압축공기를 이용한 발사체 방출시스템 해석

권용훈† ·김준범*·박원규**·한명철**·안재열***·정찬희***

Analysis of Ejection System of Projectile with Compressed Air

Yong-Hun Kwon† Jun-Bum Kim*, Warn-Gyu Park**, Myung-Chul Han**,
Jae-Yul Ahn***, Chan-Hee Jung***

Abstract

The purpose of the present work is to develop a compressed air discharging system to eject a projectile from the underwater. For the flow analysis of compressed air tank, projectile ejection tube, and pipe system, the air is assumed as an ideal gas, undergoing 1-dimensional axisymmetric, compressible flow, the Fanno flow analysis was applied. The commercial Fluent code was used to solve 3-D Navier-Stokes equation of the internal flow within the valve. The dynamics of the projectile within the ejection tube was assumed 1-degree of freedom. The calculations were performed to four cases of valve opening area ratio, i.e., 25%, 50%, 75%, and 100% opening area, at both depths of 10m and 50m. The results were shown as the figures of time variation of pressure of the compressed air tank and projectile ejection tube. The velocity and distance of the projectile were also predicted.

1. 서 론

고압의 압축공기를 이용한 수중발사 시스템의 발사원리는 압축공기 탱크 내의 압축공기가 방출 밸브를 통하여 발사튜브내로 사출됨에 따라 발사튜브 내에서 공기가 팽창 및 압축되면서 형성된 공기압력에 의하여 발사튜브 내 발사체를 밖으로 이탈시키는 것이다. 본 연구에서는 공기저장탱크로부터 발사튜브에 이르는 복잡한 배관과 방출밸브를 거치는 과정에서 각 유로 요소의 정확한 압력 감소분을 예측하여 발사튜브 내부 공기압을 계산하고 아울러 발사체의 최종 이탈속도 및 가속도를 계산하는 것이다. 그리고 방출밸브 개방면적의 개도율 변화에 따라 발사체의 이탈 속도 및 가속도의 변화를 예측해 보고자 한다.

† 부산대학교 기계공학과 대학원
E-mail : v6490@dreamwiz.com
TEL : (051)510-3064 FAX : (051)512-5236
* 부산대학교 기계공학과 대학원
** 부산대학교 기계공학부
*** 국방과학연구소

2. 방출 시스템의 유동해석

2.1 유동해석의 지배방정식

밸브를 제외한 배관 시스템 내부의 공기 유동은 이상기체, 압축성, 1차원 축대칭 유동으로 가정하여 이상기체 상태방정식, 연속방정식과 에너지방정식으로부터 유동 방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다. 먼저 이상기체 방정식으로부터

$$pV = mRT \qquad (1)$$

여기서 p는 압력, V는 체적, T는 온도를 나타내고 m은 질량, R은 기체상수이다.

공기 저장 탱크에서 유출되는 유량을 계산하기 위해 식(1)을 시간에 대해 미분하고 등엔트로피 관계식을 적용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$V\frac{dp}{dt} = mR\frac{\gamma-1}{\gamma}\frac{T}{p}\frac{dp}{dt} + RT\frac{dm}{dt} \qquad (2)$$

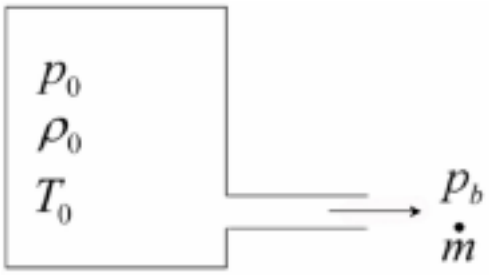


Fig. 1 Air discharge from tank

이 식에서 출구 단면적 변화로 인한 유동의 질식현상 효과를 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{pA_{th}}{\sqrt{T}}\sqrt{\frac{\gamma}{R}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \qquad (3)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\rho A_{th}\left(\frac{p_b}{p}\right)\sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}\right)\frac{p}{\rho}\left[1-\left(\frac{p_b}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \qquad (4)$$

여기서 유출유량은 질식되는 경우 식(3)과 그렇지 않은 경우 식(4)로 구분되며, 질식여부의 조건식은 다음과 같은 조건에 따라 정해진다.

$$p_b \leqq p^* = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} p_0 \qquad (5)$$

여기서 A_{th}는 출구의 단면적을 p_b는 배압을 의미하며, p_0는 공기저장탱크압력을 의미한다. γ는 비열비이다.

