

# 친환경 차량의 제동 정숙성을 위한 브레이크 디스크의 열변형 강건성 향상에 관한 연구

심재훈\* · 황세라\* · 전갑배\* · 공창섭\*\*

## A Study on Improvement of the Thermal Deformation Robustness of Brake Disc for Braking Quietness of Eco-Friendly Vehicles

Jaehun Shim\*, Sera Hwang\*, Gabbae Jeon\*, ChangSup Kong\*\*

*Key Words: Judder vibration(저더 진동), Coning(코닝), Robust design(강건설계), Non-friction, Surface(비마찰면), SN(Signal-to-Noise) Ratio(신호대 잡음비)*

### ABSTRACT

Braking judder vibration caused by thermal deformation of disc has been a major problem in brake system for a long time and many researchers have analyzed its mechanisms and developed solutions. However, judder vibration still occurs due to harsher vehicle driving conditions like increased power of EV (Electric Vehicle) and various environmental characteristics. In particular, in the case of eco-friendly vehicles such as EV, it is predicted that judder vibration will become a bigger problem due to the quiet driving condition compared to ICE (Internal Combustion Engine) vehicles. In addition, existing studies on judder vibration have been focused on the capacity and thermal deformation of the braking friction surface. So, the influence analysis of thermal deformation on the non-friction surface of the brake disc is relatively insufficient. In this study, we attempt to secure braking characteristics that are insensitive to thermal deformation in terms of the non-friction surface of the disc, focusing on the coning characteristic that occurs during braking thermal deformation. For this purpose, various factors of the non-friction surface of the disc are analyzed using robust design. The design standard for the robustness of the brake disc against judder vibration is proposed through the research results.

### 1. 서론

제동시스템은 아래의 Fig. 1에 도시된 바와 같이 캘리퍼(Caliper)에 내제된 마찰재와 디스크(Disc)의 상호 마찰 메커니즘(Mechanism)을 이용하여 차량의 운동에너지를 열에너지로 전환하여 차속을 저감시키는 장치이다.

이때, 마찰 메커니즘의 특성상 과도한 열발생으로 인하여

마찰 소음 및 저더 진동(Judder Vibration)이 불가피하게 발생하게 된다. 특히, 저더 진동은 제동시스템과 연결된 현가시스템, 조향시스템 그리고 이들과 연결된 차체를



Fig. 1 Schematic of braking heat generation

\* 현대자동차, 책임연구원

\*\* 명화공업, 이사대우

E-mail: jhs4u@hyundai.com

통해서 운전자의 감성품질에 심한 악영향을 주게 되어 상품성 저하를 야기시키게 된다.

일반적으로, 저더 진동은 디스크 마찰면의 이상 마모로 발생하는 DTV(Disc Thickness Variation) 악화에 의한 냉간 저더와 디스크와 마찰재의 과도한 마찰열에 의해 발생하는 열간 저더로 구분된다. 냉간 저더의 경우 디스크 가공 후 품질 검사와 허브 베어링(Hub Bearing)과의 조립성 확인으로 저감을 하고 있으며, 열간 저더의 경우 디스크 마찰면의 체적을 최적화하여 개선하게 된다.

한편, 저더 진동을 저감하기 위한 학술적인 노력은 많은 연구가들에 의하여 의미 있는 결과들이 발표되었다.

6시그마 개념을 도입하여 강건설계를 이용한 저더 진동의 개선과 디스크의 열적 거동에 대한 기본적인 연구가 저더 개선을 위한 초창기 연구의 주류였으며,<sup>(1,2)</sup> 드래그(Drag)의 원리 연구, 제동 속도에 따른 열간 저더 진동의 영향, 시간에 따른 디스크 마모의 수치 해석적 모델을 통하여 저더 진동 발생을 예측하는 연구들이 후속 연구로 활발히 이루어졌다.<sup>(3-6)</sup>

또한, 디스크 마찰면의 단면 형상 최적화 및 마찰면 가공 형태에 따른 영향도 분석과 같은 부품 측면에서의 연구와 실차 상태에서의 가혹한 제동성능 평가를 통한 저더 진동의 저감 및 발생 영향 요인에 대한 분석 등이 수행되었다.<sup>(7-12)</sup>

그러나, 이와 같은 연구들은 주로 디스크의 마찰면에 국한되어 왔으며, 아직까지 디스크의 비마찰면에 대한 저더 진동의 영향성 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 디스크 비마찰면의 최적화를 실시하여 저더 진동에 둔감한 디스크 설계 방안을 제시하고자 한다.

