

해수흡입 램젯추진 수중운동체 개념설계

엄재령^a · 임현애^a · 진완성^a · 최정열^{a,*}

Conceptual Design of An Underwater Vehicle Powered by Water-breathing Ramjet

Jaeryeong Um^a · Hyunae Lim^a · Wansung Jin^a · Jeong-Yeol Choi^{a,*}

^aDepartment of Aerospace Engineering, Pusan National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

ABSTRACT

Many countries are paying efforts to the research and development of water-breathing ramjet propulsion for submersible vehicle with the super-cavitation which makes traveling at high speed in underwater possible. In this study, a conceptual design of an underwater vehicle with water-breathing ramjet was carried out. Mission profiles and operating conditions are determined by examining the operation environment. Drag is estimated based on the theories of super-cavitation and fluid mechanics. The sizing and performance analysis of the components were performed using thrust required, thrust and specific impulse of designed engine were verified.

초 록

초공동현상을 이용한 고속 수중 운동체와 함께 이를 가능하게 하는 기술로써 해수흡입 램젯 추진에 대한 연구가 여러 나라에서 진행되고 있다. 본 연구에서는 해수 흡입 램젯 엔진을 추진기관으로 하는 수중 운동체의 개념 설계를 진행하였다. 가동 환경을 확인하여 임무 작동 조건을 설정하였으며, 해당 조건 내에서 초공동현상 이론과 유체역학적 지식을 통해 운동체에 작용하는 항력을 예측하였다. 이로 부터 필요 추력을 산출하여 추진기관의 대략적인 사이징과 부분별 성능해석을 수행하였으며, 설계한 추진기관의 추력 및 비추력 성능을 확인하였다.

Key Words: Super-cavitation(초공동현상), Water-breathing Ramjet(해수 흡입 램젯), Underwater Propulsion System(수중 추진 시스템), Conceptual Design(개념 설계)

1. 서 론

Received 10 December 2013 / Revised 1 July 2014 / Accepted 5 July 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 추계학술대회(2013. 12. 4-5, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

소련의 초공동현상 이용 고속 어뢰 개발이 알려진 이후, 해저에서 고속운동이 가능한 수중운동체 개발 및 관련 기술에 대한 많은 연구가 여

러 나라에서 진행되고 있다. 해저환경에서의 고속운항을 위해 가장 기본이 되는 핵심기술인 초공동현상은 고속의 유동 압력이 증기압 이하가 되어 유동 내에 발생한 증기포가 물체를 다 덮을 만큼 충분히 발달하는 것이며, 이를 이용해 점성항력을 급감시키는 방법에 대한 연구가 진행되었다[1-4].

고속 수중운동체 추진기관으로 고체로켓을 이용하는 경우, 작동시간이나 비행거리가 극히 제한된다. 이를 극복하고자 적용되는 핵심 기술인 해수흡입 램젯 추진기관은 공기흡입 기관인 램젯 기관의 원리를 이용한 것으로, 바닷물을 산화제로 사용하며 연료는 수반응성이 높은 금속을 사용한다[5-8]. 초기 연구는 고압공기에 의해 가속된 해수의 운동량을 통한 노즐 형상에서의 추진효율분석[9]이 주로 이뤄졌으며, 현재는 해수와 수반응성 금속 간의 연소과정을 통한 추진기관 성능에 대한 연구도 진행되고 있다[6-8].

본 논문에서는 해수흡입 램젯 추진을 이용한 수중운동체의 개념 설계 연구를 수행하였다. 기존의 중어뢰 및 알려진 고속 수중 운동체를 바탕으로 연구 대상의 가동 조건 및 초기 외형을 설정하였으며, 초공동현상 이론 및 유체역학적 지식을 통한 항력도출을 시행하였다. 또한, 주변 유동의 특성 분석을 통해 해수흡입 램젯 흡입구의 성능해석을 수행하였으며, 알루미늄과 해수의 연소반응을 통해 발생 열량 및 추진성능을 계산하였다.

2. 항력 추정

2.1 초기 외형 선정

설계하고자 하는 어뢰의 외형은 기존의 중어뢰 체원을 정리한 Table 1을 참고하였다. Table 2는 가정한 초기 외형을 정리한 것이다. 초공동현상을 발생시키기 위한 선두형상인 캐비테이터는 기존 연구에서 사용되는 원판에 비해 항력을 적게 받는 원뿔[10]로 가정하였으며, 반각을 10° , 원뿔 바닥 직경은 어뢰직경과 동일한 0.533 m로 가정하였다. Fig. 1에서 러시아의 shkval 어뢰의

Table 1. Specifications of reference model.

	Shkval	MK-48	Z13	Spearfish
Origin	Russia	USA	France	UK
Diameter (mm)	533	533	550	533
Weight (kg)	2700	1558	N/A	1850
Length (m)	8.2	5.79	7.125	7
Range (m)	300~800	400~900	~1000	N/A
Max. V (km/h)	370	101.86	55.5	150

* en.wikipedia.org

Table 2. Specifications of initial design objective.

