이션 시간), Time Values(삼각파의 변곡점 위치를 의미하며 x축 상의 시간/fsw로 표시), Output Values(Time Values 에 해당하는 y축 상의 크기로 표시).

Table 5 삼각파 /	생성을	위한	입력	파라메터
---------------	-----	----	----	------

Duration Time(sec)	Time Values	Output Values
3(fsw=0.5)	0, 0.25/fsw, 0.75/fsw, 1.25/fsw, 1.5/fsw	0, 1, -1, 1, 0
10(fsw=0.1)	0, 0.5/fsw, 1/fsw	0, 1, 0
50(fsw=0.02)	0, 0.25/fsw, 0.75/fsw, 1/fsw	0, 1, -1, 0

% fsw(frequency switching)

Input Type	Duration	Wayo Form
mput Type	Time(sec)	wave Form
삼각파 Type 1	3(fsw=0.5)	0 sec 3 sec
삼각파 Type 2	10(fsw=0.1)	0 sec 10 sec
삼각파 Type 3	50(fsw=0.02)	0 sec 50 sec

Fig. 34 Triangular wave type

1) 삼각파 Type 1 입력

Fig. 35은 fsw 0.5, duration time 3s의 경우 시간(가로축)에 대한 추진기 의 응답특성인 전류/프로펠러 RPM/추진력/토크/유속(세로축)의 크기를 나 타낸다. Fig. 36~Fig. 37는 추진력과 RPM, 추진력과 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다. 두 가지 경우 모두 곡선형태의 비례관계를 가짐을 알 수 있다.



Fig. 35 Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@fsw 0.5)



Fig. 36 Thrust vs. RPM(@ fsw 0.5)



Fig. 37 Thrust vs. Current(@ fsw 0.5)

2) 삼각파 Type 2 입력

Fig. 38은 fsw 0.1/duration time 10s의 경우 시간(가로축)에 대한 추진기 의 응답특성인 전류/프로펠러 RPM/추진력/토크/유속(세로축)의 크기를 나 타낸다. Fig. 39~Fig. 40는 추진력과 RPM, 추진력과 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다. 두 가지 경우 모두 곡선형태의 비례관계를 가짐을 알 수 있다.



Fig. 38 Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@fsw 0.1)



Fig. 39 Thrust vs. RPM(@ fsw 0.1)



Fig. 40 Thrust vs. Current(@ fsw 0.1)

3) 삼각파 Type 3 입력

Fig. 41은 fsw 0.02/duration time 50s의 경우 시간(가로축)에 대한 추진 기의 응답특성인 전류/프로펠러 RPM/추진력/토크/유속(세로축)의 크기를 나타낸다. Fig. 42~Fig. 43는 추진력과 RPM, 추진력과 전류의 상관관계 를 나타내는 그래프이다.



Fig. 41 Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@fsw 0.02)



Fig. 42 Thrust vs. RPM(@ fsw 0.02)



Fig. 43 Thrust vs. Current(@ fsw 0.02)

5.4 사인파입력

Fig. 44은 사인파 입력(Frequency: 1rad/sec, Amplitude 1)일 경우 시간에 (가로축)대한 추진기의 응답특성인 전류/프로펠러 RPM/추진력/토크/유속 (세로축)의 크기를 나타낸다. Fig. 45~Fig. 46는 추진력과 RPM, 추진력과 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다.



Fig. 44 Current/RPM/Thrust/Torque/Water speed vs. Time(@sine wave)







Fig. 46 Thrust vs. Current(@ sine wave)

- 46 -

5.5 시뮬레이션 결과 고찰

시뮬레이션 결과를 종합하면 다음과 같다.

•계단입력 #1의 경우 추진력 vs. 프로펠러 RPM, 추진력 vs. 전류의 그래 프는 각각 곡선형태의 비례관계를 가진다.

• 계단입력 #2의 경우 프로펠러의 반경이 클수록 전류, 추진력, 유속은 커 지고 프로펠러 RPM은 작아짐을 알 수 있다.

•계단입력 #3의 경우 항력계수(C_D)를 고정시키고 양력계수(C_L)를 0.1씩 증가시켰을 때 양력계수가 커짐에 따라 추진력과 유속은 커짐을 알 수 있 다.

• 계단입력 #4의 경우는 양력계수(*C_L*)를 고정시키고 항력계수(*C_D*)를 0.1씩 증가시켰을 때 항력계수가 증가하면 전류 값이 커짐을 나타낸다. 항력계수 가 높아질수록 추진력과 유속은 작아진다.

• 계단입력 #5의 경우 민물과 해수의 추진력 차이를 나타낸다. 해수의 밀 도가 민물보다 높기 때문에 추진력도 커짐을 알 수 있다.

•삼각파입력(삼각파 Type 1~3)일 경우 추진력 vs. 프로펠러 RPM, 추진 력 vs. 전류의 상관관계는 유사한 특성을 나타낸다. 세 가지 경우 모두 곡 선형태의 비례관계를 가짐을 알 수 있다.

•사인파입력 일 경우 추진력 vs. 프로펠러 RPM, 추진력 vs. 전류의 상관 관계 그래프는 곡선형태의 비례관계를 가진다. 또한, 삼각파 Type 1~3와 유사한 형태의 추진력 선도가 나타났다.

6. 추진기의 추진력 실험

6.1 실험장치 구성

시뮬레이션을 검증하기 위한 실험 장치를 설계/제작하여 추진력을 측정하 였으며 실험장치는 Fig. 47와 같이 수조 상부 및 하부에 설치된다. 모터 구 동시 추진력으로 인해 로드셀 장착부위의 굽힘을 방지하기 위해 지지대를 설치하고 추진기와 로드셀 간의 거리는 Fig. 49와 같이 중간베어링 부분에 서부터 양끝까지의 길이가 각각 400mm가 되도록 하였다. 실험장치는 추진기 (Cross bow Inc._400hfs-1), 수조(2400mm×1800mm×750mm), Data 수집장치 (HBM_mx840a), Thruster controller(Texas instruments Inc._drv 8301), 유속측 정장치(flowwatch, 스위스), DC power supply(30vdc 10A), 클램프형 전류계 (Prosys cp41, 영국), 회전속도계(Hioki 3403, 일본), 노트북(삼성sens r410, LG xnote r590), 로드셀(yc33-50k) 등으로 구성된다.



Fig. 47 Thruster testing facility

Fig. 48은 실험장치의 구성도이다. 수심은 수조바닥에서부터 수면까지 0.5m가 되게 한다.



Fig. 49 Thruster test rod

Fig. 50은 모터구동을 위한 Instaspin-bldc 프로그램의 GUI화면이며 Fig.48의 노트북2에서 운용되는 프로그램이다. Control Mode는 Duty Cycle을

선택하였다. 최고속도 3,000RPM대는 Duty Cycle 0.7에서 작동된다. 또한, Flux Threshold는 0으로 조정한다. 그 외 셋팅은 Defalt 되어있다.

Incto CDINIM_P	LDC				
Instaspin -B	LDC			INTERPACE DESIGNER	
Main Settings 03 Engineering More	100000				
Motor Speed (RPM)	0.75000				4 -
58008	0.50000				A
	0.25000				x
Control Mode -> Knob Function	0.00000		/		(A)
Duty Cycle -> Duty Cycle	0.75000				191
Velocity -> Motor Speed (PU)	0.50000				
Cascade -> Motor Speed (PU)	0.25000				
-0.20 0.20	0.00000				24. I
0.0	1.00000				
	0.75000				
-1.60 = 0.60	0.50000				
	0.25000				
-0.0	0 20	00 4000	6000	8000 1000	0
-1.00 1.00	Contractor Contract	Des Old	Dia home		
0.00	Grade Intersection	Hak (PO)	13 (FO)	x: 9,540,6360, y: 0,1	9494
Motor Current (PU)	1.00000				F F
0 02 04 06 0.8 1	0.80000				
	0.60000				÷
<value></value>	0.40000				5
Rux Threahold (PU)	0.20000				
0005 10 15 20 25 20 25 40 45 50	0.00000				
	0 20	4000	6000	8000 1005	5
0.00			IRPM		0000
(**** (**)				x, 0.161, 6000, 97 0.	(a.u.a)
Control Mode F	ault Status	0 9 18 27	35 45 54 63	Driver	
Enable Motor Duty Cycle *	Reset Fault	Bus		Warning	
	-	(Val	162		

Fig. 50 InstaSPIN-BLDC Program GUI view

Fig. 51은 로드셀로부터 측정된 추진력 데이터를 해석하기위한 Fig. 48의 노트북1에서 운용되는 프로그램의 초기화면을 표시한다.

