

실물형 연소기의 추력측정용 노즐확장부에 대한 열/구조적 건전성 평가

김홍집* · 최환석**

Thermo-Structural Survivability Evaluation of a Thrust-Measuring Nozzle Extension in a Full-scale Combustor

Hong-Jip Kim* · Hwan-Seok Choi**

ABSTRACT

The survivability of the temporary nozzle extension for an accurate thrust measurement in a full-scaled combustor has been investigated through thermal analyses. The effects of nozzle extension materials and the thickness of thermal barrier coating (TBC) have been elucidated. It has been found that thermal survivability cannot be guaranteed without TBC. The maximum temperature of the nozzle extension decreased with increasing TBC thickness. For hot firing tests, the TBC is thought to be indispensable to the thermo-structural survivability of the nozzle extension made of steel.

초 록

정확한 추력 및 비추력 특성을 파악하기 위하여 액체로켓엔진용 연소기에 추가적으로 임시 노즐확장부를 장착함에 있어, 그 열/구조적 건전성을 파악하였다. 이 열/구조적 건전성은 재질 및 차폐막(TBC)의 두께 효과를 살펴봄으로써 검토하였다. TBC가 없는 경우에는 열/구조적 건전성을 유지할 수 없음을 파악할 수 있었다. TBC의 두께에 따라서 노즐확장부 벽면에서의 최대온도는 많이 감소하였다. 노즐확장부를 steel로 제작하는 경우에는 TBC를 적용해야만 연소시험동안 확장부의 열/구조적 건전성이 보장될 것으로 예상된다.

Key Words: Thermal Analysis(열해석), Full-scale Combustor(실물형 연소기), Nozzle Extension(노즐 확장부), Thermal Survivability(열적 건전성), Thermal Barrier Coating(열차폐코팅), Thrust(추력), Specific Impulse(비추력)

† 2009년 5월 8일 접수 ~ 2009년 10월 29일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

