

## 스크린 도어 모터 시스템의 동하중 상태 구동강성 검증

이중현<sup>1</sup>, 이선봉<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>계명대학교 일반대학원 기계공학과

<sup>2</sup>계명대학교 기계자동차공학과

### A Study for the Screen Door Motor System Driving Stiffness of Dynamic Load Condition

Jung-Hyun Lee<sup>1</sup>, Seon-Bong Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Keimyung University

<sup>2</sup>Division of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

**요약** 초기 도시철도는 수송수단으로서의 역할만 요구되었으나 지하 승강장에 체류하는 시간이 길어짐에 따라 하나의 생활 공간으로 환경개선이라는 문제에 직면하게 되었다. 이에 따라 스크린 도어의 근간이 되는 슬라이딩 자동문은 고객의 편의와 출입을 통제하는 방법의 편리성을 이유로 대형 유통매장, 병원, 음식점, 관공서 등에 광범위하게 사용되고 있다. 이에 따라 스크린 도어는 승객의 편의와 안전 확보, 쾌적한 역사 조성 및 에너지 절약을 목적으로 필요할 뿐만 아니라, 요소부품의 설계 및 신뢰성 확보를 통한 스크린 도어 시스템 최적설계기술개발이 필요하게 되었다. 따라서 본 논문에서는 지하철 안전에 필요한 스크린 도어의 모터에 대한 설계 구동 강성을 검증하기 위해 구성 부품의 이론적 하중을 계산하고 해석 하였으며, 실험을 통해 검증하였다.

**Abstract** The initial urban railway was only required to perform its role as means of transportation. As the time of staying in an underground platform was extended, it has been faced with the issues of environmental improvement as a living space. Therefore, the sliding automatic door, which is the basis of the screen door, is used widely for large distribution stores, hospitals, restaurants, and public offices for customers' convenience and as a convenient method to control access. Therefore, screen doors are required for the purpose of customers' convenience, securing safety, establishing pleasant station buildings, and energy savings. It would be also necessary to develop the optimal design technology for a screen door system through the design of element parts and to ensure reliability. Therefore, this paper calculated, interpreted, and verified the theoretical weight of the composition parts to verify the design drive hardness of the motor for screen doors necessary for the safety of subways.

**Keywords** : Bearing, BLDC Motor, Screen door, Shaft

### 1. 서론

운행초기의 지하철은 단지 수송수단으로서의 역할만이 요구되었으나 현재의 지하철은 이용 빈도가 많아지고, 지하철 승강장에 체류하는 시간이 길어짐에 따라 단순한 수송수단이 아닌 하나의 생활공간으로서의 역할도 만족시켜야 하는 상황에 이르렀다.[1]

또한 전반적인 생활수준이 향상됨에 따라 지하철내의 환경에 대한 사용자들의 쾌적함과 안전성에 대한 인식이 높아지고 있어, 승객들의 체류시간이 대합실과 비교해서 상대적으로 긴 지하철 승강장의 환경개선에 대한 문제가 계속 제기되고 있는 실정이다.[2]

지하철 승강장 내에서 안전사고는 지속적으로 발생되고 있고, 도시의 인구집중과 교통량의 팽창 등으로 외부

\*Corresponding Author : Seon-Bong Lee(Keimyung University)

Tel: +82-10-5180-5067 email: seonbong@kmu.ac.kr

Received November 11, 2015

Revised (1st January 15, 2016, 2nd January 19, 2016)

Accepted February 4, 2016

Published February 29, 2016

환경오염요인이 증가되어 지하철 승강장내 환경에도 나쁜 영향을 미치고 있다. 또한, 여름철 냉방 시 냉방공기가 유출되어 에너지 절감 등이 요구되는 시설이 필요하고, 특히 승강장내에서 승객의 안전 확보, 쾌적한 역사 환경조성, 에너지절약 등의 효과가 있는 스크린도어(PSD: Platform Screen Door)가 도입되었다.[3]

스크린도어는 승강장 선단에 고정벽과 자동문을 설치하여 선로부를 차단하고, 열차가 정거장에 진출입시 신호를 전달받아 열차의 출입문과 스크린 도어 출입문이 동시에 개폐되는 시스템으로 초기에는 외국에서 경전철에 주로 적용하였으나, 최근에는 파리 메테오(meteo)선, 영국 jubilee선, 동경 남북선 등 중전철에도 적용이 증가하고 있는 실정이다.[4]

