

고출력 횡축형 선형전동기의 원리와 응용

1. 서론

1930년대의 NEMA 445 Frame이 50 Hp의 출력이었던 반면에 지금은 200 Hp의 출력을 내고 있다. 이러한 전동기 기술의 발전은 설계기술, 재료기술, 제작기술, 전력변환기술 등 전동기 관련 요소기술의 진보에 기인하고 있다. 근래에 전력용 반도체(GTO, IGBT 등)와 새로운 전기기기 관련 재료(회도류 영구자석, 초전도체, 비정질 자성재료 등)가 발전함에 따라 전기기기 기술이 비약적으로 발전되고 있으며, 이와 더불어 새로운 설계 개념을 도입한 새로운 형태의 횡축형 전동기가 개발되고 있다.

횡축형 전동기는 자속의 방향이 이동자의 이동 방향에 대해 횡방향을 나타내며, 이동자와 같은 방향으로 전류가 흐르는 형태로 구성된다. 그리고, 극간격의 크기를 작게 설계할 수 있기 때문에 높은 출력밀도를 얻을 수 있으며, 기존의 종축형 전동기에 존재하는 오버행이 없는 링 형태의 권선으로 동의 양을 줄일 수 있어 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 전동기의 체적을 줄일 수 있는 구조를 가지고 있다.^[1] 따라서, 횡축형 전동기는 높은 출력과 효율 특성으로 인해 전동기 중량이 적게 요구되는 전기자동차, 철도관련 차량, 자기부상 열차와 같은 교통수단의 추진장치로 매우 적합하다.^[2] 특히, 영구자석 여자 횡축형 전동기를 지하철 차량 혹은 경전철 차량의 선형 추진 시스템에 적용시킬 경우, 일반 선형 유도전동기에 비해 3배 이상 높은 출력밀도를 얻을 수 있기 때문에 차량의 경량화, 지지구조의 경량화는 물론이고, 터널의 면적을 50% 정도 절감시킬 수 있다.^[3]

본 고에서는 보다 고출력이 가능한 영구자석 여자 횡축형 전동기를 중심으로 그 원리와 응용형태를 살펴 보도록 하겠다.

2. 횡축형 전동기 이론

2.1 횡축형 전동기 기본모델

횡축형 전동기의 원리는 기본적으로 릴럭턴스 전동기와 같다. 그림 1에서 권선 전류에 의한 자력이 Θ_a [AT]일 때, 자속 Φ_a 가 발생하여 자기저항이 최소화되는 방향으로, 즉 고정자와 회전자 치가 일치할 때까지 힘을 발생시키게 된다. 이때, 자속 Φ_a 의 진행방향과 전동기의 이동 방향 x 는 횡방향(전류의 방향과 전동기의 진행방향이 같음)이 된다.

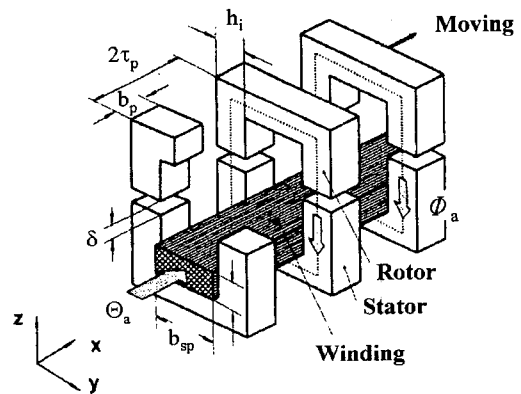


그림 1. 횡축형 전동기의 기본 형상

이와 같이 횡축형 전동기의 장점은 자기회로와 전기회로가 분리되어 있기 때문에 단위 체적당 높은 출력과 높은 효율이 가능하다는 점이다.

그림 2는 기본형 횡축형 전동기 모델에 대해 전류 (θ_a)와 발생 추력(F_x)의 관계를 회전자의 위치에 따라 나타내고 있다. $0 \sim \tau_p$ 구간에서는 한쪽 방향으로 힘을 발생시키고 $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 다른 방향으로 힘을 발생시키므로 일정한 방향의 힘을 얻기 위해서 $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 전류를 흘리지 않는다.

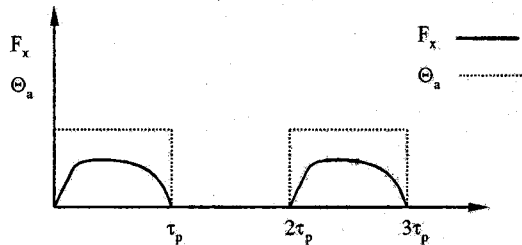


그림 2. 횡축형 기본모델의 회전자 위치에 따른 기자력(θ_a)-발생추력(F_x)

그림 1의 기본형상에서 발생 가능한 단위 면적당 추력 F_{xd} 는 다음 식 (1)과 같다^[4].

$$F_{xd} = \frac{\mu_0}{32\delta\tau_p} \theta_a^2 \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 공기의 투자율, θ_a 는 기자력, δ 는 공극, τ_p 는 극간격이다. 이상의 식 (1)은 횡축형 전동기 힘발생 밀도로 전동기 설계시 기본식으로 이용하고 있다. 발생 힘 밀도 F_{xd} 는 공극과 극간격에 반비례하고 기자력의 자성에 비례함을 알 수 있다. 고효율 전동기를 설계시 공극은 기계적인 구조 때문에 한정되어 있고 기자력은 자기회로의 포화화 권선의 온도상승 때문에 제한을 받고 있다. 따라서, 주어진 회전자의 크기에서 극간격을 적게 설계하면 발생 힘 밀도를 증가시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다. 식 1에서 $\theta_a=2000$ [AT], $\delta=0.5$ [mm], $\tau_p=10$ [mm] 일 경우 발생 가능한 힘 밀도는 31.4 [kN/m²]이다.

