

技術論文

헬리콥터 시뮬레이터용 6자유도 전기식 운동구현장치의 개발

한동주*, 김국재*, 김옥구*, 전향식**, 남기욱**

Development of the 6-DOF Electrical Motion Platform System for Helicopter Simulator

Dong-Ju Han*, Kuk-Jae Kim*, Ok-Gu, Kim*, Hyang-Sik Jun** and Ki-Wook Nam**

ABSTRACT

In this paper, the 6-dof electric motion platform system designed for the helicopter simulator satisfying the class of the CASA(Civil Aviation Safety Authority) level 2 is presented. From the kinematic, dynamic and structural analyses for motion base and electrical actuator systems, we show the feasibility of the developed motion platform system by producing the acceptable results of the test and evaluation according to the requirements specified in the CASA level 2. Furthermore through this development we suggest newly the adaptability of the electrical actuator system up to 10 ton class motion platform system, whose usage will be broaden rapidly, substituting with the advantage over the conventional hydraulic system.

초 록

민간항공안전국 등급 2를 만족하는 헬리콥터 시뮬레이터에 사용되는 6자유도 운동구현장치 개발에 관해 기술하였다. 운동판과 제어 구동장치의 기구학적 및 구조적 해석을 통해 설계 제작된 운동구현장치의 시험 평가로부터 규정에 만족하는 결과를 보였고 이로부터 실제 헬리콥터 시뮬레이터로의 적용 타당성을 확보하였다. 또한 동품의 개발 결과로 인해 그간 유압 구동체계를 사용한 운동구현장치의 단점을 전기식 구동장치 적용을 통해 새롭게 개선함과 동시에 국내 최초로 10 톤급의 적재하중 능력을 보유한 6자유도 운동구현장치를 보급하게 되는 계기를 마련하였다.

Key Words : Electrical Motion Platform System(전기식 운동구현장치), Helicopter Simulator (헬리콥터 시뮬레이터)

1. 서 론

항공기용 시뮬레이터 운동구현장치(그림 1)는 실 항공기의 공간상 운동을 지상의 제한된 운동 영역에서 훈련자에게 동적인 느낌을 갖도록 운동

감을 인가시키기 위한 장치로써 미연방항공국 (FAA, Federation Aviation Administration)의 관련 규정(AC120-40B, AC120-63, FAR PART60)과 건설교통부 항공안전본부(CASA)의 관련규정(항공안전본부고시 제2004-49호, CASA Order2004-49, '모의비행훈련장치 지정기준 및 검사요령')에 그 사용을 의무화하고 있다[1,2,3]. 운동구현장치는 실제 항공기의 무한한 3차원 운동을 제한된 운동범위로 훈련자에게 최대한 유사한 느낌을 인가할 수 있도록 기구부의 형상 및 운용로직을 설계하

† 2006년 9월 18일 접수 ~ 2006년 11월 13일 심사완료

* 정회원, 썬에어로시스 기술연구소

연락처, E-mail : djhan@sunaerosys.com

충남 연기군 남면 송원리 248-1

** 정회원, 한국항공우주연구원 항공사업단

표 1. 운동성능 요구사항(CASA 2종)

	변위	속도	가속도
Surge	±34 in	±28 in/s	±0.6g
Sway	±45 in	±28 in/s	±0.6g
Heave	±34 in	±24 in/s	±0.8g
Roll	±25°	±20°/s	±100°/s ²
Pitch	±25°	±20°/s	±100°/s ²
Yaw	±25°	±20°/s	±100°/s ²

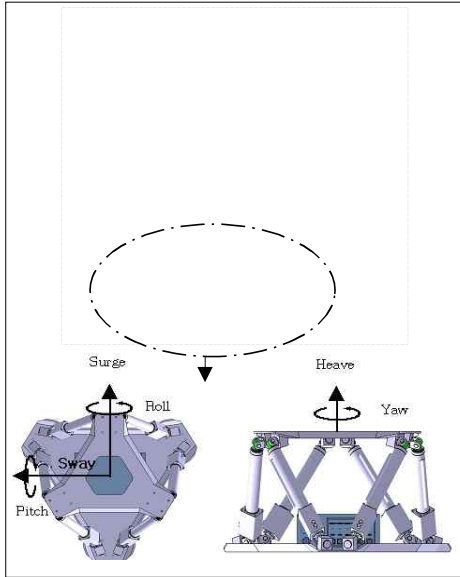


그림 1. 6자유도 운동구현장치의 형상

여야 한다. 기본적인 비행상황을 최대한 모사하는 것 외에도 활주로에서의 충격, 공기 흐름효과 및 랜딩기어의 진동, 후퇴하는(retreating) 블레이드 실속 및 엔진동력에 따른 진동, 착륙시의 느낌, 로터진동 등 특수효과나 비상상황 모사가 가능하도록 설계되어야 한다.

