

복사 열전달에 의한 성층권 무인 비행선의 열 특성 연구

김승민* · 이상명* · 박휘섭* · 노태성** · 최동환**

A Study on Thermal Characteristics of Stratospheric Airship Considering Radiation Heat Transfer

Seung-Min Kim* · Sang-Myeong Lee* · Hwi-Seob Park* · Tae-Seong Roh** · Dong-Hwan Choi**

ABSTRACT

A study of thermal characteristics of the airship considering radiation heat transfer has been conducted by building a numerical model for the airship in order to identify the possibility to obtain the reliable flight performance in severe stratospheric heat conditions. The variations of distributed temperature of the skin and the inner flow by free convection have been calculated according to the change of the solar position. As the results of the analyses, the stratospheric heat conditions slightly have an influence on the flight performance of the airship.

초 록

성층권 비행선이 성층권의 열 환경에서 비행성능을 확보할 수 있는지 여부를 확인하기 위해 비행선의 모델을 구축하여 태양복사 에너지를 고려한 열전달 해석을 수행하였다. 태양의 위치 변화에 따른 외피의 온도분포와 자연대류 현상에 의한 내부유동을 해석하였으며, 이를 바탕으로, 성층권 내의 열 환경에서 비행선은 안전한 비행성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: Stratospheric airship(성층권 비행선), Solar radiation(태양복사), Heat transfer(열전달), Distributed temperature(온도분포), Free convection(자연대류)

1. 서 론

성층권 비행선은 주어진 임무를 수행하기 위하여 태양 복사에너지를 직접 받는 성층권 내에

서 장기 체공을 하게 된다. 따라서, 태양 복사 에너지에 의한 비행선의 온도 상승이 극심할 것이라 예상되며, 이에 따른 비행선 내부의 자연대류유동이 내부탑재물에 영향을 주게 될 것이라 예상된다. 본 연구에서는 태양 복사 에너지가 비행성능과 내부탑재물에 어떠한 영향을 주는지 예측하기 위해 열전달 해석을 수행하였다. 이를 위하여, 성층권의 열 환경을 조사하였고,

† 2005년 12월 30일 접수 ~ 2006년 4월 15일 심사완료

* 학생회원, 인하대학교 항공우주공학과

** 정회원, 인하대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: gopmihana@daum.net

Gridgen으로 형성한 비행선의 해석격자모델을 STAR-CD를 사용하여 열 특성 연구를 수행하였다[1].

Sample Test를 통하여 해석에 적합한 모델을 선정하였으며, 해석값과 비행시험 측정값을 비교하여 신뢰성을 확보하였다. 이를 바탕으로, 태양의 위치 변화에 따른 외피의 온도분포와 내부 유동을 해석하여, 태양 복사 에너지가 비행선에 미치는 영향을 해석하였다.

2. 해석 모델

2.1 성층권 비행선의 구조와 격자 형성

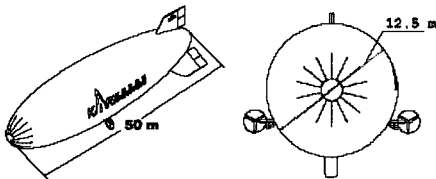


Fig. 1 Configuration of Stratospheric Airship

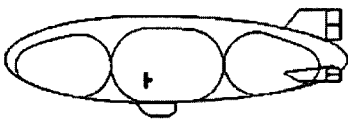


Fig. 2 Inner Constructing of Stratospheric Airship

본 연구에서는 Fig. 1에서 보듯이 전장 50 m, 최대직경 12.5 m의 비행선을 모델로 하였다. 외피의 재질은 약 0.175 mm의 얇은 Mylar가 사용되었다. Fig. 2는 비행선 내부를 나타낸 그림이며, 3 개의 공기기낭 주위로 헬륨가스가 차있는 상태이다. 해석 시에는 비행선 내부를 헬륨가스로 가정하였으며, 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것이라 판단되는 꼬리날개, 콘돌라 및 프로펠러는 고려하지 않았다[1].

Figure 1과 Fig. 2의 비행선 구조를 바탕으로 Fig. 3과 같은 비행선과 외기에 대한 해석격자 모델을 각각 형성하였다.