Diameter (mm)	Weight (kg)	Length (m)	Max. Velocity (km/h)
533	2000	6	252 [70 m/s]

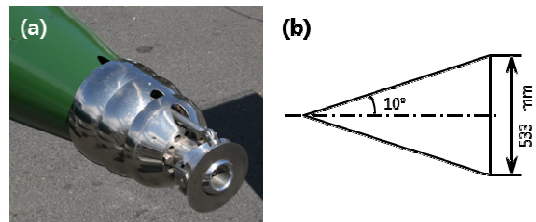


Fig. 1 Cavitor shape (a) cavitor of shkval torpedo (b) schematic diagram of conical cavitor.

원판 형 캐비테이터의 형상 및 본 연구에서 사용한 원뿔형 캐비테이터의 2차원 개략도를 확인할 수 있다.

2.2 가동 조건 설정

설계할 어뢰는 잠수함에서 발사, 적 잠수함 및 전함을 공격하는 것을 목표로 한다.

주 가동 위도는 주요 국가들이 밀집되어 있는 북위 40° ~ 70° 의 고위도로 가정한다. 분석 수심 범위는 100 m 이내로 가정하고 최대 가동속도를 70 m/s로 가정하였다.

고위도 100 m 이내의 수심에서는 수온이 4.5°C 로 일정하다. 수온의 영향을 받는 밀도, 점성, 증기압은 각각 $\rho_\infty \approx 1027.732 \text{ kg/m}^3$, $\mu_\infty \approx 0.001645 \text{ kg/ms}$, $p_v \approx 880.81 \text{ Pa}$ 의 값을 가진다[11].

2.3 항력 추정

2.3.1 초공동현상 이론

캐비테이션 수 σ 는 공동현상 발생여부를 판단하는 무차원수로, 작을수록 공동발생 가능성이 높으며, 속도 V 와 압력, 밀도에 의해 정의된다 [12].

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V^2} \quad (1)$$

$\sigma \leq 1.6$ 부터 공동현상이 발생하는 것으로 가정 [13]하며, 본 연구에서는 Eq. 2와 같이 정리되는 공동길이 l 이 어뢰길이에 도달하는 속도범위부터 초공동현상으로 볼 수 있다 [14].

$$\frac{4}{\pi} \sigma l + \int_0^c \left(\frac{l+1}{t} \right)^{\frac{1}{2}} y_0'(t) dt = 0 \quad (2)$$

이 때, t 는 0에서부터 최대 길이 c 까지의 캐비테이터 길이 변수, $y_0'(t)$ 는 캐비테이터 길이 변수에 대한 직경 변화를 나타낸다.

2.3.2 압력항력 D_p 추정

압력항력은 캐비테이터에만 작용한다고 가정하며, 캐비테이터는 공동현상이 발생하여도 공동 내에 포함되지 않고 해수와 접촉한다.

압력항력계수는 선두에서 박리가 발생하지 않을 때 유동 특성에 대한 상수 [15]이며, $\sigma > 1.6$ 범위에서 상수 0.05로 가정한다 [10].

공동현상 발생 시, 압력항력계수 $C_{d,p}$ 는 아래의 식과 같으며, 캐비테이션 수와 연관되어 있다 [12].

$$C_{d,p} = C_{d,0} (1 + \sigma) \quad (3)$$

이 때, $C_{d,0}$ 는 캐비테이터 반각에 따라 결정 [10]되며 0.069로 가정한다. 압력항력의 기준면적은 캐비테이터의 단면적이다.

2.3.3 점성항력 D_f 추정

본 연구에서 점성항력은 표면마찰항력으로 가정한다. 경계층이론을 통해 유도되는 Schoenherr 점성항력계수($C_{d,f}$) 공식 Eq. 4를 사용하여 점성항력을 추정하였다 [16].

$$C_{d,f} = \frac{0.0776}{(\log_{10} Re - 1.88)^2} + \frac{60}{Re} \quad (4)$$

이 때, Re 는 유동의 레이놀즈수이다. 점성항력을 도출할 때의 기준면적은 어뢰의 표면적이며, Eq. 2를 통해 구한 공동길이에 대해 공기에 대한 유동 특성을 사용하였다. 이는 공동을 형성하는 기체의 경우, 해수에 녹아있던 대기의 성분과 해수의 수증기가 혼합된 상태로 발생하므로 공동 내 유동을 수증기만의 특성으로 판단할 시 발생할 오차를 줄이기 위함이다.

2.3.4 항력 추정 결과

가동수심(H) 100 m 이내에서 압력항력과 점성항력의 영향을 Fig. 2를 통해 확인해보았다. 대표수심 10 m에서 압력항력은 공동현상이 발생하는 $\sigma \leq 1.6$ 의 범위부터 급격히 증가하며 이 지점은 Eq. 2에 의해 $V \geq 15$ m/s인 구간이다. 그 이하의 속도범위에서는 점성항력이 지배적임을 알 수 있으며, 초공동현상으로 가정한 공동길이 $l \geq 6$ m인 $V \geq 47$ m/s에서 점성항력이 급감한다.

