

MDO기법에 의한 새로운 구조해석 및 설계기법 고찰: 플랩 구동장치의 구조설계에의 적용

권영주*, 방혜철**

A Study on the New Method for Structural Analysis and Design by MDO(Multidisciplinary Design Optimization) Methodology: Application to Structural Design of Flap Drive System

Kwon, Y.-J.* and Bang, H.-C.**

ABSTRACT

MDO (Multidisciplinary Design Optimization) methodology is an emerging new technology to solve a complicate structural analysis and design problem with a large number of design variables and constraints. In this paper MDO methodology is adopted through the use of computer aided systems such as Geometric Solid Modeller, Mesh Generator, CAD system and CAE system. And this paper introduces MDO methodology as a new method for structural analysis and design through the application to the structural design of flap drive system. In a MDO methodology application to the structural design of flap drive system, kinetodynamic analysis is done using a simple aerodynamic analysis model for the air flow over the flap surface instead of difficult aerodynamic analysis. Simultaneously the structural static analysis is done to obtain the optimum structural condition. And the structural buckling analysis for push pull rod is also done to confirm the optimum structural condition (optimum cross section shape of push pull rod).

Key words : Flap Drive System, MDO(Multidisciplinary Design Optimization) Methodology, Structural Mechanics, Aerodynamics, Kinetodynamics, Optimum Static Structure, Statics, Buckling

1. 서 론

공학적 설계방법론과 컴퓨터시스템 및 전산해석기술을 접목시키면서 개발 발전되어 기계, 항공 및 토목공학 분야 등에서 구조물의 경량설계를 위해 적용되어 왔던 최적화설계 기법들은 설계에 필요한 목적함수, 설계변수 및 구속함수 등을 정의하는 최적설계의 수식화 표현을 하나의 단위로 묶어 해석용 소프트웨어와 연결하여 최적화를 수행하였다¹⁻³⁾. 그러나 고성능, 다기능, 고부가가치 등의 기술적 특성을 요구하는 제품을 개발 하기 위해서는 제품설계와 관련된 여러 분야의 공학적 원리들(구조해석, 동역학해석, 제어, 열·유체유동해석, 전자기장해석 등)을 동

시에 고려⁴⁾하며 각 분야간 상충된 설계조건들을 통합적으로 다룰 수 있는 통합적 다분야 해석 및 설계기술이 필요하다.

이러한 현안을 해결할 수 있는 최적설계 신기술이 바로 MDO(Multidisciplinary Design Optimization)기법이다^{5,6)}. 이 기법은 여러 분야의 공학적 설계원리들을 동시에 고려하여 균형 있고 유기적인 방법으로 최적설계결과를 구하는 설계자동화 기술이다. 하나의 단위로 묶어서 수행하는 고전적 최적설계기법 하에서는 대부분의 설계 변수들이 다수의 공학적 현상에 연관되어 있으므로 최종적으로 얻어진 최적설계의 의미를 판정하기가 어려울 뿐 아니라, 변수가 많은 현실적이고 복잡한 시스템의 설계 문제에서는 모든 변수가 최적 설계 값에 도달하기 전에 수렴하는 경우가 발생한다.

이러한 설계 최적화상의 문제를 해결하기 위해 많

*정회원, 홍익대학교 기계정보공학과

**홍익대학교 기계설계학과

은 설계 변수와 구속 함수를 수반하고 여러 가지 공학적 현상이 발생하는 대규모의 기계 구조 및 시스템 설계를 위해 최근에 MDO 설계 기법이 효율적으로 사용되고 있다^{7,13}.

본 연구에서는 MDO기법의 기본개념을 소개하고, 항공기 플랩 구동장치 최적설계에 있어서 많은 설계 변수와 구속 조건을 갖는 설계상의 문제에 MDO기법을 적용함으로써 여러 가지 공학적 현상의 해석(공기역학해석, 기구동역학해석, 정역학해석) 및 이들 설계상의 상호 연관 관계를 동시에 고려하여 균형 있고 유기적인 방법으로 최적설계를 수행하는 새로운 구조해석/설계 기법을 고찰하고자 한다. 기계구조물의 설계 최적화 분야에서의 최적 설계법을 개발하고 적용하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. MDO기법에 의한 구조해석

2.1 MDO기법의 기본개념

현실적이고 복잡한 시스템에 적용되는 최적 설계 응용 분야에서는 한 가지의 현상만을 수반하는 문제 뿐 아니라 여러 가지 공학적 현상을 고려하는 복합적 문제에서 각 분야간 상호 연관 관계의 설계조건을 통합적으로 다룰 수 있는 최적화 설계 신기술인 MDO (Multidisciplinary Design Optimization) 기법^{5a}의 중요성이 점차 요구되고 있다.

MDO 설계 기술의 기본개념은 다량의 설계 변수와 구속 조건을 갖는 한 단위의 설계 문제를 여러 개의 하부 시스템으로 분리하고 각 하부 시스템의 상호 연관 관계를 이용하여 국부적 설계 값을 서로 비교, 검토하여 시스템 목적에 최선으로 도달하는 설계 해를 찾는 방법이다.

대규모의 설계 최적화 문제는 여러 개의 하부시스템으로 구성할 수 있으며, 이들은 상호 연관성을 갖는다.

전체 시스템에서의 통합된 설계 해를 동시에 탐색하기 위해 각 하부 시스템간의 설계 변수의 상호 연관 관계를 이용한다. 각 하부시스템에 존재하는 서로 다른 구속 조건을 만족시키기 위해서는 한 하부시스템에서의 설계 해의 변화에 따른 다른 하부시스템에서의 구속함수의 만족도 등을 나타내는 상호 영향계수로부터 하부시스템간의 구속조건 연관성을 고려하며 한 하부 시스템에서의 최적화 과정을 수행해나가면서 설계 변수에 대한 통합화 과정을 거쳐 최종적으로 균형된 설계 해를 결정한다.

이와 같은 MDO의 기본개념을 근거로 1980년대

후반에 CSSO(Concurrent Subspace Optimization)라 불리는 수학적 이론적인 기법 및 알고리즘이 개발되어왔다^{14,15}. CSSO를 구성하는 중요한 최적화 요소 기술은 GSE(Global Sensitivity Equation), SSO(Subspace Optimization), COP(Coordination of Problem)로 불리는 수학적 이론적 알고리즘들이다. 그러나 본 논문에서는 이들에 대한 상세한 이론적 소개는 생략한다. 왜냐하면 본 논문은 이와 같은 수학적 이론 알고리즘을 활용하지 않고 대신에 컴퓨터 응용 시스템들을 활용하는 새로운 MDO방법론을 제시하고자 하기 때문이다.

일반적으로 현대의 기계 시스템은 매우 다기능 고도화되고 있으며 이에 따라 구조형상도 매우 복잡화되고 있어 이와 같은 복잡한 구조형상을 해석하고 설계하는 것은 단순한 문제가 아니다. 이와 같은 복잡한 문제는 수학적 이론적 접근을 매우 어렵게하고 있다. 이 문제를 해결할 수 있는 유일한 방법은 컴퓨터를 활용하는 것이다.