다음으로 발사튜브 내부 유동 방정식은 역시 이상기체 상태방정식 식(1)으로부터 다음과 같이 유도되며,

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{V}\left(\gamma R T \dot{m}_{in} - p\gamma\frac{dV}{dt}\right) \qquad (6)$$

여기서 $\dot{m}_{in}$은 발사튜브 유입 유량을 의미한다.

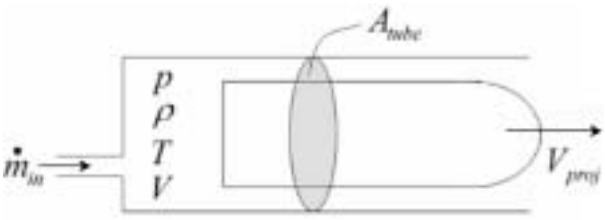


Fig. 2 Inflow of Air to ejection tube

시스템 배관 내의 벽면 마찰 효과를 고려하기 위해 Fanno 유동으로 가정하여 다음의 식으로 해석하였다.

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\gamma M^2[1+(\gamma-1)M^2]}{(1-M^2)}\left[\frac{\tau_W}{\rho V^2}\frac{P}{A}dx\right] \qquad (7)$$

여기서 τ_w, V 그리고 M은 각각 벽면 전단 응력, 유체의 속도와 마하수이다.

방출밸브 내의 유량계수를 얻기 위해서는 방출밸브의 단계별 개도율에 따른 유량 비를 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 해석하였다.

발사체의 운동방정식은 발사튜브 내에 장착되어 있는 발사체가 압축공기에 의하여 추진될 경우 뉴톤 2법칙에 의하여 다음과 같은 식이 구해진다.

$$(m_{proj} + m' + m_w)\frac{d^2x_{proj}}{dt^2} = p_{tube}A_{tube} - F_f - F_D \qquad (8)$$

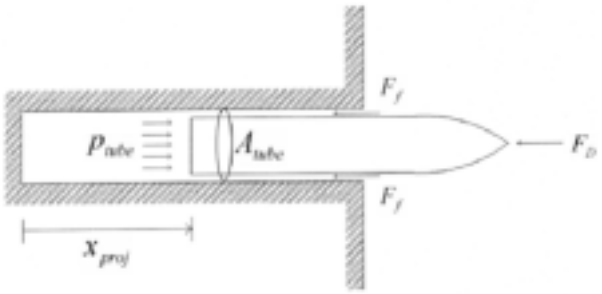


Fig. 3 Force diagram of projectile

여기서 m_{proj}는 발사체의 질량이고 m'은 물체가 물속에서 운동할 때 나타나는 부가질량(added mass)이며 대개 운동하는 물체질량의 10%내지 20%이다. 또한 m_w는 발사튜브와 발사체사이의 공간에 들어있는 물의 질량이다. A_{tube}는 발사튜브의 단면적, p_{tube}는 A_{tube}에 작용하는 압력이고 F_f는 발사튜브와 발사체 사이에 작용하는 접촉마찰력이며 F_D는 발사체의 이동시 나타나는 유체의 항력이다.

Fig. 4는 실제 방출밸브 시스템을 간단히 개략화한 것으로 Opening Pressure의 힘으로 방출밸브가 열림으로써 공기압이 발사튜브로 이동한다.

