

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 이용허락조건 을 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 🖃





박 의 종

연취에

2015년 2월 석사학위 논문

PMLSM의 전기자 분산배치에 의한 단부코깅력에 관한 연구

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

박 의 종



PMLSM의 전기자 분산배치에 의한 단부코깅력에 관한 연구

A Study on End Cogging Force by Stationary Discontinuous

Arrangement Armature of PMLSM

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원 전 기 공 학 과 박 의 종





PMLSM의 전기자 분산배치에 의한 단부코깅력에 관한 연구

지도교수 김 용 재

이 논문을 전기공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

박 의 종





박의종의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 <u>이 우 선 (인)</u> 위 원 조선대학교 교 수 <u>조 금 배 (인)</u> 위 원 조선대학교 교 수 김 용 재 (인)

2014년 11월

조선대학교 대학원





목 차

ABSTRACT	√I
I . 서 론 ·································	1
II. 이론적 고찰 ···································	3
A. 장거리 반송시스템에서의 리니어 모터 ·······	3
1. 리니어 모터	3
2. 장거리 반송용 PMLSM /	4
B. 전기자 분산배치 시스템	6
1. 전기자 분산배치 시스템의 문제점	6
2. 단부 코깅력	8
Ⅲ. 시스템의 모델링	10
A. 전기자 분산배치 시스템의 제안모델	10
B. 제안모델의 코깅력 특성분석	13



IV. 시뮬레이션 분석 검토	17
A. 구간의 수식 분석을 통한 단부 코깅력 저감	17
B. 주기성 변경을 통한 단부 코깅력 저감	19
C. 보조치 설계를 통한 단부 코깅력 및 리플 저감 …	20
1. 신개념 전기자 분산배치 시스템의 추력	20
2. 다구치 실험계획법을 이용한 보조치 최적 설계	22
3. 보조치 최적 모델의 적용	28
V. 결 론 ··································	30
참고문헌	32





표 목차

Table 1.	Reduction ratio of used electrical steel sheet according to the
	armatures interval
Table 2.	Specification of proposed model
Table 3.	First Taguchi's orthogonal array 23
Table 4.	First contribution ratio table 22
Table 5.	Second Taguchi's orthogonal array 22
Table 6.	Second contribution ratio table 25
Table 7.	Third Taguchi's orthogonal array 26
Table 8.	Third contribution ratio table 27





그림 목차

Fig.	1.	Method of armature arrangement 4
Fig.	2.	The adjustment of armatures interval7
Fig.	3.	The adjustment of mover length7
Fig.	4.	Cogging force at the end of armature8
Fig.	5.	The numerical analysis model9
Fig.	6.	Cogging force of the PMLSM····· 9
Fig.	7.	Basic model of novel discontinuous arrangement armature system… 10
Fig.	8.	Cogging force of novel discontinuous arrangement armature system 11
Fig.	9.	The positions of mover
Fig.	10	Entrance and exit according to the points13
Fig.	11.	Analysis of the section 3 with armature #114
Fig.	12.	Analysis of the section 3 with armature #2 15
Fig.	13.	Comparison of Analyzed and calculated value 16
Fig.	14.	Cogging force comparison with armature interval 720mm······18
Fig.	15.	Cogging force comparison with armature interval 735mm······19
Fig.	16	Thrust force comparison with continuous and discontinuous
		armature····· 20
Fig.	17.	Auxiliary teeth model······ 22
Fig.	18.	First main effect plot for means23





Fig.	19.	Second main effect plot for means	25
Fig.	20.	Third main effect plot for means	27
Fig.	21.	Thrust force comparison with continuous armature and	
		discontinuous armature with auxiliary teeth	28
Fig.	22.	Thrust force comparison with armatures interval 360mm and	
		discontinuous armature with auxiliary teeth	29





ABSTRACT

A Study on End Cogging Force by Stationary Discontinuous Arrangement Armature of PMLSM

Eui-Jong Park

Advisor: Prof. Yong-Jae Kim, Ph. D. Department of Electrical Engineering Graduate School of Chosun University

The linear motor for transportation system generally applies the long stator system which arranges the armature at the full length of transportation lines. When this system is applied to the long distance transportation system, it causes problems such as the increase of material cost and manufacturing time. In order to solve these problems, a stationary discontinuous armature method which arranges the armature only in the areas where the acceleration and deceleration are needed has been proposed. However. the stationary discontinuous armature method has problems such as generating a cogging force greatly by the edge of armature and is impossible of mover control when the mover stops by the disturbance at the freewheeling section where the armature is not located. Therefore, in order to propose a new method of stationary discontinuous armature which the control of the mover is possible at any position, we analyze the cogging force according to the distance between armatures and derive the optimal distance between armatures.





1. 서 론

최근 반송분야의 기계화 및 자동화가 점차 고속화됨에 따라 국내·외 여러 국가의 정부 및 기업들은 고속 및 고효율의 반송시스템을 요구하고 있다. 하지만기존의 회전형 기기를 사용한 자동반송시스템은 경년 변화(經年變化)에 의한 특성 저하, 마찰에 의한 에너지 손실과 소음 발생, 발열 및 강성저하, 주기적인보수·점검으로 인한 보수·점검비용 상승, 기계적 변환장치 사용에 따른 구조의 복잡성 등의 문제점이 존재한다[1]-[4].

회전형 시스템과 달리 기계적 변환장치 없이도 직접 동력 전달이 가능하고 고가감속 및 고추력을 발생할 수 있는 영구자석형 선형 동기전동기(PMLSM: Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)가 위와 같은 문제점을 해결할 수있는 핵심구동 장치로 주목받고 있다. 또한 공장 자동화(Factory Automation)분야 및 교통분야의 자동반송시스템 등에 그 이용이 확대되고 대형화됨에 따라 장거리 자동반송시스템에 적용하는 사례가 증가하고 있다. 하지만 PMLSM을 장거리 반송시스템에 적용할 경우 전기자를 반송경로 전장에 설치해야 하기 때문에 거리에 따라 초기 재료비용 및 제작시간이 상승하게 된다[5]-[10]. 이러한 재료비용과 제작시간이 상승하는 문제점을 해결하기 위해 전기자 분산배치 시스템이 제안되고 있다.

전기자 분산배치 시스템은 가동자의 가속 및 감속이 필요한 구간에만 전기자를 설치하는 시스템으로 전기자를 단일 모듈로 구성하여 간헐적으로 배치하게된다. 전기자 분산배치 시스템의 이러한 구조적 특성은 반송 경로가 길면 길수록 재료비용 및 제작시간을 대폭 저감할 수 있게 하는 반면에 두 가지의 문제점을 내포하고 있다.

첫 번째 문제점은 전기자가 분산배치 됨에 따른 제어 불가능 영역의 존재이다. 전기자 분산배치 시스템의 제어 불가능영역의 존재는 가동자의 길이에 비해전기자 사이 간격이 매우 길게 설정됨으로 인한 문제점이다. 문제점에 대한 해결책으로 전기자 사이간격을 축소할 경우 전기자를 분산시켜 배치한다는 의미까지 동시에 축소된다. 따라서 본 논문에서는 전기자 분산배치 시스템의 가동자를 어느 구간에서든지 제어할 수 있도록 가동자와 전기자의 길이를 동시에 조절하였다. 먼저 가동자 길이와 전기자 사이간격에 따른 PMLSM의 특성을 분석하여 적



합한 기본모델을 도출한다. 다음으로 전기자 사이간격 조절에 따른 코깅력 특성을 분석하여 리플과 코깅력을 최소로 할 수 있는 전기자 간격을 도출한다. 전기자 사이간격이 도출된 후에는 전기자 한 모듈을 대상으로 하여 PMLSM의 코깅력저감연구를 수행한다.

