

## 열차폐 코팅이 재생냉각 챔버에 미치는 열/구조적인 영향

유철성\* · 이금오\* · 김홍집\* · 최환석\*

### Thermo-structural Effects of Thermal Barrier Coating on Regenerative Cooling Chamber

Chul-Sung Ryu\* · Keum-Oh Lee\* · Hong-Jip Kim\* · Hwan-Seok Choi\*

#### ABSTRACT

A study has been performed to investigate the thermo-mechanical effects of thermal barrier coating on liquid rocket regenerative cooling chamber using finite element analysis. Two kinds of thermal barrier coatings were studied on the same loading condition: first, NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> coating which is currently applied to the developing combustion chamber and second, Ni-Cr coating which might be applied in the future. Analysis results showed that NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> coating has better decreasing effect of temperature than the Ni-Cr coating. As a results, temperature and deformation of the cooling channel in the NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> coating were also less than those of the Ni-Cr coating. The Ni-Cr coating has no effect on a structural stability of the outer jacket but the NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> coating reduced the effective stress of the outer jacket and enhanced the structural stability of the chamber.

#### 초 록

재생냉각형 액체로켓 연소기 챔버에서 열차폐 코팅이 미치는 열/구조적인 영향에 대하여 유한요소 해석을 통하여 고찰하였다. 열차폐 코팅은 현재 개발하고 있는 연소기에 사용되는 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub>과 향후 적용할 가능성이 있는 Ni-Cr 두 종류를 적용하였다. 열/구조해석 결과 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 Ni-Cr 코팅에 비하여 열차폐에 의한 온도감소 효과가 크게 나타났다. 결과적으로 냉각채널의 온도와 변형 또한 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용하였을 때 Ni-Cr 코팅보다 감소하였다. 외측구조물의 구조안정성에 있어서 Ni-Cr 코팅이 미치는 영향은 없었으나, NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅은 외측구조물의 유효응력을 감소시켜 챔버의 구조안정성을 증가시켰다.

Key Words: Thermal Barrier Coating(열차폐 코팅), Regenerative Cooling Chamber(재생냉각 챔버), Liquid Rocket Thrust Chamber(액체로켓 연소기)

#### 1. 서 론

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

재생냉각형 연소기 챔버에서 극고온의 연소가

스로부터 챔버의 내측구조물(inner jacket)을 보호하기 위하여 연료가 유동할 수 있는 사각형 또는 원형의 채널을 내측구조물 내부에 만들어 고온의 연소가스에 의한 열손상이 발생되지 않도록 한다. 열차폐 코팅(thermal barrier coating)은 연소가스와 접하는 내측구조물 벽면에서 온도를 감소시켜 열손상을 방지하고 냉각채널에 발생하는 구조 변형을 감소시킨다. 이러한 열차폐 효과들은 결과적으로 재생냉각 챔버의 구조 안정성과 수명을 증가시킨다. 본 연구는 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버에서 열차폐 코팅의 유무와 종류에 따른 열적 구조적인 영향에 대하여 고찰하였다. 열차폐 코팅은 주로 항공기용 가스 터빈 엔진과 액체로켓 연소기에서 고온의 연소가스로부터 구조물을 보호하기 위하여 사용되어 왔다. 외국의 경우에 연소기 챔버의 열적손상을 방지하고 피로수명을 향상시키기 위하여 여러 종류의 코팅에 대하여 많은 연구를 수행하였다 [1,2]. 국내에서 개발하고 있는 연소기 챔버에는 대기 플라즈마 용사(Air Plasma Spray) 방식으로 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용하고 있다. 국내에서는 이 코팅에 대한 열차폐 효율과 내구성을 축소형 연소기 챔버를 이용한 연소시험으로 평가하였으며[3], NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅과 Ni-Cr 코팅의 내구성 평가는 열 충격 시험을 통하여 수행하였다[4].

