

항공기 제동장치의 마찰·마멸 특성 및 신뢰도 예측

장동관#, 김대은*

Friction and Wear Characteristics and Reliability Estimation of Aircraft Brake System

Dong-Kwan Jang[#], Dae-Eun Kim^{*}

ABSTRACT

Pin-on-disk and hardness tests using mechanical components of M-20J aircraft braking system were performed to identify the friction and wear characteristics. The intention of this work was also to analyze a 5-year term maintenance record of an M-20J aircraft used for flight training at Hankook Aviation University, and to determine the reliability of the brake system of an M-20J aircraft. The mean wear coefficients of the lining sliding against the brake disk were compared between the test and reliability estimation to obtain a predictive wear model.

Key Words : Aircraft Brake(항공기 브레이크), Friction coefficient(마찰 계수), Wear coefficient(마멸 계수), Reliability estimation(신뢰도 예측)

기호설명

- V = wear volume
- k = wear coefficient
- L = load
- x = sliding distance
- P = hardness
- t = flight time
- n = number of landing
- η = scale parameter
- β = shape parameter
- γ = location parameter

1. 서론

항공기 제동장치(Brake System)는 착륙장치의 양쪽의 주바퀴(Main Wheel)에 장착되어 지상에서 방향전환과 항공기를 정지시키기 위한 제동능력을 제공한다. 브레이크의 작동은 발에 의해 페달에 힘을 가하게 되면 유압에 의해 브레이크 피스톤에 힘이 전달되어 브레이크 디스크(Disc)의 양쪽면에 붙어있는 라이닝(Lining)을 조여 줌으로써 마찰력을 유발하여 제동을 하게 된다.^{1,2} 이러한 마찰력으로 인해 브레이크 디스크와 라이닝은 마멸을 일으키게 되는데 Pin-On-Disk 실험을 통해 이들 부품들의 마찰과 마멸특성을 파악함으로써 설계자료로 활용할 수 있을 것이다.³

접수일: 2003년 1월 23일; 게재승인일: 2003년 8월 14일
 교신처: 한국항공대학교 비행교육원
 E-mail: dkjang@hau.ac.kr, Tel: (02) 300-0321
 * 연세대학교 기계공학부

항공기 브레이크 디스크와 라이닝은 마멸이나 파손에 의해 수리가 불가능하고 정해진 규격 이하에서 교환해야 하는 품목들이다. 따라서 정비기록의 분석을 통해서 마멸에 의한 교체시기를 마멸고장(Wear-out Failure)으로 간주하고, 교체시기를 비행시간과 착륙횟수를 기준으로 Weibull 확률밀도 함수에 적용시키면 신뢰도 예측함수를 구할 수가 있다. 신뢰도 예측을 통해 이들 부품에 대해 명확한 수요예측과 예비품목 확보에 참조자료 활용할 수 있어 예방정비가 가능하다.⁴

또한, 실험을 통해 얻은 브레이크 디스크에 대한 라이닝의 마멸계수와 실제 비행상황을 신뢰도 예측에 적용하여 산출된 마멸계수를 비교함으로써 마멸특성을 파악하는데 서로 보완될 수 있을 것이다.

2. 항공기 제동장치의 마찰·마멸 실험

2.1 Pin-On-Disk 실험

2.1.1 실험편 및 실험장치

브레이크 디스크의 실험편의 재질은 주철(Cast Iron)이며 M-20J 항공기의 브레이크 디스크를 Fig.1 과 같이 원형 그대로 Pin-On-Disk 실험장치에 장착하였다.

