

항공기용 외부연료탱크 질량 관성모멘트 측정 시험치구 및 오차분석

김현기^{1*}, 김성찬¹, 하병근², 안수홍²
¹한국항공우주연구원, ²한화에어로스페이스

Test Fixture and Error Analysis for Measuring Mass Moment of Inertia for Aircraft External Fuel Tank

Hyun-gi Kim^{1*}, Sungchan Kim¹, Byung Geon Ha², Su-hong An²

¹Korea Aerospace Research Institute

²Hanwha Aerospace Corporation

요약 질량 관성모멘트는 물체가 자신의 회전운동을 유지하려는 정도를 나타내는 물리량이다. 질량 관성모멘트는 회전 운동을 기술하는데 필요한 각운동량, 각속도, 각가속도, 회전힘들 사이의 관계를 나타내며, 시험체의 회전축, 질량 그리고 형상 등에 의해 달라진다. 질량 관성모멘트는 수치해석 모델을 통해 계산할 수 있으나, 수치해석 모델을 실제 구조물의 질량 분포나 각 구성품들의 위치와 정확하게 일치하도록 만드는 것은 불가능하다. 따라서, 수치해석 모델의 계산값과 시험 측정값 사이의 오차를 확인하여 질량 관성모멘트 측정시험의 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 본 논문에서는 항공기용 외부연료탱크의 질량 관성모멘트를 측정하고 그 결과를 제시하였다. 본문에서는 질량 관성모멘트를 측정하기 위한 시스템 구성과 시험치구, 그리고 질량 관성모멘트 측정을 위한 시험설치에 대해 설명하였다. 또한, 질량 관성모멘트 계산에 사용되는 파라미터 산출을 위해 수행해야 하는 무게중심 측정 방법을 설명하였다. 그리고, 시험에 사용하는 스프링 상수의 선형 구간을 파악한 후, 진동시험을 통해 각 시험체의 진동주파수를 측정하여 질량 관성모멘트의 계산에 적용하였다. 시험결과로, 측정된 질량 관성모멘트와 기준값과의 비교를 통해 측정 결과의 오차를 분석하여 시험 결과의 신뢰성 수준을 확인하였다.

Abstract The mass moment of inertia (MMOI) represents the relationship between angular momentum, angular velocity, angular acceleration, and rotational forces necessary to describe rotational motion; it varies depending on the rotation axis, mass, and shape of the test specimen. The MMOI can be calculated using a numerical model, but it is impossible to make the numerical model exactly match the mass distribution of the test specimen or the location of each component. Therefore, it is necessary to verify the reliability of the MMOI measurement test by checking the error between the value of the numerical model and the test measurement. In this study, the MMOI of an aircraft external fuel tank was measured. The system configuration and test fixture for measuring the MMOI and the test installation were explained. In addition, the method of measuring the center of gravity applied to calculate the MMOI was explained. After identifying the linear interval of the spring constant, the vibration frequency of the test specimen was measured through the vibration test and applied to the calculation of the MMOI. The reliability of the test results was confirmed by analyzing the error between the measured MMOI and the reference values.

Keywords : Center of Gravity, External Fuel Tank, Frequency, Mass Moment of Inertia, Spring Constant

*Corresponding Author : Hyun-gi kim(Korea Aerospace Research Institute)

email: shotgun1@kari.re.kr

Received April 24, 2024

Accepted July 5, 2024

Revised May 27, 2024

Published July 31, 2024

1. 서론

질량 관성모멘트(Mass Moment of Inertia, 이하 MMOI)는 회전운동을 기술하는데 필요한 각운동량, 각 속도, 각가속도 사이의 관계를 이어주는 물리량으로써, 물체의 형상, 회전축 그리고 질량에 따라 달라진다. MMOI는 이론식을 통해 구할 수 있으나 복잡한 구조물에서는 적용하기 용이하지 않다. 또한, 수치모델의 질량 분포와 각 구성품들의 장착위치를 실제 구조물과 정확하게 일치하도록 만드는 것은 쉽지 않기 때문에, 수치모델의 계산값과 시험 측정값 사이의 차이가 발생할 수 밖에 없다. 따라서, 항공기 운용시 해당 구성품들의 동특성을 정확하게 파악하기 위해서는 시험체의 정확한 질량분포와 각 구성품들의 MMOI 정보가 필요하기 때문에 수치 모델에서의 MMOI 값과 측정값 사이의 오차를 확인할 필요가 있다.

