論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(11), 981-988(2016)
DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.11.981
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

혼성동력계에서 주요 설계변수가 제동성능에 미치는 효과분석

이종훈*, 황재혁**, 정민지***, 권준용****

Effect of the Design Parameters Change on the Hybrid Dynamometer Braking Performance

Jong-Hoon Lee*, Jai-Hyuk Hwang**, Min-Ji Jeong*** and Jun-Yong Kwon****
Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU*,
Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University**,***
The 7th Research and Development Institute, ADD, Korea*,****

ABSTRACT

Dynamometer is a device for testing the performance of the brake and it is composed of a test zone, the mechanical inertia zone, the electric motor and the control zone. Hybrid dynamometer is a way to compensate for the loss of mechanical inertia in accordance with the brake operation by using an electric motor to reduce the size of the mechanical inertia with the advantage that can be tested in the relatively small size of the mechanical inertia and low cost. In this paper, design the proper size of hybrid dynamometer in the laboratory level with the space constraints, analysed the effect of critical parameter on the braking performance of hybrid dynamometer such as changing the friction coefficient. With this study, could get the results of guideline to judge the poor friction material by measuring the torque of the electric motor to compensate the energy loss due to a reduced mechanical inertia.

초 록

브레이크 동력계는 브레이크의 성능을 시험하는 장치로 시험구역, 기계적 관성구역, 전기모터 및 제어구역으로 구성된다. 혼성동력계는 기계적 관성 구역의 크기를 줄이고 전기모터를 이용하여 브레이크 작동에 따른 기계적 관성의 손실을 보상하는 방식으로 상대적으로 작은 기계적 관성 크기와 적은 비용으로 시험이 가능한 장점이 있다. 본 논문에서는 공간적 제약이 있는 실험실에 적절한 혼성동력계를 설계하였고, 설계된 혼성동력계에서 마찰계수 변화 등 주요 설계변수가 혼성동력계 제동성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통해 축소된 기계적 관성에 의한 에너지 손실을 보상하기 위한 전기 모터의 토크를 측정하면 마찰재의 불량여부를 판단 할 수 있는 결과를 얻었다.

Key Words : Brake System(브레이크계통), Hybrid Dynamometer(혼성 동력계) Smart Material Pump(지능재료펌프), Piezoelectric Actuator(압전 작동기)

† Received : October 8, 2016 Revised : October 18, 2016 Accepted : October 19, 2016
** Corresponding author, E-mail : jhhwang@kau.ac.kr

Ⅰ. 서 론

브레이크 동력계(Dynamometer)는 실제 차량 또는 항공기에 장착될 브레이크 시스템의 중요한 성능(감가속도, 열 흡수능력 등)을 실제 운용 상태와 유사한 조건을 만들어서 입증하는 장치이다. 차량 또는 항공기에 장착된 브레이크처럼 모든 도로조건 또는 실제 복잡한 상황을 모두 모사 할 수 있는가의 관점에서 보면 동력계의 능력은 주요 특성에 대한 비교자료를 제공하는 것으로 제한될 수 있지만, 도로 주행시험의 소요를 줄일 수 있고 설계를 보완할 수 있다[1]. 브레이크 성능을 시험하는 동력계는 일반적으로 관성 동력계 (Inertia Dynamometer)와 홈 동력계(Chase Dynamometer)로 나눌 수 있다. 상대적으로 작은 크기의 홈 동력계는 비용이 적게 들고 시험시간을 줄일 수 있으나 주로 마찰재의 표면에 있는 홈의 표본을 실험하는데 사용된다[2].

관성동력계는 크게 시험구역(Test Section), 관성구역(Inertia Section), 동력계를 구동하기 위한 모터구역(Motor Section) 및 제어구역으로 구성된다. 관성 동력계는 Fig. 1(a)와 같이 관성구역의 전체가 제동성능을 충족하는 항공기의 질량과 같은 등가관성으로 이루어지는 완전 기계식 관성 동력계 (Full Mechanical Inertia Dynamometer)와 Fig. 1(b)와 같이 기계식 관성구역 대신에 전기모터를 이용하는 전기식 관성동력계로 분류 할 수 있다. 전기식 관성동력계는 전적으로 전기모터만의 토크를 이용하는 전기모터 동력계와 Fig. 1(c)와 같이 전기모터와 기계적 관성을 혼합하여 이용하는 혼성 동력계 (Hybrid Dynamometer)로 분류된다[3,4].