끝으로, 본 연구 결과를 바탕으로 내연기관 대비 차량 정속성이 더욱 요구되는 HEV(Hybrid Electric Vehicle) 및 EV(Electric Vehicle)와 같은 친환경 차량을 위한 디스크 설계 표준을 수립하여 제동 안정성과 감성품질 향상에 기여하고자 한다.

## 2. 적용 검토 및 연구 방향 수립

디스크 비마찰면에 대한 연구 범위 검토를 위하여 다양한 디스크 종류에 대한 적용 검토를 실시하였으며, 아래의 Fig. 2에 제동시스템 디스크 종류에 따른 구성을 도시하였다. 이와 같이 현재 상용화되고 있는 디스크를 도시한 이유는 다양한 종류의 디스크에 대한 적용 가능 여부를 검토함으로써, 본 연구 결과의 효용성을 확인하기 위함이다.

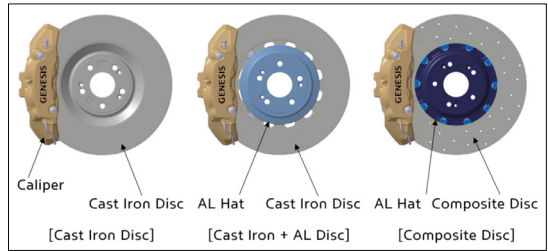


Fig. 2 Definition of structure for a variety of disc types

도시된 바와 같이 제동시스템에서 디스크의 역할은 캘리퍼와 함께 구성되며, 캘리퍼에서 생성된 유압이 캘리퍼에 내장된 마찰재에 인가되어 디스크와 함께 상호 마찰을 하면서 차량을 정지시키는 것이다. 이때, 디스크의 마찰면은 마찰재와 직접 접촉된 면적을 의미하며, 비마찰면은 마찰재와 접촉되지 않은 면적을 각각 의미한다.

주철 디스크, 주철-알루미늄 이종 접합 디스크 그리고 복합재 디스크가 현재까지 사용 중인 디스크의 종류이며, 3가지 디스크 모두 개발 목적 및 현가시스템과 같은 주변 시스템들과의 관계에 의하여 적용 되는 차종은 다소 상이 하더라도 기본적으로 구성되는 비마찰면에 대한 설계는 동일한 조건을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서, 저더 진동에 대한 디스크 비마찰면의 강건성 설계는 디스크 표준화의 원리 연구 차원에서 매우 유효한 접근이라고 할 수 있다. 비마찰면에 대한 자세한 내용은 다음 장에 상세히 기술하고자 한다.

한편, 아래의 Fig. 3은 저더 진동 발생에 대한 개념도를 나타내고 있다. 저더 진동은 과도한 제동 열부하에 따른 디

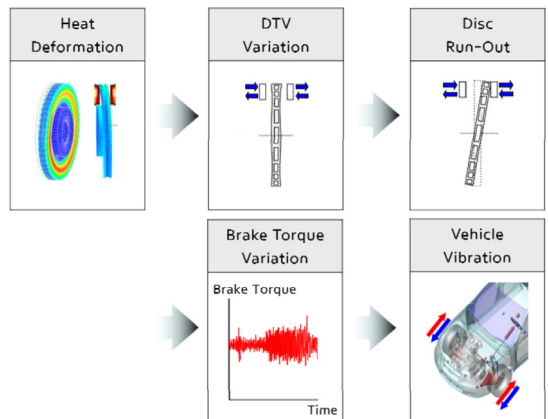


Fig. 3 Mechanism for brake judder vibration

스크의 열변형과 직접적인 관계를 갖고 있으며, DTV(Disc Thickness Variation)와 디스크 런아웃(Run-Out)의 변화를 순차적으로 야기시켜 최종 BTV(Brake Torque Variation)의 변화에 의하여 차량의 이상 진동을 발생하게 된다.

이와 같은, 이상 진동의 발생으로 표현되는 저더 진동은 고객의 불만 제기와 같은 감성품질 저하와 클레임 비용 발생으로 인한 수익성 악화를 야기시키게 된다. 특히, 고출력 파워트레인과 모터를 적용하여 가속성능을 크게 향상시킨 차량 개발이 증가하면서 제동 시 디스크 열부하도 증대되고 있다.

따라서, 제동시스템의 신뢰성 확보를 위해서는 디스크 열변형의 저감을 통하여 저더 진동의 강건성을 확보하여야 한다.

