

제동디스크의 코팅 두께에 따른 열응력 2D 해석 모델 연구

전지훈¹, 이호용², 김민수^{2*}

¹성균관대학교 기계공학과, ²한국철도기술연구원

A Study on the 2D Analysis Model of Thermal Stress by Coating Thickness of Brake Disc

Ji Hoon Jeon¹, Ho Yong Lee², Min Soo Kim^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

²Korea Railroad Research Institute

요약 일반적으로 제동시스템의 특징은 마찰재와 제동디스크 사이의 마찰 작용에 의해 제동력이 발생하는 구조이다. 이때 제동작용으로 인해 마모가 발생하고 이는 최근에 이슈가 되고 있는 미세먼지의 발생 원인이 된다. 이때 발생하는 미세먼지 저감을 위한 국내외에서는 친환경적인 연구가 활발하게 진행되고 있다. 미세먼지를 저감하기 위해서는 제동디스크의 표면에 다양한 방법으로 코팅층을 형성하여 마모량을 줄이고 제동 성능을 유지할 수 있도록 설계해야 한다. 하지만, 마찰로 인해 높은 열이 발생되고 이로 인해 제동디스크 표면에 열이 축적되어 높은 열응력을 생성한다. 또한 코팅층과 모재부 그리고 두층을 접합시켜주는 본드층의 열팽창률 차이로 인해 더 높은 열응력이 발생되고, 열응력은 제동디스크 균열에 큰 영향을 미치기 때문에 열응력을 최소화하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 열-구조 연계해석을 통해 제동디스크의 코팅표면에서 코팅층 및 본드층의 두께에 따른 열응력 해석결과를 도출하고 코팅 두께와 열응력과의 상관관계를 분석하였다. 다양한 두께를 갖는 코팅층, 본드층 및 모재부와 각층을 구성하는 재료들의 상관관계를 분석하고, 정밀한 모델링과 유사하면서 해석시간을 절약할 수 있는 미세구조의 2D 해석 모델을 제안하였으며, 제동시험 데이터를 기준으로 온도 조건을 부여하여 각 층의 열응력을 도출하였다. 또한 결과 분석을 통해 코팅층 및 본드층 각각의 두께가 증가함에 따라 열응력이 변화하는 상관관계를 해석하고 최적화를 위한 모델을 제시하고자 하였다.

Abstract A braking system is a structure in which a braking force is generated by friction between friction material and a braking disc. Wear occurs due to braking action, which causes the occurrence of fine dust, which has recently become an issue. Eco-friendly research is being actively conducted domestically and abroad to reduce fine dust. In order to reduce fine dust, a coating layer should be formed on the surface of the braking disc in various ways to reduce wear and maintain braking performance. However, high heat is generated due to friction, and as a result, heat is accumulated on the surface of the braking disc, thereby generating high thermal stress. Research is needed to minimize thermal stress because the difference in the thermal expansion rate between the coated layer, the base material part, and the bond layer that bonds the two layers generates higher thermal stress, which greatly affects the braking disc. Therefore, in this study, the thermal stress according to the thickness of the coating layer and bond layer was derived from the coating surface of a braking disc through thermal-structure linkage analysis. The correlation between the coating thickness and thermal stress was analyzed. A micro-structured 2D analysis model is proposed to correlate the coating layer, bonding layer, base material parts, and materials with various thicknesses and to save analysis time. The thermal stress of each layer was derived based on braking test data. Using the analysis of the results, a model for optimization was obtained.

Keywords : Bond Coating, Coating Layer, Eco-Friendly, Material Part, Micro-structured 2D Model, Thermal Stress

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

(저마모 제동디스크를 위한 열분사 표면코팅 핵심기술 개발, PK2203D2)

*Corresponding Author : Min-Soo Kim(Korea Railroad Research Institute)

email: ms_kim@krri.re.kr

Received October 26, 2022

Revised December 6, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

일반적으로 제동 장치는 마찰을 일으켜 차량의 운동 에너지가 열 에너지로 전환되면서 제동작용을 하는 감속 장치의 한 종류이다. 제동의 작동원리는 마찰식 브레이크로 제동 과정에서 회전 속도가 높으면 제동디스크 내부에 열이 축적되고 높은 온도 구배를 생성하여 열 균열, 열 변형, 피로 손상과 같은 구조적인 문제를 발생시킬 수 있다[1]. 또한 마찰에 의한 열 관련 문제로 일정량 이상의 마모가 발생하면 제동디스크를 교체해야 하며 이때 많은 비용이 소요되며 환경적인 문제도 발생하기 때문에 마모량을 줄이면서 제동 성능을 유지하는 연구가 필요하다. 이에 제동디스크 표면에 코팅을 입혀 마찰 계수를 유지하면서 마모량을 감소시키는 연구가 진행되었다[2-5].

