

자기 부상 열차용 리니어모터의 슬립 주파수 제어에 관한 연구

임 달 호, 김 규 탁, 김 영 관*
한양대학교 전기공학과

A study on the slip frequency control of linear induction motor for magnetic levitation transit

Im Dal-Ho, Kim Gyu-Tak, Kim Young-Kwan*
Hanyang Univ.

ABSTRACT

In this study, a variety of characteristics is considered when LIM for transit is driven with acceleration and deceleration. From the characteristics of constant voltage, with V/f ratio fixed, slip frequency is derived.

With slip frequency of 12[Hz] and objective velocity of 40[km/h], the robust control characteristics which are generated constant thrust and normal force, except for open-loop control interval, are obtained.

1. 서 론

리니어 모터는 자기 부상 열차, 저상 경량화 전철, 자동 반송 장치등의 구동용과 FA, OA기기를 비롯한 정보관계기에 서보용으로 널리 이용되고 있으며 앞으로 그 응용 범위는 더욱 확대될 것으로 기대된다[1, 2].

자기 부상 열차 및 저상 경량화 전철의 구동용으로 표현되는 고속형 모터로써 리니어 모터를 응용하는 경우, 저상 경량화 전철에서는 차량과 레일의 마찰력에 의해 추진력을 발생하는 일반 전철과는 달리 리니어 모터의 1차축과 2차축사이에서 직접 추력이 발생하므로 안내 궤도만이 필요하게 되어 저상화가 가능하여 터널의 단면적을 크게 줄일 수 있다[2, 3]. 또한 급커브 및 급구배에서의 운전도 가능하여 도심과 같은 밀집 지역에서의 노선 설계가 기존 철도보다 훨씬 수월하므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 현재 실용화 되고 있다[2, 3]. 또한 자기 부상 열차는 레일과의 마찰력에 의해 추진하는 방식이 아니기 때문에 본질적으로 고속성, 무공해, 안정성, 신뢰성, 경제성 및 승차감이 뛰어나다. 자기 부상 방식은 레일 표면에서 자력을 이용하여 부상한 상태에서 주행하기 때문에 외부와의 물리적인 접촉이 필요없이 마찰에 의한 소음, 공해, 마찰등이 없는 대단히 이상적인 미래의 운송 수단으로 각광을 받고 있다[4, 5]. 리니어 모터를 자기 부상 열차, 저상 경량화 전철등의 구동용 모터로 이용하는 경우 변번한 가, 감속 운전을 행하여야 한다. 리니어 모터의 속도제어 방법으로는 여러 방법이 고려되고 있으나 그 대표적인 것은 개루프 제어(open-loop control)와 속도 피드백을 하여 최적 슬립 주파수로 운전시키는 폐루프 제어(closed-loop control)이다.

개루프 제어는 간단히 주파수에 대응하는 전압을 인가하여 차량의 관성과 발생 추력, 주행저항등에 의해 운전슬립이 결정

되어 수평부를 주행할 때에는 큰 문제가 없으나 경사지역을 주행하는 경우에는 효율 및 수직력에 많은 문제점이 있다. 특히 수직력이 흡인력으로 작용하는 경우에는 등가적으로 차량중량을 증가시켜 저상 경량화 전철에서는 주행저항의 증가, 기계적 문제점등이 나타나며, 자기 부상 열차에서는 부상을 전자석의 전자력을 증가시켜야 하는 등 부상 제어에 악영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 수송 수단용 리니어 모터의 주파수에 대한 제특성을 등가회로 계산법에 의하여 계산하고 개루프제어 특성과 각 운전 주파수에서의 추력, 수직력, 효율 특성으로부터 정격 운전 슬립 주파수를 산정하여 가, 감속 운전을 하는 페루프 제어 특성을 규명한다.