** 종신회원, 한국항공우주연구원 연소기팀
연락처, E-mail: khongjip@kari.re.kr

1. 서 론

액체로켓엔진용 연소기의 초기 개발과정에서

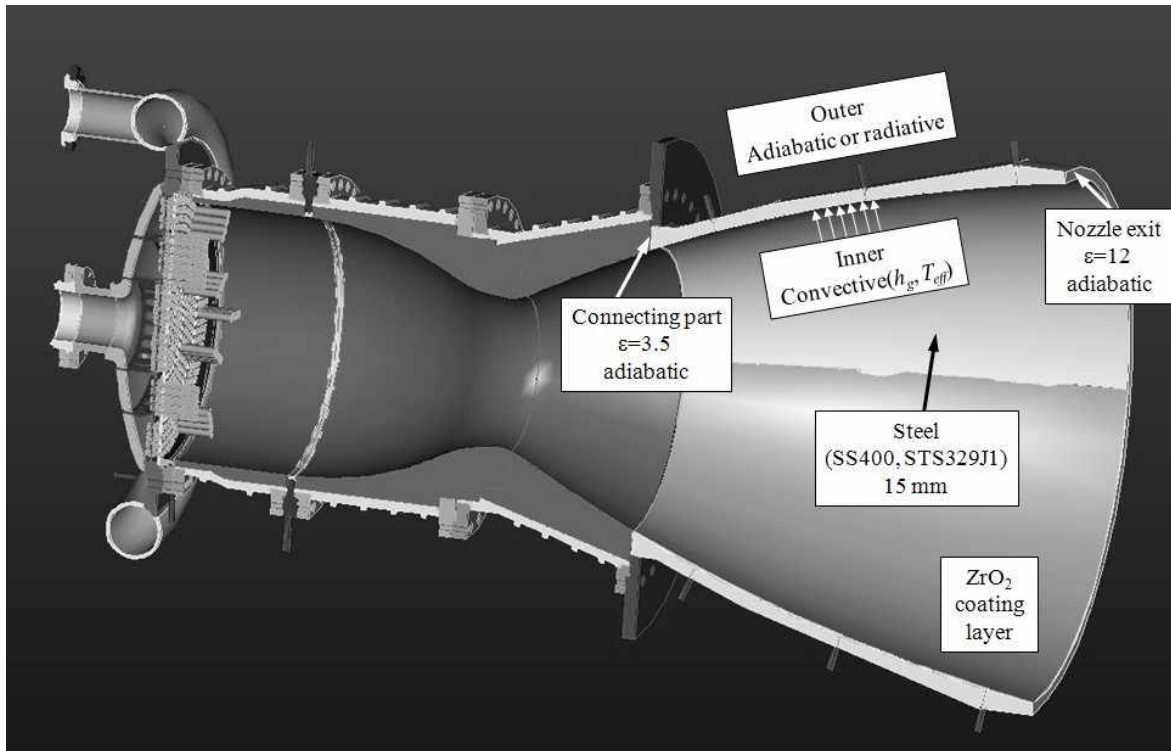


Fig. 1 A Schematic and Boundary Conditions of the Present Thermal Analysis

는 개발의 목적에 따라 비행용 최종 설계안의 일부분을 생략하기도 한다. 본 연구에서 고려한 연소기의 최종 설계안은, 노즐목의 단면적(A_{th}) 대비 축방향 위치에서의 단면적으로 정의되는 팽창비($\epsilon = A/A_{th}$)가 12인 재생냉각형 연소기이다. 하지만, 초기 개발모델에서는 먼저 분사기 헤드의 연소성능과 이에 따른 연소안정성 여부를 파악하기 위하여, Fig. 1에 나타난 바와 같이 제작이 용이한 내열재 방식을 채택하고 있다. 특히 용도, 제작비용 및 노즐 제작의 크기 제한 등을 고려하여 팽창비 3.5까지만 내열재를 이용한 heat sink 노즐을 사용한다. 이 연소기를 이용하여 연소시험을 수행하는 경우, 분사기 헤드로부터 노즐목까지의 연소 특성에 의해 결정되는 최종 설계안의 특성속도(c^*)와 분사기 헤드에 의해 결정되는 연소안정성 특성을 제대로 평가할 수는 있다. 하지만 후류에서 노즐 유동이 매우 크게 과소팽창(under-expanded)되어 팽창비 3.5인 노즐로서는 최종 설계안의 추력 및 비추력(Isp)을 정확하게 평가하기는 어렵게 된다[1-3]. 따라

서 올바른 추력 및 비추력 평가를 위한 노즐확장부의 장착이 필요하다고 하겠다.

일반적으로 연소기의 노즐목 이후의 팽창비가 큰 부분은 노즐목 근처에 비해 상대적으로 낮은 열유속을 가지므로, 비교적 단순한 냉각기구만을 고려해도 임시적인 노즐확장부의 설계가 가능하다. 이와 같은 관점에서, 초기 개발모델에서도 추가적인 노즐확장부의 장착을 통해 보다 현실적으로 추력과 비추력을 모사할 수 있도록 하는 방안이 검토되고 있다[4]. 이 경우 노즐확장부가 건전하게 작동할 수 있도록 열 및 구조/진동에 대해 검증하는 절차가 필요하다. 본 연구에서는 추가적으로 설치될 노즐확장부의 열/구조적 건전성을 파악하여 적용이 가능한 재질을 검증하고자 하였다.

2. 설계안과 해석 방법

앞서 언급한 바와 같이, 기존 연소기와 연결되는 대상 노즐확장부의 팽창비는 3.5에서 12이며,

그 재질은 구조적 강도가 우수한 STS 329J1과 일반 steel로서 수급이 용이한 SS 400을 고려하였다. 열해석은 열차폐코팅(Thermal Barrier Coating; TBC)이 포함된 노즐확장부만을 고려하였다. 이 때 기존의 연소기와 체결되기 위하여 확장부의 두께는 축방향 팽창비에 따라 변하지만, 해석의 편이를 위하여 모두 동일하게 15 mm로 가정하였다. 또한 열차폐를 위한 TBC의 두께는 0, 0.4, 0.7, 1.0 mm인 4가지를 고려하였다.