아래의 식 (1)은 디스크의 열변형을 계측하는데 활용되는 코닝(Coning) 관련 식을 나타내고 있다.

식 (1)이 나타내는 바와 같이, 코닝은 디스크의 축방향 변형량을 디스크 반지름과 반경방향 변형량의 합으로 나눈 값을 의미한다.

$$\text{Coning}(\theta) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Axial Deformation}}{\text{Disc Radius} + \text{Radial Deformation}} \right) \quad (1)$$

즉, Fig. 4와 같이 코닝값은 마찰면의 열특성뿐만 아니라 비마찰면의 거동과 변형에도 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 열변형에 의한 코닝 변형량을 분석함으로써 저더 진동에 강건한 디스크 비마찰면을 확보할 수 있도록 연구 방향을 설정하였다.

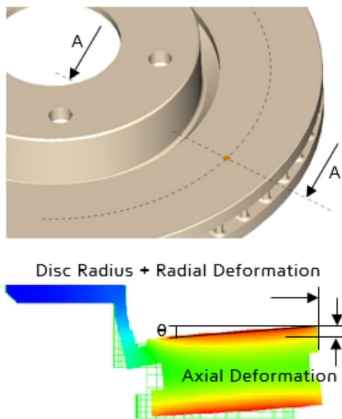


Fig. 4 Schematic of disc coning generation

### 3. 강건성확보를 통한 표준화 검토

#### 3.1. P-diagram 정의

2장의 이상 기능 검토에 이어서 P-diagram을 검토하여 제동시스템의 입력, 출력, 제어 요인 및 잡음 요인을 도식화 하였다. 아래의 Fig. 5는 이와 같은 검토를 통하여 수립된 P-diagram을 나타내고 있다.

본 연구의 목적인 코닝 저감을 위하여 강건 설계 방법을 적용하였으며, 가속 반복 제동 상황인 외부 노이즈에 둔감하게 반응하여 코닝 문제를 해결할 수 있는 시스템이 되어야함을 P-diagram 도식화 과정을 통하여 명확히 할 수 있었다.

또한, 출력 반응이 코닝을 저감 시키기 위한 것이기 때문에, 망소 특성(Smaller The Better Type Characteristics)이 P-diagram 특성으로 적합한 설정임을 확인하였다.

아래의 식 (2)는 망소 특성에 대한 SN(Signal to Noise)비 관련 식을 나타내고 있다. SN비는 신호 요인과 잡음 요인 간의 비를 의미하며, 더 자세한 모평균 제곱의 추정치와 분산의 추정치의 비로 나타낼 수 있다.

강건설계에서는 SN비를 최대화 시킴으로써 잡음 요인에 대하여 일관성 있고 강건한 결과를 얻을 수 있다.

$$\text{SN ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum v_i^2 \right) \quad (2)$$

가속 제동을 고려한 잡음 요인의 경우 제동초속도 100kph에서 0.3g 감속을 10회 연속 제동하여 디스크의 열변형을 야기시키도록 하였다.

제어 요인의 경우 디스크의 비마찰면을 강건하게 하기 위하여 실제 설계 과정에서 변경 가능한 자유도와 과거차

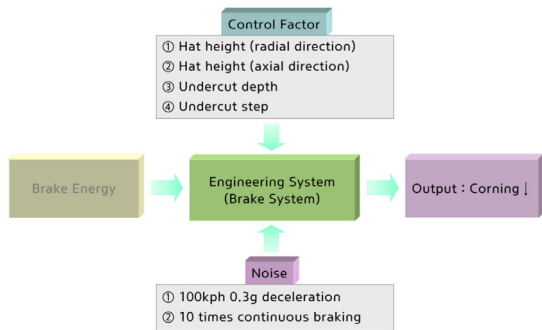


Fig. 5 Definition of P-diagram

개발 경험을 최대한 반영하였다.

일반적으로, 디스크의 햇(Hat) 내경은 현가장치의 허브 베어링 외경에 중속되며, 휠이 안착되는 햇 상부 두께 및 디스크 마찰면과 연결되는 햇의 월(Wall)부 두께는 주변부품과의 인터페이스의 영향으로 설계 자유도가 제한된다.

