◎ 논 문

자동차 브레이크 패드의 기계적 특성 연구

신재호* · 김경진** · 강우종**

Mechanical Characteristics of Automobile Brake Pads

Jaeho Shin*, Kyungjin Kim** and Woojong Kang**

Key Words : Brake pad(브레이크 패드), Friction coefficient(마찰 계수), Fade and recovery(가혹 및 회복), Wear loss (마모 손실), Indentation test(압입 시험)

ABSTRACT

Brake pads are a component of disc brake system of automobile and consist of steel backing plates and friction material facing the disk brake rotor. Due to the repeated sliding forces and torque in vehicle braking, friction performance of brake pads are ensured. Futhermore, the brake pad is one of major tuning components in aftermarket, mechanical characteristics of the brake pad are necessary to evaluate for establishing the certification standards of tuning components. This study had performed the five specimen tests for friction coefficients and wear loss rates according to the SAE test specification. Using the instrumented indentation method, yield strength and tensile strength were measured. Friction coefficients, 0.386 - 0.489, and wear loss rates, 1.0% - 3.7% are obtained. The range of yield strength and tensile strength are 21.4 MPa - 105.3 MPa and 39.5 MPa - 176.4 MPa respectively.

1. 서 론

자동차의 제동장치는 고속 회전중인 휠디스크에 브레이크 패드를 접촉시켜 마찰을 일으킴으로써 회전-운동 에너지를 열에너지로 변환하여 차량을 감속시키는 역할을 한다[1]. 자동차 제동장치의 주요한 부품인 브레이크 패드는 반복적인 미끄럼 마찰과 큰 토크를 견뎌야 하는 가혹한 하중 조건에서 적절한 기계적 특성을 갖추어야 한다.

브레이크 패드는 마찰재의 성분에 따라 유기질패드, 금속패드, 소결패드로 구분되며, 마찰재에는 흑연, 고무분말, 금속분말 및 금속섬유 등 10가지 이상의 다양한 재료를 포함하고 있다[2].

* 경일대학교 기계자동차학부, 교신 저자
** 경일대학교 기계자동차학부
E-mail: jhshin@kiu.kr

또한, 브레이크 패드는 페놀수지를 결합제로 사용하여 성형한 후 열처리를 거쳐 제조된다. 대표적인 비석면 마찰재는 강철섬유의 포함 여부에 따라 로스틸 마찰재와 논스틸 마찰재로 구분된다. 로스틸 마찰재는 제동거리 및 패드수명 측면에서 우수성을 보이며, 논스틸 마찰재는 소음과 진동이 적어, 정숙도 및 대면공격성 측면에서 우수한 특성을 나타낸다. 일반적으로 로스틸 마찰재는 포함된 강철섬유의 높은 공격성으로 인해 브레이크 디스크의 수명을 단축시키는 경향이 있다. 최근에는 두 마찰재의 단점을 보완한 융합형 마찰재를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(2).

브레이크 패드는 기본적으로 마찰계수가 높고 마모가 적으며, 운전속도·면압·온도 등의 넓은 사용 범위로 충분한 열적, 기계적 강도와 우수한 열전도율이 요구된다. 브레이크 패드의 주요 고장 형태는 기계적 특성의 저하로 인한 과도한 마모 또는 국부적인 변형으로 나눌 수 있다.

