

## 리니어 오실레이팅 전기기기의 비교 연구

정성인, 엄상인\*  
광주대학교 미래자동차공학과 교수

### Convergence Comparison of Linear Oscillating Electric Machines

Sung-In Jeong, Sang In Eom\*  
Professor, Department of Automotive Engineering, Gwangju University

**요약** 본 연구는 하이브리드 자동차의 리니어 오실레이팅 전기기기의 비교 연구를 위해 수행하였으며, 다섯 가지 (직각좌표형, 영구자석 매입 원통형, 자속역전식, 릴럭턴스 원통형, 횡자속 형태.)의 제안된 형태의 비교를 통해 리니어 오실레이팅 전기기기의 연구결과를 제시하였다. 모든 형태는 초기 모델링으로서 누설을 고려한 등가자기 회로법을 통해 수행되었다. 영구자석 형태의 이동자로 구성된 직각좌표형은 구속조건 아래에서 설계변수들의 파라미터 분석을 통한 최적화 과정이 수행되었고, 영구자석 매입 원통형은 이동자에 영구자석과 Back-iron이 결합된 구조를 제시하였다. 자속역전식은 영구자석형 이동자의 매입형태에 따른 분석과 향상된 모델을 제시하며, 릴럭턴스 원통형은 유효 자속의 증가와 리플을 저감하기 위한 이동자 치의 형태를 비교·분석하였다. 횡자속 형태에서는 2차원 분석기법과 3차원 분석을 통한 비교를 수행하였다. 본 연구는 설계 규칙과 리니어 오실레이팅 전기기기의 특성을 제공한다는 측면에서 의미가 있다.

**주제어** : 직각좌표형, 영구자석 매입 원통형, 자속역전식, 릴럭턴스 원통형, 횡자속 형태

**Abstract** This paper presents the results of study of linear oscillating electric machine: Cartesian, cylindrical type with permanent magnet, flux reversal, cylindrical reluctance, and transverse flux type. The focus of the work is the suggestion of the characteristics and design process of propose topology, respectively. First of all, there are five types of the proposed to this study on the basis of the existing literatures: Cartesian type, cylindrical type, flux reversal type, cylindrical reluctance type, and transverse flux type. All topology is achieved using equivalent magnetic circuit considering leakage elements as initial modeling. Cartesian type is investigated by number of phases and number of pole pairs using optimal process. A cylindrical type is described by number of phases and displacement of stroke. The flux reversal type is proposed based on the symmetrical and non symmetrical stator cores of the surface mounted PMs mover, and non slanted PMs and slanted PMs of the flux concentrating PMs mover. A cylindrical reluctance type is studied by the shape of mover teeth in geometric aspect to reduce force ripple and increase magnetic flux. A transverse flux type is considered by dividing the transverse flux electric excited and the transverse flux permanent magnet excited. It is significant that the study gives a design rules and features of linear oscillating electric machine.

**Key Words** : Cartesian, Cylindrical, Flux reversal, Cylindrical reluctance, Transverse flux

\*This Study was conducted by research funds from Gwangju University in 2021.

\*Corresponding Author : Sang In Eom(sieom@gwangju.ac.kr)

Received September 23, 2021

Revised November 4, 2021

Accepted December 20, 2021

Published December 28, 2021

### 1. 서론

초기 에너지 변환의 다양성에 있어 오실레이팅 원리가 사용되고 있다. 일반적으로 이러한 오실레이팅 모션은 로드 구동과 크랭크 샤프트에 의한 연속적인 회전 운동으로 변환된다. 이러한 크랭크 기어는 부가적 마찰, 중량과 체적, 그리고 마모 등에 의해 효율을 감소시킨다 [1-3]. 이와 같은 단점을 회피하기 위한 리니어 오실레이팅 전기기기의 사용은 고효율, 기계적인 소모 감소, 크기의 소형화, 무게의 경량과 셋업을 가능하게 한다. 리니어 오실레이팅 원리를 적용한 압축기용 모터는 효율 향상을 가져오며, 특히 직렬식 하이브리드 자동차의 발전기 적용은 근래 에너지 자원 고갈과 환경오염 등의 문제에 좋은 해결책이 된다[4-7]. 반면 기존의 연구에서는 토폴로지(구성), 상 수, 에너지 측면에서의 효율에 관한 연구가 수행되지 않았다.

본 연구에서는 아래와 같이 서로 다른 리니어 오실레이팅 전기기기 형태(토폴로지)에 대한 조사와 연구가 수행되었다.

