

수중발사를 위한 ATP 방식 압축수 방출시스템의 동특성 해석

Analysis of the Dynamic Characteristics of Pressurized Water Discharging System for Underwater Launch using ATP

한 명철, 김정관*, 김광수
(Myung-Chul Han, Jung-Kwan Kim, and Kwang-Su Kim)

Abstract: The underwater launch system using an ATP consists of five parts: compressor tank, proportional flow control servo valve, expulsion spool valve, air turbine pump, and discharge tube. The purpose of this study is to develop an underwater launch system using an ATP and to verify the validity of the system. The proportional flow control servo valve is modeled as a 2nd order transfer function. The projectile is ejected by pressurized water through the air turbine pump, which is controlled by expulsion valve. The mathematical model is derived to estimate the dynamic characteristics of the system, and the important design parameters are derived by using simulations. The computer simulation results show the dynamic characteristics and the possibility of control for underwater launch system.

Keywords: air turbine pump system, electro-hydraulic system, expulsion valve, proportional flow control valve

I. 서론

20세기 이후 강조되어온 수중발사 시스템의 전략적, 기술적 가치는 21세기에도 매우 중요하게 인식되고 있으며, 특히 해양에 접하고 있거나 관심 해역을 보유하고 있는 국가들을 중심으로 자체 개발 또는 도입에 의하여 수중발사 시스템을 보유하고 있는 추세이다. 일반적으로 수중발사 시스템의 전략적, 기술적 가치와 효율도는 탐지체계와 무기체계로 결정되며, 특히 수중발사 시스템의 무기체계는 수중발사 시스템의 광범위한 운용 범위에서 활용이 가능하여야 한다. 따라서 선진국들이 수행해 온 대륙간 탄도미사일, 대함/대지/대공 유도미사일, 어뢰 등의 다양한 형태의 수중 무기 체계 개발에 있어 수중 무기 발사 체계는 별도의 핵심 기술로서 연구되고 있다. 수중발사 시스템은 탑재된 첨단장비의 보호와 요구되는 성능을 유지하기 위해, 발사 시 속도 및 이탈가속도에 대한 요구조건이 주어진다. 현재 운용중인 수중발사 시스템은 압축공기에 의한 압축수 방출시스템과 해수를 이용하는 압축수 방출 방식으로 분류되며 압축수 방출 방식의 종류로는 선형펌프방식, ATP (Air Turbine Pump) 방식, REML (Rotary Electromagnetic Launcher) 방식, Water Balloon 방식 등이 있다[1,2].

국내에서는 압축수 방출방식과 선형펌프 방식 수중발사 시스템에 관한 연구가 수행된 바 있으나, 다른 방식들에 대해서는 현재까지 관련 연구가 미비한 실정이다.

본 논문에서는 ATP 방식 수중발사 시스템을 대상으로 수중발사 성능 요구조건을 만족시키기 위한 주요 설계변수를 도출하고, 수학적 지배방정식을 구성품 별로 유도하며, 수립된 전체시스템에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 응답특성 및 동특성 분석을 수행한다.

II. 시스템 모델링

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2008. 10. 8., 채택확정: 2009. 3. 10.

한명철, 김정관, 김광수: 부산대학교 기계공학부

(mchan@pusan.ac.kr/jgdkim@pusan.ac.kr/windy1416@pusan.ac.kr)

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

이미 기술된 바와 같이, 수중운동체 발사 시스템에 관한 연구는 크게 고압의 압축공기를 이용한 발사 방식과 그림 1과 같은 압축수를 이용한 발사 방식으로 나눌 수 있다. 전자의 경우, 압축가스탱크로부터 공급되는 압축공기가 방출밸브를 통하여 직접적으로 발사관으로 유입되며, 발사관 내부로 유입되는 압축공기에 의해 발생하는 추진력으로 발사체를 발사관 외부로 방출시키는 구조로 되어 있다. 이러한 경우 발사 시 압축수 방출로 인한 소음이 발생하는 기술적 단점을 가지므로, 선진국의 경우 이미 압축수에 의한 발사 방식으로 전환한 상태이다.

