

技術論文

마찰계수의 변화를 고려한 로터 브레이크 시스템의 제동시간 예측

최장훈*, 오민환*, 조진연**

A Study on the prediction of braking time for rotor brake system considering the friction coefficient variation with temperature

Jang Hun Choi*, Min Hwan Oh* and Jin Yeon Cho**

ABSTRACT

A helicopter rotor brake system stops or reduces the speed of the rotor by transforming the kinetic energy into the heat energy. The frictionally generated heat has a considerable effect on the frictional property of material itself and causes the change of the friction coefficient which may affect the braking time significantly. In this paper, to take into account the effect of change of friction coefficient according to temperature on braking time, thermo-mechanically coupled analysis is carried out by commercial software ABAQUS. Further, simple theoretical equation is derived considering thermo-mechanical behaviors. The predicted braking times both from theoretical and numerical methods are compared and validity of proposed theoretical equation is investigated.

초 록

회전익기의 로터 브레이크 시스템은 제동 시 운동에너지를 마찰에 의한 열에너지로 변환시켜 로터를 정지시키거나 감속시키게 된다. 이때 발생된 마찰열은 재료의 마찰 특성 자체에 상당한 영향을 주게 되어 제동시간의 변화를 초래하거나 열탄성적 불안정성을 발생시키기도 한다. 이에 본 논문에서는 상용해석 소프트웨어 ABAQUS를 이용하여 온도에 따른 마찰계수의 변화를 고려하여 제동시간을 예측할 수 있는 열기계학적 연성해석을 수행하였으며, 이와 함께 열기계학적 거동을 고려하여 간략한 이론식을 제시하고, 이를 통해 마찰계수가 온도에 따라 변할 경우 로터 브레이크 시스템의 제동시간을 예측하고 제안된 이론식의 타당성을 고찰하였다.

Key Words : Braking time(제동시간), Thermo-mechanical behavior(열기계학적 거동), Rotor brake system(로터 브레이크 시스템), Friction coefficient(마찰계수)

1. 서 론

회전익기 로터 브레이크 시스템은 엔진 정지 후 회전 중인 로터를 빠른 시간 내에 감속/정지시키거나, 계류 중 바람 등의 영향으로 인한 로터의 회전을 제한하는 역할을 한다. 만약 운용 요구조건에 따라 로터를 주어진 시간 내에 제동

† 2009년 2월 20일 접수 ~ 2009년 6월 15일 심사완료

* 정희원, 인하대학교 항공우주공학과 대학원

** 정희원, 인하대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : c jy@inha.ac.kr

인천광역시 남구 용현동 253번지

하지 못할 경우에는 인명피해나 기계파손 등의 사고로 이어질 수 있으므로, 운용 요구조건에 맞춰 회전익기를 안전하게 운용하기 위해서는 설계 단계부터 제동시간을 신뢰성 있게 예측할 수 있어야 한다.

회전익기 로터 브레이크 시스템은 회전중인 로터의 운동에너지를 열에너지로 변환시켜 로터를 정지시키거나 감속시키는 장치로서, 디스크(disk)와 패드(pad), 캘리퍼(caliper)로 구성되어 있다. 로터 브레이크 시스템에 사용되는 디스크 브레이크는 유압을 이용해 캘리퍼에 장착된 피스톤을 이동시켜 패드와 디스크를 압착시키고, 이때 발생하는 마찰력을 이용하여 운동에너지를 마찰열로 소산시키고 동시에 로터의 회전속도를 감소시키게 된다. 일반적으로 재료의 마찰계수는 온도에 따라 변화되는데 그 이유는 마찰시 수반되는 응착현상(adhesion)과 재료 변형저항(deformation resistance)의 변화 때문인 것으로 알려져 있다[1]. 또한 심한 마찰열은 디스크와 패드의 열변형, 불균일한 접촉, 그리고 디스크 표면의 적열점(hot spots, 국부적인 고온 부위)을 유발하여, 스퀼(squeal)이나 저더(judder)와 같은 열탄성적 불안정(TEI, thermo-elastic instability) 현상의 원인이 되기도 한다[2-6].

이 같은 이유로 회전익기 로터 브레이크 시스템의 제동시간을 더욱 신뢰성 있게 예측하기 위해서는 브레이크 시스템의 열적 거동과 탄성 동역학적(elasto-dynamics) 거동을 함께 고려하여, 제동 중 발생된 마찰열과 그로 인해 변화되는 마찰계수의 영향을 반영하여야 한다.

