

다방향으로 입체 보강된 복합재 노즐의 열탄성해석

유재석*, 김광수*, 이상의**, 김천곤**

Thermo-Elastic Analysis of the Spatially Reinforced Composite Nozzle

Jae-Seok Yoo, Kwang-Su Kim, Sang-Eui Lee, Chun-Gon Kim

Key Words: Spatially Reinforced Composite(SRC), Property Prediction, Transient Thermo-elastic Analysis, Kick Motor Nozzle.

Abstract

This paper predicts the material properties of spatially reinforced composites (SRC) and analyzes the thermo-elastic behavior of a kick motor nozzle manufactured from that material. To find the appropriate SRC structure for the nozzle throat that satisfies given design conditions, the equivalent material properties of the SRC are predicted using the superposition method for those of rod and matrix. Studied are the elastic behavior, temperature distribution, and thermo-elastic behavior of a kick motor nozzle composed of carbon/carbon SRC as a throat part. The elastic deformation of the nozzle composed of 3D carbon/carbon SRC shows asymmetry in a circumferential direction. However, 4D carbon/carbon SRC nozzle shows uniform deformation in the circumferential direction. Stress concentration in connecting parts of the kick motor nozzle is ultimately high due to the high temperature gradient in each connecting part. The thermo-elastic deformations of both the 3D and the 4D SRC nozzles are uniform in the circumferential direction due to the isotropy of CTE of each SRC. The deformation of the 3D SRC nozzle is a slightly smaller than that of the 4D SRC nozzle in the nozzle throat, which is favorably effective on rocket thrust. The circumferential stress is the most critical component of the kick motor nozzle. The 4D SRC nozzle having 1,1,1,1.7 diameters in each direction has the smallest circumferential stress among several SRC nozzles.

1. 서론

본 연구의 해석 시에 고려한 공간적으로 보강된 복합재(spatially reinforced composite : SRC) 키 모터용 노즐은 수렴부와 확장부의 라이너(liner) 내피로 탄소/페놀, 확장부의 라이너 외피로 강철,

그리고 노즐목 재료로 탄소/탄소 복합재나 그라파이트(graphite)가 사용되어진다. 그라파이트는 노즐목의 환경을 견딜 수 있는 기계적, 열적, 전기적 특성을 가지고 있을 뿐 아니라 내열성이 뛰어나 노즐목 재료로 사용되나, 취성이 강하고 열적 충격파(thermal shock)에 대해 취약하다는 단점이 있다. 하지만 탄소/탄소 복합재료는 그라파이트의 좋은 특성을 가지고 있으면서도 열적 충격파에 강하며 그라파이트와 마찬가지로 변형성(strain capability)이 적은 편이지만, 이것에 비해 하중지지능력(load-carrying capability)이 뛰어나고 구조물에 치명적인 파손도 적은 것으로 알려져 있어, 현재 노즐목 재료로는 거의 탄소/탄소 복합

* 항공우주연구원, 로켓구조재료

** 한국과학기술원, 항공우주공학부

재료가 사용되고 있다.

노출복 재료로 사용되어지는 SRC에 대한 기계적 물성 즉 강성예측은 여러 가지 방법으로 시도되어왔다. Joon-Hyung Byun [1]은 Plain weave와 8-harness satin weave에 대하여 강성예측을 수행하였다. Plain weave와 8-harness satin weave의 단위구조(unit cell)를 정의하여, 이 단위구조를 해석함으로써 강성을 예측하였다. 또한 열전도계수 예측은 Tsai [2]가 예측한 식을 적용하되, 일방향 복합재의 열전도계수를 얻기 위해 Hashin [3]이 제안한 식으로 대체하였다. 열팽창계수의 예측은 체적평균법을 이용하였다. Mukherjee [4]은 전체 노출이 회전 대칭성(rationally symmetric)을 가지는 다방향 복합재료로 이루어져 있는 경우에 대해 열구조적 해석을 수행하였고, 이 재료를 SiC/Nickel 복합재와 성능을 비교하였으나, 복합재료를 이루는 횡방향 등방성인 라드를 등방성으로 가정하여 해석하였다.

