

## 꼬리날개를 고려한 50m급 비행선의 부가 질량 예측

옥호남\*, 류재문\*\*, 이융교\*\*\*, 이진우\*\*\*

### Prediction of the Added Mass of a 50-meter Class Airship with Empennage

Honam Ok\*, Jae-Moon Lew\*\*, Yung-Gyo Lee\*\*\* and Jinwoo Lee\*\*\*

**Key Words :** Added Mass (부가 질량), Airship (비행선), Strip Theory (띠 이론), Panel Method (패널 기법)

#### Abstract

Korea Aerospace Research Institute has been developing a 50-meter class airship to demonstrate the technology to be used in the development of a stratospheric airship, and importance of accurate prediction of the dynamic behavior of an airship before flight test is widely conceived. The added mass has large impact on the dynamic characteristics of an airship unlike for an airplane and the added mass of the airship with empennage is predicted in this paper. At first, the usability of the strip theory is examined which integrates the analytic two dimensional results in the cross section along the longitudinal axis. A panel method with the surface distribution of sources is developed and its validity is also examined. Finally, the panel method with both source and doublet distributions is implemented, and it is validated and applied for the calculation of the added mass of a 50-meter class airship. Using the methods developed, the influence of empennage and control surface deflection on the added mass property of the airship is studied.

#### 1. 서론

한국항공우주연구원에서 개발중인 50m급 비행선은 성층권에서 장기 체공하며 부여된 임무의 수행을 목표로 하는 다목적 성층권 비행선의 기술 입증기(Technology Demonstrator)로서의 의미를 지니고 있으며, 본격적인 성층권 비행선 개발에 필요한 기반 및 핵심 기술을 개발 확보하는 것이 중요한 연구 개발 목표중의 하나이다. 비행선은 그 자체로도 항공기와 다른 많은 특성들을 지니고 있으며, 또한 본 비행선은 정점 체공을 주 임무로 함으로써 보통의 비행선과는 다른 문제점들도 있다.[1] 이러한 특성의 예측 및 문제점 해결에 필요한 여러 설계 해석 도구들은 항공기 개발에는 요구되지 않는 것들도 많으며, 특히 부가 질량의 예측이 대표적인 사례중의 하나이다. 부가 질량의 개념에 관해서는 참고문헌 [2]와 같은 고전적인 유체역학 교과서들에 잘 기술되어 있고 또 조선 분야에서는 익숙한 개념이므로 여기서는 이에 대한 설명은 생략하고자 한다.

부가 질량은 직선 운동에 의한 질량 증가뿐만 아니라 회전 운동에 의한 회전 관성(Moment of Inertia)의 변화 효과도 가져오며, 또한 직선 및 회전 운동의 연계 효과도 있으므로 6×6 크기의 텐서(Tensor) 형태로 주어진다. 부가 질량은 그 이름이 의미하는 바를 따르면 일반적인 형태의 운동방정식의 좌변, 즉 물체의 질량 및 회전 관성(Moment of Inertia) 값을 변화시키도록 하는 것으로 볼 수 있으나, 더 엄밀히 말하면 직선 혹은 회전

운동 가속도에 의한 공력적인 힘의 변화를 나타낸다. 따라서 운동방정식의 우변, 즉 공력의 산출에 있어서 이를 고려하도록 하는 것이 더 정확한 개념으로 볼 수 있다. 어떤 처리 방식을 선택할 것인가 하는 점도 고려해 볼 문제이나, 본 비행선 개발에 있어서 운동방정식 해석 및 비행 모사(Flight Simulation)에 참고문헌 [3]의 기법을 따르므로 본 연구에서도 진자의 처리 방식을 택하였다. 이를 따르면 부가 질량 tensor의 36개(대칭형이므로 미지수는 27개) 항 중 오직 7개 성분만이 필요하도록 운동방정식이 구성된다.

