

직경 2m급 축소로터 시험장치 개조 및 보완 Modification of Dia. 2m-Small-scaled Rotor Test Facility

송근웅†·이재하*·김승호**

Song Keun Woong, Lee Jae Ha, Kim Seung Ho

Key Words : Helicopter(헬리콥터), 축소 로터(Small-scaled rotor), 회전시험(Rotating Test)

ABSTRACT

Small-scaled Rotor Test facility(GSRTS, General Small-scaled Rotor Test Facility) in KARI could not use the test because facility aging and parts discontinued. Also in order to perform a joint international research, GSRTS modifications should be needed. So requirements of GSRTS modifications were established and according to the requirements, GSRTS modifications were conducted. Facility operation test, 6-component fixed balance calibration, Small-scaled OLS rotor performance test were performed to verify the results of GSRTS modifications. Reasonable results were obtained in comparison to calculation results. Then GSRTS ready was completed to conduct international collaborative research and wind tunnel test.

1. 서 론

헬리콥터 로터 연구 분야에서 축소 로터 시험은 실물에 대한 개발 위험 감소, 비용 절감, 기술 개발의 효과 증가 등의 장점이 있으며 로터시스템에 대한 구조동력학 및 공기역학적인 현상의 실험적 검증에 매우 효과적인 기술 분야이다. 이에 한국항공우주연구원(이하 KARI)에서는 1999년 축소로터 시험장치를 제작/설치⁽¹⁾하였고 이후 약 10년 동안 축소 로터 관련 회전시험을 수행하였다. 하지만, 사용기간 동안 시험장치 노화 및 부품 단종으로 더 이상 시험장치를 운용할 수 없게 되었으며, 또한 국제공동연구를 수행하기 위해서는 시험장치 개조가 필요하게 되었다. 이에 KARI에서는 축소로터 시험장치 개조를 위해 요구조건을 수립하고 그에 따라 장치 개조를 수행하였다. 본 논문에서는 축소 로터 시험 기술과 그에 필요한 축소로터 시험장치, 그리고 KARI에서 수행한 시험장

치 개조와 그 검증에 대해 기술하였다.

2. 축소 로터 시험 및 시험장치

2.1 축소 로터 시험 분야

축소 로우터 시험장치(이하 GSRTS, General Small-scaled Rotor Test System)를 통하여 수행될 핵심 기술 분야는 측정되는 물리량의 종류에 따라 로터 시스템 공력탄성학적(Aeroelastic) 및 공력기계적(Aeromechanical) 안정성 시험, 고성능 로터 시험, BVI(Blade Vortex Interaction) 소음 특성 시험, Active Vibration Control 시험, Smart Rotor 시험(Vibration/Noise Control) 등으로 구분할 수 있으며, 헬리콥터가 갖는 비행 조건에 따라 크게 3가지 형태로 분류할 수 있다.⁽²⁾

- 지상 착륙시
 - Ground Resonance
- 정지 비행시
 - Aeroelasticity stability/ Aeromechanical stability(Air Resonance)
 - Aerodynamics

† 송근웅; 정회원, 한국항공우주연구원
E-mail : skw@kari.re.kr

Tel : 042-860-2196, Fax : 3530

* 충남대학교 항공우주공학과

** 한국 항공우주연구원 회전익기술팀

○ 전진 비행시(wind tunnel)

- Aeroelasticity stability/ Aeromechanical stability(Air Resonance)
- Aerodynamics Characteristics

이러한 분류는 시험 조건이 다르다는 것을 의미한다. 그러나 가장 중요한 것은 축소 로터의 스케일링이다. 축소 로터 분야에서는 크게 Froude-scale과 Mach-scale을 사용하여 축소 모델을 제작한다.

(1) Froude-scale Test

Froude-scale은 실물 크기 대 축소 모델이 크기의 비를 S라 하면 선형치수, 선형 처짐/변위, 동적 변위 및 원판하중 등을 그대로 S라는 비율을 유지한다. 이로 인해 요구되는 추력계수와 전진비 조건에 대해 회전속도가 감소하게 된다. 이 모델은 주로 구조동역학적인 시험에 사용된다.

