

중소형 무인기 브레이크 시스템용 복합형 지능재료펌프 설계

이종훈^{1,2} · 황재혁^{1,†} · 양지연¹ · 주용휘¹ · 배재성¹ · 권준용²

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

²국방과학연구소 제7기술연구본부

Design of the Compound Smart Material Pump for Brake System of Small · Medium Size UAV

Jonghoon Lee^{1,2}, Jaihyuk Hwang^{1,†}, Jiyoun Yang¹, Yonghwi Joo¹, Jaesung Bae¹ and Junyong Kwon²

¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

²The 7th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

Abstract : In this study, the design of compound smart materials hydraulic pump that can be applied to a small-medium size UAV having a limited space envelope and weight has been conducted. Compound Smart Material Pump(CSMP) proposed in this paper is composed of a pressurize pump and a flow pump for supplying the high pressure and fluid displacement to overcome the disadvantages of the piezoelectric actuator which has a small strain. Though this compound smart material pump has been designed as small size and lightweight as possible, it can sequentially supply the sufficient large flow rate and pressure required for the brake operation. For the design of CSMP, about 2,700 kg (6,000 lb) class fixed wing manned aircraft was selected. Based on the established requirements, the design of the CSMP have been done by strength, vibration, and fluid flow analysis.

Key Words : Compound Smart Material Pump, Piezoelectric Stack Actuator, Brake System

1. 서 론

항공기에서는 신뢰성, 취급상의 안전성, 작동의 확실성, 구조의 간결성 등의 이유로 기계적인 동력 전달 매체로 유압을 사용한다. 항공기에서 사용되는 유압 브레이크 시스템에는 저유기(Reservoir), 서보밸브, 체크밸브, 압력조절기, 릴리프 밸브, 전자제어장치(Electronic Control Unit) 등 다양한 구성품이 요구된다. 중소형 무인항공기의 경우 장착 공간 및 중량의 제약 그리고 유압시스템의 복잡성으로 인해 유압 브레

이크 시스템을 소형·경량화하고 단순화하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 기존 유압 브레이크 시스템의 다양한 구성품과 유압 제어 시스템 대신에 전기적 신호만으로 작동 및 제어가 가능한 시스템으로 대체하는 것이 필요하며, 이러한 시스템을 Fly-by-wire 브레이크 시스템이라 한다. 대표적인 지능재료(Smart Material) 중 하나인 압전재료 작동기는 다른 작동기에 비해 적은 부피로 큰 힘을 발생시킬 수 있기 때문에 출력밀도가 매우 높을 뿐만 아니라 에너지 변환 효율도 높다[1]. 그러나, 힘에 비해 변형량이 매우 작은 압전작동기의 단점 때문에 마이크로 펌프와 같은 배압이나 유량이 매우 작은 경우에 대한 연구가 주로 진행되었다[2-7]. 일반적인 유압식 작동기는 많은 유량을 필요로 하기 때문에 변형량이 작은 압전작동기의 단점

을 극복하기 위해 압전작동기를 높은 주파수로 작동시켜 유량을 증가시켜야 한다[8-13]. 압전 작동기를 유압 작동기에 적용하면 유량이 증가될수록 발생하는 압력은 감소하기 때문에 출력단에서 충분한 힘을 보장하기 위해서 압전 작동기의 크기를 증가시켜야 하며 소형·경량화가 어렵다는 단점이 있다. 반면 유압식 브레이크 시스템은 일반적인 유압 작동기에서와는 달리 적은 유량과 큰 힘을 필요로 하므로 변형률은 작지만 구동력이 크고 응답속도가 빠른 압전작동기를 적용하기에 비교적 적합한 시스템이다.

