

접촉해석에 의한 철도차량용 제동패드의 형상 최적화

구병춘[†] · 나인균

한국철도기술연구원 교통신기술연구실

Topology Optimization of Railway Brake Pad by Contact Analysis

Byeong-Choon Goo[†] and In-Kyun Na

New Transportation Research Department, Korea Railroad Research Institute
(Received January 17, 2014; Revised March 31, 2014; Accepted April 4, 2014)

Abstract – To stop a high speed train running at the speed of 300 km/h, the disc brake for the train should be able to dissipate enormous kinetic energy of the train into frictional heat energy. Sintered pin-type metals are mostly used for friction materials of high speed brake pads. A pad comprises several friction pins, and the topology, length, flexibility, composition, etc. have a great influence on the tribological properties of the disc brake. In this study, the topology of the friction pins in a pad was our main concern. We presented the optimization of the topology of a railcar brake pad with nine-pin-type friction materials by thermo-mechanical contact analysis. We modeled the brake pad with/without a back plate. To simulate a continuous braking, the pad or friction materials were rotated at constant velocity on the friction surface of the disc. We varied the positions of the nine friction materials to compare the temperature distributions on the disc surface. In a non-optimized brake pad, the distance between two neighboring friction materials in the radial direction from the rotational center of the disc was not equal. In an optimized pad, the distance between two neighboring friction materials in the radial direction was equal. The temperature distribution on the disc surface fluctuated more for the former than the latter. Optimizing the pad reduced the maximum temperature of the brake disc by more than 10%.

Keywords – brake pad (제동패드), contact analysis (접촉해석), topology optimization (위상최적화), finite element (유한요소), high-speed train (고속철도)

1. 서 론

고속열차는 최고 운행속도가 300 km/h이고, 차량 한 량의 무게가 50톤이 넘어 제동 시 열차의 방대한 운동 에너지를 소진하기 위해서는 최첨단의 제동시스템을 요구하고 있다. Fig. 1은 KTX 열차에 사용되고 있는 제동디스크와 제동패드를 보여준다. 제동패드의 마찰재는 열전도도가 우수하고 고온에 견딜 수 있는 동계 소결(sintered) 마찰재[1]가 사용되고 있다. 마찰재는 핀 형

상으로 제작되어 패드 하나에 9개가 강판으로 만들어진 지지판에 고정되어 있다. 패드는 제동디스크의 좌, 우 측면에 2개씩 장착된다. 패드는 우선 운영사가 요구하는 마찰, 마모 특성을 만족하여야 하며, 제동 시 발생하는 열을 신속히 흡수하여 발산시키고, 심한 제동 스켈소음을 발생시키지 않아야 하며, 상대재인 디스크에 가능한 최소한의 손상을 주도록 설계되어야 한다. 위에서 열거한 다양한 특성은 제동 시 제동디스크와 패드의 접촉현상과 온도 분포와 밀접한 관계가 있다. Belhocine과 Bouchetara[2, 3]는 접촉해석을 통하여 디스크의 냉각핀이 온도와 응력의 분포에 큰 영향을 미침을 보여 주었고, Dufrenoy 등[4]은 열응력에 의해 철도차량의 제동디스크에 발생할 수 있는 손상 메커니즘을 유한

[†]Corresponding author : bcgoo@krii.re.kr
Tel: +82-31-460-5243, Fax: +82-31-460-5031
© 이 논문은 한국윤활학회 2013년도 추계 학술대회 (2013.10.15-18/여수히든베이호텔) 발표논문임.

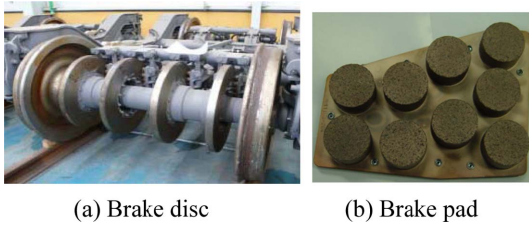


Fig. 1. Brake disc and pad of KTX.

