

# 추진기관의 동적 거동 분석 (I)

국방과학연구소

김중근, 윤일선

## 1. 서론

추진기관의 연소 시험시 나타나는 측력을 계측하는 목적은 추진기관 구성부품의 정렬이탈 (misalignment) 때문에 발생하는 thrust vector의 변화량을 계측하고 이와같은 thrust vector의 변화량에 의해서 발생하는 side force를 계산하는데 있다. 실제 비행시험 (flight test)을 통하여 thrust vector의 변화량을 계측하는 것이 가장 정확한 방법이지만 이 경우 제한된 데이터 밖에 얻지 못하고, 계측항목이 제한되며, 비용이 많이 든다는 단점 때문에 적합하지 않은 방법이다. 따라서 지상에서 실시하는 시험으로 정보를 얻는 방법이 널리 이용된다. 지상에서 실시하는 추진기관의 측력 측정방법은 다음과 같은 어려움이 있다.

- 1) thrust stand의 상호작용
- 2) 시간에 따른 추진기관의 무게감소
- 3) 무게감소에 따른 추진기관 무게중심 위치변화  
위와같은 원인으로 지상시험을 통하여 계측된 data에 error가 발생하게 된다.

현재로써는 대형 추진기관의 경우 측력을 계측하기 위하여 수평시험을 하며 위와같은 수평시험 방법에서 나타나는 error를 최소화 하기 위하여 시험대, ground, loadcell의 rigidity를 충분히 확보하여서 추진기관과 시험대의 진동을 최소화하는 방법을 사용하고 있다. 이와같이 rigidity를 높여서 추진

기관의 진동이 충분히 적은 경우에는 추진기관의 무게 감소와 무게중심의 변화를 시간에 따른 선형적인 함수로 간단히 표현할 수 있다 이렇게 하여 얻은 data는 적절한 filter를 통하여 위의 error성분을 제거하여 줄 수 있고 정확한 data를 얻을 수 있다.

## 2. 장비

### 2.1 시험장비

최대추력 300,000 lbf를 견딜 수 있도록 폭 2 m, 길이 4m의 I beam으로 제작한 시험대가 견고한 concrete에 설치된 rail 위에 설치되어져 있다. 이는 추진기관을 장착하고 운반하기 쉽도록 설계한 것이다. 위에서 언급된 내용으로 측력계측 실험에서는 ground 뿐만 아니라 시험대의 rigidity를 높여서 추진기관의 점화나 연소시험 동안에 진동을 최소화하는 것이 중요하다. 따라서 rigidity를 높여주기 위해서 ground를 최대한의 수평을 유지하며 concrete로 견고하게 설치하였고 시험대도 over-design하여 concrete에 설치된 rail위에 견고하게 설치하였다. (그림1 참조)

## 2.2 계측장비 (loadcell)

계측용도	위 치	제작사 모델명	용량 (lbf)	브릿지 저항	최대 입력 저 항	출력비 (mV/V)	오 차 ( % / Fs )
주추력용	axial	BHL U3G2	100K	i : 350.0 $\Omega$ o : 350.0 $\Omega$	10V AC-DC	-3.000 +3.000	비선형 : 0.03% hysterisis : 0.02%
보조추력용	axial의 좌/우측	BHL U3G2	5K	i : 350.0 $\Omega$ o : 350.0 $\Omega$	10V AC-DC	-3.000 +3.000	비선형 : 0.03% hysterisis : 0.02%
측력용	전방 하 (2개)	Lebow 2319	5K	i : 700.0 $\Omega$ o : 700.0 $\Omega$	20V DC	-2.088 +2.088	비선형 : 0.05% hysterisis : 0.05%
측력용	후방 하 (2개)	Lebow 2283	10K	i : 700.3 $\Omega$ o : 700.3 $\Omega$	20V DC	-2.123 +2.121	비선형 : 0.05% hysterisis : 0.05%
측력용	전/후방 상	Lebow 2277	20K	i : 699.5 $\Omega$ o : 699.5 $\Omega$	20V DC	-2.103 +2.103	비선형 : 0.05% hysterisis : 0.05%

## 3. 시험전 사항

### 3.1 시험대 alignment

시험대 및 추진기관의 과도한 misalignment는 계측 결과에 직접 영향을 미치므로 alignment를 정확히 맞추는 것은 상당히 중요한 절차가 된다. 이미 알고 있는 misalignment의 경우 그 값이 작으면 data 를 수정하여 줄 수 있다.

