

Article

항공기용 ABS 제동시스템의 노면 조건별 제동특성에 관한 시험적 연구

이미선*

Experimental Research on Braking Characteristics of Aircraft ABS Brake System with Ground Conditions

Mi-Seon Yi*

ABSTRACT

Results of the experimental research are described in this thesis, which are about braking characteristics of aircraft ABS brake system with different ground conditions. Dynamo-tests were conducted with the state of the application aircraft condition and with two different ground conditions. The Braking characteristics on each ground condition were drawn from the results of occurrence of skid, braking distance and deceleration. The braking performance of the application aircraft could be anticipated and the efficient range of braking operation could be set with those results.

Key words : Aircraft Brake System(항공기용 제동시스템), Anti-lock Brake System(잠김방지 브레이크 시스템), Dynamo-test(다이내모시험), Skid(스키드)

1. 서론

차량 ABS 기능은 브레이크 잠김현상(이하, 스키드(Skid)라 함) 발생으로 인한 교통사고 발생을 예방하기 위하여 2012년도 국내에서 의무화되어 보편적으로 적용되고 있다. 차량운용 중 스키드가 발생하면 조향이 불가능하고 제동거리가 증가하여 교통사고로 이어질 수 있다. 항공기의 경우에는 차량보다 관성이 커, 활주 중 스키드가 발생하면 타이어 마모가 심하고 또는 타이어가 터질 수 있다(Flat tire). 이는 활주로 이탈, 또는 전복으로 이어져 기체 손상을 유발할 수 있다. 이와 같이 정비성과 안전성의 측면에서 항공기용 제동장치의 ABS 기능이 요구되므로 항공기용 제동장치의 ABS 기능에 대한 국내 기술 개발 연구가

이루어지고 있다[1][2][3].

항공기에 ABS 기능을 구현하기 위해서는 제동력을 가변할 수 있는 제동장치와 제동장치가 위치한 휠 속도를 측정하는 휠속도센서와 ABS 로직을 포함한 제동력 제어 장치를 보유해야 한다. 본 논문의 시험에 적용한 항공기용 제동장치는 1~2,000kgf 중량급의 소형항공기에 적용되는 전기 모터식 제동장치와 ABS 제어 로직을 포함하는 제동제어기이다. ABS 제어 로직은 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용하여 제동력을 조절함으로써 휠 슬립율이 최적 슬립율을 초과하지 않도록 구현되어 있다.

일반적으로 제동장치 개발과정 중 제동장치 구성품 단위에서 제동성능을 확인하기 위해 다이내모 시험을 수행하며 다이내모장비에서 항공기 중량조건을 모사할 수 있다.

본 연구에서는 ABS 제동시스템을 소형항공기에 적용하기위한 사전검토를 목적으로 다이내모시험을 수행하였다. 제동장치와 휠속도센서, 제동제어기, 제어기의 점검장비를 모두 갖추어 제동시스템을 구성

Received : 30. Mar. 2017. Revised : 7. Jun. 2017.

Accepted : 21. Jun. 2017

* 국방과학연구소

연락처, E-mail : miseon_yi@add.re.kr

대전시 유성우체국 사서함 35호

함으로써 ABS 기능을 포함한 제동성능시험을 수행하였다. 이때, 다이นา모장비에서 미끄러운 노면 조건을 설정하여 스키드 발생을 유발하였다. 스키드 발생 유무와 제동거리, 감속도 등의 시험결과로부터 ABS 제동시스템의 제동 특성을 분석하고 적절한 항공기 운용 범위를 도출하였다.