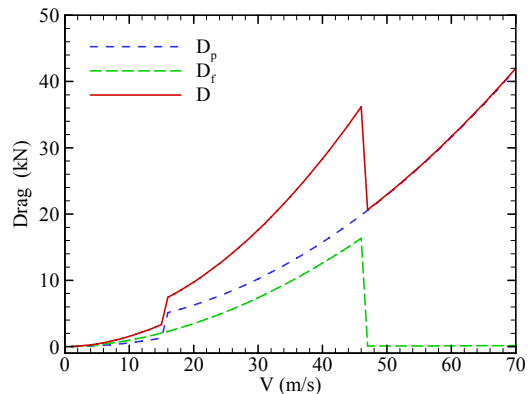


Fig. 2 Components of total drag at H = 10 m.

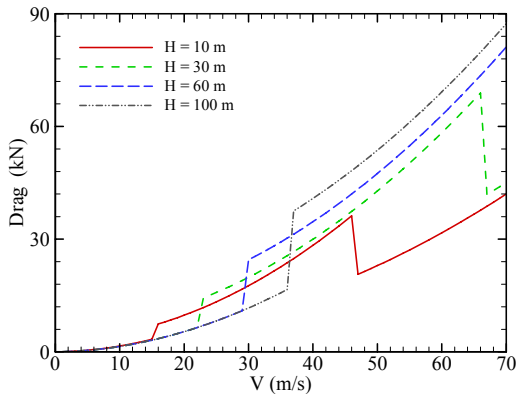


Fig. 3 Total drag.

수심에 따른 총 항력(D)은 Fig. 3과 같다. 수심이 깊어짐에 따라 초공동현상이 고속에서 발생하며, 총 항력이 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 깊은 수심은 초공동현상을 이용해 얻을 수 있는 이득이 적고 압력항력의 증가로 추진에 방해가 됨을 알 수 있다.

3. 추진기관 형상설계 및 성능해석

추진기관 형상설계 및 성능해석은 Fig. 4의 station 번호에 따라 진행한다. ∞는 free stream, 1은 흡입구 입구, 2는 흡입구 출구, 3은 연소실 입구, 4는 연소실 출구이자 노즐 입구, 5는 노즐 목, 6은 노즐 출구이며, 2~3은 연료와 산화제 반응성 증가를 위한 미립화구역이다.

추진기관 형상설계는 추진기관이 필요추력 이상의 추력을 발생시키기 위해 필요한 유량 및 그에 따른 추진기관 직경방향에 대한 개념설계를 실시하였으며, 길이방향으로의 설계는 진행하지 않았다.

3.1 흡입구 형상설계 및 성능해석

3.1.1 흡입구 형상설계

흡입구 내 유동의 유량은 질량 보존 법칙에 의해 일정하게 유지되며 흡입구의 입, 출구에서

$$\dot{m}_o = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \tag{5}$$

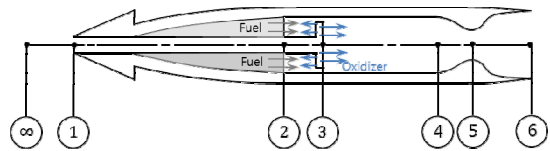


Fig. 4 Station numbering of engine.

의 관계를 가진다. 이 때, A는 각 위치에서의 단면적이며, 해수는 비압축성 유체로써($\rho_1 = \rho_2$)

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_2}{V_1} \tag{6}$$

의 관계를 확인할 수 있다. 이 때, 출구속도 V_2 는 미립화 구역 유입속도 V_3 와 같게 가정한다.

미립화 구역에서 알루미늄과 해수는 가열되며, 이때의 유속 V_3 는 알루미늄과 해수증기의 반응 가능 속도인 30 m/s[17] 이내로, 연소기 내 유속이 낮을수록 안정된 연소로 추진효율이 좋아진다[18]. V_3 와 질량보존에 따라 직경(d)을 도출하며, ρ_2 는 해수밀도, ρ_3 는 공기밀도이다.

$$\dot{m}_o = \rho_2 A_2 V_2 = \rho_3 A_3 V_3 \tag{7}$$

$$A_3 = \frac{\rho_2}{\rho_3} A_2 = \frac{\rho_2}{\rho_3} \frac{V_1}{V_2} A_1 \tag{8}$$

위 과정을 통해 도출된 흡입구 형상은 흡입구 입구 직경에 대해 Fig. 5 및 Table 3과 같은 경향을 보이며 직경 결과는 소수점 첫째자리에서 반올림하였다. 최종형상은 $d_1 = 11$ mm, $d_2 = 17$ mm, $d_3 = 492$ mm로 결정하였다.

3.1.2 흡입구 성능해석

개념설계를 진행함에 있어 흡입구 내 유동을 등 엔트로피 과정으로 가정하여 마찰손실 등을 무시하였다. 이때의 유동은 산화제로만 구성되며, 베르누이 방정식을 통해 흡입구 내 압력변화를 알 수 있다.

