

틸팅차량용 제동 디스크의 트라이볼로지 특성 연구

Tribological Characteristics of proposed brake disk for Tilting train

박경식* 강심웅** 조정환*** 이희삼****
Park, Kyung-sik Kang, Sung-woong Cho, Jeong-whan Lee, Hisung

ABSTRACT

Brake system is indispensable functional part to the transportation machines such as railroad cars, and all of industrial machines. It is mechanical element to stop the movement or slow the speed, transforming kinetic energy of motion object into thermal energy through solid friction. According that recently the railroad cars have become high-speed, the technique in braking domain to secure the overall braking effort is making rapid progress.

In particular, material development and manufacturing process are so important to secure friction performance, which is the core in braking performance of mechanical brake units. Wear of brake disk could mainly result in the diminishment of its life span due to thermal cracking, so the endurance against high temperature is required. On the other hand, in this case, the problem is that the side wear of pad, relative material is slightly increased because of enlargement of plastic deformation. It is necessary, therefore, to develop a disk material that will be used in the Tilting System mechanical brake units.

The purpose of this paper is to make a study prior to developing brake disk of Tilting Train travelling at 200km/h and to propose the component of brake disk. Accordingly, I will conduct sufficient researches on technical documents of brake disk, that are basic documentations, analyze an impact on components, and further, considering braking degree of train, study for the basic proposal on brake disk's component of the train travelling at 200km/h, which has relatively minor influence of heat stress and maintains the friction.

In this respect, I would like to investigate friction characteristics between disk and relative friction material via Test on some possible test segments, analyze and propose friction performance, temperature impact and so forth coming from the contact with pad, relative material to demonstrate the friction characteristics.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 비회원

** 유진기공 과장, 정회원

*** (주)다원프릭션 대표이사 공학박사, 정회원

**** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량시스템학과 교수, 정회원

1. 서론

제동장치는 철도차량 등의 수송기계와 모든 산업기계에 없어서는 안 되는 중요한 기능 부품으로서 운동체의 운동에너지를 고체 마찰에 의해 열에너지로 변환시켜 운동을 중지시키거나 운동속도를 감소시켜 주는 기계요소이다. 최근 들어 철도차량이 고속화됨에 따라 전체 제동력을 확보하기 위한 제동분담기술이 비약적으로 발전하고 있으나, 최종적으로는 일정부분의 제동력은 여전히 기계제동장치가 분담하여야 한다.

이때 기계제동장치 제동성능의 핵심요소인 제동디스크와 페드의 설계 개념은 매우 중요하다. 이때 디스크는 마모보다는 열균열에 의해서 수명이 단축되는 경우가 많기 때문에 고온강도가 요구되며, 소성변형이 크게 되므로 상대재인 페드의 편마모가 약간 증대되는 분체질 등이 있다. 따라서 위의 여러 가지 사항들을 고려하여 텀탕시스템의 기계제동장치에 사용될 고속용 제동디스크의 소재 개발은 매우 중요하다.

본 연구 논문에서는 200km/h급 텀탕차량의 제동디스크로 가장 적합한 제동 디스크 개발을 위하여, 기 사용중인 제동디스크에 관련된 기술 자료를 충분히 조사하고, 이를 활용하여 디스크 소재의 조성에 대한 영향을 분석하며, 차량의 제동력 수준을 고려하여 마찰력을 유지하고 열응력에 대한 영향이 비교적 적은 200km/h급 차량의 제동 디스크로 적합한 소재를 제안하고, 이에 제안된 디스크 소재와 상대 마찰재료의 트라이볼로지적 특성을 조사 분석하여, 가장 적합한 디스크와 페드의 조합을 제안하고자 한다.