초기에 승강장 스크린 도어를 국내에 도입하던 시기에는 승강장 스크린 도어 제어와 관련한 경험의 부재로 인해 일본, 프랑스, 미국 등과 기술 제휴를 통해 제품을 도입하여 설치를 진행하였으나, 이후 국내 업체들의 연구 개발을 통해 종합 제어반 및 각종 RF장치 등에서 상당 부분 국산화를 이루었다.[5]

기술적 측면으로 품질의 향상 및 안정성이 향상되어 고품질의 스크린 도어 시스템을 위해서 안정성 평가가 필요하고, 국산기술의 확보와 기술적 선점을 위한 연구가 계속되어야 된다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 직접구동 BLDC(BrushLess DC)모터방식의 제어장치가 있는 스크린 도어 시스템에서 하중을 받는 모터부의 샤프트(shaft)와 베어링(bearing)을 최적의 강성을 갖도록 설계하고, 해석과 시험을 통해 검증하였다. 보다 효율적인 해석을 위해 스크린 도어 시스템을 단순화하여 해석을 진행한다.

## 2. 스크린 도어 최적설계

### 2.1 스크린 도어 시스템 모델링

스크린 도어 내부에 있는 구조물을 최적 상태 조건에서 해석을 진행하기 위해 직접 동특성의 영향을 받는 모터의 단순화 작업을 실시하였다. 기존의 모터는 스크린 도어 프레임과 연결되어 구동 된다. 하지만 해석 시에 구속조건 및 외부 영향들이 구조물의 강성 해석에 영향을 미치고 있어, 접촉조건 및 하중 등 여러 설계 인자들을 고려해가며 해석을 통해 최적조건을 선정하였다. 기존의 스크린 도어 모델링 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

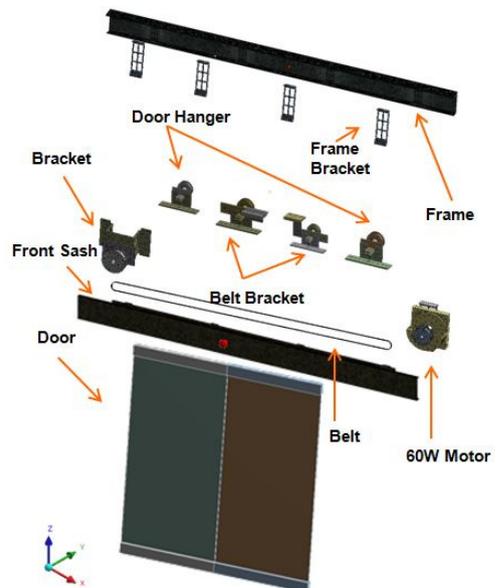


Fig. 1. Screen door total shape

### 2.2 스크린 도어 모터의 모델링 단순화

스크린 도어 모터의 불필요한 엣지(edge)를 제거하여 해석 결과의 정확도를 높이기 위해 최적 조건으로 모델링 하였다.

Fig. 2는 단순화 작업을 실시한 모터를 나타내었다. 이때 사용된 모델링 소프트웨어는 CATIA V5이다.

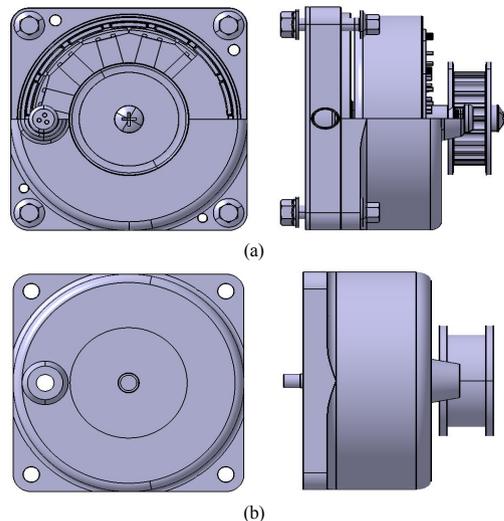


Fig. 2. Screen door motor simplify the modeling  
(a) Before simplify of the motor  
(b) After simplify of the motor

