

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(6), 488-494(2014)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.6.488>

유도탄 화염이 인접 구조물에 미치는 영향 연구

양영록*

A Study on Impact of an Adjacent Structure by a Rocket Plume

Young-Rok Yang*

Agency for Defense Development(ADD)

ABSTRACT

Rocket Plumes can cause serious damage to launch vehicles and adjacent structures. This paper describes the impact of an adjacent structure by a rocket plume. Each parameter related with dynamic behavior of a missile is modeled with probabilistic distributions of variables. Flyout analyses of initial behavior of a vertically launched missile are performed using Monte-Carlo simulation and flow-motion analyses were conducted by using CFD. In this way, when a missile is fired by a ship, the impact of an adjacent structure by a rocket plume was analyzed.

초 록

유도탄 발사 시 화염은 발사 장치 및 인접 구조물에 심각한 손상을 야기할 수 있다. 본 연구는 유도탄 발사 시 함정과 유도탄의 초기 운동에 의해 유도탄의 화염이 인접 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행하였다. 이를 위해 함정과 유도탄의 초기 운동에 영향을 미치는 각 인자들을 확률분포로 정의하고 Monte Carlo 해석 기법을 이용하여 통계적으로 발생할 수 있는 유도탄 이탈 영역을 분석하였다. 그 후 유도탄의 화염이 인접 구조물에 가장 큰 영향을 미치는 유도탄 이탈 궤적에 대해 CFD기법을 이용하여 유동-운동 해석을 수행하였다. 이와 같은 방법으로 유도탄 발사 시 함정과 유도탄의 초기 운동에 의해 유도탄 화염이 인접 구조물에 미치는 영향을 분석하였다.

Key Words : Rocket Plume(로켓 플룸), Supersonic Impinging Jet(초음속 충돌 제트), Missile Flyout Analysis(유도탄 이탈 해석), Launch System(발사 시스템)

1. 서 론

수직 발사 시스템에서 유도탄이 발사될 때 유도탄은 발사관과의 상대운동을 통해 Fig. 1과 같이 지지 점을 잃으며 각운동량을 발생하게 된다. 이때 함상 환경에서는 함정 운동, 바람에 의한 항력, 추진 기관의 정렬 오차에 의한 영향이 유도탄에 복합적으로 작용하여 초기 자세 및 이탈

영역이 결정된다. 이와 관련하여 지상 및 함상 환경에서 발사 초기의 유도탄 거동을 예측하는 연구[1-4]가 수행되었으며 최근에도 유도탄 발사 초기 안정성 및 신뢰성을 확보하기 위한 연구[5-7]가 수행되고 있다.

유도탄 발사 시 유도탄의 초기 거동과 발사 시스템의 상대운동에 의해 로켓 화염은 Fig. 2와 같이 발사 시스템 및 인접 구조물에 큰 영향을

† Received: January 24, 2014 Accepted: May 29, 2014

* Corresponding author, E-mail : yryang@add.re.kr<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

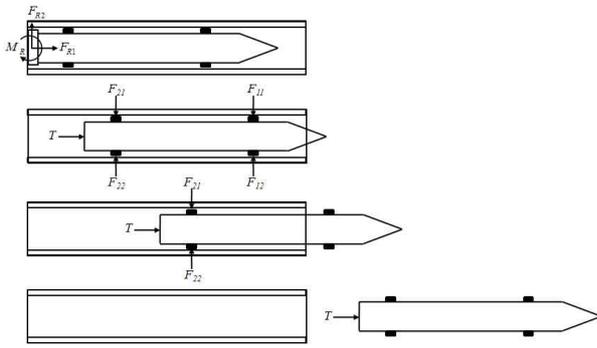


Fig. 1. Stages of missile launch



Fig. 2. Vertical launching system

미친다. 특히, 고온 고압의 로켓 화염이 발사장치 및 인접 구조물에 직접 충돌하게 되면 구조물이 불타거나 녹아 손상을 입을 수도 있다.