완전 기계식 관성 동력계를 이용하여 브레이크의 성능을 시험하는 경우에는 항공기 좌/우 주륜 휠에 작용하는 하중보다 같거나 큰 등가관성 (Equivalent Inertia)을 갖도록 기계적 관성의 크기를 설계하여야 하므로 항공기의 중량이 증가 할수록 기계적 관성의 크기도 커져야 한다. 특히 실험실 수준에서는 공간적인 제한으로 인하여 요구되는 등가관성을 만족하는 동력계를 설치하는데 한계가 있다. 따라서 공간 및 비용의 제한을 받는 실험실에서 요구되는 브레이크의 성능을 입증 할 수 있는 동력계가 필요하다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 전기모터를 이용하여 관성력을 모사하는 방법이 연구되었는데 기계적 관성구역의 크기를 축소하는 대신에 전기모터의 토크를 증가시키는 방법이 제안되었다[3,4].

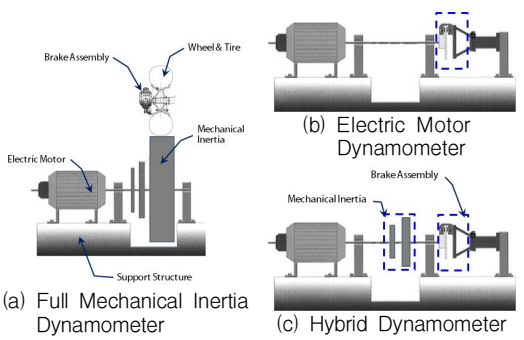


Fig. 1. Types of inertia dynamometer

본 논문에서는 공간적 제약이 있는 실험실 수준에 적절한 혼성동력계를 설계하였다. 설계된 혼성동력계에서 마찰재의 마찰계수 등 주요 설계변수 변화가 혼성동력계의 제동성능에 미치는 효과를 집중적으로 분석하였다. 기존 연구에서는 브레이크 디스크 마찰계수의 평균값을 적용하여 해석을 수행하였으나 본 연구에서는 시간에 따라 마찰계수가 증가하는 점을 고려였다. 혼성동력계의 제동성능 분석은 다음과 같은 절차로 수행되었다.

첫째, 항공기 브레이크 동적 요구 성능을 설정하기 위해서 설계 대상 항공기를 FAA 핸드북을 참고하여 선정하였으며, 최대이륙중량은 2,658 kg (5,862 lb)이며 제동시작속도는 36 m/sec (70 knots)이다. 동적제동조건에서의 운동에너지는 미국 군사규격서 또는 미국 연방항공청 규정[FAR Part 23.735]을 적용하여 산출한다. 브레이크가 흡수해야 하는 최대 운동에너지는 이륙 포기 제동시 발생하며, 862,030 N-m이다[5,6].

둘째, 혼성동력계를 시험구역, 관성구역, 모터구역 및 제어구역으로 구분한 후 MATLAB [R2014a version] Simulink를 이용하여 모델링 하였다. 시험구역은 브레이크 압력발생을 위한 지능재료펌프, 및 브레이크 조립체로 구성된다. 관성구역은 단순한 원판형 기계구조물이며, 모터구역은 ABB사의 직류모터 자료를 이용하였다. 전기 모터의 제어는 완전기계식과 혼성동력계의 기계적 관성 회전속도 차이를 되먹임 하는 방식이다.

셋째, 기계적 관성의 크기를 반경 및 길이(폭) 방향으로 변화시키면서 브레이크 작동시 발생하는 기계적 관성 손실을 전기모터의 토크를 이용하여 어느 정도 보상 할 수 있는지에 대해서 분석하였다. 기존 연구에서는 마찰재의 마찰계수가 일정하다고 가정하고 성능을 예측하였으나, 실제로는 브레이크가 작동하는 동안 마찰계수는 증가하므로 이를 반영하여 브레이크의 감속시간을 계산하였다.

Ⅱ. 혼성 동력계 설계

2.1 혼성 동력계의 구성

혼성동력계는 Fig. 2와 같이 시험구역, 기계적 관성구역, 동력계를 구동하기 위한 모터구역 및 제어기 구역으로 구성된다[3,4].

혼성 동력계를 이용한 관성 모사 시 발생하는 손실은 실제 자동차나 항공기에서 발생하는 차량 손실과 이와 무관한 비 차량손실로 구분 할 수 있다[3,4].