2.2 영구자석여자 횡축형 전동기

횡축형 전동기의 다른 형태로 회전자에 영구자석을 삽입하여 출력밀도를 증가시킨 영구자석 여자 횡축형 전동기가 있다. 구조적으로 그림 3과 같이 영구자석에서 발생하는 자계가 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있다.

그림 3의 형상에서 회전자의 영구자석은 자속을 일정한 방향으로 발생시키도록 교대로 설치되며, 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 고정자 철심은 양측 극면에서 τ_p 만큼 엇갈리게 설계되었다. 물론 권선을 회전자에 설치하여도 무방하다.

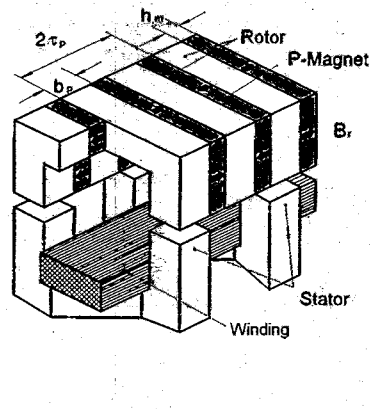


그림 3. 영구자석 여자 횡축형 전동기 형상

회전자 위치에 따른 기자력-발생추력은 그림 4와 같다. 일정한 방향으로 힘을 발생시키기 위해 $0 \leq x \leq \tau_p$ 구간에서는 고정자의 자속이 영구자석의 자속방향과 같은 방향이 되도록 전류를 인가하고, $\tau_p \leq x \leq 2\tau_p$ 구간에서는 반대방향의 전류를 흘려야 된다.

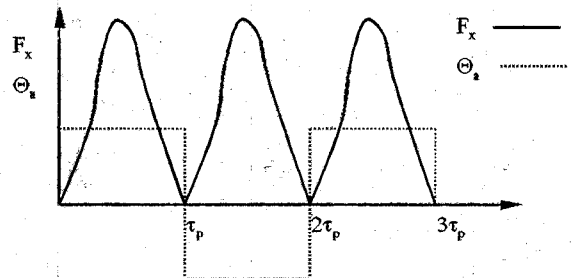


그림 4. 영구자석 여자 횡축형 전동기의 회전자 위치에 따른 기자력(θ_a)-발생 추력(F_x)

그림 5는 영구자석 여자 횡축형 전동기에서 발생하는 추진력 F_x , 안내력 F_y , 흡인력 F_z 를 계산하기 위한 간이동가모델로서 누설자속이 무시되었다. 이것은 고정자 철심 중간 부분을 절단하여 펼친 형태로 권선의 기자력 θ_a 가 공극 자기저항과 영구자석의 자기저항에 집중된다고 가정한다.

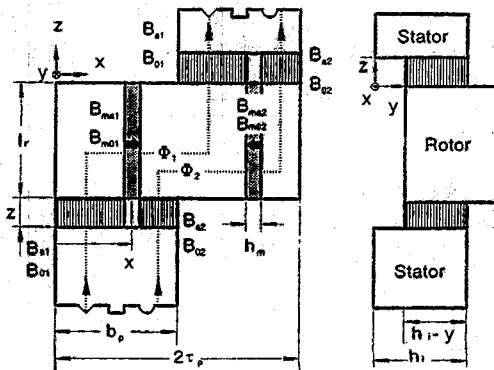


그림 5. 영구자석 여자 횡축형 전동기 간이 해석 모델

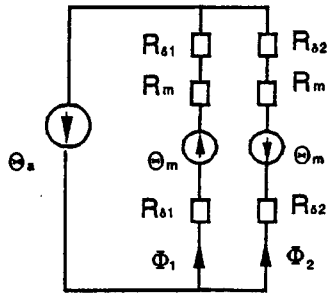


그림 6. 영구자석 여자 횡축형 전동기 자기 등가 회로

또한, 에너지 변화를 계산하기 위한 자기 등가회로는 그림 6과 같으며 누설과 포화가 무시된 형태이다. 여기서, $R_{\delta 1}$ 과 $R_{\delta 2}$ 는 공극의 자기저항, R_m 은 영구자석 자기저항, Θ_m 은 영구자석 기자력, Φ_1 과 Φ_2 는 그림 5에서 자로를 지나는 자속이다. 전기자 전류가 흐르지 않는 무부하일 때 공극에서 자속밀도를 B_{o1} , B_{o2} , 영구자석에서 자속밀도를 B_{m1} , B_{m2} 로 두면 다음 식 (2), (3), (4), (5)가 성립한다.