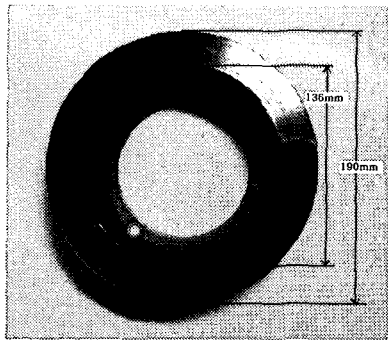


Fig. 1 Brake disc specimen

본 실험에 사용된 라이닝은 비석면(Asbestos-Free)의 Semi-Metallic 계의 복합재이고, 실험편은 Fig. 2 에서 보는 것과 같이 라이닝의 접촉면이 실험장치에 직접 접촉할 수 있도록 면에 수직방향으로 잘라 (b)와 같이 5mm 의 아크릴봉에 부착하여 편의 팁(Tip)의 지름이 0.9mm 가 되도록 원추형태로 가공하였다.

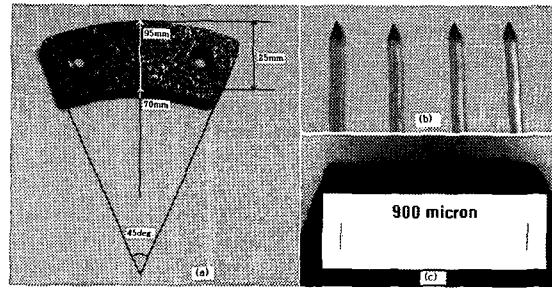


Fig. 2 Brake lining Specimen

2.1.2 실험 방법 및 조건

Pin-On-Disk 실험을 위해 브레이크 디스크 및 라이닝을 Fig. 3 과 같이 Pin-On-Disk 실험장치에 설치하였다.

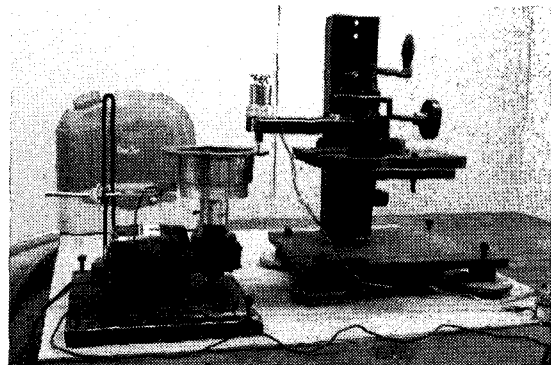


Fig. 3 Pin-on-disk tester

디스크의 회전속도는 비행중 일반적인 활주속도가 5.14m/s 에서 10.28m/s 이고 지면과 접촉한 항공기의 타이어의 반경이 21.6cm 이므로 분당 회전수로 환산하면 각각 227RPM 과 455RPM 이 된다. 라이닝과 접촉되는 디스크의 중심반경이 8.25cm 이므로 브레이크 디스크와 라이닝간의 선속도는 각각 1.96m/s 와 3.93m/s 가 된다. 시편의 실험 초기 면적은 팁(Tip)의 지름이 0.9mm 이므로 2.8mm² 가 되고 하중은 실험장치에 부여할 수 있는 최대하중인 0.5kg(4.9N)를 적용하여 초기압력은 17.86kg/cm² 가 되나 접촉면적이 늘면서 적용압력은 점차 감소한다. 실험시간은 227RPM 에서 5 시간과 455RPM 에서 3 시간으로 거리로 환산하면 약 33.5 km 에서 43.5km 를 접촉한 상태에서 상대운동을 한 셈이며 실험조건을 정리하면 Table 1 과 같다.

Table 1 Pin-on-disk experimental condition

Test No.	Rotating Speed	Contact Radius	Sliding Speed	Contact Time	Sliding Dist.
#1	227 RPM	85.4 mm	7.3 km/h	5hr	36.5 km
#2	227 RPM	78.4 mm	6.7 km/h	5hr	33.5 km
#3	455 RPM	81.9 mm	14.0 km/h	3hr	42.0 km
#4	455 RPM	84.5 mm	14.5 km/h	3hr	43.5 km

2.1.3 Pin-On-Disk 실험 결과 및 고찰

Table 1 의 실험조건 #1, #2, #3 과 #4 에 따라 실험한 결과를 시간에 따른 변화를 관찰하기 위해 아래의 Fig. 4 에서 Fig. 7 에 걸쳐 초단위로 마찰계수에 대한 출력값을 그래프로 표시하였다.

