

고 정확도 추력 계측 시험대 설계기법

이규준* · 박익수* · 최용규**

Design Method of the High Accuracy Thrust Stand

Kyu-Joon Lee* · Iksoo Park* · Yongkyu Choi**

ABSTRACT

The thrust measurement systems(TMS) with high accuracy are required in rocketry, according to develop the high precise guided space vehicle. For obtaining high accuracy, the basic concepts and the necessary technology which have been acquired through many experiences of TMS are summarized, and the design methodology for practical use in ADD is presented. In this paper, the parameters against accuracy of TMS are discussed, and the improving methods are suggested. Through this application example, the design methodology of ADD is shown its superiority in TMS.

초 록

우주항공 산업과 유도무기의 발달로 여러 종류의 다양한 고성능 추진기관의 개발이 요구됨에 따라서 보다 정확한 추력계측이 요구된다. 이와 같은 요구조건을 충족하기 위하여 지금까지 국방과학연구소에서 개발하여 적용하고 있는 시험대의 설계 기법을 제시하고 시험대의 설계에 필요한 기본적인 지식, 개념을 정리한 것이다. 본 논문에서 정확도를 해치는 여러 가지 원인 분석과 제거기법을 제시하였으며 본 설계기법을 적용한 사례를 통하여 본 설계기법의 우수성을 확인하였다.

Key Words: Thrust Vector(추력 벡터), Thrust Test Stand(추력시험대), Thrust Error(추력오차)

1. 서 론

추진기관의 임무는 탑재물을 목표위치로 이동시키는 에너지원으로 다양한 종류의 고성능 추진기관이 개발되어 왔다. 최근에는 우주항공 산업과 유도무기 분야에서 보다 더 정확하게 탑재

물을 이동하는 것이 요구되어 보다 더 정확한 추력제어/추력방향제어 기술이 개발되고 있으며 이에 상응하여 추력계측/평가기법도 보다 높은 정확도가 요구되고 있다. 본 논문은 이러한 추세에 대응하여 추진기관 성능 평가의 핵심 장치 중 하나인 추력계측 시험대의 높은 정확도를 달성할 수 있는 설계기법에 대하여 논한다. 이를 위하여 첫째, 정확하게 힘을 계측하는 기법을 논하고 둘째, 추진기관 작동 시 발생하는 변형에 의한 상호 간섭효과를 효과적으로 제거하여 계

† 2005년 10월 31일 접수 ~ 2006년 3월 7일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 기술연구본부 4부

** 종신회원, 국방과학연구소 기술연구본부 4부
연락처, E-mail: dreamoj@para.com

측 정확도를 높일 수 있는 설계기법에 대하여 논하며 마지막으로 본 설계 기법을 적용하여 설계/제작하여 운용중인 추력 시험대의 성능 평가 결과를 제시한다.

2. 힘의 계측 원리

2.1 인장 시험기에서 힘 계측 기법

공학적으로 가장 쉽게 접하는 힘의 계측은 인장 시험기이다. 인장 시험기에서 시편에 가해지는 인장력을 정확하게 계측하기 위해서 사용되는 자동정렬 장치(self alignment)는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 볼 소켓(ball and socket), 유니버설 조인트, 체인, 나이프 엣지(knife edge) 등을 이용하고, 압축력에서는 볼 소켓과 나이프 엣지 등이 이용된다. 이들 장치는 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 상하 고정된 두 점 사이에 작용하는 힘의 작용선을 자동적으로 일치시켜 힘 발생 장치에서 발생하는 힘과 정렬 정확도에 관계없이 시편에 원하는 하중만 작용하게 되어 힘이 아주 정확하게 계측되는 것을 보장 해준다[1].

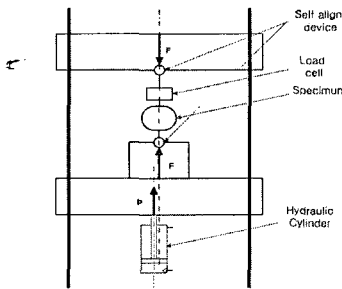


Fig. 1 Tension Test Machine

2.2 추력 시험대에서 힘 계측 기법

1) 단일 추력 시험대 힘 계측 개념

추진기관의 주 추력만 계측하는 단일 추력 시험대는 다분력 추력 시험대에 비해서 비교적 간단하나 인장 시험기처럼 단순하게 힘을 계측할 수는 없다. 단일 추력 시험대에서 힘을 정확하게 계측하기 위해서는 인장 시험기의 인장/압축력