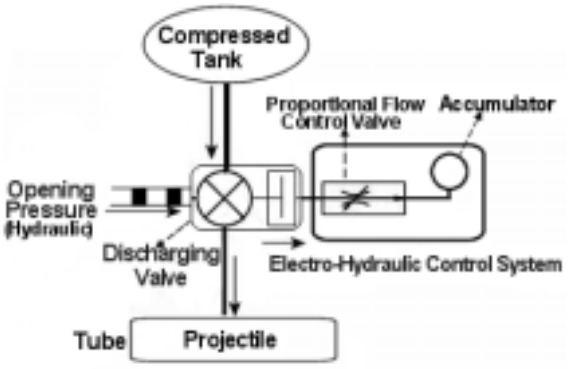


Fig. 4 Schematic diagram

2.2 방출 시스템의 유동해석

수심 10m와 50m에서 방출밸브의 개도율이 전체 개방 스풀변위의 변화에 따른 발사체 운동방정식을 해석하였으며 계산시간은 발사체 후미가 완전히 발사튜브를 이탈하는 시간까지만 계산하였다. 방출밸브 개방패턴은 Fig. 5와 같이 3가지 경우에 대해 발사 시스템을 해석하여 보았다.

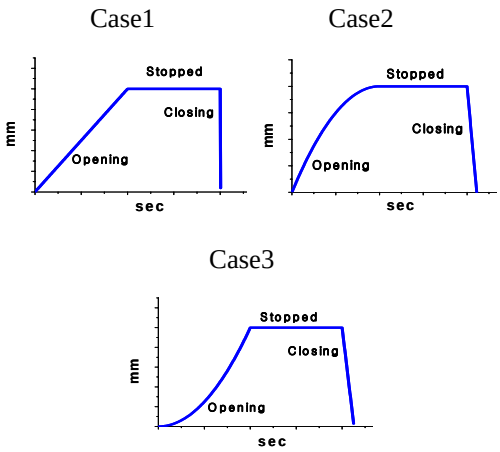


Fig. 5 Pattern of spool displacement

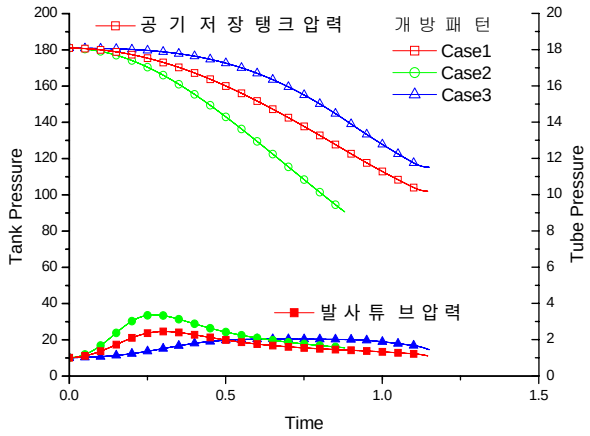


Fig. 6 Pressure change for each case(Depth=10m)

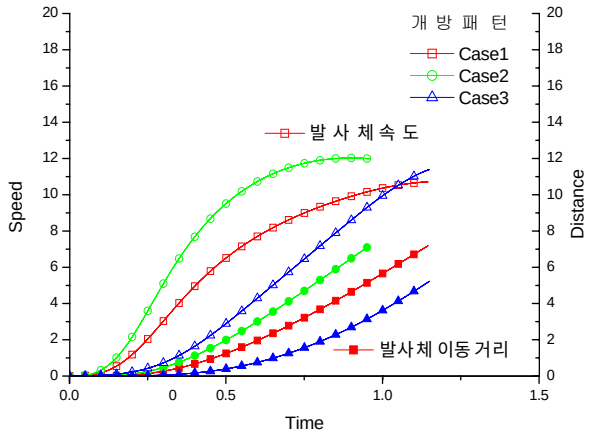


Fig. 7 Speed and distance of projectile for each case(Depth=10m)

