

다중보상 알고리즘을 활용한 우주실험용 소질량측정시스템의 정확도 향상 연구

이종원*, 김연규*, 이주희*[#]

*한국항공우주연구원

Accuracy Analysis of Small-Mass Measurement System using Multiple Calibration Algorithm for Experiments in Space

Jong-Won Lee*, Youn-Kyu Kim*, Joo-Hee Lee*[#]

*Korea Aerospace Research Institute (KARI)

(Received 11 March 2021; received in revised form 11 May 2021; accepted 27 May 2021)

ABSTRACT

Scientists at the International Space Station have been studying space life sciences to prepare for future manned space explorations, and require experimental specimen such as rodents for mass measurement. However, it is challenging to use mass measurement systems in space owing to the errors caused by factors such as mechanical-electronic noise. Therefore, to minimize the measurement errors, we propose a new algorithm called multiple calibration, which divides the mass range and calculates the sample weight by using the correction equation of each interval. We performed tests to evaluate and compare the performance of the proposed method to that of normal methods. As a result, the measurement accuracy improved by over two times using the multiple calibration method. Furthermore, we conducted mass measurements on various samples and confirmed that our method is valid for mass measurements.

Key Words : Small Mass Measurement System(소질량측정시스템), Multiple Calibration(다중보상), Space Experiment(우주실험), Microgravity(마이크로중력)

1. 서 론

세계 우주선진국들은 인류의 우주활동 영역확대를 위해 유인우주탐사와 관련된 많은 연구들을 수행해왔다. 특히, 미국은 아르테미스 프로젝트(Artemis Project)라고 불리는 유인달탐사를 선언하고 달에 지속적인

탐사를 위한 기지 건설 등을 목표로, 국제우주정거장을 활용한 기술시험과 우주에서의 인간의 건강 및 안전한 활동과 관련된 연구들을 수행하고 있다.^[1] 이뿐만 아니라, 우주 민간기업들은 일반인의 우주여행을 상품화하기 위한 노력을 기울이고 있어 머지않은 미래에는 이른바 ‘우주관광시대’가 도래할 것으로 예측되고 있다.^[2] 이러한 시대적 흐름에 따라 국제우주정거장의 건설 및 운영 참여국가들은 중요한 과학임무 중의 하나로, 인간이 우주환경에서 안전하게 체류하

[#] Corresponding Author : jhl@kari.re.kr

Tel: +82-42-860-2378, Fax: +82-42-860-2261

기 위한 생명과학 분야의 연구를 수행해 오고 있으며 이러한 연구과정 중에는 실험동물이나 우주인들의 정확한 무게를 측정하는 것이 요구되기도 한다.^[3] 따라서 우주인의 건강상태를 모니터링(monitoring)하기 위한 물리적인 방법의 몸무게 측정장치가 사용되고 있다.^[4] 그러나 현재까지 마이크로중력(micro-gravity) 환경을 스스로 감지하여 무게를 측정할 수 있는 센서가 없어 동물실험이나 우주인의 건강관리를 위한 특별한 질량측정시스템이 반드시 필요하다. 국내에서는 한국우주인 배출사업을 통해 소질량 측정시스템이 개발된 바 있으며^[4] 본 연구를 통해 측정 정확도를 향상시키고자 하였다.

마이크로중력 환경에서는 설치류와 같은 동물의 질량을 측정할 수 있는 장치를 개발하기 위해 많은 연구가 수행되어왔다.^[5-7] 이를 위해 원심력을 이용한 질량 측정방법^[8]이나 스프링을 이용한 방법^[9] 등을 이용한 장치가 개발되어 왔으며, 특히, 국내에서는 2008년, 관성력을 이용한 우주저울의 개발과 국제우주정거장에서 성능실험을 시작으로 이 분야의 연구를 수행하였다.^[3,10] 또한, NASA에서는 질량측정시스템을 개발하여 국제우주정거장에서 운영한 사례가 있으나 시간의 지남에 따라 오차가 누적되어 제대로 된 저울의 기능을 수행하지 못하여 사용이 중지되기도 하였다.^[3,10] 이러한 오차가 발생하는 이유는 김광식에 의해 기구적인 요소인 기계적 공차에 의한 진동 발생과 시스템 자체가 내재하고 있는 부품들의 오차율에서 발생하는 것으로 알려져 있다.^[11]

