

C/C 제동 디스크의 고유진동 측정 및 해석

Analysis and measurement of the natural modes of a C/C brake disc

나인균*[†], 구병춘*

In-Kyun Na*[†], Byeong-Choon Goo*

Abstract To examine the vibration characteristics and noise sources for a Carbon/Carbon(C/C) brake disc, natural frequencies were measured by impact hammer tests and analyzed by finite element method. Natural modes were obtained by combining the tri-axial modal tests of the brake disc that was a half-size model of a full-size railway brake disc. Experimental and numerical vibration characteristics were compared. The two results were in a good agreement.

Keywords : C/C composite, Brake disc, Natural frequency, Natural mode, ABAQUS

초 록 C/C 제동 디스크의 진동 특성과 소음발생 원인에 대한 기초자료 조사를 위해 고유진동수를 측정하고, 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 고유진동수와 진동모드를 수치 해석하였다. C/C 제동 디스크는 철도차량용 제동 디스크의 1/2 축소모델로 제작되었고, X-Y-Z 3축에 대한 모달 테스트 결과를 취합하여 진동특성을 나타냈다. 해석 프로그램을 이용한 해석 결과와 모달 테스트의 결과를 비교하여 오차를 평가하였고, 두 결과가 일치함을 확인하였다. 결과값은 추후 제동 디스크의 진동, 소음 원인규명에 대한 자료로 활용될 것이다.

주요어 : C/C 복합소재, 제동 디스크, 고유진동, 진동모드, ABAQUS

1. 서론

제동 디스크의 진동현상과 소음발생이 브레이크 시스템을 이루는 각 구성요소들의 고유진동수와 깊은 관련이 있음을 기존의 많은 연구들이 알려주고 있다. 브레이크 켈리퍼 구성품과 마찰 패드, 디스크, 등을 모달 테스트 또는 해석하여 스킵소음의 주파수 대역과의 관계성을 보여주고 있으며, [1,2] 제동디스크의 복소고유치 해석을 통해 마찰계수와 고유진동수의 연관성을 보여주고 있다. [3] 본 논문에서는 제동 디스크의 신소재로 사용되고 있는 탄소/탄소(C/C) 복합재로 된 철도차량용 제동 디스크의 1/2 축소모델에 대해 모달 테스트를 실시하고 결과값을 취합하여 진동모드를 구하였다. 또한 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 모달 해석을 진행하여 테스트 결과값과 분석값의 오차를 평가하였다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 교통신기술연구실 (ikna@krri.re.kr)

2. 모달 테스트

2.1 모달 테스트 개요

시험에 사용된 C/C 복합재 브레이크 디스크는 철도차량용 디스크의 1/2 축소모델로 제작되었다. 마찰열 방출에 유리한 벤틸레이트(Ventilated)형식이며, 탄소 섬유로 된 세라믹 디스크이다. 모달 테스트는 LMS Test Lab을 사용하여 X-Y-Z 3축의 응답값을 FFT 결과값으로 얻어 고유진동수를 확인하였다. Fig. 1과 같이 디스크 Z축 방향인 앞/뒤 마찰면에 각 24개의 측정점을 선정하여 임팩트 해머로 가진 하였고, X, Y 축은 디스크 접선방향의 4개의 측정점을 가진 하였다. 구해진 고유진동수는 디스크 지오메트리(Geometry)에 적용하여 고유진동모드를 구현하였다.