따라서, 본 연구에서는 디스크 단품내에서 독립적으로 제어할 수 있는 디스크 반경방향 햇 높이, 디스크 축방향 햇 높이, 언더컷(Undercut) 깊이, 언더컷 단차를 각각 제어 요인으로 선정하였으며, 제어 요인의 수준을 다양하게 하여 잡음 요인에 강건한 비마찰면의 영향도 분석이 가능하도록 하였다. 설정된 제어 요인의 수준과 조합에 대해서는 다음 장에 상세히 서술하고자 한다.

### 3.2. 제어 요인 설정

아래의 Fig. 6은 3.1에서 서술한 각각의 제어 요인별 상세 수준을 나타내고 있다.

일반적으로, 강건설계에서는 시스템 설계, 파라미터(Parameter)설계, 허용차 설계의 순서로 진행된다.

시스템 설계는 손실 비용 저감을 위해서 실시되고, 파라미터 설계는 제어 가능한 요인에 대한 설계를 나타내면서 산포를 저감하기 위하여 실시된다. 그리고, 허용차 설계는 최종 제품의 규격을 고려하여 허용차를 조정하기 위하여 실시된다.

여기서, 파라미터 설계 단계에서 산포를 축소해야 하는 이유는 손실 비용을 감소시키기 위함이며, 손실 비용은 제

품이 고객에게 판매된 후부터 발생하여 사회에 끼친 손실로 정의된다.

강건설계를 창시한 다구찌 품질공학에서는 공차내에 들어온 측정값을 맹목적으로 좋은 품질로 간주하지 않으며, 목표값에 떨어진 산포의 정도에 따라 손실 비용이 증가하기 때문에 목표값에 최대한 근접하도록 산포의 축소를 강조하였다. 본 연구에서는, 위와 같은 사항과 연구개발 단계임을 고려하여 파라미터 설계를 통한 산포 저감에 집중하였다.

먼저, 반경방향 햇 높이는 디스크 내경과 언더컷 끝단까지의 반경방향 거리를 나타내며, 축방향 햇 높이는 디스크의 허브 베어링 접촉면과 언더컷 끝단까지의 축방향 거리를 각각 나타낸다.

또한, 언더컷 깊이는 마찰면 중심에서 언더컷 끝단까지의 거리를 나타내며, 언더컷 단차는 마찰면에서 시작되는 언더컷 시작 지점의 거리를 각각 나타낸다.

이와 같이 4개의 제어 요인 별로 3개의 수준을 각각 실험하기 위하여 최종적으로  $L_93^4$  직교표를 설정하였다.

### 3.3. 실험

제어 요인을 수립한 후 순차적으로 실험계획법을 준수하여 각 제어 요인 수준의 조합별 실험을 실시하였다.

실험은 코닝 분석의 용이성을 고려하여 해석을 통해서 진행되었으며, Fig. 7에 각 제어 요인의 수준 조합별 해석 결과를 도시하였다. 도시된 바와 같이, 잡음 요인으로 인한 디스크의 동적 거동을 확인하였으며,  $L_93^4$  직교표에 의