	CotmonAP V3.5.1 (Presentation version) DAV	Q project «C#Users#US	ER#Desktop#Loadce1 MEP> Charnel tools	-	-	-	🗠 🖄 Analyze measurement data 🗮 Window 🔹
Image: Construction (Structure) Texter Description (Structure) Owner (Structure)<	Start Grant Control	play at the factor of the fact	gure TEDS Sensor MANA	Freedow Execute Create States Create States	special Configure		
State State <th< th=""><th>Avent QuantumX Compatibility Mode active</th><th>Details Updat</th><th>de firmware Terminate</th><th></th><th></th><th></th><th></th></th<>	Avent QuantumX Compatibility Mode active	Details Updat	de firmware Terminate				
Lange Lange <thlange th="" <=""> <thlange th="" <=""> <thl< th=""><th>Configure DAQ channels</th><th></th><th>1201 2 2 2</th><th></th><th></th><th>Current sensor database: Sensor</th><th>database.sdb</th></thl<></thlange></thlange>	Configure DAQ channels		1201 2 2 2			Current sensor database: Sensor	database.sdb
ti Chamad variane i Lastada Bild Chamad variane i Madia (2014) Bild Chamad Jammat i Bild Cha	Access_1 (1996) Access_1 (1996	Birope (100:64-87-80-01) # 50 12 (27:68-7-64) # 50 12 (27:68-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-7-64) # 50 12 (27:78-76-76) # 50	1.1 10 CAN person assigned 1.2 10 CAN person assigned 1.3 10 CAN person assigned 1.4 10 CAN person assigned 1.5 10 CAN person assigned 1.6 10 CAN person assigned 1.6 10 CAN person assigned 1.7 10 CAN person assigned 2.8 Thermost person assigned 2.9 Thermost person assigned 3.9 Do Malogned 3.9 Do Malogned 3.9 Do Malogned 20 Carlon 3.9 Do Malogned 20 Carlon	H00000 *(0/91) H0000 *(0/91) H00000 *(0/91) H00000 *(0/91) H00000 *(0/91) H00000 *(0/91) H0000 *(0/91)		Constant Constan	by dramet
	4			_		Charnel name Computation Computation Computation Compute Cares value	icented HostablCH #%460/10.433

Fig. 51 CatmanAP V3.5.1

6.2 실험결과

실험은 추진기의 프로펠러 RPM 값이 전진저속과 전진 중.고속 그리고 후 진 등 3가지 모드로 실험하였다.

1) Fig. 52~Fig. 54는 전진저속에서의 시간에 대한 추진력의 크기를 표시 한다. 청색선은 실제 측정된 데이터이다. 이때 데이터는 0.02초 마다 측정 하였고 붉은선(굵은실선)은 실험데이터를 이동평균(60개)한 값이다. 추진력 실험결과는 Table 6과 같다.



Fig. 52 Thrust vs. Time (@ 324RPM)



Fig. 53 Thrust vs. Time (@ 588RPM)



Fig. 54 Thrust vs. Time (@ 764RPM)

Table 6 추진력 실험결과(@ 1,000RPM 이하)

324RPM	588RPM	764RPM
0.144	0.457	0.839
		· · · ·
	324RPM 0.144	324RPM 588RPM 0.144 0.457

2) 전진 중/고속 영역에서는 1,000RPM, 2,000RPM, 3,000RPM에서 시험하였다.
(1) Fig. 55~Fig. 57은 1,000RPM에서의 시간에 대한 추진력의 크기를 표시한다. 청색선은 실제 측정된 데이터이다. 이때 데이터는 0.02초 마다 측정하였고 붉은선(굵은실선)은 실험데이터를 이동평균(60개)한 값이다. 추 진력 실험결과는 Table 7과 같다.



Fig. 55 Thrust vs. Time(@ 1,000RPM 1st)



Fig. 56 Thrust vs. Time(@ 1,000RPM 2nd)



Table 7 추진력 실험결과(@ 1,000RPM)

	전압(V)	전류(A)	유속(m/s)	RPM	추진력[N]
1차 실험	12.1	0.924	0.69	1,048	1.706
2차 실험	12.1	0.921	0.69	1,030	1.722
3차 실험	12.1	0.925	0.69	1,045	1.742
평균				1,041	1.723

(2) Fig. 58~Fig. 60은 2,000RPM에서의 시간에 대한 추진력의 크기를 표시한다. 청색선은 실제 측정된 데이터이다. 이때 데이터는 0.02초 마다 측정하였고 붉은선(굵은실선)은 실험데이터를 이동평균(60개)한 값이다. 추진 력 실험결과는 Table 8과 같다.



Fig. 58 Thrust vs. Time(@ 2,000RPM 1st)



Fig. 60 Thrust vs. Time(@ 2,000RPM 3rd)

	전압(V)	전류(A)	유속(m/s)	RPM	추진력[N]
1차 실험	12.1	3.62	1.38	2,013	6.153
2차 실험	12.1	3.57	1.30	2,040	5.870
3차 실험	12.1	3.57	1.33	2,068	5.832
평균					5.952

Table 8 추진력 실험결과(@ 2,000RPM)

(3) Fig. 61~Fig. 63은 3,000RPM에서의 시간에 대한 추진력의 크기를 표시한다. 청색선은 실제 측정된 데이터이다. 이때 데이터는 0.02초 마다 측정하였고 붉은선(굵은실선)은 실험데이터를 이동평균(60개)한 값이다. 추진 력 실험결과는 Table 9와 같다.



Fig. 61 Thrust vs. Time(@ 3,000RPM 1st)



Fig. 62 Thrust vs. Time(@ 3,000RPM 2nd)



Fig. 63 Thrust vs. Time(@ 3,000RPM 3rd)

	전압(V)	전류(A)	유속(m/s)	RPM	추진력[N]
1차 실험	12.1	10.40	1.72	3,061	11.929
2차 실험	12.1	10.42	1.69	3,150	12.115
3차 실험	12.1	10.43	1.69	3,092	12.149
평균	\subseteq			3,101	12.064

Table 9 추진력 실험결과(@ 3,000RPM)

결론적으로 전진 중.고속에서의 시험결과는 1,000RPM를 제외하고는 모두 실험값과 시뮬레이션 값이 잘 일치하는 경향을 보였다. 실험값과 시뮬레이 션 값의 추진력 비교결과는 Table 10 와 같다.

Table 10 추진력비교(실험 vs. 시뮬레이션)

	1,000RPM	2,000RPM	3,000RPM
실험[N]	1.723	5.951	12.064
시뮬레이션[N]	1.512	5.998	12.870

3) 후진에서는 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 64~Fig. 66의 청색선은 실제 측정된 데이터이다. 이때 데이터는 0.02 초 마다 측정하였고 붉은선(굵은실선)은 실험데이터를 이동평균(60개)한

값이다. Duty Cycle -0.7에서 최대추진력(후진)이 발생하였으며, 추진력 실 험결과는 Table 11과 같다.



Fig. 64 Thrust vs. Time(@Reverse 1st)



Fig. 65 Thrust vs. Time(@Reverse 2nd)



Fig. 66 Thrust vs. Time(@Reverse 3rd)

Table 11 추진력 실험결과(@ 후진)

	전압(V)	전류(A)	유속(m/s)	RPM	추진력[N]
1차 실험	12.1	10.42	0.30	3,159	5.81
2차 실험	12.1	10.42	0.30	3,126	5.83
3차 실험	12.0	10.43	0.30	3,158	5.57
평균				3,147	5.74

지금까지의 실험결과를 정리하면 전진 중.고속 영역에서 산출된 결과인 12.064N(@3,000RPM)에 비해 후진모드에서는 5.57N(@3,100RPM)을 얻음으 로써 전진에 비해 후진방향은 약 41.6%의 추진력 크기를 가짐을 알 수 있 다.

