

초음속 노즐의 열구조 연성 해석에 관한 연구

김경식* · 임설* · 김대승* · 조승환*†

A study on Thermo-Structural Analysis of Supersonic Nozzle

Kyungsik Kim* · Seol Lim* · Daeseung Kim* · Seunghwan Cho*†

ABSTRACT

The thermo-structural analysis of the solid-fuel propulsion Nozzle is studied to estimate the thermo-structural safety of the metal nozzle. The thermal load is determined to be significantly large, Because the metal nozzle in a short combustion time is directly exposed to high pressure and temperature of combustion gas. Through a analysis result, the influence of a thermal load is estimated and henceforward a design data of thruster is used.

초 록

금속 소재의 열구조 안정성을 파악하기 위해 고체연료 추진기관의 노즐에 대해 열구조 해석을 수행하였다. 금속 소재 노즐은 짧은 연소 시간이지만 고온, 고압의 연소가스에 직접 노출되어 열하중이 상당히 클 것으로 판단된다. 해석 결과를 통해 열하중의 영향을 예측하고 향후 추력기 설계 자료로 이용하고자 한다.

Key Words: Metal nozzle(금속 노즐), Thermo-structural Safety(열구조 안정성), 열하중(Thermal load), 고체연료 추진(Solid-fuel propulsion)

1. 서 론

로켓 추진기관의 노즐에 사용하는 재료는 고온, 고압에 직접 노출되어 있으며, 그 조건하에 노즐목의 크기와 요구 추력을 유지해야 한다. 이

런 특징으로 노즐 재료는 열전도도, 열충격 저항성이 커야하며, 열팽창계수는 작아야 한다. 주로 노즐목 재료는 Graphite, C/C, C/SIC, 텅스텐 등의 내열합금, 지르코늄 등의 내열 코팅이 쓰이고 있다[1]. 본 논문에서는 노즐목의 재료로 추진기관 가스발생기에 쓰이는 금속 소재인 SCM440과 17-4PH에 대한 열하중에 의한 구조적인 안정성을 평가하고 열구조 설계 자료를 도출하여 추력기 및 추진기관을 설계하기 위해 수행하였다.

* (주)한화 구미사업장 개발2부

† 교신저자, E-mail: josungwh@hanwha..co.kr

2. 해석 방법

2.1 열전달계수 계산

연소가스의 유동에 의한 노즐 벽면의 열전달 계수(h)는 Bartz equation에 의해 구해진다.

$$h = \frac{0.026}{D_t^{0.2}} \left[\frac{C_p \mu^{0.2}}{\text{Pr}^{0.6}} \right] \left[\frac{P_c}{C^*} \right]^{0.8} \left[\frac{D_t}{R_t} \right]^{0.1} \left[\frac{A_t}{A} \right]^{0.9} \sigma$$

단, 상수 C 는 0.026, σ 는 1이다.

여기서 Pr : Prandtl number

C_p : 연소가스의 정압비열(J/Kg·°C)

μ : 연소가스의 점성계수(kg/m·s)

C^* : 연소가스의 특성속도(m/s)

h : 대류열전달 계수(W/m²·K)

σ : 경계층을 가로 지를때의 물성치 변화에 대한 보정계수

P_c : 챔버 평균 압력(MPa)

k : 열 전도도(W/m·°C)

ρ : 연소가스의 밀도(kg/m³)

A_t : 노즐목의 단면적(m²)

A : 특정 구간의 단면적(m²)

R_t : 노즐목의 곡률 반경(m)

2.2 해석모델

설계모델은 노즐목 직경 14.1mm이며 노즐 확장각은 15°이다. 유한요소모델링은 Hypermesh를 사용하였고 경계조건 및 해석은 Marc를 사용하였다. 요소는 2차원 4절점 선형요소 quad4이며 요소 수 9835개이고 절점 수는 9311이다. 또한, 2D axisymmetry 모델링으로 5mm 두께 방향의 요소 수는 16개이다.

추진제의 연소온도는 2300K, 평균압력은 8.2MPa로 설계압력은 13.7MPa이다. 또한, 연소 시간은 1.52sec로 최소 시간 증분값(minimum time increment)은 152step으로 나누어 0.01sec이다.

구조해석시 작용 하중은 열해석에서 구한 온도분포에 의한 열하중과 노즐 내면에 일정하게 작용하는 압력하중이다. 해석시 사용하는 경계조

건은 Fig. 1과 같이 노즐의 내면에는 연소가스 유동에 의한 열전달계수, 온도, 압력을 주었으며 노즐의 밖에는 $h=10\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 의 자연대류 조건을 주었다. Table 1, 2는 SCM440의 온도별 물성치를 나타내었다.