2. 운전 슬립 주파수 선정

본 연구에서 운전 슬립 주파수를 산정하기 위하여 적용한 모델의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 리니어 모터의 제원
Table 1. Dimensions of LIM

	전기적 사양	기계적 사양
1차 축	방식: 단 1차 편축식 상수: 3 상 극수: 4 극 정격전압: 220 [V] 정격전류: 165 [A] 정격저항: 0.03[Ω] 상당극수: 96[회] 매극대상당슬롯수: 3	철심치수: (폭) 175[mm] (높이) 110[mm] (길이) 908[mm] 슬롯치수: (폭) 175[mm] (길이) 50[mm] 극 간격: 182[mm]
2차 축	저항율: Al: 0.204x10 ⁻⁶ [Ω·m] Fe: 0.665x10 ⁻⁵ [Ω·m]	두께: (Al) 5[mm] (Fe) 50[mm] 치수: (폭) 280[mm] (지름) 2020[mm]

이 때의 전원공급은 전압원 PWM 인버터를 이용하였으며 주파수 f_1 에 대한 상전압은 다음과 같다.

$$V_1 = 2f_1 + 20 [V]$$

일반적으로 운전 슬립 주파수는 추력을 정격치 이상으로 발생시키고 수직력(흡인력)은 가급적 적어야 한다. 또한 효율, 용량 대 출력비, 용량 대 추력비가 크게 되도록 선정하여야 한다.

표 1과 같은 리니어 모터의 최적 슬립 주파수 영역을 산정하

기 위해서는 각 운전 주파수에서의 정상 특성 해석이 선결되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 동기회로법으로 정상특성을 구하여 이로부터 최적 슬립 주파수 영역을 산정하였다.

그림 1.a)는 각 주파수에서의 정전압 구동시의 추력특성이다. 리니어 모터는 등가 2차저항이 매우 크므로 V_1/f_1 일정상태에서 속도-추력 특성은 일반 권선형 유도전동기에서 외부 2차저항을 크게 삽입하였을 경우의 토크 특성과 유사한 수하 특성을 나타내었다. 또한 주파수 변화에 따른 발생 추력의 최대치는 거의 일정하였다. 발생 추력이 수하 특성을 지니므로 개루프 제어에 대해서도 가, 감속 제어가 가능함을 알수있다.

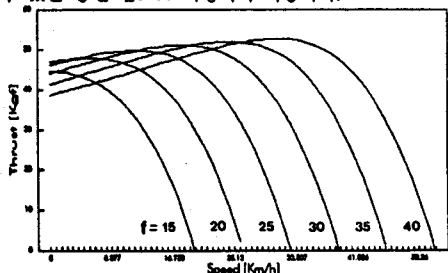
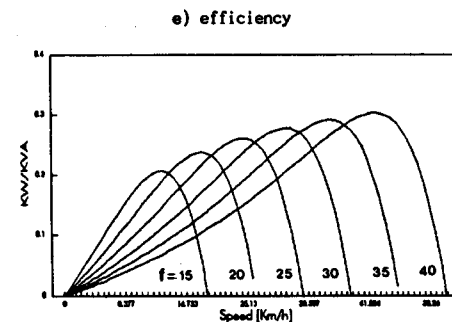
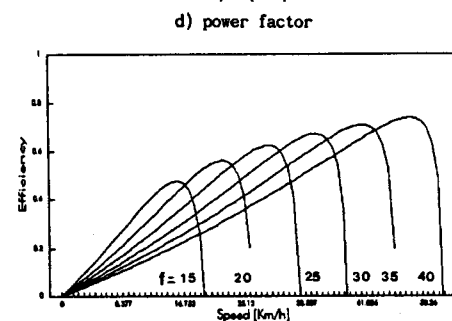
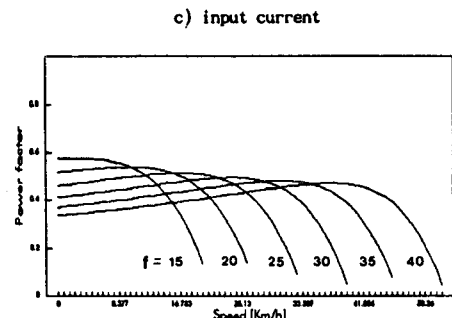
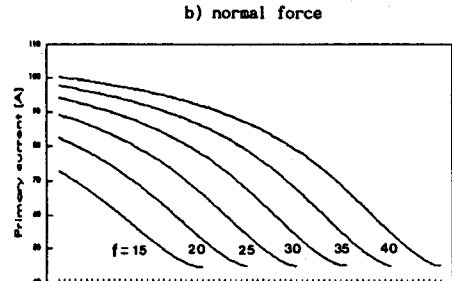
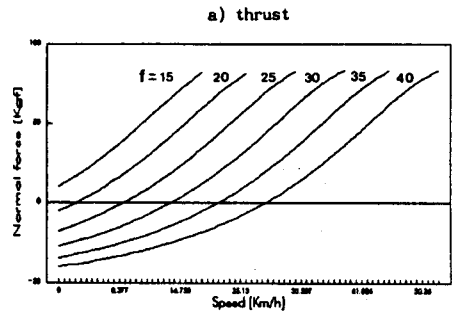
그림 1.b)는 각 주파수에서의 수직력 특성을 나타낸 것으로 주파수가 15[Hz]인 경우, 전 슬립구간에서 흡인력으로 나타났으며, 주파수가 증가할 수록 수직력이 영으로 되는 슬립이 작아짐을 알수있다. 이는 주파수 증가에 의해 2차측에 와전류가 많이 발생하기 때문으로, V/f 가 일정한 가, 감속 운전시 수직력을 일정하게 유지시키기 위해서는 주파수 증가에 따라 슬립을 작게 운전시켜야 한다. 또한 단위 효과에 의하여 동기속도에서도 2차측 도체만에 와전류가 유기되어 그 반작용에 의해 흡인력이 작아졌다. 그러나 저 주파수의 경우 낮은 슬립영역에서는 흡인력이 매우 크게된다. 따라서 저장 경향화 전철에 리니어 모터를 구동용 전동기로 이용할 경우, 차량은 차륜과 레일에 의해 지지되고 있으므로 과도한 흡인력은 동가적인 차량중량을 증가시켜 주행특성이 나빠지게 되고 2차측 도체만 및 리니어 모터의 치부 강도가 문제시 되며, 자기 부상 열차에서는 부하 하중으로 작용하여 전류가 증대되어 비 효율적이므로, 시동 및 정지시 슬립 주파수 선정에 신중을 기하여야한다.