따라서 본 논문에서 추구하는 MDO기법은 이와 같은 컴퓨터를 활용하는 기술의 발달을 배경으로 추구하는 새로운 기법이다.

현대의 MDO기법에 의한 해석 및 설계에서 컴퓨터 응용 시스템인 Mesh Generator, Solid Modeller, CAD 시스템, CAE 시스템 등의 이용은 필수적으로 요구되고 있는 것도^{16,17} 이와 같은 이유로 사료된다.

이러한 전산시스템들의 성능향상은 현대의 기계구조 해석 및 설계에서 이와 같은 MDO기법의 적용을 더욱 요구하고 있다.

2.2 MDO기법을 적용한 플랩 구동장치의 구조해석 및 최적설계

플랩(Flap)이란 항공기의 주 날개의 뒤쪽 동체 쪽에 붙어 있는 보조날개로서 날개의 모양을 변형시킴으로써 양력과 항력을 증가시켜주는 장치이다. 플랩을 사용함으로써 저속 이착륙이 가능하며 에어 브레이크 작용을 해서 이착륙거리를 단축시킬 수 있는 역할을 하기도 한다. 이러한 항공기 조종면 중 특히 2차 조종역할을 하는 플랩은 기계식, 유압식, 전기제어식 등 여러 형태의 Mechanism으로 변형되어 운동을 구동한다.

기계식 조종장치란 조종석의 조종력이 Push Pull Rod나 케이블, 벨 크랭크 등을 이용하여 조종면에 직접 전달되는 것을 말하며, 플랩 조종은 전후방 조종간을 좌우로 움직일 때 이의 운동량이 주 날개에 있는 봉 및 벨 크랭크를 통하여 주 날개에 달려있는

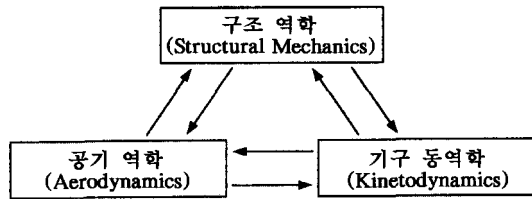


Fig. 1. Analysis types and their inter organic relations for Flap Drive System.

플랩 조종면을 상하로 움직이게 된다.

조종간과 플랩을 연결해 주는 Push Pull Rod는 일반적으로 기계 작동시 동력을 전달하는 기계 장치 내에서 큰 하중을 받아 작동하는 기계요소로서 Push Pull Rod의 설계에 있어서 많은 설계변수(Design Variable)와 구속조건이 수반되고 여러 가지 공학적 현상의 복잡성과 수행해야 될 해석 수의 많음이 예상된다.

이와 같은 점을 고려할 때 Push Pull Rod에 대한 수학적 이론적 해석은 거의 가능하지 않다. 플랩을 구동하는 Push Pull Rod의 설계상에 요구되는 해석으로는 플랩면에 작용하여 흐르는 공기에 대한 공기역학(Aerodynamics)해석, 플랩의 운동에 대한 기구학(Kinematics)해석, 자중 및 유체력에 의한 동역학(Dynamics)해석, 또 이와 같은 하중에 의한 구조변형에 대한 정역학(Statics)해석 및 좌굴(Buckling)해석이 있다.

이와 같은 해석들은 Push Pull Rod의 최적설계에 있어서 Fig. 1과 같이 공학적 현상의 해석 및 설계상의 각 하부 시스템간의 설계 변수와 구속 조건 사이의 유기적인 작용으로 상호영향을 미친다.

Fig. 2는 MDO기법을 이용한 플랩 구동장치의 구조해석 및 최적설계 과정을 나타내고 있다.

본 연구에서는 항공기의 조종계통에서 널리 사용되고 있는 플랩 구동장치의 최적화 설계에 앞 절에서 언급한 MDO기법을 적용하여 다량의 설계 변수와 구속 조건을 갖는 한 단위의 설계 문제를 여러 개의 하부 시스템으로 분리하고, 각 하부 시스템의 상호 연관 관계를 이용하여 독립적으로 설계를 수행하고 최종적으로 통합된 최적설계를 수행하는 새로운 방법을 고찰하고자 한다.

3. 플랩 구동장치의 기구동역학 해석 및 최적구조물

기계장치의 기구동역학 해석은 정확한 운동을 유

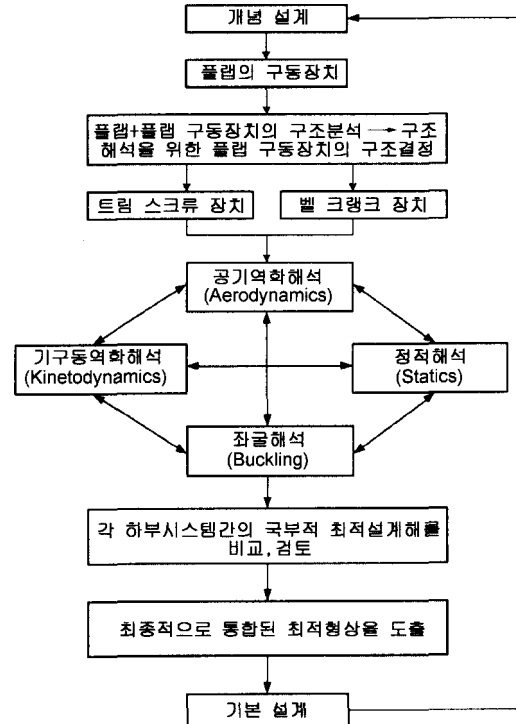


Fig. 2. Structural analysis and optimum design process for Flap Drive System using MDO methodology.

지하는데 소요되는 각부의 힘을 분석하는 연구분야로서 장치를 구성하는 각 링크(Link)나 조인트(Joint)들의 정확한 위치, 속도, 및 가속도를 규명하고 외력 및 관성력에 의한 동적 힘의 상태를 결정하는 것이다.

기구동역학 해석에 관한 대부분의 지식들은 그 성격상 도해적인 경향을 갖는 기법으로 오랜 시간동안 수작업으로 해석해 오다가, 최근 컴퓨터의 고속발전 에 의해 보다 보편적이고 정밀도가 높은 기구동역학 해석용 프로그램을 사용하게 되었다.

본 연구에서는 기구동역학 해석 프로그램인 ADAMS 를 이용하여 강체요소 링크로 구성된 플랩 구동장치 들의 운동학적 특성(위치, 속도, 가속도)과 동역학적 특성(반력, 토크)을 서로 비교해서 보다 최적인 형태의 기구를 결정하고 정역학(Statics)해석 및 좌굴(Buckling)해석을 수행하는데 있어서의 설계변수와 구속 조건의 상호 연관관계를 제시하고자 한다.

3.1 플랩 구동장치의 기구동역학 해석

플랩 구동장치는 기하학적 형상과 조인트의 변위 조건으로 말미암아 경우에 따라서는 플랩의 제한 변위가 정확한 위치에 도달하는 것은 불가능 할 수도

있다.