다음으로 추진기관과 cradle에 대한 misalignment로 추진기관의 centerline은 stand의 axial centerline에 대해서 평행하게 설치되어야 한다. 만일 평행하게 설치되지 않으면 추진기관이 기울어지게 되어 정확한 data 를 얻을 수 없게 되는데 본 실험에서는 이를 방지하기 위해 cradle의 위치를 변경시켜 주면서 각각의 loadcell에 걸리는 값을 읽어서 최대한 평행하게 설치되도록 하였다. 노즐의 경우는 노즐의 centerline이 연소전에는 thrust stand의 axial centerline에 대해서 일직선이 되게 설치하여야 한다.

### 3.2 calibration

실험에서 나오는 결과를 정확하게 분석하여 추진기관의 정확한 thrust vector 변화량을 구하기 위해서는 thrust stand의 특성을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 이것은 시험대의 정확한 calibration에 의해서 얻을 수 있으며 각각의 6개의 loadcell의 상호작용(interaction)을 파악하는데 있다. 이는 6개의 loadcell중에서 하나의 loadcell에 힘을 가해 주고 나머지 loadcell에서 나오는 값을 기록/분석하는 작업으로 이루어진다.

### 3.3 초기상태 분석

연소시험을 통하여 thrust vector 변화량을 계측하기 전에 추진기관과 장착치구전체의 무게를 측정하고 장착치구를 이용하여 추진기관을 시험대에 장착한 후 각각의 loadcell에 나타나는 값을 기록하여 각각의 loadcell이 시험대에 대해서 어떤 간섭을 받고 있지 않는가를 확인하는 작업이 필요하다. 이때 실제의 전체 시험대 무게값과 loadcell에

서 계측한 값 사이에 큰 차이가 존재하면 시험물 인 추진기관이 순수하게 loadcell에 의해서 지지되지 않고 시험대와 상호작용 interaction하는 경우 이므로 추진기관을 시험대에 다시 setting하여 주어야 한다.

#### 4. 연소시험 data 분석

##### 4.1 진동 분석

###### 4.1.1 axial 가속도계

axial 가속도계는 추진기관 전체가 어느 정도로 흔들리는지를 파악하고 흔들리는 현상이 추력과 보조추력에 어느정도의 영향을 미치는지를 확인하기 위하여 A-frame의 윗부분에 axial방향에 평행하게 설치하였다

그림2의 분석결과를 보면 초기점화에 의해서 가속도계가 제자리를 잡으려는 offset 현상을 나타내는 DC(direct current)성분이 거의 "0" 값을 갖는 low frequency를 가지고 신호로 들어오고 있다. 가속도계의 경우는 구조물의 진동에 의해서 나타나는 가속도를 계측하는 것이므로 이 주파수의 data는 실제 거의 진동하지 않는 성분이므로 추진기관의 가속도에는 전혀 의미가 없는 것이다. 또한 약 160 Hz의 주파수를 갖는 신호가 큰 에너지를 가지고 들어오고 있다. 이는 주추력과 보조추력 loadcell에서 동일한 주파수를 갖는 신호가 들어오는 것으로 보아 추진기관은 160 Hz의 주파수를 가지고 흔들리고 있음을 알려주고 이 160 Hz는 추진기관의 axial 방향의 진동에 의해서 A-frame에 전달되는 것이다. 실제로 이 주파수는 추진기관의 내부압력에 의한 axial 방향의 고유진동수와 같다.