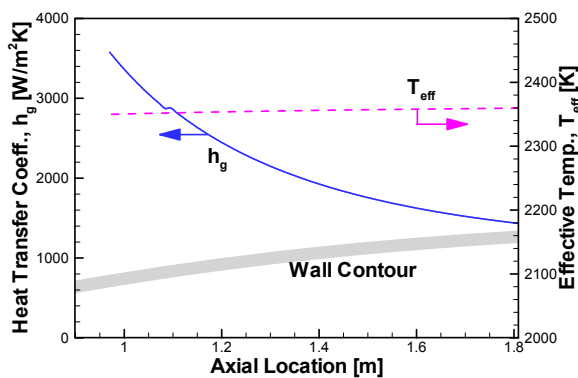


Fig. 2 Heat transfer coefficient and effective temperature at hot gas side wall

재질의 열적 건전성만을 고려하기 위하여, 식 (1)과 같이, 재질 내부에서의 열원이 없는 축대칭 비정상 열전도만을 해석하게 되며, Fluent v.6[5]를 이용하여 해석하였다. 비정상 열전도 계산에 사용한 시간 간격의 크기는, 이것이 최종해에 변화를 주지 않는 값으로서 1 msec을 사용하였다.

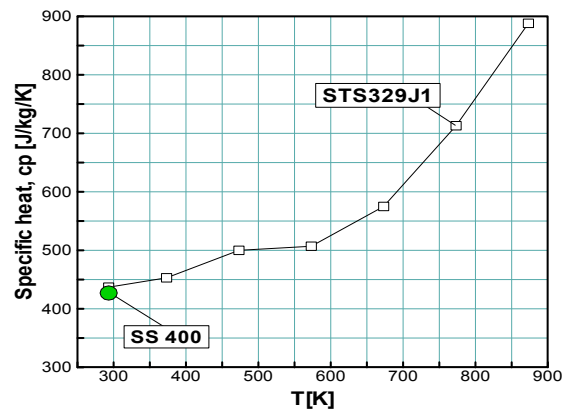
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Figure 1에서 알 수 있듯이, 연소기 노즐목부와 연결되는 왼쪽이 팽창비 3.5이며, 노즐 출구인 오른쪽이 팽창비 12이다. 연소가스와 접하는 노즐확장부 내측의 경계조건은 대류열전달 조건을 사용하였다. 이 때 연소실에서의 연소가스의 유동에 의해 부가되는 열전달계수(h_g)와 연소장에서 유호 온도(T_{eff})는 다음과 같은 Bartz 관계식[1]을 사용하였으며, Fig. 2와 같이 축방향

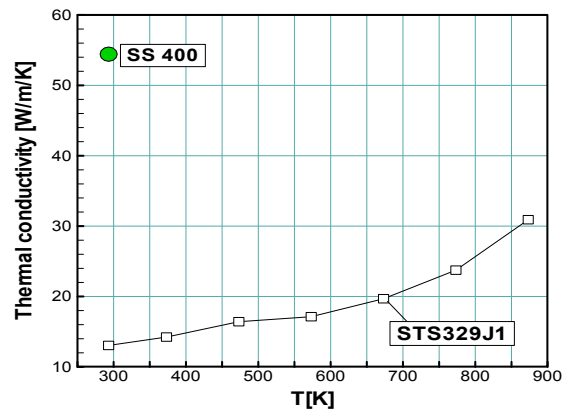
위치에 따라 profile의 형태로 부여하였다.

$$h_g = \frac{0.026}{D_t^{0.2}} \left(\frac{\mu^{0.2} C_p}{Pr^{0.6}} \right)_{ns} \left(\frac{(p_c)_{ns}}{c^*} \right)^{0.8} \times \left(\frac{D_t}{R} \right)^{0.1} \left(\frac{A_t}{A} \right)^{0.9} \sigma \quad (2)$$

여기서 D_t 는 노즐목 직경, μ 는 연소가스의 점성계수, C_p 는 연소가스의 비열, Pr 는 프란틀 수, $(p_c)_{ns}$ 는 정체 연소압, c^* 는 특성속도, R 은 곡률반경, A_t 는 노즐목의 단면적, A 는 면적, σ 는 연소실 벽면 경계층에서의 물성 보정 변수이다.



(a) specific heat, c_p



(b) thermal conductivity k

Fig. 3 Property-Variations of STS 329J1 and SS 400

노즐확장부 외벽에서는 연소실로부터의 열전달로 인하여 온도가 증가함에 따라 복사 현상이 발생할 수 있어, 단열조건과 더불어 복사열전달 경계조건도 적용하였다. 그 외 나머지 방향으로의 열전달 조건은 모두 단열조건을 사용하였다.

