



헬리콥터 주로터 블레이드의 동적밸런싱 시험에 대한 데이터베이스 설계 및 적용

윤병일¹, 백승길², 송근웅³, 김덕관⁴

Design and Application of Database System for Dynamic Balancing Test of Helicopter Main Rotor Blade

Byung-Il Yoon¹, Seung-Kil Paek², Keun-Woong Song³ and Deog-Kwan Kim⁴

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

The dynamic balancing test of helicopter main rotor blades is a blade rotation test conducted on the ground to make the track of each blade and the load on each pitch rod to a similar level before the flight tests. The purpose of the test is to reduce the vibration occurring on main rotor system as a result of dissimilarity of each blade. The RTB test has been performed for a long period at Whirl Tower Test Facility located in Goheung Flight Centre, accumulating its data. As the amount of the results has become increasingly enormous the needs for the development of database system has been raised to manage the data with effective method. This research aimed to describe the development of Dynamic-Balancing Database System for the RTB test results. For the design of the database system the informations of RTB test results have been categorized into properties, connecting each others according to its logical meaning, and comprised into a database system with relational elements. It has been shown in this paper that the Dynamic Balancing database system enables to effectively accumulate the RTB test data and to be utilized for the data analysis.

초 록

헬리콥터 주로터 블레이드의 동적 밸런싱 시험은 헬리콥터의 비행시험 전 각 블레이드의 트랙과 피치로드 하중을 동일한 수준으로 조절하기 위해 수행되는 지상회전시험이다. 이러한 동적밸런싱 시험의 목적은 블레이드 간 특성차이로 인해 나타나는 주로터 시스템 진동을 감소시키기 위함이다. 고흥 항공센터의 휘타워 시험설비에서는 오랜 기간에 걸쳐 수리온 주로터 블레이드에 대한 동적밸런싱 시험을 수행하고 데이터를 축적해 왔다. 이에 데이터양이 점차 방대해짐에 따라 시험결과를 효율적으로 관리하기 위한 데이터베이스 프로그램의 개발의 필요성이 제기되어 왔다. 본 연구에서는 휘타워 시험설비에서 수행한 동적밸런싱 시험결과를 바탕으로 구축한 데이터베이스 시스템에 대해 기술하였다. 본 연구에서 구현된 데이터베이스 시스템은 동적밸런싱 시험 결과를 각 정보별로 논리적으로 모델링하고 각각의 데이터가 상호 관계를 이룰 수 있도록 연결하여 관계형 구조를 이루도록 설계되었다. 아울러 본 논문을 통해 기 설계된 데이터베이스 시스템이 동적밸런싱 시험 결과의 축적과 시험 결과 분석에 효과적으로 활용될 수 있음을 보였다.

† Received : May 23, 2019 Revised : July 8, 2019 Accepted : July 27, 2019

¹ Researcher, ² Principal Researcher, ³ Principal Researcher, ⁴ Principal Researcher

² Corresponding author, E-mail : seungkilpaek@kari.re.kr

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Key Words : Helicopter(헬리콥터), Dynamic Balancing(RTB, 로터 동적밸런싱), Relational Database (RDB, 관계형 데이터베이스), Main Rotor Blade(주로터 블레이드), Whirl Tower(휠 타워 시험설비)

1. 서 론

헬리콥터와 같은 회전익 형태의 항공기의 주로터 시스템은 블레이드의 회전을 통해 추력을 발생시키는 핵심 구성품으로 정지 혹은 순항 비행 등 헬리콥터 운용 시 기체의 전반적인 성능을 좌우한다. 주로터 블레이드는 제작에 쓰이는 소재인 복합재의 성형 특성상 제작 공정 과정 시 각 블레이드의 내부 부품의 미세한 위치 편차가 발생하게 되며, 이로 인해 각 블레이드 간의 질량 및 강성 분포 차이 등 블레이드 간 상이성(Dissimilarity)이 나타나게 된다. 이러한 블레이드 간 특성의 차이는 로터 회전수 증가에 따라 원심력 차이 혹은 양력 불균형을 심화시키고 결국 주로터에서 발생하는 1/rev 성분 진동의 주요 원인이 된다. 이 때 발생한 진동은 허브를 통해 동체로 전달되어 승무원의 탑승 피로감에 영향을 미치고 헬리콥터 기체를 구성하는 부품의 피로수명을 단축시킴으로서 기체 전반의 유지보수 문제를 야기한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 비행 시험 전 블레이드 동적밸런싱 시험(Dynamic Balancing 또는 Rotor Track and Balance)과 같은 주로터 시스템의 지상 회전시험을 수행하며, 각 블레이드의 트랙과 피치로드 하중을 동일한 수준으로 조절함으로써 블레이드 간의 특성 차이로 인한 진동을 최소화시키게 된다.

국의 동적밸런싱 관련 연구는 널리 수행되는 연구 분야는 아니지만 그 필요성에 의해 꾸준히 수행되어 왔다. Rosen 등은 블레이드의 Non-Uniformity가 로터 허브에 미치는 영향성을 Sensitivity 행렬식으로 나타내어 트랙과 밸런스를 수학적으로 모델링하였고 [1], Ben-Ari는 Rosen과 함께 실 예제에 Sensitivity 행렬식을 대입하여 트랙과 밸런스에 대한 수학적 모델링을 검증한 바 있다[2].