### 2.3 스크린 도어 모터에 걸리는 이론적 하중

스크린 도어 모터가 구동될 때 벨트의 전달 동력은 풀리(fulley)의 회전력으로 인해 베어링에 하중이 발생한다. 즉 벨트의 유효 장력  $P$ 와 벨트의 속도  $v$ 로부터 원심력을 무시할 때 식(2.1)과 같이 나타내고, 원심력을 고려할 때 식(2.2)와 같다.

$$H = \frac{Pv}{1000} = \frac{T_1 v}{1000} \cdot \frac{e^{\mu\theta} - 1}{e^{\mu\theta}} \quad (2.1)$$

$$H = \frac{Pv}{1000} = \frac{v}{1000} (T_1 - mv^2) \cdot \frac{e^{\mu\theta} - 1}{e^{\mu\theta}} \quad (2.2)$$

또, 벨트의 전달 동력은 식(2.1)에서 벨트의 속도가 증가함에 따라 커지지만, 어느 속도 이상이 되면 원심력 때문에 도리어 전달 동력이 감소하게 된다. 이 때, 전달 동력이 최대가 되는 속도  $v_0$ 는 식(2.2)에서 미분하여 구하면 식(2.3)과 같다.

$$\frac{dH}{dv} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{e^{\mu\theta} - 1}{e^{\mu\theta}} (T_1 - 3mv^2) = 0 \quad (2.3)$$

식(2.3)에서  $T_1 - 3mv^2$ 의 값이 0이면 식(2.4)와 같고,

$$v = \sqrt{\frac{T_1}{3m}} = v_0 \quad (2.4)$$

위의 식(2.4)에서  $v_0$ 는 전달 동력이 최대가 되는 벨트의 속도이다. 따라서, 최대 전달 동력  $H_{\max}$ 은 식(2.1)의  $v$ 대신에  $v_0$ 를 대입하면 식(2.5)와 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$H_{\max} = \frac{2}{3} \cdot \frac{T_1}{1000} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{3m}} \cdot \frac{e^{\mu\theta} - 1}{e^{\mu\theta}} \quad (2.5)$$

### 2.4 스크린 도어 모터에 걸리는 실제 하중

스크린 도어 베어링에 작용하는 하중 값을 계산하기 위한 시스템 파라미터를 나타내고, Table 1에는 각각의 수치 값을 나타내었다.

$D_{1,2}$ = 풀리의 지름	$T_1$ = 긴장측 장력
$C$ = 풀리의 축간 거리	$T_2$ = 이완측 장력
$n$ = 모터의 회전수	$\theta$ = 접촉각
$\mu$ = 마찰계수	$P$ = 유효장력
$v$ = 벨트의 속도	$H$ = 정격출력

Table 1. Specification of data

term	data
$D_1$	54.7mm
$D_2$	66mm
$C$	2000mm
$n$	190rpm
$\mu$	0.25
H	60W

벨트의 속도를 식(2.6)으로 구한 다음 원심력의 고려 여부를 결정한다.

$$v = \frac{\pi D n}{1000 \times 60} \quad (2.6)$$

실제 계산 값에 의하면, 벨트의 속도가 10m/s 보다 작기 때문에 원심력을 무시하였고, 식(2.1)에 의해 유효장력  $P$ 를 구하면 111N이 발생하였다. 또한 긴장측 장력과 이완측 장력을 구하기 위하여, 식(2.7)로 접촉각을 구한 다음 식(2.8)에 대입하여,  $e^{\mu\theta}$ 의 값을 구한다.

$$\theta = 180^\circ - 2\sin^{-1}\left(\frac{D_2 - D_1}{2C}\right) \quad (2.7)$$

$$e^{\mu\theta} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2.8)$$

그 다음 아이텔바인(Eytelwein)의 식(2.9), 식(2.10)에 의해 긴장측 장력과 이완측 장력을 구하였다.