이러한 연구의 결과는 항공안전본부에서 규정한 모의비행장치 2종 헬리콥터 시뮬레이터의 운동구현장치에 적용할 계획으로 표 1과 같은 주요 운동사항을 만족하도록 한다[1,2,3,4]. 여기서, 6자유도 운동좌표와 기구부 형상은 그림 1과 같다.

이는 소위 스텐더트 플랫폼으로 명명되는 6개의 닫힌형태(Closed Type)의 절점으로 연결되는 6개의 자유도를 갖고 일반적인 로봇팔(Robot Arm)과는 정반대의 구동 개념으로서 상대적으로 변위는 작으나 큰 힘을 내는 것이 특징이다. 6개 각 절점의 운동을 발생시키기 위해 6개의 전기식

액츄에이터가 상호식 육면체 형식(Synergistic Hexapod)로 연결되어 있으며 이에 사용되는 전기식 액츄에이터는 소음 및 진동을 최소화하기 위하여 축과 일자 형태(Shaft In-Plane)로서 모터의 직결 구동 방식(Direct Coupling Drive)으로 설계 제작 한다. 여기서는 이러한 각 절점의 변위를 목표점(End Effect)의 기구학적인 운동으로 변환하기 위해 역기구학(Inverse Kinematics)을 이용한다. 단, 목표점이 힘이나 토크 등 역학적인 요소를 필요로 할 경우는 순기구학(Forward Kinematics)이 요구된다[5,6,7].

본 논문에서는 헬리콥터 시뮬레이터의 요구 운동 조건에 부합하는 6자유도 운동구현장치의 개발을 위한 설계/제작 및 이의 시험 평가를 통한 타당성을 검토하고 안정적인 운용 및 내구성을 확보하기 위한 신뢰성 시험결과 등 전반적인 연구개발 내용에 대해 서술하기로 한다.

II. 시스템의 설계 및 제작

2.1 기구부의 설계

항공안전본부의 관련규정 ‘모의비행훈련장치 지정기준 및 검사요령’에 제시된 2종의 성능 중 우선적으로 변위성능을 만족시키도록, 그림 2와 같이 자체적으로 개발된 사용자 대화형(GUI) 프로그램을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 기구학적인 형상을 그림 3과 같이 선정하였다. 이는 3/6축의 형상 선택에 대해서 역/순기구학으로부터 절점(목표점)의 변위입력에 대한 목표점(절점)의 변위를 도식적으로 표현하여 간섭여부를 점검할 수 있고, 모터의 요구출력 및 운용속도에 대한 볼스크류의 리드, 각 구동축의 작용하중 및 속도/가속도, 운용조건에 대한 동작상황의 애니메이션 등을 도시함으로써 설계 및 설계 결과의 시뮬레이션을 가능하게 하는 운동구현장치

