

## 다축 시험대의 상호 간섭 최소화 설계기법

김중근\* · 윤일선\*

### Design Technique for Minimizing the Crosstalk Effect in Multiaxis Thrust Measurement Stand

Joung Keun Kim\* · Il Sun Yoon\*

#### ABSTRACT

This paper described design method to minimize the crosstalk effect of multiaxis thrust measurement stand which can measure the thrust vector control performance of Solid Rocket Motor. This paper presents a theoretical solution for predicting the magnitude of crosstalk and calculates design sensitivity. The results indicate that the most important parameter of crosstalk is the displacement of flexure-loadcell-flexure assembly. And shape, dimension and mechanical properties of flexure and loadcell can also influence the magnitude of crosstalk.

#### 초 록

본 논문에서는 추진기관의 추력방향 성능 평가에 적용되는 다축시험대의 상호 간섭 최소화 설계 방법에 대해서 논하였다. 다축시험대의 변형 모델링으로 상호 간섭 크기를 이론적으로 예측하고 설계변수가 상호 간섭 크기에 미치는 영향을 평가하였다. 본 논문의 결과로부터 다축시험대 설치에 따른 정렬오차, 힘에 의한 시험대의 변형이 상호 간섭에 가장 큰 영향을 미치며 로드셀과 플렉서의 물성 및 기하학적 형상에도 영향을 받는 것으로 분석되었다.

**Key Words:** 추력방향제어(Thrust Vector Control), 상호 간섭(Crosstalk), 플렉서(Flexure), 로드셀(Loadcell), 다축시험대(Multiaxis Measurement Thrust Stand)

#### 1. 서 론

현대전장의 핵심 무기체계로서 유도미사일은 대상 목표물을 정밀 타격하는 수단으로서 널리

활용하고 있으며 고속 비행 요격체(Interceptor)와 같이 시시각각 변하는 운용환경에서 보다 정밀한 실시간 타격 임무를 완수하기 위해 추력 방향을 정밀 제어할 수 있는 다양한 방법이 개발되고 있다. 이에 따라 유도미사일의 추력 방향 제어능력에 대한 정확한 평가가 요구된다.

유도미사일의 추력 방향 제어 성능을 평가하

\* 2007년 5월 28일 접수 ~ 2007년 6월 17일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 기441

연락처, E-mail: korea\_kimjk@yahoo.co.kr

기 위해 6 분력( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ ) 계측이 가능한 다축시험대가 적용된다. 6 분력 가운데  $F_x, F_y, F_z$ 는 로드셀로 계측되는 힘을, 그리고  $M_x, M_y, M_z$ 는 계측된 힘과 다축시험대의 기하학적 치수에 의해 계산되는 모멘트를 의미한다. 다축시험대의 운영 개념에 따라 정확한 6분력을 산출하기 위한 분석 프로그램이 필요하며 분석 정확도는 다축시험대의 설계/제작/운용조건에 의해 결정된다.

일반적으로 다축시험대에서 상기의 6 분력은 완전히 독립적으로 계측되지 못하고 서로 상호 작용하여 계측 결과에 영향을 주게 되는데 이를 다축시험대의 상호 간섭(Crosstalk)이라고 한다 [1]. 상호 간섭 특성은 분석 프로그램 구조를 결정할 뿐만 아니라 분석 정확도에도 영향을 준다.

본 논문에서는 다축시험대에서 발생할 수 있는 상호 간섭 크기를 이론적으로 계산하고 각각의 설계 변수가 상호 간섭 크기에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 상호간섭을 최소화시킬 수 있는 설계조건을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 다축시험대

다축시험대는 유도미사일에서 발생하는 추력 벡터를 기준 좌표계 성분으로 나누어 계측함으로써 정확한 추력의 크기, 방향 그리고 작용점을 분석하는 시험 장치로, 적용되는 유도미사일의 크기나 모양에 따라 다양한 형태로 운영되고 있으나 유도미사일의 추력 벡터를 기준 좌표계의 3 성분으로 나누어 계측하고 계측된 힘과 다축시험대의 기하학적 치수를 이용하여 3 성분의 모멘트를 계산하는 것에서는 거의 동일하다.

