

대전력 펄스발전기의 전자기력 해석

김성태, 김영춘, 문태선  
두산중공업(주) 기술연구원

Electromagnetic Analysis of High-power Compulsator

S.T.Kim, Y.C.Kim, T.S.Moon  
R&D Center, DOOSAN Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

**Abstract** - Electromagnetic analysis has been made for the design of 3 MJ Compulsator (Compensated Pulsed Alternator, CPA) that will be used as the power supply system of the electrothermal-chemical launcher system, using finite element method with ANSYS/Emag.

From the analysis results, it was possible to decide the excitation MMF and the rotor/stator size to obtain the desired output current. And using electromagnetic forces from the analysis results, the stresses on the components of 3 MJ CPA could be analyzed.

The detailed design based on the analysis results has been made and the fabrication of 3 MJ CPA is in progress.

Before assembling components into 3 MJ CPA, an experiment is being made to check the correspondence between analysis results and measurements.

1. 서 론

대전력 펄스 발전기를 설계하기 위한 기초적인 전자기력과 그 전자기력을 이용한 구조해석을 수행하였다. 아래의 표에 기기의 대표적 사양을 나타냈다.

표 1. CPA Specifications

Peak open-circuit voltage	5 kV
Peak output current	57 kA
Maximum rotor speed	7,500 rpm
Number of poles	4
Excitation MMF	56,000 AT (56turn, 1000 A)

전열화학 추진체계의 전원 공급장치로서의 역할을 위해 적절한 출력 전류를 회로해석을 통해 결정하고, 회전체 동역학 해석으로부터 회전자의 치수를 구하였다. 이로부터 펄스발전기의 대략적인 2-D 모델을 구성하고, 전자기장 해석을 통해 Excitation MMF와 고정자와 회전자의 정확한 치수를 결정하고, 이 전자기력에 의해 구조물에 미치는 각종 힘(force), 응력(stress), 변위(displacement) 등을 구해 상세 설계를 위한 기초 데이터로 활용했다.

펄스발전기의 2-D 모델은 I-DEAS를 이용해 모델링하고, ANSYS/Emag 5.5를 이용해 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)을 적용하여 해석을 수행했다.

2. 본 론

2.1 해석모델 구성

당사에서 제작하고자 하는 펄스발전기 기본사양을 적용하여 해석을 위한 2-D 모델을 구성했다. 현재 제작하고자 하는 펄스발전기는 4-pole, 철심형(iron-core type)의 선택적 수동보상(selective passive compensation) 방식으로, 출력(Power density)을 높이기 위해 Air-gap winding 방식을 택했다.

구성한 해석모델은 크게 회전자와 고정자, 기본축, 전기자/보상/계자권선, 전기자/보상/계자권선 지지층, 공극으로 구성되어 있다.

회전자와 고정자 모두 동일한 재료로, 와전류 손실(Eddy current loss)을 줄이기 위해 구조강판으로 적층되어 있고, 축은 스테인레스 강(Stainless steel)을 사용하여 모델링하였다. 2~3 msec 정도의 펄스폭을 가진 펄스형태로 출력 전류가 발생하기 때문에 전류의 표면 효과(Skin effect)를 고려하여 전기자권선과 보상 권선은 리쯔 권선(Litz wire)을 사용한다. 모델의 권선 부분 중 세곳은 15 turn, 나머지 한곳은 14 turn이고, 한 권선의 단면적은 약 75.0E-6 m<sup>2</sup>이다. 계자권선은 단면이 11×11, Ø4 구멍이 있는 중공 도선(Hollow conductor)를 사용하였고, 한 권선의 단면적은 108.4E-6 m<sup>2</sup>이다. 전기자권선과 보상권선 지지층은 일반 발전기와 달리 권선이 회전자의 표면과 고정자 내경표면에 접착되는 Air-gap winding 방식으로 제작되기 때문에 각 권선을 표면에 고정시켜주기 위한 부분으로, 유리섬유와 Epoxy resin을 몰딩해 제작한다. 계자 권선 지지층은 고정자의 Pole 사이와 계자권선으로 이루어진 부분의 빈 공간을 G-10으로 채워넣고 Pole face와 동일한 내경을 이루도록 한다.

해석에 필요한 각 구성요소별 물성치는 다음 표 2, 3과 같다. 이중 강자성체인 회전자와 고정자의 B-H 데이터는 자속세기(H)가 200 A/m까지는 기존 데이터를 참조하였고, 그 이후는 앞의 데이터와 자속밀도(B)의 설계 한계치, 공간(Free space)에서의 투자율(Permeability)를 고려하여 임의로 설정한 값이다. 이는 B-H 데이터의 부족으로 인해, 해석결과에서 회전자나 고정자 영역에서 자기포화(Magnetic saturation) 때문에 실제 자연계 현상에서는 일어날 수 없는 아주 높은 자속밀도(B)를 가지는 경우를 방지하기 위한 것이다.