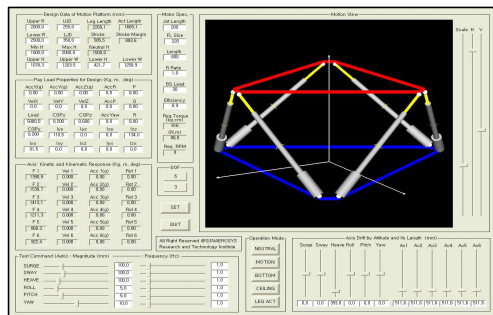


그림 2. 설계 및 설계형상 확인 프로그램 GUI

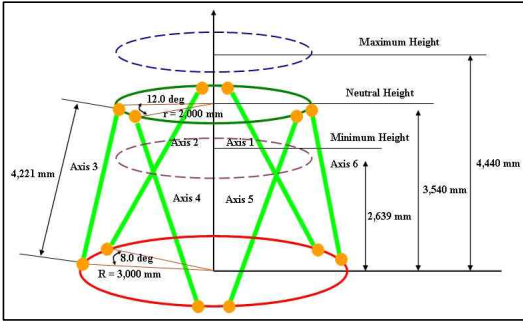


그림 3. 기구학적 형상 및 크기

표 2. 형상 데이터

스트로크(Stroke)	1,500 mm
최소 길이	3,500 mm
최소 높이	2,639 mm
운동기준 높이	3,540 mm
최대 높이	4,440 mm
상판 반경	2,000 mm
하판 반경	3,000 mm
상부 조인트 각도	12 deg
하부 조인트 각도	8 deg

표 3. 운동변위

병진운동	변 위(inch)	회전운동	변 위(°)
Surge	-50.7~55.1	Roll	-27.8~27.8
Sway	-48.0~48.0	Pitch	-26.2~27.2
Heave	-35.4~35.4	Yaw	-37.4~37.4

표 4. 운동속도(@2000 rpm)

병진운동	속도(in/s)	회전운동	속도(°/s)
Surge	±49.5	Roll	±24.3
Sway	±47.0	Pitch	±22.8
Heave	±31.2	Yaw	±33.8

표 5. 운동 가속도

병진운동	가속도(g)	회전운동	가속도(°/s ²)
Surge	>0.6	Roll	>150
Sway	>0.6	Pitch	>150
Heave	>0.8	Yaw	>150

의 설계/검증을 위한 종합적이고 효과적인 기능을 포함하고 있다.

상기의 형상을 갖는 운동구현 장치는 다음 표 3 과 같은 운동변위를 갖는다.

전기식 운동구현장치의 속도성능은 모터의 회전 속도, 볼스크류의 리드, 기구부의 형상에 의해서 결정된다. CASA 2종의 모의비행장치 허용기준을 검토한 결과 표 4에 보인바와 같이 병진운동 속도는 충분한 여유를 갖고 만족되며 회전운동 속도의 경우 Yaw 운동도 충분한 여유가 있으며 Roll 및 Pitch 운동은 비교적 다소의 여유가 있는 상태로 모두 요구성능을 만족함을 확인하였다.

전기식 운동구현장치의 가속도 성능은 모터의 토크 및 가감속성능, 볼스크류 리드, 부하조건(무게, 중심편위에 대한 모멘트, 관성모멘트 등)에 의해 결정된다[8]. 운동구현장치의 힘 평형식과 모멘트 평형식으로부터 각 액츄에이터에 작용하는 힘을 계산하였고, 목표성능에 해당하는 가속도를 도출한 후 적재하중 입력을 통하여 최대 힘을 구하였으며 이는 모터 선정에 있어 모터의 최대 발생 축력을 넘지 않도록 기준자료로 활용한다. 이 결과 설계된 운동구현장치는 가속도 성능은 다음 표 5 와 같다.

표 3, 표 4, 표 5 로 부터, 설계된 운동구현장치의 운동성능이 CASA 2종 또는 FAA 관련규정이 정한 헬리콥터 시뮬레이터용 운동구현장치 요구성능(표 1 참조)을 만족시킴을 알 수 있다.

2.2 구조해석

운동구현장치의 설계된 액츄에이터의 구조해석을 위해 이에 작용하는 하중조건은 운동성능 관계식으로부터 구한다. 이로부터 운동구현장치에 적용된 부하조건은 다음 표 6과 같다.

표 6. 표준 부하조건

정하중 (Weight, kgf)	관성모멘트 (M.O.I, kg · m ²)			무게중심 (C.G., mm)		
	I _{XX}	I _{YY}	I _{ZZ}	x	y	z
10,000	30,000	30,000	30,000	0	0	1,500

구조해석에 있어서 각 구성 유닛들과 액츄에이터가 조립된 모션 시스템을 대상으로 구조적인 안정성을 평가하는 것이 가장 이상적인 방법이나 시간과 모델링 측면에서 비효율적인 방식으로 간주되어 국부적인 모델링 방식을 채택하여 구조적 강성을 평가하였으며, 설계 데이터를 기반으로 모델링한 모션시스템의 설계사양이 적용된 핵심 구성 유닛인 힌지부와 주요 운동부인 액츄에이터를 대상으로 하여 해석적인 방법을 통해 정적 변형 모드와 응력 집중 현상 등을 평가하고 고찰하여 설계안에 대한 검증을 수행하였다. 이 경우 전체 정