따라서 기준 좌표계에 대하여 플랩의 위치 및 방향이 주어지는 경우 각 조인트의 변위 상태를 구하는 역 기구학적 해석법을 응용하여 플랩 구동이 목표치에 가장 가까이 도달할 수 있는 형상을 구하는 과정이 된다.

항공기 플랩을 구동시키는 기구는 여러 가지 기하학적인 형태로 변형되어 플랩의 운동을 유지할 수 있으며, 본 연구에서는 두 형태의 기구인 트림 스크류(Trim Screw)장치와 벨 크랭크(Bell Crank)장치에 대하여 해석을 수행하였다. 플랩 구동장치 기구에 대한 입력은 플랩면에 작용하는 유체력(F)과 함께 벨 크랭크 장치에서는 벨 크랭크의 회전운동(θ), 트림 스크류 장치에서는 트림 스크류의 회전운동에 대한 Push Pull Rod Link의 이송운동(d)이며, 출력은 플랩의 회전운동(θ)이다.

다음 Fig. 3은 플랩 구동장치의 기구선도이다. 그림의 기구선도에 표시된 것과 같이 플랩 구동장치의 기구학 모델은 벨 크랭크 장치에서는 5개의 Link, 트림 스크류 장치에서는 6개의 Link(빗금친 ground 포함)이며, 5개의 Joint로 구성되어 있다. 따라서 플랩의 회전운동에 대한 1개의 허용 자유도(Mobility: θ)를 가진다.

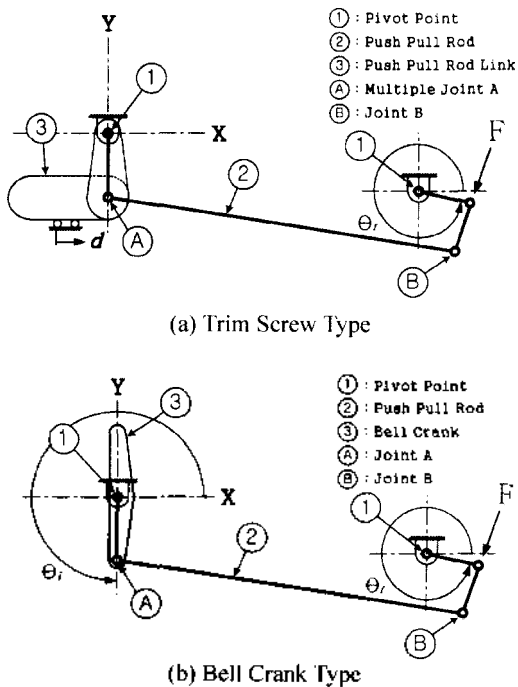


Fig. 3. Kinematic diagram of Flap Drive System.

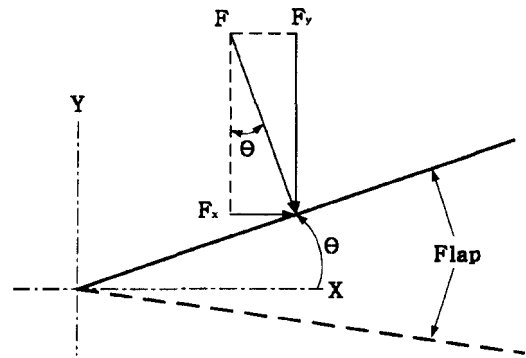


Fig. 4. Aerodynamic pressure load applied on the Flap surface.

플랩구동 장치의 동역학적 특성을 고려하기 위해서는 플랩면에 작용하는 유체력을 알아야 한다. 이를 위해서는 플랩면을 지나는 유체의 흐름에 대하여 공기역학(Aerodynamics)해석을 수행하거나 실험적 방법에 의하여 정확한 값을 구해야 한다.

그러나 일반적으로 이론적 공기역학 해석이나 실험적 방법은 매우 난해하며, 또한 본 연구에서는 유체의 유동장 보다는 이 유동장에 의해 가해지는 유체력에 관심이 있기 때문에 해석상의 복잡성을 피하고 플랩 구동장치 기구에 대한 최적형상 설계라는 측면에서 힘의 특성만을 고려하였다(Fig. 4).

압력 P가 일정하다는 가정하에 플랩면에 작용하는 유체력(F)은 플랩이 구동하는 시간(t)에 대하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_x = P \cdot A \cdot \sin\theta(t) \tag{1}$$

$$F_y = P \cdot A \cdot \cos\theta(t) \tag{2}$$

$$F = F_i + F_j \tag{3}$$

이와 같은 설계변수와 구속조건을 가지고 기구학적 운동과 동역학적 해석을 수행할 수 있는 전산해석코드인 ADAMS 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 ADAMS 프로그램으로 모델링한 플랩 구동장치 기구의 고체모델(Solid model)이다. 플랩의 구동은 플랩의 회전축(Z축)에 대하여 +방향으로 18°, -방향으로 23°사이에서 이루어지며 이사이에서의 위치와 방향이 결정될 때 역 기구학 해석법을 이용하여 기구의 기하학적 제원, 즉 지지점(Pivot point)의 좌표값, 링크의 길이, 벨 크랭크의 회전각도(θ), Push Pull Rod Link의 이송운동(d)등 조인트의 변위상태를 구할 수 있으므로 기구학 및 동역학적 해석이 가능하다.

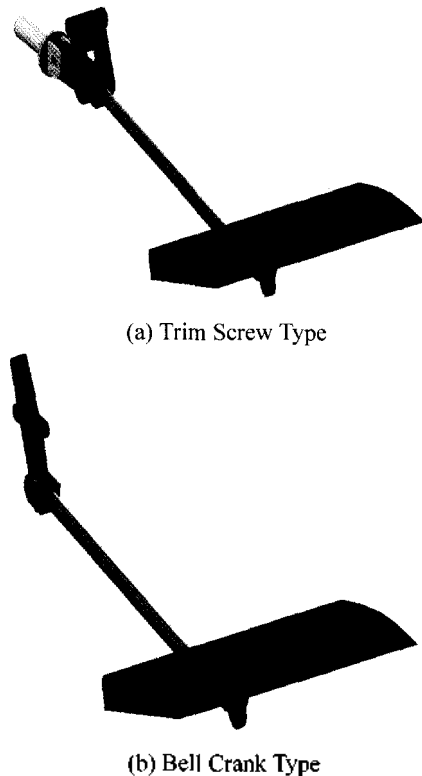


Fig. 5. Solid model of flap Drive System.

3.2 해석결과분석 및 최적구조물

앞 절에서는 MDO기법에 의하여 기구 동역학적인 하부시스템으로 분리하여 해석을 수행하였다. 플랩 구동장치의 기구에 대한 운동학적 특성과 동역학적 특성을 파악하기 위해서는 각 조인트들의 변위, 속도, 가속도, 반력을 알아야 한다.

해석결과 두 가지 형태의 기구에서 각 조인트의 운동학적 특성은 수치적으로는 다소 차이는 있지만 거의 같은 경향을 보임을 알 수 있다. 다음 Fig. 6은 플랩면에 작용하는 압력이 500Pa 일 때 각 조인트들의 변위, 속도, 가속도를 나타내고 있다.