두 번째 문제점은 전기자의 단부에 의한 코깅력의 증가이다. PMLSM의 코깅력 저감법에는 치 형상을 조절, 영구자석 형상 조절, 보조구의 설치 등 다양한 방법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 전기자 한 모듈의 양쪽 측면에 보조치를 설치하고 최적설계하여 코깅력을 저감하고자 한다. 보조치의 최적설계에는 다구치의 실험계획법을 사용하여 최소한의 실험으로 각 인자들의 기여도를 분석하고 기여도가 큰 인자부터 수준 범위를 조절한다. 이를 통해 본 논문에서 사용한 PMLSM의 코깅력 저감에 최적인 보조치를 도출하고 전기자 분산배치 시스템에 적용한다.

본 논문에서는 각각의 모델들을 유한요소법(Finite Element Method) 기반의 20 수치해석을 이용한 전자기 해석을 통해 코깅력 및 추력 등의 각 특성들을 분석하였으며, 전기자 분산배치 시스템의 재료비용 및 제작시간을 저감할 수 있는 장점은 살리면서 제어 불가능 영역 및 단부 코깅력의 문제점을 해결할 수 있는 신개념의 전기자 분산배치 시스템을 제안하고 최적설계하여 장거리 반송 시스템에서의 PMLSM의 설계 지침을 제시하고자 한다.



Ⅱ. 이론적 고찰

A. 장거리 반송시스템에서의 리니어 모터

1. 리니어 모터

전 세계적으로 첨단자동이송시스템에 대한 관심과 투자가 집중되면서 2000년 도 이후 국가에서는 경제발전의 주요 수단으로 물류기술에 대한 지원 정책을 수 립하면서 장기적인 관점에서의 물류정책을 추진하기 시작하였다.

2006년 건설교통부는 국가물류기본계획(2001~2020) 수립 이후 글로벌 물류체계의 구축 등 5대 추진전략을 제시하고 2007년에 국가물류 표준화 추진계획을시행하여 수송, 운반하역 등 우리나라 물류 표준화의 미래상을 제시하였다. 2010년에는 국가에서 저탄소 녹색성장을 위한 국토해양 R&D 발전 전략을 수립하여 물류시설/장비 등의 고도화에 집중적인 투자를 진행하였다.

하지만 현재 물류 시설 인프라 고도화 기술 분야에는 선진국과 9년정도 기술 격차를 보이고 있고, 지능형 물류장비기술의 경우에는 5년정도 격차를 보이고 있어, 기술의 제한성으로 인해 국내에서는 적재시스템에 대한 적용 및 개발이 주로 이루어져 왔다.

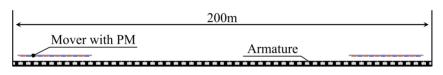
최근에는 물류 자동이송시스템, 초고속자기부상열차 등 신기술 개발이 가속화됨에 따라 국내에서도 Linear Motor-based Transfer Technology 등의 리니어 동기모터를 이용한 연구사례가 증가하고 있다. 또한 부산 신항간의 첨단자동이송시스템의 도입을 적극적으로 검토하고 있으며 첨단자동이송시스템의 고비용적인문제와 고속·고효율에 대한 문제해결을 위해 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 추세에 발맞추어 장거리 반송시스템에 PMLSM을 적용하기 위한 연구를 수행하였다.



2. 장거리 반송용 PMLSM

일반적으로 PMLSM을 이용한 반송 시스템은 그림 1(a)와 같이 전기자를 반송경로 전장에 설치하는 전기자 연속배치 시스템이 사용되고 있다. 하지만 전기자연속배치 시스템은 반송경로가 증가하면 증가할수록 전기자의 전기강판 및 코일의 사용량, 기타 설비들의 설치가 함께 증가하기 때문에 재료비용 및 제작시간의 상승을 초래하게 된다. 이러한 재료비용과 제작시간이 상승하는 문제점으로인해 PMLSM을 이용한 반송 시스템은 주로 단거리나 제한된 장거리 반송시스템에적용되고 있으며, 문제점에 대한 해결책으로 그림 1(b)와 같은 전기자 분산배치시스템이 제안되고 있다.



(a) Continuous arrangement armature



(b) Discontinuous arrangement armature

Fig. 1. Method of armature arrangement

전기자 분산배치 시스템은 가동자의 가속 및 감속이 필요한 구간에만 전기자를 설치하는 시스템으로 거리에 따른 재료비용 및 제작시간을 감소할 수 있다. 만약 200m 반송경로에 40mm의 슬롯을 사용하여 전기자를 설치할 경우 전기자 연속배치 시스템은 5,000개의 슬롯이 필요하다. 반면에 동일한 조건하에 전기자분산배치 시스템의 전기자 한 모듈은 9슬롯(360mm), 전기자 사이간격은 1m로 설정할 경우에는 1,323개의 슬롯이 필요하고 전기자 사이간격이 5m인 경우는 342개의 슬롯이 필요하게 된다. 이는 전기자 연속배치 시스템 대비 각각 73.54%, 93.16%의 전기강판 저감율을 나타낸다. 표 1에 전기자 사이간격에 따른 전기강판 저감율을 나타낸다.





Table 1. Reduction ratio of used electrical steel sheet according to the armatures interval

	배치된 전기자 모듈수[Units]	배치된 슬롯수[Slots]	전기강판 저감률[%]
전기자 연속배치	-	5,000	_
전기자 분산배치 (전기자 간격: 1m)	147	1,323	73.54
전기자 분산배치 (전기자 간격: 5m)	38	342	93.16

표 1을 통해 전기자 분산배치 시스템은 전기자 연속배치 시스템의 재료비용 문제를 대폭 해결할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 전기자 분산배치 시스템은 가동자의 가속 및 감속이 필요한 구간에만 전기자를 설치함에 따라 전기자는 단일 모듈로 구성되어 간헐적으로 배치된다. 전기자 분산배치 시스템의 이러한 구조적 특성은 두 가지의 문제점을 내포하고 있다. 첫 번째 문제점은 전기자가 분산배치 됨에 따라 전기자 사이간격이 증가하여 추진자계에 의한 가동자의 제어가 불가능한 것이고, 두 번째 문제점은 전기자가 분산배치 됨에 따라 전기자의 단면이 존재하게 되어 전기자 단부에 의한 코깅력의 증가이다. 전기자 분산배치 시스템의 이러한 문제점들은 다음절을 통해 자세히 다루고자 한다.





B. 전기자 분산배치 시스템

1. 전기자 분산배치 시스템의 문제점

전기자 분산배치 시스템은 구동방식에 있어, 가동자가 전기자 설치 구간에서 추진자계를 받아 추진력을 얻은 다음 전기자 미설치 구간에서는 관성으로 진행하는 방식을 사용한다. 이러한 구동방식은 전기자의 배열 간격을 가동자의 길이보다 길게 설정하여 재료비용 및 제작시간 저감을 극대화 할 수 있지만 문제는 가동자가 전기자 미설치 구간을 진행할 때 발생한다. 만약 계통 및 시스템상의문제나 예측치 못한 외력이 가동자의 진행을 방해할 경우 가동자는 전기자 미설치 구간에서 정지할 수 있다. 전기자 미설치 구간은 추진자계를 발생시키는 계자원이 존재하지 않기 때문에 가동자의 재 구동을 위해서는 전기자가 존재하는 구간까지 가동자를 이동시켜야 하는데, 이 때 견인 시스템이 추가적으로 요구된다. 또한 이러한 사고 발생 시 대응 시간은 지연될 수밖에 없고 추가적인 사고까지 야기할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 가동자와 전기자의 일정부분이 항상 대항할 수 있도록 가동자와 전기자의 길이를 조절하여 어느 구간에서든지 가동자를 제어할 수 있는 신개념의 전기자 분산배치 시스템을 제안한다.

