



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년

2016년 2월  
석사학위 논문

2월

석사학위논문

# 전기자 분산배치 PMLSM의 단부 디텐트력 저감을 위한 보조치 최적설계

전기자 분산배치 PMLSM의 단부 디텐트력  
저감을 위한 보조치 최적설계

조선대학교 대학원

전기공학과

김민석

김민석

# 전기자 분산배치 PMLSM의 단부 디텐트력 저감을 위한 보조치 최적설계

Optimal Design of Auxiliary Teeth for Reducing End Detent  
Force of Stationary Discontinuous Armature PMLSM

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

김 민 석

# 전기자 분산배치 PMLSM의 단부 디텐트력 저감을 위한 보조치 최적설계

지도교수      김    용    재

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

김    민    석

## 김민석의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>曹錦培</u> 
위원	조선대학교	교수	<u>崔孝祥</u> 
위원	조선대학교	교수	<u>金容載</u> 

2015년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

I . 서 론 .....	1
II . 이론적 고찰 .....	3
A. 장거리 반송시스템 영구자석 선형 동기전동기 .....	3
1. PMLSM의 동향 .....	3
2. 장거리 반송용 PMLSM .....	4
B. 전기자 분산배치 PMLSM .....	6
1. 전기자 분산배치 시스템 .....	6
2. 전기자 분산배치 PMLSM의 특성 .....	7
3. 전기자 분산배치 PMLSM의 디텐트력 .....	9
III . 단부 디텐트력 저감을 위한 보조치 모델링 .....	11

A. 아크형 보조치 형상 .....	11
B. 아크형 보조치의 형상 변수에 따른 설계 .....	12
IV. 실험계획법에 의한 고찰 .....	15
A. 다구치 계획법을 이용한 보조치 설계 및 분석 .....	15
1. 실험계획법 .....	15
2. 직교배열표 및 주효과 그래프 분석 .....	17
3. S/N비 및 변수의 기여율 분석 .....	19
B. 아크형 보조치의 최적 형상 .....	20
1. 교호항을 고려한 아크형 보조치의 최적 모델 .....	20
2. 회귀분석을 이용한 보조치 최적 설계 검토 .....	23
3. 추정 회귀식의 적합도 판별 .....	25
V. 결    론 .....	28

## 참고문헌

## 표 목차

Table 1. Reduction ratio according to the armatures arrangement.....	5
Table 2. Specifications of the experimental device.....	7
Table 3. Characteristics for each detent force reduction method.....	10
Table 4. Factor and level of arc-shaped auxiliary teeth.....	17
Table 5. Orthogonal arrays of $L_9(4^3)$ .....	17
Table 6. Calculation of contribute ratio.....	19
Table 7. The modified factors and levels of arc-shaped auxiliary teeth...	21
Table 8. The $L_{27}(4^3)$ orthogonal array with interaction AB,AC,AR.....	21
Table 9. Significance level of factor.....	23
Table 10. Variance analysis of orthogonal array with interaction AB, AC, AR.....	25
Table 11. Error factor and residual of orthogonal array and estimated regression equation with interaction AB, AC, AR.....	27

## 그림 목차

Fig. 1. Schematic of armature arrangement.....	4
Fig. 2. Forces by the mover at the end edge of armature.....	6
Fig. 3. 3-D numerical analysis model.....	7
Fig. 4. Detent force in conventional model.....	8
Fig. 5. Detent force reduction methods.....	9
Fig. 6. Variable of arc-shaped auxiliary teeth.....	11
Fig. 7. Specifications of arc-shaped auxiliary teeth .....	12
Fig. 8. The procedure of Taguchi method.....	16
Fig. 9. Main effect plot of $L_9(4^3)$ .....	18
Fig. 10. Main effect plot of $L_{27}(4^3)$ .....	20
Fig. 11. Comparison of end detent force with conventional model and optimal model.....	22

## ABSTRACT

### Optimal Design of Auxiliary Teeth for Reducing End Detent Force of Stationary Discontinuous Armature PMLSM

Min-Seok Kim

Advisor : Prof. Yong-Jae Kim, Ph. D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

Permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM), which uses system resources as a permanent magnet, has a high thrust-to-weight ratio and thus is capable of high-speed and high-thrust operation in the linear motion system. Though the PMLSM has been suggested for use in the field of long-distance transport system due to this feature, it has a problem of material costs and production time increasing in proportion to the distance because of the characteristics of linear motors that the armature needs to be installed on the full length of the transport path. In order to solve this problem, an armature distribution system which has the armature installed only on acceleration and deceleration parts is proposed, to reduce the material cost and production time. However, the stationary discontinuous armatures system does not have armatures in the parts where acceleration/deceleration of the mover is not required and thus, due to its structure, there must be ends of the armatures. The armature ends significantly increases the detent force that acts as a cause of vibration and/or noise from the armature, lowering the device performance. Inspired by the shape of the double auxiliary teeth, we proposed arc-shaped auxiliary teeth that could represent the change of air-gap gradually while maintaining a simple structure of the conventional auxiliary teeth. In addition, we completed the optimal design by designating each variable for effective application of the arc-shaped auxiliary teeth.

For designing the new auxiliary teeth, Taguchi's design of experiment was used, with which the impact of each factor on the objective function were analyzed and a model suitable for reducing the end detent force was derived. Each model was numerically analyzed using finite element method (FEM) based on 3-D numerical analysis.

## 1. 서 론

국내·외에서는 석유자원의 고갈과 지구 온난화 등으로부터 발생하는 에너지 부족 현상을 해결하기 위해 반송분야에서 에너지 소비가 많은 기기의 효율을 향상시키려는 방안이 다각도로 검토되고 있다. 또한 반송분야의 기계기술의 고도화 및 자동화가 가속화 되면서 고속 기기 및 고효율 기기를 사용하는 반송시스템을 요구하고 있다[1].

기존의 반송분야에서 직선추력을 구현하기 위해선 래크와 피니언, 스크류와 너트 등의 기계적 변환장치를 사용해야한다. 하지만 기계적 변환장치의 사용은 기기의 부동작을 초래하는 경년변화, 마찰에 의한 손실, 유지 보수 점검으로 인한 비용 상승, 기계적 변환장치 사용으로 인한 복잡한 구조 등의 문제를 가진다[2]-[4].

이에 직선추력을 요구하는 분야에서는 기계적 변환장치를 사용하는 회전형 시스템과 달리 직접 동력 전달이 가능하고 이러한 문제를 해결할 수 있는 영구자석 선형 동기 전동기(PMLSM)가 대체 구동원으로 주목 받고 있다. 또한 공장자동화 분야 및 교통분야 등 적용범위가 확대 및 대형화 되면서 장거리 반송분야 적용에 대한 연구사례가 증가하고 있다.

하지만 PMLSM을 장거리 반송시스템에 적용하면 전기자를 반송구간 전 영역에 설치해야 하기 때문에 거리가 증가함에 따라 재료비용 및 제작시간이 상승하게 되는 문제점이 발생한다[5]-[8]. 이에 가동자를 가속 및 감속 시키는 부분에만 전기자를 분산하여 설치하는 시스템을 제안하여 재료비용 및 제작시간의 문제를 해결할 수 있는 대책이 제시되고 있다. 전기자 분산배치 시스템은 반송경로 전 영역의 전기자에서 가동자의 가속 및 감속이 필요하지 않는 부분의 전기자를 제거하는 것으로, 시스템의 구조상 반드시 단부가 존재하게 된다.

하지만 전기자의 단부는 기기 구동성능을 방해하고 가동자의 진동 및 소음을 유발하여 디텐트력을 크게 증가시키므로 기기의 운전 시 성능을 저하시키는 치명적인 문제점을 발생시킨다. 전기자의 단부에서 발생하는 단부 디텐트력 저감에는 일반적으로 보조치를 사용하며 가동자의 이동방향에 따라 공극의 변화를 조절한 더블형 보조치가 더 효과적임이 본 연구실의 연구를 통해 확인된 바 있다. 하지만 더블형 보조치에서 고려되어야하는 설계변수는 6종류에 달하기 때문에 설계 변수 간 상호작용이 복잡하며 최적 설계를 위해 해석해야 할 모델의 경우의 수 또한 다양하므로 설계하는데 어려움이 있다. 이에 더블형 보조치의 형상에 착안하여 기존의 보조치와 같이 단순한 구조를 유

지하면서 공극의 변화를 완만하게 나타낼 수 있는 아크형 보조치를 제안하였다. 또한 아크형 보조치의 효과적인 적용을 위해 각 변수를 지정하였고 다구치 실험계획법을 이용하고자한다.

하지만 다구치 실험계획법을 사용할 경우 각 변수들의 상호작용인 교호작용에 대한 영향에 대한 분석이 어려운 단점이 있으므로 최적 값에 근사하는 결과 값을 도출하는데 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하고자 각 변수들에 대한 최소한의 실험 횟수로 실험을 진행하여 각 변수가 목적함수에 미치는 기여율을 분석하고 목적함수에 가장 크게 영향을 미치는 변수를 선정하여 해당 변수의 교호작용을 고려한 아크형 보조치 최적설계를 진행하였고 단부 디텐트력 저감에 적합한 모델을 도출하고자 한다. 또한 도출된 결과 값에 대해 적합성을 판별하기 위해 통계적인 관점에서 추정회귀식과 결정계수, 추정 회귀식에 대한 잔차와 오차율을 분석하여 최적 설계 과정에 대한 신뢰성을 확보하고자 한다.