본 논문에서는 코팅 제동디스크의 코팅 표면의 열균열에 대한 원인 및 균열의 시작 지점을 분석하고자 코팅 표면의 단면을 묘사한 미세구조의 2D 해석모델을 FEM(Finite Element Method)을 활용하여 구축하였다. 2D 해석모델의 구조는 코팅층과 모재부 그리고 두 층을 접합시켜주는 본드층으로 구성되어 있다. 코팅층 및 본드층 열 균열의 원인을 관련 이론을 통해 열응력으로 판단하고, 코팅층 및 본드층 두께에 따른 열응력 분석을 목적으로 열-구조 연계해석(Thermal Structure Coupled Analysis) 기법을 활용한 2D 모델 해석 결과 데이터를 확보하여 비교 분석한다.

선행 연구로는 S.Widjaja는 온도 변화에 따른 열팽창, 열 응력에 대해 범용적인 이론식을 제안하였고[6], Leon L. Shaw는 이중 재료가 접합되어 있을 때 각 층의 온도 분포가 달라지는 것을 고안하여, Poisson's ratio와 탄성계수 값에 따른 열 응력에 대한 범용적인 이론식을 제안하였다[7]. T. C. MILLER는 코팅층과 본드층의 상세한 분석을 위해 FEM을 이용하여 미세 크기의 요소를 구성해 각 층을 구성하고, 2차원 구조적 특성을 고려한 모델을 제안하였다[8]. 각 층의 재료가 가지는 온도에 따라 열 팽창률이 달라지고 2차원 구조 특성에 맞게 온도 구배가 선형적으로 달라지는 것을 반영하였다. Marcin Bialas는 탑 코팅(Top Coating)과 본드 코팅(Bond Coating)사이의 산화물(Thermally Grown Oxide)층이 생기는 것을 고려하여 FEM을 이용한 2차원 모델을 제안하였다[9]. A. Moridi는 열을 차단시키는 목적으로 열 차폐코팅(Thermal Barrier Coating)을 묘사하여 코팅층과 모재부를 비금속 재료와 금속 재료로 2차원 모델을 구성하였다. 열 차폐를 목적으로 비금속 재료와 금

속 재료로 미소 모델링을 한 후 코팅층과 본드층의 불균일한 형상을 직접 모델링 하여 돌출 부위에서 나오는 열 균열을 파악하고자 하였다[10]. Bekir GÜNEY는 실제 디스크를 다양한 재료로 디스크를 코팅하고, 직접적으로 실험을 진행하여 마모 성능, 경도, 결합강도, 거칠기를 분석 및 비교하였다[11].

본 연구에서는 제동디스크의 표면 처리 특성에 맞게 코팅층과 모재부를 각각 금속 재료로 구성하고[12-15], 재료의 열 팽창률에 따라 발생하는 열응력을 영향을 분석하였다. 열 균열 특성 평가 결과를 바탕으로 코팅층 두께와 본드층 두께에 따른 경향성을 반영하여 제동디스크 코팅 설계에 반영하고자 하였다.

2. 본론

2.1 관련 이론

2.1.1 열-구조 연계해석

구조물에 열을 가하면 온도 변화와 공간 구배(Gradient)에 영향을 미쳐 열응력, 열 변형 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 열-구조 연계해석은 이러한 열이 가해졌을 때 구조와 연계시켜 열응력 및 열 변형의 결과를 도출한다. Eq. (1)에는 결합 방정식(Coupling Equation)을 나타내며 열-구조 물리계 간에 연계하여 해석을 진행하고 열전달을 통해 구조해석을 수행, 구조에서 열 평형 방정식으로 상호간에 영향을 준다[7].

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{T} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [C^{tu}] & [C^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{T} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^{ut}] \\ [0] & [K^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F + [K^{ut}] T_{ref} \\ Q \end{Bmatrix} \quad (1)$$

단, $[K^{ut}]$ 는 요소의 열탄성 강성 행렬이며, $[C^{tu}]$ 는 열탄성 효과로 인한 감쇄 행렬이고, $[K^t]$ 는 열 전도 행렬로 물질 확산에 대한 전도($[K^{tb}]$)와 물질 대류 표면에 의한 전도($[K^{tq}]$)를 합한 값으로 계산된다. $[F]$ 는 특정 노드에 가해지는 힘과 요소가 받는 모든 힘 벡터를 계산한다.