요소 해석을 통하여 연구하였다. Ghadimi 등[5]은 철도 차량용 휠 장착 제동디스크에 대해 제동다이내믹 시험과 유한요소 온도해석결과를 비교하여 수치해석의 유용성을 보여 주었다. Wang과 Fu[6]는 접촉해석을 통하여 마찰재의 배치가 디스크의 온도 분포에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여 주었다. 전산도구의 발전과 상용 해석 프로그램의 보급으로 유한요소법을 적용한 전산해석은 제동디스크와 패드의 접촉현상에 관한 연구에 아주 유용하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 유한요소 접촉해석을 통하여 핀 형상의 마찰재의 배치를 최적화하여 디스크에 발생하는 온도 분포의 구배를 가능한 작게 하고, 최대 온도도 낮게 하여 고온과 열응력에 의한 디스크의 열화를 저감할 수 있는 하나의 방안을 제시하고자 하였다.

2. 유한요소 모델링

2-1. 마찰재의 배치

제동패드와 제동디스크 사이 마찰에 의해 제동디스크는 300°C 이상까지 온도가 올라가고 국부적으로는 600°C 이상까지 온도가 상승하기도 한다. 그리고 디스크와 패드 마찰재의 마찰이 국부적으로 일어나면 디스크 마찰면의 마모가 국부적으로 일어나 원활한 제동력 확보에도 좋지 않고 진동과 소음의 발생원이 되기도 한다. 따라서 디스크와 패드 마찰재의 마찰이 가능한 균일하게 일어나도록 마찰재를 배치하는 것이 좋으나 현재까지 이러한 마찰재 배치에 대한 적절한 방법이 제시되지 않고 있다. Fig. 2는 패드 하나에 9개의 마찰재 핀이 부착된 현재 사용되고 있는(이하 Current로 표시) 패드에 대해 각 마찰재 핀의 중심 위치를 제동디스크의 중심으로부터 거리를 구하여 나타낸 것으로 마찰재 핀 2번과 3번, 4번과 5번, 그리고 7번과 8번이 거의 동심원 상에 배치되어 있음을 알 수 있다. 핀의 중심이 동심원 상에 있다는 것은 제동

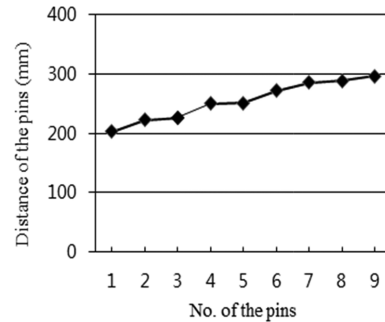


Fig. 2. Pins deployed at unequal interval.

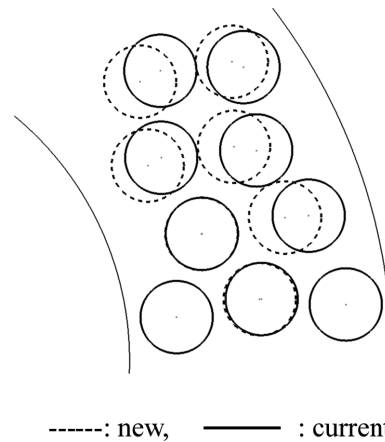


Fig. 3. Pin positions of the new and current pads.

시 선행 핀이 지나간 자리를 후행 핀이 중복적으로 지나간다는 것을 의미하므로 같은 부위에 과도한 마찰열을 발생시켜 디스크는 과도한 열 하중을 받게 되어 온도가 상승하고 열 균열이 쉽게 발생하고 심한 손상을 입게 되어 수명이 단축될 수 있다. 핀 형상을 가지는 다수의 마찰재와 제동디스크가 가능한 균일하게 접촉하도록 마찰재를 지지판에 배치하기 위하여 디스크의 회전중심에서 각 마찰재 핀의 중심을 횡축에 도시하여 중심간 거리가 균일하게 배치하고 이 마찰재를 디스크의 회전중심에 대해 회전시켜 마찰재 지지판의 적정 위치로 이동시켜 마찰재를 배치하면 각 마찰재와 디스크의 좀 더 균일한 접촉을 유지할 수 있을 것이다. Fig. 3은 디스크 중심에서 마찰재 핀의 중심까지의 최소값과 최대값은 Fig. 2와 동일하게 하고 최대값과 최소값 사이에 있는 2~8번 핀을 일정한 간격으로 배치시켜 마찰열이 가능한 균일하게 발생하도록 배열한 경우(new로 표시)와 기존의 배열을 비교하여 보여 준다.