이에 본 논문에서는 열기계학적 거동을 고려하여 마찰계수 변화를 고려할 수 있는 간략한 이론식을 유도하였으며, 정적 접촉 수치해석을 이용하여 유도된 이론식을 보정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 제안된 이론식을 검증하기 위해 열기계적 연성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우로 구분을 하고, 각각의 경우를 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS[7]를 이용해 로터 브레이크 시스템의 제동 해석을 수행하였으며 그 결과를 제안된 이론적 방법과 비교하였다. 이를 통해 제동시간 예측 시 온도에 따른 마찰특성 변화의 영향을 살펴보고 각 예측 방법의 한계 및 장단점을 고찰하였다.

II. 본 론

2.1. 이론식을 이용한 제동시간 예측

2.1.1. 마찰계수 변화를 고려한 간단한 이론식

본 절에서는 디스크를 강체로 가정한 후 강체

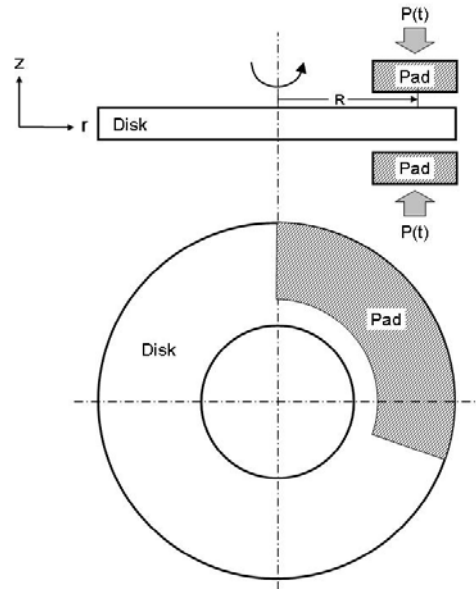


Fig. 1. 디스크와 패드의 이론적 모델

동역학을 이용하여 간단한 제동시간 예측식을 유도하고 이를 토대로 온도에 따른 마찰계수 변화를 고려한 제동시간 예측식을 제시하였다.

Fig. 1과 같은 디스크 브레이크 시스템에서 디스크를 강체로 가정하면 디스크의 운동방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다[8].

$$I\ddot{\theta} = -M(t) \quad (1)$$

여기서 I 는 디스크의 관성 모멘트(moment of inertia), $\ddot{\theta}$ 은 디스크의 회전 각가속도를 나타낸다. $M(t)$ 는 패드와의 마찰로 인해 디스크에 전달되는 모멘트로서 아래 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$M(t) = 2\mu_d \int_A P(t) r dA \quad (2)$$

여기서 $P(t)$ 는 패드를 통해 디스크에 가해지는 압력, A 는 압력이 가해지는 면적, r 은 모멘트 팔길이, μ_d 는 재료의 동마찰계수이고, 상수 '2'는 패드가 2개임을 의미한다. 그리고 식 (3)과 같은 유효 모멘트 팔길이 개념을 도입하면 운동방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{eff} = \frac{1}{F} \int_A P r dA \quad (3)$$

$$I\ddot{\theta} = -2\mu_d R_{eff} F(t) \quad (4)$$

여기서 $F(t)$ 는 패드를 통해 디스크에 가해지

는 힘, R_{eff} 는 유효 모멘트 팔길이 이다. 만약 균일한 압력이 작용한다고 가정하면 디스크에 가해지는 힘 F 는 PA 와 같으므로 이 경우 유효 모멘트 팔길이 $R_{eff}^{(uni)}$ 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_{eff}^{(uni)} = \frac{1}{F} \int_{r_0}^{r_1} \int_0^\alpha Pr(rdrd\theta) = \frac{2}{3} \frac{(r_1^3 - r_0^3)}{(r_1 - r_0)(r_1 + r_0)} \quad (5)$$

여기서 r_1 와 r_0 는 패드의 바깥쪽 반지름과 안쪽 반지름이며, α 는 패드의 양끝 사이의 각도이다. 정지 시 각속도가 0인 사실을 고려하여 운동 방정식 (4)를 시간에 대해 적분하면 디스크의 제동시간 t_b 를 구할 수 있다.

$$\int_0^{t_b} \theta \ddot{t} dt = \dot{\theta}(t_b) - \dot{\theta}(0) = \int_0^{t_b} -\frac{M(t)}{I} dt$$

$$\dot{\theta}(0) = \frac{2\mu_d R_{eff}^{(uni)}}{I} \int_0^{t_b} F(t) dt \quad (6)$$

여기서 $\dot{\theta}(0)$ 는 초기 각속도, $\dot{\theta}(t_b)$ 는 디스크가 완전히 정지했을 때의 각속도를 의미한다. 식 (6)은 디스크가 정지할 때까지 일정한 동마찰계수를 적용하여 제동시간을 예측한 경우이다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 제동 시 발생하는 마찰열이 재료의 마찰계수에 영향을 주기 때문에 더 정밀한 예측을 위해서는 이에 대한 고려가 필수적이다.