II. 본 론

2.1 ABS 제어로직 개요

ABS 제어로직은 Fig 1과 같이 휠 슬립율 λ 가 최적 슬립율 λ^* 을 추종하도록 제동토크를 제어하는 방식이다[4]. 제동제어기에는 활주로 노면에 따라 두 가지 모드로 구분된다. 일반적인 노면조건에서는 dry/wet 모드로 운용하고 미끄러운 조건에서는 ice 모드로 운용한다. dry/wet 모드의 최적 슬립율은 0.55이고 ice 모드의 최적 슬립율은 0.2이다. 단, 휠 슬립율은 식 (1)의 정의에 따라 항공기 속도가 0에 도달하면 발산하게 되므로 20km/hr 속도 이하인 저속 구간에서는 휠 슬립율의 물리적 의미가 없다고 판단하고 ABS 기능을 제외한다.

$$\lambda = \frac{V_{aircraft} - (\omega r)_{wheel}}{V_{aircraft}} \quad (1)$$

2.2 다이나모 시험 개요

다이나모시험은 제동장치 구성품 단위에서 제동성능을 확인하기 위해 수행하는 시험이다. 다이나모 장비는 항공기의 관성모멘트와 등가하는 회전체의 회전 모멘트를 발생시키고, 타이어에 항공기 자중에 의한 수직력을 인가하여 항공기 활주시험과 유사한 조건을 모사한다. Fig 2에 다이나모시험 개념도를 제시하였다. 시험은 다이나모 속도를 증가시켜 항공기 제동인가 속도에 도달하면 휠에 장착된 제동장치에 제동력을 인가하여 다이나모와 휠이 정지할 때까지 제동력, 다이나모 속도, 휠 속도 등의 데이터를 측정하는 방식이다. 또한, 제동장치에 로드셀이 연결되어 있고 제동과정에 휠에 작용하는 토크를 측정한다.

Fig 3과 같이 (주)다윈프릭션의 다이나모시험 장비를 활용하여 16년 6월부터 7월간 다이나모시험을

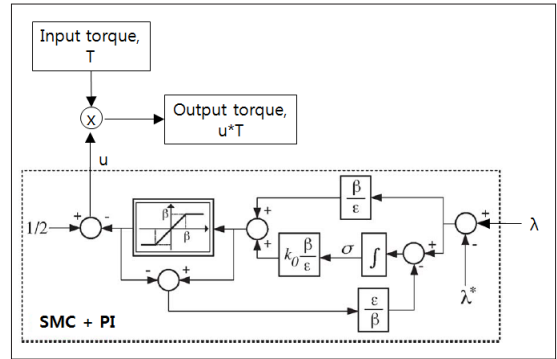


Fig. 1. ABS control logic schematic

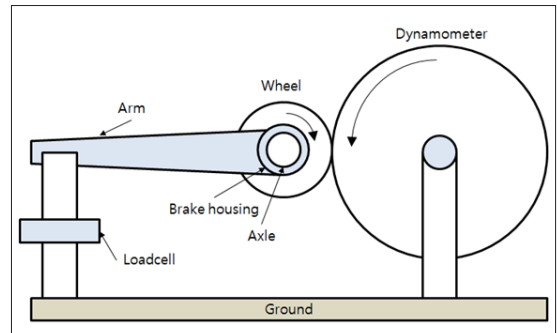


Fig. 2. Dynamo-test schematic

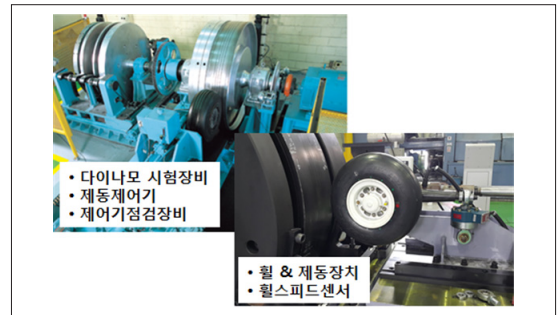


Fig. 3. Dynamo-test bench & test setting

수행하였다. 다이나모 표면 재질은 강(Steel)이며 표면마찰계수는 0.35이다. 이는 활주로 노면조건에서 wet 조건에 해당한다.