조인트의 위치 변화에 따른 반력은 플랩 구동이 + 방향으로 거동이 될 때 반력의 증가함을 볼 수 있으며, Push Pull Rod 양끝 조인트에 발생하는 반력이 Bell Crank Type 보다 Trim Screw Type의 기구가 보다 적은 반력이 생김을 알 수 있다(Fig. 7참조).

따라서 Trim Screw Type 기구가 보다 더 큰 하중(좀더 큰 항공기)에 적합함을 알 수 있다. 즉 Trim Screw Type 기구가 좀 더 최적기구 형상임을 알 수 있다. 플랩면에 걸리는 압력의 크기가 500Pa인 경우

반력의 크기가 최대 일 때의 플랩 위치(θ)는 Bell Crank Type 기구일 경우 16.71856°이다. 이 위치는 압력의 크기가 증가함에 따라서 Table 1과 같이 변한다(16°~17°). Push Pull Rod의 양 끝단인 Joint A, B에 최대 반력이 발생하는 이 위치는 저하중인 경우 비교대상 두 기구 모두 동일 위치에서 발생하지만 하중이 증가하면 Trim Screw Type 기구인 경우 Joint A에 최대 반력이 약간 먼저 발생함을 알 수 있다. 따라서 플랩 구동장치가 작동할 때 유체력 등의 외력에 의해 플랩구동장치에서 구조변형의 발생이 예상되는데 그 최대 변형크기는 Table 1에 표시된 θ 위치에서 발생하는 것이 예상된다. 즉 이 위치에서 Push Pull Rod의 최대 구조변형과 좌굴(Buckling)현상 등이 일어날 것으로 예상된다. 다시 말하면 이 위치에서의 플랩구동장치 구조형상이 정적 구조해석을 수행하기에 가장 최적의 구조 형상임을 알 수 있다.

따라서 다음절에서는 본 절에서 구한 설계변수와 구속조건에 대하여 이 위치 구조형태에 대한 정적해석을 수행하여 구조변형을 구하여 구조물의 취약 부분 및 Push Pull Rod의 최적 단면형상을 찾아내고자 한다.

4. 플랩 구동장치의 구조변형에 대한 정역학(Statics)해석

앞 절에서는 기구 동역학해석을 통하여 두 기구의 각 조인트들의 위치변화에 따른 운동학적 특성과 동역학적 특성을 구할 수 있었다.

본 절에서는 MDO기법에 의한 두 번째 하부시스템 해석단계로서 기구동역학 해석단계에서의 상호연관성을 고려하여 플랩 구동장치의 구조적 변형을 구하는 정역학 해석을 수행하였다. 정역학 해석을 수행함에 있어서 플랩 구동의 모든 위치에 대해서 구조변형 해석을 한다는 것은 무의미 하며, 설계목적에 맞는 최소한의 동작 상태, 즉 기구 동역학 해석을 통해 구할 수 있었던 구조적으로 큰 변형이 예상되었던 Push Pull Rod 양끝 Joint A, B에 반력이 가장 크게 걸리는 지점에서의 해석이 필요하다.

이와 같은 해석의 타당성은 최적설계를 위해서는 변형 크기의 정확도도 중요하지만 변형의 경향(응력 집중 현상등에 대한 정보)이 더욱 요구되기 때문이다.

본 연구에서는 구조 변형해석에 있어서 자중에 의한 구조적인 변형을 갖게 하기 위해서 같은 단면적을 갖는 중공원형, 중공 직사각형, 중공 정사각형단

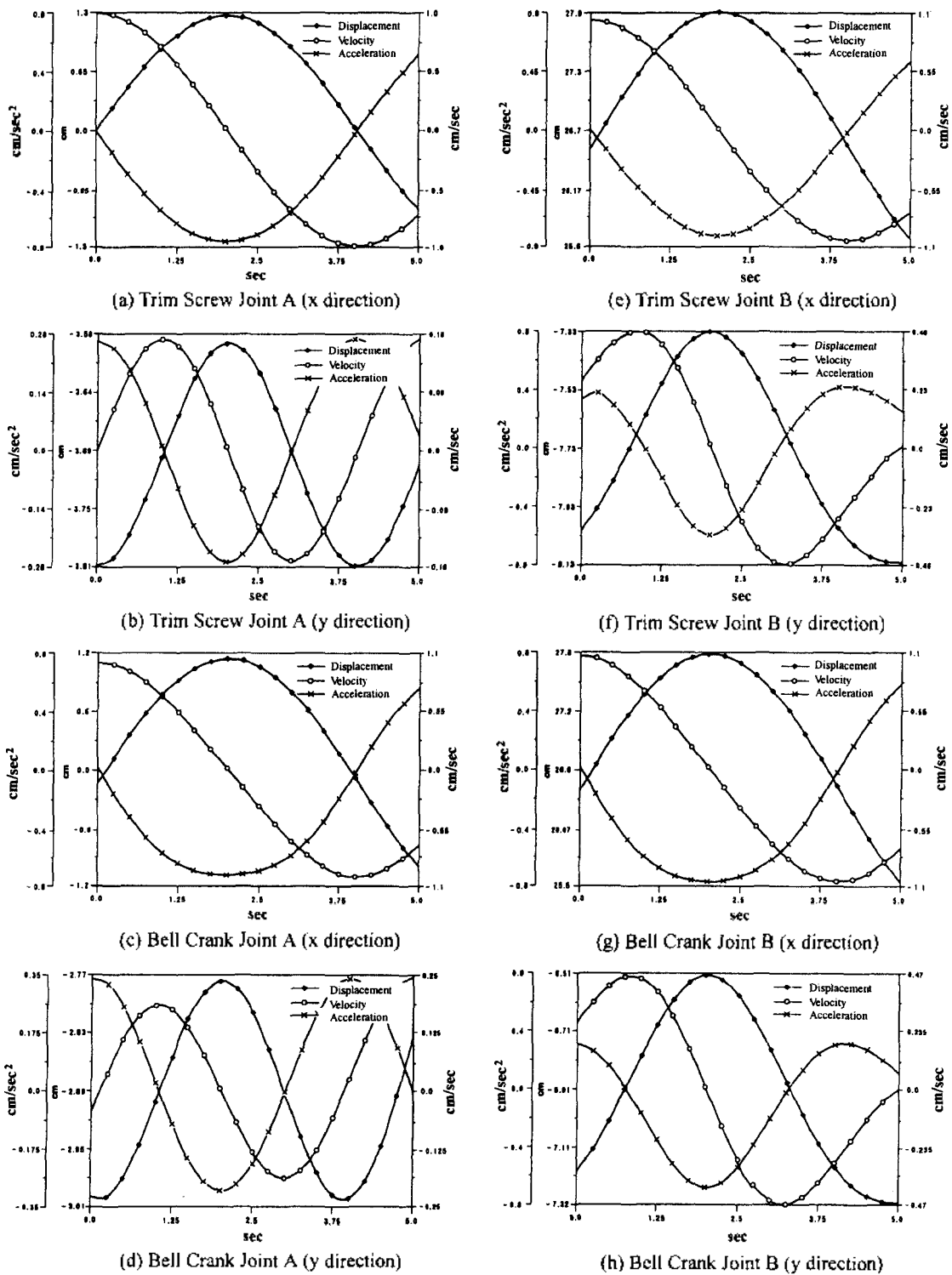
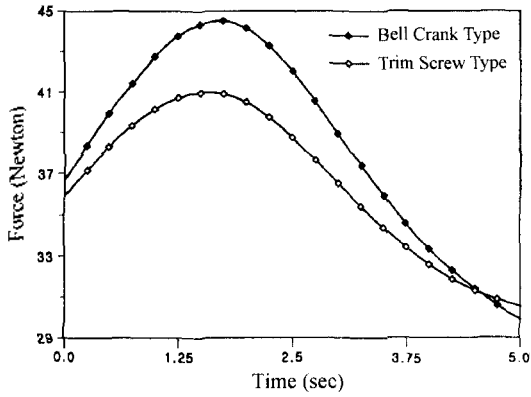
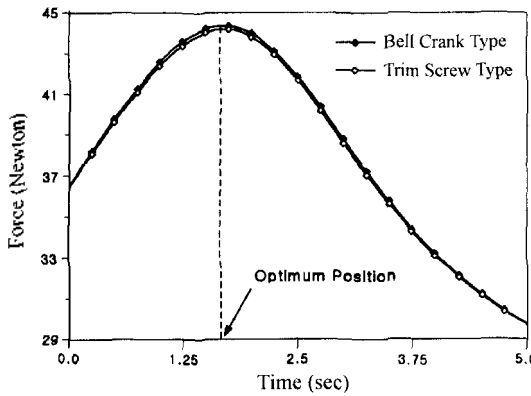


