

# Dynamometer 시험을 통한 ABS 효율 계산

## Braking Efficiency Calculation of Antiskid Brake System of a Fixed-Wing Aircraft

이 기 창\*, 전 정 우\*, 황 돈 하\*, 김 용 주\*\*, 구 대 현\*

(Ki-Chang Lee, Jeong-Woo Jeon, Don-Ha Hwang, Yong-Joo Kom, Dae-Hyun Gu)

**Abstract** - In the development of Antiskid Brake System(ABS) for a fixed-wing aircraft, the braking efficiency is the most essential parameters to evaluate the ABS, especially in slippery road conditions. The braking distance and landing distance of the aircraft depends on it. Since the ABS has been designed and implemented as a subsystem of the aircrafts, the braking performance was evaluated under dynamometer test, where the dynamometer emulates the aircraft mass. Under simulated wet road conditions, the dynamometer starts to be braked. This paper suggests practical braking efficiency calculation methods and the results and finally compares each method.

**Key Words** : HILS(Hardware In-the Loop Simulation); Dynamometer Test; ABS(Antiskid Braking System); Braking Efficiency

### 1. 서 론

항공기 착륙시스템에 사용되는 미끄럼방지 제동장치(ABS)는 항공기의 착륙 시 제동거리의 단축과 Flat Tire 방지, Skid 방지 등을 통하여 최적의 제동효율을 발휘하도록 하는 안전장치이다. 지난 수 년 간의 연구를 통하여, 국산 수출용 훈련기에 장착될 목적으로 미끄럼방지 제동장치가 연구되었다. 항공기 미끄럼방지 제동장치의 핵심 부품인 Mark IV 타일의 디지털 브레이크 제어 장치(Brake Control Unit, BCU) 및 유압 조절 밸브가 개발되어 Hardware In-the Loop Simulation (HILS)를 통하여 그 성능이 검증되었다.[1][2][3]

이러한 연구를 바탕으로, 개발된 미끄럼방지 제동장치의 최종 성능평가를 위하여 항공기 무게의 1/2을 모의한 Dynamometer를 활용한 제동 성능평가를 실시하였다. 그림 1에 Dynamometer 시험을 하기 위한 시스템 구성도를 보인다. 시험은 Dynamometer와 바퀴에 부착된 Wheel Speed Transducer로부터 나오는 바퀴속도 신호를 제어 및 모니터링 하고, 타이어나 노면의 마찰계수를 얻기 위해 Wheel 장착 Jig에 Load Cell을 장착하여 제동토크를 측정하였다.

#### 1.1. 다이내모미터의 동역학 모델

개발된 ABS의 성능을 평가하기 위한 다이내모 시험을 수행하기 전 단계로써, 다이내모의 동역학 모델을 구성하여 이를 HILS에서 먼저 시험하였다. 이를 위한 다이내모의 모델은 다음 그림 2와 같이 구성된다. 다이내모의 선속도와 타이어의 선속도는 접지점에서 상호 일치한다. 또한 다이내모의 타이어 사이의 마찰력만이 다이내모에 브레이크 마찰력으로 작용한다고 가정하였다.

