

오리피스 형상에 따른 발사관 내 부가추력 특성 연구

Analysis of the Thrust Augmentation in the Canister with Baseplate Orifices

윤진영*

Jin-Young Yoon

임범수*

Beom-Soo Lim

Abstract

If the flow of booster gas which is exhausted to the rear part of a canister is properly restricted in the canister of a hot-launch system, the resultant pressure built up in the canister provides additional force to accelerate the missile to a required launch velocity. These thrust augmentation performances can be controlled through the configuration design of baseplate orifices.

In this paper, the simple technique to analyze the thrust augmentation performances of baseplate orifices is suggested and the thrust augmentation characteristics by its various configurations are compared. According to the initial displacement of a missile, the inner pressure of a canister is measured from scaled cold flow tests, and the discharge coefficient of baseplate orifices is calculated. Then the thrust augmentation in a canister is simulated by applying these discharge characteristics to the AMESIM software for launch dynamics.

Keywords : Baseplate Orifices(오리피스형 후방판), Thrust Augmentation(부가추력), Discharge Coefficient(확산계수), Scaled Cold Flow Test(축소 공압시험), AMESIM

1. 서론

추력발사 방식의 유도탄 발사 체계에서 유도탄은 부스터 추력에 의해 발사관을 이탈하고, 유도탄의 발사 화염은 발사관 후방을 통해 외부로 배출된다. 유도탄은 안전상 발사관 내에서 최대한 빨리 이탈되는 것이 바람직하나, 부스터의 크기 제약과 공용화 등으로 인

해 부스터 자체의 초기 추력을 증대하는 것은 한계가 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 발사관 후방에 오리피스가 있는 후방판을 적용하여 유도탄 발사화염의 배출을 일부 차단할 경우, 이로 인해 발사관 내부에 압력이 추가로 생성되어 부스터의 설계 변경 없이 유도탄의 발사 초기 추력 증가가 가능하다.

발사관 내부에 부가되는 추력 특성은 후방판의 오리피스 형상, 크기 및 배열 등에 따라 다르며, 후방판에 3개의 원형 오리피스를 일렬로 적용할 때 부가추력 성능이 가장 효과적인 것으로 나타났다^{1,2)}.

오리피스형 후방판에 의한 발사관 내 부가추력 특성

† 2011년 7월 26일 접수~2011년 11월 4일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 윤진영(yjy0914@add.re.kr)

을 확인하는 방법으로는 유도탄을 발사관에서 실제로 이탈하는 시험을 실시하여 추력결과를 획득하는 것이 가장 정확하나, 시험 준비일정과 비용이 상당히 소요되고 시험장소도 제한적이어서 실제 이탈시험 전에 발사관 내 부가추력 특성을 효과적으로 예측하여 시험횟수를 최소화하기 위한 방법이 필요하다. 또한 발사관 내 유도탄 발사화염의 유동 특성은 전산유체역학을 이용한 수치해석을 통해 비교적 정확한 예측이 가능하나^[3], 오리피스형 후방판의 형상을 설계하기 위해 초기에 검토되어야 할 많은 변수들에 대한 특성을 확인하기 위해서는 상당한 시간이 요구된다.

