

통풍식 자동차 디스크 브레이크의 열탄성 불안정성에 관한 실험적 연구

조병수 · 백병준* · 박복춘* · 김종환** · 김완두***

군장공업전문대학 자동차시험과
*전북대학교 공과대학 기계공학부
**전북대학교 대학원 정밀기계공학과
***한국기계연구원 신교통기술연구부

An Experimental Study of Thermoelastic Instability in Automotive Ventilated Disk Brake

Byung-Soo Cho, Byung-Jun Baek, Bok-Choon Park, Jong-Hwan Kim and Wan-Doo Kim

Department of Automotive Testing, Kunjang Technical College
**Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University*
***Graduate School, Chonbuk National University*
****Korea Institute of Machinery and Materials*

Abstract—The present study describes an experimental investigation of temperature fluctuations associated with thermal instability. Surface temperatures of brake disk and pad were monitored at various locations in a caliper type brake system during drag braking conditions. It was found that the thermal instability appeared in pad more seriously than in disk. The temperatures at various circumferential positions fluctuate synchronously, whereas the center temperature fluctuates with 180° phase difference from the outer and inner radius temperatures. The temperature and amplitude of the temperature perturbations are increased due to the increase of contact area in the center location. It was also found that the thermal instability was dominantly determined by the increase of rotation speed and pressure. And the modification of ventilation path could retard the onset of thermal instability.

Key words—brake disk, pad, drag braking, floating caliper, thermoelastic instability.

1. 서 론

경제 성장과 함께 요구되고 있는 수송량의 증대 및 운행 시간의 단축은 차량의 고속화를 필수로 하고 있으나, 차량의 속도 제곱에 비례하는 운동 에너지는 차량의 속도가 빨라질수록 브레이크에 걸리는 열 부하는 급격히 증가한다. 마찰에 의한 제동이 지속되는 동안 모든 마찰 일은 열로 변환되어, 주위 환경의 온도 상승을 야기시킨다. 이 온도 상승은 효율적이고 안전한 작동 조건 및 마찰 재료의 선택, 브레이크 판과 차륜의 최적 부하 결정 등에 있어서 중요한 인자

가 된다.

기계식 브레이크의 마찰에 의한 열발생, 열변형 및 탄성 접촉 등의 상호작용은 마찰면에서의 불균일 접촉을 야기시키며, 이 불균일 접촉은 특히 구름 속도가 높을 때 매우 불안정하게 되어 국부적인 접촉에 의한 고온점(hot spot)을 형성하는 열탄성적 불안정성(TEI, thermoelastic instability)의 원인이 된다. 이런 열탄성적 불안정성은 많은 실제적 적용에서 관심의 대상이 되어 왔으며, 특히 철도 차량과 비행기 브레이크[1]의 접촉 압력의 불균일, 열팽창 등이 고찰된 패드의 순응을 위한 형상이 제안된 바 있으며, 최근 자동차 제동

시스템의 재질 및 설계 향상과 더불어 관심이 증대되고 있다.

Floquet와 Dubourg[2]는 축대칭으로 운동하는 3차원 브레이크 모델에 비대칭, 비정상 상태의 열유속 조건에 대한 분석을 수행하였다. 그들은 푸리에 변환 기법과 유한 요소법을 조합한 새로운 FFT-FEM 기법을 사용한 해석을 시도하여 브레이크내 비대칭적 온도장을 계산하였으나, 이론적, 수치적 열분석에 있어 이 온도의 열적 불안정성에 대한 고찰의 한계가 있었다.

Day[3]는 트럭 브레이크의 브레이크 마찰에 대한 유한요소기법을 도입하여 고압력 제동시 브레이크의 온도, 라이닝 마모와 압력분포, 열적 변형을 예측하고, 마찰면에서의 표면온도에 대한 비교적 정확한 온도예측을 한 바 있다.

Sasaki등[4]은 마찰면의 미시적 고찰을 통해서 미소 접촉점에서의 순간적 온도는 1000°C이상의 고온이 발생되며, 이 접촉면에서 용융, 열분해, 산화, 화학적 작용 등이 이루어짐을 설명하였다.

Matsuzaki등[5]은 접촉면에서의 소음 발생에 미치는 열팽창, 패드모양, 미끄럼 조건 등의 메커니즘을 규명함으로써 접촉면의 변화에 따른 소음제거를 논했으나, TEI와 관련시켜 검토할 필요가 있었다.

열탄성적 불안정 현상은 마찰열의 발생이 심각한 자동차 브레이크와 클러치 등에서 실질적으로 대두되는 문제로서 Barber 등[6]에 의해 총괄적으로 검토되어 브레이크 작동조건이 최대 온도 도달에 미치는 영향이 조사되었다.