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_2 V_2^2 \tag{9}$$

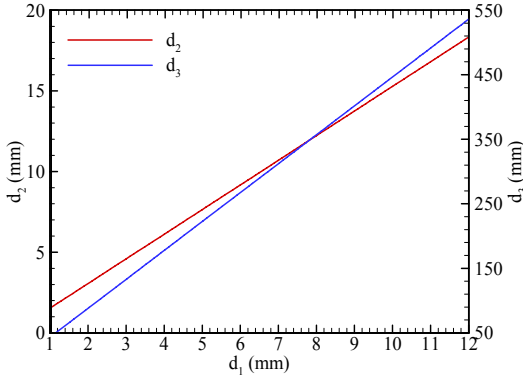


Fig. 5 Change of inlet shape.

Table 3. Specifications of inlet shape at several diameter of station 1.

\dot{m}_o (kg/s)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)
3.616	8	12	357
4.577	9	14	402
5.650	10	15	447
6.837	11	17	492
8.136	12	18	536

흡입구 내 에너지 보존 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} + \dot{m}_1(p_1 v_1 + u_1 + g z_1 + \frac{1}{2} V_1^2) \\ = \dot{m}_2(p_2 v_2 + u_2 + g z_2 + \frac{1}{2} V_2^2) + \dot{W} \end{aligned} \quad (10)$$

이 때, v 는 체적, u 는 내부에너지를 뜻한다. 흡입구에서는 열량, 일률, 높이변화가 없으며, 질량보존 및 베르누이 법칙을 통해 Eq. 10은 아래와 같이 다시 정리 가능하다.

$$u_1 = u_2 \quad (11)$$

위 식과 내부에너지 변화 식 Eq. 12를 통해, 흡입구 내 온도변화가 없음을 알 수 있다.

$$du = c_v dT \quad (12)$$

이 때, c_v 는 정적 비열이며, 가동속도가 70

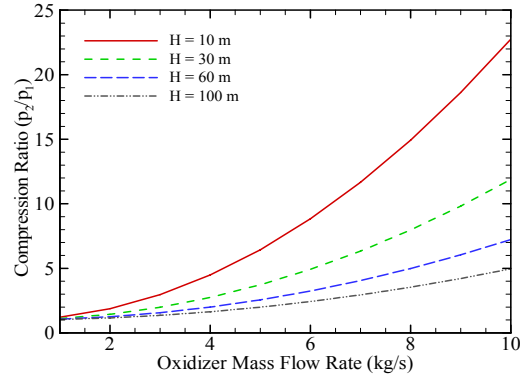


Fig. 6 Inlet compression ratio.

Table 4. Inlet performance at $V = 70$ m/s.

h (m)	T_1 (K)	p_1 (Pa)	p_2 (Pa)	T_2 (K)
10	277.65	202120.5	2257585	277.65
30	277.65	403761.6	2459226	277.65
60	277.65	706223.3	2761688	277.65
100	277.65	1109505	3164970	277.65

m/s일 때의 수심별 흡입구 성능은 Table 4, 속도에 따른 수심별 압축비는 Fig. 6과 같다.

미립화 구역에서 해수의 상태변화에 필요한 열량인 증발잠열 h_{fg,H_2O} 는 흡입구 온도 277.15 K에서 약 2403.18 kJ/kg을 가지며[11], 연소실 유입 산화제 온도 T_3 와의 관계는 아래와 같다.

$$Q = h_{fg,H_2O} = \int_{T_2}^{T_3} c_p(T) dT \quad (13)$$

재생냉각을 통해 해수가 기화되기 위한 증발잠열만큼의 열량이 제공되었다고 가정하며, 기체 상태에서의 가열에 필요한 열량을 고려하지 않은 상태에서 도출된 T_3 는 약 746.514 K이다.

3.2 연소실 형상설계 및 성능해석

3.2.1 연소실 형상설계

연소실은 연소실 내의 고압을 버틸 수 있어야 하므로 일정량 이상의 두께가 필요하다. 이를 위해 연소실 직경은 흡입구의 미립화 구역 직경 d_3 과 동일하게 가정하였다.

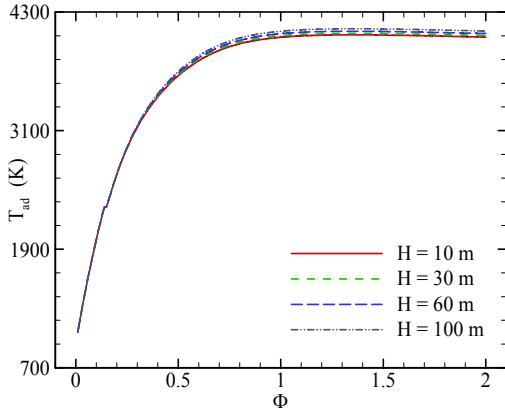


Fig. 7 Adiabatic flame temperature at 70 m/s.