최근 유한요소해석 기술을 활용한 브레이크 패드 마모에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이익환은 브레이크 패드의 마모로 인한 소음 및 브레이크 패드의 불안전성을 파악하고자 디스크와 패드 사이에서 발생하는 접촉압력과 슬립 량을 고려한 유한요소해석을 수행하고, 실험 데이터와 비교하여 마모 해석의 신뢰도를 평가하였다[3]. 박진택은 디스크 브레이크의 편마모 저감을 위한 브레이크 패드의 마찰재 형상 강건설계 연구를 수행하고(1), 여태인은 FFT-FEM을 적용한 브레이크 패드의 온도와 수명 예측 연구를 수행하였다(4). 또한, 이호건은 브레이크 스퀼 해석에서 패드 마모의 영향에 관한 연구를 수행하였고[5], 권성진은 스퀼 노이즈 (squeal noise)를 예측하고 이에 영향을 미치는 패드의 특성인자를 분석하여 브레이크 패드의 설계방안 및 공정개선 방안을 정립하는 연구가 수행되었다[6]. 그러나, 아직도 실험적 방법을 통한 접촉압력분포를 수치화하기에는 제한적이며, 패드의 마모가 진행되기 전후의 유한요소 모델을 구성하여 해석을 수행하고 있다[5]. 또한 한진은 브레이크 디스크의 산질화처리가 부식지연 및 제동특성에 미치는 영향의 연구를 통해, 질화층이 형성된 제동면이 자동차의 제동성능에 미치는 영향성에 대하여 분석하였다[7].

한편 정부의 튜닝시장 활성화 방안 발표 (2013년) 및 자동차 튜닝산업 진흥대책 (2014년) 등으로 자동차 튜닝 시장과 관련 부품개발 연구 분야에 많은 관심이 집중되고 있으며, 브레이크 패드는 차체 및 섀시의 성능을 향상시키기 위한 기능성 튜닝 부품으로 튜닝부품 인증기준 및 성능평가 기술개발 연구가 요구되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 자동차 튜닝 부품의 인증 기준 및 성능 평가 기술 정립을 위해 브레이크 패드 마찰재의 마찰 특성 및 기계적 특성을 측정하고 평가하였다.

2. 브레이크 패드의 마찰 성능 시험

2.1. 마찰 성능 시험 방법

브레이크 패드의 마찰 성능 시험은 기준 시험, 열가혹 시험, 열회복 시험 등으로 구성되며, 마찰방법, 작용면압, 회전 속도, 온도 조건 등에 따라 여러 시험 방법이 제시되고 있다(Table 1).

Table 1 Test procedures for pad friction performance

Test	JASO	ISO	SAE	KS
Pressure (kPa)	700 / 1,050	700 / 1,050	700 / 1,032	700 / 1,032
Velocity (m/s)	4.5 / 6.15	4.5 / 6.15	4.57 / 6.10	4.57 / 6.10
Temp (℃)	100 - 350	100 - 350	93 - 343	93 - 343
Initial Baseline	6.15 m/s, 1,050 kPa, 100 ℃, 20 times	6.15 m/s, 1,050 kPa, 100 ℃, 20 times	6.10 m/s, 1,032 kPa, 100 ℃, 20 times	6.10 m/s, 1,032 kPa, 100 ℃, 20 times
1st Fade	6.15 m/s, 1,050 kPa, 300 ℃, 10 min	6.15 m/s, 1,050 kPa, 300 ℃, 10 min	6.10 m/s, 1,032 kPa, 288 ℃, 10 min	6.10 m/s, 1,032 kPa, 288 ℃, 10 min
1st Recovery	6.15 m/s, 1,050 kPa, Int.* (10 s)	6.15 m/s, 1,050 kPa, Int.* (10 s)	6.10 m/s, 1,032 kPa, Int.* (10 s)	6.10 m/s, 1,032 kPa, Int.* (10 s)
Wear	6.15 m/s, 1,050 kPa, 200 ℃, 100 times	-	6.10 m/s, 1,032 kPa, 204 ℃, 100 times	6.10 m/s, 1,032 kPa, 204 ℃, 100 times
2nd Fade	6.15 m/s, 1, 050 kPa, 350 ℃, 10 min	6.15 m/s, 1,050 kPa, 350 ℃, 10 min	6.10 m/s, 1,032 kPa, 344 ℃, 10 min	6.10 m/s, 1,032 kPa, 343 ℃, 10 min
2nd Recovery	6.15 m/s, 1,050 kPa, Int. (10 s)	6.15 m/s, 1,050 kPa, Int. (10 s)	6.10 m/s, 1,032 kPa, Int. (10 s)	6.10 m/s, 1,032 kPa, Int. (10 s)
Final Baseline	6.15 m/s, 1,050 kPa, 100 ℃, 20 times	6.15 m/s, 1,050 kPa, 100 ℃, 20 times	6.10 m/s, 1,032 kPa, 100 ℃, 20 times	6.10 m/s, 1,032 kPa, 100 ℃, 20 times