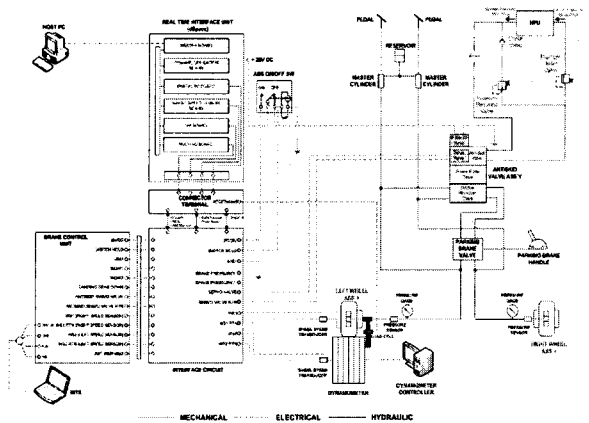


그림 1. 다이내모 시험을 위한 시스템 구성도  
Fig. 1. Setup for Dynamometer Test

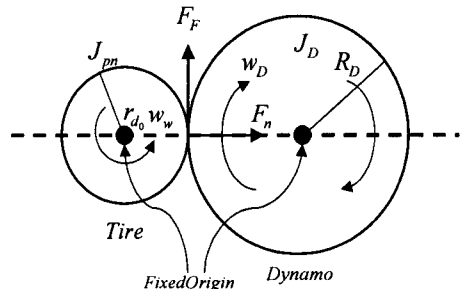


그림 2. 다이내모미터와 바퀴의 제동 모델  
Fig. 2. Dynamometer and wheel model

저자 소개

\*한국전기연구원 산업전기연구단

\*\*한국전기연구원 융합기술연구단

그림 2로부터 동역학 방정식을 유도하면 (1)과 같다.

$$\frac{d\omega_D}{dt} = \frac{1}{J_D} (-\mu F_n R_D) \quad (1)$$

이때,  $\omega_D$ 는 다이노미터의 휠 속도,  $J_D$ 는 다이노미터 관성 모멘트,  $\mu$ 는 다이노미터와 타이어의 마찰계수,  $F_n$ 은 타이어가 다이노미터에 접촉할 때의 수직력, 그리고  $R_D$ 는 다이노미터의 반경이다. 다이노미터 시험에 사용된 다이노미터의 질량과 관성 모멘트는 1개의 바퀴를 가지는 1/2 항공기의 제동을 위한 값으로 보정되었다.

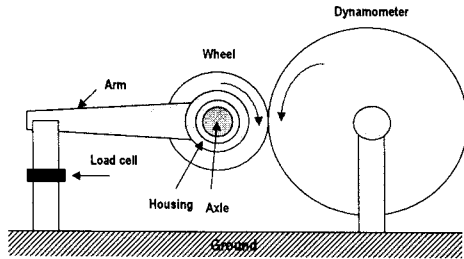


그림 3. 마찰계수 측정을 위한 실험준비  
Fig. 3. Setup for measurement of friction coefficient

### 1.2. 노면 마찰계수 측정

그림 2의 Load-cell로부터 측정된 모멘트 값과 타이어와 휠의 회전 모멘트, 그리고 제동 모멘트의 합력으로 계산된 효과로부터 타이어에 작용하는 마찰력으로 역으로 산출하고, 그 마찰력으로부터 마찰 계수를 구하며, 그때의 식은 다음과 같다.

$$M_{net} = (J_w + J_{pn}) \frac{d\omega}{dt} - M_{br} + M_{fr} \quad (2)$$

여기서,  $M_{net}$ 은 load-cell로부터 측정된 모멘트 값의 합 모멘트 값이고,  $M_{br}$ 과  $M_{fr}$ 은 각각 제동 모멘트와 마찰 모멘트를 의미하고,  $(J_w + J_{pn}) \frac{d\omega}{dt}$  항은 타이어와 바퀴의 회전 모멘트를 의미한다. 위의 마찰 모멘트로부터 (3)과 같이 마찰 계수를 계산하여, HILS 시험을 통해 예측한 결과 값과 비슷한 경향을 보임을 확인하였다.

$$\mu_s = \frac{M_{fr}}{r_d \times F_n} \quad (3)$$

## 2. ABS의 성능평가 방법 - 제동 효율 계산 방법

MIL-B-8075D에 의하면, 항공기용 ABS(Antiskid Brake System)의 성능을 평가하기 위한 방법은 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법과 다이노미터 테스트에 의한 방법으로 나뉘어 질 수 있다.

### 2.1. 컴퓨터 시뮬레이션 방법

착륙제동 시스템의 실험실적 테스트로는 컴퓨터 시뮬레이션과 다이노미터 테스트로 구성된다. 컴퓨터 시뮬레이션은

타이어, 바퀴, 브레이크, 항공기 동체 및 항공기 공기역학 동역학이 포함된다. 또한 타이어 또는 바퀴의 슬립에 따른 마찰계수의 특성변화도 고려되어야 한다. 이용 가능한 최대 바퀴와 지면의 마찰계수는 0.05에서부터 최대 마찰계수  $\mu_{max}$ 까지 해석되어야 한다. 제동거리 효율  $\eta$ 는 아래 식과 같다.

$$\eta = \frac{X_{BRK\_MIN}}{X_{BRK}}, \text{ 단, } X_{BRK\_MIN} = \frac{\dot{x}_0^2}{2\mu_{Max}g} \quad (4)$$

단  $\mu_{Max}$ 는 이용 가능한 최대 마찰 계수이고,  $g$ 는 중력가속도,  $\dot{x}_0$  진행방향 항공기 초기속도이다.