국의 헬리콥터 개발의 경우, 풍부한 동적밸런싱 관련 연구 경험을 바탕으로 헬리콥터 기체 진동을 저감하고자 HUMS (Health and Usage Management System) 기술에 동적밸런싱 기술을 적용한 사례가 다수 있다. 미군에서는 VMEP (Vibration Management Enhancement Program) 프로젝트의 일환으로 신경망 (Neural Network)을 기반으로 하는 동적밸런싱 프로그램을 개발하여 시험 비행 횟수를 40% 가량 감소시킨 결과가 있다[3]. Eurocopter에서는 Feed-Forward Network 기법을 이용하여 트랙과 밸런스를 수행하는 신경망 기반의 시스템을 개발하였으며[4], Goodrich Aerospace에서는 HUMS 기술에 트랙과 밸런스 알고리즘을 적용하여 IMD HUMS (Integrated Mechanical

Diagnostics HUMS) 기술을 개발한 연구사례도 있다 [5].

국내에서 주로터 블레이드 동적밸런싱 시험은 한국형 기동헬기(KUH, Korean Utility Helicopter)인 수리온의 주로터 시스템 개발을 위해 구축한 한국항공우주연구원의 휠타워 시험설비(Whirl Tower)를 이용하여 수행하였다[6,7]. 2007년부터 2012년까지 수리온 헬리콥터의 개발 완료 이후 2014년까지 호기별 Shipset 단위(1대를 이루는 블레이드 세트를 지칭, 4엽인 수리온의 경우 4개의 블레이드를 1 Shipset으로 함)의 주로터 블레이드 동적 밸런싱 시험을 수행하였고, 이후 2017년까지 블레이드 간 유사성 및 호환성을 고려하여 마스터 블레이드를 이용한 동적 밸런싱 시험을 수행하였다[8]. 현재는 한국항공우주산업(주)에서도 양산용 휠타워를 구축하여 수리온 주로터 블레이드 동적밸런싱 시험을 수행하고 있다.

국내 동적밸런싱 관련 연구로는 주로 동적밸런싱 조절변수 최적화 기법에 대한 연구 사례들이 있다. 휠타워 회전시험 데이터를 바탕으로 유전자 알고리즘을 적용하여 휠타워 동적밸런싱 시험 시 최적의 조절 변수를 산출하는 모델을 개발한 연구 사례[9]가 있으나, 당시 적용 가능한 시험 데이터의 부족으로 실제 동적밸런싱 시험에는 적용되지 못하였다. 이후 다수의 블레이드 시험 결과를 바탕으로 혼합모델을 사용하여 동적밸런싱 시험의 조절변수 최적화 기법 개발에 대한 연구가 수행되었으며 이를 통해 시험의 반복 횟수를 줄이고 시험 효율성을 개선하는 방안을 확보한 연구 사례가 있다[10].

관련 연구 사례에서 보는 바와 같이 시험 결과의 분석과 이를 바탕으로 한 기술의 개발을 위해서는 데이터베이스를 기반으로 한 효율적인 데이터 축적이 필요하다. 앞서 언급한 사례인 VMEP 프로젝트의 동적밸런싱 프로그램의 경우 비행 중 획득된 데이터를 지상 장치인 PC-GBS 데이터베이스에 축적하여 신경망 혹은 선형 모델을 이용한 분석에 활용한 바 있다[11]. 국내 연구 사례로는 T-50 항공기의 플러터 및 진동소음 비행시험 데이터를 효율적으로 축적하기 위해 관계형 데이터베이스를 설계하고 질의처리 및 검색을 통해 데이터 분석에 효과적으로 활용하였다[12]. 그 외 한국형 발사체의 실시간 시험 데이터 저장 시스템(DSS) 개발 사례[13]와 위성 기상탑재체의 원격명령/측정데이터 시험분석 시스템 개발 사례 [14]에서도 데이터베이스 기능을 활용하여 시험결과 분석에 활용하는 등 여러 연구사례에서 시험결과 축적과 분석을 위해 데이터베이스를 활용하고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 한국항공우주연구원의 헬타워 시험설비에서 마스터 블레이드를 이용하여 수행한 동적밸런싱 시험 결과를 바탕으로 구축한 데이터베이스 시스템(Dynamic-Balancing Database, 이하 DBS)을 제시하였다. DBS는 관계형 데이터베이스를 기반으로 하며, 장기간 축적된 동적밸런싱 시험 결과의 각 정보를 논리적으로 모델링하고 각 데이터가 상호 관계를 이룰 수 있도록 구조화하여 데이터베이스를 구현하였다. 또한 데이터베이스 내의 데이터를 선택하여 시험결과를 출력할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

II. 블레이드 밸런싱 시험

2.1 정적 밸런싱(Static Balancing)

주Rotor 블레이드의 밸런싱은 정적밸런싱(Static Balancing)과 동적밸런싱(Dynamic Balancing)으로 구분한다. 블레이드의 정적밸런싱은 회전시험 이전에 지상에서 수행되며, 블레이드 Root부에서 동일한 원심력이 작용하도록 조정하게 된다[15]. 각 블레이드별 원심력을 계산하기 위해 아래 식 (1)을 적용한다.

$$CF = \Omega^2 \times \iiint r \times dm = \Omega^2 \times M_s \quad (1)$$

여기서 CF 는 원심력, r 은 로터 반경, Ω 는 로터 회전수, dm 은 로터 단위부피당 질량, M_s 는 정적 모멘트이다. 위 식 (1)에서 로터 회전수는 각 블레이드에 대해 동일하므로, 정적모멘트(Static Moment)를 동일하게 조정하여 블레이드 회전 시 개별 블레이드에 동일한 원심력이 작용할 수 있도록 한다. 정적모멘트 조정은 Fig. 1과 같이 블레이드 끝에 위치한 정적 균형추(Static Balance Weight)를 이용하여 조정하며, 바깥쪽 4개의 포켓 내의 균형추를 스펀방향으로 위치를 이동하여 무게 중심과 정적모멘트를 조정한다.