따라서 이와 같은 손상을 방지하고 운용성을 보장하기 위하여 유도탄 무기 체계에서 유도탄 화염이 구조물에 미치는 영향에 대한 분석[8-10]을 요구한다. 이러한 분석이 수행되지 않았을 경우 1988년 AH-1F 헬리콥터에서 발생한 사고와 같은 문제가 발생할 수 있다[10]. 이러한 배경 하에 함정에서 운용하는 수직 발사 시스템에 대해 유도탄의 화염이 인접 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 연구가 수행되었다.

II. 본 론

본 연구에서는 발사 초기 유도탄의 거동을 예측하기 위해 함정과 유도탄의 초기 운동에 영향을 미치는 각 인자들을 확률분포로 정의하여 Monte Carlo 해석 기법을 이용하여 통계적으로 발생할 수 있는 유도탄 이탈 영역을 분석하였다. 그 후 유도탄의 화염이 인접 구조물에 가장 큰 영향을 미치는 유도탄 이탈 궤적에 대해 CFD 기법을 이용하여 유동-운동 해석을 수행하여 인접 구조물에 작용하는 최대 압력과 온도를 계산하였다. 이와 같은 방법으로 유도탄 발사 시 함정과 유도탄의 초기 운동에 의해 유도탄 화염이 인접 구조물에 미치는 영향을 분석하였다.

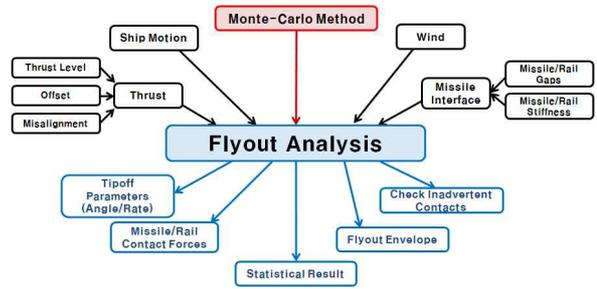


Fig. 3. Monte-Carlo Analysis

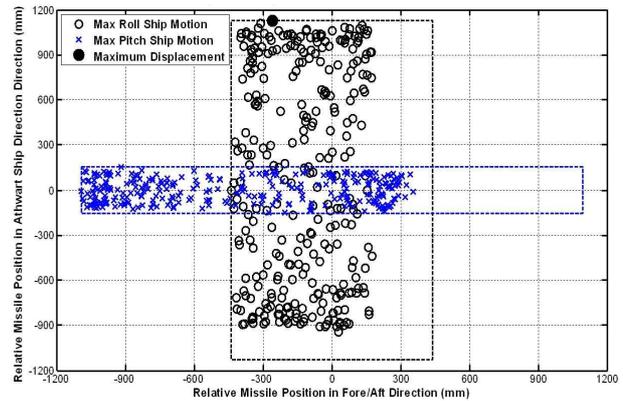


Fig. 4. Flyout envelope

2.1 유도탄 이탈 해석

유도탄 이탈 해석은 동역학 해석 S/W인 Recurdyn V7R5을 이용하였다. 유도탄 이탈 해석 시에는 유도탄 거동에 영향을 미치는 함정 운동, 항력, 추력, 발사관 이탈 시 접촉 요소 등을 확률 분포의 형태로 정의한 후 Fig. 3과 같이 Monte Carlo 해석 기법을 이용하여 통계적으로 발생할 수 있는 유도탄 이탈 영역을 분석하였다. 자세한 해석 방법은 김경태 연구원의 “수상함에서 발사된 수직 발사 유도탄 초기 거동의 통계적 해석” 연구[9]에 나타나있다.

유도탄 이탈 해석 결과 함정 운동이 유도탄과의 상대운동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 함정의 최대 Roll 조건과 최대 Pitch 조건에 대해 유도탄 최대 이탈 해석을 수행하였다. 결과는 Fig. 4와 같고 최대 Roll 조건에서 유도탄의 최대 이탈 영역이 나타났다.

