

핀틀이 적용된 고온 가스 밸브의 비정상상태 해석 기법에 관한 연구

이경욱^a · 허선욱^b · 권세진^b · 이종광^{a,*}

Study on Transient Analysis of Hot Gas Valve with Pintle

Kyungwook Lee^a · Seonuk Heo^b · Sejin Kwon^b · Jongkwang Lee^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Korea

^bDepartment of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea

*Corresponding author. E-mail: jongkwang@hanbat.ac.kr

ABSTRACT

A numerical simulation was conducted to establish the analysis methods of the unsteady conjugated heat transfer with a hot gas valve. Two methods are proposed to reduce the computational cost and analysis time of the unsteady conjugate heat transfer; namely, the multi-section analysis method and the one-way analysis method. The multi-section analysis method exhibits relatively high reliability. In the one-way analysis method, the unsteady conjugate heat transfer from the fluid domain to the solid domain was simulated from the analysis results of the steady-state flowfield. The incipient accuracy of the analysis results obtained by the one-way analysis method was slightly lower than that of the results obtained by the multi-section analysis method. However, the discrepancy became smaller with time, as the analysis progressed.

초 록

고온밸브의 비정상상태 복합열전달 해석 기법을 확립하기 위한 연구를 수행하였다. 장시간 작동하는 고온밸브의 특성과 해석의 경제성을 고려하여 두 가지 해석 기법을 제시하였다. 발달순서에 따라 구간을 나누고 구간별로 시간간격을 증가시켜 해석을 수행하는 다 구간 해석 기법과 정상상태 유동장 해석결과를 비정상상태 해석의 초기 값으로 사용하는 one-way 해석 기법을 제시 하였다. 다 구간 해석 기법의 경우 신뢰도가 높은 해석이 수행 가능하지만 경제적인 측면에서 설계 단계의 해석 기법으로는 부적합하였다. one-way 해석 기법의 경우 초기 신뢰도는 떨어지나 기민한 설계 변수 연구가 가능한 경제적인 해석 수행이 가능하였다.

Key Words: Pintle(핀틀), Hot Gas Valve(고온밸브), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

곳에서 고체추진 또는 액체추진 가스발생기가 사용되며 생성된 2000℃ 이상의 고온가스를 제어하기 위해 고온밸브가 많이 사용되고 있다. 고온밸브가 적용되는 분야는 덕티드 로켓, 유도무기, 추력기, 에어터보 로켓(ATR, Air Turbo Rocket), 전투기 비상탈출좌석의 자세제어장치, 우주발사체 및 우주귀환 캡슐의 자세제어 장치 등이 있다. 이 중 고온 가스 밸브가 많이 사용되는 대표적인 분야는 유도무기이다. 특히 고고도에서 사용되는 유도무기는 공기가 희박한 대기권 또는 외기권에서 작동하여 공력을 이용한 궤도 수정이 어렵고, 궤도전이 및 자세제어에 큰 추력 발생 장치가 요구되며 이 같은 요구사항으로 개발된 것이 DACS (Divert and Attitude Control System)이다.

Fig. 1은 DACS가 적용된 Raytheon사의 외기권 직격 요격체이다[1]. DACS의 경우 고온가스 밸브의 일종인 핀틀을 사용하여 노즐 목 면적을 변화시키며 추력을 정밀하게 조절한다. 이와 관련된 국내 연구는 핀틀의 형상에 따른 추력특성에 관한 연구[2-4], 핀틀의 보어 유무에 따른 수치 해석적 연구[5], 핀틀 노즐 고체추진기관의 연소시험 성능 분석[6], 삭마 특성에 관한 연구[7] 등이 진행 되었다. 하지만 기존의 연구에서는 주로 정상상태에서 냉 가스로 해석이 진행되어 열전달 측면에서 부품에 미치는 영향에 관한 연구결과가 부족하였다.

이 연구에서는 선행연구[8]에서 수행한 정상상태 해석기법에 관한 연구를 기반으로 가혹한 조건에서 장시간 작동하는 고온 가스밸브의 온도 특성을 확인하기 위해 비정상상태 해석 기법을 제시하려 한다.

