

마이크로중력환경에서 사용 가능한 관성저울의 성능평가[§]

장현진* · 이주희* · 최재혁** · 박설현***†

* 한국항공우주연구원 우주과학연구팀, ** 한국해양대학교 기관시스템공학부, *** 조선대학교 기계시스템공학과

Performance Evaluation of Inertial Balance for Measuring Mass in Microgravity

Hyun-Jin Jang*, Joo-Hee Lee*, Jae-Hyuk Choi**, and Seul-Hyun Park***†

* Space Science Research Team, Korea Aerospace Research Institute (KARI),

*** School of Marine System Engineering, Korea Marine and Ocean Univ.,

*** Dept. of Mechanical Systems Engineering, Chosun Univ.

(Received July 3, 2014 ; Revised September 21, 2014 ; Accepted September 22, 2014)

Key Words: Microgravity(마이크로중력), Inertial Balance(관성저울), International Space Station(국제우주정거장), Mass Measurement(질량측정), Drop-Tower(자유낙하탑), Load Cell(로드셀)

초록: 중력이 거의 작용하지 않는 마이크로중력환경에서 소동물의 질량이 측정 가능한 고성능 관성저울을 개발하기 위해, 약 100g의 측정시료를 이용하여 관성저울의 핵심 디자인 파라미터인 로드셀의 응답특성을 평가하였다. 정확한 성능평가를 위해서 1.5초의 마이크로중력환경을 제공할 수 있는 15m 자유낙하탑을 활용하였으며, 살아 있는 동물의 질량을 측정해야 하는 점을 고려하여 측정시료의 감속 크기 변화에 따른 로드셀의 응답특성을 파악하였다. 동일한 가속도로 가·감속되는 표준시료와 측정시료의 관성력 비의 분석결과 로드셀이 장착된 가속판이 평균 이동속도 0.5 m/s 이상으로 운동하는 경우에 한하여 설계 기준에 부합하는 것을 알 수 있었다.

Abstract: In an effort to develop and implement an inertial balance with high performance, the response characteristics of a load cell, which are some of the critical parameters for optimal system design, were evaluated using a sample object of approximately 100 g under microgravity conditions. To this end, a 15-m drop-tower was used to produce microgravity conditions, and the response characteristics of the load cell were investigated in terms of the variations in the magnitude of the deceleration of the sample object, noting that the mass of a living animal should be determined in microgravity. An analysis of the ratio of the inertial forces clearly demonstrated that the average velocity of a load cell plate should be higher than 0.5 m/s to meet the design requirements.

1. 서론

관성저울(Inertial Balance)의 개발은 국제우주정거장(International Space Station, ISS)에서 장기간 체류하는 우주인들의 몸무게 변화를 측정하기 위하여 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 주도로 개발하기 시작하였다. 국제우주정거장과 같이 중력이 거의 작용하지 않는 마이크로중력 환경에서는 지상에서

사용하는 일반적인 저울을 활용할 수 없어 다른 방식의 측정시스템이 요구된다. 즉, 마이크로중력환경에서는 측정대상 물체에 작용하는 중력 가속도의 크기가 0 m/s²에 근접하기 때문에 지상에서 사용되는 일반적인 저울을 이용해서는 물체의 무게를 측정할 수 없는 것이다. 따라서 마이크로중력환경에서 무게를 측정하기 위해서는 측정 대상물체에 인위적인 속도를 부여하고 속도의 시간당 변화량인 가속도를 측정하거나, 운동량의 변화를 측정하여 힘의 크기를 역산하는 방법이 주로 사용되고 있으며, 각각의 방식에 대한 장단점은 참고문헌⁽¹⁻³⁾에 잘 정리되어 있다.

국제우주정거장에서 우주인의 건강상태를 모니터

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 호남지회 춘계 학술대회(2014. 5. 9., 군산대) 발표논문임.

