

제동시 피스톤 소재를 고려한 브레이크 오일 온도의 수치적 예측

김수태*, 김진한⁺, 김주신⁺

Numerical Prediction of Brake Fluid Temperature Considering Materials of Piston During Braking

S. T. Kim*, J. H. Kim⁺, J. S. Kim⁺

Abstract

Recently, many studies have been performed and good results have been reported in literature on the prediction of the brake disk temperature. However, study on the brake fluid temperature is rarely found despite of its importance. In this study, brake fluid temperature is predicted according to material property of brake piston. For the analysis, a typical disk-pad brake system is modeled including the brake disk, pad, caliper, piston and brake fluid. Vehicle deceleration, weight distribution by deceleration, disc-pad heat division and the cooling of brake components are considered in the analysis of heat transfer. Unsteady-state temperature distribution are analyzed by using the finite element method and numerical results are compared with the vehicle test data

Key Words : Disk-Pad Brake(디스크-패드 브레이크), Finite Element Method(유한 요소 해석), Friction heat(마찰열), Brake Fluid(브레이크 오일), Caliper(캘리퍼), Brake Fluid Vaporization(브레이크 오일 증기화)

1. 서론

디스크-패드식 브레이크 장치는 제동의 안정성, 조절성, 제동 토크 안정성 등의 이점 때문에 자동차용 브레이크 시스템에 광범위하게 사용된다. 이러한 브레이크시스템의 제동과정은 매우 복잡하다. 제동 과정중의 모든 파라미터(속도, 하중, 온도, 재료의 윤활특성 등)는 시간에 종속된다.

제동 중 디스크와 패드 마찰 면에서 발생하는 마찰열은 높은 온도를 야기 시키고, 마찰 면에서의 높은 온도발생은 브레이크 시스템에서 페이드 현상, 베어링 파손, 브레이크 오일 증기화, 열적 진동, 열 크랙 등을 발생시켜 성능 저하의 원인이 된다. 따라서 이러한 브레이크 시스템에서의 온도 예측은 브레이크 성능을 결정하는 중요한 요소로써 작용한다.

* 주저자, 창원대학교 기계공학과 (stkim@changwon.ac.kr)

주소: 641-562 창원시 사림동 창원대학교 기계공학과

⁺ 창원대학교 기계공학과 대학원

최근 브레이크 디스크에서의 온도 예측에 관한 연구는 많이 수행되었고, 좋은 결과를 보여주고 있다⁽¹⁻⁷⁾. 그러나 브레이크 오일의 온도 예측에 관한 연구는 그 중요성에도 불구하고 전무한 실정이다. 또한 자동차의 고출력화, 경량화, 고속화 추세에 따라 브레이크는 더욱 가혹한 상태에서 운전되어야만 하고, 브레이크 시스템에서 온도는 더욱 높아질 것이다. 따라서 이번 연구는 디스크, 패드, 캘리퍼, 실린더, 펌 등으로 구성되어 있는 전형적인 디스크-패드식 브레이크 시스템에서 패드와 캘리퍼, 브레이크 오일에서의 온도를 예측하고자 한다. 그리고 자동차의 세계적 추세에 따라 경량화의 일환으로 브레이크 시스템에서 유압을 전달하는 실린더에서 금속재 피스톤을 페놀 수지 피스톤으로 교체하고 이에 따른 브레이크 시스템에서 각부의 온도 및 브레이크 오일의 온도를 예측하고 브레이크 시스템의 성능을 평가하고자 한다.

