

충격파관을 이용한 DISK형 MHD발전기의
엔탈피추출율과 단열효율에 관한 연구

배 철오, 김 윤식, 박 영산, 신 명철
한국해양대학교

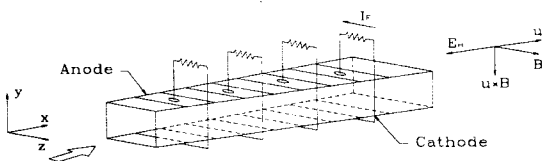
A Study on Enthalpy Extraction Rate and Isentropic Efficiency of
the Disk Type Generator using a Shock Tube

C. O Bae, Y. S Kim, Y. S Park, S. M Shin
Korea Maritime University

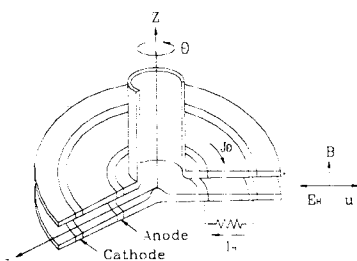
Abstract - The principle of the MHD generation is based on Faraday's law of induction that a electromotive force($u \times B$) is generated when the working gas of velocity u flows a channel in which magnetic field of strength(B) exists. In MHD power generation system, enthalpy of the working gas is converted to electric power directly through expansion in generator channel. It means that electric power can be generated without moving mechanical linkage such as turbine blades. There are two types in the MHD generator; linear type Faraday and disk type hall generator. Disk type hall generator is the main target of this paper. Isentropic efficiency and enthalpy extraction rate of disk type shock tube driven hall generator is discussed here.

1. 서 론

MHD(Magneto-Hydro-Dynamics)발전은 전자기학과 유체역학을 결합한 발전방식이고, 자장과 수직방향에 전기전도성을 가진 작동유체를 흘림으로써, 유체가 가지는 열(엔탈피)을 전력으로 변환하는 것으로⁽¹⁾, 기본적으로는 작동유체가 자장안으로 흐르면 자장과 작동유체의 운동 방향에 수직한 방향으로 기전력이 발생한다고 하는 파라데이의 전자유도법칙을 응용한 분야이다. MHD발전기에는 그림 1.1, 1.2에서 나타난 것처럼 크게 리니어(Faraday)형⁽²⁾과 디스크(Hall)형의 2종류가 있다.



[그림 1.1] 리니어형 파라데이 발전기



[그림 1.2] 디스크형 홀 발전기

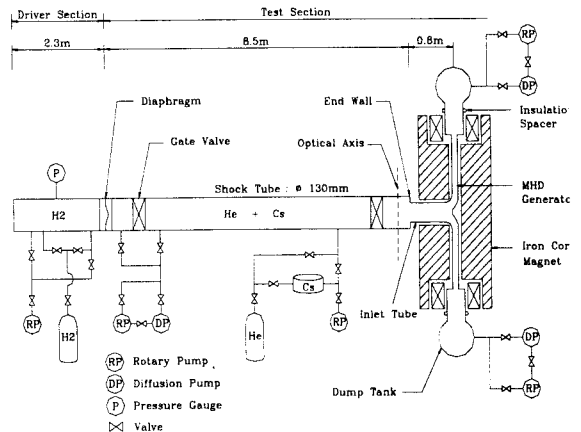
이들 중, 디스크형 발전기는 리니어형 발전기에 비해 현재까지의 출력이나 효율면에서 실험적으로 상당히 앞서고 실제 발전플랜트의 적용가능성 측면에서도 많이 활용되고 있어 본 논문에서도 디스크형을 채택하여 실험

을 행하였다. 작동유체로서는 세슘(Cs)을 시드로 한 헬륨(He)을 사용하였고, 작동유체의 온도를 1800~2000[K] 정도의 높은 온도를 비교적 쉽게 얻기 위해 충격파에 의한 일시적인 단열압축방식인 충격파관을 이용하고 있다.