본 논문에서는 압축수에 의한 발사 방식 중 소형에서 대형 발사체에 모두 적용가능한 장점을 가지는 ATP 방식의 수중발사 시스템을 고려하며, 그 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이, 압축수에 의한 발사체의 발사 동작 메커니즘은 고압공기로 공기터빈을 회전시켜 축 상으로 연결된 해수펌프로 압축수 탱크(impulse tank) 내 해수를 가압시킨다. 이때 해수는 해수 유입구(sea chest inlet)를 통해 지속적으로 펌프로 공급된다. 가압된 해수는 슬라이딩밸브(sliding valve)를 통해 발사관 후부로 밀려들어가 발사체를 밀어낸다. Caliber Ring은 발사관과 발사체 사이로 흐르는 해수에 의한 압력의 손실을 줄이기 위하여 설치되는 것으로 강제사출 방식 수중발사

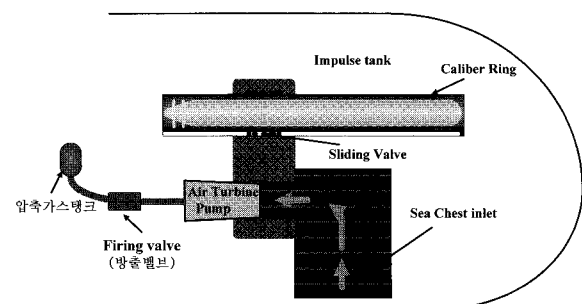


그림 1. ATP 발사 방식 개략도.

Fig. 1. Structure of the ATP system.

시스템에서 필수적으로 사용된다.

1. 방출밸브

방출밸브 스톱의 위치는 비례 유량제어 밸브를 통해 축압기로 빠져나간 작동유의 유량에 의해 제어되며, 그 개방 정도에 의해 압축공기의 방출유량이 결정된다. 그림 2는 방출밸브의 구조를 나타낸다.

먼저 유압실 내 작동유의 압축성을 고려하여 방출밸브가 밀어낸 작동유의 유량을 구해보면 다음과 같다.

$$Q_s = A_{ev3} \dot{X} - \frac{(V_{0ev3} - A_{ev3}X)}{\beta_s} \dot{P}_s \quad (1)$$

여기서 V_{0ev3} 는 유압실 초기 체적, A_{ev3} 는 유압실 방출밸브 스톱의 단면적이고, β_s 는 작동유의 체적탄성계수이다. 또한 작동유의 연속방정식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = Q_v \quad (2)$$

여기서 Q_v 는 비례 유량제어 밸브의 출력유량으로서 발사체의 발사 시 방출밸브 후부에서 축압기로 빠져나가는 유량을 나타낸다. 방출밸브의 운동방정식을 유도하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{X} + KX = F_b - P_r(A_{ev1} - A_{ev2}) - F_{k0} - P_s A_{ev3} \quad (3)$$

여기서,

- X : 방출밸브 스톱의 변위
- F_b : $P_b A_{ev1}$
- M : 방출밸브 스톱의 질량
- K : 스프링 상수
- F_{k0} : 초기 스프링력

$P_r(A_{ev1} - A_{ev2})$ 은 좌우 스톱의 단면적 차로 인한 힘으로서 방출밸브 내의 P_r 은 압축탱크에서 공급되는 압력과 동일하다고 가정한다. F_b 는 방출밸브를 미는 일정한 개방력으로 발사 완료 시 제거된다. F_b 가 사라지면 스프링력과 유압실 내부 압력 P_s 에 의해 방출밸브는 닫히게 된다.

2. 비례 유량제어 밸브

본 논문에서 사용된 비례유량제어밸브(PFCV : Proportional Flow Control Valve)는 Rexroth사의 2FRE 6 B-2X 시리즈 모델로서 유량의 설정은 명령값 포텐서미터에 의해 결정된다. 그림 3과 같이 제조사로부터 제공되는 응답특성 곡선으로부터 입

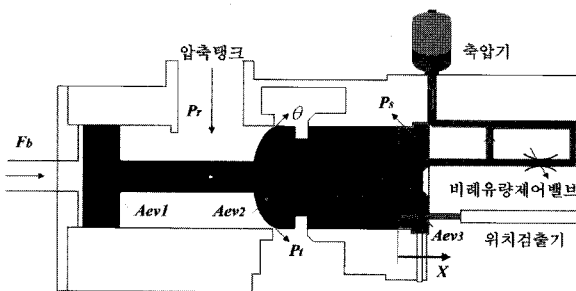


그림 2. 방출밸브의 구조.
Fig. 2. Structure of the expulsion spool valve.