이를 위해 본 연구에서는 동마찰계수 μ_d 를 로터 브레이크 시스템의 온도변화 ΔT 의 함수로 가정하였다.

$$\mu_d = \mu_d(\Delta T) \quad (7)$$

제동이 시작되면 회전에 의한 운동에너지는 패드와 디스크의 마찰로 인해 감소하게 되며, 운동에너지 손실량인 ΔE 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta E(\dot{\theta}) = \frac{1}{2} I [\dot{\theta}^2(0) - \dot{\theta}^2(t)] \quad (8)$$

이때 로터 브레이크 시스템을 단열로 가정하면 운동에너지의 손실이 시스템의 열에너지 증가와 동일하므로 온도변화는 식 (9)와 같이 표현될 수 있고, 마찰계수는 식 (10)과 같이 각속도의 함수로 표현할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{C_p(m_D + m_P)} \quad (9)$$

$$\tilde{\mu}_d(\dot{\theta}) = \mu_d(\Delta T) = \mu_d \left(\frac{\Delta E(\dot{\theta})}{C_p(m_D + m_P)} \right) \quad (10)$$

이때 C_p 는 재료의 비열, m_D 와 m_P 는 각각 디스크와 패드의 질량이다.

식 (10)에서 구한 동마찰계수를 운동방정식 (4)에 대입하여 적분하면 온도 변화에 따른 마찰계수의 변화를 적용한 디스크의 제동시간 $t_b^{(T)}$ 를 구할 수 있으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{M(t)}{I} = -\frac{2\tilde{\mu}_d(\dot{\theta})R_{eff}^{(uni)}F(t)}{I}$$

$$\frac{1}{\mu_d(\dot{\theta})} \frac{d(\dot{\theta})}{dt} dt = \frac{1}{\mu_d(\dot{\theta})} d(\dot{\theta}) = -\frac{2R_{eff}^{(uni)}F(t)}{I} dt$$

$$\int_0^{\dot{\theta}(0)} \left[\frac{1}{\tilde{\mu}_d(\dot{\theta})} \right] d(\dot{\theta}) = \frac{2R_{eff}^{(uni)}}{I} \int_0^{t_b^{(T)}} F(t) dt \quad (11)$$

2.1.2. 정적 접촉 해석을 이용한 이론식의 보정

2.1절의 이론식은 패드로부터 디스크에 가해지는 접촉압력이 패드 전체에 걸쳐 균일하다는 가정 하에 유도한 결과이다. 그러나 일반적으로 실제 피스톤을 통해 패드가 디스크에 압착됐을 경우 패드로부터 디스크에 가해지는 접촉압력은 균일하지 않게 작용하며[9], 이와 같이 접촉압력이 균일하지 않을 경우에는 유효 모멘트 팔길이 가 균일한 접촉압력이 가해지는 경우와 다르게 되므로 이에 대한 보정이 필요하다.

정적 접촉 유한요소 해석과 식 (3)을 통해 유효 모멘트 팔길이 $R_{eff}^{(SC)}$ 를 구하고 이를 $R_{eff}^{(uni)}$ 대신 사용하여 제동시간을 예측하는 보정식을 제안하였다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\dot{\theta}(0) = \frac{2\mu_d R_{eff}^{(SC)}}{I} \int_0^{t_b} F(t) dt \quad (12)$$

$$\int_0^{\dot{\theta}(0)} \left[\frac{1}{\tilde{\mu}_d(\dot{\theta})} \right] d(\dot{\theta}) = \frac{2R_{eff}^{(SC)}}{I} \int_0^{t_b^{(T)}} F(t) dt \quad (13)$$

앞서와 유사하게 식 (12)는 기계적 거동만을 고려하여 제동시간 t_b 를 구하는 식이고 식 (13)은 마찰계수의 온도에 따른 변화를 고려하여 제동시간 $t_b^{(T)}$ 를 구하는 식이다.

