

# 점소성 모델을 이용한 액체로켓 연소기 재생냉각 채널 구조해석

류철성\* · 최환석\*

## Structural analysis of liquid rocket thrust chamber regenerative cooling channel using visco-plastic model

Chul-Sung Ryu\* · Hwan-Seok Choi\*

### ABSTRACT

Elastic-viscoplastic structural analysis is performed for regenerative cooling chamber of liquid rocket thrust chamber using Bodner-Partom visco-plastic model. Strain rate test was also conducted for a copper alloy at various temperatures in order to get material constants of visco-plastic model used in the structural analysis. Material constants of visco-plastic model were obtained from strain rate test results and visco-plastic model was incorporated into finite element program, Marc, by means of user subroutine. The structural analysis results indicate that the deformation of cooling channel is mostly caused by thermal loading rather than pressure loading and confirmed structural stability of the cooling channel under operating condition.

### 초 록

Bodner-Partom 점소성 모델을 이용하여 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 구조해석을 수행하였다. 구조해석에 사용한 점소성 모델의 재료상수를 구하기 위하여 구리합금에 대하여 변형률 속도를 변화시켜 인장시험을 상온 및 고온에서 수행하였다. 점소성 모델의 재료상수는 구리합금의 변형률 속도 시험 데이터로부터 구하여 사용하였으며 점소성 모델의 구현은 상용유한요소 해석 프로그램인 Marc의 사용자 서브루틴을 이용하여 구현하였다. 구조해석 결과 냉각 채널은 압력에 의한 영향보다 열하중에 의하여 대부분의 변형이 발생하며 연소기의 작동조건에서 냉각 채널의 안정성 여부를 확인할 수 있었다.

Key Words: Liquid Rocket Thrust Chamber(액체로켓연소기), Regenerative Cooling Chamber(재생냉각 챔버), Elastic-viscoplastic Structural Analysis(탄성-점소성 구조해석)

### 1. 서 론

액체로켓 연소기 챔버는 높은 압력, 온도에서 작동하는 구조물로 높은 성능, 재사용성, 소형화, 경량화는 액체로켓 연소기 개발에서 중요한 요소이다. 현대사회에서 이러한 극심한 환경에서 작동하는 구조물로는 원자력 발전소의 부품들과

\*\* 정회원, 한국항공우주연구원  
연락처, E-mail: csryu@kari.re.kr

항공우주 분야의 구조물들이 대표적이다.

연소기 챔버는 많은 연소시험을 반복적으로 수행하기 때문에 열/기계적인 하중 사이클을 반복적으로 받는다. 1회의 연소시험 동안 연소기 챔버는 높은 온도 상승을 경험하고 이 과정에서 연소기 챔버의 냉각 채널에는 큰 비탄성 변형률이 발생한다. 또한, 이러한 높은 작동 온도에서 대부분의 금속들은 변형률 속도와 크립 같은 시간 의존적인 영향을 받는다. 따라서 연소기 챔버의 정확한 설계를 하기 위해서는 고온에서 작동하는 금속 구조물의 거동을 정확하게 모사할 수 있는 구성 모델이 필요하다. 이러한 요구에 의하여 지난 30년 동안 많은 수의 탄성-점소성 모델들을 개발하여 구조물이 높은 온도에서 시간 의존적인 특성을 포함하는 비탄성 변형을 모사하기 위하여 제안하였다.

탄성-점소성 모델을 이용하여 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 구조해석을 수행한 결과는 여러 문헌들에서 찾아볼 수 있다. Arya[1, 2]는 Freed의 모델과 Robinson 모델을 이용하여 냉각 채널의 변형을 모사하였으며 Providakis[3]은 Robinson 모델을 이용하여 경계요소법(boundary element method)으로 액체로켓 연소기 챔버에 대한 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서는 Bodner-Partom 모델을 이용하여 연소기 재생냉각 챔버 구조물에 대한 탄성-점소성 구조해석을 수행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 Bodner-Partom 점소성 모델

점소성 모델의 평가에 대한 기존의 연구로 Chang et al.[4]는 네 종류의 점소성 모델을 이용하여 재료의 단축 거동에 대하여 비교 평가를 수행하였으며 Chan et al.[5]는 Bodner-Partom 점소성 모델에 대하여 평가하였다.

