

1차측 분산 배치 리니어 동기 모터의 재가속부에서의 구동 고찰

김용재\*<sup>1)</sup>, 임용수<sup>2)</sup>, 和多田 雅哉<sup>1)</sup>, 鳥居 薫<sup>1)</sup>, 海老原 大樹<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>무사시 공업 대학(일본), <sup>2)</sup>경상대학교

Drive Investigation of the Discontinuous Primary Linear Synchronous Motor in the Re-accelerator

Yong-jae Kim\*<sup>1)</sup>, Yong-su Um<sup>2)</sup>, Masaya Watada<sup>1)</sup>, Susumu Torii<sup>1)</sup> and Daiki Ebihara<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>Musashi Institute of Technology(Japan), <sup>2)</sup>Gyeong Sang National University

**Abstract** - The discontinuous primary linear synchronous motor is proposed as a driving source in the middle-distance transportation systems in factories and facilities. This paper describes the examination about the acceleration characteristics and a synchronizing method when the secondary mover overlaps with the primary from the inertia travel motion section in the whole of the re-acceleration part.

가이드 시스템은 2차측의 부하가 증가함에 따라 레일과 휠 사이의 마찰력을 저감시키는 특징이 있다. 1차측 분산 배치 리니어 동기 모터의 사양을 표 1에 나타내었다.

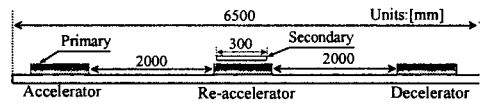


그림 2. 1차측 분산 배치 리니어 동기 모터의 1차측 배치의 개략도

표 1. 1차측 분산 배치 리니어 동기 모터의 사양

Item	[Unit]
<b>Primary</b>	
Pole Pitch $\tau$	33[mm]
Length of the Stator (per unit)	324[mm]
Magneto motive force $mmf$	410.8[A]
<b>Secondary</b>	
Number of magnet	8[Pole]
Magnet	
- Length	28[mm]
- Width	45[mm]
- Thickness	3[mm]
- Maximum energy product $BH_{max}$	238.5[kJ/m <sup>3</sup> ]
Force	160[N]
Air-gap	gap 4.0-8.0[mm]

1. 서론

최근, 리니어 유도 모터에 비해 전력 효율이 좋고, 정지시의 위치 결정 유지 능력을 가지는 코에너지 자석 재료를 이용한 영구 자석형 리니어 동기 모터가 반송장치의 구동원으로서 사용되고 있다.[1] 일반적으로, 리니어 모터를 이용한 반송장치는 1차측을 반송 경로 전체에 배치하는 지상 1차측 설치 방식이 적용되고 있지만, 장거리 반송 장치에 적용할 경우, 코스트가 상승하는 문제가 생긴다. 따라서, 코스트를 저감시키고 장거리 반송을 실현하기 위해 가감속운동이 필요한 부분에 리니어 동기 모터의 1차측 분산 배치 방식의 리니어 동기 모터가 제안되었다.[2] 1차측을 연속 배치할 경우와 분산 배치할 경우의 운동 패턴은 그림 1과 같다.

본 논문에서는 1차측을 분산 배치할 경우, 문제점으로 여겨왔던 재가속부에 있어서의 동기화 수법 및 오픈 루프 제어에 의한 재가속부의 구동 특성에 대해 기술하고자 한다.