- 직각좌표 형태(단상)
- 영구자석 매입 원통형(단상)
- 자속 역전 타입(단상)
- 릴럭턴스 원통 타입(3상)
- 횡자속 타입(단상/2상)

토폴로지별 기하학적 형상과 전기적인 특성을 함께 고려하여 리니어 오실레이팅 기기의 자기 에너지와 효율을 등가자기회로방법에 의하여 계산한다. 각 형태의 설계과정을 통해 에너지변환과정에서의 효율을 극대화함으로써 리니어 오실레이팅 전기기기의 설계 규칙과 특성을 제공한다.

### 2. 설계과정

본 연구는 등가자기회로법(EMC; Equivalent Magnetic Circuit)에 기반한 다양한 형태의 리니어 오실레이팅 전기기기를 위한 분석적 접근방식을 제안한다. 종래의 분석은 전기기기의 성능을 예측하는 방법이 사용되었는데 [8], 이는 정확한 자속 포화와 그에 따른 전기기기의 치수와 크기 설계에 한계를 가지고 있다. 특히 슬롯-극 조합을 지닌 전기기기의 각 고정자 치에서 자속을 결정

하는 것은 매우 어려워져 자기 포화는 일반적으로 간과되거나 교정 계수(Correction Factors)에 의해 보상되었다[9].

본 연구에서는 먼저 제안된 모든 형태의 전기기기 특성들이 등가자기회로방법에 의한 기기의 치수를 위해 수행되었다. 최적 모델은 등가자기회로와 구조적인 측면에 의한 전기적 결과들의 비교를 통해 이루어지고, 선택된 최적 모델은 포화를 고려한 세부설계가 수행되었으며, 이는 유한요소 분석을 통해 이루어진다. 열 특성과 기계적인 강건성을 위한 샤프트와 볼트의 피로 해석을 통한 설계를 통해 마침내 선택된 최적 모델의 정교한 설계 과정들을 평가하게 된다.

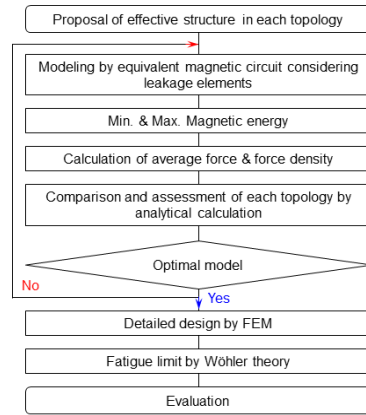


Fig 1. Procedure of Design

등가자기회로법을 이용한 제안된 형태의 모델을 설계하는 과정에서 사용된 기호는 다음과 같다.

Table 1. Explanation of Symbols

Symbol	$\Phi$	Flux	$\theta$	MMF
	$R$	Reluctance	$\tau$	Pole Pitch
	$r$	Radius	$l$	Length
	$h$	Height	$b$	Tooth
Sub-script	$a$	Armature, Aligned	$m$	Field
	$\sigma$	Leakage	$u$	Unaligned

### 3. 제안된 모델

#### 3.1 직각좌표 형태

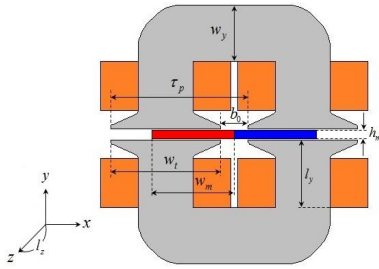


Fig. 2. Cartesian Type

평판형 리니어 오실레이팅 전기기기는 전기자 철심과 영구자석 사이의 강한 추력으로 전기자 권선에 의한 자계의 발생으로 전기기기의 출력을 발생시킨다. Fig. 2에서 보이는 것과 같이, 회색의 상단과 하단은 권선이 감긴 고정자이고, 영구자석으로만 구성된 중앙 부분이 이동자이다. 본 형태는 영구자석형 이동자가 이동함에 따라, 양쪽 끝단 부분에 큰 누설이 발생하고, 출력 대비 큰 체적을 가진다.