$$B_{o1}(x - \frac{h_m}{2})(h_i - y) = B_{m1}l_r h_i \quad (2)$$

$$\Theta_m = \frac{1}{\mu_o} (2zB_{o1} + B_{m1} \frac{h_m}{\mu_m}) \quad (3)$$

$$B_{o2}(b_p - x - \frac{h_m}{2})(h_i - y) = B_{m2}l_r h_i \quad (4)$$

$$\Theta_m = \frac{1}{\mu_o} (2zB_{o2} + B_{m2} \frac{h_m}{\mu_m}) \quad (5)$$

여기서 두께 h_m 인 영구자석의 등가 기자력은 보자력 H_c , 잔류속도 밀도 B_r , 비투자율 μ_m 일 때, 등가 기자력은 다음 식 (6)과 같다^[5].

$$\Theta_m = H_c h_m = \frac{B_r}{\mu_o \mu_m} h_m \quad (6)$$

식 (2), (3), (4), (5)에서 무부하 공극 자속밀도와 영구자석에서 자속밀도를 구하면 식 (7), (8), (9), (10)으로 된다.

$$B_{o1} = \frac{\Theta_m}{\frac{2z}{\mu_o} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m l_r} (x - \frac{h_m}{2}) (\frac{h_i - y}{h_i})} \quad (7)$$

$$B_{m1} = \frac{\Theta_m}{\frac{2z l_r}{\mu_o (x - \frac{h_m}{2})} \frac{h_i}{h_i - y} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m}} \quad (8)$$

$$B_{o2} = \frac{\Theta_m}{\frac{2z}{\mu_o} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m l_r} (b_p - x - \frac{h_m}{2}) (\frac{h_i - y}{h_i})} \quad (9)$$

$$B_{m2} = \frac{\Theta_m}{\frac{2z l_r}{\mu_o (b_p - x - \frac{h_m}{2})} \frac{h_i}{h_i - y} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m}} \quad (10)$$

전기자 권선 기자력 Θ_a 에 의한 공극 자속밀도 B_{a1} , B_{a2} 와 영구자석의 자속밀도 B_{ma1} , B_{ma2} 는 마찬가지로 식 (11), (12), (13), (14)와 같다.

$$B_{a1} = \frac{\Theta_a}{\frac{2z}{\mu_o} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m l_r} (x - \frac{h_m}{2}) (\frac{h_i - y}{h_i})} \quad (11)$$

$$B_{ma1} = \frac{\Theta_a}{\frac{2z l_r}{\mu_o (x - \frac{h_m}{2})} \frac{h_i}{h_i - y} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m}} \quad (12)$$

$$B_{a2} = \frac{\Theta_a}{\frac{2z}{\mu_o} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m l_r} (b_p - x - \frac{h_m}{2}) (\frac{h_i - y}{h_i})} \quad (13)$$

$$B_{ma2} = \frac{\Theta_a}{\frac{2z l_r}{\mu_o (b_p - x - \frac{h_m}{2})} \frac{h_i}{h_i - y} + \frac{h_m}{\mu_o \mu_m}} \quad (14)$$

공극과 영구자석에서의 합성 자속밀도 B_1 , B_2 , B_{m1} , B_{m2} 는 영구자석에 의한 자속과 전기자 권선에 의한 자속의 합과 차로 식 (15), (16), (17), (18)과 같이 나타낸다.

$$B_1 = B_{a1} + B_{o1} \quad (15)$$

$$B_2 = B_{a2} - B_{o2} \quad (16)$$

$$B_{m1} = B_{ma1} + B_{m01} = B_1 \frac{(x - \frac{h_m}{2})}{l_r} (\frac{h_i - y}{h_i}) \quad (17)$$

$$B_{m2} = B_{ma2} - B_{m02} = B_2 \frac{(b_p - x - \frac{h_m}{2})}{l_r} (\frac{h_i - y}{h_i}) \quad (18)$$

여기서 $h_m/l_r \approx 0$ 으로 영구자석에서 자기저항을 무시할 경우 전류에 의한 자속밀도 B_a , 무부하 자속밀도 B_0 , B_{m1} , B_{m2} 는 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$B_a = B_{a1} = B_{a2} = \frac{\Theta_a}{\mu_o} \quad (19)$$

$$B_0 = B_{01} = B_{02} = \frac{\Theta_m}{\mu_o} \quad (20)$$

$$B_{m1} = 0 \quad (21)$$

$$B_{m2} = 0 \quad (22)$$

전기자 전류에 의한 기자력 Θ_a 가 일정할 경우 그림 5의 모델에서 자기에너지를 계산하면 다음 식(23)과 같이 된다.

$$W_m = \frac{2z(h_i - y)}{2\mu_o} [B_1^2 (x - \frac{h_m}{2}) + B_2^2 (b_p - x - \frac{h_m}{2})] + W_{m1} + W_{m2} \quad (23)$$

여기서 W_{m1} , W_{m2} 는 다음과 같다.