2. 제동디스크(Brake Disk)

2.1 철도차량의 디스크제동의 종류

1) 차축용 제동디스크

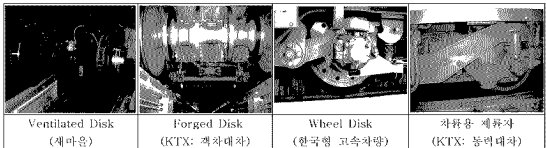
- Ventilated Disk : 디스크 내부에 방열편을 설치하여 냉각성능을 향상시킨 디스크로, 제조공정은 주조법(Casting)이며, 가장 널리 사용하는 범식임(새마음)
- Forged Disk : 디스크 열적 강도를 증가하기 위하여 단조법을 사용하여 제작하는 디스크임(KTX, TGV계열 차량)

2) 차륜용 제동디스크 (Wheel Disk)

- 차축용 제동디스크를 설치하기에 공간이 부족한 경우, 차륜 측면에 제동디스크를 별도로 장착하여 사용함(한국형 고속철도차량)

3) 담면 제동(차륜용 제동자)

- 차륜담면에 재료자륜 사용하여 제동하는 경우로, 화물차 등 많이 사용되었다 (KTX나 TGV 계열의 경우 동력차에 적용)



2.2 디스크의 개발 현황

고속차량의 제동디스크는 마모보다도 열균열에서 수명이 단축되는 경우가 많이 발생한다. 재질 향상면의 페라이트(ferrite) 주철이 주장되지만 고온강도 향상을 위해 Ni, Cr, Mo 주철을 사용하기도 한다. 내열강을 사용한 경우에 있어서 강도향상을 기대할 수 있지만 소성변형이 크게 되기 때문에 라이닝의 편마모가 약간 증대되는 문제점이 있다. 또한 디스크 열응력 경감을 위해 라이닝에 대한 형상개량의 연구가 진행되고 있다.

디스크의 재료는 가격, 제조과정의 용탕, 강도, 열손상에 대한 저항성 등의 이유로 주로 회주철이 사용되었다. 그러나 구미에서는 일본과 같은 모양의 주철이 디스크의 주류를 이루고 있고 일본의 일부 신간선에서는 강제디스크도 사용되고 있다. 강제 디스크 중에서도 단조강 디스크는 냉각 효과에 영향을 미치는 방열면적에 따라 핀(fin)을 부착한다.

영국, 일본을 중심으로 디스크의 균열문제 해결을 위해 CV 흑연주철이 실용화되고 있으며 영국 국철에서는 고속열차에서 CV 흑연주철 디스크를 채용하여 약 30만km를 주행시험하고 균열발생이 일어나지 않는 것을 확인하였다. 프랑스의 고속열차인 TGV에서는 현재 일부 주철 디스크가 사용되고 있으며, 단강 디스크로서 한국의 KTX 채용되어 운영되고 있고 단강 디스크로 한국형 고속철도 G7 일부 시험운행 중이다. 독일, 일본등에서는 경량화와 내마모성이 좋은 알루미늄 디스크를 연구개발하고 있다. 세계각국에서 사용되고 있거나 개발중에 있는 디스크의 현황은 다음 Table1 과 같다.

Table 1 세계각국의 디스크 개발 현황

소재명		소재명칭	현황	개발국
분류				
철계금속재료	주철계	편상흑연주철 (보통주철)	재래선 사용	일본 세계각국
		구상흑연주철 (GCD40)	재래선 사용	유럽
		Ni-Cr-Mo 저합금주철(NCM)	신간선, 재래선 일부사용	일본
		CV 흑연주철	재래선 사용	일본, 영국
		주철-주강재	신간선 사용	일본
	강 계	주강	G-7, 일부 대형 자동차 사용	한국 일본
		단강	신간선, TGV, KTX 등 사용중	한국, 일본, 프랑스등
복합재료	비금속	C/C복합재료	항공기, F1차 등 사용중	일본, 유럽
	금속	AL합금복합재	개발완료	일본, 유럽

2.3 철도차량별 제동 디스크 재질

Model of Rolling Stock	Max. Speed (km/h)	Disk Material	Pad Material	Maker
새마을	150	Gray Casting (GC: 회주철)	Resin mat.	삼창기계
신간선	250(100)	NCM Casting (NCM 주철)	Cu sintered mat.	구리모토
KTX	300	Forged Steel (FS: 단강)	Cu sintered mat.	WABCO
ETR	250	Steel Casting (SC: 주강)	Cu sintered mat.	Poli
G-7	350	Steel Casting (SC: 주강)	Cu sintered mat.	Poli
TTX	200		Cu sintered mat.	