공간적으로 보강된 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성과 열 물성치를 예측하는 프로그램을 개발하였으며 공간적으로 보강된 탄소/탄소 복합재 노출에 대한 열탄성 해석을 수행하였다. 노출 형상의 모델링은 MSC사의 PATRAN을 해석은 ABAQUS를 사용하였다.

2. 3차원 직조 복합재의 물성치 예측

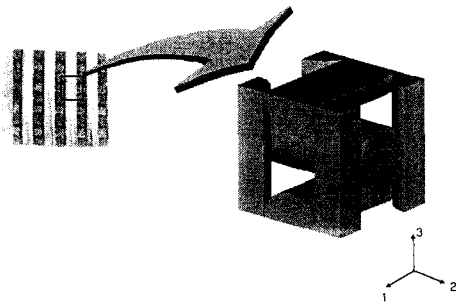


Fig. 1 Unit cell of the 3-D SRC.

강성행렬의 중첩(superposition of stiffness matrix)의 대상인 단위구조(unit cell)를 정의하면 다음과 같다. 단위구조란 3차원 직조 복합재에 나타나는 형태적으로 반복되는 구조를 말하며, Fig. 1과 2에 나타나 있다. 이와 같은 단위구조

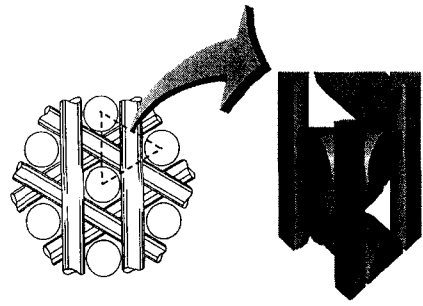


Fig. 2 Unit cell of the 4-D SRC.

해석은 같은 형태가 반복되는 형상에 대한 일반적인 해석으로, 구조 전체를 해석하지 않고 단위구조에 대한 해석을 통하여 공간적으로 보강된 복합재(spatially reinforced composite : SRC)의 물성을 예측한다. 여기서 SRC는 제품의 가공하기 전 단계로 Fig 1의 왼쪽 사진과 같은 육각 블록을 의미한다. 이와 같이 제조된 SRC를 가공하여 일반 복합재 구조물로 쓰이게 되는데, 한번 가공된 SRC는 다시 구조를 바꿀 수 없기 때문에 SRC의 물성예측은 필수적이다.

강성행렬의 중첩은 3차원 직조 복합재 구조물의 기본단위인 단위구조가 균일 변형률(iso-strain)을 받는다[1]고 가정하면 단위구조에 대한 강성행렬의 중첩이 가능해진다. 단위구조가 균일 변형률을 받는다는 가정은 전체 SRC에 대해서 단위구조가 작고 단위구조가 변형을 받는 동안 라드와 기지가 떨어지지 않는다는 가정이 있어야 한다. 이와 같은 가정에 의해 구조물이 임의의 방향의 하중을 받을 때 단위구조는 균일 변형률을 받는다. 이러한 가정 하에 단위구조의 강성행렬은 아래의 식과 같이 각 방향의 라드와 기지의 체적평균으로 구할 수 있다.

$$[C]_c = \sum_{i=1}^n VF_i [K]_i [C] [K]_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n VF_i\right) [C]_{iso} \quad (1)$$

여기서 n은 3-D SRC 경우는 3이고 4-D SRC 경우는 4가 된다. 또한 $[C]_{iso}$ 는 탄소기지의 강성행렬이다.

열 물성치 역시 체적평균법을 이용하여 열전달계수와 열팽창계수를 예측하였다. 열물성치의 예측식은 아래와 같다.

$$[k]_c = \sum_{i=1}^n \frac{VF_i}{V_r} [K] [k'] \quad (2)$$

$$[a]_c = \sum_{i=1}^n \frac{VF_i}{V_r} [K] [a'] \quad (3)$$

여기서 $V_r = \sum_{i=1}^n VF_i$ 로, 각 방향라드의 체적 합이다. SRC의 열 물성치를 알기 위해서는 역시 SRC를 구성하는 라드와 기지의 열물성치를 알아야 한다. T300 fiber와 Carbon matrix로 구성된 라드의 열전달계수와 열팽창계수는 Hashin [3]이 제안한 식을 사용하였다.