† Corresponding Author, isaac@chosun.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

링하기 위해서 NASA에 의해 개발된 관성저울은 우주인의 몸무게를 기준으로 약 $\pm 2\text{kg} \sim 3\text{kg}$ 정도의 오차 범위를 가지고 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 그러나 국제우주정거장의 사용연한이 2020년까지 연장되고, 생명(의생리학) 분야의 연구비중이 확대됨에 따라 마이크로중력환경에서 실험용 쥐와 같은 소질량 동물에 대한 정확한 질량 측정기술의 개발 필요성이 증대되고 있다.^(4,5) 이러한 필요성을 만족시키기 위해서는 질량 100g당 $\pm 1\text{g}$ 의 오차 범위 내에서 측정할 수 있도록 저울이 설계되어야 하는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 하지만 살아있는 동물의 경우 마이크로중력환경에서 인위적인 속도를 가하여 질량을 측정하는 경우 동물이 가속되는 과정에서 받을 수 있는 스트레스를 고려하여 최소의 이동속도를 적용하여야만 한다. 그럼에도 불구하고 기존의 관성저울⁽¹⁻³⁾은 속도변화에 대한 영향을 고려하지 않고 고정된 가·감속 환경에서만 작동되도록 설계되어 살아있는 동물의 질량측정에 바로 적용할 수 없는 한계를 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 국제우주정거장 환경과 흡사한 마이크로중력환경에서 질량이 100g 이하인 쥐를 측정할 수 있는 관성저울을 개발하기 위한 선행연구로서, 가·감속 중인 약 100g의 측정시료가 총질량의 오차범위 1% 내외에서 측정될 수 있는지를 평가해 보고자 하였다.

2. 관성저울의 구성 및 측정방법

본 연구에 적용된 관성저울의 원리는 측정 대상물인 시료질량(m_1)과 이미 알고 있는 표준질량(m_2)을 갖는 물체에 동일한 가속도를 가하여, 시료질량의 관성력(F_1)과 표준질량의 관성력(F_2)간의 비를 이용하여 시료질량을 계산하는 원리이다. 즉, Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 사용자는 이미 무게 값을 알고 있는 물체(표준시료)와 측정하고자 하는 시료를 동일 가속도가 가해지는 가속판에 올리고 각각의 가속판 아래 설치된 로드셀을 이용하여 가속에 따른 관성의 힘을 측정하고, 두 힘의 비를 계산하면 다음 식을 이용하여 시료질량을 계산할 수 있다.

$$F_1 = m_1(a + g) + m_0(a + g) \quad (1)$$

$$F_2 = m_2(a + g) + m_0(a + g) \quad (2)$$

$$m_2 = \frac{F_2}{F_1}(m_1 + m_0) - m_0 \quad (3)$$

여기서, a 와 g 는 각각 가속판의 가속도 및 중력가속도이며 m_0 는 m_1 및 m_2 를 제외한 가속판의 질량이다. 식 (3)에서 m_1 과 m_0 는 이미 알고 있는 값이고, F_1 와 F_2 는 측정으로 얻을 수 있는 값이므로, 가속도 측정유무와 상관없이 m_2 를 측정할 수 있으며, 중력이 거의 작용하지 않은 국제우주정거장에서도 위와 같은 방법을 적용하여 대상 물체의 질량을 측정할 수 있다.

관성저울의 가속판을 구동시키기 위해 적용된 BLDC (Brushless Direct Current)모터는 측정대상 시료, 표준시료, 로드셀, 가속판의 무게를 고려하여 선정하였다. 관성저울의 핵심 성능 파라미터인 힘의 비를 측정하기 위해 사용된 로드셀과 가속판을 구동시키기 위해 적용된 BLDC모터의 사양은 Table 1에 요약되어 있다. 또한 가속판의 원활한 직선 왕복운동을 위해 Ball Screw를 갖는 Linear Guide를 설치하였으며, BLDC모터는 노트북 PC에 연결된 모터드라이브에 의해 제어되어 가속판이 Linear Guide를 따라 상하 직선 왕복운동하면서 속도가 조절될 수 있도록 제작하였다. 가속판의 상향 운동으로 발생된 관성력에 대응하는 로드셀 아날로그 신호는 로드셀 전용 고속 데이터 수집장치(Data Acquisition System)를 통해 노트북 PC에 실시간으로 저장되도록 구성되어 있다.