## 2. 열차폐 코팅

### 2.1 열차폐 코팅용 재료

본 연구에서 열/구조적인 영향을 비교하기 위하여 두 종류의 코팅을 사용하였다. 첫 번째는 지르코니아 기반의 세라믹 코팅으로 ZrO<sub>2</sub> 탑 코트(top coat)와 금속 모재와 탑 코트 사이에 증착되어 모재의 산화와 고온부식을 방지하고, 세라믹과 모재와 결합력을 유지시키는 본드 코트(bond coat)는 NiCrAlY를 사용한다. 이 본드 코트 재료는 우수한 내열성과 낮은 열전도성, 상대적으로 낮은 열팽창률 때문에 사용한다. 두 번째 종류는 Ni-Cr 코팅이다. 이 코팅은 세라믹 코팅

에 비하여 열차폐 효율은 떨어지지만 고온의 연소가스에 의한 구리합금인 내측구조물이 내산화성과 내부식성을 갖도록 한다.

### 2.2 재생냉각 챔버에 열차폐 코팅의 적용

열차폐 코팅의 효과를 평가하는데 사용된 재생냉각 챔버는 75톤 2단용 연소기 챔버이다. 일반적으로 재생냉각 챔버는 축 방향에 따라 냉각 채널의 개수와 폭뿐만 아니라 열하중 또한 변화한다. 본 연구에서는 이 챔버에서 총 5곳을 선정하여 열/구조해석을 수행하였다. 열/구조해석을 수행한 각각의 단면은 열해석 결과 냉각채널에서 가장 높은 온도를 나타내는 곳, 연소실 실린더부와 노즐목부에서 냉각채널의 폭이 가장 큰 곳, 열하중이 가장 큰 노즐목, 그리고 노즐 팽창부에서 냉각 채널의 두께가 가장 작고, 냉각채널의 폭이 가장 큰 단면을 선정하였다. Fig. 1에 75톤 2단 연소기의 형상과 챔버에서 열/구조해석을 수행한 단면들의 위치를 나타내었다. Fig. 2는 재생냉각 챔버의 단면형상과, 연소가스와 접하는 냉각채널에서 열차폐 코팅이 적용된 형상을 보여 준다. 구리합금으로 이루어진 내측구조물끝단에 본드 코트인 NiCrAlY 또는 Ni을 코팅하고, 그 위에 탑 코트인 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 이나 Cr을 코팅한다. 본 연구에서 본드 코트인 NiCrAlY과 Ni의 두께는 각각 150  $\mu\text{m}$ 와 100  $\mu\text{m}$ 이며, 탑 코트인 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Cr의 두께는 250  $\mu\text{m}$ 와 150  $\mu\text{m}$ 을 적용하였다. 열/구조해석에 사용된 열차폐 코팅 재료들에 대한 열/기계적인 물성 값들은 기존의 문헌[5-9]들에서 제시한 값들을 사용하였다.

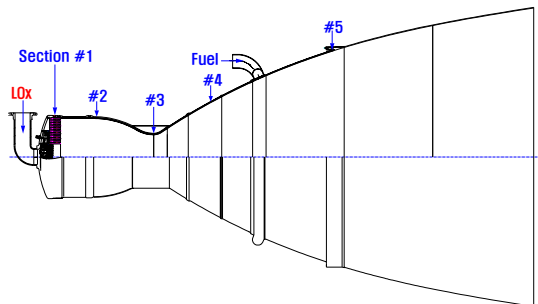


Fig. 1. Configuration of thrust chamber and location of analysis section

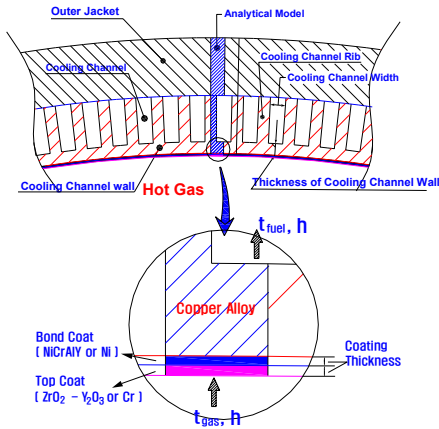


Fig. 2. Configuration of regenerative cooling channel and thermal barrier coating

