

# 압축공기 방식 수중발사 시스템의 동특성 시뮬레이션

## Simulations of Dynamic Characteristics of the Underwater Discharge System with Compressed Air

**박인기\***

Park, In-Ki

### ABSTRACT

In this paper, simulations of the underwater discharge system with compressed air are performed to predict dynamic characteristics of the system and to find optimal opening trajectories of the expulsion valve. Major components of the system are defined and their governing equations are derived to make up the mathematical model. The compressed air discharge method is affected largely by the discharge depth, and therefore the opening trajectories according to the discharge depth should be found to satisfy the demands of discharge performances. Simulation results are compared with experimental data to confirm the validity of the system model.

주요기술용어(주제어) : Underwater Discharge System(수중발사 시스템), Opening Trajectory(개방궤적), Expulsion Valve(방출밸브), Exit Velocity(이탈속도)

### 1. 머리말

어뢰는 성공적인 발사를 위하여 발사관으로부터 이탈시 일정한 속도 범위를 갖도록 해야 한다. 이탈속도가 너무 빠르면 발사 중 과도한 가속이 수반되므로 어뢰가 무리한 충격을 받을 수 있고 소음의 증가와 더불어 불필요한 에너지를 소모하게 된다. 반면에 너무 느리면 이탈 시 발사 플랫폼 전방에 형성되는 횡류에 의한 영향을 크게 받아 이탈 후 발사 플랫폼에 부딪히거나 안정된 자세유지가 어렵게 될 수 있다.<sup>[1]</sup>

어뢰의 수중발사 특성에 영향을 미치는 인자로는

어뢰의 종류, 발사관의 특성, 발사 플랫폼의 속도와 발사수심 등이 있다.<sup>[2]</sup> 현재 각국에서 운용중인 수중발사 시스템의 발사방식으로는 압축공기 방식, ATP(Air Turbine Pump) 방식, Water Ram 방식, Mechanical Ram 방식 등이 있으며 여기서는 국내에서 운용중인 압축공기 방식을 대상으로 한다.

압축공기 방식의 수중발사 시스템은 발사관, 압축공기 탱크, 방출밸브 등으로 구성되어 있다.<sup>[3]</sup> 발사관은 발사 전까지 어뢰를 보관하며 발사 중에는 압축공기의 방출에 따라 움직이는 어뢰를 직진방향으로 안내하는 역할을 한다. 압축공기 탱크는 발사의 에너지원이 되는 압축공기를 발사 플랫폼 내의 고압공기 계통으로부터 공급받아 저장하며 발사관 당 하나씩 설치되어 있다. 방출밸브는 압축공기 탱크에 저장되어 있던 공기를 발사관내로 방출시키는 밸브로서 이를

† 2004년 5월 20일 접수 ~ 2004년 6월22일 심사완료

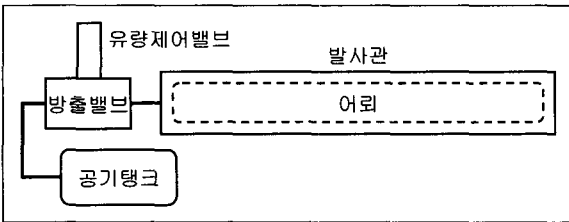
\* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)  
주저자 이메일 : victor@add.re.kr

통과하는 공기유량을 제어할 수 있게 되어 있다.

발사관 내에서 어뢰의 운동특성은 발사관 내에 형성되는 압력에 따라 크게 영향을 받으며 이 압력은 방출밸브의 개방형태에 따라 조절될 수 있다. 따라서 발사성능 요구조건을 만족시키는 가장 적절한 방출밸브의 개방형태를 찾는 것이 본 연구의 목적이며 이를 위해 압축공기 방식의 수중발사 시스템을 수학적으로 모델링하여 어뢰가 발사되는 과정에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 방출밸브의 개방형태는 허용범위 내에서 일정하게 변화시켜 모의 발사시험을 수행하고 결과분석을 통해 발사성능 요구조건을 만족시키는 가장 적합한 형태를 찾게 된다.

