

과산화수소의 촉매 분해를 활용한 수중 제트 추진 시스템 개념 설계

백승관* · 강홍재* · 안병욱* · 윤용태* · 이재호* · 권세진*†

Conceptual Design of Underwater Jet Propulsion System using Catalytic Decomposition of Hydrogen Peroxide

Seungkwan Baek* · Hongjae Kang* · Byeonguk Ahn* · Yongtae Yun* · Jaeho Lee*
· Sejin Kwon*†

ABSTRACT

High temperature oxygen and water vapor was generated from catalytic decomposition of rocket grade highly concentrated hydrogen peroxide, and monopropellant thruster system was developed and applied into space propulsion system. In this research, background research and conceptual design of underwater propulsion system using catalytic decomposition of hydrogen peroxide was progressed. Two types of system was designed with different steam injection methods. Propulsion system that has ring-type steam injector was manufactured and performance estimation of system was performed with different nozzle exit area. Performance evaluation with central steam injection type jet engine will be progressed in the future.

초 록

로켓 등급의 고농도 과산화수소는 촉매 분해를 통해 높은 온도의 산소와 수증기를 발생하며, 이와 같은 성질을 이용하여 우주 추진 기술로 사용된 바 있다. 본 연구에서는 과산화수소의 촉매 분해를 이용한 수중 추진 시스템 관련 문헌 조사 및 개념 설계를 진행했다. 과산화수소 분해 가스를 분사하는 분사기 설계의 경우 로켓 노즐 설계 방식과 유사하게 진행했으며, 두 종류의 형태로 엔진 설계를 진행했다. 환형의 형태의 가스 분사기를 갖는 엔진을 제작하여 수중 환경에서 작동 시험을 수행했으며, 엔진 노즐 출구의 면적에 따른 성능 변화를 관찰했다. 향후 중앙에서 가스를 분사하는 방식의 엔진을 제작하여 성능 평가를 수행할 예정이다.

Key Words: Underwater Jet Propulsion System(수중 제트 추진 시스템), Hydrogen Peroxide(과산화수소), Catalytic Decomposition(촉매 분해)

* 한국과학기술원 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: trumpet@kaist.ac.kr

수중 글라이더 등의 수중 운동체가 임무를 효과적으로 수행하기 위해 추력을 발생하는 수중 추진 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]. 수중 환경에서 추력을 발생할 수 있는 구조는 매우 다양한데, 대표적으로 프로펠러를 구동하는 방식이 있다. 하지만 수중 환경에서 프로펠러를 구동할 때 기술적인 한계가 존재한다[2]. 프로펠러의 고속 추진 시 프로펠러 블레이드의 표면에서 공동(Cavitation) 현상이 발생하며, 이는 프로펠러의 손상을 야기한다. 이러한 현상으로 인해 프로펠러 추진 방식으로 얻을 수 있는 추력에는 한계가 있다.

위와 같은 프로펠러 방식의 단점을 보완하는 추진 시스템으로 수중 환경에서 고속의 제트를 분사하여 추력을 얻는 추진 시스템 관련 연구가 활발히 진행 중에 있다. 제트 추진 시스템은 프로펠러와 같은 기계적 구동부가 없어 공동 현상에 의한 제약을 받지 않는다. 제트 추진 시스템의 종류로 고압 탱크를 활용하여 제트를 분사하는 방식, 연료를 연소하여 발생한 고온, 고압의 기체를 활용하여 제트를 분사하고 제트를 분사하는 방식이 있다[3]. 고압의 가스를 분사하는 방식은 단순한 시스템을 가지지만 에너지 밀도가 상당히 낮다. 또한 연료를 연소하여 높은 에너지의 제트를 생성하는 경우 연소 생성물로 인해 환경에 영향을 끼칠 수 있으며, 고속 추진 시 구조적인 한계로 인해 높은 항력을 받는다. 열기관을 활용하여 고온의 기체를 생성하는 방식의 경우 소형화가 어려워 수중 운동체 적용에 한계가 있다.