그러나 가공기술이 발달하면서 모터 및 볼 스크류 등 소질량측정시스템에 활용되는 부품들이 정밀화되고 로드셀(load cell), 가속도 센서와 같은 각종 센서들의 성능이 향상됨에 따라 측정 오차가 줄어들고 있다. 그럼에도 불구하고 아직 국제우주정거장에서는 소질량측정시스템이 적극적으로 활용되지 못하고 있는데 이는 기술의 발달만으로는 극복되지 않는, 마이크로중력이라는 지구상에서 겪을 수 없는 고유한 환경으로 인한 것으로 사료된다.

따라서 본 논문은 이러한 오차를 극복하고자 소질량시스템을 개발하였으며 이를 제어와 운영 관점에서 제시하고자 한다. 기존의 소질량측정시스템 개발에 있어 어떤 물리적 방법으로 질량을 측정하는 것이 더 효율적인지에 대한 방법론적인 내용에 집중하여 연구

를 수행해왔다면 본 연구에서 소질량측정시스템의 제어 알고리즘과 운영의 개선을 통해 오차를 최소화하기 위한 방안에 대해 논의하고자 한다.

2. 본 론

2.1 소질량측정시스템의 개요

마이크로중력 환경 하에서 질량을 측정하는 방법은 다음과 같은 세 가지 방법이 있다. 첫 번째로 스프링-질량 시스템에 의한 질량 측정으로써 진동운동에 의한 방법이다. 이 방법은 측정시간이 짧아 가속장(acceleration field)이 균일하거나 일정하지 않기 때문에 물체의 밀도와 가속분포를 모두 고려해야 한다. 따라서 물과 같은 비강체 대상에 대한 질량측정이 어렵다는 단점이 있다. 두 번째로 원심력을 이용한 방법이다. 이는 일정한 가속장을 이용한다는 장점이 있지만, 충분히 강한 인공 가속장을 생성하기 위해서는 비교적 큰 장비와 긴 측정시간을 요구한다는 단점이 있다. 또한, 비강체의 경우에는 측정 시, 모양과 밀도가 변화하여 가속장이 일정하지 않기 때문에 질량 중심을 결정하는 것에 큰 어려움을 겪게 된다. 세 번째로 선형 가속운동을 이용하는 방법이다. 물체의 속도변화, 즉, 선형가속운동을 통해 가속도 측정에 의한 질량 측정법이다.^[11]

한국항공우주연구원에서는 세 번째 방법인 임의의 가속운동법을 응용하여 관성력을 더해 물체의 질량을 측정 및 계산하는 방법에 대해 연구해왔다.^[3,5] 이는 측정시스템에 가속도를 인가하여 물체의 관성력을 무게 센서인 로드셀로부터 측정함으로써 물체의 질량을 계산하는 방법이다. 본 논문에서는 Fig. 1(a)와 같이, 이전에 개발된 모델^[3,5]을 개선한 소질량측정시스템을 개발하였으며 이는 1g ~ 200g의 범위를 질량을 측정할 수 있다. 소질량측정시스템의 구동방식은 BLDC 모터(bush-less direct current motor)를 이용하여 마이크로중력 환경에서 수직 방향으로 순간적인 가속도를 부여하고 뉴턴의 제 3법칙에 의해 물체의 관성력을 로드셀을 이용하여 측정함으로써 질량을 계산하는 원리이다.

