

전자가속기 빔 집속 향상을 위한 솔레노이드 전자석 설계

안진남*, 신승욱, 남궁호, 채종서

성균관대학교

1. 서론

전자가속기는 전자를 가속시켜서 가속되지 않은 전자보다도 더 많은 부가가치를 생산해내며 최근에도 그에 관련된 연구가 활발히 진행 중이다. 예를 들어 전자빔을 이용하여 나노구조나 나노입자를 만드는 기술[1], X-ray를 이용한 지질탐사 [2] 비파괴 검사, 소프트 빔을 이용한 살균기술, 혹은 테프론 등 분해되지 않는 불소 수지에 쪼여 결합을 약하게 함으로서 환경보존에 이바지 하는 등 이미 넓은 분야에 두루 쓰이고 앞으로의 가능성과 발전 여지 또한 크다.[3]

전자가속기 와 더불어 전자석 또한 넓은 범위에 두루 쓰이는데 그 예로 우주발사체 시스템에 필요한 코일 전과[4] 친환경 리니어 모터[5] 등이 있다.

따라서 본 논문에서는 전자가속기와 상용에 공한 전자석을 이용하여 전자를 가속시켜 더 많은 부가가치를 생산해낼 수 있도록 전자빔의 특성을 향상시키는 연구를 진행하였다.

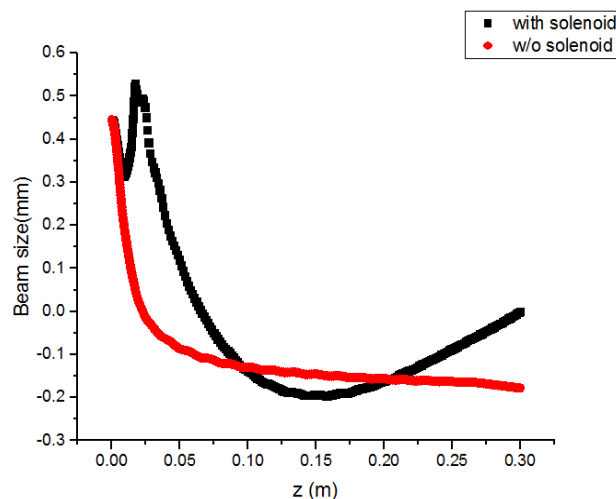


Fig. 1. Graph of beam size that pass through solenoid coil and not controlled the beam with solenoid coil hits accurate target point but the beam size without solenoid is the bigger size the longer target spot

전자가속기에서 나온 전자가 발사될 때 같은 전하를 가진 전자들은 쿨롱힘에 의하여 서로 밀어내는 성질이 있어 전자들은 퍼지게 되고 의도한 타겟보다 넓은 범위에 영향을 끼치고 특성이 나빠지게 된다. 따라서 빔 전송 시 빔 손실을 줄이고 타겟에서의 X-ray 발생 효율을 높이기 위하여 집속시키는 과정이 필요한데 이를 위하여 솔레노이드코일 안으로 통과시켜 자력을 받으면 로렌츠힘에 의하여 반지름방향의 반대방향으로 힘을 받게 되고 흩어져있던 전자를 모아서 더 강한 전자빔을 발생시킬 수 있다.[6] 그러나 자기장의 세기가 너무 큰 경우 과집속되어 오히려 전자빔의 크기가 커지게 되는 현상이 발생한다. 따라서 적당한 크기의 자속을 갖게 하는데 이미 본 연구에서 사용된 전자가속기의 전자빔의 경우 이미 다른 연구를 통해 중심에서 1600G가 나오는 전자석이 사용되었을 경우 최적의 빔을 발생시킬 수 있다는 것을 알고 있다. Fig.1.에서 나타난 것처럼 중심에서 1600G를 갖는 전자석을 통과시킬 경우 빔사이즈는 빔 경로의 중심에 근접하고 전자석을 통과시키지 않은 전

자빔의 경우 점점 퍼짐을 알 수 있다.

본 논문의 목적은 1600G의 최대 자속밀도 갖는 공심 솔레노이드 전자석이 최소한의 전력소모를 하도록 권선의 굵기와 권선 수를 조정하여 설계하는데 있다. 또한 전자석 시뮬레이션 프로그램인 CST EM STUDIO와 Opera.TOSCA 프로그램을 이용하여 모델링 시뮬레이션을 진행해 설계된 전자석 설계를 검증하였다.