Table 1. Properties of the materials

Properties	Material	
	Brake Disc	Friction pin
Density (g/cm ³)	7.85	5.4
Elastic Modulus (GPa)	202	102
Poisson's ratio	0.29	0.29
Specific Heat (J/kg ^o C)	418	418
Thermal Expansion (1/ ^o C)	1.089×10 ⁻⁵	1.67×10 ⁻⁵
Thermal conductivity (W/m ^o C)	33	24

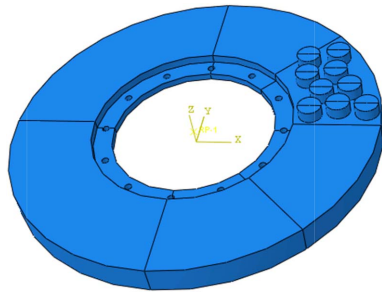


Fig. 4. FE model with 9 friction pins.

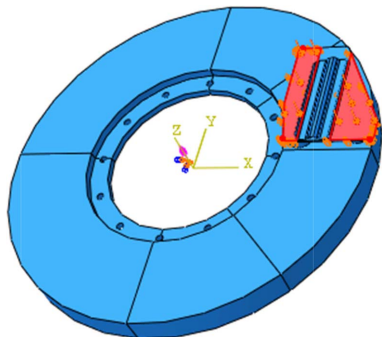
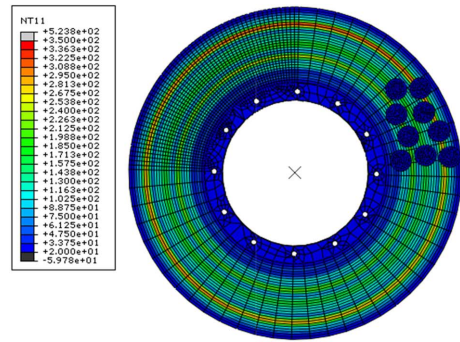


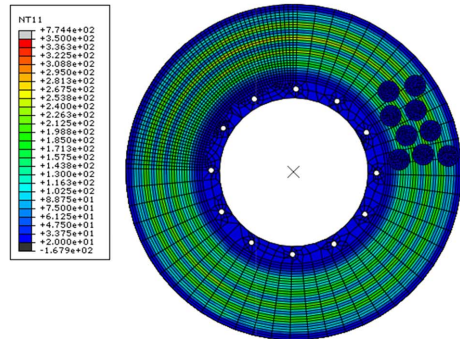
Fig. 5. FE model with a pad assembly.

2-2. 유한요소 모델링

해석 모델은 고속철도차량 KTX에 사용되고 있는 외경 640 mm, 내경 350 mm, 두께 45 mm인 단조 강 디스크와 $\Phi 40 \times 20$ mm 크기의 제동마찰재가 부착된 소결재 패드이다. 해석에 사용된 재료의 특성값은 Table 1과 같다. 대류열전달계수는 $100 \text{ W/m}^2/\text{C}$ 를 적용하였다. 실제로는 제동패드가 제동디스크의 양 측면에 2개씩 장착되나 열-기계 연성해석은 많은 계산시간이 소요되므로 해석의 단순화를 위해 패드 하나만 적



(a) Current design



(b) New design

Fig. 6. Temperature distribution of the disc at 2.5 s.

용하였고, 마찰재 지지판이 있는 경우와 지지판이 없는 경우에 대해 마찰재 배치에 따른 디스크의 온도 분포를 해석하였다. 마찰재 핀만 있는 경우 2 MPa의 균일한 압력을 핀의 상면에 가하였고(Fig. 4), 지지판이 있는 경우는 Fig. 5와 같이 실제 제동패드의 지지판과 캘리퍼가 접촉하는 부분에 일정한 분포하중을 적용하였다. 이 경우 총 하중은 핀만 있는 경우와 동일하게 하였다. Fig. 4와 5에서 디스크의 회전 중심에 직각좌표계의 원점을 설정하였다. 본 연구의 모델링과 해석은 모두 ABAQUS 코드[7]를 이용하여 수행하였다. 사용된 유한요소는 디스크, 마찰재, 지지판 모두 8절점을 갖는 6면체 요소를 사용하였고, 디스크의 마찰면 중 1/4 면은 조밀하게 분할하여 요소의 크기가 접촉해석에 미치는 영향을 살펴보았다. 경계조건으로는 핀만 고려한 모델의 경우 핀 상면의 x, y 변위를 구속하였고, 지지판을 포함한 모델은 경계조건은 하중이 작용하는 패드의 면의 x, y 변위를 고정하였다. 실제 철도차량이 내리막 길을 제동을 체결한 상태로 일정속도로 내려가는 과정