본 연구에 사용한 Bodner-Partom의 구성방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

#### ■유동법칙(Flow rule)

$$\begin{aligned}\epsilon_{ij} &= \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p \\ \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \lambda S_{ij} \\ S_{ij} &= \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}\end{aligned}\quad (1)$$

#### ■운동방정식(Kinematic equation)

$$D_2^p = D_0 \exp\left[-\left(\frac{Z^2}{3J_2}\right)^n \left(\frac{n+1}{n}\right)\right]\quad (2)$$

여기서

$$Z = Z^I + Z^D$$

$$D_2^p = \frac{1}{2}\dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p$$

$$J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij}$$

$$\lambda^2 = D_2^p / J_2$$

#### ■ 내부 변수들의 진화 방정식

##### ◆등방경화(isotropic hardening) 진화방정식

$$\dot{Z}^I = m_1 [Z_1 - Z^I(t)] \dot{W}_p(t)\quad (3)$$

여기서

$$\dot{W}_p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p$$

$$Z^I(0) = Z_0, \quad W_p(0) = 0$$

##### ◆이동경화(kinematic hardening) 진화방정식

$$\dot{\beta}(t)_{ij} = m_2 (Z_3 u_{ij}(t) - \beta_{ij}(t)) \dot{W}_p(t)\quad (4)$$

$$u_{ij}(t) = \sigma_{ij} / [\sigma_{kl}(t) \sigma_{kl}(t)]^{1/2}$$

$$Z^D = \beta_{ij} u_{ij}$$

$$Z^D(0) = 0, \quad \beta_{ij}(0) = 0$$

### 2.2 변형률 속도 시험 및 재료상수 계산

금속 재료의 인장시험에서 얻은 응력-변형률 곡선은 시간에 따라 변화하지 않는다고 일반적으로 가정하지만 만약 금속 재료의 온도가 상승하면 변형률 속도에 시간 의존적(time dependent)인 거동을 보인다. 연소기 재생냉각 챔버의 내측 구조물이 고온에서 작동하기 때문에 변형률 속도 변화에 의한 영향을 받을 수 있다. 이 변형률 속도 변화에 대한 각각의 응력-변형률 데이터를 얻기 위하여 변형률 속도 시험을

수행하였다. 변형률 속도 시험은 상온, 200℃, 400℃ 그리고 500℃에서 변형률 속도  $0.02\text{sec}^{-1}$ ,  $0.002\text{sec}^{-1}$ ,  $0.0002\text{sec}^{-1}$ , 그리고  $0.00002\text{sec}^{-1}$ 의 속도로 시험을 수행하였다. Fig. 1은 500℃에서 시험결과이다. 시험결과 구리합금이 온도가 증가하면 변형률이 증가하면서 속도 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

탄성계수를 제외하고 Bodner-Partom 모델에는  $D_0$ ,  $n$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $Z_0$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ 인 총 12개의 재료상수들이 있다. 비례적(nonproportional)이지 않은 하중 이력(load paths)을 포함하여 모든 경우에 있어  $A_1 = A_2$ ,  $r_1 = r_2$ ,  $Z_0 = Z_2$ 로 가정하고  $D_0$ 는 일정한 값으로 정해지기 때문에 8개의 재료상수가 필요하다. 재료상수의 대부분은 서로 다른 온도조건에서 수행한 변형률 속도 시험 데이터로부터 구할 수 있다. 만약 낮은 변형률 속도시험 데이터가 없다면 크립(creep) 시험 데이터를 사용하기도 한다 [6].

인장시험과 크립 시험 데이터에 기초를 둔 Bodner-Partom 모델 재료상수들을 계산하기 위한 방법은 여러 문헌에서 제시하였다[7, 8]. 본 연구에서는 구리합금의 열적인 회복 영향을 고려하지 않았으며 회복 상수들을 제외한 나머지 재료상수들을 구한 값들을 Table 1에 나타내었다.

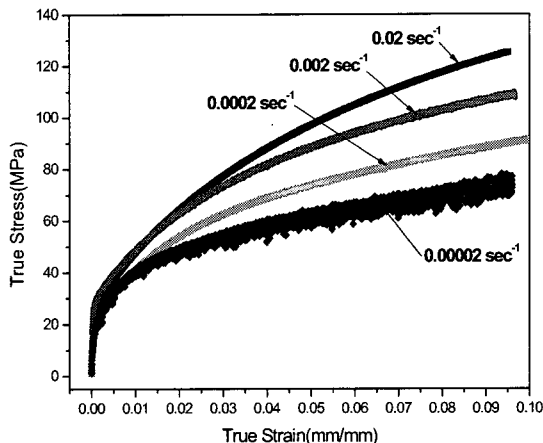


Fig. 1. Strain rate test results of copper alloy at 500℃

Table 1 Material constants of Bodner-Partom model

Temperature dependent constants						
Temp.	n	$Z_0$ (MPa)	$m_{1a}$ $\text{MPa}^{-1}$	$m_{1b}$ $\text{MPa}^{-1}$	$m_{1c}$ $\text{MPa}^{-1}$	E (MPa)
Room temp.	5.6	38.0	1.3	0.22	0.053	95000
200 °C	3.2	38.0	1.5	0.25	0.053	93000
400 °C	2.2	33.0	2.4	0.35	0.045	91000
Temperature independent constants						
$D_0$	$1 \times 10^4 \text{sec}^{-1}$					
$Z_1$	251.3 MPa					
$Z_3$	6.2 MPa					
$m_{2a}$	$661.3 \text{MPa}^{-1}$					
$m_{2b}$	$66.1 \text{MPa}^{-1}$					
$m_{2c}$	$0.005 \text{MPa}^{-1}$					