관련 세부연구로, 자체 개발한 질량, 무게중심(Center of Gravity, CG) 및 MMOI 측정장비를 이용하여 시험체의 MMOI를 측정하고, 측정 불확도 추정 연구가 진행되었고[1,2], 공기 베어링을 이용하여 대형구조물의 MMOI 측정 연구가 진행된 바 있다[3]. 또한, 무인표적기의 CG와 MMOI를 측정하고 실험값과의 비교를 통한 신뢰성 연구가 수행되었으며[4], 틸트로터 무인항공기의 MMOI를 측정하는 실험적인 방법과 정확도 분석연구가 진행된 바 있다[5]. 그리고, 인공위성의 MMOI 추정을 위한 MRP(Modified Rodrigues Parameter) 자세 변수기반의 추정기 설계에 대한 연구가 수행되었고[6], 우주선의 CG와 MMOI 획득 절차에 대한 연구가 진행된 바 있다[7].

항공기용 구성품과 같은 대형 시험체의 MMOI를 측정하는 위해서는 Fig. 1과 같은 고가의 측정장비를 사용해야 하고, 시험체와 장비를 정밀하게 고정시킬 수 있는 별도로 시험치구도 준비해야 한다. 해당 장비는 높은 측정 정확도를 보장하지만, 운용비용이 높고, MMOI 측정이 다수 요구되는 경우 장비의 사용이 어려울 수 있다.

본 논문에서는 저비용으로 MMOI를 측정할 수 있는 시험치구를 제작하고, 해당 시험치구를 적용하여 항공기용 외부연료탱크의 MMOI를 측정한 후, 시험 결과의 신뢰성을 확인하였다. 본문에서는 MMOI를 측정하기 위한 시스템 구성과 시험치구에 대해 설명하였다. 그리고, MMOI 계산에 필요한 파라미터들을 구하기 위해 수행되는 시험체 무게중심 측정방법에 대해 설명하였다. 정확한 진동주파수 측정을 위해 힌지와 스프링으로 지지되는

시험체가 초기에 수평상태가 유지되도록 설치하였고, 시험시 진동 폭이 작으면서 운동상태의 모드가 혼합되지 않도록 초기변위를 인가하였다. 최종적으로, 시험체의 피치(Pitch)와 요(Yaw) 방향에 대해 각각 10회의 진동 시험을 수행한 후, 그 평균값을 MMOI 계산에 적용하였고, 시험값과 수치모델값과의 비교를 통해 실측한 MMOI의 신뢰성을 확인하였다.



Fig. 1. Equipment for measuring MMOI of Large Structure

2. 시스템 구성과 설치

시험체의 MMOI를 측정하기 위한 개략적인 시스템 구성은 Fig. 2와 같으며, 시스템의 주요 구성에 대한 설명은 다음과 같다.

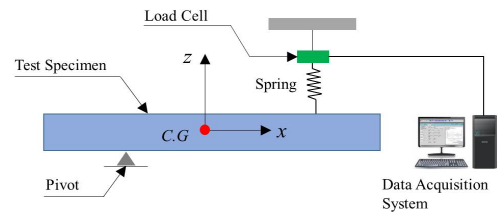


Fig. 2. Test Configuration of MOI Measurement

- ① 스프링: 하중-변위 그래프의 초기 하중구간은 비선형이고, 스프링의 탄성변형 범위 내에는 선형구간이 일정범위 존재한다. 이 선형구간의 중간점이 스프링에 걸리는 초기 하중과 부합되게 스프링을 설계/제작하고, 스프링의 스프링 상수를 측정하여 MMOI 측정에 적용하였다.
- ② 로드셀: MMOI 측정 시 스프링의 진동하중을 전기적 신호로 바꾸어 인디케이터에 전달하는 기능을 한다.
- ③ 데이터획득장비: 로드셀에서 계측된 스프링 하중신호를 디스플레이하여 주파수 측정이 가능토록 한다. 본 시험에서는 HBM MGCplus가 데이터 획득 장비로 사용되었다.