###### 4.1.2 side 가속도계

side 가속도계는 연소관의 AL skirt에 부착하여 놓았다.

그림 3의 분석결과를 보면 DC성분이 대부분을 이루며 연소전 부터 계측되는 60Hz의 전기적인 신호가 대부분을 이루고 있다.그리고 나머지 주파수 영역에서는 지배적인 인자가 없는 것으로 보아 이 가속도계는 거의 진동하고 있지 않는 것으로 보인다. 또한 axial 가속도계가 axial 방향으로 160Hz로 진동하고 있는데 side 가속도계에는 영향을 미치지 않는 것으로 보아 axial 방향의 motion과 side 방향의 motion이 서로 분리되어서 서로 상호작용을 하지 않는 것으로 판단되며, 각각의 loadcell이 상호간섭 없이 loadcell의 중심축에 수직 한 성분만을 계측하도록 추진기관에 제대로 setting된 것으로 판단된다.

###### 4.1.3 추력 data

그림 4의 분석결과를 보면 DC성분과 약 160Hz의 주파수 성분이 대부분을 이루고 나머지는 미미한 것들이다. 160Hz는 전방axial 가속도계에서도 계측된 값으로 실제 연소관의 진동에 의해서 나타나는 것으로 실제로는 추력값과는 전혀 관계없는 값이므로 filtering하여 제거하여야 한다. 그리고 이 intensity가 DC성분에 비해서 작은 관계로 filtering하지 않아도 실제 thrust값에는 거의 영향을 미치지 않는다.

###### 4.1.4 보조 추력 data

이 loadcell은 추진기관의 추력 계측용 loadcell에 대해서 0도와 180도 방향으로 설치하였다.

그림 5의 분석결과를 보면 DC성분과 60Hz의 주파수 신호, 그리고 약 160Hz의 주파수 성분이 대부분을 이루고 나머지는 미미한 것들이다. 60Hz 주파수는 전기적인 원인에 의한 것이므로 noise로 간주되며, 160Hz는 추진기관의 axial 방향의 진동에 의한 값으로 제거되어야 하는 값이다. 그러나 이들 두 성분이 DC 성분에 비해서 상당히 작은 값으로 filtering하지 않아도 실제값에는 거의 영향을 미치지 않는다.

## 4.2 추진기관의 거동분석

### 4.2.1 axial 방향의 속도

그림 6의 결과는 연소관의 전/후방에 설치한 가속도계를 시간에 대해서 한번 적분한 것으로 연소시간 동안 추진기관이 겪게 되는 속도 분포를 나타낸 것이다. 전방의 경우에는 가속도계를 강성이 큰 A-frame에 설치한 결과 A-frame이 low pass filter 역할을 하여 고주파수 영역은 제거되고 속도 분포가 깨끗하게 나오고 있으나 연소관 후방에 설치한 가속도계의 경우는 추진기관의 axial vibration과 더불어 연소관 내부의 압력파에 의한 다양한 진동 mode를 가지고 있어서 시간에 따라서 변화가 심한 경향을 보여 주고 있다. 추진기관이 점화되어 추력이 발생하면 추진기관 전방은 앞으로 빠른 속도로 이동하지만, 연소중에는 추력의 단위 시간당 변화가 작아서 거의 속도변화가 없다가 연소가 끝나게 되면 추진기관이 뒤쪽으로 빠르게 이동하는 것을 알 수 있다. 추진기관의 후방 부분은 추진기관 내부의 압력에 의해서 연소관은 팽창하게 되고 따라서 추진기관의 후방 부분은 뒷부분으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그리고 연소중

의 속도변화는 추력에 의한 것보다는 내부압력에 의한 것이 훨씬 더 영향이 큰 것으로 보인다.

