

# 김발의 가속도 시험용 Shaker의 설계 및 개발

윤재윤\*

## Design and Development of Shaker for Acceleration Test of Gimbal

Jae Youn Youn\*

### ABSTRACT

This paper proposes a shaker system design for acceleration test of gimbal. Main reason of shaker system design is to give acceleration to the gimbal, which is moving and tracking the target on the tracking test equipment. The shaker system is mounted on the tracking test equipment. It uses the scotch yoke mechanism to have the constant movement in return. The Scotch yoke mechanism changes the rotational movement of constant velocity to simple harmonic motion.

**Key Words :** Gimbal(김발), Scotch yoke Mechanism(스카치 요크 기구), Encoder(엔코더, 속도 측정 센서) Servo Control System(서보 제어 장치),

### 1. 서론

본 연구에서는 김발의 가속도 시험용 Shaker 개발에 대한 내용을 수록하고 있다. 김발이란 안테나가 지향하고자 하는 방향으로 기계적인 지향을 하는 안테나 Coordinator의 역할을 수행하며, 구동중 가해질 수 있는 외란에 대하여도 안테나를 안정적으로 자세안정화시켜주는 기계구동장치이다. 김발의 가속도 시험용 Shaker는 김발에 가해지는 동적 환경중 가속도가 김발의 동작성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 간이적인 장치가 필요하여 설계된 것이다. 김발에 가해지는 외부 동적 환경은 어떤 시간 간격을 가지고 반복해서 운동을 발생시키는 진동과 매우 짧은 시간 간격동안에 작용하는 매우 큰 크기의 힘을 발생시키는 충격력 그리고 시간에

대한 속도의 변화로 정의되는 가속도로 분류된다. 김발에 대한 가속도 시험의 경우 김발에 가속도를 인가시키면서 이동하는 표적에 대한 구동성능을 시험할 수 있는 장치 구성이 필요하다. 가속도 시험을 위한 방법에는 원심력(Centrifuge)방식, 로켓추진식 썰매(Rocket Sled)방식, 셰이커(Shaker)방식이 있다. 원심력을 이용하여 가속도를 주는 Centrifuge Accelerator 장비일 경우, 원심력 가속도를 주기 위해 시험장비에 설치된 김발이 회전되므로 김발축에 대한 김발각이 변하게 되는 문제와 구동시험을 위하여 회전하는 원심테이블 위에 이동표적을 구현하기 위해 모의표적을 이동시키는 장치를 설치하는 것은 매우 어려운 문제이므로 시험에 적합한 방법이 아니다. 로켓추진식 방식은 전용의 장비를 이용하는 것으로 장비의 구비를 해야 하며, 또한 실험

\* 국방과학연구소

을 위한 넓은 공간의 필요성으로 인하여 역시 실험에 적합한 방법은 아니다. 그러나 Shaker 방식은 입력되는 진동주파수가 구조물의 가장 낮은 고유진동수의 1/3보다 적을 경우 Steady Acceleration으로 증가적으로 적용시켜도 무방하다. 예를 들면, 구조물의 가장 낮은 고유진동수가 30Hz 이면 10g의 가속도를 주기 위해서는 10Hz로 왕복운동을 줄 때 약 5cm의 왕복 행정 거리가 요구되는 Shaker가 필요하다. 원심력(Centrifuge)방식, 로켓추진식 썰매(Rocket Sled)방식은 일정한 방향으로 가속도를 줄 수 있으나 Shaker 방식은 왕복운동을 하므로 김발축 방향으로 전후나 횡방향으로 좌우로 왕복운동을 주므로 가속도의 크기도 Harmonic으로 변한다는 것이 다르다. 이러한 일정 가속도가 김발에 미치는 영향과 Shaker에 의한 Harmonic 가속도가 김발에 미치는 영향이 서로 연관성을 가져 대체 효과를 줄 수 있다면 대체 시험 방안으로 고려할 수 있다.