Fig. 3은 MMOI를 측정하는 시험체를 보여주고 있다. Fig. 4는 시험체의 피치(Pitch) 및 요우(Yaw) 방향 MMOI를 측정하기 위해 제작한 장비이다. 시험체의 한 쪽은 힌지로 고정하고, 반대편은 스프링을 연결시켜서 해당장비에 수평으로 올려 놓는다. 그리고, 베어링 피봇을 중심으로 진동하도록 초기 변위를 인가한 후, 진동주기를 측정하여 주파수를 측정한다. 그리고, 식 (1)을 이용하여 MMOI를 계산한다[2]. 참고로, 식 (1)에 사용되는 물리량들은 Fig. 5에 나타내었다.



Fig. 3. Test Specimen for MMOI Measurement

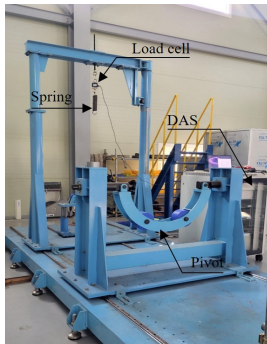


Fig. 4. Test Equipment for MMOI Measurement

$$I_{CG} = \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \cdot (K \cdot L^2 - W \cdot h) - \frac{W}{g} (a^2 + h^2) \quad (1)$$

여기서, 식 (1)에 사용된 기호에 대한 정의는 아래와 같다.

- f : 측정 주파수
- K : 스프링 강성
- L : 힌지에서 스프링 고정점까지의 거리
- h : 시험체 하단에서 무게중심까지의 높이
- W : 시험체 무게
- g : 중력가속도
- a : 힌지에서 시험체 무게중심까지의 거리

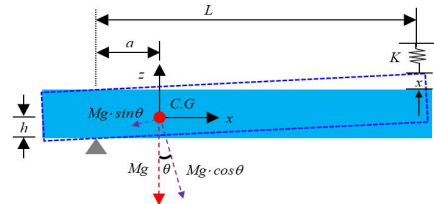


Fig. 5. Parameter for MMOI measurement

3. 무게중심 측정

MMOI 측정을 위해서는 시험체의 CG를 먼저 측정해야 한다. Fig. 6과 같이 두 지점에 작용하는 반력을 측정한 후, 모멘트 평형식을 이용하면 식 (2)와 같이 반력지점에서 가로방향 CG 거리 a 를 계산할 수 있다. 그리고, Fig. 7과 같이 시험체를 각도 θ 만큼 기울인 후, 전방 반력지점을 기준으로 모멘트 평형식을 적용하면 식 (3)과 같이 수직방향의 무게중심 거리 x 를 계산할 수 있다. 실측을 통해서 측정된 수평방향과 수직방향의 CG 위치는 Table 1과 같다.

