

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2014.30.4.240>

디스크 질량 변화에 따른 철도차량용 제동디스크의 마찰 특성

정종록 · 고은성 · 이희성[†]

서울과학기술대학교

Influence of Disk Mass with regard to Frictional Characteristics of Brake Disk for Rolling Stock

Jong Rok Jung, Eun Sung Ko and Hi Sung Lee[†]

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology

(Received March 28, 2014 ; Revised June 17, 2014 ; Accepted June 25, 2014)

Abstract – Low alloy heat resistant brake disk and sintered brake pad are applied to mechanical brake system for the speed-up of urban rapid transit. In this research, we analyzed how the frictional characteristics between brake disk and pad are influenced by the disk mass. At a high disk mass, the friction stability was the lower value as a result of the lack of tribofilm formation at the disk surface. Wear rates of friction materials showed the higher value at a low disk mass and wear rates of 10 mm and 15 mm showed the similar level. Average friction coefficient was the lower value at the 10 mm disk thickness and range of variation of average friction coefficient was also the smaller value at the 10 mm disk thickness. However, there were no significant changes in the friction coefficients under any of test conditions. Surface roughness of a disk showed the highest value at the 5 mm disk and surface roughnesses of 10 mm and 15 mm showed the similar level. As a result, friction characteristics of disk mass influenced the friction stability, as well as the wear rate of friction pad and disk, but not the friction coefficient.

Keywords – brake disk (제동디스크), pad (마찰재), frictional characteristics (마찰특성), disk mass (디스크 질량)

Nomenclature

μ_s : 마찰계수의 안정성
 μ_{ave} : 평균 마찰계수
 μ_{max} : 최고 마찰계수
 μ_{min} : 최저 마찰계수
 E_{brake} : 제동에너지
 ρ : 마찰부품의 밀도 (steel: 7,840 kg/m³)
 C_β : 마찰부품의 비열 (steel: 460 J/kg·K)
 V : 마찰부품의 부피(m³)
 ΔT : 온도변화(K)
 m : 마찰부품의 중량(kg)
 β_{eff} : 효율

1. 서 론

광역철도 서비스망이 확대됨에 따라 광역철도의 운행속도가 준고속 철도차량급으로 속도향상이 필요하게 되었다. 이에 따라 높아진 준고속 철도차량의 운동에너지를 감당할 수 있는 기계식 제동장치가 필요하게 되었다[1-2]. 이에 기계식 제동장치를 구성하는 제동디스크와 마찰재에 있어서 실질적으로 운동에너지를 흡수하는 것은 마찰재에 비해 질량이 높은 제동디스크이며, 이에 따라 제동디스크의 질량에 따라 마찰특성이 변화될 것으로 예측된다.

또한 준고속용 철도차량의 기계식 제동장치를 운용 및 유지보수하는 입장에서 본다면, 제동디스크는 불균일 마모 혹은 디스크 크랙 발생에 따른 삭정이 필요하게 되는데, 이때 마찰특성을 유지할 수 있는 최소한의

[†]Corresponding author : hslee@seoultech.ac.kr
Tel: +82-2-970-6877, Fax: +82-2-971-6877

디스크 두께(질량)를 설정할 필요가 있다[3-4].

이에 따라 본 연구에서는 디스크 두께(질량)의 변화에 따른 마찰특성 고찰을 통하여 기계식 제동장치의 유지 보수기준 정립에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 시험방법

2-1. 제동디스크

본 연구에 사용된 제동디스크는 3종류로 각각의 디스크 두께를 5, 10, 15 mm가 되도록 제작하였다. 시

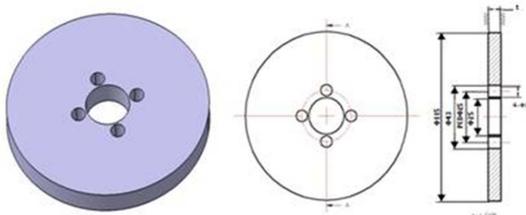


Fig. 1. Morphology of brake disk for test.