해석에 사용한 STS 329J1과 SS 400의 비열 및 열전도계수는 Fig. 3과 같으며, STS 329J1의 경우는 온도에 따른 물성치의 변화도 고려하였다[6]. SS 400의 경우, 본 해석에서 적용한 값은 상온에서 탄소가 0.05% 미만의 탄소강 물성치로서, 온도변화에 따라 정확하게 명시된 데이터를 구하기 힘들기 때문에 이에 따른 물성치 변화를 고려하지는 않았다.

열차폐코팅에 대한 물성치는 Table 1과 같다[6-8]. 코팅층의 열전도도는 각각 $200 \mu\text{m}$ 두께의 ZrO_2 와 bonding layer(NiCrAlY)를 평균한 값으로 재생냉각 연소기에서 냉각채널의 열해석[6]에서 사용하는 값을 적용하였다.

Table 3. Properties of Thermal Barrier Coating(TBC)

Properties	value
density [kg/m^3]	6600
specific heat, C_p [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]	502.4158
thermal conductivity [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	4.2857

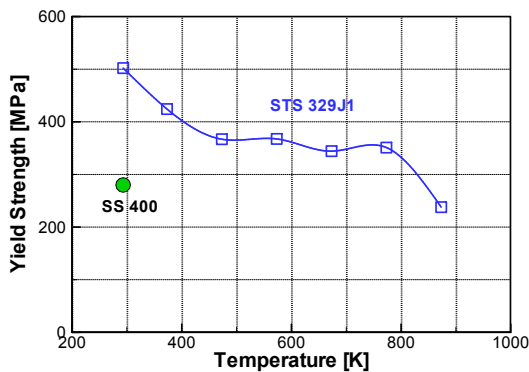


Fig. 4 Variations of 0.2%-offset Yield Strength of Steels

Figure 4는 온도에 따른 상용 steel의 0.2% offset 항복강도를 나타내는데[9], 그림에서 알 수 있듯이 온도가 800 K 정도에 이르면 항복강도의 변화가 급격하게 되어 구조적인 건전성을 보장하기 어렵게 된다. 따라서 본 해석의 결과를 분석함에 있어 800 K를 한계 온도로 설정하여, 재질의 최대온도가 그 이하가 되도록 하였다.

3. 결과

3.1 STS 329J1 노즐확장부의 경우

기존의 연소시험 결과로부터 예상해보면, 현재 임시 노즐확장부의 장착을 통해 연소시험을 수행할 경우 약 5초 이상의 연소시험 시간이면 충분히 정상 상태에 도달하여 정확한 추력 및 비추력을 평가할 수 있을 것으로 판단된다[4]. 먼저 열차폐 코팅이 없이 STS 329J1만으로 노즐확장부를 설치하였을 경우에 대한 결과를 검토해보았다. Fig. 5는 시간에 따른 노즐확장부 내외측의 최대 온도를 나타낸다. 노즐확장부 내측을 제외한 모든 벽면조건을 단일 조건으로 하였을 때의 결과이다. 시간에 따라 노즐확장부 내벽(STS inner) 중 열유속이 높은 팽창비 3.5인 쪽에서 온도가 가장 높으며 시간이 지남에 따라 빠르게 증가한다. 비록 10초가 지나도 외벽(STS outer)의 온도는 500 K를 넘지 않지만, 내벽의 최대 온도는 약 1.5초에서 약 800 K에 이르는 것으로 예측되었다. 따라서 이 결과로 볼 때 STS 329J1만으로 임시 노즐확장부를 제작하여 설치하는 경우에는 구조적 강도를 확보하지 못할 것으로 보여 열적으로 심각한 문제가 생길 것으로 예측된다.

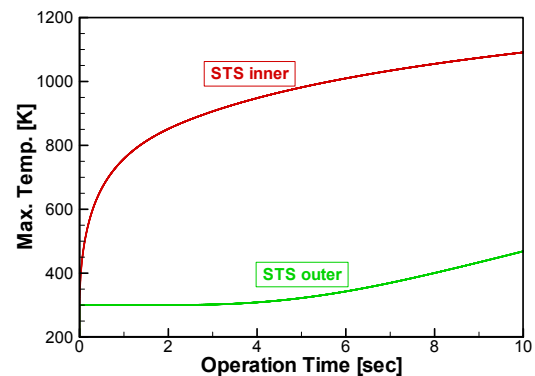


Fig. 5 Maximum Temperature Variations for STS 329J1 Wall without TBC

앞서의 결과를 바탕으로, 이번에는 STS 329J1 노즐확장부의 내벽에 1.0mm 열차폐코팅을 적용한 경우를 살펴보았다. Fig. 6에 보이는 바와 같이, 열차폐코팅의 영향으로 내벽(STS inner)의 온도가 TBC가 없는 경우와 비교해 보았을 때 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 더불어 외벽(STS