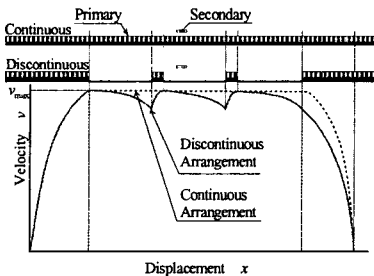


그림 1. 연속배치와 분산배치의 운동 패턴 비교

2. 1차측 분산 배치 리니어 동기 모터

2.1 실험장치의 구성

1차측 분산 배치 리니어 동기 모터의 1차측 배치 방식은 그림 2와 같다. 1차측은 주행로 전장 6500[mm]에 걸쳐, 복수의 설치가 가능하다. 그리고 2차측에는 네오디뮴계 희토류 자석을 스쿠 배치 하였다. 이 스쿠 배치에 의해, 완전 대항시의 코깅력을 저감하는 것이 가능해졌다. 2차측의 지지기구로서 V자형 주행로(레일)를 V자형 가이드 휠이 주행하는 V가이드 시스템을 채용하였다. 이

2.2 동기화 수법

2차측의 속도, 위치검출은 광학식 센서를 1차측에 설치해, 길이가 기지(既知)인 차광판을 2차측에 설치해, 센서를 차광하는 시간 간격으로부터 속도 정보를 얻어, 동기화를 행한다. 여자 개시시의 주파수는 2차측이 1차측에 진입하는 속도와 극 피치에 의해 얻어진다. 여자 개시시의 주파수를 결정하는 관계식은 식(1)과 같다. 그리고, 여자 개시까지의 시간은 센서로부터 여자 개시점까지의 거리  $d$ 와 2차측의 속도로부터 식(2)에 의해서 구해진다. 이 관계를 그림 3에 나타내었다[3].

$$f_s = \frac{v_i}{2\tau} \tag{1}$$

$$t_s = \frac{d}{v_i} \tag{2}$$

여기서  $f_s$ [Hz]: 여자 개시시의 주파수,  $v_i$ [m/s]: 광학식 센서 통과시의 2차측 속도,  $t_s$ [s]: 여자개시까지의 시간,  $d$ [m]: 광학식 센서와 여자 개시점의 거리,  $\tau$ [m]: 극 피치

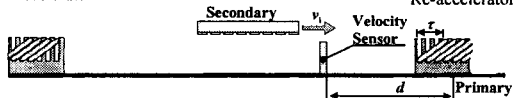


그림 3. 동기화에 있어서의 각 변수의 관계

### 3. 1차측 분산 배치 리니어 동기 모터의 오픈 루프 제어에 의한 재가속부의 재가속 특성

2차측은 시동부에서 설정한 속도까지 가속된 후, 반출된다. 그리고 무여자 구간을 수행후, 재가속부에 진입하게 되며, 그 순간 동기화를 행하게 된다. 그 후, 2차측은 재가속 되어, 반출에 이를 때까지 위치 피드백 없이 미리 설정된 구동 패턴에 의해 구동한다.

#### 3.1 등가속도 구동 패턴

등가속도 구동 패턴은 2차측의 위치에 대해서 가속도가 일정한 구동 패턴이다. 등가속도 구동 패턴을 그림 4에 나타내었다. 그리고 이 구동 패턴을 이용해 구동시켰을 경우의 결과를 그림 5에 나타내었다. 설정한 운전 조건은 지령가속도를 파라미터로 하여, 공극  $g=5.0[\text{mm}]$ , 탑재 부하 중량  $m=0[\text{kg}]$ , 재가속부에서의 진입속도  $v_i=1.0[\text{m/s}]$ 로 설정하였다. 그리고 여자전류는  $1.3[\text{A}]$ 일정으로, 실험에 사용한 1차측 길이는  $324[\text{mm}]$ 로 하였다. 그림 5에서 2차측은, 지령치에 대해서 가속을 하고 있는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 동기화 수법에 의해 동기화가 가능하다는 것을 나타내고 있다. 그러나, 지령 가속도를 변화시켜도 재가속시에 2차측에 속도 맥동이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이 속도 맥동은 부하각의 변동이 주된 요인[4]으로 2차측의 위치에 대한 부하각의 특성에 대해서 검토하였다. 그 결과, 지령가속도  $2[\text{m/s}^2]$ 시,  $-9[\text{deg.}] \sim 73[\text{deg.}]$ 까지 부하각이 변동하고 있는 것이 확인되었다.