## 2. 수중발사 시스템 모델링

압축공기 방식 수중발사 시스템의 구성을 그림 1에서 보이고 있다. 공기탱크에 저장된 압축공기는 방출밸브의 열림에 따라 발사관으로 유입되고 발사관 내 공기의 압력이 높아짐에 따라 어뢰를 밀어내게 된다. 방출밸브의 개방형태는 전기신호에 의해 제어되는 유량제어밸브를 통하여 조절된다. 방출밸브는 어뢰가 발사관을 이탈한 후에 닫히게 된다.

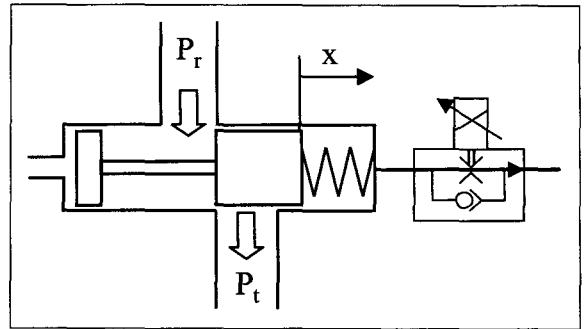


[그림 1] 압축공기 방식 수중발사 시스템의 구성

### 가. 방출밸브

방출밸브에 유량제어밸브가 결합된 모델은 그림 2와 같이 간략히 표현될 수 있다.

방출밸브는 평시에 닫혀 있다가 발사신호에 따라 방출밸브 피스톤의 한 쪽 면에 작용하는 공기압에 의해 열리게 된다. 방출밸브의 열리는 변위와 속도는 부착된 유량제어밸브에 의해 조절된다. 여기서는 방출밸브의 개방형태를 원하는 형태로 조절할 수 있다



[그림 2] 방출밸브 모델

고 가정하고 방출밸브의 운동방정식은 고려하지 않는다. 방출밸브의 변위  $x$ 는 처음에 닫힌 상태를 기준으로 하여 측정된다.

방출밸브를 통하여 흐르는 공기의 질량유량은 방출밸브 전후의 압력비와 밸브출구의 유효단면적에 따라 주로 결정되며 다음과 같은 관계식으로 표현된다.<sup>[4]</sup>

$$\dot{m} = P_r A_e \alpha \sqrt{\left(\frac{1}{k-1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{k}{RT_r}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\dot{m}$ 은 방출밸브를 통해 흐르는 공기의 질량유량이고  $k$ 는 공기의 비열비,  $R$ 은 기체상수이며  $P_r$ 은 공기탱크 내의 압력,  $T_r$ 은 공기탱크 내의 온도이다.  $A_e$ 는 방출밸브 출구의 유효단면적으로서 다음과 같이 구해진다.

$$A_e = C_c \pi D x \quad (2)$$

여기서  $C_c$ 는 밸브의 유로 단면적비에 따른 수축계수이고  $D$ 는 밸브출구의 직경이다.

식 (1)에서  $\alpha$ 는 방출밸브 전후의 압력비에 따라 결정되는 값으로서 다음과 같이 두 가지의 경우로 구분된다.

$$\alpha = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{P_t}{P_r} - b\right)^2} & \text{for } \frac{P_t}{P_r} > b \\ 1 & \text{for } \frac{P_t}{P_r} \leq b \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서  $P_t$ 는 발사관 내의 압력이며  $b$ 는 방출밸브의 임계압력비이다. 즉, 방출밸브 전후의 압력비가  $b$ 이하가 되면 공기의 흐름이 질식(choke)되어 압력비에 의해서는 더 이상 질량유량이 증가하지 않는다. 이로부터 알 수 있듯이 방출밸브를 통해 흐르는 공기의 양은 출구 단면적뿐만이 아니라 다른 여러 인자들로부터 영향을 받는다.

나. 공기탱크

공기탱크에 저장되어 있던 압축공기는 방출밸브의 열림에 따라 발사관으로 방출되어 공기탱크 내의 기체상태가 변하게 된다.