출력 힘의 최대화라는 목적함수, 자속밀도의 구속 조건, 목적함수에 영향을 미치는 설계변수들로 구성된 최적화 과정으로 수행되었다. 직각좌표 형태의 설계변수 선정은 목적함수에 영향을 미치는 파라미터들로 선정 되었으며, 기하학적 구조에 따라 초기값이 설정되었다.

$$\Phi_{a\delta} = \frac{\Theta_a(R_\sigma + R_m)}{(2R_\delta + R_\sigma)R_m + 2R_\delta R_\sigma} \quad (1)$$

$$\Phi_{a\sigma} = \frac{\Theta_a(R_\delta + R_m)}{(2R_\delta + R_\sigma)R_m + 2R_\delta R_\sigma} \quad (2)$$

$$\Phi_{m\delta} = \frac{\Theta_m R_\sigma}{(2R_\delta + R_\sigma)R_m + 2R_\delta R_\sigma} \quad (3)$$

$$\Phi_{m\sigma} = \frac{\Theta_m R_\sigma}{(2R_\delta + R_\sigma)R_m + 2R_\delta R_\sigma} \quad (4)$$

식 (1) 부터 (4) 를 통해 얻은 자속 방정식을 통해, 식 (5)와 (6)의 자기 에너지를 계산할 수 있다.

$$W_{\max} = 2(\Phi_{a\delta} + \Phi_{m\delta})^2 R_\delta + (\Phi_{a\sigma} - \Phi_{m\sigma})^2 R_\sigma + (\Phi_{a\delta} - \Phi_{a\sigma} + \Phi_{m\delta} + \Phi_{m\sigma})^2 R_m \quad (5)$$

$$W_{\min} = 2(\Phi_{a\delta} - \Phi_{m\delta})^2 R_\delta + (\Phi_{a\sigma} + \Phi_{m\sigma})^2 R_\sigma + (\Phi_{a\delta} - \Phi_{a\sigma} - \Phi_{m\delta} - \Phi_{m\sigma})^2 R_m \quad (6)$$

Table 2. Comparison of Initial and Optimal Model

-	Symbol[mm]	Initial	Optimum
Design Variable	$h_m$	5	4
	$w_m$	22	25
	$w_y$	28	28
	$l_y$	16	16
	$b_0$	4	8
	$w_t$	25	30
Object Function	Force [N]	235	250
Constraint	B [T]	1.4~2.0	1.6~1.7

최적화 과정을 통한 결과는 초기값 선정과 거의 유사하다. 단, 고정자 치의 길이( $w_t$ )가 초기값과 다소 차이가 존재하는데, 이는 전류가 일정하다면 자속이 증가함에 따라 힘이 증가하고 영구자석 한 극의 길이와 고정자 치의 길이 간의 관계, 그리고 국부점에서 최소값(Local Minimum)이 발생하였기 때문이다.

### 3.2 영구자석 매입 원통형

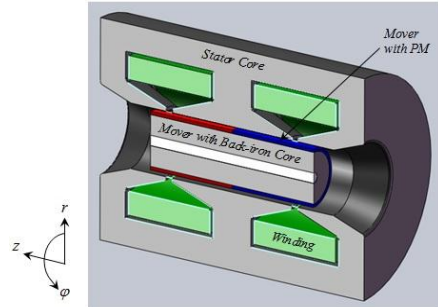


Fig. 3. 3-Dimension of Cylindrical Type

Fig. 3은 이동자에 영구자석과 Back-iron이 결합한 원통형의 전기기기를 나타내고, 그림 4는 축 방향으로 절단한 2차원 단면이다. 이동자의 회전은 전기기기의 전기적 특성에 영향을 미치지 않으나, 직각 좌표형보다 제작이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 하지만, SMC(Soft Magnetic Composite)에 의해 이러한 단점은 극복되었으며, 평판형 타입보다 구조적인 측면에서 더 높은 효율과 신뢰성을 가진다[10]. 본 형태의 누설 성분을 이용한 등가자기회로법을 이용한 설계과정은 다음과 같다.

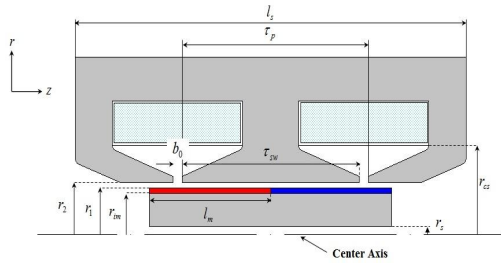


Fig 4. 2-Dimension of Cylindrical Type

$$R_{\sigma 1} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{2\pi(r_2 - r_1)} \frac{1}{\left(\frac{l_m - \tau_{sw}}{2}\right)} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{9} \frac{\delta}{2\pi(r_2 - r_1)} \frac{1}{\ln\left(\frac{l_m - \tau_{sw}}{\delta}\right)} \quad (7)$$