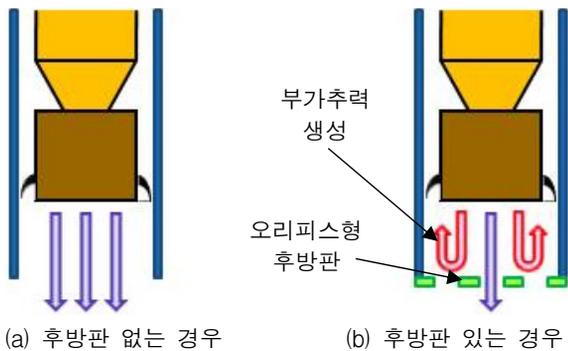


Fig. 1. 오리피스형 후방판에 의한 발사관 내 부가추력 생성 원리

본 논문에서는 압축공기를 이용한 축소 공압시험과 AMESIM^[4] 프로그램을 이용한 발사동력학 해석을 통해 오리피스형 후방판에 의한 발사관 내 부가추력을 간단히 예측하는 방법을 제시하였고, 이 방법을 이용하여 3개의 원형 오리피스 크기와 배열에 따른 발사관 내 부가추력 특성을 비교 분석하였다. 고온/고압의 유도탄 발사화염을 상온의 압축공기로 모사한 축소 공압시험을 통해 발사관 내 유도탄의 이동거리별로 발사관 내부압력을 개별적으로 측정하여 오리피스형 후방판의 확산계수를 계산하고, 축소 공압시험으로부터 획득한 확산계수 특성을 AMESIM 해석 모델에 적용하여 발사관 내 부가추력 특성을 예측하였다.

2. 시험장치 및 해석 모델

가. 축소 공압시험 장치

부스터로부터 배출되는 고온/고압의 유도탄 발사화

염을 상온의 압축공기로 모사하여 축소 공압시험 장치를 설계 제작하였다. 축소 공압시험 장치의 구성 및 회로도도 Fig. 2와 Fig. 3과 같다.

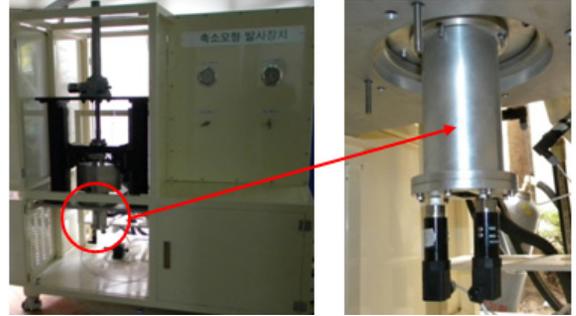


Fig. 2. 축소 공압시험 장치 구성

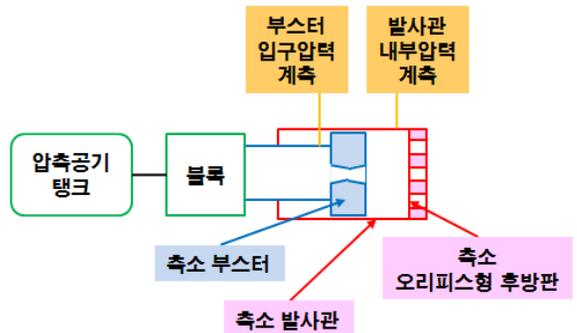


Fig. 3. 축소 공압시험 장치 회로도

축소 공압시험 장치는 실제 모델 대비 1/6로 축소하였고, 실제 모델과 축소 모델 간의 부스터 노즐 입구에서의 레이놀즈수 상사식과 부스터 노즐 목에서 유동이 초크될 때의 질량유량 식으로부터 유도된 식 (1)을 이용하여 축소 모델의 부스터 노즐 입구압력을 설정하였다^[5].

$$\frac{D_m}{D_p} = \frac{\mu_p}{\mu_m} \frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_p} \quad (1)$$

$$= \frac{\mu_p}{\mu_m} \frac{\left[P_{bst} A_n \sqrt{\frac{k}{RT_{bst}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \right]_m}{\left[P_{bst} A_n \sqrt{\frac{k}{RT_{bst}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \right]_p}$$

여기서, 하첨자 p 와 m 은 각각 실제 모델과 축소

모델을 의미하며, D 와 A_n 은 부스터 노즐 목의 직경과 단면적, μ 는 점성계수, \dot{m} 은 질량유량, P_{bst} 와 T_{bst} 는 부스터 노즐 입구의 압력과 온도, k 는 비열비, R 은 기체상수를 의미한다.

또한 실제 모델과 축소 모델 간의 부스터 노즐 출구에서의 마하수 상사와 기하학적 상사를 이용하여 축소 공압시험 장치 구성품의 형상 제원을 설정하였다.