먼저 전기자의 사이간격을 조절한 모델을 그림 2에 나타낸다. 그림 2(a)는 8 극(240mm)의 가동자와 9슬롯(360mm)의 전기자를 2Units 사용한 기본모델로, 전기자 사이간격은 가동자의 길이보다 길게 설정되어 있다. 가동자의 길이가 전기자 간격보다 짧은 관계로 전기자 사이에 가동자가 위치할 경우 일정구간 항상대항하는 조건에 부합하지 않는다. 따라서 가동자가 전가자에 일정구간 항상대항하는 조건에 부합하지 않는다. 따라서 가동자가 전가자에 일정구간 항상대항할 수 있도록 그림 2(b)와 같이 전기자 사이간격을 가동자의 길이보다 짧게조절하였다. 그 결과 가동자와 전기자는 일정부분이 항상대항하게 되었으나 전기자 사이간격은 대폭 감소하였다. 만약 전기자 사이 간격을 가동자의 길이인 240mm로 가정하고 200m의 반송경로에 적용할 경우 사용되는 전기자 모듈은 334units, 슬롯수는 3,006slots이 된다. 이는 전기자 연속배치 시스템에서 사용된 5,000slots 대비 39.88% 저감된 값으로 절반에도 미치지 못한 값이다.





(a) Armatures interval more than mover length

(b) Armatures interval less than mover length

Fig. 2. The adjustment of armatures interval

다음으로 가동자의 길이를 조절한 모델을 그림 3에 나타낸다. 그림 3(a)는 그림 2(a)와 동일한 모델이며, 그림 3(b)는 가동자가 전가자의 일정구간에 항상대항할 수 있도록 가동자의 길이를 전기자 사이간격보다 길게 조절한 모델이다. 가동자의 길이조절을 통해 가동자와 전기자를 일정구간 항상 대항시키면서 전기자의 사이간격 및 전기 강판 사용량 저감률을 전과 동일하게 유지할 수 있었다. 하지만 가동자의 길이를 무한정 증가시킬 수 없기 때문에 본 논문에서는 가동자의 길이를 전기자 모듈 길이의 3배수인 1080mm로 제한하고 기존의 전기자 분산배치 시스템의 문제점을 개선한 신개념 전기자 분산배치 시스템의 기본모델 가동자로 결정 하였다.

(a) Mover length less than armatures interval

(b) Mover length more than armatures interval

Fig. 3. The adjustment of mover length



2. 단부 코깅력

코깅력은 전기자의 단부와 가동자의 영구자석 사이에 발생하는 힘을 일컫는다. 코깅력이 가동자의 진행방향과 동일한 방향으로 발생할 경우 양의 값으로서가동자를 가속시키는 힘으로 작용하며, 가동자의 진행방향과 반대의 방향으로발생할 경우 음의 값으로서 가동자를 감속시키는 힘으로 작용한다. 그림 4에 전기자의 단부가 가동자에 미치는 영향을 나타낸다.

전기자를 길게 연속배치하는 시스템과는 달리 전기자 분산배치 시스템은 길게 배열된 전기자에서 가동자의 가속 및 감속이 요구되지 않는 부분의 전기자를 제거하는 방식으로, 앞절의 그림 1(b)에서 나타낸 것과 같이 시스템의 구조상 반드시 전기자의 단부가 존재한다. 전기자의 단부는 가동자의 진동 및 소음의 원인으로 작용하는 코깅력을 크게 증가시켜 기기의 성능을 저하시키는 문제점을 발생시킨다[11]-[14]. 이 때 전기자 단부에서 발생하는 코깅력을 단부 코깅력이라 한다.

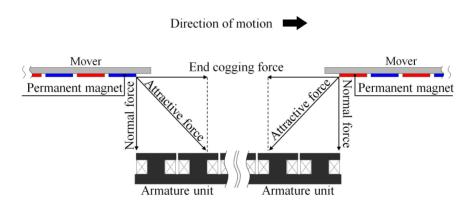


Fig. 4. Cogging force at the end of armature



단부 코깅력의 작용을 확인하기 위해 8극 9슬롯 모델에 대해 FEM 기반 2D 수 치해석을 하였다. 수치해석 모델은 그림 5와 같으며 이때의 절점수는 70,640, 요소수는 134,228이다. 가동자가 전기자에 진입하는 순간부터 반출하기까지의 코깅력을 1mm 간격으로 분석하여 그림 6에 나타내었으며 가동자의 위치에 따라 A, B, C 구간으로 구분하였다. A 구간은 가동자가 전기자에 진입하기 시작해서 진입을 완료하기까지의 구간이고 B 구간은 가동자가 전기자에 완전히 대항하여 진행하는 구간이며 마지막 C 구간은 가동자가 전기자로부터 반출하기 시작하여 반출을 완료하는 구간이다. 그림 6을 통해 A, C 구간의 최대 최소 코깅력은 ±27.73N 으로 B구간의 ±0.6N 대비 40배 이상 큰 힘이 발생함을 알 수 있다. 따라서 가동자가 전기자의 단부를 진행하는 전기자 분산배치 시스템에서는 단부코깅력을 저감하는 연구가 선행 되어야 한다.



Fig. 5. The numerical analysis model

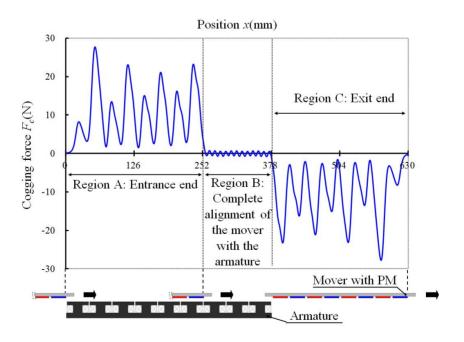


Fig. 6. Cogging force of the PMLSM





Ⅲ. 시스템의 모델링

A. 전기자 분산배치 시스템의 제안모델

앞의 II-B절에서는 제어 불가능 영역을 개선한 가동자를 제시하였다. 여기에 전기자 두 모듈을 적용하여 신개념 전기자 분산배치 시스템의 기본모델을 그림 7에 나타낸다. 전기자의 3배수에 해당하는 가동자는 36국이 배치되어 있으며 Back iron을 포함한 가동자의 총 길이는 1,104mm이다. 전기자의 두 모듈의 초기 사이간격은 전기자 한 모듈의 길이인 360mm로 고정하였다. 제안된 신개념 전기 자 분산배치 시스템의 기본모델의 제원을 표 2에 나타낸다.

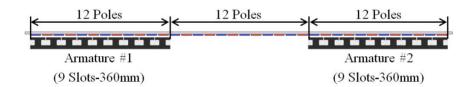


Fig. 7. Basic model of novel discontinuous arrangement armature system

	Value				
	Height of PM	3 mm			
	Length of PM	26 mm			
Mover	The number of PM	36 poles			
	Pole pitch	30 mm			
	Back iron height	6 mm			
	Coil turns per phase	75 turns			
	Slot pitch	40 mm			
Armotilro	Slot width	24 mm			
Armature	Slots of armature module	9 slots			
	Width of teeth	16 mm			
	Height of teeth	20 mm			
Med	Mechanical air-dan				

Table 2. Specification of proposed model



나타낸 기본모델의 코깅력 특성을 파악하기 위해 가동자가 첫 번째 전기자를 진입하여 두 번째 전기자로부터 반출하기까지의 코깅력을 그림 8에 나타내었다. 여기에서 1, 2, 3구간과 4, 5, 6 구간은 그림 8에서 보는 것과 같이 서로 대칭 적인 파형을 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 1, 2, 3 구간에 대한 분석만을 수 행한다. 또한 실제 기기의 동작은 2-5 구간에서 이루어짐에 따라 1, 6 구간에 대한 분석은 불필요 하지만 타 구간에 대한 설명의 이해를 돕기 위해 함께 분석 하고자 한다.