가속판의 운동 시 각각의 로드셀에서 출력되는 아날로그 신호를 획득하면, 측정대상의 시료질량, m_2 는 식 (4)을 이용하여 다시 계산할 수 있다.

$$m_2 = \frac{AD_2}{AD_1}(m_1 + m_0) - m_0 \quad (4)$$

식 (4)에서 AD_1 와 AD_2 은 각각 측정시료와 표준시료의 가속판 아래 장착된 로드셀에서 출력된 아날로그 신호이다.

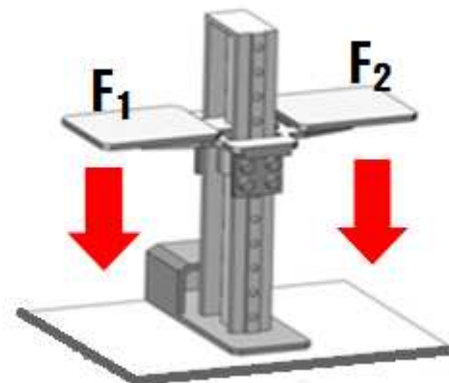


Fig. 1 Schematics of an internal balance with two load cell plates for specimen and reference objects

Table 1 Summary of load cell and BLDC motor specification

H/W		Major Specification
Load Cell	Max Capacity	3kg _r
	Rated Out	20mV/V
	Non-Linearity	0.02 %
	Resolution	1 : 5000
BLDC Motor	Rated Speed	4000 RPM
	Rated Power	70 W
	Rated Torque	0.175 N·m
	Rotor Inertia	95 g·cm ²
	Peak Current	20 A

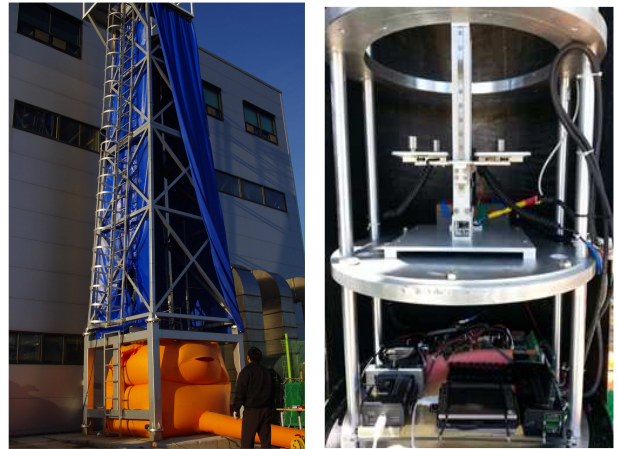


Fig. 3 Images of a 15m drop-tower and inertial balance installed inside the drop capsule