### 4.2.2 side 방향의 속도

그림 7의 결과는 추진기관이 연소중에 겪게 되는 side 방향의 이동속도를 나타낸 것이다. 추진기관이 점화가 되면 추진기관의 전방부분이 상당한 속도를 가지고 순간적으로 한쪽으로 쏠리고 있는 현상을 볼 수 있다. 이것은

side 방향의 가속도계가 추진기관의 90도로 윗부분에 설치된 관계로 추진기관이 점화되는 순간에 윗부분으로 올라가려는 경향이 있음을 알 수 있다.

### 4.2.3 추진기관의 편심

그림 8의 결과는 추진기관이 연소가 시작되는 시간부터 연소가 끝날때 까지 기울어지는 정도를 나타낸 것이다. 결과를 보면 추진기관은 점화가 되는 순간부터 거의 0.068 도로 일정하게 기울어지고 있음을 알 수 있다.

### 4.2.4 축방향 변위(axial displacement)

추진기관이 연소중에 axial 방향으로 얼마나 이동하는지를 근사적으로 계산하기 위하여 가속도계 data를 시간에 대해서 2번 적분하여 그 결과를 그림 9에 도시하여 놓았다. 추진기관 전방의 경우에는 초기에 변위가 "0"인 위치에서 점화되어 추진기관에 추력이 발생하면 추진기관 전체가 앞으로 약 1.1 mm정도 이동하며 추력이 최대가 되는 10초 부근에서 최대값이 되고 그 이후는 추력의 증감곡선에 따라서 추진기관이 이동하는 것을 볼 수 있다. 그리고 후방에 이동곡선은 연소중에 추진기관

내부에 발생하게 되는 압력에 의한 연소관의 팽창량을 나타내는 것으로 연소관이 전반적으로 팽창하고 있음을 알 수 있다. 추진기관의 연소가 끝나는 40초에서 추진기관은 본래의 “0” 위치로 돌아오며, 연소가 종료되면 추력의 변화폭이 너무 커서 추진기관이 뒤로 약간 이동하는 경향도 볼 수 있다. 이 추진기관의 이동 대부분은 추력을 계측하기 위하여 설치한 A-frame에 의한 것으로 판단된다.

#### 4.2.5 측면 변위 (side displacement)

추진기관이 연소하게 되면 추력이 발생하게 되고 이 추력이 axial 방향으로 일정하지 않고 어느 방향으로 편심이 지게 되면 추진기관은 위/아래로 그리고 좌/우측으로 치우치게 된다. 일반적으로 구조물이 하중을 받게 되면 구조물은 force equilibrium을 이루는 상태로 돌아가려는 성질이 있다. 추진기관에서 나오는 추력이 axial 방향으로만 작용한다면, 그리고 추진기관이 force equilibrium 위치에 있다면 전혀 측면으로 이동하여서는 안된다. 그러나 이 시간동안에 측면으로 이동하는 것으로 보아 추력이 axial 방향으로만 작용하는 것이 아니라 초기에 nozzle의 centerline인 axial방향과 일치하지 않고 약간 편심지게 되어 추력의 side성분이 생성되는 것으로 볼 수 있다. 또한까지는 처음에 추진기관이 시험대에 설치 될 때 force equilibrium상태에 놓인 것이 아니고 약간은 force equilibrium상태를 벗어나게 설치될 가능성도 있다. 결과는 그림10에 도시하였다.

#### 4.2.6 무게감소 현상

##### 4.2.6.1 무게감소의 영향

추진기관의 추력을 계측하기 위하여 추진기관 밑 부분에 설치한 loadcell은 추진기관의 자중을 받고 있는 상태에서 실험을 실시하였으므로 초기에는 압축상태가 되어 있다. 만일 추력에 의한 힘의 측력성분이 작용하지 않는 상황에서 단지 추진기관의 무게만 감소한다면 loadcell에는 항상 현재의 압축상태를 줄일려고 하는 인장하중이 걸리는 효과가 나타난다. 이는 추진기관의 정열이탈에 의해서 발생하는 측력값을 loadcell에서 순수하게 측력만을 계측하지 못하고, 추력을 감소시키는 방향으로 나가게 된다(loadcell은 추력을 압축하중으로 계측한다.) 따라서 무게감소에 의한 영향을 제거하고 순수한 추력을 계측하기 위해서는 무게감소량을 다시 압축시키는 방향으로 작용시켜 주어야 한다.

