고속철도 디스크 브레이크의 유연 패드 개발에 대한 연구

Study on Development of Flexible Pad for High Speed Train Disk Brake

이민규¹ · 김주용¹ · 김재민¹ · 양영민¹ · 김상호² · 조종두^{*}

Mingyu Lee · Jooyong Kim · Jae-min Kim · Youngmin Yang · Sang-Ho Kim · Chongdu Cho

Abstract This paper investigates the structural stability and reliability on improving performance of flexible brake pad used in high speed train. To this end, an improved model of flexible pad was obtained through structural analysis. Brake pad specimens were subjected to modal, stroke and endurance tests to examine the dynamic characteristics and mechanical stability. The hot spot generation with increasing rotational speed was observed on chassis dynamometer equipment and then the structurally uniform contact between the disc and pad was achieved. The temperature distribution of flexible pad was measured using the infrared camcorder. Hence, the proposed flexible pad showed the better structural stability and thermal energy emission.

Keywords : High speed train, Disk brake, Flexible pad, Modal test, Dynamo, Hot spot

초 록 본 논문은 고속철도 디스크 브레이크용 유연 제동 패드의 성능 향상을 위해 구조적 안정성 검토와 신뢰성에 대한 연구를 수행하였다. 연구에서는 유연패드의 구조 해석 과정을 거쳐 개선된 모델을 얻어내었으며, 실제 크기와 동일한 1/2 모델을 가지고 구조적 안전성을 확인하였다. 또한, 축소 시편을 제작하여 모달 시험과 스트로크 및 내구성 시험을 수행하여 동 특성과 기계적 안정성을 확인하였다. 사시 다이아모 장비와 열 적외선 캠코더를 이용하여 유연패드에 대하여 회전 속도에 따른 열점 발생 현상을 측정하고, 디스크와 패드 사이의 균일한 접촉 능력을 확인하였다. 또한, 제동 시 유연패드에 안정적인 온도 분포가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 토대로 제안된 유연패드의 구조 안정성 및 열에너지 방출 효과 등의 장점을 확인하였다.

주요어 : 고속철도, 디스크 브레이크, 유연 패드, 모달 시험, 다이아모, 열점

1. 서 론

차량 제동 시스템의 주요 부품인 디스크 브레이크는 디스크와 패드 간의 마찰력을 이용하여 운동에너지를 열에너지로 전환시켜 차량을 정지시킨다. 디스크 브레이크의 제동 시 발생하는 다양한 문제들은 패드와 디스크 간의 마찰 현상에서 그 주요 원인이 있으며, 많은 연구가 진행되어 왔다. 디스크 브레이크의 마찰 문제는 진동과 소음 뿐 아니라 열 응력에 의한 균열 등의 문제가 발생할 수 있다[1]. 브레이크 디스크 연구는 제동 시 표면상에서 발생하는 높은 마찰열로 인한 균열 및 제동 성능 특성 등의 문제가 재료적 관점에서 이뤄져 왔다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 고강도 주철재(cast iron), 주강재(cast steel) 및 단조강(forging steel) 디스크를 사용하고 있으며, 최근에는 내열성이 뛰어난 알루미늄 복합재료와 높은 마찰계수를 갖는 금속계 마찰재 적용에 대한 연구가 이루어지고 있다[2-4]. 또한, 재료적인 관점에서 벗어나 디스크 브레이크의 제동에 의해 발생하는 문제를 역학적으로 접