6.3 실험결과 고찰

실험결과는 다음과 같다. 전진저속(1,000RPM 이하)에서의 추진력 실험결 과는 Table 6와 같다. 전진중.고속(1,000RPM/2,000RPM/3,000RPM)에서 추진 력은 Table 10과 같으며, 1,000RPM에서는 실험값과 시뮬레이션 값이 다소 차이를 보이고 있으나, 프로펠러 회전수 2,000RPM에서는 실험값과 시뮬레이션 값의 오차율이 0.78%로 나타났고 3,000RPM에서는 오차율 4.02%로 나타났다. 이는 시뮬레이션에서 몇가지 가정을 하였고, 실험에서도 측정오차 발생가능성이 있음을 감안 할 경우 이정도의 오차는 인정할 수 있을 것으로 판단된다. 후진에서의 추 진력 결과는 Table 11과 같으며, 전진 중.고속에서 보다 약 41.6% 의 추진 릭 크기를 가진다.

7. 추진기모델을 적용한 Hovering AUV의 수중운동 시뮬레이션

7.1 운동방정식

5개의 추진기를 갖는 Hovering AUV는 Fig. 67와 같이 각 추진기의 동작 에 따라 6방향 운동을 제어할 수 있다. 2개의 회전가능한 주 추진기와 3개 의 보조 추진기로 구분된다. 주 추진기가 수평이면 x축 방향, 즉 전.후방향 으로 운동할 수 있으며, 주 추진기가 수직이면 z축 방향, 즉 상.하 방향으 로 운동한다. 2개의 수평 추진기는 xy 평면에서의 방향을 제어할 수 있다. 또한, 수직 추진기는 기울기(pitch)를 제어할 수 있다. 이상과 같이 총 5개 의 추진기를 사용하여 수중에서의 운동을 제어한다.



Fig. 67 Hovering AUV coordinate system

-59-
6자유도에 대한 위치와 자세를 표현하기 위해서는 지구고정좌표계(Earth fixed coordinate system)와 동체고정좌표계(Body fixed coordinate system) 를 정의하여야 한다. 6자유도를 나타내는 변수는 Table 12와 같다. 또한 Hovering AUV 크기는 부록 6과 같다.

	r		
방향	힘, 모멘트	위치, 각도	속도, 회전속도
surge	Х	X	u
sway	Y	У	v
heave	Z	Z	w
roll	K	φ	р
pitch	М	θ	q
yaw	N	Ψ	r

Table 12 6자유도 운동변수

6자유도 운동방정식은 뉴턴의 제2법칙과 각운동량 법칙을 사용하여 유도 할 수 있다. 동체 고정 좌표계의 속도(u,v,w), 각속도(p,q,r)는 다음의 식(43 ~48)으로 나타낼 수 있다. 식(43~48)의 우변항은 외력의 합이다. 좌변항 은 동역학 모델을 12개의 상태변수를 사용한 비선형 미분 방정식으로 표시 할 수 있다. 본 연구에서는 3축(x, y, z)방향 직선운동과 회전운동(yaw)만 있는 것으로 가정하여 4개의 운동방정식만 고려하였다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = X$$
(43)

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(pq + \dot{r})] = Y$$
(44)

$$m[\dot{w} - up + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] = Z$$
(45)

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] = K$$
(46)

$$\dot{I_{yy}q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] = M$$
(47)

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] = N$$
(48)

Hovering AUV의 자세와 위치는 오일러 각을 이용하여 식(49~54)와 같 이 표현된다.

$$\dot{\phi} = p + q \sin\phi \tan\theta + r \cos\phi \tan\theta \tag{49}$$

$$\theta = q\cos\phi - r\sin\phi \tag{50}$$

$$\dot{\psi} = (q\sin\phi + r\cos\phi)/\cos\theta \tag{51}$$

$$\dot{x} = u \cos\psi \cos\theta + v(\cos\psi \sin\theta \sin\phi - \sin\psi \cos\phi)$$
(52)
+ $w(\cos\psi \sin\theta \sin\phi + \sin\psi \sin\theta)$

$$\dot{y} = u \sin\psi \cos\theta + v(\sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\phi)$$
(53)
+ $w(\sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi)$

$$\dot{z} = -u\,\sin\theta + v\,\cos\theta\,\sin\phi + w\,\cos\theta\,\sin\phi \tag{54}$$

첫째, 힘으로 표시된 항목을 정리하면 다음과 같다. <Added mass>

$$X_{A} = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}q^{2} + X_{vr}vr + X_{rr}r^{2}$$
(55)

$$Y_A = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq$$

$$(56)$$

$$Z_A = Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_{uq} uq + Z_{vp} vp + Z_{rp} rp$$

$$\tag{57}$$

<Hydrostatic force>

$$X_{HS} = -(W - B)\sin(\theta) \tag{58}$$

$$Y_{HS} = (W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \tag{59}$$

$$Z_{HS} = (W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \tag{60}$$

- 61 -

<Drag force>

$$D = \frac{1}{2}\rho C_D A V^2 \tag{61}$$

<Thrust>

둘째, 모멘트 항을 정리하면 다음과 같다.

<Added mass>

$$K_A = K_p \dot{p} \tag{62}$$

$$M_{A} = M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uw}uw + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uq}uq$$
(63)

$$N_A = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_{uv} uv + N_{\wp} \wp + N_{pq} pq + N_{ur} ur$$
(64)

<Hydrostatic moment>

$$K_{HS} = -y_g W\cos(\theta)\cos(\phi) - z_g W\cos(\theta)\sin(\phi)$$
(65)

$$M_{HS} = -z_g W \sin(\theta) - x_g W \cos(\theta) \cos(\phi)$$
(66)

$$N_{HS} = -y_g W \cos(\theta) \sin(\theta) - z_g W \sin(\theta)$$
(67)

7.2 운동 시뮬레이션

본 Hovering AUV의 운동방정식과 관련된 각종 상수 및 계수 값은 참고 문헌[56]에서 인용하였다. 또한 유선형의 외피가 있는 경우로 가정하였다.

7.2.1 기본운동 시뮬레이션

기본운동 시뮬레이션은 추진기의 다물리 모델로부터 추진력을 계산하고 이 추진력을 전체 시스템의 동역학 모델에 적용하여 동적운동을 계산한다. 동역학 시뮬레이션에 사용된 각종 물성치는 부록 9와 같다.





Fig. 68 Simulink blocks for surge control



Fig. 70 Hovering AUV response about surge control

나. Sway (y방향)



Fig. 71 Simulink blocks for sway control



Fig. 72 Thruster response about sway control



Fig. 73 Hovering AUV response about sway control



Fig. 74 Simulink blocks for heave control



Fig. 76 Hovering AUV response about heave control

라. YAW $angle(\psi)$





Fig. 78 Hovering AUV response about yaw control

7.2.2 PD제어 시뮬레이션

추진기의 비선형성과 Hovering AUV 자체의 비선형성으로 인하여 한계 싸이클(Limit cycle)이 발생한다. 이러한 한계싸이클을 제어하기 위해 PID 제어를 하게 되면 적분게인(Integrated gain)의 영향으로 시스템이 오버슈 트 혹은 발산하는 성질이 나타난다. 따라서 본 연구에서는 수중에서 운항 거리를 제어하기위해 PD제어기를 사용하였다. 각 축별 목표거리는 x축 (10m), y축(5m), z축(5m)으로 구분하였으며, yaw 회전각(r)은 10도로 셋팅 하여 각 목표지점에 도달시 동작을 정지하는 것으로 설정하였다. 시뮬레이 션 결과는 아래과 같다. 설계된 PD-gain 값은 Table 13과 같다. 항력산출 을 위한 항력계수 산정은 부록 10과 같다.

