

발사전 가열 해석 - Delta II 자료 분석

최상호*, 김성룡**, 김인선***

Prelaunch Thermal Analysis - Analysis of Delta II Case

Sang Ho Choi*, Seong-Lyong Kim**, Insun Kim***

Abstract

Before the launch, launch vehicle is set up a few days ago at launch pad to check process and to supply fuels, etc. During the prelaunch process, the payload is exposed to the thermal environments. The purpose of a prelaunch thermal analysis is to predict maximum/minimum liftoff temperature of payload fairing and to evaluate air conditioning performance.

The prelaunch thermal analysis of Delta II PLF is performed using Sinda/fluint, general thermal/fluid analyzer. The results are analyzed and compared with Delta II report.

초 록

발사체는 발사되기 수일 전에 발사탑에 세워져 체크과정 및 연료공급 등을 수행하게 되므로 발사까지는 계속 외부의 열환경에 노출되게 된다. 발사체의 페어링에 대한 발사전 가열 해석(Prelaunch Thermal analysis)은 발사시 페어링의 최대/최소 온도 예측 및 공조 설비(air conditioning system)의 성능 예측을 목적으로 수행된다. 본 연구에서는 범용 열해석 프로그램인 Sinda/Fluint 이용하여 Delta II 페어링에 대하여 발사전 가열 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Delta II 보고서 자료와 비교 및 분석하였다.

키워드 : 델타 II(Delta II), 발사전 가열(thermal analysis), 페어링(fairing), 공조시스템(air conditioning system), 이륙 온도(liftoff temperature), 태양복사(solar radiation)

1. 서 론

발사체에 대한 열해석은 크게 발사체 이동중 가열, 발사전 가열, 이륙 후 페어링 분리전까지의 공력가열, 페어링 분리 후 자유분자가열/플룸복사/태양복사로 인한 가열 4가지로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 발사체가 발사대에 세워져 이륙시까지의 주변열환경으로 인해 받는 영향을 분석하

는 발사전 가열에 대해 분석하고자 하였다.

발사체는 발사되기 수일 전에 발사대에 세워져 여러 가지 체크과정 및 연료공급 등을 수행하게 되므로 발사까지는 계속 외부환경에 노출되게 된다. 따라서 외부의 날씨 및 기온에 따른 가열 요인과 접하게 되어 오전에는 냉각, 오후에는 가열 등의 영향을 계속 순환해서 받게 되어 탑재물 부에 영향을 미친다. 따라서 이러한 주변 열환경

* 열공력그룹/sahchoi@kari.re.kr

*** 열공력그룹/iskim@kari.re.kr

** 열공력그룹/saintl@kari.re.kr

으로부터 탑재물을 보호하기 위하여 공조(air conditioning)를 통한 열제어를 수행한다. 발사체의 PLF(payload fairing)에 대한 발사전 가열 해석(Prelaunch Thermal analysis)은 발사전 PLF를 설계된 온도 범위 내에 있도록 하는 공조 설비의 성능예측 및 발사체 이륙시의 초기온도를 예측하여 공력가열 해석시 이용하려는 목적으로 수행된다.

본 보고서는 무궁화 위성 발사체(델타 II, 7925/9.5 Foot Fairing)에 대한 설계시의 분석사항 및 일반적인 대형발사체의 설계과정에 대한 과정 습득을 목적으로 94. 10. 14 - 95. 01. 13간 파견 후 보고된 Delta II 자료[1]를 분석하였다. 또한 자체적으로 범용 열유체 해석 프로그램인 Sinda/Fluint를 이용하여 Delta II에 대하여 발사전 가열 해석을 수행하였다. Delta II 자료 역시 Sinda를 이용하여 발사전 가열 해석을 하였으나, 결과만 있을 뿐 Sinda의 입력과일이 없다. 따라서 자체적으로 모델링한 결과와 Delta II 보고서에 나타난 결과를 비교하여 모델링 방법을 검증하였다.

앞으로 본 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 KSLV-1의 발사전 가열에 대한 모델링 및 해석을 수행할 예정이다.