(1) 차량 손실(Vehicle Losses)
 (가) 타이어와 지면과의 마찰에 의한 타이어 회전저항에 의한 손실
 (나) 공기저항 등 차량이나 항공기 형상과 관련된 손실
 (다) 휠/타이어 베어링 손실
 (라) 동력전달장치의 유해성 손실

(2) 비 차량 손실(Non Vehicle Losses)
 (가) 전기모터 베어링 손실
 (나) 풍손(Windage Loss)
 (다) 전기모터의 타성 토크(Coasting Torque)에 의한 손실

차량 손실은 충분한 자료가 있거나 제조회사에서 이들 손실에 대한 특정한 가용 모델을 제공하면 모사가 가능하다. 실제 차량의 운용에서와 또 다른 현상은 직류전기모터의 특성상 자장에 전류를 공급하거나 정지했을 때 타성 토크(Coasting Torque)가 발생한다는 것이다[3]. 이미 보유하고 있는 전기 모터의 용량이 일정한 경우에 브레이크 작동에 의한 기계적 손실을 보상하는 방법은 Jijie Ma 등이 제안하였으나, 이들의 혼성 동력계 수학적 모델은 두 가지 가정이 전제되어야 한다[4].

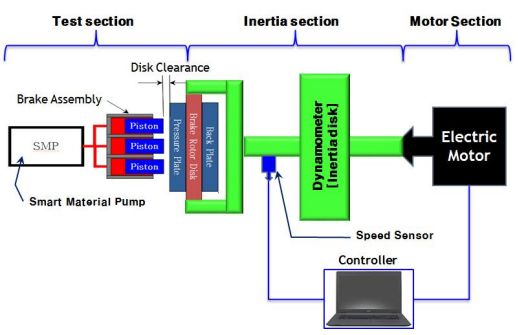


Fig. 2. Sketch of hybrid dynamometer

(1) 제동과정 중 감가속도는 일정하다고 가정
(2) 전기모터의 미리 설정된(Pre-established) 보상주기는 실제 브레이크 작동시간보다 짧다고 가정

Jijie Ma 등이 설계한 혼성동력계는 동작 및 제어 시스템의 단순화를 위해서 전기모터의 토크가 감가속도에 의해서 작동 될 수 있는 일정한 값으로 고정하고, 총 보상 에너지는 앞서 산출한 값과 미리 설정한 보상주기로 계산한다. 관성 모사는 브레이크가 작동하는 동안 미리 설정한 보상주기에 따라서 전기모터의 토크를 일정하게 유지함으로서 구현된다. 감가속도 및 전기적 관성이 높은 경우에는 보상주기가 길어지며, 감가속도 및 전기적 관성이 낮은 경우에는 적절한 보상주기를 가져야 한다. 이 모델은 보상해야 하는 기계적 관성이 급격히 증가하는 경우 오차가 커지는 단점을 가지고 있다[4].

본 논문에서는 위에서 제안된 모델과 달리 시간에 따른 마찰재의 동적 마찰계수 변화를 고려하여 감가속도가 변화하는 경우에 대해서도 모사를 할 수 있도록 하였다. 완전 기계식 관성 동력계와 혼성동력계를 모델링하여 두 개의 동력계를 동시에 구동하여 기계적 관성 차이에 의해 발생하는 에너지 손실을 전기모터의 토크를 변화시켜 모사 할 수 있도록 동력계를 설계하였다.

2.2 시험구역의 모델

2.2.1 지능재료 펌프

브레이크 작동을 위한 유압은 적층형 압전재료를 이용한 지능재료펌프를 이용하였다.

Figure 3은 지능재료 펌프를 이용한 해석 결과로 최대 토출 압력은 140 Hz에서 738.17 psi 이고, 정상제동에 필요한 450 psi에 도달하는 시간

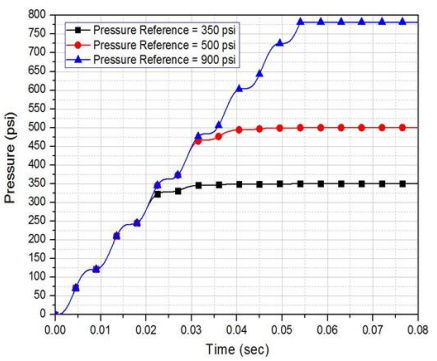


Fig. 3. Simulation result of pump outlet pressure(with closed loop)

은 약 30 msec이내이다[7,8].

2.2.2 브레이크 조립체

브레이크 조립체는 완전 디스크 형태(Full Disk Type)으로 6개의 브레이크 피스톤을 가지고 있는 단판(Single Disk) 브레이크이다[7]. 피스톤에 가해지는 제동력(F_B) 및 제동토크(T_B)는 각각 식(1)과 같이 구할 수 있다[9,10].

$$F_P = A_P \times P_P \tag{1}$$

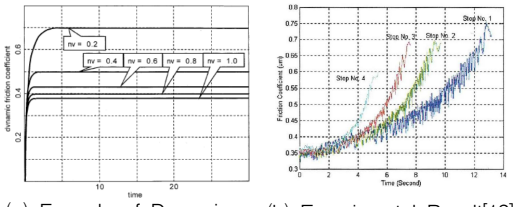
$$F_B = \mu_d \times N_B \times F_P$$

$$T_B = F_B \times R_P$$

여기서, F_P는 브레이크 피스톤의 작동력, A_P는 브레이크 피스톤 전체면적, P_P는 피스톤의 작동압력, μ_d는 마찰재의 마찰계수, N_B는 마찰면의 수(디스크 당 2면), R_P는 타이어 중심에서 브레이크 피스톤 중심까지의 거리이다. 혼성동력계는 모터 축에 직접 브레이크 조립체를 연결하여 시험하므로 휠/타이어 모델은 제외 하였다.