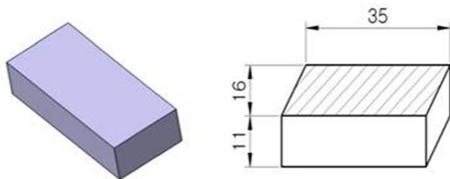


Fig. 2. Morphology of pad for test.

Table 1. Combination of test specimen

	1	2	3
pad	sintered brake pad		
brake disk (thickness, mm)	5	10	15



Fig. 3. Lab-scale dynamo tester.

험에 사용된 제동디스크의 재질과 물성을 준고속용으로 개발된 금속계 디스크 시편은 Fig. 1, 마찰재 Fig. 2로 실험을 위한 시편조합을 Table 1에 나타내었다[5-6].

2-2. 시험장치

마찰특성평가는 KS R 4024에 따라 제작된 소형다이나모시험기(Lab-scale dynamo tester)를 이용하였다(Fig. 3). 본 시험기는 제동디스크를 요구하는 속도로 회전시킨 후에 마찰시편에 압부력을 가하여 이때 발생하는 토크, 회전속도, 제동압력 등을 실시간으로 측정한다.

2-3. 시험방법

2-3-1. 제동시험조건

본 연구에서의 시험모드는 일정압력으로 마찰재를 제동디스크에 압착시켜 마찰특성을 평가하는 일정압력 모드를 Table 2와 같이 하였다. 제동시험을 위한 관성 질량은 0.095 kgf·m·s²로 고정하여 시험하였으며, 본 실험의 규정된 조건에서 마찰재에 0.55 MPa의 조건으로 인가하여 총 50회 제동을 하여 마찰특성을 평가하였다. 회전수는 준고속 철도차량의 실제 제동조건을 감안하여 설정한 것으로 철도차량속도로 환산하면 50, 70, 90 km/h에 해당한다.

2-3-2. 평가항목

마찰특성은 각 속도별 50회의 평균마찰계수와 평균 마찰계수 안정성으로 나타난다. 마찰계수 안정성(Stability)은 제동시 마찰계수의 변화를 평가하는 항목으로 제동시 순간마찰계수의 변화가 평균마찰계수에서 벗어난 정도를 나타내며, 마찰계수 안정성은 다음 (1) 식과 같다[7].

$$\mu_s = \left[(\mu_{ave}) - (\mu_{max} - \mu_{min}) \times \frac{1}{2} \right] \times \frac{100}{(\mu_{ave})} \quad (1)$$

마찰시편의 마모량은 실험 전 후의 중량차를 측정한다

Table 2. Conditions before main test

Specim in	Test pattern	Test pressure (MPa)	Rolling speed (rpm)	Speed (m/s)	Braking Num.
1	Constant pressure	0.55	1,673	13.9	50
2			2,342	19.4	50
3			3,012	25.0	50

후 이를 나타내거나, 에너지당 마모부피로도 평가하였다. 제동시험 후 제동디스크의 표면상태는 표면조도계(Roughness Tester)로 마찰트랙을 측정하여 R_a (중심선 평균표면조도)값으로 산출하였다. 또한 XRD(X-Ray Diffractometer)를 이용하여 마찰면의 성상을 분석하였다. 시험결과에 대해서 평균마찰계수와 마찰계수안정성, 마찰재의 마모량 및 시험 전·후 디스크의 표면조도를 관찰하였고, 마찰면을 조사하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 평균마찰계수

Fig. 4는 각 제동디스크에서 속도에 따른 평균마찰계수를 나타내었다.

디스크의 두께가 5 mm에서 전체 평균마찰계수는 0.423, 10 mm에서는 0.372, 15 mm에서는 0.440을 나타내었다. 디스크 두께에 따라 평균마찰계수가 최대 18.3%까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 중간 디스크 두께(10 mm 디스크)에서 마찰계수가 가장 낮고, 디스크 두께가 얇거나(5 mm) 두꺼운(15 mm) 디스크에서는 마찰계수가 높게 나타났는데, 이러한 현상은 디스크 두께에 따라 마찰열의 거동이 달라지며 따라서 마모 형태가 변화하였기 때문으로 판단된다.