2. 발사전 PLF 주변의 열환경

발사체의 가열 해석에는 최악조건(worst case)을 이용하여 해석이 수행되며, 최악조건은 더운 날 조건(Hot Day Condition)과 추운 날 조건(Cold Day Condition)으로 분류된다. PLF의 발사전 가열 해석을 수행하기 위한 고려되는 사항으로는 탑재물의 온도 조건을 맞추기 위한 공조에 따른 내부 대류, 발사체 주변의 바람으로 인한 외부 대류, 지표면 및 하늘로부터의 복사 열교환 및 PLF가 받는 태양복사 등이 고려된다. 이러한 해석에 사용되는 조건과 매개변수들은 CCAFS(플로리다 발사장)의 기후환경을 기준으로 하였으며, 이들에 대해 다음에 상세히 설명하였다.

2.1 대류 현상

- 내부 대류 : 공조 시스템의 영향으로 페어링 내부에 강제 대류 현상이 일어나게 된다. 페어링의 내부에서 공조시의 흐름 속도는 공조시의 질량유속과 페어링과 탑재물 사이의 유효 단면적($A_{flow} = A_{fairing} - A_{sc}$)로부터 결정된다. 하지만 과거로부터 주로 페어링 내부를 지나는 내부공기의 흐름 속도를 기준으로 하여 $0.7 \text{ Btu/ft}^2\text{hr}\text{F}$ ($3.97 \text{ W/m}^2\text{K}$)의 내부열전달 계수를 일반적으로 사용하였다[1]. 페어링 내부 유동의 경우 열전달 계수는 평판에서의 유동으로 가정하여 경계층 방정식을 풀 다음의 상관식을 이용하여 계산한다[2].

$$Nu = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (1)$$

위의 식을 사용하기 위해서는 공기의 출구온도를 이용하여 물성치를 계산하여야 하는데 공기의 출구온도는 에너지 방정식을 이용하여 얻는다. 페어링을 거친 공기가 얻는 에너지는 페어링이 주변으로부터 받는 에너지와 같다고 가정하면 다음과 같은 에너지 방정식을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{dm}{dt} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

위식에서 Q는 페어링이 주변으로부터 받는 에너지로 태양복사 및 페어링 내부의 전자박스들의 발열을 포함하나 공기의 출구 온도를 예측하는데 전자박스들의 발열은 태양복사 에너지에 비해 그 크기가 매우 작아 무시한다. dm/dt 는 공기의 질량유량, C_p 는 공기의 비열, T_{in} 과 T_{out} 은 각각 공기의 입구 및 출구 온도를 의미한다.

공조 유량 $1500 \text{ ft}^3/\text{min}$ ($2500 \text{ m}^3/\text{hr}$), 공기 입구 온도 $60 \text{ }^\circ\text{F}$ ($15.6 \text{ }^\circ\text{C}$), $Q=2000\text{W}$ 값을 이용하면 공기의 출구온도는 $64.4\text{ }^\circ\text{F}$ ($18\text{ }^\circ\text{C}$)로 예측된다. 한편 레이놀즈수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho u X}{\mu} = \frac{dm/dt X}{\mu (A_{fairing} - A_{sc})} \quad (3)$$

X는 공기입구에서 출구까지의 거리로 델타 II의 경우 노즈캡에서 보트테일까지의 거리 4.6m를 사용하고, 공기의 출구온도를 기준으로 물성치를 계산하면 레이놀즈수는 45000의 값을 가진다. 이때 평균 누셀트수는 식 (1)을 이용하면 125의 값을 가지며 특성길이가 1m인 물체의 경우 대류열전달 계수의 값은 $3.2\text{W/m}^2\text{K}$ 의 값을 갖는다. 누셀트수에서 사용되는 특성길이가 공기 입구에서 출구까지의 거리가 아니고 물체의 특성길이를 사용하는 점에 대해서는 추후 연구가 필요하다고 판단된다.

앞에서 살펴본 바와 같이 페어링 내부 대류열전달 계수의 값은 일반적인 경우의 자연대류 열전달계수의 값과 비슷한 정도로 작은 값이기 때문에 효과적인 공조를 위해서는 유량을 조절하기 보다는 공급하는 공기의 온도를 조절하는 것이 유리함을 알 수 있다. 다만 실제 공조 설비 제작시 유량을 제어하는 것이 공기의 온도를 제어하는 것에 비해 매우 간편하며 경제성도 높기 때문에 이들을 최적화하는 것이 중요하다.