소질량측정시스템은 Fig. 1(b)와 같이 구성되어 있으며 로드셀에서 얻어지는 힘과 측정시료의 질량은 다음과 같은 식에 의해 계산한다.^[3]

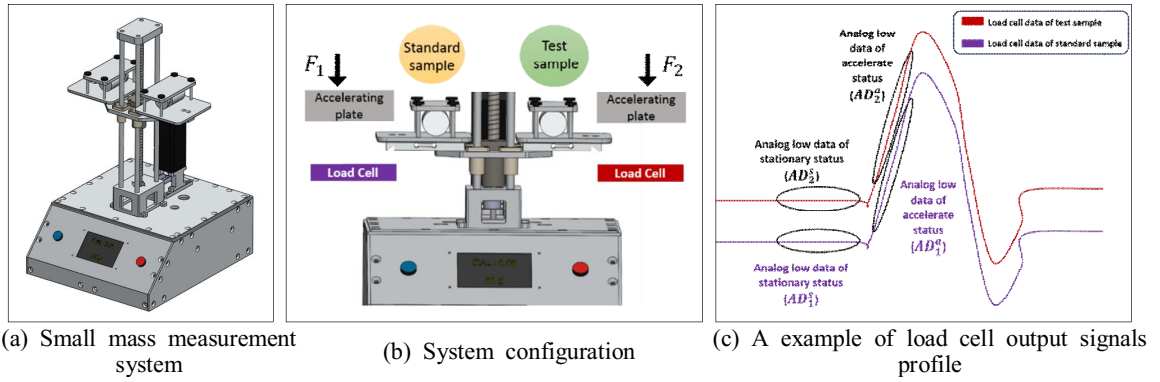


Fig. 1 Overview of small mass measurement system

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

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

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

여기서, a 와 g 는 모터에 의해 가속판에 부여된 가속도와 중력가속도이고, m_0 는 m_1 및 m_2 를 제외한 가속판의 질량이다. m_1 은 사용자가 이미 알고 있는 표준분동의 질량으로써 측정에 기준이 되는 값이며, m_2 는 측정하고자 하는 시료의 질량을 의미한다. F_1 과 F_2 는 각각 표준분동과 측정시료의 질량에 의해 측정되는 관성력으로써 로드셀에서 측정된다.

2.2 소질량측정시스템의 오차와 보정

소질량측정시스템에서 오차가 발생하는 대표적인 원인 중 하나는 로드셀의 동적 에러(dynamics error)이다. 로드셀은 정적(static) 상태일 때 힘을 측정하는 센서이다. 즉, 정지상태에서 우수한 정확성이 나타난다. 그러나 본 시스템에서는 로드셀은 가속이 이루어지는 동적 상태에서 활용되어 물체의 질량을 측정하기 때문에 오차가 수반된다. 아울러 로드셀에서 측정되는 아날로그 신호는 mV 수준의 매우 작은 신호이기 때문에 모터의 가속운동 과정에서 기계적인 미세진동과 신호선의 저항, 전원전압 노이즈(noise), 전자기력 등의 외란에 의해 신호에 오차가 발생한다. 이러한 오차들을 고려하여 식 (3)을 다시 쓰면,

$$m_2 = \frac{e_2 F_2 \pm \beta}{e_1 F_1 \pm \alpha} (m_1 + m_0) - m_0 p \quad (4)$$

와 같다. 여기서, e_1 , e_2 는 각각 로드셀 자체의 내부 오차를 의미하며 α 와 β 는 표준 및 측정시료의 질량 측정에 관련된 모든 시스템 오차를 의미한다. 시스템이 가지고 있는 오차는 현실적으로 모두 0으로 만드는 것은 불가능하기에 이를 보상하기 위한 제어적인 방법이 필요하다. 예를 들어, 지상에서 사용하는 저울은 시간이 변함에 따라 중력에 의해 그 선형성이 바뀌기 때문에 보정을 통한 오차를 줄이는 영점 조정 기능이 포함되어있다. 따라서, 본 우주실험용 소질량측정시스템에도 e_1 , e_2 , α , β 에 대한 영점 조정이 필요하다. 이를 위해 식 (1)과 (2)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$f_1 = \frac{\sum_{n=1}^n (AD_1^a)}{n} - \frac{\sum_{n=1}^n (AD_1^s)}{n} \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{\sum_{n=1}^n (AD_2^a)}{n} - \frac{\sum_{n=1}^n (AD_2^s)}{n} \quad (6)$$