또한 속도증가에 따라 마찰계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 속도에 따른 평균마찰계수의 변화폭은 5 mm 디스크에서는 8.3%, 10 mm 디스크에서는 6.4%, 15 mm에서는 18.8%로 나타나 10 mm 디스크 조건이 속도에 따른 마찰계수 변화에 가장 안정적인 것으로 나타났다.

3-2. 마찰계수 안정성

Fig. 5는 각 디스크에서 속도별 마찰계수 안정성을

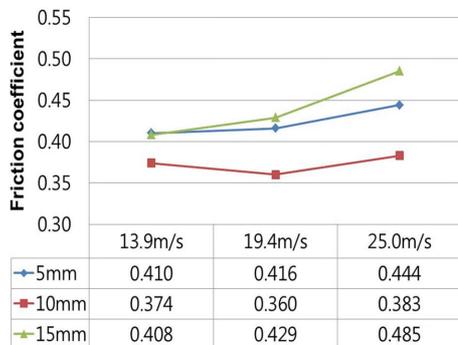


Fig. 4. Average friction coefficient variation with speed.

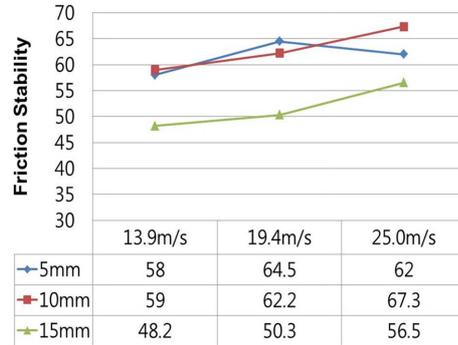


Fig. 5. Friction coefficient stability variation with speed depending on disk thickness.

나타냈다. 5 mm 디스크와 10 mm 디스크의 마찰계수 안정성은 전 영역구간에서 높은 값을, 15 mm 디스크에서는 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 15 mm 디스크에서 낮은 마찰계수 안정성을 가지는 것은 마찰면의 온도가 상대적으로 낮아 마찰계수 안정성에 미치는 산화피막의 형성이 용이하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3-3. 마모량과 디스크 표면조도

Fig. 6은 마찰재의 마모량을 나타내었다. 5 mm 디스크에서 마모량이 가장 많고, 10 mm, 15 mm 디스크에서는 마모량이 유사한 것으로 나타났다. 특히, 제동이 더 높은 25 m/s의 속도에서 5 mm 디스크에서 시험한 마찰재의 마모량이 다른 10 mm, 15 mm 디스크보다 마모량이 많은 것은 마찰재의 온도와의 상관성이 깊은 것으로 판단된다. 15 mm 디스크의 경우는 마찰

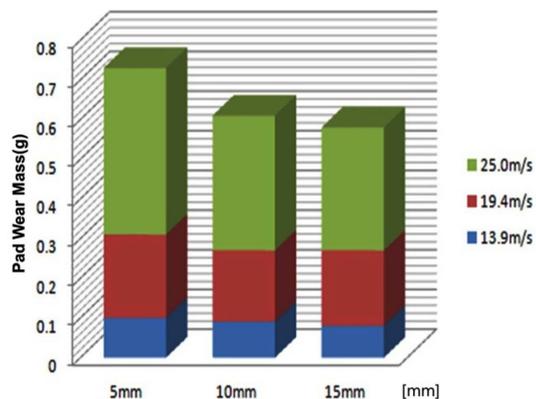


Fig. 6. Wear of friction materials with speed.