Fig. 6. Comparison of displacement, velocity, acceleration at the joint A, B.



(a) Reaction force (Joint A)



(b) Reaction force (Joint B)

Fig. 7. Reaction force at the joing A, B.

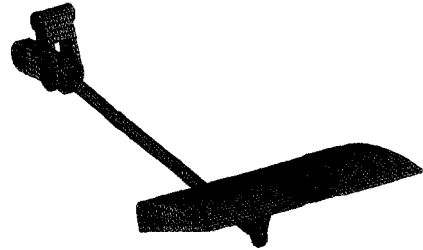
면 형상에 대하여 구조변형 해석을 수행한 후 그 변형크기를 비교하여 최적단면형상을 결정한다. 본 논문에서는 유한요소법에 의한 플랩 구동장치의 구조

변형 문제의 해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 NISA를 이용하여 해석을 수행하였다.

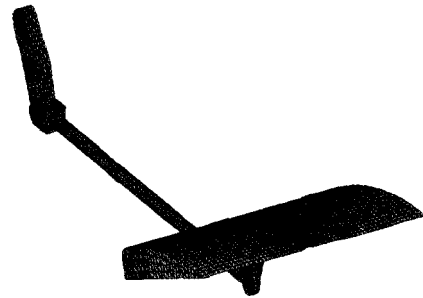
4.1 해석모델 및 경계조건

플랩 구동장치의 정적 해석을 위한 유한요소 모델은 Fig. 8과 같이 20개의 절점(Node)를 가지는 육면체(Hexahedral) 요소로 이루어졌고, 모델링과 해석은 NISA 프로그램을 이용하였다.

정적 해석은 주로 플랩면에 작용하는 입력에 의한



(a) Trim Screw Type



(b) Bell Crank Type

Fig. 8. FE. model of flap drive system.

Table 1. Pressure - Optimum flap location and maximum reaction force history

Pressure(Pa)		Time(sec)		Optimum Position θ_f (°)		Maximum Reaction force(N)	
		Joint A	Joint B	Joint A	Joint B	Joint A	Joint B
100	Trim screw	1.96	1.98	16.96797	16.98570	36.28833	38.28833
	Bell crank	1.98	1.98	16.98311	16.98311	38.81033	38.86720
200	Trim screw	1.92	1.95	16.91162	16.94327	38.75577	41.38644
	Bell crank	1.95	1.95	16.95346	16.95346	41.46962	41.52649
300	Trim screw	1.87	1.91	16.80231	16.89321	41.23795	44.05412
	Bell crank	1.91	1.91	16.89092	16.89092	44.14127	44.19816
400	Trim screw	1.83	1.87	16.68400	16.80231	43.13493	46.73280
	Bell crank	1.87	1.87	16.80220	16.80220	46.82432	46.88124
500	Trim screw	1.78	1.84	16.49794	16.71613	46.24616	49.42206
	Bell crank	1.84	1.84	16.71856	16.71856	49.51817	49.57511

Table 2. F.E. model data for flap drive system

Parameters	Trim Screw Type			Bell Crank Type			Units	
	Data			Data				
	Circle	Rectangular	Square	Circle	Rectangular	Square		
No of Nodes	16676	17694	16470	15714	16732	15508	None	
No of Elements	12192	13182	11994	11504	12494	11306	None	
Material Properties	E	7.1705E10			7.1705E10			N/m ²
	v	0.33			0.33			None
	p	2740			2740			Kg/m ²



Fig. 9. Pressure applied on the flap surface.

하중조건에 대한 플랩 구동장치의 변형 및 응력해석 이므로 Trim Screw는 직접적인 연관이 없으므로 제외하였다. 해석에 사용된 유한요소모델의 크기와 물성치는 다음 Table 2와 같다. 플랩 구동장치의 구조 변형 해석을 수행하기 위해서는 적절한 경계조건 및 구속조건이 필요하다.

해석상에 있어서 구속조건은 Bell Crank의 회전축과 Push Pull Rod의 연결부위에 대해서 모든자유도를 구속을 하였으며, 다단계 하중(100Pa, 200Pa, 300Pa, 400Pa, 500Pa)을 플랩면에 적용하여 해석을 수행하였다.

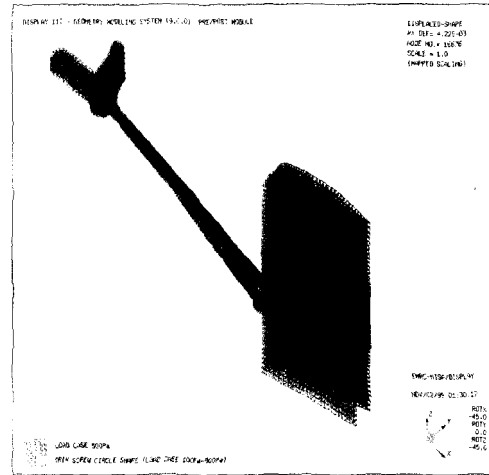
4.2 해석결과분석 및 최적단면형상

본 절에서는 플랩면에 작용하는 압력에 의하여 구동장치에 대한 구조적인 변형 해석을 수행하였다. 해석결과로 얻어진 플랩 구동장치에 대한 구조변형 형상과 응력 분포 상태를 Fig. 10, 11에 나타내었다.