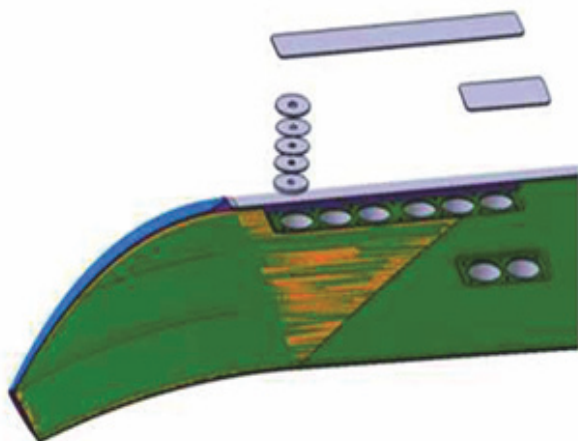


Fig. 1. Weight Balance Pocket [15]

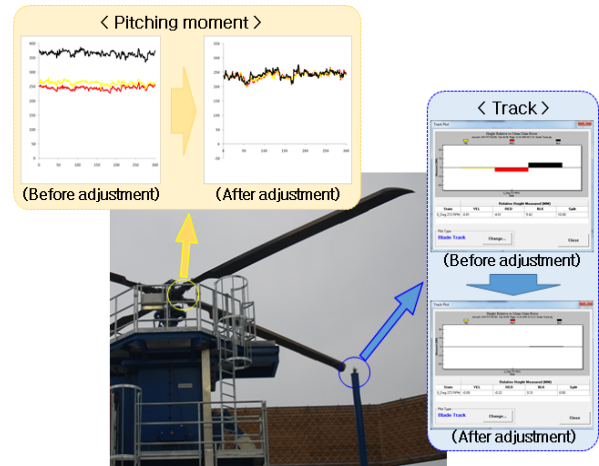


Fig. 2. Measurement of Dynamic Balancing

2.2 동적 밸런싱(Dynamic Balancing)

2.2.1 동적밸런싱 개념

블레이드의 동적밸런싱은, 회전 시 각 블레이드에 동일한 원심력이 작용할 수 있도록 정적밸런싱을 통해 무게 중심과 정적모멘트를 조정한 후 헬타워(Whirl Tower)에 블레이드를 장착하여 시험을 수행한다. 동적밸런싱은 개별 블레이드의 회전 시 그 특성을 유사하게 조절하여 비행 중 헬리콥터 진동을 최소화하기 위한 목적으로 수행되며[15], 이를 통해 회전 시 각 블레이드에 작용하는 양력 및 피칭모멘트(Pitching Moment)를 균일하게 조절한다. 이 과정은 Fig. 2에 나타난 바와 같으며, 양력의 균일한 지는 블레이드의 회전 높이인 트랙(Track)을 측정하여 확인하고, 피칭모멘트가 균일한 지는 로터 허브에 장착된 피치로드의 하중을 측정하여 확인한다.

2.2.2 동적밸런싱 과정

동적밸런싱 시험 과정은 Fig. 3과 같이 진행한다. 동적밸런싱의 대상이 되는 블레이드의 모든 조절변수를 Zero 세팅 후 초기 회전(0L)을 수행하여 피칭모멘트와 트랙을 측정한다. 그리고 측정값을 반영하여 조절변수를 조정 후 두 번째 회전(1L)을 수행하여 재측정을 수행하게 되며 측정값이 시험 요구도에 만족하는지 판별하여 반복 시험 수행 여부를 결정한다.

동적밸런싱 시험 시 시험조건은 2개의 조건으로, 각각 저피치각 조건(Low Pitch Condition)과 고피치각 조건(High Pitch Condition)으로 나뉘며, 각 조건에서 트랙과 피칭모멘트를 측정한다[16]. 이에 대한 개념은 Fig. 4에 제시하였다.

저피치각 조건에서 측정하는 트랙과 피칭모멘트는 기준블레이드와의 차이(ΔTR_{LP} , ΔM_{LP})이며, 아래 식 (2)~(3)과 같이 나타낸다.

$$\Delta TR_{LP} = |TR_i - TR_{Ref}| \quad (2)$$

$$\Delta M_{LP} = |M_i - M_{Ref}| \quad (3)$$

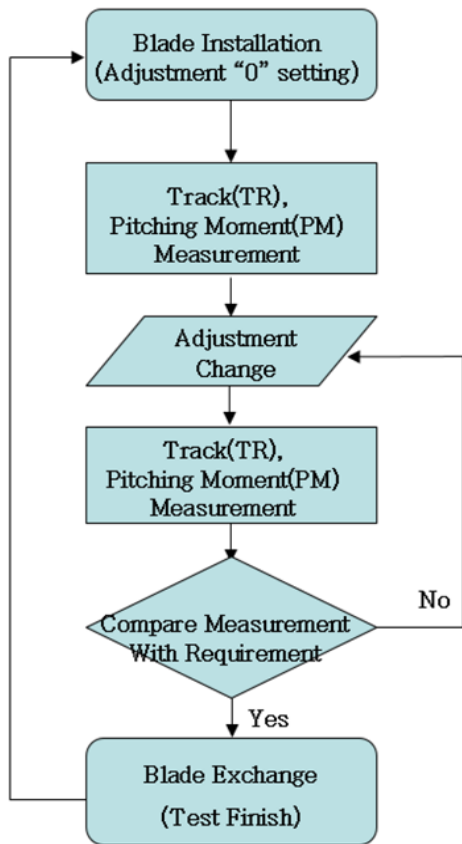


Fig. 3. Dynamic Balancing Procedure [10]