※ 신간선의 경우, 기계식 제동은 100km/h 이하에서만 제동 실시

2.4 제동 디스크 재질로 가능한 소재

재 질	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Cr	Mo	V
GC	3.00 ~3.88	2.20	0.59	0.061	0.062					
FCCV	3.75	2.50	0.26	0.036	0.007	0.026				
NCM	3.30 ~3.70	1.10 ~1.60	0.6 ~1.0	≤0.16	≤0.12	-	1.2 ~2.0	0.3 ~0.6	0.3 ~0.5	-
FS	0.24 ~0.31	0.4 ~0.7	0.5 ~0.9	≤0.025	≤0.025	-	≤0.40	1.3 ~1.6	0.6 ~0.9	0.20 ~0.40
SC	0.27 ~0.33	0.55 ~0.75	0.45 ~0.65	≤0.025	≤0.025	-	≤0.25	1.0 ~1.5	0.4 ~0.6	0.2 ~0.30
GCD	3.25 ~3.55	2.0 ~2.3	0.5 ~0.7	0.2↓	0.1↓		0.2↓	0.45 ~0.65	0.4 ~0.65	-

2.5 디스크 소재에 사용된 성분원소의 역할

- C(탄소): 주철의 내식성, 내마모성, 구조성에 많은 영향을 주는 원소이나 그 함유량이 3% 미만일 경우에는 탄화물을 충분히 석출할 수 없기 때문에 일정 정도 이상이 될 수 없고 그 함유량이 4%를 넘으면 내식성, 내마모성이 떨어진다.
- Si(규소): 탄화물이 없는 조직을 촉진시키며 그 구조성을 개선하는 작용이 있으나 함유량이 2%미만에서는 상기 작용의 기대가 어렵고, 함유량이 3.5%를 초과하면 기계적 성질의 약화 즉 취성 증가와 열전도율이 저하 될 수 있다.

- Mn(망간): 일반 철강재에서는 탈산제와 불순물 제거에 사용되고 강도와 경도를 올려주며, 주물에서는 Mn의 경우 흑연생성을 억제한다.
 - P(인): 연성, 인성, 용접성을 저하시키고 주물의 건전성에도 유해하기 때문에 최대 함량을 0.08%이하로 제한하여야 한다.
 - Ni(니켈): 탄화물 형성을 억제하며, 강하고 인성이 있는 ferrite를 형성함. Cr과 더불어 강에서 강도를 높여주고, 충격치를 향상함 또한 저온강도와 파괴인성을 증가시킴.
 - Mo(몰리브덴): 철의 경화능을 증가시킬 목적으로 첨가하며, 열처리 후 고온강도와 크리이프 특성이 우수함.
 - V(바나듐): 철에 첨가하여 고온에서 결정입자 성장을 억제함으로 열처리한 강의 강도와 인성을 증가시킴. 중간 두께 이상의 주물에서 높은 V함량이 연신율의 급격한 감소가 일어나 재질의 취성을 증가시키므로 이율 0.01~0.1%에서 제한하여야 한다.
- ※ 참조 : AMS specialty Handbook, 1996

2.6 디스크 소재의 기계적 특성

디스크 재질	인장강도 (kgf/mm ²)	경도(HB)	열전도도 (cal/m ² °C sec)	열균열성 (mm)	마모량
회주철(GC)	20~25	160~240	0.112		
Aus-GC	35~40	300~330	0.112		
C/V흑연주철(FCCV)	30~40*1)	180~250	0.100		
NCM주철	25~30	210~280	0.110	40*3)	0.98*3)
단강(FS)	105~125	331~390	0.124	≤5*3)	0.29*3)
주강(SC)	105~125	331~390	0.124	≤5*3)	

※ GCD(구상흑연주철)은 대개 3.3%C, 2%Si, 0.8%Mn 등으로 구성하고 인장강도는 40~70kgf/mm², 경도 150~270HB 정도 열전도도가 낮아 (강이나 회주철 대비 40~50% 낮음) Thermal crack의 우려 때문에 차량용 디스크 소재로는 잘 사용되고 있지 않음.

