

적외선 윈도우용 가스식 냉각장치 해석 기법

Analysis of Gas Cooling System for IR Window

현 철 봉*	구 남 서*	김 재 영**	이 호 성**
Cheol-Bong Hyun	Nam-Seo Goo	Jae-Young Kim	Ho-Sung Lee

Abstract

In this paper, a post-analysis of cooling system for infrared(IR) window was performed based on heating experiment of IR window system. We applied the same experimental conditions to analysis, and then validated the analysis technique by comparing numerical and experimental results. For an analysis software, we used a professional heat/fluid analysis program and the numerical and experimental results were in fairly good agreement. We investigated the effect of thermal transfer between the frame and IR window and also a cooling efficiency between fluid and structure in order to determine the proper parameters for the analysis. In this study, 100 % thermal transfer between the frame and IR window and 30 % cooling efficiency between fluid and structure have been proposed, which can be used in the future conceptual design and analysis of similar IR windows.

Keywords : Heating Experiment(가열시험), Analysis Technique(해석기법), Thermal Conductivity(열전도), Cooling Efficiency(냉각효율)

1. 서론

일반적으로 로켓의 전두부에 위치하는 적외선 추적 시스템을 위하여 적외선(IR : Infrared) 윈도우를 설치하는데, 외부의 공력가열로부터 내부의 시스템을 잘 보호하고 적외선이 잘 통과할 수 있도록 설계하여야 한다. 로켓의 속도가 빨라지면서 공력 가열에 의한 급격한 온도 상승 때문에 적외선 윈도우를 통과하는 적외선이 왜곡되어 목표를 부정확하게 탐지하는 결과를

초래하거나 열 충격으로 인해 윈도우의 강도 및 경도의 저하를 가져올 수 있다. 그러므로 이러한 현상으로부터 윈도우 내부에 있는 적외선 센서를 보호하기 위하여 윈도우를 강제적으로 냉각할 필요가 있다^[1,2].

Fig. 1에 윈도우 냉각 시스템을 개략적으로 나타내었다. 적외선 윈도우 냉각 시스템은 기체 외피 장착을 위한 프레임과 적외선 센서 보호를 위한 윈도우로 구성된다. 공력가열에 의하여 외부에서 유입되는 열로부터 적외선 감지 장치를 보호하기 위하여 냉각제를 흘려보내는 냉각 유로를 프레임과 윈도우 내부에 설치하여 상온의 기체나 액체를 유로에 흘려보내 윈도우를 냉각시키는데 본 연구에서는 고압의 질소 가스(N₂)를 냉각제로 선택하였다^[3,4].

본 연구의 주요한 목표는 해석 결과와 실험 결과

† 2012년 1월 3일 접수~2012년 2월 10일 게재승인

* 건국대학교(Konkuk University)

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 구남서(nsgoo@konkuk.ac.kr)

를 비교하여 최적의 해석 기법을 정립하고자 하는 것이다.

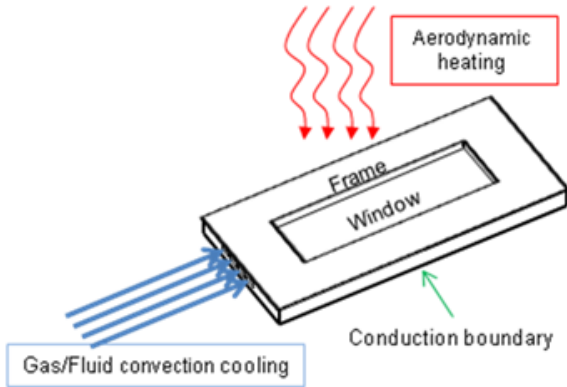


Fig. 1. Window cooling system for IR sensor

2. 이론적 배경

공력가열을 받는 IR 윈도우 냉각 시스템에서는 시스템을 이루는 구조부와 냉각 유체 사이의 복잡한 열전달 현상이 일어난다. 이러한 복잡한 열전달 문제를 설명하기 위하여 적절한 물리적 현상과 그 현상에 대한 지배 방정식이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 열전도, 대류 열전달, 그리고 이상 기체에 대한 방정식이 고려되었다.

IR 윈도우에서 발생하는 열전달은 개략적으로 윈도우와 대기와의 접촉에 따른 대류 열전달과 구조물 내부에서 발생하는 열전도가 있다. 대기와 접촉되는 구조물 표면에는 빠른 비행 속도에 의한 공력가열이 생기게 되어 결과적으로 접촉 표면의 온도가 상승하게 되고 열전도 현상에 의해 열이 점차 구조의 내부까지 전도된다⁵⁾. 윈도우 내부에 설치되어 있는 유동채널을 흐르는 냉각 유체와의 접촉면에서는 유동채널 표면과 유체 사이의 대류 열전달로 인하여 구조물의 열이 냉각유체에 전달되며, IR 윈도우가 냉각된다. 이러한 현상들을 수학적으로 표현하기 위해 아래와 같은 관계식들을 사용한다.