2.1.2 열응력 및 열 변형률

재료의 열팽창계수에 따라 재료가 변하는 정도를 나타내는 것을 열 변형률이라고 한다. 열 변형률은 Eq. (2)로 나타낼 수 있다[16].

$$\epsilon_T = \alpha_T \Delta T \quad (2)$$

열응력은 열 변형률에 의해 탄성 범위 안에서 발생하며 갑작스러운 온도 변화에 의해 발생한다. 열응력과 열 변형률과의 관계 및 열응력은 간단히 Eq. (3) 및 Eq. (4)로 나타낼 수 있다[17].

$$\sigma_T = \left(\frac{E}{1-\nu}\right)\epsilon_T \quad [N/m^2] \quad (3)$$

$$\sigma_T = -\left(\frac{E}{1-\nu}\right)\alpha_T \Delta T \quad [N/m^2] \quad (4)$$

여기서 $E[N/m^2]$ 는 탄성계수, $\alpha_T[1/K]$ 는 열 팽창계수, $\Delta T[K]$ 는 온도차, ν 는 Poisson's ratio이다.

2.2 코팅 제동디스크 표면 2D 모델

제동디스크의 표면은 코팅층, 본드층, 모재부 3층으로 구성되어 있고 각 층은 서로 다른 재료로 구성되어 있다. Fig. 1과 같은 제동디스크의 모델에서 직육면체의 미세 구조로 형상을 확대하여 θ (원주 방향), r (반경 방향), t (두께)로 정의하고, θ (원주 방향)와 t (두께)로 평면을 구성하여 2차원 모델을 구성하였다.

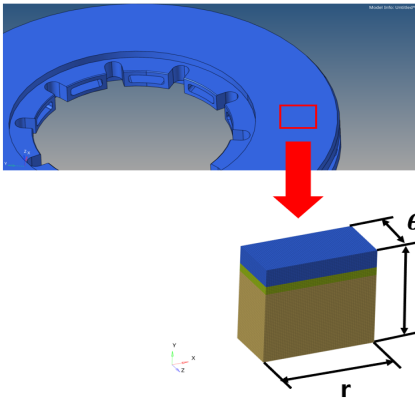


Fig. 1. Surface model geometry of braking disc

또한, 실제 표면코팅이 적용된 디스크의 단면을 절단하여 얻은 제동디스크의 단면 사진은 Fig. 2와 같으며, 확대된 단면 사진을 토대로 코팅층과 본드층의 형상과 두께를 반영하였다.

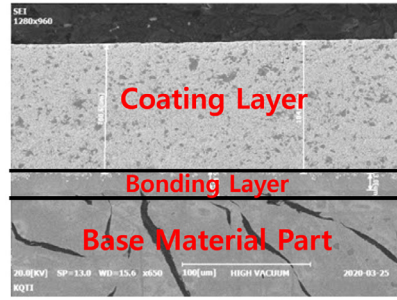


Fig. 2. Surface section of braking disc

단면 형상을 참고하여 재료에 따라 구분하여 구성한 모델은 Fig. 3과 같다. 해석 모델은 Dassult System 社의 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 12-1을 활용하여, Shell Element(S4T)로 모델을 구성하였으며, 코팅층, 본드층, 모재부의 경계 부분에서 만나는 지점은 Node 공유를 통해 구축하였다. 구성된 2D 유한요소 모델은 Fig. 4와 같다. 이때 총 Node 수는 14,641 개이고, 총 Element 수는 14,400이다. Table 1에는 모델의 상세정보를 나타내었으며, Table 2는 해석에 사용된 재료의 물성 값이다.

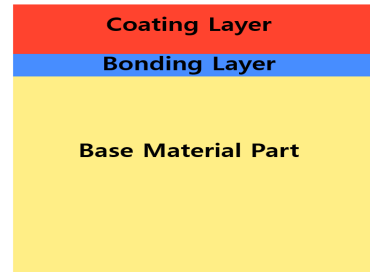


Fig. 3. 2D model concept of surface layer

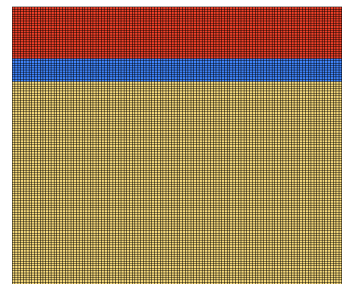


Fig. 4. 2D finite element model of surface layer

Table 1. Model node and element

Model	2D model
Total Node	14,641
Total element	14,400
Element type	Shell element

Table 2. Material properties used for 2D model analysis

	material part	Coating Layer	Bonding Layer
Density (g/cm ³)	7.02	11.56	8.57
Average expansion coeff. (10e ⁻⁶ 1/K)	13.45	7.07	12.76
Thermal conductivity (W/(m*K))	53.51	35.71	15.93
Young's modulus (GPa)	117.33	443.59	202.05
Poisson's ratio	0.28	0.25	0.32
Specific heat (J/(g K))	0.57	0.31	0.46