$$R_{\sigma 2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{2\pi(r_2 - r_1)} \frac{1}{(r_{im} - r_s)} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2} \frac{\delta}{2\pi(r_2 - r_1)} \frac{1}{\ln\left(\frac{r_{im} - r_s}{r_1 - r_{im}}\right)} \quad (8)$$

$$R_{\sigma 3} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{2\pi(r_2 - r_1)} \frac{1}{\left(\frac{l_m}{2} - l_m\right)} + \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{9}\right) \frac{\delta}{2\pi(r_2 - r_1)} \frac{1}{\ln\left(\frac{r_{im} - r_s}{r_1 - r_{im}}\right)} \quad (9)$$

$R_{\sigma 1}$ 과  $R_{\sigma 2}$ 는 최대 자기 에너지의 양 끝단 누설 자기 저항이며,  $R_{\sigma 3}$ 는 최소 자기 에너지의 누설 자기저항이다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\sigma 1} & -R_{\sigma 1} & 0 & 0 & 0 \\ -R_{\sigma 1} & R_{\sigma 1} + R_b & -R_b & 0 & 0 \\ 0 & -R_b & R_b + R_{\delta} & -R_{\delta} & 0 \\ 0 & 0 & -R_{\delta} & R_{\delta} + R_{\sigma 2} & -R_{\sigma 2} \\ 0 & 0 & 0 & -R_{\sigma 2} & R_{\sigma 2} + R_m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Theta_a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Theta_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_5 \\ \Phi_6 \\ \Phi_7 \\ \Phi_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{\sigma 3}}{2} & -\frac{R_{\sigma 3}}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{R_{\sigma 3}}{2} & \frac{R_{\sigma 3}}{2} + R_{ns} & -R_{ns} & 0 \\ 0 & -R_{ns} & R_{ns} + R_{\delta} & -R_{\delta} \\ 0 & 0 & -R_{\delta} & R_{\delta} + R_m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Theta_a \\ 0 \\ 0 \\ \Theta_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

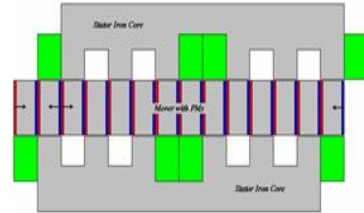
식 (10)과 (11)은 각각 최대와 최소 자기 에너지를 구하기 위한 행렬 표현식이다. 본 형태에서 최종 자기 에너지는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta W = W_{\max} - W_{\min} = \frac{1}{2} (\Phi_{\max}^2 R_{\max} - \Phi_{\min}^2 R_{\min}) \quad (12)$$

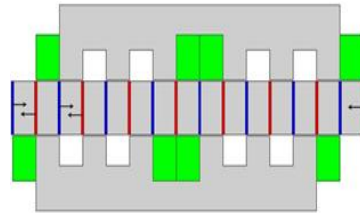
### 3.3 자속 역전 타입

자속 역전형은 간단한 구조와 강건한 고정자 구조로

인하여 높은 동기 리액턴스를 가진다. 일반적으로 자속 역전식 전기기기의 자속 방향은 중방향 혹은 이동 방향과 평행이다. 이것은 이동자의 진행 방향이 자속과 수직 방향인 횡자속과 구별되는 점이다. 본 형태는 고정자와 회전자 배치 구조상, 상대적으로 강한 추력으로 인한 리플이 크며, 이동자의 속도도 낮다[11].



(a) Conventional Model



(b) Proposal Model

### Fig 5. Flux Reversal Type

Fig. 5의 (b)는, 기존의 자속역전식보다[12]보다 이동자의 영구자석을 전기강판 사이에 한 극만을 삽입하여 유효자속을 증가시키면서 영구자석의 수량을 절감함으로써 재료비와 제작을 쉽게 하고, 이동자의 고속운전을 가능하게 하는 모델링을 제시하였다.