Figure 1은 교정장치(Calibration Device)가 내장된 다축시험대를 나타낸 것이다[2]. Fig. 1에서 C로 시작되는 것은 교정용 로드셀을, R로 시작되는 것은 계측용 로드셀을 의미한다.

로드셀이 설치된 부분의 상세한 조립상태는 Fig. 2와 같으며 로드셀 전/후로 플렉서(Flexure)

가 설치된다.

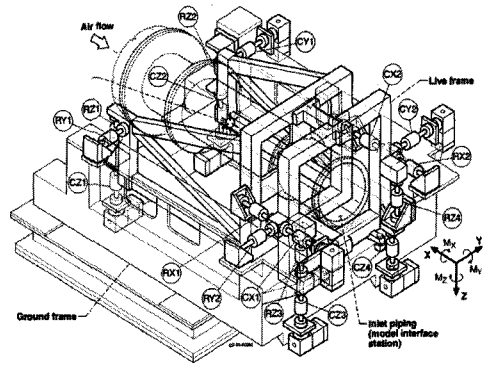


Fig. 1 Schematic of the Multiaxis thrust stand

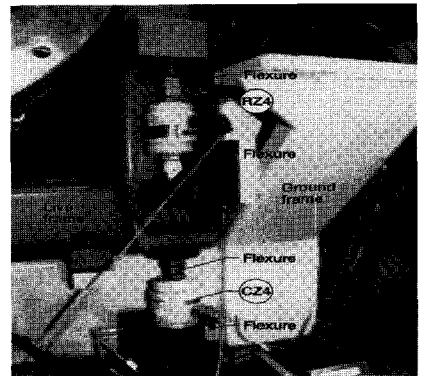


Fig. 2 Calibration/reaction load cell pair[2]

플렉서는 로드셀과 동일한 축 방향의 힘 성분을 로드셀에 전달시켜주고 축 방향에서 어긋난 힘에 의한 모멘트가 로드셀에 미치는 영향을 최소화시키기 위해 설치된다.

### 2.2 상호 간섭 영향

다축시험대에서 발생하는 상호 간섭이란 직각 방향으로 설치된 로드셀로 계측되는 힘 성분이 완벽하게 독립적으로 계측되지 못하고 서로에게 영향을 주어 순수한 축 방향 힘 성분에 영향을 주는 것을 의미한다. 따라서 정교한 다축시험대의 설계/제작능력은 상호 간섭을 원천적으로 제거할 수 있는 기술을 의미하지만 이를 완전히 제거하는 것은 불가능하기 때문에 이를 최소화

하거나 상호 간섭이 서로 선형성(Linearity)을 유지하도록 하여 분석 프로그램으로 보상하여 주는 방법이 적용된다.

프로그램으로 상호 간섭을 보상하기 위한 정보를 획득하기 위해 일반적으로 시험 전에 다축 시험대의 교정(Calibration)을 실시한다. 교정이란 교정용 로드셀의 값(입력하중)과 계측용 로드셀의 값(출력하중)을 이용하여 다축시험대의 입력-출력 관계를 규명하는 것이다. 교정용 로드셀 값은 다축시험대를 평가하는 기준이 되므로 일반적으로 매우 정밀한 로드셀을 적용한다.

다축시험대 교정결과를 나타내는 방법은 여러 가지가 제시되고 있으며[3-6] 이상적인 방법은 Eq. 1과 같다.

$$F_c = [C] F_m \quad (1)$$

여기서  $F_c$ 는 교정하중,  $F_m$ 은 계측하중 그리고  $C$ 는 6X6 교정 Matrix로 다음과 같이 정의된다.

$$F_c = [F_{x_c}, F_{y_c}, F_{z_c}, M_{x_c}, M_{y_c}, M_{z_c}]$$

$$F_m = [F_{x_m}, F_{y_m}, F_{z_m}, M_{x_m}, M_{y_m}, M_{z_m}]$$

$$C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} \\ f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} & f_{16} \end{bmatrix}$$

Equation 1은 다축시험대의 상호 간섭이 선형적이라는 조건이 성립되면 적용할 수 있는 것으로 간단하면서도 분석 정확도가 높은 다축시험대라고 판단할 수 있다. 상호 간섭이 전혀 없다면 교정 Matrix의 대각선 성분(Diagonal term)은 1이고 나머지는 모두 0가 된다.