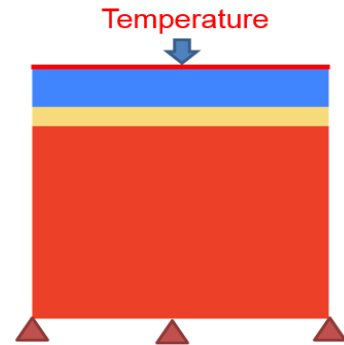


Fig. 5. Thermal analysis condition

2.3 코팅 제동디스크 표면 2D 모델 해석 조건

제동디스크는 패드의 압착을 통해 마찰작용이 생성되고 이러한 마찰을 통해 운동에너지가 열에너지로 전환되면서 열이 전달된다. 마찰열을 온도로 등가시켜 디스크 표면에 열을 부여하였고 조건은 Fig. 5와 같으며, 디스크의 코팅층 윗면에서부터 본드층, 모재부로 열이 전달된다. 모재부의 아랫면을 U_y , U_z , R_x , R_y , R_z 5개 자유도로 구속하고, U_x 에 자유도를 부여하여 해석을 진행하고, 모델의 양쪽 면은 디스크의 연속성을 고려하여 단열구조로 구성하였다. 실제 제동 시험을 수행하여 얻은 디스크 표면온도, 마찰계수, 압부력, 속도 등의 데이터를 기반으로 초기 온도를 30 °C로 설정하고, 30초일 때 210 °C의 온도를 부여하는 해석 조건을 적용하였다. 제동 시험을 통해 얻는 제동성능시험 데이터(속도, 순간마찰계수, 압부력, 디스크 표면온도)는 Fig. 6과 같다.

열해석 방법은 크게 2가지로 구분되는데, 이는 열전달 해석(Heat transfer analysis)과 열-구조 연계해석(Coupled temperature-displacement analysis) 방법이다. 본 논문에서는 열 팽창계수 차이에 따라 달라지는 열응력 및 열변형을 비교적 정확하게 분석하기 위해 열-구조 연계해석 기법을 사용하였다.

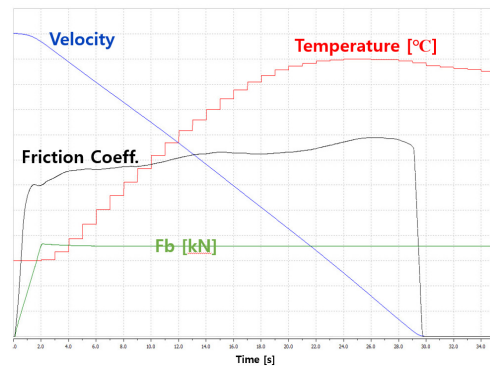


Fig. 6. Disc surface data of braking test

2.4 코팅 제동디스크 표면 2D 모델 검증

코팅 표면을 2D모델로 선정함으로써 비교적 단순하게 해석을 수행하면서도 전체 제동디스크의 열적 거동을 충분히 대변할 수 있어야 한다. 이를 위해 2가지 측면에서 2D모델의 타당성 검증을 수행하였다. 첫 번째로 2D 모델의 가로, 세로 길이에 따라 열응력 Contour 형상이 동일하게 나타나는가를 검토하고, 두 번째로 2D모델의 가로-세로 길이변화에 따라 모델 전체에서의 Max. Stress 값과 위치가 동일하게 나타나는가를 확인하였다. Fig. 7은 가로 200 μm , 세로 200 μm 일 때의 Stress Contour 형상을 나타낸 것이고, Fig. 8은 가로 400 μm , 세로 400 μm 일 때의 Stress Contour 형상을 나타냈으며, Fig. 9는 가로 600 μm , 세로 600 μm 일 때의 Stress Contour 형상을 나타낸 것이다. 각각의 Contour 형상은 동일한 경향으로 확인되었으며, Max. Stress 차이는 Table 3에 나타낸 것과 같이 동일 위치에서 3% 이하의 오차를 보여주어 2D모델의 크기가 달라졌음에도 Max. Stress가 거의 동일함을 알 수 있다. 또한

본 연구에서는 코팅층과 본드층의 두께 변화에 따른 성능을 분석하기 위해 가로 600 μm , 세로 600 μm 로 고정시키고 코팅층 및 본드층의 두께를 변경하면서 해석을 수행하였다.