$$W_{m1} = \frac{B_m^2}{2\mu_0\mu_m} n_m h_i l_r \quad (24)$$

$$W_{m2} = \frac{B_m^2}{2\mu_0\mu_m} h_m h_i l_r \quad (25)$$

자기에너지가 변위에 의해 변할 때 발생힘은 F_x , F_y , F_z 는 다음 식(26), (27), (28)과 같다^[6].

$$F_x = -\frac{\partial W_m}{\partial x} \quad (26)$$

$$F_y = -\frac{\partial W_m}{\partial y} \quad (27)$$

$$F_z = -\frac{\partial W_m}{\partial z} \quad (28)$$

따라서 본 해석 모델에서 발생하는 추진력 F_x , 안내력 F_y , 흡인력 F_z 는 식 (29), (30), (31)로 된다.

$$F_x = \frac{-4zB_a B_0}{\mu_0} (h_i - y) \quad (29)$$

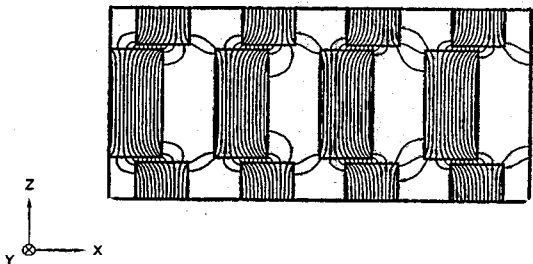
$$F_y = \frac{z}{\mu_0} \left[(B_a + B_0)^2 \left(x - \frac{h_m}{2}\right) + (B_a - B_0)^2 \left(b_p - x - \frac{h_m}{2}\right) \right] \quad (30)$$

$$F_z = \frac{h_i - y}{\mu_0} \left[(B_a + B_0)^2 \left(x - \frac{h_m}{2}\right) + (B_a - B_0)^2 \left(b_p - x - \frac{h_m}{2}\right) \right] \quad (31)$$

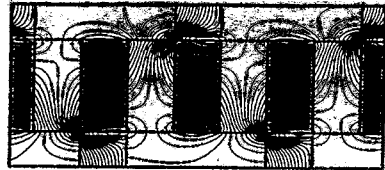
식 (29)에서 발생 가능한 힘밀도 F_{xd} 를 구하면 식 (29)에서 $2\tau_p \cdot 2h_i$ 를 나누면 식 (32)로 된다.

$$F_{xd} = B_0 \frac{\theta_a}{2\tau_p} \frac{(h_i - y)}{h_i} \quad (32)$$

영구자석 여자 횡축형 전동기에서 철심의 포화와 누설을 무시하고, 무부하 공극자속밀도 $B_0 = 1[T]$, 기자력 $\theta_a = 2,000[AT]$, 극간격 $\tau_p = 10[mm]$, 안내방향 변위 $y=0$ 인 경우 발생 가능한 힘밀도를 계산하면 $F_{xd} = 100 [kN/m^2]$ 로 된다. 이 값은 횡축형 기본모델 그림 1에서 발생하는 힘보다 약 3배로 많이 됨을 알 수 있다.



(a) 그림 1의 횡축형 기본 모델



(b) 그림 3의 영구자석 여자 횡축형 모델

그림 7. 횡축형 전동기의 자속분포 비교

한편 그림 7은 각각의 2가지 해석모델에서 회전자와 이동자 사이 공극의 자속분포를 나타내고 있다. 그림 7(a)의 경우 일반적인 릴럭턴스 전동기 자속 형상을 나타내고 있고, 그림 7(b)의 경우 영구자석과 전기자 전류에 의한 자속 때문에 이동자의 이동에 따라 많은 자기 에너지가 변화됨을 예상할 수 있다.

3. 횡축형 전동기의 응용

지금까지 횡축형 전동기와 관련된 이론을 살펴보았다. 여기에서는 횡축형 전동기가 여러 분야에서 응용이 가능하다는 것을 3가지 응용형태를 예시함으로써 나타내 고자 한다.

3.1 철도차량용 횡축형 전동기

횡축형 전동기의 형태는 전기자 권선의 위치, 회전자와 고정자의 형상에 따라 다양하게 설계가 가능하다. 그림 8은 철도차량에 적용 가능한 선형 횡축형 전동기의 기본형태로 일반 재래식 차량에 비하면 기어 없이 직접 구동되어 기계적 부품을 줄일 수 있기 때문에 경량화가 가능하다. 또한 추진과 제동시 바퀴의 마찰계수에 영향을 받지 않으므로 가속과 감속 성능이 좋고, 지하철에 적용할 경우 터널의 면적을 50% 정도 감소시킬 수 있으며, 건설비를 30% 이상 경감시킬 수 있는 장점이 있다.

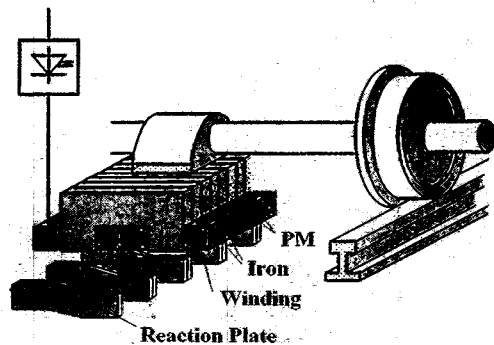


그림 8. 철도차량용 선형 횡축형 전동기

선형 유도전동기 추진 철도 차량은 오오사카 지하철 12호선에서 이미 운행중이다. 선형 전동기를 철도차량에 적용시킬 경우 기계적 공극이 적으면 유리하나 기계적 구조를 생각하여 일반적으로 공극 $\delta=10[\text{mm}]$ 로 설계한다. 반면에 공극이 큰 경우 극간격 τ_p 를 크게 할 수 있으며, 최적 설계시 주요 고려사항은 다음과 같다.