Table 1 Material properties of the carbon rod.

Symbol	Carbon rod
E_{1r} (GPa)	146.6
E_{2r}, E_{3r} (GPa)	8.23
G_{12r}, G_{13r} (GPa)	3.85
G_{23r} (GPa)	2.97
ν_{12r}, ν_{13r}	0.251
k_{1r} (W/mK)	14.02
k_{2r} (W/mK)	5.916
α_{1r} ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	-0.959
α_{2r} ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	8.764

3. 다방향으로 입체 보강된 복합재 노즐의 열탄성 해석

3.1 노즐 구성과 경계 및 하중조건

본 연구에서는 킥모터에 사용되어지는 노즐 형상에 대해 과도기 열탄성 해석을 수행하였다. Fig. 3의 노즐은 보는 것과 같이 잠입부(submerged part)의 외피와 확장부(diverging part)의 내피는 카본/페놀로 되어있고, 확장부의 외피는 강철(steel 4130)이나 알루미늄으로 되어있으며, 잠입부의 노즐목부분은 탄소/탄소 SRC로 이루어져있다. 본 연구에서는 다른 모든 조건이 동일한 상태에서 노즐목부분의 탄소/탄소 복합재가 3-D

구조와 4-D 구조를 가질 때 노즐의 거동을 연구할 것이다.

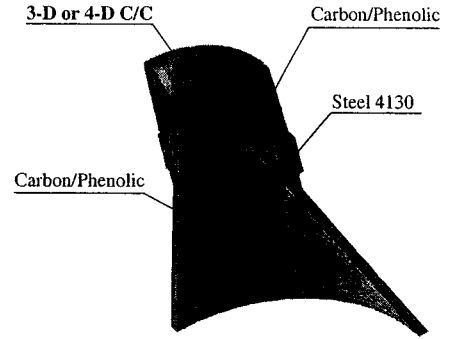


Fig. 3 Shape and constituent materials of a kick motor nozzle.

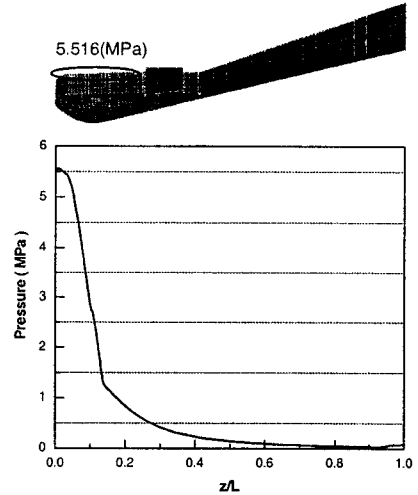


Fig. 4 Wall pressure distribution along the nozzle axis.

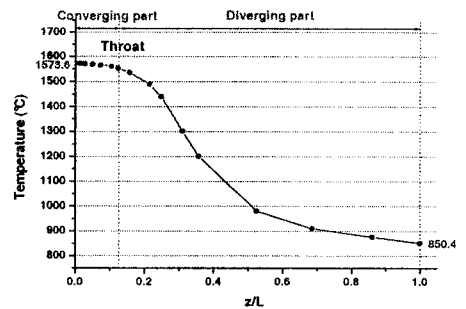


Fig. 5 Wall temperature distribution along the nozzle axis.

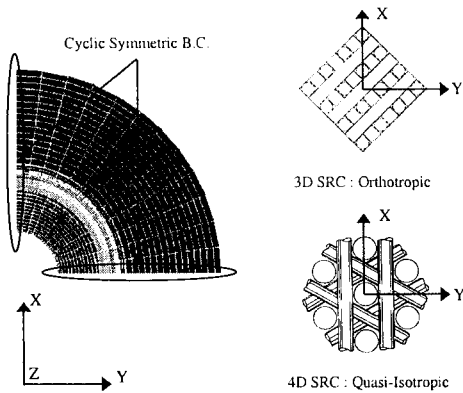


Fig. 6 Cyclic symmetric boundary condition.

Table 2 Material properties of the C/C part of the nozzle.

