

# MHD 發電技術

崔 壽 鉉

(韓國動力資源研究所 에너지節約技術센터長)

## ■ 차 례 ■

- 1. 머릿말
  - 2. MHD發電의 원리
    - 2.1 발전의 원리
    - 2.2 MHD 발전기 형태
  - 3. MHD 발전시스템구성 및 특성
    - 3.1 발전시스템 종류
    - 3.2 MHD-증기터어빈 복합발전시스템
    - 3.3 MHD 발전특성
  - 4. 외국의 기술개발동향
  - 5. 맺는 말
- 참고문헌

### 1] 머릿말

증기터어빈을 사용하는 기존의 화력발전은 효율이 현재 40%에 이르고 있으며 기술적으로 42%정도가 효율향상의 한계점인 것으로 판단되고 있다.

이러한 한계속에서 석탄과 같은 화석연료를 사용하면서 발전효율 50% 이상의 혁신적인 발전기술의 개발이 선진외국에서 적극 추진되어 왔으며 이러한 고효율의 발전기술은 전력부문에서의 대규모 에너지절약을 가능하게 한다는 점에서 관심을 얻고 있다.

이와 관련되어 여러가지의 기술개발이 시도되었으나 현재로서 가장 실용화단계에 접근된 기술로는 연료전지발전기술과 MHD (Magneto-hydrodynamic) 발전기술을 들 수 있으며 이들은 FBR을 주축으로 한 원자력발전과 함께 핵융합에 의한 에너지문제 해결시까지 경쟁적으로 계통에 투입될 것으로 전망된다.

여기서는 MHD 발전기술에 대하여 간략히 살펴보기로 한다. 電磁流体發電이라고 불리우는

MHD 발전기술에 대한 연구는 1930년대 후반부터 미국에서 수행되었으나 초기에는 작동유체의 저조한 전기전도성 때문에 실패하였다.

1960년대 초기에 고온의 연소가스에 알카리 금속을 첨가시켜 전기전도도를 대폭 향상시키면서 실용화를 위한 연구가 미국, 일본, 소련에서 본격적으로 수행되기 시작하였다.

특히 고온의 연소가스를 이용하는 MHD 발전기술은 배출가스의 열로 증기터어빈 발전이 가능하며 이러한 경우 약30%정도의 발전연료를 절약할 수 있으며 계통투입에 있어서는 기본부하용 내지는 중간부하용으로 이용이 될 것으로 전망되는 우수한 기술로서 평가되고 있다.

소규모 출력으로는 이미 계통선에 연결되어 시험되고 있으나 상업용 대용량 발전소는 2000년대 초기에 실용화 될 수 있을 것으로 전망되고 있다.

### 2] MHD發電의 원리

#### 2.1 발전의 기본원리

전기를 통할 수 있는 도체가 磁場속에서 움직

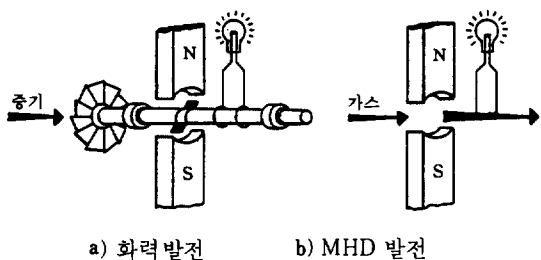


그림 1. MHD발전원리의 개념 비교

직이면 기전력이 발생하고 전류가 흐르게 되는 것이 수력발전이나 화력발전과 같은 기존 발전 기술의 기본개념이다.

여기서 살펴보려는 새로운 발전기술인 MHD 발전방식 역시 똑같은 기본원리를 이용한다. 단지, 그림 1에서 개념적으로 비교된 바와 같이 기존의 발전방식은 터빈날개에 의해 회전되는 금속도체의 회전운동으로 발전되는 반면에 MHD 발전방식은 움직이는 전기전도체로써 이온화된 가스나 유체금속(liquid metal)과 같은 전기가 통하는 유체를 이용한다.

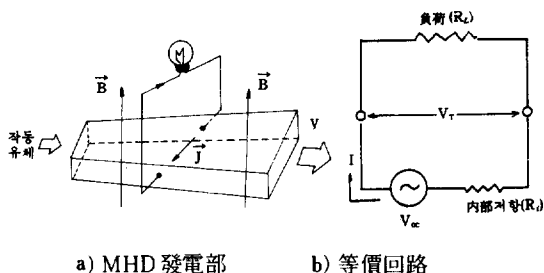
○ 이온화된 가스(Ionized gas)

완전히 이온화된 가스를 플라즈마라고 하나 대부분 석탄연소가스등 부분적으로 이온화된 가스를 사용. 따라서 전기전도성을 높이기 위하여 포타슘(K)과 같은 알카리금속을 첨가하여 사용함.

○ 유체금속(Liquid metal)

수은, 동합금등이 사용되며 알곤, 헬륨과 같은 가스와 혼합하여 사용함.