미끄러운 노면조건에 대한 다이나모시험을 위해서는 다이나모 표면에 오일을 발라 마찰계수를 낮추는 방법이 사용될 수 있다[5][6]. 하지만 본 연구에서는 효율적인 시험방식을 위해 요구되는 표면마찰계수와 다이나모 표면마찰계수의 비율만큼 수직력을 감소시켜 마찰계수가 낮아지는 것과 동일한 효과를

Table 1. Dynamo-test condition

제동속도 (km/hr)	제동력(%)		
	20	...	100
40	- 스키드 여부 [A] - 제동거리(m) [B] - 감속도(ft/s ²) [C]		
75			
110			

Table 2. Basic braking performance [wet]

속도	제동력	60	80	100
		[A]		
40	[B]	N/A	N/A	33
	[C]			9.9
	[A]			X
75	[B]	N/A	N/A	99.1
	[C]			10.6
	[A]	X	X	X
110	[B]	304.1	268.4	206.2
	[C]	6.1	7.4	10

모사하였다. 활주로 노면조건에서 ice 조건은 마찰 계수 0.15로 가정하였다. 따라서 수직력을 0.43배 (=0.15/0.35)로 낮추어 인가함으로써 ice 조건 시험을 수행하였다.

이와 반대로 수직력을 높게 인가하여 dry 조건을 모사할 수 있다. 하지만 시험장비의 수직력 인가 한계로 dry 조건은 시험에서 제외하였다.

다이나모 시험조건은 아래 Table 1과 같이 설정하였다. 제동속도 및 제동력 조건별 시험수행 후 스키드 발생 여부, 제동거리, 감속도를 분석하여 특성을 분석하였다. 제동거리는 제동명령 인가시점부터 속도가 0이 되는 시점까지 속도를 적분하여 계산하였고 감속도는 제동상태가 목표치에 도달한 이후부터 속도 5km/hr에 도달한 시점까지의 평균 가속도를 계산하였다. 제동명령 인가시점부터 제동상태가 목표치에 도달하는 시점까지 응답지연이 존재하므로 산출된 제동거리와 감속도의 경향이 완전히 일치하지는 않는다.

2.3 기본제동성능 시험

제동제어기에서 ABS 제어기능을 의도적으로 제외하고 활주로 노면 wet 조건과 ice 조건의 다이나모

시험을 수행하여 기본제동성능을 확인하였다.

활주로 노면 wet 조건의 경우 Fig 4와 같이 속도 110km/hr, 제동력 100% 조건에서 스키드 발생 없이 제동 완료하였다. Table 2와 같이 속도와 제동력 조건을 다르게 설정하여 시험 수행하였고 모든 조건에서 스키드는 발생하지 않았다. 동일한 제동력을 인가하는 경우에는 동일한 제동 토크(즉, 동일한 마찰력)가 인가되므로 제동속도별 감속도의 차이가 없다.

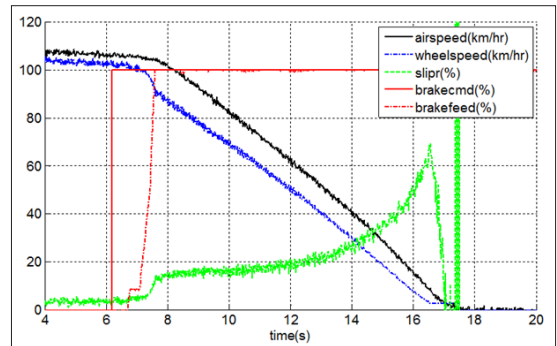


Fig. 4. Dynamo-test (wet, 110km/hr, 100%)

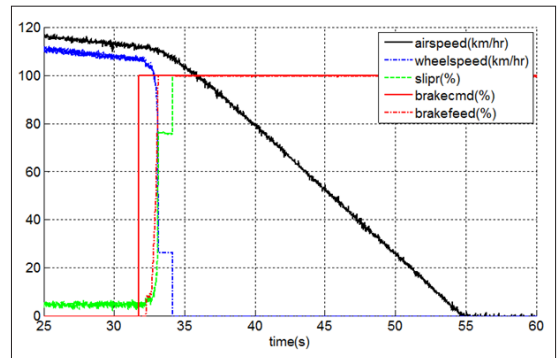


Fig. 5. Dynamo-test (ice, 110km/hr, 100%)