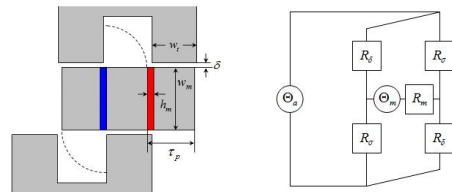


Fig 6. Equivalent Magnetic Circuit

$$R_{\sigma} = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{l_z} \frac{h_m}{(\tau_p - h_m)} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2} \frac{1}{\ln\left(\frac{\tau_p - h_m}{\delta}\right)} \quad (13)$$

자기 에너지는 자속의 표현식으로 부터 구할 수 있다.

$$\Phi_{a\delta} = \frac{\Theta_a(R_\sigma + R_m)}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_m} \quad (14)$$

$$\Phi_{a\sigma} = \frac{\Theta_a(2R_\delta + R_m)}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_m} \quad (15)$$

$$\Phi_{m\delta} = \frac{\Theta_m 2R_\sigma}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_m} \quad (16)$$

$$\Phi_{m\sigma} = \frac{\Theta_m 2R_\delta}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta)R_m} \quad (17)$$

$$W_{\max} = (\Phi_{a\delta} + \Phi_{m\delta})^2 R_\delta + (\Phi_{a\sigma} - \Phi_{m\sigma})^2 R_\sigma + \frac{1}{2} (\Phi_{a\delta} - \Phi_{a\sigma} + \Phi_{m\delta} + \Phi_{m\sigma})^2 R_m \quad (18)$$

$$W_{\min} = (\Phi_{a\delta} - \Phi_{m\delta})^2 R_\delta + (\Phi_{a\sigma} + \Phi_{m\sigma})^2 R_\sigma + \frac{1}{2} (\Phi_{a\delta} - \Phi_{a\sigma} - \Phi_{m\delta} - \Phi_{m\sigma})^2 R_m \quad (19)$$

### 3.4 릴럭턴스 원통 타입

원통형 릴럭턴스 전기기기는 평판형 릴럭턴스 타입과 비교하여 더 작은 공극에 의한 힘의 증립화가 가능하다. 또한, 본 기기는 낮은 리액턴스와 높은 역률을 지니지만, 주어진 전류에 따른 힘은 공극 길이가 길어짐에 따라 급격히 감소한다는 단점을 가지고 있다[13].

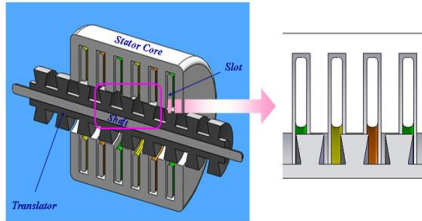


Fig 7. Tubular Reluctance Type

일반적으로 릴럭턴스 형태의 기기에서는 고정자 치의 길이보다 이동자 치의 길이를 크게 하는 것이 쇄교자속을 증가시킨다. 그러나 이러한 방법은 리플과 평균 힘의 저감을 초래하여 본 연구에서는 사다리꼴 형태의 이동자 치에 대한 연구가 이루어졌다. Fig. 8은 Fig. 7에서 보이는 이동자 치 형태를 확대한 직사각형과 사다리꼴 형태의 이동자 형상을 보여준다.

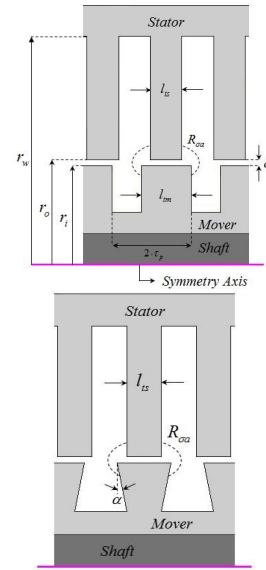


Fig 8. Shape of Mover; Trapezoidal and Rectangular

$$R_{\sigma a} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2\pi(r_o - r_i)} \frac{1}{\ln\left(\frac{l_{tm}}{\delta}\right)} \quad (20)$$

$$R_{\sigma u1} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\tau_p - l_{tm}}{2\pi(r_o - r_i)l_{tm}} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2} \frac{1}{2\pi(r_o - r_i)} \frac{1}{\ln\left(\frac{l_{tm}}{\tau_p - l_{tm}}\right)} \quad (21)$$

$$R_{\sigma u2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\frac{l_{ts}}{2}}{2\pi(r_w - r_o)\frac{l_{tm}}{2}} + \left[ \frac{1}{\mu_0} \frac{\tau_p - \frac{l_{tm}}{2}}{2\pi(r_o - r_i)\frac{l_{tm}}{2}} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2} \frac{1}{2\pi(r_o - r_i)} \frac{1}{\ln\left(\frac{l_{tm}}{\tau_p - \frac{l_{tm}}{2}}\right)} \right] \quad (22)$$

$R_{\sigma u1}$ 은 고정자 치와 이동자 측면과의 누설 자기저항이고,  $R_{\sigma u2}$ 는 슬롯과 이동자 치 사이에서 발생하는 누설 자기저항이다. 이 두 가지 누설 성분들은 직사각형 이동자 형태에서 적용된다.