outer)의 온도도 상대적으로 낮게 예측된다. 그러므로 약 10초의 시험 시간이 지난 뒤에도 STS의 최대온도가 900 K 이하로 예측된다. 이러한 결과를 바탕으로, 열차폐코팅을 이용하여 보다 정확한 추력 측정을 위한 약 5초 이상의 시험 시간 동안 임시 노즐확장부의 구조적 건전성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

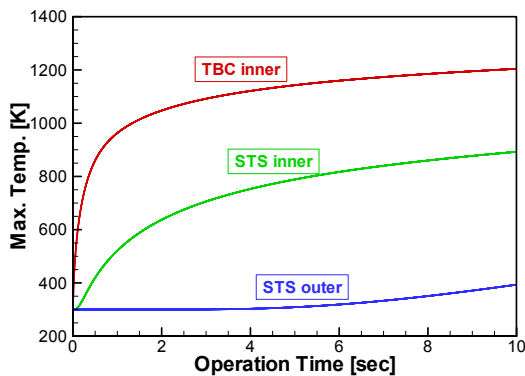


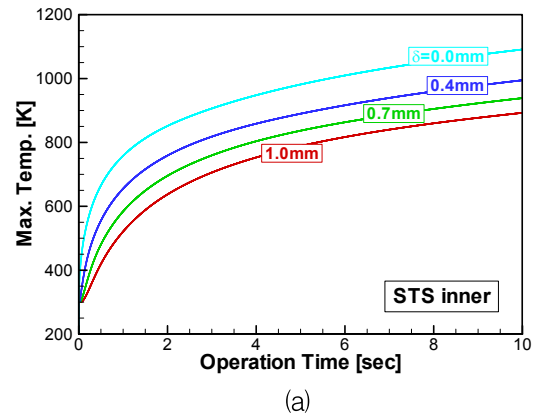
Fig. 6 Maximum Temperature Variations for STS 329J1 Wall with 1.0mm TBC

이번에는 열차폐코팅의 두께에 따른 임시 노즐확장부의 최대온도를 Fig. 7에 나타내었다. 열차폐코팅의 두께가 증가함에 따라 확장부 벽면의 최대온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 임시 노즐확장부 제작을 위한 열차폐코팅의 두께 선정에 있어 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

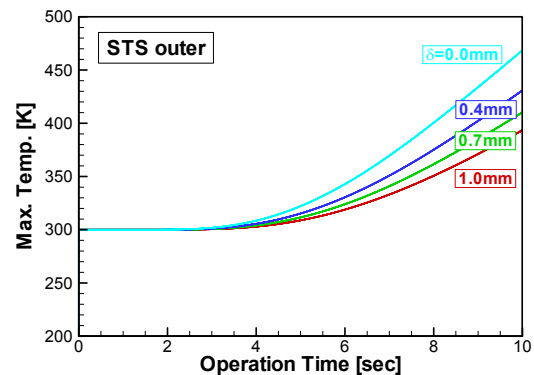
3.2 열차폐코팅을 고려한 SS 400 노즐확장부의 경우

이번에는 수급이 용이하고 비용이 저렴한 두께 15mm의 SS 400 steel로 노즐확장부를 제작하고 추가적으로 1.0mm의 열차폐코팅이 적용될 경우의 결과를, 동일한 코팅 조건에서 STS 329J1 재질의 노즐확장부 결과와 같이 Fig. 8에 도시하였다. SS 400 재질을 사용하는 경우, STS 329J1에 비하여 열전도도가 높기 때문에 내부로의 열전달이 촉진된다. 그 결과, 노즐확장부 내벽에서는 온도가 상대적으로 떨어지고, 외벽의 온도는 급격하게 상승하는 것을 알 수 있다. 따라서 STS 329J1에 비하여 노즐확장부 내부의 온도구배는 급격하지 않으며, 재료의 구조적 안정성을