2. 실험

본 연구에서는 자동차 제작사에서 일반적으로 실시하는 브레이크 성능 실험 중 높은 산에서 내려오면서 제동과 가속의 오랜 반복으로 이루어진 알파인 테스트 조건으로 비교 실험을 실시하였다. 알파인 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Alpine Test

	초기 속도 [Km/hr]	말기 속도 [Km/hr]	감속도 [g m/s ²]
sub 1	43	12	0.38
sub 2	43	17	0.34
sub 3	41	14	0.39
sub 4	46	31	0.51
sub 5	68	20	0.53
sub 6	50	13	0.52
sub 7	58	48	0.41
sub 8	60	22	0.33
sub 9	54	13	0.48
sub 10	49	31	0.49
sub 11	64	33	0.43
sub 12	57	14	0.3
sub 13	74	25	0.48
sub 14	56	40	0.31
sub 15	64	23	0.44
sub 16	55	25	0.45
sub 17	67	30	0.45
sub 18	60	40	0.29
sub 19	92	70	0.68
sub 20	87	45	0.5
sub 21	82	63	0.35
sub 22	67	26	0.49
sub 23	90	24	0.63
sub 24	69	58	0.24
sub 25	64	50	0.55
sub 26	60	33	0.46
sub 27	85	62	0.55
sub 28	79	53	0.55
sub 29	85	54	0.62
sub 30	70	52	0.61

sub 31	61	25	0.16
sub 32	78	32	0.65
sub 33	71	28	0.62
sub 34	74	57	0.66
sub 35	101	65	0.43
sub 36	99	64	0.53
sub 37	90	25	0.56
sub 38	75	25	0.59
sub 39	110	75	0.52
sub 40	87	64	0.52
sub 41	77	40	0.32
sub 42	75	45	0.33
sub 43	67	42	0.51
sub 44	57	34	0.36
sub 45	64	44	0.38
sub 46	76	60	0.43
sub 47	65	30	0.56
sub 48	97	28	0.41
sub 49	79	24	0.22
sub 50	94	28	0.48
sub 51	85	34	0.49
sub 52	69	28	0.42
sub 53	63	40	0.37
sub 54	91	0	0.48

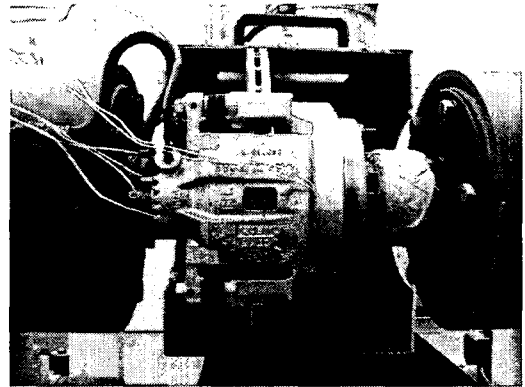


Fig. 1 Installed disc-pad brake for dynamo test

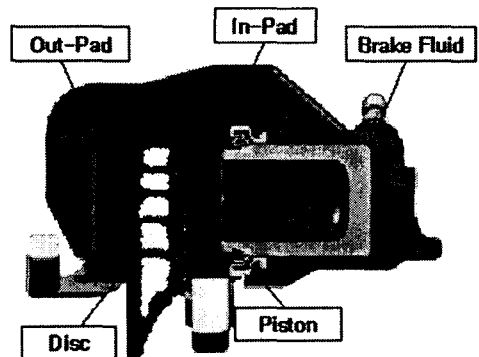


Fig 2 Measured position for temperature

Fig. 1은 실험을 위해 다이내모 미터에 설치된 브레이크 장치이다. 본 실험에서는 다이내모 미터를 사용하였으며,

모터 회전축과 연결된 디스크가 회전하게 되고 이에 따라 실린더에 압력을 가함으로써 패드를 밀어 각 감속도에 따른 제동 토크를 발생시켜 준다. 그리고 자동차의 무게를 고려하기 위해 플라이휠을 통해서 관성력을 부여한다. 이와 같은 조건으로 디스크와 패드에 제동을 가해주고, 마찰 면에서 발생하는 열을 각 지점에 부착된 온도 센서를 통해서 계측하였다. 한편 캘리퍼는 페놀 수지형 피스톤과 금속재 피스톤을 사용하여 비교 실험을 수행하였다. 실험 조건과 다이나모 미터의 재원은 Table 2 및 Table3과 같다.