## II. 이론적 고찰

### A. 장거리 반송시스템 영구자석 선형 동기전동기

#### 1. PMLSM의 동향

전세계적으로 첨단 반송시스템에 대한 이목이 집중되면서 2000년도 이후 우리나라에서는 경제발전의 주요 방책으로 물류 이송기술에 대한 지원정책인 국가물류기본계획을 수립하면서 장기적인 관점에서 5대 추진전략을 제시하였다.

현재 세계 리니어 모터 산업은 1990년대부터 미국에서 시장을 선점하였고 독일, 일본 또한 PMLSM 관련 기술 개발에 대한 다양한 성과를 보이고 있다.

국내 리니어 모터 산업은 영구자석형 선형 동기전동기를 다양한 분야에 적용하여 미국, 일본, 유럽 등의 지속적인 경쟁을 위해 응용제품을 개발하고 있지만 선진국과 물류장비기술에서 5년정도의 격차를 보이고 있어 수평형 반송장치 보다는 수직형 반송장치인 적재 시스템에 대한 연구가 활발한 실정이다.

하지만 최근 주변장치의 발달로 인한 제조원가 절감 및 기술 고도화로 국내에서도 독일 Linear Motor-based Transfer Technology와 같이 수평·수직전환이 유용하며 장거리 운용이 가능한 반송시스템 도입이 이루어지고 있으며 지속적으로 반송시스템 비용 저감, 고속·고효율에 대한 개선을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

## 2. 장거리 반송용 PMLSM

직선추력을 요구하는 분야에서 기계적 변환장치를 사용하는 회전형 기기 시스템과 달리 선형 기기 시스템은 직접 직선 구동력을 발생 시키고 기계적 변환장치가 불필요하여 회전형 기기 시스템에 비해 복잡한 구조 개선과 마찰, 열, 소음 등 에너지 손실 문제를 해결할 수 있다. 또한 추력 대 중량비가 높아 고속 및 고추력 운전이 가능한 PMLSM은 공장자동화 분야 및 교통 분야 등 적용범위가 확대 및 대형화 되면서 장거리 반송분야 적용 사례가 증가하고 있지만, 반송 구간 전 영역에 전기자를 설치해야하므로 반송 구간이 증가함에 따라 재료비용 및 제작시간이 상승하는 문제점을 가진다. 일반적으로 PMLSM을 장거리 반송분야에 적용하면 그림 1 (a)과 같이 반송구간 전체에 전기자를 설치해야한다. 하지만 반송 구간이 증가할수록 전기 강판 및 코일의 사용량 증가와 부대설비 설치로 인한 재료비용 및 제작시간이 상승하므로 그림 1 (b)과 같이 재료비용 및 제작 시간의 문제를 개선하기 위해 전기자를 분산하여 배치하는 전기자 분산배치 시스템이 제시되고 있다.

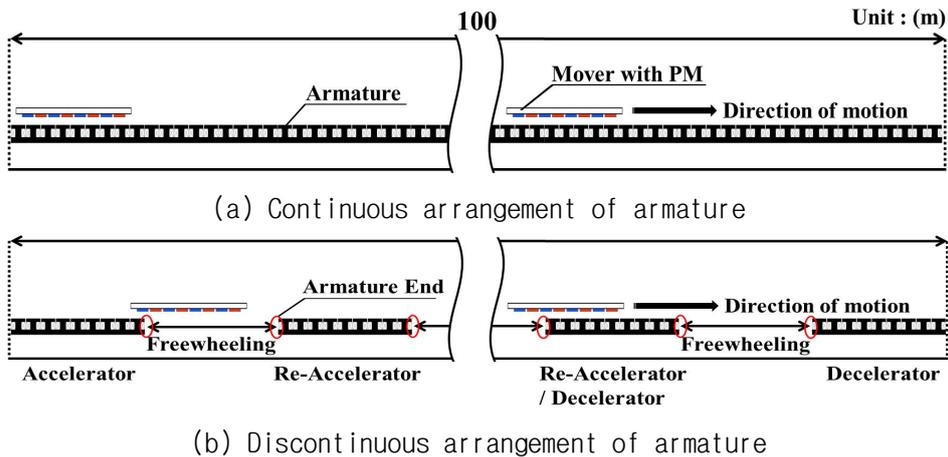


Fig. 1. Schematic of armature arrangement

이러한 전기자 분산배치 시스템은 기기 운전 시 가동자의 가·감속이 필요한 구간에만 전기자를 분산하여 배치하는 시스템으로 반송 경로가 증가할수록 재료비용 및 제작 시간을 저감할 수 있다. 만일 슬롯의 길이가 11mm이고 전기자 한 모듈이 29슬롯

(319mm)인 PMLSM을 반송구간 전영역이 100m인 구간에 전기자를 연속하여 배치하면 9090개의 슬롯이 필요하게 된다. 하지만 동일한 조건 하에 전기자 사이 간격이 1m로 가정하면 전기자 전 영역에 필요한 슬롯 수는 2198개 이다. 이러한 재료비용의 절감을 표 1과 같이 전기자 분산배치에 따른 전기자 강판 저감률로 나타내면 전기자 분산배치 시스템의 전기자 강판 사용량이 전기자 연속배치 시스템에 비해 75.81% 저감됨을 확인하였다.

이와 같이 장거리 반송 분야에서 전기자 분산배치 방식은 전기자 연속배치 시 문제되는 재료비용 및 제작시간의 문제를 개선할 수 있지만 시스템 구조상 반드시 전기자 단부가 존재하게 되고 가동자 운전 시 모든 주행구간에서 단부의 영향을 받게 된다. 이러한 단부에서는 가동자의 진동 및 소음을 유발하고 기기의 구동 성능을 방해하는 디텐트력이 발생하므로 이에 따른 개선이 필요하다.

Table 1. Reduction ratio according to the armatures arrangement

	Arrangement of armature unit[Units]	Arrange of slots[Slots]	Reduction of steel sheet [%]
Continuous arrangement armature	-	9090	-
Discontinuous arrangement armature (Distance: 1m)	75	2198	75.81

## B. 전기자 분산배치 PMLSM

### 1. 전기자 분산배치 시스템

가동자의 가속 및 감속 구간에만 전기자를 설치하는 전기자 분산배치 시스템에서 가동자는 전기자가 설치되어 있는 구간에서는 추진자계를 통해 운전하고 전기자 미설치 구간에서는 관성에 의해 운전한다. 이러한 전기자 분산배치 시스템은 전기자 연속배치 시스템에 비해 재료비용과 제작시간을 절감할 수 있지만 앞 절의 그림 1(b)과 같이 구조상 필연적으로 전기자 단부가 존재하게 되고 이와 같은 전기자 단부에서는 기기의 구동성능을 방해하는 디텐트력이 발생한다. 이때 단부에서 발생하는 디텐트력을 단부 디텐트력이라 한다. 단부 디텐트력은 철심과 영구자석 사이에서 발생하는 힘으로 가동자가 전기자에 진입 또는 반출 시 전기자 끝단에 미치는 영향을 그림 2에 나타내었다. 단부 디텐트력이 가동자의 진행방향과 같으면 양의 값으로 가동자를 가속시키는 힘이 작용하고 단부 디텐트력이 진행방향과 반대방향으로 발생하면 음의 값으로 가동자를 감속시키는 힘이 작용한다. 이러한 단부 디텐트력은 기기의 구동성능을 방해하고 가동자의 소음 및 진동을 시키므로 반드시 제거해야할 요소이다[9]-[10].

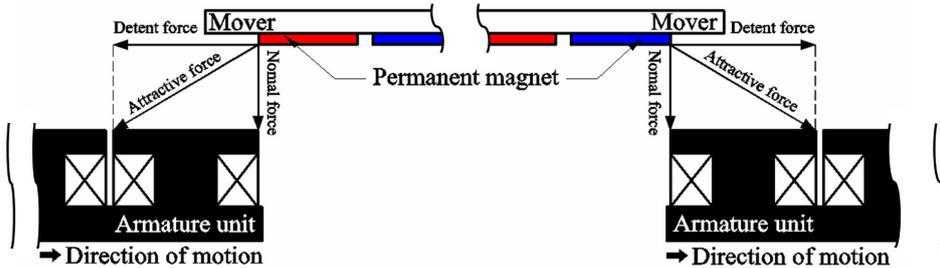


Fig. 2. Forces by the mover at the end edge of armature

## 2. 전기자 분산배치 PMLSM의 특성

본 논문에서 사용할 PMLSM의 기본모델은 8극 29슬롯으로 설정하였고 전기자 한 모듈과 가동자의 제원은 표 2와 같다. PMLSM 기본모델의 해석에는 요소 분할법 및 3D 유한요소 해석을 사용하였다. 디텐트력의 해석에 밀접한 관련이 있는 공극부분의 mesh는 1step당 이동 간격인 1mm로 분할하였다. 이에 따른 요소 수는 206,723이고 절점 수는 37,373으로 수치해석모델은 그림 3에 나타내었다. 또한 가동자가 전기자에 진입 또는 반출 시 단부 디텐트력은 힘의 방향이 양의 방향 또는 음의 방향으로 다르지만 크기가 같으므로 가동자가 전기자에 완전히 대항하는 순간부터 가동자가 전기자에 반출할 때