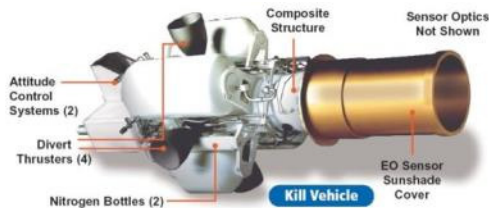


Fig. 1 Raytheon EKV (Exoatmospheric Kill Vehicle)[1].

2. 해석모델 및 계산조건

2.1 고온 밸브 설계

해석에 사용될 고온밸브는 기존 문헌을 토대로 작동 압력 128 atm에서 4,000 N의 추력을 발생시키도록 설계하였다[9]. Fig. 2는 설계된 노즐을 나타내며, 이 형상에 대하여 해석을 수행하였다. 고압 조건에서 2000℃이상의 작동 유체에 노출되는 밸브의 상황을 고려하였다. 밸브의 재료는 레늄과 C/SiC로 설정하였다. 레늄은 2200℃에서 약 50 MPa 정도의 인장강도를 갖는 소재이며 C/SiC 내열 복합재는 이에 상응 하는 소재이다[10].

2.2 계산영역 및 해석조건

선행연구[8]에서 외부 대기영역이 해석에 영향을 미치지 않음을 확인하였기 때문에 계산영역은 대기 영역이 존재하지 않는 고온밸브 영역으로 선정하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 밸브부의 격자로서 96,000개의 격자가 사용되었다.

고온 밸브의 비정상상태 열/유동 해석을 위하여 검증된 상용 프로그램 Fluent를 사용하였다.

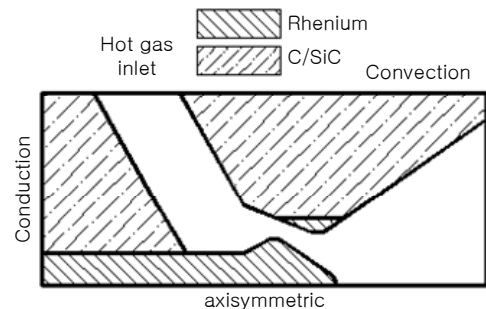


Fig. 2 Schematic of hot gas valve.

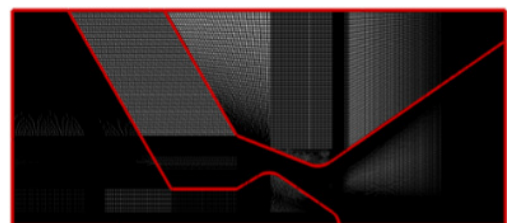


Fig. 3 Hot gas valve grid.

고온 가스 유입부에 압력 입구조건을 적용하였고, 외부 대기 영역에 대기조건과 압력 출구조건을 적용하였다. 입구 작동 조건으로 고체추진제 연소가스의 온도는 2500 K, 압력의 상승은 100 ms에서 128 atm으로 도달하는 조건을 적용하였다. 대기영역의 조건은 고도 20 km에서의 조건을 적용하여 온도는 216 K, 압력은 0.054 atm으로 설정하였다. 난류모델은 선행연구[8] 결과를 바탕으로 S-A 난류모델을 사용하였다. 비정상상태 해석은 고온밸브가 가혹 조건에서 작동하는 것을 가정하여 10초 동안 수행되었다.

2.3 해석 방법

내부유동이 초음속이고 압력의 상승이 매우 빠른 고온밸브의 비정상상태 해석에 있어 시간간격의 설정은 중요한 문제이다. 이 연구에서는 10 μs를 초과하여 시간간격을 설정할 경우 매우 빠른 유체에 속도로 인해 해석이 발산하는 것을 확인하여, 최종적으로 초기 해석 시간간격을 10 μs로 설정하였다. 하지만 시간간격을 10 μs로 설정하고 작동 시간 10초를 계산하기 위해서는 CPU 2.8 GHz(Intel E5-2680) 2개, memory 160 GB 로도 약 200 일의 CPU time이 소요될 것으로 판단되어 실용적인 해석이 불가능함을 확인하였다.