력전압에 대한 출력유량의 전달함수를 구하면 식 (4)와 같다. 전달함수는 2차식으로 설정하였으며, 그림 3을 바탕으로 각각의 파라미터를 구하였다. 그림 4는 식 (4)에 대한 주파수 응답 특성 곡선으로서 그림 3과 거의 일치함을 확인하였다.

$$G_v(s) = \frac{Q_v(s)}{V_i(s)} = K_v \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

여기서, K_v 는 $3.125 \times 10^{-3} / 60$, 감쇠비 (ζ)는 0.5, 고유진동수 (ω_n)는 58 (rad/s) 이다[3].

3. 압축탱크 내 공기 지배방정식

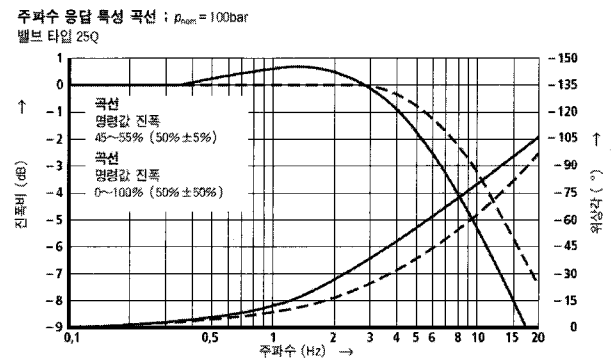
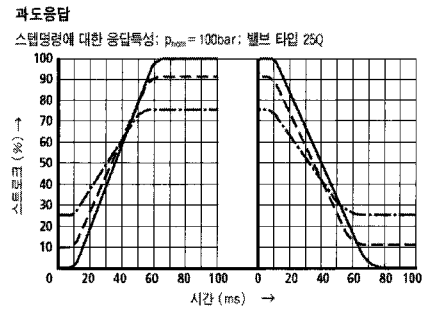


그림 3. 비례 유량제어 밸브의 주파수 응답특성.
Fig. 3. Frequency response characteristic curves of the proportional flow control valve.

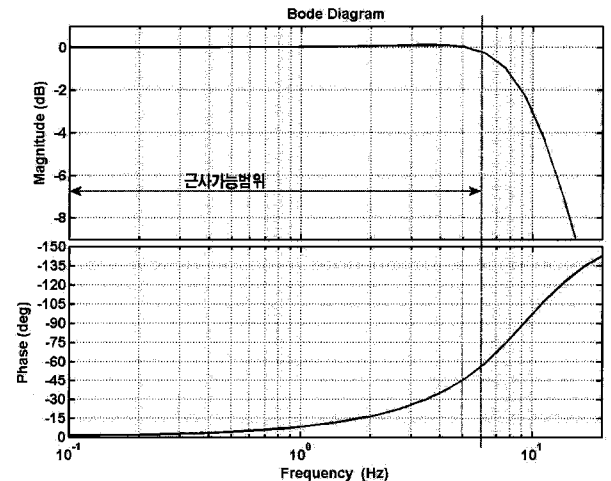


그림 4. 비례 유량제어 밸브 근사 전달함수 주파수 응답특성.
Fig. 4. Approximate 2nd order transfer function of the proportional flow control valve.

압축탱크에서 압축공기가 방출될 때 압축탱크 내부의 압력 및 온도변화를 추정하기 위한 지배방정식은 식 (5)-(6)와 같다. 이 때 압축가스는 이상기체, 방출과정은 등엔트로피 과정으로 가정한다.

$$\dot{P}_r = -P_r k \frac{\dot{m}_{r.out}}{m_r} \quad (5)$$

$$\dot{T}_r = (1-k) \frac{T_r \dot{m}_{r.out}}{m_r} \quad (6)$$

여기서 P_r 은 압축탱크 내 압력, T_r 은 온도, m_r 은 질량을 나타낸다.

