고속철도 제륵자 결함분석 및 제륵자 개발

Failure Mode Analysis and Friction Material Development of the KTX tread Brake

백종길¹ · 구병춘[†] · 구정서²

Jong-Kil Baek · Byeong-Choon Goo · Jeong-Seo Koo

Abstract The shoe brake of the KTX is used in low speed when the electric brake is not effective. The main purpose of the shoe brake is to stop the train to a desired stop point at the station. Lots of defects have been encountered in the shoe brake unit since the KTX started its operation. To improve the reliability of shoe brake unit of the KTX power car, first of all, failure modes of the KTX shoe brake unit were analyzed. Main failure modes are cracks in the shoe friction material and fracture in the welded joints of the shoe backing steel structure. Several methods to remove the defects of the shoe brake unit were proposed and on-board tests were carried out: Increase of the strength of the shoe key and shoe cam, which decreased a little the occurrence of cracks in the shoe friction material; Redesign of the shoe backing steel structure, which eliminated the occurrence of the cracks in the backing plate but could not solve completely the crack problem in the shoe friction material; Development of a new friction material, which with redesign of the shoe backing steel structure could solve satisfactorily the crack problem in the shoe friction material.

Keywords : High Speed Train, Brake Shoe Failure, Reliability, Shoe Key, Shoe Cam

초 록 고속철도 KTX 차량의 답면제동은 전기제동이 작용하지 않는 저속에서 열차를 정거장의 정위치에 정차시킬 때 주로 사용되는데 그 동안 균열발생, 제륵자 키 탈락 등 잦은 고장이 발생하였다. 본 연구에서는 이러한 고장의 원인을 규명하고 각 고장에 대해 해결책을 제시하고 시험평가를 통하여 개선효과를 검증하였다. 제륵자 키와 캠의 강도향상과 제륵자 마찰재 지지판의 강도향상은 제륵자 마찰재의 균열발생을 약간 줄이는 효과는 있었다. 지지판의 강도향상, 구조개선과 함께 제륵자의 재질을 변경하였을 때 마찰재에는 균열이 거의 발생되지 않았다.

주요어 : 고속철도차량, 제륵자, 신뢰성, 제륵자 키, 제륵자 캠

1. 서 론

고속철도차량 KTX의 제동시스템은 전기제동과 디스크제동 및 답면제동이 순차적으로 적용되는 시스템이다. 이러한 고속철도차량의 제동시스템은 고속도 영역에서는 전기 제동력으로 1차 감속이 이루어지고 필요로 하는 제동력에 미치지 못할 경우 디스크 공기제동으로 보충하게 되며 속도가 낮아져 전기 제동력이 소멸되는 시점에서 답면제동이 체결되어 열차가 원하는 위치에 정차하게 된다. 동력차에만 설치되어 있는 답면 제동장치는 열차가 정차 시에 원하는 위치에 정확하게 열차를 정차시킬 수 있도록 제동력을 제공하는 중요한 역할을 한다.

2004년 4월 고속열차가 운행되고부터 동력차 답면 제동장치에 대한 고장현황을 파악한 결과 제륵자가 비정상적 균열에 의하여 교환되는 경우가 많이 발생되고 있음을 확인하였다. 답면제동장치의 고장은 답면제동장치가 정상적인 제동

력을 발휘할 수 없을 뿐만 아니라 빈번한 유지보수를 하도록 하여 유지보수 비용의 증가로 이어지므로 고장의 원인 규명과 성능 향상이 요구되고 있다. 철도차량의 디스크와 패드에 대한 연구[1-4]는 어느 정도 수행되어 왔지만 고속철도차량의 답면제동과 제륵자에 대한 연구는 매우 미미하다. 권병진 등[5]은 고속철도차량의 답면제륵자와 차량의 제동시의 열응력과 차량과 레일의 접촉에 의한 기계적 응력을 유한요소해석을 통하여 비교하여 차량의 림에서는 접촉응력이 더 크고, 차량의 플레이트에서는 열응력이 중요한 역할을 할 수 있음을 보여 주었다.