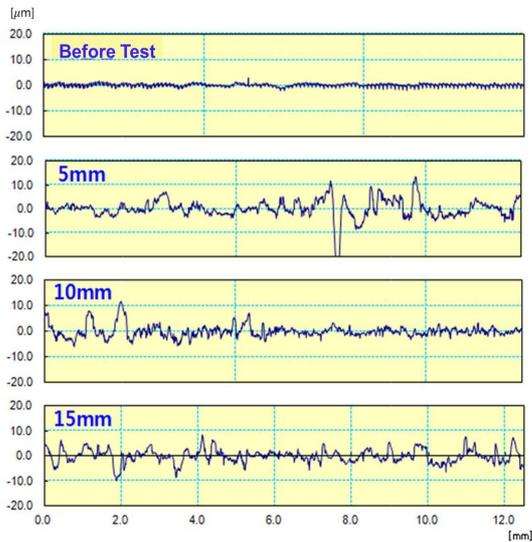


Fig. 7. Surface roughness of brake disks.

Table 3. Surface roughness of brake disks

	Ra	Rmax
Before test	0.0441	3.397
5 mm disk	3.054	20.776
10 mm disk	1.794	11.450
15 mm disk	1.964	13.683

계수가 다른 디스크 조건에서 보다 높은데도 불구하고 마찰재의 마모량은 가장 적게 나타나, 마찰계수가 마찰재의 마모량을 결정하는 주요 인자가 아님을 보여준다.

Fig. 7은 시험 후 디스크의 표면조도를 나타내었다. 5 mm 디스크에서 R_a 가 가장 좋지 않은 것으로 나타났고, 10 mm 디스크에서 표면조도가 가장 좋은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 5 mm 디스크에서 발생한 고경도의 마모분에 의해 제동디스크에서 연삭마모가 발생했기 때문으로 판단된다. 즉, 제동디스크의 두께가 얇으면 마찰재의 마모뿐 아니라 제동디스크의 마모도 증가하며 기계식 제동장치의 운용 및 유지보수 비용을 증가시킬 수 있는 것으로 판단된다.

3-4. 마찰면 분석

Fig. 8~10은 시험 후의 제동디스크의 마찰면을 나타내었다. 5 mm 디스크에서는 디스크 측면이 텁텁 칼라 (Temper Colour)가 발생할 정도의 온도까지 상승하였음을 보여주며, 마찰트랙에서 검은 산화물로 도포되어



Fig. 8. Morphology of disk surface after test for 5 mm disk.



Fig. 9. Morphology of disk surface after test for 10 mm disk.



Fig. 10. Morphology of disk surface after test for 15 mm disk.

있다. 또한 마찰트랙은 연삭마모에 의한 마모가 진행되었음을 보여준다. 즉, 5 mm 디스크에서는 마찰열에 의해 디스크의 온도가 상승하였고, 산화피막에 의한 고경질의 마모분에 의해 마찰면에서 연삭마모가 발생한 것으로 판단된다.

10 mm 디스크의 마찰트랙에서는 진한 회색의 띠고 있으며, 부분적으로 진한 산화피막을 형성하고 있다. 15 mm 디스크에서는 밝은 회색의 마찰트랙을 나타내고 있다.

Table 4. Kinetic energy & Estimated disk temperature

Disk (mm)	Speed (m/s)	Kinetic energy (J)	Estimated disk temperature (°C)
5	13.9	13,362	102
	19.4	26,189	176
	25.0	43,293	275
10	13.9	13,362	65
	19.4	26,189	104
	25.0	43,293	156
15	13.9	13,362	51
	19.4	26,189	76
	25.0	43,293	109

제동에너지가 전량 마찰열로 전환되며 제동디스크가 열 흡수체로 작용한다고 가정했을 때 제동디스크 온도는 (2)식에 따라 계산되며 예측된 디스크 온도를 Table 4에 나타내었다[8].

$$E_{brake} = pc_p V \Delta T = \beta_{eff} m_{fric} c \Delta T \quad (2)$$

예측된 디스크의 온도는 디스크 두께에 따라 변화하며, 5 mm 디스크에서 25 m/s에서는 최고 275°C까지 상승하는 것으로 계산되었다.

또한, Fig. 11은 각각 디스크에 대해 속도 별 디스크의 측면 온도를 측정된 것으로 벌크(Bulk) 온도에 해당한다. 속도증가에 따라, 디스크 두께가 얇을 수록 디스크의 온도는 높아진다.