4. 방출밸브를 통한 압축공기의 방출유량

방출밸브로부터 방출되는 압축공기의 유량은 식(7)과 같다 [4,5].

$$\dot{m} = \dot{m}_{r.out} = \dot{m}_{t.in} = \dot{m}_{max} \cdot f(r) \quad (7)$$

여기서, \dot{m}_{max} 는 방출밸브의 최대유량이며, $f(r)$ 은 임계압력 비 b 에 의해 결정되는 항으로 아래와 같다.

$$m_{max} = \lambda \cdot A_e \frac{P_r}{\sqrt{T_r}} \quad (8)$$

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{k}{R}}$$

$$f(r) = \begin{cases} 1 & \text{for } r \leq b \\ \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2} & \text{for } r > b \end{cases} \quad (9)$$

$$r = \frac{P_t}{P_r}$$

r 은 상하류의 압력비, R 은 기체상수, k 는 비열비, A_e 는 방출밸브의 유효단면적으로서 출구 단면적과 수축계수의 곱으로 나타낼 수 있으며 밸브 입출구 압력과 함께 방출유량을 결정짓는 중요한 요소이다.

5. 공기터빈펌프

방출밸브를 통하여 빠져 나온 압축공기가 공기터빈을 회전 시킴으로써 축 상으로 연결된 해수펌프로 압축수 탱크 내 해수를 가압시킨다. 그림 5는 공기터빈펌프 시스템의 개략도이다.

공기터빈 펌프 시스템의 운동방정식을 유도하면 식(10)와 같이 나타낼 수 있다[6].

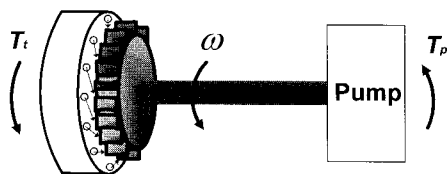


그림 5. 공기터빈 펌프 시스템.
Fig. 5. Air turbine pump system.

$$J_{tp} \dot{\omega} = T_t - T_f - T_p$$

$$= 4\eta_t N_n \dot{m}_{t.in} \left(\frac{D_t}{\pi d_n^2 \rho} \right) \cos \alpha \tan \beta \quad (10)$$

$$- \frac{1}{8} K_1 \rho_{air} \omega^2 D_t^5 - \frac{1}{8} K_1 \rho_w \omega^2 D_p^5 - T_p$$

여기서 J_{tp} 는 공기터빈 펌프의 관성모멘트, T_t 는 터빈의 회전력, T_f 는 터빈펌프의 마찰회전력, T_p 는 펌프의 부하, $\dot{\omega}$ 은 공기터빈 펌프의 각가속도, η_t 는 터빈효율, D_t 는 터빈의 직경, D_p 는 펌프의 직경, K_1 은 0.88×10^{-3} 이고, $\dot{m}_{t.in}$ 은 방출밸브를 통과한 압축공기의 질량유량, α 는 노즐출구의 각도, β 는 터빈의 설치각도, ρ_w 는 해수의 밀도, N_n 은 노즐의 개수를 나타낸다.

6. 발사체 운동방정식

발사튜브 내 압축수의 지배방정식을 유도하기 위해서는 튜브 내 체적변화를 알아야 한다. ATP 방식 수중발사 시스템의 발사관 및 펌프 부분만을 분리하여 나타내면 그림 6과 같다.

펌프에서 발사관 내로 유입되는 해수의 유량에 관한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{tu} = C_{d1} A_{sv} \sqrt{\frac{2(P_{im} - P_{tu1})}{\rho_w}} \quad (11)$$

여기서 C_{d1} , A_{sv} 는 임펄스 탱크와 발사관 사이에 있는 밸브의 배출계수, 유효단면적이다.

압축수 탱크와 발사관 내부의 압력에 관한 식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{P}_{im} = \frac{\beta_w}{V_{im}} (Q_{pump} - Q_{tu}) \quad (12)$$

$$\dot{P}_{tu1} = \frac{\beta_w}{V_{tu1} + A_{proj} x_2} (Q_{tu} - Q_{cr} - A_{proj} \dot{x}_2) \quad (13)$$

식 (12)에서 P_{im} 는 압축수 탱크 내부의 압력, V_{im} 는 압축수 탱크 내부의 체적, Q_{pump} 는 펌프의 배출유량이며, β_w 는 해수의 체적탄성계수이다. 식 (13)에서 P_{tu1} 은 발사관 내부의 압력, V_{tu1} 는 발사관 내부에서 발사체를 제외한 체적, A_{proj} 는 발사체의 단면적이며, x_2 는 발사체의 변위이다. 발사관과 발