그리고, 디스크 발전기내에 여러 센서 및 계측장치를 설치하여 발전기내에서 일어나는 여러 현상들을 분석하였고, 특히 본 논문에서는 엔탈피추출율과 단열효율에 영향을 미치는 여러 파라미터들에 관해서 계측을 행하고 분석하였다.

2. 실험장치

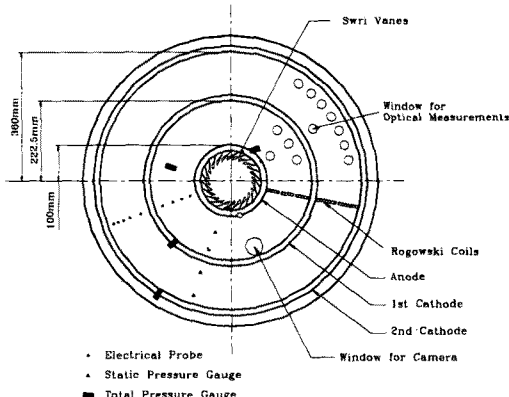
그림 2.1은 본 연구에서 사용한 충격파관 구동 MHD 발전 실험장치를 나타내고 있다. 이 실험장치는 크게 충격파관, Seed 주입장치, 디스크형 MHD 발전기, 수냉철심 상전도자석으로 이루어져 있다.



[그림 2.1] 충격파관 구동실험 장치

충격파관은 길이가 약 10[m]의 스테인레스제이고, 고압부와 저압부는 알루미늄제의 원판으로 차단되어 있다. 저압부는 작동기체로써 세슘(Cs)을 Seed로 한 헬륨(He)을 사용하고, 고압부에는 이동도가 헬륨보다 빠른 수소를 이용했다. 수냉철심 상전도자석은 최대로 약 2.6[T] 정도의 자속밀도를 발생 할 수 있다.

그림 2.2에 발전기 입구에 24개의 Swirl Vane⁽³⁾을 설치한 디스크의 내부 정면도를 나타내었다. 디스크에는 3개의 전극이 동심원상으로 설치되어 있고, 중심으로부터 Anode(A), 제1 Cathode(C), 제2 Cathode(C) 순으로 되어 있다. 본 연구에서는 Anode와 제1 Cathode(C) 사이에 외부부하를 접속하여 발전을 행하였다. 발전기의 원주방향으로 흐르는 파라데이 전류는 대전류에서도 포화되지 않도록 공심형 Rogowski coil⁽⁴⁾에 의해 측정되었다. 그밖에도 발전기 내벽에는 여러 센서를 부착하여 내부에서 일어나는 현상들을 측정하도록 되어있다.



[그림 2.2] 디스크형 발전기의 내부 정면도

3. 실험조건

본 실험의 전반적인 실험조건을 표 3.1에 나타낸다.

[표 3.1] 실험조건

Working gas	He + Cs
Stagnation temperature	2100 [K]
Stagnation pressure	1.7 [atm]
Seed fraction	0.3 ~ 5 [$\times 10^{-4}$]
Thermal input	1.08 [MW]
Load resistance	1.0 ~ 7.0 [Ω]
Magnetic flux density	0.91 ~ 2.55 [T]

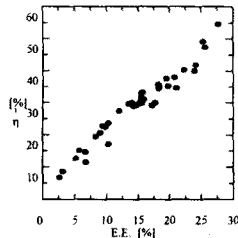
4. 실험결과

4.1 엔탈피 추출율과 단열효율과의 관계

아래 식에서 보는 바와 같이 MHD발전기의 단열효율은 엔탈피 추출율과 출구/입구의 압력비의 함수로서 표현된다.

$$\eta_i = \frac{E_e E}{1 - \left(\frac{P_{Out}}{P_{In}} \right)^{\frac{r-1}{r}}}$$

여기서 P_o 는 total압력을, 첨자 out, in은 발전기의 입구와 출구를, γ 는 작동기체의 비열비를 나타낸다.