일반적인 대류 열전달에 대해서는 다음과 같은 뉴턴의 냉각 법칙이 적용된다⁶⁾.

$$q = \frac{Q}{A} = h(T_w - T_\infty) \quad (1)$$

여기에서, q 는 열플럭스(W/m^2), Q 는 시간당 열 유동(W), A 는 가열면적(m^2), h 는 대류 열전달계수(W/m^2K), 그리고 T_w 와 T_∞ 는 각각 유체와의 접촉면과 공기 혹은 유체의 온도(K)이다.

열전도 관계식에 대해서는 아래와 같이 푸리에법칙이 적용된다⁶⁾.

$$q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

여기에서, k 는 열전도도이고($W/m \cdot K$), $\Delta T/\Delta x$ 는 길이 x 방향으로의 온도구배(K/m)이다.

유동채널 내부에 흐르는 냉각제로는 유체 또는 가스가 사용되는데 본 연구에서는 냉각제로 질소가스를 채택하였다. 유동채널의 입구에 고압을 가하는데, 입구와 출구 사이에 존재하는 압력 차이에 의해 가스가 고속으로 흘러 전체 구조물을 냉각시킨다. 본 연구에서는 유동채널을 흐르는 질소가스를 이상기체로 가정하며 다음과 같은 이상 기체 상태 방정식이 질소가스의 유동을 해석하는데 적용된다⁷⁾.

$$PV = nRT \quad (3)$$

여기에서, P 는 절대압력(N/m^2), V 는 부피(m^3), n 는 기체의 몰수, R 는 기체상수($J/mol \cdot K$), 그리고 T 는 절대 온도(K)이다.

3. 해석을 위한 모델링

본 연구에서는 가열 실험에서 사용된 적외선 윈도우 냉각 시스템 실험 장치를 모델링하여 열전달 문제를 해석하고 그 결과를 실험과 비교하여 해석기법을 정립하였다. Fig. 2에는 개념 설계 모델을 검증하기 위한 모델링을 나타내었는데 이는 윈도우, 프레임 및 질소 가스 유입부로 구성되어 있다. 질소 가스 유입부(Front Extension)는 노즐형상으로 기체가 통과하면서 속도가 증가되고 윈도우를 통과한 유동은 방출부(Back Extension)에서 대기압으로 압력이 줄어든다. 실제 윈도우는 샤프라이어를 사용할 예정이지만 실험 모델에서는 스테인레스 강(SUS304)을 사용하였다. 각 재료의 물성치를 Table 1에 정리하였다. 실제로는 재료의 물성치가 온도에 따라 변하지만 본 연구에서는 개념

설계를 위한 해석이므로 상온인 25 °C에서의 재료의 물성치를 사용하였다.

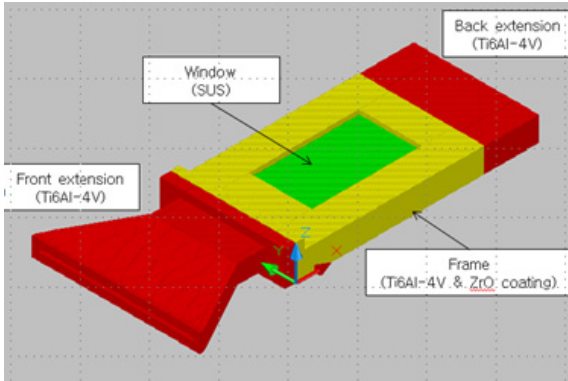


Fig. 2. Modeling of IR sensor window assembly

Table 1. Material properties used in the design

Materials	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/m.C)	Specific heat (J/kg.C)
SUS304	7729	15	435
Ti6Al-4V	4429	7.27	557
ZrO	5815	1.5663	540.3

적외선 윈도우는 장착 예정인 로켓의 크기 및 적외선 감지부의 크기를 고려하여 길이 80 mm, 폭 50 mm로 결정하였다. 윈도우 내부에는 열전달 해석과 구조 해석 및 윈도우 제작 가능성, 지지대(Supporter)에 의한 적외선 차단율을 고려하여 단면적이 11.25 mm × 2 mm인 유동 채널을 4개 설치하였다. Fig. 3에 개념 설계된 적외선 윈도우 단면의 형상 및 치수를 나타내었다⁸⁾.