본 연구에서는 고온의 기체를 생성하는 방식으로 과산화수소의 촉매 분해 반응을 이용, 이를 활용한 Steam ejector 방식의 수중 추진 시스템의 개념 설계를 진행했다. 과산화수소의 촉매 분해 반응 과정은 비교적 단순한 반응으로 쉽게 고온의 증기를 형성할 수 있으며, 분해 생성물 또한 산소와 수증기로 매우 친환경적이다. 본 연구에서는 관련 선행 연구 조사 및 시스템 개념 설계, 작동 시험을 진행했다.

2. 선행 연구 조사

2.1 관련 선행 연구 조사

본 연구에서는 과산화수소의 촉매 분해 반응을 활용하여 발생한 고온의 증기를 활용한 수중 제트 추진 시스템에 관련된 선행 연구 조사를 진행했다. 과산화수소의 촉매 분해 반응을 통해 어뢰 방식의 수중 제트 추진 시스템을 개발 및 고온의 증기를 이용하여 Steam ejector 방식의 제트 추진 시스템을 개발한 사례가 있다.

고압 가스를 이용한 추진 시스템의 낮은 에너지 밀도를 해결하기 위해 30 wt.% 과산화수소의 촉매 분해 반응을 활용하여 Fig. 1과 같이 어뢰 방식의 소형 추진 시스템 관련 연구를 수행한 바 있다[4]. 수 mN 급의 추력을 성공적으로 발생했으며, 동일한 양의 과산화수소와 압축 이산화탄소 가스를 이용하여 작동 시험을 수행한 결과 과산화수소를 활용했을 때 높은 평균 속도로 더욱 많은 거리를 이동하여 그 성능을 검증한 바 있다.

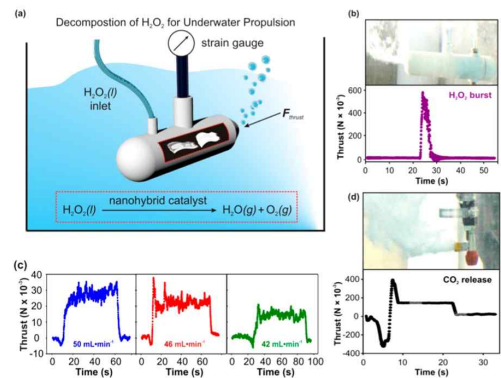


Fig. 1 Jet engine operation test results of previous research using 30 wt.% hydrogen peroxide[4]

또한 고온의 증기를 이용하여 Fig. 2와 같이 Steam ejector 방식의 수중 제트 추진시스템 관련 연구를 수행한 바가 있으며[5], 위의 문헌에서는 보일러에서 연료와 공기를 연소시킨 후 열교환기에 물을 공급하는 방식으로 고온의 증기를 생성했다. 이 증기가 Steam ejector 방식의

motive fluid 역할을 한다. 이 경우 프로펠러 추진기관의 복잡한 구동부를 제거하여 제작비용을 절감했다고 하며, 프로펠러 추진기관에서 발생할 수 있는 공동 현상, 소음, 진동과 같은 현상을 방지할 수 있다.

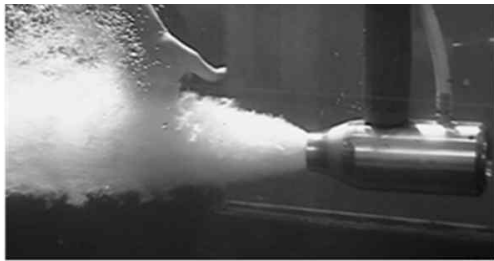
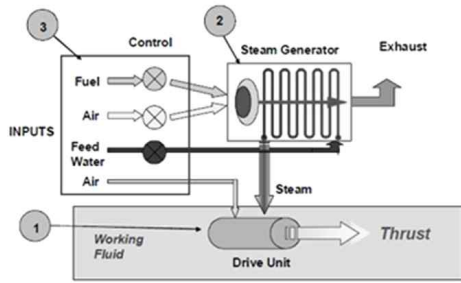