$$T_1 = \frac{e^{\mu\theta}}{e^{\mu\theta} - 1} P \quad (2.9)$$

$$T_2 = \frac{1}{e^{\mu\theta} - 1} P \quad (2.10)$$

따라서 베어링에 작용하는 하중  $Q$ 는 근사적으로 스크린 도어 풀리 양쪽에서 벨트가 잡아당기므로 긴장측과 이완측의 장력을 합하였을 때의 하중 299N이 된다.[7]

## 3. 스크린 도어 강성 해석

### 3.1 스크린 도어 모터 강성 해석

강성 해석을 수행하기 위해 메시(mesh)를 나누고, Fig. 3에 나타내었다. 메시는 167,167개의 노드와, 95,223개의 요소 수로 구성하였다. 요소 크기는 전체 부품의 크기를 고려하여 2mm로 선정하였다.

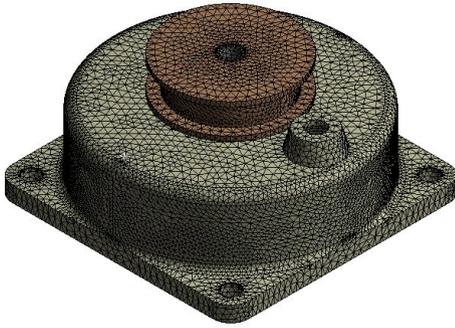


Fig. 3. Screen door motor FEM mesh shape

### 3.2 스크린 도어 샤프트 및 베어링 접촉 조건 설정

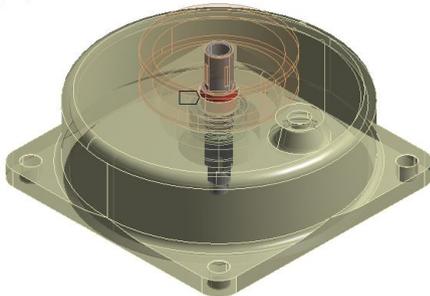
스크린 도어 모터 구동 시 샤프트와 베어링이 결합되어 폴리가 회전하는 힘이 벨트를 따라 행거(hanger), 브라켓(braket)에 전달된다. 이 구동시스템에 따라 유한요소 해석 시 실제 구동되는 조건들을 프로그램 상에서 구현하기 위해 아래와 같은 경계 조건을 지정하였다.

접촉 조건에서 샤프트와 베어링에 각각 분리가 발생하지 않고 서로 접촉만 되는 조건을 Fig. 4와 같이 나타내었고, 조인트(joint) 조건에서 회전하는 샤프트와 베어링의 연결부분에 RZ방향으로, 레볼루트(revolute) 조건을 지정하여 회전 되도록 설정하고, 지정한 각 조건을 Fig. 5에 나타내었다.

모터에 연결되어있는 폴리에 가해지는 하중을 앞서 2.4절에서 구한 긴장측과 이완측의 합산 하중 값인 299N으로 지정하여, 강성 해석을 실시하였고 Fig. 6에 나타내었다.

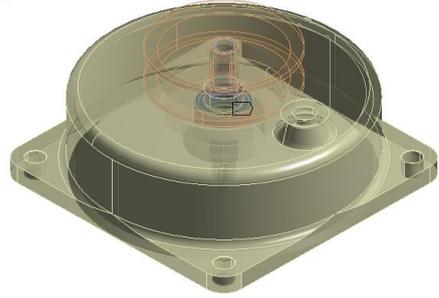
스크린 도어 모터의 물성치는 Table 2과 같고, 스크린 도어의 해석에 사용된 소프트웨어는 ANSYS이다.[8]

No Separation - 198 To 198



(a)

No Separation - Multiple To 198



(b)

Fig. 4. Screen door motor FEM separation condition  
(a) Shaft no separation condition  
(b) Bearing no separation condition