본 연구에서는 장착공간과 중량의 제약이 있는 중소형 무인항공기에 적용 가능한 압전작동기를 적용한 소형·경량의 유압 펌프를 설계하였다. 압전작동기를 사용하면서도 큰 힘과 브레이크 실린더에 필요한 유량을 만족시키는 펌프를 소형화하기 위해 가압 펌프와 유량 펌프로 구성된 복합형 지능재료 펌프를 설계하여 특허 출원 중이다. 복합형 지능재료 펌프는 압전작동기로 구성된 가압 펌프와 VCM(Voice Coil Motor) 작동기로 구성된 유량 펌프로 이루어진다. 유량 펌프는 브레이크 최초 동작을 위해 필요한 유량을 공급하며, 가압 펌프는 브레이크 동작을 위한 힘(압력)을 순차적으로 공급하는 역할을 한다.

압전작동기를 이용한 복합형 지능재료 펌프의 설계를 위해 무인기와 유사한 중량을 갖는 중소형 유인 항공기를 선정하여 브레이크 시스템의 요구도 분석을 수행하였다. 선정된 브레이크 시스템의 요구도를 토대로 지능재료 펌프의 요구도를 분석하고, 요구도를 충족시킬 수 있도록 지능재료 펌프 설계를 진행하였다. 펌프 설계 시 각 구성품에 대해 구조해석, 진동해석, 유체해석, 구조-유체 연계해석을 단계적으로 수행하여 각 설계안에 대한 확인 및 재설계가 이루어질 수 있도록 하였다. 최종적으로 확정된 펌프의 설계안을 기준으로 시제 지능재료 펌프를 제작하였다.

2. 지능재료펌프 요구도 분석

2.1 항공기 브레이크 시스템 요구도 분석

본 연구에서는 중소형 무인기의 브레이크 시스템에 적용 가능한 소형·경량의 지능재료 펌프개발을 위해 유사한 중량을 갖는 설계 대상 항공기를 선정하여 브

레이크 시스템의 요구도를 분석하였다. 설계 대상 항공기는 FAA 핸드북을 참고하여 선정하였으며, 경량 단발 항공기로서 최대이륙중량 2,658 kg(5,862 lb), 실속속도는 36 m/sec(70 knots)이다. 상세한 제원은 Table 1과 같다[14,15].

Table 1. Specification of design object airplane[14,15]

Item	Specification
Engine Thrust	Max. : 8,896 N (2,000 lb) Idle : 1334 N (300 lb)
Max. Take-off Weight [MTOW]	2,658 kg (5,862 lb)
Design Lading Weight [DLW]	1,814 kg (4,000 lb)
Stall Speed	36 m/sec (70 knots) @ MTOW 33.4 m/sec (65 knots) @ DLW
Deceleration Rate	Normal : 1.82 m/sec^2 (6 ft/sec^2) Rejected Take-Off : 3 m/sec^2 (10 ft/sec^2)

설계 대상 항공기를 기준으로 최대이륙중량 조건에서 항공기의 실속속도를 브레이크 작동속도로 가정하고 브레이크 작동압력을 산출하였다. 최대작동압력은 이륙포기 제동을 가정하여 선정하였고, 정상작동압력은 설계 착륙중량으로 착륙 시를 가정하여 산출하였다. 브레이크의 최대 유압유 토출량(Fluid Displacement)은 브레이크 디스크가 100% 마모된 상태에서 브레이크 피스톤을 이동하여 디스크와 로터를 접촉시키는 데 필요한 양을 기준으로 산출하였다[16,17]. 설계 대상 항공기의 브레이크 시스템의 요구도를 기준으로 산출된 지능재료 펌프의 요구도는 Table 2와 같다.

Table 2. Requirement of smart material pump

Item	Requirement
Max. Operating Pressure	6.89 MPa (1000 psi)
Normal Operating Pressure	3.1 ~ 3.4 MPa (450~500 psi)
Max. Fluid Displacement @ 100% Disk Worn Condition	3 cc (Approx.)
Response Time [Max. Fluid Displacement] @ Deceleration Rate 3 m/sec^2	30 msec
Operating Speed	0~150 Hz

2.2 가압펌프 요구도 분석

가압 펌프는 적층형 압전작동기(PZT Stack

Actuator)를 사용해 브레이크 작동에 필요한 압력을 발생시키도록 하였다. 가압 펌프는 최대작동압력 6.89 Mpa(1,000 psi)를 만족하고, 작동 속도 150 Hz에서 토출량 3 cc를 만족하도록 설계하였다.