그림 1.c)는 1차 입력 전류 특성으로서, 리니어 모터는 공극이 매우 커 1차 누설 리액턴스와 여자 리액턴스에 비하여 1차 저항이 매우 작으므로 운전 주파수가 증가함에 따라 동기속도 부근에서의 전류도 크게 되며, 기동 전류 대 정격 전류의 비가 2배 이내가 됨을 알 수 있다.

그림 1.d)는 역률 특성으로서 저 주파수 영역에서는 리액턴스 성분이 작아 1차 저항의 영향이 크게 나타나 고효율이 되며 슬립이 작아짐에 따라 수하특성을 갖는다.

그림 1.e)는 효율 특성을 나타낸 것으로서 1차 저항의 영향이 커 효율은 그다지 높지 않았다. 유지비면에서는 효율이 최대가 되도록 슬립 주파수를 선정하여야 한다. 한 예로 15[Hz]인 경우 $s = 0.186$ 에서 47.7[%]로 최대가 되었으며, 40[Hz]에서는 $s = 0.085$ 에서 73.9[%]로 나타났다. 그러나 이때의 추력이 너무 작아 가속이 어려우므로 추력과 효율을 고려하여 운전 슬립을 결정하여야 한다.

그림 1.f)는 단위 용량당 출력 특성을 나타낸 것으로 그 최대치는 농형 유도전동기에 비하여 큰 슬립에서 나타났으며, 본 적용 모델에서는 40[Hz]인 경우 30.3[%]로 나타났고 이때의 슬립은 0.186 이다. 용량 대 출력비 특성은 리니어 모터 및 구동장치인 인버터의 용량에 대한 기계적 출력을 나타내므로 이 값이 크게되면 소용량의 기기로 필요한 추력을 얻을 수 있으므로 기기가 소형화 될 수 있어 차량중량의 경감과 기기를 탑재할 수 있는 공간 감소로 저장화가 가능하다.