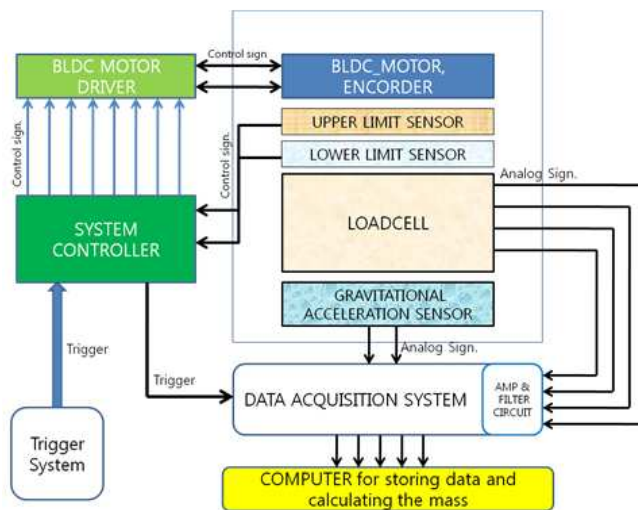


Fig. 2 System block diagram of internal balance

가속판의 이동 평균속도를 계산하기 위해 Linear Guide의 상단과 하단에 리미트 센서를 각각 하나씩 설치하여 가속판이 설치 지점을 지날 때, 추출된 신호로부터 이동시간을 구하고 로타리 엔코더와 카운터로부터 이동변위 정보를 획득하여 결정하였다. 또한 Fig. 2에서 볼 수 있는 것처럼 중력가속도의 변화를 모니터링하고 적절한 시점에 BLDC 모터에 트리거 신호를 전달하여 시스템이 구동될 수 있도록 중력가속도 센서와 시스템 컨트롤러가 설계·장착되었다. 본 연구에서는 마이크로중력환경을 생성하기 위하여 한국해양대학교에 설치되어 있는 15m 자유낙하탑을 활용하였다. 이 자유낙하탑은 실험장치를 낙하캡슐에 탑재하여 고층에서 자유낙하시킴으로써 마이

크로중력을 형성하는 방식으로 낙하충격으로부터 실험장치를 보호하기 위해 제작된 낙하캡슐이 순수하게 자유낙하할 수 있는 거리는 대략 10m이며, 1.5초 이내의 마이크로중력시간을 제공할 수 있다. 지상에는 낙하충격으로부터 캡슐내부에 장착된 여러가지 실험장치를 적절히 보호하기 위해 Deceleration 에어매트가 설치되어 있으며 공기의 주입으로 약 2.5m 가량 부풀어 낙하캡슐과 충돌 시 대부분의 순간충격을 흡수할 수 있도록 설계되어 있다. Fig. 3은 각각 15m 자유낙하탑과 낙하캡슐에 장착되어 있는 관성저울의 모습을 보여주는 사진이다.

관성저울의 작동(가속판의 상향 직선운동)은 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 낙하캡슐이 지상에 설치된 에어백과 충돌 시 발행하는 순간 충격(20G 이상)으로부터 관성저울의 시스템을 보호하기 위해 자유낙하 직후 가속도가 0G에 근접한 시점 약 0.1초 뒤 바로 시작하도록 설정되었다. Fig. 4에서 통상 지구상에 작용하는 중력가속도(9.81m/s²)의 크기를 1G라고 할 때 마이크로중력의 크기는 0G에 근접한다고 볼 수 있다. 낙하캡슐의 자유낙하로 인해 생성된 마이크로중력환경에서 BLDC모터의 회전수를 3600~1600 RPM사이에서 조절하여 가속판의 평균 이동속도가 0.6~0.3 m/s가 될 수 있도록 시스템을 구성하였다.

3. 측정결과 및 토론

지상에서 테스트한 관성저울의 성능은 Fig. 5와 Table 2에 각각 요약되어 있으며, 50g의 표준시료(m₁)을 사용하여 측정시료에 대해 5회의 반복 측

정을 실시한 뒤 계산한 평균값과 표준편차를 구하여 정리하였다. 측정시료의 질량(m_2)은 정밀저울을 이용하여 지상에서 측정한 결과 99.58 g 이었으며, 계산된 측정시료의 질량은 가속판의 평균 이동속도가 0.6 m/s일 때를 기준으로 한 것이다. 본 실험에서는 연구목적 상 저울의 성능평가를 위해 측정시료의 질량(m_2 , 99.58g)을 직접 측정하였고 가속판의 질량, m_0 과 표준시료의 질량, m_1 은 이미 알고 있으므로, 이론적으로 식 (4)를 이용하면 측정시료의 질량을 예측하기 위해 필요한 AD_2/AD_1 값을 계산해 낼 수 있으며 이 값은 Table 2에서 요약되어 있는 것 같이 1.088이다. 아울러 본 실험의 측정 불확도는 측정값, X 와 측정 평균값, \bar{X} 그리고 측정회수 n 에 의존하여 식 (5)를 통해 계산될 수 있으며, $\pm 0.14g$ 이다.