본 연구에서 다른 예제의 경우 정적 접촉 해석을 통해 구해진 유효 팔길이 $R_{eff}^{(SC)}$ 는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 식 (5)를 이용해 구한 모멘트 팔길이 $R_{eff}^{(uni)}$ 보다 더 긴 것을 확인할 수 있다.

그렇기 때문에 이 경우 정적 접촉 해석 보정식을 이용해 구한 제동시간은 간단한 이론식을 통해 구한 제동시간에 비해 짧아지게 된다.

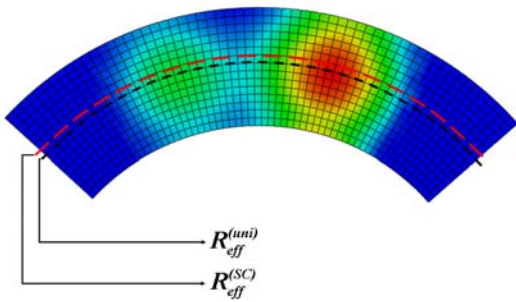


Fig. 2. 접촉 압력 분포와 유효 모멘트 팔길이

2.2. 시간 응답 해석

본 절에서는 앞서 제안한 열적 거동을 고려한 이론식 및 보정식의 타당성을 검증하기 위하여 시간 응답 해석을 이용하여 제동시간을 예측하는 제동 해석 과정에 대하여 기술하였다. 다루고자 하는 로터 브레이크 시스템은 서론에서 약술한 바와 같이 디스크와 패드 그리고 패드와 실린더를 지지하는 캘리퍼로 구성되어 있으며, 실린더에 유압을 가하여 패드를 디스크에 압착하고 이를 통해 로터를 제동하게 된다. 기본적으로 이는 탄성체 간의 동적 접촉-마찰 문제로 이해될 수 있다. 이와 더불어 디스크와 패드의 마찰로 인해 발생된 열이 디스크와 패드의 온도분포를 변화시켜 마찰특성을 변화시킴과 동시에 이들의 열변형을 유발하여 디스크-패드간의 접촉-마찰면을 변화시키는 이른 바 열적 거동과 기계적 거동이 상호 영향을 미치는 열기계학적 연성 거동을 보이게 된다.

본 연구에서는 이와 같이 로터 브레이크 시스템의 제동 시 열적, 기계학적 거동이 서로 강한 영향을 미치는 현상을 확인하기 위해 기계학적 거동만을 고려한 시간 응답 해석과 열기계학적 연성 시간 응답 해석으로 구분하여 해석을 수행하였다. 응답 해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS[7]를 이용하였으며, 본 연구에서와 같이 강한 비선형성을 가지는 해석의 경우 내재적(Implicit) 방법은 수렴성에 문제가 발생할 수 있기 때문에 외재적(Explicit) 방법을 채택하였다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 해석을 시작하기 위해서는 디스크와 패드에 온도, 속도, 변위에 대한 초기조건을 지정하고, 제동력을 부가하여야 한다. 해석은 시간스텝을 전진해가며 디스크가 정지할 때까지 반복적으로 수행된다. 기계학적 거동만을 고려한 시간 응답 해석의 경우 매 시간스텝마다 탄성체의 동적 접촉-마찰 문제만을 풀게 되지만, 열기계학적 연성 시간 응답 해석의

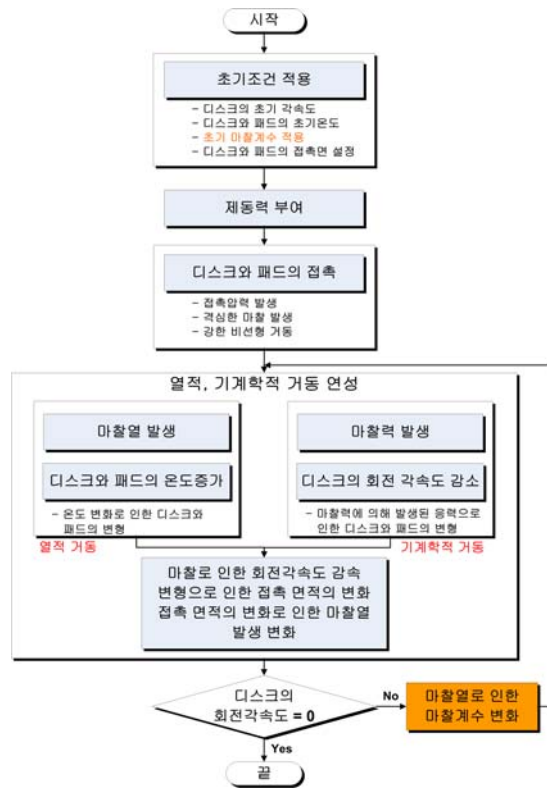


Fig. 3. 열기계학적 연성을 고려한 해석 과정

경우 매 시간스텝마다 탄성체의 동적 접촉-마찰 문제, 열전도 및 열탄성 변형을 함께 풀게 된다.