가속도에 의하여 직접적으로 영향을 받는 김발의 주요 인자는 김발의 구성품들에 의한 질량불균형 및 Wire의 편향에 의한 토크 유발, 김발축 베어링의 마찰 증대, 구조적 변형 및 편향, 구성품의 동작 성능 저하 등이 있다. 실제적인 환경에서는 가속도에 진동이 결부된 복합 환경이 작용한다. 기능 부별 가속도 시험 즉 김발의 각 부품 혹은 조립체에 대한 시험은 Centrifuge Accelerator 장비를 이용하여 수행할 수 있으나 시스템 성능인 구동성능을 시험하기 위해서는 가속도를 인가한 상태에서 표적에 대한 구동 성능을 시험하기 위해 모의 표적이 설치되고 표적을 이동시킬 수 있는 구동 시험 장치에서 시험할 수 있어야 한다. 따라서 김발에 가속도를 인가하기 위해서는 표적 시험 장치에 설치된 김발 마운트에 일정한 진폭의 왕복운동을 줄 수 있는 장치가 필요하다. 이러한 장치를 구현하기 위해서 Scotch Yoke 메커니즘을 이용하였으며, 이 메커니즘은 일정 속도의 회전운동을 단순 Harmonic Motion의 직선운동으로 변환시켜주며 작은 진동을 발생시키는 시험장치의 메커니즘으로서 많이 이용된다. 또한 이 메커니즘은 Sine-Cosine 구동의 Generator로서도 많이 이용된다. 이 장치는 가속도 시험외에 김발의 질량 균형 작업에도 이용할 수 있다. 김발축에 대하여 김발 질량체가 질량불균형되어 있으면 가속도가 김발의 질량중심점에 작용하여 김발축에 대한 토크가 발생하여 모터의 구동력을 소비하게 된다. 실험실에서의 Level Method에 의한

질량균형작업은 중력에 의한 토크만 발생하므로 김발의 마찰력으로 인한 Leveling방법에 한계가 있으므로 Shaker 시험기로 인위적으로 g를 부여하므로써 김발이 사인과 동작으로 움직일 때 김발의 Feedback Potentiometer 센서로부터 오차신호를 감지하여 질량불균형량의 교정을 하게 된다.

## 2. 방법

### 2.1 Scotch Yoke 기구

Fig 1은 Scotch Yoke의 메커니즘 개념도를 보여준다. 회전반경 r은 일정한 회전속도  $\omega_r$ 로 회전한다. 점 P의 x축에 대한 Projection은 단순 Harmonic Motion으로 움직인다. x는 다음과 같이 표현된다.

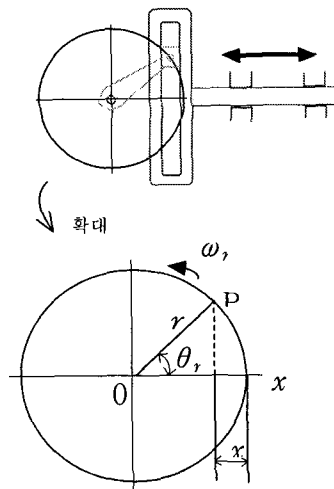


Fig. 1 Configuration of Scotch Yoke Mechanism

$$\theta_r = \omega_r t$$

$$x = r(1 - \cos \omega_r t)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = r \omega_r \sin \omega_r t$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = r \omega_r^2 \cos \omega_r t$$

$\theta_r$  은 스카치요크의 회전각이고,  $x, v, a$  는  $x$ 축상의 변위, 속도, 가속도를 나타낸다.