$$u_A = \left(\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_n - \bar{X})^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

앞서 언급한 것처럼, 관성저울을 이용하여 살아 있는 동물의 질량을 측정하고자 하는 경우 로드셀이 장착되어 있는 가속판 가·감속 정도가 측정

대상의 스트레스를 유발할 수 있으므로, 가·감속 변화에 따른 스트레스의 영향을 최소화시킬 수 있도록 설계되어야 하며, 아울러 이러한 변화가 질량측정 정밀도에 어떠한 영향을 미치는지 알아야 한다. 결국 본 연구에서 사용된 관성저울의 성능평가를 위해서는 표준시료와 측정시료가 가·감속할 때 발생하는 관성력을 측정하기 위한 로드셀의 응답특성을 살펴봐야 한다. Fig. 6은 마이크로중력환경에서 중력가속도 센서의 트리거신호를 받아 작동이 시작된 가속판에서 발생된 관성력에 대응하는 로드셀 출력신호를 시간에 따라 도시한 그래프이다. 표준시료 및 측정시료의 질량은 측정과정 중 변화가 없었으므로 그림에서 로드셀 출력신호(AD_1 , AD_2)의 증감은 가속판의 시간당 속도의 변화(가속도)와 직결된다. 따라서 Fig. 6(d)와 같이 0.15초 이후 시간이 증가함에 따라 급격히 작아지는 로드셀 출력신호는 상향 운동하는 가속판의 감속을 의미하며, 이는 평균 이동속도를 감소시키는 요인이다. 이에 반해 Fig. 6(a)의 0.15초~0.22초 구간에서 관측된 로드셀 출력신호의 비교적 완만한 감소는 상대적으로 적은 가속판의 감속을 야기하여 평균 이동속도를 증가시킨다. 결국 모터의 회전수가 감소하면서, 로드셀이 장착된 가속판의 평균 이동속도도 역시 작아지게 된다. 앞서 기술 한 것처럼, 본 연구에 적용된 관성저울의 경우, 기존의 저울들과는 달리 속도-거리-힘(로드셀 출력신호)의 관계에서 가속도를 간접 측정하지 않고 표준시료와 측정시료의 동일한 가속도로 인해 발생하는 힘의 비를 이용하여 질량을 측정하는 원리이므로, 주어진 감속 구간의 힘의 비(또는 AD_2/AD_1)를 정확

Table 2 Ground test result of mass measurements

Test#	Real mass [g]	Calculated mass [g]	Avg.mass [g]	Desired AD_2/AD_1
1	99.58	99.87	99.57	1.088
2		99.83		
3		99.23		
4		99.25		
5		99.68		