Property	Unit	C/C(3D)	C/C(4D)
Rod diameter	mm	1, 1, 1	1, 1, 1, 1
$E_1 = E_2$	GPa	34.42	24.60
E_3	GPa	34.42	30.65
G_{12}	GPa	2.552	9.17
$G_{13} = G_{23}$	GPa	2.552	2.48
ν_{12}		0.0830	0.341
$\nu_{23} = \nu_{13}$		0.0830	0.0664
$k_1 = k_2$	W/mK	13.96	14.45
k_3	W/mK	13.96	14.14
$\alpha_1 = \alpha_2$	$\cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	4.76	4.58
α_3	$\cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	4.76	4.97
C_p	J/kgK	1153	1159
ρ	kg/m ³	1514	1507

본 연구에서는 노즐에 작용하는 온도와 압력의 영향을 알아보기 위해서, 압력만 가한 탄성해석, 노즐전체의 온도분포를 구하기 위한 과도기 열전달해석, 그리고 계산된 온도분포를 압력과 동시에 가한 열탄성해석을 순차적으로 수행하였다. 압력하중조건과 열하중조건은 그림 4, 5와 같다.

해석에 필요한 소재들의 물성치 중 노즐복재

료의 물성치는 본 연구에 의한 예측식을 통하여 얻었고, Table 2에 나타내었다. 노즐의 기하학적 대칭성을 이용하여 Fig. 6과 같이 90° 부분만을 모델링하여 반복 대칭(cyclic symmetric)조건을 부과하여 전체 노즐을 해석하였다.

3.2 과도기 열전달해석

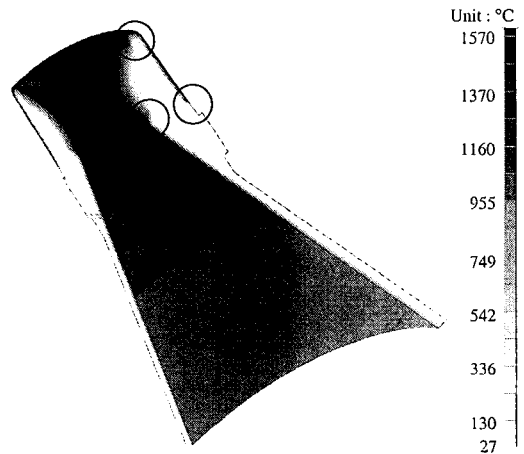


Fig. 7 Temperature distribution of 4-D SRC at 9 second.

먼저 앞서 설명한 경계조건을 가하여 노즐의 온도분포를 시간의 변화에 따라 살펴보기 위해 과도기 열전달해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 키크모터노즐의 작동시간이 9초±15% 정도 되므로, 9초까지의 온도분포를 구하였다. 4-D 복합재의 9초에서의 온도 분포를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7에서는 카본/페놀로 이루어진 부분보다 탄소/탄소 구성된 부분에서 상대적으로 더 많은 열전달이 일어남을 볼 수 있었다. 이것은 카본/페놀의 횡방향 열전도계수, 즉 반경방향의 열전도계수가 매우 낮아 발생하는 현상이다. 이런 카본/페놀의 열특성으로 인해 노즐의 작동시간 내에서는 강철로의 열전달은 거의 발생하지 않았다. Fig. 7에서 원으로 표시된 부분은 소재가 다른 부분들이 접촉되어있는 곳으로, 시간이 지나더라도 온도구배가 거의 완화되지 않아 큰 응력이 걸릴 수 있음을 온도분포로 확인할 수 있었다.