계측에 모두 적용 가능한 볼 소켓, 나이프 엣지 등을 사용하거나 다른 자동 정렬 기능을 가지는 장치를 사용해야 하는 것은 물론이며 이보다 더 복잡한 것은 피 계측물에서 힘이 발생되기 때문에 인장 시험기에서처럼 단순하지 않다. 이를 인장시험기와 비교하면, Fig. 1에서 보는바와 같이 인장 시험기에서 힘 발생장치(주로 유압 실린더가 사용됨)의 작용선과 계측하고자 하는 시험물의 작용선은 엄밀하게 말하면 독립이고 시험기 내부 두 점사이의 작용선만 일치시키면 정확한 계측이 된다. 그러나 추력 시험대에서는 추진기관으로부터 발생하는 힘의 작용선과 로드셀의 중심축을 일치시켜야 하며, 이 상태의 정렬성은 시험물이 작동할 때도 유지되어야 한다[2]. 즉 Fig. 2에서 P1, P2, P3 세 점이 같은 축 상에 있게 하는 정렬성의 보장과 유지 기법이 추력 시험대 설계의 핵심 기술이다. 이들 세 점의 정렬성 보장은 추진기관의 전후방 스킵트 링의 중심이 추진기관 작동 유무에 관계없이 항상 동일축[보통 시험대의 중심축이 된다]선상에서 벗어나지 않게 고정시키면 시험물의 전방과 시험대 추력지지대 사이 조립되는 로드셀은 자연스럽게 이 축 선상에 있게 된다. 즉 시험대의 운동 방향은 추진기관 축 방향만 이동이 가능하고 나머지 방향은 모두 고정되어야 한다.

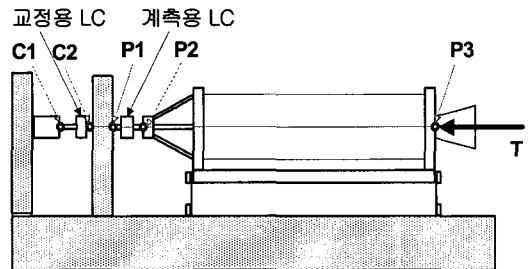


Fig. 2 Test Stand for Thrust Measurement

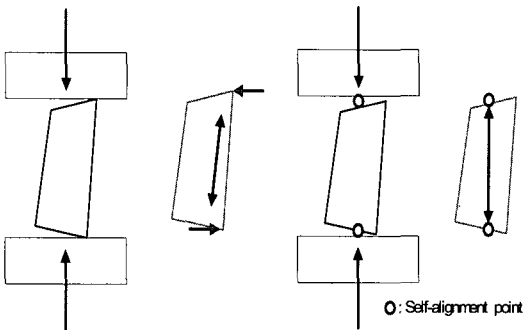
2) 다분력 추력 시험대 힘 계측 개념

추진기관에서 발생하는 추력 벡터와 작용점은 직접 측정이 불가능하나, 이 힘을 시험대 좌표계의 6축 힘으로 변환하면 계측 가능하다. 이를 계측하는 시험장치가 다분력 시험 장치이다[3]. 즉,

시험대에서 계측한 6-방향 힘으로부터 원하는 추력 벡터와 작용점 또는 3-방향 힘과 3-방향 모멘트를 구하는 것이 다분력 시험대의 계측 원리이다. 따라서 다분력 시험대 설계에서 핵심은 각 분력 상호간 평행성과 직교성을 유지하는 상태에서 각 분력을 단일 추력 시험대의 추력 계측 방법으로 힘을 계측하는 것이다. 그런데 시험대에서 분력 상호간의 직교성과 평행성이 불완전하므로 각 성분의 힘이 다른 성분에 영향을 주지 않게 역학적으로 힘을 절연하는 정도가 아주 중요하게 된다. 이 용도에 사용되는 것이 자동정렬 장치이며 다분력 시험대에서 자동 정렬 장치는 한 성분의 힘 방향에 대한 정렬뿐만이 아니라 해당 성분의 힘이 다른 성분에 미치는 영향을 역학적으로 절연하는 기능을 한다.

2.3 자동정렬 장치

1) 단일 추력 시험대



(a) without self-alignment (b) With self-alignment

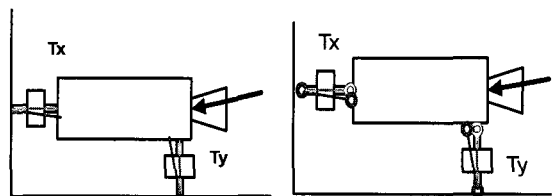
Fig. 3 Function of Self-Alignment

Figure 2와 같이 단일 추력 시험대에서 시험대의 주 추력 계측 기준축은 세 개의 조립면(시험대+로드셀, 로드셀+시험물, 시험물+시험대)에서 구현이 되며 이 세 조립면이 서로 평행이고 동시에 중심이 일치하면 힘 작용선은 시험대의 기준축과 정확하게 일치되어 정확한 계측이 가능하게 된다. 그러나 Fig. 3 (a)에서 보는바와 같이 실제 조립면은 가공공차와 조립공차 때문에 서로 평행하지 않으며, 또한 다 점 접촉이 되어 힘 작용선의 방향이 하중의 변화에 따라서 변하게