해석에서는 구조 부분과 유체 부분을 나누어 모델링하였는데, 구조 부분은 상세한 해석을 위하여 238,986개의 절점을 가진 유한차분 모델을 만들었고, 유체 부분은 집중계법(Lumped Parameter Method)을 적용하였다. Fig. 4에는 유체 부분의 모델링을 나타내었는데 고압 탱크에서 가스가 분출되는 노즐 부분은 탱크에서 공급되는 압력을 충분히 감소시켜 냉각제 압력을 일정 압력 이하로 유지하기 위하여 오리피스스를 사용하였으며⁹⁾, 유동 채널이 네 개로 갈라지도록 모델링하였고, 마지막 부분은 plenum 조건으로 대기로 분출되는 것을

모사하였다. 이 때 유체가 대기 중으로 분출될 때 생기는 압력 강하를 고려하기 위하여 동압에 대한 압력 강하로 정의되는 손실 계수(Loss Factor)를 1.5로 정의하였다.

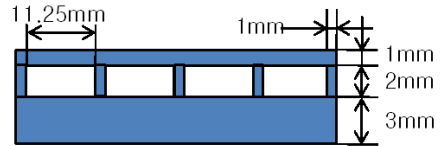


Fig. 3. Cross-sectional view of window part

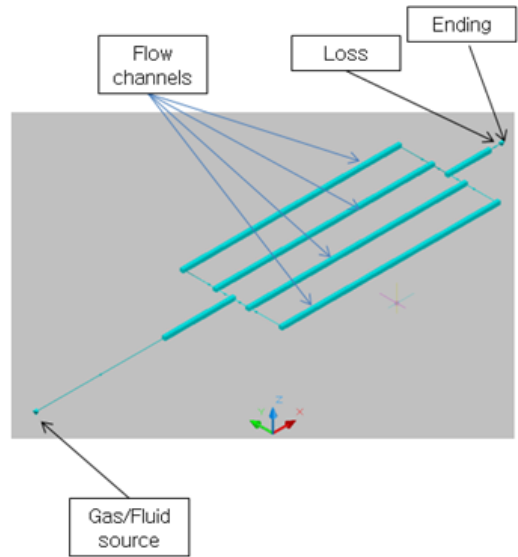


Fig. 4. Lumped parameter fluid model

4. 가열시험 결과 요약

Fig. 5에 IR 윈도우 시스템을 가열하기 위한 시험 장치의 개략도를 나타내었다. IR 윈도우 시스템 윗면에 적외선 복사 가열램프를 이용하여 열을 가하고 질소 가스를 윈도우 내부에 흘려보내면서 IR 윈도우를 냉각시킨다.

이 때 실험 치구 윗면과 아랫면에 열전대를 Fig. 6과 같이 설치하여 온도를 실시간으로 계측하였다. TC1부터 TC7까지는 윈도우의 윗면에 설치된 열전대, TC8과 TC9는 프레임 윗면에 설치된 열전대, TC10부터 TC12까지는 윈도우의 밑면에 설치된 열전대이다. 온도를 계측하는 열전대 외에 유량 게이지를 설치하여 윈도우 냉각에 사용되는 질소 가스의 양을 계측하였다.