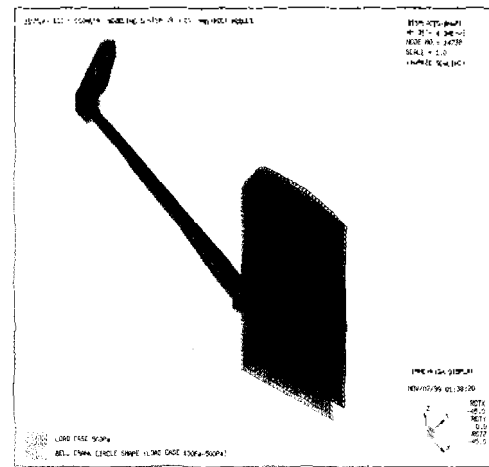
구조변형된 형상을 보았을 때 Push Pull Rod의 끝단에서 큰 변위가 발생하며, 작용하는 힘에 대하여 좌굴(Buckling)현상이 예상되기도 한다.

각 단면형상에 대한 응력분포의 크기와 Push Pull Rod 끝단의 변위의 크기를 Fig. 12, 13에 비교하여 나타내었다.

그럼에 나타난 바와 같이 해석대상 단면형상들의 최대응력의 크기를 비교했을 때 500Pa이내에서는 재료의 항복응력인 51.45 MPa 보다 작은 값을 가지며



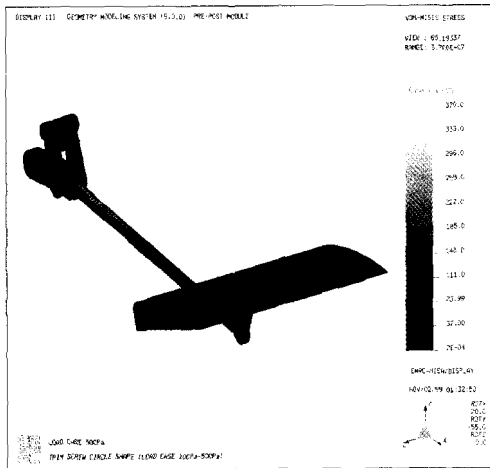
(a) Trim Screw Type



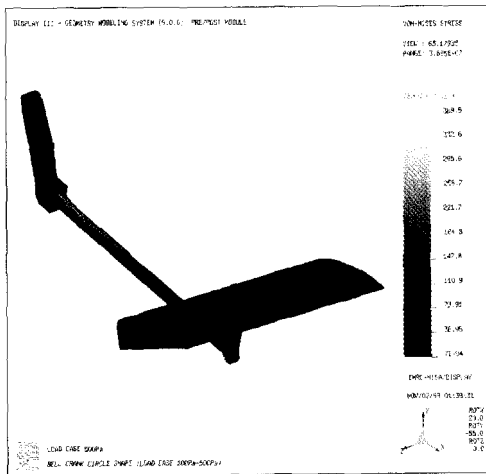
(b) Bell Crank Type

Fig. 10. Deformed shape of Flap Drive System(circle section shape - load case 500Pa).

로 해석대상 단면형상들은 안전하다고 볼 수 있으며, 중공직사각형 단면의 플랩 구동장치의 구조에서 다



(a) Trim Screw Type



(b) Bell Crank Type

Fig. 11. Stress distribution of Flap Drive System(circle section shape - load case 500Pa).

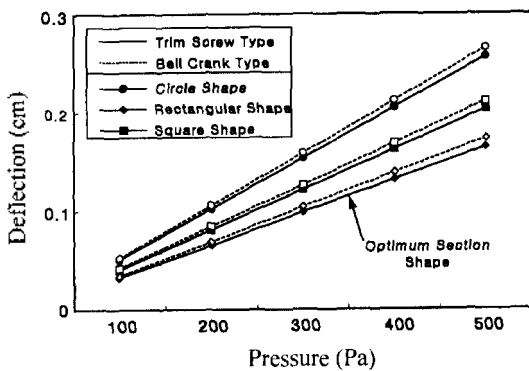


Fig. 12. Comparison of load - deflection history.

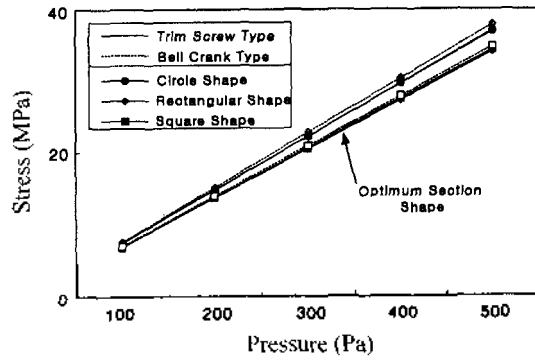


Fig. 13. Comparison of load - stress history.

큰 비교대상 단면 보다 작은 변위 및 응력이 발생함을 알 수 있다. 따라서 비교대상 단면형상 중 가장 견고한 플랩 구동장치의 Push Pull Rod의 단면형상은 중공직사각형단면형상의 구조물임을 알 수 있다. 즉 이 중공직사각형 단면 형상이 비교대상중 최적단면형상이다.

5. Push Pull Rod의 좌굴해석

구조물의 하중 지탱요소로는 보(Beam)와 기둥(Column)이 널리 사용되고 있으며, 기둥은 구조 특성상 작용하중에 의하여 계(System)가 불안정하게 되는 임계조건이 존재한다. 따라서 기둥은 구조물 자체의 하중과 함께 외부에서 가해지는 하중을 안전하게 지탱할 수 있도록 하기 위해서 안정성을 고려하여야 한다. 가늘고 긴 부재가 점점 증가하는 압축력을 받을 경우, 부재는 직접적인 압축력에 의하여 파괴되기 보다는 축하중이 점점 증가함에 따라 축 방향으로 굽어지거나, 횡방향 처짐 역시 크게 증가하면서 어느 순간 갑자기 붕괴된다. 이러한 현상을 좌굴(Buckling)되었다고 한다.

본 연구에서는 기구동역학 해석과 정역학 해석을 통하여 동특성 및 구조변형에 대한 설계 변수 및 결과사이의 서로 유기적인 관계를 파악하여 플랩 구동장치 구조물의 하중 지탱요소로 사용되는 Push Pull Rod의 좌굴 거동을 고찰하며, 각 단면형상(원형, 직사각형, 정사각형)에 대한 Buckling mode shape 및 임계하중(Critical load)을 서로 비교해서 가장 안전한 형상을 제시하고자 한다. 유한요소법에 의한 Push Pull Rod의 좌굴 문제의 해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 NISA를 이용하여 해석하였다. NISA의 좌굴(Buckling)해석 기술에는 선형좌굴하중

을 구하는 Eigenvalue 좌굴해석과 비선형을 고려한 Non-linear 좌굴해석이 있으며, 본 연구에서는 Linear 좌굴해석을 통하여 좌굴하중(Buckling load)과 좌굴거동(Buckling mode shape)을 구하였다.