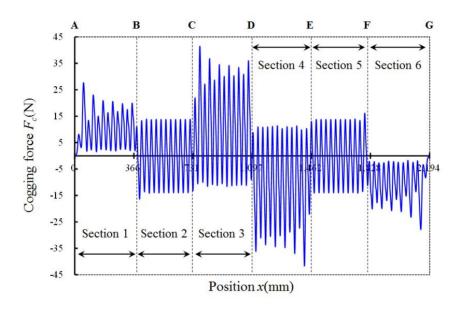


Fig. 8. Cogging force of novel discontinuous arrangement armature system

그림 8에 나타낸 A부터 G까지의 각 지점에 대한 가동자 위치는 그림 9와 같다. A 는 가동자가 첫번째 전기자에 진입하는 순간의 위치이다. B 는 가동자가 첫번째 전기자로부터 반출하는 순간의 위치이다. C 는 가동자가 두번째 전기자에 진입하는 순간의 위치이다. D 는 가동자가 두번째 전기자로부터 반출하는 순간의 위치이다. E 는 가동자가 첫번째 전기자로부터 반출을 완료한 순간의 위치이다. F는 가동자가 두번째 전기자로의 진입을 완료한 순간의 위치이다. G 는 가동자가 두번째 전기자로부터 반출을 완료한 순간의 위치이다. G 는 가동자가 두번째 전기자로부터 반출을 완료한 순간의 위치이다. 이에 따라 A-B는 1 구간, B-C는 2 구간, C-D는 3구간, D-E는 4구간, E-F는 5구간, F-G는 6구간으로 분류된다.





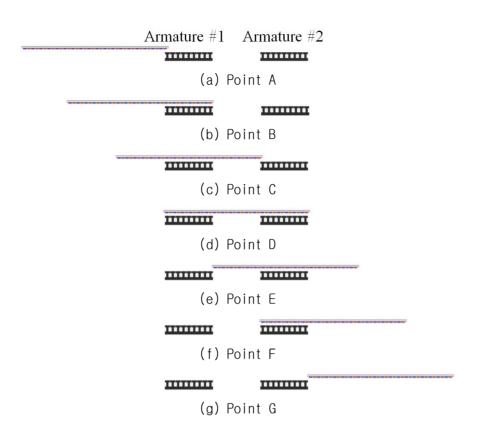


Fig. 9. The positions of mover





B. 제안모델의 코깅력 특성분석

먼저 1 구간은 가동자가 첫번째 전기자에 진입하는 구간으로, 반출은 이뤄지지 않고 진입만 나타나기 때문에 그래프에서는 양의 코깅력만 발생한다. 2 구간은 가동자가 두번째 전기자에 진입하기 직전까지를 나타내는 구간으로, 첫번째 전기자에 의한 진입과 반출이 동시에 나타나는 구간이다. 따라서 그래프에서도양의 코깅력과 음의 코깅력이 번갈아가며 나타난다. 3 구간은 가동자가 두번째 전기자에 진입하여 양쪽 전기자에 완전히 대항하는 구간으로, 가동자의 진입은 첫번째 전기자와 두번째 전기자에서 동시에 이뤄지며 반출은 첫번째 전기자에 의해서만 이루어진다. 각 지점에 대한 진입 및 반출위치를 그림 10에 나타낸다.

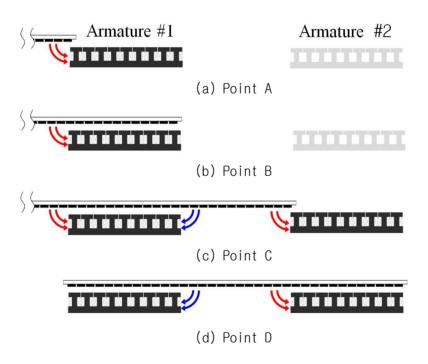


Fig. 10. Entrance and exit according to the points



우리는 이러한 3 구간의 특성을 첫번째 전기자에 의한 영향과 두번째 전기자에 의한 영향으로 나누어 분석하여 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 먼저 그림 11(b)의 첫번째 전기자에 의한 영향만을 살펴보면, 그림 11(c)와 같이 첫번째 전기자에 의해 진입과 반출이 이루어지는 2 구간과 동일한 구조임을 알 수 있다.

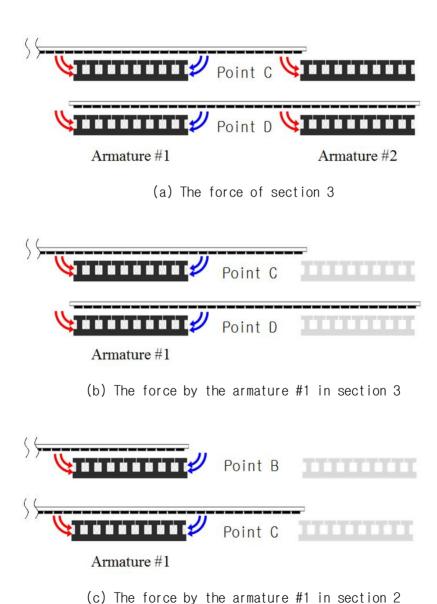
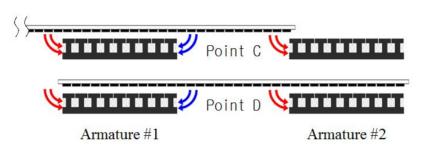


Fig. 11. Analysis of the section 3 with armature #1

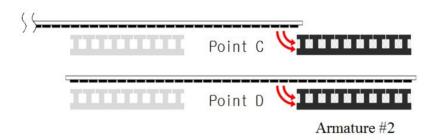




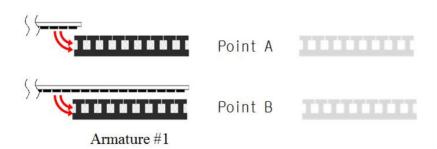
다음으로 그림 12(b)의 두번째 전기자에 의한 영향만을 살펴보면, 그림 12(c)와 같이 첫번째 전기자에 의해 진입만 이루어지는 1 구간과 동일한 구조임을 알수 있다.



(a) The force of section 3



(b) The force by the armature #2 in section 3



(b) The force by the armature #1 in section 1

Fig. 12. Analysis of the section 3 with armature #2





따라서 3 구간의 코깅력은 1 구간과 2 구간 코깅력으로 나눌 수 있기 때문에식 (1)과같이 나타낼 수 있으며 동일하게 4 구간은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. $F_{cogging}$ 은 각 구간에서 발생하는 코깅력을 나타내며 그림 13에 1, 2 구간의코깅력 합과 3 구간의 코깅력을 비교하여 나타낸다.

$$F(C-D)_{coaging} = F(A-B)_{coaging} + F(B-C)_{coaging}$$
 (1)

$$F(D-E)_{cogaing} = F(E-F)_{cogaing} + F(F-G)_{cogaing}$$
 (2)

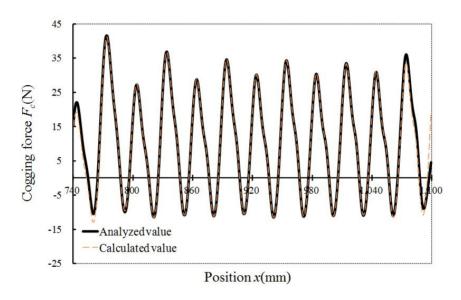


Fig. 13. Comparison of Analyzed and calculated value

한편 3 구간의 양의 코깅력은 최대 41.46N으로 2 구간에 비해 2배 이상 매우 큰 힘을 나타내고 있다. 이는 앞서 분석한 내용에 근거하여, 진입은 두개의 전기자에서 이루어지는 반면 반출은 한 개의 전기자에서 이루어짐에 따른 흡인력불균형을 원인으로 볼 수 있다. 따라서 우리는 수식적 분석과 전기자 간격 조절을 통해 2 구간과 같이 진입시와 반출시의 균형을 맞추어 코깅력을 저감하고자한다.