- 외부 대류 : 외부대류의 영향은 외부 대기의 온도, 풍속 등에 의존하게 된다. 이러한 값들은 오랜 기간의 통계자료를 이용하는데 더운 날 조건에서는 100%(Extreme Maximum) 온도가 사용되며, 추운 날 조건에서는 2.28% 온도(97.72% cold)가 사용된다. 델타 II 발사전 가열 해석에서는 5 mile/hr (2.2 m/s)의 풍속을 기준으로 열전달 계수의 값 $1.0\text{ Btu/ft}^2\text{hr}^\circ\text{F}$ ($5.68\text{ W/m}^2\text{K}$)을 사용하였다[1]. 한편 대류열전달 계수를 예측하기 위하여 페어링을 실린더라 가정하고 Zhukauskas 상관식을 적용하여 보았다.[4] 이 경우 무차원화된 대류열전달 계수를 나타내는 평균 누셀트 수 (Nu_D)는 다음과 같이 나타난다.

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (4)$$

위의 상관식은 유동이 층류나 난류에 상관없이 적용 가능하며, 넓은 범위의 프란틀수에 사용된다. 외부 대기의 온도를 300K라 가정하면 풍속

이 2.2 m/s, 페어링 지름이 2.90m (9.5ft)인 경우 레이놀즈수(Re_D)는 400,000이며 이때 $C=0.076$, $m=0.7$, $n=0.37$ 값을 사용한다. 한편 Pr은 자유류 온도를 이용하여 계산하며, Pr_s 는 페어링 온도를 이용하여 계산한다. 이 경우 누셀트수는 560이며 대류열전달 계수는 다음과 같이 예측된다.

$$h = Nu_D \frac{k}{D} = 5.1\text{ W/m}^2\text{K} \quad (5)$$

Zhukauskas의 상관식을 이용하여 페어링 외부 대류열전달 계수를 예측한 것은 실제 Delta II 발사체에 이용된 값과 매우 근접한 값을 나타낼 수 있다.

2.2 복사 현상

PLF와 주변의 지표면 및 하늘과의 열복사 교환을 계산하기 위해서는 페어링-지표면(Ground), 페어링-하늘(sky) 간의 보기계수(View Factor) 및 지표면과 하늘의 온도를 알아야 한다. 열복사 교환 해석을 위한 페어링-지표면, 페어링-하늘간의 보기계수는 무궁화 발사체의 경우 General Dynamics의 MV03 프로그램을 이용하여 계산하였다. 페어링-지표면, 페어링-하늘간의 보기계수는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$F_{F \rightarrow S} = 1 - F_{F \rightarrow G} \quad (6)$$

표 1에 참고문헌 [1]에 나타난 페어링의 각 위치별 보기계수를 정리하였다. 참고로 보기계수는 자료마다 약간의 차이를 지니고 있으나 그 차이가 크지는 않다.

한편 복사열전달에 사용되는 지표면의 온도는 대기온도와 같다고 가정을 하며 페어링과 하늘과의 복사열전달에 사용되는 유효 하늘 온도(effective sky temperature)는 대기온도 T_{air} 를 이용하여 다음과 같은 Swinbank 방정식을 통해

표 1. PLF와 지표면 및 하늘과의 View Factor

| Section | F_{F-S} | F_{F-G} |
|----------|-----------|-----------|
| NoseCap | 0.130 | 0.870 |
| 25° Cone | 0.289 | 0.711 |
| 15° Cone | 0.369 | 0.631 |
| Cylinder | 0.499 | 0.501 |

계산한다[1].

$$T_{sky} = 0.04114 (T_{air})^{1.5} \quad (\text{in } ^\circ\text{R}) \quad (7)$$

Swinbank 방정식은 하늘온도에 대한 상대습도를 영향을 직접적으로 보상하지 않으나 발사전 가열해석에는 정확한 편이다.

이때, 페어링과 하늘과의 복사열전달은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \epsilon \sigma F_{F \rightarrow S} A (T_{sky}^4 - T_{fairing}^4) \quad (8)$$

여기서 ϵ 는 페어링의 방사율(emissivity), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, $F_{F \rightarrow S}$ 는 보기계수, A 는 페어링의 면적을 의미한다.