공기탱크 내의 체적은 일정하며 공기를 이상기체로 간주하고 외부와의 열전달이 없다고 가정하면 다음과 같은 상태방정식들을 얻을 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$\dot{P}_r = -\frac{1}{m_r} k \dot{m} P_r \quad (4)$$

$$\dot{T}_r = \frac{1}{m_r} (1 - k) \dot{m} T_r \quad (5)$$

식 (4), (5)에서  $m_r$ 은 공기탱크 내의 공기질량이다. (-)부호에 의해 공기탱크 내의 압력과 온도는 공기의 방출에 따라 점차 감소한다는 것을 예측할 수 있다.

다. 발사관

발사초기에 발사관 내의 온도와 압력은 해당 발사 수심에서 물의 상태와 같다. 방출밸브로부터 나온 압축공기는 발사관 내의 압력을 높이고 어뢰를 밀어내는 힘으로 작용하게 된다. 발사관 내의 체적은 어뢰의 후면에 형성되는 공기로 채워진 공간의 체적으로 한다. 어뢰가 움직이면서 발사관 내의 체적이 변하게 되어 발사관 내의 공기상태에 영향을 미치게 된다. 발사관 내의 공기상태 변화를 단열과정으로 가정하면 다음과 같은 압력, 온도, 체적에 관한 식들을 얻을 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$\dot{P}_t = \frac{k}{V_t} (R T_r \dot{m} - P_t \dot{V}_t) \quad (6)$$

$$\dot{T}_t = \frac{\dot{m}}{m_t} (k T_r - T_t) + (1 - k) \frac{\dot{V}_t T_t}{V_t} \quad (7)$$

$$\dot{V}_t = A_p \dot{x}_p \quad (8)$$

식 (6)에서  $P_t$ 는 발사관 내 공기압력,  $V_t$ 는 체적이며 식 (7)에서  $T_t$ 는 발사관 내 공기온도,  $m_t$ 는 발사관 내 공기질량을 나타낸다. 식 (8)에서  $A_p$ 는 어뢰의 진행방향 단면적을 나타낸다.  $x_p$ 는 어뢰의 속도를 나타내며 발사관 내의 체적 변화율은 어뢰의 단면적과 어뢰의 속도를 곱한 값으로 하였다.

라. 어뢰

어뢰는 발사관 내에 고정되어 있다가 발사가 시작되면 발사관 내로 유입되는 공기의 압력에 의하여 발사관 밖으로 강제 사출된다. 어뢰는 사출과정에서 수압에 의한 힘, 항력, 마찰력 등의 저항을 받게 된다.

어뢰에 작용하는 진행방향 힘의 평형관계를 이용하여 어뢰의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$(M_p + M_a) \ddot{x}_p = (P_t - P_w) A_t - F_f - F_d \quad (9)$$

식 (9)에서  $M_p$ 는 어뢰의 질량이며  $M_a$ 는 수중운동체에 고려해 주어야 하는 부가질량을 나타낸다.  $P_w$ 는 어뢰의 전면에 작용하는 수압이고  $F_t$ 는 어뢰와 발사관 사이에 작용하는 마찰력으로서 다음과 같이 구해진다.

$$F_f = \mu |M_p g - \gamma V_p| \quad (10)$$

여기서  $\mu$ 는 마찰계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\gamma$ 는 물의 비중,  $V_p$ 는 어뢰의 부피이다. 그리고 식 (9)에서  $F_d$ 는 어뢰에 작용하는 항력이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_d = \frac{1}{2} (C_f + C_p) \rho S \dot{x}_p^2 \quad (11)$$

식 (11)에서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $S$ 는 어뢰의 표면적이

다.  $C_f$ 는 마찰항력계수,  $C_p$ 는 압력항력계수이며 이에 대한 다음과 같은 실험식이 알려져 있다.<sup>[6]</sup>

$$C_f = \frac{0.0776}{(\log R_n - 1.88)^2} + \frac{60}{R_n} \quad (12)$$

$$C_p = \left\{ 0.2047 + 2.8153 \left( \frac{d}{l} \right) + 26.9149 \left( \frac{d}{l} \right)^2 \right\} 10^3 \quad (13)$$

식 (12), (13)에서  $R_n$ 은 어뢰의 길이에 관계된 레이놀즈수,  $d$ 와  $l$ 은 각각 어뢰의 직경과 길이를 나타낸다. 위에서 유도한 어뢰의 운동방정식은 어뢰가 발사관을 이탈하기 전까지만 유효하다.