##### 4.2.6.2 이론적인 무게감소

추진기관이 연소하면 추진기관내의 추진제의 무게가 감소하게 되며 따라서 전체 시험물의 무게는 감소하게 되며 무게감소 현상은 추진기관 밑부분에 설치한 loadcell에 직접 영향을 미치게 된다. 이때 실험을 통하여 시간에 따른 무게감소 곡선을 얻는 것이 가장 확실하지만 비용측면에서나 실제의 이용가치 면에서 볼 때 큰 도움이 되지 못한다. 따라서 본 측력분석 방법에서는 성능해석을 통하여 예측된 값을 적용하였다. 이 방법은 추진기관이 연소하는 동안에 자체의 연소불안정이나 외부교란에 의한 추진기관 진동이 심하지 않는 경우 내탄도 특성(internal ballistic characteristic)이 변하지 않게 되며 따라서 계측된

추력값과 압력값에 의해서 거의 정확한 추진제의 무게감소량 값을 얻을 수 있다.

#### 4.2.6.3 무게중심이동

본 시험물에 대한 side loadcell data의 frequency를 분석한 결과 low frequency를 갖는 signal이 주로 들어오고 나머지는 거의 계측 data에 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 만일 추진기관이 연소하는 중에 심하게 떨리지 않고 안정된 상태가 된다면 매 시간마다의 상태를 정적인 문제(static problem)로 보고 힘과 모멘트의 평형방정식으로 부터 추진기관의 무게중심을 구할 수 있다. 따라서 연소전 상태의 loadcell data에서 추진기관의 초기 무게중심을 구하고 연소가 끝난후의 loadcell data를 이용하여 최종의 무게중심을 구한 후 연소중간의 임의 시간에 대한 무게중심을 계산한 결과 연소초기의 무게중심 위치가 시간에 따라서 선형적으로 변하여 연소말기의 무게 중심으로 이동하는 것으로 보인다. 따라서 추진기관의 무게중심의 이동을 시간에 대한 1차함수로 표현하여 적용하였다.

#### 4.2.7 부피팽창 효과

추진기관의 연소관이 내압을 받게 되면 연소관은 팽창하게 되고 팽창된 양은 계측용 loadcell에 압축하중으로 작용하는 효과로 나타나게 된다. 따라서 추진기관의 정열이탈에 의한 순수한 측력만을 계측할 수 있도록 하기 위하여 추진기관 연소관의 팽창에 의한 영향을 제거하여 주어야 한다. 연소관 팽창량을 실제로 측정하는 것이 정확하나 이는 거의 불가능하여 다음과 같은 이론적인 방법으로 계산하였다.

#### 4.7.2.1 effective pressure 에 의한 방법

추진기관의 내부에 연소로 인한 압력(P1)이 발생하게 되면 연소관에 미치는 effective 압력(P2)은 추진제의 물성, 케이스의 물성, 그리고 내부형상 등에 의해서 결정되는데, 추진제가 연소하기 시작하는 시점에서는 추진제의 web 두께가 두꺼워서 힘의 평형조건에 따라 P2가 P1보다 상당히 작은 값을 갖게 된다. 그러나 연소말기에는 추진제가 완전히 연소하게 되고 연소관의 표면에 그대로 압력(P1)이 작용하게 되어 연소관 내부 압력과 effective 압력이 같은 상태가 된다. 그러나 추진기관에 내부압력에 의해 연소관이 팽창한다고 하더라도 실제로 연소관을 팽창시키는 압력은 P2가 되고 이 압력에 의한 연소관의 부피팽창량이 그대로 loadcell에 영향을 미치게 된다. 따라서 이 effective 압력을 이론적으로 구하고 이 압력(P2)을 loadcell에서 그대로 제거하여 주는 방법이다. 이 방법을 적용한 결과 만족스러운 결과를 얻었다.