- 높은 추진력 $F_{xd} = f(\tau_p, b_p, h_m, \theta_a)$
- 낮은 흡인력 F_z
- 영구자석 재료 최소화

표 1은 3차원 유한요소법에 의해 계산되어 설계된 영구자석 여자 횡축형 선형전동기의 사양으로 그림 4와 같은 형태의 전류가 인가되는 경우의 설계 값이다. 이때 효율은 동특성에서 계산하여야 하나, 정격운전시 출력 198 [kW], 동손 2.8 [kW], 철손 3.25 [kW]로 기계손을 무시할 경우 효율은 97%로 계산되었다.

표 1. 철도차량용 횡축형 전동기 설계사양

	설계 결과
속도	100 km/h
전동기 출력	189 kW
기저력	12 kA
추진력	6.8 kN
전동기 무게	306 kg
추력밀도 F_{xd}	42.7 kN/m ²
추진력/전동기 무게	22.2 N/kg
공극 δ	10 mm
극간격 τ_p	60 mm
극폭 b_p	36 mm
전자석 높이 h_m	24 mm
극길이 h_i	80 mm
권선창 폭 b_{sp}	80 mm
권선창 높이 h_{sp}	40 mm
전동기 길이	1 m
접착율 k_{cu}	0.65
전류밀도 J	5.8 A/mm ²
효율 η	0.97

표 1에서 설계된 영구자석 여자 횡축형 전동기와 자기 부상용 선형 유도전동기^[7,8]의 추력/전동기 무게, 효율, 역률의 비교표를 그림 9에 나타내고 있다. 선형전동기의 출력, 효율, 역률은 설계 정격점에 따라 다르게 나타나지만 도시형 자기부상열차 선형 유도전동기에서는 전동기의 무게가 약 303 [kg]이고 발생 추력이 2,000 [N]으로서 단위 무게당 추력이 약 6.6 [N/kg], 효율과 역률이 60 [%] 이하를 나타낸다.^[9]

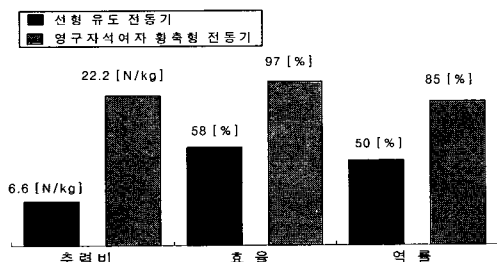


그림 9. 추력비, 효율, 역률 비교

그림 9에 나타난 특성을 검토하면 선형 유도전동기는 큰 기계적 공극과 2차 도체 두께에 의해 약 15 [mm]의 전기적인 공극을 가지게 되어 이로 인해 추력비, 효율, 역률이 낮아지게 된다. 이와 비교할 때 영구자석 여자 횡축형 전동기의 추력비는 3배 이상됨을 알 수 있다.

3.2 자기부상 열차용 횡축형 전동기

기존의 지하철과 고속 전철을 대신할 21세기의 새로운 교통수단으로 자기부상열차가 적합한 것으로 각광받으면서 독일, 일본, 한국 등을 중심으로 연구개발이 활발히 진행되어 왔다. 독일은 추진과 부상이 결합된 선형 동기전동기로 자기부상열차 Transrapid를 개발하여 Berlin과 Hamburg사이에 2005년 운항을 목표로 하고 있으며, 일본은 저온 초전도 전자석으로 부상·안내·추진이 결합된 자기부상열차 JR-Maglev를 개발하였다. 국내에서는 전자석으로 부상과 안내를 하고 선형유도전동기로 추진하는 자기부상열차를 개발하여 시험하고 있는 단계이다. 본 절에서는 자기부상 및 안내 결합형 선형전동기에 대해 살펴보고, 기존의 선형유도전동기에 비해 출력비가 높고 차량의 경량화와 고효율 추진이 가능한 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기를 자기부상 열차에 적용할 경우 그 특성을 비교하였다.

자기부상 열차용 선형전동기에서 필요한 추진력, 안내력, 부상력의 비는 1:3:10으로 추진 시스템의 기본 설계 사양으로서 이용된다. 따라서, 전자석 단위 길이당 필요한 부상력은 1 ton/m, 전자석의 무게에 대한 부상력은 10배이며, 부상력에 대한 소비 전력은 1 [kW/ton]이 필요하다. 그림 10에 부상력, 추진력 및 안내력을 발생시키는 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기를 나타내었다.