Kwangjin Lee[7,8]는 자동차 브레이크 브레이크의 열탄성 불안정성에 미치는 브레이크 브레이크 두께, 대칭성, 교란의 파장, 마찰재료의 성질 등의 영향이 총괄적으로 검토하였다. 이와 같이 TEI와 관련된 국소적 고온 부의 형성은 재질의 퇴화, 열적 기계적 파손(MC. Fec[9])과 페이드 현상 등 브레이크 성능 저하를 야기시킨다.

Tranvir[10]는 브레이크 온도상승에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 철도 차량에 사용되는 원판 브레이크에 통풍구(ventilated hole)를 설치하여 냉각 성능이 향상될 수 있음을 확인하였다.

그러나 현재 국내에 사용되고 있는 자동차용 통풍식 브레이크 판 및 패드의 열적 성능에 대한 자료는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 시판되고 있는 한 특정회사의 브레이크 시스템을 사용

하여, 일정시간 동일한 회전속도로 주행중 제동(drag braking)하였을 때 그 열적 성능을 분석하고자 한다. 즉, 브레이크 판과 패드 사이의 마찰에 의해 발생하는 열 부하에 따른 브레이크 판 내의 온도 특성을 측정함으로써 그들에 미치는 접촉압력, 회전속도의 영향을 관찰하고 열적 불안정성을 저감시킬 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

연구에 적용된 개략적인 실험장치는 Fig. 1과 같다. 전기 구동모터(20 HP)에 의해 동력이 전달되는 브레이크 판 및 브레이크 패드가 선반대에 설치되며, 브레이크 마찰면은 압축된 공기에 의해 부동형 캘리퍼(floating caliper)형태로서 가압되도록 하였다. 압축 공기는 완충탱크(surging tank)를 통과시킴으로써 순간적 변화를 방지한다.

브레이크 판의 회전속도는 구동모터에 각각 직경 7.6 cm, 12.8 cm, 27.4 cm의 풀리에 V 벨트를 연결하여 조정하였으며, 그 회전 속도 및 브레이크에 작용하는 접촉압력은 각각 회전 속도계와 압력계에 의해 탐지된다.

브레이크 판 및 패드의 온도는 K형 열전대(No. 24 Gauge)를 사용하여 측정하였다. 브레이크 내의 온도는 일반 열전대를 사용하는 측정방법으로는 브레이크의 회전운동 때문에 측정이 불가능하나, 수은접촉의 슬립 링(slip ring; SR 36M)을 사용하여 회전체의 미소 전위차를 자료 획득장치(data acquisition system; DT 2835)로 전송시킴으로써 온도변화를 측정하였다.

온도측정용 A/D변환기는 주위로부터의 잡음에 매우 민감하다. 따라서 열전대와 연결선은 특수 제작된 자료전송용 전선을 사용하였으며, 열전대의 기준점 보상을 위한 온도센서를 갖는 단자판(terminal panel)과의 연결시 각각의 채널이 접지를 갖도록 하는 차등방식(differential mode)으로 연결하여 잡음의 영향을 최소화하였다.

Fig. 2는 브레이크 판과 패드의 원주 방향 및 반경 방향의 온도교란(fluctuation)을 측정하기 위하여 가공된 구멍의 위치를 보여주는 그림이다. 브레이크 표면으로부터 1 mm위치에 직경 1.5 mm 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하고 세라믹 본드를 이용하여 열전대를 고정시킨다. 6개의 열전대를 설치하여 통풍의 영향 및 브