Table 2. Specifications of the experimental device

	Items	Value
Mover	Number of poles	8 poles
	Thickness of PM	3 mm
	Length of PM	28 mm
	Width of PM	45 mm
	Pole pitch	33 mm
	Back iron length	300 mm
Armature	Number of slots	29 slots
	Slot pitch	11 mm
	Armature length	324 mm
	Mechanical air-gap	5 mm

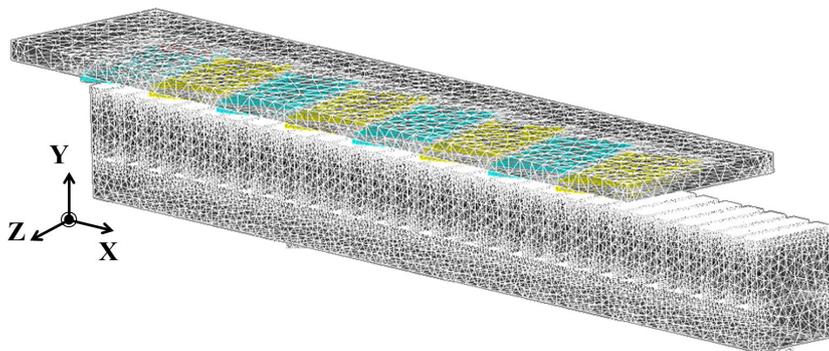


Fig. 3. 3-D numerical analysis model

까지의 과도해석을 수행하였으며 그림 4에 나타내었다. 가동자의 위치에 따른 디텐트력 분석을 위해 그림 4와 같이 Section 1과 Section 2로 나누었고 Section 1은 가동자가 전기자에 완전하게 대항하는 순간, Section 2는 가동자가 전기자로부터 반출하는 순간의 위치를 나타낸다. Section 1에서 발생하는 PMLSM의 최대 최소 단부 디텐트력은  $\pm 0.98\text{N}$ , Section 2의 최소 단부 디텐트력은  $-9.96\text{N}$ 로 나타났다. 그림 4를 통해 가동자가 전기자에서 반출하는 최소 단부 디텐트력은 가동자와 전기자가 완전히 대항하는 디텐트력 대비 최대 10배 큰 힘이 발생함을 확인하였고 이와 같은 디텐트력의 증가는 기기의 운전에 치명적인 영향으로 작용할 수 있다.

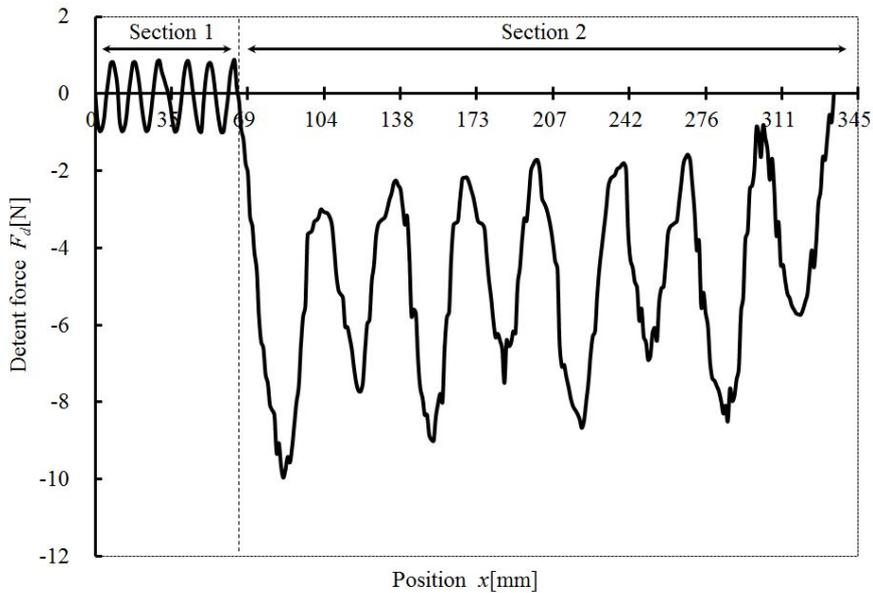


Fig. 4. Detent force in conventional model

### 3. 전기자 분산배치 PMLSM의 디텐트력 저감방법

일반적으로 기기의 성능을 저하시키는 디텐트력 저감법에는 전기자 치의 형상에 변화를 주는 바이퍼케이팅법과 치챔퍼링법, 영구자석측의 자로에 영향을 주는 보조극법, 전기자 단부의 자속 흐름에 영향을 주는 보조치법 등이 있다. 하지만 이러한 설계과정에서 기기의 추력이 동시에 저하될 우려가 있기 때문에 설계 시에는 이러한 부분의 충분한 고려가 필요하다. 따라서 우리는 디텐트력 저감을 위해 그림 5와 같은 다양한 방법을 시도하였으며 이를 표 3에 나타내었다. 표 3을 통해 바이퍼 케이팅법과 챔퍼링법은 치 디텐트력 저감에 매우 효과적임을 알 수 있다.

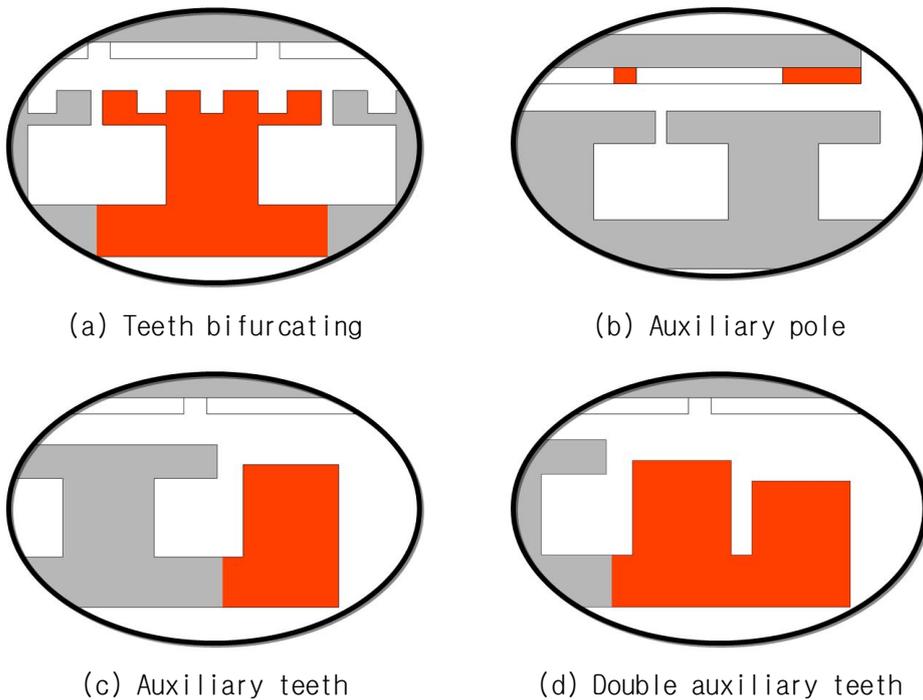


Fig. 5. Detent force reduction methods

하지만 제안한 전기자 분산배치 시스템에서 가동자가 크게 영향을 받는 힘은 단부 디텐트력이기 때문에 상기의 방법은 적합하지 않았다. 또한 이러한 방법은 공극을 증가시키는 형태이기 때문에 공극 내 자속밀도가 감소되어 역기전력과 추력에서도 불리

하게 작용한다. 따라서 우리는 단부 디텐트력 감소와 추력특성에 매우 효과적인 모델을 도출하기 위해 다양한 형태의 보조치를 분석하였다.

그 결과 그림 5(d)와 같은 더블형 보조치를 사용하는 모델이 가장 적합하였으며 그 중에서도 보조치의 형상이 상부에서 하부로 점점 하강하는 형상을 나타낼 때 단부 디텐트력의 저감에 유리함을 알 수 있었다. 하지만 더블형 보조치에서 고려되어야 하는 설계변수는 6종류에 달하기 때문에 설계 변수 간 상호작용이 복잡하며 최적 설계를 위해 해석해야 할 모델의 종류 또한 다양하여 설계하는데 어려움이 있다. 따라서 우리는 더블형 보조치의 형상에 착안하여 기존의 보조치와 같이 단순한 구조를 유지하면서 보조치의 형상이 상부에서 하부로 하강하는 아크형 보조치를 제안한다.

Table 3. Characteristics for each detent force reduction method

	Reduction methods	Reduction of teeth Fd	Reduction of end Fd	Back EMF	Thrust	Parameters
(a)	Teeth bifurcating	◎	△	×	×	3
(b)	Auxiliary pole	○	△	○	○	2
(c)	Auxiliary teeth	×	○	◎	◎	3
(d)	Double auxiliary teeth	×	◎	◎	◎	6

### III. 단부 디텐트력 저감을 위한 보조치 모델링

#### A. 아크형 보조치 형상

형상 설계 변수가 적은 단순한 구조를 유지하면서 보조치의 형상이 상부에서 하부로 하강하여 공극의 변화를 완만하게 해줄 수 있는 아크형 보조치를 그림 6과 같이 제안하였고 아크형 보조치의 형상에 따른 변수를 선정하여 나타내었다.