5.1 Push Pull Rod의 좌굴 및 해석 모델링

플랩의 거동에 따라 Push Pull Rod의 양끝 단에 반력의 변함을 기구동역학 해석을 통하여 알 수 있었으며, 반력이 최대인 위치에서의 플랩면에 작용하는 압력에 의하여 Push Pull Rod의 구조적인 변형과 좌굴을 예측할 수 있었다.

본 절에서는 좌굴(Buckling)해석을 함에 있어서 설계변수 및 구속조건을 앞 절에서 수행하였던 해석 결과 사이의 연관성을 고려하여 해석을 수행하였다. 좌굴하중은 기둥의 단면형상과 기둥의 길이에 대해 정의되는 세장비, 재료의 탄성계수(E), 경계조건에 의하여 산출되며, 이에 대한 이론적 해석은 Euler에 의하여 제시되었으며, 좌굴에 대한 기본형인 자유단으로 형성된 기둥에 대한 이론적인 선형 좌굴 하중 식은 식 (4)와 같다.

$$P_B = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{4 \cdot L^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

여기서, P_B 은 좌굴하중(Buckling load), L 은 기둥의 유효길이, I 는 단면모멘트이며, 좌굴하중 중 가장 작은 값인 임계하중은(Critical load)은 기둥이 부담할 수 있는 기준 하중으로 클수록 강하다는 것을 알 수 있다. 좌굴하중의 개선은 세장비를 감소시키거나 고탄성계수 E 를 가지는 재료를 사용함으로써 상승될 수 있다. 해석대상인 Push Pull Rod의 해석 모델은 다음 Fig. 14와 같다. 모델의 한쪽 끝에서 모든 자유도를 구속시켜 고정단을 형성하였다. Push Pull Rod는 밀도(ρ)=2740 N/m³, Young's modulus (E)=7.1705E10N/m², Poisson's ratio(ν)=0.33의 물성치를 가지는 알루미늄으로 이루어져 있다.

5.2 해석결과분석 및 최적단면형상

본 장에서는 플랩 구동장치의 하중 지탱요소로서 사용되는 Push Pull Rod의 안정성을 고려한 설계를 위해서 좌굴(Buckling)해석을 수행하였다. 해석결과 Buckling mode shape은 Fig. 15에 나타내었으며, 3rd mode에서 Push Pull Rod의 중앙부위가 볼록하게 들출된 형상으로 발생하였다.

최소위험하중 즉, 좌굴은 1st mode에서 일어나므로 각 단면형상에 대한 임계하중(Critical load)을 비

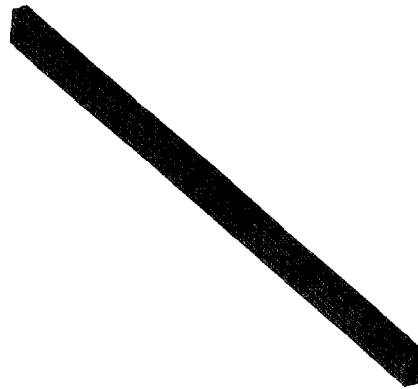


Fig. 14. F.E. analysis model of Push Pull Rod(rectangular shape).

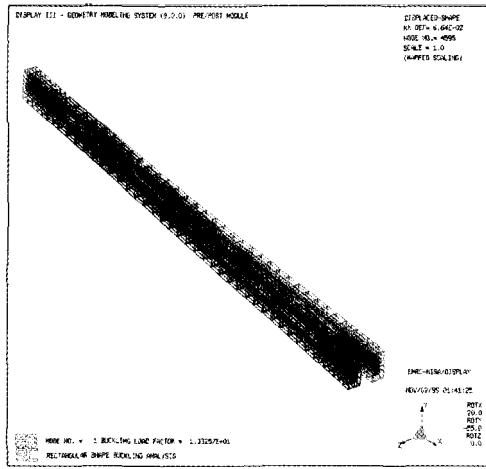
교해보면(Table 3참조) 본 논문에서 적용하였던 작용하중(Table 1참조)에 대해서는 모든 형상에 대해서 좌굴이 발생하지 않는 안정된 요소로 볼 수 있다.

따라서 작용하중($P=500Pa$ 이내의 압력)에 대하여 비교단면 형상중 최소의 변형 및 응력(Fig. 12, Fig. 13참조)이 발생하는 중공직사각형 단면의 Push Pull Rod가 비교대상중 최적 단면 형상임을 알 수 있다.

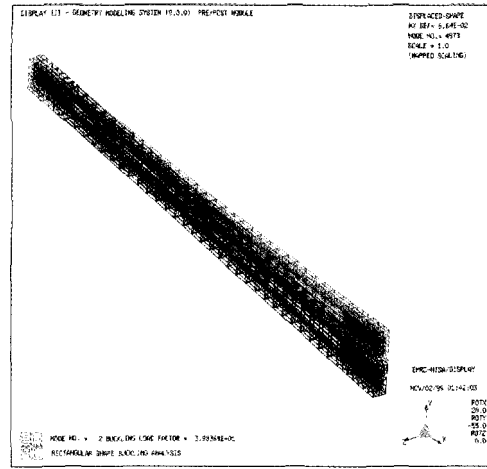
6. 결 론

본 연구에서는 항공기의 플랩 구동장치와 같이 최적 설계에 있어서 많은 설계 변수와 구속 조건을 갖는 설계상의 문제를 해결할 수 있는 MDO(Multidisciplinary Design Optimization)기법에 의한 새로운 구조해석 및 설계 기법을 고찰하였으며 또 이 기법을 플랩 구동장치에 적용하여 공기역학(Aerodynamics), 기구동역학(Kinetodynamics), 정역학(Statics)등 여러 가지 공학적 현상의 해석 및 설계상의 상호 연관관계를 동시에 고려하여 균형 있고 유기적인 방법으로 최적설계를 수행하였다.

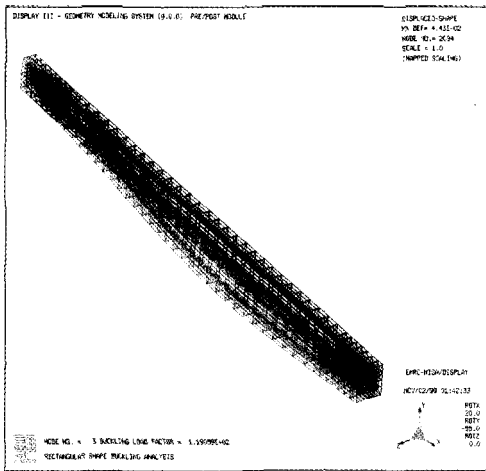
기구동역학 해석을 통해 본 논문에서 제시된 벨 크랭크 장치 및 트림 스크류 장치에 대해 플랩 운동에 대한 각 조인트 및 링크들의 정확한 위치, 속도 및 가속도를 규명하였으며, 외력 및 관성력에 의한 동적 힘의 상태를 결정하였다. 그 결과 해석모델에 대한 반력의 크기를 서로 비교해서 보다 안정적인 기구장치를 얻을 수 있었으며, 압력의 증가에 따른 조인트들의 반력의 크기가 최대 일 때 플랩의 위치 변화를 알 수 있었다. 따라서 이 위치에서의 구조형태의 최대변형 즉, Push Pull Rod의 구조변형과 좌굴(Buckling)현상이 예상되며 이 위치에서의 플랩 구