### 3. 해석결과 및 검토

#### 3.1 냉각 채널의 온도변화

본 연구에서 사용된 열차폐 코팅 재료인 ZrO<sub>2</sub>와 NiCrAlY의 열전도도는 각각 0.0012 W/mm·K, 0.0091 W/mm·K이며, Cr과 Ni의 열전도도인 0.00691 W/mm·K와 0.0607 W/mm·K이다. 열차폐 기능에 중요한 탑 코트의 열전도성을 비교하면 ZrO<sub>2</sub>이 Ni에 비하여 열전도성이 매우 낮다. 따라서 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 연소기 챔버에 전달되는 열하중을 Ni-Cr 코팅에 비하여 크게 감소시킬 수 있는 재료적인 특성을 갖고 있다. 이러한 특성은 재생냉각 챔버의 열/구조해석 결과에서도 동일한 경향으로 나타났다. Fig. 2와 3에 Ni-Cr 코팅과 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용하였을 때 재생냉각 채널 단면 형상에 나타난 노드(Node) 1~노드 4의 위치에서 정상상태(steady state)의 온도분포를 나타내었다. Ni-Cr 코팅의 경우 열차폐 효과에 의하여 연소가스와 접하는 코팅 외측면과 내측의 구리합금과의 온도 차이는 각각의 해석 단면(section) 1, 2 그리고 3에서 201 K, 53 K, 그리고 132 K로 나타났다. NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용한 해석결과에서는 각각의 해석 단면 1, 2 그리고 3에서 코팅 외측면과 본드 코트와 접하는 냉각 채널에서의 온도 차이가

1756 K, 557 K, 그리고 1003 K로 Ni-Cr 코팅에 비하여 온도 기울기(temperature gradient)가 크게 나타나 열차폐 효과가 Ni-Cr 코팅보다 좋게 나타났다. Fig. 1의 해석 단면 #1에서 본드 코트와 접하는 내피구조물 표면(Node 3)에서 온도는 열차폐 코팅을 적용하지 않았을 때 1029 K이지만 Ni-Cr과 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용하면 동일 위치에서 온도는 986 K와 564 K로 감소하였다. 따라서 열차폐 코팅을 적용하면 코팅을 적용하지 않은 냉각채널의 온도에서 Ni-Cr 코팅은 4.2%, NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅은 45.2%의 온도가 감소하여 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 Ni-Cr 코팅보다 온도 감소 효과가 약 11배 좋게 나타났다. 해석 단면 #2와 #3에서도 동일한 경향을 보여주어 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 Ni-Cr 코팅보다 온도 감소 효과가 각각 9배와 7배 좋게 나타났다. 이러한 결과들은 표 1에 나타내었다.

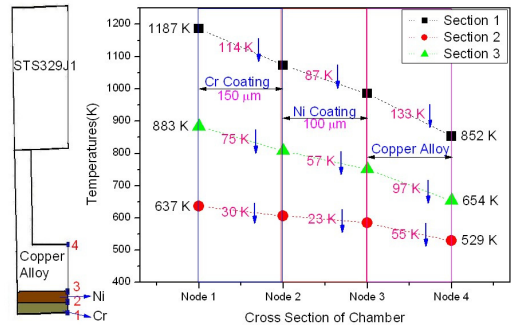


Fig. 3. Temperature variation of cooling channel applied by Ni-Cr coating

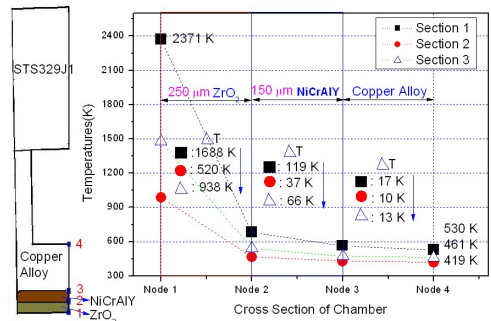


Fig. 4. Temperature variation of cooling channel applied by NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> coating

Table 1. Comparison of temperature variation by coating types at node 3

단면 위치	값	적용 코팅		
		None	Ni-Cr	NiCrAlY-ZrO <sub>2</sub>
#1	Temp.(K)	1029	986	564
	$\Delta T$ (K)	-	43	465
	$\Delta T$ (%)	-	4.2	45.2
#2	Temp.(K)	604	584	427
	$\Delta T$ (K)	-	20	177
	$\Delta T$ (%)	-	3.3	29.3
#3	Temp.(K)	797	751	474
	$\Delta T$ (K)	-	46	323
	$\Delta T$ (%)	-	5.8	40.5