## 2.2 구동시스템 모델링

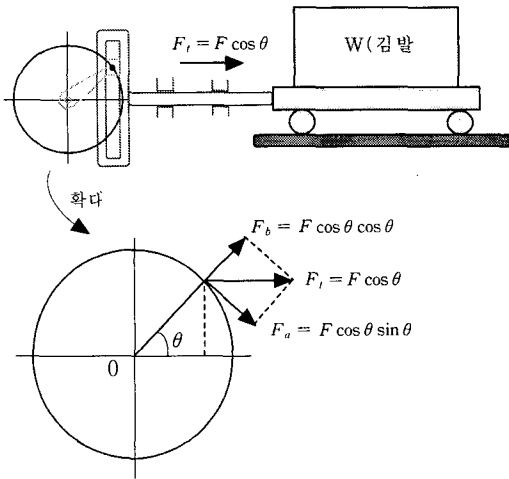


Fig. 2 Modelling of Shaker System

Fig 2에서 보여지듯이 운동체의 무게를  $W$  라고 하면,  $a$  의 가속도로 운동하기 위한 힘은 다음과 같다.

$$F_t = \frac{aW}{980} + \mu W$$

$$= \frac{(r \omega_r^2 \cos \omega_r t) W}{980} + \mu W$$

여기서,

$W$ : 김발 중량 (6) + 치구 및 테이블 중량(4)

= 10 Kgf

$\mu$  : 습동면 마찰계수 0.003

$\omega_r$  : 모터축 각속도 44 rad/sec

$r$  : 회전운동 반경 2.5 cm

$$F_t = 50 \cos 44 t + 0.03 \approx 50 \cos 44 t$$

무게  $W$  의 물체를  $a$  의 가속도로 운동하기 위한 힘  $F_t$ 는 접선 방향의 분력  $F_a$ 와 법선 방향의 분력  $F_b$ 로 작용한다. 접선력  $F_a$ 는 회전반경  $r$ 을 곱하여 토크로 작용하고 법선력  $F_b$ 는 캠중동자의 굴림 마찰계수를 곱하여 접선력으로 작용하게 되며 여기에 회전반경  $r$ 을 곱하여 토크로 작용하게 된다. 회전각이  $\theta$ 일 때의 이것을 식으로 표시하면,

$$T = F \cos \theta \sin \theta \cdot r$$

$$+ \mu \cdot F \cos \theta \cos \theta \cdot r$$

$\theta$ 가 0일 경우에는 마찰에 의한  $\mu F r$ 의 토크력만 작용하고  $\theta$ 가 90°일 경우에는 토크력은 0이 된다. 상기의 수식에서 마찰력에 의한 토크항은 적으므로 무시하면,

$$T = F \cos \theta \sin \theta \cdot r$$

이다.

## 2.3 요구 구동력 계산

최대 토크를 발생하는 각을 구하기 위해 토크 수식을 미분하면,

$$\frac{dT}{dt} = -F l \sin \theta \sin \theta + F l \cos \theta \cos \theta$$

$$= F l (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$= F l \cos 2\theta$$

따라서  $\theta$ 가 45°일 때 최대값이 되며  $\theta$ 가 45°일 때의 토크  $T$ 는 62.7 kgf-cm 이다. 이 때의 모터의 Kw 값은

$$P_{kw} = 0.27(Kw)$$

이다.

## 2.4 요구 사항 분석

본 장비가 목표로 하는 가속도 시험을 위해 필요한 사항을 정리해 보면 다음과 같다.

- 1) 김발 및 shaker 시스템에 사용하는 베어링은 예압 작업을 수행하여, 강성을 증가시킨다.
- 2) 김발에 연결된 Wire들은 움직임이 작도록 고정시켜야 한다.
- 3) Shaker 시험중 시험장치의 흔들림이나 놀음이 생기지 않도록 충분히 큰 Mass를 가진 Base위에 장착을 한다.
- 4) 구동 모터는 shaker 시험에 충분한 정도의 파워를 가진 모델을 선택하고, 모터에는 타코미터가 장착되어 속도 제어를 할 수 있도록 한다.
- 5) 가속도시험을 수행한 후, 나사 조립 상태 점검을 통하여 shaker 시험 장치의 조립성을 살펴야 한다.