여기서, n 은 데이터의 개수를 의미하고 AD_1^a 와 AD_1^s 는 로드셀에서 측정되는 아날로그 신호 값으로써 각각 표준분동의 운동 상태 값과 정지 상태 값이다. AD_2^a 과 AD_2^s 는 측정시료의 운동 상태 값과 정지 상태 값을 나타낸다. 다시 말하면, 가속판에 표준분동(m_1)을 올

려놓고 정지된 상태에서의 로드셀의 데이터 값(AD_1^s)을 측정하고 가속 시 로드셀의 데이터 값(AD_1^a)을 측정하여 평균낸 두 값의 차를 f_1 로 정의하며 이는 표준분동에 대한 로드셀의 기준값이 된다. 같은 방법으로 측정시료의 f_2 를 구할 수 있으며 이 때의 로드셀로부터 얻어지는 신호의 형태는 그림 Fig 1(c)와 같다. f_2 를 f_1 으로 나누어 γ 를 정의하면 아래와 같다.

$$\gamma = \frac{f_2}{f_1} \quad (7)$$

f_1 과 f_2 의 값은 로드셀의 오차상수 e_1, e_2, α, β 가 포함되어 측정 및 계산된 데이터이며 γ 는 영점 조정상수으로써 시스템 오차 값을 보정한다. 따라서 측정시료의 질량은 비례식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_2 = m_1 \gamma \quad (8)$$

일반적으로 질량을 측정하는 시스템에서는 무게 측정 전에 영점을 조정하여 사용하지만 마이크로중력 환경에서 이러한 기능이 가능한 센서가 없기 때문에 다른 형태의 보정이 필요하다. 이를 위해 소질량시스템에서는 수동으로 영점을 조정한다. 영점을 조정하는 방법은 Fig. 1(b)에서 표준분동의 무게를 50g으로 고정하고 측정시료에는 아무것도 올리지 않고 가속운동을 통해 로드셀 신호를 10회 반복 측정하여 f_1 과 f_2 를 각각 구하고 이를 평균화하여 γ_0 를 구한다. 이 때, 10회 반복시 측정되는 로드셀의 신호 파형은 Fig. 2와 같다. 그 뒤, 측정 시료에 200g의 시료를 올리고 위와 동일한 방법으로 γ_{200} 을 구한다. 구해진 γ_0 와 γ_{200} 을 이용하여 기울기에 관한 선형 방정식을 구할 수 있으며 이는 단일보상법(normal calibration)으로써 아래와 같다.

$$m_2 = a\gamma + b \quad (9)$$

여기서, a, b 는 기울기와 절편을 의미한다.

2.3 다중보상 알고리즘

단일 보상법은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 1차 함수

로써 실제 영점 보정 값이 2차 함수일 때 실제 값과 차이가 발생한다. 이에 본 논문에서는 이를 최소화하기 위해 다중보상(multiple calibration) 알고리즘을 적용하였다. 다중보상 알고리즘은 측정하고자 하는 질량의 범위를 n 개로 나누고 각 구간에서 γ 값을 구하여 이를 각각 일차 함수화하여 2차 곡선의 형태로 모사한 뒤, 시료의 질량이 속하는 구간의 보정 방정식에 적용하여 질량을 측정하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 소질량측정시스템을 작동하는 순서는 영점 조정단계와 측정단계로 나뉜다. 영점 조정단계에서는 사용자가 알고 있는 질량인 표준분동과 측정시료를 가속판에 설치한다. 정의한 반복 횟수만큼 소질량시스템을 작동시켜 로드셀로부터 각각의 AD값을 얻는다. 이 때, 측정시료를 0g, 50g, 100g, 150g, 200g 등으로 바꾸어 가며 반복 실험하며 식 (5)와 (6)에 의해 각 구간별 f_1 과 f_2 를 구하고 γ 값을 도출하면 다중보상 알고리즘에 의해 영점이 조정된다. 측정 단계에서는 측정하고자 하는 시료를 가속판에 올리고 원하는 횟수만큼 반복하여 로드셀의 값을 구한다. 그리고 위와 같은 계산 과정을 거쳐 보정 구간을 판별하고 식 (8)과 (9)에 의해 시료의 질량을 Fig. 4와 같이 얻을 수 있다.