오리피스형 후방관에 의한 발사관 내 부가추력 특성을 예측하기 위한 주요 변수는 부스터 노즐을 통해 발사관 내부로 유입되는 압축공기가 후방관의 오리피스를 통과할 때의 확산계수이다. 확산계수는 이론 질량유량과 실제 질량유량의 비이며, 본 논문에서 이론 질량유량은 축소 공압시험에서 측정된 발사관 내부압력을 식 (2)와 식 (3)에 적용하여 계산하고^[5], 실제 질량유량은 축소 공압시험 중에 압축공기 배출로 인한 압력탱크의 내부압력 변화량을 이용하여 식 (4)로부터 계산하였다.

$$\dot{m}_{theo} = A_{orif} P_{can} \sqrt{\frac{2k}{RT_{can}(k-1)} \left[\left(\frac{P_{atm}}{P_{can}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{atm}}{P_{can}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

for $P_{atm}/P_{can} > 0.528$ (2)

$$\dot{m}_{theo} = A_{orif} P_{can} \sqrt{\frac{k}{RT_{can}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

for $P_{atm}/P_{can} < 0.528$ (3)

$$\dot{m}_{real} = \frac{V_{tank}}{RT_{tank}} \frac{(P_{tanki} - P_{tankf})}{t}$$

(4)

여기서 \dot{m}_{theo} 와 \dot{m}_{real} 은 각각 이론 질량유량과 실제 질량유량을 의미하고, A_{orif} 는 후방관의 오리피스 총 단면적, P_{can} 과 T_{can} 은 발사관 내부의 압력과 온도, P_{atm} 은 대기압, V_{tank} 와 T_{tank} 는 압력탱크의 체적과 내부온도, t 는 시험시간, P_{tanki} 와 P_{tankf} 는 시험 전과 t 초 경과 후의 압력탱크 내부압력을 의미하며, 모든 압력은 절대압력이다.

오리피스형 후방관의 확산계수는 발사관 내에서 유도탄이 이동하면서 유도탄 발사화염과 후방관 오리피스 간의 작용관계에 따라 변동되며 유도탄 발사화염이 후방관 전체면적에 작용하는 위치 이후부터는 일

정한 값으로 수렴하게 된다^[1]. 이러한 유도탄의 발사 거동을 연속적으로 모사하기 위해서는 시험장치가 복잡해지므로, 유도탄 이동거리별로 시험을 각각 실시하도록 축소 공압시험 장치를 구성하였다. 시험위치는 총 9개소를 선정하였고, 후방관 오리피스에 대한 유도탄 발사화염 영향이 큰 유도탄의 초기 위치에서는 간격을 세밀하게 설정하고 이동거리에 따라 간격을 증가하였다.

나. 발사동력학 해석 모델

축소 공압시험으로부터 획득한 오리피스형 후방관의 확산계수 특성을 이용하여 발사관 내 부가추력 성능을 해석하기 위해 발사동력학 해석 프로그램인 AMESIM 소프트웨어를 사용하였고, 해석 모델은 Fig. 4와 같다.

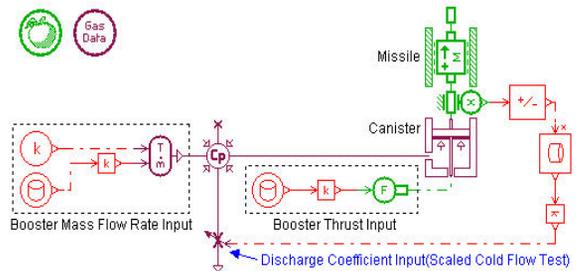


Fig. 4. AMESIM을 이용한 발사동력학 해석 모델

AMESIM은 1차원 해석 프로그램이므로 후방관 오리피스의 3차원 형상을 모사할 수 없으나, 축소 공압시험으로부터 획득한 확산계수 특성이 3차원 형상으로부터 얻은 결과이므로, 이를 AMESIM 해석 모델에 적용하여 AMESIM의 차원 제약을 해결하였다. 해석 모델에서 유도탄과 발사관의 제원, 부스터의 질량유량과 추력은 실제 모델의 값을 그대로 사용하고, 오리피스형 후방관의 확산계수 특성만 축소 공압시험으로부터 얻은 값을 적용하였다.