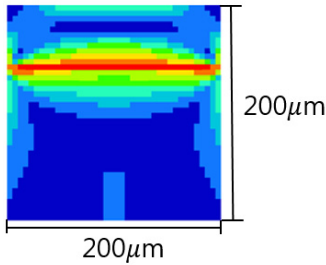


Fig. 7. 200×200 μm 2D model

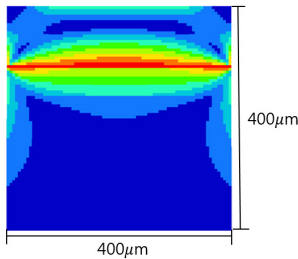


Fig. 8. 400×400 μm 2D model

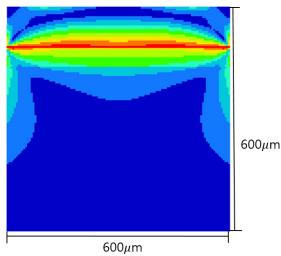


Fig. 9. 600×600 μm 2D model

Table 3. 2D model Max. stress result

MPa \ mm	0.2x0.2	0.4x0.4	0.6x0.6
Max Stress	204.8	210.5	195.4

2.5 코팅층 두께 변화에 대한 해석 결과

코팅층, 본드층, 기재부로 구성된 디스크의 코팅층과 본드층은 상, 중, 하로 세분화하였고, 기재부는 4개 지점으로 구분하여 1번~10번 위치에 대한 Stress 결과를 분석하였다. 특히, 기재부는 가장 윗부분부터 10 μm 간격으로 4개 지점을 구성하였다. Fig. 10에 세분화된 위치와 번호를 도시하였다. 또한, 코팅층의 두께를 100 μm , 200 μm , 300 μm 로 증가시키면서 해석을 수행하여 코팅층 두께변화에 따른 특성을 분석하였다.

해석결과, Max. Stress가 발생하는 위치는 모두 코팅층의 3번 위치에서 동일하게 발생하였다. 코팅층 100 μm , 200 μm , 300 μm 각각 두께에 따른 Contour 형상을 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13에 나타내었으며, 본드층에서 기재부로 내려오면서 Stress가 감소함을 알 수 있다. 코팅표면(1번위치)에서 기재부(10번위치)까지 위치별 Max. Stress 결과 그래프를 Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16에 나타내었다. 즉, 코팅층 1번 위치에서의 Max. Stress는 코팅층이 100 μm 일 때 15.92 MPa였으며, 코팅층이 200 μm 및 300 μm 으로 증가함에 따라 96 MPa 및 88 MPa 증가되는 경향을 보여주지만 전체 Max stress에 비해 비교적 낮은 값이기 때문에 열균열이 시작되는 위치로는 판단되지 않았다. 결과적으로 코팅층 3번 위치에서 가장 큰 Stress가 나타났으며, 코팅층 100 μm 두께 모델에서 195.4 MPa, 코팅층 200 μm 두께 모델에서 205.1 MPa, 코팅층 300 μm 두께 모델에서 184.8 MPa 결과가 도출되었다. 결과적으로 코팅층 두께에 따른 열응력의 크기는 일정한 경향성을 보이지 않았고 코팅층 두께가 열균열에 미치는 영향 또한 낮은 것으로 판단되었다. Fig. 17에 Max. Stress 결과 데이터를 종합하여 비교하였다.

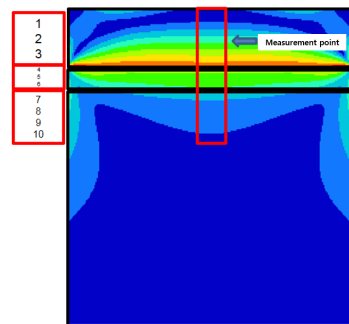


Fig. 10. 2D model stress measurement location

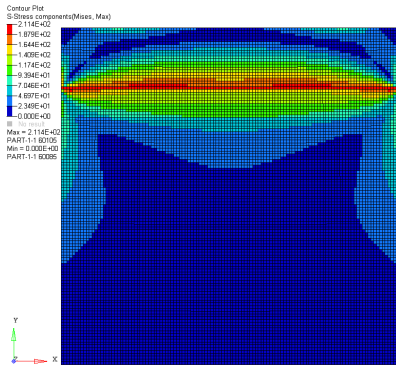


Fig. 11. Stress contour of coating layer thickness $100\mu\text{m}$, bond coating thickness $50\mu\text{m}$ model

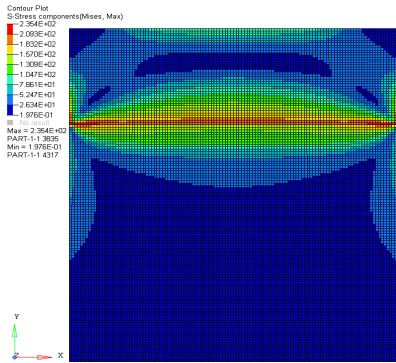


Fig. 12. Coating layer thickness $200\mu\text{m}$, Bond coating thickness $50\mu\text{m}$ model Stress Contour