2.2 수치해석

2.2.1 해석 코드 검증

유도탄의 운동을 고려한 유동해석은 유체해석 S/W인 CFD-FASTRAN Ver. 2011[11]을 이용하였다. 초음속 충돌 제트[12-16] 해석 능력을 검증하기 위해 국방과학연구소에서 수행한 연소시험



Fig. 5. Jet impingement test

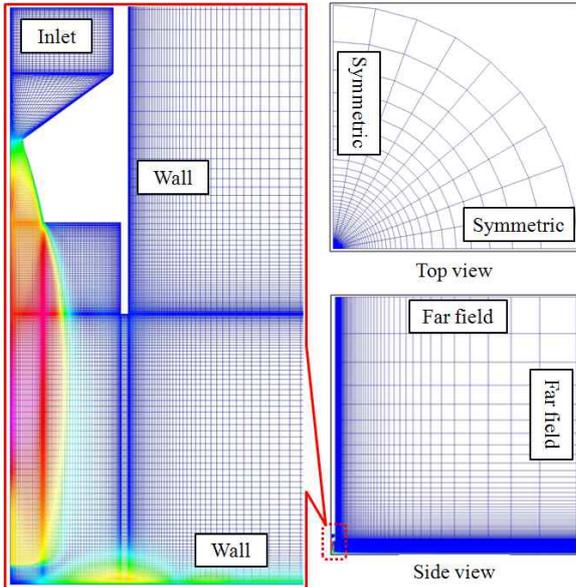


Fig. 6. Grid and boundary condition

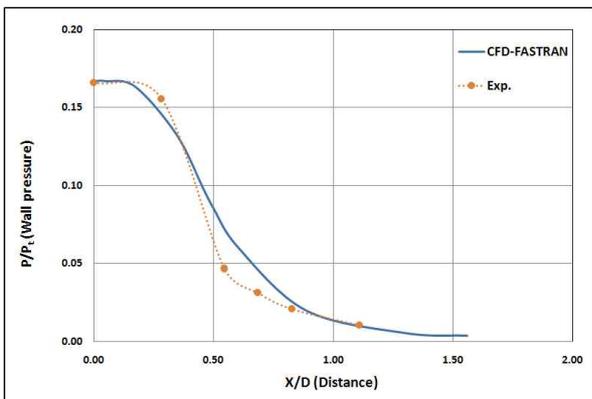


Fig. 7. Comparison of wall pressure distribution

[17]과 동일한 조건에서 유동해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다. Fig. 5는 실물 연소시험을 나타낸 그림이다.

지배 방정식으로 압축성 Navier-Stocks 방정식을 사용하였다. 수치기법으로 Cell 기반 유한 체 적법, 풍상기법인 Van Leer's FVS(Flux Vector Splitting)[18]를 사용하였다. 난류모델은 대수학적

모델인 Baldwin-Lomax 모델을 사용하였다. 점성 모델로는 Sutherland's Law[19]를 사용하였다.

Figure 6은 CFD해석을 위해 생성한 격자와 경계조건을 나타낸 그림이다. 해석 결과 Fig. 7과 같이 시험과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. D는 노즐 출구의 지름, X는 중심에서 부터의 거리, P는 계측 압력, P_i는 연소실의 압력을 나타낸다.

2.2.2 유동-운동 해석

운동 해석을 위해 Chimera 격자기법[20]을 이용하여 비정상상태(unsteady state), 운동체(moving body) 해석을 수행하였다. 수치해석 수행 시에는 내재적(implicit) 시간 전진법을 이용하였고 time step은 CFL 수의 10% 값에 해당하는 값을 이용하였다.