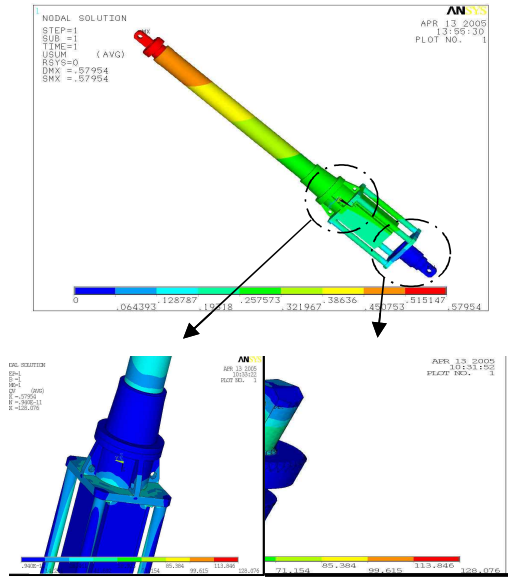


그림 4. 액츄에이터 응력분포 및 변형 형상

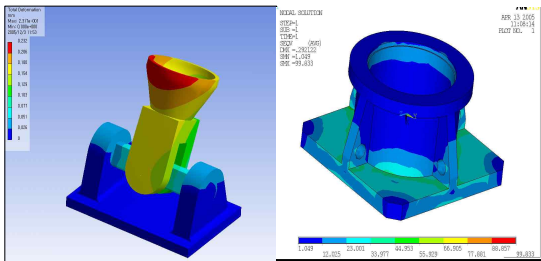


그림 5. 힌지부 응력분포 및 변형 형상

적 운용하중(10 ton)에 대해서 축당 약 2ton 정도로 설계하중은 동적하중을 감안하고 강도 안전여유를 포함해서 약 3.5배 정도로 감안하여 7 ton을 기준하였다. 이러한 압축력을 기준으로 하여 그림 4와 같이 1축 액츄에이터에 대한 구조해석을 수행하였다.

액츄에이터 끝단의 하단 힌지(under joint hinge) 고정부에 연직방향으로 발생하는 반발력 때문에 액츄에이터의 주요 구성 부품인 하단 힌지, 힌지판(hinge plate), 지지대(supporter), 몸체연결부(housing coupling), 하단 잇부 베어링(under housing bearing), 상단 힌지(upper joint hinge) 등에서 비교적 높은 응력이 발생하였다. 그러나 액츄에이터의 주요 구성 재료인 일반 구조용 압연강재(SS400)의 항복 강도(235 MPa)와 기계 구조용 탄소강재(SM45C)의 항복 강도(340 MPa) 범위 내에 응력(약10 ~ 100 MPa)과 최대 응력(126 MPa)이 분포하고, 최대 전단응력 (5~50 MPa)은 비교적 낮

은 분포량을 보였다. 그리고 이에 따른 변위량(약 0.2~0.5mm)은 재료의 선형 탄성 영역내의 거동이라 판단되어 모션이 끝단에 다다를 때 따른 압축력 하에서 액츄에이터의 구조적 강도는 안정적이라 판단된다.

그림 5와 같이 힌지부 구조해석 결과에 의하면 모션의 운동에 의해 받는 압축력하에서는 액츄에이터의 끝단 joint hinge와 연결되어 있는 hinge shaft에 응력이 집중 분포하는 것과 그로 인해 나타나는 변형 형상을 확인 할 수 있었다. 그러나 힌지부 주요 구성 재료인 기계 구조용 탄소강재(SM45C)의 항복 강도(340 MPa) 범위 내에 최대 응력(약 95 MPa)이 분포하고, 강성측면에서 나타나는 변위량(0.103mm)의 경우 재료의 항복점 이내 탄성영역내의 거동으로 힌지부의 구조적 강도 또한 상당히 안정적인 결과를 보이고 있다.

2.3 구동 제어시스템

운동구현장치의 구동제어를 위한 시스템의 구성은 다음 그림 6과 같다.