본 연구에서는 KTX 개통 이후 제륵자 균열현상 데이터를 기반으로 하여 제륵자의 사용수명을 평가하고 FMECA(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)를 통하여 고장 모드를 분석하고 몇 가지 개선책을 제시하여 실험을 실시하고 각 개선책의 효과를 검증하였다.

2. 제륵자 고장 원인 분석

2.1 답면제동장치의 구조

답면제동은 제동 실린더가 제륵자를 차량의 답면에 눌러

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 철도구조연구실
E-mail : bcgoo@krri.re.kr

¹한국철도공사 수도권철도차량관리단

²서울과학기술대학교 철도전문대학원

Fig. 1 Tread brake unit and brake shoe

제륜자와 차륜 담면 사이에 마찰력을 발생시켜 제동작용을 한다. 담면제동 실린더 장치는 동력차의 대차에 부착되며 제동제어장치로부터 생성된 공기압력을 제륜자를 통해 차륜에 전달한다. 담면제동 장치는 내부에 자동간격조정장치가 내장되어 있어 차륜이나 제륜자의 마모에 관계없이 항상 일정한 간격을 유지시킬 수 있다. 담면제동 장치는 스프링 작동식 주차 제동기능을 가지고 있으며 차량이 주차 된 상태에서 차량의 자연적인 누기에 의해 공기가 완전 배기되면 스프링력으로 제동이 체결되게 되어있으며 주행 중 배관의 파손 등으로 인해 급속히 배기되는 경우는 차량의 안전을 위해 주차 제동이 체결되지 않게 설계 되어있다. 담면제동 장치는 동력대차당 4개씩 설치되어 편성당 24개의 제동장치를 갖추고 있다. 담면제동장치는 크게 구분하여 차륜과 제륜자의 거리를 항상 일정하게 유지시키는 자동간격 조정장치, 공기압력을 증폭시키는 레버장치, 스프링 작동에 의해 제동을 체결하는 주차제동장치, 긴급 배기 시 주차 제동 체결을 제한하는 장치 및 주차제동 수동완해장치 등으로 구성되어 있다(Fig. 1).

2.2 담면제동장치의 고장유형 분석

20량 1편성 총 46편성 고속열차의 담면제동장치에 대해 2년간(2005.12~2007.12)의 고장에 의한 교체이력을 조사한 결과 Table 1에서 보는 바와 같이 51건의 교체가 있었다. 정상마모에 의한 교환수명은 53만km 정도이다. 교체내역을 분

Table 1 Failure modes and number of replacement of the KTX tread brake unit

Part name	No. of replacement	Cause of failure
제륜자 홀더	22	제륜자 마찰재의 균열에 의한 제륜자 탈락으로 인한 제륜자 홀더 마모나 열화
주차/공기제동불량	13	기능불량
실린더 공기누설	4	기능불량
리턴 스프링	2	기능불량
실린더	2	기능불량
실린더 스프링	1	기능불량
주차제동 타격파손	1	외부물체의 타격으로 파손
기타(원인불명)	6	-

석한 결과 고속주행 중 제륜자의 탈락으로 제륜자 홀더(holder)가 차륜에 직접 접촉되면서 마모 열화되어 교체한 것이 22건으로 가장 많았으며 그 외 공기 실린더의 고무실의 노후 경화, 제륜자 홀더 행거의 링크 부식 마모, 기능불량 및 기타 외부 타격에 의한 고장으로 분석되었다.

FMECA는 각 고장에 대한 고장빈도, 고장의 검출도, 고장의 심각도 등을 평가하여 치명도(RPN: Risk Priority Number)를 평가하여 고장을 제거하는 우선순위를 정하는 데 사용할 수 있다[6]. Table 3에서 심각도, 발생빈도 및 검출도는 절대적인 것이 아니고 해석 대상에 따라 해당분야의 전문가들이 적절히 분류하여 사용할 수 있다. Table 3의 분류 기준을 적용하여 담면제동장치를 구성하는 각 부품의 고장 유형과, 원인, 고장의 영향, 치명도에 대해 Table 2와 같이 FMECA 분석을 하였다. 구성품 중 제륜자의 고장이 치명도 평점 6.69로 가장 높아 제륜자에 관한 설비개선 또는 구조 변경이 가장 시급한 것을 알 수 있다. 그리고 제동실린더, 자동간격조정장치, 스프링류, 제동기어 등 링크류는 치명도 3등급으로 나타났으며 치명도 3등급 중 브레이크 제륜자 홀더는 치명도 평점 3.91로 동일 치명도 등급 중 다소 높게 나