여기서는 비행선의 운동방정식 해석에 필요한 부가 질량을 어떻게 구할 것인가에 대하여 알아보려고 하였다. 먼저 해석적 기법을 응용한 띠 이론(Strip Theory)에 대하여 알아보고, 비행선 동체와 같은 회전체 문제에 적용함으로써 그 한계를 파악하고자 하였다. 다음으로 패널 기법(Panel Method)의 적용 가능성을 알아보려고 하였다. 먼저 물체 표면에 source만을 분포시킨 패널 기법을 개발하고, 이를 회전체 및 비행선에 적용하여 보았다. 다음으로 계산 결과에서 드러난 Source 패널 기법의 한계를 극복하기 위하여 source 외에 doublet을 함께 분포시킨 패널 기법을 개발하고, 여러 형상의 물체에 대한 검증을 거쳐 최종적으로 50m급 비행선의 부가 질량을 예측하고자 하였다.

#### 2. Strip Theory에 의한 부가 질량 계산

비행선의 부가 질량 산출을 위한 기법으로 먼저 띠 이론(Strip Theory)의 적용 가능성을 살펴보았다. 이 기법은 기본적으로 세장형 물체(Slender Body)의 부가 질량을 산출하기 위한 것으로, 2차원 단면에 대하여 알려진 이론해(Analytic Solution)

\* 한국항공우주연구원 로켓체계개발그룹,  
honam@kari.re.kr

\*\* 충남대학교 선박해양공학과, jmlw@cnu.ac.kr

\*\*\* 한국항공우주연구원 비행선연구그룹

를 축방향을 따라가며 적분함으로써 임의의 3차원 물체의 부가 질량을 구한다. 이 기법은 참고문헌들[4,5]에 그 이름은 언급되어 있거나 자세한 설명이 주어지지 않았으며, 오히려 참고문헌 [6]에 missile의 동안정 미계수를 구하기 위한 중간 과정으로 간단히 소개되어 있다. 그러나 조선 분야에서는 이 기법이 잘 알려져 있으므로 그 자세한 계산 과정은 생략하고 여기서는 결과만을 살펴 보고자 한다.

Strip theory를 비행선 부가 질량 계산에 응용할 수 있는지의 여부를 알아보기 위하여 이론해가 알려진 타원 회전체(Ellipsoid)의 부가 질량을 계산하였다. 장단축의 길이가 각각 a, b인 회전체의 세장비(a/b)의 값을 변화시켜 가면서 무차원화된 부가 질량 성분을 이론해[7]와 비교한 결과를 그림 1에 나타내었다. 이 그림에서  $\mu_x$  및  $\mu_y$ 는 x 및 y 축 방향 직선 운동,  $\mu_{yy}$ 는 y 축에 대한 회전 운동에 의한 무차원 부가 질량을 나타낸다. 여기서 a/b의 값이 커질수록, 즉 단면적의 변화가 작을수록 이론해와 strip theory의 결과가 점점 더 잘 일치하게 됨을 알 수 있으며, 이는 strip theory의 유도에 사용된 기본 가정과 일치하는 결과이다. 본 비행선과 같이 세장비의 값이 4인 경우에는  $\mu_y$ 는 약 16%,  $\mu_{yy}$ 는 약 55%의 차이를 나타내며, 이론해에 의한  $\mu_x$ 는 비교적 작은 0.0816의 값을 나타내고 있다. 따라서 50m 급 비행선 동체의 부가 질량 계산에 있어서 strip theory 계산

결과의 신뢰도가 높다고 보기는 어려우며, 세장비가 작은 현대식 비행선 형상에 있어서 부가 질량의 계산을 위해 이 기법을 적용하는 것은 적절치 못한 것으로 판단된다. 그러므로 비행선의 부가 질량 산출을 위해서는 더욱 정확도가 높은 기법에 의존하여야 할 것으로 보이며, 이를 위해 패널 기법을 적용하여 보았다.