아크형 보조치 형상 변수는 총 4개로 보조치 높이에 영향을 미치는 변수 A, 변수 C와 보조치의 너비인 변수 B, 호의 반지름인 R로 구성된다.

아크형 보조치를 작도하기 위해서는 기준 보조치의 세로축의 길이인 C가 가로축길이인 B보다 길어지면 아크형 보조치 작도 시 공극의 변화를 완만하게 나타낼 수 없는 구조가 발생하므로 기준 보조치의 가로축의 길이인 B가 세로축의 길이인 C보다 반드시 길어야 하는 전제 조건이 필요하다.

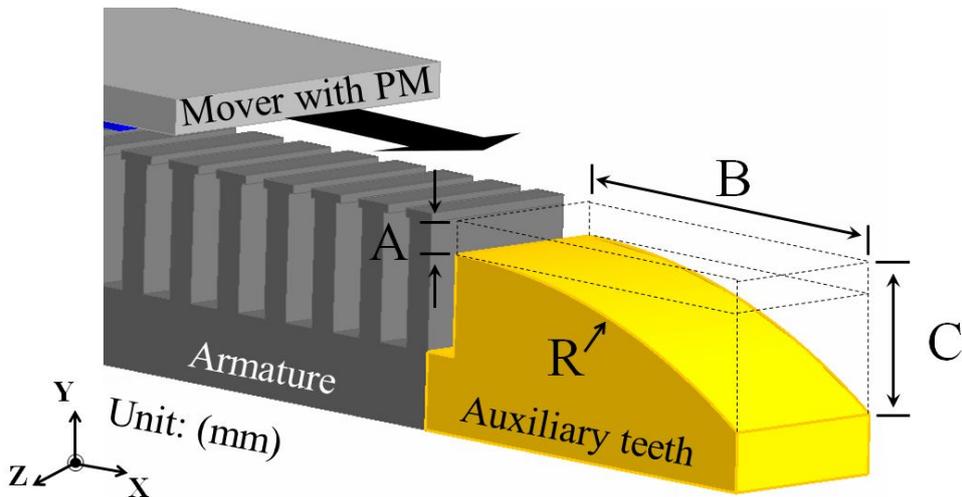


Fig. 6. Variable of arc-shaped auxiliary teeth

## B. 아크형 보조치의 형상 변수에 따른 설계

아크형 보조치의 가로축의 길이 B는 전기자의 세로 길이인 36mm의 약 2배수에 해당하고 6슬롯 피치 길이인 66로 정하였다. 또한 작도의 편의성을 위해 보조치의 좌측 상단에 기준점을 정하고 X축과 Y축을 그림 7과 같이 설정하였다.

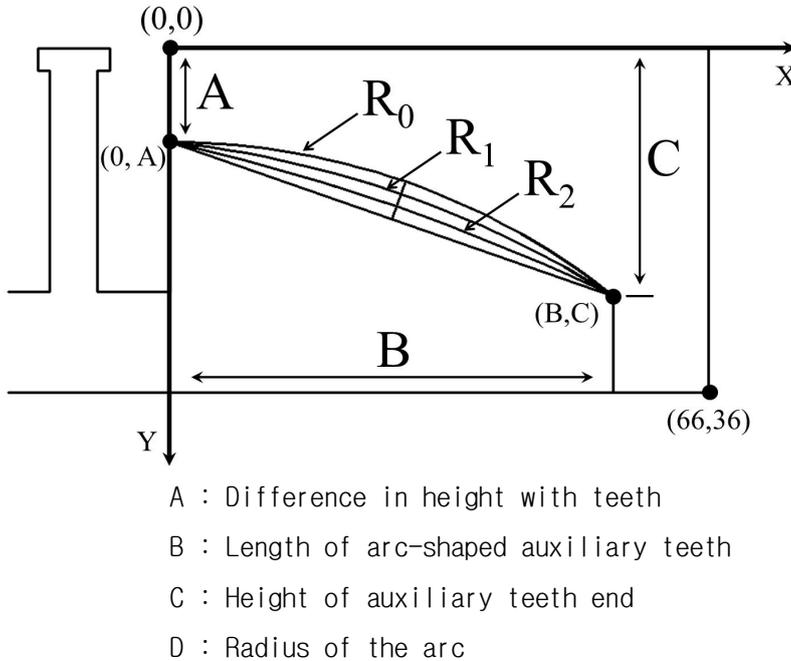


Fig. 7. Specifications of arc-shaped auxiliary teeth

아크형 보조치 아크의 작도 순서는 전기자 축 상부에서 우측 하부로 하강하는 형태로 가동자의 이동 방향으로 작도하며 변수 R을 반지름으로 하고 X축과 접하도록 한다. 아크 시작점의 X축 좌표는 0으로 Y축에 고정이고 Y축 좌표는 변수 a로 정하여 (0,a)로 나타내었다. 아크 끝점의 X축 좌표는 변수 b로, Y축 좌표는 변수 c로 정하여 (b,c)로 나타내었다. 아크의 변수를 설정하기 위해 아크의 시작점과 끝점을 직선으로 연결한 선과 작도된 아크와의 사이 간격을 그림 5 (b)과 같이 3등분하여  $R_0$ - $R_2$ 로 나타내었다.

아크의 작도에는 변수 b와 변수 c가 영향을 미치는데 만약 b의 값이 c의 값 보다 작을 경우 정해진 a, b, c의 값을 초과하여 작도된다. 따라서 변수 b가 변수 c보다 항상

크거나 같도록 설정하고 아크를 작도해야한다. 또한  $R_0$ - $R_2$ 의 값은 변수  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 의 값에 따라 계속 변하므로 다음과 같은 수식적 접근이 필요하다.

먼저  $R_0$ 의 작도 수식은 식 (1)과 같다.

$$b^2 + ((c-a) + R_0)^2 = R_0^2 \quad (1)$$

$R_0$ 를 다시 정리하면 식 (2)와 같으며 이를 통해 작도되는 아크의 사이 각도를 도출하였다.

$$R_0 = \frac{b^2 + (c-a)^2}{2(c-a)} \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{[2R_0^2 - b^2 + (c-a)^2]}{2R_0^2} \quad (3)$$

3등분한 지점의 정확한 좌표값을 구하기 위해서는  $R_0$ 의 중간점에 대한 정보가 필요하며 식 (4)와 식 (5)를 연립하여  $x$ ,  $y$ 의 좌표 값을 도출할 수 있다.

$$x^2 + y^2 + (R+a)^2 = R^2 \quad (4)$$

$$y = \frac{x}{\tan(\frac{\theta}{2})} - (a+R) \quad (5)$$

또한 변수  $R$ 을 4등분하는 각 등분점은 식 (6), 식 (7)과 같다.

$$(4-m) \frac{x - \frac{b}{2}}{4} + \frac{b}{2}, (m=0,1,2,3) \quad (6)$$

$$(4-m) \frac{\frac{a+c}{2} + y}{4} - y, (m=0,1,2,3) \quad (7)$$

앞의 식을 통해  $x_0$ ,  $y_0$ 를 원점으로 하고 각 등분점에 해당하는 반지름 값을 식(8), (9), (10)을 연립하여  $R_0$ - $R_3$ 의 값들을 도출할 수 있다.

$$x_0^2 + (y_0 + a)^2 = R^2 \quad (8)$$

$$(x_0 - b)^2 + (y_0 + c)^2 = R^2 \quad (9)$$

$$(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 = R^2 \quad (10)$$

## IV. 실험계획법에 의한 고찰

### A. 다구치 계획법을 이용한 보조치 설계 및 분석

#### 1. 실험계획법

실험계획법은 크게 요인배치법과 반응표면 분석법 두 가지로 분류할 수 있다. 여기에서 요인배치법은 완전요인배치법, 부분배치법, 플랙컷-버먼 계획법의 3가지로 소분류 된다. 먼저 완전요인배치법은 두 가지 이상인 변수의 관계를 동시에 분석하는 통계적인 실험법으로 각 변수의 모든 수준조합에서 분석이 이루어지는 방법이다. 완전요인배치법의 장점은 한 변수씩 실험을 진행하는 것보다 매우 효율적이고, 교호작용이 존재할 때 이용하는 유용한 실험계획법이며, 어떤 변수의 영향이 다른 변수의 모든 수준조합에서 추정되므로 실험조건의 모든 실험범위 내에서 유효한 결론을 도출할 수 있다. 하지만 완전 요인 배치 방법은 의한 실험은 변수의 증가에 따른 실험의 횟수가  $2^n$ 으로 기하급수적으로 늘어난다는 단점이 있다. 두 번째 방법인 부분배치법은 완전요인배치법 보다 두드러지는 특성이 있는데  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ 과 같이 실험횟수를 대폭으로 줄일 수 있는 점이다. 이 방법은 적은 실험횟수로도 많은 잠재 변수들 중에서 중요한 변수의 선별이 가능하며 고차의 교호변수에 대한 분석이 필요하지 않을 때 사용한다. 세 번째로 플랙컷-버먼 계획법이 있다. 이는 주 변수에 대한 도출에 사용되는 방법으로, 일반적으로 5 개 이상의 잠재 변수가 실험에 포함될 때 사용한다. 실험횟수는 4 의 배수로 수행하게 되며, 주 변수와 2 변수의 교호 변수가 교락 되어 있고 2 변수의 교호 변수에 대한 효과는 무시한다.