해석 모델은 Fig. 8, 9와 같다. 운동체 및 유동 해석을 위해 Fig. 10과 같이 중첩 격자(overset grid)를 이용하여 유도탄과 함상 상태를 모사하

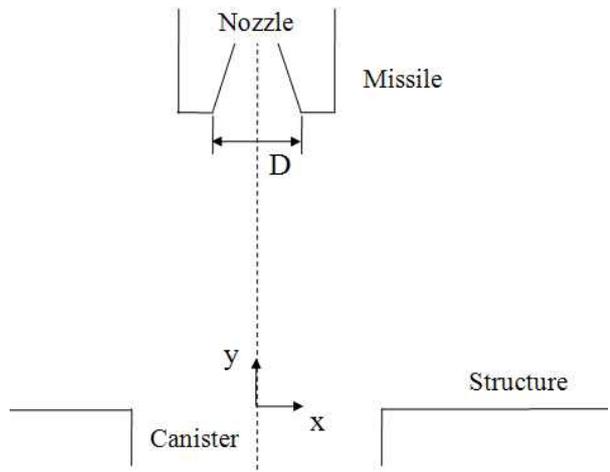


Fig. 8. Computational model

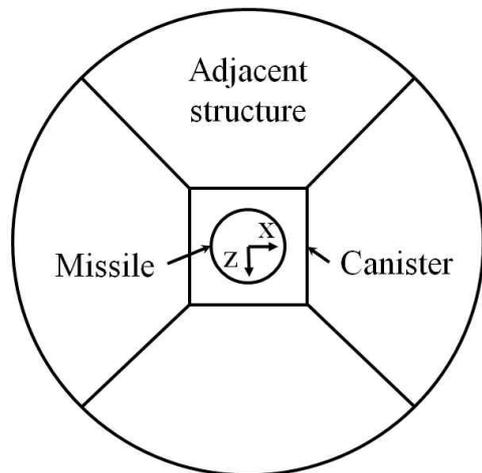


Fig. 9. Adjacent structure

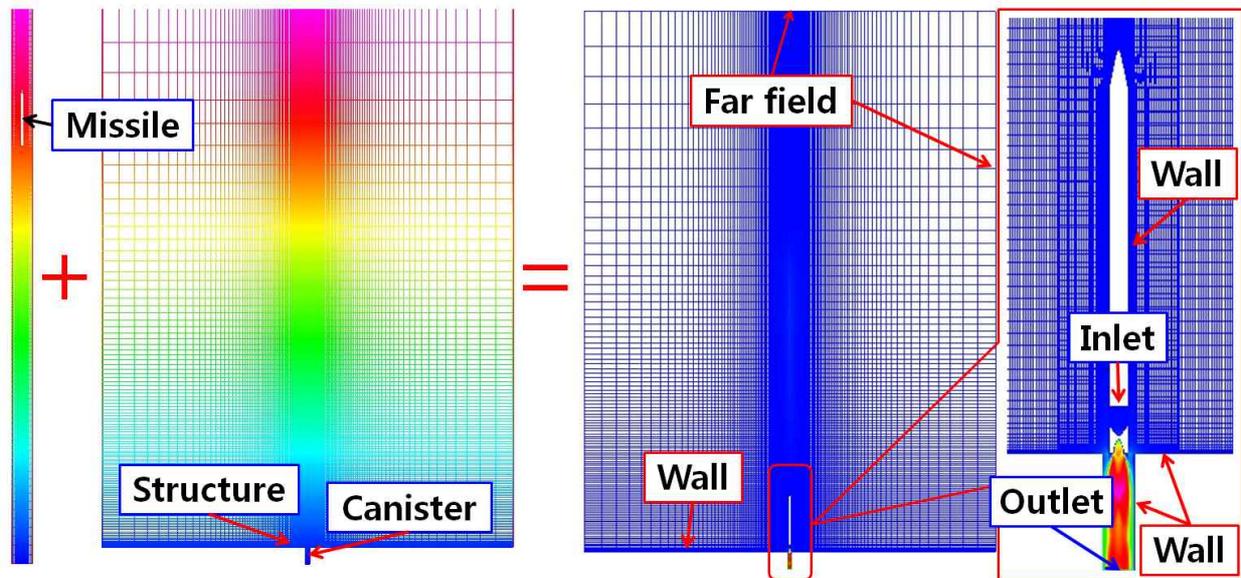


Fig. 10. Computational grid topology