하지만 실측한 디스크의 온도와 계산된 결과는 큰 차이를 보여주고 있다. 특히, 운동에너지가 높은 고속

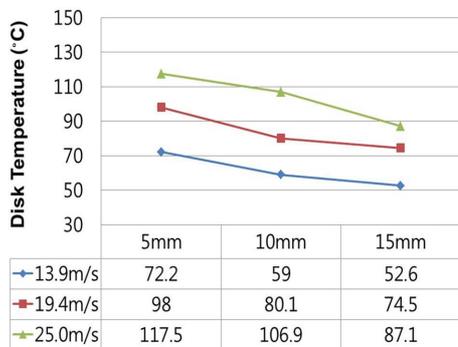


Fig. 11. Measured disk bulk temperature with speed depending on disk mass.

에의 차이는 더욱 심한 것으로 나타났다. 이러한 차이는 마찰재가 열 흡수체로 역할을 하지 않는다고 가정했고, 대류에 의한 열 발산도 감안하지 않은데 기인한 것으로 판단된다. 또한 디스크나 마찰재를 잡아주는 지그류 등도 실제로는 열흡수체로 작용할 수 있는데 이러한 것이 감안되지 않았기 때문으로 판단된다.

실제 마찰특성에서 중요한 것은 마찰면의 온도이나 이를 정확히 측정하는 것은 쉽지 않기 때문에 마찰면에 형성된 산화물의 색상으로 마찰면의 온도를 확인할 수 있다. 실제 마찰면의 접촉온도 보다는 120~150°C 낮은 연구결과에 따르면 마찰면의 최대온도는 237~267°C로 예측되어 지고, 마찰면에 형성되는 산화물은 Fe₂O₃로 판단된다.

Fig. 12는 시험 후 마찰면을 나타내었다. 5 mm 디스크에서는 검은색상의 산화피막이 형성되어 있지만 디스크 두께가 증가할 수록 붉은색의 마찰재 색상이 유지되고 있다.

Fig. 13은 마찰재의 온도를 측정된 결과이다. 역시

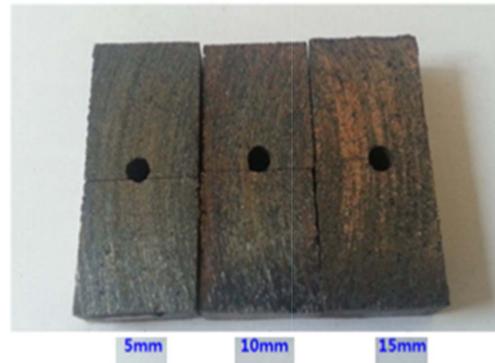


Fig. 12. Morphology of pad after test.

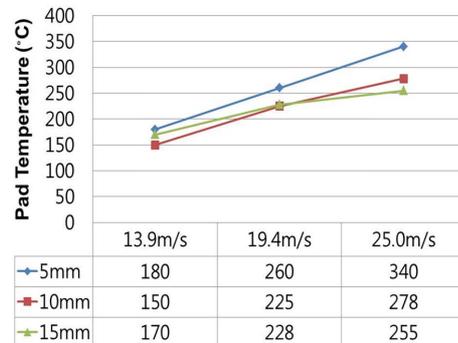


Fig. 13. Measured pad bulk temperature with speed depending on disk mass.

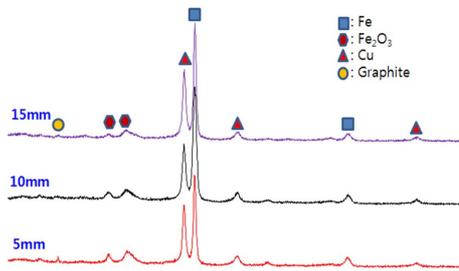


Fig. 14. XRD pattern of pad surface after test.

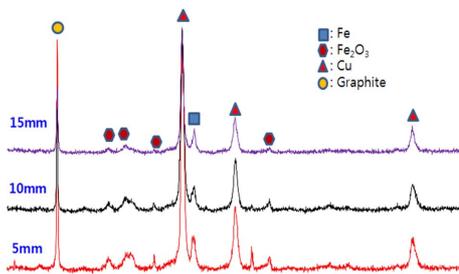


Fig. 15. XRD pattern of disk surface after test.