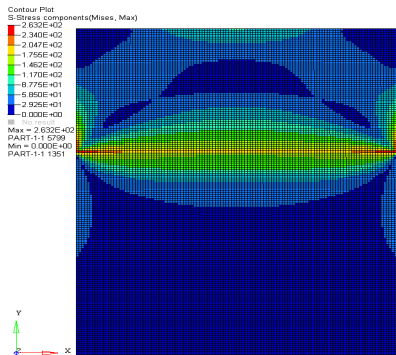


Fig. 13. Coating layer thickness $300\mu\text{m}$, bond coating thickness $50\mu\text{m}$ model stress contour

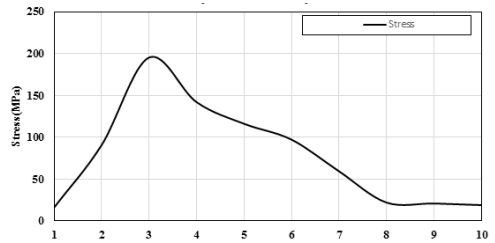


Fig. 14. Coating layer thickness $100\mu\text{m}$, bond coating thickness $50\mu\text{m}$ model stress by location

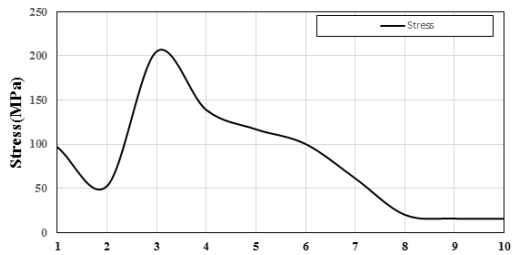


Fig. 15. Stress of coating layer thickness $200\mu\text{m}$, bond coating thickness $50\mu\text{m}$ by location

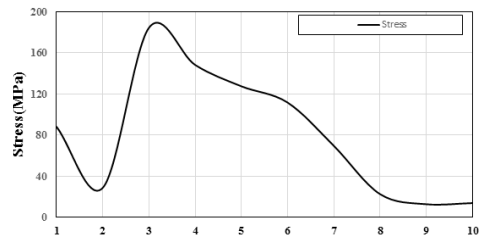


Fig. 16. Stress of coating layer thickness $300\mu\text{m}$, bond coating thickness $50\mu\text{m}$ by location

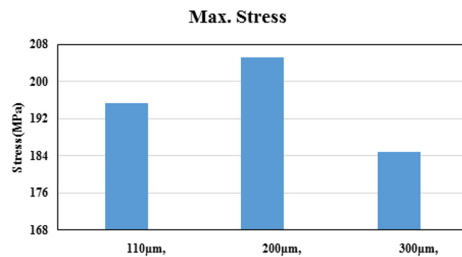


Fig. 17. Max stress of coating layer thickness $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$

2.6 본드층 두께 변화에 대한 해석 결과

본드층 두께를 달리하여 열해석을 수행하였을 때, Max. Stress가 발생하는 위치는 코팅층의 두께를 변경시켰을 때와 동일하게 코팅층의 3번 위치에서 발생하였다. 본드층 50 μm , 100 μm , 150 μm 각각 두께에 따른 Stress contour는 Fig. 18 및 Fig. 20에 나타내었으며, 본드층 두께를 변경하여도 동일하게 코팅층 3번 위치에서 Max stress가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 코팅층 1번위치에서 내려올수록 Stress가 증가하다 코팅층 3번 위치에서 Max. Stress를 보여주고, 본드층에서 모재부까지 내려오면서 Stress가 지속적으로 감소하는 것을 확인하였다. Stress가 모재부쪽으로 갈수록 작아지는 결과 그래프를 Fig. 19 및 Fig. 21에 나타내었다. 또한, 본드층이 150 μm 두께일 때 203.9 MPa로 가장 큰 Stress 결과가 나타났으며, 본드층이 100 μm 에서는 202.5 MPa, 본드층이 50 μm 에서 195.4 MPa 순서대로 Stress가 감소되는 것을 확인하였다. 즉, 본드층은 두께가 작을수록 Max stress값이 감소한다는 것을 알 수 있으며, Fig. 22에 Max. Stress 결과 데이터를 종합하여 비교하였다.