Table 2 Specification of experiment Condition

Item	Specification
Tire Roll Radius [mm]	361
Initial Temperature [°C]	30
Atmosphere Temperature [°C]	30
Inertia	2.7

Table 3 Dynamo meter specification

Item	Specification
Type	Dual Type
Max. Inertial [kg · m]	16.7
Max. RPM [km/h]	2000
Torque [kgf · m]	250
Pressure [kgf/cm ²]	350
Max. Temp. [°C]	1000

3. 수치 해석

3.1 브레이크 발열 특성

디스크와 패드 마찰 면에서의 발생하는 마찰열은 운동 에너지에서 전환된 열이다. 이로부터 브레이크에서의 발열은 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\dot{q} = \frac{C_1 C_2 C_3 \gamma k m a V(t)}{A} \quad (1)$$

여기서, C_1 : 전후륜 발열비

C_2 : 한쪽 바퀴 브레이크의 비율

C_3 : 패드 한쪽 면에 대한 비율

$$\gamma = \frac{\dot{q}_p}{\dot{q}_r + \dot{q}_p} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_p c_p k_p}{\rho_r c_r k_r} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

: 패드에서의 열 분배비

k : 회전체 질량의 보정 계수

$V(t)$: 차량의 속도 [m/s]

m : 차량의 질량 [kg]

a : 감속도 [m/s²]

A : 발열 면적 [m²]

마찰 면에서의 발열을 해석하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 자동차의 운동 에너지는 제동시 모두 열에너지로 전환된다.
- 2) 복사에 의한 열전달은 전도 및 대류에 비해서 영향이 작은 값으로 보고 무시한다.
- 3) 디스크와 패드 사이에서 발생하는 마찰열은 접촉면에서 균일하게 생성된다.

3.2 브레이크의 냉각 특성

캘리퍼와 패드에서의 냉각은 David 등의 경험식⁽¹¹⁾을 사용하였다.

$$Nu = 0.174 (Re_t)^{0.618}$$

$$\text{여기서, } Re_t = \frac{\phi V_r D}{2(\nu)}, \phi = \frac{V^*}{V_r}$$

V^* : Cooling flow velocity [m/s]

V_r : Vehicle velocity [m/s]

3.3 지배 방정식 및 물성치

각 제동 구간의 시간에 따른 열전달을 해석하기 위한 3차원 비정상 열전달 방정식 및 각 재료의 물성치는 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (2)$$

여기서, ρ : 밀도, c : 비열,

T : 온도 [T(x,y,z,t)], t : 시간(time)

k : 열전도율, \dot{Q} : 발열량

수치 해석에서 사용된 물성치는 Table 3과 같다.

Table 3 The properties of materials

	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/kg·°C]	Thermal conductivity [W/m·°C]
Disc	7272	420	52
Pad	2595	1465	1.5
Caliper	7228	419	48.5
Piston (phenol)	1380	960	1.5
Air	1.143	1006	0.0268
Brake fluid	1117	2386	0.257

3.4 브레이크의 모델링

각 제동 구간에 대한 브레이크의 발열 특성을 해석하기 위해서 마찰 표면에서의 발열 및 각 재질에 따른 열전달 특성 등을 고려하여 모델링을 Fig. 3과 같이 하였다.

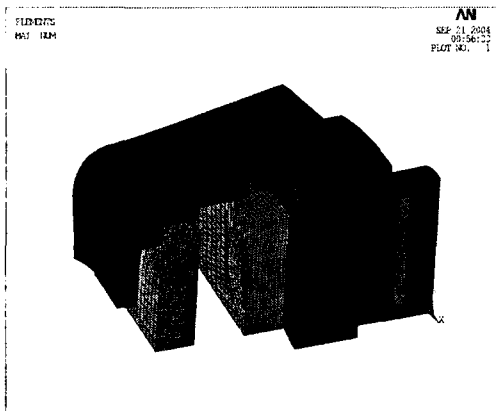


Fig. 3 FEM model of Brake System

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 알파인 조건으로 금속재 피스톤의 재질로 실험한 결과이다. 디스크와 마찰 면(디스크)에서의 온도가 가장 높게 나타났다. 그리고 마찰 면에서 떨어질수록 점점 낮아지는 경향이 나타나고 있다. 양쪽 패드 중 바깥쪽에 위치한 패드는 상대적으로 안쪽보다 낮은 온도를 보이고 있다. 이는 바깥쪽은 외부 공기와 접촉면이 상대적으로 많기 때문에 대류 열전달이 커서 안쪽 패드보다 낮은 온도를 보이고 있