* Int.: intermittence

본 연구에서는 SAE 시험 방법으로 마찰 성능 시험을 수행하였으며, 세부 내용은 다음과 같다.

① 기준 시험 (Initial Baseline): 시험용 드럼의 온도가 82~93 ℃일 때 시험을 시작하고, 냉각 공기를 사용하여 시험 중의 온도가 82~104 ℃에서 유지되도록 한다. 667 N, 417 rpm에서 10초간 하중을 가하고 20초간 하중을 제거하는 사이클을 20회 반복하며, 마지막 하중을 가할 때 냉각 장치의 작동을 중지한다.

② 1차 열가혹 시험 (1st Fade): 드럼의 회전 장치, 가열 장치와 냉각 장치의 작동을 중지하고 드럼을 냉각시킨다. 82 ℃에서 시험을 시작하고 가열 장치를 작동 시킨다. 667 N, 417 rpm에서 연속적으로 제동하는 10분과 288 ℃ 중 먼저 도달할 때까지 시험을 실시한다. 93 ℃에서 시작하여 28 ℃

간격으로 마찰력을 읽는다. 288 ℃에 도달하기까지 걸린 시간을 기록한다.

③ 1차 열회복 시험 (1st Recovery): 1차 열가혹 시험을 완료한 후 가열 장치의 작동을 중지하고 냉각 장치의 작동시킨다. 냉각 중에 260 ℃, 204 ℃, 149 ℃ 그리고 93 ℃에서 667 N, 417 rpm으로 10초간 시험한다.

④ 마모 측정 (Measurement): 드럼이 정지하고 드럼 온도가 90~100 ℃이며, 시험편에 656 N이 가해진 상태에서 샘플 홀더의 높이를 기록한다.

⑤ 마모 시험 (Wear): 667 N, 417 rpm에서 20초간 하중을 가하고 10초간 하중을 제거하는 사이클을 100회 반복한다. 드럼의 온도가 193~204 ℃일 때 시험을 시작하고, 냉각 공기를 사용하여 시험 중의 온도가 193~216 ℃에서 유지되도록 한다.

⑥ 마모 측정 (Measurement): 드럼이 정지하고 드럼 온도가 88~99 ℃이며, 시험편에 667 N이 가해진 상태에서 샘플 홀더의 높이를 기록한다.

⑦ 2차 열가혹 시험 (2nd Fade): 3차 마모 측정이 끝난 후, 드럼의 회전 장치, 가열 장치와 냉각 장치의 작동을 중지하고 드럼을 냉각시킨다. 82 ℃에서 시험을 시작하고 가열 장치를 작동 시킨다. 667 N, 417 rpm에서 연속적으로 제동하는 10분과 343 ℃ 중 먼저 도달할 때까지 시험을 실시한다. 93 ℃에서 시작하여 28 ℃ 간격으로 마찰력을 읽는다. 343 ℃에 도달하기까지 걸린 시간을 기록한다.

⑧ 2차 열회복 시험 (2nd Recovery): 2차 열가혹 시험을 완료한 후 가열 장치의 작동을 중지하고 냉각 장치의 작동시킨다. 냉각 중에 316 ℃, 260 ℃, 204 ℃, 149 ℃ 그리고 93 ℃에서 667 N, 417 rpm으로 10초간 시험한다.