Table 2 FMECA of the KTX tread brake unit

부 품	기 능	고장유형	고장원인/발생과정	고장 영향		고장 검지법	심각도	발생 빈도	검출도	RPN	등급
				국부적	상위시스템						
제륜자 홀더	제륜자 고정	차륜과 접촉열화	제륜자 탈락	차륜열화, 제동기능 상실	충당변경	육안검사	10	2	3	3.91	3
제동실린더	제동력 발생	제동력 상실	공기 누설	제동불량	충당변경	작동검사	6	1	3	2.62	3
주차제동 장치	정차시 제동체결	주차제동 미체결	내부 스프링 불량	영향없음	영향없음	작동검사	2	1	6	2.29	4
자동간격 조정장치	제륜자와 차륜 간격 조절	조절기능 상실	스크류 손상	제동불량	충당변경	작동검사	6	1	3	2.62	3
스프링	실린더 복원	절손	피로	제동불량	충당변경	작동,육안	6	1	7	3.48	3
제륜자	제동력 발생	균열,절손	차륜과 접촉	제동불량	충당변경	육안검사	10	10	3	6.69	1
링크 류	제동력 전달	유동	부식 마모	진동소음	영향없음	육안검사	2	1	7	2.41	3

Table 3 Criteria of criticality, frequency, detection and RPN

평점요소		점수	평가기준
심각도	기능적 고장 영향의 중요도	10	· 임무달성 불능
		9	· 임무달성 불능, 대체 방법에 의한 일부만 달성가능
		8	· 임무의 중요한 부분 달성불능
		7	· 임무의 중요한 부분 달성불능, 보조수단으로 달성가능
		6	· 임무의 일부달성 불능
		5	· 임무의 달성불능, 보조수단으로 달성가능
		4	· 임무의 경미한 부분 달성가능
		3	· 외관기능을 저하시키는 경미한 고장
		2	· 임무에 거의 영향이 없음
		1	· 임무에 전혀 영향이 없음
발생빈도	고장발생의 빈도 (시간, 횟수)	10	· 600회 이상
		9	· 500회 ~ 599회
		8	· 400회 ~ 499 회
		7	· 300회 ~ 399회
		6	· 200회 ~ 299회
		5	· 100회 ~ 199회
		4	· 50회 ~ 99회
		3	· 30회 ~ 49회
		2	· 10회 ~ 29회
		1	· 10회 미만
검출도	고장 검출의 용이성 (시간, 방법)	10	· 정기검수시 고장검지 불가, 기지입고 후 명확한 고장원인 파악하기 어려움
		9	· 정기검수시 고장검지 불가, 기지입고 후 명확한 고장확인 어려움
		8	· 정기검수시 고장검지 불가, 기지입고 후 숙련된 작업자 고장확인 가능
		7	· 정기검수시 고장검지 불가, 기지입고 후 특수장비를 통해 고장확인 가능
		6	· 정기검수시 고장검지 불가, 기지입고 후 일반적인 방법 및 조작으로 검지가능
		5	· 정기검수시 특수장비를 이용 고장검지 가능
		4	· 정기검수시 일반적인 방법으로 고장검지 가능
		3	· 정기검수시 작동상태로 고장검지 가능
		2	· 육안으로 고장검지 가능
		1	· 고장으로 관련장치의 작동에 영향을 끼치지 않으며, 육안으로 고장검지 가능
RPN 평점 계산법		$RPN = (\text{심각도} \times \text{발생빈도} \times \text{검출도})^{1/3}$	