## 7. 결론

고성능, 고충전의 추진기관을 설계/제작하기 위해서는 thrust vector 변화에 의한 측력을 계측하는 것은 필수불가결한 사항이다. 그러나 우리의 현실이 측력을 계측하기 위한 장비가 전혀 없으며 이들 장비제작기술과 설치방법은 이미 이에 대한 상당한 장비와 기술, 그리고 정보를 가지고 있는 다른 나라에서는 전혀 정보를 주지 않고 있는 것이 현실이다. 따라서 현재 우리 연구소의 연소시험 장비를 그대로 사용하고 이를 적절히 개조하여 측력을 계측하기 위한 방법이 모색되었고 이를 적용하여 측력을 계측한 결과 다음과 같은 결론을 내릴

수 있었다.

1) 현재의 시험장은 지면에 대해서 수평/수직 상태가 상당히 양호한 것으로 판단되었다. 이는 앞으로의 측력계측용 시험대를 만드는데 있어서도 상당히 중요한 사항이 되며 기존의 시험장 설치기술을 그대로 이용할 수 있도록 이에 대한 정보를 사전에 습득하는 과정이 필요하리라고 본다.

2) 수평시험에 의한 측력분석은 추진기관의 무게 감소와 이에 따른 무게중심의 이동이 계측결과에 상당한 영향을 미친다. 추진기관이 심하게 진동하는 경우에는 이에 대한 위치 이동함수를 시간의 함수로는 표현이 불가능하며 진동에 따른 효과도 고려하여 주어야 하므로 상당히 어려운 문제가 되고 측력 계측에 상당한 error를 유발하게 된다. 현재의 시험에서 추진기관이 axial 방향으로 160Hz로 흔들리고 있음에도 불구하고 무게감소 현상과 무게중심의 위치이동을 시간에 따라 선형적으로 가정하여 적용하여도 측력분석에는 거의 영향이 없음을 확인하였다. 이것은 향후에 시험대의 rigidity를 확보하여 진동을 감소시키기 위해 시험대를 over-design 하는 것을 막을 수 있으며 시험대의 공진현상을 막을 수 있도록 시험대를 설계할 때에 필요한 상당히 유용한 정보라고 판단된다.

3) 대부분의 시험대가 추진기관의 부피팽창에 의한 영향을 제거하기 위하여 여러 가지 복잡한 장치를 적용하거나 추진기관을 장착하기 위한 seat를 over-design하는 경향이 있다. 이런 경우 시험대가 거대하여 지면 취급하기에 힘들게 된다. 그러나 본 실험에서는 이 부피팽창에 의한 영향을 이론적으로 제거하여 주었으며 이 방법을 적용하여

도 거의 부피팽창에 영향을 받지않는 측력성분을 얻을 수 있었다. 따라서 본 시험에 의한 방법을 적용하여서도 상당히 신뢰할 수 있는 측력성분을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4) 마지막으로 현재의 시험장비를 그대로 적용하여 추진기관에 가해지는 측력을 어느정도의 범주 내에서는 계측이 가능하다고 판단된다. 다만 보조추력을 계측하기 위하여 설치한 loadcell을 제거하여 주어서 추진기관의 끝부분이 완전히 free상태가 되도록하는 방법이 모색되어야 한다. 이는 추진기관의 시험안정성에도 영향을 미치므로 상당히 주의깊게 고려되어야 하며 현재 우리가 보조추력 loadcell에서 얻는 정보를 계측할 수 있는 다른 방법도 아울러 계속 연구되어야 한다고 판단된다. 이상과 같은 사항을 종합/판단할 때 기존의 시험대를 그대로 사용하고 다양한 정보들을 종합/분석하여 추진기관의 무게감소와 무게중심의 이동을 시간의 함수로 표현하여 주고 추진기관의 연소실 압력에 의해서 연소관의 팽창에 따른 효과를 제거하여 주면 추진기관에 가해지는 측력을 예측할 수 있다고 판단된다.