2.3 태양 복사

PLF에 작용하는 태양복사는 하루 중 시간에 따른 수직 입사 태양 복사량(Normal Incident solar flux) 및 복사 대상과의 입사각(incident angle)에 의존한다. 최대 태양 복사 입사량은 2월에는 346.1 Btu/ft²hr (1091.8 W/m²)에서 6월에는 283.9 Btu/ft²hr(895.6 W/m²)이다. 평균적으로 CCAFS에서의 여름철에 대한 더운 날 조건에서는 최대 태양 복사 입사량을 300 Btu/ft²hr(946.4 W/m²)을 사용한다.

태양입사각은 연별, 일별, 페어링이 위치한 위도, 경도, 페어링의 태양에 대한 방향에 따라 달라진다. PLF가 받는 태양 복사량은 그 계산이 상당히 복잡하기 때문에 MDSSC(Mcdonnell

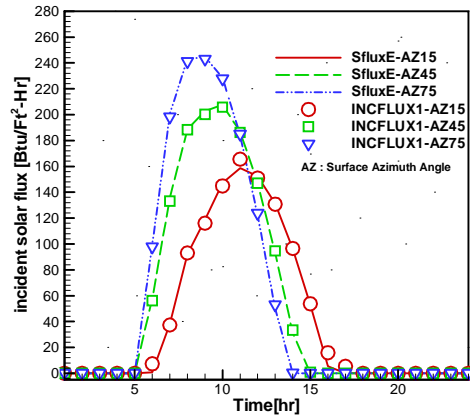


그림 1. INCFLUX1와 SfluxE의 태양 복사량 비교

Douglas Space System Corp.)는 INCFLUX1이라는 프로그램을 이용하였으며 본 연구에서는 태양 복사량을 계산하기 위하여 참고문헌 [1]에 나타난 이론을 바탕으로 자체적으로 Fortran을 이용하여 SfluxE 프로그램을 개발하였다. SfluxE를 이용하여 계산한 결과와 Delta II 보고서에 나타난 INCFLUX1의 결과를 그림 1에 비교하였다. 계산은 경도(Lo) 80.566°, 위도(M) 28.445°, 표준시간은 Eastern time zone인 플로리다 발사장의 8월 15일에 대한 값을 기준으로 하였다. 이때 surface elevation angle은 75°였으며 surface azimuth angle은 15°, 45°, 75°에 대해 비교하였다. 그림 1을 보면 Delta II 보고서에 나타난 INCFLUX1의 결과와 SfluxE의 결과가 일치함을 알 수 있다.

3. 발사전 가열 해석 조건

발사체의 PLF에 대한 발사전 가열 해석을 위한 초기 조건들은 날씨(더운날, 추운날)의 영향을 많이 받는다. 따라서 그 조건들도 기후환경에 따라 바뀌게 되는데 최악 상황을 가정하여 더운날 조건과 추운날 조건을 사용하며 아래와 같다.

3.1 더운날 조건(Hot Day Condition)

- 9월 플로리다 발사장의 최고 더운날의 시간

에 따른 수직 입사 태양복사량이 사용되며, 일반적으로 최대값을 300 Btu/ft²hr (946.4 W/m²)로 하여 사용한다.

- 9월달 발사장의 최대 공기 온도 사용
- 페어링 공조 입구 공기온도 : 62°F(16.7°C)
- PLF의 태양 복사 흡수율은 0.433
- 그림 2에는 더운날 조건하에 대기/지표면 온도와 유효 하늘 온도를 나타내었으며, 그림 3에는 surface azimuth angle 0°에 대하여 페어링의 노즈캡, 20° 콘, 15° 콘, 실린더의 부분별로 단위 면적당 입사하는 태양 복사량을 나타내었다.

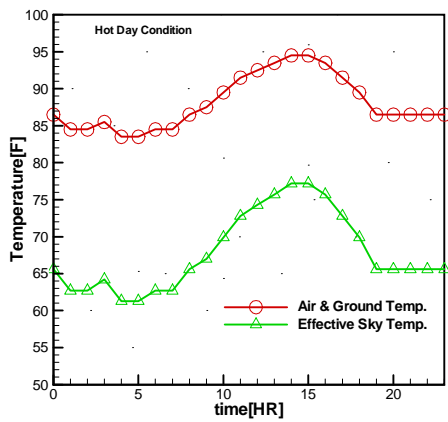


그림 2. 대기/지표면과 유효 하늘 온도 (더운날 조건)