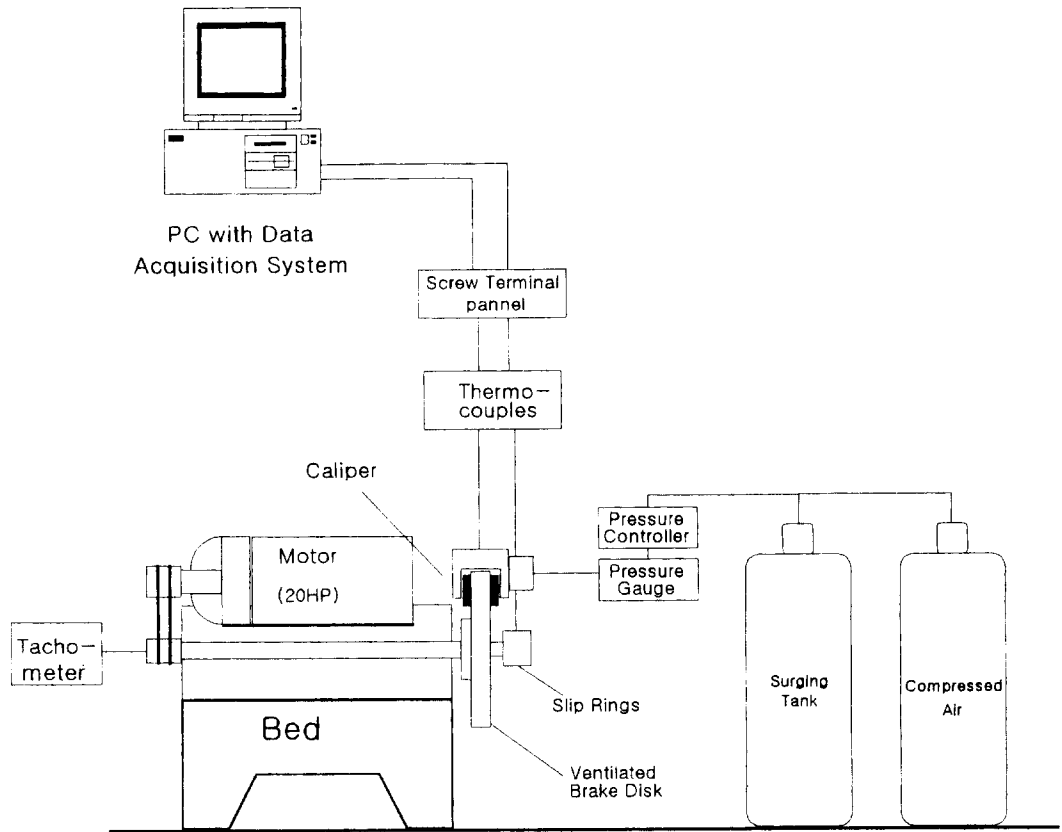


Fig. 1. Experimental apparatus and data acquisition system

레이크 내부의 원주 방향으로 발생하는 시간에 따라 변화하는 온도 변화를 측정하였다. 브레이크 외부 패드에는 12개의 열전대를 설치하여 브레이크 패드로부터 발생하는 열적 불안정성을 반경 방향($r=88\text{ mm} \sim r=120\text{ mm}$)과 원주 방향($\varphi=0^\circ \sim \varphi=45^\circ$)을 따라 측정하였다.

모든 실험은 브레이크 라인 내의 최대압력(제동시 모터의 회전이 가능한 최대압력) $P_{\max}=180\text{ kPa}$ 이내($P=80\text{ kPa}$, $P=130\text{ kPa}$)의 정격회전 상태에서 실험을 실시하였다. 브레이크의 회전 속도는 7.65 cm , 13.8 cm , 27.4 cm 인 풀리의 직경에 따라 각각 $\omega=375\text{ rpm}$, $\omega=755\text{ rpm}$, $\omega=1200\text{ rpm}$ 의 정상속도에 도달되면 일정시간 동안($t=1200\text{ 초}$) 제동이 지속되는 상태에서 온도변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

디스크 브레이크 표면 및 패드사이의 마찰표면은

수많은 요철의 미시적 접촉을 이루며, 제동시 차량의 운동에너지가 이 수많은 접촉점에서 열에너지로 바뀐다. 동일 제동 에너지에서 접촉점의 온도는 증가된 접촉 면적에 의해 비교적 낮은 온도를 유지할 수 있으나, 미소 접촉점에서는 제동 시간이 진행됨에 따라 순간적인 고온이 발생되어 열적 불안정성을 야기시키는 요인이 된다.

Fig. 3은 열적 불안정성이 나타나지 않는 경우에 대한 브레이크 판의 온도 변화를 측정된 결과이다. 회전 속도 375 rpm 과 낮은 작용압력 $P=80\text{ kPa}$ 일 때 브레이크 판과 패드의 접촉시간이 증가함에 따라 브레이크 판의 표면온도는 반경방향의 위치($r=88\text{ mm}$, $r=104\text{ mm}$, $r=120\text{ mm}$)와 무관하게 점진적인 온도상승을 나타내고 있다. 작용압력이 증가함에 따른 제동력 증가는 판의 평균온도를 상승시키며, 압력이 $P=180\text{ kPa}$ 로 증가하면 판의 반경 방향위치에 따른 온도상승이 크게 변화하여 $t=300\text{ 초}$ 이후부터는 그 표면 온도차가