### 3.2 냉각 채널의 변형을 변화

연소기 재생냉각 챔버는 연소가스에 의한 열하중과 압력에 의하여 변형된다. 연소기가 작동하면 연소가스에 의하여 내측의 구리합금으로 이루어진 내측구조물의 온도가 증가하여 열팽창하지만 외측의 STS329J1로 이루어진 외측구조물(outer jacket)은 상대적으로 온도가 낮게 증가하여 열팽창에 의한 변형이 내측구조물보다 작게 발생된다. 따라서 내측구조물의 열팽창에 의한 변형이 외측구조물에 의하여 억제되어 온도의 증가/감소에 따라 내측구조물에 압축/인장 변형이 발생된다. 재생냉각 챔버가 반복적으로 작동하면 내측구조물도 반복적으로 압축-인장 변형이 발생된다. 이러한 반복적인 변형이 발생될 때 챔버 피로수명을 좋게 하기 위해서는 최대 변형률이 작게 발생되도록 설계해야 한다. Fig. 5는 열/구조해석을 수행한 각각의 챔버 단면에서 노드

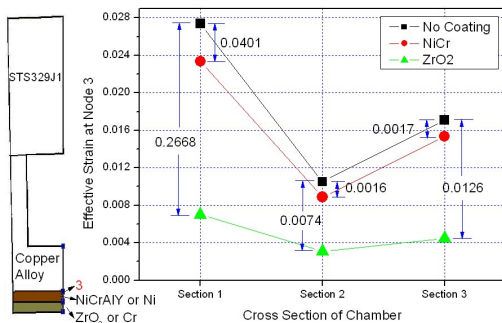


Fig. 5. Variation of effective strain at node 3

3 위치에서의 유효변형률(effective strain)을 보여준다. NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용하였을 때, 본드 코드와 접하는 내측의 구리합금 구조물의 온도가 Ni-Cr 코팅을 적용한 경우와, 코팅을 적용하지 않은 경우보다 상대적으로 온도가 낮게 유지되기 때문에 열팽창에 의한 열 변형이 감소하여 유효변형률 또한 작게 나타났다.

### 3.3 재생냉각 챔버의 구조안정성

가압방식이 아닌 터보펌프 방식의 연소기는 일반적으로 높은 연소압력 환경에서 작동된다. 이 연소가스 압력에서 챔버가 구조적으로 안정하게 작동되도록 하기 위하여 재생냉각 챔버의 외측구조물에는 브레이징 특성뿐만 아니라 재료의 강도가 좋은 STS329J1 재료가 사용된다. 이 STS329J1의 0.2% 오프셋 항복강도는 온도 변화에 따라 상온에서 502 MPa, 그리고 100 °C에서 424 MPa, 200 °C에서는 366 MPa로 감소한다 [10]. 표 2에 열/구조해석을 수행한 각각의 단면에서 외측구조물의 최외측면에서의 폰-미세스(Von-Mises) 응력을 나타내었다. 적용 코팅에서 None는 코팅을 하지 않은 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과 Ni-Cr 코팅을 적용한 경우와 코팅을 적용하지 않은 경우 폰-미세스 응력 값들의 차이가 3 MPa 이내로 거의 동일하게 나타나 외측구조물의 구조적인 안정성에 미치는 영향은 매우 작게 나타났다. NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용한 경우에는 유효응력 값이 작은 해석 단면#3에

Table 2. Von-Mises stress of outer jacket

단면	값	적용 코팅		
		None	Ni-Cr	NiCrAlY-ZrO <sub>2</sub>
#1	$\sigma_{eff}$ (MPa)	278	277	243
	$\Delta\sigma_{eff}$ (MPa)		1	35
	$\Delta\sigma_{eff}$ (%)		0.36	12.56
#2	$\sigma_{eff}$ (MPa)	249	247	225
	$\Delta\sigma_{eff}$ (MPa)		2	24
	$\Delta\sigma_{eff}$ (%)		0.80	9.64
#3	$\sigma_{eff}$ (MPa)	165	162	163
	$\Delta\sigma_{eff}$ (MPa)		3	2
	$\Delta\sigma_{eff}$ (%)		1.82	1.21