전체 평균마찰계수는 0.35 로 측정되었고, 회전속도가 227RPM 에서 0.37, 455 RPM 에서 0.32 로 작은 회전수에서 마찰계수가 높게 나타났다.

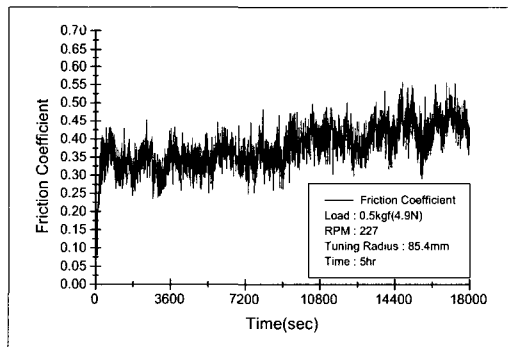


Fig. 4 Friction coefficient with respect to sliding time for test No.1

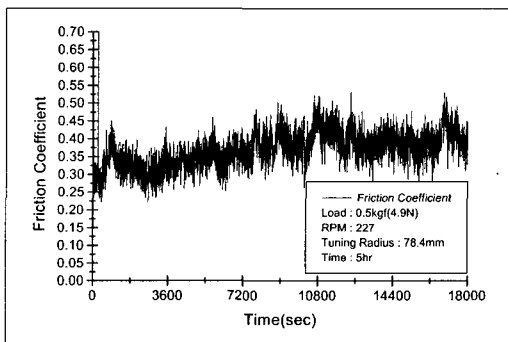


Fig. 5 Friction coefficient with respect to sliding time for test No.2

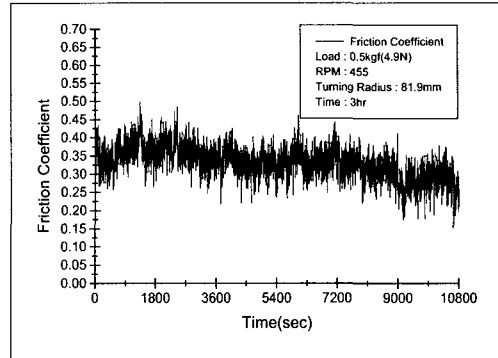


Fig. 6 Friction coefficient with respect to sliding time for test No.3

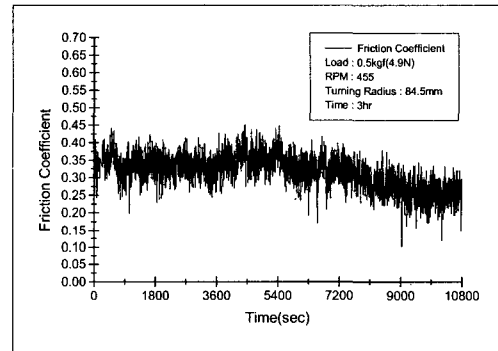


Fig. 7 Friction coefficient with respect to sliding time for test No.4

시간에 따른 변화를 보면 227RPM 에서는 시간이 경과함에 따라 마찰계수가 증가하고, 455RPM 에서는 감소하는 경향을 보였다.

브레이크 라이닝의 마멸량을 측정하기 위해 실험후에 시편의 지름을 측정한 결과 실험조건 #1 에서 #4 까지 각각 2.5mm, 2.3mm, 2.2mm, 2.3mm 로 측정되었다. 따라서 마멸된 라이닝재의 체적을 계산하면 실험 전의 원추형 시편 팁(Tip)의 지름이 0.9mm 이므로 실험조건 #1 에서 #4 까지 각각 4.68mm³, 3.59mm³, 3.12mm³, 3.59mm³가 된다.