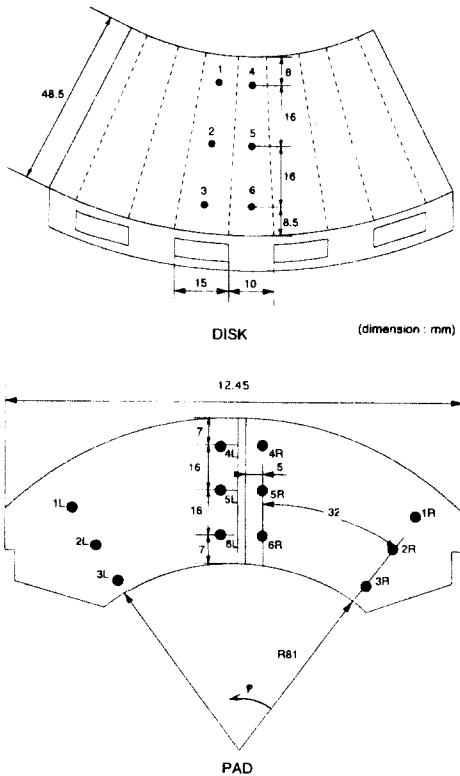


Fig. 2. Thermocouple locations of disk and pad

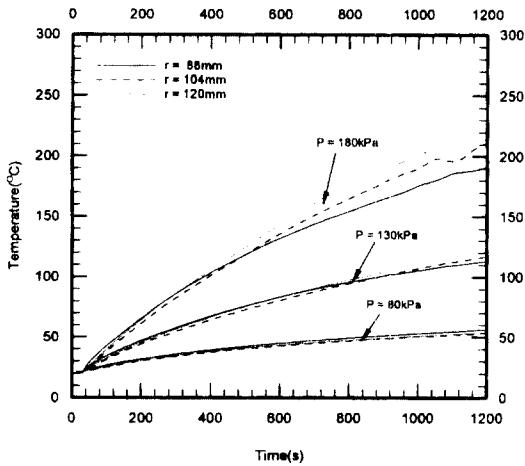


Fig. 3. Temperatures for the thermoelastically stable cases in the ventilated disk ($\omega=375$ rpm).

증가함을 알 수 있다. 외측반경($r=120$ mm)인 지점에서는 동일 회전 속도일지라도 원주방향의 미끄럼 속도의 증가로 인하여 그 평균온도가 $r=88$ mm인 내측

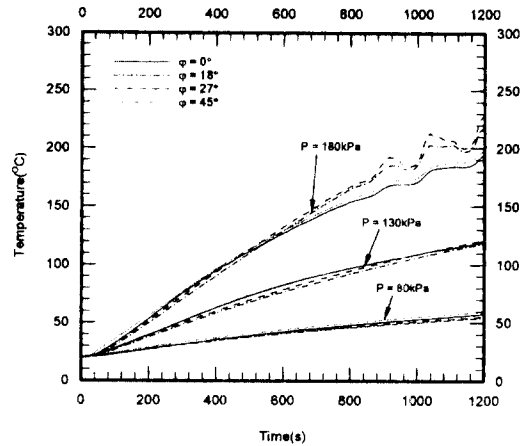


Fig. 4. Temperatures for the thermoelastically stable cases in the brake pad ($\omega=375$ rpm).

반경의 온도보다 높게된다. $t=1000$ 초에 도달되면 열적 불안정성을 나타내고 있는 온도의 요동(oscillation)이 형성된다. 중심부 $r=104$ mm에서는 열적 불안정에 기인된 접촉증대로 인한 주기적인 극대 온도점을 형성하여 $r=120$ mm의 온도와 유사한 변화를 한다.

Fig. 4는 회전속도 375 rpm일 때 원주 방향을 따라 측정된 브레이크 패드의 온도분포이다. $P=80$ kPa, $P=130$ kPa의 비교적 낮은 작용 압력에 대해서는 열탄성적으로 안정된 온도분포를 유지하며 작동시간이 증가할수록 전체 표면에서 단조로운 온도상승을 이룬다. 압력이 증가하여 $P=180$ kPa에 이르면 $t=850$ 초 이후에 온도 교란이 시작되며, 그 온도교란은 열확산이 우수한 브레이크 판에 비하여 조기에 발생함을 알 수 있다. 패드 표면의 온도는 중심부 $\phi=18^\circ$, $\phi=27^\circ$ 에서 패드의 양단($\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$)의 온도에 비해 접촉 면적의 증대로 인하여 그 온도가 높게 나타난다. 이 접촉면적의 증대는 Day[3]에 의해 패드 접촉면의 압력분포를 고찰함으로써 제시된 바 있다.