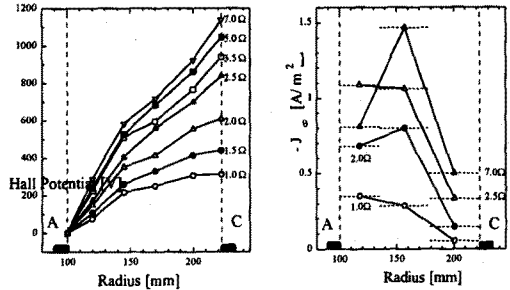


[그림 4.1] 엔탈피 추출율과 단열효율과의 관계

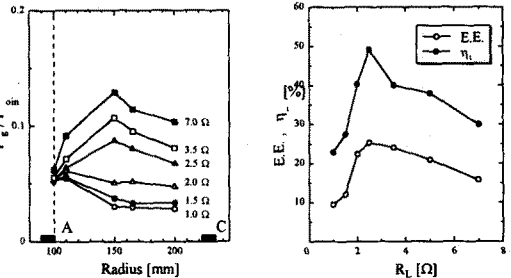
따라서, 단열효율을 높이기 위해서는 높은 엔탈피 추출율을 유지하고 P_{Out} / P_{In} 의 값을 크게 즉, 출구에서의 총압력의 저하를 억제할 필요가 있다. 그림 4.1에서는 엔탈피 추출율과 단열효율에 관한 그래프를 나타내고 있다. 엔탈피 추출율이 증가할수록 단열효율 또한 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 이 실험에서 최대 단열효율은 54.6[%]가 얻어졌다.

4.1 부하저항의 영향

외부 부하저항을 1.0 ~ 7.0[Ω]으로 변화시켜, 부하저항이 발전성능에 미치는 영향을 조사하였다. 여기서 다른 실험조건은 일정하게 하였다. 부하저항의 변화에 따른 Hall 전위분포의 관계를 그림 4.2에 나타내었다. 부하저항이 클수록 발생하는 Hall 전압도 점점 증가함을 알 수 있다. 그런데 발전기 중류부분 이후 Hall 전계강도가 약간 감소하는 것이 나타나 있는데, 이는 중류영역 이후에서 유속 및 자속밀도의 감소에 의해 Hall 기전력이 저하함으로써 일어난다고 생각된다.



[그림 4.2] Hall 전위분포 [그림 4.3] 파라데이 전류밀도



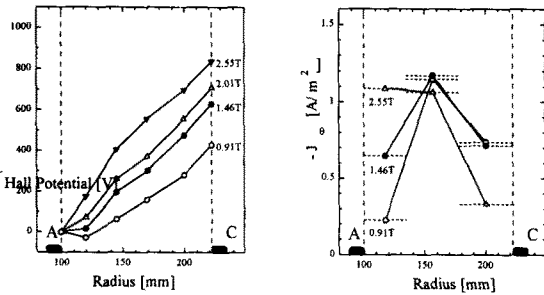
[그림 4.4] 정압분포 [그림 4.5] E.E와 η_i 의 분포

한편, 그림 4.3은 파라데이 전류밀도를 나타내며, 어떠한 부하저항 값에서도 발전기 하류부분에서는 파라데이 전류밀도가 작게 되고, 7.0[Ω]의 경우 상류부분에서의 파라데이 전류밀도가 2.5[Ω]의 경우보다 작게 됨을 볼 수 있다. 이것은 발전기 입구부분에서 큰 파라데이 전류가 흘러 유속의 감속이 심해지고, 곧바로 파라데이 전류가 감소하기 때문이라고 생각한다. 그림 4.4에서는 부하저항이 높게 되면 정압상승이 크게 된다는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 4.3에서 알 수 있듯이 부하저항이 높게 되면 파라데이 전류밀도가 증가하고, 작동기체의 흐름방향과 반대로 작용하는 로렌츠의 힘($j \times B$)이 크게 되어 브레이크 작용을 하기 때문이다. 그림 4.5에 부하저항의 변화에 따른 엔탈피 추출율(E.E)과 단열효율(η_i)의 관계를 나타내었다. 본 실험조건에서는 부하저항이 2.5[Ω]일 때 엔탈피 추출율 및 단열효율이 최대로 된다는 것을 확인하였다. 이러한 사실로 엔탈피 추출율 및 단열효율이 최대로 되는 최적의 저항값이 존재함을 알 수 있다.