2.7 TTX에 적용 가능한 디스크 소재에 따른 마찰 마모 특성비교

디스크 재질	마찰특성	마모특성	내균열성	변형	가격(%)
회주철(GC)	◎	△	△	○	50
CV흑연주철(FCCV)	◎	△	△	○	60
Aus-GC	◎	○	○	◎	70
NCM주철	◎	◎	○	◎	90
단강(FS)	◎	◎	◎	○	-
주강(SC)	◎	◎	◎	○	100

2.8 시험평가 방안

항 목	시 험 내 용	기 타
재질검토 및 선정	-재질검토 & 재질선정 1) NCM 2) GC -시험제작	
LAB. TEST	-소형 다이내모 시험가로 Screen Test 진행	
FULL SCALE TEST	-시험품 제작 -시험조건 설정 및 시험평가	

2.9 시험장비

-Lab-Scale Dynamometer 사양

Disk Size: $\varnothing 110 \times 6t$

마찰재: 2개의 마찰재 사용, 마찰면적 : $11.2cm^2$

회전속도(디스크): 100~6000RPM(상용 4500rpm이하)

압부력: 10~500kgf

관성: 기본관성 $0.40kgm^2$ /최대관성 $1.25kgm^2$

Brake 토크: $25kgf \cdot m$ (Max $35kgf \cdot m$)

전동기: 7.5kW DC모터, 50~3500 정도크 특성.

냉각장치: 전동송풍기사용(최대 $11m^3/min$)

시험방법: 압부력 일정시험, 정도크시험,

파킹브레이크

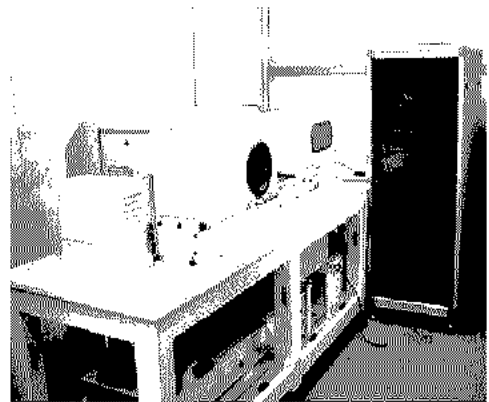
기록: 디스크 회전속도에 대해 연속적 기록.

STOP시까지의 회전수 및 시간 기록.

디스크와 패드의 온도변화의 연속적 기록

압력, FORCE의 변화기록.(최대값 포함)

출력 토크 기록



구분	디스크재질	패드재질
Case1	GC(회주철)	합성제륜자
Case2	GC(회주철)	소결패드
Case3	NCM주철	합성제륜자
Case4	NCM주철	소결패드

시험용 디스크/패드의 조합

5. 결론

철도차량의 고속화에 따른 제동성능 향상의 핵심적 요소인 제동디스크와 패드사이의 트라이볼로지 성능을 확보하기 위한 디스크 재질을 개선하여 높은 품질의 제동성능을 확보하고자 한다. 본 시험논문은 국내 최초로 디스크 개발을 위한, 현용 회주철 계열 및 NCM주철계 디스크와 합성제륜자 및 소결패드를 차량의 속도 향상에 따른 적합성 여부를 확인하기 위하여, 소형다이내모에서 비교분석으로 하고자 한다. 앞으로 진행되는 시험을 통하여 디스크에 강도, 마모 상태, 열균열 등의 시험(2종)을 통해 시험함으로써, 디스크와 패드의 상대적인 접촉특성에 따른 트라이볼로지적 특성을 비교분석하고자 한다.

200km/h급 틸팅차량에 적용할 수 있는 디스크 개발 결과를 활용하여, 향후에도 신형 디스크 개발뿐만 아니라 신소재 디스크 개발에도 적극 활용할 수 있다.

참고문헌

1. QR of RTRI, Vol.30, NO.4, 1989
2. FCCV : CV(Compact Vermicular)형태의 Graphite Casting iron
3. JIS 12209-2C~15AR1T(신간셀 차량용 디스크 브레이크)
4. G7 제동시스템 개발 3차년도 연차보고서, 1999 철도기술연구원
5. AMS 6385
6. 특허공고번호 90-4009(제동 디스크용 구상흑연주철)
7. 성균관대학교 차량제동제어연구 기술세미나, 2004
8. G7 제동시스템 개발 3차년도 연차보고서, 1999 철도기술연구원
9. 스미토모 금속기보, 1993
10. 철도차량의 제동성능 향상에 관한 연구, 1995.12 철도기술연구원