따라서 이 연구에서는 장시간 작동하는 고온밸브의 특성과 해석의 경제성을 고려하여 다 구간 해석 기법과 one-way 해석 기법을 적용하여 해석 기법간의 차이를 비교하였다.

다 구간 해석 기법의 경우 비정상상태 해석을 수행하기 위하여 발달순서에 따라 구간을 나누고 구간별로 시간간격을 증가시켜 해석을 수행하였다. Table 1과 같이 발달순서에 따라 유동장 발달구간, 압력상승 종료구간, 유동영역 온도장 발달구간, 고체영역 온도장 발달구간으로 구간을 나누었고 구간별로 특정지점에서의 마하수, 압력, 온도 등의 변화가 크지 않을 경우 구간변경 및 시간간격을 증가시켜 해석을 수행하였다. 이때 시간간격은 계산이 발산하지 않는 범위에서 10 배씩 증가시켜 수행하였다. 구간변경의 기준은 정량적 결과 값이 정상상태와 5% 이내의 차

Table 1. Analysis sections.

Section number	Analysis section	Time step size
Section 1	Flow field development	10 μs
Section 2	Pressure rise termination	100 μs
Section 3	Temperature development in flow area	1 ms
Section 4	Temperature development in solid area	10 ms

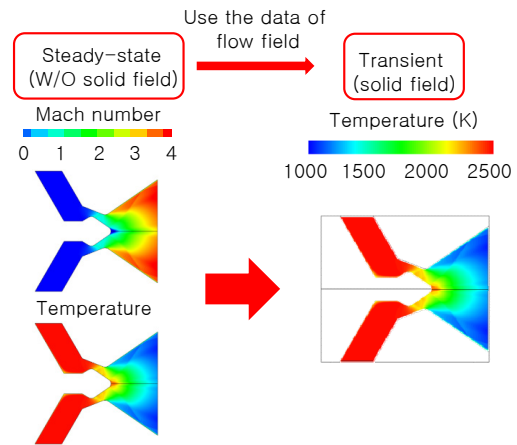


Fig. 4 Principle of one-way method.

이를 가질 때로 선정하였다.

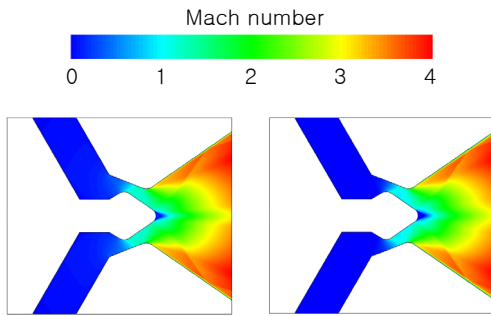
고도 20 km에서 작동하는 고온밸브는 높은 압력비로 인해 유체의 유동장이 매우 빠르게 발달되고 이러한 특성 때문에 유동영역의 발달과 고체 영역의 온도 상승에 소요되는 시간의 스케일이 100 배 이상의 차이를 가지게 된다. One-way 해석 기법은 이 같은 물리적 현상을 고려하여 도입되었다. 이 해석 기법은 정상상태로 유동장 해석을 수행한 후 유동장의 해석결과를 비정상상태 해석의 초기 값으로 사용하는 해석 기법으로 Fig. 4에 one-way 해석 기법을 나타내었다.

3. 수치 해석 결과

3.1 다 구간 해석 기법

다 구간 해석 기법의 1구간은 유동장 발달 구간이다. 이 구간에서는 10 μ s의 시간간격으로 10 ms까지 해석이 수행되었다. Fig. 5는 정상상태와 비정상상태의 마하수 분포를 비교한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 유동장은 10 ms에서 정상상태와 비교하였을 때 유의미한 차이가 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 고온 밸브 중심부의 마하수를 정량적으로 나타낸 그래프이다. 핀틀 끝단에서 밸브출구까지의 거리는 무차원화 하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 해석시간 10 ms에서 해석결과간의 유의차가 존재하지 않았다.