### 3. Panel Method에 의한 부가 질량 계산

부가 질량은 항공기 개발 분야에서는 수요가 없어 계산 기법도 거의 개발되어 있지 않으나, 항공기 공력 예측에 많이 사용되는 패널 기법(Panel Method)을 응용하여 그 값을 얻을 수 있다. 이러한 연구는 조선 분야에서 활발하며, 선박의 특성상 자유경계면(Free Surface)이 있는 좀 더 복잡한 문제에 대한 해를 구할 수 있도록 기술이 개발되어 있다. 패널 기법 자체에 대한 이론적 설명은 참고문헌 [8] 등에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 모두 생략하고, 결과만을 살펴보고자 한다.

#### 3.1 Source Panel Method

양력을 발생하지 않는 물체에 대해서는 물체 표면에 source만을 분포시킨 패널 기법으로도 정확한 유동장의 계산이 가능하며, 본 연구에서는 먼저 이러한 기법을 이용하여 부가 질량을 간편하게 구해보고자 하였다. 앞의 strip theory의 경우와 마찬가지로 세장비를 변화시켜 가며 타원 회전체의 부가 질량을 계산하였으며, 이론해와의 비교 결과를 그림 2에 나타내었다.  $\mu_x$ 의 값은 모든 세장비에 대하여 이론해와 잘 일치하는 것처럼 보이나,  $\mu_y$  및  $\mu_{yy}$ 는 세장비가 커질수록 차이가 나타남을 알 수 있다. 그러나 이론해에 대한 오차는 그림 2 (b)에 나타내었듯이 모든 세장비에 대하여 약 5% 전후의 값을 가짐을 알 수 있으며, 따라서 임의의 물체에 대한 부가 질량 계산에 source 패널 기법을 적용할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 여기서 한 가지 유의해야 할 점은, source 패널 기법이 공력 특성의 계산에 있어서 양력을 발생하지 않는 물체에 한한다는 적용 범위의 제한이 있으며, 따라서 양력 발생면이 있는 물체의 부가 질량 산출에 어떤 특성을 나타낼 지가 아직까지 불확실하다는 점이다. 또한 지금까지의 검증이 부가 질량 tensor의 대각항(Diagonal Term)만을 위주로 하였으며, 비대각항(Off-Diagonal Term)의 경우에 대한 정확도는 검증되지 않았음에 주의해야 할 것이다.

다음으로 source 패널 기법을 적용하여 50m급 비행선의 부가 질량을 계산하였다. 그림 3에는 승강타 변위 30도인 경우의 표면 격자를 나타냈었으며, 공기 밀도를 1.0으로 두었을 때의 계산 결과는 표 1과 같다. 여기서 밀줄 그은 항들은 물리적 의미를 갖는 것들이며, 물리적 의미는 없으나 비대각항들을 살펴봄으로써 계산 기법의 정확도를 추정할 수 있다. 즉 좌우 대칭형상인 경우 0이 되어야 할 일부 비대각항들이 제법 큰 값을 나타내고 있어 이러한 항들에 대한 source 패널 기법의 정확도가 높지 않음을 짐작할 수 있다. 이와 같은 비대각항 계산 결과에 대한 불확실성은 타원 회전체의 경우에 있어서도 나타났으며, 따라서 비행선 꼬리날개와 같은 양력 발생면의 존재에 의한 것은 아닌 것으로 보인다.

#### 3.2 Source/Doublet Panel Method

비록 물리적 의미가 있는 항들에 대한 source 패널 기법의 정확도는 있는 것으로 보이나, 비대각항들에 대한 한계로 인하여 좀 더 정확도 높은 계산 기법이 필요한 것으로 보고 source