모델에서 요소는 2-D Coupled-field 문제를 풀 수 있는 Plane13을 사용했다. Plane13은 요소 각 노드(Node)에서 자유도(Degree of Freedom)가 AZ (Z-방향 Magnetic vector potential), UX, UY(X, Y방향 변위), Temp(온도)로 전자기장에 관련된 해석결과인 전자기력을 이용해 구조적인 문제까지 동시에 해석이 가능하다. 모델에서 Air 영역에 해당하는 요소들은 Element type option에서 자유도를 AZ만 선택하였고, 나머지 영역에서는 UX, UY를 선택하여 구조물에 미치는 전자기력에 의한 각종 힘, 응력, 변위 등을 계산했다.

경계조건은 내부에서 발생한 자장은 모두 고정자와 공극, 회전자를 경로로 하여 고정자 외부로 누설되는 자장은 없다고 가정해, 고정자의 바깥 외경을 이루는 노드에 자장이 평행하다고 두었고, 기계적으로 고정자 외경 부분을 하우징으로 지지해주기 때문에 고정자 외경을 이루는 노드들에 대해서 변위 (UX, UY)를 고정시켰다.

전체 모델의 요소 수는 25,000~30,000개 정도로 하였고 공극, 전기자/보상권선 지지층 부분을 조밀하게 나누었다.

계자권선에 흐르는 계자전류가 1,000 A이고, 하나의 계자권선의 단면적이  $108.4E-6 \text{ m}^2$ 이므로 부하로 입력하는 전류밀도는  $9,520,000 \text{ A/m}^2$ 이고, 무부하시 Air-gap에서 1.7 T의 자속밀도를 갖기 위해 몇 번의 해석결과 계자권선은 56 turn으로 결정했다.

표 2. FEM 해석모델 Material properties

구성요소	물성치 항목	Young's modulus E (Pa)	Poisson비	Relative Permeability, $\mu_r$
회전자/고정자		1.50E+11	0.28	표 3. 참조
Shaft(Stainless steel)		1.90E+11	0.305	1
Air		-	-	1
전기자/고정자/계자권선		1.19E+11	0.326	1
전기자/고정자권선 지지층		40E+9	0.25	1
계자권선 지지층		80E+9	0.25	1

표 3. 고정자/회전자 B-H data

H (A/m)	20	25	30	35	40	45
B (Tesla)	0.425	0.64	0.85	1.05	1.18	1.27

	50	60	80	100	200	300	400
	1.35	1.445	1.55	1.6	1.7	1.75	1.8

	600	800	1000	1200	1400	1600	1890
	1.85	1.88	1.895	1.901	1.91	1.915	1.9171

전기자권선과 보상권선에 인가되는 전류는 회로해석 결과에서 기계적으로 가장 큰 부하가 걸리게 되는 시점을 선택, 그 순간에 흐르게 되는 전류값들을 전류밀도로 환산하여 입력했다. 회로해석 결과 그 시점은 스위칭한 이후 0.85 msec가 지난 시점으로 그림 1과 같이 전기자권선과 보상권선이 서로 Pole face 상에서 마주보고 있을 때이다. 이때 전기자권선에는 57 kA, 보상권선에는 54 kA가 흐르고, 이를 전류밀도로 환산하면 각각 약  $76.0E+7 \text{ A/m}^2$ ,  $72.0E+7 \text{ A/m}^2$ 이다.

전기자권선과 보상권선의 전기적 위상차는 회로해석 결과에 따라 90°로 하였다. 보상권선은 계자권선과 보상권선의 자기장 축이 45°의 각도를 이루도록 Pole face 전면에 위치시켜, 실제 부하가 걸려 전기자권선과 보상권선에 전류가 흐를 때라도 그에 의한 반경방향의 자기장의 영향을 최소화 되도록 하였다. 이와 같이 두 권선이 배치되어 있는 경우, 스위칭하는 순간(at t=0) 전기자권선은 Pole과 Pole 사이에 위치하고, 첫번째 최대값이 나오게 되는 순간(at t=0.85 msec)에는 전기자권선과 보상권선이 마주보게 된다. 해석은 스위칭하기 전 계자권선에만 전류가 흐르는 때(at t=0)와 첫번째 최대 전류가 흐르는 순간(at t=0.85 msec), 두 가지 경우에 대해 수행했다.