확보할 수 있는 온도 범위 내에 존재한다. 최대 온도의 측면에서는 SS 400이 STS 329J1보다 더 좋은 것으로 판단된다. 또한 현재 최대 연소시험 시간으로 예정하고 있는 10 초 동안에는 800 K를 조금 상회하는 것을 Fig. 8로부터 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Effects of Thickness of Thermal Barrier Coating

본 열해석에서 적용한, 노즐확장부의 내측에서의 대류열전달 조건에서 열전달계수와 free stream에서의 유효온도[1]는 상당히 과다예측된 값으로 알려져 있다. 또한 케로신과 같은 고탄화수소계 연료를 사용하는 경우에는 연소실 벽면에서 soot 등에 의한 단열 효과도 무시할 수 없다. 따라서 본 연구에서의 결과는 보수적인 결과로 여겨질 수 있다. 이에 대한 설명은 다음 절에 연소시험 결과와의 비교를 통해 언급하였다.

위의 결과를 바탕으로 요약해보면, SS 400을

사용하는 경우, 노즐확장부 외벽의 온도는 증가하지만 국소적인 최대온도는 감소하는 것으로 예측되었다. 따라서 현재의 설계안으로 제작하더라도 심각한 열적인 문제를 야기하지는 않을 것으로 예상된다. 다만 본 해석으로는 여러차례의 연소시험으로 인하여 발생할 열적 피로 현상을 제대로 예측하기는 힘들기 때문에 보다 안전한 노즐확장부의 운용을 위하여 연소시험시간을 줄일 필요성은 있다고 하겠다.

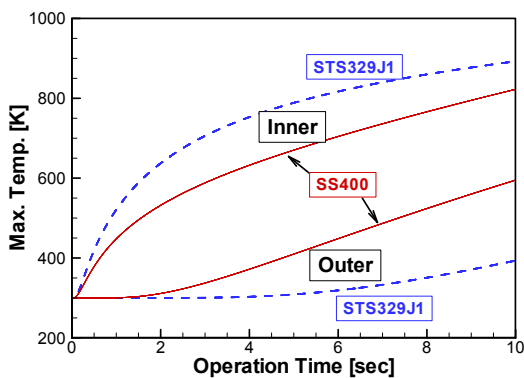


Fig. 8 Maximum Temperature Variations for SS400 Wall with 1.0mm TBC

3.3 연소시험을 통한 검증

현재 항우연 시험설비의 한계로 인하여, SS 400으로 제작된 임시 노즐확장부를 장착한 연소기의 연소시험은 설계 압력의 50%인 30 bar에서 수행되었다. Fig. 9는 임시 노즐확장부에 온도센서를 부착하여 계측한 시험결과를 열해석 결과와 비교하여 도시한 그림이다. 시간이 경과함에 따라 계측값과 해석 결과와의 편차가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한대로 연소실 벽면에 증착되는 soot 등의 효과로 여겨진다. 대체로 케로신과 같은 고탄화수소계 연료를 사용하는 경우 soot가 상당히 많이 발생하며, 연소시험이 진행되는 동안 생성과 쓸러나감이 반복된다. 이 soot는 다음과 같이 연소실 벽면에서 일종의 열저항으로 작용하여 연소실 벽면의 온도 상승을 막는 것으로 알려져 있다.

$$\frac{\delta}{k} = A e^{-0.48 - 0.000726G} \quad (3)$$

여기서 k 는 열전도도, δ 는 soot층의 두께, G 는 연소실에서의 질량유속(mass flux)이다. 실험적으로 결정되는 계수인 A 는 연구자들에 따라 큰 편차를 보이고 있으며[1,10], 본 연구에서는 Rocketdyne에서 적용한 값(10^{-2})을 사용하였다[10]. Soot의 효과를 고려하지 않으면, 실험결과와의 온도 편차가 시간에 따라 매우 증가하나, soot의 효과를 고려하게 되면 실험에서의 결과와 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 이러한 경향으로부터, 본 연구에서 채택한 열해석 방법은 보수적인 설계 도구로서 타당함을 확인할 수 있었다. 추후 보다 엄밀한 해석을 위하여, soot 등의 효과를 고려하고 내부 연소유동장과도 결합된 열유동 해석이 필요하다고 할 수 있겠다.