서 코팅을 하지 않은 외측구조물과 Ni-Cr 코팅을 한 외측구조물간의 유효응력 값들의 차이는 매우 작게 나타났다. 그러나 해석 단면 #1과 #2의 결과처럼 외측구조물의 유효응력 값들이 증가하였을 때 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용한 외측구조물의 유효응력 값들이 코팅을 하지 않은 챔버의 외측구조물의 유효응력 값들에 비하여 9.6%, 12.6% 감소하였다. 이 결과들은 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 연소기 챔버 외측구조물의 유효응력을 감소시켜 챔버가 고압으로 작동할 때 구조안정성을 증가시키나 Ni-Cr 코팅은 이러한 효과가 없음을 보여준다. 특히 외측구조물의 유효응력 값이 증가할수록 코팅을 하지 않은 외측구조물에 비하여 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 한 외측구조물의 유효응력 값이 더욱 감소하는 경향을 보여주었다. 따라서 재생냉각 챔버의 구조적인 안정성 측면에서 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 Ni-Cr 코팅보다 좋은 특성을 갖는다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

75톤 연소기 재생냉각 챔버에서 코팅 유무와 종류에 따른 대한 열/구조해석을 수행하여 재생냉각 챔버에 미치는 열/구조적인 영향에 대하여 고찰하였다. 열차폐 효과는 Ni-Cr 코팅에 비하여 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 매우 좋게 나타났으며, 결과적으로 냉각체널에 발생하는 변형 또한 감소하였다. 따라서 재생냉각 챔버의 열하중을 감소시키기 위해서는 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용하는 것이 더 좋으나 반복적인 열하중에 의한 코팅의 손상 정도는 추가적으로 고려해야 할 것으로 판단된다. 코팅의 종류에 따른 외측구조물의 유효응력의 변화에서 코팅을 적용하지 않은 외측구조물과 Ni-Cr 코팅을 적용한 외측구조물 모두 유효응력 값들의 차이가 없었으나 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅을 적용한 경우에는 외측구조물의 유효응력 값이 코팅을 하지 않은 외측구조물의 값보다 감소하는 경향을 보여주어 연소압력에 의한 챔버의 구조안정성 측면에서는 NiCrAlY-ZrO<sub>2</sub> 코팅이 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. DeMasi, J. T., Sheffler, K. D. and Ortiz, M., "Thermal Barrier Coating Life Prediction Model Development," NASA CR-182230, 1989
2. Nesbitt, J. A., "Thermal Modelling of Various Thermal Barrier Coating in a High Heat Flux Rocket Engine," NASA TM-102418, 1989
3. 이광진외 4인, "액체로켓엔진 연소기에 적용된 니켈-크롬 코팅의 열차폐 효율과 내구성," 항공우주기술, 제8권, 제1호, 2009, pp. 138-143
4. 임병직외 3인, "액체로켓엔진 연소기에 적용하기 위한 도금방법들의 반복 열충격 시험결과," 제9회 우주발사체 심포지움, 2008,
5. Nils, C. and Barry, L. S., "Thermal barrier coating on high temperature industrial gas turbine engines," NASA CR-135147, pp. 54 February 1977
6. James, A. N., "Thermal modeling of various thermal barrier coating in a high heat flux rocket engine," NASA TM-102418 December 1989
7. Hillery, R. V., Pilsner, B. H., McKnight, R. L., Cook, T. S. and Hartle, M. S., "Thermal barrier coating life prediction model development," final report, NASA CR-180807, November 1988
8. Hillery, R. V., Pilsner, B. H., Cook, T. S. and Kim, K. S., "Thermal barrier coating life prediction model," second annual report NASA CR-179504, april 1986,
9. Piyush, J., Sai, V. R., Hemker, K. J., "Characterization of NiCrAlY coating for a high strength," Acta materialia vol. 55, 2007, pp. 5103-5113
10. 유철성, 이동주, 최환석, "액체로켓 연소기 재생냉각 챔버 구조설계," 한국항공우주학회, 제 33 12호, 2005, pp. 109-116