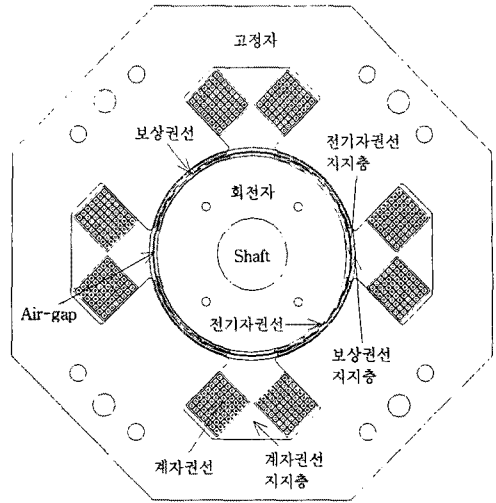


그림 1. FEM 해석모델 (at t=0.85 msec)

## 2.2 해석결과

### 2.2.1 무부하시 해석결과

전기자권선과 보상권선에 전류를 인가하기 이전에, 원하는 전류출력을 얻기 위해서는 무부하 상태에서, 즉 펄스발진기의 부하가 Open되어 있을 때 공극에서 어느 정도의 자속밀도(B)가 형성되어야 하는지를 결정해야 한다. 이는 FEM 해석 이전 단계인 회로해석을 통해 결정하였는데, 회로해석 결과 최대출력전류 57 kA를 얻기 위해서는 공극에서 최대값 약 1.7 T의 자속밀도가 필요하다.

회전체 동역학 해석을 통해 기계적인 관점에서만 Shaft와 회전자의 직경을 정하고, 나머지 구조물에 대해서도 대략적인 치수를 일차적으로 결정해 해석모델을 구성했다. 이렇게 구조물의 치수가 결정되어 있는 상태에서 무부하시 공극에 나타나는 자속밀도에 가장 영향을 미치는 인자는 계자권선의 Excitation MMF로, 이를 결정하기 위해 일차적인 FEM 해석을 통해 계자권선의 Turn 수, 여자전류를 결정해야 한다.

수 차례의 해석결과 일차적으로 Excitation MMF를 56,000 AT (1000 A, 56 turn)으로 결정하였고, 이때의 자기장 분포는 다음 그림 2와 같다.

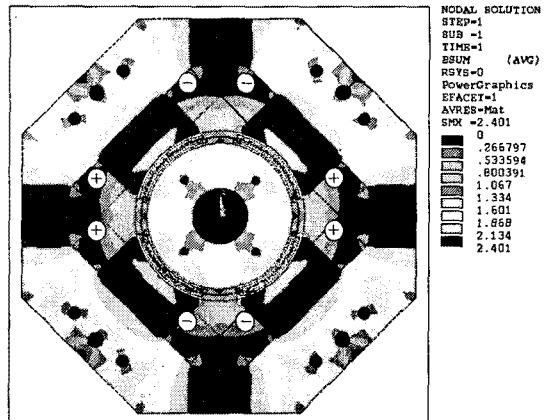


그림 2. 무부하시 (at t=0) 자기장 분포

그림 2에서 대부분의 자장분포는 고정자와 회전자, Air-gap을 따라 형성되고, Air-gap에서의 자속밀도는 약 1.5~1.8 T 정도의 분포가 나타났다. 고정자의 Pole 영역에서 자속밀도 값이 2.406 T로 최대값이 나타났다.

출력 전류는 전기자권선에 유기되는 전압에 의해 결정되는데, 전기자권선에 유기되는 전압은 권선의 길이, 각속도, 자기장에 의해 결정된다. 이중 권선의 길이와 각속도는 제작과 회전체 동역학에도 큰 관련이 있어 조절이 힘든 반면 자기장의 분포는 Excitation MMF, Pole width 조절함으로 비교적 쉽게 변화시킬 수 있다.

이를 위해 그림 2에서와 같은 자기장 분포가 형성되었을 때 공극에서 자기장 분포가 어떤 값을 갖는지 알아보기 위해 그림 3에 전체 공극에서 1/2에 해당하는 부분만 자기장 분포를 나타냈다. 여기서 반경방향의 자기장 성분을 보면 값의 크기는 전체 자기장의 값과 차이가 거의 없고, 최대값도 1.75 T 정도가 나오며 원주방향을 따라 위상이 바뀌는 부분을 제외하고는 대체적으로 삼각함수 분포를 따르고 있다. 공극에서 위 그림과 같이 자기장 분포가 형성된다면 전기자권선에 유기되는 전압은 설계값과 유사하게 나올 것으로 예상된다.