2. 실험방법과 결과

솔레노이드를 설계하기 전에 만들고자 하는 솔레노이드의 기본 형태를 정하고 설계에 영향을 미치는 변수를 설정한다. 솔레노이드의 내부 공간은 이상적 투자율을 가진 진공으로 가정하며 모양은 원통형 솔레노이드에 내반경 2.5cm 설정하며 사용되는 코일의 직경은 미국전선 규격인 AWG(American wire gauge)를 따르며 Table.1과 같다.

Table.1. AWG (American Wire Gauge)

AWG#	D(mm)	AWG#	D(mm)
1	7.348	10	2.588
2	6.544	11	2.305
3	5.827	12	2.053
4	5.189	13	1.828
5	4.621	14	1.628
6	4.115	15	1.45
7	3.665	16	1.291
8	3.264	17	1.15
9	2.906	18	1.024

목표로 하는 자속밀도 1600G를 생성하는 솔레노이드 전자석을 설계하기 위한 변수는 솔레노이드에 흐르는 전류, 전자석에 감는 권선의 반경, 직경방향 권선수, 축방향 권선수이다.

이때 전자석의 길이는 권선의 직경과 길이방향 권선수의 곱으로 나타내며 전체 전자석의 반경은 내반경에 권선의 직경과 전자석의 반지름방향 권선수를 곱해준 값을 더해준 것으로 정한다.

3. 설계

위 식(1)은 설계변수들이 포함된 자속밀도식으로 각각의 변수에 대한 설명은 다음과 같다.

$$B = \frac{\mu I (H_{coil})}{2D_{wire}^2} \ln \frac{[R_{core} + (N_{layer} \times D_{wire})] + \sqrt{[R_{core} + (N_{layers} \times D_{wire})]^2 + \frac{1}{4} H_{coil}^2}}{R_{core} + \sqrt{R_{core}^2 + \frac{1}{4} H_{coil}^2}} \quad (1) [7]$$

B: 자 속 밀 도 [T]

μ : 투자율 [H/m]

I: 전류 [A]

H_{coil} : 솔레노이드 코일의 전체길이 [cm]

R_{core} : 솔레노이드의 안쪽 반경 [mm]

N_{layer} : 반경방향으로 권선된 코일의 수

D_{wire} : 사용되는 권선의 직경 [mm]

위 (1)식에서 1600G가 나오는 축 방향, 반경 방향 권수를 구하고

$$R_{coil} = \frac{2\pi N(MR_1 + \frac{M^2 d}{2})}{\pi(\frac{d}{2})^2} \times \rho_{copper} \quad (2)$$

N : 축 방향 권수

M : 반경방향 권수

R : 솔레노이드의 내 반경[mm]

d : 코일의 직경[mm]

ρ_{copper} : 구리의 비 저항[$\Omega \cdot m$]

$$P_{coil} = I^2 \times R_{coil} \quad (3)$$

식(2)와 (3)을 연립하여 사용 전력의 최저값을 구한다.

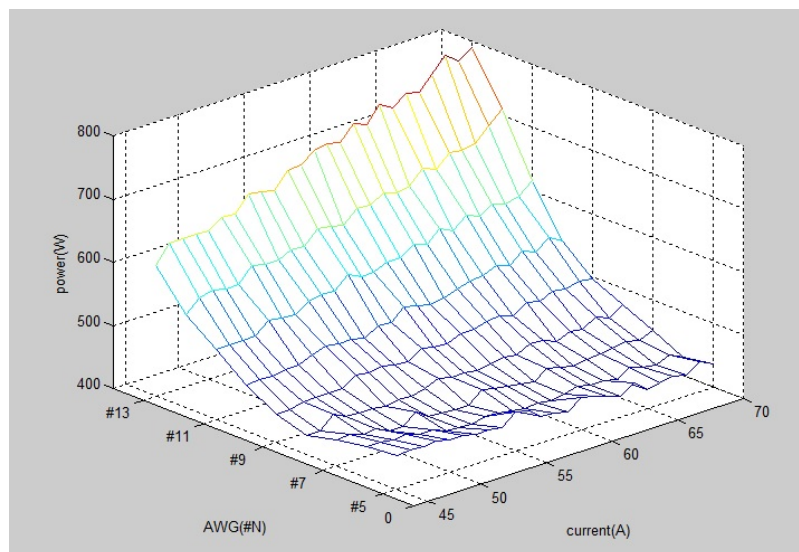


Fig. 2. The power of sets that have 1600G magnetic density in center. It is arrayed by current and diameter represented in AWG, coil have the bigger number, the bigger diameter of it. In significant region, small diameter coil have too big resistor to satisfy 1600G and in respectively big diameter, to satisfy 1600G it requires big current so it has minimum power in AWG#6 and 64A current

식(1), (2), (3)을 조합하여 자속밀도 0.16T가 나오는 조합을 와 전류를 통하여 나타내면 Fig.2.과 같다.