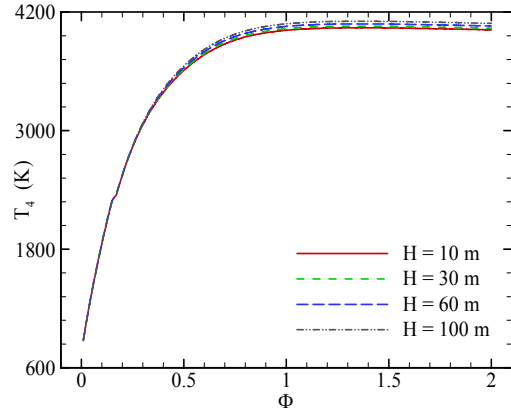
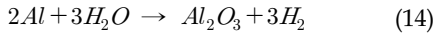


Fig. 8 Combustion chamber temperature at 70 m/s.

3.2.2 연소실 성능해석

연소실 내에서는 정압단열연소가 일어나며 산화제 온도는 746.514 K, 연료 온도는 알루미늄 용해점 933.15 K으로 가정한다. 이는 산화피막이 제거된 알루미늄이 미립화 구역에서 이미 용해된 상태로 가정한 조건이다. 연소실 내 가장 안정적인 알루미늄과 해수의 반응은 아래와 같다.



CEA 프로그램을 통해, 연소실 내의 정압단열 화염온도 T_{ad} 를 도출하였다. Fig. 7은 가동속도 70 m/s일 때, 수심별 당량 비 ϕ 에 따른 정압단열 화염온도이다.

재생냉각 시스템을 통해 구조물에 가해지는 열 하중을 줄이는 방식으로 추진기관을 설계하며, 생성물 엔탈피 h 에서 해수의 증발잠열 h_{fg,H_2O} 과 알루미늄의 용해잠열 $h_{fg,Al}$ 약 387 kJ/kg[19]이 방출된 이후의 열량으로 연소실 최종온도를 도출한다.

$$Q = h - h_{fg,H_2O} - h_{fg,Al} = \int_{T_{ad}}^{T_4} c_v dT \quad (15)$$

$$= c_v (T_4 - T_{ad})$$

위 과정을 거쳐 Eq. 15를 통해 도출한 연소실 출구온도 T_4 는 Fig. 8에 정리하였으며, T_4 가 엔

진가동 가능한 연소실 온도범위 2000 K ~ 3000 K에 해당하는 ϕ 범위는 0.12 ~ 0.29이다. 각 당량 비에 해당하는 생성물 엔탈피는 CEA를 통해 도출하였으며, 이후에 이뤄지는 형상설계 및 성능해석은 ϕ 0.1 ~ 0.4 범위에서 시행하였다.

3.3 노즐 형상설계 및 성능해석

3.3.1 노즐 형상설계

노즐 내 유동은 압축성유동이며, 노즐 단면적과 유속 간의 관계는 Eq. 16과 같고[20], A^* 는 노즐 목 면적이며 $A = A_4$, $M = M_4$ 로 둔다.

$$\left(\frac{A}{A^*}\right)^2 = \frac{1}{M^2} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \quad (16)$$

수축-확장 노즐에서 노즐 목과 압력 p_x 를 가지는 임의 하류유동 면적 비는 아래와 같다[21].

$$\frac{A_5}{A_x} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma+1}} \left(\frac{p_x}{p_4} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (17)$$

이 때, 목 면적은 Eq. 16을 통해 도출하며 설계조건에서 노즐 유동의 아음속 여부를 확인한다. 여기서 γ 는 노즐 내 기체의 비열비이다. 모든 조건에서 필요추력 이상의 추력이 발생 가능

한 최종형상은 $d_5 \approx 123 \text{ mm}$, $d_6 \approx 235 \text{ mm}$ 이다.

3.3.2 노즐 성능해석

노즐 내 유동은 경계층 효과를 무시하며 단일 1차원 정상상태의 이상기체 유동으로 가정한다. 노즐 목의 압력, 온도 변화는 아래와 같다[21].

$$\frac{p_5}{p_4} = \frac{\left[1 + \frac{1}{2}(\gamma-1)M_4^2\right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\left[1 + \frac{1}{2}(\gamma-1)M_5^2\right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (18)$$

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{p_5}{p_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (19)$$

엔진이 가동 가능한 온도범위 내 최대 당량비인 0.29에서 수심별 노즐 목의 압력과 온도는 Fig. 9, 10에 정리하였다.

노즐 출구 압력 p_6 는 노즐 형상에 대한 팽창비 p_6/p_4 를 통해 도출 가능하며 Fig. 11과 같은 경향을 보인다. 노즐 내 등 엔트로피 유동의 노즐 출구와 노즐 목 온도 관계 식 Eq. 20에 따라 도출한 노즐 출구 온도 T_6 은 Fig. 12와 같다.