IV. 시뮬레이션 분석 검토

A. 구간의 수식 분석을 통한 단부 코깅력 저감

본 절에서는 가동자의 진입 및 반출의 불균형 해소를 위해 2-5 구간을 수치적으로 분석하였다. 2-5 구간의 길이는 L_2 - L_5 으로 나타내었으며 Back iron을 제외한 가동자의 길이는 식 (3)과 같이, 전기자의 길이는 식 (4)와 같이 나타내었다. 여기에서 τ_p 는 가동자의 극 피치, P는 극 수, τ_s 는 전기자의 슬롯 피치, S는 슬롯 수, 전기자 사이 간격은 D_{bo} 이다.

$$Mover length(L_{mover} = L_m) = \sum_{n=1}^{P} \tau_{pn}$$
(3)

$$Armature \ length \ (L_{armature} = L_a) = \sum_{n=1}^{S} \tau_{sn}$$
 (4)

2 구간은 앞 절에서 설명한 내용과 같이 가동자가 첫번째 전기자에서 반출을 시작하는 B 지점부터 두번째 전기자에 진입하기 직전인 C 지점까지를 나타내는 구간이다. 따라서 2구간의 길이는 전기자의 사이간격과 동일한 길이가 된다. 하 지만 전기자 한 모듈의 길이와 전기자 사이 간격의 합이 가동자 길이보다 길 경 우 2구간은 C 지점에 진입하기 전에 종료되기 때문에 2 구간의 범위 또한 도출 할 수 있다. 2 구간은 식 (5)와 같으며 5구간 또한 이와 동일하다.

$$Section 2 = D_{ba}, (when D_{ba} \le L_m - L_a)$$
(5)

3 구간은 가동자가 두번째 전기자에 진입하기 직전인 C 지점부터 가동자가 첫 번째 전기자로부터 진입을 완료한 D 지점까지를 나타내는 구간이다. 기본모델의 간격을 기준으로 전기자 사이간격이 길어질수록, 가동자의 길이가 짧을수록 3구 간은 짧아지게 된다. 3 구간은 식 (6)과 같으며 4구간 또한 이와 동일하다.

$$Section 3 = L_m - (L_a + D_{ba}) \tag{6}$$



따라서 식 (6)을 통해 불균형 구간인 3, 4구간을 제거할 수 있다. 구간의 길이에 음수값은 존재하지 않기 때문에 식 (6)의 L_3 , L_4 의 값이 0보다 같거나 작은 값이 나오도록 하면 3, 4 구간은 제거할 수 있다. 본 모델에서 가동자의 길이는 1,080mm, 전기자의 길이는 360mm로 고정이기 때문에 전기자 사이간격이 720mm 이상일 때 3구간과 4구간을 제거할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (7)과 같고 최종적으로 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{ba} \ge L_m - L_a \tag{7}$$

$$D_{ba} \ge \sum_{n=1}^{P} \tau_{pn} - \sum_{n=1}^{S} \tau_{sn} \tag{8}$$

이를 바탕으로 전기자 간격이 720mm 일때의 코깅력을 그림 14에 나타내었다. 앞의 수식에서 분석한 내용과 같이 2, 5구간은 전기자 사이 간격만큼 길어졌으며 2, 5 구간 사이에 존재하던 3, 4 구간은 제거되고 새로운 구간이 나타났다. 이 구간은 신 개념 전기자 분산배치 시스템의 핵심 구간이 되며 두 개의 전기자모두에 대항하는 구간이다. 또한 첫번째 전기자에서는 반출이, 두번재 전기자에서는 진입이 이루어지기 때문에 진입 및 반출의 균형을 갖춘 구간이다. 이 구간에서 발생한 최대 코깅력은 ±25.09N으로 기본 모델보다 40%의 저감을 보였고수식에 의한 단부 코깅력 저감을 입증하였다.

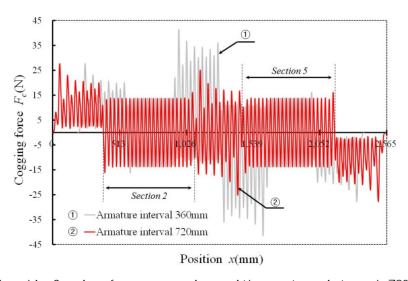


Fig. 14. Cogging force comparison with armature interval 720mm





B. 주기성 변경을 통한 단부 코깅력 저감

앞 절의 진입 및 반출의 균형을 통해 단부 코깅력을 기본모델 대비 40 % 저감시켰지만 여전히 2구간과 5구간 사이의 코깅력은 2구간의 최대 코깅력 보다 10N 이상 큰 힘이 발생하고 있기 때문에 추가적인 저감이 필요하다. 따라서 우리는 코깅력의 주기성을 변화시켜 서로 상쇄되는 방법으로 코깅력을 저감하고자 한다. 일반적인 치 코깅력의 주기는 극피치와 슬롯피치의 최대 공약수로 구할 수 있지만 단부 코깅력은 전기자의 치부분 보다 전기자 단면과 영구자석에 의한 영향을 크게 받는다. 따라서 단부 코깅력의 파형은 전기자에 진입하고 반출하는 영구자석 극수에 따라 발생한다. 이러한 특성에 근거하여, 본 모델의 극 피치인 30mm의 1/2인 15mm를 이동시켰고 그 결과를 그림 15에 나타내었다.

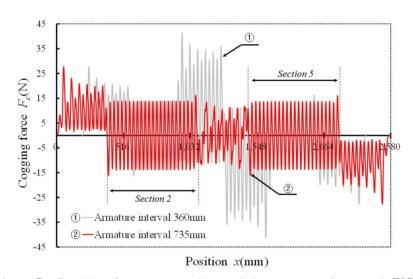


Fig. 15. Cogging force comparison with armature interval 735mm

그림 15를 통해 극 피치에 의한 단부 코깅력이 서로 상쇄됨을 확인하였으며 2 구간과 5구간 사이의 최대 코깅력은 13.40N이 발생하여 기본모델 대비 67.7%의 저감을 보였다. 이에 따른 최종 전기자 사이간격 수식을 식(9)에 나타내었다. au_c 는 단부 코깅력의 주기를 나타낸다.

$$D_{ba} \ge \sum_{n=1}^{P} \tau_{pn} - \sum_{n=1}^{S} \tau_{sn} + \frac{1}{2} \tau_{c}$$
 (9)





C. 보조치 설계를 통한 단부 코깅력 및 리플 저감

1. 신개념 전기자 분산배치 시스템의 추력

전기자 분산배치 시스템의 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 가동자와 전기자 사이간격을 조절하여 신개념의 전기자 분산배치 시스템을 제안하였고 코 강력을 최소화 할 수 있는 전기자 사이간격을 도출하였다. 하지만 전기자 연속배치 시스템과의 정확한 비교분석이 이루어지지 않았기 때문에 제안된 시스템에 대해 개선 여부를 판단할 수 없다. 따라서 도출된 모델에 대해 전기자 연속배치 시스템과 비교하여 추력을 분석하였다. 추력 분석에는 5A, 16.67Hz의 전원을 사용하였으며 사용된 한 슬롯의 전기자 권선은 75turn이다. 전기자 사이간격 735㎜인 전기자 분산배치 시스템의 추력 해석 범위는 앞에서 언급한 것과 같이, 1, 6 구간은 가동자의 진행에 불필요한 구간으로 2구간부터 5구간 사이만을 분석하였다. 그림 16에 전기자 연속배치 시스템과 신개념의 전기자 분산배치 시스템의 추력 그래프를 나타낸다.

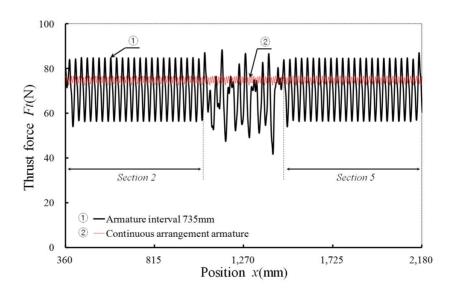


Fig. 16. Thrust force comparison with continuous and discontinuous armature



그림 16에서 보는 것과 같이 전기자 분산배치 시스템은 전기자 사이의 간격으로 인해 2구간과 5구간의 사이에서 불규칙한 파형이 발생한다. 따라서 추력은 일정한 파형이 발생하는 2구간과 5구간에 대해 비교하였다. 전기자 분산배치 시스템의 평균 추력은 70.32N으로 전기자 연속배치 시스템의 74.80N대비 5.98% 감소한 값이다. 또한 추력 리플에 있어서도 전기자 연속배치 시스템은 5.52%인 반면 전기자 분산배치 시스템은 40.74%가 발생하였다. 이러한 추력리플의 증가는 가동자의 진동 및 소음을 유발하기 때문에 전기자 분산배치 시스템의 개발에 있어 반드시 저감해야 한다. 추력 리플의 크기는 코깅력의 크기와 관련이 있으며 전기자 분산배치 시스템의 코깅력은 단부 코깅력이 주를 이루고 있는 점을 바탕으로 단부 코깅력 저감을 통해 추력 리플을 저감하고자 하였다.

