

## 선형펌프 방식 수중발사 시스템의 동특성 해석

Analysis of the Dynamic Characteristics of the Underwater Discharge System  
using a Linear Pump

**박인기\***      **정찬희\***  
Park, In-Ki      Jung, Chan-Hee

### ABSTRACT

In this paper, the mathematical model of the underwater discharge system using a linear pump is derived and the suitable opening pattern of a flow control valve which satisfies the discharge performance requirements is obtained through the underwater discharge simulations. The simulation results show that the dynamic characteristics of a projectile are greatly affected by the opening pattern of the flow control valve, however, hardly by the diving depth. It is anticipated that the simulation model can be used to derive the design parameters and analyze the performance of the designed underwater discharge system using a linear pump.

주요기술용어(주제어) : Linear Pump(선형펌프), Underwater Discharge(수중발사), Tube(발사관), Flow Control Valve(유량제어밸브)

### 1. 머리말

수중에서 발사되는 발사체는 발사관으로부터 사출되는 과정에서 속도와 가속도에 대한 요구조건이 주어지며 수중발사 시스템은 이를 만족시켜주어야 한다. 발사체의 이탈속도는 발사함의 전단부에 형성되는 횡류에 의한 모멘트를 극복하고, 이탈 후 안정된 자세를 유지하기 위한 최소 속도가 필요하며 발사체의 가속도는 발사체의 구성품들이 견딜 수 있는 최대 가속도 이내여야 한다.<sup>[1]</sup>

수중발사 과정에서 발사체의 동특성에 영향을 주는

요소로는 발사체의 제원, 발사관을 포함한 수중발사 시스템의 형식, 발사함의 속도와 발사수심 등이 있다.<sup>[2]</sup>

현재 각국에서 운용중인 수중발사 시스템은 발사력을 발생시키는 에너지원의 종류에 따라 압축공기를 이용하는 Direct Air 방식, 압축수를 이용하는 Linear Pump 방식, Rotary Pump 방식, Elastomeric Balloon 방식, 그리고 기계적인 힘을 이용하는 Mechanical Ram 방식 등이 있다.

국내에서는 Direct Air 방식 수중발사 시스템의 동특성 해석에 관한 연구가 수행된 바 있으나, 다른 방식들에 대해서는 현재까지 관련 연구가 전무한 실정이다.

선형펌프 방식 수중발사 시스템은 발사관, 수압실린더, 피스톤, 유압실린더, 축압기, 유량제어밸브 등으

† 2005년 8월 1일 접수~2005년 9월 9일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : victor@add.re.kr

로 구성되어 있다. 발사관은 발사 전까지 발사체를 고정 및 보관하며 발사 중에는 압축수의 유입에 의해 전진하는 발사체의 움직임을 발사관의 축방향으로 제한하는 역할을 한다. 수압실린더는 해수를 저장하고 피스톤의 운동에 따라 해수를 압축하여 발사관으로 공급한다. 피스톤은 유압실린더에서 발생한 힘을 수압실린더로 전달한다.

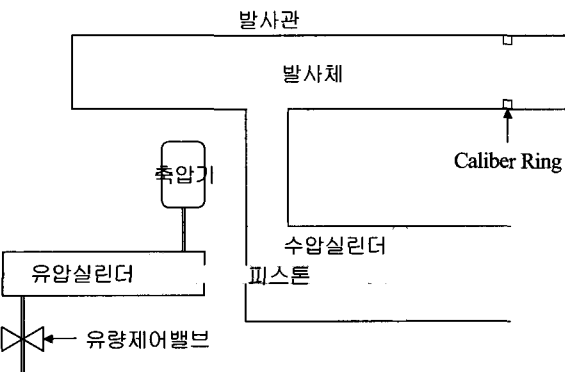
수중발사 과정에서 발사체의 운동특성은 피스톤의 운동에 따라 조절되며 피스톤의 운동은 유압실린더에 연결된 유량제어밸브를 통하여 배출되는 유압유량에 따라 결정된다. 즉, 발사체의 운동특성은 유량제어밸브에 의하여 조절할 수 있으며, 수중발사 과정의 요구조건을 만족시키기 위한 유량제어밸브의 조절방법을 찾는 것이 필요하다.

본 연구에서는 선형펌프 방식 수중발사 시스템을 수학적으로 모델링하여 수중발사 과정의 해석 및 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 하였으며, 시뮬레이션을 통하여 수중발사 과정의 요구조건을 만족시키는 유량제어밸브의 조절방법을 도출하였다.