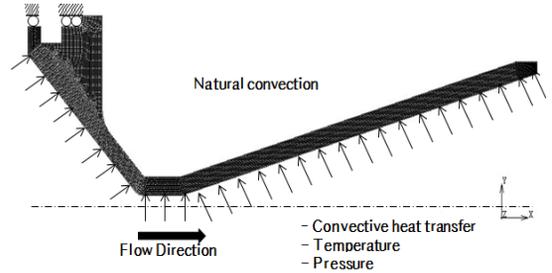


Fig. 1 Boundary conditions of Nozzle

Table 1. Thermal properties of SCM440

Temp. [°C]	ρ [kg/m ³]	Thermal conductivity [W/m·K]	Specific heat [J/kg·K]	CTE $\times 10^{-5}$ [1/K]
30	7833.4	43.344	434.6	1.17
130		42.951	459.6	1.26
230		41.631	483.7	1.33
330		39.663	506.7	1.38
430		37.325	528.8	1.41
530		34.898	549.8	1.44
630		32.382	-	1.47
730		29.777	-	1.29
830		27.083	-	1.20
930		24.3	-	-
1030		21.428	-	-
1130		18.467	-	-
1230		15.417	-	-

Table 2. Mechanical properties of SCM440

Temp. [°C]	Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Yield strength [MPa]
30	212020	0.29	1276.5
130	208070		-
230	201990		-
330	193780		-
430	183450		-
530	170990		-
630	156400		-
730	139690		-
830	127640		-
930	120870		-
1030	114100		-
1130	107320		-
1230	100530		-

Table 3, 4는 17-4PH의 온도별 물성치를 나타내었다.

Table 3. Thermal properties of 17-4PH

Temp. [°C]	ρ [kg/m ³]	Thermal conductivity [W/m · K]	Specific heat [J/kg · K]	CTE $\times 10^{-5}$ [1/K]
99	7827	10.95	344.90	1.09
203		13.10	441.28	1.12
345		15.15	537.65	1.17
417		17.11	634.02	1.20
505		18.97	730.40	-
615		20.74	826.77	-
702		22.42	743.13	-
789		24.00	578.31	-
896		25.48	617.93	-
1021		26.87	657.54	-
1099		28.17	697.16	-
1199		29.37	736.77	-
1299		30.48	737.17	-
1394		31.45	-	-

Table 4. Mechanical properties of 17-4PH

Temp. [°C]	Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Yield strength [MPa]
20	196680	0.288	1285.8
70	194070		1220.2
120	191330		1167.3
169	188440		1124.7
220	185400		1089.6
271	182230		1059.7
315	179250		1032.3
370	-		1005.0
419	-		975.2
470	-		926.4
520	-		808.6
540	-		731.0

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 열해석 결과

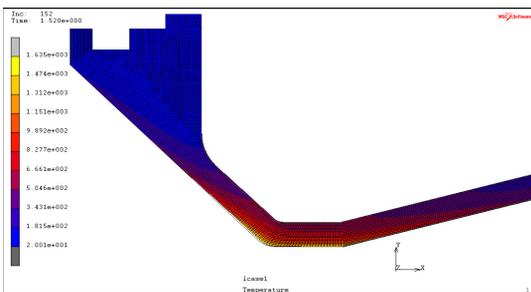


Fig. 2 Temperature contour of SCM440 at 1.52sec

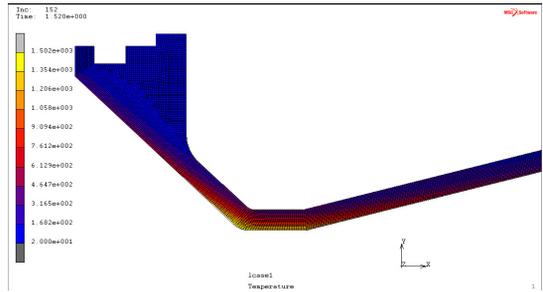


Fig. 3 Temperature contour of 17-4PH at 1.52sec

Table 5. Comparison of analysis and experiment at nozzle neck

Material	Analysis [°C]	Experiment [°C]
SCM440	584.61	-
17-4PH	400.13	105.5

SCM440의 최대온도는 노즐목 입구에서 연소가 끝나는 시점 1.52sec에서 1635.2°C까지 올라갔으며, 초기에 급격히 상승한 후 점차 줄어드는 형태로 나타났다. 17-4PH의 최대온도는 노즐목 입구에서 연소가 끝나는 시점 1.52sec에서 1502.3°C까지 올라갔으며, 초기에 급격히 상승한 후 점차 줄어드는 형태로 나타났다.