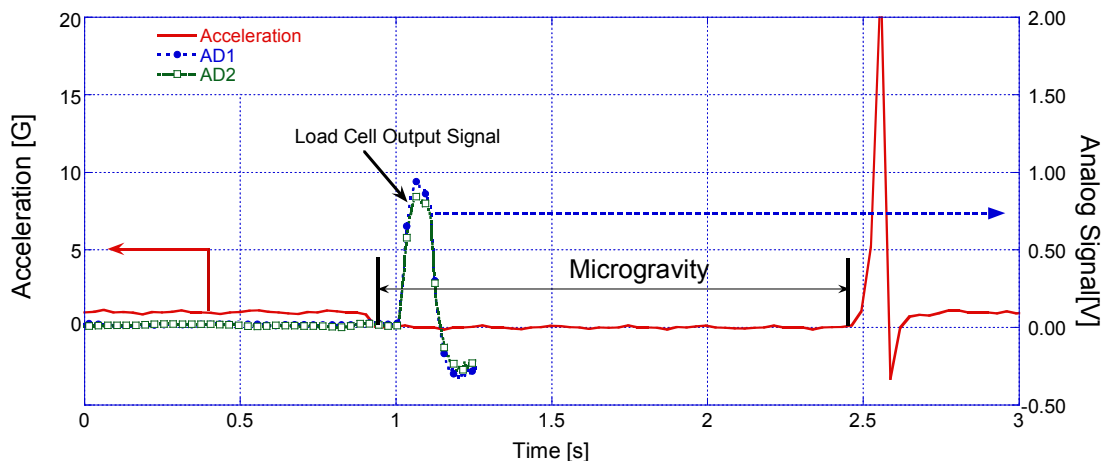


Fig. 4 Acceleration and load cell output signals plotted as a function of time

히 측정하는 것이 시스템 평가에서 중요한 요소이다. 따라서 Fig.7에 가속관이 가속을 시작한 직후인 0.12초부터 감속이 마무리되는 무렵인 0.22초 구간의 로드셀 출력신호의 비(AD_2/AD_1)를 도시하였다. AD_2/AD_1 는 그림에서 동일한 시간대에 각각

의 로드셀로부터 출력된 값을 이용하여 계산하였으며, 구간 평균값을 적용하였다. 그림에 나타난 바와 같이 가속구간 (0.12~0.17초)에는 주어진 평균 이동속도와는 관계없이 측정시료 값 (99.58g)을 예측해내기 위해 이론적으로 계산된 AD_2/AD_1 인 1.088(Table 2 참조)과 측정된 AD_2/AD_1 의 분포가 근접해 있음을 알 수 있다. 하지만, 감속구간 (0.17~0.22초)에서는 가속관의 평균 이동속도가 0.5 m/s 이상인 경우에 한하여 AD_2/AD_1 의 분포가 1.088에 비교적 가까운 양호한 분포를 나타내고 있으며, 가속관의 평균이동속도가 0.5 m/s 미만인 경우는 AD_2/AD_1 의 분포가 급격히 불안정해지는 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로 로드셀은 중력 가속도가 작용하는 환경에서 중력방향으로 작용하는 힘의 크기를 측정할 수 있도록 설계되어 있지만, 본 연구에서는 무중력이라는 특수한 환경을 고려하여 가속관을 임의의 속도로 이동시켜 발생하는 관성력을 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 따라서 가속관의 가속도가 중력가속도의 크기만큼 충분하지 않은 경우 로드셀의 출력신호는 매우 불안정해질 수 있으며, Fig. 7에서 보이는

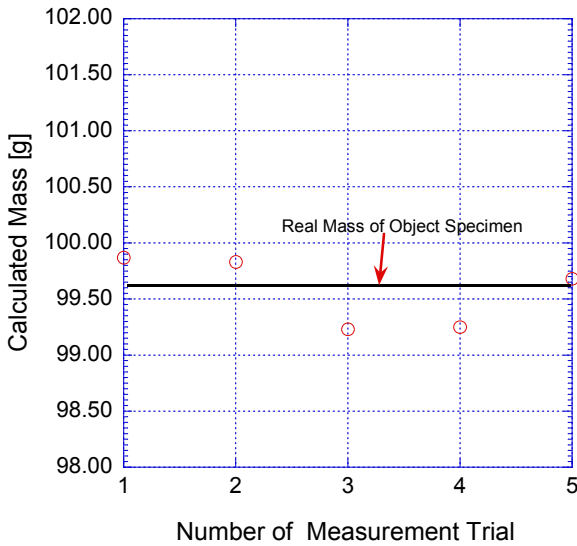


Fig. 5 Calculated mass distributions for a sample object with the mass of 99.58 g