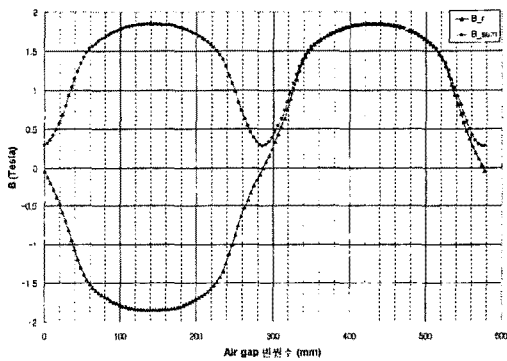


그림 3. Air-gap 원주방향 자기장 분포 (at t=0)

자기저항(Magnetic reluctance)의 관점에서는 자기장의 경로를 형성하는 고정자, 공극, 회전자에서 전체 Excitation MMF 중 대부분이 공극에 인가되고 고정자와 회전자에서는 상대적으로 거의 무시할만한 정도로 인가되는 것이 효율적이다. 고정자와 회전자의 재질이 결정되어 있다면 자기장이 통과하는 경로의 단면적이 자기저항을 좌우한다. 만약 고정자와 회전자에서 단면적을 늘린다면 자기회로의 관점에서는 유리하지만 전체 무게와 비용이 많이 늘어나게 되고, 반대로 줄인다면 자기저항이 늘어나 공극 영역에서 원하는 자속밀도 값을 얻을 수 없게 되거나 Excitation MMF를 높여주어야 한다. 그러므로 적절한 수준에서 고정자와 회전자의 치수를 결정해야 하는데, 고정자의 Width 0.105 m, 회전자에서 자기경로의 Width 0.105 m, Pole width 0.22 m로 하였을 때 그림 2와 같은 자기장 분포를 얻을 수 있었고, 그림 4, 5, 6은 각각 고정자, 회전자, 공극에서 Excitation MMF를 해석한 결과이다.

### 2.2.2 최대전류 인가시(at t=0.85msec) 해석결과

회로해석에서 t=0.85 msec에서 첫번째 최대전류가 나타나는데, 이때가 전자기력에 의한 최대 응력과 외부 고정프레임에 가장 큰 힘이 걸리게 되는 시점이다. 전체 출력 전류 주기에서 이때가 가장 전류값이 높으므로,

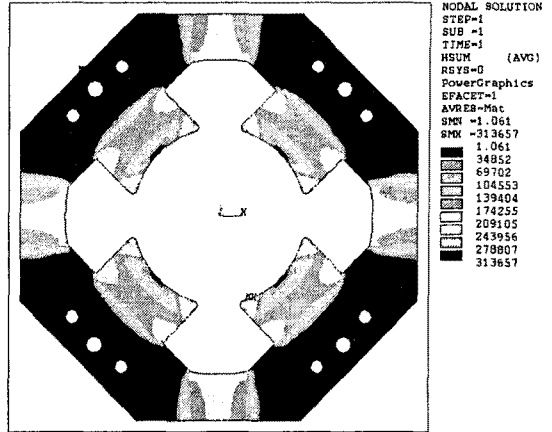


그림 4. 고정자에서 Excitation MMF 분포 (at t=0)

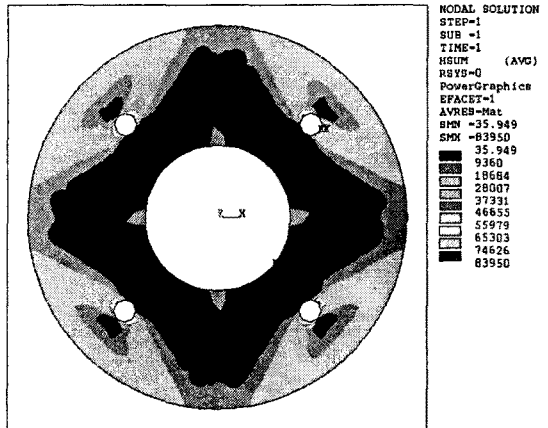


그림 5. 회전자에서 Excitation MMF 분포 (at t=0)

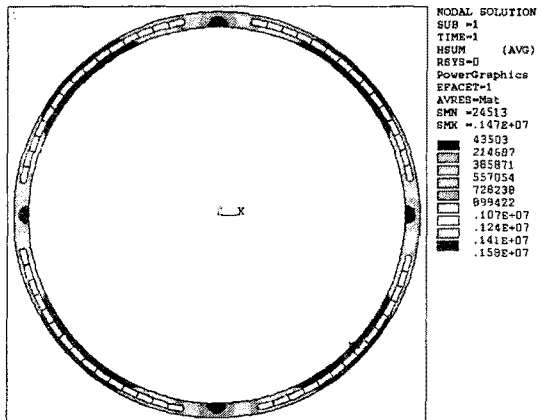


그림 6. 전기자권선 지지층(Air-gap)에서 Excitation MMF 분포 (at t=0)

이때를 기준으로 구성품에 걸리는 Force와 Stress를 충분히 전달 수 있도록 설계한다면 나머지 경우에 대해서도 기기의 견전성을 보장할 수 있을 것이다.