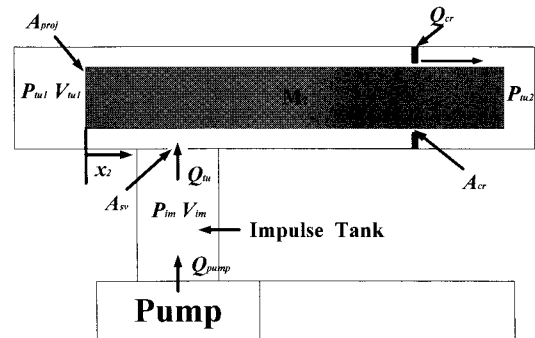


그림 6. 발사관 및 펌프 모델.
Fig. 6. Model of the discharge tube.

사체 사이의 틈새로 해수의 누설에 따른 압력손실을 줄이기 위하여 설치된 Caliber Ring 사이로 흐르는 해수량은 다음과 같다.

$$Q_{cr} = C_{d2} A_{cr} \sqrt{\frac{2(P_{tu1} - P_{tu2})}{\rho_w}} \quad (14)$$

여기서 C_{d2} , A_{cr} 은 발사체와 Caliber Ring 사이 공간의 배출 계수, 유효단면적, 그리고 P_{tu2} 는 수심에 따라 정해지는 해수 압이다.

발사관을 수평 정지상태라고 가정하고 발사관내에서의 발사체 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$(m_2 + m_a)\ddot{x}_2 = A_{proj}(P_{tu1} - P_{tu2}) - \frac{1}{2}(C_f + C_p)\rho_w S \dot{x}_2^2 \quad (15)$$

여기서 m_2 는 발사체의 질량, m_a 는 수중운동체에 적용되는 부가질량, C_f 는 발사체의 마찰항력계수, C_p 는 압력항력계수, S 는 발사체의 표면적이다.

III. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서 제시한 ATP 방식 압축수 방출시스템의 구조 및 입출력 관계는 그림 7과 같으며, 앞서 유도한 수학적 모델을 기반으로 그림 8과 같이 MATLAB/Simulink를 이용한 시뮬레이션 툴을 개발하였다. 그림 9-11은 각각 비례유량제어밸브, 방출밸브, 그리고 ATP에 대한 시뮬레이션 블록 구조를 나타

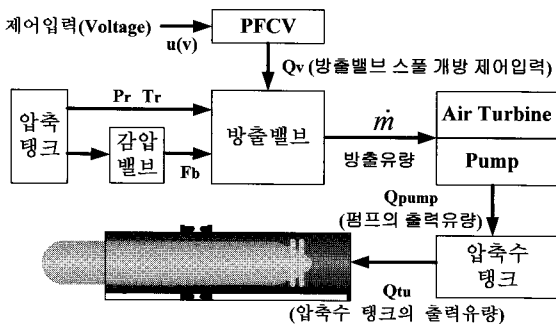


그림 7. 전체 시스템의 입출력 관계도.
Fig. 7. Input-output relation of the ATP system.

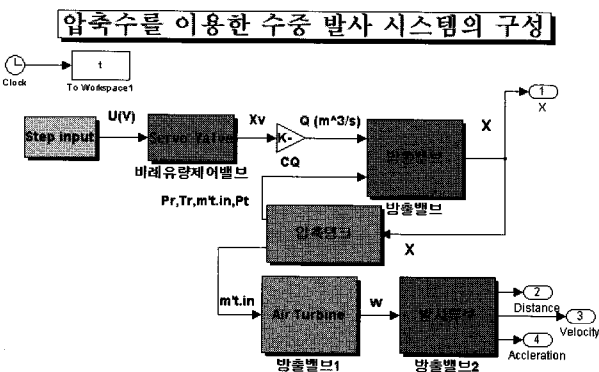


그림 8. 압축수 방출시스템의 전체 블록선도.
Fig. 8. The block diagram of the ATP system.

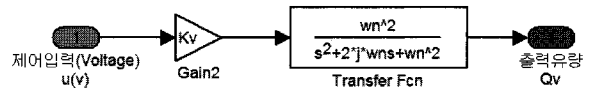


그림 9. 비례 유량제어 밸브 블록선도.
Fig. 9. The block diagram of the proportional flow control valve.