Burton 등[12]은 미끄럼 접촉시 불안정성을 야기시키는 임계 회전속도의 존재를 예측한 바 있다. 그래서 Fig. 5는 회전속도를 755 rpm으로 증가시켰을 때 $\phi=0^\circ \sim \phi=45^\circ$ 까지 원주방향을 따라 변화하는 브레이크 패드의 온도교란을 나타내고 있다. 회전속도를 증가시키며 따라 안정적으로 상승되던(Fig. 4, $P=80$ kPa) 온도에 비교적 긴 파장의 요동이 중첩된 온도의 교란이 형성됨을 알 수 있다. 작용압력이 낮은 $P=80$ kPa에서는 패드의 양단과 중심부의 구별 없이 온도 상승이 유

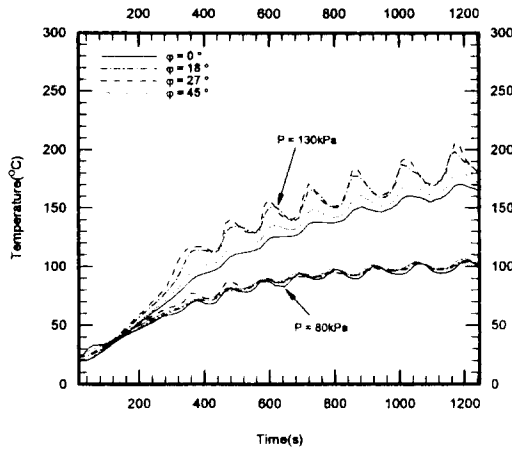


Fig. 5. Temperature fluctuations for circumferential locations in the brake pad ($\omega=755$ rpm).

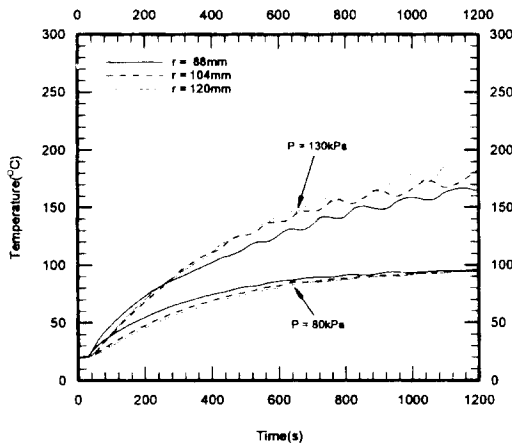


Fig. 6. Temperature fluctuations for radial locations in the brake pad ($\omega=755$ rpm).

사하며, $t=360$ 초 이후 동일 위상의 온도 교란을 나타내나, $P=130$ kPa으로 증가하면 온도 상승 및 요동의 진폭이 원주 방향 위치에 따라 상이한 결과를 나타낸다. 즉 선단부 ($\varphi=0^\circ$)에서는 브레이크 판과 접촉이 시작되는 점으로서 접촉이 지속된 $\varphi=45^\circ$ 위치보다 낮은 온도의 교란이 나타나고 있으며, 패드의 중심부 ($\varphi=18^\circ$, $\varphi=27^\circ$)에서는 접촉 증대에 의하여 고온의 온도교란이 야기되며 그 온도교란의 진폭이 크게 증가한다.

Fig. 6은 브레이크 패드의 반경 방향 위치의 온도변화에 미치는 압력의 영향을 나타낸 그림이다. $P=80$ kPa일 때 형성된 미세한 진폭의 온도교란은 압력이 증가됨에 따라 평균온도의 상승과 함께 증가하여 ΔT

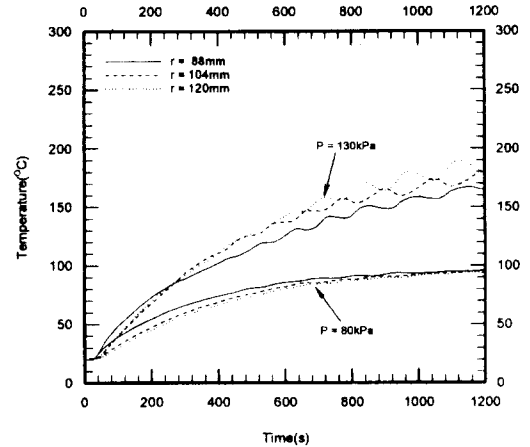


Fig. 7. Temperature fluctuations for radial locations in the ventilated disk ($\omega=755$ rpm).