반면, 고피치각 조건에서의 측정값은 기준블레이드와의 차이(ΔTR_{HP} , ΔM_{HP})를 측정하고, 이를 저피치각 조건에서 측정된 값(ΔTR_{LP} , ΔM_{LP})과의 차이(ΔTR_{HP-LP} , ΔM_{HP-LP})를 구하여 나타낸다. 이러한 방법으로 계산되는 이유는 모든 피치각 조건에서 각 블레이드 간 트랙과 피칭모멘트 차이가 동일한 경향을 나타내도록 하기 위함이며 아래 식 (4)~(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta TR_{HP-LP} = |\Delta TR_{HP} - \Delta TR_{LP}| \quad (4)$$

$$\Delta M_{HP-LP} = |\Delta M_{HP} - \Delta M_{LP}| \quad (5)$$

동적밸런싱 시험 완료 여부는 각각 저피치각 조건과 고피치각 조건에서 측정된 트랙과 피칭모멘트 값이 동적밸런싱 요구 범위 이내로 만족하는지에 따라 결정되며, 요구도를 만족하지 못할 경우 블레이드의 조절변수를 조정하여 반복적으로 시험을 수행한다.

2.2.3 블레이드 조절변수

헬리콥터 주로터 블레이드의 동적밸런싱 시험에서 트랙과 피칭모멘트를 요구범위 이내로 조정하기 위해 조절 가능한 변수는 3가지가 있다[16]. 먼저, 조절 변수로는 피치로드 길이를 직접적으로 조절하는 노치(Notch)와 앞선 언급한 블레이드 끝단에 위치한 동적 균형추(Dynamic Balance Weight), 마지막으로 블레이드 뒷전에 장착된 트림탭(Tab)이 있다.

조절변수 중 노치는 피치로드의 길이를 직접적으로 조절하여 블레이드 피치각에 변화를 주게 된다. 피치로드는 나사산에 따라 돌리면 길이가 늘어나거나 줄어들도록 제작되어 있다. 노치는 Fig. 5(a)와 같이 나사산 한 바퀴를 60등분한 장치로 노치에 따라 피치로드를 돌려 길이를 조절한다. 이렇게 변화된 피치각은 해당 블레이드의 양력에 영향을 미쳐 결과적으로 트랙을 변화시킨다.

동적 균형추는 Fig. 5(b)와 같이 안쪽에 위치한 4개 포켓 내의 동적 균형추 개수에 변화를 주어 시위방향 무게에 변화를 주는데 사용된다. 포켓 내에는 40g, 10g, 5g, 3g의 균형추가 일정한 개수로 들어있고, 앞쪽 포켓 내의 균형추와 뒤쪽 포켓 내의 무게가 다른 균형추를 상호 교환하여 시위 방향 무게를 조정하게 된다. 이러한 경우 블레이드 전체 무게와 길이방향 무게 중심에 변화를 주지 않으면서 시위방향으로 무게가 변하여 트랙과 피칭모멘트 측정값에 영향을 준다.

트림탭은 Fig. 5(b)와 같이 블레이드 70~80%R 지점에 장착되어 있으며, 바깥쪽에 위치한 6개의 트림탭의 각도에 변화를 준다. 트림탭의 각도가 변하면 블레이드 단면의 캠버가 변하므로 피칭모멘트 및 양력에 영향을 주어 트랙에 변화가 생긴다.

각 조절변수가 측정값에 미치는 영향은 블레이드의 특성과 시험 환경 조건에 따라 다소 차이가 있지

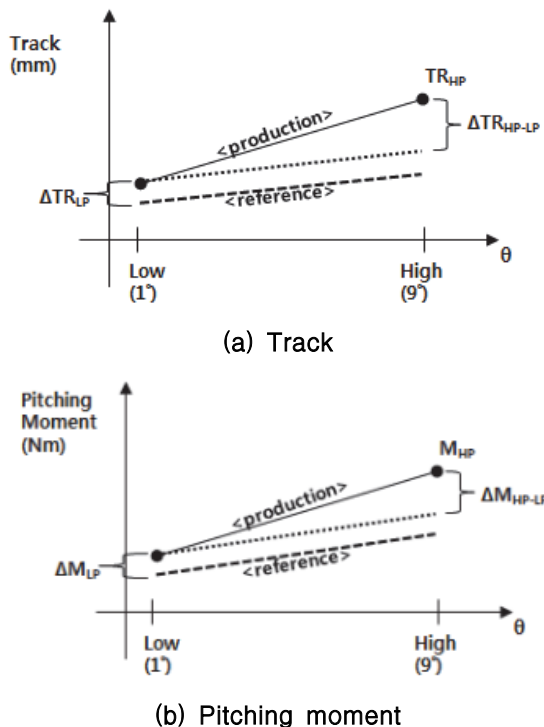
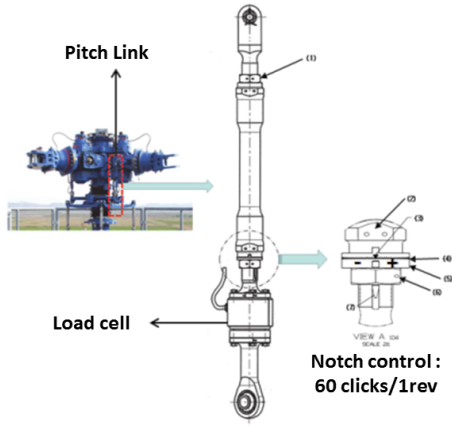
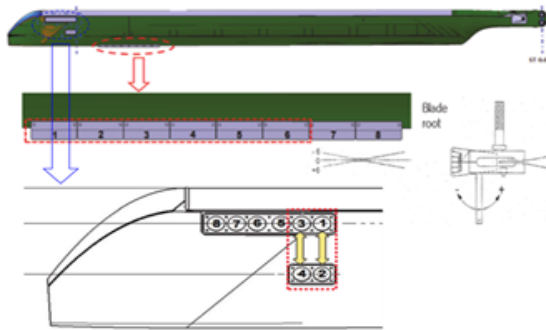