### 2.2.2.1 최대전류 인가시 자기장 분포

다음 그림 7은  $t=0.85$  msec에서 자기장 분포를 나타낸 것이다.

Excitation MMF는 앞에서와 동일하게 56,000 AT으로 고정되어 있고, 전기자권선과 보상권선의 전류는 회로해석 결과로부터 전류밀도로 환산하여 입력하였다. 전기자권선의 경우 한 Turn의 단면적이 약  $75.0E-6 \text{ m}^2$ 이고, 흐르는 최대전류는 57 kA이므로 전류밀도는 약  $76.0E+7 \text{ A/m}^2$ 이다. 보상권선은 동일한 단면적에 전류가 54 kA이므로 전류밀도는 약  $72.0E+7 \text{ A/m}^2$ 이다.

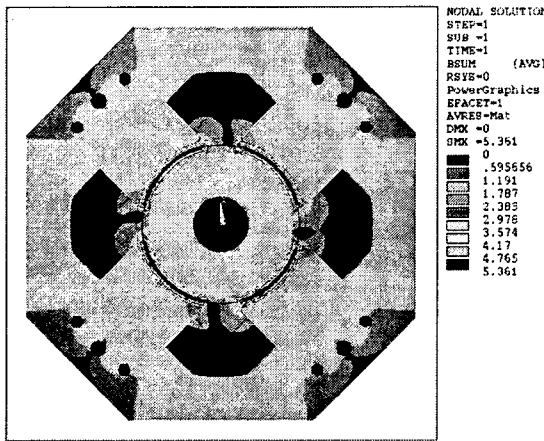


그림 7. 최대전류 인가시(at  $t=0.85\text{msec}$ ) 자기장 분포

그림 7의 자기장 분포에서 서로 마주보면서 반대방향으로 흐르는 전기자권선 전류와 보상권선 전류에 의해 유기된 자기장은 두 권선 사이에 대부분이 갇히게 되어 공극에서 최대 5.27 T의 높은 자속밀도를 나타낸다. 공극 이외의 영역, 즉 고정자나 회전자 영역에서는 자속밀도의 평균값이 약 2.3 T 정도로, 전기자권선과 보상권선에 큰 전류가 흐르는 것을 감안하면 무부하시의 자장 분포와 상대적으로 비교해도 큰 변화가 없다고 할 수 있다. 이는 전기자권선 전류와 반대방향으로 흐르는 보상권선 전류에 의해 차폐가 효과적으로 일어난다고 볼 수 있고, 보상의 효과가 크다고 할 수 있다.

### 2.2.2.2 회전자 외경에서의 Shear stress

펄스발전기의 각 구조물에 미치는 힘은 결국 위의 결과에서 나온 전자기력으로부터 발생한다. 이중 먼저 고속으로 회전하던 회전자가 방전시 전자기력에 의해 받게 되는 역토크로 인한 회전자 외경에서의 전단응력(Shear stress) 분포에 대해 살펴본다. 주지하다시피 회전자의 관성에너지로 저장되어 있던 에너지가 방전시 전기에너지로 전환되어 빠져나가면서 그에 해당하는 만큼의 에너지가 역토크로 회전자에 걸리게 된다. 일반 발전기는 회전자에 있는 권선이 슬롯 내에 위치하기 때문에 역토크에 의한 손상을 상대적으로 고려하지 않아도 되지만, 펄스발전기는 회전자의 표면 위에 권선이 위치하고 Epoxy resin의 접착력으로 고정되어 있기 때문에 방전시의 전단응력이 설계시 중요한 인자가 된다.

그림 8과 9는 전기자권선 지지층과 회전자 원주방향으로 Nodal solution 중 전단응력을 나타낸 것이다. 그림 8은 전기자권선 지지층 전체에 대해 전단응력

분포를 나타내고 있는데, 최대 7.38 MPa 에서부터 -1.41 MPa까지 분포하고 있다. 그림 9는 회전자의 원주, 즉 전기자권선 지지층과의 접착면에서 본 전단응력 분포이다. 전기자권선의 가운데 부분에 해당하는 지점에서 전단응력이 가장 높게 나타나고 양쪽 끝으로 갈수록 그 값이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 극이 위치해 반경방향의 자속밀도가 가장 높은 가운데 부분에서 가장 큰 로렌츠 힘(Lorentz force)이 나타나기 때문이다.

이 해석결과는 회전자의 표면에 전기자권선을 접착시킬 때 탄소섬유와 Epoxy resin을 선정하는데 기본 데이터로 활용할 수 있다.