펌핑 메커니즘 중 다이어프램 방식은 다이어프램 변위를 통해 챔버 내 압력의 변화를 만들어내는 원리로 작동된다. 다이어프램의 미소 변위만으로도 펌프로써 작동이 가능하기 때문에 변형률이 작은 압전작동기를 활용하는 가압 펌프는 다이어프램 방식을 선정하였다. 가압 펌프 설계를 위한 주요 설계변수는 챔버의 직경이며 펌프의 소형화를 위해 챔버의 직경은 50 mm 이하로 제한하였다.

Table 3은 챔버의 직경에 따라 최대작동압력 6.89 Mpa, 토출량 3 cc(150 Hz 구동 시)을 만족시키는 작동기의 변위와 힘을 산출한 결과이다. 적층형 압전작동기는 변위가 클수록 길이가 길어지기 때문에 챔버의 직경이 작아질수록 펌프의 길이가 증가하게 된다.

Table 3. Chamber diameters of pressure supply actuator

Chamber Diameter (mm)	Actuator Force (N)	Actuator Displacement (μm)
30	4873.6	56.6
35	6633.5	41.6
40	8664.1	31.8
45	10965.5	25.2
50	13537.7	20.4

본 연구에서는 챔버의 직경이 40 mm일 때 압력과 토출량을 만족시키는 작동기를 선정하였다. 선정된 작동기(Pst 1000/16/40)는 변위 40 μm, 발생력 12,000 N으로 요구도를 만족한다. 작동기의 직경은 16 mm이며, 길이는 36 mm이다.

2.3 유량 펌프 요구도 분석

유량 펌프는 VCM 작동기를 사용해 브레이크 작동에 필요한 유량을 공급하는 역할을 한다. 유량 펌프는 30 msec 내 3 cc의 작동유를 공급할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 브레이크 실린더 측에 발생하는 압력(약

0.06 MPa, 9.70 psi) 이상이 발생할 수 있도록 설계되어야 한다. 유량 펌프 설계를 위한 주요 설계변수는 펌프 챔버의 직경이다. Table 4는 챔버의 직경에 따라 토출량 (3 cc/ 30 msec)과 압력 (0.06 MPa) 요구도를 만족하는 작동기의 힘과 변위를 산출한 결과이다.

Table 4. Chamber diameters of flow supply actuator

Chamber Diameter (mm)	Actuator Force (N)	Actuator Displacement (μm)
30	47.3	4.2
35	64.3	3.1
40	84.0	2.4
45	106.4	1.9
50	131.3	1.5

본 연구에서는 챔버 직경이 40 mm일 때 토출량과 압력을 만족시키는 작동기를 선정하였다. 선정된 작동기(AVM 40-HF-6.5)는 변위 ±3.2 mm, 발생력 99.4 N으로 요구도를 만족한다. 일반적으로 VCM 작동기의 응답속도는 매우 빠르기 때문에 피스톤을 밀어내는 힘이 충분하다면 응답속도 요구도인 30 msec를 만족하는 것이 가능하다. 작동기의 직경은 40 mm이며, 길이는 39.6 mm이다.

요구도 분석을 통해 설계된 복합형 지능재료 펌프는 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 유량과 압력을 순차적으로 공급하는 지능재료 펌프는 크게 VCM을 이용한 유량 펌프와 압전작동기를 이용한 가압 펌프로 구성되어 있다. 유량 펌프에 의해 발생한 유량은 가압 펌프의 체크 밸브에 의해 챔버로 역류되는 것이 방지된다. 유량 펌프와 가압 펌프 간 방향제어는 펌프 제어기에 의해 이루어진다. [20,24]

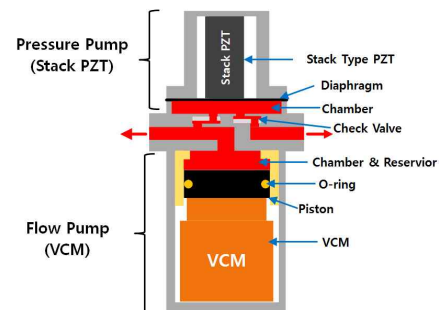


Fig. 1. Schematic of smart material pump

3. 지능재료펌프 설계

3.1 구조해석

지능재료 펌프의 각 구성품의 체결을 위한 고장력 볼트와 케이싱의 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 체결을 위한 볼트의 특성은 Table 5와 같다.