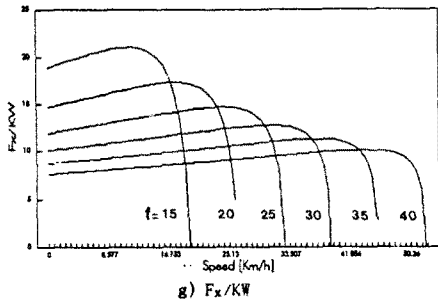


그림 1. V/F 일정시의 특성
Fig. 1. The characteristics with constant V/f

그림 2는 그림 1의 특성도를 이용하여 최적 슬립 주파수를 결정하기 위하여 속도 대 슬립 주파수의 그래프를 도시한 것이다. 그림 2.a)로부터 추력 35[kg·f] 이상을 발생하는 슬립 주파수 영역을, 그림 2.b)로부터는 수직력이 정격 추력 및 그 이하로 되는 슬립 주파수 영역을 구하였다. 그림 2.e)~2.f)서는 추력 대 출력비, 출력 대 입력비가 최대가 되는 슬립 주파수를 구하였다.

그림 2로부터 최적 슬립 주파수를 결정하는 경우 가속 구간에서는 추력과 수직력의 조건이 지배적이며 정속 구간에서는 용량 대 추력비, 입력 대 추력비, 효율이 최대가 되도록 동작 점을 선정하는 것이 양호한 특성을 얻을 수 있으리라 생각된다 [6]. 따라서 가속시 수직력을 20[kg·f] 이하로, 발생 추력을 발생하는 슬립 주파수 영역은 A영역으로 결정하며 수직력을 40[kg·f]까지로 허용한 슬립 주파수 영역이 B이므로 본 연구에서는 슬립 주파수를 12[Hz]로 정하였다.

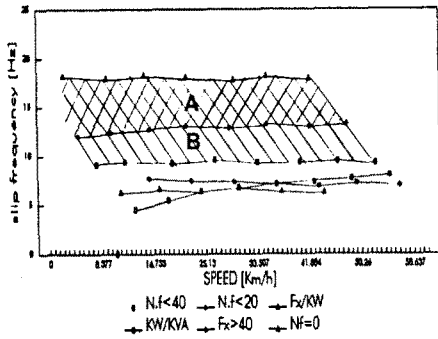


그림 2. 운전 슬립 주파수 영역
Fig. 2. The driving slip frequency region

3. 개루프 제어

리니어 모터는 그림 1.a)의 발생 추력 곡선에서 알 수 있는 바와 같이 속도-추력 특성이 수하특성을 지니므로 단순히 V_1/f_1 일정 관계에서 주파수를 시간에 따라 변화시켜 가, 감속운전을 행할 수 있다. 즉 리니어 모터의 발생 추력과 모터를 탑재한 차량의 관성, 무게 등에 의해 결정되는 부하하중이 평형을 이루는 점에서 동작점이 결정된다. 따라서 그림 3과 같은 패턴으로 가, 감속제어를 행하였다.

본 시험기의 가속계수를 0.05g로 하여 2차속의 속도를 40[Km/h]까지 상승시키는데 필요한 시간은 22초이므로 가, 감속 시간을 20초로 하였다.

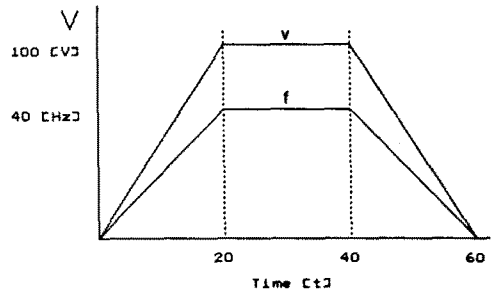
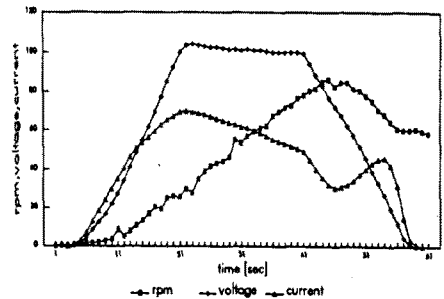


그림 3. 시간 - 전압, 주파수
Fig. 3. Time vs. Voltage, frequency

그림 4.a)의 전압, 전류, 속도 특성에서 알 수 있는바와 같이 본 시험기의 관성이 매우 커 20초 동안의 주파수 상승 시간 동안에는 슬립이 점증하며, 주파수 일정기간 동안에도 목표 속도까지 가속되고 있다. 따라서 주파수 상승 기간 동안에는 슬립이 점증하여 전류가 증가되나, 주파수 일정기간 동안에서는 전압은 일정하지만 2차속의 속도가 계속 증가하여 슬립이 작아져 전류가 감소하게 된다. 한편 감속기간에서는 초기에 슬립이 0 부근이 되어 이때의 전류는 1차속 부하전류가 거의 0 이되어 일시적으로 전류는 감소하나 이후에는 발전제동이 되어 전류가 다시 상승하게 되었다.