## 2. 수중발사 시스템 모델링

선형펌프 방식 수중발사 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

축압기에 저장된 유압유는 유량제어밸브가 열림에 따라 유압실린더로 유입되고 유압에 의한 힘이 피스톤을 당긴다. 피스톤의 운동에 따라 수압실린더 내의



[그림 1] 선형펌프 방식 수중발사 시스템의 구성

해수는 압축되어 발사관 내로 유입되며 이는 발사관 내의 압력을 증가시킨다. 결국 발사관 내의 증가된 압력은 발사체를 밀어내는 힘으로 작용하게 된다.

그림 1의 개념을 보다 구체화하여 시스템의 수학적 모델을 유도한다.

### 가. 유압계통

선형펌프 방식 수중발사 시스템의 유압계통만을 분리하여 나타내면 그림 2와 같다.

발사 준비 시에 피스톤은 유압실린더의 우측단에 위치하며 축압기로부터 유압실린더로 연결되는 배관은 열려있는 상태이다. 그러나 유량제어밸브가 닫혀 있어 피스톤은 움직이지 않는다. 발사 시작 신호는 유량제어밸브를 열리게 하고 유압유가 배출되면서 피스톤은 좌측으로 움직이게 된다.

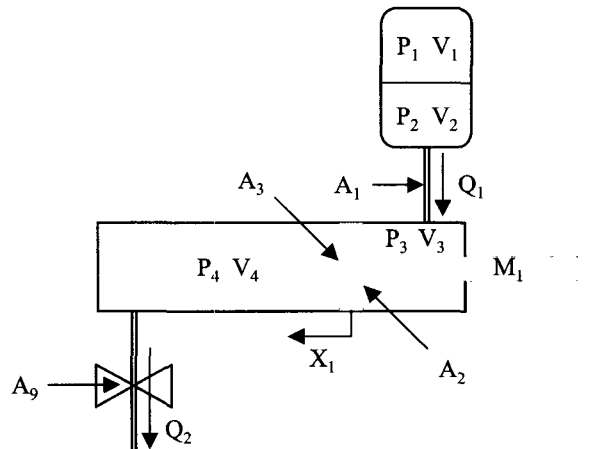
축압기 내부의 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$P_1 = P_2 \tag{1}$$

$$P_1 = P_{i1} \left( \frac{V_{i1}}{V_1} \right)^n \tag{2}$$

$$\dot{P}_2 = -\frac{\beta_h}{V_2} (\dot{V}_2 + Q_1) \tag{3}$$

$$V_2 = V_{2i} - (V_1 - V_{1i}) \tag{4}$$



[그림 2] 유압계통 모델

식 (1)에서  $P_1$ 은 축압기 내 기체의 압력이며  $P_2$ 는 축압기 내 유압유의 압력이다. 식 (2)에서  $V_1$ 은 축압기 내 기체의 체적이며  $n$ 은 축압기 내 기체의 비열 비이다. 식 (3)에서  $V_2$ 는 축압기 내 유압유의 체적,  $\beta_h$ 는 유압유의 체적탄성계수이다. 아래첨자  $i$ 는 각 변수의 초기값을 의미하며 각 변수위의 점은 시간에 관한 미분을 의미한다.

축압기에서 유압실린더로 흐르는 유압유량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_1 = C_{d1} A_1 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_3)}{\rho_h}} \quad (5)$$

식 (5)에서  $C_{d1}$ 은 노즐의 배출계수,  $A_1$ 은 노즐의 단면적,  $\rho_h$ 는 유압유의 밀도이다.

유압실린더 양측 내부의 압력에 관한 식은 각각 다음과 같이 표현된다.<sup>[4]</sup>

$$\dot{P}_3 = \frac{\beta_h}{V_{3i} + A_2 x_1} (Q_1 - A_2 \dot{x}_1) \quad (6)$$

$$\dot{P}_4 = \frac{\beta_h}{V_{4i} - A_3 x_1} (A_3 \dot{x}_1 - Q_2) \quad (7)$$

식 (6)에서  $P_3$ 는 유압실린더 우측 내부의 압력,  $V_3$ 는 유압실린더 우측 내부의 체적,  $A_2$ 는 유압실린더 우측 피스톤의 단면적이며  $x_1$ 은 피스톤의 변위이다.