빠른 응답과 넓은 속도제어의 범위를 가진 고회력의 AC 서보 모터는 출력 정도에 따라 상(2,3)의 형태가 달라지는데 고회력이 요구될 경우 일반적으로 3상을 사용한다. 정지·시동·역전 등의 동작에 따른 방열효과를 개선하고, 역전 등의 급격한 운동에 대비하여 회생 에너지 방출회로를 구성하였다. 실린더 길이 변화를 감지하여 상판 프레임의 운동을 제어하기 위해 고정밀의 엔코더를 부착시켰다. 미약한 제어신호를 증폭하고 이를 모터의 교류 상제어로 만들어 주거나 모터의 안정성을 배가하기 위한 서보 모터 드라이버를 장착하였으며 리미트센서와 전기적 브레이크를 구성하여 이상 작동시 안전을 확보하도록 설계하였다.

서보모터의 운용방식에는 속도(변위)모드와 토크모드로 대별되는데, 전압제어 방식인 속도(변위)모

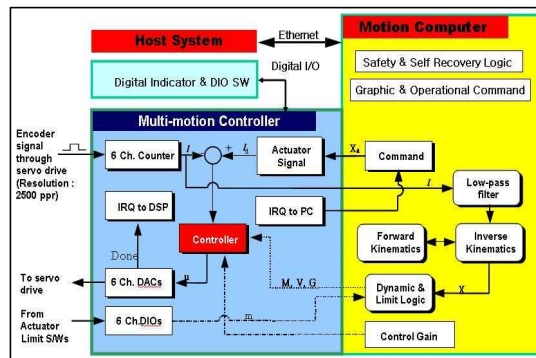


그림 6. 제어시스템 구성

드의 경우는 정격토크를 유지하면서 요구속도(변우)를 추종하도록 하고, 전류제어 방식인 토크모드의 경우는 요구토크를 추종하도록 하는 방식으로 민감한 토크력의 제어를 필요로 하여 로봇환경에 사용하고 있다. 현재와 같은 헬리콥터 시뮬레이터용 운동장치의 주된 요구기능은 최대 적재하중에서 안정적으로 요구하는 속도 및 변위를 충족하는 운동감과 운용시의 최대하중에 대한 안전운용이 절대적이므로 이를 감안하여 여기서는 속도모드를 선택하였다. 엔코더를 통한 모터드라이버의 내부 제어회환 신호(Inner Loop)에 부가하여 DSP(Digital Signal Processor)를 장착한 모션 컨트롤러(Outer Loop)에서 고속으로 각 절점의 위치를 연산하고 PI 제어방식의 제어로직 운용프로그램을 통해 액츄에이터의 위치 제어동작을 수행한다.

III. 성능 및 신뢰성 시험

3.1 액츄에이터 응답성 시험

설계/제작된 6축 운동구현장치의 각 액츄에이터에 대한 응답성 성능시험을 수행하였다. 그림 7은 제작된 조립 전 액츄에이터의 구성품을 보인 것이다.



그림 7. 조립전 액츄에이터 구성품의 형상

0~5,000 kgf의 더미하중을 상판에 순차적으로 적재해 가면서 각 단축방향에 대한 운동을 발생시켜 액츄에이터 길이에 대한 입력값과 출력값을 비교하였다. 이 때 각각에 대해서 주파수를 0.5 Hz, 0.7 Hz, 1.0 Hz로 높여가며 변위 및 속도의 추종능력에 대한 동일한 시험을 반복 수행하였다 [9].

그림 8~12는 각 운동모드에서 가장 변위가 큰 액츄에이터에 대한 시간에 따른 추이를 나타낸 것으로서, 운용속도 1.0 Hz의 경우에 대한 대표적인 결과를 도시한 것이다. 정현파 변위입력에