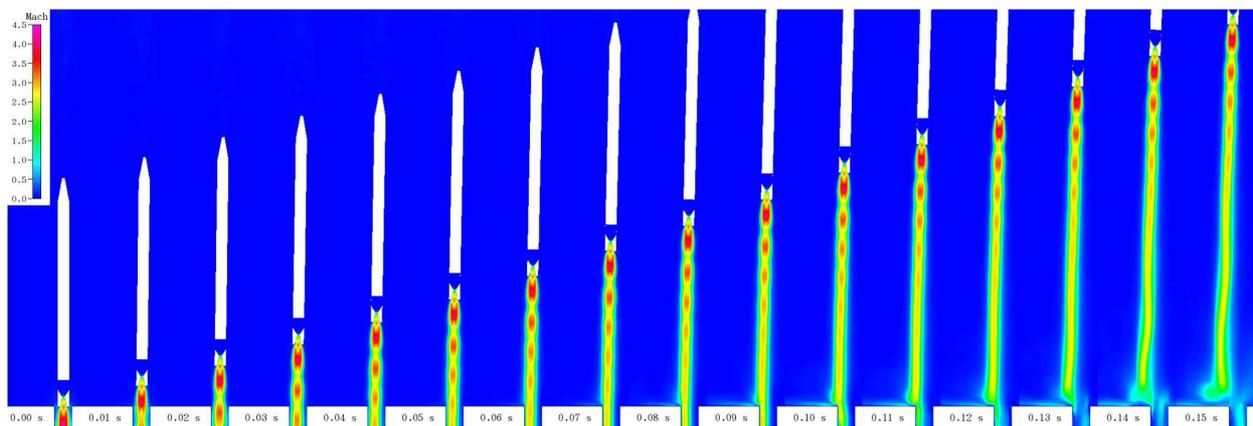


Fig. 11. Mach contour of nominal trajectory

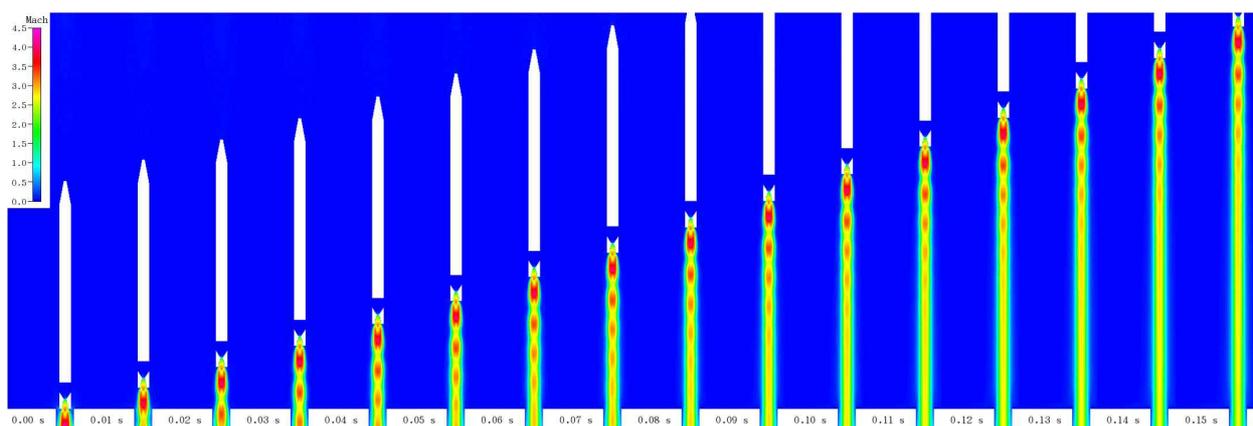


Fig. 12. Mach contour of maximum trajectory

여 3차원 격자를 구성하여 중첩하였다. 유동의 변화가 큰 로켓 모터의 노즐 후방 부와 함정의 벽면에 격자를 집중하였다. 총 격자수는 약 320

만개이며 유도탄이 발사관을 이탈하는 시점을 초기 조건으로 유동-운동 해석을 수행하였다.