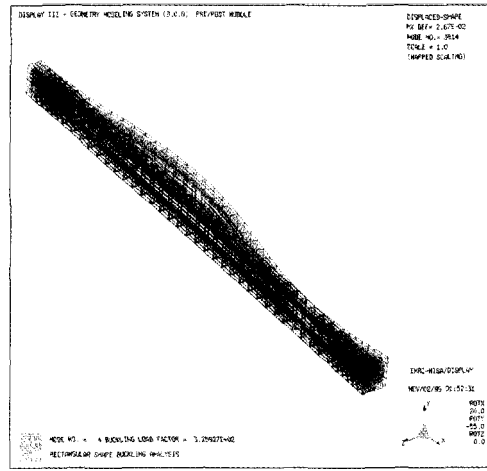
(a) Mode Shape for 1st mode
(Buckling Load Factor = 1.33257E+01)



(b) Mode Shape for 2nd mode
(Buckling Load Factor = 3.98368E+01)



(c) Mode Shape for 3rd mode



(d) Mode Shape for 4th mode

Fig. 15. Buckling mode shape of Push Pull Rod (rectangular section shape).

Table 3. Computed buckling load of push pull rod. E. model data for Flap Drive System unit: Newton

Buckling Mode	Section Shape	Circle		Rectangular		Square	
		Numerical	Theoretical	Numerical	Theoretical	Numerical	Theoretical
Buckling Load	1st	1130.3281	1106.9447	588.9714	580.7400	1345.7499	1309.3244
	2nd	1130.3281	1106.9447	1760.7132	1739.4152	1345.1629	1309.3244
	3rd	10045.3136	9962.5023	5262.1887	5226.7466	11916.9425	11783.9203
	4nd	10045.3136	9962.5023	14405.3736	15654.7367	11916.4923	11783.9203

동장치에 대한 정역학 해석(정적해석, 좌굴해석)을 수행하면 된다는 결론을 얻을 수 있었다.

정역학 해석결과 구조변형된 형상을 보았을 때 Push Pull Rod의 끝 단에서 큰 변위가 발생하며,

500Pa이내에서는 재료의 항복응력보다 작은 값을 가지므로 안전함을 알 수 있다. 단면형상을 여러 가지로 변화시킨 해석(정적해석, 좌굴해석)결과 중공직사각형 단면형상이 구조적으로 견고한 안정적인 형상

이며, 비교대상 중에서 보다 큰 하중을 지탱할 수 있는 최적 단면형상임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 홍익대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Prager, W. and Taylor, J. E., "Problems in Optimal Structural Design", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, No. 1, pp. 102-106, 1968.
- Vanderplaats, G. N., "Structural Optimization-Past, Present and Future", *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 7, pp. 992-1000, 1982.
- Rozvany, G. I. N., Zou, M. and Birker, T., "Generalized Shape Optimization Without Homogenization", *Structural Optimization*, Vol. 4, pp. 250-252, 1994.
- Yun, C. B., Kim, J. W., Kim, H. S., Seo, J. M., Kim, J. M., Choun, Y. S., "Fluid-Structure Interaction Analysis of Liquid Storage Structures", 한국전산구조공학회 논문집, 제5권, 제2호, pp. 103-111, 1992.
- Sobieszczanski-Sobieski, J., "Multidisciplinary Design Optimization: An Emerging New Engineering Discipline", *Advances in Structural Optimization*, edited by J. Herskovitz, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 483-496, 1995.
- Alexandrov, N. and Hussaini, Y., (eds), *Multidisciplinary Design Optimization: State of the Art*, SIAM Publications, Philadelphia, PA, 1997.
- Sobieszczanski-Sobieski, J. and Hafta, R., "Multidisciplinary Aerospace Design Optimization: Survey of Recent Developments", *AIAA Papers* 96-0711, Jan. 1996.
- Stubbe, J., "PAYCOS: A Multidisciplinary Design Optimization Tool for Hypersonic Vehicle Design", *Proceedings of the AIAA/USAF/NASA/OAI 4th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization(Cleveland OH)*, AIAA, Washington DC, pp. 263-271, 1992.
- Tappeta, R., Nagaendra, S. and Renaud, J. E., "A Multidisciplinary Design Optimization Approach for High Temperature Aircraft Engine Components", *Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, 39th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference(Long Beach, CA)*, AIAA, Reston, VA, pp. 1055-1065, 1998.
- Giesing, J. P., Agrawal, S. and Bharadvaj, B. K., "The Role of Computational Fluid Dynamics in Multidisciplinary Design Optimization of Transport Aircraft", *Proceedings of the 6th International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Technology and Operations Congress (Lake Tahoe, CA)*, 1995.
- Charmis, C. C., "Coupled Multidisciplinary Optimization of Engine Structural Performance", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, pp. 190-199, Jan-Feb, 1999.
- Rowell, L. F., Braun, R. D., Olds, J. R. and Unal, R., "Multidisciplinary Conceptual Design Optimization of Space Transportation Systems", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, pp. 218-226, Jan-Feb, 1999.
- Jamson, A., "Re-Engineering the Design Process Through Computation", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, pp. 36-50, Jan-Feb, 1999.
- Bloebaum, C.L., *Formal and Heuristic Decomposition Methods in Multidisciplinary Synthesis*, Ph. D. Dissertation in Aerospace Engineering, the University of Florida, Gainesville, FL, 1991.
- Jongsoo Lee, *Genetic Algorithms in Multidisciplinary Design of Flow Vibrations Rotors*, Ph. D. Dissertation in Mechanical Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y., 1996.
- Samareh, J. A., "Use of CAD in MDO", *AIAA paper* 96-3991, Sept. 1996.
- Samareh, J.A., "Status and Future of Geometric Modeling and Grid Generation for Design and Optimization", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, pp. 97-104, Jan-Feb, 1999.

권 영 주



1979년 서울대학교 공과대학 기계공학과 학사
 1981년 서울대학교 대학원 기계공학과 석사
 1987년 미국 미시간대학교(The University of Michigan, Ann Arbor) 대학원 공학박사
 1987년-1988년 미국 ADAPCO 엔지니어
 1988년-1990년 미국 EMRC(기계공학연구소) 수석연구원
 1990년-1996년 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원
 1996년-현재 홍익대학교 기계정보공학과 부교수
 관심분야: 비선형고체역학이론(Theory of Nonlinear Solid Mechanics)
 -좌굴 및 열구조해석(Buckling and Thermal Structure Analysis)
 -유한요소법개발(Finite Element Method Development)
 -MDO에 의한 통합구조해석기술개발

방 해 철



1998년 홍익대학교 기계설계학과 학사
 1998년-현재 홍익대학교 대학원 기계설계학과 석사과정
 관심분야: CAE에 의한 구조해석 및 설계
 -MDO에 의한 통합구조해석기술 개발