을 모사하기 위해서는 디스크의 중심과 디스크의 내경, 외경의 면을 강체로 연결하고 회전축을 50 rad/s의 속도로 일정하게 회전시키고 패드에 압력하중을 가하여 일정시간까지 돌려 온도의 증가와 분포를 살펴보았다. 기계-열 연성해석과 일반접촉(General contact) 조건을 적용하였다. 마찰재에 작용하는 총 힘은 UIC 기준[8]을 참고하여 22.619 kN를, 마찰계수는 0.5를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 마찰재 핀만 고려한 모델

Figs. 6(a), (b)는 각각 마찰재 핀이 비 등간격으로 분포된 경우와 등간격으로 분포된 경우 연속제동 상태에서 제동디스크가 20 회전 한 후 디스크 표면의 온도분포를 보여 준다. 전반적으로 디스크의 바깥 가장 자리에 가까운 쪽에서 온도가 높게 발생하였다. Fig.

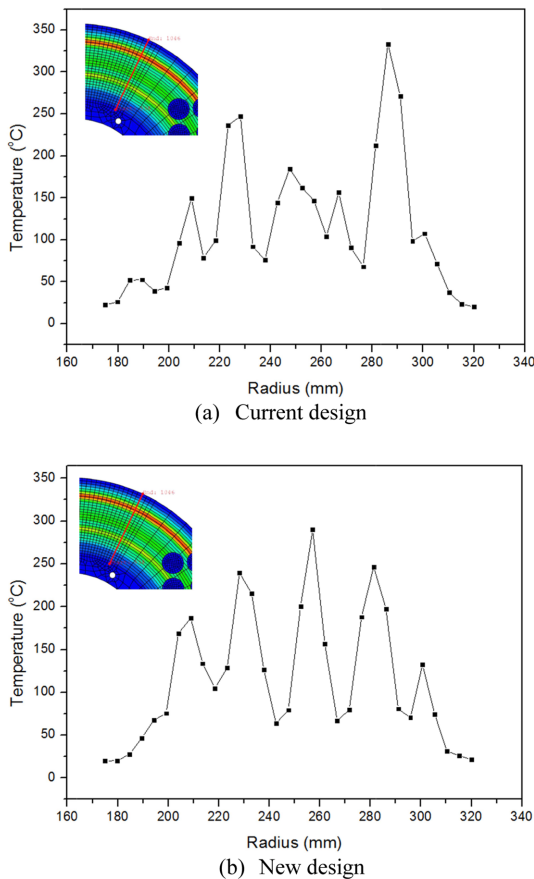


Fig. 7. Temperature distribution along the radial line of the disc at 2.5 s.

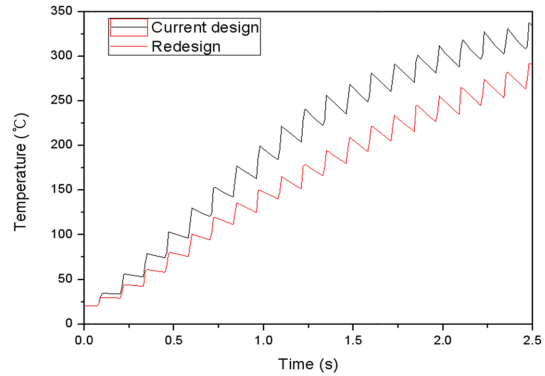


Fig. 8. Comparison of the temperatures.