근하는 연구가 행해지고 있으며, 제동 시 마찰에 발생하는 디스크의 국부적인 열점(hot spot) 현상에 의하여 발생하는 열 탄성 불안정성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. Painer 등 [5]은 실험적 연구를 통하여 철도 제동 시 패드의 강성과 접촉 길이가 열점에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. Cho 등 [6,7]은 국부적인 열 집중에 의한 현상과 브레이크 디스크의 진동 특성인 모드 형상(mode shape)과의 관계를 연구하였으며, Joo 등 [8]은 제동 마찰열에 의한 디스크의 온도 분포 및 열 응력을 해석하여 피로 손상에 대하여 연구하였다. 또한, 유럽과 일본에서는 고속철도용 디스크 브레이크의 제동 성능 향상을 위하여 다양한 패드 스티드(stud)의 형상 및 체결 메카니즘에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 유연 제동 패드(flexible brake pad)에 있어서는 다양한 패드 스티드의 형상 및 체결 메카니즘에 대한 연구가 현재도 진행되어 특허출원 및 양산 적용에 성공한 많은 사례를 가지고 있다[9,10]. 국내에서도 고속철도 브레이크 패드의 상황은 고정 제동 패드(fixed brake pad)에서 유연 제동 패드로 변화하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 국내 고속철도 사업의 지속적인 성장과 연계하여 고속철도용 제동장치의 성능 향상을 위해 새로운 개념의 유연 제동 패드에 대하여 구조적 안정성을 검토하여 적용 가능한 모델을 선정하였으며, 선정 모델에 대한 half-scale

^{*}교신저자 : 인하대학교 공과대학 기계공학과
E-mail : cdcho@inha.ac.kr

¹인하대학교 공과대학 기계공학과

²(주)다원프릭션

설계 및 해석을 진행하였다. 또한, 축소 시편을 제작하여 동특성 및 내구성 평가를 수행하였으며, 제동 시 진동의 원인이 되는 열 탄성 불안정성을 확인하기 위하여 열섬 발생 임계속도 시험과 패드의 온도 분포를 측정하여 디스크와 패드의 일정한 압력 작용 여부를 비교 검토하였다. 이와 같은 연구를 진행하여 기존에 개발된 패드에 비하여 유연 제동 패드의 여러 가지 장점을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 브레이크 패드

고속철도용 브레이크 패드는 스티드의 조립 구조에 따라 고정 패드와 유연 패드로 나눌 수 있다. 고정 패드는 스티드가 스티드 플레이트(stud plate)에 완전히 고정되어 있는 상태의 패드이다. 이러한 고정 패드는 단순한 구조로 가공 및 조립이 수월하나 제동 시 발생하는 소음 및 진동이 크고, 편마모가 발생하여 패드의 수명을 단축시키는 단점을 가지고 있다. 유연 패드는 스티드를 스티드 플레이트에 고정할 때 스프링 또는 특수한 지지조건에 의해 유동적으로 움직일 수 있게 만든 브레이크 패드이다. 유연 패드는 고정 패드에 비해 소음 및 진동이 적고, 편마모가 거의 발생하지 않아 고정 패드보다 성능이 뛰어나지만 부품수가 많아 가공 및 조립에 다소 번거로움이 있으며, 내구성이 취약하다는 단점이 있다.

2.2 구조적 안정성 검토

2.2.1 축소 모델 구조 안정성 검토

유연 패드의 기본 구조를 결정하기 위하여 스프링 부재의 형상에 따라 Fig. 1과 같이 6개의 축소 모델을 설계하였다. Case 1은 중앙이 고정되어있고 스프링이 백플레이트에 슬라이딩되는 스프링 부재 위에 스티드가 위치한 모델이고, case 2는 중앙의 한 점이 고정되어있고 곡률을 지닌 링크형 스프링 부재 위에 스티드가 위치한 모델이다. Case 3은 초기 곡

률을 지닌 시소형 스프링부재 위에 스티드를 접합한 모델이고, case 4는 단일 판 다이어프램형 스프링 위에 스티드가 위치한 모델이다. Case 5은 곡률이 없는 링크형 스프링 부재 위에 스티드가 위치한 모델이며, case 6은 2중 시소형 스프링 부재 위에 스티드가 위치한 모델이다. 구조 해석은 스티드를 1mm로 하강시켰을 때 스프링이 받는 응력과 반력을 산출하였으며, Ansys WorkBench 11.0을 사용하여 수행하였다. 경계조건으로 백플레이트(back plate)와 plate side surface에 fixed boundary condition을 적용하였으며, 스티드의 윗면에 1mm 변위하중을 가하는 방법으로 구조해석을 진행하였다. Table 1과 같이 해석 모델 목표 값으로 응력은 스프링 재질의 항복 응력을 고려하였으며, 스프링 반력은 업계에서 요구하는 제동 하중의 범위로 결정하였다.