### 3. 수중발사 시뮬레이션

수중발사 중 어뢰의 거동에 큰 영향을 미치는 인자로는 공기탱크의 초기압력, 어뢰의 제원, 발사 플랫폼의 속도, 발사수심, 방출밸브의 개방형태 등이 있다. 여기서 공기탱크의 초기압력은 18MPa로 고정한다. 또한 어뢰도 한 가지만을 대상으로 하며 발사 플랫폼의 속도는 정지상태라고 가정한다. 발사수심에 의한 영향을 고려하면, 수심이 깊어짐에 따라 수압도 증가하여 어뢰의 전면에 저항력이 증가하므로 어뢰의 후면에 작용하는 공기의 압력도 증가시켜야 할 것이다. 발사관 내 공기의 압력을 조절하기 위해서는 방출밸브가 열리는 형태를 조절해야 하는데 열리는 변위를 시간에 따른 값으로 표현한 것이 방출밸브의 개방계적이다. 따라서 임의의 수심에서 발사요구조건을 만족시키는 가장 적절한 방출밸브의 개방계적을 찾아야 한다.

#### 가. 최적 개방계적 도출

방출밸브 개방계적의 기본적인 형태는 구해야 하는 제어인자를 최소화하기 위해 가장 단순한 형태인 사다리꼴로 하였다. 즉 닫힌 상태에서 시작하여 일정한 속도로 열리다가 어느 위치에서 정지하여 어뢰가 이탈할 때까지 그 위치를 유지하는 형태이다. 따라서 필요한 제어인자는 방출밸브의 개방 속도와 최대 변

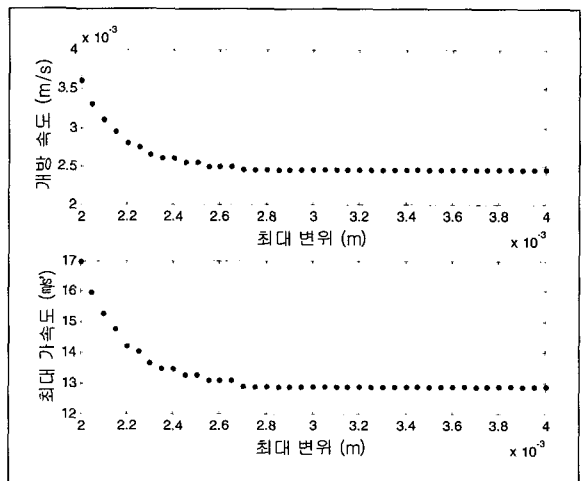
위의 두 가지가 된다.

먼저 일정한 수심조건에서 발사할 때 주어진 요구 성능을 가장 만족시키는 방출밸브의 개방계적을 구하는 과정을 제시한다. 수중발사에서 요구되는 성능조건은 다음과 같이 설정하였다.<sup>[7]</sup>

- ① 어뢰의 발사관 이탈속도는 11m/s 이상
- ② 어뢰의 최대 가속도는 8g(78.48m/s<sup>2</sup>) 이하 이면서 가능한 작은 것

즉, 이탈속도가 11m/s 이상 되는 경우들 중에서 발사 중 최대 가속도가 가장 작은 것을 찾게 된다. 먼저 발사수심을 10m로 고정하고 다음과 같은 과정을 반복 수행한다. 개방계적의 최대변위는 어느 한 위치로 하고 개방속도를 작은 값부터 시작하여 점차 증가시켜가며 어뢰의 이탈속도가 최초로 11m/s를 넘는 경우를 찾는다. 그러면 이 때의 개방속도와 최대 가속도를 기록한다. 이와 같은 방법으로 하여 최대변위를 조금씩 바꾸어가며 구한 개방속도와 최대가속도의 값을 그래프로 표현하면 그림 3과 같이 된다.