2.2.3 마찰재의 마찰계수

마찰재는 통상적으로 12가지 이상의 다른 재료로 구성되어 있다. 이 재료의 구성과 마찰층(Friction Layer) 및 재료와 마찰층의 거동은 아직 정확하게 알려진 바 없다. 마찰재를 생산하는 회사마다 고유의 산출식을 가지고 있으며, 마찰재의 최적화는 반복-오차법을 이용하여 이루어진다. 통상적으로 마찰재의 마찰계수는 0.1~0.9사이의 값을 가지며, 디스크 마찰열과 마찰력이 증가함에 따라서 감소하는데 이를 열화(Fading)라고 한다. 또 다른 영향은 시간에 대한 마찰계수의 주기적인 변화(Periodic Change)이며, 이러한 현상들에 대한 물리적인 설명은 알려지지 않았다. G. P. Ostemeyer는 이를 브레이크에서 발생하는 열과 마모 및 미끄럼 저항과의 관계식 제안하였으며 시간변화에 대한 마찰계수의 변화는 Fig. 4(a)와 같다[11]. 일반적으로, 완전 기계식 동력계를 이용한 브레이크 시스템 시험 시 동적 마찰계수의 평균치를 적용한다. W. Y. Loh 등은 동력계의 동적 거동 모사를 위하여 마찰재(3 종류)별로 축소형 동력계를 이용하여 시험을 수행한 결과를 바탕으로 초기 제동온도 및 초기 속도 조건하에서 가해진 제동력에 대한 순간적인 마찰계수를 구할 수 있는 실험식을 제안하였으며, 저금속성 마찰재(Low Metallic Friction Material)에 대한 시간변화에 따른 마찰계수 실험 결과는 Fig. 4(b)와 같다[12]. 본 논문에서는 Fig. 4(b)에서 제시된 실험결과를 이용하였다.



(a) Formula of Dynamic Friction Coefficient[11] (b) Experimental Result[12]

Fig. 4. Dynamic friction coefficient with time

2.3 관성구역의 모델

관성구역은 기계적인 구조물로 구성되며, 한쪽은 브레이크 조립체 로터부분과 연결되어 맞물려 돌아가며 다른 한 쪽은 전기 모터에 연결되어 전기모터의 구동력에 의해 회전한다. 미군사규격서 MIL-W-5013L 4.3.19.2에 의하면 기계적인 관성만 이용하여 항공기의 운동에너지(KE, Kinetic Energy)를 모사하여 품질인증시험을 수행하는 경우에는 동력계의 등가관성(IE, Inertia Equivalent) 중량이 주륜 휠에 작용하는 하중보다 크거나 같아야 한다[10].

$$KE = \frac{1}{2}\frac{W_m}{g} V_b^2 = \frac{1}{2} I_{dyn}\, \omega_{dyn}^2 \tag{2}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{IE}{g} V_{dyn}^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{IE}{g} R_{dyn}^2\right)\omega_{dyn}^2$$

$$I_{dyn} = \frac{IE}{g} R_{dyn}^2 = \frac{1}{2} m_{dyn} R_{dyn}^2 \tag{3}$$

$$\therefore IE = \frac{1}{2} m_{dyn}\, g$$

$$I_{dyn} = \frac{1}{2}\frac{W_{dyn}}{g} R_{dyn}^2 = \frac{\pi}{2g} R_{dyn}^4\, L_{dyn}\, \rho_{dyn} \tag{4}$$

기계적인 관성만 이용하여 항공기의 운동에너지 모사하는 완전기계식 동력계와는 달리 혼성동력계는 기계적 관성을 축소한 형태이다. 여기서, W_m은 주륜 휠에 작용하는 하중, g는 중력가속도, L_{dyn}는 동력계의 길이[m], R_{dyn}는 동력계의 반경[m], V_b는 제동시작속도, V_{dyn}는 동력계의 접선속도, W_{dyn}는 동력계의 중량[Kg], ω_{dyn}는 동력계의 회전각속도, ρ_{dyn}는 동력계의 밀도[Steel = 0.284 lb/in^3 = 0.00788 kg/cm^3] 이다[10,13].