Table 5. Specification of high strength bolt

Head Size	5.5 mm
Diameter	3 mm
Yield Stress	1,170 MPa
Pretension	1000 N
Bolt Torque	0.05 N·m

구조해석 결과, 볼트에 작용하는 최대 응력은 419.4 MPa로 항복 응력의 35.8%이며, 응력분포는 Fig. 2와 같다.

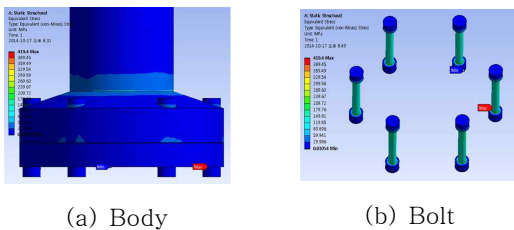


Fig. 2. Structural analysis results of body and bolt

펌프의 필수부품인 체크 밸브는 한 방향으로만 유체가 흐르게 하고 다른 방향의 흐름은 차단하기 위해 사용된다. 체크 밸브는 펌프의 흡입과 토출 작동에 맞추어 흡입구와 토출구의 역류를 방지하고 압전작동기의 고속 운동에 연동 가능하도록 설계되어야 한다. 체크 밸브의 주요 설계 변수는 밸브의 재질, 판의 두께, 다리의 형상, 다리의 개수 등이다. 이러한 설계 변수를 변화시키며 요구도를 만족하는 최적의 체크 밸브의 형상을 결정하기 위해 구조해석을 수행하였다[7].

지능 재료 펌프는 별도의 축압기를 사용하지 않기 때문에 다이어프램의 변형에 의해 챔버 내로 작동유가 흡입되기 위해 체크밸브는 1 atm보다 적은 압력에서 열릴 수 있도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 체크 밸브의 정상 변위 조건을 0.15 mm 이상으로 설정하였다. 또한 체크 밸브는 최대 0.5 mm 변위 발생 시에도 구조적으로 안정하도록 설계하였다.

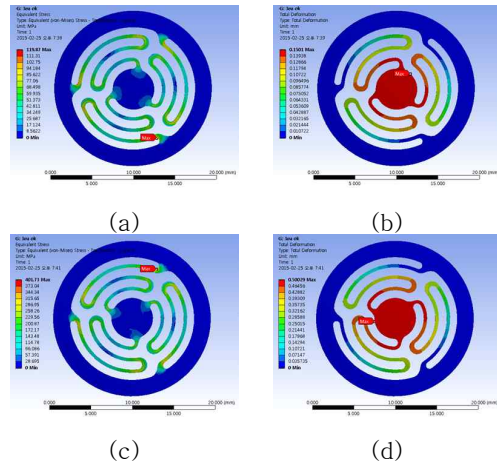


Fig. 3. Structural analysis of check valve : (a) stress and (b) deformation for $\Delta P=1$ atm condition ; (c) stress and (d) deformation for displacement 0.5 mm

Fig. 3은 설계된 체크밸브의 구조 해석 결과이다. 체크 밸브의 재질은 SUS304-CSP이며 영률 200 GPa, 항복응력 510 MPa이다[18]. Fig. 3의 (a)와 (b)는 1 atm 조건에서 설계된 체크 밸브의 구조해석 결과이다. 최대응력은 119.87 MPa로 항복 응력의 24%이며, 최대변위는 0.15 mm로 요구도를 만족한다. Fig. 3의 (c)와 (d)는 밸브에 강제 변위 0.5 mm를 인가했을 때의 구조해석 결과로 최대응력은 401.73 MPa이다. 이 경우의 안전 여유(Safety of Margin)은 +0.41로 구조적으로 안전하다.