⑨ 2차 기준 시험 (Final Baseline): 시험용 드럼의 온도가 82~93 ℃일 때 시험을 시작하고, 냉각 공기를 사용하여 시험 중의 온도가 82~104 ℃에서 유지되도록 한다. 667 N, 417 rpm에서 10초간 하중을 가하고 20초간 하중을 제거하는 사이클을 20회 반복하며, 마지막 하중을 가할 때 냉각 장치의 작동을 중지한다. 2차 기준 시험 후에 각 시험편의 최종 두께 및 무게, 마찰 계수 등을 측정한다. 마찰계수는 시험기에서 측정된 마찰력을 전체 작용하는 압착력으로 나누어 계산된다.

2.2. 마찰 성능 시험 시편

국내에 판매되고 있는 총 5 종의 브레이크 패드(Fig. 2)의 시편 (25.4 mm × 25.4 mm)을 Fig. 3 와 같이 제작했으며, 소비자 가격 (4 pieces)은 최고 169,200 원에서 최저 9,500 원이였다.

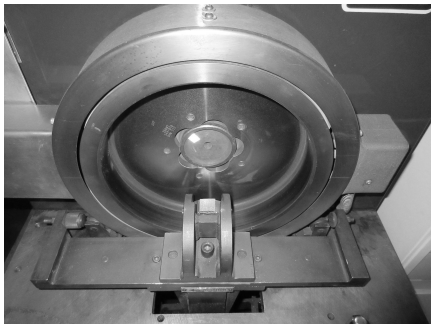

Fig. 1 Test machine and specimen for frictional characteristics

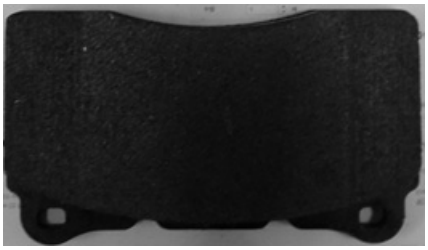

Fig. 2 Automobile brake pad

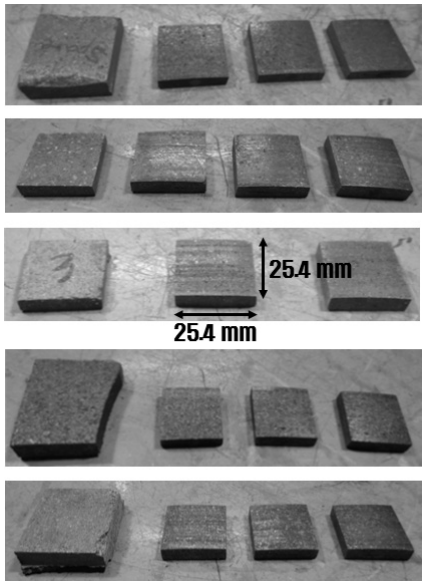

Fig. 3 Specimens of automobile brake pads

2.3. 마찰 성능 시험 결과

총 5 종의 브레이크 패드에 대해 시편을 각각 3개씩 시험한 결과 5 종의 브레이크 패드 모두 SAE 시험 기준 (마찰 계수, 0.25 - 0.70)을 만족 하였다 (Table 2). 5 개 브레이크 패드 샘플의 마모율은 1.0% - 3.7%로 측정되었고, 4개의 샘플이 기준 (마모율 3.0% 이하)을 만족하였다(Table 3).

3. 브레이크 패드의 압입 시험

3.1. 계장화 압입시험

임의의 형상을 가지는 브레이크 패드의 강도 실험을 위한 인장 시편을 채취하는 것은 쉽지 않기 때문에 본 연구에서는 브레이크 패드에서 인장 시편을 채취하지 않고, 강도 및 경도를 측정할 수 있는 계장화 압입 시험 방법을 도입하였다.