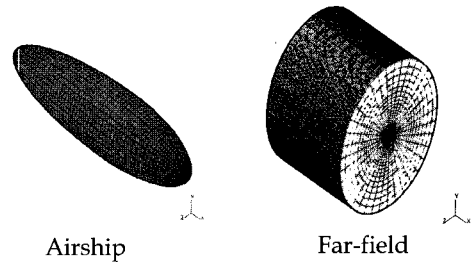


Fig. 3 Configuration of Calculation Grid

구축된 해석모델에 대해 수렴성과 정확성을 확보하면서, 계산시간을 단축하기 위해 Sample Test를 수행하였다. 최종적으로 비행선 내기의 격자수는 160,000 개, 비행선 외피는 10,000 개 그리고, 외기의 격자수는 330,000 개로 모델을 구성하였다. 외기의 전체적인 크기는 X축 방향 150 m, 반지름 100 m로 결정하였다.

2.2 초기조건 및 경계조건

성층권 대기환경 조건과 Mylar에 대한 물성치를 초기조건과 경계조건으로 사용하였다. 구체적인 내용은 Table 1과 2를 통해 각각 나타내었다[2].

Table 1. Stratosphere Conditions

Temperature (K)	217
Pressure (atm)	0.0542
Density (kg/m ³)	0.08816
Gravity (kg · m/s ²)	9.733
Solar intensity (W/m ²)	1366
Air speed (W/m ²)	10

Table 2. Mylar Properties

Thickness (mm)	0.175
Density (kg/m ³)	1,390
Conductivity (W/m · K)	0.155
Specific heat (J/kg · K)	1,172
Solar radiation	$\gamma : 0.9 / \alpha : 0.1$
Thermal radiation	$\gamma : 0.5 / \alpha : 0.5$

3. 해석 방법

3.1 열전달 현상

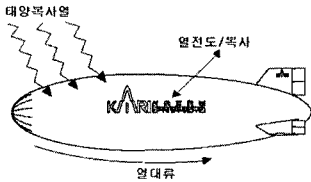


Fig. 4 Heat Transfer of Airship

태양복사 열전달에 의해 외피의 온도가 상승된다. 이 때문에 외피에는 열전도와 복사 열전달이 발생하며 비행선 내부유동과 외기유동에는 자연대류현상이 발생한다. Fig. 4에서는 해석에 고려된 열전달 현상을 나타내었으며, 태양 복사 에너지에 의한 비행선 표면에서의 총열전달량 q''_w 는 Eq. 1을 통해 계산되었다[3].

$$q''_w = q''_r + q''_c + q''_d + q''_{r,s} \quad (1)$$

여기서, q''_r : 벽 표면에서의 순복사량

q''_c : 대류에 의한 열전달량

q''_d : 전도에 의한 열전달량

$q''_{r,s}$: 벽 표면에서의 순태양복사량

3.2 자연대류

강제속도가 없는 경우에도 유체 중에는 대류 유동이 존재한다. 이것을 자연대류라 하며, 이것은 밀도구배가 존재하는 유체에 작용하는 체적력에 기인한다. 그 정미의 효과가 부력이며, 이것이 자연대류유동을 발생시킨다. 표면에서 자연대류열전달은 표면의 형상과 방향에 따라 좌우되며, 또한 표면에서의 온도변화와 포함된 유체의 열물리학적 물성치에 의존한다. 표면에서 유체온도는 판의 온도와 같을 것이며, 표면에서 충분히 먼 거리에서 주위 유체의 온도까지 점차 감소한다[4].

3.3 태양 광선의 입사각도와 일몰각도

태양의 위치가 변하면 비행선에 대한 태양의 입사각도가 변하게 된다. 특정 지역에서 태양 광선의 입사각도를 알기 위해서 지구 중심 좌표값을 그 지역의 지역 좌표값으로 변환시켜야 한다. 본 논문에서는 ENU좌표계를 사용하였으며, ENU는 East, North, Up의 머리글자로 세 값은 각각 그 지역에서 동쪽, 북쪽, 수직방향의 위치를 의미한다. 날짜와 시간에 따른 특정 위도상의 태양의 위치 벡터는 Eq. 2와 같이 표현되어진다. 이를 표현하기 위한 각각의 변수들은 Eq. 3-5에 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \sin \eta \cos \xi \\ \cos \phi \sin \xi + \sin \phi \cos \eta \cos \xi \\ \sin \phi \sin \xi - \cos \phi \cos \eta \cos \xi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta = 360^\circ \times \frac{\text{Day}}{365} \quad (3)$$