2.3. 로터 브레이크 시스템의 제원 및 물성치

로터 브레이크 시스템의 제동 시 패드에 가해지는 압력의 이력곡선과 온도에 따른 마찰계수 변화는 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다.

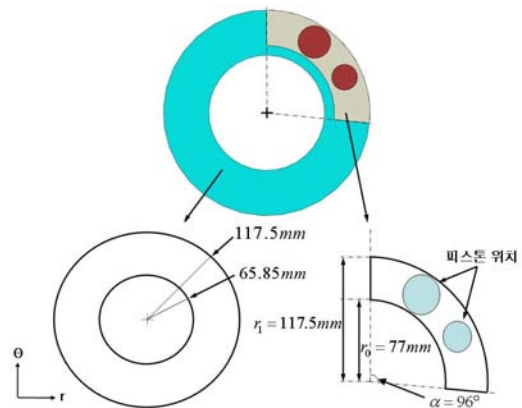


Fig. 4. 해석에 사용된 모델의 제원

Table 1. 탄소-탄소 복합재 물성치(횡등방성)(10)

	디스크, 패드
탄성계수(E_r)	50.2 GPa
탄성계수(E_z)	5.89 GPa
전단계수(G_{rz})	2.46 GPa
밀도(ρ)	1800 kg/m ³
포아송비($\nu_{r\theta}$)	0.3
포아송비(ν_{rz})	0.33
열전도도(k_r)	50 W/mK
열전도도(k_z)	10 W/mK
열팽창계수(α_r)	0.31 10 ⁻⁶ /K
열팽창계수(α_z)	0.29 10 ⁻⁶ /K
비열(c)	1420 J/kgK

Table 2. 하중조건 및 회전관성

패드에 가해지는 압력 (P)	4.65 MPa
회전 관성 (I)	19.8 kgm ²

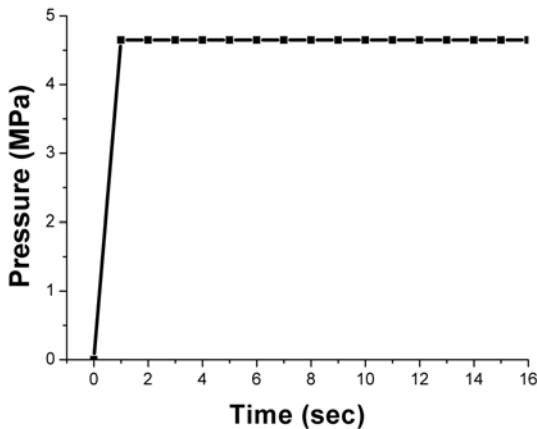


Fig. 5. 패드에 가해지는 압력의 이력곡선

기계학적 거동만을 고려한 제동해석과 열기계학적 연성 제동해석에 사용된 브레이크 시스템은 동일하며, 해석에 사용된 디스크와 패드의 유한요소 모델을 Fig. 7에 도시하였다. 이 모델의 경우 디스크의 두께방향으로 위아래가 대칭이므로 해석시간을 단축시키기 위해 디스크의 두께를 반으로 줄이고 패드를 한 개만 사용하여 해석하였다. 디스크에 사용된 요소는 3차원 8절점 감차적분 요소인 C3D8RT 요소이며 패드에 사용된 요소