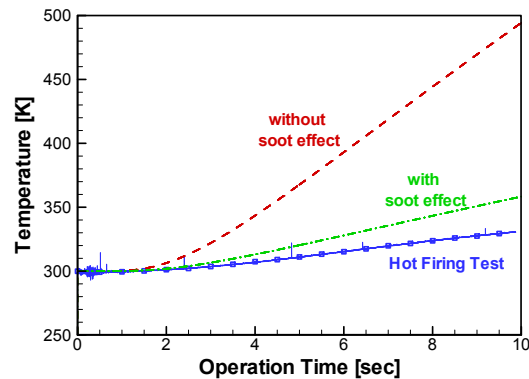


Fig. 9 Comparison of Temperature Trace at Temporary Nozzle Extension; Hot Firing Test and Analysis.

4. 결론

로켓엔진 연소기의 연소시험에서 보다 정확한 추력/비추력을 얻기 위하여 고려되는 임시 노즐확장부의 열/구조적인 건전성을 확보하기 위한 비정상 열해석을 수행하였다. 노즐확장부의 재질 및 열차폐코팅의 두께 효과를 검토하였다. 재료는 구조적 강도가 우수한 STS 329J1과 상대적으로 수급이 용이하고 저렴한 SS 400을 대상으로

하였다.

열차폐코팅이 없는 경우에는, 구조적 강도가 우수한 STS 329J1로도 구조적 건전성을 확보할 수 없음을 파악할 수 있었다. 따라서 노즐확장부를 steel로 제작하는 경우, 열차폐코팅은 반드시 필요한 것으로 파악되었다. 열차폐코팅의 두께에 따라서 시간에 따른 재질의 최대온도를 살펴보았다. 차폐막의 영향으로 STS 329J1 내벽의 최대온도는 상대적으로 많이 낮아짐을 확인하였다. 이러한 결과들은 향후 연소시험 결과와의 비교를 통하여 신속하게 향후 시험에서의 임시 노즐확장부의 열/구조적 건전성 여부를 평가할 수 있을 것으로 예상된다. SS 400을 사용하는 경우는 STS 329J1에 비하여 재질 내부에서의 열전달이 활발해져, 내벽의 최대온도는 감소하고 외벽의 최대온도는 증가하였다. 연소실 벽면에 침착되는 soot에 의한 열저항 효과를 고려함으로써, 보다 개선된 예측결과를 얻을 수 있었다. 이를 통하여 본 연구에서 채택한 열/구조적 건전성 파악을 위한 해석 방법이 보수적인 설계 도구로서 타당함을 확인할 수 있었다. 본 결과는 열적 피로 현상을 모사하지 못하므로, 여러 차례의 누적 사용으로 인한 구조적 건전성의 상실을 피하기 위해서는 보다 세심한 주의가 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

1. D.K. Huzel and D. Huang, Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines, AIAA Inc., 1992.
2. G.P. Sutton and D.M. Ross, Rocket Propulsion Elements, John Wiley & Sons Inc; 5th edition, 1986.
3. G.P. Sutton, History of Liquid Propellant Rocket Engines, American Institute of Astronautics and Aeronautics, 2005.
4. 한영민, 김종규, 이광진, 김성구, 김홍집, "75톤급 1단 엔진 비행용 연소기 PDR용 설계 보고서," 2008.
5. Fluent User's Manual, Version 6
6. 김홍집, "75톤급 1단 재생냉각 연소기 열수력 해석," KARI-CCT-TM-2008-020, 2008.
7. 구성모, 김길무, "NiCoCrAlY 및 NiAl bond coat를 사용한 Theraml Barrier Coating의 고온 안정성에 미치는 Pt의 영향," 한국재료학회지 15권 6호, 2005
8. 정규익외 3인, "열차폐 코팅을 위한 지르코니아계 세라믹 소재의 기계적 특성," 한국세라믹학회지 43권 8호, 2006
9. 류철성, 김홍집, 최환석, "재생냉각형 가스발생기 챔버 구조해석," 대한기계학회지, A권, 31권 10호, 2007, pp.1047~1053.
10. A. Kumakawa, M. Sasaki, K. Sato, H. Tamura, F. Ono, H. Sakamoto and N. Yatsuyanagi, "Hot Gas Side Heat Transfer Characteristics of LOx/H₂ and LOx/HC Type Propellants," NAL-TR-1062T, National Aerospace Lab., 1990.