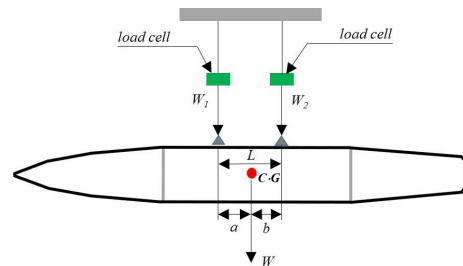


Fig. 6. CG Measurement of Horizontal Direction

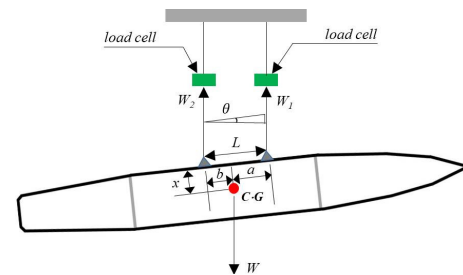


Fig. 7. CG Measurement of Vertical Direction

$$a = \frac{W_2}{W} L \quad (2)$$

$$x = \left(L \cdot \frac{W_1}{W} - b \right) \cdot \cot(\theta) \quad (3)$$

Table 1. Measurement of CG

Direction	Location(mm)	Note
Horizontal	620.3	a in Fig. 6
Vertical	371.7	x in Fig. 7

참고로, 식 (2)와 (3)의 기호에 대한 설명은 아래와 같다.

- L : 전후방 반력 측정점사이의 거리
- a : 무게중심과 전방 반력 측정점 거리
- W : 시험체 무게
- W_2 : 후방 반력 측정값
- W_1 : 전방 반력 측정값
- b : 무게중심과 후방 반력 측정점 거리

4. 시험 수행

4.1 스프링 상수 측정

본 시험에 사용된 스프링의 상수 측정 결과는 Fig. 8과 같다. 결과로부터, 스프링에 인가되는 하중크기가 50~175kg 범위에서는 선형거동을 보이므로 이 범위의 시험체 중량에 대해 적용할 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 참고로, 스프링 상수는 Fig. 9와 같이 시험체 하중을 포함하는 범위에서 무게추를 사용하여 측정하였다.

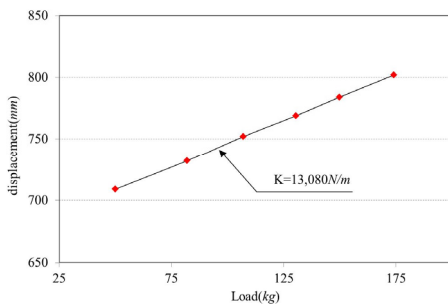


Fig. 8. Measurement of Spring Constant

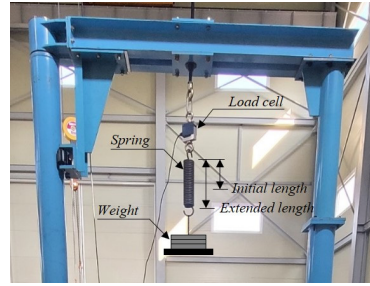


Fig. 9. Test Configuration of Measuring Spring Constant

4.2 MMOI 측정

Fig. 10(a)와 (b)는 시험체의 Pitch 방향(I_{yy})과 Yaw 방향(I_{zz})의 MMOI를 측정하기 위한 시험설치 형상이다. 참고로, 시험설치시 시험체의 수평 여부는 Fig. 11과 같이 디지털 각도계를 사용하여 확인하였다. 각 시험체의 Pitch 방향과 Yaw 방향에 대한 진동주파수를 측정하기 위해, 초기변위를 인가하는 진동시험을 총 10회 수행한 후, 평균값을 계산하였다. 참고로, Fig. 12는 시험체의 Pitch 방향과 Yaw 방향에서 측정된 진동을 나타내고 있으며, Table 2는 Pitch 방향과 Yaw 방향에 대해 10회 측정한 MMOI 결과이다. 시험체에 대한 Pitch 방향과 Yaw 방향의 진동주파수 평균값은 Table 3과 같으며, Table 4는 각 방향의 MMOI를 계산하기 위해 식 (1)에 적용되는 물리량들을 나타내고 있다.