$=24^\circ\text{C}$ 의 진폭을 갖는 주기적 불안정성을 나타내고 있다. 중심부($r=104$ mm)에서 180° 지연된 위상의 온도교란은 열탄성적 불안정성에 의하여 중심부와 내·외측($r=88$ mm, $r=120$ mm) 위치의 주기적 접촉에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 회전속도 755 rpm에 대하여 반경방향으로 측정된 회전 브레이크 판의 온도 분포를 나타낸 것이다. $P=80$ kPa일 때 형성되지 않았던 온도의 요동이 압력이 증가할수록 ($P=130$ kPa) 초기의 미세한 진폭의 진동이 진행되어 온도가 상승한 후 완만한 상승 온도에 중첩된 비교적 긴 파장, 진폭의 요동이 형성된다. $P=130$ kPa일 때 브레이크 판의 온도 상승 및 온도교란은 패드의 표면온도에 비해 안정적 변화를 한다. 이와 같이 온도교란이 300초 후 형성된 패드(Fig. 6)에 비해 지연되며 그 요동 온도폭이 작은 현상은 통풍구를 통과하는 공기유동에 의한 냉각 및 높은 열전도도를 갖는 브레이크 판의 재질 특성의 영향으로 판단된다.

브레이크 판의 열적 불안정성에 미치는 회전 속도의 영향을 고찰하기 위하여 $P=130$ kPa일 때 $r=104$ mm, $\varphi=45^\circ$ 의 위치에서 측정된 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 동일한 브레이크 판의 온도에 대해서 동적 불안정성에 미치는 회전속도의 영향을 나타낸 것이다. 회전속도 375 rpm일 때 형성되지 않았던 온도의 요동이 회전수가 증가할수록($\omega=755$ rpm) 브레이크 작동 초기의 미세한 진폭의 진동이 진행되어 온도가 상승한 후 완만한 상승 온도와 비교적 긴 파장의 요동이 형성된

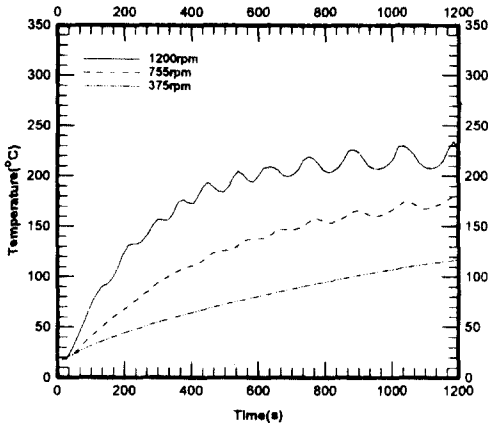


Fig. 8. The effects of sliding speed on the fluctuations in the ventilated disk ($r=104$ mm, $P=130$ kPa).

다. 이 미세 진동의 시작점은 회전수가 더욱 증가할수록 ($\omega=1200$ rpm)브레이크 작동 초기에 형성되어($t=140$ 초) 열적 불안정성이 조기에 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 브레이크 판이 회전함에 따라 원심력에 의해 회전축과 평행하게 공기가 흡입되어 빗금친 브레이크 판을 냉각시킨 후 방출되는 공기의 속도 벡터를 나타낸 그림이다.

이 유동 특성의 고찰은 상용 열유체 해석코드인 "FLUENT/V.4.3"을 사용하여 2차원 정상 상태로 단순화시킨 모델을 해석하였다. 이때 흡입된 공기의 입구 속도는 1 m/s, 출구의 단면에 수직한 속도 변화 $\partial\theta x = 0$ 을 경계조건으로 하였다.

Fig. 9(a)는 기존 사용되고 있는 브레이크의 형상으로서, 흡입된 공기가 회전축에 연결된 안내판(guide plate)과 브레이크 판 사이의 넓은 공간에 확산되어 정

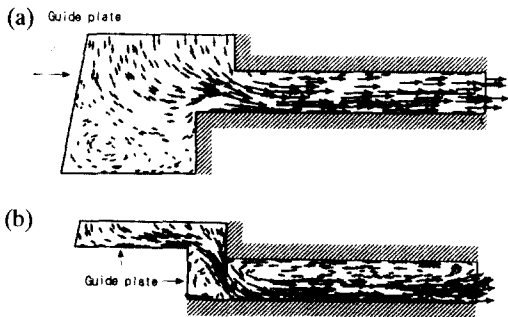


Fig. 9. Velocity vectors of ventilating air. (a) original inlet shape of ventilating hole, (b) modified inlet shape of ventilating hole.

체된 영역 및 통풍구의 입구 모서리에서 소규모 유풀기 (air bump)를 형성한 후 발달되는 일반적인 덕트의 유동 형태를 나타내고 있다. Fig. 9(b)는 안내판과 브레이크 사이의 공간을 밀폐시킴으로써 공기가 직접 통풍구에 흡입 될 수 있도록 고안된 유로에서의 속도 벡터를 나타낸다. 통풍구 윗부분 모서리로부터 비교적 큰 재순환 영역과 추가로 부착된 안내판 뒷면에 재순환 영역이 형성된 후 재발달 과정을 이루며, 통풍구 아래면에 가속된 속도벡터를 도기한 것이다.