(2) Mach-scale Test

Mach-scale은 선형 치수 외에 시간이 포함된 성분에 대해 S 비율을 유지한다. 이에 tip speed와 같은 항목이 실물과 동일하게 된다. 따라서 블레이드 하중에 대한 마하수의 효과를 정확하게 기술할 수 있다. 주로 공기역학적인 시험에 사용된다.

2.2 축소 로터 시험 장치

KARI가 보유한 축소로터 시험장치(GSRTS)는 직경 2m급의 축소 헬리콥터 로터 시스템을 시험할 수 있는 장치로서 GSRTS의 주요 기능 및 특성을 아래 표 1에 정리하였다.⁽³⁾

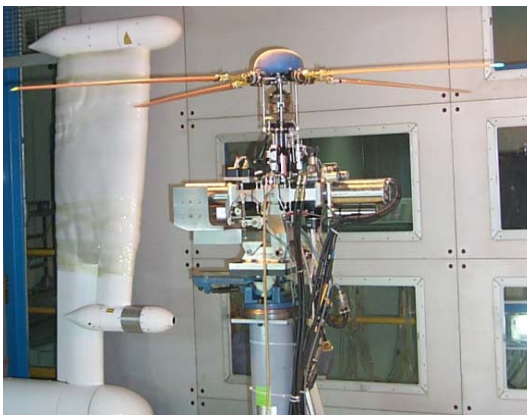


Figure 1 GSRTS in Wind-tunnel

Table 1 GSRTS Specifications

구분	사 양
종류	로터 직경 2m Froude-scaled Rotor Test System (Mach-Scaled 시험도 가능)
회전수	최대 2,100 rpm
구동	AC Variable Frequency motor (20Hp×2)
로터 시스템	4 blade, Fully articulated hub 4 blade Hingeless hub 2 blade teetering hub
시험 항목	- 정지 및 전진 비행 시 공력탄성학적 안정성 - 지상 착륙 시 지상 공진 시험 - 공력 특성 및 소음 시험
주요 특징	- 2축 Gimbal system - Snubbing

3. 시험장치 개조 보완

GSRTS를 10여년 사용해오면서, 전기 모터 1기 추가, 6분력 회전 하중 발란스 추가, 미션 교체, 피치 조종 모터 교체 등의 하드웨어 수정/보완 작업을 수행하였고, 데이터 획득 시스템 추가/보완이 수없이 이루어져 왔다. 그러나 장비 노화로 인해 수냉식 전기모터의 워터자켓이 터짐으로써 더 이상 사용이 불가하게 되었다. 장치를 제작한 후, 오랜 시간이 지나 해당 제작업체가 폐사하였으며, 관련 부품 및 보드 등도 단종되어 그 부품을 구할 수 없는 경우도 발생하였다.

항우연에서는 JAXA와의 협력 연구, 국제 공동연구 프로젝트인 STAR 과제에 참여함에 따라 축소 로터 시험 수행이 요구되었으며, 그에 맞는 장치 개조/보완이 필요하게 되었다.

3.1 GSRTS 개조/보완 요구도

JAXA와 공동연구인 능동제어 모듈을 장착한 축소 블레이드의 회전시험을 위해서는 기존 GSRTS의 개조/보완이 필요하다. 특히 능동제어 모듈을 구동하기 위한 고전압을 회전부로 전달해야 하기 때문에 기존 슬립링을 사용할 수 없으며, 더 큰 용량의 슬립링을 장착하여야 한다.