Table 5는 시험체에 대한 MMOI 측정결과와 Fig. 13에 나타난 수치해석 모델의 MMOI 값과의 비교 결과이다. 그 결과, Pitch 방향 MMOI(I_{yy})는 1.1%, Yaw 방향 MMOI(I_{zz})는 2.6% 오차로 파악되어 전체적으로 3% 이내의 오차 수준을 보이는 것으로 확인되었다. 해당 결과는 수치해석 모델을 적용한 동특성 해석이 실측값과 갖게 되는 오차 수준을 의미하며, 향후 측정결과를 반영하여 유한요소 수치해석 모델의 신뢰성을 향상시키거나, 동특성 해석 결과를 보정하는 중요 데이터로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

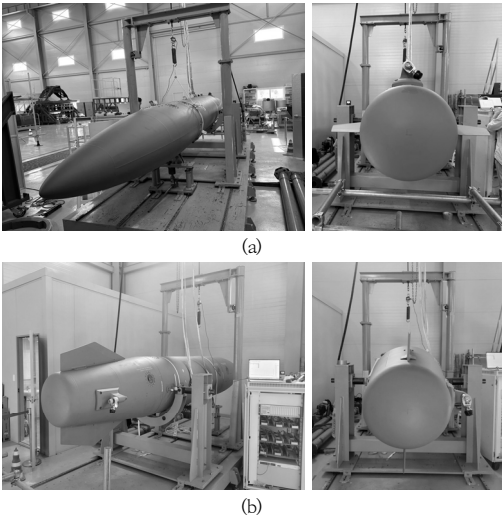


Fig. 10. Test Setup for MMOI Measurement
(a) Measurement of I_{yy} (b) Measurement of I_{zz}



Fig. 11. Check the Level of the Test Specimen

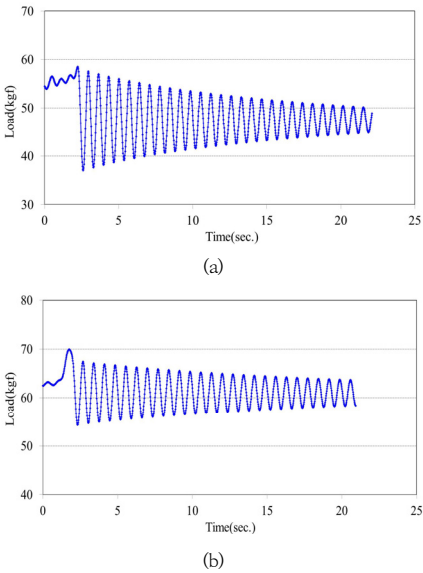


Fig. 12. Frequency Measurement of Test Specimen
(a) Pitch (b) Yaw

Table 2. Measured Frequency of Pitch and Yaw

No.	I_{yy} (Pitch)	I_{zz} (Yaw)
1	1.45	1.40
2	1.46	1.40
3	1.45	1.41
4	1.46	1.40
5	1.45	1.40
6	1.46	1.40
7	1.46	1.40
8	1.45	1.40
9	1.45	1.40
10	1.45	1.40

Table 3. Average Frequency for Pitch and Yaw

MOI	I_{yy}	I_{zz}
Frequency(Hz)	1.45	1.40

Table 4. Parameter for MMOI Measurement

Parameter	I_{yy}	I_{zz}
$K(N/m)$	13,080	
$l(m)$	1.57	
$a(m)$	0.5	0.59
$h(m)$	0.360	0.366

Table 5. Error of MMOI between Test and Numerical Model

MOI	Test($kg \cdot m^2$)	FEM($kg \cdot m^2$)	Error(%)
I_{yy}	319	323	1.1
I_{zz}	330	322	2.6

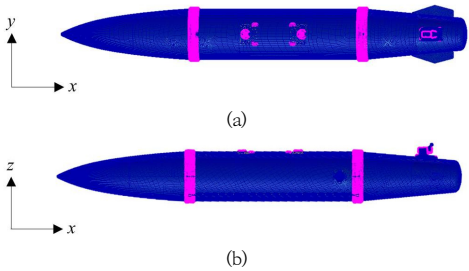


Fig. 13. Finite Element Model of Test Specimen
(a) Top View (b) Side View

5. 결론

본 논문에서는 항공기용 외부연료탱크의 MMOI 측정 결과를 제시하였다. MMOI를 정확하게 측정하기 위해서는 시험체의 수평상태가 유지되어야 하며, 흔들리는 진동폭이 작고 운동상태의 모드가 혼합되지 않아야 한다. 또한 무게중심 위치와 진동시간의 측정이 정확해야 하고, 시험에 사용하는 스프링 상수가 정확하게 반영되어야 한다. 본 논문의 구체적인 수행내용은 다음과 같다.