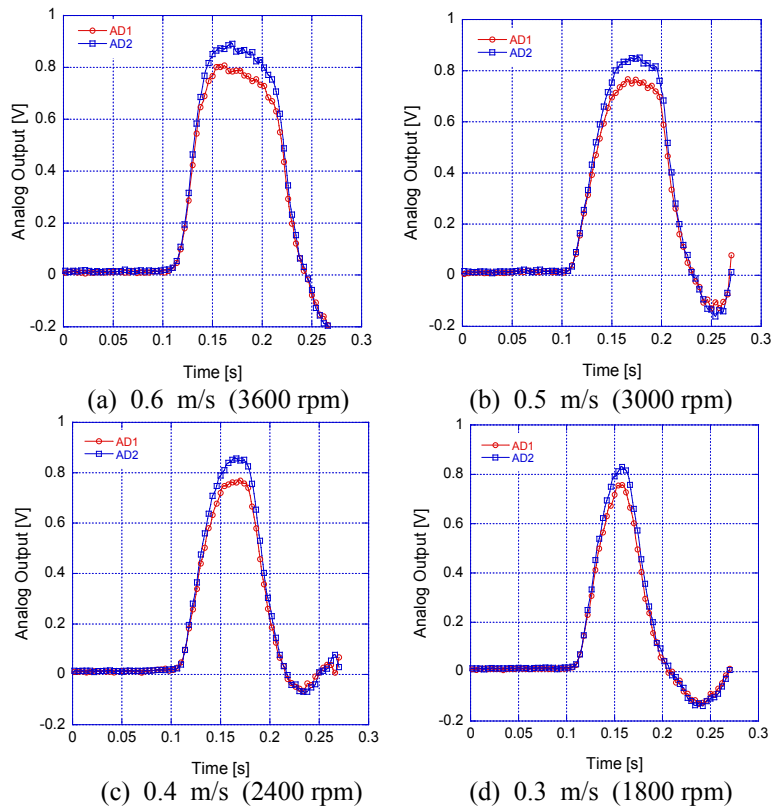


Fig. 6 Load cell output signals plotted as a function of time

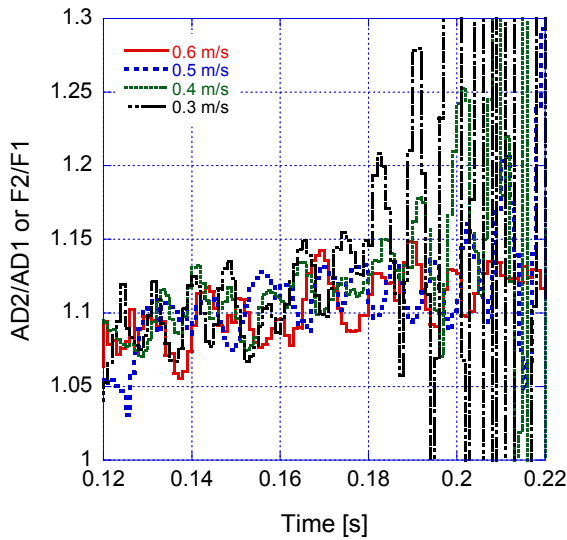


Fig. 7 Ratio of AD₂ to AD₁ plotted as a function of time

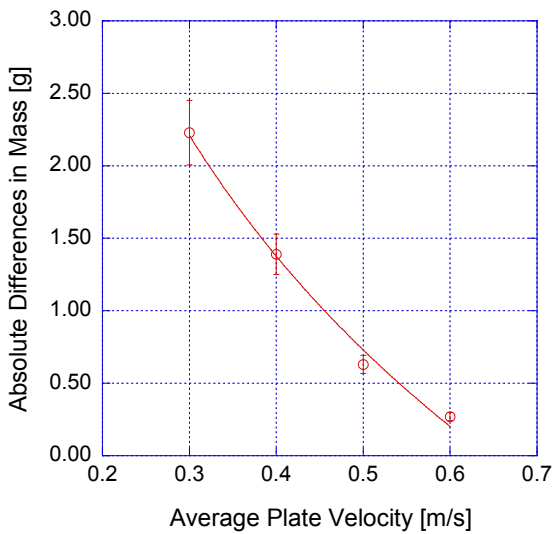


Fig. 8 Calculated absolute differences in mass with regards to average plate velocity