3.2 진동해석

체크 밸브는 펌프 동작 조건에서 파괴 및 공진이 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

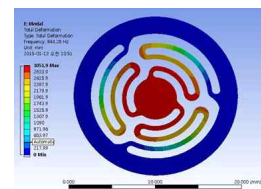


Fig. 4. Vibration analysis of check valve

Fig. 4은 체크밸브의 진동해석결과이며, 1차 모드 주파수는 883.1 Hz이다. 이 값은 주변 유체의 특성을 고려하지

않은 값이다. 일반적으로 유체 내에서 공진 주파수는 구조 진동 자체 값에 비해 약 1/4 정도 감소하는 것으로 알려져 있다[8]. 이러한 현상을 감안하더라도 펌프의 작동 속도 범위인 150 Hz 내에서 공진이 발생하지 않을 것으로 예상된다.

Fig. 5는 지능재료 펌프 본체의 진동해석 결과이다. 해석결과 고유진동수는 7997.5 Hz로서 펌프의 작동 주파수인 150 Hz내에서 공진이 발생하지 않을 것으로 판단된다.[21,22]

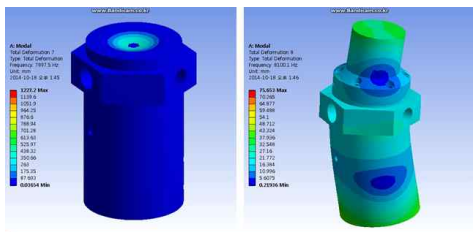


Fig. 5. Vibration analysis of pump body

3.3 유동해석

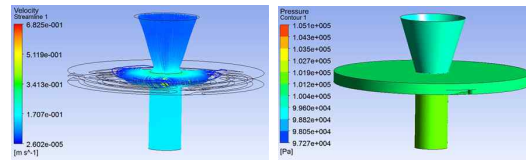
구조해석을 통해 설계된 체크 밸브를 이용하여 밸브 통과 시 압력손실을 계산하였다. 유동해석은 ANSYS의 CFX모듈을 활용하였다. 유체의 특성은 실제 항공기에서 작동유로 사용되는 Mil-PRF-83282의 물성치를 적용하였다[19]. Table 6은 유체의 물성치이며, Table 7은 유동해석을 위한 경계조건 설정에 대한 내용이다. 질량유량은 압전작동기의 작동 변위 40 μm, 작동 속도 30 Hz 일 때의 값이며, 압력 손실은 체크 밸브가 0.15 mm 열렸을 때를 기준으로 해석하였다. 유동해석 결과 토출구에서의 압력은 100.34 kPa로 압력손실은 0.99 kPa이다. 유동해석 결과는 Fig. 6과 같다.[23]

Table 6. Fluid Properties(Mil-PRF-83282)[19]

Kinematic Viscosity @ 40°C	14.2 [cSt]
Specific Gravity (15.6°C)	0.851

Table 7. Boundary conditions and Setup

Inlet Pressure	1 atm
Outlet Mass Flow Rate	0.0637×10 ⁻³ kg/s
Turbulent Model	K-Epsilon
Node	226,965
Elements	1,141,184



(a) Stream Line (b) Pressure Contour

Fig. 6. Flow analysis of smart material pump

3.4 지능재료 펌프 제작

구조해석, 유동해석 및 진동해석을 통해 확정된 펌프 설계안에 대해 제작을 수행하였다. 제작된 복합형 지능재료 펌프의 구성품은 Fig. 7과 같으며, 상세한 사양은 Table 8과 같다. 가압 펌프와 유량 펌프로 구성된 복합형 지능재료 펌프의 작동은 펌프 제어기를 통해 이루어진다.