경계조건은 Fig. 10과 같으며 연소실 내부의

전압력과 전온도를 이용하여 노즐 유동을 해석하기 위하여 입구(inlet) 조건을 설정하였다. 또한 연소관 내부의 압력이 시간에 따라 변할 수 있도록 입구 조건을 설정하였다. 본 연구에서는 구조물에 작용하는 열 하중 분석이 주요 내용임으로 구조물로 전달되는 열전달은 고려하지 않았다. 따라서 벽면(wall) 조건은 단열조건으로 설정하였다. Far field 조건은 대기조건으로 설정하였다.

유도탄 이탈 해석을 통해 예측된 유도탄 최대 이탈 궤적과 외란이 없는 상태의 공칭 이탈 궤적에 대해 유동-운동 해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

2.3 해석 결과 분석

유도탄 이탈 궤적에 따른 유동-운동 해석 결과는 Fig. 11, 12와 같다. Fig. 11은 공칭 이탈 궤적에 대한 해석 결과로 이탈 시간에 따른 마하수 분포를 나타낸 그림이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 대부분의 유도탄 후류가 발사관을 통해 배출되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 12는 최대 이탈 궤적에 대한 해석 결과로 이탈 시간에 따른 마하수 분포를 나타낸 그림이다. 함정과 유도탄의 운동에 의해 유도탄 후류가 인접 구조물에 직

접 충돌하여 인접 구조물에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

이탈 시간에 따라 인접 구조물에 작용하는 평균 압력과 온도는 Fig. 13, 14와 같이 나타났다. 이때 평균 압력과 온도는 Fig. 9에 나타나있는 인접 구조물에 작용하는 압력과 온도의 평균을 의미한다. 공칭 이탈 궤적에서는 대부분의 유도탄 후류가 발사관을 통해 배출되어 인접 구조물에 작용하는 평균 압력이 1.1 bar 이하로 나타났다. 반면, 최대 이탈 궤적에서는 유도탄의 후류가 인접 구조물에 충돌하여 급격한 압력 상승을 보였다. 인접 구조물에 유도탄의 화염이 가장 큰 영향을 미치는 시간은 유도탄이 발사관을 이탈한 후 약 0.12 초 후이며 최대 평균 압력은 1.6 bar 이다. 이때의 압력 분포는 Fig. 15와 같고 유도탄 후류가 직접 충돌하는 곳에 압력이 집중되었으며 최대 압력은 약 6.0 bar로 나타났다. 인접 구조물에 작용하는 온도는 발사관 중심으로부터 거리에 따라 Fig. 16과 같이 나타났다. 공칭 이탈 궤적 인접 구조물에 작용하는 평균온도는 약 370 K이며 최대 온도 약 430 K로 나타났다. 반면, 최대 이탈 궤적에서는 유도탄의 후류가 인접 구조물에 충돌하여 Fig. 17과 같이 최대 온도가 약 2240 K