### 2.3 냉각채널의 구조해석

본 연구에서 사용한 Bodner-Partom 점소성 모델과 다른 점소성 구성 모델(viscoplastic constitutive model)들은 일반적으로 사용하는 상용 유한요소해석 프로그램에 구현되어있지 않다. 이러한 이유 때문에 본 연구에서는 Marc 상용 프로그램에서 제공하는 사용자 서브루틴 기능을 이용하여 점소성 구성 모델을 구현하여 냉각채널의 해석에 사용하였다.

연소기 챔버의 냉각 채널부는 동일한 채널 형상이 연소실 원주방향으로 반복적으로 배치되기 때문에 1개 채널에 대한 형상을 모델링 하였다. 열 하중을 가장 많이 받는 노즐 목에서 냉각 채널의 폭은 1.2 mm이며 두께는 1.5 mm 와 1.0 mm 두 가지 형상에 대하여 구조해석을 수행하였다. 연소기 챔버는 내측 구조물에 구리합금과 외측 구조물에 STS329J1을 사용한다. 이들 재료의 물리적인 물성 값들은 류철성 등이 재료시험을 통하여 얻은 데이터를 사용하였다[9]. 열/구조해석에 필요한 경계조건은 현재 국내에서 개발하고 있는 연소기 작동 조건으로 하였으며 열해석에 필요한 경계조건은 연소실 내부 유동해석으로 얻은 데이터를 사용하였다. 총 해석 시간은 7초이다. 초기 0.5초까지는 연료가 냉각 채

널을 통해 연소기 헤드부까지 유동하는 시간으로 이 구간에서는 연소가 일어나지 않는다. 초기 연소가 시작되는 0.5초에서 0.8초까지의 천이 구간(transition period)에서 경계 조건들은 선형적으로 변한다고 가정하였다[10]. Table 2는 구조 해석에 사용한 경계조건이다.

Table 2 Boundary condition of nozzle throat

Boundary Condition	No Combustion	Combustion
Hot Gas Side Heat Transfer Coefficient ( $W/m^2.K$ )	0.0	12474
Gas Temperature(K)	293	2500
Hot Gas Side Wall Static Wall Pressure(MPa)	0.1	2.5
Coolant Side Heat Transfer Coefficient ( $W/m^2.K$ )	47500	72692
Coolant Temperature(K)	293	380.8
Coolant Side Static Wall Pressure(MPa)	7.54	7.58

#### 2.4 해석 결과

연소기가 반복적인 연소시험을 수행하면 챔버의 냉각 채널 구조물은 반복적으로 열하중과 냉각 유체의 압력을 받는다. 냉각 채널 구조물은 각각의 연소시험에서 열 하중에 의하여 소성변형을 하며 냉각 채널 내부에 걸리는 압력에 의하여 냉각 채널이 부풀어 오르는(bulge) 현상이 발생한다. 반복적인 연소시험은 위에서 설명한 벌징(bulging) 현상이 계속적으로 누적되어 냉각 채널이 개집(dog house) 형태로 변형이 된다. 열 해석 결과 냉각 채널 두께 1.5 mm의 최대온도는 677.4 K이며 두께 1.0 mm인 경우 645.5 K로 두께를 0.5 mm 감소시킴으로서 구조물의 온도를 32 K 감소시킬 수 있었다. 두 가지 냉각 채널의 형상에 대한 탄성-점소성 모델을 이용하여 해석한 변형률 분포 결과는 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 냉각 채널 두께 1.5 mm에 대한 냉각 채널의 위치에 따른 유효변형률은 Fig. 2에

나타내었으며 냉각 채널의 두께가 1.0 mm인 경우, 유효변형률 분포는 Fig. 3에 나타내었다. 해석 결과 최대 유효변형률은 리브에서 나타났으며 그 값들은 1.413%와 1.454%이다. 냉각 채널의 두께를 감소시키면 채널 리브에서 유효변형률은 증가하지만 냉각 채널의 피로 수명과 관련 있는 채널 중앙부에서의 유효변형률은 열하중이 감소함으로써 1.313%에서 1.03%로 감소하였다.