(a) Steady-state (b) Transient-state
Fig. 5 Comparison of Mach number contours.

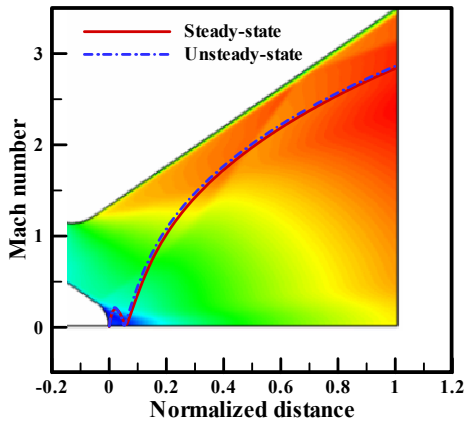
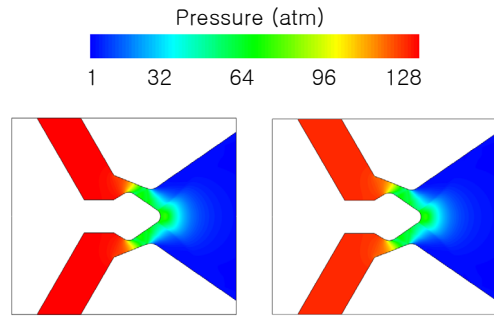


Fig. 6 Comparison of Mach number as function of length at axis line.

따라서 시간간격을 100 μ s로 증가시켜 압력의 상승이 종료되는 2구간 해석을 진행하였다. Fig. 7은 압력의 상승이 종료되는 시점인 100 ms에서의 압력 분포이다.

Fig. 8은 밸브 중심부의 압력을 나타낸 그래프이다. Fig. 7, 8에서 압력의 상승이 종료되는 시점인 100 ms에서 고온 밸브 유동부의 압력은 정상상태와 유의미한 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 2구간 해석을 종료한 후 시간간격을 1 ms로 증가시켜 3구간 해석을 수행하였다.

해석의 세 번째 구간은 유동영역의 온도장이 발달하는 구간이다. 고온 밸브의 소재는 낮은 열전도와 높은 비열[8]로 인해 유동영역의 온도발달이 고체영역보다 빠르기 때문에 이 구간을 3



(a) Steady-state (b) Transient-state
Fig. 7 Comparison of pressure contours.

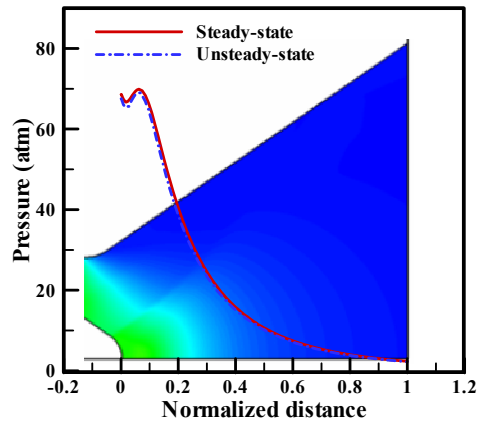


Fig. 8 Comparison of pressure as function of length at axis line.

구간으로 선정하였다. 이 구간에서 비정상상태 해석은 100 ms부터 5.5 sec까지 수행되었다. Fig. 9는 해석 종료시점인 5.5 sec에서의 유동영역 온도분포이다. 그림에서 유동영역의 온도 분포가 정상상태와 차이를 가짐을 확인 할 수 있듯이 비정상상태 해석 결과와 차이가 존재하였다. 하지만 앞선 두 구간의 결과와 마찬가지로 전반적인 관점에서 5% 이내의 정량적 차이가 존재하므로 시간간격을 10 ms로 증가시켜 마지막 구간인 고체영역의 온도발달 구간 해석을 진행하였다.