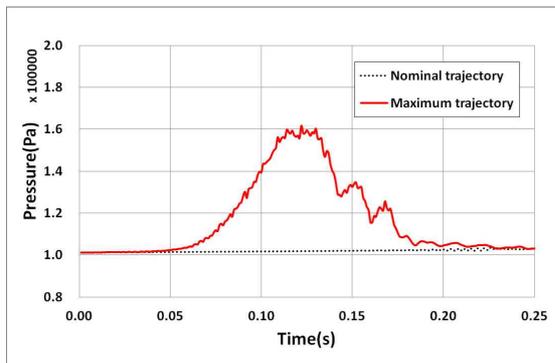


Fig. 13. Comparison of average pressure

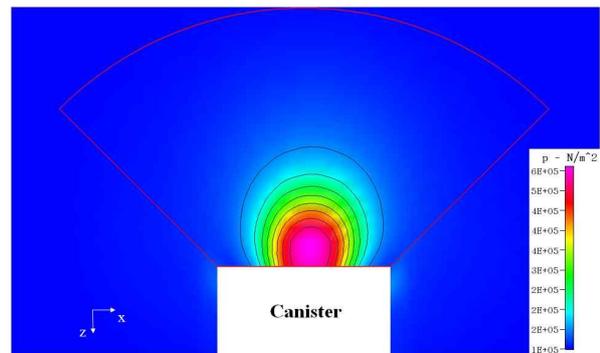


Fig. 15. Pressure contour at 0.12 s

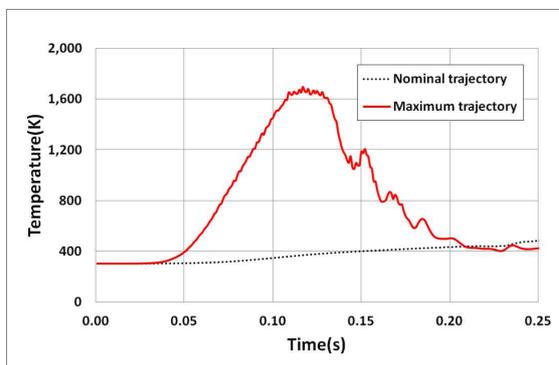


Fig. 14. Comparison of average temperature

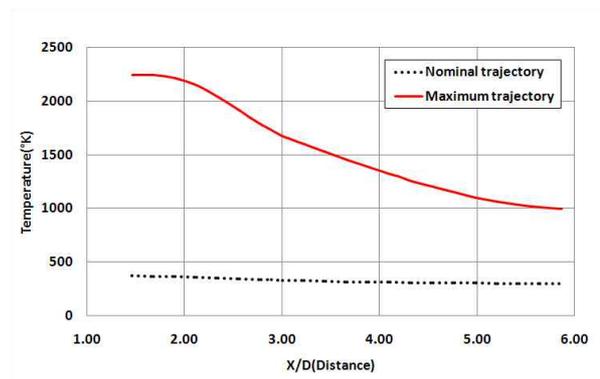


Fig. 16. Comparison of average temperature

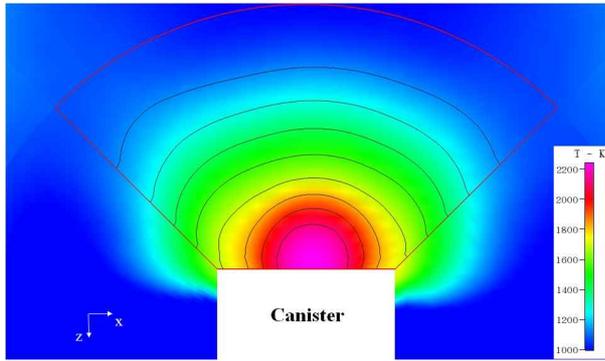


Fig. 17. Temperature contour at 0.12 s

로 나타났고 평균 온도는 약 1650 K로 상승하였다.

III. 결 론

유도탄 발사 시 함정과 유도탄의 운동에 의해 화염이 인접 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구가 수행되었다. 이를 위해 함정과 유도탄의 초기 운동에 영향을 미치는 각 인자들을 확률 분포로 정의하고 Monte Carlo 해석 기법을 이용하여 통계적으로 발생할 수 있는 유도탄 이탈 영역을 분석하였다. 그 후 유도탄의 화염이 인접 구조물에 가장 큰 영향을 미치는 유도탄 최대 이탈 궤적에 대해 CFD기법을 이용하여 유동-운동 해석을 수행하여 공칭 이탈 궤적에서의 유동해석 결과와 비교하였다.

해석 결과 공칭 이탈 궤적에서는 대부분의 유도탄 화염이 발사관을 통해 배출되어 평균 온도는 약 70 K 상승하였고 평균 압력은 약 0.1 bar 상승한 것을 확인할 수 있었다. 반면, 최대 이탈 궤적에서는 유도탄의 화염이 인접 구조물에 충돌하게 되고 이로 인해 평균 온도는 약 1350 K 상승하였고 평균 압력은 0.6 bar 상승하는 것으로 나타났다. 또한 인접구조물에 작용하는 최대 온도는 약 2240 K, 최대 압력은 약 6 bar로 작용하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 유도탄 발사 시 함정과 유도탄의 초기 운동에 의해 유도탄 화염이 인접 구조물에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있었다.