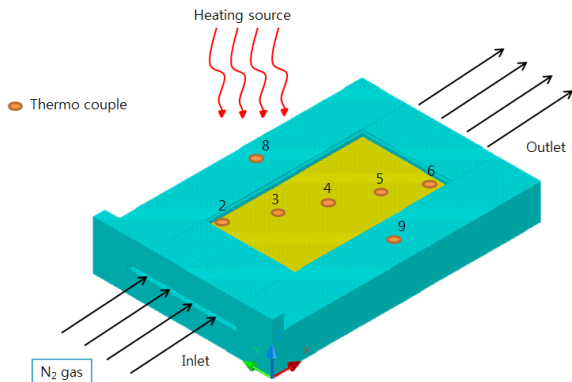


Fig. 5. Experimental set-up to retrieve temperature from window assembly

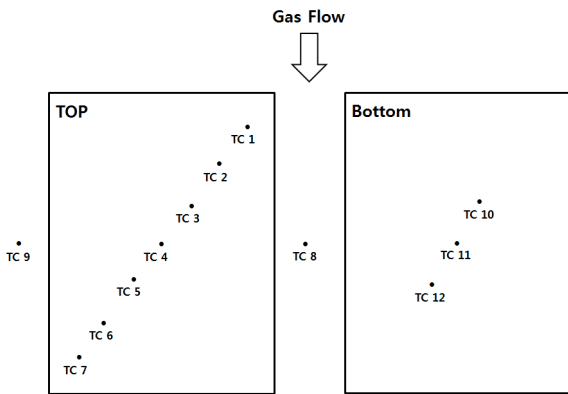


Fig. 6. Position of thermocouple on the window assembly

Table 2. Conditions for experiment and analysis

	hf30fr01	hf50fr01
열 플럭스(W/cm ²)	9.56	26.45
유량(kg/s)	0.083	0.108

본 연구에서는 hf30fr01과 hf50fr01 두 가지 조건을 적용하여 가열시험결과와 해석결과를 비교하였다. 여기서 hf30과 hf50은 복사 가열램프의 가열 량에 따라 각각 최대 가열량의 30 %, 50 %의 열을 가했다는 것을 의미하고 fr01은 0.1 kg/s 유량의 질소가스를 흘려보냈다는 것을 의미하는데 이것은 목표치이고 실제로는 유량 계측을 통하여 얻은 질소가스 유량을 해석의 조건으로 사용하였다. Table 2에 두 가지 경우에 열량 계

이기로 계측한 열 플럭스와 홀러 보낸 질소 가스의 유량을 정리하였다.

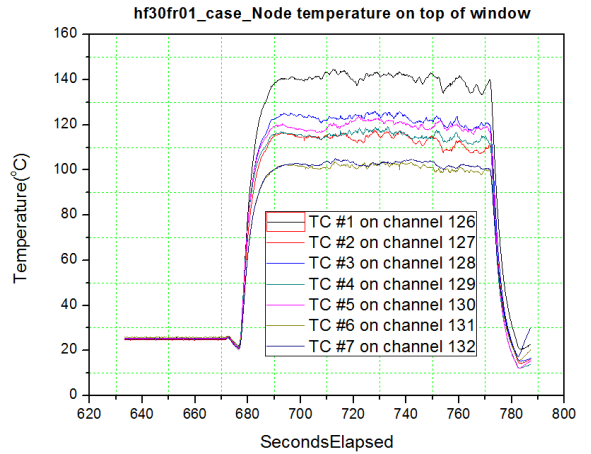


Fig. 7. Temperature change on the top surface of window

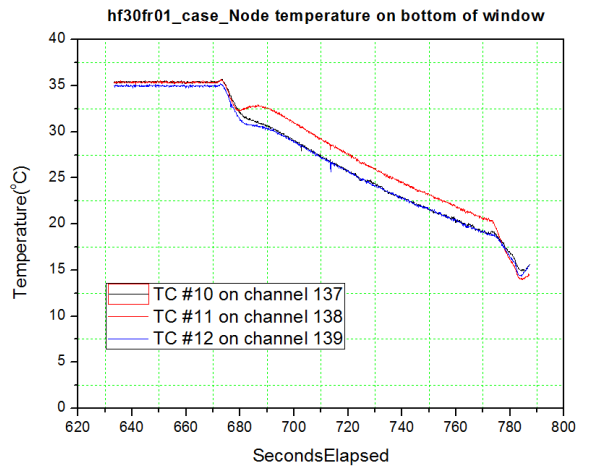


Fig. 8. Temperature change on the bottom surface of window

Fig. 7에서 9가지 예서는 hf30fr01 경우에 실험에서의 각 부위의 온도 계측 결과를 나타내었다. 그림에서 보면 전체 구조 모델에서 윗면과 밑면의 초기온도가 각각 25 °C와 35 °C 가량으로 10 °C 차이가 나타났는데 이는 본 실험에 앞서 수행한 예비실험 때문에 상승한 온도가 냉각과정에서 밑면이 윗면보다 덜 냉각되었기 때문이다. 시간의 제약 때문에 냉각 채널이 완전히 식기를 기다릴 수 없었기 때문에 균일 온도가

안 된 상태에서 실험을 다시 진행하였기 때문에 생긴 오차이다.

Fig. 7의 윈도우 윗면의 온도 변화를 보면 빠르게 정상 상태로 수렴함을 확인할 수 있다. 이와는 달리 Fig. 8의 결과에서는 윈도우 밑면이 가열되지 않아 구조물 내부의 열전도도보다 냉각의 영향을 더 크게 받으므로 온도가 계속 낮아지는 현상이 나타났다. Fig. 9에서는 프레임 윗면의 경우 가열될 때 윈도우보다 냉각되는 속도가 느리므로 정상상태에 도달하지 못 한 채로 실험이 마친 것으로 나타났다. 실험을 계속 진행하였다 면 정상 상태에 도달하였을 것으로 생각된다.