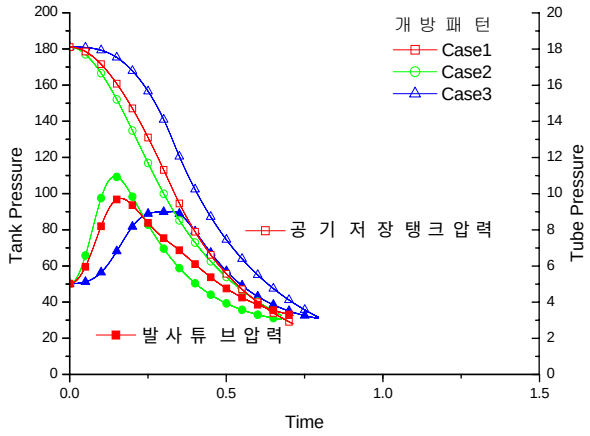


Fig. 8 Pressure change for each case(Depth=50m)

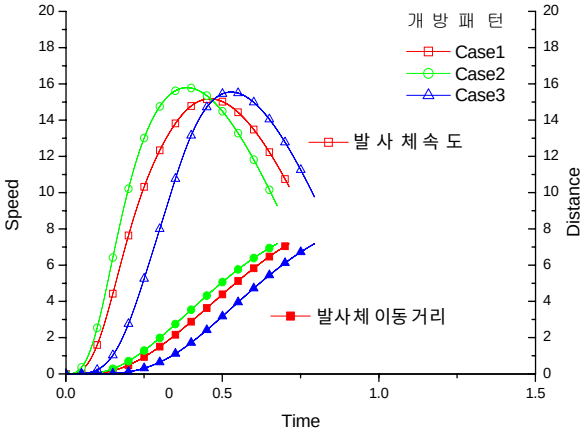


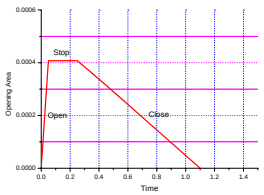
Fig. 9 Speed and distance of projectile for each case(Depth=50m)

Fig. 6~9는 Fig. 5의 방출밸브 개방패턴일 때 발사시스템의 해석결과로써 Case2는 Case 1에 비해 밸브를 빠르게 개방했을 경우로써 공기저장탱크 압력은 급격히 감소하고 발사튜브 압력은 급격히 증가하였다가 감소하며 발사체의 속도와 이동거리는 증가한다. 그러나 Case3일 때는 Case1에 비해 방출밸브를 천천히 열었을 경우로써 공기탱크압력은 서서히 감소하며 발사튜브압력은 서서히 증가하였다가 감소하고 발사체의 속도와 이동거리는 감소하는 경향을 보인다.

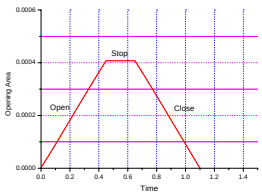
특히, Case1의 개방패턴에서 수심 10m일 때 Fig. 10과 같이 밸브의 개방시간, 정지시간, 닫힘시간을 조정하여 3가지 경우로 압력과 발사체의 속도 및 이동거리를 비교하였다.

Case1-1은 개방시간, 정지시간, 닫힘시간을 각각 0.05, 0.2, 0.85sec로 하였고 Case1-2는 0.45, 0.2, 0.45로 하였으며 Case1-3은 0.85, 0.2, 0.05sec로 하였다.