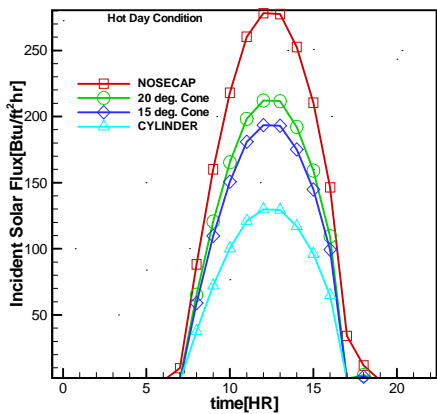


그림 3. 페어링 입사하는 태양복사량 (더운날 조건)

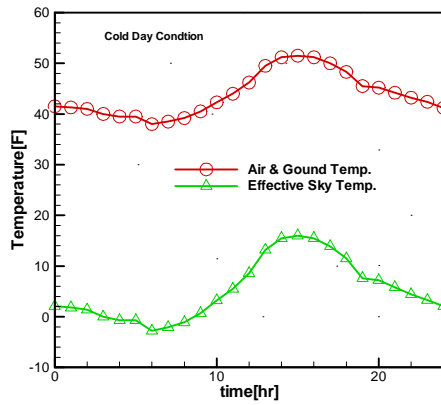


그림 4. 대기/지표면과 유효 하늘 온도 (추운날 조건)

3.2 추운날 조건(Cold Day Condition)

- 태양 복사 입사량은 없다고 가정
- 1월달 발사장의 97.2% cold 공기 온도 사용
- 페어링 공조 입구 공기온도 : 58°F(14.4°C)
- 그림 4에 추운날 조건에서 대기/지표면 온도와 유효 하늘 온도를 나타내었다.

3.3 공통 조건

- 유효 하늘 온도(effective sky temperature)는 Swinbank 방정식을 사용하여 계산
- 지표면온도(Ground Temperature)는 대기온도 (Air Temperature)와 같다고 가정
- 외부 대류 열전달 계수 : 5.68 W/m²K
- 내부 대류 열전달 계수 : 3.97 W/m²K
- 외부 방사율 : 0.9 (AL 7075 물성치)
- 내부 방사율 : 0.86 (Acoustic Blanket 물성치)
- 보기계수 : 0.5 ~ 0.87
- 공조 유량 : 1500 ft³/min (2548.3 m³/hr)

4. PLF 및 외부 환경 모델링

4.1 페어링 구조 및 재료 물성치

무궁화 위성 발사체인 델타 II의 경우 단열을 위해 가장 바깥쪽의 외피에 Sparesyl을 사용하였

표 2. 델타발사체 페어링 구성 재료의 물성치

| 재 질 | 밀도 lb _m /ft ³ | 온도 °F | 비열 BTU/lb _m °F | 열전도도 BTU/fts°F |
|---------------------|--|----------|------------------------------|-------------------|
| AL 7075 | 175 | -400 | 0.119 | 14.3 |
| | | -250 | 0.138 | 40.6 |
| | | -100 | 0.191 | 57.5 |
| | | 300 | 0.22 | 94.0 |
| | | 500 | 0.238 | 104 |
| | | 700 | 0.265 | 105 |
| | | 1200 | 0.265 | 105 |
| Acoustic Blanket | 0.8 | 75 | 0.025 | 5.76E-6 |
| | | 200 | 0.025 | 7.5E-6 |
| | | 400 | 0.024 | 9.4E-6 |

다. Sparesyl 재료의 경우 발사 후 공력가열시에는 단일 및 ablation 효과 등을 나타내기 때문에 열해석시 모델링을 한다. 하지만 발사전 가열 해석시에는 두께가 얇으며 비열 역시 매우 작으므로 전체적으로 열용량(Heat Capacity)이 매우 작다. 또한 두께가 매우 얇아 단열효과가 상온 범위에서는 크지 않기 때문에 Delta II 보고서에서는 이를 모델링을 하지 않았으며 본 연구에서도 Sparesyl 재료의 모델링을 하지 않았다. 한편 PLF 외피를 이루는 AL 7075 재료 및 페어링 안쪽의 Acoustic Blanket은 모델링을 하였으며 이들은 물성치는 표 2에 정리하였다.