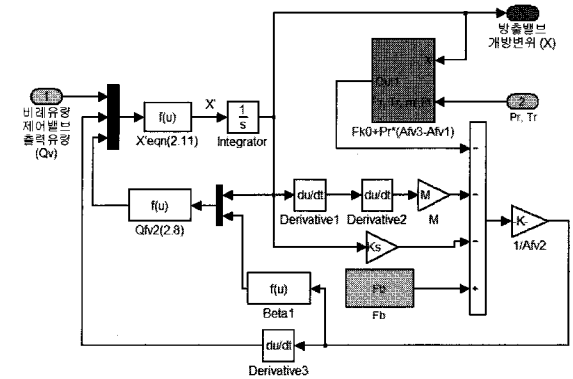


그림 10. 방출밸브 블록선도.
Fig. 10. The block diagram of the expulsion spool valve.

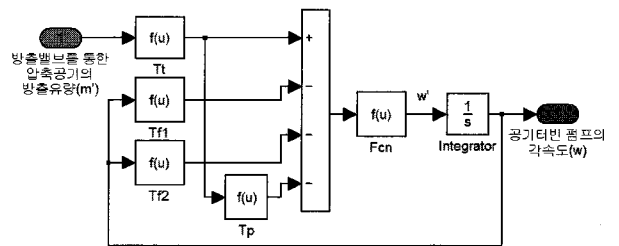


그림 11. 공기터빈 펌프 블록선도.
Fig. 11. The block diagram of the air turbine pump.

낸다. 시스템의 수중발사성능 요구조건은 기존의 연구결과를 바탕으로 다음과 같이 설정하였다.

- 발사체의 발사관 이탈속도는 11(m/s) 이상
- 발사체의 최대 가속도는 77.4(m/s²) 이하

그림 12-13은 그림 2의 방출밸브 후부에서 일정 유량이 축압기로 빠져나갈 때의 방출밸브 스펴면위 응답특성을 나타낸다. 그림 14-15는 비례유량제어밸브에 일정한 전압이 인가되었을 때의 출력유량 응답곡선을 각각 나타내며, 이 때 비례유량제어밸브의 출력유량(그림 15)에 대한 방출밸브 개방변위는 그림 16과 같다. 본 연구에서는 최종적으로 그림 14와 같이 비례유량제어밸브에 스펴입력을 인가하였을 경우에 대한 발사체 운동에 관한 개루프 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 때 발사체의 위치, 속도, 그리고 가속도 결과를 그림 17-19에 도시하였다. 그림 16에서 실제로 방출밸브 개방이 시작되는 1(mm)까지 스펴이 이동하는데 걸리는 시간은 약 0.1(sec)이며, 이 때 발사체 이동이 시작되어 그림 17에서와 같이 약 0.85(sec)에 발사체가 7(m) 길이의 발사관을 이탈한다. 그림 18-19에서 발사체의 이탈속도는 약 21(m/s)이며 이탈가속도는 약 10(m/s²)로서 수중발사성능 요구조건에 부합함을 확인하였다.

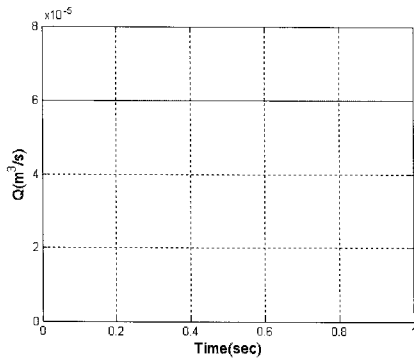


그림 12. 방출밸브의 기준입력.
Fig. 12. Reference input of the expulsion spool valve.

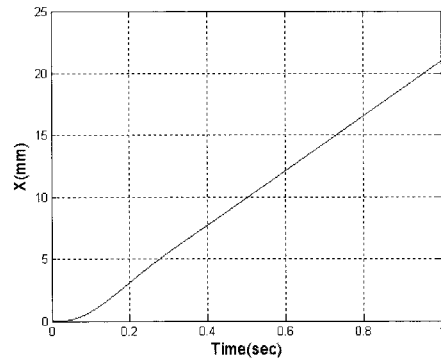


그림 16. 방출밸브의 개방변위.
Fig. 16. The response of expulsion spool valve.