구분	P-gain	D-gain
x	5	10
у	5	80
z	10	5
r	0.1	0.01

Table 13 PD-gain

가. Surge (x방향)

운동방정식 :
$$mu = X = -X_A - X_{HS} - D + T$$

$$= -X_u \dot{u} + (W - B)\sin(\theta) - D + T$$
(68)

위 식(68)을 정리하면,
$$\dot{u} = \frac{1}{m + X_{\dot{u}}} [(W - B)\sin(\theta) - D + T]$$
 (69)



Fig. 79 Simulink blocks for surge PD control



Fig. 81 Hovering AUV response about surge PD control

나. Sway(y방향)

운동방정식:
$$\dot{mv} = Y = -Y_A - Y_{HS} - D + T$$

$$= -Y_v v - (W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) - D + T$$
(70)

위 식(70)을 정리하면,
$$\dot{v} = \frac{1}{m + Y_{\dot{v}}} [-(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) - D + T]$$
 (71)



Fig. 82 Simulink blocks for sway PD control



Fig. 83 Thruster response about sway PD control



Fig. 84 Hovering AUV response about sway PD control

다. Heave(z방향)

운동방정식:
$$\dot{mw} = Z = -Z_A - Z_{HS} - D + T$$

= $-Z_{\dot{w}}\dot{w} - (W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) - D + T$ (72)

위 식(72)를 정리하면,
$$\dot{w} = \frac{1}{m + Z_{\dot{w}}} [-(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) - D + T]$$
 (73)





Fig. 86 Thruster response about heave PD control



Fig. 87 Hovering AUV response about heave PD control

라. Yaw(Z축 기준 회전)
운동방정식 :
$$I_{ZZ}\dot{r} = \sum N = M_{Thrust} - D$$
 (74)
 $M_{Thrust} = Force[N] \times Distance[m]$ (75)

식(75)에서 M_{Thrust} 는 전방수평추진기에서 발생하는 모멘트를 말한다. 힘 은 추진기에서 발생하는 y축 방향의 추진력이며, 거리는 y축 센터에서 전 방수평 추진기의 프로펠러 중심점까지의 거리이다. 따라서 위 식(74~75)을 정리하면 식(76)과 같다.

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{zz}} [M_{Thrust} - D] \tag{76}$$



Fig. 88 Simulink blocks for yaw PD control



Fig. 90 Hovering AUV response about yaw PD control

7.3 운동 애니메이션

7.3.1 애니메이션을 위한 데이터 생성

Fig. 91~94는 가로축은 시간, 세로축은 surge, sway, heavy 방향의 이동 거리(x, y, z) 및 Yaw angle(ψ)를 나타낸다. 즉, x방향은 10m, y방향은 5m, z방향은 5m, 요각(yaw angle)은 10도 이동하게 된다.



Fig. 93 Distance z vs. Time



Fig. 94 Yaw angle(ψ) vs. Time

7.3.2 애니메이션 프로그램 실행



Fig. 95 Hovering AUV Animation

Fig. 95는 수중에서의 운동을 모사하는 Animation 이다. 이를 이용하면 최초 설계단계에서부터 물속에서의 운동을 관찰할 수 있게 된다.

MatLab/Simulink에서 계산된 결과를 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn 으로 시뮬레이션 하였다. Animation은 병진운동만 하는 경우와 병진운동과 Yawing을 같이 하는 경우 2가지를 고려하였다.

8. Hovering AUV의 기본성능예측

8.1 정격속도

지금까지의 연구결과를 바탕으로 본 장에서는 Hovering AUV의 운동모 델에 추진기모델을 삽입하여 전체시스템에 대한 기본성능을 예측하였다. 이러한 예측모델의 장점은 설계변경으로 인한 입력 파라메터의 변경에도 실시간으로 변화되는 기본성능을 예측할 수 있다는 것이다. 그러나 이러한 예측은 향후 실험을 통하여 확인/검증되어야만 완전한 모델 기반 제어 및 설계가 완성된다고 할 수 있다. 이러한 시뮬레이션과 실험이 계속 반복될 수 록 정밀한 제어 및 설계가 가능하다. 지금까지의 연구결과를 종합하면 각 방향별 예상되는 정격속도는 Table 14와 같다.

Table 14 Hovering AUV 정격속도

방향	정격속도(m/s)	비고
X	2.03	3.95 knot
У	0.60	1.17 knot
Z	0.27	0.53 knot

8.2 배터리 가용시간

실제 군수용이나 민수용으로 사용함에 있어서 현재 최대난제는 다음과 같 다. 첫째, 배터리의 용량한계로 인한 수중에서의 작동시간의 제한이다. 둘 째, 무선신호와 위성항법장치(GPS)는 심해에서는 작동되지 않기 때문에 통 신이 매우 어려우며, 해류로 인하여 예정된 코스를 벗어나기 쉽다. 셋째, 바다 속에서는 시야가 육상이나 공중보다 훨씬 제한되기 때문에 수중센서 의 탐지거리에 한계가 있다. 넷째, 바닷물이 장치들을 부식시키기 때문에 설계시 녹이슬지 않는 선체재료를 선정해야 한다. 현재 REMUS(미국, WHOI)와 같은 소형 AUV들은 최고 22시간까지 활동이 가능하나 SEAHO RSE(미국, ONR)같은 대형 AUV들은 72시간까지 가능하다. 그러나 군사용 으로 사용하기에는 아직도 부족한 형편이다. 따라서 추진효율이 높은 물고 기형태의 추진장치가 연구되고 있으며 향후 이런 난제들은 해결되리라 예 상해 본다. 본 논문의 연구대상인 Hovering AUV의 전원모듈은 모터용배 터리, 전장용배터리로 구성된다. 모터전원부는 모터용배터리를 사용하고, 전장전원부는 전장용배터리를 사용하다. 이는 모터 구동시 역기전력이 발 생하게 되는데 전장부에 영향을 미치지 않게 하기 위학이다[57]. 작동시스 템은 모터용 배터리에서 28V가 출력되면 모터의 정전압인 12V로 DC/DC 컨버터가 전압을 하강시킨 후 모터에 전압을 공급한다. 공급처는 주추진기 2개, 주 추진축 회전을 담당하는 서보모터 2개, 수직/수평추진기 3개 등 총 7개의 모터이다. 현재 장착된 추진기의 소비전류는 Table 15와 같다. 그리 고 장착되어있는 배터리 용량은 25Ah이다. 일반적인 배터리수명 계산식은 식(77)과 같다.

배터리수명(h) = 배터리용량(Ah)÷장치소비전류(A)×0.7 (77)

추진기 : 배터리수명=25Ah÷20.8A×0.7=0.84h(50.4분 혹은 3,024초) 추진기+전장전원부: 배터리수명=25Ah÷26.2A×0.7=0.67h(40.2분 혹은 2,412초)

계산결과 2개의 주 추진기를 사용하여 정격속도로 운항시 약 50.4분 동안 운항가능하며 전장전원부를 사용할 경우 약 40.2분 운항 가능하다.

Table 15 장치 소비전류

항목	전압(V)	용량(Ah)	추진기개수(n)	장치소비전류(A)
추진기	12	10.4	2	20.8
전장전원부	_	_	_	5.4
계				26.2

8.3 운항거리

현재 군사용 AUV의 주요임무중의 하나는 기뢰제거이다. 기뢰들은 얕은 바다 뿐만 아니라 깊은 수역에서도 위험요소이다. 보통 이런 종류의 기뢰 들은 해저 바닥에 있거나 수면 근처에 떠 있게 된다. 작전수역이 아주 넓 기 때문에 이 같은 기뢰제거 임무를 가진 AUV는 상당히 장거리 임무를 수행하여야 한다. 심해 소해용으로 제작된 SEAHORSE(미국, ONR)는 배 터리를 동력으로 300해리를 활동수역으로 하여 72시간 임무를 수행한다. 또한, 장기기뢰정찰시스템(Long-Term Mine Reconaissance System)은 100해리 (185.2Km)에 이르는 거리를 작전수역으로 한다.