타났다. 답변제동장치 FMECA에서 보듯이 답변제동장치의 고장을 저감시키기 위해서는 제륜자와 홀더를 개선하여야만 답변제동장치의 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 제륜자의 탈락원인은 제륜자의 균열, 제륜자 고리가 절손되면서 탈락되는 것이 대부분으로 파악되었으며 이는 열차 운행 중 차량-선로간 진동으로 차량답면과 제륜자 간에 빈번한 접촉으로 충격하중이 제륜자에 작용되어 균열이 발생한 것으로 추정되어 제륜자의 비디오 모니터링 결과 일부 구간에서 제륜자 끝단과 차륜간에 서스펜션 동작 및 진동으로 접촉현상이 발생하고 있음을 확인하였으나 마찰재의 특성상 스치는 정도의 접촉으로 표면의 박리를 유발할 수 있으나 충격의 가능성은 낮은 것으로 판단되었으며, 30km/h 이하의 속도에서는 비상제동 시 제륜자와 차륜 간에 충격이 발생할 수 있음을 확인하였다. 또한 제동작용 시 발생하는 수직력은 마찰재에 압축응력으로 작용하나, 차륜이 회전 중일 때는 마찰계수와 수직력에 의해 마찰력이 작용하여 마찰재의 표면에 발생하는 인장 및 압축응력, 제동열에 의해 피로 균열이 발생하는 것으로 판단되었으며, 차륜과 제륜자 사이에 마찰력 발생시 상대적으로 제륜자 고리부에 전단력이 작

용되어 제륜자 고리가 절손되는 것으로 판단되어 제륜자 고리의 개선연구와 현차시험을 시행하였다.

3. 답변제동장치 개선 및 시험평가

3.1 제륜자 고리부 구조변경

제륜자 고리 두께를 Table 4 및 Fig. 2와 같이 기존제품보다 두께는 1mm, 높이는 2mm 더 크게 하여 강도를 보강하고 제륜자 고리 조립방법을 기존의 단순 용접구조에서 제

Table 4 Structural change of the shoe ring

구분	기존품	개선품
제륜자 고리 두께	3 mm	4 mm
제륜자 고리 높이	22 mm	24 mm
제륜자 고리 조립	프레스 일체 가공	제륜자 고리 양 끝부분을 보강판 밑으로 넣고 가공

Fig. 2 Structural change of the shoe ring

륜자 고리를 보강판 밑으로 넣어 견고히 용접하는 구조로 개선하여 제륜자 홀더와 유동 간격 없이 장착되도록 하였다. 6개월 동안의 현차시험 결과 제륜자 고리 탈락 및 제륜자 고리의 균열발생은 없었다. 그러나 개발품 40개 중 33개의 제륜자 마찰재에서 균열(82.5%)이 발생되어 마찰재 균열문제는 해결되지 않았다. 구조변경 전 실제 운행차량에서의 균열 발생비율은 92%였다.

3.2 제륜자 마찰재 개발

여러 차례 답면제동장치의 구조개선과 현차시험을 수행하여 제륜자 고리의 탈락은 방지할 수 있었으나 마찰재의 균열저감은 만족할만한 수준이 되지 못하였다. 마찰재의 근본적인 개선 없이는 제륜자의 균열, 탈락을 방지할 수 없다는 결론에 도달하여 아래와 같이 새로운 마찰재 개발을 시도하였다.

3.2.1 구조 및 성분

Fig. 3과 같은 기존품 제륜자 형상을 Fig. 4와 같이 중앙부에 V형 홈이 있는 형상으로 변경하였으며, 보강판의 두께는 3mm에서 4.5mm로 1.5mm 증대시켰고, 제륜자 고리는 3.1 절에서 검토한 구조로 보강판 속으로 들어가 결합되는 구조로 하여 보강판의 균열을 방지할 수 있도록 하였다. 제륜자의 마찰재 재료는 합성수지, 환원철분, 윤활제, 파이버, 무기물 분말, 유기물 분말 등으로 구성되며 각 성분의 함유량을 조정하여 경도, 강도, 마찰계수 등을 조절하였다. Table 5는 기존품과 개발품의 특성치이며 Fig. 7에 이들 값을 비교하여 도시하였다.