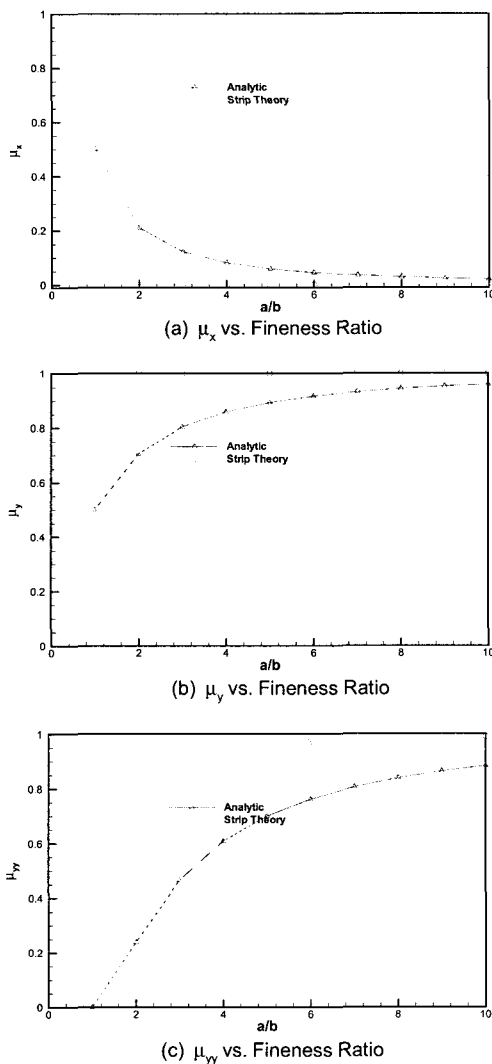


Fig. 1 Added Mass of an Ellipsoid by the Strip Theory

및 doublet을 동시에 분포시키는 source/doublet 패널 기법을 적용하여 비행선의 부가 질량을 계산하고자 하였다. 계산 기법의 검증은 위하여 앞에서와 같이 타원 회전체의 부가 질량을 계산하고, 이론해와 비교 결과를 그림 4에 나타내었다. 전반적으로 이 기법이 source만 분포시킨 것에 비하여 정확도가 더 뛰어난 것을 알 수 있으며, 이론해와 완벽히 일치함을 알 수 있다. 또한 비대각항에 있어서도 모두 0의 값을 나타내고 있어 계산 결과의 정확도가 매우 높음을 알 수 있다. 그리고 양력 발생면이 있는 경우에 대한 기법의 정확도를 알아보기 위하여 2차원 평판의 부가 질량을 산출하였으며, 역시 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이러한 source/doublet 패널 기법으로 일반적인 형상의 부가 질량을 정확히 산출할 수 있음을 알 수 있으며, 이 기법을 사용하여 비행선의 부가 질량을 계산하였다.

표 2에는 승강타 변위 30도, 밀도 1.0일 때의 부가 질량 tensor를 나타내었다. Source 패널 기법의 결과에 비하여 좀 더 나은 대칭성을 보이고 있고, 0이 되어야 할 값들의 크기도 한 order 정도 더 작게 나타남을 알 수 있다. 그런데 여기서 한 가지 흥미로운 점은 물리적 의미가 있는 값들(표에서 밑줄 표시)은 두 기법에 의한 계산 결과가 거의 같다는 점이다. 즉 source 패널 기법이 해의 대칭성은 떨어지고 0이 되어야 할 성분이 제법 큰 값을 나타낸다는 점을 제외하고는 물리적 중요성을 가진 항들은 source/doublet 기법에 의한 결과와 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

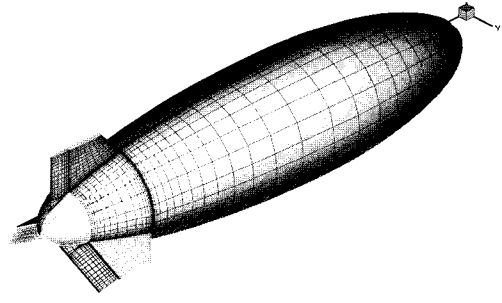
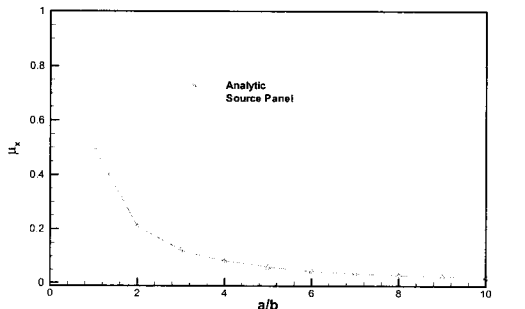
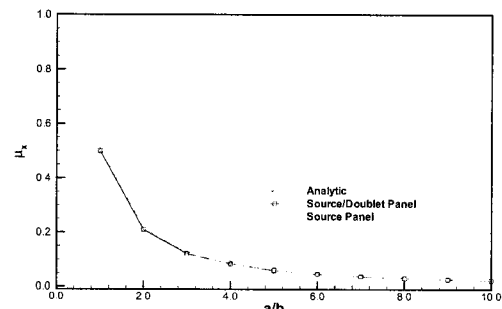