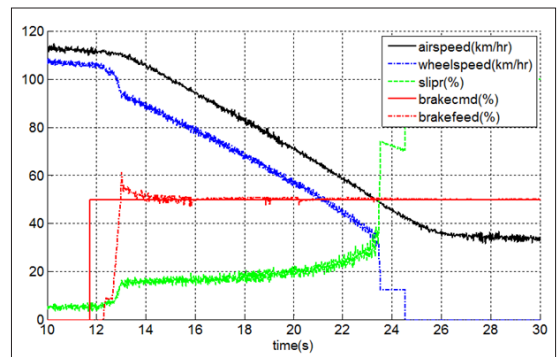


Fig. 6. Dynamo-test (ice, 110km/hr, 50%)

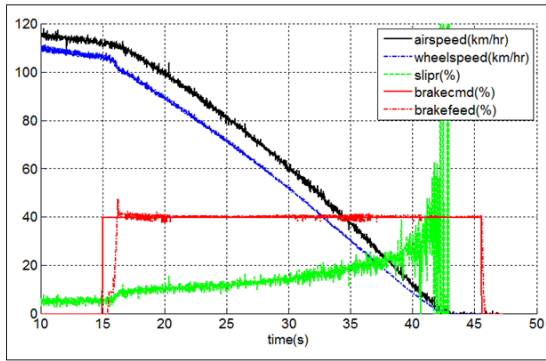


Fig. 7. Dynamo-test (ice, 110km/hr, 40%)

Table 3. Basic braking performance [ice]

속도	제동력			
	60	80	100	
40	[A]			X
	[B]	N/A	N/A	33
	[C]			9.9
75	[A]			X
	[B]	N/A	N/A	99.1
	[C]			10.6
110	[A]	X	X	X
	[B]	304.1	268.4	206.2
	[C]	6.1	7.4	10

또한 동일속도 조건일 경우 제동력에 비례하여 제동토크가 인가되므로, 감속도는 제동력에 비례하여 증가 또는 감소한다.

활주로 노면 ice 조건의 경우 Fig 5와 같이 속도 110km/hr, 제동력 100% 조건에서 제동직후 스키드 발생하였다. 스키드가 발생하지 않는 제동조건을 확인하기 위하여 제동력 조건을 90, 80, ..., 40%로 낮추어 시험하였고, Fig 6와 같이 제동력 50% 조건에서 제동 말미에 스키드 발생하였으나 Fig 7과 같이 제동력 40% 조건에서 스키드 발생 없이 제동 완료하였다. Table 3과 같이 속도와 제동력 조건을 다르게 하여 시험 수행하여 스키드 발생하지 않는 조건을 확인하였다.

2.4 ABS 기능을 포함한 제동성능시험

제동제어기에서 ABS 제어기능을 포함하여 활주로 노면 wet 조건과 ice 조건의 다이내모시험을 수행

하였다.

활주로 노면 wet 조건의 경우 휠 슬립율이 55%를 초과하지 않으므로 ABS 기능이 작동하지 않았고 Table 2와 결과가 동일하였다.

활주로 노면 ice 조건의 경우 휠 슬립율이 20%를 초과할 경우 ABS 기능이 작동하였다. Fig 8은 Fig 5와 동일 조건이지만 ABS 기능에 의해 제동력이 감소,

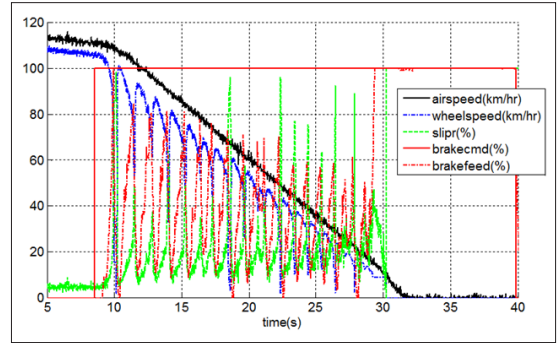


Fig. 8. Dynamo-test (ABS, 110km/hr, 100%)