$$\xi = \sin^{-1}(\sin 23.5^\circ \sin \theta) \quad (4)$$

$$\eta = hh \times 15^\circ + mm \times 0.25^\circ \quad (5)$$

여기서, ϕ 는 그 지역의 위도이며, Day는 춘분으로부터 경과일자, hh는 그 지역 태양시의 시각, mm은 그 지역 태양시의 분을 의미한다.

한편, 지상에서는 태양이 지평선 아래로 내려가더라도 높은 고도에서는 태양을 계속 볼 수 있게 된다. 이런 현상 때문에 비행선의 아래쪽에서도 태양 광선이 비추는 효과가 생긴다. 높은 고도에서 수평 아래로 보이는 각도를 a 라고 할 때 Eq. 6에 의하여 일몰각도를 구하게 된다.

$$\cos a = \frac{6367.456}{6367.456 + H} \quad (6)$$

여기서, 6367.456과 H는 각각 지구반지름과 비행선의 고도를 km단위로 표시한 것이다.

본 논문에서는 비행선의 고도가 20 km이며, 이때의 일몰각도는 4.54° 의 값을 사용하였다[5].

3.4 수치해석 기법

속도장, 압력장, 온도장 및 밀도장에 대한 공간차분화에는 MARS(Monotone Advection and Reconstruction Scheme)를 사용했으며, 난류 유동장에 대해서는 Upwind Scheme을 사용하였다. 해석 알고리즘으로는 PISO를 사용하였고, 수렴성을 향상시키기 위해서 하향이완계수(Relaxation Factor)를 도입하였다.

4. 해석 결과

4.1 Sample Test 해석 결과

수렴성과 정확성 및 계산시간 단축을 위해 해석 모델에 대하여 Sample Test를 수행하였으며, 이를 통해 가장 적합한 해석 모델을 선정하였다. 최종적으로 확정된 모델에 대하여, 태양광선의 입사각도가 90°로 주어졌을 때, 대기속도를 0 m/s, 10 m/s로 각각 설정하여 해석을 수행하였다. 해석결과로 온도분포, 밀도분포, 속도분포를 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다.

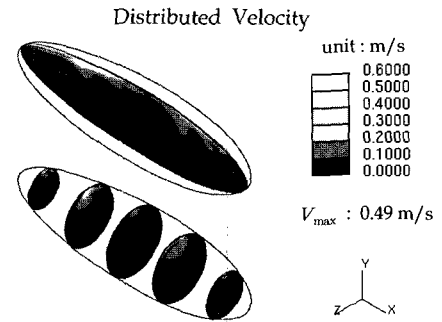


Fig. 5 Distribution Map (0 m/s Air Speed)