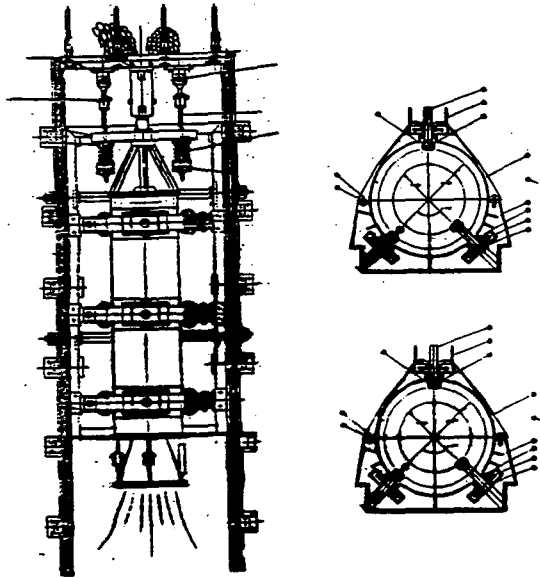


그림 1. 사용된 시험대 개략도

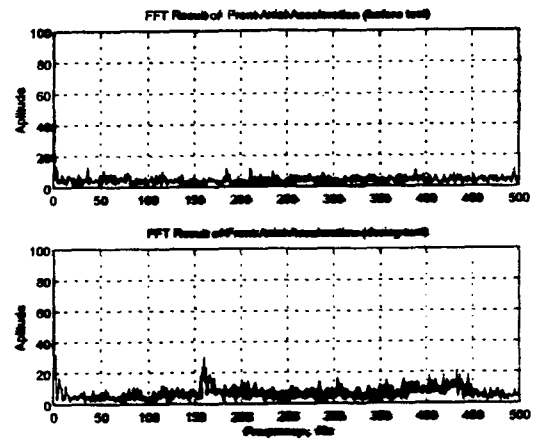


그림 2. 축방향 가속도계 진동분석

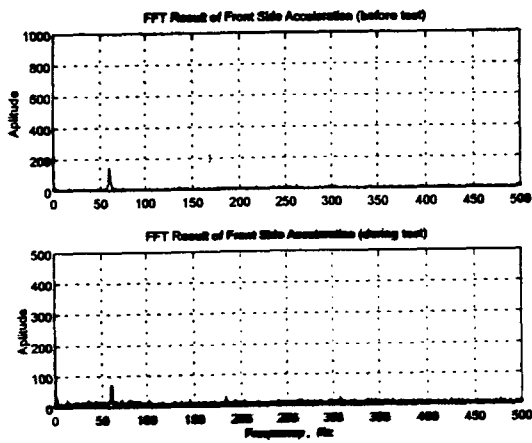


그림 3. 측력방향 가속도계 진동분석

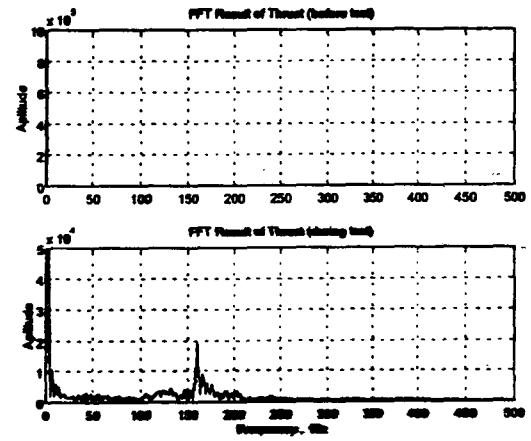


그림 4. 추력결과의 진동분석

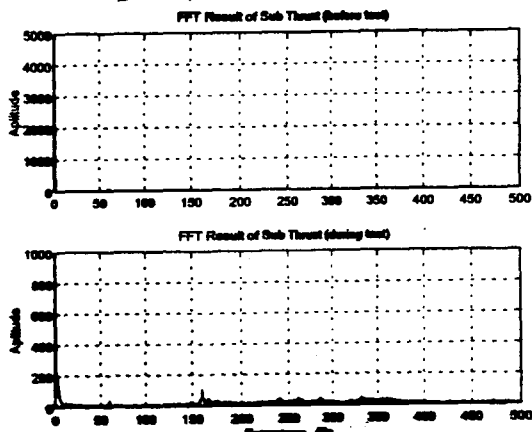


그림 5. 보조추력 결과 진동분석