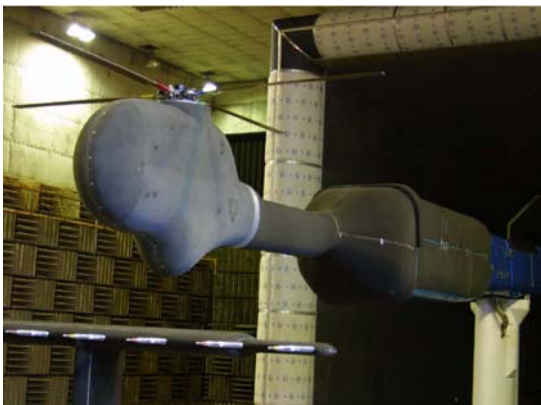
항우연에서는 GSRTS의 하부에 장착되는 슬립링을 고전압용으로 교체하기 위해 필요한 공간 확보 및 측정 정확도 향상, 풍동시험 편의성 등을 고려한

Table 2 Requirement for GSRTS Modifications

구분	내역	요구도
Power	3m급 축소로터 Mach-scaled 시험 가능	50 kW
Operating Time	풍동시험 수행을 위한 연속가동 시간 확보	1 시간 이상
blade pitch	피치 작동기의 backlash 제거	피치 작동기 교체
하중 발란스	6분력 회전발란스의 하중 신뢰도 향상	6분력 고정발란스 추가 (Error 0.5%F.S)
슬립링 장착	고전압용 슬립링 장착 공간 확보	직경 100mm, 길이 250mm 의 공간 확보

시험장치 개조를 위한 요구도를 표 2와 같이 수립하였다. 이러한 개조 목표를 갖고, GSRTS를 개조하기 위해 DLR(German Aerospace Center)의 ROTEST-II 시험장치를 참고하였다. ROTEST-II 시험장치는 로터 국제 공동연구인 HART, STAR program에 사용될 정도로 신뢰도가 높은 축소로터 시험장치이다. 그림 2는 직경 4m급 축소 로터를 장착하고 DNW(German-Dutch Wind-tunnel)풍동에 설치된 ROTEST-II를 보여준다. ROTEST-II는 1개의 유압모터와 6분력계 하중측정시스템, 기타 모니터링 센서 등으로 구성된다. 유압모터 구동을 위한 유압공급장치는 별도로 설치된다.

해당 시험장치를 참고하여 GSRTS의 목표 성능은 표 3과 같이 수립하였다. 기존 장치 대비 최대 동력을 50% 증가시키는 등의 요구도에 부합되는 목표 성능을 수립하였다.

**Figure 2** ROTEST-II in DNW Wind-tunnel**Table 3** Target Specifications of GSRTS

구분	GSRTS		
	기존	개조/보완	
Rotor size		Dia. 2 m	
구동부	Power / RPM	30kW Max. 2100 rpm	55 kW Max. 2400 rpm
	Motor / 연속 가동 시간	전기모터 2EA 1 hr 이내	유압모터 1EA 2 hr 이상
측정부	회전발란스	6분력/2분력계	
	고정발란스	-	6분력계 Error 0.5%FS
	Rotary Encoder	1024/rev	2048/rev
제어부	Pitch control Act.	Electric Motor	Electric Step Motor
	Control logic	Closed-loop	Open-loop
구조물	Safety Factor	4	5

3.2 GSRTS 개조/보완 내역

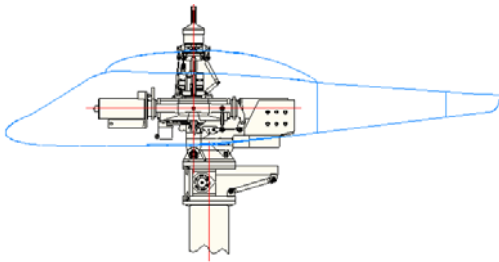
본 연구에서 가장 핵심적인 내용은 축소로터 시험장치의 구동부를 전기식 모터/미션에서 유압모터 직결식으로 교체하는 것과, 고전압 슬립링을 장착할 수 있는 공간확보, 그리고 6분력 고정발란스 추가이다.