3.2.2 마찰계수 시험

Fig. 8의 제동 다이내모미터는 최대 판성 2156kgm², 최대 회전수 1700rpm으로 실제 운행 차량의 제동을 모사할 수 있는 시험기이다. 이 시험기를 이용하여 기존품과 개발품 A, B의 마찰계수를 측정하였다. 상대제인 차륜은 KTX용 차륜이다. Fig. 9, 10은 측정된 마찰계수의 값이다. 제륜자가 차륜을 누르는 수직력이 1100Kgf일 때 기존품의 마찰계수가 모든 속도에서 개발품에 비해 약간 높다. 수직력이 3300Kgf

Fig. 3 Present shoe shape

Fig. 4 Enhanced shoe shape

Fig. 5 Present shoe backing plate

Fig. 6 Enhanced shoe backing plate

Fig. 7 Properties of the present and enhanced brake shoes

일 때는 60km/h까지는 높다가 100, 120Km/h에서는 약간 낮아지는 경향을 보인다.

3.2.3 차륜에 대한 공격성

마찰재가 마찰계수와 마모량에 대한 기준을 만족하여도 차륜에 손상을 주거나 열 균열을 발생시키면 사용할 수 없으므로 차륜에 대한 공격성은 주요한 평가항목의 하나이다. 본

Table 5 Properties of the present and enhanced brake shoes

제륜자 종류	경도 (HRS) ASTM D 785	압축강도 (MPa) KS M 3015	굽힘강도 (MPa) ASTM D 790	충격강도 (KJ/m ²) KS M 3056	박리강도 (Kgf) UIC 541-4
기존품	34	43.6	20.4	2.23	1581
개발품A	94	97.2	44.3	6.1	2625
개발품 B	87	85.0	49.6	6.3	2863

Fig. 8 Brake dynamometer

Fig. 9 Mean coefficient of friction, normal force 1100kgf

Fig. 10 Mean coefficient of friction, normal force 3300kgf

연구에서는 표면복제법을 적용하여 공격성을 평가하였다. 우선 기존품 제륵자와 개발품 2종에 대한 상대제 차륵 3개를 확보하고 다이내모 성능시험 전 차륵 표면의 4곳을 지정하여 자분탐상 비파괴검사(MT: Magnetic Particle Testing)를 실시하여 결함이 없음을 확인하였다. 다이내모 시험 후 관찰부위 4곳에서 조직검사를 하였다. 표면복제 시, 연마의 초기엔 산화피막을 연삭한 후 점차 미세한 연마지를 사용하여

Fig. 11 Microstructure at point 3 (400x)

Fig. 12 Microstructure at point 4 (400x)

Fig. 13 Microstructure at point 1 (400x)

연마하였으며, 최종 연마시에는 6 μm와 1 μm의 다이아몬드 연마제를 사용하였다. 2% 나이탈(Nital)을 사용하여 부식시킨 후 셀룰로오스 아세테이트 필름을 사용하여 미세조직을 복제하였다. 최적조건을 얻기 위하여 각 부위에서 부식 수준을 달리하여 3종의 래플리카를 얻었다. 래플리카는 대비를 좋게 하기 위하여 금으로 진공 스퍼터 코팅한 후, 실험실에서 광학 현미경으로 400배의 배율로 관찰하였다.

기존품 제륵자의 상대제인 차륵에서 실시한 검사 결과, 일부 영역에서 마르텐사이트로 변태된 금속조직이 관찰되었으

Fig. 14 Microstructure at point 3 (400x)

Fig. 16 Microstructure at point 4 (400x)

Fig. 15 Microstructure at point 3 (400x)

며, 소성변형이 일어난 조직을 보이고 있으나 균열은 발견할 수 없었다. Fig. 11, 12는 관찰점 3, 4에서 400배 확대한 사진으로 망상형으로 보이는 부위는 페라이트이고, 기지는 펄라이트이다. 개발품 제륜자 A의 상대재인 차륜에서 실시된 각 관찰부의 검사결과, 일부 마르텐사이트 변태된 금속조직이 관찰되었으며, 소성변형이 일어난 조직을 나타내고 있고 각각의 표본을 관찰한 결과 Fig. 13, 14에서 보는 바와 같이 관찰부위 1과 3에서 그물망 형태의 균열이 관찰되었다.