SCM440과 17-4PH의 녹는점(Melting point)은 각각 1416°C와 1440°C이다 해석결과로 볼 때, 금속 소재는 구조적 안정성에 문제가 있는 것으로 보이나, 시험 결과와 비교해보면 약 4배가량 차이가 난다. 이는 열해석시 경계조건인 열전달계수, 실제 연소가스 온도, 환경 요인 등의 요인들을 분석할 필요가 있다.

3.2 구조해석 결과

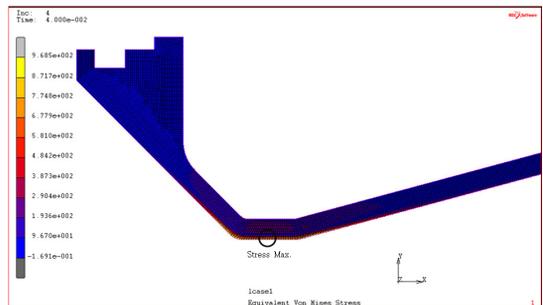


Fig. 4 Max. equivalent stress of SCM440 at 0.04sec

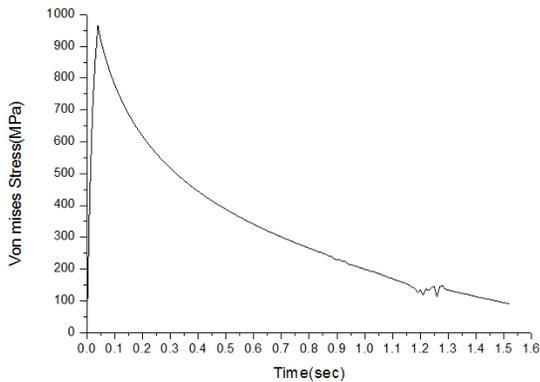


Fig. 5 Max. equivalent stress of SCM440 during combustion

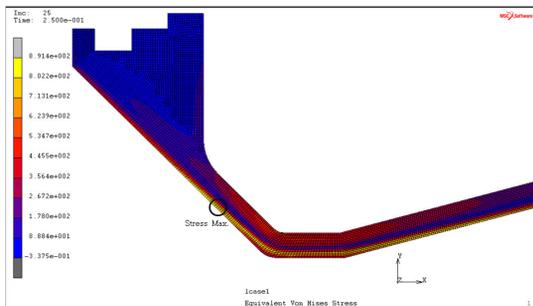


Fig. 6 Max. equivalent stress of 17-4PH at 0.25sec

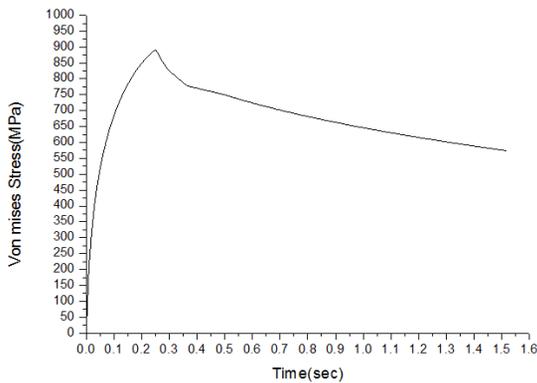


Fig. 7 Max. equivalent stress of 17-4PH during combustion

SCM440의 최대응력은 최대온도 발생부위가 아닌 노즐목의 중간부분의 0.04sec에서 966.4MPa이며, 17-4PH의 최대응력은 최대응력 발생부위가 아닌 노즐의 입구 부위에 891.4MPa 이 발생한다. 2가지 노즐의 경우 최대온도와 최

대응력 발생부위는 다르지만 시간에 따른 온도 변화에 따라 시간에 따른 등가응력이 변화함으로써 압력하중보다 열하중의 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 금속 재료의 경우 온도에 따라 항복응력이 변하므로 최대응력 시점과 최대 온도 시점을 분석하여 구조적 안정성을 고려해야 한다.

4. 결 론

열구조 연성해석 방법을 활용하여 고체모타 노즐의 열구조 안정성 시험을 위한 해석을 수행하였다.

실제 시험과 해석 결과 차이로 인해 열해석 조건인 열전달계수, 소재 물성, 연소가스 온도, 환경 요인 등의 복합적으로 고려할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 구송희, 문순일, 이영신, "2003 Korea User Conference," MSC. Software, 2003
2. Ahmad, Rashid A. "Convective Heat Transfer in the Reuable Solid Roker Moter of the Space Transportation System", Heat Transfer Engineering, 26: 10, 2005, pp30-45
3. D. R. Bartz, "A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective Heat Transfer Coefficient", Jet Propulsion, Vol.27 ,No.1, Jan, 1957 pp.49-51