Table 1 Target value of structural analysis

Variable	Target value	Remarks
Max. principal stress (MPa)	Max. 1,300	Yield stress of spring material
Spring reaction force (N)	9,810~11,780	7-stud base

Table 2 Analysis result of total cases

		Max. stress (MPa)	Reaction force(N)	
			1-Stud	7-Stud
Target value		Max. 1,300	-	9,810 ~11,780
Analysis cases	Case_1	1,243	1,487	10,409
	Case_2	677	549	3,843
	Case_3	1,245	1,495	10,466
	Case_4	1,291	1,611	11,278
	Case_5	694	417	2,919
	Case_6	1,232	1,409	9,860

Fig. 1 Configuration of FEM models

Fig. 2 Analysis results : (a) Case 1 and (b) Case 3

총 6개의 축소 모델 중 스프링의 두께, 길이 등을 변경하여 해석한 결과를 Table 2에 정리하였다. 4개 모델의 해석 결과가 허용 응력 및 반력을 만족하였으나, case 2, 5번의 경우 반력이 설계 목표에 미치지 못하였다. Case 4, 6번은 목표 요구성능은 만족하나, 설계 구조가 복잡하고 적용 시 양산의 어려움이 있을 것으로 판단하여 제외하였다. 향후 연구에는 case 1, 3을 최종 모델로 선정하여 진행하였다. Fig.2는 case 1 과 case 3의 해석결과를 나타내었다.

2.2.2 Half-scale 모델 구조 안정성 검토

철도 디스크의 양면에 동일한 제동 조건이 작용하기 때문

Table 3 Analysis result of half-scale model

	Allowable stress (MPa)	Case 1		Case 3	
		Max. stress (MPa)	Safety factor	Max. stress (MPa)	Safety factor
Stud support	220	158.5	1.39	67.8	3.24
Spring	1,300	1,295.0	1.00	1,055	1.23
Back plate	220	160.6	1.37	31.9	6.90
Dovetail	355	39.4	9.01	48.3	7.34

(a)

(b)

Fig. 3 Half-scale FE model : (a) Case 1 and (b) Case 3

에 한 번에 해당하는 half-scale 모델을 case 1과 case 3의 조건에 따라 설계를 진행하였다. 구조적 안정성 평가를 위하여 스프링의 반력 및 응력, 스프링을 제외한 기타 부품들의 모델에 대하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 3은 백플레이트에 스테드가 배치된 case 1과 case 3의 half-scale 유한요소 모델(FE model)이다.

Case 1의 구성은 7개의 스테드와 스테드 지지대(stud support), 4개의 스프링, 백플레이트와 도브테일(dovetail)은 각각 1개로 구성이 되어있다. 유한요소모델의 절점(node)은 208,339개이고, 요소(element)는 49,825개로 구성을 하였다. Case 3은 10개의 스테드와 스테드 지지대, 5개의 스프링, 백플레이트와 도브테일은 각각 1개로 구성이 되어있다. 유한요소모델의 절점은 141,858개이고, 요소는 39,125개로 구성을 하였다.

해석 조건으로 Fig. 4와 같이 스테드에 대응하는 디스크 부분은 완전구속조건을 설정하고, 백플레이트에서 도브테일을 제외한 캘리퍼와 접촉하는 부위에 1mm 변위하중을 부여하였다. Case 1과 3의 half-scale 모델 해석 결과 스트로크 1mm에서 스프링의 반력은 10,943N 및 11,321N으로 스트로크 대비 반력의 목표 값을 만족하였다. 브레이크 패드를 구성하는 각 부품에 대한 해석결과는 Table 3과 같다. 최고 응력은 모두 스프링에서 발생하였으며, 응력 값은 모두 허용응력에 대하여 만족하여 구조적으로 안전한 것으로 판단하였다.