Revolute - 198 To Multiple

- X
- Y
- Z
- RX
- RY
- RZ

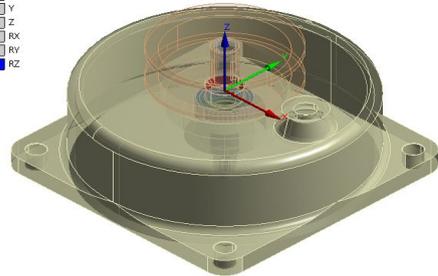


Fig. 5. Screen door motor FEM rovolute condition

Force 2: 299. N  
Components: -299., 0., 0. N

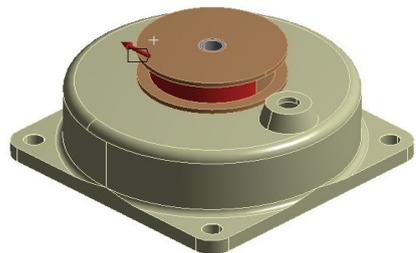


Fig. 6. Screen door roller FEM load condition

Table 2. Screen door motor specifications

Spec.	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Modulus of elasticity (GPa)
SPHC 400	7.8	0.3	210E-09
S45C	7.855	0.29	200E-09
SWRCH 10-12A	7.85	0.29	205E-09
ADC 10-12	7.8	0.3	205E-09

## 4. 해석 및 시험 결과

### 4.1 스크린 도어 모터 응력 해석 결과 분석

스크린 도어가 개폐될 때 299N의 하중을 받는 롤러와 볼트 사이에 발생하는 응력분포를 Fig. 7에 나타내었다.

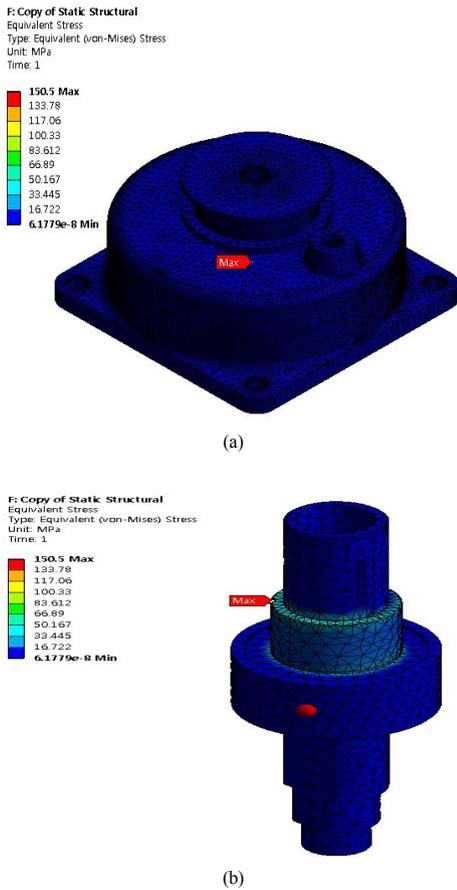


Fig. 7. Screen door motor equivalent stress  
(a) Total equivalent stress  
(b) Shaft and bearing equivalent stress

이때 스크린 도어 모터에서 최대 응력 발생 지점은 샤프트와 풀리가 맞닿는 내부 접촉면에 최대응력 약 150.5MPa이 발생하였다.

해석으로 구한 최대 응력 결과 값(약 150.5MPa)은 스크린 도어 시스템 재료 물성치와 비교하였을 때, 탄성 계수(210GPa)내에 있어, 현재 사용되는 시스템의 안전성에는 문제가 없음을 확인 할 수 있다.

### 4.2 스크린 도어 롤러 및 M8 볼트 변형 결과 분석

Fig. 8은 하중을 받는 모터와 풀리, 샤프트 그리고 베어링의 전체 변형량을 나타낸 것이다. 또한 최대 변형이 발생한 지점은 베이링이 하우징(housing)과 접촉하는 부분이었고, 최대 변형 값은 0.42mm로 값이 미세함에 따라 시스템 구동에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