Fig. 4. Dynamic Balancing Concept [16]



(a) Notch control on Pitch Rod



(b) Control of Dynamic Weight and Trim Tab

Fig. 5. Blade Control Parameter [16]

만, 시험 데이터 즉 통계량이 축적됨에 따라 조절변수와 트랙 및 피칭모멘트의 관계에 대한 이해가 깊어지면서 예측모델을 고안할 수 있게 된다.

III. 데이터베이스

3.1 데이터베이스 구성

동적밸런싱 시험 DBS는 최적의 조절변수 산출을 위해 시험결과를 효과적으로 축적하고자 설계하였다. 시험 결과로는 마스터 블레이드를 이용하여 수행한 수리온 헬리콥터 주로터 블레이드 동적밸런싱 시험결과를 데이터베이스화하여 구축하였다. DBS의 실행 프로그램은 오픈소스 프로그래밍 언어인 파이썬(Python)과 오픈소스 데이터분석 패키지인 판다스(Pandas)를 사용하여 작성하였으며 Fig. 6과 같이 동적밸런싱 시험에서 측정된 결과 및 정보 등을 실행 프로그램을 통해 데이터베이스에 입력시킨다. 실행프로그램을 통해 데이터베이스에 입력된 각 데이터는 측정결과(Test Results) 정보와 시험정보(Test Configuration)로 나뉘어 관련 테이블 내 항목별로 입력된다. 데이터베이스 결과는 스프레드시트 프로그램인 MS 엑셀파일 형태로 저장되어 별도의 데이터베이스 프로그램 유무에 관계없이 정보의 공유가 용이하다.

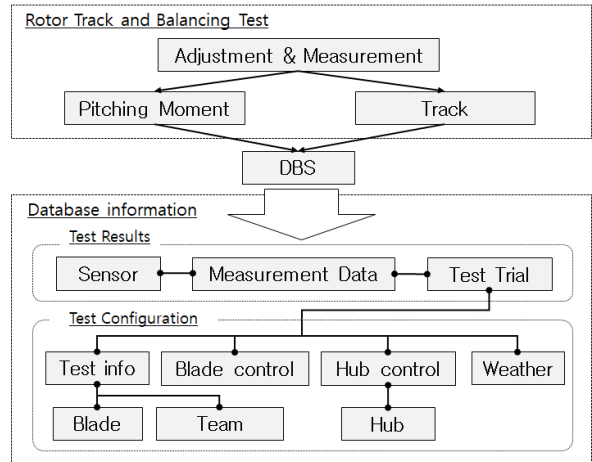


Fig. 6. Database Diagram

3.2 데이터베이스 구조

DBS를 통해 저장된 결과는 각각의 정보에 따라 연관된 데이터와의 상호 유기적인 관계를 이루는 관계형 데이터베이스 구조로 저장된다. 이러한 관계형 데이터베이스는 대용량 데이터의 처리와 관리에 있어 신뢰성이 있고 안정적인 이점이 있다.

데이터베이스를 구성하는 각 테이블에 대한 설명 및 관련 테이블과의 관계구조는 아래와 같다.

3.2.1 측정 결과 정보

데이터베이스의 측정결과(Test Result) 정보는 Fig. 7과 같이 3개의 테이블로 구성되어 있으며, 이는 측정 결과 테이블(Measurement Data)과 시험 시도 테이블(Test Trial), 센서 테이블(Sensor)로 나뉜다.

측정 결과 테이블의 시도(Trial ID)항목은 동적밸런싱 시험 과정의 반복시험을 나타내는 항목으로 트랙과 피칭모멘트 측정값이 요구범위 내에 만족하지 않는 경우에 수행하게 되는 반복시험의 시도 차수를 ID 형태로 나타내었다. 시도ID 항목과 연결된 시험 시도 테이블(Test Trial)에서는 각 시험 시도 별 날짜, 장착된 블레이드, 허브, 블레이드 조절변수, 기상정보 항목에 대한 정보가 저장된다.

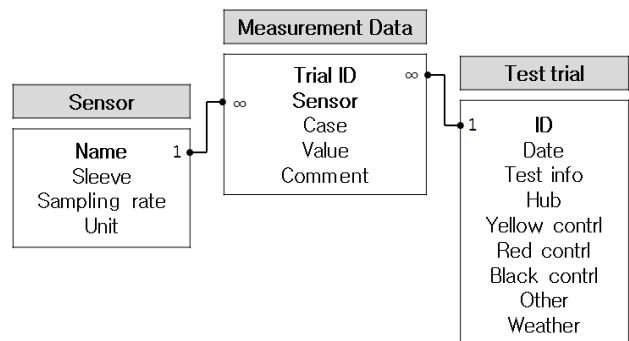


Fig. 7. Test results relation

센서(Sensor) 항목은 트랙과 피칭모멘트 측정 센서를 나타내며, 이와 연결된 테이블인 센서 테이블을 통해서 센서의 상세 정보를 확인할 수 있다.