Case1-1



Case1-2



Case1-3

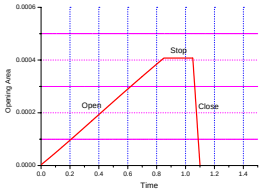


Fig. 10 Time history of opening area(Depth=10m)

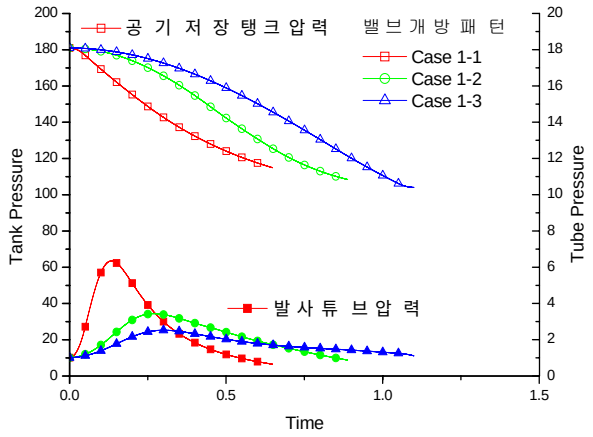


Fig. 11 Pressure change for each case(Depth=10m)

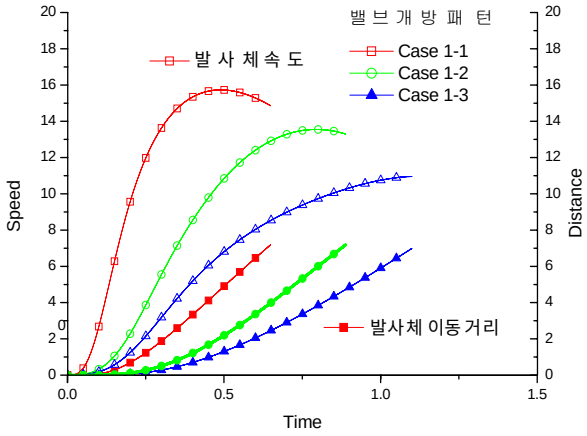


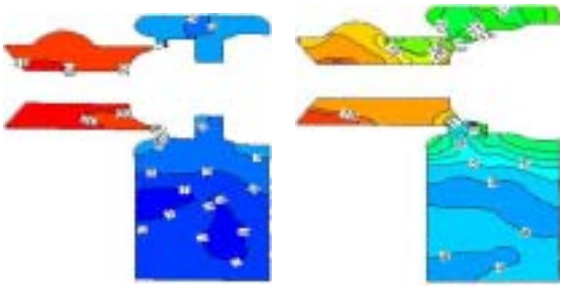
Fig. 12 Speed and distance of projectile for each case(Depth=10m)

Fig. 11.과 Fig. 12는 수심 10m인 경우의 공기저장탱크와 발사튜브의 압력변화와 발사체의 속도변화 및 이동거리를 나타낸 것이다. Case1-1은 개방시간을 짧게 한 경우로써 Case1-2에 비해 공기저장탱크 압력은 빠르게 감소하고 발사튜브압

력이 급격히 튀는 현상이 일어남을 볼 수 있다. 그리고 Case1-3은 Case1-1에 비해 공기저장탱크 압력은 서서히 증가하며 발사튜브압력은 튀는 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

2.2.1 방출밸브 내부 유동해석

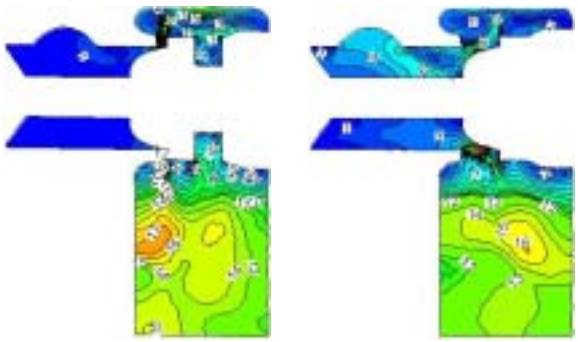
방출밸브 내의 정확한 점성유동을 해석하기 위하여 상용코드인 Fluent를 이용하였으며, 각 계산은 입구의 압력은 공기저장탱크압력이고 출구의 압력은 각각의 수심 정압으로 일정하게 유지하고 있다고 가정하여 해석하였다. 이때 밸브의 개도율이 1/4, 2/4, 3/4, 1(완전개방)일 때의 4가지 경우에 대해 계산을 수행하였다.