PMLSM의 코깅력 저감법에는 치 형상을 조절, 영구자석 형상 조절, 보조구의 설치 등 다양한 방법이 사용되고 있으며, 본 논문에서는 전기자 한 모듈의 양쪽 측면에 보조치를 설치하고 최적설계하여 코깅력을 저감하고자 한다. 보조치의 최적설계에는 다구치의 실험계획법을 사용하여 최소한의 실험으로 각 인자들의 기여도를 분석하고 기여도가 큰 인자부터 수준 범위를 조절한다. 이를 통해 본논문에서 사용한 PMLSM의 코깅력 저감에 최적인 보조치를 도출하고 전기자 분산배치 시스템에 적용하고자 한다.



2. 다구치 실험계획법을 이용한 보조치 최적 설계

다구치의 실험계획법은 직교배열을 이용하는 실험계획법으로, 요인 간에 직교성을 가지도록 실험을 계획하여 데이터를 구하기 때문에 같은 실험횟수라도 인자의 효과에 대해 검출력이 더 좋은 검정을 할 수 있고 정도가 더 높은 추정을할 수 있는 것으로 밝혀져 있다. 이에 직교배열표란 교호작용 가운데 기술적으로 생각하여 무시될 수 있는 것을 주효과와 교락시켜 실험의 크기를 줄일 수 있는 실험계획을 짜도록 고안되어 정리된 표로써 인자간의 직교성이 이루어지도록만들어 놓은 표이다[15]. 직교배열표를 작성하기 위해서는 인자와 수준수를 결정해야 한다. 인자는 변수와 같은 개념이며 수준은 인자들의 범위내의 규칙적인구간을 의미한다.

인자와 수준수를 결정하기 위해 먼저 보조치의 기본모델을 그림 17과 같이 구성하여 나타낸다. X는 보조치와 전기자 사이간격으로 최소값은 1mm이다. Y는 보조치의 높이로 최소값은 9mm, 최대값은 29mm이다. D는 보조치의 길이로 슬롯피치인 40mm를 최대값으로 정한다. 여기서 X, Y, D는 인자이고 인자들의 값들을 수준이라고 한다. 이러한 값들을 기준으로 첫 번째 다구치 직교배열표를 표 3에 나타내고 목적함수는 단부 코깅력의 최대치와 최소치의 차이값으로 정한다. 또한 공정특성에 대한 잡음인자의 영향을 효과적으로 추정할 수 있는 망소특성 SN 비를 식 (10)을 통해 구하여 나타낸다. 여기서 y는 해석을 통해 구한 단부 디텐트력의 최대 최소 차이값, n은 반복 해석수를 나타낸다.

$$SN \, ratio = -10 \log_{10} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y^2}{n} (dB) \tag{10}$$

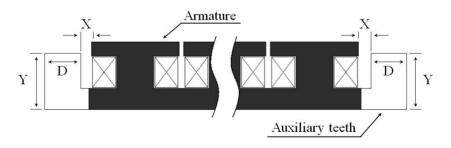


Fig. 17. Auxiliary teeth model





표 3을 통해 각 인자에 따른 영향도를 파악할 수 있는 주효과 그래프를 그림 18에 나타낸다. 그림 18을 통해 Y인자의 기여도가 가장 큼을 예측해 볼 수 있으나 정확한 수치적 비교를 위해 SN비를 이용한 기여율표를 작성한다. 표 4에 기여율표를 나타냈으며 Y인자의 기여율이 78.86%로 가장 높은 영향을 미침을 알수 있다. 또한 그림 18의 주효과 그래프 상에서 알 수 있듯이, Y값이 13전후 일때 단부 코깅력의 최대 최소의 차이값이 가장 작게 나타난다. 따라서 Y인자의수준 범위를 10.13.16으로 재조정하여 다구치 실험계획표를 재작성 하였다.

	X [mm]	Y [mm]	D [mm]	End cogging force peak to peak[N]	SN ratio
1	1	20	40	27.22	-28.6990
2	1	13	27	14.98	-23.5079
3	1	6	14	23.53	-27.4308
4	2	20	27	31.66	-30.0101
5	2	13	14	6.33	-16.0294
6	2	6	40	26.17	-28.3571
7	3	20	14	35.90	-31.1014
8	3	13	40	18.69	-25.4335
9	3	6	27	25.41	-28.1004

Table 3. First Taguchi's orthogonal array

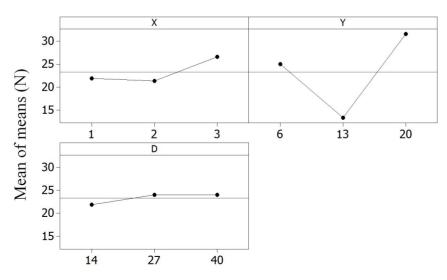


Fig. 18. First main effect plot for means



Table 4. First contribution ratio table

	Х	Υ	D	Sum
1	-26.55	-29.94	-27.50	
2	-24.80	-21.66	-27.21	-238.67
3	-28.21	-27.96	-24.85	
Average	-26.52	-26.52	-26.52	
Sum of square	1.94	12.47	1.40	15.81
contribution ratio[%]	12.28%	78.86%	8.86%	100%

표 5에 재작성한 다구치 직교배열표를 나타낸다. 동일하게 단부 코깅력의 최대 최소 차이값과 SN비를 함께 나타내었다. 이를 통한 주효과 그래프는 그림 19에, 기여율 분석표는 표 6에 나타낸다. 두 번째 직교배열표를 통한 분석에서는 D인자가 59.64%의 기여율을 나타냈으며 수준값이 적을수록 단부 코깅력의 최대최소 차이값도 감소하였다. 따라서 D인자의 수준값 40은 제거하고 9, 18, 27로 재구성하여 세 번째 직교배열표를 작성하였다.

Table 5. Second Taguchi's orthogonal array

	X [mm]	Y [mm]	D [mm]	End cogging force peak to peak[N]	SN ratio
1	1	16	40	33.32	-30.4554
2	1	13	27	15.04	-23.5431
3	1	10	14	15.73	-23.9373
4	2	16	27	19.20	-25.6666
5	2	13	14	6.46	-16.2065
6	2	10	40	22.89	-27.1921
7	3	16	14	12.29	-21.7908
8	3	13	40	18.27	-25.2358
9	3	10	27	9.61	-19.6582





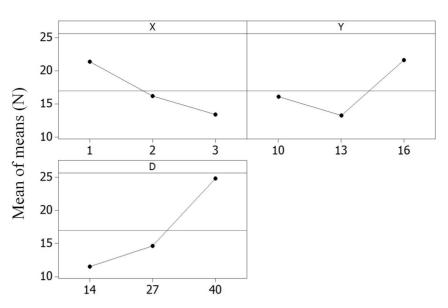


Fig. 19. Second main effect plot for means

Table 6. Second contribution ratio table

	X	Υ	D	Sum
1	-25.98	-25.97	-27.63	
2	-23.02	-21.66	-22.96	-213.69
3	-22.23	-23.60	-20.64	
Average	-23.74	-23.74	-23.74	
Sum of square	2.60	3.11	8.44	14.15
contribution ratio[%]	18.41%	21.95%	59.64%	100%



세 번째 직교배열표는 표 7에, 주효과 그래프는 그림 20에, 기여율 분석표는 표 8에 나타낸다. 세 번째 직교배열표를 통한 분석에서는 X인자가 56.31%의 기여율을 나타냈으며 수준값 2 내외의 값일 때 단부 코깅력의 최대 최소 차이값도 감소하였다. 하지만 X인자의 경우 각 수준별 차이값이 1mm에 지나지 않기 때문에 추가적인 직교배열표 작성은 이보다 조밀한 값으로 구분하는 것을 의미한다. 또한 이와 같은 분석은 무한대의 실험을 의미하기 때문에 이 이상의 실험은 더이상 의미가 없다고 판단하여 세 번째 직교배열표를 마지막으로 분석을 종료하였다.