마지막 해석 구간은 5.5 sec부터 고온밸브의 작동시간인 10 sec까지 수행되었다. Fig. 11은 고온밸브의 작동시간 10 sec에서의 온도분포를 비

교한 것이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 유동영역의 온도장은 정상상태에 도달하였으나 고체영역의 온도장은 정상상태에 도달하지 못한 것을 확인 할 수 있다. 해석 종료 시점에서 정상상태와 비정상상태의 정량적인 결과를 비교하기 위해 핀틀 중심부의 온도를 Fig. 12에 나타내었다. 핀틀 중심부의 거리는 무차원화 하였다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 핀틀 선단에서의 온도는 정상상태와 유의차가 없으나 끝단에서 멀어질수록 유의차가 발생하였고 그 차이는 최대 7%가 존재하였다. 이러한 결과는 고온밸브의 최종 작동시간인 10 sec에서도 고체영역으로의 열 전달이 진행 중인 것을 보여준다. 다 구간 해석 기법을 적용하여 비정상상태 해석을 수행할 경

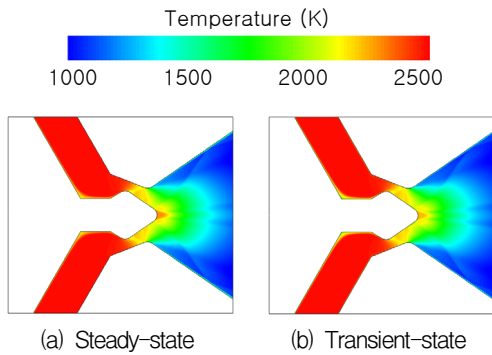


Fig. 9 Comparison of temperature contours in flow field.

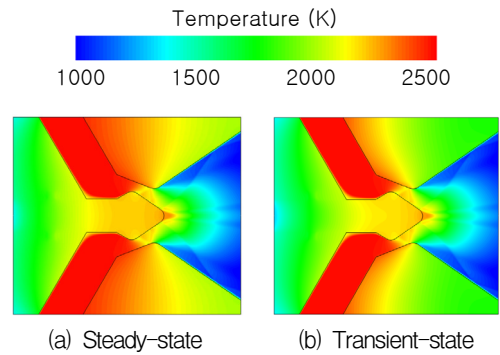


Fig. 11 Comparison of temperature contours in solid field.

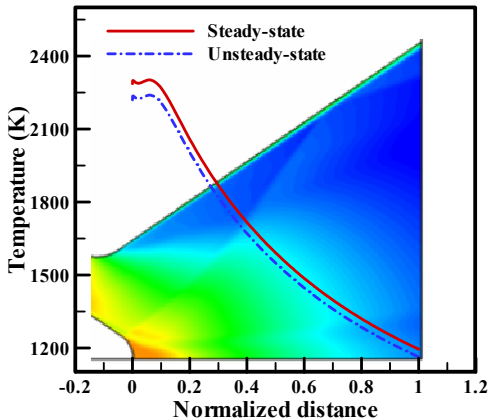


Fig. 10 Comparison of temperature in flow field as function of length at axis line.

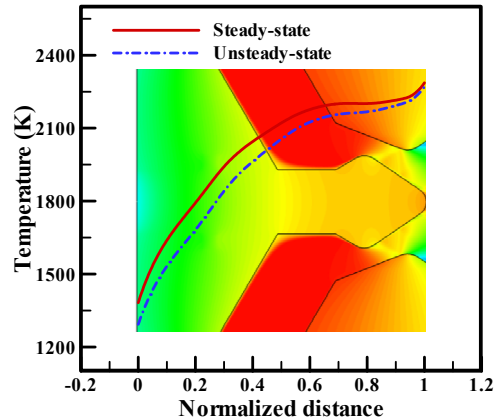


Fig. 12 Comparison of temperature in solid field as function of length at axis line.

우 해석의 소요된 총 계산시간은 약 70시간 이었고 기존 추정시간 대비 약 98%의 시간을 감소시켜 해석을 수행할 수 있었다.