3. 실험방법

우주생명과학실험에서 활용되는 실험용 쥐는 그 종류와 성별, 나이에 따라 체중이 다양하다. 본 논문에서는 측정 시료의 범위를 0g에서 200g로 설정하였으며 반복 횟수는 영점 조정시 10회, 측정시는 5회로 설정하였다.

본 논문의 제어 알고리즘의 검증을 위하여 단일보상법과 다중보상법을 이용하여 50g, 100g, 150g, 200g의 질량을 측정하여 표준편차를 비교하였다. 또한, 소질량측정시스템의 검증을 위하여 강체, 비강체와 실험용 쥐의 질량 측정 시험을 수행하였다. 실험에서 AND사 GH-252 정밀저울의 측정값과 본 시스템의 측정값을 비교하였다. 강체실험에서는 표준분동을 이용하여 25g, 75g, 125g, 175g의 질량을 측정하고 비강체 실험에서는 물을 플라스틱 용기에 담아 무게를 측정하였다. 또한, 실제 생명과학실험에서 활용되는 실험용 쥐의 무게를 측정함으로써 시스템의 성능을 검증하였다.

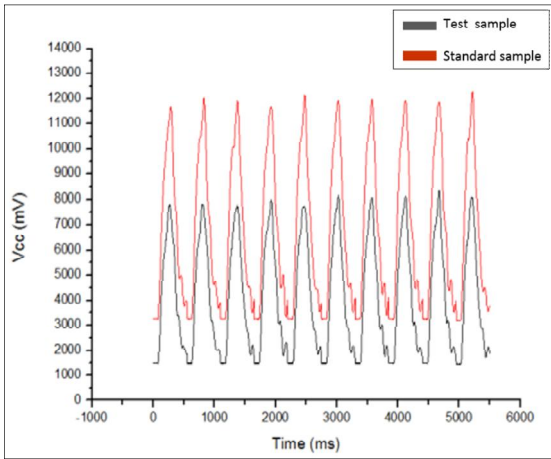


Fig. 2 Output signals of small mass measurement system plotted for 10 iterations

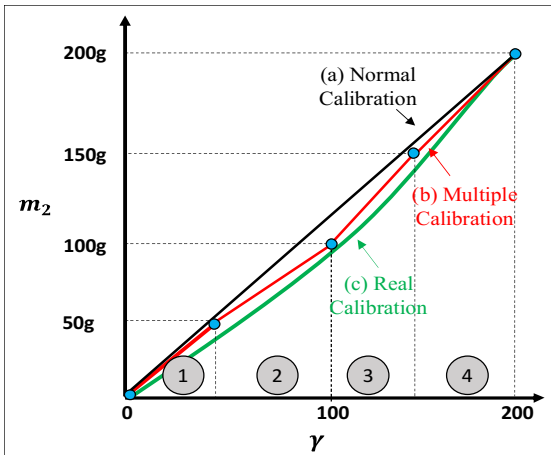


Fig. 3 Multiple calibration

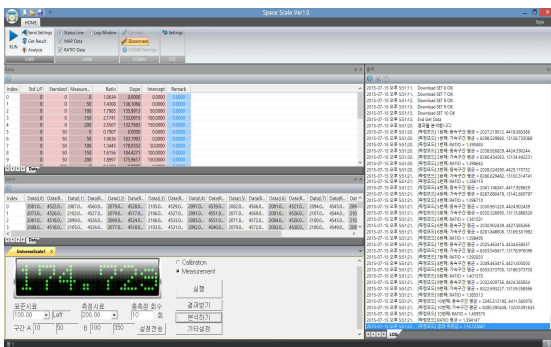


Fig. 4 GUI of Small-Mass Measurement System

4. 결과 및 고찰

4.1 측정결과

Table 1은 단일보상법과 다중보상법을 이용하여 50g, 100g, 150g, 200g의 질량들에 대하여 각각 5회 반복하여 측정된 질량이며 그 값을 평균을 내어 최종 질량이 결정된다. 표에서 볼 수 있듯이, 동일한 질량을 5회 반복 측정하는 동안에 그 값이 계속 변화하며 오차가 발생한다. 이 오차를 최소화하기 위해 측정된 값들을 평균을 최종 질량으로 결정하였다. 또한, 다중보상법을 이용하여 측정된 질량이 단일보상법으로 측정된 질량보다 오차가 더 작음을 확인할 수 있다. Fig. 5는 측정된 질량의 표준편차를 나타낸 것으로써, 단일보상법으로 측정된 질량의 표준편차는 시료의 질량이 증가할수록 증가하지만, 다중보상에 의한 측정법은 시료의 질량에 무관하게 거의 일정한 편차임을 확인할 수 있다.

Table 1 Comparison of mass measurement results by calibration method