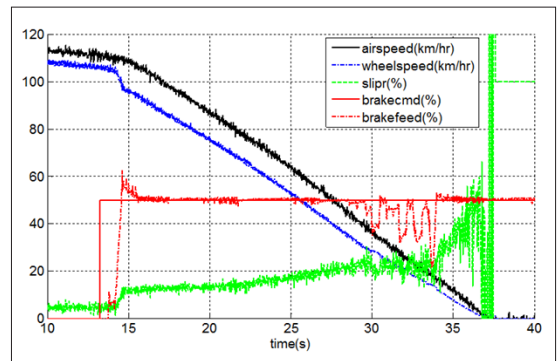


Fig. 9. Dynamo-test (ABS, 110km/hr, 50%)

Table 4. ABS braking performance [ice]

속도	제동력					
	50	60	70	80	100	
40	[A]					
	[B]	N/A	53.1	55.3	55	51.8
	[C]		4.8	5.1	5.1	5.4
75	[A]	X	△		△	△
	[B]	185.1	167.1	N/A	173.3	190.5
	[C]	4.4	5		4.8	4.4
110	[A]	X	△		△	△
	[B]	400.9	333.3	N/A	358.5	383.1
	[C]	4.4	5.1		4.7	4.5

증가를 반복하면서 20km/hr 속도까지 스키드 방지되었고 그 이하 속도에서 스키드 발생하였다. Fig 9은 Fig 6과 동일 조건이나 ABS 기능이 작동하여 스키드 없이 제동 완료하였다.

그외 시험결과를 종합하여 Table 4에 나타내었다. 스키드 여부 중 “△”는 20km/hr 이하 속도에서 스키드가 발생하는 경우를 의미한다. Table 3과 비교하여 Table 4에서는 전영역으로 스키드 없이 제동 가능한 영역이 확장되었다. 단, 제동력이 커질수록 빈번한 ABS 작동으로 인하여 감속도가 감소하고 제동거리가 증가하는 경향을 보인다.

2.5 노면 조건별 제동특성 분석

기본제동성능 시험에서 활주로 노면 wet 조건에서는 스키드 발생하지 않았으나 ice 조건에서는 스키드 발생하였다. ABS를 포함한 제동 성능시험에서 활주로 노면 wet 조건에서는 ABS 기능 작동 없이 제동 완료하였으나 ice 조건에서는 ABS 기능이 작동하여 스키드 없이 제동 완료하였다.