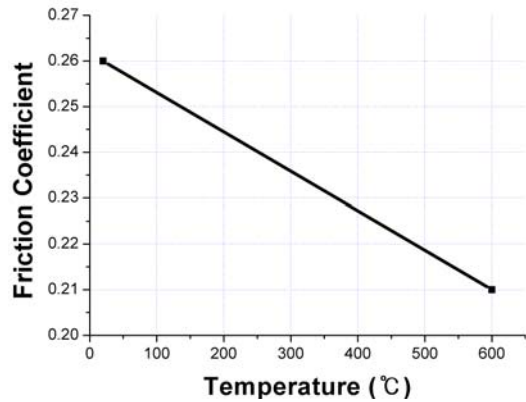


Fig. 6. 온도 변화에 따른 마찰계수의 변화

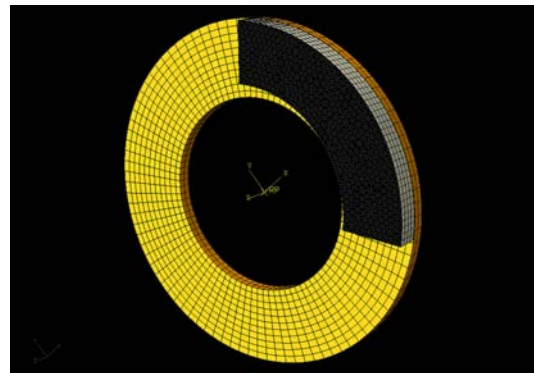


Fig. 7. 제동해석에 사용된 유한요소 모델

는 3차원 6절점 요소인 C3D6T이다. 전체 모델의 요소 수는 5702개, 절점 수는 5846개이다.

2.4 제동시간과 열기계적 거동 효과

앞 절에서 언급한 시간 응답해석을 통해 열기계학적 연성 거동이 제동시간에 미치는 효과를 고찰하였다. 기계적 거동만을 고려한 경우, 대류를 무시하고 열기계적 거동을 고려한 경우, 대류와 열기계적 거동을 모두 고려한 경우에 대하여 ABAQUS를 이용해 시간 영역에서 제동 해석을 수행하고 이를 통해 열적 거동이 제동시간에 미치는 효과를 고찰하였다. 기계적 거동만을 고려한 경우에는 디스크와 패드의 접촉면에서 발생하는 마찰열과 그로 인한 효과를 무시하고 디스크의 회전과 마찰력에 의한 거동만을 고려하였다.

Table 3에는 시간 응답 해석을 통해 제동시간을 예측한 세 가지 경우를 상세히 기술하였다. Case I에서는 마찰계수가 온도에 따라 변하지 않으며 그 값으로는 Fig. 5에서 20°C일 때의 마찰계수 0.26을 적용하였다. Case II와 Case III에

Table 3. 시간 응답 해석 방법을 이용한 제동시간 예측

제동시간 예측 방법	
Case I	- 기계학적 거동 - 마찰계수 일정(0.26)
Case II	- 기계학적 거동 + 열적 거동 - 마찰계수 변화 고려 - 대류 현상 고려하지 않음
Case III	- 기계학적 거동 + 열적 거동 - 마찰계수 변화 고려 - 대류 현상 고려

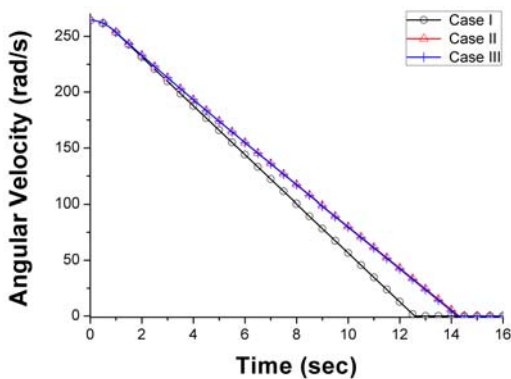


Fig. 8. 디스크의 회전 각속도 변화 비교

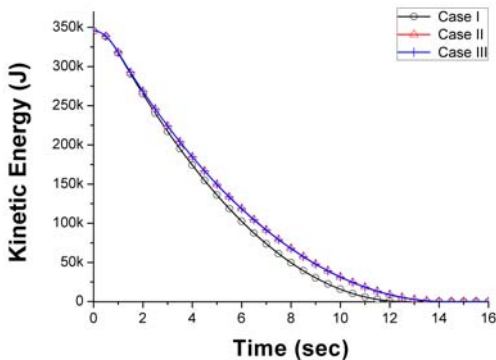


Fig. 9. 디스크의 운동에너지 변화 비교

서는 마찰계수가 Fig. 6에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 감소하게 된다.