반응 표면 분석법은 목적함수에 영향을 미치는 2개 이상의 핵심 변수가 선정 되었을 때, 각 변수의 최적 결과를 도출을 위하여 사용하는 방법으로 목적함수와 변수 간에 2 차식 형태의 수학적 모형을 도출할 수 있다. 다시 말해서 2개 이상의 핵심 변수가 동시에 변화되었을 때, 목적함수의 반응 변화를 확인하는데 사용되며 변수의 수에 따라 중심합성 계획법과 박스-벤킨 계획법으로 분류된다.

직교배열을 이용하는 실험 방법은 변수 간에 직교성을 가지게 직교배열표를 작성하여 데이터를 도출하기 때문에 똑같은 실험으로도 변수의 효과에 대해 뛰어난 검출력을

가지며 정도가 더 높은 추정을 통해 최적설계를 할 수 있다. 이에 직교배열표란 교호작용을 기술적으로 판단하여 무시하여 최소한의 실험으로 목적함수의 영향도를 분석할 수 있다. 하지만 다변수 일 경우 반드시 교호작용을 고려해야하고 이러한 조건을 전제로 획기적으로 실험의 크기를 줄일 수 있도록 고안되어 정리된 표로써 어떠한 변수 간에서도 직교성이 가능하도록 만들어 놓은 표이다[11].

본 논문에서는 PMLSM의 단부 디텐트력을 저감하기 위한 아크형 보조치를 최적 설계하기 위해 4종류의 변수를 선별하였다. 또한 최적화 시간을 최대한 단축하면서 최대의 효과를 얻을 수 있는 실험계획법의 부분배치법중 하나인 다구치의 실험계획법을 그림 8과 같이 이용하여 아크형 보조치를 설계하였다.

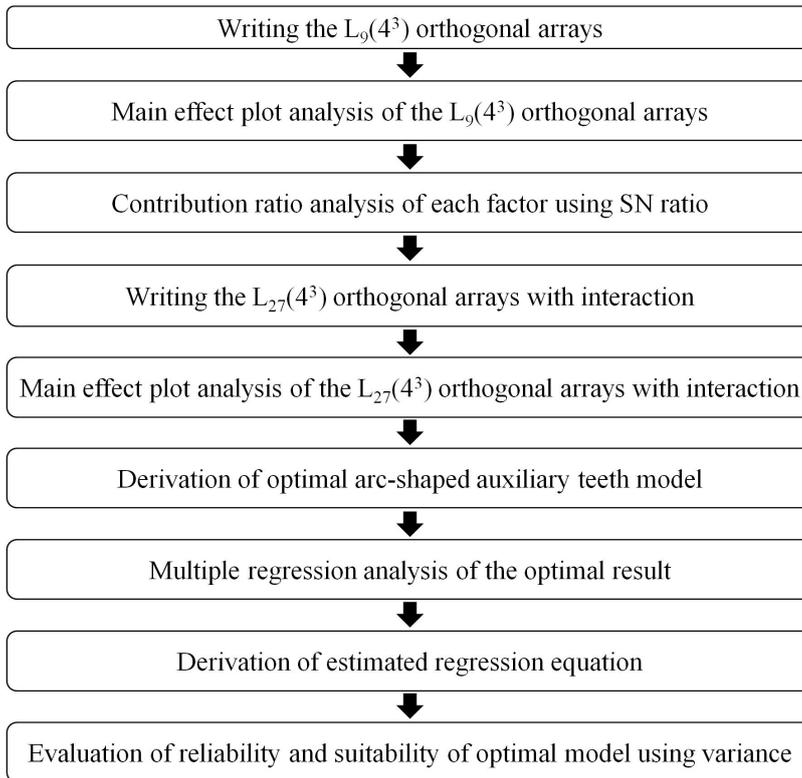


Fig. 8. The procedure of taguchi method

## 2. 직교배열표 및 주효과 그래프 분석

먼저 직교배열표를 작성하기 위해서는 변수와 수준수를 먼저 결정해야 한다. 변수는 앞 절에서 아크형 보조치의 변수인 A, B, C, R 수준은 3 수준으로 설정하였고, 총 9번의 간단한 실험으로 변수가 단부 디텐트력에 미치는 영향을 분석하였다. 표 4는 아크형 보조치의 변수와 수준에 대해 나타내었으며, 이를 통해 작성한 직교배열표를 표 5에 나타내었다.  $L_9(4^3)$ 의 직교배열표를 통해 변수 A, B, C, R이 목적함수인 단부 디텐트력에 미치는 영향을 그림 6의 각 변수를 평균값으로 분석한 주효과 그래프로 나타내었다.

Table 4. Factor and level of arc-shaped auxiliary teeth

$L_9(4^3)$	Factor			
Level	A[mm]	B[mm]	C[mm]	R[mm]
1	0	36	12	$R_0$
2	5	51	24	$R_1$
3	10	66	36	$R_2$

Table 5. Orthogonal arrays of  $L_9(4^3)$

	A[mm]	B[mm]	C[mm]	R[mm]	Detent force[N]	SN ratio
1	0	36	12	1	8.06	-18.13
2	0	51	24	2	7.83	-17.87
3	0	66	36	3	7.90	-17.95
4	5	36	24	3	8.71	-18.80
5	5	51	36	1	8.18	-18.26
6	5	66	12	2	8.66	-18.75
7	10	36	36	2	9.69	-19.73
8	10	51	12	3	9.56	-19.61
9	10	66	24	1	9.25	-19.33

주효과 그래프의 X축은 수준을 나타내고 Y축은 단부 디텐트력을 나타내며, 주효과 그래프의 각 변수 최소 지점은 아크형 보조치 최적모델의 단부 디텐트력 최소값을 나타낸다. 그림 9 주효과 그래프에서의 최소 단부 디텐트력을 갖는 3D 수치해석 결과값은 직교배열표 상의 최적 3D 수치해석 결과값이 아닌 A는 1수준, B는 2수준, C는 3수준, R은 1수준으로 나타났다. 하지만 유한요소해석 결과, A는 1수준, B는 2수준, C는 3수준, R은 1수준의 단부 디텐트력은 8.24[N]으로 직교배열표 상의 최소 단부 디텐트력 값보다 오히려 증가함을 알 수 있었다. 이러한 부정확성에 대한 원인은 적은 실험 횟수로 인해 교호작용의 누락, 비선형 효과의 누락 등으로 사료된다.

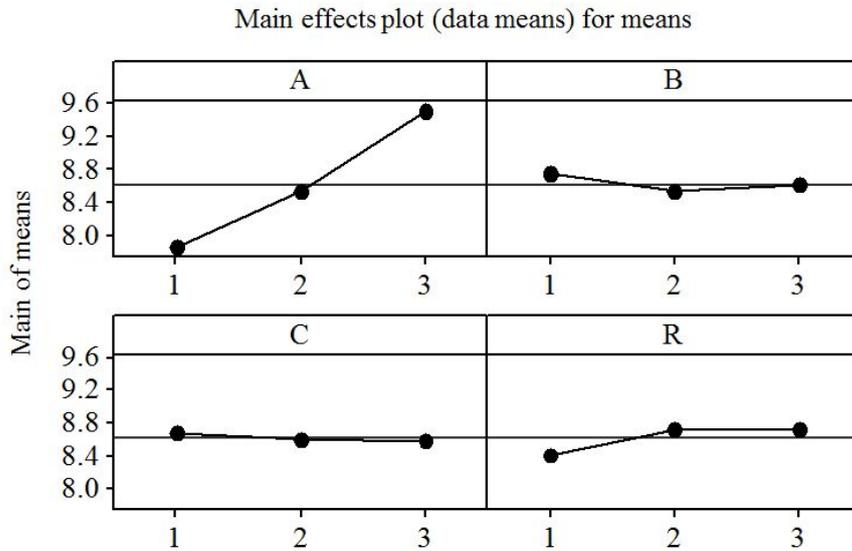


Fig. 9. Main effect plot of  $L_9(4^3)$

### 3. S/N비 및 변수의 기여율 분석

우리는 각 변수의 영향도를 정확한 수치적인 비교를 통해 분석하고자 S/N비를 바탕으로 기여율을 도출하였다. S/N비란 신호와 잡음의 비를 의미하며 공정특성의 잡음변수 영향에 대한 효과적인 추정 기법을 말한다. 본 연구에서는 목적함수의 최소값을 도출하는 망소특성을 사용하였다. 망소특성의 S/N비는 식 (11)처럼 나타낼 수 있으며 수식에 의한 각 모델별 S/N비의 값은 표 6에 나타내었다[12]-[14].

$$S/N = -10 \log_{10} \sum \frac{y^2}{n} \text{ (dB)} \quad (11)$$

여기에서  $y$ 는 해석을 통해 도출한 단부 디텐트력,  $n$ 은 반복 해석수를 나타내고 S/N비 결과 값으로 기여율을 계산할 수 있다. 기여율은 각 변수가 목적함수에 영향을 미치는 정도를 나타내는 지표로써 각 변수의 분산 총합에 따른 단일 변수의 비율을 나타내는 값이다. 표 6에 각 변수의 기여율 계산 결과, 아크형 보조치와 전기자와의 높이 차이인 변수 A는 92.57%, 보조치의 가로 길이인 변수 B는 3.59%, 보조치 끝단 높이인 변수 C는 1.52%, 보조치의 곡률 반경인 변수 R는 2.31%만큼 단부 디텐트력의 변화에 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 따라서 단부 디텐트력의 변화에 가장 많은 영향을 가지고 있는 변수 A의 수준 범위 재설정 및 교호작용을 고려한 직교배열표 제작성이 필요하다.