7(a), (b)는 최고 온도 발생점에서 반경방향으로 선을 따라 도시한 온도 분포를 보여주고 있다. 마찰재 간 거리가 균등하게 배치된 경우 온도가 균일하지 않은 배치에 비해 최고 온도가 낮고 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 비 등간격 배치의 경우 Fig. 2에서 보듯이 마찰재 7, 8이 거의 디스크의 동일 반경에 놓여 있어 두 마찰재 핀의 궤적이 거의 일치하게 된다. 따라서 마찰이 이 궤적을 따라 반복되므로 이 부분에서 디스크의 온도가 높을 것이라는 것을 추론할 수 있는데 해석 결과도 이에 부합하는 결과를 보여 주고 있다. 20 회전의 연속 마찰 후, 기존 배치의 디스크 표면 최고 온도는 338°C이며, 등간격으로 배치된 경우 디스크 표면의 최고 온도는 기존 배치의 최고온도 대비 약 13% 감소한 294°C이다. Fig. 8은 최고 온도가 발생한 지점의 온도가 시간에 따라 변화하는 양상을 보여 준다. 최고 온도 발생 지점 근처에서 디스크와 패드의 마찰이 있을 때 온도는 상승하고 디스크가 회전하여 이 지점을 벗어나면 냉각이 되고 이러한 과정을 반복하므로 온도가 톱니바퀴 모양을 하면서 상승하고 있다.

3-2. 마찰재 지지판을 포함한 모델

Fig. 9는 마찰재 사이의 간격이 일정하지 않은 기존 배치에 대해 반경방향으로 최고 온도가 발생한 점을 지나는 선을 따라 도시한 온도 분포이고, Fig. 10은 마찰재 사이의 간격을 일정하게 배치한 경우의 온도 분포이다. 패드의 지지판 중앙부는 하중이 작용하지 않고 왼쪽, 오른쪽 면에 하중이 작용하여 양 끝단부에 있는 마찰재와 디스크 면의 접촉압력이 크게 되어 이 부분에 상대적으로 높은 온도가 발생하고 있다. 따라

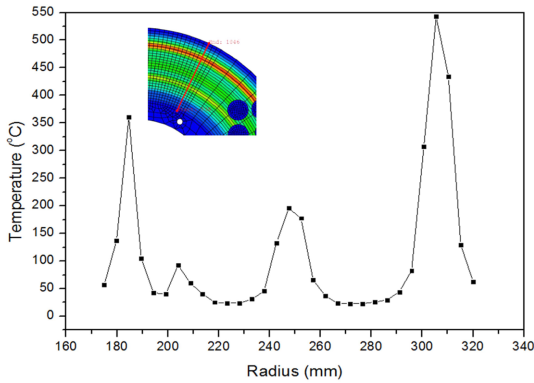


Fig. 9. Temperature of the current design at 2.4 s.

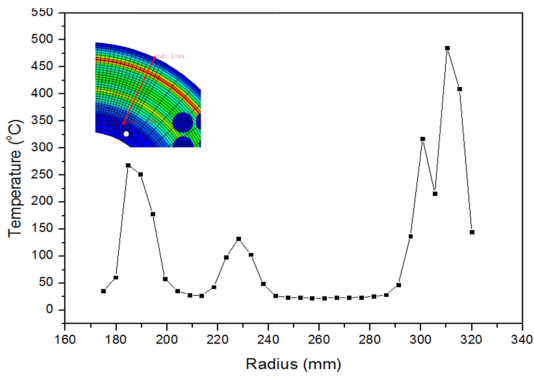


Fig. 10. Temperature distribution along the radial line of the new design at 2.4 s.

서 현재와 같은 구조의 패드는 마찰 핀에 작용하는 하중의 분포가 균일하지 않으므로 패드의 중앙부도 압력이 작용하도록 하고 전체적으로 균일한 압력이 작용하도록 구조를 개선할 필요가 있다고 판단된다. 마찰재 핀만 고려한 모델의 해석결과인 Fig. 7과 비교할 때 디스크의 내, 외측 반경 부근에서 더 높은 온도가 발생함을 알 수 있다. Fig. 11은 두 모델에 대해 최고 온도가 발생하는 디스크 표면의 한 점에서 시간의 경과와 함께 온도의 변화를 비교하여 보여준다. 마찰재가 등간격으로 배치된 경우가 제동의 시작부터 계속하여 약 10.5% 이상 온도가 낮아 등간격 배치는 온도 분포를 균일하게 하는데 효과가 있음을 알 수 있다. 핀만 고려한 모델과 마찰재 지지판까지 포함한 모델 모두에서 본 연구에서 제안한 방법은 온도 분포를 고르게 하고 최고 온도도 낮아지게 하는 효과가 있어 현재의 마찰재를 개선할 수 있는 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