2.4 모터구역의 모델

DC 모터의 천이상태에서 아마추어 회로의 전

Table 1. DC Motor Data

Item	DMI 225S	DMI 225U	DMI 225X
Power, P[kW]	267	289	290
Nominal armature current, I_N [A]	471	718	717
Motor Torque, T [N m]	1,980	2,272	2,618
Efficiency, η[%]	90.0	90.2	90.5
Nominal, n [rpm]	1,288 @440V	1,217 @440V	1,058 @440V
Maximum, n_2 [rpm]	2,900	2,900	2,561
Resistance, $R_a[m\Omega]$	74	30	34
Inductance, $L_a[mH]$	1.42	0.68	0.78
Moment of Inertia of motor J_M $[kg/m^2]$	3.0	3.4	3.8
Weight [kg]	1,000	1,160	1,340

압 식은 다음과 같다. 여기서, V_S는 공급전압(Source Voltage), R_a는 모터의 저항, i_a는 모터 아마추어 전류, L_a는 모터의 인덕턴스 및 $K_e\phi\omega_M$는 역기전력(Back EMF)이다[14,15].

$$V_S = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_e \phi \omega_M \quad (5)$$

전기 모터 용량의 영향성을 분석하기 위한 전기 모터의 자료는 ABB사의 DC Motor를 참고하였으며 주요 성능은 Table-1과 같다[16].

2.5 혼성 동력계 제어방법

혼성 동력계는 기계적 관성을 축소하였으므로 브레이크 동작 시 완전 기계식 관성 동력계에 비해 상대적으로 빠르게 속도가 감소하게 된다. 이 속도차이에 의해서 축소된 기계적 관성에 의한 에너지 손실이 발생하는데 이를 전기 모터의 토크를 이용하여 보상한다. 기존 연구에서는 감가속도 및 모터의 토크가 일정하다고 가정하고 모터 토크의 보상주기를 조절하여 브레이크 동작에 따른 에너지 손실을 보상하는 방법을 사용하였다[4]. 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 시간에 따라 브레이크 디스크의 마찰계수가 증가하고 이에 따라 감가속도가 증가하므로 완전 기계식 동력계의 기계적 관성 회전속도와 혼성동력계의 기계적 관성 회전속도 차이를 전기모터의 토크를 이용하여

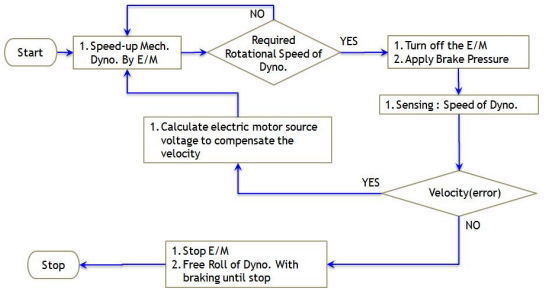


Fig. 5. Control logic of hybrid dynamometer

보상하는 방법을 적용하였다.

III. 시뮬레이션 결과 및 토의

3.1 혼성 동력계 기본적인 특성

요구조건을 충족하는 동력계의 크기는 미국 군사규격(MIL-W-5014)에 의하면 최소 직경이 45 inch(1.143 m)이므로 동력계 기계적 관성의 길이(또는 폭)를 조정하여 산출하면 동력계 기계적 관성의 최소크기는 0.5715 m(반경) x 0.33 m(길이)이다.

동력계 기계적 관성의 크기 차이에 대한 제동시간을 비교하기 위해서 브레이크 작동 시 축소된 기계적 관성의 에너지 손실을 보상하지 않는 조건에서 기계적 관성의 반경을 0.5 m로 줄인 경우를 기계적 관성의 반경이 0.5715인 경우와 비교하면 Fig. 6과 같다. 요구되는 항공기의 운동에너지를 모사하기 위해서 기계식 관성의 반경이 0.5715 m에서 0.5 m 로 줄어든 경우 회전수가 약 600 rpm에서 약 900 rpm으로 증가된다. 요구되는 회전수에 도달하도록 전기모터를 이용하여 동력계를 작동시키고 12초에 브레이크 압력을 가