되고 또한 원하지 않은 모멘트와 전단력이 발생한다. 이로 인하여 시험물에 2차 하중이 가해져 정확한 시험목적은 달성할 수 없게 되고 센서나 치구가 파괴될 가능성도 있어 심각한 안전문제를 유발하기도 한다. 이런 문제를 해결하기 위해서 Fig. 3 (b)와 같이 자동정렬 장치를 사용하면 자동정렬 장치의 중심을 연결하는 힘의 작용선이 시험대의 기준축과 일치시킬 수 있다. 즉, 자동정렬 장치의 중심을 고정하거나 허용량 이하로 이동범위를 제한하면 축의 일치가 구현된다.

2) 다분력 추력 시험대

Figure 4와 같이 2축 이상의 추력을 계측하는 다분력 추력시험대에서 한 축의 불일치 성분은 다른 축의 하중에 직접 영향을 미친다. 또한 자동 정렬장치가 없는 경우 Fig. 4 (a)와 같이 한 축의 직각방향 강성이 다른 축 방향의 강성에 큰 영향을 미치기 때문에 시험대의 거동이 아주 복잡하여 정확한 계측이 어려워지고 센서는 과다한 2차 하중을 받게 되어 시험대의 성능뿐만 아니라 운용성도 심각하게 저하시킬 수 있다. 따라서 다분력 힘을 계측할 경우 자동 정렬 장치가 필수적이며 가장 적합한 장치는 유니버설 플렉서(universal flexure)이다[4]. 이 장치는 볼소켓 장치와 같은 기능을 하면서 마찰이 없어 재현성이 거의 완벽하고 하중 전달 방향에 대한 직각 방향 강성이 아주 작고 회전 중심의 변화가 아주 작아 위에서 언급한 문제들이 거의 해결된다. 그러나 시험대의 변형으로 발생하는 상호 직교성의 오차의 영향은 피할 수 없으며 이 문제는 시험대의 설계에서 자세하게 다룰 것이다.



(a) without self-alignment (b) With self-alignment

Fig. 4 Comparison of Two Types Test Stands

3. 추력 시험대의 설계 방법

3.1 시험대의 설계 시 고려사항

1) 시험대의 규격

2장에서 언급한 힘의 계측 방법과 추력 계측 시험대에서 정확한 기준축의 구현방법을 확보하고, 추진기관에서 발생하는 힘의 작용선을 정확하게 예측하면 완벽한 힘의 계측이 가능하게 보이지만 근본적으로 추진기관에서 발생하는 힘의 작용선을 정확히 예측한다는 것은 불가능하고, 시험대의 기준축도 일정 크기 이상의 기하학적 오차를 가진다. 또한 오차가 작을수록 이에 비례하여 추력 계측 시험대의 전체 비용은 기하급수적으로 상승하므로 요구 정확도와 비용간의 최적점에서 오차를 결정해야 한다. 따라서 시험대의 설계에서 가장 먼저 요구되는 것이 시험대의 규격 결정이다. 시험대 규격은 추진기관의 성능 평가에 요구되는 데이터의 정확도와 운용성을 고려하여 결정되어야 하므로 추진기관 설계자, 시험장치 운전자, 데이터 계측 시스템 운전자 등과 많은 사전협의를 거쳐서 결정되어야 한다. 즉, 시험 데이터 획득 계측장비의 능력, 시험 데이터의 분석 요구 정확도, 시험대의 설계개념을 구현할 수 있는 제작능력, 운용능력, 시험물의 자체 오차 등을 고려하여 결정해야 하며 시험대의 규격 구성요소는 다음과 같다: 1) 추력계측의 용량 및 시험대 정확도, 2) 추력벡터의 요구 성분수, 3) 시험대의 요구 주파수, 4) 정열의 정확성 및 편리성, 5) 가용 시험물의 크기, 조립/분해성, 6) 시험대의 교정정확도 및 운용성, 7) 시험조건의 환경 모사성(온도, 고도), 8) 안전 통제성, 9) 비용.