상호 간섭이 선형적이지 못한 경우에 Eq. 1을 적용하면 분석오차가 발생할 수 있으므로 비선형 상호 간섭을 고려하기 위한 방법으로 Eq. 2를 적용하기도 한다.

$$F_c = [C_1] F_m + [C_2] F_m^* \quad (2)$$

Equation 2에서 오른쪽 첫 번째 항은 Eq. 1과 같으며 두 번째 항은 상호 간섭의 비선형 특성을 보상하기 위한 것으로  $F_m^*$ 는 상호 간섭의 비

선형 정도에 따라 2차, 3차 제곱항으로 적용된다. 일반적으로 Eq. 2의 교정계수  $[C_1], [C_2]$ 는 반복기법에 의해 결정된다.

Equation 2를 적용하여 다축시험대의 계측 결과를 분석할 수 있으나 교정계수 재현성 문제가 야기될 수 있기 때문에 다수의 교정과정을 거쳐야 할 뿐만 아니라 비선형 특성을 완전히 고려하지 못함에 의한 분석오차가 발생하게 된다.

따라서 다축시험대의 상호 간섭을 원천적으로 없애거나 선형성을 유지할 수 있도록 다축시험대를 설계하여야 분석 프로그램 구조가 간단 할 뿐만 아니라 분석 정확도를 향상시킬 수 있다.

### 23 이론적 접근

#### 2.3.1 모델링

다축시험대의 상호 간섭 크기를 이론적으로 계산하기 위해 Fig. 2의 플렉서-로드셀-플렉서 조합을 Fig. 3과 같이 간략화 하였다.

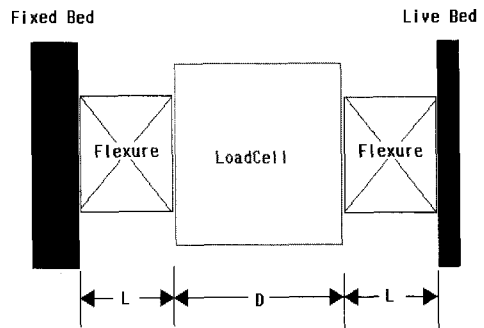


Fig. 3 Flexure-Loadcell-Flexure Mode

Figure 3에서 고정대(Fixed Bed)는 지면과 고정된 부분을, 운전대(Live Bed)는 유도미사일에서 발생하는 힘을 로드셀로 전달시켜 주는 부분을 의미한다.

다축시험대의 제작/설치 과정에서 발생할 수 있는 초기 정렬오차나 힘에 의해 Fig. 3의 운전대가  $\Delta$ 만큼 변형한 후에 압축하중 P를 받는 경우를 해석하기 위한 모델링은 Fig. 4의 (a)와 (b)로 제시하였다.

일반적으로 로드셀 강성은 플렉서 강성과 비

교하여 훨씬 크기 때문에 대부분의 변형은 플렉서 양단에서 발생하고 로드셀은 강체거동으로 가정하여도 큰 오차가 발생하지 않는다.

Figure 4(a)와 (b)에서  $\Delta = 2\delta + D\sin\theta$  가 되고  $\Delta$ 가 플렉서-로드셀-플렉서 전체 길이와 비교하여 작기 때문에  $\sin\theta \approx \theta$  가 성립되므로 Eq. 3과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \approx 2\delta + D\theta \quad (3)$$