Fig. 2 Jet engine system schematic (top) and engine operating test (bottom) using principles of steam ejector[3]

본 연구에서는 고온의 증기를 얻기 위해 로켓 등급의 90 wt.% 과산화수소의 촉매 분해 반응을 적용했다. 또한 생성된 증기를 활용하여 Steam ejector 방식의 수중 제트 추진 시스템의 개념 설계를 수행했다. 고농도 과산화수소를 사용할 경우 에너지 밀도가 매우 높으며, 과산화수소의 촉매 분해 반응은 별 도의 연소 시스템 및 열 교환기가 필요하지 않아 시스템의 소형화가 가능하다. 또한 생성물이 수증기와 산소로 매우 친환경적으로 관련 선행 연구에서 발생한 문제점을 해결할 수 있을 것이라 생각된다.

2.2 과산화수소의 촉매 분해 반응

과산화수소는 상온에서 액상으로 존재하며 농도에 따라 다양한 용도로 활용되어 왔다. 80 wt.% 이상의 농도를 갖는 고농도 과산화수소는

Eq. 1 과 같은 촉매 분해 반응 특성을 가져 과거 로켓 엔진 개발 초기 단계에서 추진제로 사용되어 왔으며, 독성의 하이드라진을 대체하기 위한 친환경 추진제로 근래 들어 활발히 연구 중에 있다[6]. 90 wt.% 과산화수소가 촉매 분해를 통해 발생하는 증기의 온도는 약 756 °C 이며[7], 촉매 분해 생성물로 수증기와 산소가 생성되어 수중 환경에 영향을 끼치지 않아 매우 친환경적이다. 따라서 90 wt.% 과산화수소의 촉매 분해 반응을 이용하여 고온의 증기를 생성할 수 있고, 이를 수중 제트 추진 시스템의 Motive fluid 로 활용하고자 한다. 과산화수소의 분해 촉매 활성 물질로 백금 등의 귀금속류 및 망간, 납 등의 금속류가 알려져 있으며, 본 연구에서는 수중 환경에서 안정적으로 촉매 분해 성능을 확인한 바 있으며, 상대적으로 저렴한 비용을 갖는 망간 촉매 활성 물질을 다공성의 감마 알루미늄에 담지한 촉매를 제작했고, 제작된 촉매는 Fig. 3과 같다.

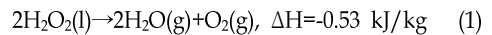


Fig. 3 Fabricated MnO₂/γ-Al₂O₃ catalyst

3. 추진 시스템 설계

3.1 시스템 설계 방안

과산화수소의 촉매 분해를 통해 생성된 가스로 추력을 얻는 추진 시스템의 설계 방안으로 Fig. 4와 같은 두 종류의 방식이 있다. 고온의 과산화수소 분해 가스가 추진 시스템의 내부 벽면으로 분사되고 외부의 물이 중앙부에서 엔진으로 유입되는 방식(Central water jet type) 및 과산화수소 분해 가스가 추진 시스템의 중앙으