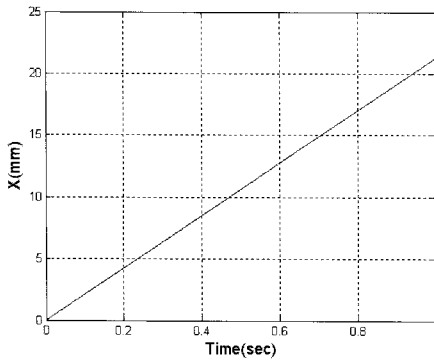


그림 13. 방출밸브 출력.
Fig. 13. Output of the expulsion spool valve.

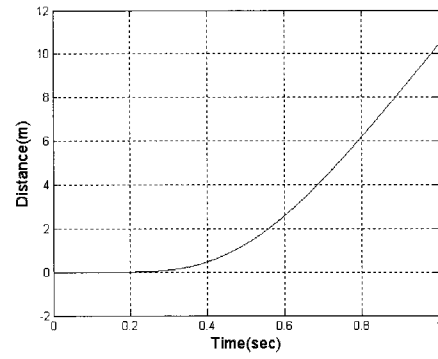


그림 17. 발사체 이동거리.
Fig. 17. Distance of the projectile.

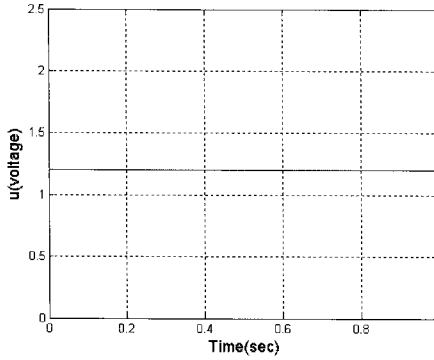


그림 14. 비례 유량제어 밸브 기준입력.
Fig. 14. Reference input of the proportional flow control valve.

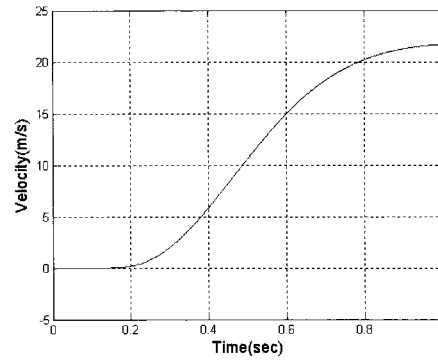


그림 18. 발사체의 속도.
Fig. 18. Velocity of the projectile.

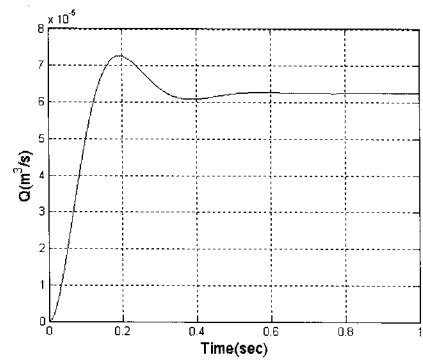


그림 15. 비례 유량제어 밸브 출력유량.
Fig. 15. Output of the proportional flow control valve.

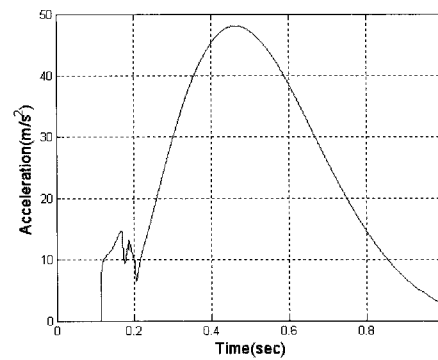


그림 19. 발사체의 가속도.
Fig. 19. Acceleration of the projectile.

이상과 같이, 본 논문에서는 압축수에 의한 ATP 방식 방출 시스템에 대한 동특성 분석을 수행하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제어 가능성을 확인하였다. 그러나 보다 정확한 해석을 위하여 방출밸브 내 유체력 및 마찰력을 고려할 필요성이 있다. 또한, 본 논문에서는 그림 14와 같이 비례유량제어밸브에 단순한 스텝입력을 인가하여 그림 16과 같이 방출밸브 스펙트럼 변위를 개방하였으나, 향후에는 ATP, 압축탱크, 발사관 등 시스템 전반에 대한 유동해석을 수행함으로써 수심 또는 모선의 이동속도 변화 등 다양한 불확실성에 대하여 성능 요구조건을 만족시킬 수 있는 최적의 방출밸브 개방계획 산출이 요구된다. 향후 이러한 추가적인 연구와 아울러 본 시스템 특성에 적합한 방출밸브 스펙트럼 제어알고리즘을 설계함으로써, 그림 19의 약 0.2(sec) 이전 구간에서 과도한 제어입력으로 인하여 발생하는 섭동(perturbation) 개선을 포함한 보다 안정적인 시스템 제어가 가능할 것으로 사료된다.