Fig. 3 Surface Mesh of a 50-meter Class Airship

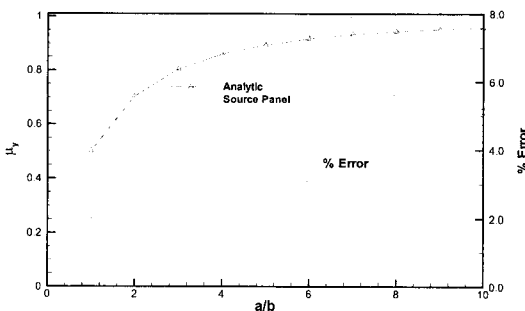
표 2의 결과에서 한 가지 흥미로운 점은  $M_{46}$  성분이 제법 큰 음의 값을 갖는다는 점이다. 이것은 roll 방향 가속 회전 시 yaw 방향으로 힘이 발생하는 것을 의미하며, 부호가 음의 값을 갖는 것은 yaw 방향으로 회전에 저항하는 힘이 아니라 오히려 회전을 도와 주는 힘이 발생한다는 뜻이다. 승강타의 변위가 없는 경우 50m급 비행선 형상의 대칭적 특징상 이러한 힘이 발생할 수 없으며, 계산 결과도 0의 값을 나타내었다. 승강타나 방향타의 변위는 비행선의 외형을 변화시키고 따라서 그에 의해 결정되는 부가 질량의 모든 성분이 영향을 받는 것은 당연하다. 그러나 대각항들의 변화는 상대적으로 크지 않으며 단지 비대각항 성분인  $M_{46}$  만이 의미 있는 값의 변화를 나타내고 있다. 따라서 이 성분은 모든 승강타의 변위에 대하여 각각 다른 값을