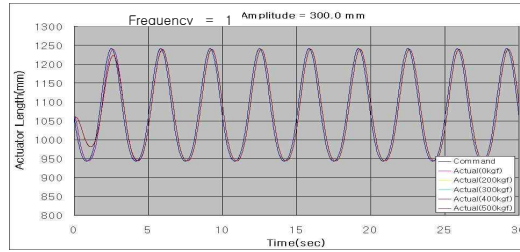


그림 8. Surge 운동에 대한 응답성 시험결과

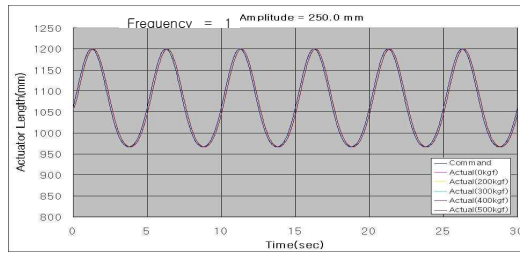


그림 9. Sway 운동에 대한 응답성 시험결과

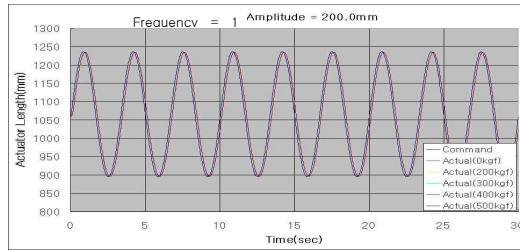


그림 10. Heave 운동에 대한 응답성 시험결과

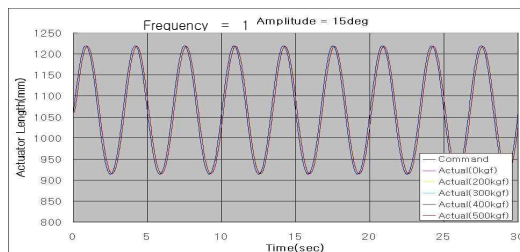


그림 11. Roll 운동에 대한 응답성 시험결과

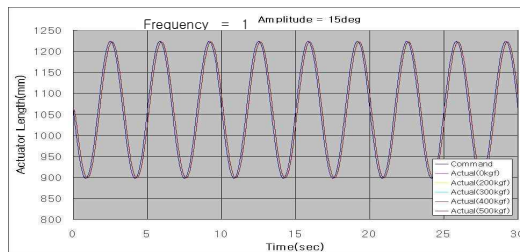


그림 12. Pitch 운동에 대한 응답성 시험결과

대한 최대하중 조건 및 하중 변화 상황 하에서도 각 액추에이터의 출력 변위가 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 다만 약 10 Hz (0.1 초)이내의 시간지연(Time Delay)을 보이고 있으나 이는 시뮬레이터의 요구 규격 최대 동작 운동성능 (0.15 초) [1,2,3,4]이내로서 요구조건에 부합하고 있다.

3.2 신뢰성 시험모델 제작 및 시험

응답성 시험을 거친 액추에이터의 신뢰성 검증 및 내구성 향상을 위하여 시험용 액추에이터를 제작하였다. 전기식 액추에이터에 부하를 적용하기 위하여 유압 서보 액추에이터를 사용하였으며, 변위계측을 위하여 액추에이터 외부에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 장착하여 그림 13과 같은 시험장치를 구성하여 제작하였다.



그림 13. 액추에이터 시험장치

표 7. 시험항목 및 평가결과

No.	시험 항목	평가 결과
1	무부하 작동시험	이상 소음 및 진동 등이 없이 원활한 작동
2	최대 추력시험	
3	주파수 응답특성 시험	주파수별 위상(deg) 및 변위비(dB) 만족
4	위치 정밀도시험	각 위치에서 측정된 값이 ±1% 오차 이내
5	가속도 잡음시험	0.05g 이내 만족
6	고온(80 °C)/저온(-40 °C) 저장시험	저장 후 성능의 저하 또는 파손 및 균열 등의 외관손상이 없음
7	습도시험	95% 상대습도 상태하의 시험 후, 부식, 들뜸, 기포발생, 변형 등의 외관 손상이 없음
8	수명시험	100만 Cycle 무고장 시험에 합격

기계연구원과 공동으로 신뢰성 시험을 수행하였는바, 고장 원인의 정확한 분석을 위하여, 고장 모드 메커니즘 분석(FMMA; Fault Mode Mechanism Analysis), 고장 모드 효과와 치명도 분석(FMECA; Fault Mode Effect and Critical Analysis), 2단계 품질 기능 전개(2-Stage QFD; Quality Function Development), 고장 계통 분석(FTA; Fault Tree Analysis) 등의 고장 분석을 실시하였다[10].