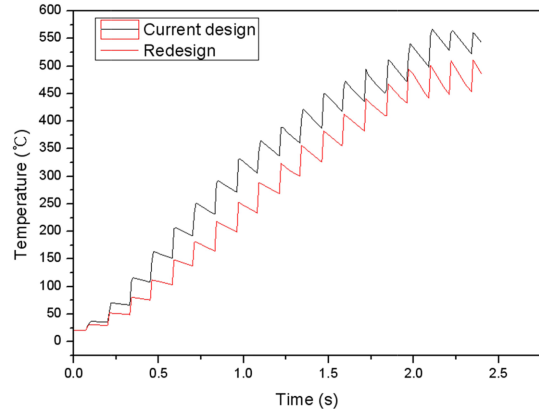


Fig. 11. Comparison of the maximum temperatures of the current and new pads with respect to time.

5. 결 론

높은 온도와 급격한 온도 구배는 재료의 열화를 가속하고 열 크랙의 발생을 쉽게 하여 제동디스크의 수명을 단축시키고 유지보수비를 증가시키며, 열차의 운행 안전성 확보에도 나쁜 영향을 끼치므로 마찰재의 설계, 개발 시 최적 배치를 고려할 필요가 있다고 판단된다. 본 연구에서는 디스크와 마찰재의 접촉해석을 통하여 브레이크 디스크에 발생하는 온도 분포를 예측하고 마찰, 마모학적 관점에서 유용한 몇 가지 사실을 규명할 수 있었다.

- 1) 온도 분포를 균일하게 하고 최고 온도를 낮추기 위해 본 연구에서 제시한 방법과 같이 패드의 마찰재 핀을 디스크의 반경방향으로 서로 일정한 간격으로 떨어져 배치할 경우 최고 온도를 기존의 배치와 비교하여 13% 낮출 수 있었다.
- 2) 제동디스크가 50 rad/s로 일정한 속도로 회전하는 경우 디스크 표면 위 한 점에서의 온도는 시간의 흐름에 따라 톱니바퀴 형상으로 상승하다가 18 바퀴 회전 후에 최고 점에 도달하고 그 이후에는 일정한 온도를 유지하였다.
- 3) 본 연구에서는 디스크 표면의 온도 분포를 가능한 균일하게 되도록 하기 위하여 마찰재 핀 9개를 반경방향으로 균등한 간격으로 배치하여 얼마만큼의 목적을 달성하였다. 그러나 여전히 온도의 변동 폭이 크므로 향후 마찰재의 형상변경, 각 핀의 직경 차별화 등을 통한 최적화에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업의 결과물이다. 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Kim, Y. G., Lee, H. S., "Study on dependence of friction characteristics of sintered brake friction materials on graphite shape and ratio with regard to speeding up rapid transit system", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 29, No. 4, pp. 242-247, 2013.
- [2] Belhocine, A., Bouchetara, M., "Thermal-mechanical coupled analysis of a brake disc rotor", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 1167-1179, 2013.
- [3] Belhocine, A., Bouchetara, M., "Thermal analysis of a solid brake disc", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 32, No. 32, pp. 59-67, 2012.
- [4] Dufrénoy, P., Bodovillé G., Degallaix, G., "Damage mechanisms and thermomechanical loading of brake discs", *European Structural Integrity Society*, Vol. 29, pp. 167-176, 2002.
- [5] Ghadimi, B., Kowsary, F., Khorami, M., "Thermal analysis of locomotive wheel-mounted brake disc", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, No. 1-2, pp. 948-952, 2013.
- [6] Wang, G., Fu, R., "Impact of brake pad structure on temperature and stress fields of brake disc", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2013, Article ID 872972, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/872972>, 2013.
- [7] ABAQUS User's Manual Ver. 6.5, 20, 2009.
- [8] UIC Code 541-3, "Brakes - Disc brakes and their application - General conditions for the approval of brake pads", international Union of Railways, 2010.