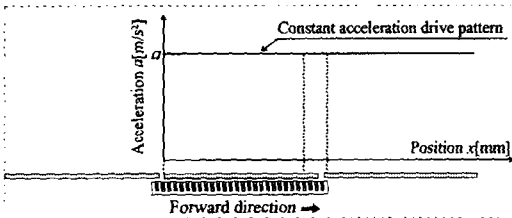


그림 4. 등가속도 구동 패턴

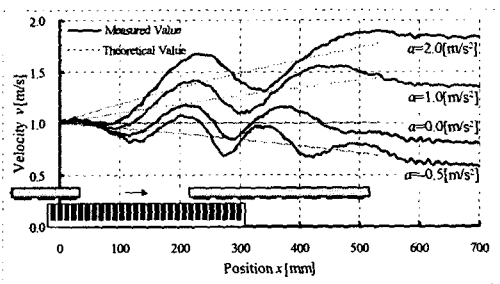


그림 5. 등가속도 구동 패턴의 2차측 위치-속도 특성

#### 3.2 위치 피드백을 이용하지 않는 부하각 일정 제어에 의한 지령 전류 패턴

모터의 요구 추력과 발생 추력의 관계식은 식(3)과 같다.

$$F = ma = Kisin\delta \quad (3)$$

여기서  $m[\text{kg}]$ : 2차측의 질량,  $a[\text{m/s}^2]$ : 가속도,  $i[\text{A}]$ : 전류,  $K[\text{N/A}]$ : 추력정수( $K=52.85[\text{N/A}]$ ),  $\delta[\text{deg.}]$ : 부하각

2차측이 무여자 구간을 수행후, 재가속부에 진입하여 재가속을 할 때, 발생하는 속도 맥동은 부하각의 변동에 의한 것이라는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 이 속도 맥동을 억제하기 위해서, 식(3)의 부하각이 일정하게 되

는 오픈 루프 제어에 의한 부하각 일정 제어 방식에 대하여 검토하였다. 부하각 일정 제어의 구동 원리로서 부하각 일정시의 발생 추력의 변화를 그림 6에 나타낸다. 그림 6에서 부하각을 일정하게 하고 전기자 전류의 진폭을 제어하는 것으로 요구 추력을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. 이 제어법은 부하각을 최대치( $90[\text{deg.}]$ )일정으로 설정함으로써, 요구 추력에 대해 최소 전류로 구동할 수가 있다. 따라서, 각 위치의 요구 추력의 변화에 맞추어 전류를 변화 시키는 지령 전류 패턴을 도출하면 재가속부에서 발생하는 속도 맥동은 억제될 것이다. 그림 7은 재가속부에서의 지령 전류 패턴을 나타내고 있다. 지령 전류 패턴의 도출 방법을 그림 8을 이용해 설명하고자 한다. 그림 8은 탑재 부하 중량  $8.6[\text{kg}]$ , 2차측 자체 중량  $4.7[\text{kg}]$ , 지령 가속도를  $2[\text{m/s}^2]$ 로 했을 경우의 전류치에 대한 발생 추력의 그래프이다. 이 조건을 식(3)에 대입하면 최대 전류치를 구할 수 있다. 예를 들어 어떤 위치의 가속도가  $1.005[\text{m/s}^2]$ 의 경우, 식(3)에 대입해 계산하면 요구 추력은  $13.37[\text{N}]$ 이 된다. 그림 8에서 부하각  $90[\text{deg.}]$ 을 일정하게 유지하기 위해서는 발생 추력이  $13.37[\text{N}]$ 이 되는 전류  $0.253[\text{A}]$ 를 결정하면 된다. 이 방법으로 재가속부에서의 지령 전류 패턴을 도출한다. 그림 8의 방법을 이용해 도출한 지령 전류 패턴은 아래식과 같다. 단, 식(4)은 진입부의 지령 전류 패턴이고 식(5)는 완전 대항부의 지령 전류 패턴의 식이다. 그리고, 식(6)은 반출부의 지령 전류 패턴의 식을 나타내고 있다.