고장 분석 자료에 대한 검토결과, 전기식 액추에이터의 주고장 부위는 볼 스크류, 베어링, 커플링 등인 것을 알 수 있었다. 이와 같이 전기식 서보 액추에이터의 잠재적 고장형태인 볼 스크류 및 너트의 마모 및 피로 파괴, 상부 힌지 조립체의 파괴, 내, 외측 실린더의 마모 및 변형, 커플링의 마모 및 파손, 서보 모터의 고장 등을 파악하기 위하여 이에 적합한 시험을 실시하였다. 이 외에도 사용조건(고온, 저온, 습도) 하에서도 시험을 실시하였다. 이러한 시험결과를 정리하면 표 7과 같다. 이로부터 모든 시험항목에 대해서 모두 만족스런 결과를 보임으로서 개발된 운동구현장치용 액추에이터의 신뢰성을 입증하였다.

V. 결 론

항공안전본부의 관련규정 ‘모의비행훈련장치 지정기준 및 검사요령’ 에 제시된 2종의 헬리콥터 시뮬레이터 운동구현장치 개발을 위하여 기구학 및 동역학 분석을 통하여 6자유도의 운동을 갖는 전기식 스튜어트 플랫폼의 설계 변수를 구하고, 설계 요구 사항을 충족시키기 위한 전기식 액추에이터를 설계하였다. 또한 설계된 스튜어트 플랫폼에 대하여 구조해석을 실시하여 구조적 안정성을 확인하였다. 또한 개발된 운동구현장치의 성능평가를 위한 다양한 시험방안을 수립하였으며 단축 시험용 액추에이터를 제작하여 신뢰성 평가를 수행함으로써 향후 인증시험에 필요한 시험에 대비하였다. 연구결과에 대한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 6자유도 스튜어트 플랫폼의 기구학 해석 모듈을 프로그래밍하여 모의비행장치 2종 운동구현장치의 형상 및 크기를 설계하였다.
- 2) 6자유도 스튜어트 플랫폼 동역학 해석 모듈을 프로그래밍하여 하중조건에 부합하는 전기식 액추에이터 사양을 결정하였으며 구조해석을 수행하여 액추에이터를 설계하였다.
- 3) 설계된 액추에이터 및 시험장치를 제작하여 신뢰성 시험을 수행하였다.

향후, 헬리콥터 시뮬레이터에 적용하여 조종 훈련 상황과 관련되는 워시아웃 등 (Washout) 등 운동감재현 알고리즘과 과속 진동효과(Buffer Motion)를 구현함으로써 모의비행장치(FFS; Full Flight Simulator)를 위한 더욱 개선된 운동구현장치를 개발해 나가고자 한다.

후 기

본 연구는 항공우주연구원의 국가교통핵심기술개발사업인 “훈련용 헬기 시뮬레이터 개발”의 일환으로 수행되었으며 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) FAA AC 120-63 “Helicopter Simulator Qualification”.
- 2) 항공안전본부고시 제2004-49호, “모의비행훈련장치 지정기준 및 검사요령”, CASA Order2004-49.
- 3) Federal Aviation Administration, “AC 120-63 Helicopter Simulator Qualification”, U.S Department

of Transportation, 1994.

4) MIL-STD-1558, “Six-Degree-of-Freedom Motion System Requirements for Aircrewmember Training Simulator”, Department of Defense, 1974.

5) E.F.Fichter, “A Stewart Platform-based Manipulator : General Theory and Practical Construction”, Int. J. of Robotics Research, Vol.5, No.2, 1986, pp.157~182.

6) Nahon, M., and Reid, L., “Simulator Motion Drive Algorithms - A Designer’s Perspective,” Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 13, No. 2, 1990, pp. 356-362.

7) 박일경, “차량 시뮬레이터를 위한 모션베이스의 설계 및 성능평가에 관한 연구”, 국민대학교 자동차공학과 석사학위 논문, 1997.

8) Paul T. “Dynamic Characteristics of Flight Simulator Motion Systems”, USAF, 1978.

9) 김우영, 김동규, “유압 시뮬레이터를 이용한 동특성시험 알고리즘”, 한국항공우주학회지, 제 30권, 제 2호, 2002, pp. 83-90.

10) 한국기계연구원, “시뮬레이터용 전기식 서보 액츄에이터 신뢰성 평가”, RSB 0009, 2005.