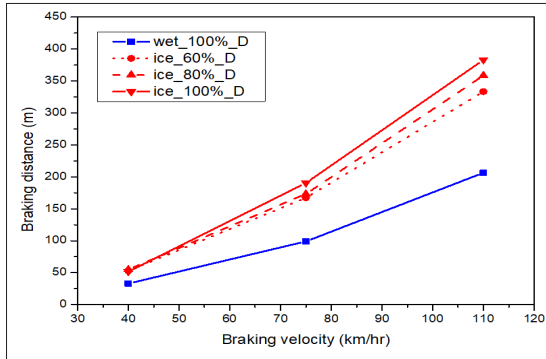


Fig. 10. Braking distance vs. Braking velocity

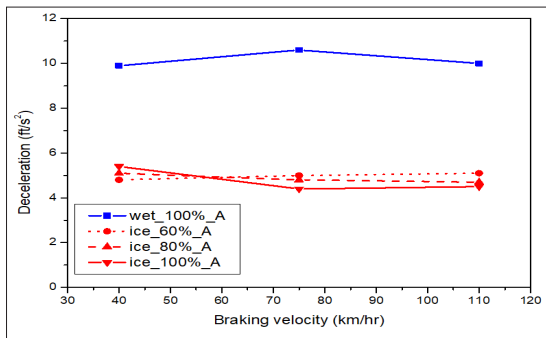


Fig. 11. Deceleration vs. Braking velocity

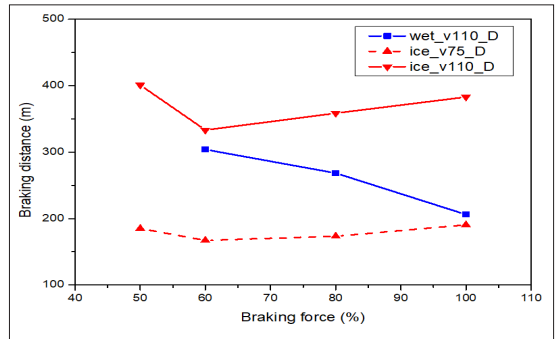


Fig. 12. Braking distance vs. Braking force

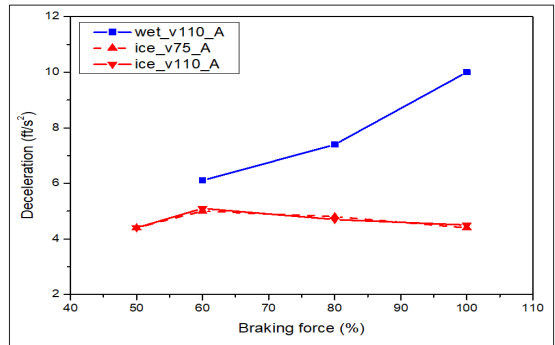


Fig. 13. Deceleration vs. Braking force

Fig 10과 Fig 11에서 확인할 수 있듯이 제동거리는 ice 조건보다 wet 조건이 약 두배 길고 감속도는 약 0.5배 낮다.

Fig 12와 Fig 13에 제시된 바와 같이, 활주로 노면 wet 조건의 경우 인가되는 제동력이 클수록 제동거리가 짧아지고 감속도가 증가하지만 ice 조건의 경우 정반대의 경향을 보인다.

활주로 노면 ice 조건의 경우, 제동력 60%에서 제동거리가 가장 짧고 감속도가 가장 크다. 제동력이 더 커질수록 제동거리가 길어지고 감속도가 낮아진다. 이는 ABS 기능이 빈번하게 작동함에 따라 제동 성능이 저하되는 현상이다. 따라서 항공기의 제동 운용 범위를 적절하게 설정하여 제동성능을 확보할 필요가 있다.

2.6 항공기 제동운용범위 도출

항공기 운용시 짧은 제동거리와 안정적인 제동이 요구된다. 단, 스키드가 발생하면 제동거리가 증가하고 사고로 이어질 수 있으므로 ABS 기능이 요구된다. 그러나 빈번한 ABS 작동은 제동력의 증가와

감소가 반복되면서 제동이 불안정해지고 오히려 제동거리가 증가하므로 지양되어야 한다.

본 논문의 ABS 제동시스템은 항공기 운용시 wet 조건에서 운용 제한을 둘 필요가 없다. 제동력은 크게 증가할수록 제동거리가 짧아지고 감속도가 증가한다. 그러나 ice 조건에서는 제동력 60%로 운용하는 것이 제동거리와 감속도, 제동안정성의 측면에서 가장 효율적인 것이다.

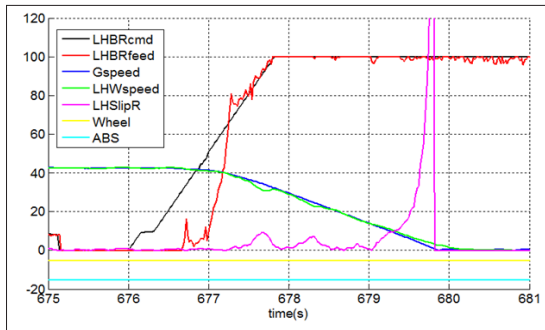


Fig. 14. Taxiing test (40km/hr, 100%)