Fig. 8-10에는 앞서 언급한 각각의 경우에 대한 디스크의 회전각속도, 운동에너지 및 열에너지 변화 이력곡선을 비교 도시하였다. 각각의 경우의 초기 각속도는 264.42 rad/s 이며, 운동에너지는 약 350 kJ 이다. 제동 초기에는 마찰열이 발생하지 않았으므로 Fig. 10에 나타난 바와 같이 열에너지는 '0'임을 알 수 있다. Fig. 8의 디스

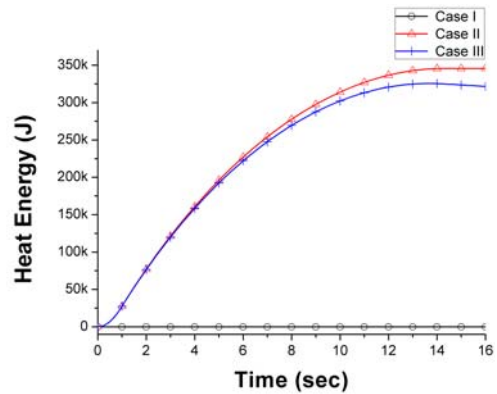


Fig. 10. 디스크의 열에너지 변화 비교

크 회전 각속도 변화 이력곡선에 도시한 바와 같이 디스크와 패드의 압착이 시작된 후부터 디스크의 회전 각속도는 감소하며, 결과로부터 Case I은 약 12.6초 이후, Case II는 약 15.0초 이후, Case III은 약 14.9초 이후에 디스크가 완전히 정지했음을 알 수 있다.

Fig. 9는 디스크의 회전에 따른 운동에너지 변화 이력곡선으로 두 가지 경우 모두 디스크의 회전 각속도가 감소함에 따라 운동에너지도 줄어들게 됨을 알 수 있다. 열기계학적 연성을 고려한 Case II와 Case III의 경우, 디스크의 운동에너지가 열에너지로 변환되면서 제동이 되므로 Fig. 10에 도시한 바와 같이 로터 브레이크 모델의 열에너지는 디스크가 완전히 정지할 때까지 점진적으로 증가한다. Case II는 해석 모델과 대기의 대류를 무시하였기 때문에 디스크가 정지한 이후 열에너지가 일정하게 유지된다. 반면에 Case III의 경우는 대류를 가정하였으므로 제동 중 발생하는 열에너지가 Case II보다 적고 디스크가 완전히 정지한 이후로는 다소 감소하는 이력을 보여준다. 이는 디스크가 완전히 정지하여 마찰열이 더 이상 발생하지 않고 열에너지가 열소산으로 인해 대기 중으로 빠져나가기 때문이다. 그러나 열기계학적 연성을 고려하지 않은 Case I의 경우에는 제동 해석을 수행할 때 열적 거동을 무시하기 때문에 열에너지가 발생하지 않는다.

2.5 각 방법에 따른 제동시간 예측

각 방법을 통해 구한 제동시간을 Table 4에 나타내었다. 먼저 기계적 거동만을 고려한 예측 방법 중에서 실제 현상을 가장 많이 반영한 동적 접촉-마찰 시간 응답 해석(Case I)을 통해 구한 제동시간과 기계적 거동만 고려한 이론식 및 보정식을 통해 얻은 제동시간을 비교하면 그 차이

가 각각 2.4%, 2.0%인 것을 알 수 있다. 이는 제동 시 동적 효과로 인해 정적 접촉 해석과 다른 접촉압력과 마찰력이 발생하고 이로 인해 유효 모멘트 팔길이가 길어지기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 열기계학적 연성을 고려하지 않은 Case I의 제동시간을 열기계학적 연성과 대류를 고려한 Case III의 제동시간과 비교하면 상당히 큰 차이(18.5%)가 있음을 확인할 수 있다. 이는 로터 브레이크 시스템의 열적 거동을 고려하지 않을 경우, 복잡하고 시간이 오래 걸리는 동적 접촉-마찰 시간 응답 해석을 수행하더라도 정확한 제동시간 예측이 쉽지 않음을 의미한다. 또한 열적 거동을 고려한 간단한 이론식과 Case III의 제동시간 차이가 6.6%임을 감안할 때, 열적 거동을 고려하지 않은 동적 접촉-마찰 시간 응답 해석 방법보다 오히려 본 연구에서 제시한 열적 거동을 고려한 간단한 이론식이 더 효율적이고 정확함을 알 수 있다.

Case II와 열적 거동을 고려한 이론식의 제동 시간에 차이가 발생하는 원인으로는 동적 접촉에 의한 유효 모멘트 팔길이가 길어져 제동시간이 짧아지는 점과 이론적 가정과 다른 국부적 온도 상승 및 그에 따른 마찰계수 감소로 제동시간이 길어지는 점을 들 수 있다. 이와 같은 원인들과 Case II의 제동시간이 이론식보다 더 길다는 결

과로부터 열적 거동 효과가 제동시간에 가장 중요한 영향을 주는 인자임을 간접적으로 다시 확인할 수 있다.