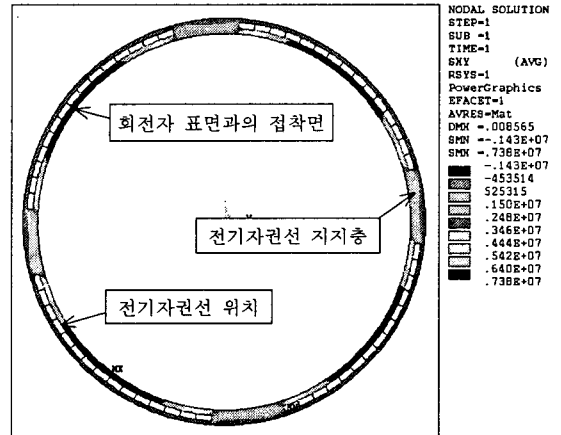


그림 8. 전기자권선 지지층에서의 Shear stress 분포

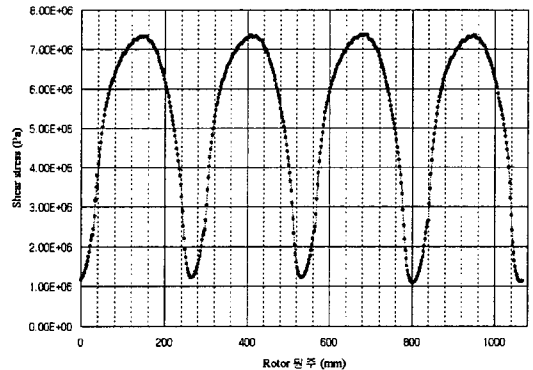


그림 9. 회전자 원주방향(전기자권선 지지층의 안쪽표면) Shear stress 분포

### 2.2.2.3 고정자 원주방향 Force

펄스발전기를 실제 제작함에 있어 고정자를 한 몸체로 제작할 수가 없다. 고정자가 한 몸체로 되어있을 경우 제자권선을 Winding하고 Pole에 위치시키는 것이 어렵기 때문에 고정자를 네 부분으로 나누어 제작한다. 이럴 경우 방전시에 마주보고 있는 전기자권선과 보상권선 사이에 서로 반대방향의 전류가 흐르는 때가 있고 이 두 권선 사이에는 전류의 크기에 따라 매우 큰 척력이 발생하게 되는데, 이 척력을 고정자를 감싸고 있는 Housing에서 지지해주지 못한다면 네 부분으로 된 고정자에서 기기의 손상을 입게 된다. 이 때문에 방전시 전기자권선과 보상권선 사이에서 발생하는 최대 척력을

계산해 외부에서 이를 지지할 수 있는 구조로 만들어야 한다.

두 권선 사이에 최대의 척력이 발생하는 시점은 앞에서 해석한  $t=0.85$  msec 때인데, 이 때가 최대의 전류가 흐르면서 두 권선이 서로 정확하게 마주보고 있기 때문이다. 설계시 이때에 고정자의 외경에서 위·아래 방향으로 걸리게 되는 힘을 구하고, 이 힘을 견딜 수 있도록 외부구조를 설계한다면 다른 경우에 대해서도 기기의 안전성을 보장할 수 있다.

그림 10은 해석모델에서 고정자의 외경을 이루는 Node에서의 반력(Reaction force)을 도식한 것이다. 직교 좌표계에서 두 권선 사이에 발생하는 척력의 분력 중 좌우로 나타나는 힘은 하우징을 이루는 재질 자체의 강도로 충분히 지지해줄 수 있기 때문에 위·아래 방향으로 걸리게 되는 분력만을 나타냈다.

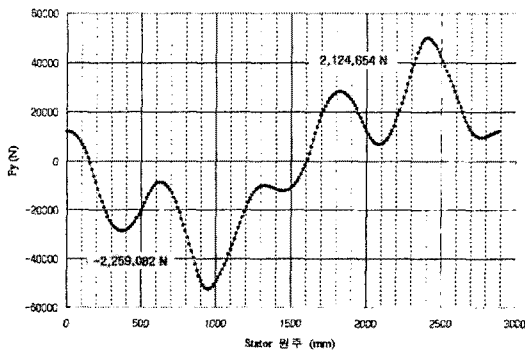


그림 10. 고정자의 원주방향 Fy 분포

위 그림에서 고정자의 위·아래 부분에서 걸리는 힘이 차이가 나는 것은 전기자/보상권선이 모두 15 turn이 아니고 한군데씩은 14 turn이기 때문이다.

### 2.3 시험결과

위 해석결과를 바탕으로 상세 설계를 수행하여 펄스 발전기를 제작하였다. 현재 펄스발전기 전체를 조립하기에 앞서, 회전자와 고정자 각각을 조립하여, 회전자 동역학 및 계자권선에 전류 인가시 공극 영역에 실제 해석한 결과와 유사한 자기장이 형성되는지 확인해 보았다.