2.2 마멸계수 추정

비커스(Vickers) 경도시험기를 통해 브레이크 디스크 및 라이닝의 경도는 각각 299Hv 와 96Hv 로 측정되었다. 따라서 브레이크 라이닝의 경도값과 Pin-On-Disk 실험시 적용한 하중, 접촉상태에서의 미끄럼 거리와 마멸량을 알면 식 (1)의 Archard

의 마멸방정식을 이용하여 마멸계수 k 를 구할 수 있고, 이를 정리하면 Table 2 와 같다.⁵

$$V = \frac{kLx}{P} \quad (1)$$

브레이크 디스크에 대한 라이닝의 마멸계수를 살펴보면 회전속도가 227RPM 인 실험조건 #1 과 #2 에서는 각각 2.45×10^{-4} 와 2.05×10^{-4} 로 나타나 평균 2.25×10^{-4} 로 측정되고, 회전속도가 455RPM 인 실험조건 #3 과 #4 에서는 각각 1.42×10^{-4} 와 1.58×10^{-4} 로 평균 1.5×10^{-4} 로 나타나 전체 평균 마멸계수는 1.88×10^{-4} 로 측정되었다.

Table 2 Wear coefficient of brake lining

Test No.	Wear Volume	Load	Sliding Dist.	Surface Hardness	Wear Coeff.
#1	4.68 mm ³	0.5kg _f	36.5km	96Hv	2.46×10^{-4}
#2	3.59 mm ³	0.5kg _f	33.5km	96Hv	2.06×10^{-4}
#3	3.12 mm ³	0.5kg _f	42.0km	96Hv	1.43×10^{-4}
#4	3.59 mm ³	0.5kg _f	43.5km	96Hv	1.58×10^{-4}

3. 항공기 제동장치의 신뢰도 예측

3.1 신뢰도 이론

Weibull 분포는 지수분포를 일반화한 분포로서 고장율 함수가 상수이거나 증가함수 또는 감소함수인 수명 분포들을 모형화 할 때 적당한 분포로 넓은 적용성으로 인해 신뢰도 예측을 위해 가장 많이 사용되는 분포이다. 식 (2)는 Weibull 분포를 따르는 확률밀도 함수식이고, 식 (3)은 Weibull 신뢰도 함수를 나타낸다.

$$f(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

또한, F(t)를 불신뢰도 함수라 하면 신뢰도 함수는 식 (4)로 나타낼 수 있으며 시스템의 가동시간이 t 이상인 확률이다.

$$R(t) = P_r[T > t] = 1 - F(t) \quad (4)$$

식 (3)와 식 (4)에서 $F(t) = 1 - R(t)$ 를 사용하여 2 회의 LOG 함수를 취하면 식 (5)와 같이 선형화된 함수를 얻을 수 있게 된다.

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1-F(t)}\right]\right\} = \beta \ln(t-\gamma) - \beta \ln(\eta) \quad (5)$$

식 (5)는 $Y=mX+C$ 형태의 일차 선형방정식으로 $X=\ln(t-r)$, $Y=\ln[\ln\{1/1-F(t)\}]$, $m=\beta$, $C=\beta \ln(\eta)$ 가 된다. 따라서 Weibull 신뢰도 함수에서 형상모수인 β 는 방정식의 기울기 값인 m 이 되고, 척도모수인 η 는 Y 축과 만나는 점인 $\eta = \exp[-(y_0 / \beta)]$ 가 되며 위치모수인 r 는 Y 축과 만나는 최소치가 된다. 이들 모수(Parameter)들은 Weibull 확률용지 위에 도식하거나 Spread Sheet 또는 신뢰도 예측을 위한 상용 프로그램을 이용하여 산출할 수 있다.⁶⁻⁸

3.2 정비자료 분석

한국항공대학교에서 그 동안 실습용으로 사용 해온 Mooney 사의 M-20J 항공기의 제동장치(Brake System)에 대해 1997 년부터 약 5 년간 정비기록부를 분석하여 교체시기를 마멸에 의한 고장으로 간주하고, 신뢰도 예측을 위한 자료를 위해 브레이크 디스크 및 라이닝을 비행시간과 착륙횟수로 구분하여 교체주기가 짧은 순으로 정리하면 Table 3 과 같다.