노즐 내부 유동의 압력과 온도는 산화제 유량이 증가함에 따라 비례하여 증가하며, 깊은 수심에서 더 높은 압력과 온도를 보인다.

$$\frac{T_6}{T_5} = \left(\frac{p_6}{p_5}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (20)$$

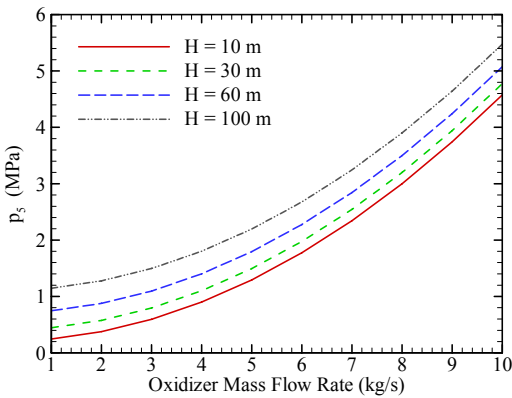


Fig. 9 Nozzle throat pressure at $\Phi = 0.29$.

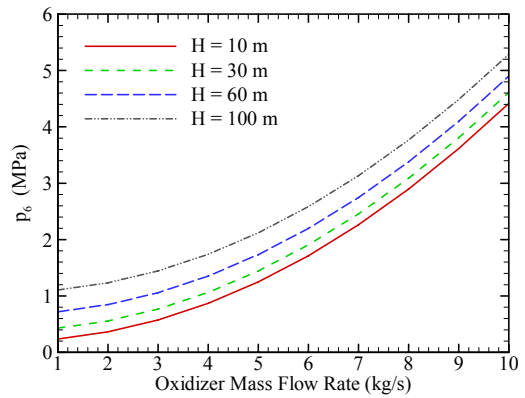


Fig. 11 Nozzle exit pressure at $\Phi = 0.29$.

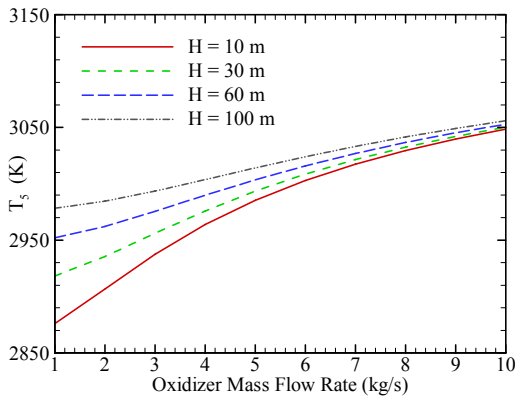


Fig. 10 Nozzle throat temperature at $\Phi = 0.29$.

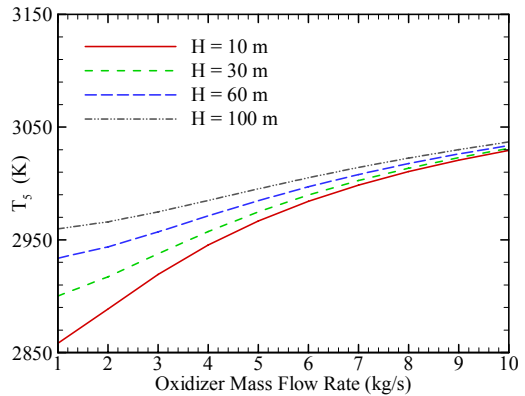


Fig. 12 Nozzle exit temperature at $\Phi = 0.29$.

3.4 최종 형상

부분별 형상설계 과정을 통해 도출된 해수흡입 램젯 기관의 최종 형상은 Fig. 13과 같으며, 캐비테이터를 제외한 다른 추진기관 형상은 필요추력 이상의 추력을 발생하기 위해 필요한 유량 및 성능에 따른 직경방향에 대한 개념설계를 실시하였다. 각 부분의 치수는 소수점 첫째자리에서 반올림 한 값이다.

3.5 추진기관 성능해석

앞서 설계한 추진기관 형상에 대해 산화제 유량에 따른 추력 및 비추력 추진성능해석을 시행하였다. 주 가동속도 70 m/s에서 엔진이 가동 가능한 온도 범위 부근의 당량 비 0.1 ~ 0.4 이내의 성능을 해석하였다.

3.5.1 추력

이상 램젯으로 가정하였을 때, 추력 F 은

$$F = \dot{m}_o \left[\left(1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_o} \right) V_6 - V_1 \right] + (p_6 - p_b) A_6 \quad (21)$$

으로 표현된다[22]. 이 때, p_b 는 배압으로 p_1 과 같다. 노즐 출구 속도 V_6 는[22]

$$V_6 = \sqrt{2 \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) R T_{04} \left[1 - \left(\frac{p_6}{p_{04}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (22)$$

이며, 이때의 연소실 출구 전 온도 T_{04} 와 전압력 p_{04} 는 아래와 같다.

$$T_{04} = T_4 + V_4^2 / (2c_p) \quad (23)$$

$$p_{04} = p_4 + (1/2) \rho_4 V_4^2 \quad (24)$$

ρ_4 는 CEA 프로그램을 통해 해수-알루미늄 반응 시의 밀도를 도출하여 사용하였으며, 당량 비에 따른 추력은 Fig. 14와 같다. 이 때, 정해진 노즐 형상에서 얻을 수 있는 추력은 수심이 증가함에 따라 배압의 영향으로 감소한다. 항력 영향을 고려한 알짜추력 F_{net} 은 Fig. 15와 같으며, 수심이 깊어지면 항력의 증가로 인해 알짜추력이 급감함을 확인할 수 있다.