현재 단계에서는 아직 각 부분별로 시험을 하고 있는데, 여자시험은 회전자가 없는 상태에서 여자전류 인가시, 보상권선 지지층의 안쪽 표면에 나타나는 자속밀도를 측정하여 이를 해석값과 비교해 보았다. 이것은 펄스 발전기의 무게가 10톤 이상이기 때문에 전체를 조립하기에 앞서 해석을 통해 결정한 Excitation MMF가 공극에서 설계값인 1.7 T의 자속밀도를 형성시킬 수 있을 것인지를 간접적으로 확인할 수 있기 때문이다.

먼저 시험결과와 비교하기 위해, 회전자가 없는 상태에서 여자전류를 인가하여 보상권선 지지층의 안쪽 표면에 형성되는 자기장을 해석하였다. 펄스발전기 본 실험에서는 여자전류 1,000A를 인가할 예정이지만, 여자 시험에서는 안전상의 문제로 100A만 인가하여 측정하였다. 그러나 해석은 100A, 500A, 1,000A 경우에 대해 수행했는데, 100A일 때 해석결과와 시험결과가 유사하게 나올 경우, 1,000A일 때도 해석결과를 신뢰할 수 있다. 그것은 현재의 시스템에서는 1,000A에서도 자기포화(Magnetic saturation)가 발생하지 않으므로 여자전류와 자속밀도는 선형적인 관계를 가지기 때문이다.

그림 11은 1,000A 경우 보상권선 지지층에서 반경 방향의 자기장 해석결과이고, 그림 12는 100A일 때 해석결과와 시험결과를 나타낸 것이다. 시험은 사진 1에서

와 같이 회전자가 없는 상태에서 여자전류로 DC 100A를 인가하고, Transverse type의 Gauss meter Probe(Lakeshore model XMMT-1336)를 이용하여 반경방향의 자기장을 측정하였다.

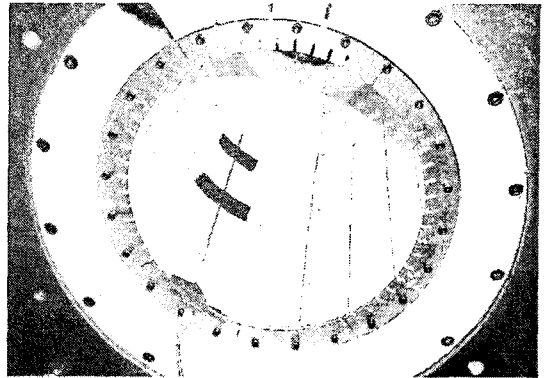


사진 1. 회전자가 없을 때 100A 여자전류 인가시 자기장 측정시험

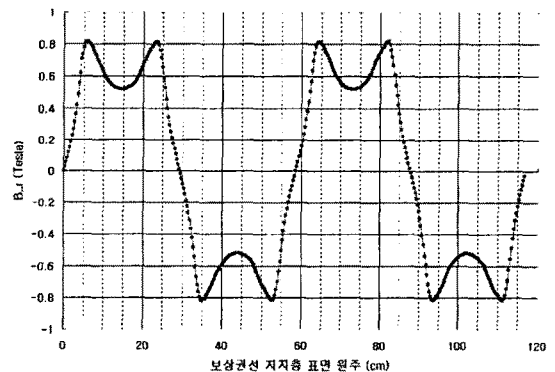


그림 11. 회전자가 없을 때 1,000A 여자전류 인가시 보상권선 지지층 표면에서 자속밀도 해석결과

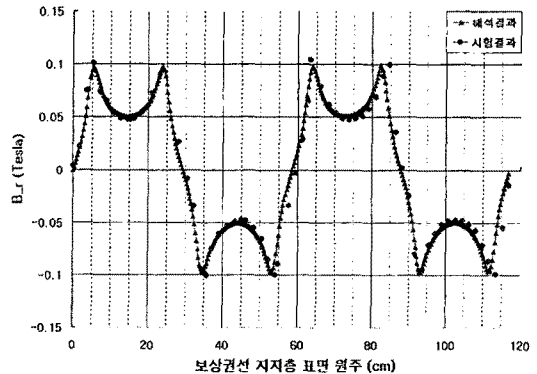


그림 12. 회전자가 없을 때 100A 여자전류 인가시 보상권선 지지층 표면에서 자속밀도 해석 및 시험결과

그림 12의 결과를 살펴보면 해석과 시험결과가 거의 유사하게 나타난다. 이는 지금까지 수행한 해석이 실제로 유효함을 나타내는 것이다.