그림 4.b)는 개루프 제어시의 발생 추력 및 수직력 특성의 실험치를 나타낸 것이다. 20초 동안의 가속 시간 동안 주파수가 상승함에 따라 운전슬립이 증가하여 수직력은 흡입력에서 반발력으로의 전환이 발생한다. 즉 저속 영역에서는 낮은 슬립에서 운전이 되어 수직력은 흡입력으로 작용하나 주파수가 증가함에 따라 슬립이 커져 입구단부에서는 흡입력에서 반발력으로 반전되고 있다. 그러나 출구단부에서는 리니어 모터의 단부효과로 인하여 자속이 출구단부로부터 편중되어 수직력의 반전현상은 나타나지 않았다. 따라서 속도가 큰 영역에서 수직력이 입구단부에서는 반발력으로, 출구단에서는 흡입력으로 작용하는 dolpin force가 발생하므로 리니어 모터의 치부 및 2차 도체판에 악영향을 미치게 된다.

한편, 발생 추력 특성에서는 가속 초기에는 인버터의 주파수 상승 개시시간, 저 주파수등으로 인하여 발생추력이 거의 발생하지 않았고, 감속시에는 부(負)추력이 크게 나타났다. 이는 리니어 모터의 관성 모멘트가 매우 커 입력 주파수에 의한 동기속도보다 2차속의 속도가 커 이를 제동하기 위한 힘으로써 발전제동이 되고 있다. 따라서 이러한 발전제동을 억제하고 수직력이 반발력으로 작용하지 않게 하기 위하여는 가, 감속시간을 크게 설정하여야 한다.



a) voltage, current, velocity

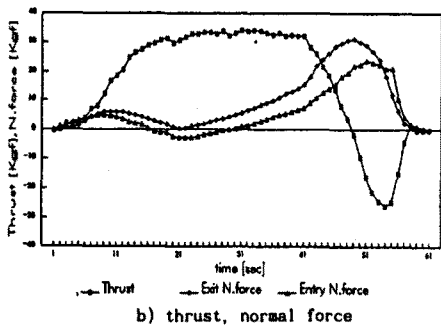


그림 4. 개루프 제어 특성
Fig. 4. The characteristics of open-loop control

4. 폐루프 제어

그림 5는 본 연구에서 이용한 폐루프 제어 시스템의 블록 선도이다.

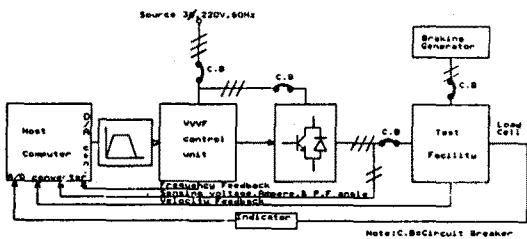


그림 5. 폐루프 제어 시스템
Fig. 5. The system of closed-loop control

본 연구에서 이용한 편속식 리니어 모터 시험 장치에서, 속도는 시험기의 회전수를 자기식 rotary encoder로 검출 하였으며 이를 host computer로 궤환시켜 지령 주파수에서의 슬립을 계산하였으며 이로부터 슬립 주파수를 산출하였다. 이때의 발생 추력 및 수직력은 Load Cell로 측정하였다.

한편 전압은 선간 전압을 분배시켜 측정오차를 줄이기 위하여 연산 증폭기를 이용하여 전파정류시키고 필터링한 후 검출하였다. 전류는 Hall CT로 센싱한 AC 출력을 전압과 동일한 방법으로 검출하였다. 역률 측정에서는 전압과 전류의 위상차를 영점 검출기(zero crossing detector)로 검출하였다.