Table 3 Frequency of brake disc and lining replacement

List	Flight Time		No. of landing	
	Brake Disc	Brake Lining	Brake Disc	Brake Lining
1	476.1	175.3	2112	590
2	535.2	181.2	2868	818
3	708.3	181.3	3552	959
4	896.1	182.4	5260	975
5	1044.1	222.3	5263	979
6	1065.3	226.1	6335	981
7		232.5		984
28		392.4		2178
29		397.0		2996
30		406.3		3112
31		439.6		4108

여기서 중간 데이터는 지면상 생략했고 디스크의 경우에는 6 회의 교체가 이루어졌으며 라이닝은 31 회의 교체가 이루어졌다.

3.3 항공기 제동장치의 신뢰도 예측

비행시간 또는 착륙횟수가 증가하면서 항공기 브레이크의 디스크(Disc)와 라이닝(Lining)은 누적된 마멸에 의해 규정된 제한치에 도달하게 되면 교체가 이루어진다. 이 시점을 마멸에 의한 고장으로 간주하여 고장 데이터를 Weibull 모델에 적용 함으로써 신뢰도 함수를 구할 수 있고 신뢰도 예측이 가능하다.⁴

앞의 식 (3)과 식 (5)에서 브레이크 디스크와 라이닝에 대해 비행시간 t 이후까지 또는 착륙횟수 n 이후까지 고장없이 정상적으로 사용될 수 있다고 한다면 비행시간 또는 착륙횟수를 기준으로 신뢰도 함수와 선형화된 함수를 구할 수 있다.

3.3.1 자료분석

Weibull 도식(Plot)을 위해서 앞 절의 Table 3에서 교체주기 순서에 따라 식 (5)에 따른 요소들을 산출해야 한다. 비행시간을 기준으로 브레이크 디스크에 대해 Weibull 도식을 위해 산출한 자료는 Table 4와 같고 다른 항목들도 마찬가지로 산출하면 된다. 여기서 각 열의 내용은 아래와 같다.

i 열 : 각 부품의 교체주기(마멸고장)의 순서

($i = 1, 2, 3, \dots, s$)

t_i 열 : 각 부품의 비행시간을 근거한 교체주기

$F(t_i)$ 열 : $[F(t_i) = (i+0.3)/(s+0.4)]$

중앙순위(Median Rank)를 나타내는 값으로 i 번째 교체 부품의 고장률 함수를 나타낸다.

Table 4 Data for Weibull plot of brake disc(t)

i	t_i	$F(t_i)$	$\ln(t_i)$	$\ln(t_i-r)$	$\ln\{\ln\{1/R(t_i)\}\}$
1	476	0.10938	6.16563	6.61794	-2.15562
2	535	0.26563	6.28264	6.69394	-1.17527
3	708	0.42188	6.56287	6.88816	-0.60154
4	896	0.57813	6.79805	7.06339	-0.14729
5	1,044	0.73438	6.95091	7.18266	0.28192
6	1,065	0.89063	6.97101	7.19863	0.79434

3.3.2 Weibull 도식

3.3.1 절의 자료분석에서 나온 $\ln(t_i - \gamma)$ 열과 $\ln\{\ln\{1/1 - F(t_i)\}\}$ 열의 자료를 가지고 그래프를 작성하면 선형적 함수의 그래프가 되고, 이를 이용해 신뢰도 함수의 모수(Parameter)에 대한 추정치가 가능하게 된다. Fig. 8은 비행시간을 기준으로 한 브레이크 디스크의 Weibull 도식을 나타내고 다른 항목들도 마찬가지로 절차를 따른다.