한편 발사전 가열 해석을 위한 모델링을 위한 페어링의 형상은 9.5ft/7925은 자료를 찾지 못하여 참고문헌[5]에 나타난 9.5ft/6915 페어링의 치수를 이용하였으며 그림 5에 나타난 바와 같이 Delta II 보고서 자료의 AL 7075와 Acoustic Blanket의 두께를 사용하였다.

모델링은 페어링의 노즈캡, 20° 콘, 15° 콘, 실린더 부위만 하였으며 Boattail 이하는 고려하지 않았다. 한편 탑재물의 온도 조절을 위하여 사용되는 Air Conditioning은 Sinda/Fluint에서 제공되는 flow 모델링을 사용할 수 있으나 이 경우

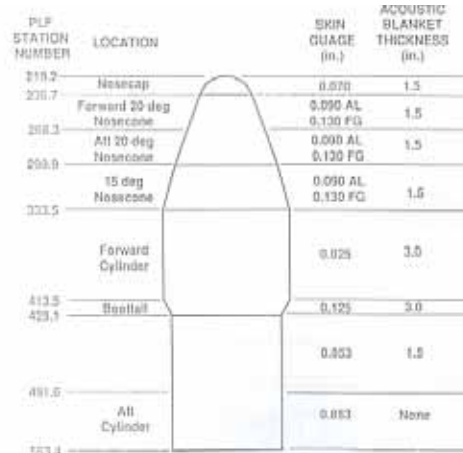


그림 5. Delta II 발사체의 페어링 구조

모델링이 더 복잡해지므로 Delta II 보고서에 나타난 방법과 같이 One-Way Conductor 방법을 이용하였다. One-Way Conductor 방법은 열모델과 주변의 유동 모델이 결합하여 해석해야 할 경우, 유동을 직접 모델링하지 않고 열모델링내에서 유동을 이에 상응하는 가상의 Node 및 conductor로 구성하는 방법이다[6]. 또한 공조에 사용되는 공기는 노즈캡에서 유입되어 실린더 부위에서 외부로 빠져나가는 것으로 가정하였다.

한편, Sinda/Fluint 내에서 페어링을 모델링할 때 축 대칭성을 가진다고 가정하였으며, 발사체의 표면과 남쪽이 이루는 각인 surface azimuth angle에 대한 변화는 고려하지 않았다. 이는 모델링 방법의 검증 차원에서 Delta II의 발사전 가열을 수행하기 때문에 복잡한 모델링 방법을 피하기 위해서다. 하지만 이 부분은 앞으로 KLSV-I의 페어링 발사전 가열 해석에서는 고려할 예정이다. 앞에서 언급한 내용을 바탕으로 페어링 및 주변 열환경을 Sinda/Fluint에서 모델링한 것을 개략적으로 그림 6에 나타내었다.