본 절에서는 다구치의 직교배열표를 통해 기여율을 분석하고 가장 기여율이 큰 인자부터 수준수를 조절한 결과 최종적으로 표 7과 같은 직교배열표를 도출할 수 있었다. 이는 X가 1-3mm, Y가 10-16mm, D가 9-27mm 일 때 단부 코깅력의최대 최소 차이값이 가장 적게 도출되었다. 각 직교배열표상에 도출된 단부 코깅력만을 비교해 보아도 첫 번째 표에서 단부 코깅력의 최대 최소 차이값들의평균은 23.32N, 두 번째 표에서의 평균은 16.98N 마지막으로 세 번째 표에서의평균은 12.94N이다. 각 표의 평균값 또한 저감됨을 통해 본 실험의 신뢰성을 입증할 수 있으며, 따라서 세 번째 직교배열표에서 도출된 수준값을 통해 최적 모델을 도출할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 구체적인 최적 모델 도출에는 전조합 실시법에 상응하는 실험이 요구되기 때문에 본 논문에서는 편의상 직교배열표상의 최적값을 보조치의 최적모델로 결정하였다.

Table 7. Third Taguchi's orthogonal array

	X [mm]	Y [mm]	D [mm]	End cogging force peak to peak[N]	SN ratio
1	1	10	9	19.75	-25.9131
2	1	13	18	6.22	-15.8721
3	1	16	27	9.89	-19.8999
4	2	10	18	11.15	-20.9482
5	2	13	27	12.40	-21.8707
6	2	16	9	7.68	-17.7127
7	3	10	27	9.61	-19.6582
8	3	13	9	12.25	-21.7596
9	3	16	18	27.51	-28.7911





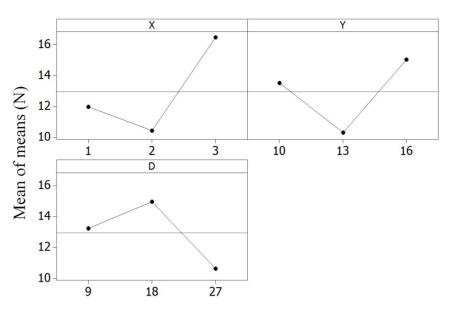


Fig. 20. Third main effect plot for means

Table 8. Third contribution ratio table

	X	Υ	D	Sum
1	-20.56	-22.17	-21.80	
2	-20.18	-19.83	-21.87	-192.43
3	-23.40	-22.13	-20.48	
Average	-21.38	-21.38	-21.38	
Sum of square	2.07	1.20	0.41	3.68
contribution ratio[%]	56.31%	32.54%	11.15%	100%



3. 보조치 최적 모델의 적용

앞 절에서 도출한 보조치의 최적 모델은 X=1, Y=13, D=18이다. 본 모델을 신개념 전기자 분산배치 시스템에 적용하여 추력을 분석했으며 전기자 사이간격 또한 보조치 적용 후 재조절한 결과 전기자 사이간격이 720mm일 때 코깅력이 가장 저감됨을 확인하였다. 전기자 연속배치와 보조치가 적용된 전기자 분산배치의 추력을 그림 21에 나타낸다.

보조치가 적용된 모델의 평균 추력은 72.38N으로 연속배치대비 3.22%가 감소됐으며 리플은 16.25%가 발생하였다. 하지만 보조치를 적용하지 않은 모델 대비평균추력은 2.85%가 증가했으며 리플은 24.5% 감소하였다. 비록 전기자 연속배치 모델에 비해서는 평균 추력도 작고 리플도 크게 발생하지만 보조치를 통해전기자 분산배치 시스템의 리플을 저감할 수 있음을 확인하였다.

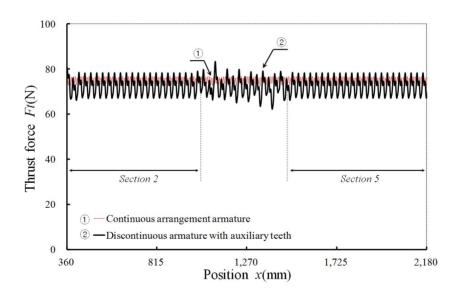


Fig. 21. Thrust force comparison with continuous armature and discontinuous armature with auxiliary teeth





다음으로, 보조치가 적용된 모델의 추력을 초기 전기자 간격 360mm 모델과 비교하여 그림 22에 나타낸다. 각 그래프의 최대값에서는 1번 모델이 175.12N, 2번 모델이 78.60N으로 2번 모델이 55.11%의 저감을 보였다. 2구간과 5구간에서의 평균 추력은 1번 모델이 70.63N, 2번 모델이 72.38N으로 2번 모델이 2.43%증가하였다. 마지막으로 추력 리플에서는 1번모델이 40.95%, 2번모델이 16.25%로 2번 모델이 24.71% 더 저감됨을 보였다.

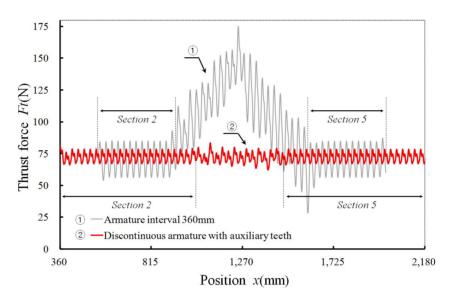


Fig. 22. Thrust force comparison with armatures interval 360mm and discontinuous armature with auxiliary teeth





Ⅵ. 결론

본 논문은 영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)를 장거리 반송시스템에 적용하는 데에 있어 문제점으로 작용하는 재료비용 및 제작시간 등의 문제점을 해결하기위해 가동자의 가속 및 감속이 필요한 구간에만 전기자를 설치하는 전기자 분산배치 시스템에 대한 연구를 수행하였다.

먼저 기존의 전기자 분산배치 시스템의 제어 불가능 영역 발생 및 단부 코깅력의 문제점에 대해 분석하였다. 제어 불가능 영역이 존재하는 문제점에 대해서는 전기자 사이간격을 조절하는 방법과 가동자의 길이를 조절하는 방법을 분석하여 가동자와 전기자가 일정구간 항상 대항할 수 있는 모델을 도출하고자 하였다. 결과적으로 가동자의 길이를 조절한 모델이 가동자와 전기자를 일정구간 항상 대항시키면서 전기자의 사이간격 및 전기 강판 사용량 저감률을 전과 동일하게 유지할 수 있었다. 하지만 가동자의 길이를 무한정 증가시킬 수 없기 때문에본 논문에서는 가동자의 길이를 전기자 모듈 길이의 3배수인 1080mm로 제한하여기존의 전기자 분산배치 시스템의 문제점을 개선한 신개념 전기자 분산배치 시스템의 기본모델 가동자로 채택 하였다.