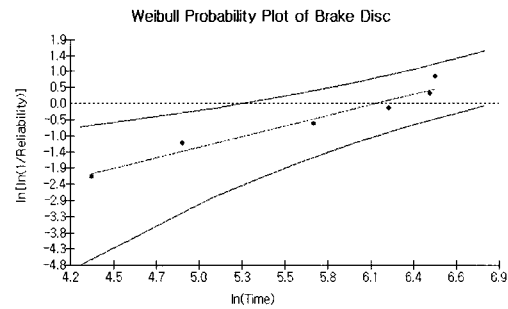


Fig. 8 Weibull plot of brake disc based on flight time

3.3.3 모수추정 및 신뢰도 함수

3.3.2 절의 그래프를 이용하여 브레이크 디스크에 대해 3.1 절의 모수추정 방법을 이용해 Weibull 모수(Parameter)를 추정하면 $\beta=1.157$, $\eta=456.7$, $r=399.9$ 가 되고, 이 모수들을 식 (3)에 대입하면 비행시간을 기준으로 한 디스크에 대한 신뢰도 함수는 식 (6)과 같다. 마찬가지로 방법으로 비행시간을 기준으로 한 라이닝에 대한 신뢰도 함수는 식 (7)과 같고, 착륙횟수를 기준으로 한 디스크에 대한 신뢰도 함수는 식 (8)과 같으며 착륙횟수를 기준으로 한 라이닝에 대한 신뢰도 함수는 식 (9)와 같다.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-399.9}{456.7}\right)^{1.157}\right] \quad (6)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-78.88}{249}\right)^{3.152}\right] \quad (7)$$

$$R(n) = \exp\left[-\left(\frac{n-1094}{3670}\right)^{1.669}\right] \quad (8)$$

$$R(n) = \exp\left[-\left(\frac{n-494.4}{1160}\right)^{1.643}\right] \quad (9)$$

3.3.4 신뢰도 예측

3.3.3 절에서 구한 각 부품별 신뢰도 함수를 Fig. 9부터 Fig. 12에 걸쳐 그래프로 나타내었다. 이들 그래프에서 X축은 비행시간 또는 착륙횟수가 되고 Y축에 나타난 수치가 신뢰도가 된다.

이들 결과로부터 브레이크 디스크 및 라이닝의 50% 신뢰도는 비행시간을 기준으로 각각 730, 300시간으로 예측되고, 착륙횟수를 기준으로 각각 4000, 1400회로 예측된다.