본 연구대상인 Hovering AUV의 운항거리는 정격속도(surge 기준)와 배 터리 수명(운항시간)을 곱하여 다음과 같이 계산하면 추진기만 사용할 경 우 최대 약 6.1km, 추진기 및 전장전원부 동시 사용시 약 4.8km 이동 가 능하다. 이는 배터리의 총용량을 이동하는데 사용할 경우이기 때문에 특수 임무가 주어질 경우에는 소요전력 만큼 이동거리는 단축 된다.

Table 16 예상되는 운항거리

구분	정격속도(m/s)	배터리수명(s)	운항거리(m)
추진기	2.03	3,024	6,138
추진기+전장전원부	2.03	2,412	4,896

9. 결론

본 논문은 다물리 추진기 모델을 사용한 Hovering AUV의 모델기반 운동 제어에 대하여 연구하였고 결과는 다음과 같다.

1. 추진력을 발생시키는 요소인 모터와 프로펠러의 유체력(Hydrodanamic force)을 종합하여 이론적인 추진기 모델을 수립하였다. 이후 시뮬레이션만 수행하여 추진기로부터 발생하는 추진력을 계산하였고 실험을 통하여 이론 적인 추진기 모델의 타당성을 확보하였다. 추진력을 계산하기 위해서는 양 력.항력계수의 산출이 중요하다. 이를 위해 현재 사용중인 추진기 (400HFS-L)의 프로펠러를 3D 스캔하고 이를 3차원 데이터 파일로 만들어 CFX 프로그램을 사용하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 입력 파라메터는 대부분 실험을 통하여 실측하였으나 측정할 수 없는 모터 아마추어의 회전관성 값은 Trial and error method로 구하였다.

2. 추진력 측정을 위한 실험장치를 설계 및 제작하여 실험을 수행하였으
며 실험 내용은 추진기 프로펠러의 회전속도가 전진 저속과 전진 중.고속
그리고 후진 등 3가지 모드로 실험하였다. 실험결과는 일부 차이가 있었으
나, 대부분 시뮬레이션 값과 잘 일치함을 알 수 있었다.

3. 위의 과정을 통해 확보한 추진력 시뮬레이션 결과는 Hovering AUV의 전체 운동 시뮬레이션에 적용하였다. 그리고 본 연구에서는 PD제어기를

사용하여 4축(x, y, z, r)방향에 대한 운동을 시뮬레이션한 결과 x축방향의 속도가 제일 빠르고, y축, z축 순으로 나타났다.

4. 지금까지 Hovering AUV의 수중운동에 대한 연구에 있어서 입력항인 추진력은 상수가 입력되어 왔으나, 본 연구에서는 다물리 추진기 모델을 사용하여 추진력을 계단입력, 삼각파입력, 사인파입력 등 다양하고 현실상 황과 유사하게 넣을 수 있게 하였다. 또한, 비선형모델인 추진기모델을 선 형화(Linearization)시키지 않고서도 추진기 모델에 대한 운동방정식을 수립 하였고 Hovering AUV의 제어가 가능하도록 모델기반 제어 프로그램을 제 시함에 본 논문의 의의를 둘 수 있다.

5. 본 논문에서 제시하는 바와 같이 모델기반 제어는 설계자의 의도와 구 매자의 요구가 수시로 변경되는 상황에서도 최종적인 결과를 실시간으로 예상할 수 있는 설계 툴(Tool)의 기능을 가짐을 확인 할 수 있다. 따라서 시스템 설계초기에 대략적인 임무형태(정찰, 공격 등)를 결정하는데 도움이 되리라 판단된다. 예를 들면 프로펠러의 크기나 형태, 모터의 종류 등 입력 파라메터 선정에 따른 체계시스템의 기본성능을 예측할 수 있다. 또는 반 대로 특정 임무를 수행하기위한 입력(파라메터) 값을 구할 수 도 있다.

6. 본 연구에서 수행한 수중추진기에 대한 연구는 타 분야(자동차, 항공기
등)의 다물리 추진 모델을 설계하고 이를 사용하여 시스템의 모델기반 정
밀 운동제어 연구에 활용가능하리라 판단된다.

7. 본 연구에서 운동이 4축 방향만으로 한정 하였으나 6자유도 전체에 대해 PD, PID제어기를 사용한 운동 시뮬레이션을 추가로 연구할 필요가 있

- 81 -

고 실제의 운동을 실측하고 시뮬레이션 결과와 비교하여 발생된 오차를 피 드백하여 시뮬레이션 프로그램을 수정/보완하는 작업도 필요하다. 현재까 지의 연구는 수중에서의 해류 및 파도에 의한 영향은 제외되었으나 향후 추가 연구되어야 할 부분이다. 또한, 수중물체의 운동은 효율성이 중요하기 때문에 장시간 작동 가능한 추진기에 대한 연구개발이 필요하다.



References

[1] 서진호, "국내외 수중로봇 산업현황 및 전망," Robot Issue Brief 2014-1, 한국로봇산업진흥원

[2] 전봉환, 정용화, 심형원, 이판묵, "해저로봇 크랩스터 CR200을 이용한 서해안 해저유물의 탐지.식별.회수 실험," 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 710-712, 2015. 11.

[3] 장하용, 소명옥, 하윤수, 최형식, 강신영, 박한일, "1KW급 BLDC모터 기반의 수중추진체 개발에 관한 연구," 대한조선학회 학술대회자료집, pp. 1425-1428, 2011. 6.

[4] 김태형, 하병길, 안진우, "1KW급 수중로봇 추진용 브러시레스 직류전
동기 구동시스템 및 자기커플러 개발," 대한전기학회 학술대회 논문집, pp.
1103-1104, 2011. 7.

[5] 최형식, 소명옥, 박한일, 박원규, 장하용, 홍성율, "300W급 BLDC모터 기반의 수중추진체 개발," 한국마린엔지니어링학회지 34(8), pp. 1128-1134, 2010. 11.

[6] 전명재, 김동형, 최현석, 한창수, "단일 구동기로 수중이동이 가능한 수중 이동체 개발," 한국정밀공학회지 33(7), pp. 571-577, 2016. 7.

[7] 이성형, 김병국, 조원영, 김현우, 강민수, "레저용 소형선박의 가이드를 위한 2마력급 수중추진체 개발," 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 57-59, 2013. 4.

[8] 최원철, 유일수, 윤의수, "무인잠수정용 추진기 수력 설계," 대한기계학 회 춘추학술대회, pp. 2863-3864, 2015. 11.

[9] 최형식, 전지광, 정상기, 박한일, 유삼상, "새로운 Convertible ROV의 설계 연구," 한국마린엔지니어링학회지 36(4), pp. 451-458, 2012. 5. [10] 윤동원, 경진호, 박찬훈, 유이준, 김명혁, "수중 로봇의 추력에 관한 연 구," 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 1936-1937, 2011. 7.

[11] 윤동원, 박찬훈, 경진호, "수중 로봇의 추진성능에 관한 연구," 대한기 계학회 춘추학술대회, pp. 192-193, 2012. 4.

[12] 김경진, 이두형, 박원규, 박한일, "수중로봇용 덕트 추진기의 설계 및 성능해석," 한국해양공학회지 26(6), pp. 39-45, 2012. 12.

[13] 박경찬, 박찬재, 박원규, 박한일, "수중로봇용 덕트 추진기의 설계 및 성능해석," 대한조선학회 학술대회자료집, pp. 1437-1441, 2011. 6.

[14] 백찬욱, 서정무, 유지윤, 정인성, "에어 블로워 구동용 50W급 고속
BLDC 모터에 관한 연구," 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 110-112, 2006. 10.

[15] 김진현, 정완균, "외부유체의 영향을 고려한 무인잠수정의 추진기 모
델," 로봇학회 논문지 2(2), pp. 109-118, 2007. 6.

[16] 김창민, 백운경, "유체항력 계산을 통한 자율무인잠수정의 운동성능 예측과 실험," 한국마린엔지니어링학회지 39(6), pp. 614-619, 2015. 7.

[17] 백운경, 주문갑, 최형식, 서주노, "천해역 해양탐사를 위한 자율무인잠 수정의 연구용 시작품 개발," 한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집, pp. 232-233, 2012. 10.