그 외 시험케이스(Case) 항목은 반복 측정을 나타내는 항목으로, 동적밸런싱 시험 시 트랙과 피칭모멘트의 측정값의 신뢰도를 위해 각 시험조건 당 3~5회 반복 측정하는 과정을 나타낸 것이다. 마지막으로 측정값(Value) 항목에는 각 시험조건에서 측정한 모든 트랙과 피칭모멘트 값이 저장된다.

3.2.2 시험 정보

데이터베이스의 시험정보(Test Configuration)는 Fig. 8과 같이 시험 시도 테이블(Test Trial)의 항목 중 시험 정보(Test Info) 항목과 연결된 테이블인 시험 정보 테이블(Test Info)과의 관계 구조를 이루며 구성되어 있다.

시험 정보 테이블은 블레이드 정보(Blade)와 팀원(Team)에 대한 정보를 담고 있으며, 각각은 블레이드 일련번호(SN)와 팀 번호(Team No.)로 가입되어 관련 테이블과 연결된다.

블레이드 테이블(Blade)에서는 동적밸런싱 시험이 수행된 블레이드의 일련번호(Serial No.)와 정적밸런싱 시험결과 정보(무게(WT), 시위방향 모멘트(CM), 길이방향모멘트(SM))가 저장되며, 팀 번호와 연결된 팀원 테이블(Team)을 통해 시험을 수행한 인원에 대한 정보를 확인할 수 있다.

3.2.3 허브 정보

시험에 사용된 로터 허브 관련 정보는 Fig. 9와 같이 시험 시도 테이블(Test Trial)의 허브(Hub) 항목과 연결된 허브 컨트롤 테이블(Hub Control)에 입력된다. 허브 컨트롤 테이블에는 동적밸런싱 시험 시 저피치각 조건과 고피치각 조건이 되는 콜렉티브 피치각(Collective)과 사이클릭 피치각(Cyclic)에 대한 정보가 있으며, 허브(Hub) 항목과 연결된 허브 테이블(Hub)에는 로터 허브의 유지보수 이력이 입력되어 있다.

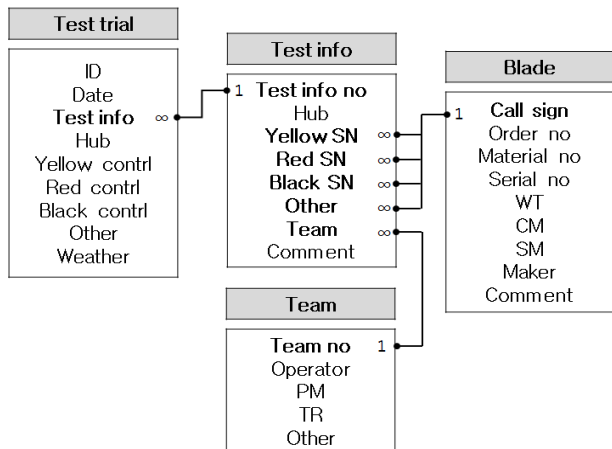


Fig. 8. Test information relation

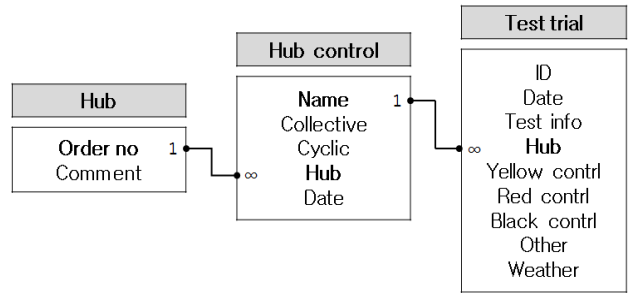


Fig. 9. Hub control relation

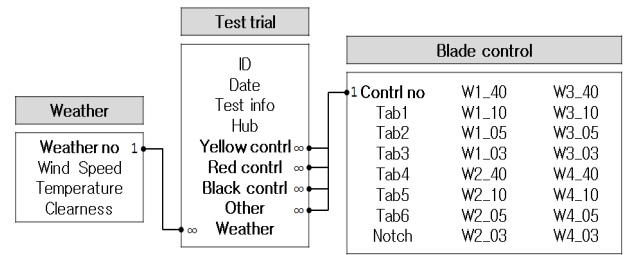


Fig. 10. Blade control and weather relation

3.2.4 조절변수 및 기상 정보

동적밸런싱 시험 시 측정값이 요구 범위 이내에 만족하지 않을 때 반복 시험 시도 전 블레이드의 3 가지 조절변수를 조정하게 된다. 조절변수에 대한 정보는 Fig. 10과 같이 시험 시도 테이블(Test Trial)의 블레이드 컨트롤(Yellow, Red, Black Control) 항목과 연결되는 블레이드 컨트롤 테이블(Blade Control)에 관련 정보가 저장되어 있다.

블레이드 컨트롤 테이블에서는 노치(Notch), 동적 균형추(Dynamic Balance Weight), 트림탭(Tab)의 변화에 대한 정보를 확인할 수 있으며, 트림탭의 경우 조절가능한 6개의 탭 각각의 각도에 대한 정보가 입력되며, 동적 균형추의 경우 각 균형추 포켓(Weight Pocket) 내의 무게별 균형추 개수를 통해 동적 균형추 변화량을 확인할 수 있다.