식 (7)에서  $P_4$ 는 유압실린더 좌측 내부의 압력,  $V_4$ 는 유압실린더 좌측 내부의 체적,  $A_3$ 는 유압실린더 좌측 피스톤의 단면적이다.

유량제어밸브를 통하여 흐르는 유압유량은 다음과 같이 표현된다.<sup>[5]</sup>

$$Q_2 = C_{d4} A_9 \sqrt{\frac{2(P_4 - P_9)}{\rho_h}} \quad (8)$$

식 (8)에서  $C_{d4}$ 는 유량제어밸브의 배출계수,  $A_9$ 은 유량제어밸브 노즐의 단면적,  $P_9$ 은 유량제어밸브 출구측의 압력이다.

피스톤의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m_1 \ddot{x}_1 = P_3 A_2 - P_4 A_3 - P_5 A_5 + P_8 A_8 \quad (9)$$

식 (9)에서  $m_1$ 은 피스톤의 질량을 나타낸다.

#### 나. 발사관 및 수압실린더

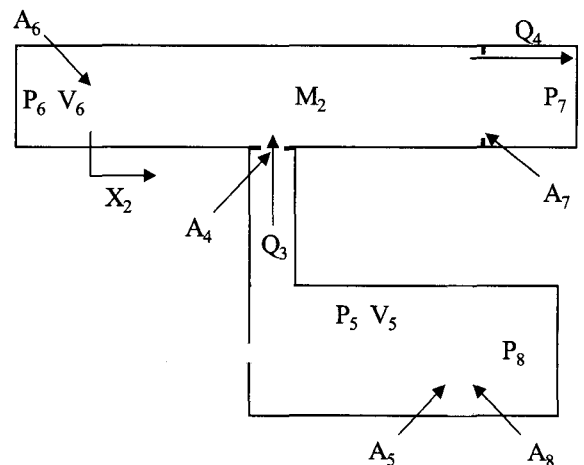
선형펌프 방식 수중발사 시스템의 발사관 및 수압실린더 부분만을 분리하여 나타내면 그림 3과 같다.

발사가 시작되면 유압실린더에서 당기는 힘에 의해 피스톤은 좌측으로 움직이고 수압실린더 내의 해수는 압축되어 발사관으로 유입된다. 발사관 내로 유입된 해수는 발사관 내의 압력을 증가시키고 발사체는 발사관 내 압력과 발사관 전방에 작용하는 발사수심에 따른 정수압과의 압력 차이에 의해 추진력을 얻게 된다.

수압실린더에서 발사관으로 유입되는 해수의 유량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_3 = C_{d2} A_4 \sqrt{\frac{2(P_5 - P_6)}{\rho_w}} \quad (10)$$

식 (10)에서  $C_{d2}$ 는 발사관 유입밸브의 배출계수,  $A_4$ 는 발사관 유입밸브의 단면적,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도이다.



[그림 3] 발사관 및 수압실린더 모델

수압실린더와 발사관 내부의 압력은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{P}_5 = \frac{\beta_w}{V_{5i} - A_5 \dot{x}_1} (A_5 \dot{x}_1 - Q_3) \quad (11)$$

$$\dot{P}_6 = \frac{\beta_w}{V_{6i} + A_6 \dot{x}_2} (Q_3 - Q_4 - A_6 \dot{x}_2) \quad (12)$$

식 (11)에서  $P_5$ 는 수압실린더 좌측 내부의 압력,  $V_5$ 는 수압실린더 좌측 내부의 체적,  $A_5$ 는 수압실린더 좌측 피스톤의 단면적이며  $\beta_w$ 는 해수의 체적탄성계수이다.

식 (12)에서  $P_6$ 는 발사관 내부의 압력,  $V_6$ 는 발사관 내부에서 발사체를 제외한 체적,  $A_6$ 는 발사체의 단면적이며  $x_2$ 는 발사체의 변위이다.

발사관과 발사체 사이의 공간을 통한 해수의 유출에 따른 압력손실을 줄이기 위하여 Caliber Ring이 설치되며 발사체와 Caliber Ring 사이로 흐르는 해수의 유량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_4 = C_{d3} A_7 \sqrt{\frac{2(P_6 - P_7)}{\rho_w}} \quad (13)$$

식 (13)에서  $C_{d3}$ 는 발사체와 Caliber Ring 사이의 배출계수,  $A_7$ 은 발사체와 Caliber Ring 사이의 단면적이며  $P_7$ 은 발사 수심에 따른 정수압이다.