Fig. 4 Load and boundary condition of FE analysis : (a) disk is fixed, (b) back plate moves freely only vertical direction, (c) 1.0mm displacement are applied on the determined faces of back plate

2.3 내구성 및 동적 특성 평가

2.3.1 스트로크 및 내구성 시험

Case 1과 case 3의 내구성을 검증하기 위하여 압축시험기를 이용하여 압축변위에 대한 반력 특성을 시험하였다. Fig. 5의 축소 시편 및 장비를 이용하여 스트로크 1mm 기준으로 각 case 별 10회 시험을 실시하였으며, Fig. 6과 같은 압축변위에 따른 반력 결과를 얻어내었다. Case 1은 각 시편 별 결과가 1mm 기준 반력이 1,750N으로 비교적 일정한 양상을 나타내며 해석결과 1,487N에 비해 우수한 결과를 얻었다. 반면, case 3은 스티드 플레이트의 곡률 형상에 따라 압축변위에 따른 반력의 특성이 일정하지 못하여 해석결과와 차이를 보였으나, 실제 차량에 적용되는 경우 제동 시 연결 부위가 파괴되는 구조적 안정성 문제와 설계 구조상 제품의 양산성이 떨어질 영향이 있을 것으로 판단하고 향후 연구에는 배제하였다.

최종 선정된 case 1에 대하여 Fig. 5(c)의 장비를 이용하여 내구성 시험을 수행하였다. 하중의 변화는 비교적 안정적인 값을 보이며 60,000회 이전까지는 시편에 손상 없이 하중을 유지하였으나, 60,000회를 지나면서 스프링의 벤딩 부위에 균열 발생이 시작하여 100,000회가 되었을 때 완전히 파손되었다.

Fig. 5 Stroke reduced specimens : (a) case 1, (b) case 3, (c) test equipment

Fig. 6 Stroke test result of reduced specimens : (a) case 1 and (b) case 3

2.3.2 모달 시험

디스크와 고정 패드, 유연 패드의 동 특성 파악 및 유한 요소모델의 신뢰도를 확인하기 위해 축소시편을 제작하여 모달 시험(modal testing)을 수행하고, 모달 해석(modal analysis)을 통해 검증하였다. 시험 방법으로 응답 점을 고정하고 가진 점을 이동시켜 측정하는 로빙(roving) 방법을 채택하였다. Fig. 7와 같이 디스크와 패드에 각각 80개와 40개의 절점(nodal point)으로 나누어 free-free 조건에서 절점 당 5회 측

Fig. 7 Modal Testing Specimens : (a) Disk, (b) Fixed pad, (c) Flexible pad

Fig. 8 FRF (Frequency response function) curve : (a) Disk, (b) Fixed pad, (c) Flexible pad

Table 4 Result of FEA(finite element analysis) and testing of out-of-plane mode frequency

Mode out-of-plane	Disk			Fixed pad			Flexible pad		
	Natural frequency		error(%)	Natural frequency		error(%)	Natural frequency		error(%)
	FEA(Hz)	Test(Hz)		FEA(Hz)	Test(Hz)		FEA(Hz)	Test(Hz)	
1st	789	788	0.13	1,341	1,410	4.91	1,280	1,201	6.58
2nd	1,310	1,277	2.58	1,970	2,076	5.12	1,350	1,292	4.49
3rd	2,021	2,017	0.20	4,852	5,014	3.23	3,009	2,813	6.97
4th	2,696	2,594	3.93	5,093	5,257	3.12	3,365	3,241	3.83
5th	3,602	3,590	0.33	6,101	6,070	0.51	4,174	3,949	5.70
6th	5,000	4,849	3.11				4,696	4,434	5.91
7th	5,473	5,442	0.57						

정을 수행하였다.