### 2.2. 다이노미터 테스트 방법 및 제동 효율

유압 테스트 벤치, 타이어, 바퀴 및 제동시스템 등의 실제 하드웨어를 사용함으로써 소프트웨어 시뮬레이션을 보완하고, 향상시킨다. 다이노미터 테스트를 통해, 제동압력 효율, Drag 효율 및 제동토크 효율이 성능비교를 위해서 사용될 수 있다. MIL-B-8075D에 의하면 제동 효율은 다음과 같은 방법으로 정의된다. 제동 효율은 제동의 전 시간구간동안 측정되어야 하며, 이러한 다양한 방법에 의해 계산된 제동효율의 값을 서로 비교할 수는 없지만, ABS의 제동 효율을 나타내는 척도가 된다.

#### 2.2.1 제동 압력 효율

제동 압력 효율은 측정된 제동압력 시간 그래프에서, 측정된 제동 압력의 적분값과 슬립이 발생하는 사이의 압력의 최대 값들을 연결한 직선의 적분 값의 비로 정의된다.

#### 2.2.2 제동 모멘트 효율

제동 모멘트 효율은 측정된 제동 모멘트의 시간 그래프에서, 측정된 제동 모멘트의 시간 적분 값과 슬립이 발생하는 사이의 모멘트의 최대 값들을 연결한 직선의 시간 적분 값의 비로 정의된다.

#### 2.2.3 제동 토크 효율

제동 토크 효율은 측정된 제동 토크의 시간 그래프에서, 측정된 제동 토크의 시간 적분 값과 슬립이 발생하는 사이의 토크의 최대 값들을 연결한 직선의 시간 적분 값의 비로 정의된다.

#### 2.2.4 제동 거리 효율

제동거리 효율은 주어진 제동 시스템이 발휘할 수 있는 최소 거리와 실제 제동거리의 비로 정의된다.

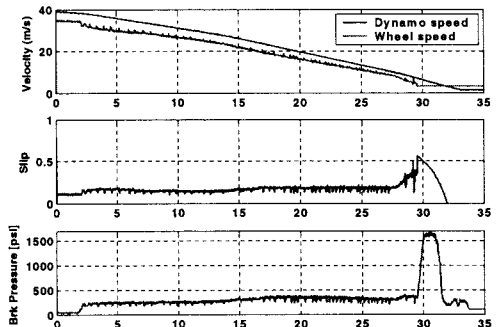


그림 4 다이노미터 제동 시험 결과  
Fig. 4 Low Friction Coefficient load test with ABS ON

### 3. 다이노미터 시험 방법 및 결과

#### 3.1. 다이노미터 시험 방법

항공기 중량 3,866 (lbf)를 모의한 다이노미터에 대해서, 초기속도 75 knots의 속도로 제동을 수행하였다. 다이노미터의 표면 및 바퀴의 표면에, 윤활용 기름을 뿌려서, 젖은 노면 조건을 모의하고, BCU를 동작시켜서, Antiskid Brake 모드에서 동작시켰다. 이러한 윤활용 기름을 살수한 다이노미터의 젖은 노면은 최대 마찰계수가 0.2 정도로 유지됨을 확인하였다.

#### 3.2. 다이노미터 시험 결과 및 제동효율 계산

항공기가 75 knots의 초기속도로 착륙 후, 충분히 자세가 안정화 된 2 초 후에 조종사가 제동 페달을 최대로 밟는 것을 가정하였다. 그림 4에 이러한 다이노 시험을 수행했을 때에 취득된 데이터를 현시하였다. 다이노미터와 바퀴의 속도는 약 0.1 정도의 슬립을 유지하면서, 최적으로 제어됨을 알 수 있다. 그림 5 ~ 8에 이 제동 시험동안 측정된 제동 압력과 제동 모멘트 값과 계산된 마찰계수 및 제동거리를 나타내었다. 또한, 그림 5 ~ 7에는 값들의 최대값을 연결한 직선과 그 적분을 추가적으로 나타내었고, 다양한 방식으로 계산된 제동효율의 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1. ABS의 제동 효율 계산 결과