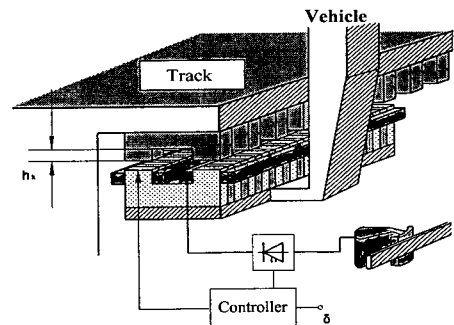


그림 10. 부상 및 안내 결합형 추진 시스템

그림 10의 부상 시스템은 공극에 대해 불안정한 특성 즉, 공극이 증가함에 따라 부상력이 감소하며, 공극이 감소함에 따라 부상력이 증가하는 특성을 나타내지만 전류제어로 일정한 공극을 유지할 수 있다. 수평방향의 안내력은 U-형태의 철심이 공극을 사이에 두고 일치하려는 힘에 의해서 안정된 안내력을 발생시킨다.

그림 11은 부상 및 안내 결합 횡축형 선형전동기의 한 형태로서 차량에 1차 권선을 포함한 선형 전동기가 설치되고 선로에는 back iron이 설치되어 있다. 또한 영

구자석은 공극자속을 집중시키기 위해 서로 같은 방향의 영구자석을 마주보게 하여 철심사이에 부착되며 전동기의 좌우측이 같은 방향의 힘을 발생시킬 수 있도록 극간격 τ_p 만큼 back iron이 엇갈리게 설계되었다.

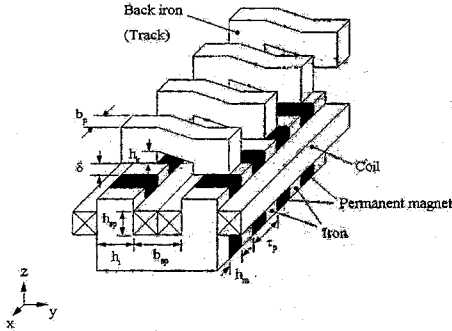


그림 11. 부상 및 안내 결합형 선형 전동기 모델

자기부상열차의 부상 및 안내결합형 추진 시스템의 설계시 추진력, 안내력, 부상력의 비를 1:3:10으로 제한하면서 가능한 큰 부상력/전자석 자중의 비와 적은 소비전력/부상력의 비를 얻을 수 있도록 하여야 한다. 따라서, 이와 관련된 전자석 두께, 극간격, 레일 치폭, 레일 치 높이 값들을 최적화시킬 필요가 있다. 부상 및 안내 결합형 선형 전동기의 제어 원리는 그림 12의 벡터 선도로 나타낼 수 있다.

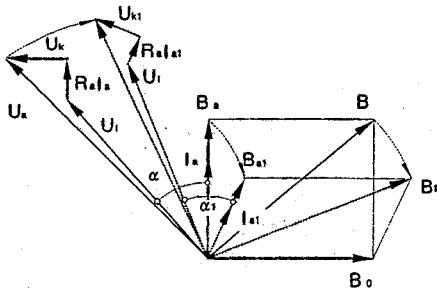


그림 12. 일정 부상력 제어 선형 전동기 벡터도

그림 12는 일정 부상력을 유지하면서 추진력 제어 원리를 나타내고 있는데 공극자속밀도 B 는 권선 전류에 의한 자속 B_a 와 영구자석에 의한 자속 B_s 의 합성으로 이루어지며 공극자속밀도 B 에 의해 90° 위상차이가 나는 유기 기전력 U_i 가 유기된다.

공극에서 발생하는 출력 P_{out} 는 유기 기전력 U_i 와 전기자 전류 I_a 와의 벡터곱으로 나타난다.

$$P_{out} = U_i I_a \cos \alpha \quad (33)$$

여기서 α 는 전기자 전류와 유기 기전력과의 위상차이다. 전력 변환 장치를 통해 전기자 전류를 제어하여 벡터선도에서 점선으로 나타난 I_a 와 같이되는 I_{a1} 을 선택하면 공극자속밀도 B 는 B_1 과 같은 크기를 가지고, 출

력은 다음식 (34)과 같이 된다.

$$P_{out} = U_i I_{a1} \cos \alpha_1 \quad (34)$$

즉, 전기자 전류 I_a 의 위상과 크기를 변경시켜 일정한 부상력을 얻으면서 출력 P_{out} 을 제어할 수 있다.

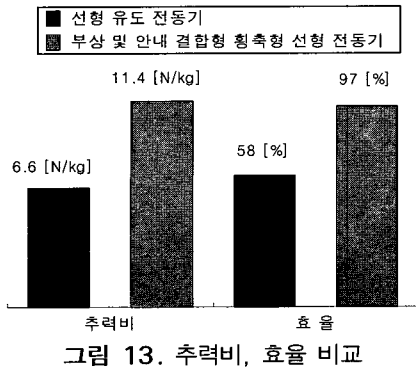
영구자석으로 여자된 선형 전동기는 공극 $\delta \approx 0$ 에서는 매우 큰 부상력을 가지고, 정격 공극의 2배에서는 적은 부상력 때문에 차량을 부상시킬 수 없다. 따라서 영구자석으로 여자된 선형 전동기를 초기 부상시키기 위해서는 2가지 방법이 있는데, 하나는 공극 $\delta \approx 0$ [mm]에서 영구자석의 자속과 반대방향으로 전류를 인가하여 선로와 전자석사이의 부상력을 줄임으로써 정격 공극을 유지하는 방법이고, 다른 한 방법은 정격 공극의 2배에서 영구자석의 자속과 같은 방향으로 전류를 인가하여 선로와 전자석 사이의 부상력을 증가시킴으로써 정격 공극을 유지할 수 있다.