References

1) Peizhen, L., "Dynamic simulation of rocket launch system based on virtual

prototype technology," *Mechanic Automation and Control Engineering*, 2011 Second International Conference, 2011, pp. 203-211.

2) Ahn, J. S. and Lim, B. S., "Flexible Multibody Dynamic Analysis of Missile Behavior for initial Launching," *ADAMS User Conference*, 2001.

3) Cungui, Y., Dawei, M. and Xuefeng, Z., "Launch Process Simulation of a Ship-borne Multiple Launch Rocket System," *World Journal of Modelling and Simulation*, Vol. 3, No. 1, 2007, pp. 58-65.

4) Chae, A., Bae, D. and Jeon, H., "A Development of Numerical Analysis Software on Dynamic Analysis for Launching System," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 32, No. 12, 2008, pp. 1146~1152.

5) Kim, K., "Statistical Analysis of Initial Behavior of a Vertically-Launched Missile from Surface Ship," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 9, 2012, pp. 889-895.

6) Ahn, J. S. and Lim, B. S., "Study on Initial Behavior of a Vertically-Launched Missile from Ship," *The Korea Institute of Military Science and Technology Conference*, 2006.

7) Ahn, J. S., "Missile Flyout Launch Dynamic Analysis Including Ship," *The Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 5, No. 2, 2002, pp. 37-49.

8) Dennis, C. W. and Sutton, P., "Assessing Rocket Plume Damage to Launch Vehicles," *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.

9) Yanli, M., Yi, J., Jiguang, H. and Feng, Y., "Simulation of the Influence of Missile Exhaust Plume to the Launching Equipment," *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Vol. 3, 2010.

10) Hawley, E., "Mk 66 Rocket Motor/Helicopter Compatibility Program," *National Defense Industry Association 38th Annual gun, ammunition and missile symposia*, 2003.

11) ESI CFD, Inc., *CFD-FASTAN User's Manual-Version 2011*, Cummings Research

Park, 2011, pp. 97-125.

12) Inman, J. A., Danehy, P. M., Nowak, R. J. and Alderfer, D. W., "The Effect of Impingement on Transitional Behavior in Underexpanded Jets," 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2009.

13) Lee, K. S., Lee, J. G., Hong, S. K. and Ahan, C. S., "Numerical Simulations of the Supersonic Jet Impingement in a Confined Plenum of Vertical Launching System," Korea Society for Computational Fluids Engineering Parallel CFD, 2006, pp. 301-305.

14) Lee, H. C. and Klopfer, G., "OVERFLOW Validation for Predicting Plume Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets onto Angled Flat Plates," 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011.

15) McIlroy, K. and Fujii, M., "Computational Analysis of Supersonic Under-expanded Jets Impinging on an Inclined Flat Plate - Part I,"

37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2007.

16) Lee, K. S. and Hong, S. K., "Supersonic Jet Impingement Navier-Stokes Computations for Vertical Launching System Design Applications," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 41, No. 5, 2004, pp. 735-744.

17) Ahn, J. S. and Lim, B. S., "Development of Ablative Material for Gas Management System of Shipboard Vertical Launcher," Agency for Defense Development, MADC-516-020651, 2001, pp. 71-93.

18) Van Leer, B., Flux-Vector Splitting for the Euler Equation, Springer Berlin Heidelberg, 1997, pp. 80-89.

19) Sutherland, W., "The Viscosity of Gases and Molecular Force," Philosophical Magazine, S. 5, V. 36, 1893, pp. 507-531.

20) Steger, J. L., Dougherty, F. C., and Benek, J. A., "A Chimera Grid Scheme," Advances in Grid Generation, ASME Fluids Engineering Conference, 1983.