

# 항공기 Anti-Braking System을 위한 적응 슬라이딩 모드 제어기 설계

\*최형섭, 이원주, 박민용, 김은태  
연세대학교 전기전자공학과

e-mail : *reload79@hanmail.net, delicato@empal.com*  
*mignpark@yonsei.ac.kr, etkim@yonsei.ac.kr*

## Design Of Adaptive Sliding Mode Control For Aircraft Anti-Braking System

\*HyungSup Choi, Wonju Lee, Mignon Park, Euntai Kim  
School of Electrical & Electronic Engineering  
Yonsei University

### Abstract

This paper proposes the design of anti-braking system on aircraft and wheel slip ratio control using adaptive slide mode control. By maintaining the desired wheel slip ratio under runway conditions, we can obtain the maximal frictional force and reduce the braking range. In this paper, we apply an adaptive sliding mode control to aircraft brake system and it can guarantee the robustness under variations in brake characteristics. The performance of proposed controller is verified in simulations.

### I. 서론

자동차의 제동 장치하면 흔히 ABS(Anti-lock Brake system)라고 말하는 사람들이 있다. 엄밀히 말하면 ABS는 제동 장치가 아니라 단지 브레이크 잠김을 방지해주는 장치일 뿐이다. 자동차와 마찬가지로 항공기의 제동(엔진 역추진, Aerodynamic brake 제외)은 브레이크를 사용하는 양에 따라 결정된다. 원래 ABS 시스템은 제한된 활주로에서 항공기를 효과적으로 제동하기 위한 목적으로 개발되었다. 부수적으로 브레이크 잠김으로 인한 마찰열로 타이어가 터지는 것을 방지한다.

### II. 본론

#### 2.1 휠 슬립율(Wheel slip ratio, $\lambda$ )

휠 슬립율은 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda = \frac{V_a - r_e w}{V_a} \tag{1}$$

$V_a$  : 항공기 속도(m/s),

$w$  : 타이어의 각속도(rad/s),

$r_e$  : 실제적으로 굴러갈 때 타이어의 반지름(m)

그림 1은 마찰 계수와 휠 슬립율의 관계를 나타내는데 휠 슬립율이 대략 10~20%에서 마찰 계수가 최대가 되어 최대의 제동 효과를 가지게 된다. 만약 휠 슬립율이 100%인 경우 브레이크 잠김이 발생하여 미끄러지고 있는 상태이고 0%인 경우 브레이크를 사용하지 않은 상태를 나타낸다[2].

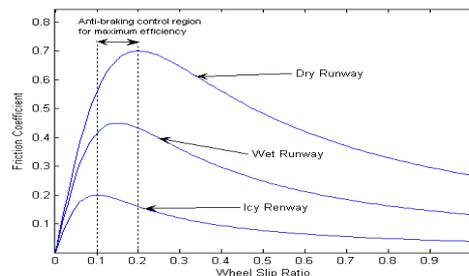


그림 1. 마찰 계수와 휠 슬립율 관계

2.2 타이어 운동 방정식

뉴턴의 제 2법칙을 이용하여 항공기 가속도는 다음과 같이 정리된다[1].

$$a = \frac{T}{M} - \frac{2R_m \mu}{M} - \frac{1}{2} \frac{\rho V_a^2 S C_D}{M} \quad (2)$$

$M$  : 항공기 무게(Kg)  $T$  : 항공기 추력(Kgf)  
 $\mu$  : 마찰 계수  $D$  : 항공기 항력(Kgf)  
 $R_m$  : 메인 타이어에 작용하는 힘(Kgf)  
 $a$  : 항공기 가속도(m/s<sup>2</sup>)

제동시 타이어 운동 방정식은 다음과 같다[3].

$$\dot{w} = \frac{1}{I} (R_m \mu r_s - f_T) = \frac{1}{I} (F_F r_s - f_T) \quad (3)$$

$w$  : 휠의 속도(rad/s)  $F_F$  : 제동력  
 $f_T$  : 브레이크 토크(Kgfm)  
 $r_s$  : 휠 중심에서 지상과의 거리(m)  
 $I$  : 휠의 회전 관성 모멘트(Kgfm<sup>2</sup>)