로 분사되고 외부의 물이 벽면을 통해 엔진의 중심부로 유입되는 방식(Central steam nozzle type)이다. 이 두 종류의 방식은 기존의 어뢰 방식에 비해 시스템 작동 시 발생하는 항력을 최소화할 수 있다. Figure 4에서 두 종류의 설계 모델 모두 혼합부(Mixing zone)에서 과산화수소 분해 가스와 외부에서 유입된 물이 혼합되어 포화 상태의 이상(two-phase) 유동을 형성하고, 수축 노즐 목 근처 국소영역에서 물속의 기체가 노즐 목 면적 감소로 인한 압력 상승으로 인해 액체로 상변화가 발생하고, 온도가 상승하며, 상변화를 통해 밀도 또한 상승한다. 다시 말해 온도와 압력이 급격하게 상승하는 일정 영역이 수축 노즐 목 근처에 존재하게 되는데 이 현상을 응축 충격파(Condensation shock) 현상이라 한다. 응축 현상으로 인해 발생하는 수격(Condensation-induced water hammer) 현상을 통해 야기되는 압력 구배로 인해 엔진은 출력을 얻는다[8].

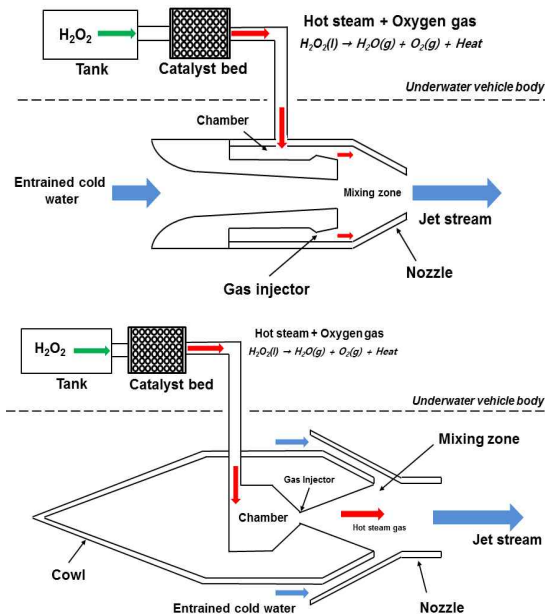


Fig. 4 Design concepts of underwater jet propulsion system (top: central water jet type, bottom: central steam nozzle type)

3.2 시스템 초기 EM 설계 및 제작

위 Fig. 4의 엔진 설계 방안 중 엔진 내부의 Mixing zone에서 포화 상태의 유동이 형성되었다고 가정하였으며, 과산화수소 분해 가스가 초음속 노즐을 통해 분출되었을 때 후류 가스의 특성 및 포화 상태의 유동 특성을 참고하였고[7, 9], 엔탈피 보존 및 질량 보존 법칙을 활용하여 과산화수소 및 물의 설계 유량을 도출했다. 위 Fig. 4의 두 종류의 설계 방안 중 EM 설계를 위해 비교적 항력이 비교적 적을 것이라 생각되는 Central water jet type 모델을 선정하여 아래 Fig. 5와 같이 설계 및 제작을 진행했다. 가스 분사기는 로켓 노즐 설계와 동일한 방식을 적용했으며, 외부에서 유입되는 물의 레이놀즈 수를 계산하여 물의 흐름이 층류가 형성될 수 있도록 물 유입부의 단면적을 선정했다. 엔진 노즐 형상에 따른 응축 충격파 현상 발생 여부 및 엔진 추력 변화를 보기 위해 노즐 수축 각도는 동일하지만 노즐 출구 면적이 다른 두 종류의 엔진 노즐을 설계했다. 아래 Fig. 5는 추진 시스템의 초기 EM 도면을 나타내며, Fig. 6과 같이 제작을 진행했다. 제작된 EM의 설계 인자는 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Design components and their values of fabricated underwater jet propulsion system engineering model prototype

Components	Value
H ₂ O ₂ mass flow rate (g/s)	40.0
Water mass flow rate (g/s)	60.9
H ₂ O ₂ decomposition gas injector	
Chamber pressure (bar)	20
Exit pressure (bar)	5
Expansion ratio	1.26
Mixing chamber	
Chamber diameter (mm)	8.4
Chamber length (mm)	5.3
Mixing zone pressure (bar)	5
Nozzle	
Concentration angle (deg)	20
Nozzle exit diameter (mm)	70
	57.8