Real mass	Normal Calibration		Multiple Calibration	
	Average	mass value (g)	Average	mass value (g)
50 g	50.54 g	50.23	50.20 g	50.00
		51.02		50.32
		50.41		50.24
		50.47		50.28
		50.48		50.18
100 g	101.38 g	100.57	100.21 g	100.10
		101.58		100.34
		101.63		100.28
		101.66		100.29
		101.47		100.07
150 g	150.56 g	150.7	150.09 g	150.09
		149.64		150.02
		150.12		150.06
		151.37		150.12
		151.11		150.15
200 g	200.56 g	200.00	200.09 g	200.00
		200.07		200.07
		201.17		200.00
		199.80		200.29
		201.74		200.08

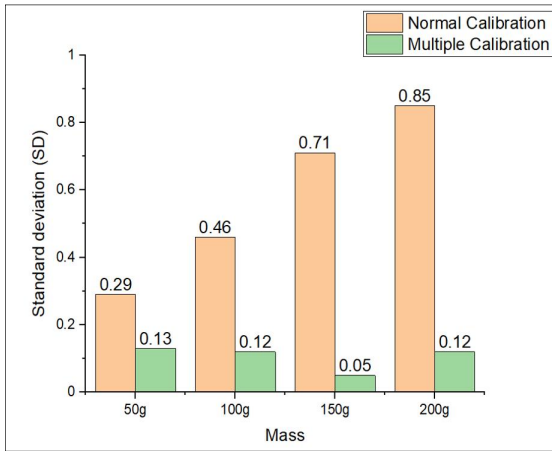


Fig. 5 Comparison of SD by calibration methods

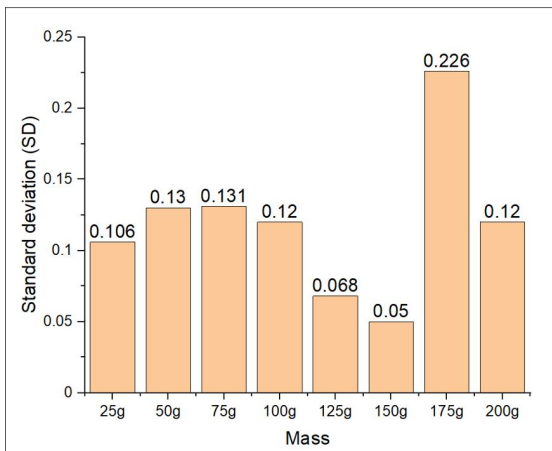


Fig. 6 Standard deviation according to mass



Fig. 7 Image of water & rat mass measurement test

Table 2 Mass measurement results using multiple calibration

Real mass	Average value
25g	24.948
75g	74.942
125g	125.068
175g	174.946

Table 2는 다중보상법을 이용하여 다른 질량의 강체를 측정된 결과로써, 실제 질량과 매우 유사하게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 6과 같이 표준편차를 비교한 결과에서도 대부분 유사한 것으로 확인되었다. 그러나 175g에서는 타 질량의 편차보다 약 2 배 가량 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 질량 측정 과정에서 실험 환경이나 실험오류에 의해 진동과 같은 외란에 의해 발생한 것으로 사료된다.