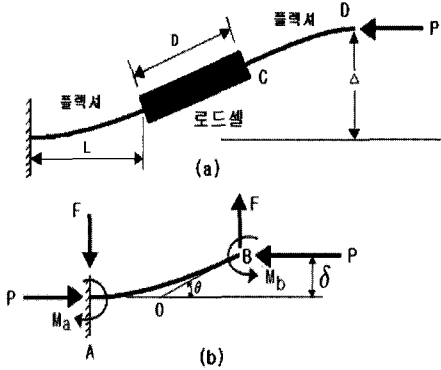


Fig. 4 Deformation Analysis Model

그리고  $\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta}{(D\cos\theta + L)}$  에서  $\theta \ll 1$  이면

$\tan\theta \approx \theta$ ,  $D\cos\theta \approx D$  가 되어  $\theta$  는 Eq. 4로 근사화 될 수 있다.

$$\theta \approx \frac{\Delta}{(D+L)} \quad (4)$$

Equation 3, 4로부터 플렉서 변형 크기를 Eq. 5로 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{L\Delta}{2(D+L)} \quad (5)$$

2.3.2 상호 간섭 예측

Figure 4(b)의 플렉서 변형에 대한 지배방정식 (Governing Equation)은 Eq. 6과 같다.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x) \quad (6)$$

Equation 6에서 E는 플렉서의 탄성계수, I는 플렉서 단면의 2차 관성모멘트, y는 플렉서의 변형을 의미한다. 그리고  $M(x)$ 는 플렉서에 작용하는 모멘트로 Eq. 6에 적용하면 변형 지배방정식

은 Eq. 7과 같고 해(Solution)는 Eq. 8로 구할 수 있다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \beta^2 y = \frac{M_a}{EI} - \frac{F}{EI} x \quad (7)$$

$$y = c_1 \sin\beta x + c_2 \cos\beta x + \frac{1}{P}(M_a - Fx) \quad (8)$$

여기서  $\beta = \sqrt{P/EI}$ 이다. Eq. 8로부터 플렉서 끝단, 즉  $x=L$ 에서의 플렉서 변형  $\delta$ 와 기울기  $\theta$ 를 계산할 수 있다.

$$\delta = C_1 \sin\beta L + C_2 \cos\beta L + \frac{1}{P}(M_a - FL) \quad (9)$$

$$\theta = C_1 \beta \cos\beta L - C_2 \beta \sin\beta L - \frac{F}{P} \quad (10)$$

여기서  $C_1, C_2$ 는 경계조건으로 구할 수 있다.

$$x=0 : y=0$$

$$x=0 : \frac{dy}{dx}=0$$

다축시험대의 상호 간섭 F,  $M_a$ 는 Eq. 9-10으로부터 주어진 플렉서의 변형  $\delta$ , 기울기  $\theta$  그리고 입력하중 P의 관계로 나타낼 수 있다.

$$M_a = \frac{FL + P\delta - \frac{F}{\beta} \sin\beta L}{(1 - \cos\beta L)} \quad (11)$$

$$F = \frac{\beta M_a \sin\beta L - P\theta}{(1 - \cos\beta L)} \quad (12)$$

만일 하중 P의 방향이 인장방향으로 작용한다면 변형방정식의 해는 Eq. 13과 같다.

$$y = C_1 \sinh\beta x + C_2 \cosh\beta x + \frac{1}{P}(M_a - Fx) \quad (13)$$

위와 동일한 과정을 걸쳐서 상호 간섭 F,  $M_a$ 를 구할 수 있다.

$$M_a = \frac{FL + P\delta - \frac{F}{\beta} \sinh\beta L}{(1 - \cosh\beta L)} \quad (14)$$

$$F = \frac{\beta M_a \sinh\beta L + P\theta}{(\cosh\beta L - 1)} \quad (15)$$

2.3.3 상호 간섭 크기

상호 간섭에 영향을 주는 성분 F,  $M_a$ 는 Eq. 11, 12와 Eq. 14, 15로부터 플렉서의 탄성계수 E, 플렉서의 관성 모멘트 I, 플렉서의 길이 L, 로

드셀의 길이  $D$  그리고 변형량  $\Delta$  에 영향을 받음을 알 수 있다. 이들의 변화가  $F$ ,  $M_a$ 에 미치는 영향을 평가하였다.