IV. 결론

수중발사 시스템은 탑재된 정밀 첨단장비의 보호와 요구되는 성능을 유지하기 위해, 발사 시 안정성이 확보된 상태에서 적절한 이탈 속도 및 가속도를 가져야 한다.

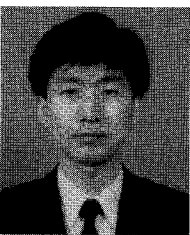
본 논문에서는 수중발사를 위한 ATP 방식 압축수 방출시스템의 동특성을 예측하기 위해 수학적 모델을 유도하였다. 수학적 모델은 압축탱크, 비례유량제어 밸브, 방출밸브, ATP시스템, 발사체로 각각의 수학적 모델을 유도한 후 결합하여 전체적인 모델을 구성하였으며, MATLAB/Simulink를 이용한 시뮬레이션 툴을 개발하였다. 압축수 방출시스템은 비례유량제어 밸브를 통해 유압실에서 축압기로 유출되는 작동유의 양을 조절함으로써 방출밸브 스펙트럼의 개방변위를 제어할 수 있다.

비례유량제어밸브는 응답특성 곡선으로부터 2차식의 전달함수로 모델링 하였고, 압축탱크 내 공기 지배방정식은 등엔트로피 과정과 이상기체 방정식을 적용하여 유도하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 비례유량제어밸브와 방출밸브 간의 응답특성 및 그에 따른 발사체의 발사응답 특성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 적용되지 않았으나 향후 발사체의 동특성 해석에 있어서 수중모선의 이동속도를 고려한 연구가 추가적으로 필요하며, 그림 1에서와 같이 ATP 시스템 및 해수 흐름에 대한 전반적인 3D유동해석에 의한 수학적 모델의 검증 및 이를 기반으로 보다 정확한 방출밸브의 개방 목표계획 산출에 관한 연구가 요구된다. 또한, 실험장치의 구축을 통한 타당성 검증 역시 해결해야 할 과제이다.

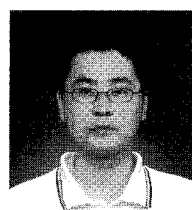
참고문헌

- [1] 구대정, “수중발사를 위한 압축가스 방출시스템의 동특성 해석 및 제어,” 석사학위논문, 부산대학교, 2004.
- [2] 박인기, 변홍석, “선형펌프 방식 수중발사 시스템의 동특성 해석 연구,” 국방과학연구소, NSDC-513-060878, 2006.
- [3] J. Watton, *Fluid Power Systems*, Prentice Hall International (UK) Ltd, 1989.
- [4] G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag, and C. Borgnakke, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, 4th Ed., John Wiley & Sons, Inc, 1994.
- [5] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, “Fundamentals of fluid mechanics,” 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [6] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, 3rd Ed., Pergamon Press, 1978.



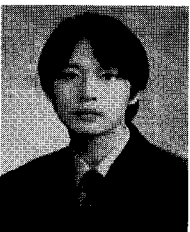
한 명 철

1983년 서울대학교 기계설계과 졸업.
1985년 동 대학원 공학석사. 1992년 Georgia Institute of Technology 공학박사.
1994년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 건설제어, 비선형제어, 로봇제어, 제어이론.



김 정 관

1995년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업.
1997년 동 대학원 공학석사. 2004년 동 대학원 공학박사. 2006년~2007년 Postdoctor at UC Berkeley. 2007년~현재 부산대학교 기계공학부 계약교수. 관심분야는 건설제어, 비선형제어, 로봇공학, Visual Servoing Control.



김 광 수

2006년 동의대학교 전자공학과 졸업.
2008년 부산대학교 대학원 기계공학부 공학석사. 관심분야는 지능로봇제어, 비선형제어.