바와 같이 가속판의 평균 이동속도가 0.5m/s 미만인 경우는 감속구간에서 AD₂/AD₁ 역시 급격히 불안정해 지면서 질량 측정 정확성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 가·감속구간의 AD₂/AD₁ 평균값을 이용하여 하여 계산된 측정시료 질량과 실제 측정시료 질량 차의 절대값을 가속판의 평균 이동속도에 따라 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 가속판의 평균 이동속도가 증가할수록 절대값의 차로 표현되는 측정오차가 줄어들지만, 가속판의 평균이동속도가 0.4 m/s 이하로

줄어들 경우 측정오차가 측정시료 질량의 1%를 초과하게 된다. 이는 Fig. 7에서 언급한 바와 같이 가속판의 감속구간에서 평균 이동속도가 0.4 m/s 이하인 경우 AD₂/AD₁ 값이 급격하게 불안정해지기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로중력환경에서 소동물의 질량측정이 가능한 관성저울을 개발하기 위한 일환으로써, 가속판의 가·감속 조절을 통해 평균 이동속도를 변화시켜가며 질량측정 성능을 평가하였다. 소동물, 특히 실험용 쥐의 질량이 100g 이내인 점을 감안하여 질량이 99.58g인 측정시료를 이용하여 관성저울의 핵심설계 파라미터인 관성력의 비를 마이크로중력환경에서 획득하여 전체적인 성능을 평가해 보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 로드셀이 장착된 가속판의 평균 이동속도가 증가함에 따라 AD₂/AD₁ 평균값이 이론적으로 측정시료의 질량을 예측하기 위해 필요한 관성력의 비인 1.088에 근접하여 측정오차가 줄어들음을 확인할 수 있었다.

(2) 가속판의 평균이동속도가 0.5 m/s 미만으로 감소함에 따라 AD₂/AD₁ 값이 감속구간에서 급격히 불안정해지고 측정오차도 측정시료 총질량의 1%를 초과하게 되는 것을 확인하였다. 이는 결국 관성저울의 질량 측정 정확도를 높이기 위해서는 가속판의 이동속도(가속도)를 임의적으로 낮출 수 없으며, 하한점이상으로 조정해야 하며 본 연구에서는 평균 이동속도 기준으로 0.5 m/s임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 우주핵심기술개발사업으로부터 지원받아 수행되었습니다(2011-0030858).

참고문헌 (References)

(1) Fujii, Y., Fujimoto, H., and Namioka, S., 1999, "Mass Measurement Under Weightless Conditions," Review of Scientific Instruments, Vol. 70, No. 111, pp. 111~113
 (2) Fujii, Y., Shimada, K., Yokota, M., Hashimoto, S.

- and Sugita, Y., 2008, "Mass Measuring Instrument for Use under Microgravity Conditions," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 79, 056105-1~3
- (3) Beyer, N., Lomme, J., McCollough, H., Price, B. and Weber, H., 1994, "Proposal for an Astronaut Mass Measurement Device for the Space Shuttle," NASA-CR-197198
- (4) Paik, H.Y., Choi, H.J., Choi, G.H., Kim, J.W. and Kim, Y.K., 2006, "Mass Measurement System and Method Using Inertial Force and Standard Mass in Gravity-free Environment," U.S. Patent Application Publication.
- (5) Rivetti, A., Martini, G., Alasia, F., Birello, G., Gratti, L. and Solitro, F., 1998, "An Inertial Low-Capacity Balance Designed to Be Accommodated on Board the International Space Station," *Proceeding of the 2nd European Symposium on the Utilization of the International Space Station*, Nordwick, Netherlands