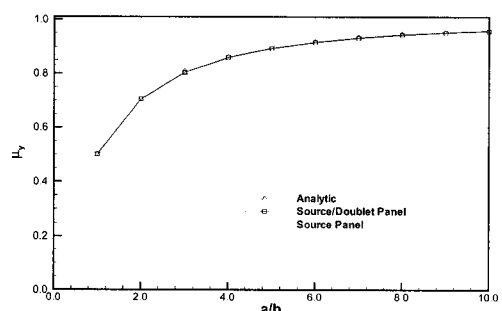
(a)  $\mu_x$  vs. Fineness Ratio



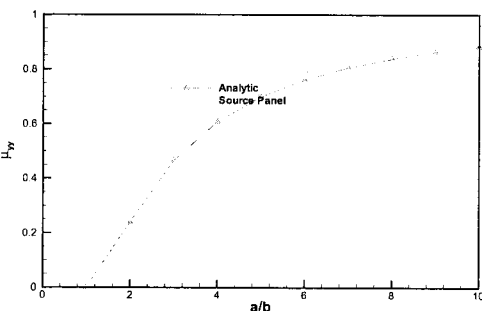
(a)  $\mu_x$  vs. Fineness Ratio



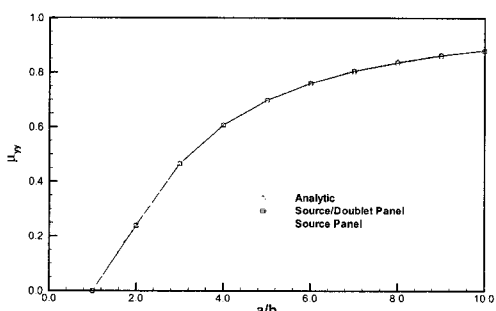
(b)  $\mu_y$  vs. Fineness Ratio



(b)  $\mu_y$  vs. Fineness Ratio



(c)  $\mu_{vv}$  vs. Fineness Ratio



(c)  $\mu_{vv}$  vs. Fineness Ratio

Fig. 2 Added Mass of an Ellipsoid by the Source Panel Method

Fig. 4 Added Mass of an Ellipsoid by the Source/Doublet Panel Method

Table 1 Added Mass Tensor of the 50m Class Airship by Source Panel Method

<u>0.34990E+03</u>	-0.45930E+00	0.28841E+02	0.22106E+01	0.64616E+03	0.10327E+02
-0.78663E+00	<u>0.39279E+04</u>	-0.54470E+00	0.55661E+02	-0.30072E+02	-0.64136E+04
0.43354E+02	-0.17850E+01	<u>0.39178E+04</u>	0.59544E+01	0.63592E+04	0.26164E+02
0.18797E+01	0.20136E+02	0.39651E+01	<u>0.64032E+04</u>	0.10373E+03	<u>-0.96058E+03</u>
0.95388E+03	-0.25385E+02	0.62856E+04	0.13368E+03	<u>0.45556E+06</u>	0.63619E+03
0.16756E+02	-0.64144E+04	0.25276E+02	<u>-0.15541E+04</u>	0.58398E+03	<u>0.45491E+06</u>

로 예상할 수 있었다. 그러나 흥미롭게도 source 패널 기법의 계산 결과가 앞에서 말한 결점을 지니고 있거나 물리적 의미가 있는 부가 질량 성분에서 source/doublet 계산 기법과 거의 유사한 결과를 나타내고 있

사용하도록 하는 것이 타당할 것으로 볼 수 있다. 만약 비행선의 roll 운동에 대한 예측 정확도가 전체 비행 예측에 큰 영향을 미친다면, 이러한 점을 고려하기 위해서는 부가 질량의 효과를 운동방정식에서 단순히 moment of inertia의 변화량으로 나타내기보다는 공기역학적인 힘에 포함시키도록 하는 것이 더 합리적인 것으로 보인다. 그런데 앞서도 언급한 바와 같이 비행선의 roll 운동이 다른 두 성분의 회전 운동에 비하여 그 중요도가 상대적으로 떨어지며, 따라서 어떤 대표값을 선정하여 사용하여도 될 것으로 추정된다. 방향타 변위 10°일 때의 부가 질량 계산 결과 전체적으로 대각항의 변화는 크지 않으며 앞의 승강타의 경우와 마찬가지로  $M_{46}$  성분이 양의 값을 가지는 것이 특징적인 변화이다.

4. 결론

50m급 비행선의 운동방정식 해석에 필요한 부가 질량을 예측하기 위해 세 가지 기법을 적용하였다. 먼저 2차원 이론해를 축방향으로 적분하여 임의의 3차원 형상에 대한 부가 질량을 계산하는 strip theory를 적용하여 비행선 동체와 같은 타원 회전체의 부가 질량을 예측하였다. 이 기법은 세장비 4인 타원 회전체의 부가 질량을 제대로 예측할 수 없어 비행선에의 적용은 의미가 없는 것으로 나타났다.

다음으로 물체 표면에 특이점을 분포시켜 임의의 형상에 대한 공력 특성을 예측하는 패널 기법을 사용하여 부가 질량을 계산하였다. 먼저 source 만을 분포시킨 패널 기법을 적용하여 타원 회전체의 부가 질량을 예측하였으며, 이론해와 잘 일치함을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 비행선 동체 및 꼬리날개를 포함한 비행선의 부가 질량을 계산하였다. 그러나 대각항의 신뢰도는 높으나 부가 질량 tensor의 대칭성이 떨어지고 0이 되어야 할 비대각항들에 제법 큰 값이 나타나 이 기법의 정확도를 재고할 필요성이 생겼다. 따라서 이러한 결점이 없는 좀 더 정확도 높은 기법의 개발이 필요하였으며, 이를 위해 물체 표면에 source와 doublet을 함께 분포시키는 패널 기법을 적용하였다.