측정 장비로 단축 가속도계와 impact hammer를 이용하였으며 acquisition 장비로 LMS Test.Lab 을 사용하였다. 측정 결과는 A/D signal converter를 통해 신호를 받아 FFT(fast fourier transform)과정을 거쳐 Fig. 8의 FRF (frequency response function) curves를 얻어내었다.

디스크의 경우 7개의 out-of-plane mode가 측정되었고, 고정 패드와 유연 패드의 경우 각각 5개와 6개의 out-of-plane mode가 측정되었다. 모달 측정 결과와 정확성을 검증하기 위해 수행한 모달 해석의 결과를 Table 4에 정리하였으며,

시험과 해석의 최대 오차는 6.97%로 신뢰성을 확인할 수 있었다. 이와 같은 신뢰성을 바탕으로 2.3.3절에 수행되는 피로해석 모델에 모달 해석에 사용되어진 유한요소모델을 적용하였다.

2.3.3 축소시편 피로해석

장기간 운행되는 철도 차량의 성능 조건으로 고속철도를 기준으로 하루당 평균 제동 횟수와 연간 운행일 및 개발 안전율을 고려하여 60,000회 이상의 요구수명을 만족하여야 한다. 축소 시편의 내구성 시험에 앞서 스트로크 시험에 대한 피로 해석을 수행하였다. 해석 조건으로 1mm의 스트로크가

Fig. 9 Crack occurrence position of specimen on analysis and test : (a) Fatigue analysis and (b) Endurance test

적용되는 시험과 같은 조건을 구현하기 위해 하중 인가 방식을 zero based로 적용하였다. 피로해석 결과 Fig. 9(a)에서 보여지는 것과 같이 최대 응력 발생하는 스프링의 벤딩 부분에 발생하였으며 이는 Fig. 9(b)에 도시한 바와 같이 2.3.1 절에서 수행한 내구성 시험을 통해 확인된 파손 위치 및 파괴 시작 시점과 일치하였다. 피로 수명은 60,625cycle로 요구수명에 만족하는 것을 확인하였다

2.4 열적 안정성 검토

2.4.1 열섬 발생 임계속도 시험

브레이크 제동 시 열섬이 발생하는 디스크의 임계 회전 속

Fig. 10 Equipment set-up of chassis dynamo and infrared camcorder

도를 측정하는 시험으로 고정 패드와 유연 패드에 대하여 각각 수행하였다. Fig. 10의 샤시 다이내모에서 고속으로 회전

Table 5 Hot spot test result of fixed pad and flexible pad

Classification	Dynamo rotational speed (rpm)	Max. Temp. (°C)	Min. Temp. (°C)	Temp. difference (°C)	Hot spot generation
fixed pad	600	300.63	245.88	54.75	○
flexible pad	780	299.43	283.97	15.46	×
	840	291.84	283.86	7.98	×
	900	294.11	281.06	13.05	×
	960	292.68	278.43	14.25	×
	1020	293.21	283.9	9.31	×
	1080	304.23	298.02	6.21	×
	1140	310.15	302.41	7.74	×
	1200	322.52	300.58	21.94	×
	1500	294.47	284.27	10.2	×
	1800	316.66	305.62	11.04	×
	2100	347.13	341.42	5.71	×

Fig. 11 Hot spot test result : (a) Fixed pad test result on 600rpm and (b) Flexible pad test result on 2100rpm

하는 디스크에 2bar의 일정한 제동 압력이 가압된 상태로 디스크 회전 속도를 780rpm부터 60rpm 간격으로 증가시키며 드래그 시험을 수행하였다. 고속 적외선 캠코더를 이용하여 디스크의 표면 온도 분포를 측정하고 열섬 발생 여부 및 발

생 시 임계 속도를 산출하였으며, 불안정 표면온도 분포가 확인될 경우 열섬이 발생한 것으로 판정하였다.