Fig. 10은 통풍구 채널 길이의 중심($r=104$ mm)의 위치에서 유동에 수직방향으로의 속도 분포를 나타낸 것이다. 종래의 형상에 대해서는 채널의 중심부에서 최대 속도를 갖는 포물선 형태의 속도분포를 유지하고 있으나, 유로를 수정하여 위에서 언급한 바와 같이 고온의 고체표면($y=0$ m)에 근접한 곳에서의 속도를 증가시킴으로써 냉각효과를 증진시킬 수 있다.

본 실험에서는 $y=0$ m인 고체면의 온도를 측정하여 그 효용가치를 확인 할 수 있었으나, 그 통풍구의 반대면(즉 $y=0.008$ m)에서는 평균속도의 감소 및 재순환 영역의 유동정체 현상 등에 의해 오히려 열 방출이 감소될 것으로 추측된다. 본 실험에서는 통풍구의 유동현상이 브레이크 판의 온도상승 및 열적 불안정성에 미치는 영향이 확인되었으며 추후 이 재순환 영역을 제거할 수 있는 최적형태의 입구형상을 검토할 예정이다. 이상에서 언급한 바와 같이 작동 압력 상승에 따른 평균온도 상승에 의한 열적 불안정성 및 회전속도의 증가에 따른 동적 불안정성에 의해 브레이크 시스템의 불안정성이 지배된다.

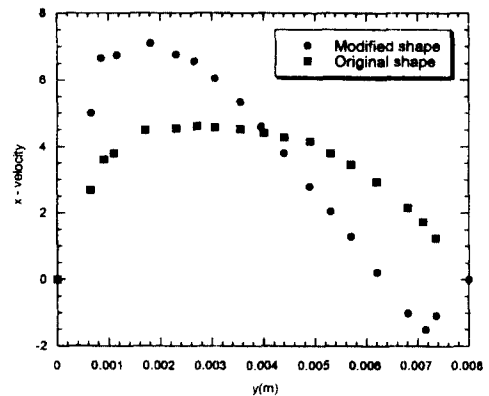


Fig. 10. Velocity profiles across the flow direction at $r=104$ mm.

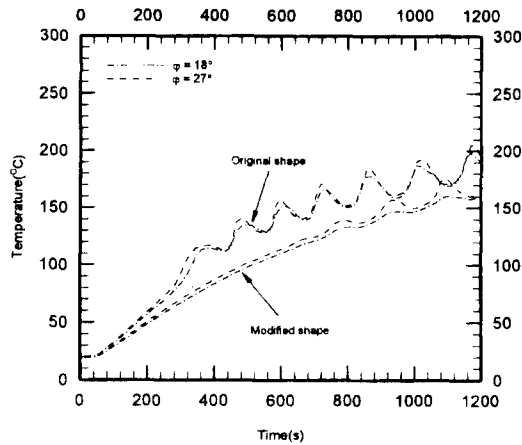


Fig. 11. Temperature fluctuations for circumferential locations in the brake pad ($\omega=1200$ rpm, $P=130$ kPa).

브레이크 판의 회전 속도에 의한 불안정성은 피할 수 없는 요인으로 고려할 때, 온도 교란이 극심한 패드의 국소 접촉을 피할 수 있는 구조 및 재질 변화에 의한 성능개선이 요구되나, 본 실험에서는 그 제작상 어려움으로 통풍구 내부의 유동 특성을 고찰한 후 마찰면의 온도상승 및 온도 교란을 저감시킬 수 있도록 하였다.

Fig. 11은 브레이크 판의 회전속도 755 rpm, 작용압력 $P=130$ kpa의 경우에 통풍구의 입구 형상을 수정한 결과, 패드 중심부($\phi=18^\circ$, $\phi=27^\circ$)의 온도 상승 및 온도 교란의 변화를 도시한 것이다. 표면 근접부에 고속의 공기유동이 가능토록 형상을 수정한 결과 $t=360$ 초에 발생되었던 불안정 온도교란이 현저히 지연되어 $t=780$ 초에 교란이 발생함을 알 수 있다. 또한 냉각효과의 증대로 인하여 최대온도는 16%이상 감소되었으며, 초기 교란온도($T=120^\circ\text{C}$)에 도달되는 시간은 78%이상 지연되었다.