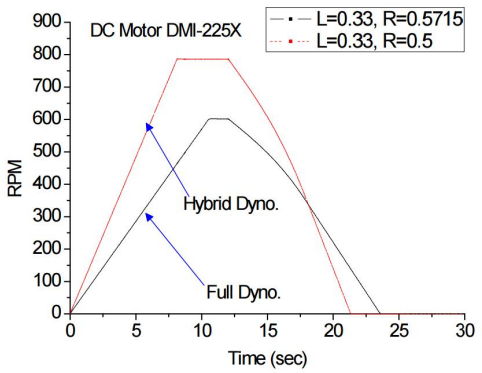


Fig. 6. Comparison of full vs. hybrid dynamometer

하여 정지 할 때까지의 시간을 산출하면 기계적 관성의 반경이 0.5 m 인 경우에 21.33초, 0.5715 m 인 경우에 23.58초로 2.25초의 차이가 발생한다. 이는 요구되는 운동에너지를 맞추기 위해서 중량을 줄이고 회전수를 증가시키면 실제 항공기의 제동성능이 향상되는 것처럼 나타나게 되므로 동력계를 이용한 브레이크 성능시험은 등가관성 중량이 2.3절에서 언급한 조건을 충족한 상태에서 수행되어야 한다.

3.2 기계적 관성 크기의 영향성 분석

기계적 관성의 길이(폭)과 반경 변화에 따른 혼성동력계의 기계적 관성 및 무게를 계산하여 비교하면 Table 2 및 Table 3과 같다. 기계적 관성은 반경보다는 길이(또는 폭)를 줄이는 것이 효과적으로 기계적 관성을 줄일 수 있다.

Figure 7 및 Fig. 8은 혼성동력계의 길이를 각각 0.33m 및 0.2m인 경우에 대하여 반경을 0.5715 m에서 단계적으로 0.3 m까지 변경하면서 두 동력계의 회전속도 차이를 전기 모터의 토크로 보상한 결과를 비교한 것이다. 혼성 동력계는 브레이크 작동 시 축소된 기계적 관성에 의한 에너지 손실을 전기 모터의 토크를 이용하여 보상하는 방식이므로 전기 모터의 토크가 제한됨에 따라서 보상하는데 한계가 있다. Table-1에서 제시된 모터 자료를 기준으로 분석한 결과 유사한 290 kW 급 모터 중에서도 토크가 상대적으로 큰 전기 모터를 사용해야 축소된 기계적 관성에 의한 에너지 손실을 적절하게 보상 할 수 있다. Table-1에 제시된 전기모터 중 상대적으로 큰 토크(2,618 N-m)를 발생시키는 경우에도 Fig. 8(d)와 같이 기계적 관성 크기의 차이가 큰 경우에는

Table 2. Comparison of mechanical inertia

Inertia $[kg-m^2]$		L_{dyn} [m]	
		0.33	0.2
R_{dyn} [m]	0.5715	***435.7[100%]***	264.1[61%]
	0.5	255.3[59%]	154.7[36%]
	0.4	104.16[24%]	63.37[15%]
	0.3	33.09[8%]	20.05[5%]

Table 3. Comparison of dynamometer weight

Weight $[kg]$		L_{dyn} [m]	
		0.33	0.2
R_{dyn} [m]	0.5715	***2,668[100%]***	1,617[61%]
	0.5	2,042[77%]	1,238[46%]
	0.4	1,307[49%]	792.2[30%]
	0.3	735.2[28%]	445.6[17%]

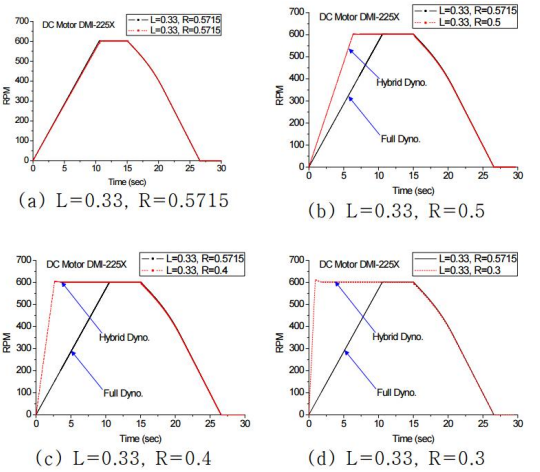


Fig. 7. Characteristics of hybrid dynamometer[1]

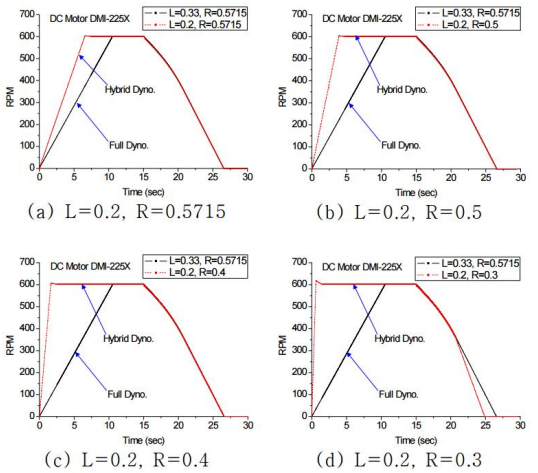


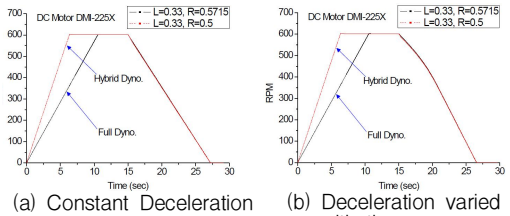
Fig. 8. Characteristics of hybrid dynamometer[2]

보상하는데 한계가 발생한다.