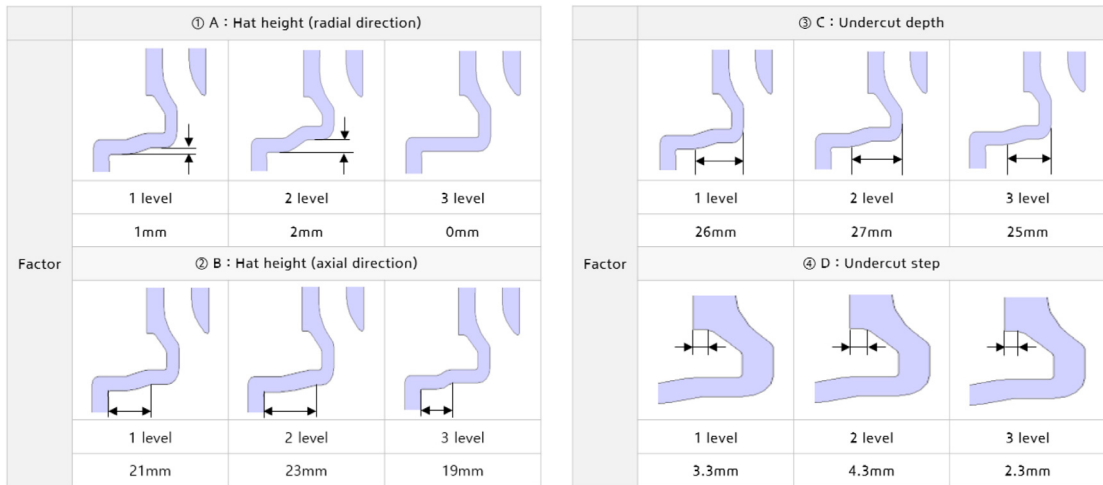


Fig. 6 Level of control factors for non-friction surface of disc

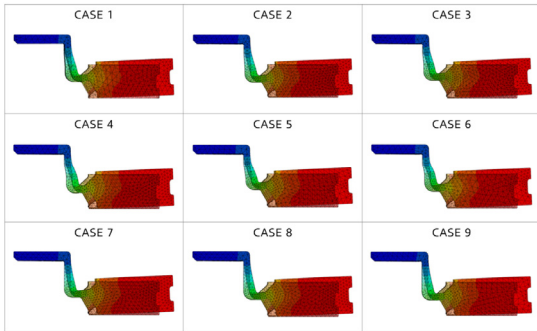


Fig. 7 Thermal analysis for mean and S/N ratio calculation

Table 1 Results of mean and SN ratio

	A	B	C	D	Mean	SN
1	1	1	1	1	0.121	18.344
2	1	2	2	2	0.108	19.331
3	1	3	3	3	0.136	17.329
4	2	1	2	3	0.122	18.272
5	2	2	3	1	0.125	18.061
6	2	3	1	2	0.119	18.489
7	3	1	3	2	0.125	18.061
8	3	2	1	3	0.125	18.061
9	3	3	2	1	0.112	19.015

한 1회 실험부터 9회 실험까지 디스크 비마찰면의 서로 다른 변화를 관찰할 수 있었다.

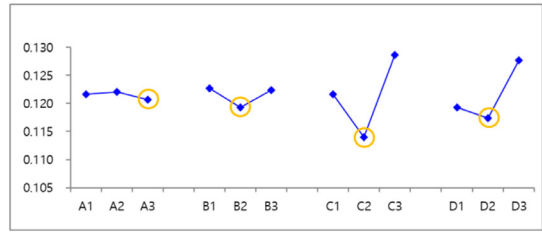
한편, Table 1은 전체 실험을 통한 평균 및 SN의 출력 반응 결과를 나타내고 있다.

### 3.4. 실험 결과 분석

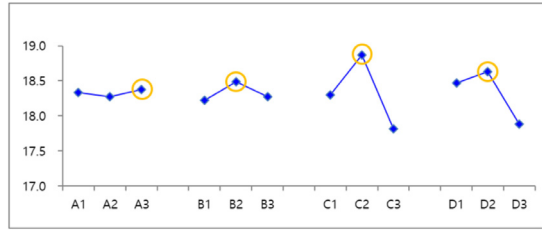
실험계획법을 통해서 수집된 계측 데이터에 대하여 출력 반응 분석을 실시하였다. Fig. 8은 제어 요인의 수준별 평균과 SN비의 반응 결과를 나타내고 있다.

평균의 경우 3-2-2-2 수준의 반경방향 헛 높이, 축방향 헛 높이, 언더컷 깊이, 언더컷 단차를 갖는 것이 망소 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 또한, SN비 측면에서도 3-2-2-2 수준이 가장 높은 SN비를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

강건설계의 출력 반응 분석에서는 평균은 중심 제어 요



(a) Mean



(b) SN

Fig. 8 Analysis of mean and SN ratio according to control and noise factor

인을 나타내고, SN비는 산포 제어 요인을 각각 나타낸다.

분석시 SN비가 높을 경우 전술한 바와 같이, 잡음 요인에 대하여 일관성 및 강건성을 갖기 때문에 강건설계 출력 반응 결과를 분석할 때에는 평균보다는 SN비가 높은 수준을 우선적으로 설계에 반영하는 것이 효과적이다.

참고적으로, SN비가 동등한 경우 차순위로 망소특성의 경우 평균이 작은 수준을, 망대특성의 경우 평균이 큰 수준을 선정하는 것이 최적화에 효과적이다.

본 실험의 경우, 망소특성의 적은 평균과 높은 SN비가 이상적인 관계를 나타내고 있기 때문에 제안된 비마찰면에 대하여 각 요인별 3-2-2-2 수준을 선정하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

한편, 아래의 Table 2에 평균과 SN비의 상대 비교를 위하여 초기 사양과 최적화 사양의 결과값을 도시하였다.