발사함을 정지된 상태로 가정한 발사체의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$(m_2 + m_a) \ddot{x}_2 = A_6 (P_6 - P_7) - \frac{1}{2} (C_f + C_p) \rho_w S \dot{x}_2^2 \quad (14)$$

식 (14)에서  $m_2$ 는 발사체의 질량,  $m_a$ 는 수중운동체에 적용되는 부가질량이며  $C_f$ 는 발사체의 마찰항력계수,  $C_p$ 는 압력항력계수,  $S$ 는 발사체의 표면적이다.

### 3. 수중발사 시뮬레이션

앞서 구한 수중발사 시스템의 수학적 모델에 의한 수중발사 과정의 시뮬레이션에 있어서 발사함은 수평 정지 상태로 가정하였다.

발사체의 원하는 운동특성을 얻기 위한 유량제어밸브 개방형태를 찾기 위해 일정 수심에서 수중발사 시뮬레이션을 반복 수행하여 유량제어밸브 개방형태와 발사체 운동특성간의 관계를 확인하였다. 다음으로 발사 수심의 변화에 의한 영향에 관해 알아보았다.

#### 가. 유량제어밸브의 개방형태 도출

유량제어밸브의 개방형태는 가장 단순한 형태인 사다리꼴로 가정하였다. 즉, 닫힌 상태에서부터 일정한 속도로 열리기 시작하여 어느 위치에서 열린 상태를 발사체 이탈 시까지 일정하게 유지하는 형태이다. 이로부터 구해야 하는 인자는 유량제어밸브의 단면적 변화율과 최대 단면적의 두 가지로 정해진다.

수중발사 과정에서 요구되는 성능조건은 다음과 같이 설정하였다.<sup>[3]</sup>

- 발사체의 발사관 이탈속도는 11m/s 이상
- 발사체의 최대 가속도는 8g(78.48%) 이하

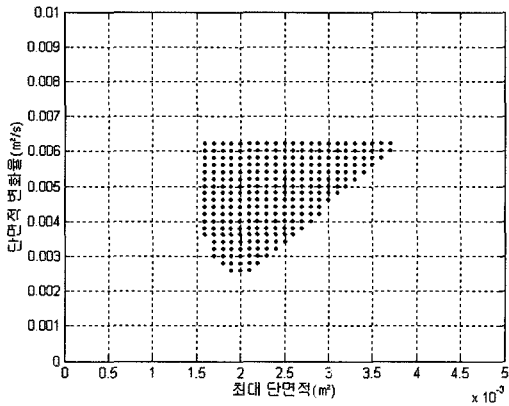
먼저 발사 수심을 10m로 고정하고 유량제어밸브의 단면적 변화율과 최대 단면적을 일정한 간격으로 변화시켜 가며 시뮬레이션을 반복 수행한다. 시뮬레이션 결과가 위에서 제시한 성능조건을 만족하는 경우, 그때의 단면적 변화율과 최대 단면적 값을 표시한다.

이와 같은 방법으로 구한 유량제어밸브의 개방형태 인자는 그림 4와 같다.

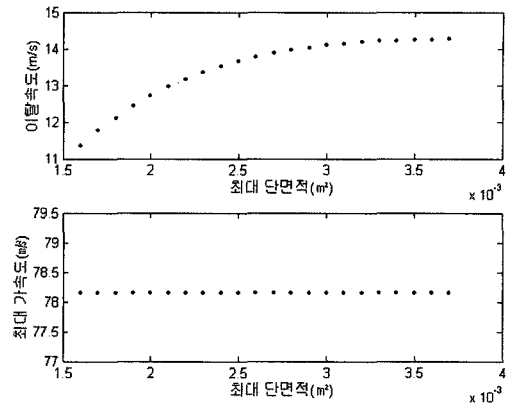
유량제어밸브 개방형태의 각 인자들과 발사체 운동특성 간의 상관관계는 다음과 같이 분석하였다.

먼저 최대 단면적을 0.002m<sup>2</sup>로 하고 단면적 변화율은 0.0026m<sup>2</sup>/s부터 0.0062m<sup>2</sup>/s까지 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하고 발사체의 운동특성을 확인하였다. 그 결과는 그림 5와 같다.