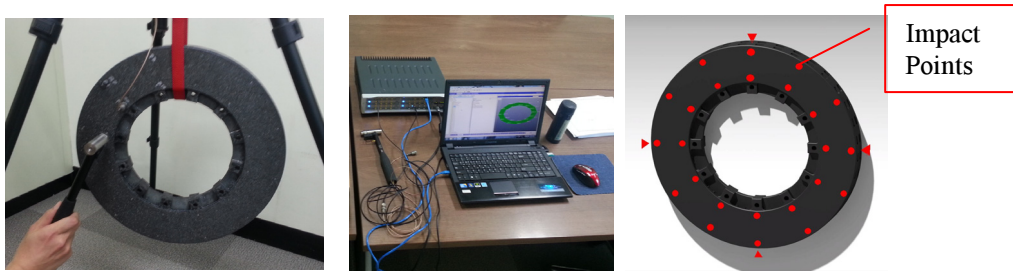
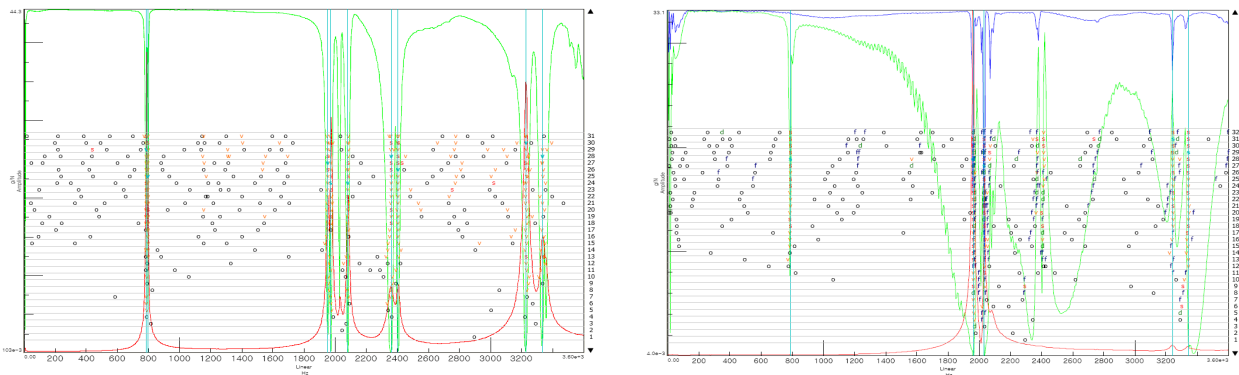


Fig. 1 The C/C composite brake disc and measuring instruments

2.2 시험결과

고유진동수 측정은 0~3600Hz 범위에서 진행되었고 총 15개의 모드가 784.5Hz~3343.6Hz로 측정되었다. 디스크는 환형의 대칭구조이므로 각 모드는 2개씩 짝을 이루어 나타났다. 댐핑은 0.01~0.91% 범위에 있었고, 1973.1Hz에서 상대적으로 큰 0.91%의 댐핑을 보였다. 고유진동모드는 대부분 휨과 뒤틀림 형태를 나타냈다.



(a) Sum FRF and MIF of Z axis

(b) Sum FRF and MIF of X-Y axis

Fig. 2 Sum FRF of each of measurement points

※ MIF: Mode Indicator Function

Table 1 Natural frequencies of the C/C composite disc

Directions of Measurement	Mode	Frequency (Hz)	Damping (%)
Z axis	Mode 1	784.5	0.26
	Mode 2	796.2	0.01
	Mode 3	1951.8	0.52
	Mode 4	1973.1	0.91
	Mode 5	2082.1	0.51
	Mode 6	2360.2	0.85
	Mode 7	2403.3	0.46
	Mode 8	3227.4	0.21
	Mode 9	3333.3	0.49
X, Y axis	Mode 1	787.0	0.44
	Mode 2	1960.9	0.27
	Mode 3	2031.7	0.21
	Mode 4	2373.2	0.67
	Mode 5	3243.3	0.49
	Mode 6	3343.6	0.67

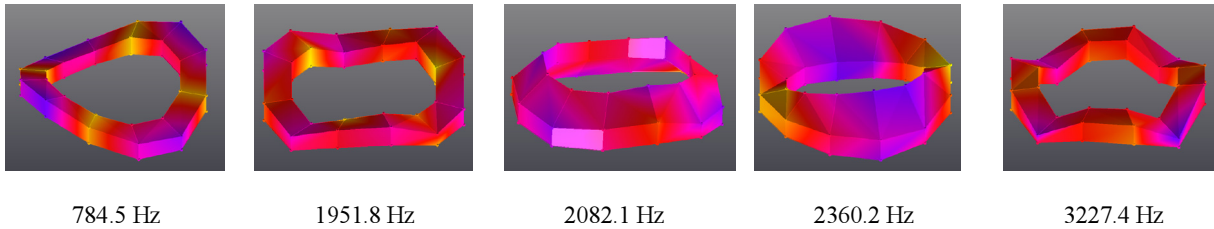


Fig. 3 Vibration modes by modal test

3. 유한요소 해석

3.1 유한요소 해석 개요

모달 테스트에 사용한 디스크를 모델링하여 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS로 모달 해석을 실시하였다. 적용된 물성치는 Table 2와 같고, 요소선정은 삼면체 10절점 요소를 사용하여 총 63,380개의 요소로 구성하였으며, 경계조건은 구속이 없는 자유상태로 해석하였다.