2) 추력 계측 시스템의 오차 및 비용

추력 계측 시스템에서 최종적으로 구해지는 데이터의 오차는 추력 시험대 오차, 계측 시스템 오차, 시험물 자체에 의한 오차 등 크게 3 부분으로 구분되며, 신뢰도 95%인 경우 시험 데이터의 총 오차는 Eq. 1과 같이 나타난다. 이 식에서 투입되는 비용으로 최상의 데이터를 획득하기 위해서는 시험대와 계측 시스템의 오차와 비용,

시험물의 제작공차와 비용을 고려하여 투입되는 비용이 한곳으로 치우치지 않고 원하는 성능을 달성할 수 있게 오차의 크기와 비용을 Fig. 5의 흐름도에 따라서 조정해야한다.

$$\epsilon_{total} = \sqrt{\epsilon_p^2 + \epsilon_{ts}^2 + \epsilon_m^2} \tag{1}$$

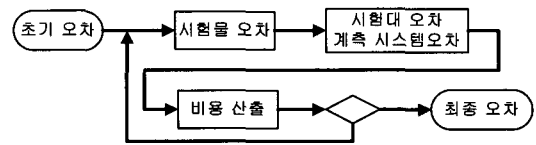


Fig. 5 Flow Chart of the Thrust Error Magnitude Determination

여기서, ϵ_p : 시험물(추진기관) 오차, ϵ_{ts} : 시험대 오차, ϵ_m : 데이터 획득 시스템의 오차이다. 이들 오차를 감소시키기 위해서 투자되는 비용은 기하급수적으로 증가되며 10 ton 이하의 규모에서는 계측 시스템이 가장 큰 상승폭을 가진다. 따라서 시험 데이터의 요구 정확도는 유도비행체의 요구조건에 적합하게 결정해야 한다.

3.2 시험대의 설계 방법

1) 시험대 형상

시험대의 기본 형상은 지면을 기준으로 주 추력방향에 따라서 수직식과 수평식으로 구분되고 주 추력의 작용선과 주 추력계측용 로드셀의 작용선과의 일치 또는 편심 여부에 따라서 정측 시험대와 편심(offset) 시험대로 구분된다. 시험 요구조건과 용도가 결정되면 시험대의 형상은 Table 1에서 결정된다[5].

Table 1. Characteristics of Test Stand Type

형상	특징	용도
수직식	추력 계측이 정확	추력평가 ≥ 추력평가
수평식	주 추력 계측이 정확	추력평가 ≤ 추력평가
정측형	동특성, 정확도 우수	고체/액체 추진기관용
편심형	동특성, 정확도 양호	공기 흡입추진기관용

2) 시험대의 설계 개념

가장 이상적인 시험대는 강성이 무한대인 시험대이나 이는 불가능하므로 시험대의 변형을 허용하면서 정확도를 극대화 시키는 개념이 필요하다. 즉 추력벡터를 계측하는 로드셀 간의 변위를 허용하고 이를 보상할 수 있는 시험대를 만드는 것이다. 보상 방법은 정확한 모사 추력벡터를 시험대에 가하고 이때 발생하는 계측용 로드셀의 응답을 구하여 입력과 출력간의 관계식을 결정한 후 실제시험에서 구해진 데이터를 관계식에 입력하여 원하는 추력벡터를 구하면 변형에 의한 영향이 고려되는 시험대가 된다. 따라서 이런 시험대에서 문제의 핵심은 얼마나 정확하게 기준 입력을 가하느냐에 달려있다. 이를 개략적으로 나타내면 Fig. 6과 같고 이를 수식화하면 아래 Eq. 2, 3, 4와 같다. Eq. 3은 교정입력 CF 와 이에 대응하는 시험대 출력 MF 로부터 C_{ij} 를 구하는 교정 방정식이고, Eq. 4는 교정결과인 C_{ij} 와 지상연소시험에서 획득한 시험대 출력 데이터 MF 로부터 미지의 입력 추력 데이터 XF 를 구하는 식이다.

$$CF = C_{ij}MF \tag{2}$$

$$C_{ij} = CF^*MF \tag{3}$$

$$XF = C_{ij}MF \tag{4}$$

여기서 CF^* : pseudo inverse matrix

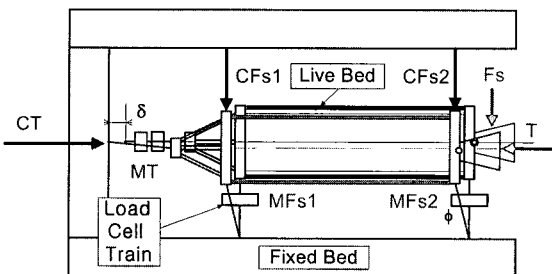


Fig. 6 Test Stand with In-Place Calibrator

여기서 입/출력 관계식은 엄밀한 의미에서 비선

형이지만 운용성을 높이기 위해서는 요구 정확도 범위 안에서 선형이 되게 설계하는 것이 좋다. 위의 시험대 모델 식은 3가지 구현방식이 있으며 자세한 내용은 참고문헌[6]에 있으며 여기서는 간략하게 소개한다.

- Sverdrup 기법: Eq. 2를 그대로 구현한 형태이다.