이 결과를 분석해본 결과 직경은 AWG#6이고 전류는 64A가 흐르고 반경방향으로 12번 축방향으로 22번 권선을 감았을 때 최저전력소모하며 그 값은 427W와 같다.

4. 고찰

이 결과를 Opera.TOSCA 와 CST EM STUDIO를 통하여 실제 시뮬레이션을 해보고 중앙에서 각각 자속밀도 최댓값인 1601.337G와 1603.3G를 갖는 모습을 관찰 할 수 있다. 여기서 구한 위치에 따른 자속밀도의 분포의 차이를 나타낸 그래프는 Fig.3.와 같다.

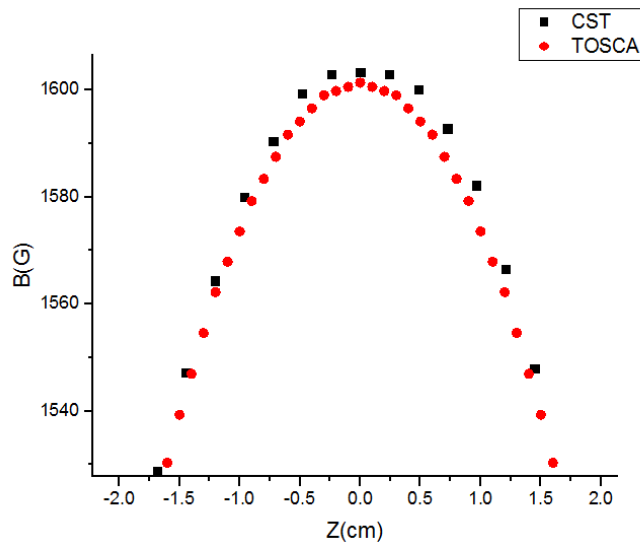


Fig. 3. The comparison of magnetic flux density between Opera TOSCA and CST EM Studio in gauss scale there is only small difference between them in center point so the model designed is considered very accurately

5. 결론

가속기의 집속향상을 위해서 선행된 연구에서 얻은 자속밀도 값인 1600G를 형성하며 효율을 최대로 하기 위하여 소모전력이 가장 작은 솔레노이드 전자석을 설계하는 것이 목표였다. AWG규격에 따라 적당한 굵기의 도선과 축방향, 반경방향 권선수와 인가전류를 설계변수 삼고 최적의 조건을 찾는 연구를 수행하였다. 이러한 변수들의 최적의 조합을 구하기 위하여 자속밀도를 나타내는 식과 저항을 나타내는 식을 설계변수에 관한 식으로 나타내고 프로그램을 이용하여 계산하고 이중 가장 적절하다고 판단되는 값을 구하여 모델링 한 결과 반경방향으로 12번, 축방향으로 22번 권선을 감고 64A의 전류를 인가해준 솔레노이드가 최저전력을 소비하는 조건이었고 그 값은 427W였다. 또한 이러한 설계가 적합한지 알아보기 위하여 CST EM STUDIO와 TOSCA 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 후 두 값을 비교하여 오차를 비교하였고 적합함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] S. O. Cho, H. Y. Jun, S. K. Ahn. 2005. A Novel Route to Three-Dimensionally Ordered Macroporous Polymers by electron Irradiation of Polymer Collolids. *Advanced Materials*, Vol. 17 p. 120
- [2] 현창욱, 박형동. 2005. X-ray CT를 이용한 암석 내부 특성 연구. *대한지질공학회 학술발표논문집*:7-11
- [3] 이병철, 정영욱, 박성희, 한영환, 강희영. 2011. 가속기의 산업이용. *물리학첨단기술*. March2006:21-28
- [4] Jae-hwan Jang, Jin-ho Kim, Su-jeong Lee. 2015. Parameter Study on the Design of Solenoid to Enhance the Velocity of Coilgun. *Journal of the Korean Magneitcs Society*. Vol.25 No.3 [2015]: 87-91
- [5] Haghmaram. R, Shoulaie.A.,. 2004, Study of Traveling Wave Tubular Linear Induction Motors. *International Conference on Power System Technology* p288-293
- [6] 김지광. 1994. 전해질에 작용하는 로렌츠 힘에 관연구. *공주대학교 교육대학원: 물리교육전공*
- [7] Jim Hawley. 2011. The magnetic field in and around a finite cylindrical air-core solenoid. September 2011