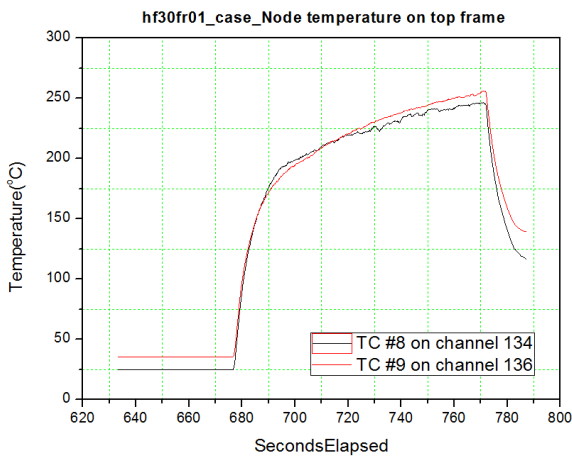


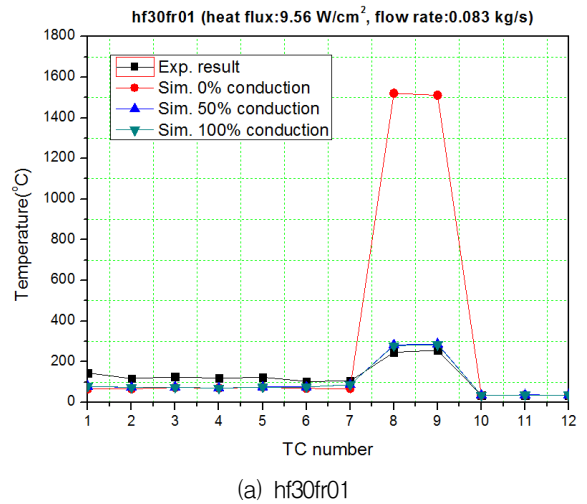
Fig. 9. Temperature change of top surface of frame

5. 가열시험 결과와 해석과의 비교를 통한 해석기법 최적화

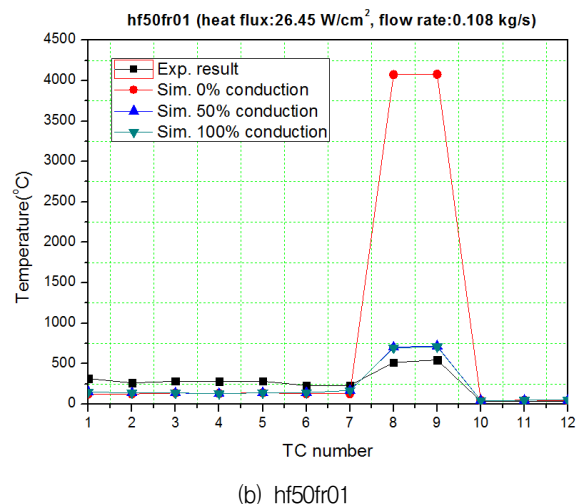
Table 2의 열량 및 유량 조건을 사용하여 해석을 수행한 결과 가열 실험 결과와 차이를 나타내었다. 이러한 차이를 나타내는 이유를 찾기 위하여 두 가지 방법으로 접근을 시도하였다. 첫 번째는 프레임과 윈도우 사이의 열전달의 영향을 분석하였고, 두 번째는 냉각 유로의 냉각 효율의 영향을 분석하였다.

먼저 두 가지 경우에 대하여 프레임과 윈도우 사이의 열전도도를 0%, 50%, 100%로 달리 하면서 해석을 수행하였다. 즉 해석모델에서 프레임과 윈도우 사이에 적용되는 열전도도(k , $W/m \cdot K$)를 티타늄 열전도도의 0%, 50%, 100%를 적용시켰다. Fig. 10에 그 결과를 나타내었다. 0%는 프레임과 윈도우 사이가 단열되었

다는 뜻이고, 100%는 완전한 열전달이 이루어진다는 뜻이다. 해석 결과에 보이듯이 프레임과 윈도우 사이의 열전달의 차이는 완전 단열을 가정하지 않는 한 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 100%의 열전달을 가정하였다. 그림에서 0%의 열전도도, 즉 프레임과 윈도우 사이가 단열되었을 때 프레임 윗부분의 온도가 매우 높게 올라가는 현상을 볼 수 있는데 이는 열이 프레임에서 방출되는 통로가 없어 축적되기 때문에 온도가 비현실적으로 올라가는 것으로 해석 되었다.