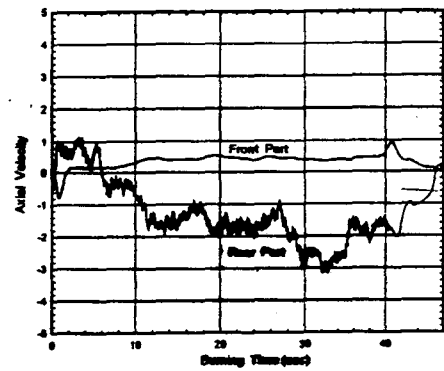


그림 6. 축방향의 이동속도 곡선



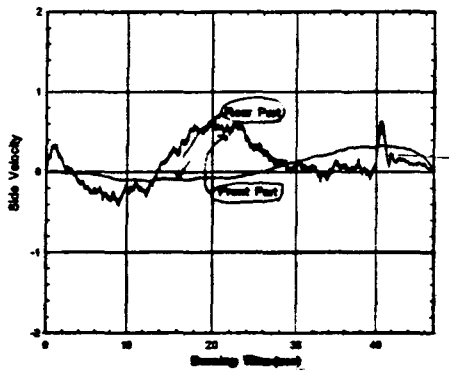


그림 7. 측력방향 이동속도 곡선

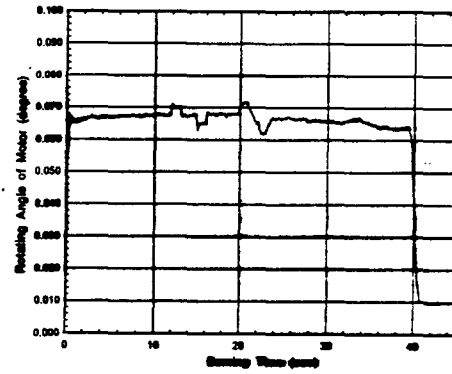


그림 8. 추진기관의 편심곡선

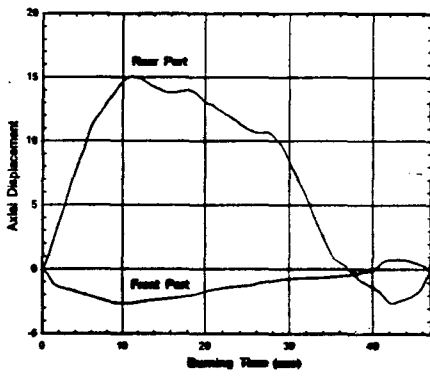


그림 9. 축방향의 이동거리 곡선

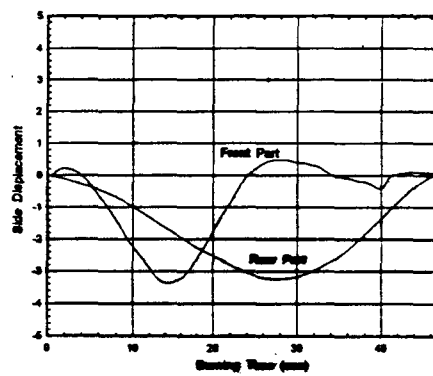


그림 10. 측력방향의 이동거리 곡선