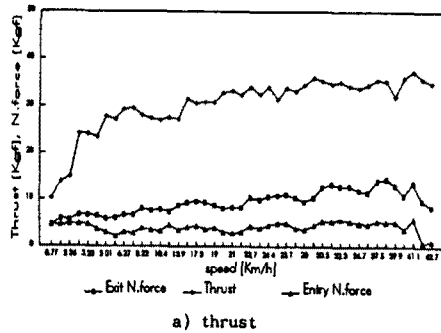
그림 6.a)는 슬립 주파수 $sf = 12[\text{Hz}]$ 로 제어하는 경우의 가속시의 발생 추력, 수직력 변화 특성을 나타낸 것이다. 속도가 5 [km/h]이하에서는 속도 피드백이 부정확하며 V/f비가 매우 높아, 개루프 제어 모드로 동작시켰다. 이 영역에서는 주파수를 12[Hz], 전압은 24 V로 유지하였으며 리니어 모터의 속도가 5.01 [km/h]를 초과하면 슬립 주파수 일정 모드로 전환시켰다. 발생 추력은 개루프 제어 모드를 제외하고는 일정 추력을 발생시켜 일정 가속이 행하여 짐을 알 수 있다.

수직력 특성에서는 가속시 입구단부의 수직력은 거의 일정하나, 속도가 증가함에 따라 출구단부의 수직력은 증가하였는데 이는 단부효과의 영향으로 속도 증가에 따라 출구단부로 자속이 편중되기 때문이다. 그러나 그 결대치는 목표치인 20[kg·f]에는 미치지 않았다. 개루프 제어 기간동안 수직력이 크게 나타난 것은 V/f의 비가 크기때문이라 사료된다.

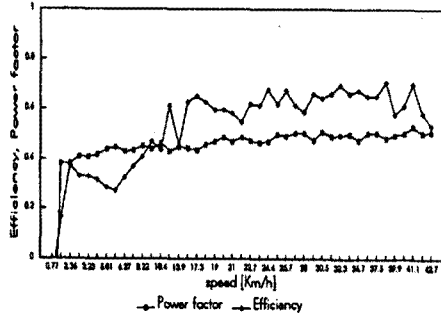
그림 6.b)의 효율, 역률특성은 개루프 제어 모드 기간을 제외하고는 일정하며, 효율은 61.3[%]로 양호하였다.

한편 감속시에는 슬립 주파수를 일정으로 한 발전제동을

시켰으며 이때의 발전제동은 23.2[km/h]에서 정지시켰다. 제동력은 가속시의 추력과 그 결대치가 대동소이 하였다.



a) thrust



b) efficiency, power factor

그림 6. 폐루프 제어 특성
Fig. 6. The characteristics of closed-loop control

5. 결론

본 연구에서는 수송 수단용 리니어 모터의 가, 감속 운전시의 제특성을 고찰하였다. 운전 슬립 주파수는 V/f 일정 상태에서 정전압시의 특성으로부터 발생 추력 40[kgf]이상, 수직력은 발생 추력이하로 제한한 결과 12[Hz]로 산정하였다. 슬립 주파수를 12[Hz]로 하여 목표속도 40[km/h]로 가, 감속운전을 실험한 결과 개루프 제어구간을 제외하고는 일정 추력, 일정수직력이 발생하는 양호한 제어 특성을 얻었다.

참 고 문 헌

1. S.Nonaka, N.Fujii, Y.Kojima, "Characteristics and Speed Control of Linear Induction Motor for Urban Transit", 電學論 88-188 pp.71-80, 1988.
2. 野中作太郎, 藤井信男, 小島安信, "新都市交通用リニア誘導モータのV/f一定運転時の動特性", 電學論 D 109 pp.493-499, 1989.
3. S.Nonaka, T.Higuchi, "On the Determination of the Rating of SLIM for Urban Transits", IEEJ pp.81-88 October, 1988.
4. 野中作太郎, 小島安信, "新都市交通用リニア誘導モータの特性に関する實驗的研究", 電學論 D 8卷 5號 pp.477-484, 1988.
5. A.K.Wallace, J.H.Parker, G.E.Dawson, "SLIP CONTROL FOR LIM PROPELLED TRANSIT VEHICLES", IEEE TRANS. VOL. MAG-16 NO. 5, pp.710-712, 1980
6. 野中作太郎, 藤井信男, 外 2人, "新都市交通LIMの滑り周波数制御特性について", 電學論 MAG-90-152 pp.49-58, 1990