평균의 경우 초기 사양 대비 9.1%의 코닝 저감 효과를 얻을 수 있었으며, SN비의 경우 초기 사양 대비 5.3%의

Table 2 Results summary of mean and SN ratio

	Mean	SN
Beginning	0.121	18.344
Optimization	0.110	19.380
Gain	0.011 (9.1% ↓)	1.036 (5.3% ↑)

향상 효과를 얻는 것으로 각각 분석되어 제어 요인별 최적 수준으로 선정된 3-2-2-2 수준이 타당함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구는 제동시스템의 저더 진동 개선을 위한 디스크 비마찰면의 강건성 확보에 관한 연구였으며, 아래와 같은 유효한 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 현재까지의 발표된 연구를 검토한 결과, 디스크의 비마찰면에 대한 연구는 마찰면에 대한 연구 대비 상대적으로 미흡함을 착안하여 비마찰면의 코닝 강건성 확보를 연구 방향으로 설정하였다.
- 2) 제동시스템 저더 진동에 대한 메커니즘과 이상 기능 정의를 통하여 현재까지 상용되고 있는 다양한 디스크에 대한 적용 가능성을 검토하였다.
- 3) P-diagram 정의에서 디스크 비마찰면의 설계 자유도와 기존 개발 이력을 최대한 고려하여 반경방향 핫 높이, 축방향 핫 높이, 언더컷 높이, 언더컷 단차에 대한 제어 요인 수준을 수립하였다.
- 4) 실험계획법에 의한 전체 실험을 수행하였으며, 높은 SN비와 낮은 평균을 갖는 3-2-2-2 수준의 비마찰면이 유효함을 확인하였고, 초기사양 대비 평균은 9.1%, SN비는 5.3% 향상됨을 확인하였다.
- 5) 디스크 비마찰면에 대한 강건성을 확보한 본 연구 결과는 HEV 및 EV와 같이 차량 주행 정숙성이 더욱 요구되는 친환경 차량 대응을 위한 디스크 표준화에 기여할 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

- (1) H. S. Kim, C. B. Kim, and H. J. Yim, 2003, "Quality improvement for brake judder using design for six sigma with response surface method and sigma based robust design," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 193~201.
- (2) T. Okamura and H. Yumoto, 2006, "Fundamental study on thermal behavior of brake disc," *SAE International*, 2006-01-3203.
- (3) B. Krough, L. Dyar, and P. Bary, 2011 "Adapting on-vehicle brake drag testing to a bench dynamo-

- meter," *SAE International*, 2011-01-2376.
- (4) J. M. Kim, M. G. Lee, B. J. Kim, and C. D. Cho, 2013, "A prediction of the relation between the disc brake temperature and the hot judder critical speed," *Transaction of KSAE*, Vol. 21, No. 1, pp. 61~67.
- (5) Y. K. Chang and J. R. Hwang, 2013, "Numerical model for prediction of brake judder due to wear and dust," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 375~384.
- (6) J. H. Park, T. W. Park, J. H. Lee, and M. H. Cho, 2014, "Hot judder simulation of a ventilated disc and design of an improved disc using sensitivity analysis," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~6.
- (7) C. Kim and T. J. Ha, 2016, "Optimization of an automotive disc brake cross-section with least thermal deformation by taguchi method," *Transaction of KSAE*, Vol. 24, No. 1, pp. 1~9.
- (8) T. S. Jung, B. W. Cha, Y. H. Hong, C. M. Kim, Y. H. Hong, and C. D. Cho, 2016, "An experimental Study for machined patterns of friction surface on disc brake rotor in performance aspect," *Transaction of KSAE*, Vol. 24, No. 4, pp. 471~479.
- (9) J. H. Shim, U. H. Shin, and G. B. Jeon, 2018, "A study on analysis and test for improvement factors of brake stiffness feeling," *Journal of auto-vehicle safety association*, Vol. 10, NO. 3, pp. 38~44.
- (10) S. C. Han and B. G. Lee, 2018, "A study on convergence contact behavior of friction heat and pad on disk brake," *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 9, No. 1, pp. 283~289.
- (11) J. H. Shim, U. H. Shin, J. H. Lee, S. R. Hwang, W. S. Yim, and B. C. Kim, 2020, "A study on development of brake system of Light eco-friendly car considering heat load and regenerative braking characteristic," *Journal of auto-vehicle safety association*, Vol. 12, NO. 2, pp. 7~13.
- (12) J. H. Jeong and E. S. Shin, 2022, "Experimental study on the effects of the brake disc thickness variation and run-out on the cold judder," *Transaction of KSAE*, Vol. 30, No. 5, pp. 397~403.