그림 11, 12에서 보상권선 지지층의 표면 원주방향으로 나타나는 8개의 최대 자속밀도 값들은 고정자에서 4개의 극 양쪽 끝으로 자기장 분포가 집중되기 때문이다. 강자성체인 회전자 설치될 경우, 최대 자속밀도 값은 극의 중간지점에서 나타난다.

또한 그림 11, 12의 해석결과를 비교하면 형성되는 자속밀도 값이 1,000A일 때 100A에 비해 10배가 됨을 확인할 수 있다. 이는 자기포화가 발생하지 않는 영역에서 형성되는 자기장은 여자전류, 즉 Excitation MMF에 비례하기 때문이다.

### 3. 결 론

대전력 펄스 발전기의 상세설계를 위해 2-D 모델을 구성하고, 유한요소 해석을 통해 기초적인 설계 데이터를 구하였다.

현재까지 전자기장 해석을 통해 설계요구치인 공극에서 1.7 T의 자장을 얻기 위한 Excitation MMF와 고정자와 회전자 치수를 결정할 수 있었고, 이 전자기장 해석결과를 이용해 구성품에 미치는 Force, Stress 등을 구하였다.

펄스발전기를 제작하는데 있어 제작상 가장 어려운 부분인 Air-gap winding을 위한 변수로 회전자와 전기자권선 지지층인 탄소섬유와 Epoxy resin의 접착력을 어느 정도 이상으로 할 것인지에 대한 데이터를 해석을 통해 구할 수 있었다. 해석결과 접착면에는 최대 약 7.38 MPa 정도의 전단응력이 걸리는 것으로 나타났고, 이는 전기자권선 지지층을 설계하고 재질을 선정하는데 있어 중요한 인자이다.

또한 방전시 두 권선 사이에서 발생하는 최대 척력, 즉 고정자의 외경에서 지지해주어야 하는 힘은 약  $4.4E+6$  N 정도로 나타났다. 이 힘은 결국 고정자의 외부에 있는 하우징에서 지지해주어야 하며, 이로부터 하우징의 재질, 구조, 체결볼트의 인장강도, 수량 등을 결정하였다.

현재 위 해석에 의한 기본 데이터를 이용해 상세 설계를 수행했고, 펄스발전기 각 부분별로 제작을 완료하였다. 펄스발전기의 전체 조립에 앞서, 해석결과를 검증하기 위해 회전자를 설치하지 않은 상태에서 여자시험을 통해 고정자의 보상권선 지지층 표면에서 반경방향 자기 밀도 분포를 측정하였다. 여자시험은 안전을 고려하여 여자전류 100 A를 인가했을 때 해석결과와 시험결과를 비교하였는데, 그림 12에서 볼 수 있듯이 두 결과는 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 실제 여자전류 1,000 A를 인가했을 때도 해석결과와 일치함을 예상할 수 있다.

향후 펄스발전기 전체 조립을 완료하고, 실제 여자전류와 방전시험을 수행하여 해석결과의 정확성을 확인해야 할 것이다.

### (참 고 문 헌)

[1] W. F. Weldon 외, "Assessment of Potential Research Areas for Improving Rotating Electrical Machines for Pulsed-power Applications", CEM Report, 1979  
 [2] W. L. Bird, Jr. 외, "The Continued Testing and Evaluation of the Engineering Prototype Compulsator and Evaluation of Advanced Compulsator Concepts", CEM Report, 1981  
 [3] S. J. Oh, "Electromagnetics of Inertial Energy Storage System with Fast Electromechanical

Energy Conversion", Ph. D Dissertation, 2000  
 [4] J. F. Eastham 외, "Numerical Analysis Techniques Applied to a Model Iron-cored Compulsator", IEEE Trans. on Mag., vol. 31, No. 1, Jan. 1995  
 [5] M. L. Spann 외, "Rotating Machines-Power Supplies for the Next Generation of EM Accelerators", IEEE Trans. on Mag., vol. 27, No. 1, Jan. 1991  
 [6] 백광현, "물체의 전열-화학 가속 및 펄스 전원으로의 단극발전기에 관한 연구", 공학박사 학위논문, 서울대학교, 2000  
 [7] 정경재, "보상펄스 발전기의 해석, 설계 및 동작특성에 관한 연구", 공학석사 학위 논문, 서울대학교, 1999  
 [8] R. J. Hayes 외, "Pulsed Power Accelerators at CEM-UT"  
 [9] M. L. Spann 외, "Compulsator Research at the University of Texas at Austin-an Overview", IEEE Trans. on Mag., vol. 25, No. 1, Jan. 1989  
 [10] M. A. Plonus, "Applied Electromagnetics", McGraw-Hill, Inc., 1978