3.5.2 비추력 I_{sp}

해수흡입 램젯의 비추력[10]은

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}_f \cdot g} \quad (25)$$

으로 정의되며, g 는 중력가속도 9.8 m/s²으로 둔다. 배압을 고려한 비추력 변화는 Fig. 16와 같다. Fig. 16을 살펴보면 수심에 따른 비추력 변화는 작으나 수심이 낮을수록 더 높은 비추력을 가짐을 관찰할 수 있다. 또한, 참고문헌 [8]에서의 알루미늄의 비추력 곡선과 비교하여 산화제/연료비가 높아지는 낮은 당량 비에서 최고 비추력이 나오며, 그 값이 참고문헌 [8]에서의 최고치와 유사함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

초공동현상 이론 및 공학적 지식을 통해 가동 조건별 항력을 도출하고, 그 조건에 따른 추진기

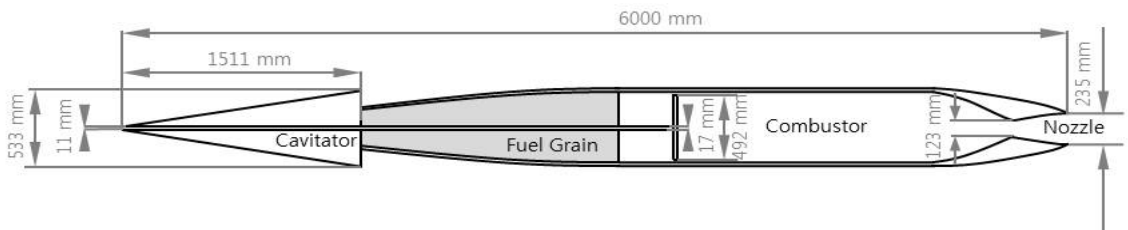
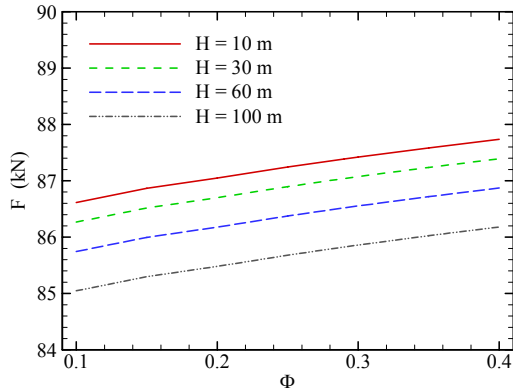
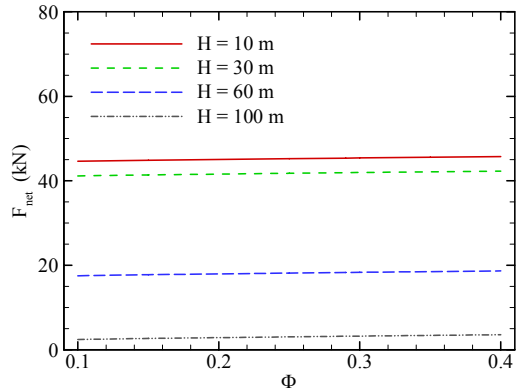


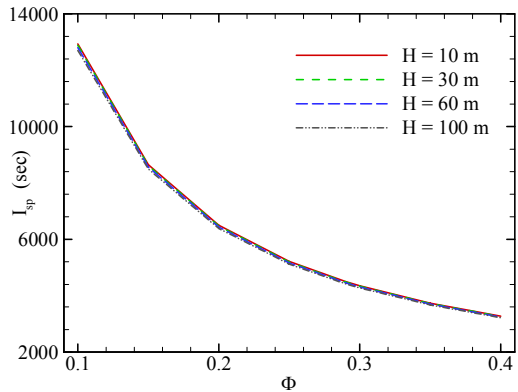
Fig. 13 Final Propulsion System Design.

Fig. 14 Thrust at $V_1 = 70$ m/s.Fig. 15 Net thrust at $V_1 = 70$ m/s.

관의 형상설계 및 성능해석을 실시하였다. 추진기관 형상에 영향을 주는 변수는 수심, 속도, 당량 비이며, 이에 따른 성능변화를 관찰하였다.

가동속도와 수심이 깊어질수록 수중 운동체에 작용하는 항력이 커지며, 그에 따라 높은 필요추력이 요구됨을 확인할 수 있었다. 모든 가동 수심범위 내에서 필요추력 이상을 발생시키기 위한 추진기관의 직경방향 개념설계를 시행하였으며, 이에 따른 추진성능을 확인하였다. 추력은 수심과 당량 비에 따라 큰 차이가 발생하였다. 알짜추력의 경우, 당량 비에 따른 차이는 매우 적었으며, 수심에 의한 차이는 최대가동속도 70 m/s에서 항력차이가 매우 커짐에 따라 큰 차이를 보임을 알 수 있었다.