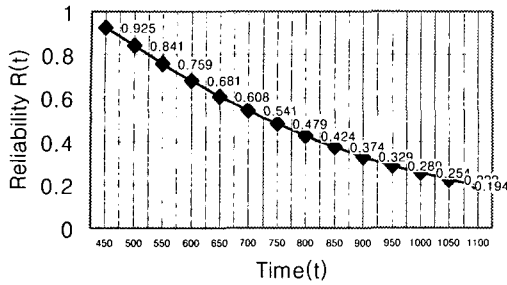


Fig. 9 Reliability function(t) of brake disc

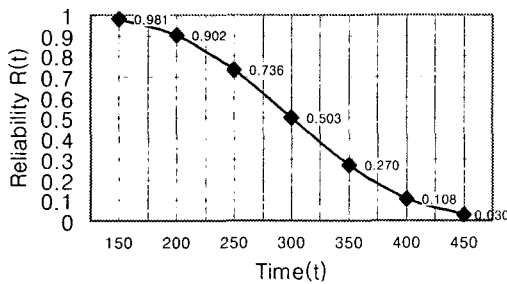


Fig. 10 Reliability function(t) of brake lining

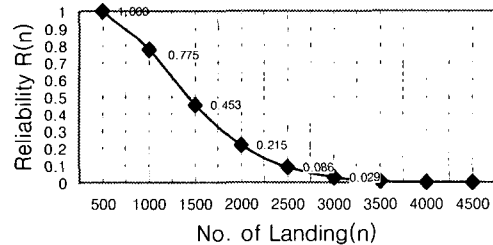


Fig. 11 Reliability function(n) of brake disc

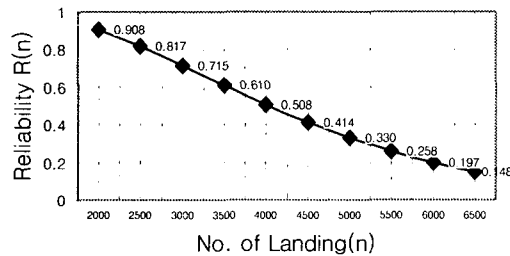


Fig. 12 Reliability function(n) of brake lining

4. 실험과 신뢰도 예측간의 마멸특성의 비교분석

4.1 50% 신뢰도에서의 마멸계수 산출

앞에서 브레이크 라이닝의 경우 50%의 신뢰도를 갖는 비행시간과 착륙횟수는 각각 300 시간과 1400 회로 예측되었다. 전체 비행자료에서 1 회 비행시 비행시간은 0.53 시간이고, 착륙횟수는 약 2.11 회로 산출되었다. 따라서 브레이크가 실제로 적용되는 비행횟수를 산출하기 위해 50% 신뢰도 값을 적용하면 비행시간을 기준으로 약 566 회가 되고, 착륙횟수를 기준으로 약 663 회가 된다.

브레이크가 적용되는 경우를 실제의 비행운용 환경에서 고려해 보면 착륙후에 활주속도까지 감속을 위해 브레이크를 사용하게 되며 지상에서 원하는 위치까지 이동하는 동안 감속과 정지를 위해 브레이크를 사용하게 되는데, 실제로 비행 1 회당 브레이크 디스크와 라이닝의 접촉거리는 약 15m 로 추산되었다. 비행시간을 기준으로 브레이크가 사용되는 비행횟수는 566 회이므로 브레이크 디스크와 라이닝이 접촉한 총 거리는 약 8,490m 가 되고, 착륙횟수를 기준으로 브레이크가 사용되는 비행횟수는 663 회이므로 브레이크 디스크와 라이닝이 접촉한 총 거리는 약 9,945m 가 산출된다.

정비교범에 의하면 라이닝의 두께가 2.82mm 까지 마멸되면 교체되어야 하므로 단면적은 1,418 mm² 가 되고 체적은 4,026mm³ 가 산출되고, 라이닝의 경도값은 96Hv, 적용하중은 498kg_r 이며 접촉거리는 각각 8,490m 와 9,945m 이다. 이 값들을 식 (1)의 Archard 마멸방정식에 대입하여 계산하면 브레이크 디스크에 대한 라이닝의 마멸계수는 비행시간을 기준으로 0.98×10^{-4} , 착륙횟수를 기준으로 0.78×10^{-4} 이 산출된다.

4.2 마멸계수의 비교분석

Fig. 13 은 실험과 신뢰도 예측간의 마멸계수 비교를 위한 그래프로 #1, #2, #3 과 #4 는 실험을 통해 구한 마멸계수를 나타내고, #5 와 #6 은 각각 비행시간과 착륙횟수를 기준으로 50% 신뢰도를 적용하여 산출된 마멸계수이다. 이를 분석해 보면 50% 신뢰도를 근거로 추정된 마멸계수는 2.2 절에서 실험을 통해 얻은 마멸계수보다 작게 나타남을 확인할 수 있다.