표 2는 부상 및 안내 결합형 횡축형 선형 전동기의 사양으로서 전자력 계산으로부터 초기부상이 고려된 추진력, 안내력 및 부상력이 얻어졌다. 표 2에서 나타난 결과를 검토하면 추진 시스템의 기본 설계사양을 만족하므로 차량의 추진 및 부상 system을 경량화 할 수 있으며 효율 또한 향상시킬 수 있다. 초기 부상공극 $\delta=2$ [mm]이므로 정격 공극 $\delta=12$ [mm]로 선정되었고 손실/부상력은 3.9 [kW/t]로서 전자석인 경우에 1[kW/t]보다 큰 값을 가진다.

한편, 그림 13은 표2에 나타난 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기와 선형 유도전동기^[7,8]와의 단위 무게당 발생 추력비와 효율을 나타내고 있다. 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기가 부상 전자석이 없음에도 불구하고 단위 무게당 2배 이상의 추력을 발생시키고 효율 또한 30%이상 증가됨을 알 수 있다.

표 2 부상 및 안내 결합형 선형전동기 설계 사양

	사양
속도	100[km/h]
차량무게	2000[kg/m]
전동기 출력	42.5[kW/m]
기자력	15.7[kA]
추진력	1.53[kN/m]
안내력(축변위 $\Delta y=0.5h_l$)	3.77[N/m]
부상력	13[kN/m]
추진력/stator무게	11.4[N/kg]
부상력/전동기무게	9.8
손실(철손포함)/부상력	3.9[kW/t]
효율	0.89
정격 공극	12[mm]
초기부상공극	2[mm] 혹은 25[mm]
초기부상시 최대 기자력	36[kA] (공극 25[mm])
극간격 τ_p	40[mm]
pole 폭 b_p	32[mm]
영구자석두께 h_m	8[mm]
pole 길이 h_l	40[mm]
권선창 폭 b_{sp}	80[mm]
권선창 높이 h_{sp}	50[mm]
레일 치 높이 h_k	30[mm]
접착률 k	0.65
전류밀도 J	6[A/mm ²]



3.3 Ropeless 승강기용 횡축형 전동기

Ropeless 승강기는 기존의 승강기에 사용되는 rope, 추 등 직선운동으로 변환하기 위한 기계적 장치를 사용하지 않고 선형전동기에 의해 직접 직선운동을 하므로 승강기의 구조를 간략화할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나, Ropeless 승강기는 그림 14에 나타난 바와 같이 승강기에 이동자가 설치되고 가이드레일부분에 고정자가 설치되므로 부하로 작용하는 이동자의 경량화와 고출력이 요구된다. 이러한 측면으로 매우 적합한 선형 전동기가 영구자석 여자 횡축형 선형전동기이다.

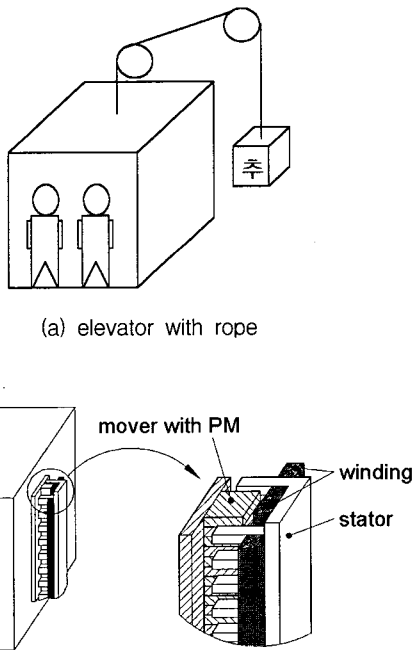


그림 14 기존의 승강기와 Ropeless 승강기

영구자석 여자 횡축형 선형 전동기의 형상은 다양하지만 승강기의 구조에 적합한 내부 이동자형을 그림 15에 나타내었다. 또한 비교를 위해 일본 지하개발 이용 연구센터에서 승강기 구동용으로 제작한 영구자석여자 선형 동기전동기^[10]의 모델을 그림 16에 나타내었다.