2.3 적응 슬라이딩 제어기 설계

슬라이딩 제어의 S 평면(Sliding surface)을 휠 슬립 오차를 이용하여 다음과 같이 정의된다[4].

$$s = \lambda - \lambda_d \quad (4)$$

식 (4)을 미분하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{s} = \dot{\lambda} = \frac{r_e}{V_a} \left[ \frac{\dot{V}_a}{r_e} (1 - \lambda) - \frac{1}{I} (R_m \mu r_s - f_T) \right] \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이용하여 아래의 슬라이딩 조건을 구할 수 있다[4].

$$s \dot{s} \leq -\eta |s| \quad (6)$$

제동력 추정오차( $\tilde{F}_F$ )를 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{F}_F = \hat{F}_F - F_F \quad (7)$$

S 평면과 제동력 추정오차에 대하여 Lyapunov function 을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V(s, \tilde{F}_F) = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{F}_F^2 \quad (8)$$

식 (8)을 미분하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{V}(s, \tilde{F}_F) = s \dot{s} + \frac{1}{\gamma} \tilde{F}_F \dot{\tilde{F}}_F \quad (9)$$

Lyapunov 안정성을 만족하기 위해 식 (9)가 Negative semi-definite가 되도록 Adaptive law와 Control law는 다음과 같이 얻을 수 있다[4].

Adaptive law

$$\dot{\hat{F}}_F = -\gamma \left[ \left( \frac{r_e}{V_a} \right) \left( \frac{1}{I} \right) r_s \right] (\lambda - \lambda_d) \quad (10)$$

Contol law

$$f_T = I \left[ -\frac{\dot{V}_a}{r_e} (1 - \lambda) + \frac{1}{I} \hat{F}_F r_s - k \operatorname{sgn}(s) \right] \quad (11)$$

III. 시뮬레이션 결과

적응 슬라이딩 제어 기법을 이용하여 Anti-braking system을 설계하고 Matlab을 이용하여 검증하였다.

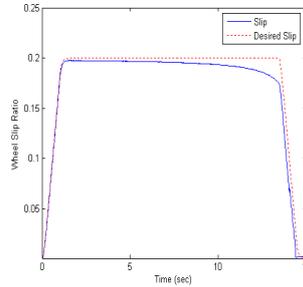


그림 2. 휠 슬립

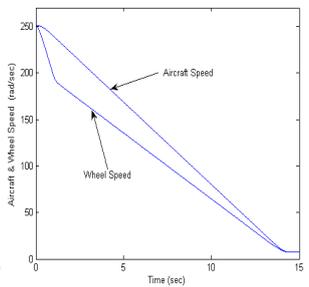


그림 3. 항공기, 타이어 속도

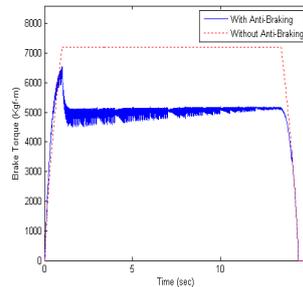


그림 4. 브레이크 토크

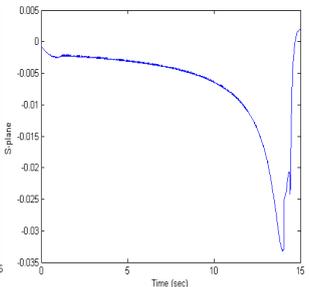


그림 5. S 평면

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 노면 마찰 계수를 알고 일정한 노면 상태를 가정 하에 연구하였으나 차통 노면 마찰 계수를 실시간 추정하여 최적의 제동이 될 수 있도록 휠 슬립을 조절하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력기반조성사업센터의 고급 인력양성사업을 통한 연세대학교 계통적용 신전력기기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] R.Somakumar, J.Chandrasekhar, "Intelligent anti-skid brake controller using a neural network", Control Engineering Practice 7, pp 611~621, 1999.  
 [2] B.Ewers, J.B., "Expert Supervision of an Anti-Skid Control System of a Commercial Aircraft", Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp 420~425, 1996.  
 [3] Chinmaya B.Patil, Raul G.Longoria, "Control Prototyping for an Anti-Lock Braking Control System on a Scaled Vehicle", Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, pp 4962~4967, 2003.  
 [4] J.J.Slotine, W.Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall, New Jersey, 1991.