Table 2 Test results of friction coefficients (5 specimens)

Friction coefficient		Normal condition	High temp.
Sample A	Specimen 1	0.503	0.455
	Specimen 2	0.496	0.467
	Specimen 3	0.468	0.498
	Average	**0.489**	**0.473**
	Pass / Fail	Pass	Pass
Sample B	Specimen 1	0.434	0.385
	Specimen 2	0.418	0.394
	Specimen 3	0.430	0.381
	Average	**0.427**	**0.386**
	Pass / Fail	Pass	Pass
Sample C	Specimen 1	0.407	0.454
	Specimen 2	0.415	0.455
	Specimen 3	0.416	0.437
	Average	**0.413**	**0.449**
	Pass / Fail	Pass	Pass
Sample D	Specimen 1	0.388	0.389
	Specimen 2	0.385	0.396
	Specimen 3	0.390	0.427
	Average	**0.388**	**0.407**
	Pass / Fail	Pass	Pass
Sample E	Specimen 1	0.419	0.471
	Specimen 2	0.396	0.471
	Specimen 3	0.416	0.485
	Average	**0.410**	**0.476**
	Pass / Fail	Pass	Pass

Table 3 Test results of wear rates (5 specimens)

Mass		Before test (g)	After test (g)	Wear rate (%)
Sample A	Specimen 1	8.25	8.05	2.4
	Specimen 2	8.44	8.10	4.0
	Specimen 3	8.37	7.99	4.5
	Average	8.35	8.05	**3.7**
	Pass / Fail	Fail		
Sample B	Specimen 1	10.17	9.97	2.0
	Specimen 2	10.37	10.14	2.2
	Specimen 3	10.22	10.02	2.0
	Average	10.25	10.04	**2.1**
	Pass / Fail	Pass		
Sample C	Specimen 1	8.85	8.69	1.8
	Specimen 2	8.83	8.67	1.8
	Specimen 3	8.50	8.35	1.8
	Average	8.73	8.57	**1.8**
	Pass / Fail	Pass		
Sample D	Specimen 1	7.92	7.86	0.8
	Specimen 2	8.36	8.26	1.2
	Specimen 3	7.83	7.79	0.5
	Average	8.04	7.97	**1.8**
	Pass / Fail	Pass		
Sample E	Specimen 1	7.85	7.77	1.0
	Specimen 2	7.99	7.91	1.0
	Specimen 3	7.60	7.52	1.1
	Average	7.81	7.73	**1.0**
	Pass / Fail	Pass		

계장화 압입시험은 압입자(Indenter)로 시험편을 압입하면서 압입하중과 압입깊이를 측정하여 재료의 기계적 물성을 평가하는 시험법으로 종래의 대상물을 파괴하는 홀 드릴링 (Hole drilling)법이나 특수 실험실에서만 측정이 가능한 X선법과 달리 측정위치에서 미세한 흔적만을 남기는 비파괴 방식으로, 구조물이 위치하고 있는 현장에서 측정이 가능한 시험법이다. 계장화 압입시험법은 비파괴적으로 물성측정이 가능하고 시편에 제약이 적으며 국소 부위의 재료물성을 정량적으로 평가할 수 있어 작업(운용)중이거나 제작/완료된 구조물의 강도 측정 연구에 적용되고 있으며, 그 실험법이 KS로 규정되어 있어, 시험 방법 및 결과에 대한 신뢰성이 보장되어 있다[8]. 계장화 압입시험은 구형 압입자에 변위를 가하여 재료의 압입하중을 증가시키고, 재료 시편의 평균접촉압력은 압입하중에 따라 증가하게 된다. 압입하중-압입깊이 곡선으로부터 인장시험에서의 유동특성을 유도할 수 있다[9]. 압입하중-압입깊이 곡선에서, 실제 접촉 깊이를 결정하기 위해서, 하중제거 곡선을

먹함수로 계산하고, 최대 압입깊이에서 미분한 기울기 값으로 재료의 강성이 계산되며[10], 재료의 강성을 ISO TR29381에 따라 재료의 인장물성을 계산할 수 있다[11]. 이정기는 계장화 압입시험법을 이용하여 용강운방용 구조물 표면에서 기계적 물성을 측정하고 구조물의 부식 형상을 고려한 구조해석을 수행하여 구조물의 안정성을 검토하였다[12]. 구병춘은 계장화 압입시험에 의한 용접부의 물성 측정 및 피로수명 예측 연구를 수행하였다[13].