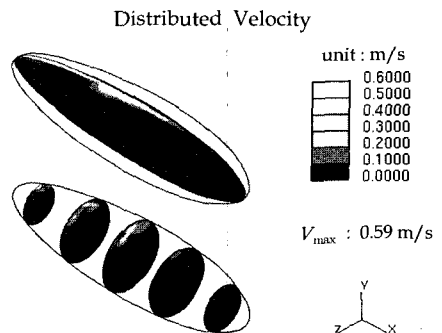
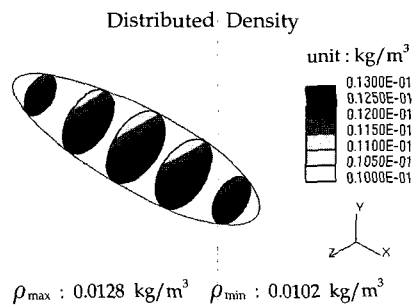
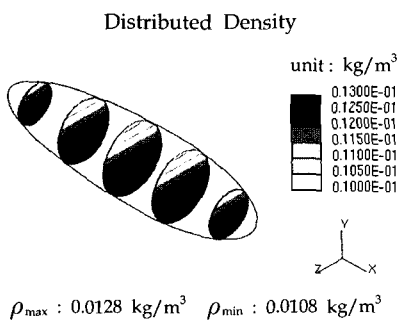
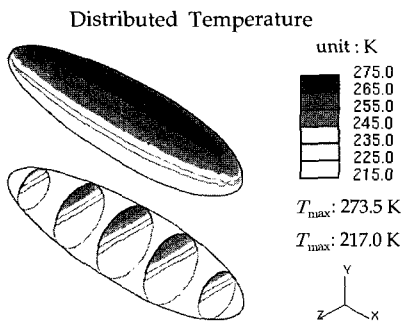
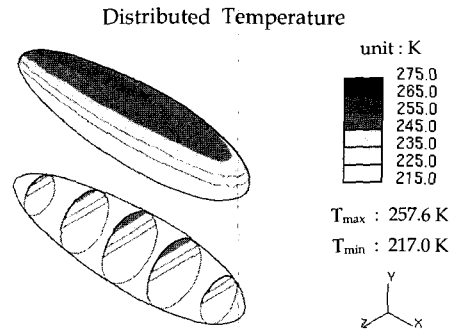


Fig. 6 Distribution Map (10 m/s Air Speed)

대기속도가 0 m/s일 때는 태양광선이 수직으로 내리쬐고 있는 비행선 중심부의 온도가 273.5 K으로 제일 높았고, 대기속도가 10 m/s일 때의 최고온도는 후방 30m 부근에서 256.7K으로 약 17K 더 낮았다. 두 가지 경우 태양복사 열전달과 전도 현상에 의해 측면부분까지 온도가 상승한 반면, 하부의 온도는 성층권 대기 온도인 217 K을 유지하였다.

상층부로 갈수록 온도는 높아지고, 밀도는 낮아지게 되어, 외피에 근접한 상층부 일부에서만 자연대류에 의한 속도가 발생하였다. 대기속도가 10 m/s일 때, 비행선 후방에서 속도분포가 약 0.6 m/s까지 상승하는 이유는 비행선 중심부보다 상대적으로 위치가 낮은 비행선 후방의 온도가 더 높기 때문이다.

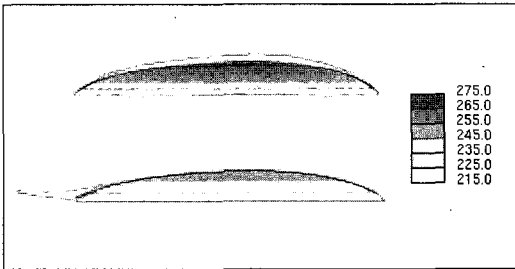


Fig. 7 Temperature Distribution of Cross Section around Airship

Figure 7에서는 비행선 주위의 온도 분포를 단면으로 나타내었다. 위쪽 그림은 대기속도를 0 m/s로, 아래쪽 그림은 10 m/s로 설정하여 해석한 것이다. 대기속도가 0 m/s일 때는, 비행선 외피의 온도에 의해 온도가 상승된 공기층이 머물러 있지만, 대기속도가 10 m/s일 때는, 외피 주변의 공기층이 뒤쪽으로 밀려나게 되어 성층권 외기와 비행선 외피가 접하게 되어, 온도가 많이 상승되지 못하였다. 하지만, 대기속도가 있을 때에도 비행선 후방에서는 온도가 상승된 공기층이 존재하게 되어 비행선의 전방보다는 후방의 온도가 더 높음을 확인하였다.

4.2 비행시험 데이터와의 비교

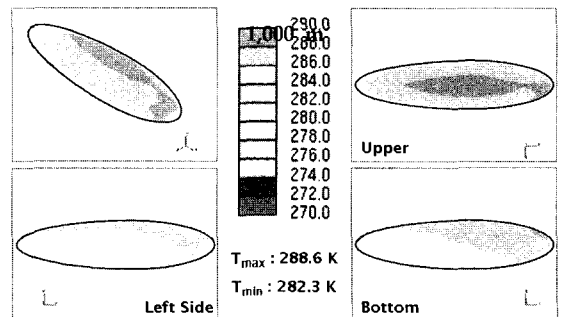
지난 2005년 9월 29일에 전남 고흥에서 50 m급 비행선의 비행시험이 있었다. 총 비행시간은 오전 6시 25분부터 8시 17분까지 1시간 52분이었으며, 최대 상승 고도는 해면고도로부터 3 km이다. 비행시험 당시의 날씨는 맑았고, 일출시각은 오전 6시 23분 35초였다.