Fig. 7. Prototype smart material pump

Table 8. Specification of prototype smart material pump

Item	Specification
Pump Size	Φ57 mm× H145.5 mm
Chamber Hight	Pressure Pump: 2 mm Flow Pump: 3 mm
Check Valve	SUS 301-CSP, Φ19 mm, t=0.35 mm
Diaphragm	SUS 301-CSP, Φ55 mm, t= 0.35 mm
PZT Stack Actuator	Size : Φ16 mm× H36 mm Max. displacement : 40 μm Max. force : 12,000 N
VCM Actuator	Size : Φ40 mm× H39.6 mm Max. displacement : ±3.2 mm Max. force : 99.4 N

펌프 제어기는 가압 펌프와 유량 펌프 간 방향 전환 밸브의 제어, 가압 펌프의 정압을 유지하기 위한 제어,

타이어의 미끄럼 발생 시 가압 펌프의 압력 제어, 유량 펌프의 제어, 압력제어를 위한 감압 밸브의 제어 등의 역할을 수행한다. 펌프 제어 알고리즘에 대한 결과는 추후 논문에서 발표할 예정이다.

4. 결론

본 논문에서는 무게와 공간에 제약이 있는 중소형 무인항공기에 적용 가능한 압전재료를 적용한 소형·경량의 복합형 지능재료 유압펌프의 설계에 대해 연구하였다. 본 연구에서 제안한 복합형 지능재료 펌프는 변형률이 작은 압전작동기의 단점을 극복하기 위해 유량 펌프와 가압 펌프로 구성된 시스템으로써 필요한 유량과 큰 힘을 동시에 공급하면서도 소형·경량화가 가능한 시스템이다. 복합형 지능재료 펌프의 설계를 위해 약 2,700kg(6,000 lb) 급 고정익 유인 항공기를 선정하여 브레이크 시스템에 대한 요구도 분석을 수행하였다. 선정된 브레이크 시스템의 요구도를 토대로 지능재료 펌프의 요구도를 선정하고, 선정된 지능재료 펌프의 요구도를 충족시킬 수 있도록 설계를 진행하였다. 지능재료 펌프 각 구성품에 대해 구조해석, 진동해석, 유동해석을 단계적으로 수행하여 각 설계안에 대한 확인 및 재설계가 이루어질 수 있도록 하였다. 설계된 지능재료 펌프는 최대 작동압력 6.89 MPa(1,000 psi), 정상 작동압력 3.1 ~ 3.4 MPa (450 ~ 500 psi), 체적은 0.4×10^{-3} m³, 무게는 1.3 kg 으로 출력밀도(Power Density)와 효율이 높은 소형·경량 유압 펌프이다.

후 기

이 논문은 2013년도 국방과학연구소의 기초연구 연구비 지원(ADD-IBR-227)을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] In Lee, "Research and Development Trends on Application of Piezoelectric Materials," Journal of the Korean Society for Composite Materials, Special Edition, pp. 90-98, 2000.

- [2] Junwu Kan, Zhigang Yang, Taijiang Peng, Guangming Cheng, Boda Wu, "Design and Test of a High-performance Piezoelectric Micropump for Drug Delivery," Journal of Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 121, No. 1, pp.156-161, 2005.
- [3] Brian D. Iverson, Suresh V. Garimella, "Recent Advances in Microscale Pumping Technologies: a Review and Evaluation," Journal of Microfluidics and Nanofluidics, Vol. 5, No. 2, pp.145-174, 2008.
- [4] Kwang W. Oh, Chong H. Ahn, "A Review of Microvalves," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 16, No. 5, pp.13-39, 2006.
- [5] Daniel J. Laser, Juan G. Santiago, "A Review of Micropumps," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, No. 6, pp.35-64, 2004.
- [6] Junwu Kan, Kehong Tang, Yu Ren, Guoren Zhu, Peng Li, "Study on a Piezohydraulic Pump for Linear Actuators," Journal of Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 149, No. 2, pp.331-339, 2009.
- [7] Young Bog Ham, Woo Suk Seo, Sung Jin Oh, Jung Ho Park, So Nam Yun, "A Piezoelectric Micropump for Microscale Pumping Systems," Journal of the Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 6, No. 2, pp.17-25, 2009.
- [8] Anirban Chaudhuri, Norman Wereley, "Compact Hybrid Electrohydraulic Actuators using Smart Materials: A Review," Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 23, No. 6, pp.597-634, 2012.
- [9] Sirohi, Jayant, Inderjit Chopra, "Development of a Compact Piezoelectric-hydraulic Hybrid Actuator," SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, International Society for Optics and Photonics, pp.401-412, 2001.
- [10] Dong Gun Lee, Siu Wing Or, Gergory P. Carman, "Design of a Piezoelectric-hydraulic Pump with Active Valves," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 15, No. 2, pp.107-115, 2004.
- [11] Taeoh Lee, Inderjit Chopra, "Design of Piezostack-driven Trailing-edge Flap Actuator for Helicopter Rotors," Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 10, No. 1,