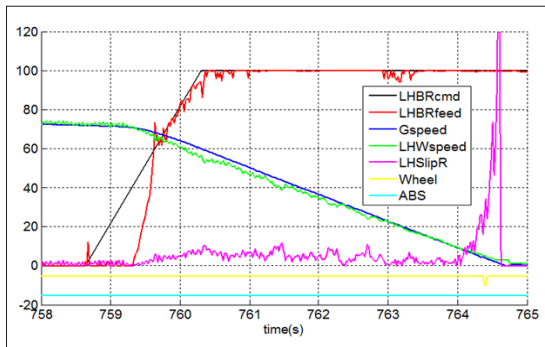


Fig. 15. Taxiing test (75km/hr, 100%)

Table 5. Taxiing test results

속도	제동력	100
40	[A]	X
	[B]	29
	[C]	14
75	[A]	X
	[B]	70.7
	[C]	12.5
110	[A]	X
	[B]	157.4
	[C]	11.8

2.7 활주시험 결과비교

본 논문의 ABS 제동시스템이 적용된 소형항공기의 활주시험은 군 활주로부터 16년 6월부터 17년 2월간 수행되었다. 다양한 항공기 속도 조건에서 100% 제동 인가한 뒤 제동성능을 확인하였다.

제동제어기의 dry/wet 모드를 적용하여 항공기 활주시험을 수행하였다. 활주로 노면은 다이ना모 장비 표면보다 표면 마찰계수가 높으므로 제동성능에 더 유리한 조건이다. 시험결과를 Fig 14~16과 Table 5에 나타내었다.

활주시험에서 활주로 노면 wet 조건의 다이나모 시험 결과와 달리 휠 슬립율이 55%를 초과하여 ABS 기능이 작동하였다. 이는 다이나모시험에서 고려할 수 없는 항공기 동특성의 영향과 활주로 노면의 차이 때문으로 판단된다. ABS 기능 작동이후 휠 슬립율은 즉각 감소하였고 스키드가 적절하게 방지되었다.

Fig 17과 Fig 18과 같이 다이나모시험 결과보다 활주로 시험 결과 제동거리가 더 짧고 감속도가 더 높게 나타났다. 따라서 다이나모시험을 통해 항공기의 제동성능을 보수적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

III. 결론

본 연구는 ABS 제동시스템을 소형항공기에 적용하기 위한 사전검토를 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 항공기 중량과 활주로 노면 조건을 모사하고 다양한 제동속도와 제동력 인가 조건을 설정하여 다이나모 시험을 수행하고 결과를 분석하였다. 미끄러운 활주로 노면 조건을 모사하여 다이나모 시험 중

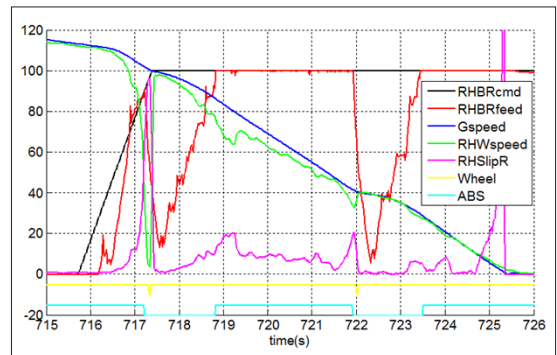


Fig. 16. Taxiing test (110km/hr, 100%)