본 연구에서는 직경 1 mm의 압입자로 압입 하중과 압입 깊이를 측정하고, 압입시험 시의 연속적인 변형거동을 압입 하중-변위의 식으로 표현하고, 접촉 깊이와 접촉 반경결과를 이용하여, 응력-변형률 선도를 계산하였다. 자동차 브레이크 패드의 계장화 압입시험은 Fig 4와 같으며, 압입시험 결과에 적용된 변형률과 응력 계산식은 계장화 압입시험의 기본이론에 근거하였다[13].

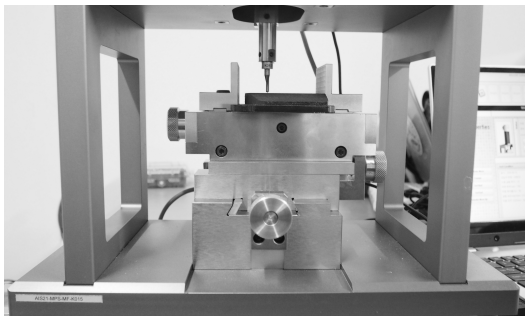

Fig. 4 Instrumented indentation test configuration of automobile brake pad

3.2. 계장화 압입 시험 결과

본 연구에서는 마찰 성능 시험에서 사용한 총 5 종의 자동차 브레이크 패드의 계장화 압입시험을 수행하였다. 패드의 재질 및 제조 특성을 반영하기 위하여, 약 8 곳 이상의 측정위치에서 압입시험을 수행하였으며, Fig 5에서 압입시험으로 얻어진 응력-변형률 시험 결과를 보여주고 있다. 응력-변형률의 관계는 측정위치에 따라 편차가 있는 것으로 나타났으며, 재질의 균일 정도를 파악할 수 있었다. 계장화 압입시험을 통해 얻어진 자동차 브레이크 패드의 항복 강도 (Yield Strength)와 인장 강도 (Tensile strength)는 Table 4와 같으며, 대체적으로 브레이크 패드의 인장 강도는 항복 강도의 약 2배의 크기인 것으로 나타났다. 총 5개 패드의 평균 항복 강도는 52.6 MPa, 인장 강도는 95.4 MPa 로 계산되었고, 표준 편차는 31.4 MPa와 52.9 MPa로 계산되었다.

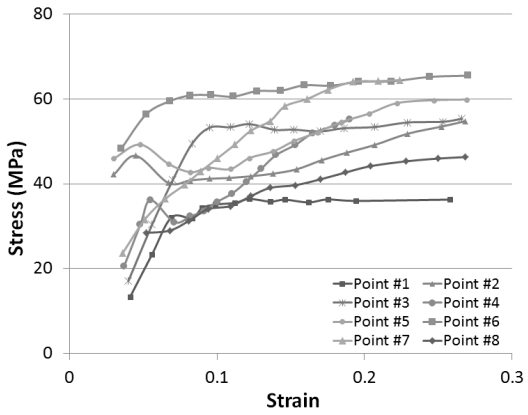

Fig. 5 Stress-strain data points of an automobile brake pad in the instrumented indentation tests

Table 4 Yield and tensile strengths of automobile brake pads in the instrumented indentation tests

Specimen	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Sample A	48.7	115.1
Sample B	40.2	65.1
Sample C	105.3	176.4
Sample D	47.2	80.7
Sample E	21.4	39.5
Average	**52.6(±31.4)**	**95.4(±52.9)**