## 3. Shaker 시스템 설계

### 3.1 Shaker 시스템의 개념 설계

김발은 Fig 3와 같이 Shaker에 장착되고 Shaker에 의해 김발이 사인과 동작으로 움직일 때 김발의 Feedback Potentiometer 센서로부터 오차 신호를 감지하여 공간안정화 성능을 발휘하게 된다. 구동시험 장치는 김발의 구동 및 구동장치의 성능을 측정하기 위하여 설계/제작되었으며, 김발 지지대와 거울 지지대를 연동 혹은 별도 구동을 할 수 있도록 설계되었다. 각 지지대는 모터에 의해 회전하는 볼스크류에 의해서 직선운동으로 변환되어 좌우로 구동하도록 되어있다. 또 모터에 엔코더(encoder)와 타코메타(tachometer)를 부착하여 속도제어가 가능하도록 하였다. 모터를 제어하기 위한 모터 구동기가 별도로 설치되어 있으며, 모터 구동기는 PC의 제어 명령에 의해 원하는 상태로 모터를 제어하도록 되어 있다. 여기서 김발의 장착용 치구는 Shaker 이다. 구동 시험 장치의 모터 구동 변수 및 구동장치 및 제어기는 다음과 같다.

#### 3.1.1 구동변수

가속도 시험을 위하여 속도 센서인 엔코더의 1회전당 펄스 수를 8,000으로 입력하고, 구동축의 1회전당 선형 운동량은 2.5 cm로 한다. 그리고 연결축의 길이는 120 cm, 볼 스크류의 길이는 180 cm로

한다. 이 때 김발 동체의 각 운동은 0 ~ 5 Hz로 하고, 선형 운동은 최대 10 deg/sec 로 하여 실험에 적용한다.

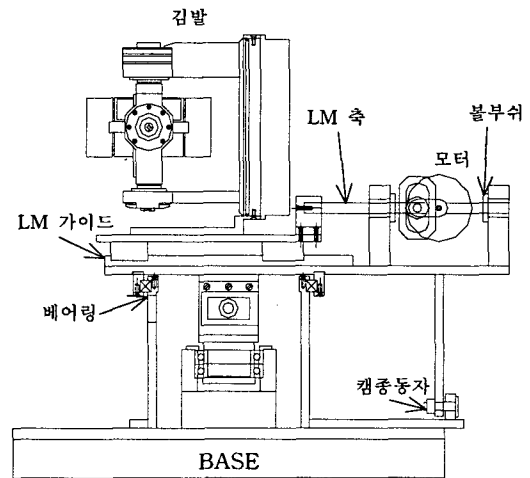


Fig. 3 General Design of Gimbal-Shaker

#### 3.1.2 구동모터

김발 구동 시스템의 규격상 420 rpm으로 구동시 270 w의 모터 파워가 요구되어지며, 이를 만족하기위해 선정한 구동모터는 Sanyo Denki사의 Super R 730T-002E L5를 선정하였고, 이 모터는 타코가 부착되어 속도제어가 가능하도록 되어있다. 또한, 선정된 모터의 구동을 위해 모터를 제작한 동일 회사의 PDT-A-12-10 모터 구동기를 선택하여 사용하였다.

#### 3.1.3 LM Guide

LM Guide는 평면상에 볼트를 장착시키는 간단한 작업만으로도 Clearance는 없으면서 고도의 走行 정밀도가 얻어지는 구조로 되어있어, 본 실험에 용이하게 사용한 부품이다. 또한 LM Guide는 그 구름 안내 부위의 특성에 의하여 위치 결정 정밀도의 향상, 전력비의 대폭적인 절감, 장시간 고 정도의 유지 등이 가능하다. LM Guide는 용도에 따라 자동조정형, 자동조심형, 미니츄어형이 있는데, 본 설계에서는 고속 반송장치 등의 용이한 적용을 위해서 저소음 형인 레이디얼 SR 20V를 선정하였으

며, 특징으로는 다른 형태의 LM 블록보다 길이를 짧게한 타입으로서 자동조정 능력이 크고 Linear Bush의 수십배 정격하중을 가진 대체품으로서 적당하다.