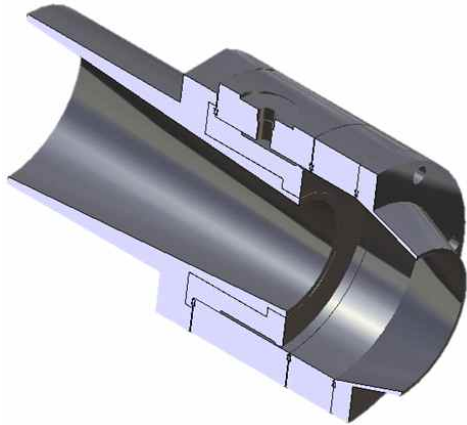


Fig. 5 Drawing of underwater jet propulsion system engineering model prototype



Fig. 6 Fabricated engineering model prototype

4. 시스템 작동 시험

4.1 추진 시스템 작동 시험

시스템 작동 시험을 위해 과산화수소 공급 시스템 및 추력 측정 시스템을 제작했다. 과산화수소 공급 시스템은 고압 질소탱크를 이용하여 가압식 추진제 공급 시스템을 사용했으며, 추력 측정을 위해 토크 센서 및 모멘트 암을 제작했다. 수중 환경 모사를 위해 소형 수조를 제작하였고, Figure 7은 제작된 추진 시스템 EM 및 작동 시험을 위한 추진제 공급 시스템, 추력 측정 시스템을 나타낸다.

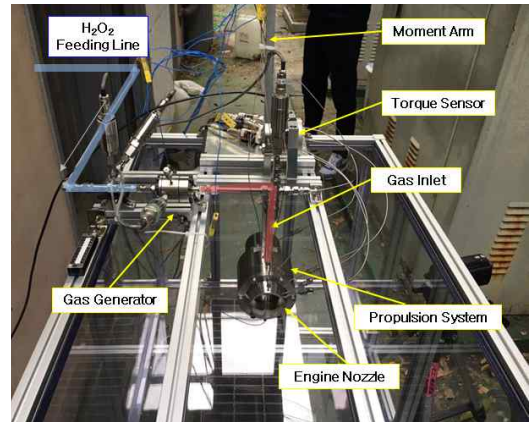


Fig. 7 Fabricated underwater jet propulsion system operation test facility

작동 시험은 각 노즐 당 지상 환경, 수중 환경에서 3초간 시험했으며, 과산화수소의 설계 유량을 공급하기 위한 탱크 가압 압력을 변화시켜 시스템 작동 특성을 파악하고자 했다. Figure 8은 추진 시스템 작동 시험 장면을 나타낸다.



Fig. 8 Underwater jet propulsion system operation test

4.2 작동 시험 결과

작동 시험은 위 Table 1의 과산화수소 공급 유량을 기준으로 공급 유량보다 낮은 유량을 공급했을 때, 공급 유량에 맞추어 공급했을 때, 공급 유량보다 높은 유량을 공급했을 때에 맞추어 진행했고, 노즐 출구 직경에 따라 작동 시험을 진행했다. 작동 시험 시 가스 분사기의 분사 효율을 평가는 Eq. 2 및 Eq. 3과 같은 특성 속도 효율을 사용했으며, 추력 성능을 확인하기 위해 비추력(specific thrust)을 Eq. 4와 같이 계산했다.

$$C^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}} = \frac{\sqrt{kRT_1}}{k\sqrt{(2/(k+1))^{(k+1)/(k-1)}}} \quad (2)$$

$$\eta_{C^*} = \frac{C_{exp}^*}{C_{theo}^*} \quad (3)$$

$$F_s = \frac{F}{\dot{m}} [Ns/kg], \quad \eta_{F_s} = \frac{F_{s,exp}}{F_{s,theo}} \quad (4)$$