Fig. 12는 회전속도가 1200 rpm으로 고속회전일 때 자연적으로 흡입되는 공기에 의한 냉각효과를 비교한 것이다. 공기량이 불충분하여 755 rpm의 경우와 같은 우수한 냉각효과는 얻지 못하고 있으나, 역시 $T=110^\circ\text{C}$ 부근의 불안정 교란 발생시간을 약 120초 정도 지연시킬 수 있으며, 브레이크 판의 온도가 평균적으로 감소되었다. 즉, 고속회전에서는 강제적 냉각 공기의 공급에 의하여 그 냉각 성능을 향상시킬 수 있으나, 반경방향과 역방향으로의 공급은 회전에 의한 자연적 흡입공기와의 충돌에 의해 그 효과가 미흡함이

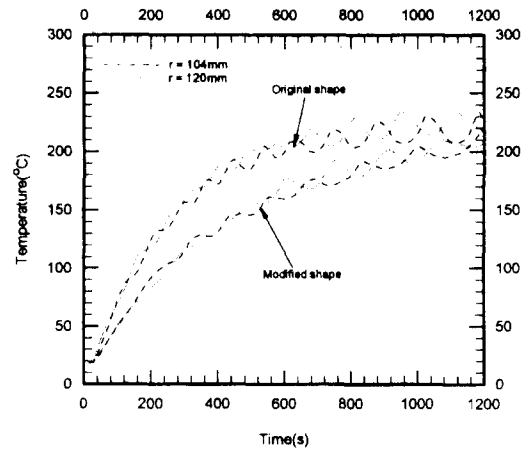


Fig. 12. Temperature fluctuations for radial locations in the ventilated disk ($\omega=1200$ rpm).

확인되었으며, 추후 반경방향으로의 공기 공급장치가 고안될 필요가 있다.

4. 결 론

주행 제동시 브레이크 판과 패드의 마찰에 의해 야기되는 온도 변화 및 열적 불안정성을 검토한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 브레이크 작동후 일정시간이 경과하면 마찰면 미소접촉점의 순간적 고온점 형성은 열적 불안정을 유발하며, 브레이크 판에 비해 열전도가 낮은 패드에서 더욱 심한 열적 불안정성이 형성된다.
2. 패드에서의 접촉면의 불균일 접촉과 원주속도 등은 패드에서의 위치에 따라 상이한 온도변화를 이룬다. 원주방향의 온도교란은 같은 위상을 갖고 있으나, 반경방향의 위상은 그 중심부에서 180° 의 위상차가 형성된다. 또한, 중심부에서는 열집중 및 접촉의 증대로 인하여 온도 및 그 교란폭이 증가된다.
3. 열탄성적 불안정성은 회전속도에 의한 동적 불안정성과 접촉압력에 의한 열적 불안정성에 의해 지배되며, 불안정성이 야기되는 회전수 및 작용압력 범위가 제시되었다.
4. 통풍구 주위에서 냉각을 위한 기존의 공기주입 방법은 오히려 그 효과가 감소되며, 브레이크 판 통풍구 입구의 형상을 개선함으로써 브레이크 판 및 패드 온도와 열적 불안정성을 지연시킬 수 있는 방법이 제시되었다.

후 기

본 연구는 1995년도 전북대학교 자동차 신기술 연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. J. J. Santini and F.E. Kennedy, "An Experimental Investigation of Surface Temperatures and Wear in Disk Brakes," *Lub. Eng.*, pp.402-417, 1975.
2. A. Floquet and M.C. Dubourg, "Nonaxisymmetric Effects for Three-Dimensional Analysis of a Brake," *Journal of Tribology*, Vol.116, pp.401-408, 1994.
3. A. J. Day, M. Tirovic and T. P. Newcomb, "Thermal Effects and Pressure Distributions in Brakes," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 205, pp.199-205, 1991.
4. Yosuke Sasaki, "Development Philosophy of Friction Materials for Automobile Disc Brakes," SAE Paper, 9531679, 1995.
5. Mikio Matsuzaki, Toshitaka Izumihara and Yosuke Sasaki, Toshiro Miyazaki and Minoru Takamiya, "Study on Low-frequency Disc Brake Groan," SAE Paper, 9531660, 1995.
6. J. R. Barber, T. W. Beamond, J. R. Waring and C. Pritchard, "Implications of Thermoelastic Instability for the Design of Brakes," *ASME, J of Tribology*, Vol. 107, pp.206-210, 1985.
7. Kwangjin Lee and J. R. Barber, "Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes," Vol. 115, pp.607-614, 1993.
8. Kwangjin Lee and J. R. Barber, "An Experimental Investigation of Frictionally-Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes Under a Drag Brake Application," *Journal of Tribology*, Vol.116, pp.409-414, 1994.
9. M. C. Fec and H. Sehitoglu, "Thermal-Mechanical Damage in Rail-road Wheel due to Hot Spotting," *Wear*, Vol. 102, pp.31-42, 1985.
10. M. A. Tranvir, "On the Cooling of Disc Brakes on a Train," *Rail International*, pp.37-42, 1988.