시험 중 기상조건에 대한 정보는 시험 시도 테이블의 기상(Weather) 항목과 연결된 기상 테이블(Weather)에 저장되며, 풍속, 온도, 운량에 대한 정보가 입력된다.

3.3 시험 결과 입력

동적밸런싱 시험에서 측정된 결과는 엑셀파일 양식에 1차적으로 입력된다. 입력된 결과는 측정값과 각 시험 회차별 조절변수 및 기상정보 등 상기 설명한 데이터 항목에 대한 정보들을 포함하고 있으며, DBS의 실행프로그램을 통해 엑셀파일 내의 데이터를 읽어 측정결과와 시험정보 등 관련 정보별로 나누고 세부 데이터 항목별로 저장하여 데이터베이스로 축적한다. 이러한 과정은 아래 Fig. 11과 같다.

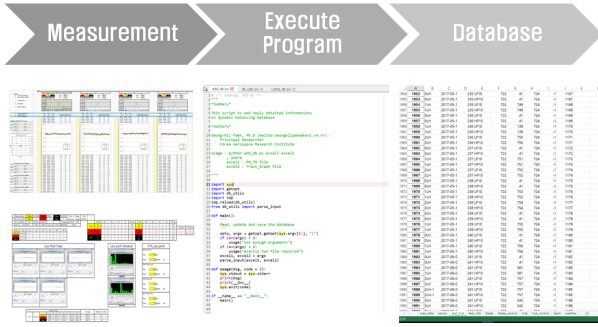


Fig. 11. Database input Procedure

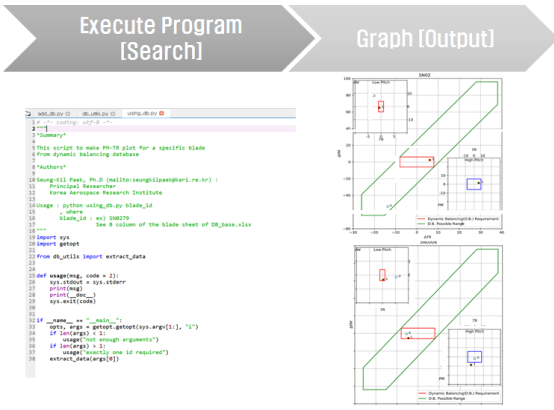


Fig. 12. Database Output Procedure

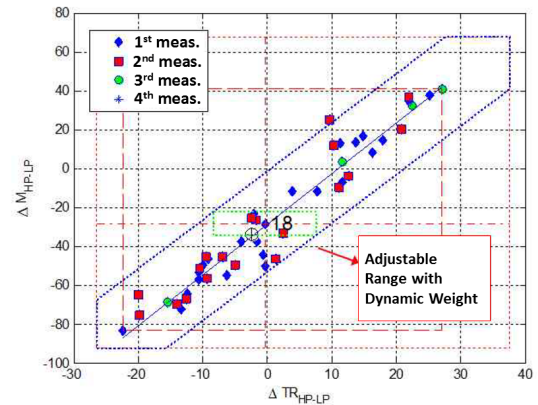
3.4 시험 결과 출력

데이터베이스에 입력된 시험 결과에 대해서 블레이드 결과 그래프를 나타낼 수 있다. 출력 방법은 Fig. 12와 같이 실행프로그램에서 해당 블레이드의 일련번호를 검색하면 그래프의 형태로 결과를 나타낸다. 그래프의 각 지점은 각각 시험시도 수행을 나타내며 많은 지점이 있는 것은 시험 시도가 여러 번 수행되었다는 의미가 된다. 해당 수행 회차의 저피치각과 고피치각에서 측정된 트랙과 피칭모멘트의 차이를 각각 X축이 ΔTR_{HIP-LP} , Y축이 ΔM_{HIP-LP} 인 그래프에 나타내어 그래프의 붉은 범위는 요구조건을 의미하며, 초록 범위는 조절변수로 조정이 가능한 범위를 의미한다.

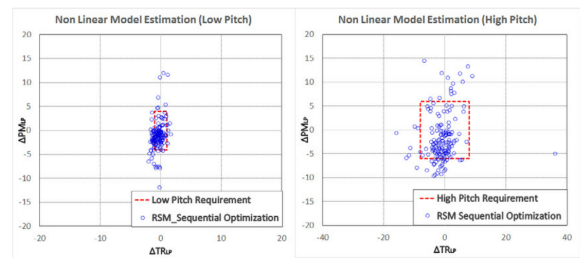
이처럼 데이터베이스의 그래프 출력 기능 통해 각 회차에 수행한 동적 밸런싱 시험 결과가 요구도에 만족하는지를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

3.5 데이터베이스 활용

3년여의 기간 동안 276개 블레이드에 대해 2,200회 이상 동적밸런싱 시험을 수행함으로써 축적된 결과는 데이터베이스를 통해 관련 정보 내 논리적 상호관계를 이루는 세부 항목별로 나뉘어 축적된다. 이러한 관계형 데이터베이스 구조는 대용량 데이터 처리와 관리에 효과적이고 안정적인 이점이 있어 데이터



(a) Example of use of Database [8]



(b) Example of use of Database [10]