(a) hf30fr01



(b) hf50fr01

Fig. 10. Experiment vs. steady-state simulation temperature distribution for different conductivities between frame and window

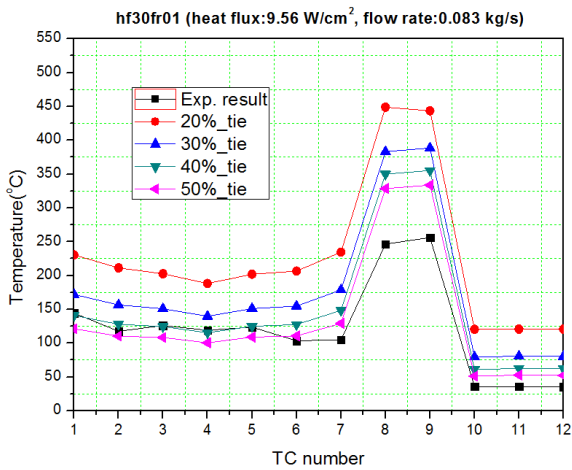


Fig. 11. Experiment vs. steady-state simulation temperature distribution for different tie efficiencies in hf30fr01 case

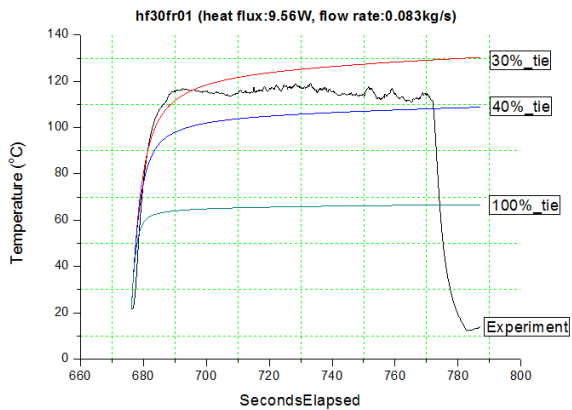


Fig. 12. Transient analysis result of TC#4 in hf30fr01 case

다음으로 두 가지 경우에 대하여 냉각 유로의 냉각 효율을 달리 하면서 해석을 수행하였다. 냉각 유로에 흐르는 유체와 유로 벽면은 Tie 요소로 모델링 되며, 이 요소가 유체와 구조 사이의 열전달을 해석하는 것이다. Tie 요소에는 Multiplier라는 계수가 있는데 이는 대류 열전달 계수의 환산 계수로써 냉각 채널의 전체 냉각 효율과 관련이 있다. 본 연구에서는 실험과 잘 일치하는 냉각효율을 구하기 위하여 Multiplier를 변경시켜 가면서 실험 결과와 비교하였다. Fig. 11과 12는 각각 hf30fr01인 경우에 대한 정상상태에서의 온도분포와 윈도우 윗면의 맨 가운데 절점, 즉 TC4에

대한 시간에 따른 과도해석에서의 온도변화를 나타내었다.

Fig. 13과 14는 각각 hf50fr01인 경우에 대한 정상상태에서의 온도분포와 TC4에 대한 시간에 따른 온도변화를 나타내었다. 두 가지 경우의 정상상태에서의 해석 결과를 보면 일정한 냉각 효율에도 불구하고 TC8과 TC9, 즉 프레임 윗부분의 온도차이가 여전히 크다. 그러나 본 연구에서는 윈도우 부분을 주로 고려하므로 윈도우 윗면의 온도 분포를 고려하여 가열 실험과의 차이가 평균적으로 가장 작은 효율을 선택하였다.

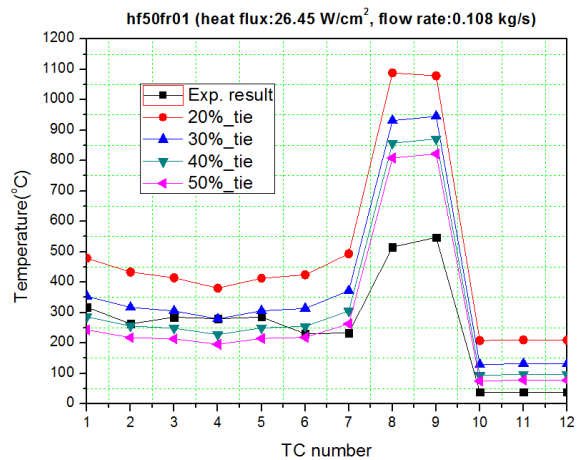


Fig. 13. Experiment vs. steady-state simulation temperature distribution for different tie efficiencies in hf50fr01 case