디스크 두께가 얇고 속도가 증가할 수록 온도는 증가하는 것으로 나타났으며, 5 mm디스크의 경우 25 m/s에서는 340까지 온도가 상승하였다. 10 mm디스크와 15 mm디스크의 온도는 차이는 크지 않은 결과가 나왔다. Fig. 14는 마찰재의 표면을, Fig. 15는 디스크의 마찰면을 XRD로 분석하였다. 디스크 두께가 얇을 수록 마찰재와 디스크 표면에서 Fe₂O₃의 피크가 높아져 상대적으로 많은 산화피막이 형성되어 있음을 보여준다. 이는 Fig. 11과 Fig. 13에서 나타낸 것처럼 디스크 두께가 얇을수록 마찰재와 디스크의 온도가 높음에 기인한다.

이러한 산화피막은 마찰계수를 낮고, 안정되게 하는 경향이 있지만, 5 mm 디스크에서 마찰계수가 오히려 10 mm 디스크에서 보다 높게 나타난 것은 5 mm 디스크에서는 마찰면의 온도가 높아 마찰재의 탈락이 많고, 이때 발생한 마모분이 마찰계수를 높인 것으로 판단된다. 5 mm디스크의 조도가 10 mm, 15 mm 디스크 보다 높은 것은 이를 반증한다.

4. 결 론

제동디스크의 두께에 따른 마찰특성을 시험실용 관성시험기를 이용하여 평가한 결과는 아래와 같다.

- 1) 평균마찰계수는 10 mm 두께에서 가장 낮고 속

도에 따른 변화의 폭도 적은 것으로 확인되었다.

- 2) 마찰계수 안정성은 15 mm 디스크에서 가장 낮게 나타났는데, 이것은 마찰면에 산화피막의 형성이 되지 않음에 기인한 것으로 판단된다.

- 3) 마찰재의 마모량은 5 mm 디스크에서 가장 높은 것으로 나타났고, 10 mm, 15 mm디스크에서 유사한 수준으로 나타났다.

- 4) 디스크의 조도는 5 mm디스크에서 가장 높고, 10 mm, 15 mm 디스크는 유사한 수준으로 나타났다.

전체적으로 볼 때, 디스크 두께에 따라 디스크/패드 마찰특성이 변화하고, 디스크의 마모도 변화하므로, 광역철도차량의 속도향상에 따른 광역철도차량의 제동 디스크의 운용 및 유지보수를 위한 합리적인 기준설정이 필요한 것으로 판단된다.

Acknowledgements

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, K. Y., Lee, B. J., Kim, S. H., Jeong, J. H., Cho, J. H. "A Investigation on the Friction materials of High Speed Train", *Trends in Metals & Materials Engineering*, Vol. 11, No. 2, 1998. (134-143)
- [2] D. Y. Chung, K. Y. Kim, J. W. Cho, "A Study on the Frictional Characteristics of B4C Added Cu Base Sintered Friction Material", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 12, No. 3, 1996. (48-54)
- [3] Kim, S.-S., Kim, C.-H., Ahn, H.-J., "Tribological Characteristics for High Performance Metallic Friction Materials", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 14, No. 1, 1998. (45-53)
- [4] Kin, S. H., Lee, H. S., "Tribological Characteristics of Brake Disc for Train", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 23, No. 1, 2007. (19-28)
- [5] Amderson, A. E., *ASM Handbook*, 10th ed, Vol. 18, pp.569-577, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International, Materials park, OH, 1992
- [6] Metal Handbook 1, Properties and selection, American Society for Metal.
- [7] Kim, S. H., Lee, H. S., "Tribological Characteristic of Brake Disc for Train", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 23, No. 1, 2007. (19-28)
- [8] Quinn, T. F. J., "Review of oxidational wear. part1: the origins of oxidational wear", *Tribo. Int.*, Vol. 16, 1983. (257-270)