5. 해석 결과

Delta II 보고서에는 발사전 가열 해석에 관한

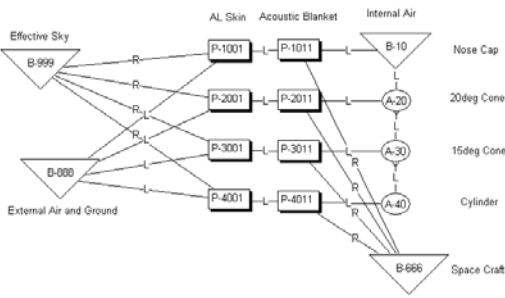


그림 6. Sinda/Fluint를 이용한 PLF 및 주변 열환경 모델링

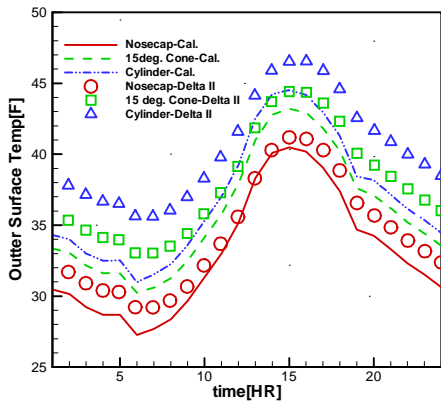


그림 7. 추운날 조건에서 페어링 외피의 온도 분포

다양한 결과가 나와 있으나 본 해석결과와 직접 비교가 가능한 데이터는 그리 많지 않은 편이다. 먼저 직접 비교가 가능한 추운날 조건에 대해 시간에 따른 페어링 외부 온도를 살펴보면 그림 7과 같다. 먼저 노즈캡 부분에서는 Delta II 보고서 결과와 자체적으로 모델링한 결과가 최대 차이가 나는 부분에서 1°F(0.56°C) 정도이며 온도가 가장 높은 정오 부분에서는 거의 일치하는 등 두 결과가 거의 같았다. 하지만 15° 콘 부분과 실린더 부분에서는 Delta II 보고서의 결과가 자체 모델링 결과에 비하여 최대 4°F(2.2°C) 정도로 다소 차이를 보였다. 이는 첫째, Delta II 보고서의 경우 더운날 해석 결과는 많이 존재하나, 추운날 조건에서의 해석 결과가 부족하여 간접적으로라도 해석 결과를 비교하기 위해 같은 위치에서의 separation rail의 온도와 비교하였기 때문이라

판단되며, 둘째는 모델링 기법의 차이 때문인 것으로 판단이 된다. Delta II 보고서의 경우는 페어링 모델링시 실린더 이후 부분도 고려하여 모델링을 하였으며, 20°콘과 15°콘을 하나로 모델링을 한 것으로 판단된다. 이러한 이유로 인하여 노즈캡에서 밑으로 내려갈수록 Delta II 보고서와 자체 모델링 해석결과에서 온도차이가 커지는 것으로 보인다. 하지만 전반적인 온도 변화의 경향이 일치하며, 페어링 외부에서 최대 온도 차이가 4°F이고 내부 온도 차이는 이보다 더 적기 때문에 두 결과가 상당히 일치한다고 볼 수 있다.

한편 더운날 조건의 해석결과의 비교는 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 그림 8은 시간에 따른 페어링 외피 온도의 분포를 비교하였으며, 그림 9는 시간에 따른 페어링 내부 공기의 온도 변화를 나타내었다. 그림 8을 살펴보면 노즈캡의 경우 자체 모델링 해석결과와 Delta II 보고서의 결과가 매우 일치하는 결과를 나타내었으며, 15° 콘 및 실린더 부위의 경우는 낮 시간에 최대 5°F(2.78°C)차이를 나타내었다. 이는 추운날의 경우와 마찬가지로 모델링의 기법으로 판단이 된다. 발사체의 경우 다른 온도에 비해 최대/최소 이륙 온도가 중요한데 최대 이륙 온도의 경우 약 138°F(58.9°C)로 두 결과가 차이가 적다. 또한 이 결과는 기존의 공력가열 해석시 최대 이륙온도로 가정하였던 60°C 값에 상당히 근접한 값이다.

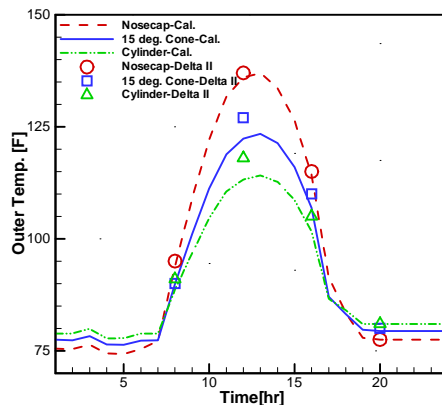


그림 8. 더운날 조건에서 페어링 외피 온도 분포

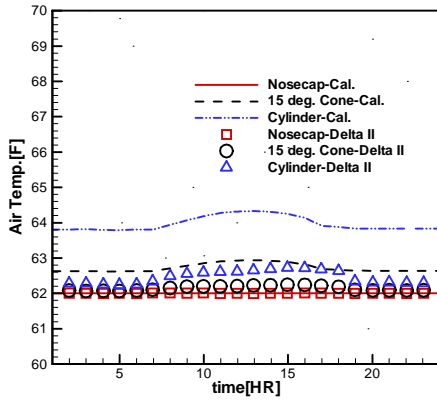


그림 9. 더운날 조건에서 페어링 내부 공기의 온도 분포

그림 9에서 더운날 조건에서 페어링 내부 공기의 온도를 살펴보면, 정성적으로는 두 결과가 상당히 비슷하나 정량적으로 자체 모델링 결과가 Delta II 보고서 결과에 비해 1.7 °F (0.94 °C) 정도로 다소 높게 예측하고 있다.