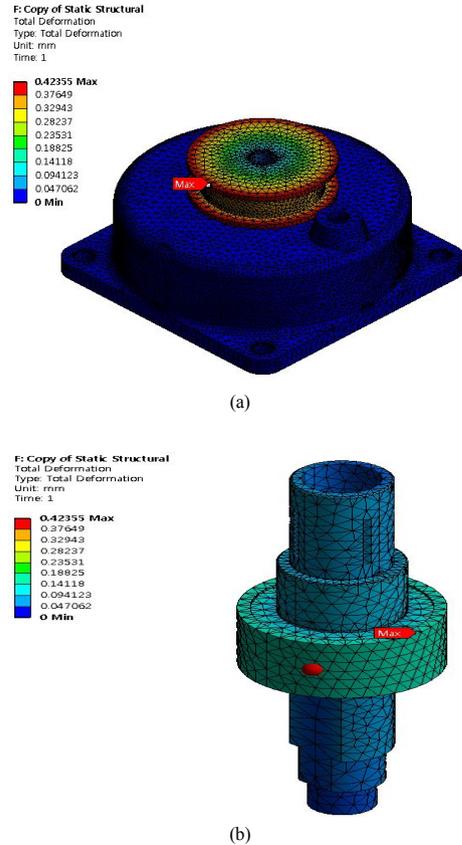


Fig. 8. Screen door motor total deformation  
(a) Total deformation  
(b) Shaft and bearing deformation

### 4.3 스크린 도어 모터 실험 검증

스크린 도어의 모터에서 발생하는 하중은 응력과 변형 값이 재료의 탄성계수 이내에 있어 이론적으로 문제가 없었다.

또한 스크린 도어 모터를 실제 구동할 때의 조건인 190rpm속도에서 부하의 변화량을 알기위해 정격 토크 (torque) 변화량과 그때의 전류 변화량을 검증하였다. 결

과를 Table 3에 나타내었고, 시험 과정을 Fig. 10에 나타내었다.



Fig. 10. Screen door durability test

Table 3. Screen door motor torque measurement

Case	Torque(Nm)
1	3.05
2	3.01
3	3.05
4	3.04
5	3.03

시험 성적서 상에서 토크의 변화량을 측정하였을 때 변화 값의 편차가 거의 없음을 확인할 수 있었고, 190rpm으로 구동될 때 모터의 토크 변화에 영향을 미치는 입력 전류를 측정한 결과는 Table 4와 같이 변화가 미세하게 나타났지만 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다.

Table 4. Screen door motor electric current measurement

Case	Electric current(A)
1	1.91
2	1.85
3	1.90
4	1.91
5	1.90

따라서 정격 속도를 내기 위한 모터의 토크 변화량도 미세할 뿐 아니라 토크에 영향을 미치는 입력 전류도 미세하여, 정격 속도에 미치는 부하의 영향은 거의 없다고 판단된다.

그리고 실험 결과 값들을 검증하기 위해 실제 스크린 도어 제품의 BLDC 모터 및 인버터(inverter)를 이용하여 간이 도어 열림, 닫힘의 내구 시험기를 제작하여 개폐

회수를 1,000,000회 이상 실시하는 내구 시험을 진행하였다.

총 1,000,000회 내구성 시험을 실시한 결과 스크린 도어 구동에는 이상이 없었으며, 내구 시험기는 Fig. 10에 나타내었고, 내구 시험 횟수는 Fig. 11에 나타내었다.[9]

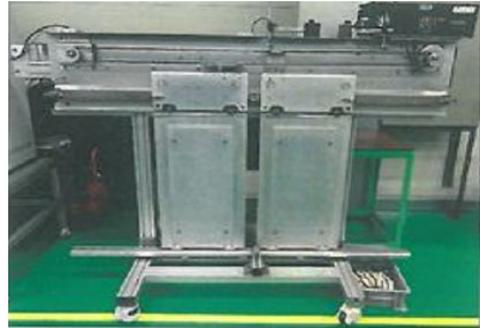
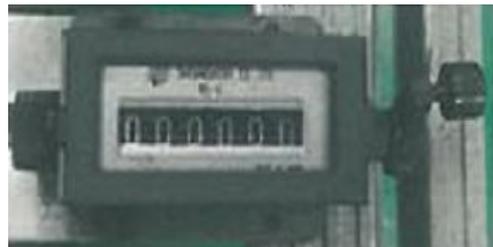


Fig. 10. Screen door durability tester



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Screen door open and shut number identify

- (a) Beginning state
- (b) Middle state
- (c) Final state

## 5. 결론

본 논문에서는 스크린 도어 시스템이 동하중 상태에서 구동될 때, 모터 내부의 샤프트와 베어링의 구동 강성에 대한 검증을 실시하였다. 동하중을 받는 모터의 강성 해석을 위해 CATIA로 모델링하였고, ANSYS로 스크린 도어 모터의 샤프트 및 베어링이 190rpm의 구동 하중을 받는 조건에서 강성 해석을 수행하고 실험으로 검증하였다.