[18] 김수진, 장근택, 이원창, "추진기의 동력학을 고려한 무인잠수정의 퍼 지제어," 한국지능시스템학회 논문지 9(3), pp. 323-330, 1999. 6.

[19] 최형식, 박한일, 노민식, 소명옥, "추진기의 동역학을 고려한 무인잠수 정의 슬라이딩 모드 제어," 한국마린엔지니어링학회지 33(8), pp. 1203-1211,
2009. 11.

[20] 류영신, "물고기형 수중로봇의 유영 메카니즘 및 알고리즘 개발(1)," 로봇학회 논문지 제4권 제1호, 2009. 3. [21] 정창현, 이상호, 차유성, 김경식, 류영선, "물고기를 모방한 수중로봇 설계," 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp. 611-612, 2009. 6.

[22] 전명재, 김동형, 최현석, 한창수, "단일구동기로 수중이동이 가능한 수 중 이동체 개발," 한국정밀공학회지 33(7), pp. 571-577, 2016. 7.

[23] 이한솔, 전봉완, 이지홍, "생체모방 수중로봇(CABLE10)의 Pitch 모션
분석 및 제어방법에 관한 연구," 대한전자공학회 학술대회, pp. 1046-1049,
2016. 6.

[24] 김희중, 전봉환, 이지홍, "유영과 보행이 가능한 생체모방 수중 로봇의 설계개념과 근사모델을 활용한 모의실험," 로봇학회 논문지 9(1), pp.
57-66, 2014. 3.

[25] 박종원, 이진이, 김수현, "생체모방 로봇의 최신동향," 제어로봇시스템 학회지 18(1), pp. 20-25, 2012. 3.

[26] Hongli L., Yufeng T., Qixin Z., and Guangming X., "Present research situations and future prospects on biomimetic robot fish," International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems Vol. 7, No. 2, March 2014.

[27] D. R, Yoerger, John, G. C and J. J E Slotine., "The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 15, No 3, july 1990.

[28] A. J. Healey and S. M. Rock, "Toward an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 20, No 4, Oct. 1995.

[29] L. L. Whitcomb and D. R. Yoerger, "Comparative experiments in the dynamics and Model-Based control of marine thruster," Proceedings

of MTS/IEEE Oceans'95

[30] L. L. Whitcomb and D. R. Yoerger, "Development, comparison, and Preliminary Experimental Validation of nonlinear dynamic thruster models," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24, No 4, Oct. 1999. [31] R. Bachmayer, L. L. Whitcomb and M. A. Grosenbaugh, "An Accurate Four-Quadrant Nonliner Dynamical Model for Marine Thruster: Theory and Experimental Validation", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 25, No 1, Jan. 2000.

[32] R. Bachmayer and L. L. Whitcomb, "An Open Loop Nonlinear Model Based Thrust Controller for Marine Thrusters," Proceedings of 2001 IEEE/RSJ

[33] 이종무, 최현택, 김기훈, 여동진, 이판묵, "상용추진기를 사용하는 무인 잠수정의 추진성능 추정," 한국해양공학회지 25(1), pp 27-31, 2011. 2.

[34] 노재규, 오정근, 김경민, 오대균, "3상 BLDC모터를 이용한 소형 AUV용 추진기 추력시험," 해양환경안전학회 학술대회논문집, pp. 41-43, 2013. 4.

[35] 강봉구, 김진혁, 김진현, "덕트형 단일 추진체 방식의 수중 이동체 운 동성능 실험," 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 1019-1022, 2011. 11.

[36] 이종무, 최현택, 문일성, 이판묵, "AUV의 추진성능 추정기법 연구," 한국해양공학회지 23(4), pp. 47-51, 2009. 8.

[37] 서영남, 고낙용, "4개의 추진기를 가진 수중로봇 제어," 제어로봇시스 템학회 학술대회 논문집, pp. 68-71, 2010. 12.

[38] 이필엽, 박성국, 권순태, 박상웅, 정훈상, 박민수, 이판묵, "수중정찰용 자율무인잠수정의 운동모델링 및 시험을 통한 계수 조정," 한국해양공학회 지 29(6), pp. 488-498, 2015. 12.

[39] 배설봉, 신동협, 주문갑, "PD제어기를 이용한 호버링 AUV의 깊이 제

어," Journal of KIIT. Vol. 12, No. 6, pp. 1-7, 2014. 6.

[40] S. Tsukioka, T. Aoki, T. Murashima and H. Nakajoh, "An investigation of low noise reduction gear for the AUV "Urashima" and sea trial of its acoustic communication," IEEE 2002.

[41] F. M. White, "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, 1979.

[42] T. Prestero, "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle," degrees of master science in ocean engineering, september 2011.

[43] Chin. C. S, Lau. M. W. S, Low. E. and Seet. G. G. L, "Software for modeling and simulation of a remotely operated vehicle(ROV)," Int. j. simul. model. 5, pp. 114–125, 2006. 3.

[44] Y. H. Eng, C. S. Chin and M. W. S. Lau, "Added mass computation for control of an open frame remotely operated vehicle : application using wamit and matlab," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 405–416, 2014.

[45] M. Nahon, "A simplified dynamics model for autonomous underwater vehicles," IEEE, 1996.

[46] J. Pan, Y. Yunan and F. Shidong, "Simulation for the propeller loading of marine electrical propulsion based on matlab," IEEE, 2011.

[47] G. R. Carrasco, A. Viedma and A. C. Toledo, "Coefficient estimation in the dynamic equations of motion of an AUV," sixth international workshop on marine technology, 2015.

[48] L. Christensen, P. Kampmann, Marc Hildebrandt, J. Albiez and F. Kirchner, "Hardware ROV simulation facility for the evaluation of novel underwater manipulation techniques," IEEE, 2009.

[49] X. Liang, J. Zhang, Y. Qin and H. Yang, "Dynamic modeling and computer simulation for autonomous underwater vehicles with fins," Journal of computers, Vol. 8, No. 4, April 2013.

[50] S. M. Savaresi, F. Previdi, A. Dester, S. Bittanti and A. Ruggeri, "Modeling, identification, and analysis of limit-cycling pitch and heave dynamics in an ROV," IEEE Journal of oceanic engineering, Vol. 29, No. 2, April 2004.

[51] C. Danilo, F. E. de Paula and B. T. Freire, "Development and analysis of a ROV dynamic model : capturing the effects of the propulsion system," Proceedings of the XI DINAME, 28th, 2005.

[52] T. H. Koh, M. W. S. Lau, E. Low, G. Swei and P. L. Cheng, "A study of the control of an underactuated underwater robotic vehicle," Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ

[53] Z. Feng and R. Allen, "Modeling of subzero II," ISVR Technical memorandum N 880, Oct. 2001.

[54] 김민지, 배설봉, 백운경, 주문갑, 하경남, "PID제어기를 이용한 호버링 AUV의 경유점 추적," 대한임베디드공학회논문지 제 10권 제4호, pp. 257-265, 2015. 8.

[55] T. I. Fossen, "Guidance and Control of Ocean Vehicles," John Wiley & Sons, 1994.

[56] 박상욱, "호버링 타입 자율무인잠수정의 운동제어 시뮬레이션," 부경대 학교 석사학위논문 2015. 2.

[57] 김민지, "후버링 자율무인잠수정의 구현과 6자유도 PID 제어기 설계," 부경대학교 석사학위논문 2016. 2.

Model-Based Accurate Motion Control of A Hovering Autonomous Underwater Vehicle Using Multiphysics Thruster Model

Yong Seok Ahn

Abstract

In the stage of concept design which underwater vehicles, it is important to estimate the vehicle's underwater performance. The key design elements for the motion are propellers, battery power, and underwater resistance of the vehicle. Usually small thrusters with motor and propeller are used for the UUV(unmanned underwater vehicles).