- Ormond 기법: Eq. 2의 교정계수 C_{ij} 에서 피복 요소만 이용한 식이며, 하드웨어에서 시험대의 변형 영향이 제거되게 한 것이며 이를 구현하기 위해서 Sverdrup 기법보다 로드셀의 수가 2배 이상 필요하게 된다[7].

- ADD 기법: 모델 식은 Eq. 2에서 MF 를 CF 의 함수로 나타낸 식이며 가장 중요한 개념은 CF 가 초기 직교성을 유지하게 교정 장치를 설계하면[6] MF 를 CF 의 함수로 나타내는 것이 Eq. 2보다 더 정확하게 구현되는 것을 이용한 것이다. 로드셀의 배열은 어느 배열에도 적용이 가능하지만 여기서는 Sverdrup 기법과 Ormond 기법의 조합으로 구성하였다[3].

$$MF = D_{ij}CF \tag{5}$$

Eq. 5는 Eq. 2보다 직교성이 우수한 성분[CF]으로 좌변 값을 근사화하기 때문에 모든 성분에 대한 민감도가 일정하나 Eq. 2의 경우 변형이 큰 방향으로 민감도가 치우쳐 오차의 영향이 Eq. 5보다 크게 나타난다. 따라서 Eq. 5를 사용하면 측력이 추력에 비해서 상대적으로 아주 작은 추력 시험대에서 더 정확하게 된다.

3) 시험대의 강성

구조물의 강성은 시험대의 입출력관계의 선형성과 직접 관계되어 정확도와 시험대의 고유진동수를 결정하는 요소이다. 설계과정에서 결정되는 것은 시험대의 허용 변위량, δ_{ts} 이며 이 변위량의 정의는 Fig. 6에서 고정 프레임의 변형량까지 포함한 크기이다. 주 추력방향의 δ_{ts} 의 결정에서 우선 고려되는 것이 시험대의 고유 진동수, f_{ts} 이고 f_{ts} 는 시험대의 동특성이 계측 데이터에

미치는 영향을 무시할 수 있는 크기로 설계할 경우 아래와 같이 결정한다.

$$f_{ts} \geq 4f_{ta} \quad (6)$$

여기서, f_{ta} : 시험물에서 발생하는 최고고유진동수이다. 시험대의 강성과 고유 진동수와의 관계는 단순 2차 무 감쇠 시스템으로 모델링하여 아래와 같이 계산한다.

$$f_{ts} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (7)$$

또한 추력 하중과 시험대의 허용변위 관계도 아래와 같이 단순하게 계산한다.

$$T = kx \quad (8)$$

Eq. 7, 8에서 δ_{ts} 를 구하면 다음과 같다[8].

$$\delta_{ts} \equiv \frac{T}{(2\pi)^2 M} \quad (9)$$

Eq. 9에서 구한 변형량의 영향이 미치는 오차를 아래와과 같이 분석하여 이 오차의 크기가 허용오차보다 작으면 시험대의 강성이 결정된다.

- 주추력 방향에서 진자효과(pendulum effect) 또는 역진자 효과에 의한 시험물 축의 offset에 의한 축 방향 오차와 측력방향의 변형으로 발생하는 주축의 오차의 크기
- 같은 방법으로 측력 방향에서 발생하는 오차의 크기

δ_{ts} 가 크다고 판단될 경우 시험대 프레임의 강성을 증가시켜야 한다. 이는 고정 프레임이나 라이브 베드의 주요 구조물의 요구 강성 증가는 H-빔의 굽힘 강성을 보강하면 가능하다. 그러나 아주 높은 주파수와 높은 정확도가 요구되는 경우는 범용시험대로 설계하여 요구조건을 구현하기 어렵기 때문에 이런 경우 한 종류의 대상 시험물만 사용하는 전용 시험대로 설계하는 것이 유리하다.

4) 시험대/시험물의 제작/조립/설치 공차 크기

시험대 및 시험물의 제작, 조립, 설치 공차에 의한 오차와 시험대의 변형은 모두 기하학적 오

차를 유발하여 계측 오차에 영향을 미친다. 따라서 이들 공차 크기는 총 허용오차에서 이들 영역에 배분되는 오차의 크기에서 직각도 오차를 계산하여 결정하고 동시에 제작 오차와, 조립, 설치에 사용되는 3차원 광학 장비의 운용 오차도 고려해야 한다. 최종 조립/설치 오차는 3차원 광학 장비의 운용 오차의 범위가 0.10~0.25 mm 이므로 조립면에 shim을 이용하면 위치오차 기준으로 0.5mm 수준까지도 규모가 크지 않은 경우 별 어려움 없이 구현 가능하다. 두께가 두꺼운 shim을 사용할수록 체결강성이 크게 저하되므로 shim의 사용을 최소화해야 하며 사용 중 전단력에 의한 체결강성의 저하를 방지하기 위해서 체결부는 최종 조립 후 반드시 다우얼 편을 박아 체결면의 전단력 저항력이 낮아지는 것을 방지해야 한다.