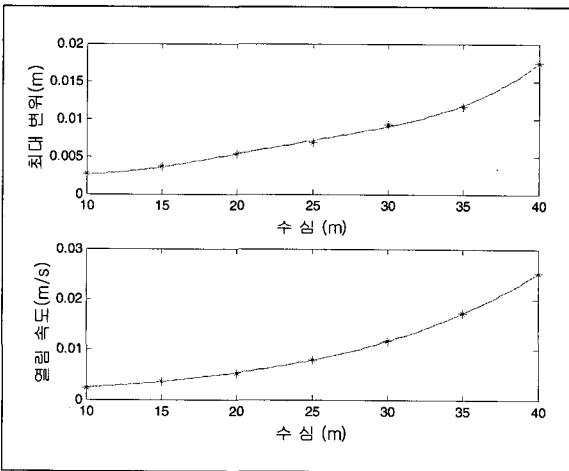
그림 3에서 보면 최대변위가 커지면 개방속도는 작아져야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 최대 가속도는 점차 감소하다가 최대변위 2.7×10<sup>-3</sup>m에서부터는 일정하게 유지되고 있다. 즉 최대변위를 더 증가시켜도 최대 가속도를 감소시키지는 못한다. 따라서 이 점을



[그림 3] 방출밸브의 개방계적에 따른 발사특성

가장 적합한 최대변위 값으로 선택하고 이 때의 개방 속도인  $2.45 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 와 조합하여 발사수심 10m에서의 최적 개방궤적을 구성한다.

다른 수심에서도 이와 같은 방법으로 최적 개방궤적을 구한다. 여기서는 수심 10m부터 40m까지 5m 간격으로 최적 개방궤적을 구하고 3차 다항식으로 근사하여 연속함수로 표현하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. (\*)표로 되어있는 것이 5m 간격으로 구한 개방궤적의 인자이고 실선으로 되어있는 것이 근사함수 값이다. 발사수심이 깊어질수록 방출밸브의 최대변위와 개방속도가 모두 증가하여야 함을 알 수

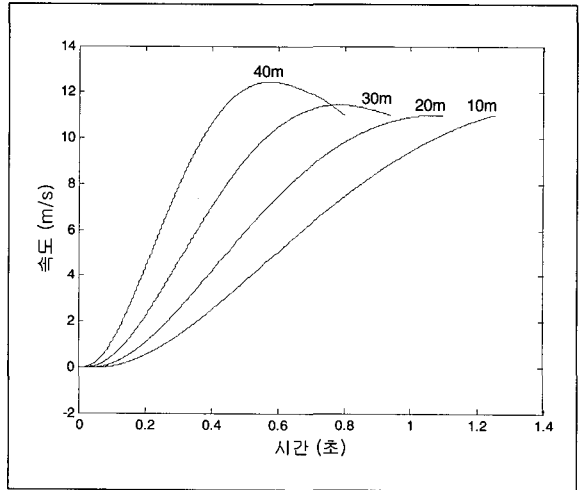


[그림 4] 발사수심에 따른 개방궤적 인자

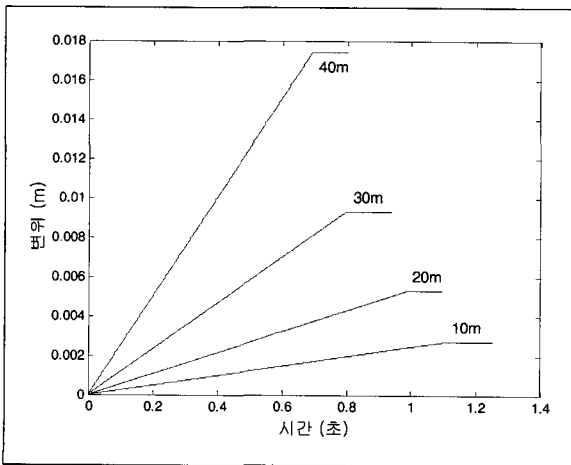
있다.