(1) 전체 구조물

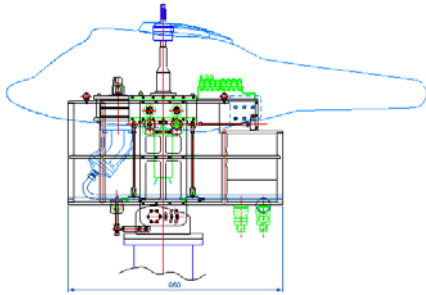
요구도와 목표 성능을 만족하는 시험장치 개조를 하기 위해 기본 설계 단계부터 상세설계 단계까지 4차례 설계 변경을 통해 구조물 설계를 완료하였다. 그 결과는 아래 그림 3과 같다. 주 구동부를 6분력 고정발란스가 지지하는 구조를 적용하였다. 주구동부의 전방에는 유압모터를 배치하고 폴리/벨트를 통해 주축을 회전하도록 하였다. 주축 하부에는 고전압 슬립링을 장착할 수 있는 공간을 확보하였다. 후방에는 유압라인을 연결하는 유압블럭을 설치하였다. 유압모터 회전축은 폴리와 연결되며 그 상부인 주 구동부 상판에 회전수를 측정할 수 있는 회전엔코더를 장착하였다.

(2) 피치 작동기

기존 피치 작동기는 LVDT로 feedback 신호를 받아 closed loop control 개념으로 피치각을 유지하는 개념으로 제작된 것이다. 그러나 closed loop 개념은 한 지점에 고정되지 않는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 rotary encoder를 사용하여 원하는 입력만큼만 피치각이 조절되는 open loop 방식을



(a) Original GSRTS



(b) Improved GSRTS

Figure 3 Design Result of GSRTS Modification

장, 회전부 신호 취득 (블레이드 스트레인게이지, 회전불균형 등), 고정부 신호 취득 (고정 불균형, 가속도계 등) 등의 기능을 갖는다.

그림 6은 기존 보유한 NI 장비와 신규로 구입한 NI PXI system으로 구성된 랙(Rack)이다.

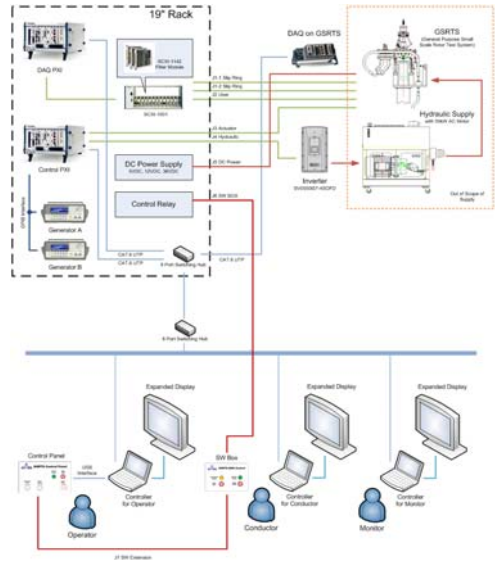


Figure 5 Control/DAQ system Concept



Figure 4 Pitch Actuator(Left:Old, Right:New)

적용하였다. 이러한 개념으로 제작된 피치작동기는 그림 4와 같다.

(3) 제어/데이터 획득 시스템

기존의 제어 PC 및 DAQ system, MIB(Model Interface Box) 등의 노후화로 인한 오작동 및 여러 단점을 보완하고, 기 보유한 NI PXI 및 SCXI 등을 최대한 활용하도록 제어/데이터 획득 시스템을 구성하였다. 그림 5는 제어/데이터 획득 시스템의 개념을 나타낸다. 제어시스템은 유압펌프 속도제어, 피치 제어용 스텝 모터 회전수 제어, DAQ system과 연동 (데이터 공유), 비상 정지 등의 기능을 갖는다.

데이터 획득시스템은 시험장치 운용에 필요한 센서류(로터리 엔코더, 열전대 등)의 연속 데이터 저



Figure 6 Control/DAQ System Rack



Figure 7 Hydraulic Motor and HPU

(4) 유압 모터 및 유압공급장치

기존 GSRTS는 20마력 AC 전기모터를 2기 사용하였다. 그러나 480V AC 전기모터를 사용함에 따라 고질적인 노이즈 문제가 있었다. 이를 보완하고 더 큰 동력을 얻기 위해 55kW 유압모터를 사용하였다. 유압모터를 구동하기 위한 유압공급장치는 별도로 설계/제작하였다. 그림 7은 사용된 유압모터 Rexroth Piston Motor A2FM56와 별도로 제작된 유압공급장치이다.