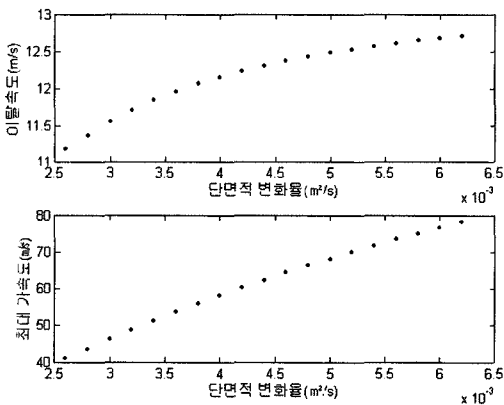
그림 5에서 유량제어밸브 단면적 변화율의 증가에 따라 발사체의 이탈속도와 최대 가속도가 모두 증가하며 특히 최대 가속도의 변화폭이 더 큼을 알 수



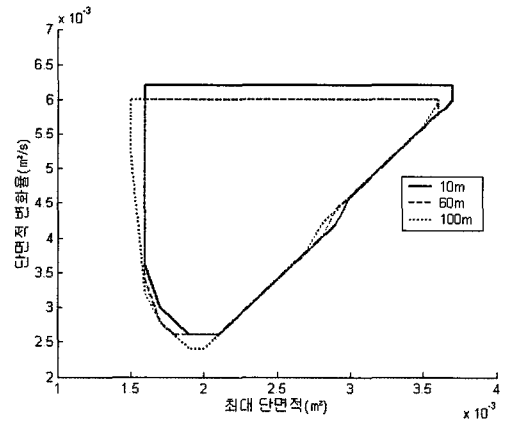
[그림 4] 유량제어밸브 개방형태 인자



[그림 6] 유량제어밸브 최대 단면적과 발사체 운동 특성



[그림 5] 유량제어밸브 단면적 변화율과 발사체 운동 특성



[그림 7] 유량제어밸브 개방형태 인자(발사 수심 10m, 60m, 100m)

있다.

다음으로 단면적 변화율은 0.0062m<sup>2</sup>/s로 하고 최대 단면적은 0.0016m<sup>2</sup>부터 0.0037m<sup>2</sup>까지 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하고 발사체의 운동특성을 확인하였다. 그 결과는 그림 6과 같다.

그림 6에서 유량제어밸브의 최대 단면적이 증가함에 따라 발사체의 이탈속도는 증가하나 최대 가속도는 거의 일정하다. 즉, 최대 단면적과 최대 가속도는 서로 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

#### 나. 발사 수심에 의한 영향

압축공기 방식 수중발사 시스템에서는 발사 수심에

따라 발사 성능 요구조건을 만족시키는 조절장치의 제어인자가 다르며 같은 제어인자로 발사했을 경우 발사 수심에 따라 발사체의 운동특성에 큰 차이를 보인다.<sup>[6]</sup>

선형펌프 방식 수중발사 시스템의 발사 수심에 의한 영향을 알아보기 위하여 발사 수심 60m, 100m에서 발사 성능 요구조건을 만족시키는 유량제어밸브의 개방형태 인자를 구하고 발사 수심 10m일 때의 결과와 함께 그 범위를 폐곡선으로 나타내면 그림 7과 같다.

그림 7에서 각각 다른 발사 수심에서 요구되는 적

절한 유량제어밸브의 개방형태 인자의 범위는 거의 유사함을 알 수 있다. 즉, 선형펌프 방식 수중발사 시스템은 발사 수심에 의한 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있는데, 이것은 발사 수심의 증가에 따른 정수압의 증가가 발사체의 전면과 후면에 동일하게 영향을 미치기 때문이다.

다. 수중발사 시스템의 동특성

앞서 구한 유량제어밸브의 개방형태를 이용하여 수중발사 시뮬레이션을 수행하고 시스템의 동특성을 분석해 본다. 여기서 발사 수심은 10m로 하고 유량제어밸브의 개방형태는 최대 가속도가 가장 작은 경우(최대 단면적 0.002m<sup>2</sup>, 단면적 변화율 0.0026m<sup>2</sup>/s)로 하였다. 이 때 유량제어밸브의 개방형태는 그림 8과 같다.