1,000 m, 2,000 m, 3,000 m에서의 측정값들을 사용하여 계산된 헬륨가스 온도의 해석값과 각각의 고도에서의 헬륨가스 온도의 측정값들을 비교하였다. 헬륨가스 온도가 측정된 위치는 전방에서부터 후방으로 10 m 지점과 38 m 지점의 비행선 위쪽 외피의 안쪽이다. 해석에 사용되는 값들을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Flight Test Data According as Altitude

고도(m)	1,000	2,000	3,000
Heading (N:0,E:90)	73.52	131.24	96.69
태양고도 (도)	188.21	179.65	171.50
태양방위 (도)	151.36	207.43	171.50
외기압력 (Pa)	89,000	79,000	70,000
외기온도 (K)	288.62	285.96	283.29
비행선 내부온도 (K)	276.6	266.7	258.7
대기속도 (m/s)	9.72	10.00	11.11
전방 헬륨 온도 (K)	285.26	281.92	274.89
후방 헬륨 온도 (K)	286.78	283.45	279.42

Figure 8은 위의 값들을 사용하여 해석된 온도 분포를 고도에 따라 각각 나타낸 것이며, 이는, 비행선 외피 바로 아래의 헬륨가스의 온도 분포이다.



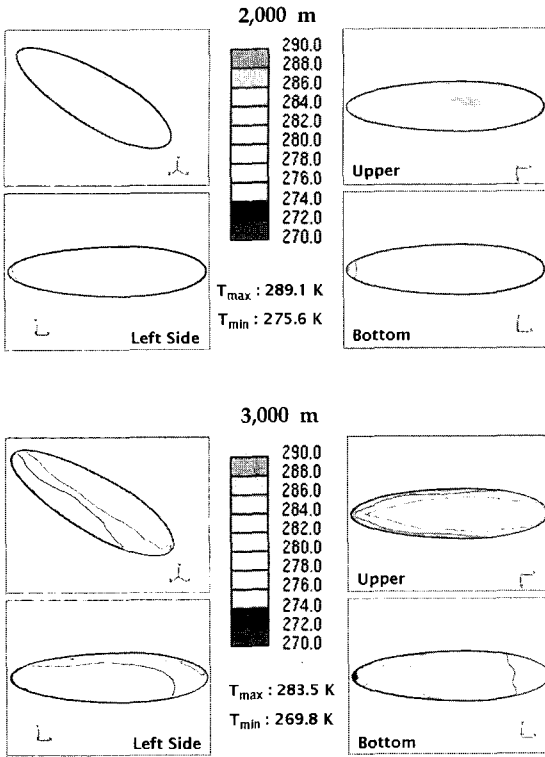


Fig 8. Temperature Distribution of Helium Bag

각각의 고도에서 해석된 값들을 측정된 값들과 비교하여 전방과 후방의 헬륨 온도에 대해서는 Fig. 9 와 10에 각각 그래프를 통하여 나타내었다.