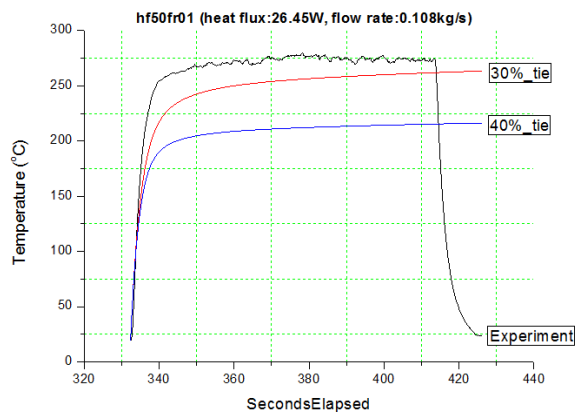
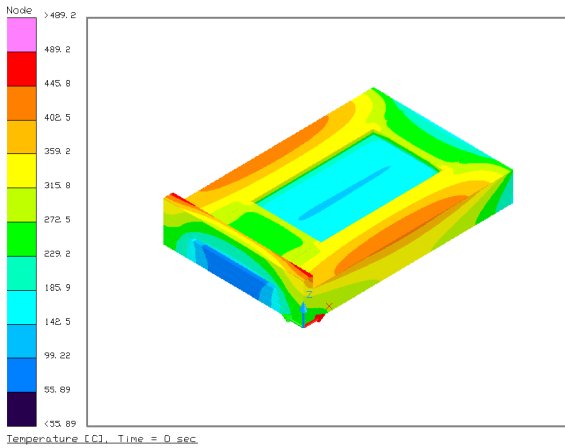
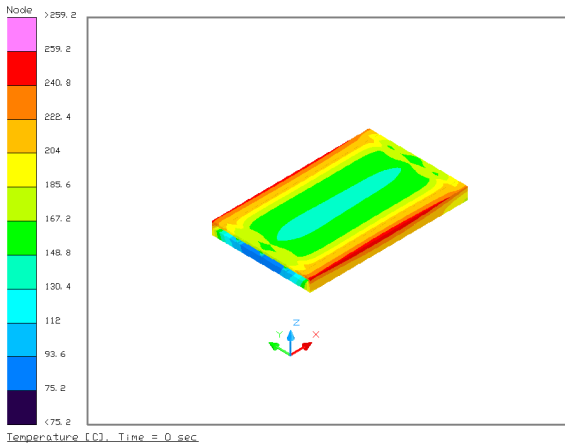


Fig. 14. Transient analysis result for TC#4 in hf50fr01 case



(a) Assembly parts



(b) Window part

Fig. 15. 3D view of steady-state simulation temperature distribution in hf30fr01 case

해석 결과 가열 량과 냉각 유체의 양에 따라 차이가 있지만, 전체적인 온도 분포의 차이점으로 봤을 때는 30 %의 냉각 효율을 사용했을 때가 가열 실험과 가장 근접함이 확인되었다. 비록 hf30fr01인 경우는 약 25 %의 냉각 효율이 가장 적합하고 hf50fr01인 경우는 35 %가 가장 적합하지만 앞으로 적용하게 되는 다양한 조건과 시뮬레이션에 걸리는 시간, 그리고 실험 결과가 없는 실제 비행 해석 등과 같은 경우를 고려하여 앞으로의 해석에서는 평균적으로 오차가 가장 작은 값, 즉 30 %의 냉각 효율을 제안하였다. 또한 본 연구는 적외선 윈도우용 냉각 장치를 개념 설계할 때 필요

한 해석 기술을 정립하기 위한 것이기 때문에 근사적인 값을 제안하였다.

Fig. 15에서는 hf30fr01 경우에 30 %의 냉각효율을 적용하였을 때 전체 모델과 윈도우 부분에 대한 정상 상태에서의 온도분포를 나타내었다.

그림에서 나타난 바와 같이 윈도우와 프레임 전체 부분에서 양쪽으로 가면서 온도가 상승하는 경향이 있다. 이는 윈도우 양쪽이 프레임과의 접촉 부분으로 프레임의 높은 온도가 윈도우 양쪽에 전도 되어 나타나는 현상으로 판단된다. 프레임에서는 최고 온도가 489 °C까지 올라갔고 윈도우에서는 259 °C까지 올라갔다. hf50fr01인 경우에도 온도만 더 높을 뿐 위와 같은 온도분포를 가졌다.

윈도우 윗면의 불균일한 온도분포 즉 유로사이의 온도구배는 열팽창을 일으키거나 적외선을 투과시킬 때 불균일한 굴절률을 일으켜 투과되는 적외선의 질을 저하시킴으로 하여 잘못된 목표를 탐지하는 결과를 초래할 수 있다¹⁰⁾. 그러므로 앞으로의 설계에서는 유로의 갯수 또는 형상을 변화시켜 유로사이의 온도구배를 감소시킬 필요가 있다.