pp.15~24, 2001.

- [12] Wiliam E. Hurt, "Piezohydraulic Actuator Design and Modeling Using a Lumped-Parameter Approach," PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [13] Jason E. Lindler, Eric H. Anderson, "Design and Testing of Piezoelectric-hydraulic Actuators," SPIE Smart Structures and Materials Symposium, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technology, pp.96~107, 2003.
- [14] FAA-H-8083-1A, Aircraft Weight and Balance Handbook, U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service, 2007.
- [15] FAA-H-8083-30, Aviation Maintenance Technical Handbook, U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service, 2008.
- [16] Rudolf Lipert, Brake Design and Safety, SAE, 1982.
- [17] Ladislao Pazmany, "Landing Gear Design for Light Aircraft Vol. I."
- [18] www.matweb.com.
- [19] http://chemsol.com
- [20] Jaihyuk Hwhang, Jonghoon Lee, Jaep Hwang, Jaesung Bae, Junyong Kwon, "Conceptual Design of Compound Smart Material Pump with Sequential Operatioon of Fluid Displacement-Force", SASE Spring Conference, 2014
- [21] Yonghwi Joo, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Jonghoonlee, Jaep Hwang Junyong Kwon, "The Design on the Check Valve of Smart Material Hydraulic Pump, SASE Spring Conference, 2014
- [22] Yongwhi Joo, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Jiyoun Yang, Junyong Kwon, "The Design on the Spring Sheet Type Check Valve of Smart Material Hydraulic Pump", SASE Fall Conference, 2014
- [23] Jiyong Seok, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Jiyoun Yang, Junyong kwon, "Fluid Analysis According to Check Valve Opening of Smart Material Hydraulic Pump", SASE Spring Conference, 2015
- [24] Jonghoon Lee, Jaihyuk Hwang, Jiyoun Yang, Yongwhi Ju, Jaeseng Bae, "Design of Compound Smart Material Pump for an Aircraft Brake System", APCATS, May 20-25, 2015

저자 소개



이 중 훈

1987년 한국항공대 항공기계공학과 졸업.
1989년 동 대학원 석사.
1989년~현재 국방과학연구소 책임연구원.
2011년~현재 동 대학원 박사과정
관심분야는 항공기 세부계통 제어 및 응용, 모델링.



황 재 혁

1980년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학 석사. 1990년 미국 UC Berkeley 박사. 1991년~현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 교수. 관심분야는 진동제어, 동역학 시스템 제어.



양 지 연

2001년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 2006년 동 대학원 석사. 2013년~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 지능재료펌프 설계 및 제어.



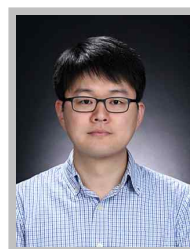
주 용 휘

2014년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 2014년~현재 한국항공대학교 대학원 석사과정. 관심분야는 지능재료펌프 설계 및 제어.



배 재 성

1996년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 항공우주공학과 석사. 2001년 동 대학 박사. 2007년~현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 교수. 관심분야는 공탄성 및 진동제어.



권 준 응

2003년 부산대학교 기계공학과 졸업. 2005년 KAIST 기계공학과 석사. 2005~현재 국방과학연구소 선임연구원
관심분야는 구동장치 제어