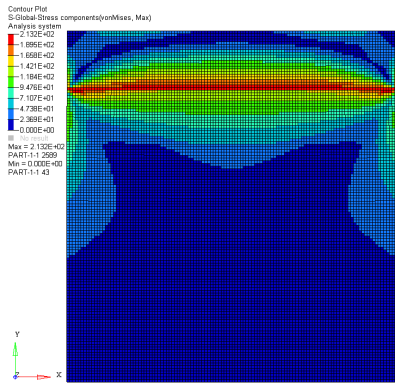


Fig. 18. Stress contour of coating layer thickness 100 μm , bond coating thickness 100 μm

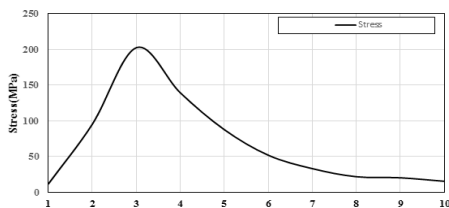


Fig. 19. Coating layer thickness 100 μm , bond coating thickness 100 μm model stress by location

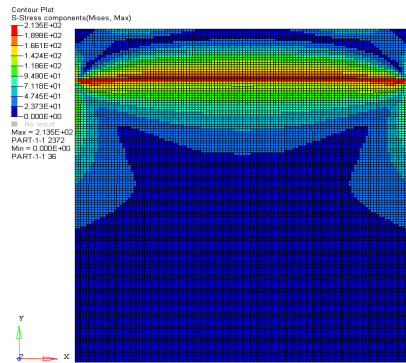


Fig. 20. Stress contour of coating layer thickness 100 μm , bond coating thickness 150 μm

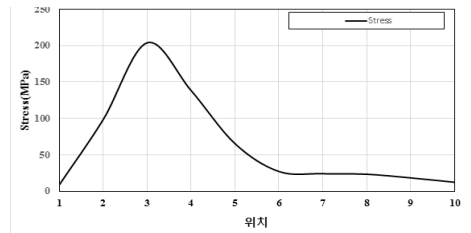


Fig. 21. Model stress of coating layer thickness 100 μm , bond coating thickness 150 μm by location

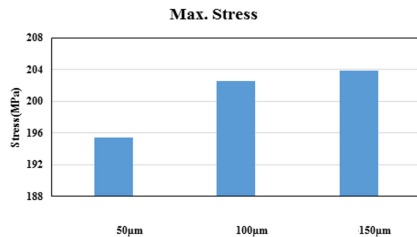


Fig. 22. Bond coating thickness 50/100/150 μm compare of max. stress

3. 결론

본 논문에서는 열-구조 연계해석을 통해 저마모 표면 코팅이 적용된 제동디스크의 코팅층 및 본드층의 두께에 따른 열응력 변화를 도출하고, 코팅 두께와 열응력과의 상관관계를 분석하였다. 코팅층, 본드층 및 모재부의 물성을 토대로 모델을 구성하였으며, 제동성능시험 데이터를 토대로 열 해석을 수행했다. 또한, 코팅층과 본드층 두께에 따른 경향성 분석을 수행한 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 브레이크 디스크의 코팅층과 본드층 물성 차이에 따른 열 균열 특성 파악

코팅층, 본드층 및 모재부의 물성을 각각 나누어 대입하고, 유한요소해석을 기반으로 열 물성 차이에 따른 열 균열 특성을 파악하였다. 제동디스크의 열조건을 부여하기 위해 제동 시험을 통해 디스크 표면테이터를 확보하였고, 디스크를 절단하여 얻은 단면을 통해 2D 모델을 구성하였다. 또한, 제동 시험의 디스크 표면온도를 코팅층 상부에 부여하여 ABAQUS v6.12의 열-구조 연계해석을 수행하였고, 2D모델과 제동디스크와의 상관관계를 고려한 구속 조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 결과적으로 재료 간의 열팽창률 차이에 따라 열응력이 발생하는 것을 확인하였으며, 코팅층과 본드층 사이에서 발생하는 Max. Stress가 열균열을 발생시키는 원인으로 판단하였다.