는 것이다. 그리고 패드 뒤쪽에 위치한 피스톤과 브레이크 오일은 열이 전달되기 까지 시간(발열이 끝난 후 약 1000 초)이 걸리기 때문에 마찰 면이 최고온도에 도달한 후에 최고 온도에 도달한다.

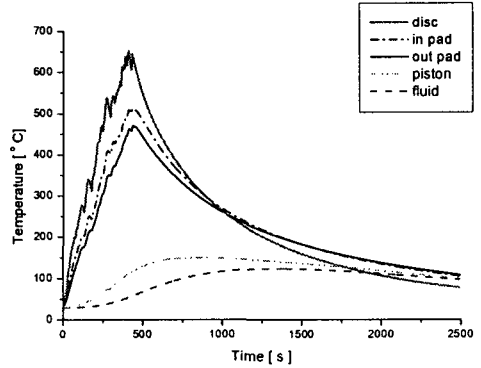


Fig. 4 Temperature distribution (steel piston)

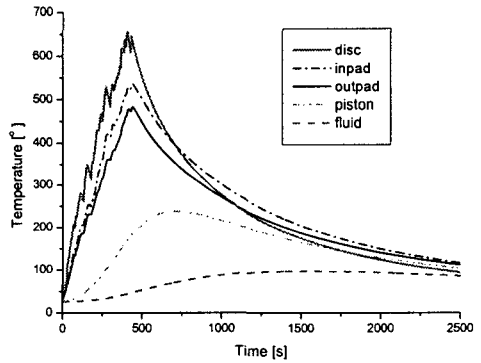


Fig. 5 Temperature distribution (phenol resin piston)

Fig. 5는 알파인 조건으로 페놀 수지 피스톤 재질로 실험한 결과이다. 마찰 면에서 온도는 금속재 피스톤과 비슷한 결과를 보이고 있다. 그러나 피스톤 온도의 경우 금속재 피스톤에 비해서 페놀 수지 피스톤이 약 60% 높게 나타난다. 이것은 디스크와 패드 사이에 발생한 마찰열이 피스톤을 통해 열전달이 일어나야 하지만 페놀 수지 피스톤은 금속재 피스톤에 비해서 낮은 열전달률로 인하여 전달되지 못하고 피스톤에 흡수되기 때문이다. 또한, 이 같은 영향으로 브레이크 오일에서의 온도는 페놀 수지 피스톤이 약 27% 정도 낮게 나타난다. 일반적으로 알파인 실험 조건에서 브레이크 디스크의 온도는 700°C 이하, 브레이크 오일 온도는

180°C 이하로 규정하고 있다.

Fig. 6, 7은 알파인 조건에 따라 발열량을 주고 수치 해석한 결과이다. 실험 결과와 비교해 보면 발열 시에 각 지점의 온도는 잘 일치하는 것으로 나타났다. 발열이 끝난 후 피스톤, 브레이크 오일의 온도 상승도 실험 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 각 지점에서의 최고 온도를 비교해 보면 수치 해석 결과에서 디스크와 패드에서의 온도는 잘 일치하고 있으나, 피스톤과 브레이크 오일에서의 온도가 약간 차이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 재질의 온도 특성, 열전달 특성 등의 원인에 따른 것으로 파악된다. 따라서 이 같은 문제를 해결하기 위하여 추후 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

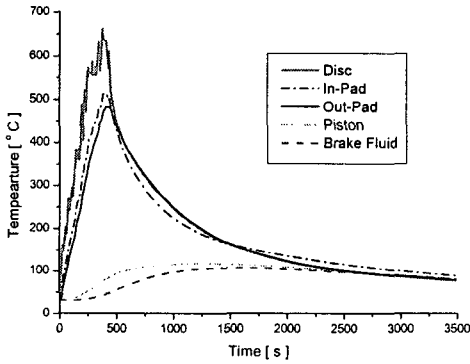


Fig. 6 Temperature distribution (metal piston)