그림 5는 최적 개방궤적을 시간에 따른 변위로 나타낸 것으로 10m, 20m, 30m, 40m의 4가지 경우를 도시하였다. 개방궤적이 끝나는 곳은 어뢰가 발사관을 이탈하는 시점이다.

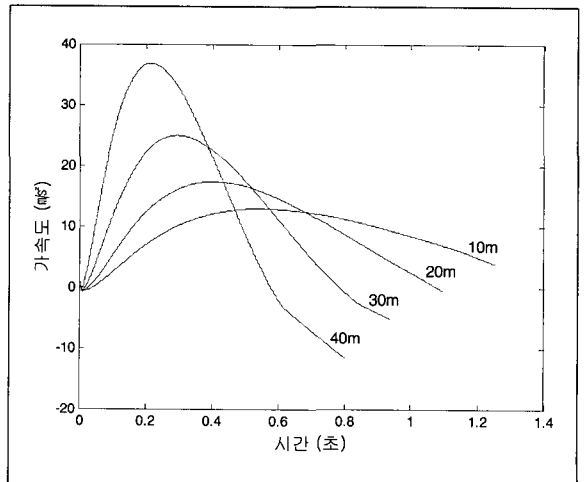
이제 앞서 구한 최적 개방궤적으로 발사하였을 때 발사관 내 어뢰의 거동을 살펴본다. 그림 6과 그림 7은 각각 발사수심에 따른 어뢰의 속도와 가속도이며 발사시작 시부터 발사관 이탈 시까지가 표현되어 있다.



[그림 6] 발사수심에 따른 어뢰의 속도



[그림 5] 발사수심에 따른 개방궤적 선도



[그림 7] 발사수심에 따른 어뢰의 가속도

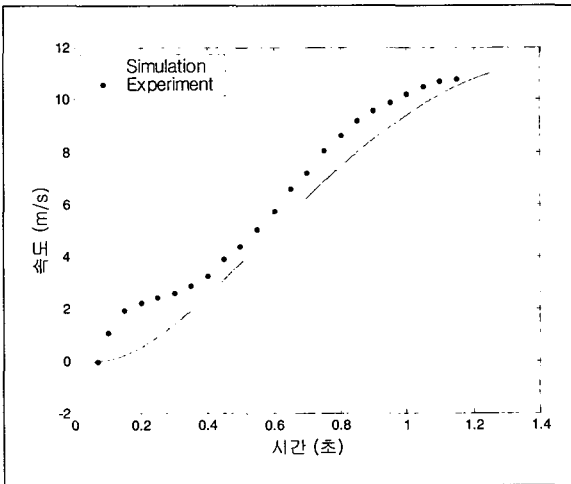
그림 6에서 보면 어뢰의 이탈속도는 모두 11m/s 이상을 만족시키고 있으며 발사수심이 깊어짐에 따라 속도의 변화가 커지고 발사관 이탈시간도 빨라짐을 알 수 있다. 그림 7에서 보면 어뢰의 가속도는 모두 8g(78.48m/s<sup>2</sup>) 이하를 만족시키지만 발사수심이 깊어질수록 큰 가속도를 수반하게 됨을 예측할 수 있다.

나. 실측자료와의 비교

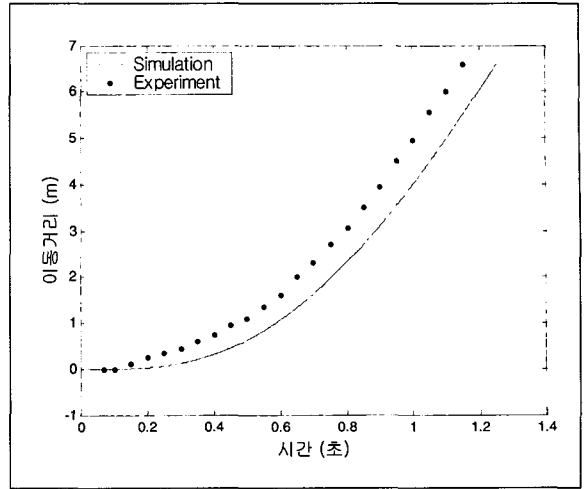
여기서는 앞서 수행한 시뮬레이션 결과를 실제 수중발사 시 측정된 자료와 비교해 본다. 그림 8은 수심 10m에서 어뢰의 속도에 대한 실측자료와 시뮬레이션 결과를 서로 비교하기 위해 같이 도시한 것이다.