(2) 미세 2D모델 검증 및 해석 결과 분석

제동디스크 표면단면을 통해 2D 모델을 구성하였다. 2D 모델은 코팅층, 본드층, 모재부로 이루어지는데 코팅층은 Tungsten carbide, 본드층은 Inconel, 모재부는 Cast iron으로 재료를 선정하여 Thermal conductivity, Density, Young's modulus, Poisson's ratio, Expansion coefficient, Specific heat 등의 열적, 기계적 물성 정보를 해석에 적용하였다. 2D 모델의 적정성을 검증하기 위해 모델의 가로, 세로 길이 변경 시에도 열응력 Contour 형상이 동일하게 나타나는지를 확인하였다. 또한, 2D 모델 가로 세로 길이에 따라 모델 전체에서의 Max. Stress 값이 동일하게 도출되는 것을 통해 검증하였다. 또한 코팅층 및 중간층의 두께변화에 따라 응력의 변화를 확인하고 두께와 응력의 상관성을 분석하였다. 코팅층 100 μm , 200 μm , 300 μm , 본드층 50 μm , 100 μm , 150 μm 으로 두께를 변화시키고 Stress 측정위치를 선정하여 같은 위치에서의 Stress값을 비교하였다. 코팅층 두께 변화에 대한 Stress는 일정한 경향성을 보이지 않으며 균열에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다. 또한 본드층의 두께가 증가할수록 Stress가 증가함으로 보아 본드층의 두께가 작을수록 열균열 방지에 유리할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 코팅층, 본드층의 두께가 열응력에 어떤 영향을 미치는지 파악할 수 있었다. 향후 본 연구결과를 바탕으로 본드층에 다른 재료를 적용했을 때 유사한 경향을 나타내는지 여부와 열응력을 최소화하기 위해 코팅층과 본드층의 두께에 대한 최적설계 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] ALNAQI, Abdulwahab A.; BARTON, David C.; BROOKS, Peter C. Reduced scale thermal characterization of automotive disc brake. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 658-668. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.001>
- [2] FUKANO, Akira; MATSUI, Hiromichi. Development of disc-brake design method using computer simulation of heat phenomena. *SAE transactions*, 1986, 956-968. <https://www.istor.org/stable/44725451>
- [3] VARECHA, Daniel, et al. Research of friction materials applicable to the multi-disc brake concept. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 647-661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.061>
- [4] BELHOCINE, Ali; ABDULLAH, Oday Ibraheem. Thermomechanical model for the analysis of disc brake using the finite element method in frictional contact. *Multiscale Science and Engineering*, 2020, 2.1: 27-41. DOI: <https://doi.org/10.36909/ier.8617>
- [5] QI, Hong Sheng; DAY, Andrew J. Investigation of disc/pad interface temperatures in friction braking. *Wear*, 2007, 262.5-6: 505-513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.027>
- [6] WIDJAJA, Sujanto; LIMARGA, Andi M.; YIP, Tick Hon. Modeling of residual stresses in a plasma-sprayed zirconia/alumina functionally graded-thermal barrier coating. *Thin Solid Films*, 2003, 434.1-2: 216-227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00427-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00427-9)
- [7] SHAW, Leon L. Thermal residual stresses in plates and coatings composed of multi-layered and functionally graded materials. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29.3: 199-210. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(97\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(97)00029-2)
- [8] MILLER, T. C.; CHONA, R. Finite element analysis of a thermally loaded interface crack in a ceramic coating. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 59.2: 203-214. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(97\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(97)00089-1)
- [9] BIAŁAS, Marcin. Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202.24: 6002-6010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.178>
- [10] MORIDI, A.; AZADI, M.; FARRAHI, G. H. Thermo-mechanical stress analysis of thermal barrier coating system considering thickness and roughness effects. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 243: 91-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.02.019>
- [11] GÜNEY, Bekir; MUTLU, İbrahim; KÜÇÜKSARIYILDIZ, Hanifi. The effect of flame spray coating on the tribological properties of brake disc. *Politeknik Dergisi*, 2019, 23.3: 755-761. DOI: <https://doi.org/10.2339/politeknik.563277>

- [12] RAJAPPAN, R., et al. Transient Thermal Analysis of Tungsten Carbide and Hafnium Carbide Disc Brake Rotor. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. p. 012020.[7] Jung, C., 2021, Thermal-structure Coupled Analysis Modeling and Design of Metal 3D Printing for Residual Stress Analysis, Doctorate Thesis, Ajou University, Republic of Korea.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1057/1/012020>
- [13] MALUF, Omar, et al. Development of materials for automotive disc brakes. Minerva, 2007, 4.2: 149-158.
- [14] VARECHA, Daniel, et al. Research of friction materials applicable to the multi-disc brake concept. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 647-661.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.061>
- [15] WANG, Y., et al. Investigation of stress field and failure mode of plasma sprayed Al₂O₃-13% TiO₂ coatings under thermal shock. Materials Science and Engineering: A, 2009, 516.1-2: 103-110.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.041>
- [16] MARTENA, Ma, et al. Modelling of TBC system failure: Stress distribution as a function of TGO thickness and thermal expansion mismatch. Engineering Failure Analysis, 2006, 13.3: 409-426.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.027>
- [17] MILLER, Robert A.; LOWELL, Carl E. Failure mechanisms of thermal barrier coatings exposed to elevated temperatures. Thin solid films, 1982, 95.3: 265-273.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(82\)90019-0](https://doi.org/10.1016/0040-6090(82)90019-0)

전 지 훈(Ji-Hoon Jeon)

[준회원]



- 현재 : 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

구조해석, 최적설계

이 호 용(Ho-Yong Lee)

[정회원]



- 2005년 2월 : 성균관대학교 기계공학과(공학박사)
- 1995년 11월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

최적 설계, 신뢰성 공학

김 민 수(Min-Soo Kim)

[정회원]



- 2003년 8월 : 숭실대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2005년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

제동시스템, 열분사표면코팅, 저마모디스크, 방음레일