4. 결 론

본 연구를 통해, 자동차 튜닝 부품의 인증 기준 및 성능 평가 기술 정립을 위한 브레이크 패드 마찰재의 마찰 특성 및 기계적 특성을 측정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 브레이크 패드의 마찰 성능 시험은 기준 시험, 열가혹 시험, 열회복 시험 등으로 구성되며, 시험 조건에 따라, JASO, ISO, SAE, KS 등의 시험 방법이 있다.
2) SAE 시험 방법으로 총 5 종의 브레이크 패드 마찰 성능을 평가하였고, 0.386 - 0.489의 마찰 계수와 1.0% - 3.7%의 마모율이 측정되었다. 5 종의 브레이크 패드 마찰 계수는 SAE 시험기준을

만족하였으나, Sample A 패드의 마모율 (3.7%)은 시험기준 (3.0% 이하)의 범위를 벗어났다.

3) 임의의 형상을 가지는 브레이크 패드의 항복 및 인장 강도를 측정하기 위해 본 연구에서는 계장화 압입 시험 방법을 도입하였다. 자동차 브레이크 패드의 항복 강도는 21.4 MPa - 105.3 MPa, 인장 강도는 39.5 MPa - 176.4 MPa 로 측정되었다.

후 기

본 연구는 국토교통부와 자동차안전연구원의 지원 (연구과제명: 자동차 튜닝부품 인증기준 및 성능평가 기술개발)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 박진택, 최낙삼, 2012, “디스크 브레이크의 편마모 저감을 위한 브레이크 패드의 마찰재 형상 강건설계”, 한국자동차공학회논문집, 제20권, 제1호, pp. 77-87.

(2) 장호, 2007, “마찰과학의 결정체 브레이크용 마찰재”, 과학과 기술, pp 39-41.

(3) 이익환, 정원태, 박경환, 이종수, 2013, “시뮬레이션을 통한 브레이크 패드의 마모 분석”, 2013년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학 부문 춘계 학술대회 논문집, pp. 281-282.

(4) 여태인, 2002, “디스크 브레이크 패드 수명 예측에 관한 연구”, 한국자동차공학회논문집, 제10권, 제4호, pp. 199-205.

(5) 이호건, 손민혁, 서영욱, 부광석, 김홍섭, 2008, “브레이크 스퀼 해석에서 패드 마모의 영향에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제32권 제11호, pp. 930-936.

(6) 권성진, 이동원, 배철용, 이봉현, 서병연, 2010, “브레이크 패드 마찰재의 탄성 물성 측정을 이용한 NBVH 해석”, 2010 한국자동차공학회 부문종합 학술대회, pp. 1471-1474.

(7) 한진, 김광윤, 이학인, 이정주, 2014, “브레이크 디스크의 산질화처리가 부식지연 및 제동특성에 미치는 영향에 관한 연구”, 자동차안전학회지, 제7권, 제2호, pp. 19-24.

(8) KS B 0950-2002, “금속재료의 계장화 압입시험-압입 인장 물성 평가”.

(9) 권동일, 강승균, 김국환, 최민재, 2009, “계장화 압입시험법을 이용한 금속소재의 인장물성 평가기술 (ISO TR29381) : 대표응력-대표변형률 방법”, Trends in Metals and Materials Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 36-43.

(10) 송기남, 홍성덕, 노동성, 이주하, 홍정화, 2013, “계장화 압입시험법에 의한 Alloy 617 용접 물성치 측정”, Journal of KWJS, Vol. 31, No. 5, pp. 41-46.

(11) ISO TR29381: Metallic Materials-Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties, 2008.

(12) 이정기, 김이곤, 유대화, 김광호, 이경로, 김정엽, 2014, “계장화압입시험법을 이용한 용강운반용 구조물의 안전성 평가”, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 34, No. 1, pp. 53-59.

(13) 구병춘, 이동형, 권동일, 최열, 2004, “계장화 압입시험에 의한 용접부의 물성 측정 및 피로수명 예측”, 한국철도학회논문집, 제7권, 제2호, pp. 142-148.