(5) 기타

축소 로터 시험장치에서 가장 중요한 구성품 중 하나인 6분력 하중 발란스의 교정을 위해 교정 프레임을 별도로 제작하였다. 장치 전체를 가운데 설치하여 6분력 방향으로 하중을 부가할 수 있도록 하였다. 그림 8은 제작된 시험장치 주구조물과 교정프레임이다.

3.3 시험장치 검증

보완이 완료된 GSRTS의 결과를 확인하기 위해 다음과 같은 검증 과정을 수행하였다.

(1) 장치 단독 운용시험

주구조물과 6분력 고정발란스, 유압공급장치, 제어 시스템과 데이터 획득 시스템이 모두 조립된 상태에서 장치 단독 회전시험을 수행하였다. 이는 장치 자체의 건전성을 확보하기 위한 것이며, 그림 10의 결과와 같이 인버터 명령 60Hz에서 최대 회전수 2500rpm을 확인할 수 있었다.

(2) 6분력 고정발란스 교정

본 연구에서 가장 중점을 둔 것은 하중발란스의 정확도였다. 교정프레임을 자체 제작하고, 공인인증이 된 분동(weight)을 사용하여 6분력 고정발란스를 교정하였다. 1차 교정에서는 목표 에러율인 0.5%FS를 넘었으나, 2차 교정에서는 범위 내에 들어왔다. 이는 교정시 하중 부가 방향 및 설치 각도의 정확도에 기인하며, 교정 수행 결과는 표 4에 나타내었다.

(3) 2-blade 회전시험

장치 단독 회전시험과 하중 발란스의 교정을 마치고, 실제 로터의 성능시험을 수행하여 최종적으로

GSRTS 개조/보완의 결과를 확인하였다. 축소 로터 성능시험을 위해 사용된 로터는 티터링 허브(teetering Hub)와 OLS blade이다. 이에 대한 사양은 표 5에 정리하였다.

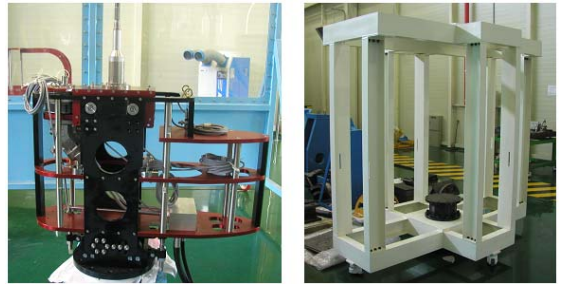


Figure 8 GSRTS Main Frame and Calibration Rig

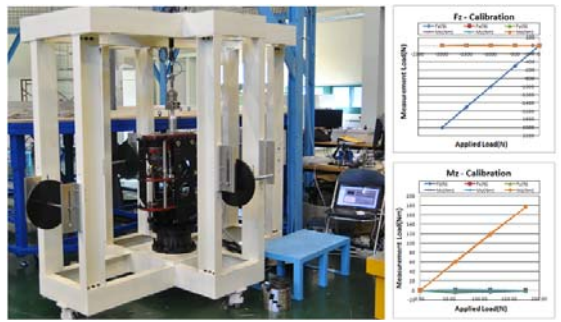


Figure 9 6-components Balance Calibration

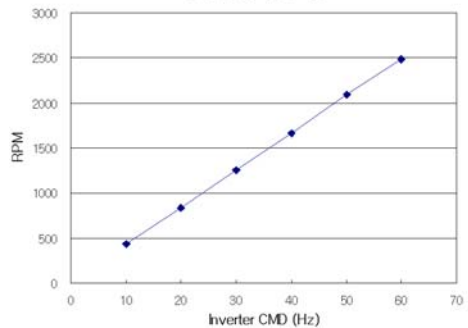


Figure 10 GSRTS Operation Test

Table 4 6-components Balance Calibration Results

Axis	Measurement Error (%)		Non-linearity Error(%)	
	1차	2차	1차	2차
Fx	0.32	0.12	0.16	0.48
Fy	0.58	0.20	0.25	0.49
Fz	0.67	0.04	0.18	0.16
Mx	0.71	0.01	0.19	0.22
My	0.38	0.10	0.14	0.10
Mz	0.61	0.29	0.61	0.42