작동 시험 결과 가스 분사기에서 과산화수소 분해 가스가 수중 환경으로 분사되었으며, 가스 분사로 인해 추력이 측정되었다. 가스 분사기의 분사 효율은 대부분 85% 근방으로 형성되었다. 설계 유량 조건에서 작동 시험 시 노즐 출구 면적에 따른 가스 발생기 전, 후단의 압력 및 추력 분포는 Fig. 9와 같고, 노즐 출구 면적에 따라 측정된 비추력은 Fig. 10과 같다. 작동 조건에 따른 EM 모델 작동 시험 결과를 정리하여 Table 2 에 나타냈다.

Table 2 Underwater jet propulsion system EM prototype operation test results

Designed H ₂ O ₂ mass flow rate (g/s)	40	
Designed specific thrust (Ns/kg)	2000	
Nozzle exit diameter (mm)	70	57.8
Case 1 - designed mass flow rate		
H ₂ O ₂ mass flow rate (g/s)	22.1	22.4
C* efficiency (%)	75.8	79.4
Thrust (N)		
Case 2 - smaller mass flow rate		
H ₂ O ₂ mass flow rate (g/s)	43.7	46.5
C* efficiency (%)	84.0	83.7
Thrust (N)		
Case 3 - larger mass flow rate		
H ₂ O ₂ mass flow rate (g/s)	51.8	55.3
C* efficiency (%)	86.2	84.7
Thrust (N)		
Specific thrust efficiency (%)	67.2	57.7

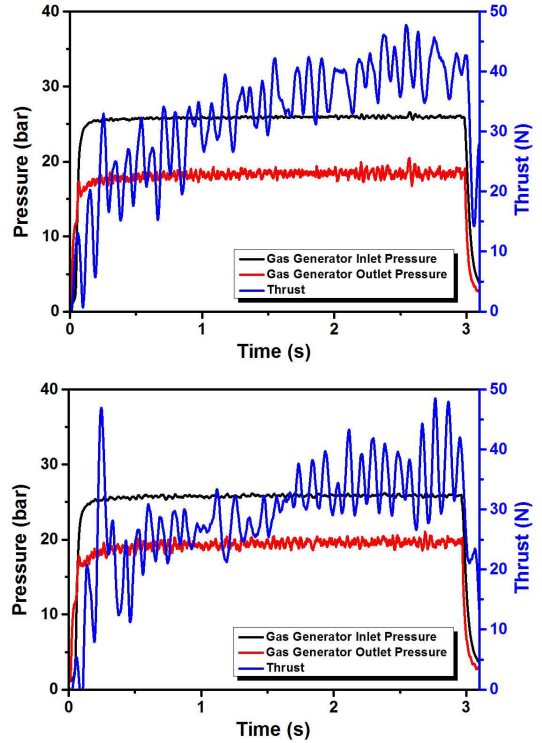


Fig. 9 Pressure variance between gas generator and thrust variance due to time (Top - 70.0 mm nozzle exit diameter, bottom - 57.8 mm nozzle exit diameter)