3.3 디스크 마찰계수 영향성 분석

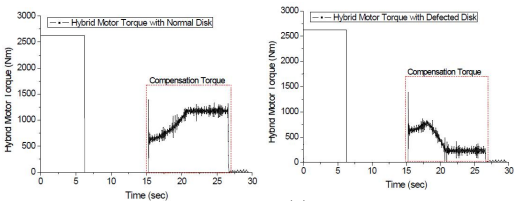
디스크 마찰계수가 혼성동력계를 이용한 시험 시 제동성능에 주는 영향은 크게 시간에 따른 디스크 마찰계수의 변화 여부와 마찰계수 불량 여부의 두 가지로 구분하였다.

첫째, 브레이크가 작동하는 동안 마찰계수가 일정한 경우와 시간에 따라 증가하는 경우를 비교하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a)는 혼성 동력계의 기계식 관성의 물리적 크기가 0.5 m (반경) x 0.33m (길이)로 동일하고, 마찰계수가 평균값(0.48)으로 일정한 경우이고 Fig. 9(b)는 마찰계수가 시간에 따라 0.34에서 0.62까지 변하는 경우이다. 평균 마찰계수를 적용한 결과 제동시간은



(a) Constant Deceleration (b) Deceleration varied with time

Fig. 9. Comparison of deceleration



(a) Torque compensation [Normal Disk] (b) Torque compensation [Defected Disk]

Fig. 10. Comparison of normal vs. defected disk

12.22초, 시간에 따라 마찰계수가 변화하는 경우의 제동시간은 11.58초로 0.64초 감소한다. 따라서 브레이크의 성능분석 시 브레이크 디스크의 평균 마찰계수를 적용하면 제동시간이 증가하므로 이를 단축시키기 위해서 보수적으로 설계하게 되고 구성품 중량이 증가 될 수 있다.

둘째, 혼성동력계에서는 불량 디스크라 하더라도 완전기계식 동력계의 기계적 관성 회전속도와 혼성동력계의 기계적 관성 회전속도 차이를 전기 모터의 토크를 이용하여 보상하므로 Fig. 7(b)와 같이 정상적인 브레이크 디스크와 동일한 제동성능을 가지는 결과를 얻게 된다. 따라서 디스크의 마찰계수가 요구수준을 충족하는지 판단하기 위해서는 축소된 기계적 관성에 의한 에너지 손실을 전기 모터의 토크로 어느 정도 보상했는지를 분석해야 한다. 혼성동력계에서 사용되는 브레이크 디스크의 불량 여부를 판단하기 위해서 혼성동력계 기계적 관성의 길이가 0.33 m, 반경이 0.5 m 인 경우에 대하여 마찰계수를 정상범위보다 감소시켜서 이에 대한 영향성을 분석하였다. 정상적인 마찰계수는 Fig. 4(b)와 같이 0.32~0.6의 범위를 가지며, 불량인 디스크의 마찰계수가 시간 변화에 따라서 0.32~0.4의 범위를 가진다고 가정하였다.

Figure 10(a)는 정상적인 브레이크 디스크에 대해서 전기 모터가 기계적 관성 차이를 보상한 결과이고, Fig. 10(b)는 결함이 있는 브레이크 디스크에 대해서 보상한 결과이다. 브레이크 디스크 마찰계수가 큰 경우에는 브레이크 작동에 따라 동력계의 회전속도가 급격하게 감소하므로 기준이 되는 완전 기계식 동력계와의 회전속도 차이가 커지므로 축소된 기계적 관성에 의한 에너지 손실도 증가하고 보상해야 하는 전기모터의 토크도 증가한다. 반대로 브레이크 디스크 마찰계수가 낮은 경우에는 두 동력계의 회전속도 차이가 정상적인 경우보다 감소하므로 보상해야 하는 전기모터의 토크도 감소한다. 따라서 혼성동력계를 이용한 시험 시 설계목표로 설정한 브레이크 디스크의 마찰계수의 충족여부는 전기 모터 토크에 의한 보상 수준을 기준으로 판단이 가능하다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 지능재료 펌프를 이용한 브레이크 시스템의 성능을 실험실 수준에서 시험하기 위한 혼성 동력계(Hybrid Dynamometer) 설계 주요 변수(기계적 관성의 크기, 마찰계수)에 대한 영향성을 MATLAB Simulink로 모델링 후 모사하여 분석하였다.