### 3.1.4 캠중동자

캠중동자는 내부에 니들 베어링이 조립되어 있고 캠 판이나 직선 운동의 가이드 롤러로서 사용 가능하며 콤팩트하면서도 강성이 높은 베어링이다. 캠중동자의 외륜은 직접 상대면과 접촉하면서 회전 운동을 하므로 두께를 두껍게 해서 충격하중에도 견딜 수 있게되어있고, 외륜의 내부에는 정밀 리테이너와 니들 롤러가 조립되어 있어 스큐현상을 방지하여 우수한 회전 성능이 얻어지며 고속회전에도 충분히 견딜 수 있다. 본 설계에서는 표준형 캠중동자 CF형을 사용하였다.

### 3.1.5 볼부쉬

볼부쉬는 표준형, 개방형, 쉘형, 클리어런스조정형, 플랜지형이 있으며, 원통축과 조립해서 사용하여 무한직선운동을 하는 직선운동 시스템이다. 부하불과 축은 점접촉을 하므로 허용하중은 작지만 최소의 마찰저항으로 구름운동을 하여 고정밀도를 가지는 경쾌한 운동이 얻어진다. 볼부쉬중에서 LM형은 축 및 外筒의 불이 구르는 면이 원통형상으로 성형되어 하중을 받는 부하불은 전부 리테이너에 의하여 축방향으로 정렬안내되고 있다. 본 설계에서는 볼부쉬 LM-UU형의 구조를 사용하였다.

### 3.1.6 LM Shaft

LM Shaft는 전용의 표준 LM Shaft를 구입할 수도 있으며, 직접 제작을 해서 사용할 수도 있으나, 직접 제작을 할 경우 주의할 점은 축의 표면 경도가 수명에 영향을 미치므로 재질의 열처리 방법에 대해 충분히 고려해야 한다. 사용할 수 있는 재질은 고주파 열처리에 따른 표면경화에 적합한 재질로써 고탄소 크롬 베어링강 SUJ2, 탄소공구강 SK 3 ~ 6, 기계구조용 탄소강 S55C 등이 일반적으로 사용된다. 표면경도는 Hv 653이상, 경화층의 깊이는 볼부쉬의 크기에 따라 정하지만 일반적으로 2mm 전후를 권장한다. 그리고 먼조도는 원활한 구름을 할 수 있도록 1.6 S 이하로 마무리 하는 것이 좋다. 또한 축의 진직도는 300mm당 50  $\mu$  m 이하로 하는 것이 권장된다.

### 3.1.7 크로스롤러 베어링

크로스롤러 베어링은 RA형, RB형, RE형이 있으며, 90.의 V홈 형상의 轉走面에 원통롤러가 스페이스 리테이너를 사이에 끼워서 교대로 직교 배열되어 있기 때문에 1개의 베어링으로 레이디얼 하중, 트러스트 하중 및 모멘트 하중 등 모든 방향의 하중을 부하할 수 있다. 특히, 직교배열한 롤러 사이에 스페이스 및 리테이너를 배치하여 롤러의 스큐(skew)현상을 방지하고 롤러끼리 상호마찰을 없게 했기 때문에 종래의 베어링에 나타났던 큰 흔들림이나 원활하지 않은 록크 현상이 생기지 않고 안정된 회전이 얻어진다. 레이디얼 클리어런스가 적고 내륜 또는 외륜 2분할 구조로 인하여 베어링의 클리어런스 조정이 가능하며 예압을 줄 수도 있기 때문에 정밀도가 높은 회전운동이 얻어진다. 그리고 강성이 있는 롤러가 직교로 배치되어 있으므로 복합 하중이 부하되어도 각방향의 변위는 최소의 값으로 되어 강성이 있는 선회, 회전기구가 구성된다. 특히, 롤러가 직교 배열되어 있으므로 두께가 얇은 앵글러 볼 베어링의 복열 사용에 비해 1개의 베어링으로서 임의의 방향의 하중이 부하되어도 강성이 3 ~ 4배 이상 향상된다. 크로스롤러 베어링은 두께가 얇은 콤팩트 Type이므로 내·외륜은 측면에서 견고하게 밀어주면서 장착해야 한다. 또한 큰 모멘트 하중이 작용하는 경우에는 하우징이나 밀착 플랜지 및 고정용 볼트의 강성에 관해서 충분히 고려할 필요가 있다