3.3 시험대 부착 교정 장치(in-place calibrator)

시험대는 Fig. 6에서 나타난 것처럼 시험물을 직접 고정하는 라이브 베드, 고정베드, 시험물에서 발생하는 하중을 계측하는 계측용 로드셀 트레인(load cell train, 로드셀+플렉서)으로 구성되며 로드셀 트레인은 라이브베드와 고정구조물 사이에 조립된다. 시험대는 연소시험 상태에서 변형되고 시험이 끝나면 원래 위치로 되돌아가는 현상이 운용 중 반복되므로, 볼트로 체결되어 있는 로드셀 트레인의 체결 강성은 미소하게 변화되어 초기 정확도를 보장하는 것이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해서 도입된 개념이 시험대 부착 교정 장치(in-place calibrator)이다. 이 교정 장치의 정확도와 운용성이 시험대의 정확도와 운용성을 결정한다. 국과연에서 사용하는 교정장치는 시험대의 변형 영향이 교정장치의 상호 직교성에 영향을 미치지 않은 오프셋 프리(offset-free) 교정장치를 사용한다[6].

3.4 로드셀의 용량 및 정확도

1) 교정용 로드셀의 용량 및 정확도

교정용 로드셀의 용량은 최대계측 용량의 1.25 ~ 1.5 범위로 결정하고 플렉서의 용량은 로드셀

용량과 같게 결정한다. 교정용 로드셀의 정확도는 시험대 정확도에 직접 영향을 미치며 최소 계측 범위에서 시험물의 계측 요구 정확도의 크기를 이용하여 아래 식에서 센서의 오차를 결정하며 통상 상용 로드셀 중 정확도가 가장 높은 것이 선정된다.

$$\text{센서의 오차} = \frac{\text{최소계측범위의 요구정확도}(M)}{\text{센서의 최대용량}(N)}$$

2) 계측용 로드셀의 용량 및 정확도

계측용 로드셀의 용량은 일반적으로 최대 계측량의 2.0 정도가 적절하다. 용량을 증가시키면 강성이 증가하여 동특성이 좋아지는 장점이 있지만 신호레벨이 작아 이를 보상하기 위해서 고가의 신호처리용 앰프가 요구된다. 정확도는 교정용보다 한 단계 낮게 결정한다. 플렉서의 하중 용량은 대략 로드셀 용량의 2.0 배로 설정하고 각도용량은 전체 시험대의 정확도에 따라서 결정되나 보통 1.5도나 4도를 사용한다.

로드셀과 플렉서의 체결부 나사의 정확도가 시험대의 초기 정확도와 정확도 유지에서 가장 민감하게 작용하므로 세심한 주의가 요구되며 정확도가 높으면 조립이 어렵고 낮으면 정확도를 떨어뜨린다. 보통 ANSI의 나사 규격으로 암나사는 3A, 수나사는 3B를 사용한다.

3.5 추진기관 변형 영향 제거기법

추력 계측 시험대의 설계에서 어려운 분야 중의 하나가 이 분야이며 시험 중 주 하중에 의해 발생하는 변형이 로드셀에 영향을 미치지 않게 하는 것이다. 제거기법은 플레이트 플렉서(plate flexure)의 한단은 추진기관의 후방 반경방향 변형이 거의 발생되지 않은 부분과 연결하고 다른 한단은 시험대의 라이브 베드 후방과 연결하여 추진기관의 길이 변형을 허용해 준다[5, 7]. 이 문제는 시험대 설계자가 대상 추진기관에 대한 변형 특성을 모르면 무시되어 시험 후 결과분석에서 문제가 발생할 경우 문제의 원인을 찾지 못하는 경우로 발전한다.

플레이트 플렉서의 주요 길이 결정은 Fig. 7에서 Eq. 10이 성립하고 이 식에서 플레이트 플렉

서의 길이 l_0 를 구하면 Eq. 11과 같다.

$$\sin\theta \approx \frac{\delta_r}{\delta_{td}} \approx \frac{\delta_{td}}{l_0} \tag{10}$$

$$l_0 \approx \frac{\delta_{td}^2}{\delta_r} \tag{11}$$

여기서 δ_r : 시험물 중심축의 반경 방향 허용 변위량, δ_{td} : 시험대에 조립되는 시험물 조립체의 최대 추력에 대한 길이방향 총 변위량이다. Eq. 10에서 $\sin\theta$ 의 값은 길이 방향 변형에 의한 추력 계측 오차크기이며 이 값은 시험대 오차 전체 크기에 비해 무시할 수 있는 크기로 선정해도 구현에 어려움이 없기 때문에 아주 작게 선정하고 이 값에서 δ_r 을 계산하면 l_0 의 크기를 선정할 수 있다.