In this study, a multiphysics thruster model that combining electro-mechanical and hydrodynamics characteristics and propeller geometry were proposed to estimate the thruster performance. To show the applicability of the mathematical model, an sample thruster was used for the derive the unknown parameters of thruster. Most parameters were derived from experiment of thruster. Lift force and drag force coefficients are important for calculate of thrust. For obtains the propeller's 3D data, 3D scanning equipment was used. And that data was conversioned to CATIA file. In CFD(ANSYS/CFX)analysis, we obtained the results that velocity vector, streamline, pressure field of propeller. Finally, propeller's hydrodynamic parameters that lift and drag coefficient were calculated by equation of fluid mechanics. Matlab/simulink program was used for the numerical simulation to predict the thruster performance from the given input data which voltage and current to the motor. Test were done by 3 mode that are low speed, middle/high speed, reverse. Also, simulation model's validity was proved by experiment test. The thrust curves of thruster which obtained from this experiment test were similar to simulation results. So, conformed thruster model is veridity.

For model based accurate motion control of Hovering AUV, equations of motion were founded in 6 degree of freedom. The equation of motions were simplied and ignored, if it is not important. This paper studied surge, sway, heavy velocity and distances(x, y, z). Also studied yawing angle(ψ)and angular velocity(r)of Hovering AUV. The thrust simulation results were used in Hovering AUV simulation program. Finally model based control is completed. Now we can predict basic performance of Hovering AUV. For example basic performance of Hovering AUV is cruising velocity, caperbility of battery, distance. And PD control used for Hovering AUV. Hovering AUV Animation program was made by RecurDyn program. The model based control or design is important because it is save resources which are time, money, effort and reduce to risk that changed ROC. Model based control is offer to desiner as powerful design tool, although changing ROC or changing buyer. Results of this study that model based control method, can using different field which are car and aircraft industry.



부록 1. 추진기(400HFS-L)사양

본 연구에 사용된 추진기(400HFS-L)의 사양은 다음과 같다.

Motor Specifications

motor type-high efficiency brushless

weight 185g

max power 130W

gear ratio 4.28:1

shaft diameter 5mm

maxmum case temperature 100C

operating voltage 12 to 50 volts

operates in forward and reverse thrust

Connector Specifications

depth rating 300ft

3 wire

Thruster Housing/End Caps

T-6 aluminum

Thruster Seal

motor - flexible, polyurethane encapsulating compound

shaft seal - fluoroloy lip seal followed by encapsulting grease gallery

Thruster Weight

weight in air - 1 pound(0.453kg)

weight in water - 9 ounces(255g)

Thruster Length

6.25"(15.87cm)

Finish

black/red type II hard anodized finish

<u>Propeller</u>

size - 2.36"(60mm) 4 blade

material - solid brass

propeller adapter - machined aluminum/anodizrd type II black

Kort Nozzle Adaptor

material - 0.90 aluminum

offset - 120 degrees

Thrust Rating(130W Max)

12 volts - 8 pounds of thrust max

* Note - never exceed the 130w(voltage × current) or damage to the motor will occur

부록 2. 모터 토크상수(측정값)

모터의 토크상수 값은 500RPM 과 1,500RPM 일때의 토크상수 값을 측정 하여 이 값의 평균값으로 설정하였다.

RPM	토크상수[Nm/Arms]
500	0.031733
1500	0.032006
평균	0.031869

Table 17 모터토크 상수



부록 3. 모터의 저항 및 인덕턴스(측정값)

구분	저항(mΩ)	인덕턴스(mH)
Bue-White	43.4	28.7E-3
Blue-Red	47.3	32.1E-3
White-Red	44.3	30.3E-3
평균	45.0	30.4E-3

Table 18 모터의 저항 및 인덕턴스



부록. 4 Simulation parameter

Ra=0.045;	% motor electrical resistance [ohms]
La=30.4e-3;	% inductance [mhenry]
Jm=1e-5;	% motor polar moment of inertia [kgm ²]
Jp=15e-5;	% propeller polar moment of inertia [kgm ²]
Bm=0.003;	% motor shaft friction coefficient
Bp=0.0123;	% propeller shaft friction coefficient
Kbf=0.032;	% forward motor back emf constant[(volts.sec)/rad)]
Ktf=0.032;	% forward motor torque constant [Nm/Amp]motor back emf constant [(volts.sec)/rad)]
Kbr=0.030;	% reverse motor back emf constant [(volts.sec)/rad)]
Ktr=0.030;	% reverse motor torque constant [Nm/Amp]
rho=1029;	% water density [kg/m ³]
A=0.00335;	% tunnel cross sectional area [m ²]
L=0.05 ;	% shrouad length [m]
gamma=1.0;	% effective added mass ratio
del_beta=2.0;	% momentum coefficients(0~2.0)
K3=rho*A*L*gamma	% hydrodynamic model constant
K4=rho*A*del_beta	% hydrodynamic model constant
R=0.03 ;	% propeller radius [m]
p1=0.0615;	% propeller pitch [m]
CL1=0.199;	% foward lift coefficients
CD1=0.282;	% foward drag coefficients
CL2=0.199;	% foward lift coefficients
CD2=0.282;	% foward drag coefficients
N=4.28;	% reduction gear ratio
h=0.5*(0.7*R)^3*rho*.	A*N^-2; % propeller model constant
fsw=0.02;	% switching frequency(3sec-fsw0.5,10sec-fsw0.1,50sec-fsw0.02)
부록. 5 양력/항력계수 계산

가. 전산유체해석(CFD) 결과는 다음과 같다. 프로펠러 회전수(1,000RPM~ 3,000RPM)일때 양력, 항력, 유속을 계산하였다.

RPM	Lift[N]	Drag[N]	Velocity[m/s]
1,000	0.25	0.34	2.65
1,500	0.55	0.78	3.93
2,000	0.98	1.39	5.12
2,500	1.53	2.17	6.56
3,000	2.2	3.13	7.88

Table 19 프로펠러의 속도별 양력/항력/유속

Fig. 96, Fig. 97은 회전수에 따른 양력 및 항력의 크기를 나타낸 그림이다. 회전수가 높아질수록 양력(세로축) 과 항력(세로축)이 커짐을 알 수 있다.



Fig. 96 Lift force vs. RPM



Fig. 97 Drag force vs. RPM

나. 수식계산

양력/항력계수는 Table 20과 같이 계산할 수 있다. 계산결과 1,500RPM과 3,000RPM에서 같은 결과와 산출되며, 1,500RPM 값을 시뮬레이션에 적용하였다.

Table 20 프로펠러의 속도별 양력/항력계수

RPM	계산식	비고
1 000	$C_L = \frac{2 \cdot LIFT}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 0.25}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 2.65^2} = 0.199$	
1,000	$C_D = \frac{2 \cdot DRAG}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 0.343}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 2.65^2} = 0.273$	
1 500	$C_L = \frac{2 \cdot LIFT}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 0.55}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 3.93^2} = 0.199$	시뮤레이셔에 저요
1,000	$C_D = \frac{2 \cdot DRAG}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 0.78}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 3.93^2} = 0.282$	
2 000	$C_L = \frac{2 \cdot LIFT}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 0.98}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 5.12^2} = 0.209$	
2,000	$C_D = \frac{2 \cdot DRAG}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 1.39}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 5.12^2} = 0.297$	
2 500	$C_L = \frac{2 \cdot LIFT}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 1.53}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 6.56^2} = 0.198$	
2,500	$C_D = \frac{2 \cdot DRAG}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 2.18}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 6.56^2} = 0.283$	
2 000	$C_L = \frac{2 \cdot LIFT}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 2.2}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 7.88^2} = 0.198$	
3,000	$C_D = \frac{2 \cdot DRAG}{\rho \cdot A \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 3.13}{1000 \cdot 0.0003576 \cdot 7.88^2} = 0.282$	

부록 6. Hovering AUV 제원



O 모터의 전력소모량

Table 21 모터의 전력소모량

항목	전압(V)	용량(Ah)	추진기 갯수	전력량(wh)
추진기	12	2.3	5	138
서보모터	12	6	2	144
계				282

Table 22 전장 전원부의 전력소모량

항목	전압(V)	용량(Ah)	전력량(wh)
RF 모듈	5	0.05	0.25
시스템제어 모듈	12	1.66	20
항법 및 센서처리 모듈1	3.3	0.2	0.66
항법 및 센서처리 모듈2	3.3	0.2	0.66
IMU	5	0.2	1
DVL	24	0.2	4.8
깊이센서	24	0.3	7.2
누수감지회로	5	0.6	3
수중카메라	12	2	24
계	NUL	5.41	61.57

○ 실제 HAUV에 적용된 모터용 배터리의 사양은 다음과 같다.