3. 시험 및 수치해석 결과

본 논문에서는 Fig. 5와 같이 3개의 원형 오리피스를 일렬로 적용한 후방관에 대해 후방관 단면적 대비 오리피스 총 단면적, 중앙과 외곽 오리피스 간의 크기 비율과 거리 등 오리피스의 크기와 배열을 설계변수

로 설정하여 발사관 내 부가추력 특성을 비교 분석하였다. Fig. 5에서 r_{can} 과 r_{center} 는 각각 후방판과 중앙 오리피스의 반경, L_{orif} 는 중앙과 외곽 오리피스 간의 거리를 의미한다.

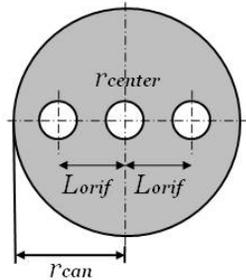


Fig. 5. 오리피스형 후방판 단면 형상

우선 후방판 단면적 대비 오리피스 총 단면적의 비율에 따른 발사관 내 부가추력 성능을 비교 분석하였다. 축소 공압시험을 통해 계산된 유도탄 이동거리별 후방판의 확산계수는 Fig. 6과 같고, Fig. 6의 확산계수를 AMESIM 해석 모델에 적용하여 획득한 유도탄의 발사 가속도를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7에서 A_{can} 은 후방판 단면적을 의미한다. Fig. 6으로부터 확산계수는 유도탄 발사화염이 초기에 후방판의 외곽 오리피스를 만나면서 급격히 증가하고, 유도탄 발사화염이 외곽 오리피스를 포함하는 위치 이후부터는 다시 감소하다가 거의 일정한 값으로 수렴되는 것을 확인하였다. 확산계수의 이러한 특성과 연계되어, 유도탄의 발사 가속도는 Fig. 7에서 알 수 있듯이 유도탄 발사화염이 초기에 후방판에 차단되어 급격히 증가하다가 후방판의 외곽 오리피스를 만나는 시점부터 감소하고, 외곽 오리피스를 포함하면서 발사 가속도가 다시 증가한 후 유도탄이 일정 위치에 도달하면 부스터 추력 대비 발사관 내부체적이 증가하여 발사 가속도는 점차 감소하게 된다. Fig. 7에서 부스터 자체 추력에 의한 유도탄의 발사 가속도는 1g 수준이나, 오리피스형 후방판에 의한 발사관 내 부가추력 생성을 통해 발사 가속도가 10g 이상으로 증가함을 확인하였다. 또한 Fig. 6과 Fig. 7로부터 후방판의 오리피스 총 단면적이 증가하면 유도탄의 초기 위치에서의 확산계수가 증가하여 유도탄의 최대 발사 가속도는 감소하게 되고, 유도탄이 점차 이동하면서 오리피스 총 단면적의 영향은 상대적으로 감소되어 확산계수와 발사 가속도가 유사

하게 나타났다.