Table 5와 같이 열섬 시험 결과 고정 패드의 경우 600rpm에서 디스크의 표면온도가 50°C이상 차이를 나타내는 불균일한 온도분포가 확인되었다. 이것은 디스크의 온도 분포에 의한 변위량 차이에 따라 디스크와 패드의 불균일한 접촉이 발생하여 디스크 표면의 불균일한 온도 분포가 나타나는 열섬 현상이 발생한 것으로 판단하였다.

동일 조건하에서 유연 패드에 대하여 780rpm에서 1200rpm까지는 60rpm, 1200rpm부터 2100rpm구간은 300rpm 간격으로 디스크 회전속도를 증가시키며 시험을 수행한 결과 디스크 표면의 온도 차이는 최대 약 22°C정도로 비교적 안정적 온도분포를 보였다(Fig. 11). 이와 같은 결과로 고정 패드에 비해 유연 패드가 전체적으로 디스크의 표면온도 분포가 고르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.4.2 패드 온도 분포 시험

브레이크 제동 시 고정 패드와 유연 패드의 온도 분포를 확인하기 위하여 시험을 수행하였다. 앞 절과 동일한 샤시 다이내모에서 디스크의 회전 속도를 960rpm, 제동 압력을 2bar로 고정하였으며, 디스크의 표면 온도가 100°C일 때부터 10°C간격으로 Fig. 12(a)의 측정 점에서 디스크 표면 온도 및 각 패드의 온도를 고속 적외선 캠코더를 이용하여 측정하였다.

시험을 통하여 측정된 온도를 Table 6에 정리하였다. 결과를 보면, 고정 패드의 경우 6.38°C에서 25.03°C까지 약 19°C의 온도 차이를 보였고, 유연 패드의 경우 15.63°C에서 29.03°C까지 약 13°C의 온도 차이를 보였다.

Table 6 Temperature of fixed pad and flexible pad

Fixed pad				Flexible pad			
Disk Temp. (°C)	Pad-01 Temp. (°C)	Pad-02 Temp. (°C)	Temp. difference (°C)	Disk Temp. (°C)	Pad-01 Temp. (°C)	Pad-02 Temp. (°C)	Temp. difference (°C)
100.11	118.74	105.95	12.79	100.03	150.95	128.32	22.63
110.07	139.28	118.18	21.1	110.32	155.18	138.92	16.26
122.12	153.71	136.84	16.87	120.28	182.54	162.64	19.9
140.49	164.37	157.99	6.38	130.19	184.5	167.17	17.33
160.36	205.32	187.43	17.89	140.43	204.69	187.32	17.37
170.03	215.93	198.68	17.25	150.06	211.87	192.76	19.11
180.83	228.24	206.03	22.21	160.01	219.56	203.0	16.56
191.05	242.42	217.39	25.03	170.03	229.53	213.9	15.63
200.43	252.52	245.97	6.55	180.14	248.64	229.31	19.33
210.25	279.38	268.71	10.67	190.72	274.63	245.6	29.03
222.31	309.15	295.8	13.35	200.42	270.77	242.75	28.02
				210.61	274.37	249.95	24.42
				220.01	280.61	257.21	23.4
				236.22	286.8	267.71	19.09
				241.12	294.53	273.41	21.12
				251.6	300.86	281.7	19.16

Fig. 12 Pad temp. result : (a) Measuring point, (b) Fixed pad on disk temp. 222.31°C, (c) Flexible pad on disk temp. 220.01°C

Fig. 13 Temperature comparison of pad 1 and 2 : (a) Fixed pad and (b) Flexible pad

결과적으로 유연 패드가 각 패드의 온도 차이에 다소 안정적으로 분포하는 것을 확인할 수 있었으며, 디스크의 온도가 증가할수록 디스크 온도 대비 패드의 온도가 낮아지는 현상을 확인하였다.