그리고 대류의 영향을 고려(Case III)하면 고려하지 않은 경우(Case II)에 비해 제동시간이 미미하게 감소하게 되는데, 이는 대류를 고려하지 않은 경우에 비해 온도가 적게 증가하게 되어 마찰계수 또한 적게 감소하기 때문으로 판단된다.

III. 결 론

로터 브레이크 시스템의 제동 시 발생하는 마찰열은 재료의 마찰 특성을 변화시켜 제동시간의 변화를 초래한다. 이에 본 연구에서는 열적 거동을 감안하여 마찰계수 변화를 고려할 수 있는 간단한 이론식과 정적 접촉해석을 통해 이론식을 보정할 수 있는 기법을 제안하였다.

제안된 기법들(열기계학적 연성 시간 응답 해석, 이론식, 보정식)을 이용해 로터 브레이크 시스템의 제동시간을 예측하고, 유한요소 해석을 통해 본 연구에서 제시한 열적 거동을 고려한 이론식 및 보정식의 타당성을 검증하였다.

또한 이들의 결과를 열기계학적 연성을 고려하지 않은 경우들(시간 응답 해석, 이론식, 보정식)과 비교하였다. 결과 비교를 통해 열적 거동을 고려하지 않을 경우 해석비용이 큰 동적 접촉-마찰 시간 응답 해석을 수행할지라도 열적 거동을 고려한 간단한 이론식보다 부정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 로터 브레이크 시스템의 제동시간에 영향을 미치는 가장 큰 요인 중 하나가 온도에 따른 마찰계수 변화 효과인 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품 개발사업(KAI주관, (주)한화 개발) 위탁연구 결과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 고길주, 조민형, 장호, "마찰재에 함유된 금속섬유와 마찰 특성의 연관관계", *Journal of the KSTLE*, Vol. 17 No. 4, Aug. 2001, pp. 267~275.
- 2) A. E. Anderson, R. A. Knapp, "Hot spotting in automotive friction systems", *Wear*, Vol. 135, 1990, pp. 319-337

Table 4. 예측 방법에 따른 제동시간 비교

제동시간 예측 방법		제동시간 (sec)
기계적 거동	간단한 이론식 이용 (마찰계수 일정)	12.9 (12.885)
	정적 접촉 해석을 통한 보정 (마찰계수 일정)	12.8 (12.837)
	Case I (마찰열 무시, 일정한 마찰계수)	12.6 (12.585)
기계적 거동 + 열적 거동	간단한 이론식 이용 (마찰계수 변화)	14.0 (13.991)
	정적 접촉 해석을 통한 보정 (마찰계수 변화)	13.9 (13.938)
	Case II (마찰열 고려, 대류 무시, 온도에 따른 마찰계수 변화)	15.0 (14.970)
	Case III (마찰열 고려, 대류 고려, 온도에 따른 마찰계수 변화)	14.9 (14.915)

* () 안의 제동시간은 계산 출력값

3) Kwangjin Lee, "Frictionally excited thermoelastic instability in automotive drum brakes", *Journal of Tribology*, Vol. 122 Issue 4, Oct 2000, pp. 849-855

4) Chongdu Cho, Sooick Ahn, "Transient thermoelastic analysis of disk brake using the fast fourier transform and finite element method", *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 25, 2002, pp. 215~243.

5) Didier Majcherczak, Philippe Dufenoy, Moussa Nait-Abdelaziz, "Third body Influence on thermal friction contact problems : application to braking", *Journal of Tribology*, Vol. 127, No.1, Jan 2005, pp. 89-95

6) 이재한, 김명구, 조종두, 박창호, 이상교,

"디스크 브레이크 임계속도에 의한 Hot Spot Analysis", *대학기계학회 추계 학술대회*, 2005, pp. 2011~2016

7) *ABAQUS Analysis user's manual*, version 6.8.

8) 최장훈, 오민환, 조진연, 김상범, 정은성, 장기원, "마찰을 고려한 로터 브레이크 시스템의 제동시간 예측", *한국항공우주학회 추계 학술대회*, 2007, pp. 903-906

9) Abd Rahim Abu Bakar, Huajiang Ouyang, "Prediction of disc brake contact pressure distributions by finite element analysis", *Journal Teknologi*, 43(A) Dis., 2005, pp. 21-36

10) Ji-Hoon Choi, In Lee, "Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes", *Wear*, 257, 2004, pp. 47-58