	제동효율 (%)
제동 압력 효율	97.96
제동 토크 효율	87.24
제동 모멘트 효율	97.91
제동거리 효율	76.94

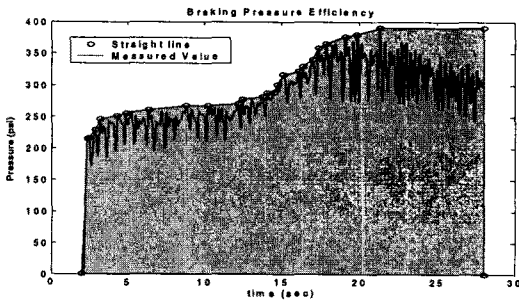


그림 5 제동 압력 적분에 의한 제동효율 계산  
Fig. 5 Efficiency by Braking Pressure Integral method

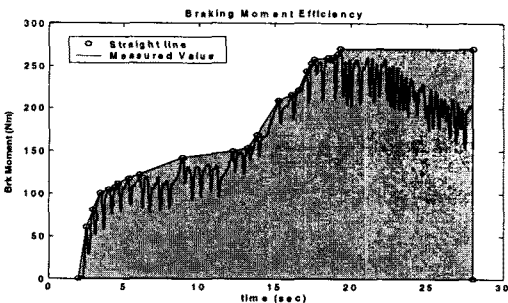


그림 6 제동 모멘트 적분에 의한 제동효율 계산  
Fig. 6 Efficiency by Braking Moment Integral method

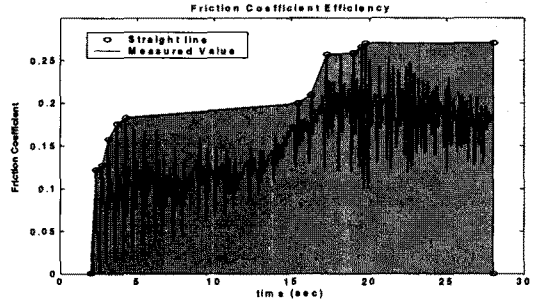


그림 7 마찰계수 적분에 의한 제동효율 계산  
Fig. 7 Efficiency by Friction Coefficient Integral method

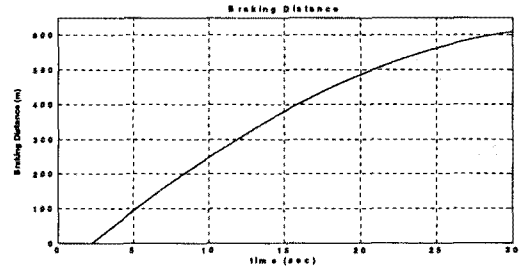


그림 8 제동 거리  
Fig. 8 Braking Distance

### 5. 결론

HILS 시험 및 실시간 시뮬레이션을 통하여 개발된 수출용 훈련기급 항공기의 미끄럼방지 제동장치의 최종 성능평가를 위하여, 다이노미터 시험을 실시하였다. 이러한 성능평가 시험은 MIL-B-8075D에 정의된 제동시스템의 성능평가 지침을 충실히 따라, 다양한 종류의 제동 효율을 계산하였다. 이러한 다양한 종류의 제동 효율은 상호 직접적인 비교는 불가능하지만, 향후 항공기 ABS의 장착시험 및 상용화에 적극 반영될 예정이다.

### 참고문헌

- [1] Jeong-Woo Jeon, Ki-Chang Lee, Don-Ha Hwang, Yong-Joo Kim, "Development of a dynamic simulator for braking performance test of aircraft with anti-skid brake system," Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol 2, pp.518-523, July, 2002.
- [2] Jeong-Woo Jeon, Gui-Aee Woo, Ki-Chang Lee, Don-Ha Hwang, Yong-Joo Kim, "Real-time test of aircraft brake-by-wire system with HILS & dynamometer system," Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, pp.322-327, June, 2004.
- [3] J.W. Jeon, G.A. Woo, K.C. Lee, and Y.J. Kim, "Real-time HILS Development for the Test of Aircraft ABS System," The Spring Meeting of the Korean Society for Aeronautical and Space Science, pp.470-471, Korea 2003.