$$i(t) = \frac{I_m}{a^*} \times \left( -\frac{3v_i a^* + \sqrt{9v_i a^{*2} + 6x_c a^{*3}}}{6x_c} t + \frac{a^*}{p} \right) \quad (4)$$

$$i(t) = I_m \quad (5)$$

$$i(t) = \frac{I_m}{a^*} \times \left( -\frac{3v_i a^* + \sqrt{9v_i a^{*2} + 6x_c a^{*3}}}{6x_c} t + a^* \right) \quad (6)$$

여기서,  $a^*[\text{m/s}^2]$ : 지령 가속도,  $p[\text{pole}]$ : 2차측 극수,  $v_i[\text{m/s}]$ : 진입 속도,  $I_m[\text{A}]$ : 최대 전류치,  $x_c[\text{m}]$ : 여자 개시점으로부터 2차측이 1차측에 완전대항 할 때까지의 거리,  $x_c[\text{m}]$ : 2차측이 완전 대항으로부터 1차측을 완전히 벗어 날 때까지의 거리

도출한 지령 전류 패턴을 이용해 구동시켰을 경우의 결과를 그림 9에 나타내었다. 설정한 운전 조건은 지령가속도를  $2[\text{m/s}^2]$ 로 하고, 2차측 중량은  $4.7[\text{kg}]$ (2차측 자체 중량), 공극  $g=5.0[\text{mm}]$ , 탑재 부하 중량  $0[\text{kg}]$ , 재가속부에서의 진입속도  $v_i=1.0[\text{m/s}]$ 로 설정하였다. 이 때의 부하각은  $90[\text{deg.}]$ 일정으로 설정하였으며, 최대 전류치는  $0.18[\text{A}]$ 이다. 실험에 사용한 1차측 길이는 재가속 특성을 정확히 분석하기 위하여,  $714[\text{mm}]$ 로 하였다. 그림 9에서 지령 전류 패턴으로 구동할 경우, 등가속도 구동 패턴에 의해 구동 시킬 경우 보다, 2차측이 무 여자 구간을 수행 후 재가속을 할 때 발생되었던 속도 맥동은 억제되었다는 것을 알 수 있다. 그리고 이때의 부하각의 변동을 검토한 결과,  $49[\text{deg.}] \sim 90[\text{deg.}]$ 의 범위에서 부하각이 변동되어, 지령 전류 패턴의 부하각의 변동이 등가속도 구동 패턴의 부하각의 변동 보다 작음을 알 수 있다.

그림 10은 2차측에 부하 중량  $28.2[\text{kg}]$ 을 탑재 할 경우의 2차측의 속도-위치 특성을 나타내고 있다. 운전 조건은 위의 조건과 같으며, 이 경우의 최대 전류치는  $1.245[\text{A}]$ 이다. 그림 10에서, 2차측에 부하를 탑재해도 재가속부에서의 안정된 가속 특성을 확인할 수 있다.

실험 결과를 통해 지령 전류 패턴으로 구동 시키면, 등가속도 구동 패턴에 비해, 보다 안정된 재가속 특성을

얻는 것을 확인 할 수 있었다.