Table 6. Calculation of contribute ratio

	A	B	C	R	Sum
1	-17.99	-18.89	-18.83	-18.57	-224.59
2	-18.61	-18.58	-18.67	-18.79	
3	-19.56	-18.68	-18.65	-18.79	
Average	-18.72	-18.76	-18.76	-18.76	-
Sum of square	0.42	0.02	0.01	0.01	0.45
Contribute ratio[%]	92.57	3.59	1.52	2.31	100

## B. 아크정보조치 최적형상

### 1. 교호항을 고려한 아크형 보조치의 최적 모델

표 7에는 교호항 AB, AC, AR을 고려한  $L_{27}(4^3)$  직교배열표의 각 변수를 나타내었고 그림 10에는 평균값을 분석한 주효과그래프를 나타내었으며, 이때 최소 단부 디텐트력을 갖는 최적 3D 수치해석 예측 수준 변수 A는 2수준, B는 3수준, C는 3수준, R은 2수준으로 표 8의 직교배열표상의 단부 디텐트력 최소값과 동일하게 나타났다. 또한 교호작용을 고려한 설계의 단부 디텐트력 저감성을 확인하기 위해 교호항 AB, AC, AR을 고려한  $L_{27}(4^3)$  직교배열표와 교호항을 고려하지 않은  $L_9(4^3)$  직교배열표의 최소 및 평균 단부 디텐트력 값을 비교하였다. 교호항 AB, AC, AR을 고려한 직교배열표에서 평균 단부 디텐트력은 7.7[N]으로 교호항을 고려하지 않 8.72[N]보다 1.02[N]이 감소하였고, 최소 단부 디텐트력은 7.83[N]에서 6.96[N]으로 0.87[N]이 저감됨을 알 수 있었다.

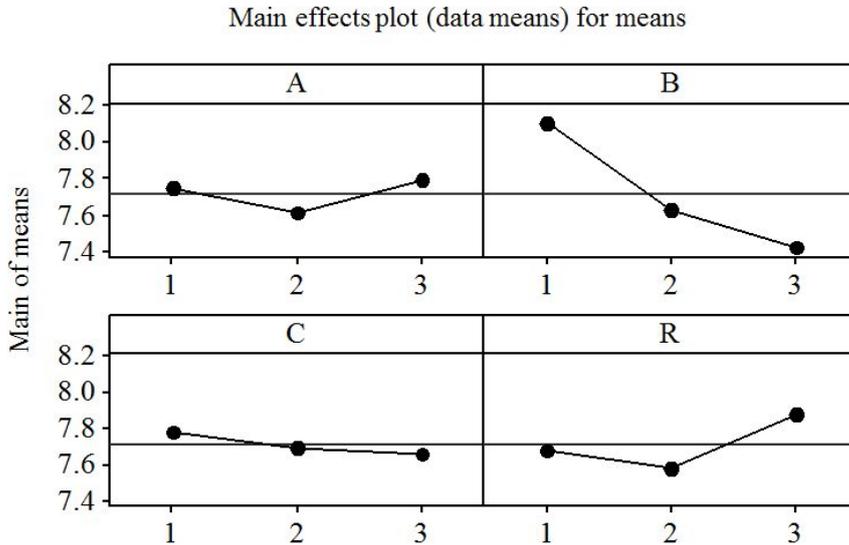


Fig. 10. Main effect plot of  $L_{27}(4^3)$

Table 7. The modified factors and levels of arc-shaped auxiliary teeth

L <sub>27</sub> (4 <sup>3</sup> ) Level	Factor			
	A[mm]	B[mm]	C[mm]	R[mm]
1	0	36	12	R <sub>0</sub>
2	1	51	24	R <sub>1</sub>
3	2	66	36	R <sub>2</sub>

Table 8. The L<sub>27</sub>(4<sup>3</sup>) orthogonal array with interaction AB,AC,AR

	A[mm]	B[mm]	C[mm]	R[mm]	Detent force[N]	SN ratio
1	1	1	1	1	7.82	-17.87
2	1	1	2	2	8.38	-18.47
3	1	1	3	3	8.28	-18.36
4	1	2	1	2	7.84	-17.89
5	1	2	2	3	7.57	-17.58
6	1	2	3	1	7.61	-17.62
7	1	3	1	3	7.46	-17.45
8	1	3	2	1	7.68	-17.71
9	1	3	3	2	7.10	-17.02
10	2	1	1	1	7.90	-17.95
11	2	1	2	2	7.80	-17.84
12	2	1	3	3	8.40	-18.48
13	2	2	1	2	7.57	-17.59
14	2	2	2	3	7.49	-17.49
15	2	2	3	1	7.43	-17.42
16	2	3	1	3	7.65	-17.67
17	2	3	2	1	7.29	-17.25
18	2	3	3	2	6.96	-16.85
19	3	1	1	1	8.10	-18.17
20	3	1	2	2	7.69	-17.72
21	3	1	3	3	8.53	-18.62
22	3	2	1	2	7.86	-17.91
23	3	2	2	3	7.70	-17.73
24	3	2	3	1	7.61	-17.63
25	3	3	1	3	7.85	-17.90
26	3	3	2	1	7.68	-17.71
27	3	3	3	2	7.08	-17.00

따라서 교호항 AB, AC, AR을 고려한  $L_{27}(4^3)$  직교배열표를 통해 도출한 최소 단부 디텐트력을 갖는 변수 A는 2수준, B는 3수준, C는 3수준, R은 2수준으로 그림 11에 PMLSM의 기본모델 단부 디텐트력과 비교하여 분석하였다.

3D 수치해석 결과 교호항 AB, AC, AR을 고려한  $L_{27}(4^3)$  직교배열표를 통해 도출한 최소 단부 디텐트력은 6.96[N]으로 예측 한 값과 거의 동일 함을 확인하였다. 이와 같은 결과는 적은 실험 횟수로 인해 교호작용의 누락, 비선형 효과의 누락 등으로 인한 부정확성에 대한 문제를 해결할 수 있었다. 또한 아크형 보조치 최적 모델의 단부 디텐트력은 6.96[N]으로 PMLSM의 기본 모델인 9.96[N]에 비해 69.87% 저감됨을 확인하였다.

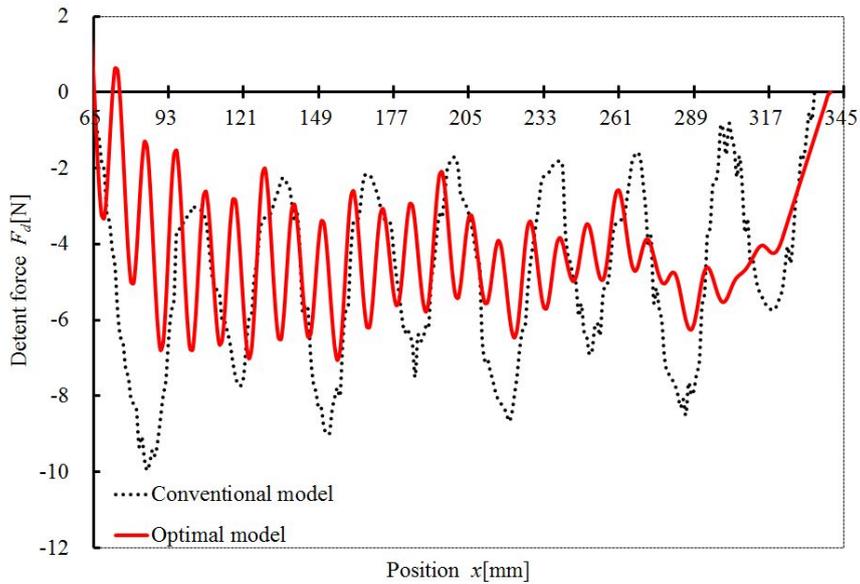


Fig. 11. Comparison of end detent force with conventional model and optimal model

## 2. 회귀분석을 이용한 보조치 최적 설계 검토

본 연구에서 작성한 직교 배열표의 통계적인 유의성 및 적합성을 검토하기 위해 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 방식에는 크게 단순회귀분석과 다중회귀 분석으로 나뉜다. 단순회귀분석은 독립변수와 종속변수가 1개이며 이들 사이의 관계를 직선관계로 가정하고 회귀분석을 수행하는 것이다.