$$R_{\sigma a} = \frac{1}{\mu_0} \left(\pi + \frac{\pi}{k}\right) \frac{\pi}{2\pi(r_o - r_i)} \frac{1}{\ln\left(\frac{l_{tm}}{\delta}\right)} \quad (23)$$

$$R_{\sigma u1} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\tau_p - l_{tm}}{2\pi(r_o - r_i)l_{tm}} + \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{k}\right) \frac{1}{2\pi(r_o - r_i)} \frac{1}{\ln\left(\frac{l_{ts}}{l_{tm} - l_{ts}}\right)} \quad (24)$$

$$R_{\sigma u2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\frac{l_{ts}}{2}}{2\pi(r_w - r_o)\frac{l_{tm}}{2}} + \left[ \frac{1}{\mu_0} \frac{\frac{l_{tm} - l_{ts}}{2}}{2\pi(r_o - r_i)\frac{l_{tm}}{2}} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2} \frac{1}{2\pi(r_o - r_i)} \frac{1}{\ln\left(\frac{l_{ts}}{l_{tm} - l_{ts}}\right)} \right] \quad (25)$$

식 (23)부터 (25)는 사다리꼴 형태의 누설 자기저항이며,  $k$ 는  $180^\circ/\alpha$ 를 나타낸다.

$$\Delta W = W_{\max} - W_{\min} = 2\theta_a^2 \left( \frac{2R_\delta + R_{\sigma u}}{R_\delta + R_{\sigma u}} - \frac{2}{R_\delta + R_{\sigma u1} + R_{\sigma u2}} \right) \quad (26)$$

한 주기 내에서 정격 전류 시, 이동자가 고정자로 이동함에 따라 인덕턴스는 상승하고, 그 특성은 직사각형 이동자 형태보다 사다리꼴 형태의 이동자가 더 향상됨을 알 수 있다. 이는 사다리꼴 형태 이동자가 유효자속이 더 향상됨을 보여주고, 그 결과 에너지와 힘 모두 직사각형 형태 이동자보다 더 나은 결과를 나타낸다.

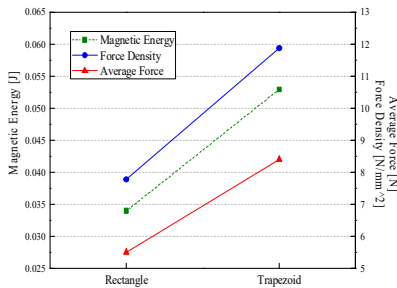
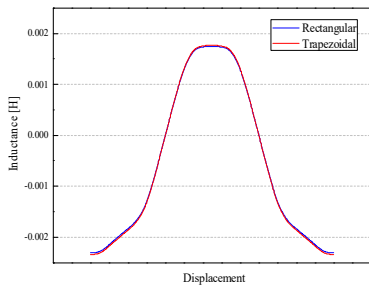


Fig 9. Comparison of Inductance and Result

### 3.5 횡자속 타입

횡자속 기기는 3차원 자속 경로에 의한 혁신적인 자기 구조를 사용한다. 본 기기는 높은 출력 밀도를 가진다는 장점이 있지만, 낮은 역률과 높은 누설 리액턴스, 설계와 제작이 어렵다는 단점을 가지고 있다[14].

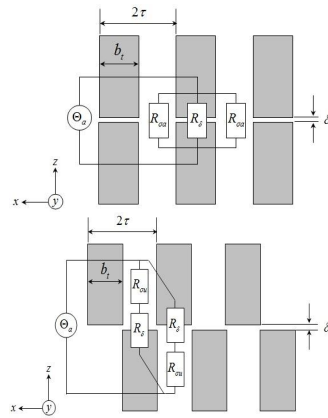


Fig 10. Transverse Flux Machine with Reluctance

Fig. 10은 릴럭턴스 형태의 횡자속 기기의 정렬 및 비정렬 위치를 각각 나타내고, 그때의 누설 릴럭턴스와 자기 에너지는 식 (30)과 같이 표현된다.