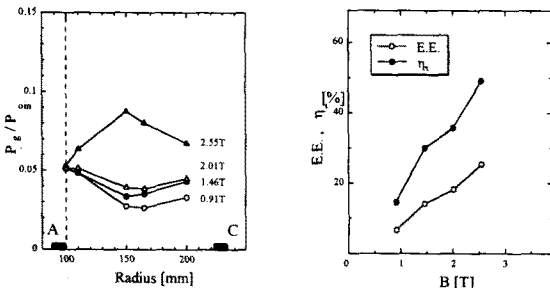
4.2 자속밀도의 영향

자속밀도를 0.91, 1.46, 2.0, 2.55[T]로 변화시켜, 자속밀도가 발전성능에 미치는 영향을 조사하였다. 여기서 다른 실험조건은 일정하게 하였다. 자속밀도의 변화에 따른 Hall 전위분포의 관계를 그림 4.6에 나타내었다. 자속밀도가 커짐에 따라 Hall 전위분포가 높게 나타남을 알 수 있다. 그런데 자속밀도가 0.91[T]시에 발전기 입구부분에서 부(-)의 전압이 나타나고 있는데, 이는 정계점 온도 및 자속밀도가 낮을 때 나타나는 것으로, 초음속 노즐 안에서 불충분한 이온화에 의해 발생된다고 생각된다. 그림 4.7에 자속밀도변화에 따른 파라데이 전류와의

관계를 나타내었다. 자속밀도가 저하하면 상류부에서 전기전도도가 저하하여 파라데이 전류가 적게 되는 것을 알 수 있다. 한편 자속밀도가 낮을 때 발전기 하류부에서의 전류밀도가 크게 되지만, 발전기내에 흐르는 파라데이 전류의 합은 자속밀도의 변화에 대응하여 변화하지 않고 있다. 그림 4.8에는 자속밀도와 정압과의 관계를 나타내고 있다. 자속밀도가 크게 됨에 따라 정압이 상승하고 있는데, 이것은 그림 4.7에서 알 수 있듯이 자속밀도가 클 경우에 발전기 상류부에서 파라데이 전류밀도가 크게 되어 로렌츠의 힘이 강하게 나타나기 때문이다. 그림 4.9에 자속밀도에 대한 엔탈피 추출율과 단열효율을 나타낸다. 자속밀도를 높게 함에 따라 엔탈피 추출 및 단열효율 모두가 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러므로 자속밀도를 크게 할수록 발전기의 성능은 향상될 수 있음을 알 수 있다.