1. 스크린 도어 모터에서 발생하는 하중을 구하기 위해 벨트와 모터 풀리 사이에 작용하는 이론적 힘을 구하고, 그 값을 기준으로 강성 해석의 구동조건을 실제와 근사하게 선정하여, 정격 속도 190rpm에서 해석을 진행하였다.
2. 해석 결과는 응력과 변형율이 각 150.5MPa, 0.42mm로 탄성범위 내에 있음을 알 수 있었다.
3. 또한 정격 속도 190rpm 구동 시 스크린 도어 모터에 걸리는 하중의 변화를 알기 위해 토크와 전류 변화를 측정하였으나 미세하게 변화하여 큰 영향이 없음을 검증하였다.
4. 실제 구동되는 조건과 동일하게 내구 시험기를 제작하여 도어 열립, 단힘의 내구 시험을 1,000,000회 실시하였고, 구동 강성에 이상이 없음을 확인하였다.

해석은 Direct Drive BLDC 모터를 적용한 스크린 도어 시스템에서 모터가 작동되는 실제 구동 조건들로 수행하였으며, 이를 위해 기존 스크린 도어 시스템을 단순화하여, 지속적인 작동 및 구동 간에 발생하는 효율 저하 및 저 수명의 한계를 극복하고자 하였다.

해석의 신뢰도를 높이기 위해 스크린 도어 내부 시스템의 실제 재질 및 특성을 적용하였고, 이는 해석 시 발생하는 오차 범위를 최소화 할 것으로 기대된다.

본 해석 결과는 스크린 도어 모터를 구성하고 있는 부품인 풀리, 샤프트, 베어링의 강성 및 전체 변형량을 확인하여 실제 스크린 도어 시스템 부품의 경량화에 적용할 수 있기 때문에 원가 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] J. H. Lee and S. B. Lee, "Subway Screen Door Shaft Axial Stiffness Optimization" Keimyung University, Bull. I.I.S. Vol. 37-1, 2014.
- [2] J. Y. Kim, "Optimal Screen Door System Design Technology Development for Environmental

Improvement and Urban Rail Disaster", Transaction of Sarek, No.3, pp45, 2005.

- [3] T. S. Keon, "Domestic and International Metro Equipment Design Latest Technology Trends", pp.3, Dae Yang Gong Jo, 2002.
- [4] H. Y. Woo, Sang-Hee Lee, Hee-Seung Lee, "Study on Subway Platform Screen Doors Introduction", Seoultech University, 2003.
- [5] B. S. Jang, "Metro Platform Screen Doors Introduces the Background and National Status", Equipment Journal, Vol. 9, No. 32, pp. 17~19, 2003.
- [6] W. P. Lee and M. S. Han, "Mechanical Element Design", Cheongmungak, pp. 410~412, 2000.
- [7] W. P. Lee and M. S. Han, "Mechanical Element Design", Cheongmungak, pp. 413~415, 2000.
- [8] H. Y. Na, "A Study on the Satisfaction of Safety According to The Installation of Subway Station Platform Screen Doors", Mater's Thesis, Keimyung University.
- [9] J. Y. Lee, K. B. Shin, B. J. Ryu, J. S. Jeon, D. H. Kim and E. K. Lee, "Evaluation of the Structural Stability of Platform Screen Door", Journal of the Korean Railway, Vol. 31, No. 45, pp. 7~14, 2006.

### 이 중 현(Jung-Hyun Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 계명대학교 기계자동차공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

자동차 전자장치, 지능형 자동차

### 이 선 봉(Seon-bong Lee)

[정회원]



- 1993년 1월 ~ 2005년 4월 : 대우정밀(주) 기술연구소 수석연구원
- 2004년 2월 : 부산대학교 대학원 기계공학 (공학박사)
- 2005년 5월 ~ 2007년 2월 : 대구경북과학기술원 지능형자동차 연구팀장
- 2009년 11월 ~ 2015년 2월 : 대구경북자동차부품진흥원 원장
- 2007년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

자동차 전자장치, 지능형 자동차