3.3 탄성해석 및 열탄성해석

압력만 가한 탄성해석과, 압력과 위의 과도기 열전달해석으로부터 얻은 9초에서의 온도분포를 사용하여 열탄성 해석을 수행하여 변형형상과 열응력을 살펴보았다. Fig. 8은 노즐 입구의 카본/페놀과 SRC 부분의 압력하중에 대한 노즐의 변형형상을 나타낸 것이다. 실제의 변형형상보다 200배 확대하였다. 노즐의 중심안쪽과 주력방향으로 변형되는 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 5에서와 같이 노즐에 분포된 압력 중, 가장 큰 챔버 압력이 노즐 목 바깥쪽을 중심방향으로 누르기 때문이다. Fig. 9는 압력과 온도하중이 가해졌을 때의 탄소/탄소 복합재 부분과 카본/페놀 부분에 대한 변형형상을 실제형상보다 10배 확대하여 나타낸 것이다. 4D SRC를 적용한 노즐의 노즐목 변위는 각 방향에서 거의 같게 나타났다. 각 경우를 비교해본 결과 3D SRC중 각 라드직경이 1,1,1.7mm인 SRC를 적용한 노즐이 노즐목에서 변위가 가장 작았지만, 노즐목에서의 균일한 변위분포를 고려하면 4D SRC중 각 라드직경이 1,1,1.7인 SRC를 적용한 노즐이 좀 더 유리한 것으로 나타났다. 또한 전체적인 노즐의 거동을 살펴보면, 온도와 압력을 가한 경우가 압력만 가했을 때의 경우보다 최대변형량이 약 26배정도 크게 나타났다. 이것은 전체변형에 압력보다는 열에 의한 변형이 지배적인 것을 알 수 있었다. 또한 챔버와의 연결부에서의 변위 자유도가 구속되어 있어서 그 곳을 중심으로 바깥쪽으로 열팽창하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10과 11에서 보듯이 응력값들이 일반적인 탄소/탄소 SRC나 카본/페놀 복합재의 인장강도보다 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 실제 노즐은 모든 재료에 대해 열팽창에 여유를 두고 제작하게 되며, 이런 열팽창에 대한 여유를 제공하기 위해 테프론, 실리콘고무 등을 와서 형태로 소재들 사이에 적용하게 된다. 본 연구에서는 앞서 제안한 물성치에 대한 예측식을 적용하기 위한 예로써 노즐을 모델링하여, 노즐목재의 구조의 변화에 대한 노즐의 거동을 살펴보는 것이 목적이므로 이런 소재사이의 열팽창의 여유를 제공하는 물질을 모델링시에 고려하지 않았다. 하지만 전체적인 경향을 파악하는 데는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. Fig. 7에서 예상할 수 있듯이, 열응력은 각 소재들의 열팽창계수의 차이로 인해, 각 재료의 연결부에서 크게 나타났다. 그리

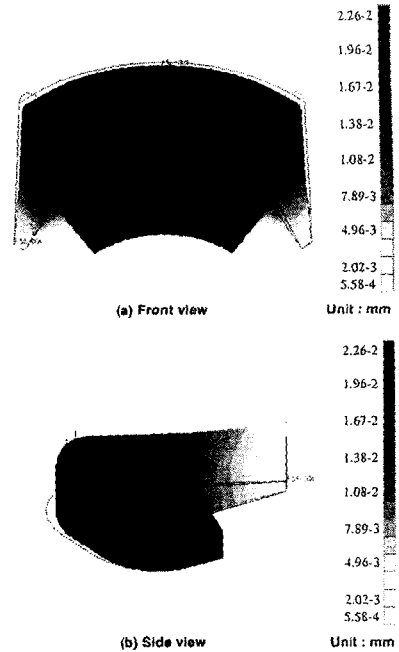


Fig. 8 Deformed shape of the 4D SRC.

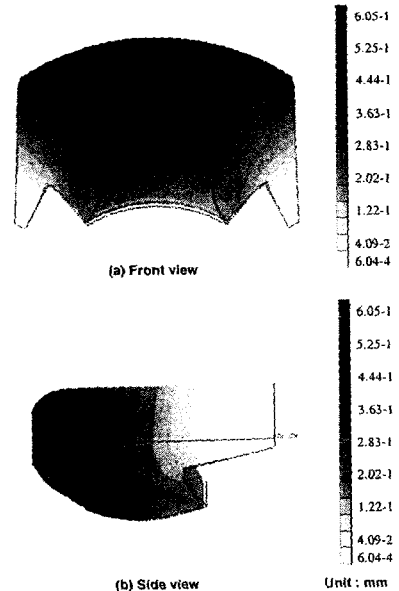


Fig. 9 Deformed shape of the 4D SRC.