가) 탄성계수  $E$  영향

플렉서 탄성계수 변화에 따른  $F$ ,  $M_a$  변화를 Fig. 5에 나타내었으며  $F$ ,  $M_a$ 는 플렉서 탄성계수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다.

따라서 플렉서는 탄성계수가 낮은 연성재료 (Ductile material)를 사용하는 것이 유리할 수 있으나 탄성계수가 작아지면 시험대 변형이 증가하거나 또는 압축하중에 대한 좌굴(Buckling)이 발생할 수 있으므로 고려되어야 한다.

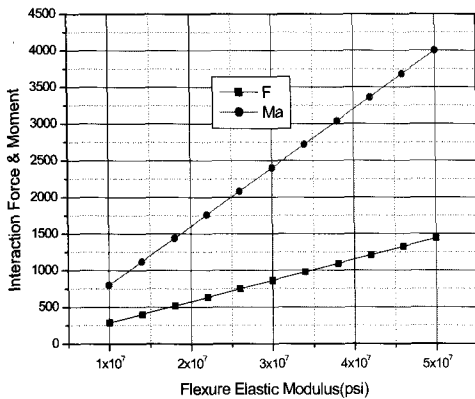


Fig. 5 Effect of Elastic Modulus

나) 관성모멘트  $I$  영향

플렉서 관성모멘트 변화에 따른  $F$ ,  $M_a$  변화를 Fig. 6에 나타내었으며 관성모멘트가 증가함에 따라  $F$ ,  $M_a$ 는 선형적으로 증가하였다.

그러므로 상호 간섭을 줄이기 위해서는 플렉서의 관성모멘트가 적은 것을 적용하는 것이 유리하지만 좌굴에 취약할 수 있으므로 고려하여야 한다.

다) 플렉서 길이  $L$  영향

플렉서 길이 변화에 따른  $F$ ,  $M_a$  변화를 Fig. 7에 나타내었으며 플렉서의 길이가 증가함에 따

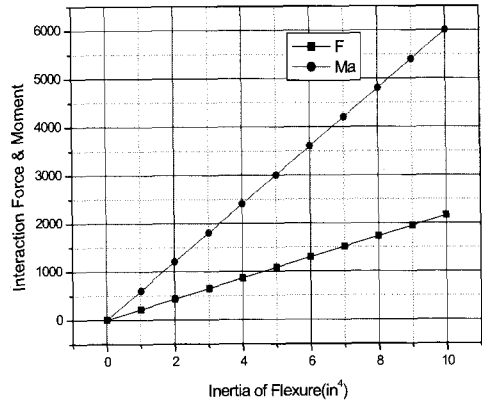


Fig. 6 Effect of Moment of Inertia

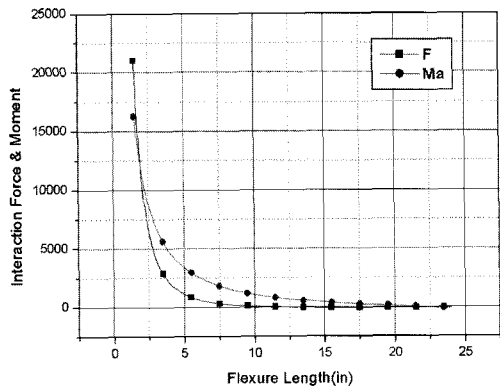


Fig. 7 Effect of Flexure Length

라서  $F$ ,  $M_a$ 는 급격히 감소하다가 일정한 값으로 수렴하였다.

따라서 상호 간섭을 줄이기 위해서 플렉서 길이를 길게 설계하는 것이 유리하지만 좌굴에 취약할 수 있으므로 고려하여야 한다.

라) 플렉서 변형량  $\Delta$  영향

플렉서 변형 변화에 따른  $F$ ,  $M_a$  변화를 Fig. 8에 나타내었으며 플렉서 변형량이 감소함에 따라서  $F$ ,  $M_a$ 는 선형적으로 감소하였다.

따라서 상호 간섭을 줄이기 위해서 플렉서의 변형량이 최소화되도록 설계하여야 한다.