(a) 1/4 open (b) Full open

Fig. 16 Pressure contour of ejection valve

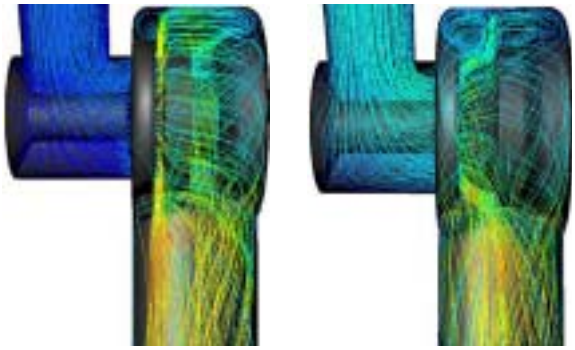
Fig. 16는 각 밸브 개도율 중 1/4, 1(완전개방)에 따른 밸브내부 등압력선 분포를 보여 주고 있는데 Fig, 12에서 알 수 있듯이 밸브 개도율이 증가할수록 밸브 간극을 통한 유량이 증가하게 되어 정체되어 있던 밸브 전방부의 압력이 서서히 감소되어 졌음을 알 수 있다.



(a) 1/4 open (b) Full open

Fig. 17 Mach contour of ejection valve

Fig. 17은 마하수에 대한 것으로 밸브 간극의 곡률이 심한 부분에서 국부적으로 최대 마하수가 1.84 (완전개방경우)까지 증가함을 알 수 있고 대체적으로 모든 개도율에서 하류 배관에서 음속의 속도를 가지고 발사튜브로 유입됨을 알 수 있다.



(a) 1/4 open (b) Full open

Fig. 18 Streamline of ejection valve

Fig. 18은 유선을 나타낸 Fig으로써 모든 개도율에서 전반적으로 비슷한 유동현상을 파악할 수 있고, 상부 유입관으로부터 유입된 공기는 밸브 스풀주위를 감싸면서 일부 와류를 형성하면서 밸브 간극을 통해 유입되고 있으며, 밸브 간극 후미부에서는 매우 강한 와류를 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 개도율이 클수록 유입 유량이 증가하게 됨으로 밸브 간극 후미부의 유동에서 점차 강한 와류가 형성되고 있음을 파악할 수 있다.

3. 결론

고압의 압축공기를 이용한 발사체의 방출시스템을 해석하기 위해 공기유동을 이상기체, 압축성, 1-차원 축대칭 유동으로 가정하여 해석하였다. 발사체의 운동방정식은 1-자유도 운동으로 가정하여 해석하였다.

또한 밸브내의 정확한 유동현상을 파악하기 위해 밸브 내부의 유동해석을 Fluent 상용 코드를 이용하여 Navier-Stokes방정식을 해석하였다.

방출밸브 개방패턴을 3가지로 가정하였고 수심 10m, 50일 때 개방면적 비를 각각 1/4, 2/4, 3/4, 1로 하여 공기저장탱크 압력, 발사튜브 압력을 그리고 발사체의 속도와 이동거리를 비교하였다. 특히, 수심 10m일 때 Case1의 개방패턴을 선택하여 개방시간, 정지시간, 닫힘시간을 조절하여 결과를 비교하였다.

참고문헌

(1) B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, 1995, "Fundamentals of fluid mechanics", John Willey & Sons, Inc. Second Edition

(2) F. E. Sanville, , 1971, "A New Method of Specifying the Flow Capacity of Pneumatic Fluid Power Valves", Guildford, Section D3, Second Fluid Power Symposium 4th~7th,, pp.37~47.

(3) D. McCloy, H.R. Martin, 1980, "Control of Fluid Power: Analysis and Design", John Wiley, New York. .

(4) J.N. Libii, M. Hartenstein, J.D. Torres, 2001, "Experimental determination of the contraction coefficient of a free jet of water", Vol.36 No.2, Physics education,, pp.115-8, .