본 시스템을 이용하여 비강체인 물과 실험용 쥐의 질량 측정 시험 결과에서는 Fig. 7과 같다. 정밀저울에서 측정된 물의 질량은 34.5866g이며 소질량시스템을 이용하여 측정된 질량은 35g으로써 0.4134g의 오차가 발생하였다. 실험용 쥐의 시험에서는 실제 질량이 99.9100g으로 측정되었으며 시스템에서는 100.32g으로 측정되어 0.41g의 오차가 발생한 것을 확인하였다.

4.2 고찰

저울과 같은 측정기기는 반복성과 재현성이 중요하기 때문에 Table 3과 같이 정밀도에 따라 등급이 분류된다. 본 소질량측정시스템은 보통급으로써 이는 지구 환경에서 생명과학분야에 활용하기 어려운 수준이나 우주의 마이크로중력 환경에서의 사용을 고려하면 실험에서 활용이 가능할 것이다. 또한, 다중보상 알고리즘을 이용한 영점 조정 기능을 포함하고 있고 반복 횟수를 사용자가 지정함으로써 자동으로 계산된 평균 값을 최종 질량으로 결정한다. 이 기능을 통해 오차누적의 가능성을 예방한다. 반복 횟수가 많을수록 오차는 작아질 것이지만 실험 시간이 길어지는 단점이 있다.

Table 3 Classification of instruments^[13]

Accuracy class	Verification scale interval (e)	Number of verification scale intervals		Min. Capacity
		min.	max.	
Special	0.001g ≤ e	50000	-	100e
High	0.001g ≤ e ≤ 0.05g	100	100000	20e
	0.01g ≤ e	5000	100000	50e
Medium	0.01g ≤ e ≤ 2g	100	10000	20e
	5g ≤ e	500	10000	20e
Ordinary	5g ≤ e	100	1000	10e

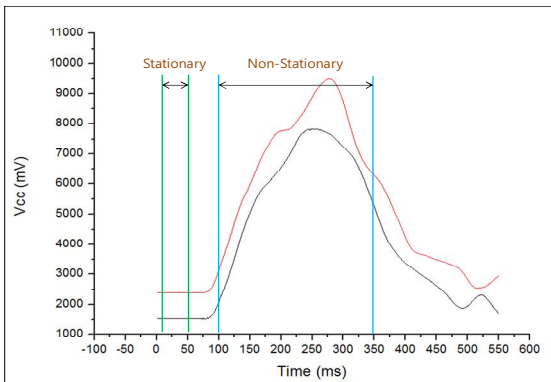


Fig. 8 Definition of the data range

시스템 운영 과정에서는 식 (5)와 (6)에서 로드셀의 데이터 개수를 어떻게 정의할 것인가에 대해 고려되어야 한다. Fig 8과 같이, 본 실험에서는 정지 구간의 데이터량을 시간에 의해 10ms에서 50ms로 하고 가속 구간을 100ms에서 350ms로 정의하였다. 이는 100ms에서 240ms, 300ms, 350ms, 400ms 등의 다양한 가속 구간에 대한 실험을 통해 정성적 판단에 의해 결정하였으나 향후 추가적인 연구를 통해 정량적 분석이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 국제우주정거장에서 우주생명과학 분야 연구에 활용하는 소질량측정시스템의 개발과