그림 8에서 점선으로 표시된 그래프가 실측자료이며 실선으로 된 것이 시뮬레이션 결과이다. 실측자료의 속도를 보면 발사시작 후 약간의 시간간연이 있다가 급격한 속도증가가 있었다. 반면에 시뮬레이션에서는 속도가 처음에 서서히 증가하였다. 실측속도가 시뮬레이션 속도보다 전반적으로 더 빠르다가 발사관 이탈 시에 실측속도는 10.8m/s, 시뮬레이션 속도는 11.0m/s로 서로 비슷하게 된다. 위의 속도선도로부터 실측 시에 더 큰 최대 가속도가 발생하였음을 예측할 수 있다.

그림 9는 수심 10m에서 어뢰의 이동거리에 대한 실측자료와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 실측



[그림 8] 어뢰의 속도 비교



[그림 9] 어뢰의 이동거리 비교

자료의 이동거리가 전반적으로 더 앞서 있으며 발사관 이탈시간도 실측 시 1.15초, 시뮬레이션 시 1.25초로 실측 시에 더 빨리 이탈하였다. 이것은 그림 8에서와 같이 실측자료가 발사 중 속도가 전반적으로 더 빨랐던 것과 관계가 있다.

그림 8과 그림 9에서 나타난 실측자료와 시뮬레이션 결과의 차이는 시뮬레이션에 사용된 수학적 모델에서 고려되지 못한 인자에 의한 오차와 공기탱크 및 발사관 내 공기 상태방정식의 단순화에서 비롯되는 것이라고 판단된다.

4. 맺음말

지금까지 압축공기 방식 수중발사 시스템의 동특성을 예측하기 위하여 시스템의 수학적 모델을 유도하고 수심에 따른 발사 시뮬레이션을 통하여 발사성능 요구조건을 만족시키는 최적의 방출밸브 개방궤적을 구하였다. 발사수심이 깊어짐에 따라 방출밸브를 더 많이 그리고 더 빠르게 열어주어야 발사성능 요구조건을 만족시킴을 알 수 있었다.

어뢰의 속도와 이동거리에 대한 실측자료와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 서로 큰 오차 없이 유사한 경향성이 있음을 확인하였다.

향후 본 연구에서 구한 최적 개방궤적을 방출밸브

가 충실히 추종하도록 하기 위해서는 방출밸브와 유량제어밸브의 동특성이 고려된 모델을 이용하여 제어기를 설계하고 이 제어기로부터 얻어지는 제어신호를 이용하여 유량제어밸브를 작동함으로써 방출밸브를 조절할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 사용된 것과 다른 발사성능 요구조건이 주어진다면 여기서 구한 방출밸브의 개방궤적도 새로운 요구조건에 맞게 수정되어야 할 것이다.

### 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] "Weapon Tube Design", HDW, 2001, pp.79.
- [4] F. E. Sanville, "A new method of specifying the flow capacity of pneumatic fluid power valves", Second fluid power symposium 4th~7th, 1971, Section D3 pp.37~47.
- [5] 박희용, 김용모, "튜브내 고압가스 유동 및 압력 변화의 동적해석(II)", 국방과학연구소, 1993, pp. 12~14.
- [6] Paul S. Granville, "Elements of the drag of underwater bodies", DTNSRDC Report SPD-672-01, 1976.
- [7] "Pressure Air Expulsion System ES 12/200", Krupp Mak, 1989, pp.2.