축소 로터 성능시험에서는 pitch sweep기법과 rpm sweep기법이 있으며, 본 시험에서는 두 가지 방법을 모두 적용하였다. 두 방법에 따른 차이는 거의 없었으며, 로터 전용 해석 코드인 Flightlab과 CAMRAD로 해석한 결과와 비교하였다. 이 결과는 그림 12에 제시하였으며, 타당한 결과를 확보하였다.



Figure 10 Teetering Hub and OLS Blade

Table 5 OLS Rotor Specifications

구분	제원
Radius, R	1047.5976 mm
Length (blade only)	904.65 mm
Chord	101.6 mm
Airfoil	NACA 00012
Twist	None
Solidity, σ	0.06192
Precone, β_p	1.2 deg
Under sling, Zus	9.144 mm
Rotation	Clockwise

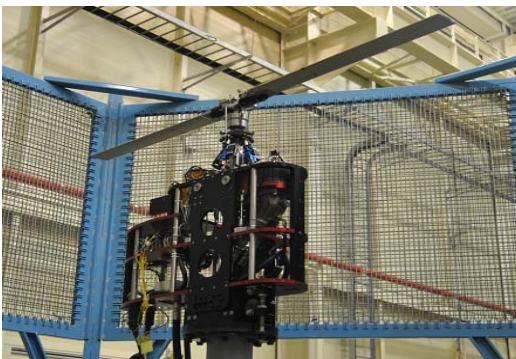


Figure 11 OLS Rotor Performance Test

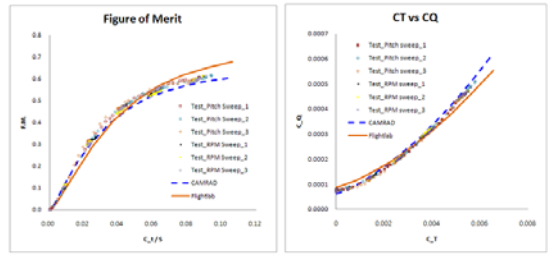


Figure 12 OLS Rotor Performance Test Results

4. 결 론

KARI에서는 축소로터 시험장치 개조를 위해 개조 요구조건을 수립하고 그에 따라 장치 개조를 수행하였다. 장치 개조 결과를 확인하기 위해 장치 단독 운용시험, 하중 발란스 교정, 축소 로터 성능시험을 수행하였다. 특히 최종 검증과정인 축소 로터 성능시험에서는 rpm sweep, pitch sweep 기법을 모두 적용하였으나, 그에 따른 성능 측정치 차이가 거의 없는 것을 확인하였다. 또한 해석치와 비교에서도 타당한 결과를 확보하였다. 이로서 GSRTS는 국제 공동연구 및 향후 풍동시험 등을 수행할 준비를 완료하였다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 주요사업 "친환경 저소음 로터기술 연구" 과제의 연구결과 중 일부임.

참 고 문 헌

- (1) Joo J., Kim J. H., Kim D. K., 2000, "The study on the Small-scaled Rotor System Testing Technology using KARI GSRTS", Proceedings of the KSAS Annual Spring Conference
- (2) Joo J. "An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of a Hingeless Rotor in Hover", SNU, Ph.D. dissertation, 1993
- (3) KARI GSRTS System Manual, 1999
- (4) Lee J. H., Lee W., Kim C. H., Song K. W., and Choi J. S., 2011, " Design and Comprise of Experimental System for Wind Tunnel Test of Small-Scaled Rotor" Proceedings of the KSAS Annual Autumn Conference