다중보상 알고리즘을 이용한 실험 결과에 관하여 내용을 기술하였다. 지구와 다른 환경인 우주의 마이크로중력 환경에서는 지상에서 활용하는 각종 부품 및 장비들의 일부는 정상적으로 기능을 수행하지 못하기 때문에 무게의 측정과 영점 보정에 어려움이 있다. 따라서 소질량측정시스템에서는 다중보상 알고리즘을 제안하고 이를 적용한 다양한 성능 시험을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단일 보상법보다 각 구간의 일차방정식을 구하는 다중보상법이 질량을 측정에 있어 더 정확하다. 이는 표준 편차에 대한 비교를 통해 측정 시료의 질량이 증가함에 따라 일정한 것을 확인하였으며 저울에 영점 보정이 효과적임에 따라 오차의 누적이 방지됨을 확인하였다.
2. 다중보상알고리즘을 적용한 소질량측정시스템을 이용하여 강체, 비강체, 실험용 쥐의 질량을 측정하여 강체에서는 최대 오차가 0.21g이고 비강체와 실험용 쥐에서는 약 0.41g으로써 강체에 비해 오차가 더 큰 것을 확인하였다.

REFERENCES

1. NASA, "Artemis Plan-NASA's Lunar Exploration Program Overview", (2020).
2. Kim, Y.-H., Lee, J. H., Ryo, C.-K., Kim, H. J., Kim, K.-S., "Use of Parabolic Flight for Research of Aerospace Biomedicine," Research in Vestibular Science, Vol. 14, No. 2, pp. 42-45, 2015.
3. Jang, H. J., Lee, J. H., Choi, J. H. and Choi, G. H., "Performance Evaluation of Inertial Balance for Measuring Mass in Microgravity," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 12, pp. 1395-1401, 2014.
4. Paik, H. Y., Choi, H. J., Choi, G. H., Kim, and Kim, Y. K., "Mass Measurement System and Method Using Inertial Force and Standard Mass in Gravity-free Environment," U.S. Patent Application Publication, 2006.
5. Kim, Y. K., Kim, K. S., Lee, J. H., Kim, J. W. and Choi, G. H., "Design and Analysis of Measurement Results for Acceleration Type in

- Small Mass Measurement Device," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 193-202, 2006.
6. John, P. W., Robert, C. M., Daniel, A. W., Russell, R. W., Ladwig, G. J., Surdyk, R. J., David, A. B. and Robert, C. R., "Mass Measurement Capability for Small Masses in a Microgravity Environment," *46th International Conference on Environmental Systems*, Vol. 38, No. 12, pp. 1395-1401, 2016.
 7. Fujii, Y., Fujimoto, H., and Namioka, S., "Mass Measurement Under Weightless Conditions," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 70, No. 111, pp. 111-113, 1999.
 8. Kim, Y. K., Kim, J. W., Lee, J. H., Choi, G. H., Choi, H. J., "Conceptual Design of Precise Space Mass Measuring Device," *Proceeding of the 2004 KSAS conference*, pp. 70-73, 2004.
 9. Fujii, Y., Shimada, K., Yokota, M., Hashimoto, S. and Sugita, Y., "Mass Measuring Instrument for Use under Microgravity Conditions," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 79, No. 5, pp. 056105-1~3, 2008.
 10. Kim, Y. K., Lee, J. H., Choi, G. H. and Choi, I. H., "Conceptual Design and Demonstration of Space Scale for Measuring Mass in Microgravity Environment," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 32, No. 4, pp. 419-425, 2015.
 11. Kim, G. S., "Mass Measuring System using Inertia and Standard Mass in the Micro-Gravity Environment," *Chungnam National University, Republic of Korea*, 2005.
 12. Yan, H., Li, L. M., Hu, C.H., Chen, H., Hao, H. W., "Astronaut mass measurement using linear acceleration method and the effect of body non-rigidity," *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, Vol. 54, No. 4, pp. 777-782, 2011.
 13. OIML R76-1 Non-automatic weighing instruments_Part 1 Metrological and technical requirements Table 3