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 h_i b_t} \quad (27)$$

$$R_{\sigma a} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{h_i \ln\left(\frac{b_t}{\delta}\right)} \quad (28)$$

$$R_{\sigma u} = \frac{1}{\mu_0} \frac{2r - b_t}{h_i b_t} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2h_i} \frac{1}{h_i \ln\left(\frac{b_t}{2r - b_t}\right)} \quad (29)$$

$$\Delta W = \theta_a^2 \left[ \frac{2R_\delta + R_{\sigma u}}{R_\delta R_{\sigma u}} - \frac{2}{R_\delta + R_{\sigma u}} \right] \quad (30)$$

Fig. 11은 영구자석이 매입된 횡자속 기기와 릴럭턴스를 이용한 자기 에너지를 위한 등가회로를 나타낸다.

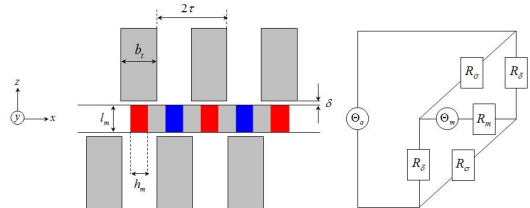


Fig 11. Transverse Flux Machine with PMs

$$R_\delta = \frac{2\delta}{\mu_0 h_i b_t} \quad (31)$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_0} \frac{h_m}{h_i l_m \mu_r} \quad (32)$$

$$R_\sigma = \frac{1}{\mu_0} \frac{\tau - b_t + h_m}{h_i (\tau + h_m)} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\pi}{2h_i} \frac{1}{h_i \ln\left(\frac{\tau - h_m}{\delta}\right)} \quad (33)$$

$$\Phi_{a\delta} = \frac{\Theta_a (R_\sigma + R_m)}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta) R_m} \quad (34)$$

$$\Phi_{a\sigma} = \frac{\Theta_a (2R_\delta + R_m)}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta) R_m} \quad (35)$$

$$\Phi_{m\delta} = \frac{\Theta_m R_\sigma}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta) R_m} \quad (36)$$

$$\Phi_{m\sigma} = \frac{\Theta_m R_\delta}{2R_\delta R_\sigma + (R_\sigma + R_\delta) R_m} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \Delta W = & [2(\Phi_{a\delta} + \Phi_{m\delta})^2 R_\delta + 2(\Phi_{a\sigma} - \Phi_{m\sigma})^2 R_\sigma \\ & + (\Phi_{a\delta} - \Phi_{a\sigma} + \Phi_{m\delta} + \Phi_{m\sigma})^2 R_m] \\ & - [2(\Phi_{a\delta} - \Phi_{m\delta})^2 R_\delta + 2(\Phi_{a\sigma} + \Phi_{m\sigma})^2 R_\sigma \\ & + (\Phi_{a\delta} - \Phi_{a\sigma} - \Phi_{m\delta} - \Phi_{m\sigma})^2 R_m] \end{aligned} \quad (38)$$

등가자기회로법에 의한 2차원 횡자속 기기는 영구 자석과 전기자 자속을 예측할 수 있다. 그러나 횡자속 기기는 영구자석과 권선의 이동 방향이 같은 방향이기 때문에 2차원 분석으로부터 힘을 계산하기가 매우 어렵다 [15]. 본 연구는 2차원 등가자기회로법에 의한 초기 분석과 3D 유한요소분석을 이용하여 그 타당성을 검증하였다.

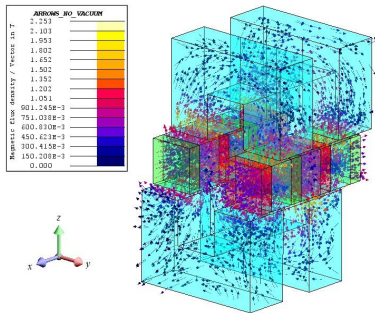


Fig 12. 3D Finite Element Analysis

Table 3. Comparison of 2D EMC and 3D FEM

	2D EMC	3D FEM
Magnetic Energy[J]	0.08	0.074
Average Force[N]	8.89	8.216
Force Density[N/mm <sup>2</sup> ]	49.4	45.64

Table 3은 3차원 유한요소해석에 의한 시뮬레이션 결과와 2차원 등가자기회로법에 의한 수치 결과 비교로써 그 결과 90[%] 이상 일치한다.