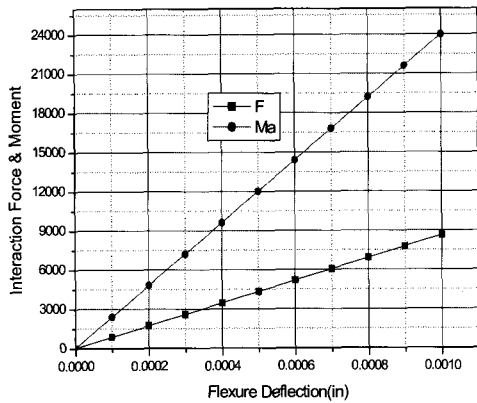


Fig. 8 Effect of Flexure Deformation

마) 로드셀 길이 D 영향

로드셀 길이 변화에 따른  $F$ ,  $M_a$  변화를 Fig. 9에 나타내었으며 로드셀 길이가 증가함에  $F$ ,  $M_a$ 는 약간 증가하였으며 다른 설계변수의 영향과 비교하여 증가폭이 크지 않았다.

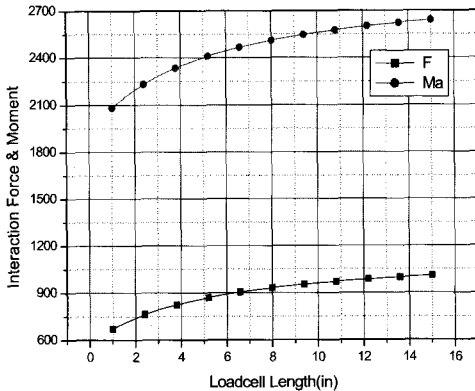


Fig. 9 Effect of Loadcell Length

24 설계 민감도(Design Sensitivity)

상호 간섭  $F$ ,  $M_a$  중에서  $M_a$ 는 로드셀 전후로 설치된 플렉서에 의해서 영향력이 대부분 제거되지만  $F$ 는 다른 축방향의 힘에 그대로 영향을 주어 상호 간섭을 일으키게 된다. Eq. 11, 12에서  $M_a$ 를 소거하면 다축시험대의 순수한 상호 간

섭  $F$ 를 Eq. 16으로 구할 수 있다.

$$F = \frac{P\theta\beta\sin\beta L - P\theta(1 - \cos\beta L)}{(1 - \cos\beta L)^2 - \beta L\sin\beta L + \sin^2\beta L} \quad (16)$$

설계 민감도란 임의의 설계변수  $a$ 의 변화가 구조물의 거동  $b$ 에 미치는 영향을 정량적으로 나타내는 값으로  $a$ 에 대한  $b$ 의 1차 미분으로 정의된다[7].

$$DS_a = \frac{\partial b}{\partial a} \quad (17)$$

Equation 16, 17를 이용하여 플렉서 탄성계수, 플렉서 관성모멘트, 플렉서 길이, 로드셀 길이 그리고 플렉서 변형량이 상호 간섭  $F$ 에 미치는 민감도를 계산하였다. 계산에 적용된 기준치는 Table 1과 같다.

Table 1. Design Reference value

설계변수	설계 기준 값
플렉서 탄성계수	3.0E07 psi
플렉서 관성모멘트	4.0 in <sup>4</sup>
플렉서 길이	5.0 in
플렉서 변형량	1.0E-02
로드셀 길이	5.0 in
압축 하중	3000 lbf

계산된 설계민감도 결과는 Table 2와 같으며, + 값은 설계변수가 증가하면 상호 간섭이 증가함을, - 값은 상호 간섭이 감소함을 의미한다.

Table 2. Design Sensitivity Result

설계변수	설계 민감도
플렉서 탄성계수	2.88E-9
플렉서 관성모멘트	216
플렉서 길이	- 536
플렉서 변형량	8.81E6
로드셀 길이	28.65

민감도 결과에서 다축시험대의 상호 간섭에 영향을 미치는 설계변수는 플렉서 변형량 > 플렉서 길이 > 플렉서 관성모멘트 > 로드셀 길이 > 플렉서 탄성계수 순서이다.