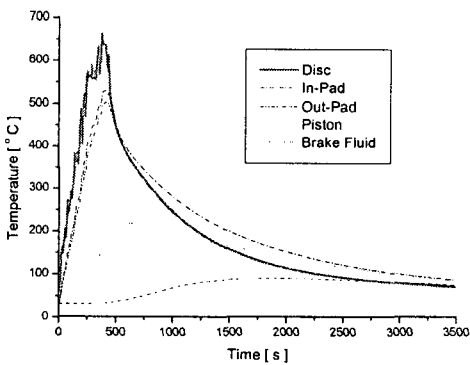


Fig. 7 Temperature distribution (phenol resin piston)

각 재질에 따른 실험과 수치 해석 중에서 최대 온도 분포를 Table 5에 제시하였다.

Table 4 Experiment Data (Max. Temp)

		Disc	In Pad	out pad	Piston	Brake Fluid
steel piston	Temp [°C]	652	514	470	149	123
phenol piston	Temp [°C]	655	535	483	238	97

Table 5 Analysis Data (Max. Temp)

		Disc	In Pad	out pad	Piston	Brake Fluid
steel piston	Temp [°C]	661	513	481	116	107
phenol piston	Temp [°C]	662	529	499	217	89

5. 결론

페놀 수지 피스톤을 사용한 브레이크 시스템과 금속재 피스톤을 사용한 브레이크 시스템의 열 특성 해석을 하고 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 페놀 수지 피스톤을 사용한 경우 페놀 수지의 낮은 열전달률로 인하여 브레이크 오일 온도는 낮게 나타났고, 피스톤의 온도는 높게 나타났으나, 온도 상승 정도는 규정된 온도 범위 내에서 발생하였다.

(2) 페놀 수지 피스톤을 사용하였을 경우 패드와 디스크에서의 온도 영향은 거의 발생하지 않는다.

(3) 수치 해석을 통해 비교적 정확히 브레이크 시스템의 온도를 예측 가능함으로써 향후 브레이크 시스템 설계에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국 과학 재단 지정 창원대학교 공작기계 기술 연구 센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) David C Sheridan, James A. Kutchey, and Farzad Samie, "Approaches to the Thermal Modeling of Disc Brakes", SAE, 880256
- (2) Masataka Yano and Masahiko Murata, "Heat Flow on Disc Brakes", SAE, 931084
- (3) S. Morgan and R. W. Dennis, "A Theoretical Prediction of Disc Brake Temperatures and a Comparison with Experimental Data", SAE, 720090
- (4) C. H. Gao and X. Z. Lin, "Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model", Journal of Materials Processing Technology 129(2002), 513-517
- (5) Taein Yeo, "Axisymmetric Temperature Analysis of Ventilated Disk using Equivalent Parameters", KSAE, Vol.11, No.1
- (6) Su Ki Lee, Boo Young Sung and Sung Kyu Ha, "Optimal Design of Ventilated Disc Brake Rotor"
- (7) Il Kwon Lee and Chung Kyun Kim, "Finite Element Analysis on the Thermoelastic Wear Behaviors for a High-Speed Disk Brake", Journal of the KSTLE, Vol. 15, No. 4, 291-296
- (8) Kwangjin Lee, "Numerical Prediction of Brake Fluid Temperature Rise During Braking and Heat Soaking", SAE, 1999-01-0483
- (9) Rudolf Limpert, "Brake Design and Safety", SAE, 111-172
- (10) Rudolf Limpert, "The Thermal Performance of Automotive Disc Brake", SAE, 750873
- (11) Rudolf Limpert, "Cooling Analysis of Disc Brake Rotors", SAE, 751014
- (12) Yunus Al Cengel, "Heat transfer", McGraw-Hill