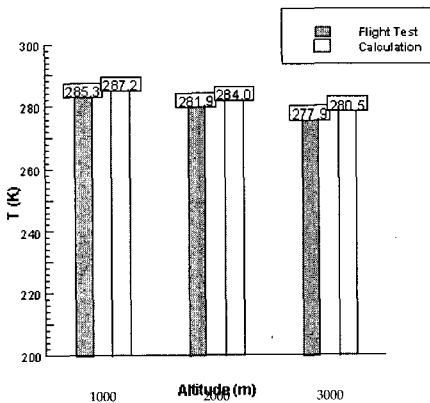


Fig 9. Compare to Flight Test Data and STAR-CD simulation about Front Helium

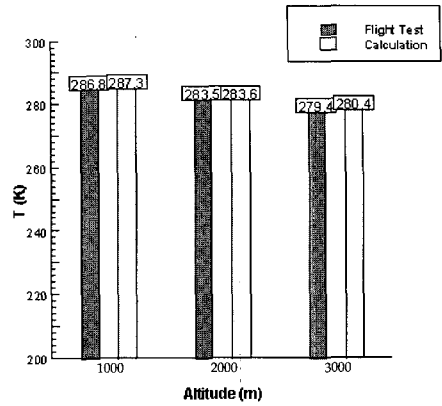


Fig 10. Compare to Flight Test Data and STAR-CD simulation about Rear Helium

4.3 태양 위치 변화에 따른 해석 결과

해석 모델에 대하여 Fig. 11과 같이 태양의 위치를 Case 1, Case 2, Case 3으로 각각 선체 방향, 반경 방향, 사선 방향으로 변화를 시키면서, 이에 대한 비행선 온도분포와 내부유동의 속도분포를 계산하였다.

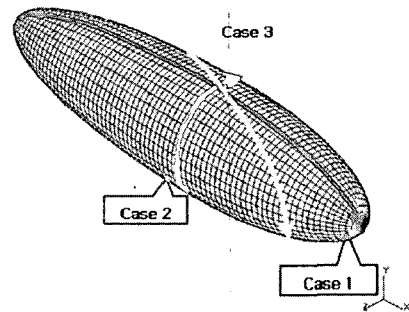


Fig. 11 Variation of Solar Position

각 Case에 대하여 해석된 결과 중, 몇 개의 태양 위치에 대한 결과값을 Fig. 12에 나타냈고, Table 4를 통해 정리를 하였다.

모든 경우에, 외피 주위에서 수직방향의 온도 차이 때문에 외피를 따라 상층부를 향하여 속도가 발생되었고, 중심부와 하부의 유동의 속도는 미소하였다. 태양이 비행선 측면의 일몰각도에