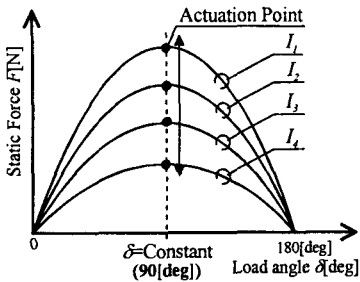


그림 6. 부하각 일정 제어의 개념도

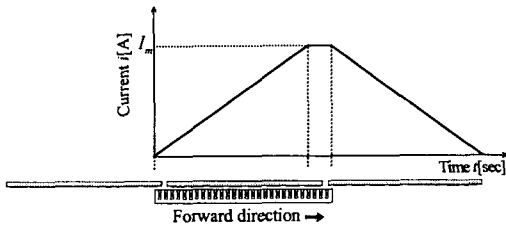


그림 7. 재가속부에서의 지령 전류 패턴

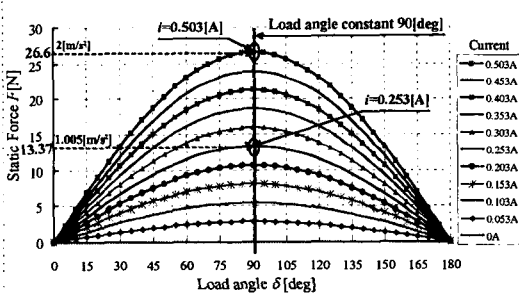


그림 8. 전류치에 대한 발생 추력의 그래프

#### 4. 결 론

본 논문에서 기술한 동기화 수법 및 구동 패턴을 이용하는 것으로 오픈 루프 제어에 의한 구동 방식이라도 재가속부에서의 동기화 및 재가속 특성을 얻을 수 있는 것이 확인되었다. 그리고, 위치 피드백을 이용하지 않는 부하각 일정 제어에 의한 지령 전류 패턴으로 구동을 행하면, 반출부에서 속도가 감소했지만, 완전 대항부까지의 2차측의 위치에 대한 부하각의 변동은 등가속도 패턴 보다 51[%] 적어짐을 알 수 있었다. 또한, 탑재 부하 중량이 기지(既知)라면 오픈 루프 제어에서도 안정된 가속 특성을 얻을 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

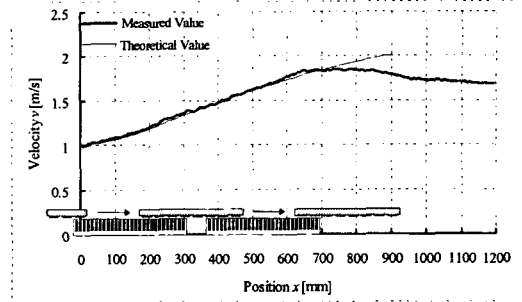


그림 9. 위치 피드백을 이용하지 않는 부하각 일정 제어에 의한 2차측의 위치-속도 특성 (탑재 부하 중량 0[kg], 최대 전류치 0.18[A])

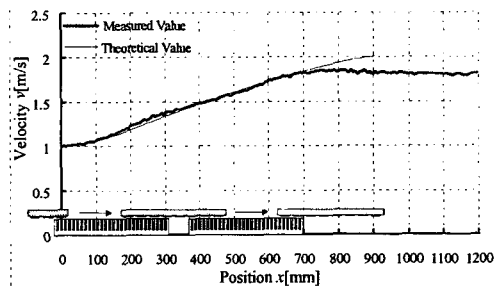


그림 10. 위치 피드백을 이용하지 않는 부하각 일정 제어에 의한 2차측의 위치-속도 특성 (탑재 부하 중량 28.2[kg], 최대 전류치 1.245[A])

#### [참 고 문 헌]

- [1]M. Karita: Present Status of Linear Drives for Industry Applications in Japan , The Third International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA 2001), pp.462-467 (2001)
- [2]K.Seki, M.Watada, S.Torii and D.Ebihara: Discontinuous Arrangement to Long Stator Linear Synchronous Motor for Transportation System ,International Conference on Power Electronics and Drive System(PEDS97), pp.697-702(1997)
- [3]M.Kajioka, K.Oka, M.Watada, S.Torii and D.Ebihara: Optimal Drive Control Timing in Discontinuous Arranged Linear Synchronous Motor Transfer System , Symposium on Power Electronics, Electricdrives, Automation & Motion(speedam 2000), pp.A2-25-A2-30(2000)
- [4]Y. Kim, M. Watada, S. Torii, D. Ebihara: A Study of the Discontinuous Primary Linear Synchronous Motor in order to Decrease the Vibration , The International Conference on Electrical Engineering (ICEE2002), pp.908-912(2002)