### 3.1.8 모터구동기

선정된 모터의 구동을 위해서 모터 제작과 동일한 회사의 PDT-A-12-10을 선택하였다. 이 모터 구동기의 사양, 외형치수는 다음과 같다.

- 1) 사양 : Rotor Inertia  $1.62 \times 10^{-3}$  kgcms<sup>2</sup>
- 2) Power Requirement : AC100V $\pm$  10%,  
50/60Hz 단상
- 3) 외형치수 : 235  $\times$  205  $\times$  47.5

### 3.2 Shaker 제어시스템

가속도 시험용 Shaker 구동장치로 엔코더 카운터 구동장치, D/A 컨버터 구동장치, 타이머 구동장치가 있으며, 본 시험에서는 엔코더 카운터 구동장치로 MC 보드를 사용하고, D/A 컨버터 구동장치 및 타이머 구동장치로 Lab Master를 사용하며, 제어 기로는 비례 제어를 사용하였다. 실제 제어 대상

이 되는 시스템의 수학적 모델이 유도되면, 시스템의 응답 특성인 시간 응답 특성 및 주파수 응답 특성을 만족하도록 제어기의 변수들을 결정할 때 다양한 방법을 적용할 수 있다. 그러나, 시스템이 너무 복잡하여 수학적 모델을 쉽게 얻을 수 없거나, 얻어진 수학적 모델의 오차가 크면 제어기 설계에 해석적인 접근이 힘들다. 따라서, 본 실험의 경우 실험적인 방법을 적용하여 제어기를 설계하였다.

#### 4. 실험

개발된 Shaker 시스템을 시험한 결과는 엔코더와 구동 프로그램을 통하여 구하였으며, 결과값으로는 각변위, 속도, 가속도의 데이터를 획득하였다. Fig 4 ~ 7은 Shaker의 구동중 얻은 김발의 회전각 속도 및 모터에 의해서 김발에 가해지는 회전각 속도 그리고 김발의 회전각가속도와 모터에 의해 가해지는 회전각가속도의 그래프이다.