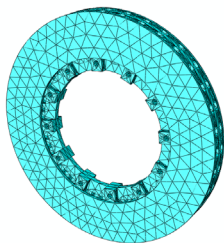


Fig. 4 Finite element model

Table 2 Material properties of the brake disc

Material	Properties	
C/C composite	Density (tone/mm ³)	2.14 E-9
	Elastic Modulus (N/mm ²)	5.1E+4
	Poisson's ratio	0.25

2.2 해석 결과 및 분석

유한요소 해석을 통해 얻은 고유진동모드에서도 휨과 뒤틀림이 주된 모드로 나타났고, 모드

가 뒤바뀌는 현상이 있으나 고유진동수가 모달 테스트 결과와 일치함을 확인하였다. 모드 순서가 뒤바뀌는 현상은 타 연구에서도 볼 수 있는데 이는 고차모드로 갈수록 굽힘과 뒤틀림 모드가 혼합되어 순서가 바뀔 수 있기 때문이다. [4] Table 3은 두 결과값의 비교와 오차 정도를 보여준다.

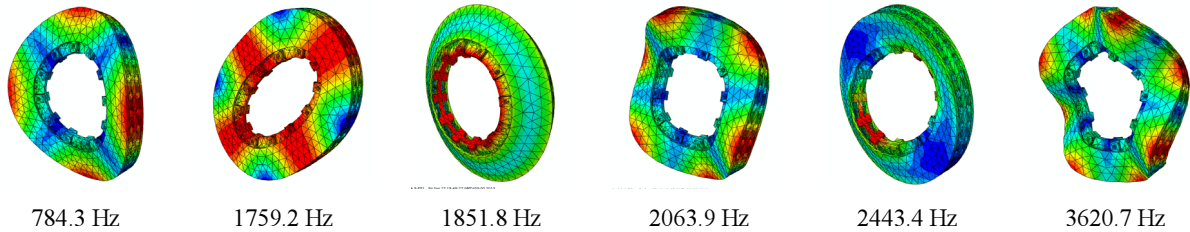


Fig. 5 Vibration modes by modal analysis

Table 3 Comparative results of measurement and analysis

Method	Natural frequency (Hz)				
	Measurement	784.5	1951.8	2082.1	2360.2
Analysis	784.3	2063.9	1851.8	2443.4	3620.7
Error	0.0%	5.7%	11.1%	3.5%	12.2%

3. 결론

철도차량 브레이크 디스크의 신소재 연구를 위해 C/C 복합재 브레이크 디스크의 진동 특성을 측정하고, 유한요소 기법으로 해석하여 결과 값을 평가하였다.

- (1) 고유진동수에 대한 모달 테스트와 해석의 결과가 서로 일치하고 댐핑의 범위는 0.01~0.91%임을 확일 할 수 있었다.
- (2) 디스크의 대칭 구조로 인해 진동모드는 짝을 이루어 나타났으며, 대부분 휨과 비틀림 모드로 나타났다.
- (3) 모달 테스트와 해석 결과에서 모드의 순서가 뒤바뀌는 현상은 고차모드로 갈수록 굽힘과 뒤틀림 모드가 혼합되기 때문에 나타난 현상으로 생각된다. 오류는 최고 12.2%로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 “기존 철도부품 국산화 및 성능향상 기술개발” 과제의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] J. K. Cha, Y. I. Park, D. K. Lee, et al. (2008) Development of the FE(Finite Element) model for analysing the squeal noise of wheel brake system, fall conference, *The Korean Society for railway*, pp. 1407-1412.
- [2] Saw Chun Lin, Abd Rahim Abu Bakar, et al. (2009) Suppressing disc brake squeal through structural modifications, *Jurnal Mekanikal*, 29, pp. 67-83.

- [3] B .C. Goo (2012) Test and Analysis of the Vibration Characteristics of KTX Brake Discs, fall conference, *The Korean Society for railway*, pp. 309-313.
- [4] Y. S. Lee, M. H. Choi (1999) An Experimental Study on the Free Vibration of Composite Plates with Various Shapes, *Journal of the Korean society for composite materials*, 12, pp. 47-58.