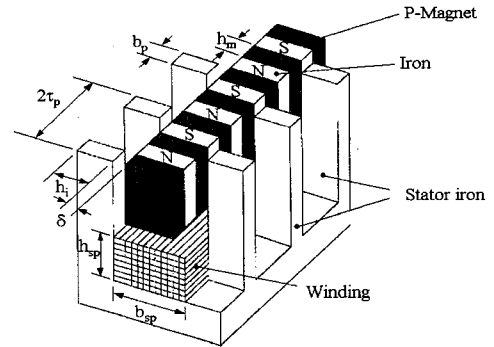


그림 15. 내부이동자형 영구자석여자 횡자속 선형전동기

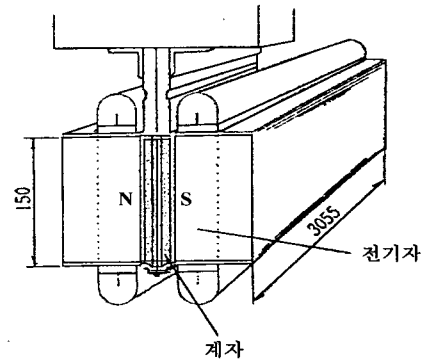


그림 16. 영구자석여자 선형 동기전동기

그림 15의 형상으로 설계된 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡축형 선형전동기의 이동자 무게는 같은 공극 크기에서 영구자석여자 선형 동기전동기의 1/3정도 밖에 되지 않는다. 따라서, Ropeless 승강기용 영구자석 여자 횡축형 선형전동기와 영구자석여자 선형 동기전동기^[10]의 무게당 추력비를 비교하면 그림 18에서 보는 것과 같이 전동기 전체(이동자+고정자)무게당 추력비와 이동자 무게당 추력비는 영구자석여자 횡축형 선형전동기가 각각 약 4.1배, 약 2.5배 정도 되는 것으로 보고되고 있다.^[11]

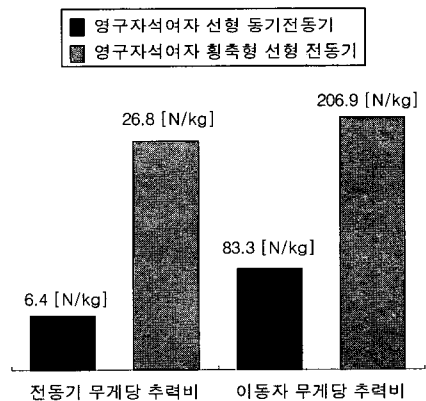


그림 18. 무게당 추력비의 비교

4. 결 론

본 고에서는 새로운 설계 개념을 도입한 영구자석여자 횡축형 전동기의 이론을 소개하고, 몇 가지 응용사례를 들어 그 특징을 설명하였다.

검토한 바와 같이 철도차량용에 응용된 영구자석여자 횡축형 선형전동기는 선형유도전동기에 비해 추력비가 3배 이상, 효율 및 역률이 35% 이상 높으며, 자기부상 열차용으로 응용된 경우 부상용 전자석이 없음에도 불구하고 단위 무게당 추력비가 2배, 효율이 30% 이상 높다. 또한 승강기에 응용된 경우 영구자석여자 선형 동기 전동기와 비교하면 단위 무게당 추력비가 4배 이상이다. 이와 같이 횡축형 전동기는 높은 효율과 출력밀도 때문에 일반 산업용은 물론이고 특히, 적은 중량이 요구되는 선형 수송기관과 큰 기동 토크가 요구되는 선형 구동 System의 추진장치로 매우 적합하다.

참고문헌

[1] Weh, H. : Permanentmagneterregte Synchronmaschinen hoher Kraftdichte nach dem Transversalflußkonzept. etzArchiv Bd. 10 (1988), H.5, S.143-149

[2] Weh, H. : Linear Electromagnetic Drives in Traffic Systems and Industry. The First International Symposium on Linear Drive for Industry Applications, Nagasaki(Japan), 1995

[3] Shoyama, Y., Ando, M. and Namikawa, H. : LIM driven subway railcar with small sectional area. International Conference on Maglev Transport '85, Yokohama, 1985

[4] Z. Jajtic. : Vortriebskraftoptimierung bei der elektrisch erregten Transversalflußmaschine. Dissertation, TU Braunschweig 1993.

[5] J. R. Hendershot JR and TJE Miller : Design of brushless permanent-magnet motors, MAGNA PHYSICS PUBLISHING AND CLARENDON PRESS, OXFORD 1994.

[6] S. A. Nasar: Electromagnetic Energy Conversion Devices and Systems, PRENTICE-HALL, INC. 1970.

[7] 김봉섭, 정현갑, 조홍제 : 선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(II), '97 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, p57~63, 대한전기학회, 1997.

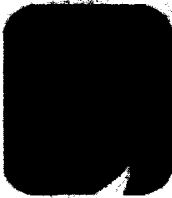
[8] 김봉섭, 정현갑, 조홍제 : 도시형 자기부상열차 추진용 선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(IV), '98 대한전기학회 하계학술대회 논문집A, p152~154, 대한전기학회, 1998

[9] "철도 차량용 고풍력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구", 강도현, Herbert Weh, 전기학회 논문지 48B권 6호, p301~308, 1999.

[10] "리ニア모ータによる垂直輸送システム實証研究", 財団法人 エンジニアリング振興協會 地下開発利用研究センター, 1992.

[11] "선형 고풍력 추진시스템 개발", 연구보고서, 과학기술부, 1998.

저 자 소 개



정인호(鄭然鎬)

1968년 3월 10일 생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학교 전기공학과 석사 졸업. 1996~현재 한국전기연구소 연구원(산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹)



강도민(姜道鎰)

1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989 동 대학교 전기공학과 석사 졸업. 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 박사 졸업. 1989~현재 한국전기연구소 선임연구원(산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹장)