Table 3 Strain values at nozzle throat for channel thickness 1.5 mm at 5.8 sec

	R strain	$\theta$ strain	Z strain	Effective strain
Node 1	0.01389	-0.00782	-0.00672	0.01413
Node 2	0.01291	-0.00682	-0.00673	0.01313
Node 3	0.01024	-0.00578	-0.00483	0.01038

Table 4 Strain values at nozzle throat for channel thickness 1.0 mm at 5.8 sec

	R strain	$\theta$ strain	Z strain	Effective strain
Node 1	0.01425	-0.00879	-0.00608	0.01454
Node 2	0.01006	-0.0045	-0.00614	0.0103
Node 3	0.01099	-0.00641	-0.0049	0.01113

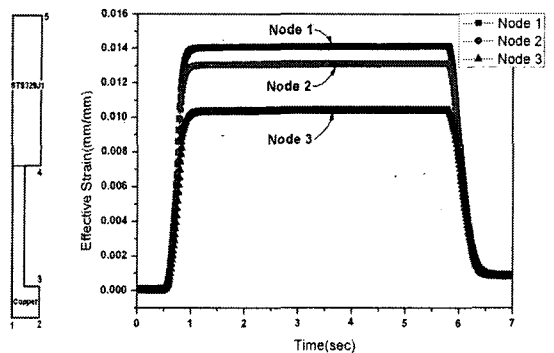


Fig. 2. Effective strain for channel thickness 1.5 mm

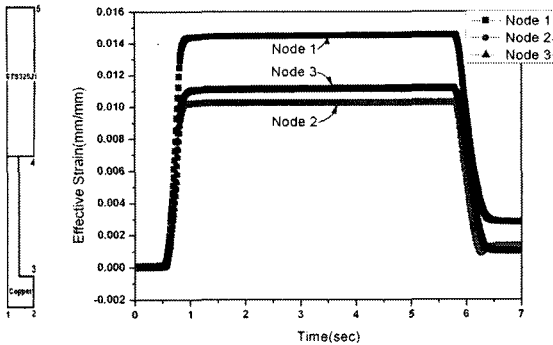


Fig. 3. Effective strain for channel thickness 1.0 mm

### 3. 결 론

Bodner-Partom 점소성 모델을 이용하여 액체 로켓 연소기의 재생냉각 챔버 구조물의 해석을 수행하였다. 점소성 모델의 재료상수를 구하기 위하여 여러 온도 조건에서 변형률 속도 시험을 수행하였다. 시험결과 연소기 재생냉각 채널의 제작 재료로 사용하는 구리합금은 상온, 200 °C, 및 400 °C 까지는 변형률 속도 영향이 크게 나타나지 않았으나 500 °C에서 변형률 속도 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있었다.

변형률 속도 시험 데이터를 이용하여 점소성 모델의 재료상수들을 구하였으며 냉각 채널의 탄성-점소성 구조해석을 수행하였다. 해석결과 냉각 채널 두께가 1.0 mm와 1.5 mm 모두 소성 변형이 약 1.4%로 구조적으로 안정한 상태임을 확인하였다. 향후에는 이러한 결과를 바탕으로 연소기의 피로 수명을 예측할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 “소형위성 발사체(KSLV-I) 개발사업”의 일부분으로 진행된 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

1. V. K. Arya, "Nonlinear Structural Analysis of Cylindrical Thrust Chambers Using Viscoplastic Models," NASA CR-185253, January 1991
2. V. K. Arya, "Viscoplastic Analysis of an Experimental Cylindrical Thrust Chamber Liner," NASA TM-103287, June 1991
3. C. P. Providakis, "D/BEM Implementation of Robinson's Viscoplastic Model in Creep Analysis of Metals Using a Complex Variable Numerical Technique," Advances in Engineering Software, Vol. 33, 2002, pp. 805-816
4. T. Y. Chang and R. L. Thompson, "A Computer Program for Predicting Nonlinear Uniaxial Material Response Using Viscoplastic Models," NASA TM-83675, July 1984
5. K. S. Chan and U. S. Lindholm, "Inelastic Deformation Under Nonisothermal Loading," Journal of Engineering Materials and Technology Vol. 112, 1990, pp. 15-25
6. A. M. Merzer, "Steady and Transient Creep Behavior Based on Unified Constitutive Equations," ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 104, 1982, pp. 18-25
7. U. S. Lindholm et al., "Constitutive Modeling for Isotropic Materials(HOST)," Second Annual Status Report, NASA CR-174980, 1985
8. K. S. Chan et al., "Constitutive Modeling for Isotropic Materials(HOST)," Third Annual Status Report, NASA CR-179522, 1986
9. 류철성, 최환석, 이동주, "액체로켓 연소기 재생냉각 챔버 구조설계," 한국항공우주학회지, 제33권 12호, 2005, pp. 109-116
10. W. H. Armstrong and E. W. Erogren, "3-D Thrust Chamber Life Prediction," NASA CR-134979, March 1976