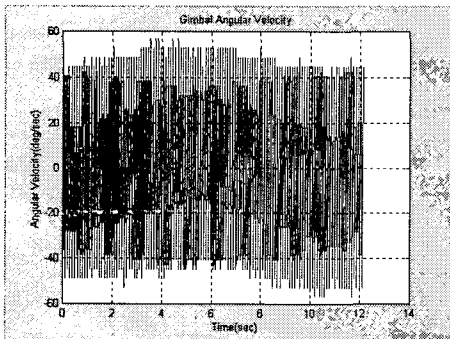


Fig. 4 Time vs. Gimbal Angular Velocity

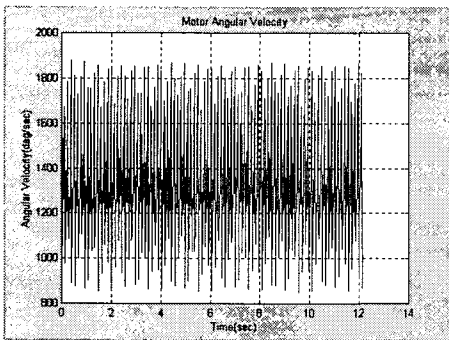


Fig. 5 Time vs. Motor Angular Velocity

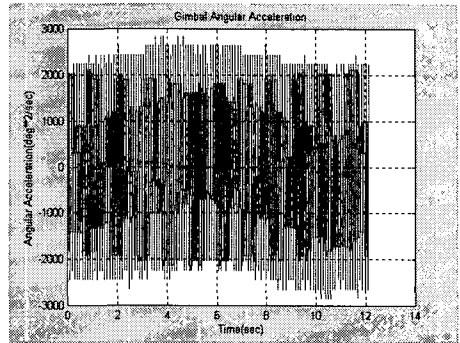


Fig. 6 Time vs. Gimbal Angular Acceleration

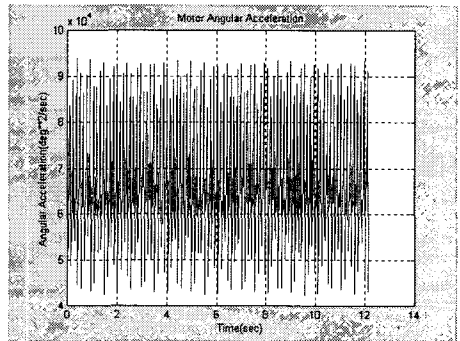


Fig. 7 Time vs. Motor Angular Acceleration  
(  $\approx 3.5$  g Value of Shaker )

Fig. 4 ~ 7 그림에서 보여지듯이 Shaker의 구동중 모터에 의해 구동되는 김발의 각속도와 각가속도 특성은 입력신호를 잘 추종했음을 알 수 있었으며, 이것은 Shaker 시험 장치를 이용하여 김발의 가속도 시험을 수행하여도 무방함을 알 수 있었다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 김발의 가속도 시험용 Shaker의 설계, 제작 및 실험을 통하여 김발에 외부 동적 하중이 가해지는 경우에 대한 김발의 공간 안정화 성능 시험, 최대 구동 속도 시험, 목표불 추적 시험에 사용할 수 있도록 하였으며, 부가적으로 김발의 질량 균형 작업을 위한 장치로서도 그 이용 가능성을 검토하였다. 설계, 제작된 Shaker 시험장치는 이미

개발되어 사용중인 추적시험장치와 연동하여 향후 김발의 공간 안정화 성능 시험, 최대 구동 속도 시험, 목표물 추적 시험에 이용할 계획이다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

① 가속도 시험 장치의 설계 및 제작을 통하여 김발에 가속도 환경을 준 상황에서 김발의 공간안정화 성능 시험, 최대 구동 속도 시험, 목표물 추적 시험이 가능하도록 하였다.

② 김발의 질량 불균형 양을 미세한 정도의 값까지 측정할 수 있는 장치가 개발되었다.

### 참고문헌

1. THK LM SYSTEM CATALOG, No. 100-1K, THK CO. LTD, TOKYO, JAPAN.
2. John J.Craig., "Introduction to Robotics, Mechanics and Control," Addison-Wesley Publishing Company. 1989.
3. Carl Machover., "Basics of Gyroscopes," John F. Rider Publisher, Inc.. 1960.
4. 유송민, 김영진, "가공 공정의 이상 상태 진단을 위한 진단 전문가 시스템의 개발," 한국정밀공학회 논문, 1997.
5. "Focus on Recent Trends in Transmission Systems :Transmission/Driveline System Update," Automotive Engineering, Oct./Nov. 91, pp. 24-36, 1993.
6. 이강수, 이건우, "설계 과정과 설계 정보, 설계 의도를 모델링하기 위한 프레임워크," 한국정밀공학회 1998년도 추계학술대회, pp. 841-846, November, 1998.
7. 국방과학연구소, "안정화 장치 집발구동부의 동력학적 해석," 1994.
8. 국방과학연구소, "조준경 안정화 최적 제어 연구," 1994.
9. 국방과학연구소, "조준경 안정화 장치의 동적 구조 해석," Technical Report, UD920130BD, 1993.