5. 결 론

앞의 결과를 종합하여 페어링 노즈캡, 15°콘, 실린더 부분의 최대, 최소 이륙온도 및 페어링 내부 공기의 온도를 최대온도 기준으로 표 3에 정리하였으며 이를 Delta II 보고서의 결과와 비교하였다. 하지만, 자체 모델링의 경우 페어링 내부 공기 온도는 노즈캡에서 공기가 공급되어 실린더 부위에서 밖으로 빠져나가는 것으로 가정하였으며, Delta II 보고서의 경우는 공기의 출구 부분이 좀 더 아래에 위치하여 있어 단순 비교는 다소 문제가 있는 것으로 판단된다. 따라서 공기의 온도는 실린더 끝 지점에서의 비교하였다.

표 3의 결과를 보면 발사전 가열의 중요한 결과인 최대, 최소 이륙온도 및 페어링 내부 공기 온도가 3°F 이내로 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다.

한편 앞의 추운날과 더운날 조건에 대해 Delta II 보고서의 결과와 Sinda/Fluint를 이용하여 자체 모델링한 결과를 종합하여 보면, 노즈캡의 경

표 3. 최대, 최소 이륙 온도 및 페어링 내부 공기 온도 비교

| | 최대 이륙온도 | 최소 이륙온도 | 공기 입구온도 | 공기 출구온도 |
|--------------------|----------|---------|---------|---------|
| Hot Day Condition | | | | |
| Delta II 보고서 | 141.2 °F | - | 62 °F | 62.7 °F |
| Sinda/Fluint 모델링 | 138 °F | - | | 64.4 °F |
| Cold Day Condition | | | | |
| Delta II 보고서 | - | 25.5 °F | 58 °F | 56.6 °F |
| Sinda/Fluint 모델링 | - | 26.5 °F | | 57.6 °F |

우 두 결과가 매우 일치하였으며 15°콘 및 실린더의 경우는 정성적으로 상당히 일치하였으나 정량적으로 페어링 외부의 경우 최대 5°F(2.78°C), 페어링 내부 공기의 경우 최대 1.7°F(0.94°C)의 차이를 보였다. 이러한 온도 차이는 Delta II 보고서는 무궁화 발사체 Delta II 9.5 ft/7925 페어링에 대해 발사전 가열을 해석하였으나 이러한 페어링의 자료가 부족하여 자체 모델링에서는 9.5 ft/6915의 형상 자료를 사용한 것과 해석 모델링 방법의 차이로 판단된다. 하지만 이러한 차이에도 불구하고 Sinda/Fluint를 이용한 모델링의 해석결과는 상당한 정확성을 가지는 것으로, 앞으로 KSLV-I의 발사전 가열 해석에서도 응용될 수 있으리라 판단된다.

앞으로 추가적으로 보완해야 될 사항으로는

(1) 더운날의 경우 발사체 페어링의 온도 분포는 표면의 azimuth angle에 따라 입사되는 태양 복사량이 다르기 때문에 페어링 표면의 azimuth angle에 대한 영향이 고려되어야 할 것이다.

(2) 무궁화 발사체 Delta II에 대한 모델링 방법을 바탕으로 KSLV-I이 발사될 고흥군 외나로도의 기후 자료를 고려하여 현재 개발중인

KSLV-I 페어링의 형상에 적용하여 발사체 이륙 최대, 최소 온도 예측 및 Air conditioning에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

(3) Delta II 보고서에 나타난 해석 결과는 실제 측정치와 비교한 것이 아니고 해석 결과만 자체적으로 나타나 있기 때문에 다소 신뢰성이 떨어진다. 보다 정확한 해석 결과를 위해서는 KSLV-I의 해석결과와 측정 결과를 이용하여 분해식기법을 수정, 보완해야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 오범석, McDonnell Douglas 교육자료 (KOREASAT/Delta II), 대전, KARI, 1995.
2. Robert D. Karam, Satellite Thermal Control for Systems Engineers, Cambridge, AIAA, 1998, pp.32-38.
3. Incropera and DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, New York, WILEY, 4th edition, pp.366-373.
4. Delta II Payload Planner's Guide, Boeing, October 2000.
5. Sinda/fluint User's Manual, C&R Tech. 2002.