개념설계 과정에서 직경방향으로의 설계만이 이뤄졌다. 또한, 산화제와 연료의 미립화 과정에서의 미립화 이후의 기체상태 가열 시 필요열량에 대한 고려는 이뤄지지 못하였으며, 연료인 알루미늄의 산화피막 제거에 대한 방법론은 제시되지 않아 실제 해수-알루미늄의 반응에서 얻을 수 있는 추력에 비해 높은 추력이 발생할 것으로 사료된다. 보다 정교한 결과를 얻기 위해서는 이 데이터들을 바탕으로 해수-알루미늄 실제 반응에 가까운 조건을 적용한 결과 및 길이방향으로의 관내 마찰 등을 고려한 설계를 시행해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 16 Specific impulse at $V_1 = 70$ m/s.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원(과제번호 2013M13A3A02042442)으로 수행된 연구의 일부입니다.

References

1. Nah, Y.I. and Lee, S.Y., "Core Technology and Recent Trends in the Development of Supercavitating Rocket Torpedo," *Joint Conference of the Korea Association of Ocean Science and Technology Societies*, pp. 436-443,

- 2011.
2. Nah, Y.I. and Kim, Y.G., "Propulsion Technologies of Supercavitating Rocket Torpedo, Shkval," *Conference of the Korean Society of Propulsion Engineers*, pp. 383-387, Nov. 2011.
 3. Chen, J.H., "Regression Relation between Cavitation Number and Cavity Length for Two-dimensional Supercavitating Hydrofoils," *Proceedings of the National Science Council Republic of China - Part A: Physics Science and Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 120-129, 2000.
 4. Hargrove, J., "Supercavitation and Aerospace Technology in the Development of High-speed Underwater Vehicles," *42nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 2004-130, Jan. 2004.
 5. Mottard, E.J. and Charles, J.S., "Preliminary Investigation of an Underwater Ramjet Powered by Compressed Air," NASA TN-D-991, 1961.
 6. Chae, J.O., Sim, J.H., Wang, H., Han, S.W. and Cha, K.S., "The Study Combustion Processes of the Solid Hydro Reactive Propellant in the Water Breathing Ram Jet Engine," *Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2006*, Beijing, China, AJCPP2006-22122, Apr. 2006.
 7. Yang, T.J. and He, M.G., "A Theoretical Investigation of Thermodynamic Performance for a Ramjet Based on a Magnesium-water Reaction," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 223, pp. 61-72, 2010.
 8. Yang, Y.J. and He, M.G., "Numerical Study on Operating Characteristics of a Magnesium-based Fuel Ramjet," *Acta Astronautica*, Vol. 79, pp. 96-106, 2012.
 9. Lee, Y.H., "A Study on Propulsion Performance of Underwater Ram-Jet with Optimized Nozzle Configuration," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 34, No. 4, pp. 42-52, 1997.
 10. Hoerner, S.F., *Fluid-dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance*, Hoerner Fluid Dynamics, Bricktown, N.J., U.S.A., 1965.
 11. Sharqawy, M.H., John, H.L. and Syed M.Z., "Thermophysical Properties of Seawater: A Review of Existing Correlations and Data," *Desalination and Water Treatment*, Vol. 16, Issue 1-3, pp. 354-380, 2010.
 12. Franc, J.P. and Michel, J.M., *Fundamentals of Cavitation*, Vol. 76, Springer, 2006.
 13. Kamada, R., "Trajectory Optimization Strategies for Supercavitating Vehicles," Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology, 2005.
 14. Ahn, B.K., Kim, H.T. and Lee, C.S., "Experimental and Numerical Studies on Super-cavitating Flow of Axisymmetric Cavitators," *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, pp. 885-890, 2010.
 15. Brooks, J.D. and Thomas, G.L., "Hydrodynamic Drag of Torpedoes," Naval Ordnance Test Station, NAVORD Report 5842, 1958.
 16. Granville, P.S., "Elements of the Drag of Underwater Bodies," David W Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda MD Ship Performance Dept., No. SPD-672-01, 1976.
 17. Roy, G.D., *Advances in Chemical Propulsion: Science to Technology*, CRC Press, 2010.
 18. Korean Society of Propulsion Engineers, *An Introduction of Aerospace Propulsion System*, Hantee Media, 2008.

-
19. Engineer's Toolbox, "Fusion Heat of Metal," World Wide Web location http://www.engineeringtoolbox.com/fusion-heat-metals-d_1266.html.
 20. Anderson, J.D., "Modern Compressible Flow: with Historical Perspective," Vol. 12, McGraw-Hill, N.Y., U.S.A., 1990.
 21. Sutton, G.P. and Oscar B., *Rocket Propulsion Elements*, Wiley, 2011.
 22. Hill, P.G. and Peterson, C.R., *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 1992.