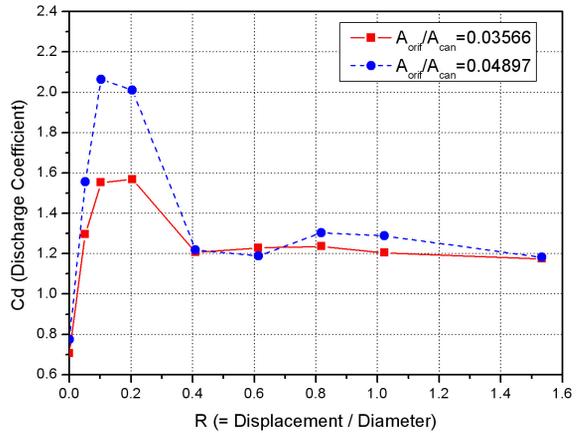


Fig. 6. 후방판 단면적 대비 오리피스 총 단면적의 비율에 따른 확산계수 비교

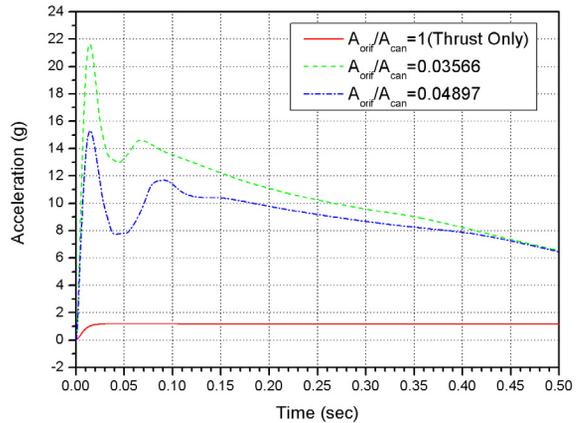


Fig. 7. 후방판 단면적 대비 오리피스 총 단면적의 비율에 따른 발사 가속도 비교

후방판의 오리피스 총 단면적이 동일할 때 중앙과 외곽 오리피스 간의 크기 비율에 따른 후방판의 확산계수와 유도탄의 발사 가속도를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9에서 $A_{canorif}$ 는 후방판의 중앙 오리피스 단면적을 의미한다. Fig. 8과 Fig. 9로부터 오리피스 총 단면적이 동일한 경우 중앙 오리피스의 단면적이 외곽 오리피스에 비해 상대적으로 증가하면 유도탄의 초기 발사 가속도는 상당히 감소되나, 오리피스 총 단면적이 동일하므로 유도탄 발사화염이 후방판의 외곽 오리피스를 포함하는 시점 이후부터는 유도

탄 발사화염에 대한 오리피스 영향이 동일하여 발사 가속도 분포가 유사하게 나타났다.

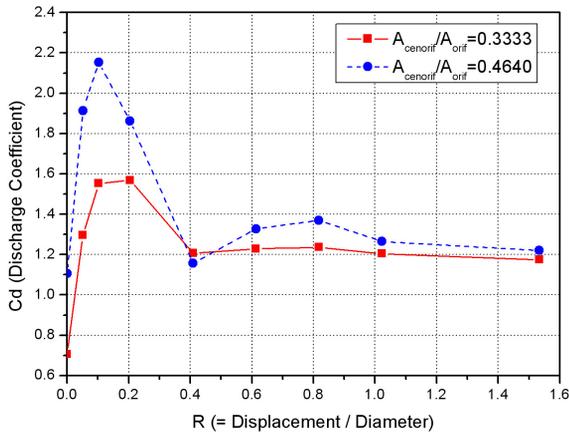


Fig. 8. 오리피스 총 단면적 대비 중앙 오리피스 비율에 따른 확산계수 비교

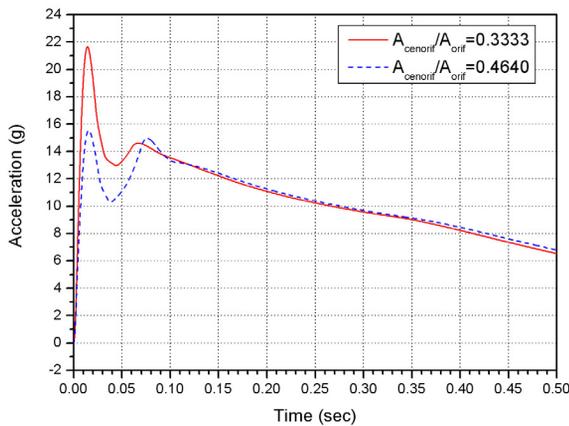


Fig. 9. 오리피스 총 단면적 대비 중앙 오리피스 비율에 따른 발사 가속도 비교

중앙과 외곽 오리피스의 크기가 동일한 후방판에 대해 오리피스 간 거리 비율에 따른 후방판의 확산계수와 유도탄의 발사 가속도를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10과 Fig. 11로부터 중앙과 외곽 오리피스 간 거리가 증가하면 유도탄 발사화염이 외곽 오리피스를 상대적으로 늦은 시점에서 만나게 되어 유도탄의 최대 발사 가속도가 약간 증가하였고, 오리피스 총 단면적과 오리피스 크기가 동일하므로 전체적인 발사 가속도 분포는 유사하게 나타났다.