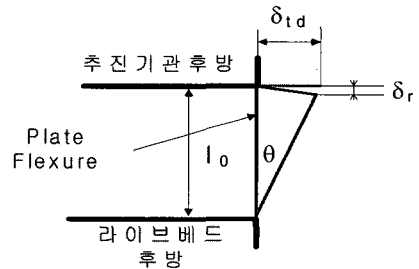


Fig. 7 Deformation Diagram of Plate Flexure

4. 적용 예

지금까지 언급한 설계기법을 적용하여 설계/제작/설치 된 시험대의 정확도 평가 결과는 다음과 같다.

4.1 시험대의 자체 정확도(교정결과)

다분력 시험대는 시험진후로 교정을 실시하여 시험동안 시험대 특성의 변화폭을 점검해야하고 이 변화 폭이 작아야 시험 데이터를 정상적으로 분석할 수 있다.

Figure 8과 같이 추력, 피치, 요가 동시에 작용하는 가장 일반적인 추력 벡터 모사 하중을 시

험대에 가하여 시험대의 정확도를 평가해보면 다음과 같다. Fig. 8에서 추력 하중이 최대인 구간 $65 < t < 82$ 에서 시험 전후의 시험대 오차 특성 곡선은 Fig. 9, 10과 같고 추력과 요의 오차는 각각 0.1, 0.38%로 아주 작으며 동시에 재현성도 아주 우수하다. 피치 오차는 시험 전 0.68%에서 시험 후 0.48%로 시험 후가 더 우수하게 나타났다. 이 현상은 고체 추진기관의 시험에서만 나타날 수 있는 현상으로 시험 전 교정에서 추진제의 무게가 피치 방향으로 작용하고 시험 후 이 값이 영이 되므로 발생하는 현상이다. 재현되는 오차는 보상이 가능하므로 보상할 경우 전체적으로 시험대의 정확도는 Table 2에 나타난 것보다 훨씬 높은 0.2 % 이하 까지 높아진다.