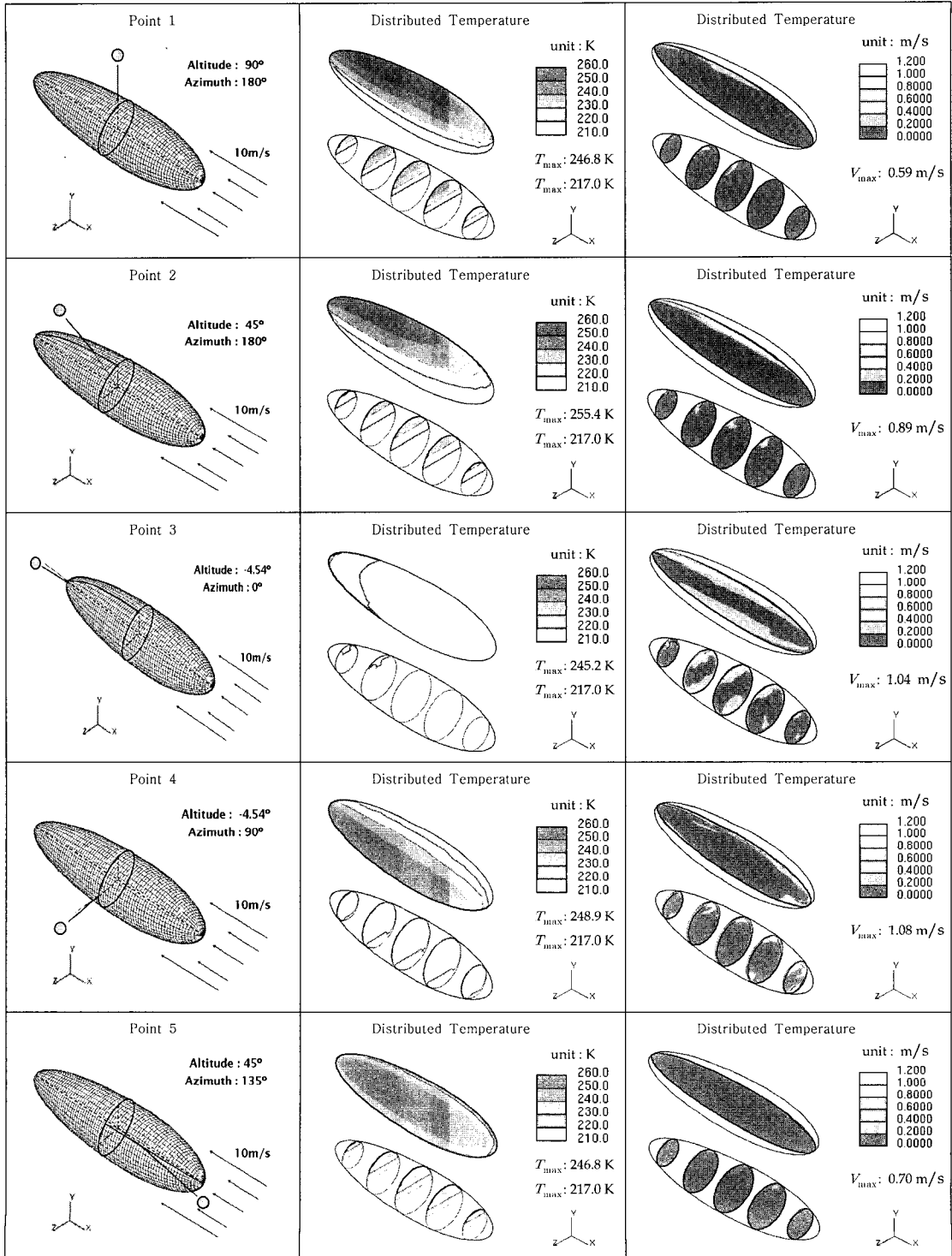


Fig. 12 Result of Analysis according as Solar Position

Table 4. Comparison According to Solar Position

태양위치	대기속도 (m/s)	최대온도 (K)	최대유속 (m/s)
point 1	0	273.5	0.49
point 1	10	257.6	0.59
point 2	10	255.4	0.89
point 3	10	245.2	1.04
point 4	10	248.9	1.08
point 5	10	246.8	0.70

있을 때, 약 1.1 m/s의 최고속도를 가졌다. 한편, 최고온도는 태양이 비행선 중심부에 수직으로 위치하고 대기속도가 0 m/s 일 때, 273.5 K의 값을 가졌다.

5. 결 론

본 연구에서는 성층권 열 환경 내에서, 성층권 비행선이 주어진 임무를 원활히 수행할 수 있는지 여부를 알아보기 위하여 태양복사 에너지를 고려한 성층권 비행선의 열 특성 연구를 수행하였다. 이를 위하여, 수치해석을 위해서 적합한 모델을 선정한 후, Sample Test를 수행하였다. 이를 바탕으로, 비행시험에서 측정된 값과 비교하였을 때 최대 2%의 오차를 가졌다.

태양 위치 변화에 따른 외피의 온도분포와 비행선 내부유동을 해석한 결과, 온도는 최대 273.5 K까지 상승하였다. 자연대류유동은 외피를 따라 발생하였으며, 중심부와 하부에서는 안정적인 상태를 유지하였다.

태양복사 에너지에 의한 온도 상승의 폭은 크지 않았고, 자연대류에 의한 내부유동도 하부와 중심부에서 안정된 기층을 형성하였다. 따라서, 비행선이 고도 20 km 성층권 열 환경에서 장기 체공 시에도, 내부탑재물의 성능저하는 없을 것이며, 비행성능도 확보할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 항공우주연구원 성층권 비행선 개발 사업단과 CD-adapco사 기술연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김민정 외, '태양 복사에너지에 의한 성층권 비행선의 열특성에 관한 연구', 한국추진공학회지 제9권 제2호, 2005, pp.89-96
2. 염찬홍 외, '국제 성층권 비행선 개발동향 및 주요 기술 현황', 한국항공우주학회지 제31권 제7호, 2003, pp.127-135
3. Star-CD Manual Methodology v3.20A, CD adapco, 2004, pp.9-1~9-7
4. Yunus A. Cengel, 'Heat Transfer : A Practical Approach', McGraw-Hill, 1999
5. 김형진 외, '성층권 비행선 전원공급용 태양 전지의 부착각도에 관한 연구', 한국항공우주학회지 제30권 제8호, 2002, pp.148-155