마멸계수가 서로 차이가 나는 원인을 분석해 보면 적용된 데이터가 실제 비행시의 정확한 값이

아니라 정량화 시킨 추정값을 사용하였고, 라이닝의 교체는 4 개중에 어느 하나라도 제한치 이하가 되면 동시에 교체가 이루어지므로 개별 단위의 실험값과 차이가 있다고 추정된다.

계수와 의 차이는 정확한 비행 및 정비 데이터를 확보하면 서로 근접한 마멸계수 추정이 가능하며, 마멸특성을 파악하는데 상호 보완 자료로 이용할 수 있다.

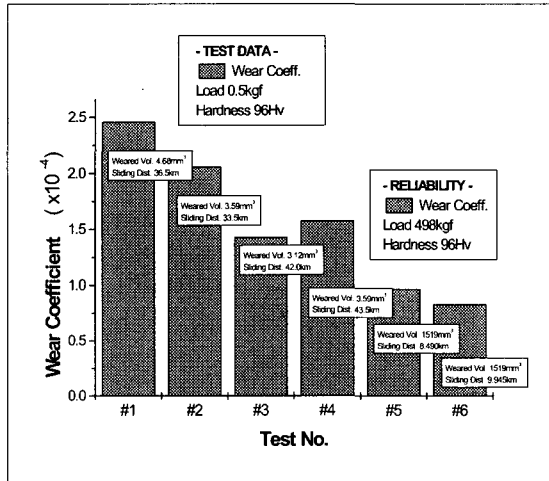


Fig. 13 Comparison of wear coefficient between measured and reliability values

5. 결론

항공기 제동장치(Brake System)의 마찰과 마멸 특성을 파악하기 위해 M-20J 항공기 브레이크 시스템에 대한 Pin-On-Disk 실험과 신뢰도 예측을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 브레이크 디스크에 대한 라이닝의 평균마찰계수는 0.35, 평균마멸계수는 1.88×10^{-4} 로 측정되었고, 마찰계수와 마멸계수는 모두 작은 회전수(Low RPM)에서 더 높고, 큰 회전수(High RPM)에서 낮게 나타났다.
- (2) 정비기록을 분석해 신뢰도를 예측한 결과 브레이크 디스크는 비행시간 또는 착륙횟수가 증가함에 따라 신뢰도는 선형적으로 감소하고, 브레이크 라이닝은 중간 구간에서 신뢰도가 급격히 감소하는 것으로 예측되었다. 따라서 신뢰도 예측을 통해 수요 예측 및 예비품 확보가 가능하고 특정 신뢰도값을 정비에 적용하면 예방정비도 가능하다.
- (3) 실험을 통해 얻은 마멸계수가 실제 비행 상황을 신뢰도 예측에 적용해 산출된 마멸

참고문헌

1. Mooney Aircraft Corporation, M20J Service And Maintenance Manual, Mooney Aircraft Corporation, pp. 21-26, 1995.
2. Roskam, J., Airplane Design : Part 4 : Layout Design of Landing Gear and System, Roskam Aviation and Engineering Corporation, pp. 57-63, 1986.
3. Hwang, D. H., Kim, D. E. and Lee, S. C., "Effect of Wear Particles on the Friction and Wear Behavior of Metals in Motion History," Proc. of the KSPE Fall Conference, pp. 807-810, 1997
4. Sheikh, A. K., Al-Garni, A. Z. and Badar, B. D., "Reliability Analysis of Aeroplane Tyres," Int. J. of Quality & Reliability Management, Vol. 13, No. 8, pp. 28-38, 1996.
5. Robinwicz, E., Friction and Wear of Materials, John Wiley & Sons, pp. 155-159, 1995.
6. Dodson, B., Weibull Analysis, ASQ Quality Press, pp. 1-33, 1994.
7. Jeong, H. S., Park, D. H. and Kim, J. J., Reliability Analysis and Application, Youngji-Moonwha-Sa, pp. 45-59, 2000.
8. Engineered Software, Reliability & Maintenance Analyst, Engineered Software, Inc., pp. 5-109, 1999.