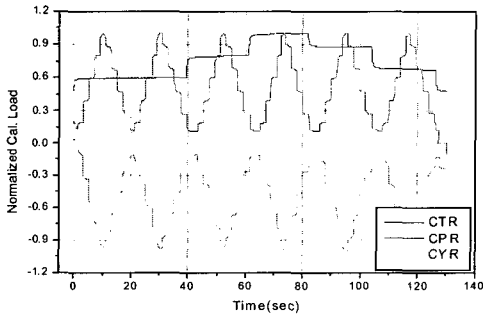


Fig. 8 Simulated Thrust Vector for the Error Evaluation of the Test Stand

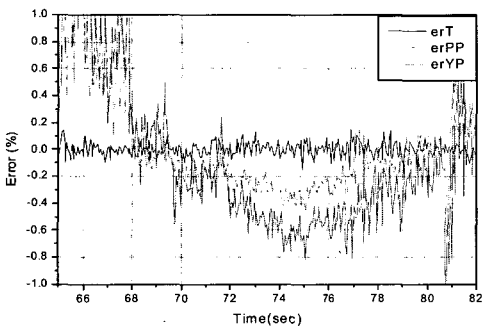


Fig. 9 Error Under Coupled Load CT+CP+CY at Pre-Calibration

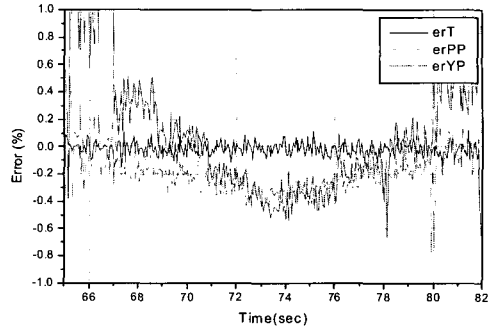


Fig. 10 Error Under Coupled Load CT+CP+CY at Post-Calibration

Table 2. Error Percentage of Coupled Load CT+CP+CY

구 분	추력[%]	피치[%]	요[%]
시험 전	±0.10	-0.68	-0.38
시험 후	±0.10	-0.48	-0.38

4.2 연소 시험결과

Figure 11은 제트 베인(Jet Vane)이 장착된 추력 조종(TVC, thrust vector control) 추진기관의 지상 분력시험결과이고, Fig. 12는 추력대비 피치와 요의 크기를 나타낸 선도이다. 이 선도에서 제트 베인 TVC시스템의 추력손실 크기, 입력대비 출력크기, 모멘트 크기, 추력벡터의 어긋남(thrust misalignment)량 등을 평가할 수 있다. 추력벡터의 어긋남은 구간 $0 < t < 1$ 에서 피치 0.6%, 요 0.13%이며, 구간 $6 < t < 9$ 에서 피치 0.035%, 요 0.08%, 구간 $11 < t < 14$ 에서 피치는 0.17%, 요 0.09%로 아주 우수한 시험결과를 보여주며 연소 초기와 말기가 상대적으로 높은 것은 제트베인 TVC의 특징이다. Fig. 13은 단분력 시험대에서 플레이트 플렉서를 사용한 시험대의 추력 선도와 플렉서를 사용하지 않은 선도와의 차이를 나타낸 것이다. 플렉서가 없는 경우 연소 후 잔류하중이 있으며 이는 연소 중 로드셀에 추력이 의 다른 2차 하중이 가해졌으며 이로 인하여 추력 계측 오차가 발생된다는 것을 보여 준다. 따라서 단일 추력시험대에서도 플렉서를 사용해야 정확한 추력 계측이 가능하다는 것을 보여 준다.

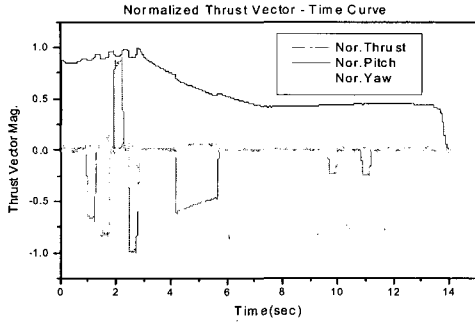


Fig. 11 Time-Thrust Vector Curve

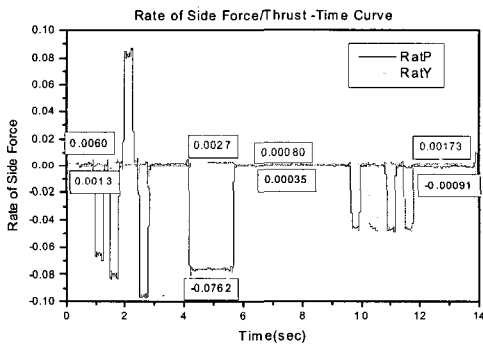


Fig. 12 Time - Side Force/Thrust Curve

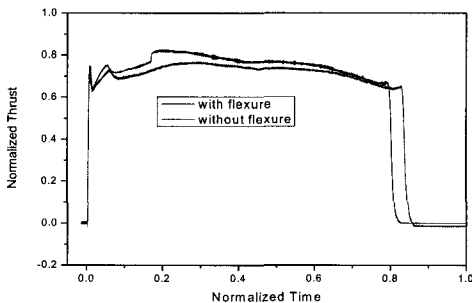


Fig. 13 The Effect of Plate Flexure

시험대의 설계는 힘 계측에 대한 정확한 정역학적 개념, 시험대의 동특성 영향, 시험물의 동특성과 변형거동 특성에 대한 정확한 개념과 이해가 요구된다. 이런 바탕에서 본 논문은 국방과학연구소에서 지금까지 획득한 많은 경험과 지식을 바탕으로 고 정확도 추력 계측 시험대의 설계에 필요한 가장 기본적이며 전문적인 지식, 개념을 기술하고, 시험대의 설계기법을 제시하였다. 또한 이 설계 기법을 적용한 시험대를 이용하여 추력 방향 조종 노즐이 장착된 추진기관의 추력 벡터 성능을 평가한 결과 아주 정확하게 평가할 수 있음을 보여주었다. 앞으로 교정장치 설계기법, 원하는 시험 데이터를 얻기 위한 신호처리 기법, 오차 평가기법 등에 대한 구체적인 방법을 제시할 예정이다.

참고 문헌

1. A. Bray, etc, Theory and Practice of Force measurement, Academic Press, 1990
2. Ormond. N. A., Stabilized Platens, US Patent 3190108, 1965
3. 박익수, 외 3명, "고체추진기관 6분력 시험대의 모델링 기법," 한국추진공학회지, 제5권 제3호, pp.79-86, 2001, 9
4. Ormond. N. A., Universal Flexure Joint, US Patent 2966049, 1959
5. Ruyan R. B, etc, "Thrust Stand Design Principle", AIAA 92-3976, 1992
6. 이규준, 소형분력시험대의 설계기법 연구, 국방과학연구소, MSDC-421-990614, 1999, 7
7. Ormond. N. A., Low Interaction Multi Load Cell System for Measuring Thrust, US Patent 3788130, 1974
8. J.A. Sprouse, etc, Design criteria for large accurate solid propellant static thrust stand, AD406842, US Naval Ordnance Test Station, 1963

5. 결 론