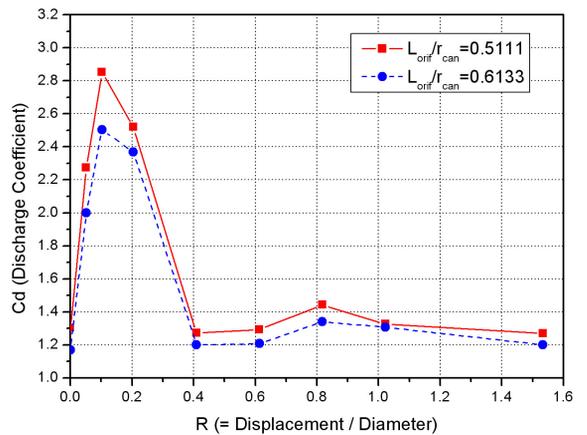


Fig. 10. 후방판 반경 대비 오리피스 간 거리 비율에 따른 확산계수 비교

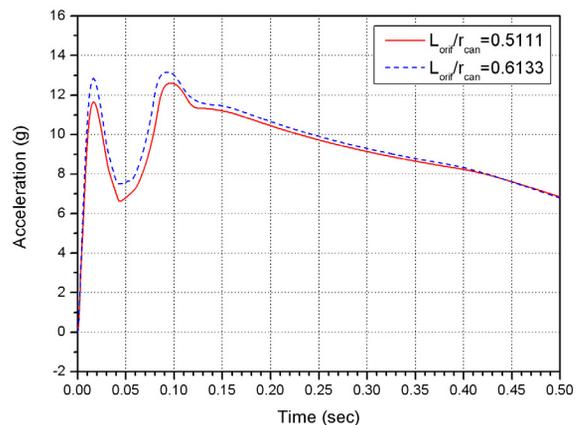


Fig. 11. 후방판 반경 대비 오리피스 간 거리 비율에 따른 발사 가속도 비교

4. 결론

본 논문에서는 축소 공압시험과 AMESIM 해석 프로그램을 이용하여 오리피스형 후방판에 의한 발사관 내 부가추력 특성을 간단히 분석하였고, 3개의 원형 오리피스 크기와 배열에 따라 발사관 내 유도탄의 이동거리별 확산계수 특성이 변화하여, 이로 인해 유도탄의 초기 발사 가속도가 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 따라서 오리피스형 후방판의 적용 및 형상 설계를 통해 요구되는 발사관 내 부가추력을 만족할 수 있으며, 본 논문에서 제시된 방법을 이용하여 오리피스

형 후방판의 다양한 설계변수에 대해 적은 비용과 시간으로 효과적인 부가추력 특성 비교 및 분석이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] North, B. F., Kim, I. K., “Thrust Augmentation for Tomahawk Cruise Missile”, AD A111781, pp. 395~416, 1982.
- [2] Kolodzie, Jr., P. A., Van Winkle, M., “Discharge Coefficients Through Perforated Plates”, AIChE Journal, Vol. 3, No. 3, pp. 305~312, 1959.
- [3] 이진규, 정석영, “보조 바닥판에 의한 발사관 내 유동의 영향 해석”, 제15회 지상무기 학술대회 논문집, pp. 1~5, 2007.
- [4] AMESIM User's Manual, 2004.
- [5] Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, U.S. Dept. of Transportation, and U.S. Environmental Protection Agency, p. B-4, 1989.