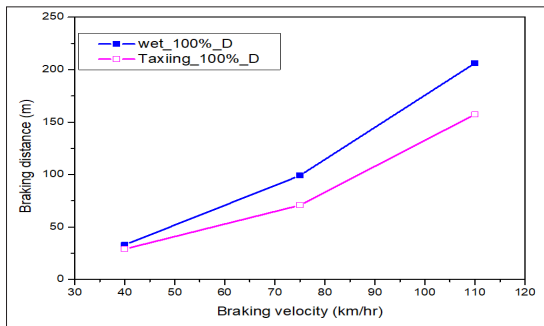


Fig. 17. Braking distance vs. Braking velocity

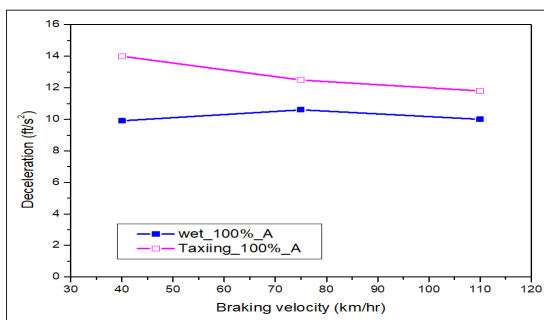


Fig. 18. Deceleration vs. Braking velocity

스키드 발생을 유도하였고 ABS 기능이 적용된 제동 성능을 분석하였다. 일반적인 노면과 미끄러운 노면에서 제동특성을 각각 분석하고 그 결과를 근거로 적절한 제동성능을 확보할 수 있는 항공기 제동운용 범위를 설정하였다. 또한, 활주시험 결과와 다이내모 시험 결과를 비교함으로써 다이내모시험을 통해 적용 항공기의 제동성능을 예측하는 방법이 타당함을 입증하였다.

기존의 다이내모시험은 제동장치 구성품 단위 제동 성능을 확인하기 위하여 수행되어 왔다[7][8][9]. 본 연구에서는 미끄러운 노면 조건을 모사하는 다이내모 시험방법을 새롭게 고안하여 노면 조건별 ABS 제동특성을 확인할 수 있도록 시험 영역을 확장하였다. 본 연구방법을 통하여 실제 항공기의 활주시험에 앞서 ABS 제동시스템의 성능을 다양한 노면 조건에서 확인하고 적절한 제동 운용 범위를 설정할 수 있다. 본 연구의 ABS 제동성능 평가 및 제동운용 범위 설정 방식은 타 항공기에 적용하여 보편적으로 활용될 수 있다.

Reference

- 1) Lee, S. Y., Lee, J. G., Kim, Y. M., Choi, J. S., Kim, C. B., Kim, J. Y., Lee, J. W., Park, H. Y., (2005), "The Development of ABS Control Valve for XKT-1 Aircraft", KSAS Fall Conference, pp. 305-308.
- 2) Shin, J. H., Lee, K. C., (2007), "The Development of Dynamic Modeling & Controller for Aircraft ABS", KSME Fall conference, pp. 106-113.
- 3) Lee, J. C., Kim, J. H., Song, W. J., Yim, D. H., Joo, K. R., Park, S. Y., Seo, M. S., (2015), "Dynamic Modeling and Simulation for the Development of Aircraft ABS System", KSAS Fall Conference, pp. 2011-2015.
- 4) Castro, R., Araujo, R., Freitas, D., (2013), "Wheel Slip Control of EVs Based on Sliding Mode Technique With Conditional Integrators", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 8, pp. 3256-3270.
- 5) Jeon, J. W., Kim, Y. J., (2004), "Development Situation of ABS System", Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 26, No. 5, pp. 11-16.
- 6) Lee, K. C., Jeon, J. W., Hwang, D. H., Kom, Y. J., Gu, D. H., (2005), "Braking Efficiency Calculation of Antiskid Brake System of a Fixed-Wing Aircraft", KIEE Annual Conference, pp. 222-224.
- 7) Kang, H. R., Song, J. H., Oh, P. S., (2016), "A study on the Physical and thermodynamics Effect of Braking for Light Aircraft(FAR23) by Dynamo Test", KSAS Spring Conference, pp. 701-704.
- 8) Kam, M. G., Kang, S. K., Kim, W. I., (2007), "Development of Brake disc using CFRC on Anti-loc Brake System of Aircraft", KISA Annual Conference, pp.21-26.
- 9) Ryu, M. R., Bae, H. E., Kim, H. S., Lee, D. H., Lee, S. B., Park, J. H., (2013), "A Study on Braking Performance of Break Disc", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 3, pp. 13-20.