하지만 일반적으로 대부분의 공업적 또는 사회적 현상을 설명할 때에는 종속변수에 영향을 미치는 독립변수의 수가 일반적으로 반드시 두 개 이상이다. 따라서 본 연구에서는 두 개 이상의 독립변수가 사용되기 때문에 다중 회귀분석을 하였고, 유의 수준 P 값을 0.05로 가정하는 신뢰수준 95%의 표 9와 같이 분산분석표를 사용하였다.

Table 9. Significance level of factor

Factor	Y intercept	A	B	C	R	AB
Coefficient	7.83	-0.47	-0.00	-0.09	0.45	0.87
P-value	< 0.01	0.03	0.99	0.43	0.02	0.00
Factor	AC	AR	BR	ABC	ABCR	-
Coefficient	0.78	-0.68	-0.21	-0.63	0.14	
P-value	0.001	0.004	0.01	0.001	0.000	

분산 분석은 각 집단의 분산을 분석하지만 실제로는 각 집단의 평균이 동일하다고 가정하고 기존 가설과 새로운 가설을 비교 검증하는 방법이다. 본 연구에서는 ‘독립변수인 각 변수는 종속변수인 단부 디텐트력과 관련이 없다’ 라는 가설을 세우고 이러한 주장에 대해 기각할 확률을 일반적인 0.05%로 가정하였으며 유의 수준 p값 0.05라 기준하였다.

이에 각 항들의 유의수준 P값이 0.05이하 일 경우 ‘각 변수는 단부 디텐트력과 관계가 없다’ 는 기존 가설이 기각되고 ‘각 변수는 단부 디텐트력과 관계가 있다’ 는 새로운 가설이 성립된다 하고 유의수준 P값이 0.05이상 일 때를 유의하지 않는 항으로 간

주하여 해당 항을 순차적으로 제거하였다.

따라서 교호항 AB, AC, AR을 고려한 다구치 실험계획의 단부 디텐트력 3D 수치해석 값을 기반으로 하여 변수 A, B, C, R의 다중 회귀분석을 수행한 결과, 표 9의 P-값이 0.05이상으로 나타난 제곱항  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$ ,  $R^2$ 과 교호작용 항 BC, CR, ABR, ACR, BCR항이 유의하지 않는 변수로 판명되어 순차적으로 제거하였고, 식 12에 교호항 AB, AC, AR을 고려한  $L_{27}(4^3)$  직교배열표의 3D 수치해석 결과 값을 기반으로 한 추정 회귀식을 나타내었다. 여기에서 변수 A, B, C, R은 각 모델 변수의 수준을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \text{Prediction detent force} = & 7.827316 - 0.47698A - 0.00111B - 0.09119C \\
 & + 0.44695R + 0.868688AB + 0.785024AC \\
 & - 0.6761AR - 0.21536BR - 0.63528ABC \\
 & + 0.141245ABCD
 \end{aligned} \tag{12}$$

### 3. 추정 회귀식의 적합도 판별

일반적으로 추정 회귀식의 신뢰성 및 적합도는 F비의 값, 결정계수( $R^2$ ) 그리고 회귀식의 잔차에 의한 오차율로 측정할 수 있다. 먼저, F비를 이용하여 적합성을 분석하기 위해 표 10에 교호항 AB, AC, AR을 고려한  $L_{27}(4^3)$  직교배열표의 3D 수치해석 결과 값을 기반으로 한 분산 분석표를 나타내었다. 표 10에서 DF는 주어진 조건을 기준하여 자유롭게 변동이 가능한 수 있는 점의 수를 나타내며, SSR은 회귀제곱합, SSE는 잔차제곱합, MSR은 각각의 평균제곱을 나타낸다. 또한 F-value는 F-검정을 위한 검정통계량으로 회귀방정식이 데이터의 성질을 설명하는데 유의성에 대한 검정을 나타내고 p-value는 유의확률로써 우리는 앞 절과 같이 회귀분석 절차로 설계된 모형이 0.05 (일반적으로 0.1, 0.05 또는 0.01이하)로 될 경우 유의하다고 결정하고 분석을 수행하였다[15]. 분석 결과, 교호항 AB, AC, AR을 고려한 직교배열표의 F비 유의확률은  $3.29E-05$ 로 앞 절에 세운 ‘독립변수인 각 변수는 종속변수인 단부 디텐트력과 관련이 없다’ 라는 기존 가설이 기각되고 ‘각 변수는 단부 디텐트력과 관련이 있다’ 라는 새로운 가설이 성립되어 통계적으로 유의함을 확인하였다.

Table 10.Variance analysis of orthogonal array with interaction AB, AC, AR

	DF	SS <sup>1)</sup>	MS <sup>2)</sup>	F <sup>3)</sup>	P-value <sup>4)</sup>
Regression	9	3.90	0.43	9.99	< 0.001
Residual error	17	0.74	0.04	-	-
Total	26	4.64	-	-	-

- 1)  $SS_{Regression} = \sum(\hat{y} - \bar{y})^2$  ,  $SS_{Error} = \sum(y - \bar{y})^2$
- 2)  $MS_{Regression} = SS_{Regression}/k$  ,  $MS_{Error} = SS_{Error}/n - k - 1$
- 3)  $F = MS_{Regression}/MS_{Error}$
- 4)  $P - value < 0.05$

결정계수는 종속변수의 전체 변이 중 회귀식으로 설명할 수 있는 크기를 나타내는 것으로 식 13과 같이 회귀분산/총 분산으로 정의 된다. 이러한 결정계수는 식 14의 총

제곱합(SST)에 의해 식 15의 1-오차분산/총 분산으로 변형시킬 수 있다. 따라서 결정 계수( $R^2$ )는 종속변수의 전체 변이중에서 회귀식으로 설명되는 분산의 비율로 교호항 AB, AC, AR을 고려한 직교배열표의 결정계수는 88%임을 알 수 있었다. 하지만, 결정계수는 변수가 많아질수록 결정계수가 증가하는 문제점이 있기 때문에 회귀모형의 모집단 결정계수의 적합도를 고려하여 자유도를 반영하면 보다 확실한 데이터를 얻을 수 있으며, 교호항 AB, AC, AR을 고려한 직교배열표의 조정된 결정계수는 81%를 나타내었다. 표 11은 교호항 AB, AC, AR을 고려한 직교배열표의 3D 수치해석 결과값과 추정회귀식의 잔차 및 오차율을 비교하였다. 직교배열표 상 최소 단부 디텐트력 값은 6.96[N]으로 다중회귀분석을 통해 도출된 추정회귀식의 예측 단부 디텐트력 7.10[N]과 1.38%의 오차율을 나타냈다. 또한 추정 회귀식과 교호항을 고려한 직교배열표의 3D 수치해석 결과값을 비교 시 평균 오차율은 1.58%로 거의 일치하여 본 논문에서 제시한 최적 설계 값이 통계적으로 신뢰성이 높은 자료임을 확인하였다.

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 = \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 + \sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2 \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (15)$$

Table 11. Error factor and residual of orthogonal array and estimated regression equation with interaction AB, AC, AR

	Prediction Value[N]	Residual	Detent force[N]	Error factor [%]
1	7.97	-0.15	7.82	1.91
2	8.01	0.37	8.38	4.41
3	8.33	-0.05	8.28	0.65
4	7.75	0.08	7.84	1.08
5	7.65	-0.08	7.57	1.05
6	7.54	0.06	7.61	0.83
7	7.39	0.07	7.46	0.94
8	7.50	0.18	7.68	2.39
9	7.11	-0.01	7.10	0.14
10	7.98	-0.08	7.90	0.99
11	7.91	-0.12	7.80	1.51
12	8.42	-0.02	8.40	0.23
13	7.74	-0.17	7.57	2.21
14	7.60	-0.11	7.49	1.51
15	7.52	-0.09	7.43	1.23
16	7.64	0.01	7.65	0.18
17	7.56	-0.27	7.29	3.73
18	7.07	-0.11	6.96	1.58
19	7.99	0.11	8.10	1.37
20	7.82	-0.13	7.69	1.72
21	8.50	0.03	8.53	0.32
22	7.73	0.13	7.86	1.71
23	7.56	0.14	7.70	1.80
24	7.49	0.12	7.61	1.52
25	7.89	-0.04	7.85	0.49
26	7.62	0.06	7.68	0.82
27	7.02	0.06	7.08	0.83

## V. 결론

본 논문에서는 장거리 반송장치용 PMLSM의 초기코스트 상승 문제를 개선하기 위해 전기자 분산배치 시스템을 제안하였다. 또한 제안된 시스템의 단부 디텐트력 증가의 문제점을 해결하기 위해 단부 디텐트력 저감에 효과적이었던 더블형 보조치와 같이 모델의 형상이 전기자 측의 상부에서 하부로 하강하는 형태인 아크형 보조치를 제안하였다. 아크형 보조치 설계를 위해선 기준 보조치의 가로축의 길이인 B가 세로축의 길이인 C보다 반드시 길어야 하는 전제 조건이 필요하였다. 이를 기반으로 아크형 보조치의 작도 식을 도출하였으며 같은 실험횟수라도 변수의 효과에 대해 양질의 검출력을 도출할 수 있는 다구치 실험계획법을 이용하여 최적설계를 진행하였다.