개발품 제륜자 B의 상대재인 차륜 3에서 실시된 각 관찰부의 검사결과, 앞의 두 차륜과 마찬가지로 일부 마르텐사이트 변태된 금속조직이 관찰되었으며, 소성변형이 일어난 조직을 나타내고 있었고 측정점 1, 3, 4에서 균열이 발견되었다(Fig. 15, 16).

3.2.4 실차 적용 시험

개발품(12개)과 개발품 A(6개), B(6개)를 영업차량에 장착하여 약 230,000km 운행시험을 실시하였다. 제륜자의 상태, 탈부착 상태, 마모량, 균열발생 여부 등을 점검하였다. 기존품 제륜자의 경우 12개 개발품 중 10(83.3%)개에서 고리 탈락, 마찰재 균열현상이 나타났으며, 개발품 A의 경우 6개중 1개(16.7%)의 고리가 탈락되었으며 개발품 B의 경우 모두 양호 하였다. 상대재인 차륜에서 자분탐상으로 결함유무를 조사한 결과 기존품과 개발품 공히 약 76,000Km 주행 시

미세한 균열이 발견되었으나 234,000km까지 주행하여도 더 이상의 균열진전이 없어 마찰재의 차륜에 대한 공격성은 기존품이나 개발품 모두 유사한 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

고속철도 KTX동력차 답면제동장치의 제륜자가 비정상적인 균열에 의하여 교환되는 수량이 많아 그 문제점을 분석하고 해결방안을 제시하였으며 최종적으로 다이내모 시험과 현차시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 답면제동장치의 FMECA 분석 결과 제륜자 및 제륜자 홀더의 고장이 열차 운행에 가장 치명적이었으며 제륜자 홀더의 고장은 주로 제륜자 마찰재의 균열에 의한 제륜자의 탈락으로 발생하므로 답면제동장치의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 제륜자 마찰재의 균열, 탈락을 방지해야 함을 알 수 있었다.

(2) 제륜자 고리부에 보강판을 삽입하고 보강판과 용접하여 현차시험을 한 결과 제륜자 고리의 탈락현상이 줄어들었으나 마찰재의 균열발생은 줄어들지 않았다.

(3) 제륜자 마찰재 조성을 변경하여 개발한 소재는 현차시험 23만km를 주행할 때까지 마찰재의 균열이나 제륜자 고리의 탈락 현상은 없었다.

감사의 글

본 연구는 한국철도공사의 KTX 동력차용 제륜자에 관한 구매조건부 신제품 개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] B.B. Kang, N.U. Baeg, K.S. Jang (1998) Experimental Analysis of Ceramic Coated Brake Discs for High Speed Train KSME Transactions A, 22, pp. 821-833.
- [2] H.G. Gil, T.W. Ko, D.H. Cho, S.H. Han, S.I. Seo (2007) Compatibility Evaluation between NCM-CV Cast Iron Brake Disk

- and Various Pads, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10, pp. 251-256.
- [3] B.C. Goo, C.H. Lim (2008) Development of brake disk materials with Ni-Cr-Mo, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(2), pp. 184-194.
- [4] S.H. Kim, Park, H.C. Park H.S. Lee (2009). Study of tribological characteristics between metallic friction materials and brake disk, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(1), pp. 72-80.
- [5] B.J. Kwon, H.C. Chung, H.K. Kim (2002) A Study on stress distribution of Korean high speed train wheel at tread braking, *Journal of the Korean Society for Railway*, 5, pp. 167-173.
- [6] MIL-STD-1629A, Procedures for performing a FMECA, 1983.
- 접수일(2011년 1월 19일), 수정일(2011년 2월 25일),
게재확정일(2011년 3월 28일)