3.2 One-way 해석 기법

정상상태 유동장 해석을 수행한 후 정상상태의 해석결과를 비정상상태 해석의 초기 값으로 사용하는 one-way 해석 기법을 적용하여 고온밸브의 비정상상태 해석을 수행하였다. 해석은 다 구간 기법과 동일하게 10 sec 동안 수행되었다.

Fig. 13은 one-way 해석 기법의 정합성을 확인하기 위해 다 구간 해석 기법과 온도분포를 비교한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 고온밸브의 작동 초기에는 고체영역의 온도분포에서 차이가 존재하지만 고온밸브의 작동시간이 경과함에 따라 온도분포에서 유의미한 차이가 존재하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 차이의 정량적인 비교를 위해 1 sec와 10 sec에서 핀틀 중심부의 온도를 측정하였다. 측정위치는 Fig. 13에 나타내었고 중심부의 길이는 무차원화하였다.

Fig. 14는 1 sec와 10 sec에서의 핀틀 중심부

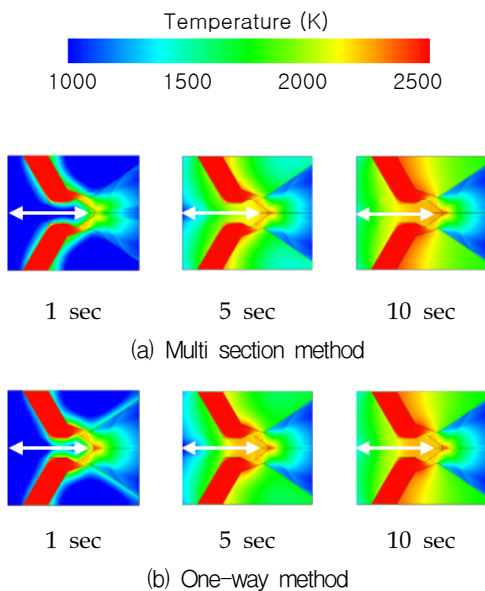


Fig. 13 Comparison of temperature contours between analysis method.

온도이다. 초기 작동시간에서는 핀틀 선단과 중단에서 온도차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있으며 그 차이는 핀틀 중단에서 최대 32%가 발생하였다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 one-way 해석 기법의 경우 정상상태 유동장 해석결과를 비정상상태 해석의 초기 값으로 사용하므로 다 구간 해석 기법보다 벽면 온도가 높은 상태로 비정상상태 해석이 수행되기 때문이다.

하지만 Fig. 14에서 확인 할 수 있듯이 고온밸브의 최종 작동시간인 10 sec에서는 핀틀 중심부 전체에서 최대 2%의 차이가 발생하였고 다 구간 해석 기법과 one-way 해석기법 간 유의미한 차이가 없음을 확인 할 수 있었다. one-way 해석 기법을 적용하여 비정상상태 해석을 수행할 경우 소요된 총 계산 시간은 1시간이었다.

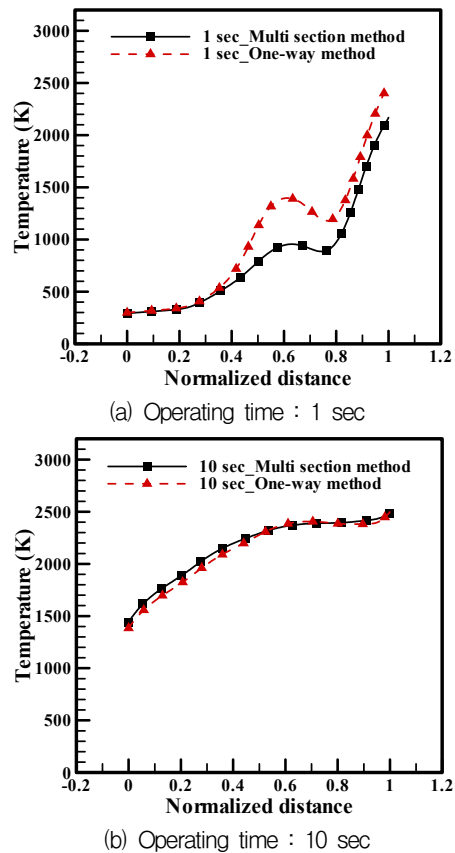


Fig. 14 Comparison of temperature at pintle center to that obtained by analysis method.