다축시험대에서 플렉서 변형 발생 원인은 크게 2가지이다. 하나는 다축시험대 설계/제작/설

치과정에서 발생하는 초기 정렬오차와 다축시험대에 작용하는 힘에 의한 변형에 의한 것이다. 초기 정렬오차는 다축시험대 설치과정에서 3차원 측정 장치를 활용하여 로드셀 전후의 플렉서 중심 위치가 정확히 일치하도록 설치함으로써 그 영향을 완화시켜 줄 수 있다. 다축시험대의 변형은 상호 간섭력 F와 벡터방향이 같은 플렉서-로드셀-플렉서 조립체의 강성(Rigidity)를 증가시키면 어느 정도 최소화시킬 수 있다. 이때에 플렉서 변형량에 대한 민감도가 탄성계수의 민감도 보다 훨씬 크기 때문에 탄성계수 증가에 따른 상호 간섭의 증가는 충분히 보상될 수 있다.

### 3. 결 론

유도미사일의 추력 벡터 성능을 평가하기 위한 다축시험대에서 나타나는 상호 간섭을 최소화 할 수 있는 방법에 대하여 논하였다.

다축시험대의 상호 간섭이 증가하면 다축시험대의 계측 정밀도는 물론 분석 프로그램의 정확도를 저하시켜 정확한 추력 벡터 성능 평가가 어렵게 된다.

본 논문에서 다축시험대의 상호 간섭을 이론적으로 예측하고 각각의 설계변수가 상호 간섭에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 다축시험대의 상호 간섭에 영향을 미치는 인자는 플렉서 탄성계수, 플렉서 관성모멘트, 플렉서 길이, 플렉서 변형량 그리고 로드셀 길이이다.
- 2) 다축시험대의 상호 간섭에 미치는 영향력은 플렉서 변형량>플렉서 길이>플렉서 관성모멘트 > 로드셀 길이 > 플렉서 탄성계수이다.
- 3) 다축시험대의 상호 간섭을 줄이는 가장 효과적인 방법은 다축시험대의 초기 정렬오차를 최소화함은 물론 플렉서 탄성계수를 증가시켜 플렉서 변형량 크기를 최소화하는 것이다.

- 4) 플렉서 탄성계수 감소, 플렉서 관성 모멘트 감소 그리고 플렉서 길이 증가도 상호 간섭 크기를 감소시킬 수 있으나 압축하중에 의한 좌굴에 영향을 미치므로 신중히 고려되어야 한다. 지속적인 연구를 통해 좌굴조건, 기하적 구속조건에 대한 상호간섭 최소화를 위한 최적설계가 이루어져야 한다.

### 참 고 문 헌

1. William G. Schweikhard and Werachone N. Singnol, "An Analysis of Cross-Coupling of a Multi Component Jet Engine Test Stand Using Finite Element Modeling Technique", University of Kansas Center for Research, Inc.,
2. Kin C. Wong, "Derivation of the Data Reduction Equations for the Calibration of the Six-Component Thrust Stand", Glenn Research Center, TM--2003-212326, 2003
3. R. L. Davis and A. F. Domal, "Technique for Successful Six Component Force Measurement of Solid-Propellant Rocket Motor", Arnold Engineering Development Center, AD463226
4. A. W. Langill, "Analysis of a Solid Rocket Motor Force Acquisition System," 19th annual ISA conference proceedings-Vol.19, 1964
5. Li. Zhaomin, Liu Jing, Li Baojing, "A Data Acquisition and Processing System for Six Component Solid Rocket Motor Testing," Binggong Xuebao, Vol 23, pp.73~75, 1987
6. 박익수, 이규준, 윤일선, 김중근, "고체 추진기관 6분력 시험대의 모델링 기법," 한국추진공학회지, 제5권 제 3호, 2001, pp.26-33
7. Edward J. Haug, Kyung K. Choi, Vadim Komkov, "Design Sensitivity Analysis of Structural Systems" Academic Press, 1984