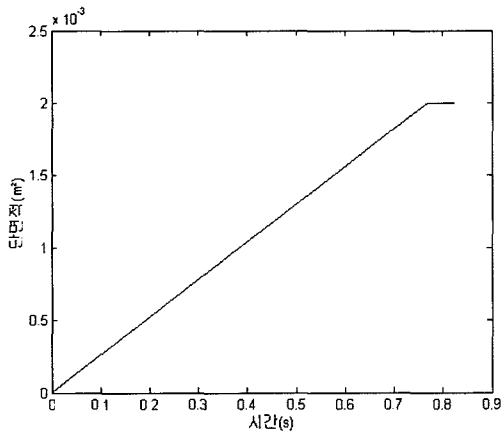
그림 8에서 유량제어밸브는 닫힌 상태에서 시작하여 일정한 비율로 열리다가 최대 단면적에 도달하여 그 상태를 유지한다. 그래프가 끝나는 점은 발사체의 후미가 발사관을 이탈한 시점이다.

발사체의 이동거리, 속도, 가속도에 관한 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다.

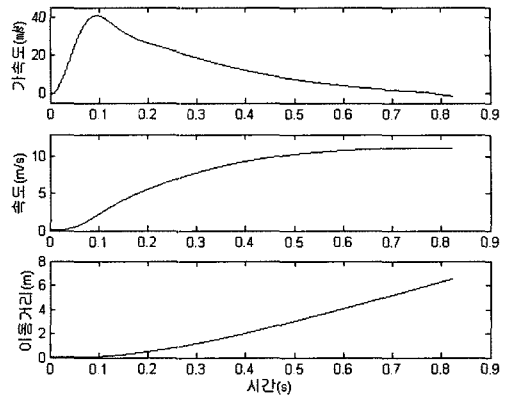
그림 9에서 발사체는 발사 초기에 큰 가속도에 의해 급격한 속도의 증가를 나타내며 후기에는 거의 일정한 속도를 유지하는 것을 알 수 있다.

수압실린더와 발사관의 압력은 그림 10과 같다.

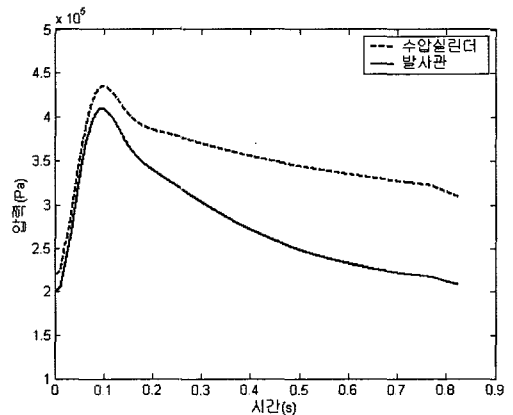
그림 10에서 발사 초기에는 수압실린더와 발사관



[그림 8] 유량제어밸브 개방형태



[그림 9] 발사체 운동특성



[그림 10] 수압실린더, 발사관 압력

압력 간에 큰 차이가 없으나 약 0.1초 이후에는 발사관의 압력이 더 크게 감소하는 데, 이는 발사체의 운동에 의한 발사관 내의 압력 감소를 수압실린더로부터 발사관으로 유입되는 해수량이 따라가지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 맺음말

본 연구에서는 선형펌프 방식 수중발사 시스템의 수학적 모델을 유도하고 이를 이용한 수중발사 시뮬레이션을 통하여 발사성능 요구조건을 만족시키는 유량제어밸브의 개방형태를 도출하였다. 또한 유량제어

밸브의 개방형태에 따라 발사체의 속도와 가속도가 크게 영향을 받음을 확인하였으며 발사 수심의 변화에 따른 발사성능의 영향은 거의 없음을 확인하였다.

본 연구를 통하여 획득한 선형펌프 방식 수중발사 시스템의 동특성 해석용 시뮬레이션 모델은 향후 선형펌프 방식 수중발사 시스템의 설계변수 도출, 설계된 시스템의 성능 예측 및 분석 등에 기여할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. T. Lenton, "Submarines and their weapon system", Maritime Defence, 1992, Vol. 17 No. 6, pp.156~161.
- [2] P. R. Ellis, "The development of a controllable weapons discharge system for submarines", WARSHIP 91 International Conference on Naval Submarines 3, 1991.
- [3] "Pressure Air Expulsion System ES 12/200", Krupp Mak, 1989.
- [4] J. Watton, Fluid Power Systems, 1989, Prentice Hall, Inc. pp.97~98.
- [5] Herbert E. Merritt, Hydraulic Control Systems, 1967, John Wiley & Sons, Inc. pp.40~42.
- [6] 박인기, "압축공기 방식 수중발사 시스템의 동특성 시뮬레이션", 한국군사과학기술학회지, 2004. 6, pp.41~47.