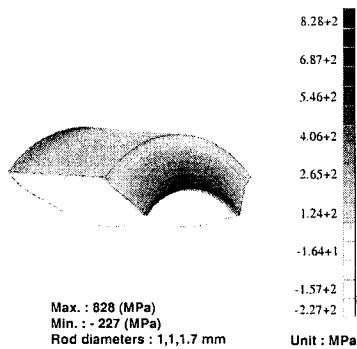
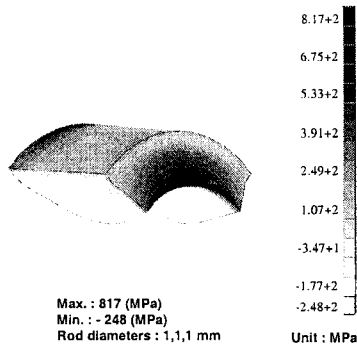


Fig. 10 Stress distribution of the 3D SRC nozzle in the circum. direction.

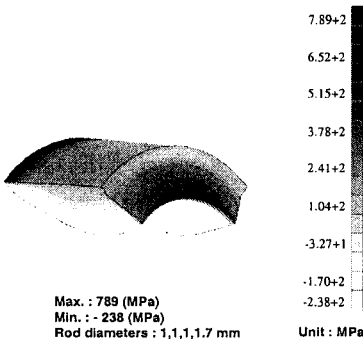
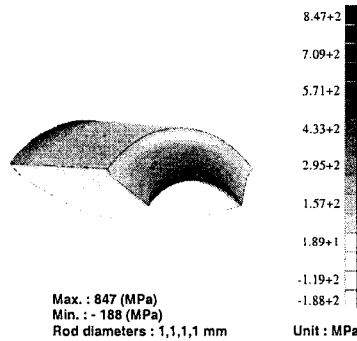


Fig. 11 Stress distribution of the 4D SRC nozzle in the circum. direction.

고 응력이 다른 방향들보다 원주 방향에 대해 큰 값을 보였는데, 이는 카본/페놀 복합재가 섬유방향(원주와 축방향)으로 음의 열팽창계수를 가지 때문에 탄소/탄소 SRC와의 경계면에서 각기 반대의 열팽창이 일어남으로써 큰 응력이 발생하였다. 원주방향의 응력이 다른 방향 응력에 비하여 약 2배에서 3배정도 크게 나타남으로, 노즐설계시 가장 중요하게 고려해야 한다.

4. 결론

SRC를 구성하고 있는 라드와 기지의 강성행렬을 체적평균하여 단위구조의 강성행렬을 얻을 수 있었다. SRC가 적용된 노즐의 열탄성해석을 수행하였다. 과도기 열탄성해석을 통하여 얻은 3초와 9초에서의 온도분포를 볼 때, 각 재료의 경계면에서 온도구배가 크게 나타났다. 압력하중과 함께 9초에서 계산된 열하중을 가했을 경우, 3D/4D SRC 모두 비교적 균일한 변형형상을 나타냈다. 노즐목에서의 변위는 3D SRC를 적용한 노즐이 좀더 작게 나타났으나, 4D SRC를 적용한 노즐이 좀더 균일한 변위를 나타냈다. 원주방향으로 응력이 가장 크게 나타났고, 노즐 축방향 라드가 1.7mm인 4D SRC를 사용한 노즐의 원주방향 응력값이 가장 작게 나타났다.

참고문헌

- (1) 변준형, "평직 및 주자직 복합재료의 탄성계수 예측," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제11호, 1997, pp. 1757-1764.
- (2) H. Tai, "Equivalent Thermal Conductivity of Two- and Three-Dimensional Orthogonally Fiber-Reinforced Composites in One Dimensional Heat Flow," Journal of Composites Technology & Research, Vol. 18, No. 3, 221-227, 1996.
- (3) Z. Hashin, "Analysis of Properties of Fiber Composites with Anisotropic Constituents," Journal of Applied Mechanics, Vol. 46, 543-550, 1979.
- (4) N. Mukherjee "Thermostructural Analysis of Rotationally Symmetric Multidirectional Fibrous Composite Structures," Computers and Structures, Vol. 65, No. 6, 809-817, 1997.