다구치 실험계획 방식을 이용한 아크형 보조치의 최적설계를 위해 우선 변수 A, B, C, R의 아크형 보조치 변수를 이용해서 최소한의 실험을 구성하고 변수 A, B, C, R에 대한 기여율을 평가하였다. 기여율의 계산방식은 직교배열표상의 동일한 수준을 갖는 각 모델의 S/N비 평균을 도출하고, 그 평균값들을 이용하여 각 수준에 대한 표준 편차를 계산하였다. 이를 바탕으로 각 인자의 수준 수의 표준편차에 대한 표준 편차의 평균을 이용하여 각 인자의 분산 총합에 따른 단일 인자의 비율로 나타내어 기여율을 구하였다. 각 인자의 기여율 계산 결과, 아크형 보조치와 전기자와의 높이 차이인 변수 A가 92.57%로 단부 디텐트력의 변화에 영향을 미치게 됨을 확인하였다. 이에 변수 A의 수준 범위 재설정 및 교호작용을 고려한 직교배열표 재 작성하였다.

변수 A가 범위를 조절하여 실험 횟수 27번의 직교배열표를 작성하였고 교호항 AB, AC, AR을 고려한  $L_{27}(4^3)$  직교배열표에서 평균 단부 디텐트력은 교호항을 고려하지 않는  $L_9(4^3)$  직교배열표에 비해 평균 단부 디텐트력이 11.69% 저감되었고, 최소 단부 디텐트력은 11.11% 저감됨을 알 수 있었다.

이러한 직교배열표를 이용한 실험계획법의 적합성을 확인하기 위해 회귀방정식을 도출하고 적합성 평가를 진행하였다. 본 연구에서는 다중 회귀분석을 이용하였고, 유의수준 P값을 0.05로 가정하는 신뢰수준 95%의 분산분석표를 사용하였다.

변수 A, B, C, R의 다중 회귀분석을 수행한 결과, 표 9의 P-값이 0.05이상으로 나타난 제곱항  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$ ,  $R^2$ 과 교호작용 항 BC, CR, ABR, ACR, BCR항이 유의하지 않는 변수로 판명되어 순차적으로 제거하였고, 이를 기반으로 추정 회귀식을 도출하였다. 또한

분산분석표를 이용하여 추정 회귀식의 적합도를 분석하였고 이 때 회귀식으로 변수들의 범위 내에 결과 값을 설명할 수 있는 결정계수는 81%로 나타났다.

마지막으로 추정회귀식의 잔차 및 오차율을 비교한 결과 직교배열표 상 최소 단부 디텐트력 값은 다중회귀분석을 통해 도출된 추정회귀식의 예측 단부 디텐트력과 1.38%의 오차율을 나타냈다. 또한 추정 회귀식과 교호항을 고려한 직교배열표의 3D 수치해석 결과값을 비교 시 평균 오차율은 1.58%로 거의 일치하여 본 논문에서 제시한 최적 설계 값이 통계적으로 신뢰성이 높은 자료임을 확인하였다.

따라서 본 연구를 통해 장거리 반송용 전기자 분산배치 시스템의 제작 시간 및 재료 비용을 저감하여 기기의 구동 및 제어에 있어 운전능력이 향상되어 보다 효과적인 기기 운용이 가능할 것으로 전망된다. 또한 다양한 PMLSM에 적합한 보조치의 형상을 수식을 통해 정밀하게 접근할 수 있으며 실험계획법을 통해 인적 물적 자원을 최소화 하여 최적 형상을 도출할 수 있어 장거리 반송용 산업에도 기여할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. Hellinger, and P. Mních, "Linear motor-powered transportation: history, present status, and future outlook", Proc. of the IEEE, Vol. 97, No. 11, pp. 1892-1900, 2009.
- [2] P. Hammond, "LinearMotionElectromagneticSystems," Electronics and Power, vol. 32, Is. 2, pp.169, 1986.
- [3] I. S. Jung, S. b. Yoon, J. H. Shim, and D. S. Hyun, "Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor", IEEE trans. Energy Conv., Vol. 14, No. 4, pp. 1265-1270, 1999.
- [4] B. M. Perreault, "Optimizing Operation of Segmented Stator Linear Synchronous Motors," in Proc. of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1777-1785, 2009.
- [5] R. Hellinger, and P. Mních, "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook", Proc. of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1892-1900, Nov. 2009.
- [6] S.M. Jang, S.H. Lee, and I.K. Yoon, "Design criteria for detent force reduction of permanent-magnet linear synchronous motors with Halbach array", IEEE Trans. Magn., vol.38, no.5, pp.3261-3263, Sep. 2002.
- [7] M. Sanda, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Interior permanent magnet linear synchronous motor for high performance drives", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.33, no.4, pp.966-972, Jul. /Aug. 1997.
- [8] A.H. Isfahani, "Analytical Framework for Thrust Enhancement in Permanent-Magnet (PM) Linear Synchronous Motors with Segmented PM Poles", IEEE Trans. Magn., vol.46, no.4, pp. 1116-1122, 2010.

- [9] J.G. Kim, "A Study on the decrease in the detent force of a tubular PMLSM with 4 separated cores", M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Hanyang Univ., Seoul, Korea, 2007
- [10] T. Yoshimura, H.J. Kim, Watada, S. Torii, and D. Ebihara, "Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans. Magn., vol.31, no.6, pp.3728-3730, 1995.
- [11] S.S Park, "A study of source identification and case study for starter motor noise using DOE", M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Yeungnam Univ., Gyeongsan, Korea, 2004.
- [12] D.H. Hyun, and Y.S. Lee "A study on the machinability using S/N ration", J. of the Korea Soc. of Automotive Engineers, vol.14, no.6, pp. 23-28, 1992.
- [13] A. M. Omekanda, "Robust torque and torque-per-inertia optimization of a switched reluctance motor using the Taguchi methods" IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, no. 2, pp. 473-478, Mar. Apr. 2006.
- [14] Y.H Liu, C.H. Hsieh, and Y.F. Luo, "Search for an optimal five-step charging pattern for Li-Ion batteries using consecutive orthogonal arrays", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 2, pp. 654-661, Jun. 1999.
- [15] S. Prakash, K. Palanikumar, et al., " Prediction of Surface Roughness Parameters in Drilling of MDF Composite Panel Using Box-Behnken Experimental Design (BBD)," IEEE Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering(FAME), 2010.

## 감사의 글

석사과정을 마치며 수행해왔던 과정들을 되새겨 보면, 이루고자한 바를 이뤄내고 결과물을 얻어내는 과정은 결코 순탄치 않았고 많은 분들께서 아낌없는 지도가 있었기 때문에 가능했다고 생각합니다.

먼저 제가 힘들거나 어려울 때 항상 같이 고민해주시고 힘든 시기를 함께 지켜봐준 가족과 친구에게 정말 감사합니다.

석사과정동안 가족같이 사랑해 주시고 지도해 주신 김용재 교수님께 진심어린 감사의 말씀을 전합니다. 항상 저의 발전을 위해 앞에서 끌어주시고 뒤에서 기다려 주시는 교수님의 은혜를 항상 잊지 않으며 앞으로 사회에 나아가 교수님의 가르침을 새기고 더욱 발전해 나아가겠습니다. 또한 항상 큰 벽에 부딪쳤을 때 교수님께서 말씀해주시던 내용들을 벗 삼아 산업에 이바지하는 역군이 되도록 노력하겠습니다.

바쁘신 가운데 소중한 시간을 내주셔서 한층 성장할 수 있도록 논문 지도와 조언을 심사해주신 조금배 교수님, 최효상 교수님 감사합니다. 또한 어려움이 있을 때 마다 많은 격려와 지도해 해주신 이우선 교수님, 김남훈 교수님, 김재홍 교수님, 김종훈 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

언제나 옆에서 같은 고민을 해가며 미래를 설계하던 동기 찬호에게 감사의 말을 전하고 항상 옆에서 큰 나무처럼 기댈 수 있도록 자리를 내어준 의종이 형에게 감사의 말을 전합니다. 또한 항상 같은 공간에서 희로애락을 같이하며 지식을 쌓기 위해 노력한 에너지변환역학실험실 선후배들에게 감사의 말을 전하고 건승을 기원합니다.

최선을 다해 석사과정을 수행하면서 마주하는 시간이 적었던 가족에게는 미안한 마음과 친구에게는 아쉬운 마음이 남습니다. 하지만 먼 미래에 반드시 이와 같은 시간들에 대한 보상을 약속하면서 좋은 결과들이 함께하길 같이 기도하겠습니다.

마지막으로 전부 언급하진 못하였지만 나의 동기들, 친구들, 불암회 선후배님들, 함께 일했던 업체 관계자 분 모두 진심으로 감사의 말씀드리면서 사회에 나아가 반드시

도움이 될 수 있도록 항상 노력하겠습니다.

이제 산 입구에 들어섰다 생각합니다. 산 중턱에 오를 땐 힘들었지만 뒤를 돌아볼 수 있는 여유를 가지고, 산 정상에 오를 땐 포기하고 싶었지만 동료들과 함께 즐기며 경치를 감상할 수 있는 자세로 한 고비 한 고비 넘길 때의 걱정보다는 앞으로의 고민만 하면서 더 가파른 길을 기분 좋은 마음으로 선택해 오를 것입니다.

2015년 12월

김민석