Fig. 13. Examples of use of Database

베이스 설계에 자주 활용되는 방법이다. 본 연구를 통해 구축된 데이터베이스는 Fig. 13과 같이 마스터 블레이드 선정을 위한 연구[7]와 동적밸런싱 시험 조절변수 최적화 모델 생성을 위한 연구[9]에 기 활용된 바 있으며, 이를 통해 본 데이터베이스가 시험결과 추적과 이를 활용한 데이터 분석 연구에 용이하게 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 한국항공우주연구원 헬타워 시험설비에서 오랜 기간 수행된 수리온 헬리콥터의 주로터 블레이드 동적밸런싱 시험 결과를 효과적으로 저장 및 관리하기 위한 방안으로 관계형 데이터베이스 기반의 동적밸런싱 시험 DBS를 구축하여 소개하였다. 시험결과 추적 방법과 출력 방법을 설계하였으며, 각 정보별로 분류하고 연관 정보가 관계적인 구조를 가질 수 있도록 하였다. 이를 통해 각 정보에서 추가확장이 용이하도록 하였고, 엑셀과 같은 스프레드시트 형태로 저장하여 정보의 공유를 용이하게 하였다.

향후 동적밸런싱 시험 DBS는 수리온 헬리콥터뿐만 아니라 현재 개발이 진행 중인 소형 무장 헬리콥터의 동적밸런싱 시험의 데이터베이스 구축에도 활용할 예정이다. 아울러 DBS에 저장되는 기상 환경 등의 정보를 통해 기상 조건이 트랙과 피칭모멘트 측

정에 미치는 영향성 분석에도 활용이 가능할 것으로 기대되며, 데이터베이스 내에 저장하는 정보를 추가 확장하여 헬리콥터 동적밸런싱 기술 개발에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

동 연구는 산업통산자원부 소형무장헬기 연계 민수헬기 핵심기술개발사업(과제번호: 10053157) 연구 결과 중 일부임.

References

- 1) Rosen, A., and Ben-Ari, R., "Mathematical Modelling of a Helicopter Rotor Track and Balance: Theory" *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 200, No. 5, 1997, pp. 589~603.
- 2) Ben-Ari, R., and Rosen, A., "Mathematical Modelling of a Helicopter Rotor Track and Balance: Results," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 200, No. 5, 1997, pp. 605~620.
- 3) Giurgiutiu, V., Grant, L., Grabill, P., and Wroblewski, D., "Helicopter Health Monitoring and Failure Prevention Through Vibration Management Enhancement Program" *Proceeding of 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Virginia Beach, May 2000.
- 4) Ferrer, R., Krysinski, T., Aubourg, P. A., and Bellizzi, S., "New Methods for Rotor Tracking and Balance Tuning and Defect Detection Applied to Eurocopter Products," *Proceeding of American Helicopter Society 57th Annual Forum*, Washington, DC., May 2001.
- 5) Bechhoefer, E., and Power, D., "IMD HUMS Rotor Track and Balance Techniques," *Proceeding of IEEE Aerospace Conference*, Vol. 7, March 2003, pp. 3205~3211.
- 6) Kim, D. K., Yun, C. Y., Kim, S. B., Song, K. W., Kang, S. N., and Han, J. H., "A Conceptual Study on the Dynamic Balancing of Helicopter Main Rotor Blade," *Proceeding of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring Conference*, April 2009, pp. 373~374.
- 7) Kim, D. K., Yun, C. Y., Song, K. W., Kim, S. H., Kang, S. N., and Han, J. H., "Dynamic Balancing Test of KUH main rotor blade," *Proceeding of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring Conference*, April 2010, pp. 80~81.
- 8) Song, K. W., Kim, D. K., Kim, S. Y., and Song, J. R., "Selection and Application of Master Blade for Helicopter Main Rotor Blade Dynamic Balancing," *Proceeding of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Fall Conference*, October 2015, pp. 244~249.
- 9) Kwon, H. J., Yu, Y. H., Jung, S. N., and Yun, C. Y., "Development of Dynamic Balancing Techniques of a Rotor System Using Genetic Algorithm," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 12, 2010, pp. 1162~1169.
- 10) Song, K. W., and Choi, J. S., "A Study on Adjustment Optimization for Dynamic Balancing Test of Helicopter Main Rotor Blade," *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 26, No. 6, 2016, pp. 736~743.
- 11) Wroblewski, D., Branhof, R. W., and Cook, T., "Neural Network for Smoothing of Helicopter Rotors" *Proceeding of American Helicopter Society 57th Annual Forum*, Washington, DC., May 2001.
- 12) Kwak, D. I., Paek, S. K., Park, K. D., and Kim, Y. I., "Development of Database System for T-50 Flutter/Vibroacoustic Flight Test Data," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 34, No. 2, 2006, pp. 82~89.
- 13) Choi, K. J., Park, Y. K., and Sun, B. C., "Design and Development of Real-Time Tests Data Storage System(DSS) for System Integration Laboratory of KSLV-II Launch Vehicle" *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2015, pp. 374~378.
- 14) Myung, H. C., Jung, K. P., and Yang, K. H., "Development of AMIGOS (AMI Ground Operation System)-TC/TM(Telecommand/Telemetry)" *The Journal of Aerospace Industry*, Vol. 81, October 2015, pp. 41~54.
- 15) Yun, C. Y., Kim, D. K., Kim, S. Y., and Kim, S. H., "Rotor Blades Balancing for Helicopter Vibration Reduction," *Proceeding of Korean Society for Noise and Vibration Engineering Fall Conference*, October 2012, pp. 87~88.
- 16) Song, K. W., and Choi, J. S., "Helicopter Main Rotor Blade Dynamic Balancing Technology Developments," *The Journal of Aerospace Industry*, Vol. 83, January 2017, pp. 45~63.