6. 요소 갯수의 효과

Fig. 12와 Fig. 14에서 실험 결과를 보면 빠른 시간 내에 정상상태로 수렴함을 알 수 있다. 이에 비하여 해석 결과는 30 %의 냉각효율을 적용시켰을 때 정상상태로 수렴하는 시간이 실험 결과 보다 좀 더 길다. 즉 정상상태로 수렴하기 전 기간의 온도 상승 속도가 가열 실험과 다르다. 이는 윈도우 윗면의 두께 방향으로의 요소(Element) 갯수가 충분하지 않아 정확한 해석에 영향을 준 것이라 판단되어 이를 확인하기 위하여 윈도우 윗부분에 있는 요소를 두께 방향으로 두 배로 증가시켜 해석하였다.

Fig. 16은 hf30fr01 경우에 실험 결과와 초기 모델에 30 %의 냉각효율을 적용했을 때의 과도해석 결과, 그리고 요소 갯수를 증가한 후의 모델에 30 %의 냉각효율을 적용했을 때의 과도해석 결과를 서로 비교한 것을 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 요소 갯수를 증가시킨 후의 해석 결과가 실험 결과와 근접한 온도 상승 속도로 정상상태로 수렴하였다. 비록 요소 갯수를 증가하였을 때에 실험과의 온도차이가 조금 더 크지만 본 연구의

과도해석에서는 실험과 해석에서 발생하는 온도차이보다 온도의 상승 속도가 중요하기 때문에 윈도우 두께 방향으로의 요소 갯수를 증가시키는 것이 더 타당하다고 판단된다.

면 실험과 잘 일치한다는 것을 밝혔고 윈도우의 해석 모델을 만들 때 윈도우 윗부분을 두께 방향으로 충분한 숫자의 요소를 만들어야 한다는 것을 제안하였다.

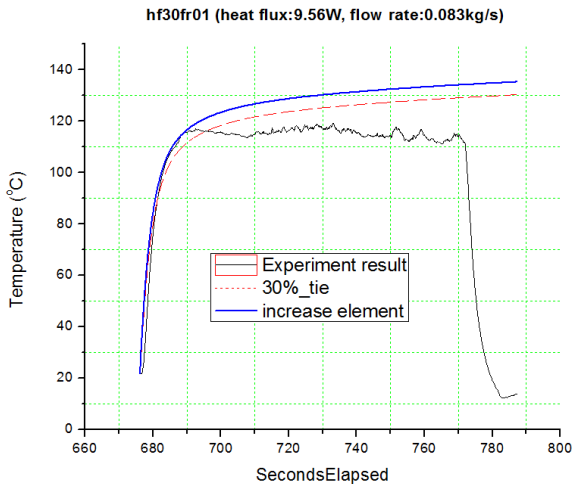


Fig. 16. Comparison of experimental and simulation result after increasing element number in hf30fr01 case

7. 결론

본 연구에서는 IR 윈도우 시스템의 가열 시험 결과를 기반으로 개념 설계용 IR 윈도우 시스템 해석 절차를 정립하였다. 프레임과 윈도우 사이의 열전달은 해석 결과에 영향을 미치지 않았으며, 냉각 유체와 유로 사이의 열전달을 모델링하는 Tie요소의 냉각 효율이 전체 해석에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 그리고 윈도우 윗부분 두께 방향으로의 요소 갯수도 결과에 일정한 영향을 준다는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 향후 해석에서 냉각 효율을 30 %로 사용하

References

- [1] Lee M. Goldman, Steven R. Collins, David B. James, David M. Blanchard, Steven Wirth, Internally Fluid Cooled Window Assembly, US Patent, US 2002/0109038, 2002. 8.
- [2] Stefan R. Korber, Coupled Aerokinetic Heating of Missile Structures at High Velocities, Missile Aerodynamics, 1998.
- [3] Hodge R. A., Murray A. L., Street T. A., Window Cooling Technology Program, AIAA, 1992.
- [4] Wojciechowski C. J. et al., Internally Cooled Window for Endoatmospheric Homing, AIAA, 1993.
- [5] Earl A. Thornton, Thermal Structures for Aerospace Applications, AIAA, 1996.
- [6] John H. Lienhard IV, A Heat Transfer Text Book, Third Edition, Phlogiston Press, 2003.
- [7] Yunus A. Cengel, Micheal A. Boles, Thermodynamics : An Engineering Approach, Fifth Edition, 2006.
- [8] M Merrigan and G. A. Wurden, Tokamak Physics Experiment : Diagnostic Windows Study, Los Alamos National Lab., 1995.
- [9] Youn-Jung Park, A Flow Channel Design on IR Window Cooling Device, Journal of Korea Aerospace, 2011.
- [10] Liu Jiaguo, Li Lin, Hu Xinqi, Yu Xin, Study of Wavefront Error and Polarization of a Side Mounted Infrared Window, SPIE, 2007.