## 4. 결론

본 연구는 직렬 하이브리드 자동차용 리니어 오실레이팅 전기기기의 다양한 형태와 등가자기회로법을 통한 설계를 제안하기 위해 수행하였다. 이를 위해 직각좌표형, 영구자석 매입 원통형, 자속 역전형, 릴럭턴스 원통형, 그리고 횡자속의 총 다섯 가지 토폴로지의 기하학적 형상과 전기적인 파라미터를 고려하여 분석하였다. 분석 과정에서 제안된 토폴로지들의 장·단점, 설계과정에서의 변수와 이를 통한 누설 릴럭턴스, 자기 에너지, 출력 등을 계산하였다. 본 연구는 리니어 오실레이팅 전기기기의 특성과 전기기기의 설계과정에 대해 프로세스와 규칙을 제공한다는 측면에서 의미가 있으며, 향후 샤프트와 결합에 따른 피로 해석과 작동 주파수별 열 해석에 대한 연구가 필요하다.

## REFERENCES

- [1] S. Barsali, C. Miulli & A. Possenti. (2004). A control strategy to minimize fuel consumption of series hybrid electric vehicles, *IEEE Trans. On Energy Conversion*, 19(1), 187-195. DOI : 10.1109/TEC.2003.821862
- [2] S. I. Jeong. (2017). Design Rules of Hybrid Stepping Machine for Free Piston Engine, *J Electr Eng Technol*, 12(3), 1219-1226. DOI : 10.5370/JEET.2017.12.3.1219
- [3] Joergen Hansson and Mats Leksell. (2007). *Performance of a Series Hybrid Electric Vehicle with a Free-Piston Energy Converter*. DOI : 10.1109/VPCC.2006.364342
- [4] C. C. Chan. (2002). The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90(2), 247-275. DOI : 10.1109/5.989873
- [5] G. Maggetto & J. Van Mierlo. (2000). *Electric and electric hybrid vehicle technology : A survey, in Proc. Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*. DOI : 10.1049/ic:20000261
- [6] Sigita Kudarauskas. (2004). *Introduction to oscillating electrical machines*, Klaipeda, ISBN : 9955-585-75-7.



- [7] W. Li, S. Gao, D. Wu & X. Zhang. (2010). Design of a linear magnetic-geared free-piston generator for series hybrid electric vehicles, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*(pp. 1-6). DOI : 10.1109/VPPC.2010.5729021
- [8] M. F. Hsieh & Y. C. Hsu. (2012). A Generalized Magnetic Circuit Modeling Approach for Design of Surface Permanent-Magnet Machines. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 59(2), 779-792. DOI : 10.1109/TIE.2011.2161251
- [9] I. Boldea. (1976). Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(4), 66-68. DOI : 10.1109/MIE.2013.2289563
- [10] S. I. Jeong. (2015). Comparative study of Linear oscillating generators. Göttingen, Cuvillier Verlag. ISBN : 9783736991170
- [11] T. H. Kim, H. W. Lee, Y. H. Kim, J. Lee, & I. Boldea. (2004). Development of a Flux Concentration Type Linear Oscillatory Actuator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(4), 2092-2094. DOI : 10.1109/TMAG.2004.832461
- [12] J. Lee, T. B. Lim & I. Boldea. (2002). Linear reciprocating flux reversal permanent magnetic machine. United States : (US) Patent. H02K-033/00
- [13] S. I. Jeong. (2020). A Study on Design of Tubular Linear Reluctance Generator Taking Account of Leakage Elements. *Journal of Magnetics*, 25(2), 293-300. DOI : 10.4283/JMAG.2020.25.2.293
- [14] H. Gao. (1994). Numerisches Berechnungsverfahren fuer Synchronmaschinen in Transversalfluss-Bauweise, Düsseldorf : VDI-Verl. ISBN : 9783181451212 3181451215
- [15] J. Kim, K. Kim & Dae Lee. (2018). Analysis on Efficiency Characteristics of IPMSM for fuel Economy Improve of Electric Vehicle. *Journal of the Korea Convergence Society*, 9(4), 1-7. DOI : 10.15207/JKCS.2018.9.4.00

정 성 인(Sung-In Jeong)

[정회원]



- 2001년 2월 : 동국대학교 전기공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 11월 : 브라운슈바이크공대 전기정보물리공학과(공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 광주대학교 미래자동차공학과 교수
- 관심분야 : 퍼스널 e-모빌리티 부품 및 시스템
- E-mail : si.jeong@gwangju.ac.kr

엄 상 인(Sang In Eom)

[정회원]



- 1998년 2월 : 부산대학교 항공우주 공학과(공학사)
- 2000년 2월 : 부산대학교 지능기계 공학과(공학석사)
- 2009년 3월 : 오사카대학 기계시스템 공학전공(공학박사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 광주대학교 미래자동차공학과 교수
- 관심분야 : 광응용계측, 액추에이터
- E-mail : sieom@gwangju.ac.kr