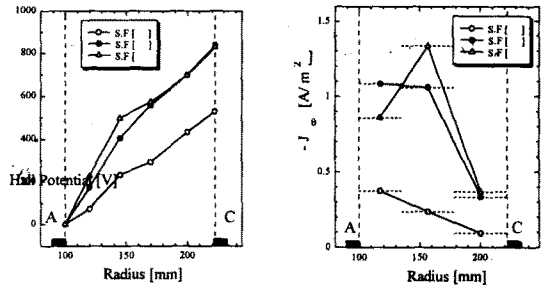
[그림 4.6] Hall 전위분포 [그림 4.7] 파라데이 전류밀도



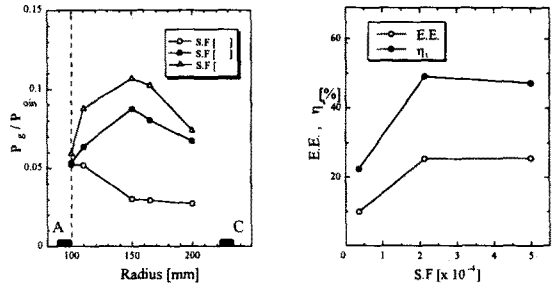
[그림 4.8] 정압분포 [그림 4.9] E.E와 η_1 의 분포

4.3 Seed들의 영향

자속밀도를 2.55[T], 부하저항을 2.5[Ω]로 유지하고 seed율을 0.3~5[$\times 10^{-4}$] 사이에서 대, 중, 소로 나누어 변화시켜, seed율이 발전 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 4.10에 seed율 변화에 따른 Hall 전위분포를 나타내었다. 발전기 상류부에서는 seed율을 높이는 것이 전위가 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 발전기 하류부에서는 seed율 [중]이상을 주입해도 Hall 전위분포는 거의 변화가 없었다. 그림 4.11에 seed율 변화에 따른 파라데이 전류밀도를 나타내었다. seed율을 높이는 편이 파라데이 전류밀도가 증가함을 알 수 있고, seed율 [대]는 발전기 입구부에서 seed율 [중]보다 전류밀도가 작지만 중반이후에는 더 증가하여, 결과적으로는 seed율 [중]과 seed율 [대]의 전체적인 전류의 합은 거의 같은 것을 알 수 있다. 그림 4.12에 seed율 변화에 따른 정압분포를 나타내었다. seed율을 높임에 따라 파라데이 전류밀도의 증가에 따른 로렌츠 힘의 증가로 정압 또한 상승하고 있음을 알 수 있다. 그림 4.13에 seed율 변화에 따른 엔탈피 추출율과 단열효율을 나타내었다. seed율 [중]이하에서는 엔탈피 추출 및 단열효율이 급격한 감소를 보이고, seed율 [중] 부근에서 최대가 되며, 그 이상에서는 완만한 감소를 보임을 알 수 있다. 따라서 seed율은 [중] 이상으로 유지하는 것이 발전 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.



[그림 4.10] Hall 전위분포 [그림 4.11] 파라데이 전류밀도



[그림 4.12] 정압분포 [그림 4.13] E.E와 η_1 의 분포

3. 결론

충격파관을 이용한 디스크형 MHD발전기 실험에서, 부하저항, 자속밀도, seed율의 운전조건을 각각 변화시켰을 때, 엔탈피 추출율과 단열효율에 주는 영향에 관하여 아래의 것들을 알게 되었다.

- 엔탈피 추출율 및 단열효율이 최대가 되는 외부 부하저항이 존재한다. 부하저항을 크게 할수록 Hall 전계분포는 높아지지만, 파라데이 전류밀도의 증가와 함께 로렌츠의 힘이 커지므로 작동기체는 감속되어 효율은 부하저항에 크기에 비례하지 않고, 최대가 되는 부하저항이 존재함을 알게 되었다.
- 자속밀도를 증가시키면 엔탈피 추출 및 단열효율은 비례적으로 증가하므로, 더 강한 자속밀도는 더 높은 효율을 향상시키기 위해서 필수적임을 알 수 있다.
- seed율 [중](2~3[$\times 10^{-4}$])을 기준으로 seed율이 감소되었을 때에는 엔탈피 추출 및 단열효율의 감소가 급감하나, 그 이상이 되었을 때에는 완만한 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 seed는 [중]에서부터 그 이상의 양이 정량적으로 발전기내에 주입될 수 있도록 하는 것이 발전기 효율을 향상시킬 수 있다.

[참고 문헌]

- R.J Rosa "Magnetohydrodynamic Energy Conversion" McGraw-Hill, 1968.
- A. Veeckind, et al., "High Power Density Experiments in a Shock-Tunnel MHD Generator," AIAA Journal, Vol. 14, No.8, pp.1118-1122, 1976.
- Hruby, V.J., "Experimental Investigation of the MHD Disk Generator with Inlet Swirl M.S. / Engineer Thesis, M.I.T. press, February, 1976.
- T. Okamura, et al., "measurement of Faraday Current in Disk Generator," Proc. of 16th Symp. of Efficient Use of Energy and Direct Electrical Power Generation, 1994