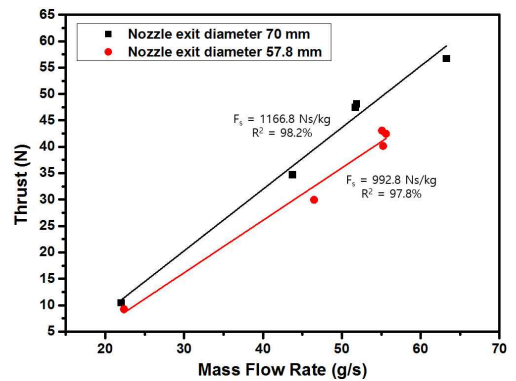


Fig. 10 Measured thrust due to mass flow rate and system nozzle exit diameter

작동 시험 도중 시스템 진동으로 인해 추력이 제대로 측정되지 못했는데, 데이터 처리 시 3초

의 작동 시간 중 중간 부분을 이용하여 유량 및 추력의 평균값을 도출했다. 작동 시험 시 시스템의 노즐 형상에 따라 가스 분사기의 효율에 영향을 크게 끼치지 않아 가스 분사기는 일정한 성능을 보임을 확인했다. 또한 노즐 출구 면적이 큰 경우 보다 174 Ns/kg 큰 비추력을 보임을 확인했다. 하지만 설계 추력에 비해 낮은 추력이 발생했고, 이는 낮은 분사 효율로 인해 Mixing chamber 내에서 포화 상태의 이상 유동을 충분히 형성하지 못했고, 노즐 수축부의 설계 인자로 인해 수격 현상이 발생할 만큼 응축 현상이 충분히 발생하지 않았다고 판단된다. 분사기의 낮은 분사 효율의 원인으로는 분사기의 환형 노즐 형상으로 인해 작동 효율이 낮아졌을 수 있고, 수중 환경에서의 열손실 또한 고려할 수 있다. 향후 수격 현상 발생 여부를 관찰하기 위해 유동장 해석을 진행, 수중 환경 내에서 수격 현상의 발생을 확인하고 시스템이 추력을 발생시킬 수 있는 노즐의 형상을 도출하고, Mixing chamber 내에서 포화 상태의 유동을 안정적으로 형성하기 위해 가스 분사기의 형상을 변경시키거나 Mixing chamber의 설계를 변경하는 방법 등을 고려할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 로켓 등급의 고농도 과산화수소의 촉매 분해를 통해 발생된 고온의 수증기와 산소를 이용하여 수중 환경에서 추력을 발생하는 제트 추진 시스템을 제안했다. 관련 선행 연구를 조사했고, 선행 연구와 비교하여 보다 나은 시스템을 개발하고자 했고, 개념 설계 및 제작을 진행하여 작동 시험을 수행했다. 작동 시험 결과 과산화수소의 분해 가스가 수중 환경으로 분사되는 것을 확인했고, 엔진 요소 별 압력 분포 및 작동 시 추력 측정 또한 진행했다. 향후 유동장 해석 등의 방법을 통해 설계 시 작동 조건을 선정 및 검증을 진행하고, 요소 설계를 변경하여 작동 시험을 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1A2A1A15055373).

참 고 문 헌

- Bradley, A.M., Feezor M.d., Singh H and Sorrel F.Y., "Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 526-538, 2001.
- Korede U.A., "Study of a Jet-Propulsion Method for an Underwater Vehicle," *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 1205-1218, 2004.
- 김윤곤, 나영인, "초공동 로켓 어뢰 Shkval 추진기술," 2011년도 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, pp. 383-387, 2011.
- Claussen, J. C., Daniele, M. A., Geder, J., Pruessner, M., Makinen, A. J., Melde, B. J. and Medintz, I. L., "Platinum-paper micromotors: An urchin-like nanohybrid catalyst for green monopropellant bubble-thrusters," *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 6, No. 20, pp. 17837-17847, 2014
- Todman M, and Alex W. "Jet age steam power for marine propulsion." *Ship Design and Operation for Environmental Sustainability. The Royal Institute of Naval Architects*, London, 2002.
- Sungyong An and Sejin Kwon, "Scaling and evaluation of Pt/Al₂O₃ catalytic reactor for hydrogen peroxide monopropellant thruster," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 5, pp. 1041-1045, 1995.
- Sanford Gordon and Bonnie J. McBride, "Computer Program for Calculation of

Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications," NASA Reference Publication 1311, 1994.

8. David Heinze, "Physically-based Models for Two-phase Flow Phenomena in Steam
- Injectors: A One-dimensional Simulation Approach," KIT Scientific Publishing, 2015.
9. www.tlv.com/global/Tl/calculator/steam-table-pressure.html