첫째, 기계적 관성의 크기를 줄이기 위해서는 반경보다는 길이(또는 폭)를 줄이는 것이 효과적이다. 혼성 동력계는 축소된 기계적 관성에 의한 에너지 손실을 전기 모터의 토크를 이용하여 보상하는 방식이므로 전기 모터의 용량 제한에 따라서 보상하는데 한계가 있다. 선정된 전기 모터 자료를 기준으로 분석한 결과 유사한 290 kW 급 전기 모터 중에서 토크가 상대적으로 큰 전기 모터를 사용하면 기계적 관성의 크기를 0.4 m (반경) x 0.2m (길이)까지 줄일 수 있었다. 전기 모터의 토크가 증가하면 전기 모터의 중량이 증가하는 단점이 있다.

둘째, 실제로 브레이크가 작동하는 동안 마찰계수는 시간에 따라 증가하므로 평균 마찰계수로 가정하는 경우 보다 제동시간이 감소한다. 브레이크 디스크의 평균 마찰계수를 적용하면 제동시간이 필요 이상으로 증가하게 되며, 혼성동력계의 설계가 보수적으로 이루어짐을 확인할 수 있었다. 만일, 마찰계수가 요구수준 보다 낮은 불량 마찰재의 경우에는 보상하는 전기모터의 토크가 상대적으로 낮아지므로 마찰재의 불량여부를 판단 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2013년도 국방과학연구소의 기초연구연구비 지원(ADD-13-01-08-24)을 받아 수행되었으

며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1) Ann Johnson "From Dynamometers to Simulations : Transforming Brake Testing Technology into Antilock Brake Systems", Fordham University, Bronx, NY, USA, 2001, Chapter 4. pp. 199～201.

2) Talib Ria Jaafar, Mohamad Soib Selamat, and Ramlan Kasiran "Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development", www.intechopen.com.

3) James K. Thompson, Aaron Marks, "Inertia Simulation in Brake Dynamometer Testing", SAE Technical Paper 2002-01-2601

4) Jijie Ma, Boda Wu, Xiaoyu Liu and Jingyang Sun "A New Method of Inertia Simulation in Brake Dynamometer Testing", SAE Technical Paper Series 2008-01-2578.

5) J. H. Lee, J. H. Hwang, J. Y. Yang, Y. H. Joo, J. S. Bae, J. Y. Kwon, "Design of the Compound Smart Material Pump for Brake System of Small · Medium Size UAV", Journal of The Society for Aerospace System Engineering, Volume 9, No. 3, 2015, pp. 1～7.

6) J. H. Lee, J. H. Hwang, J. Y. Yang, Y. W. Ju, J. S. Bae, J. Y. Kwon, " Design of Compound Smart Material Pump for an Aircraft Brake System", Proceedings of 2015 Asian Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, May 20-23, 2015.

7) Y. H. Joo, J. H. Hwang, J. Y. Yang, J. S. Bae, J. H. Lee, J. Y. Kwon, "On the Performance Test of the Piezoelectric- Hydraulic Pump", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Science, Volume 43, No. 9, 2015, pp. 822～829.

8) M. J. Jeong, J. H. Hwang, J. S. Bae, J. Y. Kwon, "On the Pressurization Characteristics of Small-Piezoelectric Hydraulic Pump for Brake System", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Science, Volume 43, No.11, 2015, pp. 963～970.

9) Cleveland Wheels & Brake, AWBPC 00001- 12/USA, "Product Catalog".

10) Nak Yoon Choi, Han Young Ko, Jong Hoon Lee, "Small Aircraft Manual-Power Generating Type Brake System Design and Analysis Report", ASDC-501-980853, 1998, pp 5～8.

11) G.P. Ostermeyer, "Friction and wear of brake systems", Forschung im Ingenieurwesen 66(2001), 2001, pp 267～272.

12) Wei-Yi Loh, R. Hecht Basch, D. Li and P. Sanders, "Dynamic Modeling of Brake Friction Coefficients", SAE Technical Paper Series 2000-01-2753.

13) http://www.matweb.com/

14) Emad Said Addasi, "Modelling and Simulation of DC-Motor Electric Drive Control System with Variable Moment of Inertia", ACEEE Int. J. of Electrical and Power Engineering, Vol. 4, No.1, Feb. 2013.

15) Austin Huges, "Electric Motors and Drives, Fundamentals, Types and Application", Third Edition, ELSEVIER, pp. 82～102

16) ABB Co. Ltd., DC Motor Data.