Source/doublet 패널 기법은 타원 회전체에 대하여 거의 완전한 대칭 형태와 0에 가까운 비대각항들을 나타내었으며, 특히 2차원 평판의 부가 질량을 정확도 높게 예측하였다. 이 기법을 사용하여 꼬리날개가 달린 비행선의 부가 질량을 계산하였으며, 그 계산 결과의 신뢰도가 source panel 기법에 비해 높을 것으

로 예상할 수 있었다. 따라서 source 패널 기법 역시 비행선의 부가 질량 예측에 있어서 충분히 유용한 결과를 제공할 수 있는 것으로 나타났다.

50m급 비행선의 동체에 대한 부가 질량 계산 결과를 기준으로 하였을 때 직선 운동 성분들은 꼬리날개가 있는 형상과 10% 이내의 편차를 보였으며, pitch 및 yaw 회전 성분은 꼬리날개의 효과에 의해 20% 정도 부가 질량이 증대된 효과를 나타내었다. Roll 회전에 의한 성분은 꼬리날개를 포함하여야만 예측할 수 있으며, 다른 2개의 회전 성분과 함께 조종면의 변위에 의한 차이는 무시할 만한 정도로 나타났다. 따라서 직선 성분 및 회전 성분들은 모두 꼬리날개의 변위가 없는 경우에 대한 계산 결과를 사용하면 될 것으로 나타났다. 마지막으로 pitch 및 roll 운동의 연계 성분은 조종면의 변위에 따라 그 절대값 및 부호가 크게 변한다. 따라서 정확한 계산을 위해서는 모든 조종면 변위에 대한 database를 구축해 두어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] 육호남, "중형비행선의 공기역학적인 문제점 및 해결 방안 연구," KARI-AD-TM-2000-024, 한국항공우주연구원, 기술 보고서, 2000.
- [2] Milne-Thomson, L. M., *Theoretical Hydrodynamics*, 2nd Edition, The Macmillan Company, New York, 1950.
- [3] Khoury, G. A. and Gillett, J. D., *Airship Technology*, Cambridge University Press, 1999.
- [4] Sahin, I., Crane, J. and Watson, K., "Added Mass Coefficients for Submerged Bodies by a Low-Order Panel Method," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 115, Sept. 1993, pp. 452-456.
- [5] Faltinsen, O. M., *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, 1st Edition, Cambridge University Press, 1990.
- [6] Nielsen, J. N., *Missile Aerodynamics*, Nielsen Engineering and Research Inc., 1988.
- [7] Bateman, H., "The Inertia Coefficients of an Airship in a Frictionless Fluid," NACA Report No. 164.
- [8] Katz, J. and Plotkin, A., *Low-Speed Aerodynamics From Wing Theory to Panel Methods*, International Edition, McGraw-Hill, Inc., 1991.

Table 2 Added Mass Tensor of the 50m Class Airship by Source/Doublet Panel Method

<u>0.33815E+03</u>	0.99356E-02	0.34655E+02	-0.85309E-01	0.75965E+03	-0.20078E+00
-0.84194E-02	<u>0.37805E+04</u>	-0.30786E-01	0.53249E+02	-0.41490E+00	-0.65960E+04
0.33331E+02	-0.24413E-01	<u>0.37817E+04</u>	0.10680E+00	0.67169E+04	0.77624E+00
-0.90250E-02	0.64677E+02	-0.41491E-01	<u>0.65212E+04</u>	-0.91518E+00	<u>-0.17619E+04</u>
0.73068E+03	-0.83128E+00	0.67122E+04	-0.24788E+01	<u>0.44928E+06</u>	0.16541E+02
0.92474E-01	-0.65835E+04	0.22142E+00	<u>-0.15595E+04</u>	0.59957E+01	<u>0.44455E+06</u>