- 제작사 : (주)엠에스텍(모델명 : SLPB216216)

- 리튬 폴리머배터리

Table 23 모터용 배터리의 사양

용량(Ah)	Min Voltage(V)	Nominal Voltage(V)	Max Voltage(V)	전력량(Wh)
25	24.0	29.6	33.6	740

- 배터리 용량 : 25Ah



Fig. 99 Hovering AUV Battery

부록. 7 기타 실험장비

- 가. 클램프형 전류계(PROSyS CP41, 영국)
 - \circ Measuring range : $0 \sim 40A$ DC
 - \circ Resoultion : 1mA/10mA
 - \circ Accuracy : ±1% of rdg
 - $\circ\,$ Frequency range : DC and 15 400Hz
 - Working voltage : 300v AC and DC



Fig. 100 Current clamp meter

- 나. 유속 측정장치(Flowwatch, 스위스)
 - ㅇ 본체



Fig. 101 Flowwatch

- 0 워터 임펠러 및 로드
 - 반경 : Φ60mm
 - 최소감도 : < 0.3km/h < 0.1m/s
 - 정밀도 : ±2%
 - 알루미늄 로드 1.2m, 케이블 2m



Fig. 102 Water impeller and rod

- 다. 회전속도계(HIOKI 3403, 일본)
 - 비접촉 포터블 회전속도계이며, 반사 테이프를 목표물에 접착 후 반
 사 되는 빛을 이용하여 회전수를 측정한다.
 - ㅇ 사양
 - Display : 0~20,000 rpm
 - Sampling period : 0.5~2.0(SLOW)/0.1~0.5(FAST)
 - Detection distance : $50 \sim 200 \text{mm}$
 - Accuracy : ±1 dgt(SLOW)/±20 dgt(FAST)
 - Power supply : 6 VDC



Fig. 103 Tachometer

라. 로드셀(YC33-50K)

ㅇ히스테리시스 : 0.5%

- 과부하 안전율 : 1.5
- ㅇ 사용 온도범위 : -20~70 ℃
- 측정범위 : 40.33 N





- 마. DATA 수집장치(HBM Inc._Mx840A)
 - 0 8채널 입력단자
 - A/D converter : 24 Bit delta sigma converter
 - Data rate : 0~19200(adjustable for each channel)
 - $\circ\,$ Active low pass filter : $0.01\,{\sim}\,3200$
 - Dimension(W×H×D) : (52.5×200×124)mm
 - Weight : 980 g



Fig. 105 DATA gathering equipment

- 바. Motor controller(TEXAS INSTRUMENTS Inc._DRV8301)
 - 최대전압 60V DC, 최대전류 60A
 - Hall sensor 포함
 - Size : (180×130)mm



부록. 8 3D 스캐너 사양



Fig. 107 3D Scanner component

Table 24 3D 스캐너 본체사양

1	정확도	0.1mm 이하
	카메라 해상도	0.3Mega pixel
	광원	백색광
보케시아	지원포맷	STL, ASC
온제사양	스캔사이즈(mm)	자동스캔 200X200X200
	스캔속도	자동스캔 4분 이하
	정렬방식	자동정렬방식
	측정보정	캘리브레이션 판 이용

부록. 9 HAUV 물성치

rho=997;	% water density [kg/m^3]
W=565 ;	% AUV weight
B=570 ;	% AUV buoyancy
pi=0 ;	% Rotation about the x-axis
theta=0 ;	% Rotation about the y-axis
psi=0 ;	% Rotation about the z-axis
xg=0 ;	% xvector to CG
yg=0;	% y-vector to CG
zg=0.07;	% z-vector to CG
xb=0 ;	% x-vector to CB
yb=0;	% y-vector to CB
zb=-0.025;	% z-vector to CB
$MA_surge=-1.107$;	% AUV added mass
MA_sway=-8.397 ;	% AUV added mass
MA_heave=-5.869;	% AUV added mass
MA_yaw=-20.48 ;	% AUV added mass
MA_pitch=-39.4 ;	% AUV added mass
Izz=7.13 ;	% Body product of inertia
Iyy=7.39 ;	% Body product of inertia
A_surge=0.258 ;	% AUV projection area
A_sway=0.734 ;	% AUV projection area
A_heave=0.53;	% AUV projection area
CD_surge=0.318;	% AUV drag coefficient
CD_sway=1.245;	% AUV drag coefficient
CD_heave=8.75;	% AUV drag coefficient

부록. 10 Hovering AUV 진행방향 항력계수

수중에서의 항력계수 값을 산출하기 위하여 참고문헌[56]의 Cross flow drag를 사용하였고, 투영면적 계산은 CATIA을 이용하였다. 참고문헌[56] 에 의하면 CFD 해석툴은 ANSYS Fluent을 사용하였고 유체영역은 x, y, z축 방향으로 ±4m로 하였다. 유체는 2m/s의 속도로 흐름을 가정하였다. Table 26의 투영면적은 CATIA 프로그램에서 확인하였다. 식(78)에 의한 항력계수 계산결과는 Table 27과 같다.

$$X_{u|u|} = \frac{1}{2} C_D \rho A_{surge} , \quad Y_{v|v|} = \frac{1}{2} C_D \rho A_{sway}, \quad Z_{w|w|} = \frac{1}{2} C_D \rho A_{heavy}$$
(78)

Parameter	cross flow drag[kg/m]
$X_{u u }$	31.75
${Y}_{v v }$	486.3
$Z_{w w }$	2098.0

Table 25 Cross flow drag

Table 26 투영면적

구분	투영면적[m ²]
A_{surge}	0.258
A_{sway}	0.734
A_{heavy}	0.530

Table 27 항력계수

구분	항력계수
C_{Dsurge}	0.318
C_{Dsway}	1.245
C_{Dheavy}	8.75

부록. 11 실험장치 도면(CAD)



Fig. 108 Drawing_BAR



Fig. 109 Drawing_BRACKET



Fig. 110 Drawing_CENTER LINK



Fig. 111 Drawing_BASE



Fig. 112 Drawing_PIN



Fig. 113 Drawing_SDE LINK



Fig. 114 Drawing_SUB



Fig. 115 Drawing_THRUSTER HOLDER

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 연구방향에 대한 조언과 따뜻한 격려로 많은 가 르침을 주신 백운경 교수님께 머리 숙여 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또 한 바쁘신 와중에도 귀중한 시간을 내어 세심히 검토하시고 논문의 완성도 를 높여주신 김부일 교수님, 이연원 교수님, 그리고 동아대학교 김현수 교 수님, 경성대학교 제우성 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

프로펠러 해석에 도움을 준 최윤환 박사님, 실험장치 구성에 도움을 준 이송철, 김민수, 최백규 그리고 유난히 더웠던 2016년 여름에 땀을 흘려가 며 실험을 도와준 우리 실험실 김봉준, 손홍문에게도 감사의 인사를 전합 니다. 여러분들의 도움이 없었다면 본 논문은 완성되지 못하였을 것입니다.

항상 아들의 학업을 위하여 헌신적으로 후원해주시고 격려해 주신 부모 님과 장모님께 감사드립니다. 지금은 고인이 되신 장인어른 영전에 이 결 실을 올립니다.

그리고 항상 저에게 도움과 용기를 주시는 김원섭형님과 처형께 감사드 립니다. 마지막으로 남편의 뒤늦은 학업을 뒷바라지 하느라 고생이 많은 사랑하는 아내와 군 입대를 앞둔 아들 성민이 논문의 오탈자를 검토해준 딸 윤지에게 감사의 인사를 전합니다.

박사학위 취득이 공부의 시작점 이란 것을 알기에 자만하지 않고 꾸준히 연구에 매진할 것을 약속드리며 도와주신 모든 분들의 앞날에도 무궁한 발 전과 영광이 있기를 기원합니다.

> 2017년 1월 안 용 석 拜上

- 116 -