제안된 가동자에 9슬롯을 한 모듈로 하는 전기자와 전기자 사이간격 360mm를 적용하여 기본모델을 나타내었으며 이를 FEM 기반 20 수치 해석한 결과 3구간에서 41.46N이 발생하여 2구간 대비 2배 이상의 코깅력이 발생함을 확인하였다. 이러한 3구간의 힘을 감소시키기 위해 각 구간을 분석하였으며 3구간의 코깅력은 1구간의 코깅력과 2구간의 코깅력 합과 동일함을 알 수 있었다. 따라서 분석한 내용을 수식으로 정리하여 3구간을 제거할 수 있는 식을 도출하였다. 식에따라 720mm의 전기자 사이간격을 적용한 결과 최대 코깅력은 ±25.09N으로 기본모델보다 40%의 저감을 보였다. 하지만 여전히 2구간보다 큰 코깅력이 발생하고 있기 때문에 단부 코깅력의 진입 및 반출하는 극수에 따라 파형이 발생하는 특성을 이용하여 극 피치인 30mm의 1/2인 15mm를 이동시키는 주기성 변경을 통해추가적인 저감을 하였다. 그 결과 전기자 사이간격이 735mm일 때 최대 코깅력은 13.40N이 발생하여 기본모델 대비 67.7%의 저감을 보였다.

도출된 모델을 바탕으로 전기자 연속배치와 추력비교를 통해 개선여부를 판단하고자 하였다. 하지만 평균추력 74.80N, 추력리플 5.52%인 전기자 연속배치 시



스템 대비, 전기자를 간격조절 한 모델은 평균추력 70.32N, 추력리플 40.74%가 발생하여 코깅력의 추가적인 저감이 요구되었다. 따라서 코깅력 저감법 중 보조치를 설치하는 방법을 적용하여 다구치의 실험계획법을 통해 최적 설계하였다. 총 3번의 직교배열표 작성을 통해 X=1, Y=13, D=18인 최적모델을 도출하였다. 최적 보조치를 적용 후 전기자 사이간격 또한 새로 조절하였으며 이때의 전기자 최적 간격은 720mm로 평균 추력은 72.38N, 추력 리플은 16.25%가 발생하였다. 이는 전기자 사이간격 360mm인 기본모델 대비 최대 코깅력에서 55.11%의 저감을 보였고 보조치를 적용하지 않은 모델 대비 평균추력은 2.85%가 증가했으며 리플은 24.5% 감소하였다. 비록 평균 추력과 추력리플이 전기자 연속배치 모델에 미치지는 못했지만 전기자 사이간격을 조절하는 것과 전기자 양 끝단에 보조치를 적용하는 것은 전기자 분산배치 시스템의 문제점 개선에 효과적임을 확인할 수있었다.

본 논문에서 제시한 전기자 사이간격 결정 수식, 보조치 적용 및 최적화 방법은 본 논문의 기본모델에만 국한되는 것이 아니라 다른 리니어 전동기에도 적용이 가능하다. 따라서 공장 자동화 및 다양한 장거리 반송 시스템에서 PMLSM의 재료비용 및 제작시간을 저감할 수 있으며 시스템의 설계 지표로도 활용 가능하다. 또한 수식을 역으로 적용 시킬 경우 수요처에서 요구되는 가동자 및 전기자의 길이도출이 가능하기 때문에 광범위한 분야에 활용 될 수 있으며, 본 연구를기반으로 단부 코깅력 저감에 대한 연구가 추가적으로 수행 될 경우 기기의 특성을 전기자 연속배치와 유사한 수준까지 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.





참 고 문 헌

- [1] R. Thornton, M.T. Thompson, B.M. Perreault, Jiarong Fang, "Linear motor powered transportation [Scanning the Issue]", Proc. of the IEEE, Vol. 97, No. 11, pp. 1754-1757, 2009.
- [2] R. Hellinger, and P. Mnich, "Linear motor-powered transportation: history, present status, and future outlook", Proc. of the IEEE, Vol. 97, No. 11, pp. 1892-1900, 2009.
- [3] K. C. Lim, J.K. Woo, G. H. Kang, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans. On Magn., Vol. 38, No. 2, pp. 1157-1160, 2002.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] R. Hellinger, and P. Mnich, "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook", Proc. of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1892-1900, Nov. 2009.
- [8] P. Hammond, "Linear Motion Electromagnetic Systems", Electron. and Power, vol. 32, ls. 2, pp. 169, 1986.





- [9] 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.
- [10] B.M. Perreault, "Optimizing Operation of Segmented Stator Linear Synchronous Motors", Proc. of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1777-1785, 2009.
- [11] 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.
- [12] T. Ishikawa, G.R. Slemon, "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing", IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 2, pp. 2028-2031, 1993.
- [13] 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
- [14] I.S. Hwang, H.S. Yoon, and C.S. Koh, "Optimal design of a PMLSM with 9 pole 10 slot for detent force reduction", Trans. KIEE., vol. 57, no. 4, pp. 589-595, Mar. 2008.
- [15] D.H. Hyun, and Y.S. Lee, "A Study On the Machinability Using S/N Ration", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol.14, No.6, pp. 23-28, 1992.





감사의 글

석사과정 진학에 대한 결정을 하고 마치기까지의 과정들을 뒤돌아보면, 그 길은 결코 쉽지 않은 길이였으며 많은 도움의 손길을 건네주셨던 고마운 분들이 계셨기에 가능했음을 생각하게 됩니다.

먼저 모든 상황을 주관하시고 부족한 제가 이 시기를 통해 깨닫고 성장하도록 인도하여주신 하나님 아버지 감사합니다.

석사과정동안 자식같이 사랑해주시고 지도해 주신 김용재 교수님께 감사의 말씀을 올립니다. 학부 과정동안 확실한 목표 없이 맹목적으로 학업에 임했던 저였고, 석사과정에 진학하고서도 갈팡질팡하던 저에게 언제나 따뜻한 관심으로이끌어주시고 아낌없는 조언을 주신 덕분에 제가 나아가야 할 길에 대해 깨닫게되었고 학업에 있어서도 지식의 풍성함을 얻을 수 있었습니다. 교수님의 가르침마음에 새기고 더욱더 성장하여 든든하고 멋진 제자로 성장하겠습니다.

바쁘신 와중에도 소중한 시간 할애해 주셔서 아낌없는 지도와 조언으로 본 논문을 심사해주신 이우선 교수님, 조금배 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 또한 학부 과정부터 지식의 폭을 넓혀주시고 많은 격려와 조언을 주신 최효상 교수님, 김남훈 교수님, 김재홍 교수님, 김종훈 교수님께도 감사를 드립니다.

항상 같은 공간에서 희로애락을 같이하며 서로의 발전을 위해 힘써준 에너지 변환역학 실험실의 선후배들에게도 감사의 말을 전합니다. 언제나 든든한 기둥 이며 어머니의 마음을 가진 김성진 선배님, 깊은 생각과 아이디어 뱅크인 민석 이, 늘 밝은 모습에 다재다능한 찬호, 맡은바 책임을 다하는 든든한 진우, 공부 에 대한 열정이 가득한 기광이, 꿈을 향해 열심히 준비중인 선종이와 규상이 까 지 실험실 가족 모두에게 감사의 마음을 전합니다.

한집에 살지만 얼굴을 마주하는 시간이 드물었던 가족에게는 미안한 마음을 담아 감사를 표합니다. 늘 격려해주시고 부족한 것은 없는지 하나라도 더 챙겨





주시는 사랑하는 어머니, 사랑하는 아버지 감사합니다. 부모님의 기쁨이 되는 멋진 아들이 되겠습니다. 나의 사랑하는 동생들 찬종이와 세종이, 형으로서 많 은 도움이 못되어 미안하지만 각자의 길에 대해 열심히 준비하는 모습이 너무나 도 자랑스럽습니다. 또한 불평불만이 많을 텐데 다 이해해주고 바쁜 시간 쪼개 가며 응원해주는 사랑하는 예은이 에게도 감사합니다.

마지막으로 좁은 지면에 일일이 언급하지 못한 나의 동기들, 친구들, 학교 및 동아리 선후배들, 함께 일했던 업체 사람들 모두에게 다시 한 번 감사의 말씀을 올립니다.

오늘의 이 열매에 대해 교만하지 않고 도움주신 많은 분들에게 감사의 마음을 갖고 더 성장하여 은혜에 보답하겠습니다.

감사합니다 그리고 사랑합니다.

2014년 12월 박 의 종 올림.