첫째, MMOI를 측정하기 위해 제작한 시험치구와 MMOI 계산에 사용되는 파라미터들에 대해 설명하였다.

둘째, 각 방향에 대한 시험체 설치형상을 나타내었고, 시험체를 매달기 위해 사용되는 스프링 상수와 진동주기 측정 결과를 제시하였다.

셋째, 측정 MMOI의 오차를 분석한 결과, 시험체의 피치방향 MMOI에 대한 오차 1.1%, 요 방향 MOI에 대한 오차는 2.6%로, 전체적으로 1~3% 오차 수준을 보이는 것으로 파악되었다.

넷째, 본 논문의 오차 분석 결과는 수치해석 모델에 대한 개선 또는 동특성 해석 결과의 보정에 적용 가능할 것으로 사료된다.

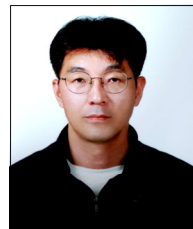
References

- [1] K.R. Kim, Y.S. Lee, "Study on the Estimation of Measurement Uncertainty in MOI Measurement", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 16, no. 6, pp. 797-802, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2013.16.6.797>
- [2] K.R. Kim, H.W. Kang, C.W. Shul, "The Confidence Estimation of MOI Measurement Equipment using Uncertainty Analysis", *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 53-57, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2018.12.3.53>
- [3] M.S. Yang, Y.H. Lee, Y.S. Lee, "Measurement of Moment of Inertia of a Large Structure", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 1997 Spring Conference*, Daejeon, Korea pp. 91-94, 1997.
- [4] J.J. Lee, S.O. Goo, J.W. Kim, J.W. Lee, "Measurement of Mass Moments of Inertia for Unmanned Target Drone", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2000 Spring Conference*, Cheongju, Korea, pp. 81-84, 2000.
- [5] J.J. Lee, "Experimental Determination of Mass Moments of Inertia for Tilt Rotor UAV", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2013 Spring Conference*, Jeongseon, Korea, pp. 1005-1008, 2013.

- [6] H.C. Bang, "Spacecraft Moment of Inertial Estimation by Modified Rodrigues Parameters", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 243-246, 2010.
- [7] G. Rudra, M. Praves, P. Swapnil, T. Ravi, "Techniques for Measurement of Centre of Gravity of & Moment of Inertia and Their Importance in Spacecraft Attitude Control", *2nd national Conference on Advance in Metrology*, February 2012 Paper No. RA 002.

김 현 기(Hyun-gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (박사)
- 2006년 2월 ~ 2007년 12월 : 현대중공업 선임연구원
- 2007년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원

<관심분야>

항공기 구조해석, 구조최적화

김 성 찬(Sungchan Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국항공대학교 항공기계공학과 (학사)
- 1998년 8월 : 한국항공대학교 항공기계공학과 (석사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 항공우주공학과 (박사)
- 1995년 2월 ~ 2000년 7월 : 한국항공우주산업 선임연구원
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원

<관심분야>

항공기 구조설계 및 세부계통

하 병 근(Byung Geon Ha)

[정회원]



- 2006년 2월 : 한국항공대학교
항공우주공학과 (학사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한화에어로
스페이스 책임연구원

〈관심분야〉

항공기 연료시스템 설계 및 시험

안 수 홍(Su-hong An)

[정회원]



- 2006년 2월 : 건국대학교 기계공
학과 (학사)
- 2008년 2월 : 건국대학교 기계공
학과 (석사)
- 2008년 3월 ~ 2014년 12월 :
현대로템
- 2015년 1월 ~ 현재 : 한화에어로
스페이스 책임연구원

〈관심분야〉

항공기 연료시스템 설계 및 해석