4. 결 론

이 논문에서는 가혹 조건에서 장시간 작동하는 고온밸브의 비정상상태 해석을 수행하였다. 초음속 유동의 복합열전달 해석을 수행함에 있어 시간간격을 증가 시킬 경우 해석 중에 발생하는 문제가 발생하였고 해석이 수행 가능한 시간간격으로는 고온밸브의 작동시간인 10 sec 계산이 불가능 하였다. 따라서 구간의 발달순서에 따라 시간간격을 증가시켜 해석을 수행하는 다 구간 해석 기법과 유동영역의 정상상태 해석 후 정상상태 결과를 비정상상태의 초기 값으로 사용하는 one-way 해석 기법을 제시하였다.

다 구간 해석 기법 경우 해석에 많은 시간이 소요되지만 실험 결과와 비교하였을 때 높은 신뢰도를 가짐을 확인 할 수 있었다. One-way 해석 기법의 경우 해석에는 1시간 이내의 시간이 소요되어 매우 경제적인 해석수행이 가능하지만 정상상태 해석 결과가 초기 값으로 사용되므로 해석 초기구간에서의 신뢰도가 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 하지만 고온밸브의 최종작동시간 10 sec에서는 두 해석 기법간의 유의차가 존재하지 않았다. 이는 다 구간해석 기법의 경우 신뢰도가 높은 해석 기법이나 기민한 설계 변수 연구가 불가능하며, one-way 해석 기법의 경우 초기 신뢰도는 떨어지나 기민한 설계 변수 연구가 가능한 효율적인 해석 기법임을 말해준다.

따라서 고온밸브의 비정상상태 해석을 수행할 때에는 해석의 목적과 작동 시간 등을 고려하여 적합한 해석 기법을 선정하여야 한다.

후 기

이 논문은 2017년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

References

1. "DACs", retrieved 03 Nov. 2015 from <http://missiledefenseadvocacy.org/>.
2. Kim, J.K., "Study on the effects of pintle shapes and position in nozzle flow field, and thrust in a solid rocket motor with pintle nozzle," Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea, 2011.
3. Park, H.J., "Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variable Thrust," Master's Thesis, School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Goyang-si, Korea, 2011.
4. Lee, J.H., "A study of the Static and Dynamic characteristic of Pintle-perturbed Conical Nozzle Flows," Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, 2012.
5. Lee, Y.W., "Computational Analysis of Pintle Nozzle for DACS(Divert and Attitude Control System)," Master's Thesis, Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea, 2010.
6. Jin, J.K., Ha, D.S. and Oh, S.J., "Experimental Study and Performance Analysis of the Solid Rocket Motor with Pintle Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 5, pp. 19-28, 2014.
7. Kam, H.D., Ha D.S., Park, Y.S., Lee, J.W. and Cho, S.H., "An Ablation Characteristics for the Pintle-nozzle," *2014 KSPE Spring Conference*, Seoul, Korea, pp.290-293, May 2014.
8. Lee, K.W., Heo, S.W., Kwon, S.J. and Lee, J.K., "Study on Flow Analysis of Hot Gas Valve with pintle." *Journal of the Korean Society for aeronautical and Space Sciences*, Vol. 19, No. 6, pp. 19-25, 2015.
9. Kim, J.K. and Park J.H., "Thrust

modulation performance analysis of pintle-nozzle motor," *Journal of the Korean Society for aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 4, pp. 392-398, 2009.

10. Lim, S.T., Kim, J.K., Kang, Y.K., Kim, H.W. and Kim, Y.C., "Perspective on the Hot Component for Rocket Nozzle and Thruster," *2008 KSPE Fall Conference*, Daejeon, Korea, pp. 67-71, Nov. 2008.