또한, Fig. 13과 같이 디스크의 온도가 올라갈수록 고정 패드의 온도는 상승 곡선 형태를 보였으나, 유연 패드의 온도는 일정한 지점에 수렴하는 곡선 형태를 나타내었다. 이것

은 고정 패드의 경우 백플레이트와 직접적인 연결로 인해 패드에 저장되는 열에너지가 외부로 방출되지 못하고 저장되어 지속적인 온도 상승에 영향을 미치는 역할을 하는 것으로 판단된다. 반면, 유연 패드는 스테드 플레이트에 의해 백플레이트와 간접적인 연결로 열에너지 방출 효과가 발휘되어 안정적인 온도 분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 고속철도 제동 성능 향상을 위해 적용 가능한 유연 제동 패드에 대해 설계 단계를 거쳐 구조적 안정성 검토와 신뢰성 확보를 위한 여러 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유연 패드의 지지 구조에 적합한 여러 모델을 선정하여 구조 해석 과정을 통해 설계 기준에 부합하는 개선 모델을 얻어내었으며, half-scale 모델 해석으로 구조적인 안전성을 확인하였다.

(2) 축소 시편의 피로 해석으로 60,625회의 피로 수명이 예측되었으며, 이것을 내구성 시험을 수행하여 확인하였다. 이와 같은 해석 및 시험을 바탕으로 유연 패드는 60,000회 이상의 내구에 대항하는 요구 수명이 확보되어진 것을 알 수 있다.

(3) 샤시 다이내모 장비를 이용하여 유연 패드의 열섬 발생 및 회전 속도를 측정하였다. 유연 패드는 디스크 표면의 온도차이가 최대 22°C 정도로 열섬 발생을 확인할 수 없었으며, 고정 패드의 디스크 표면 온도 분포가 고르지 않은 것과 달리 유연 패드는 비교적 안정적인 온도 분포를 확인하였다. 이것으로 구조적인 관점에서 유연 패드와 디스크 사이의 균일한 접촉 능력을 확인하였다.

(4) 브레이크 제동 시 패드의 온도 분포를 측정한 결과를 통해 동일 디스크 온도에서 고정패드에 비해 유연 패드의 안정적인 온도 분포를 확인할 수 있었다. 디스크 온도가 증가할수록 유연 패드의 온도는 일정한 지점으로 수렴하는 곡선의 형태로 구조적으로 열에너지 방출 효과가 발휘되어 안정적인 온도 상승을 나타내는 것을 알 수 있으며, 열에 의한 변형 억제 기능도 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)다원프릭션의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] R. Limpert (1992) *Brake Design and Safety*, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA.
- [2] T. Zeuner (1998) MMCs, an Alternative Material for Railway Car Braking System, *Materials World*, 6(1), pp. 17-19.
- [3] S. Kim, H. Lee (2009) Study of Tribological Characteristics Between Metallic Friction Materials and Brake Disc, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(1), pp. 72-80.

- [4] S. Kim, H. Lee (2007) Tribological Characteristics of Brake Disc for Train, *Journal of Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers*, 23(1), pp. 19-28.
 - [5] S. Panier, P. Dufrenoy, D. Weichert (2004) An Experimental investigation of hot spots in railway disc brakes, *Wear*, 256(7-8), pp. 764-773.
 - [6] H. Cho, C. Cho, M. Kim (2006) The Origin and Effect of Hot Spot Phenomena on Judder Vibration in Automotive Disk Brake, *Transactions of KSNVE*, 16(8), pp. 886-892.
 - [7] H. Cho, M. Kim, C. Cho (2007) A Study of Frictional Contact Vibration Influence on Hot Spot in Automotive Disk Brake, *Transaction of KSAE*, 15(1), pp. 154-161.
 - [8] S. Joo, Y. Kwon, H. Kim (2009) A Study on the Fatigue Damage of a Railway Disc Brake Surface Due to Thermal Stress During Braking Using FEM Analysis, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(2), pp. 212-218.
 - [9] BECORIT GMBH (2002) Brake lining for the disk brake of a vehicle, EP1167806.
 - [10] Knorr Bremese SFS (2003) Brake lining for the disk brake of a vehicle, US 2005/0173210 A1.
- 접수일(2010년 12월 30일), 수정일(2011년 3월 23일),
 게재확정일(2011년 3월 25일)