MHD 발전기의 원리적 구성을 좀 더 자세히



a) MHD發電部      b) 等價回路

그림 2. MHD 발전기의 원리적 구성

살펴보면 그림 2와 같다. 즉, 전자석에 의해 형성되는 강력한 磁場이 걸려있는 도관 속으로 전기전도성을 갖는 유체가 통과하도록 한다. 그림 2에서 도관의 상하부분은 전기적 절연체(Insulator)로 되어 있으며 좌우부분은 전극(Electrode)으로 구성되어 유체의 흐름에 의해 전기가 발생되며 발전된 전류는 전극을 통하여 외부의 부하로 공급된다.

이 때의 電力은 直流이며 電流量은 일반화된 Ohm의 법칙에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \frac{w\tau}{B}(\vec{J} \times \vec{B})$$

여기서,

- $\vec{J}$  = 전류밀도,       $\sigma$  = 전기전도도
- $\vec{E}$  = 전장(電場),       $\vec{v}$  = 유체속도
- $\vec{B}$  = 磁束밀도,       $w\tau$  = Hall 계수

위의 Ohm의 법칙에서 알 수 있듯이 동일한 磁場에서의 MHD발전의 출력특성은 유체가 갖는 전기전도도와 유체의 운동속도에 주로 관계된다.

따라서 MHD발전특성을 이해하기 위하여는 발전기 내부에서의 작동유체의 유체역학적 성질과 전자기학적 성질을 규정하는 電磁流體力學(Magnetohydrodynamics)의 해석을 하여야 한다.

즉, MHD 발전특성의 정확한 해석은 일반 유체역학적 고찰과는 달리 운동량보존에서 전류와 자장에 의해 형성되는 Lorentz 힘( $\vec{J} \times \vec{B}$ )이라고 불리는 전자기적인 힘을 추가로 고려하여야 하며 또한 에너지보존에서는 전류흐름에 의한 에너지손실을 고려하여야 한다. 이러한 것들을 고려한 작동유체의 질량보존, 운동량보존 및 에너지보존 관계식들에 대한 해석은 물론이러니와 이와함께 전류를 정의하는 Ohm의 법칙 그리고 전장과 자장을 설명하는 Maxwell 방정식에 대한 해석을 동시에 수행하여야 MHD 발전특성을 정확히 이해할 수 있게된다.

2.2 MHD발전기 형태

MHD 발전시스템의 여러구성요소들 중에서

직접 발전이 이루어지는 발전기는 가장 핵심요소로서 여러가지 형태로 설계되어 시험되고 있다. 즉, 앞의 그림2에서 보여진 모양의 선형(線型)발전기, 축방향 磁場에서 작동유체가 원통속에서 회전하면서 발전하는 Vortex형 발전기를 포함한 여러형태가 고안되고 있으나 기본 부하용 대규모 발전소를 위하여 개발되고 있는 형태는 선형발전기이다.

선형발전기는 전극의 형태와 부하로의 전력 공급방식에 따라 그림3에 보여진 바와 같이 다시 네가지 형태가 개발되고 있으며 각 형태에 따라 전기적효율과 출력특성이 다르다. 즉, 분리전극형은 발전성능이 좋으나 수많은 전극 때문에 출력제어가 복잡한 단점이 있으며 Hall형은 출력제어가 간편한 반면에 효율이 낮은 단점이 있다. 따라서 이들의 장단점이 보완된 Diagonal형이 가장 활발히 개발되고 있다.

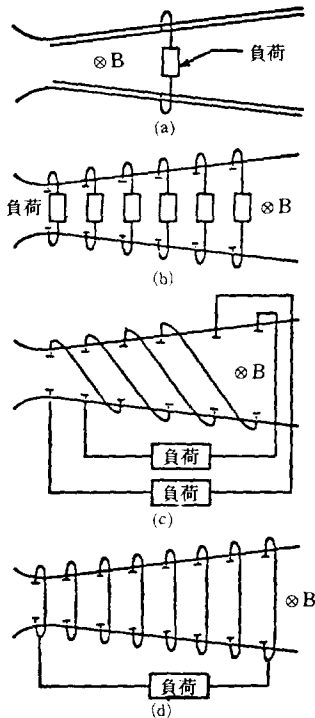


그림 3. 線型 MHD發電機 : (a)連續電極型 (b)分離電極型 (c)Diagonal型 (d)Hall型

### ③ MHD 발전시스템구성 및 특성

#### 3.1 발전시스템 종류

##### (가) Open cycle MHD 발전시스템

MHD 발전소의 실용화 건설을 위한 기술개발이 가장 많이 이루어진 시스템으로서 발전용 연료로는 석탄, 석유 및 천연가스와 같은 화석연료가 사용된다.

사용된 화석연료의 연소열을 이용한 고온의 연소가스에 전기전도도를 증가시키기 위하여 K, Cs와 같은 알칼리금속을 첨가시켜(seeding) MHD 발전기로 주입하면서 전력을 생산한다.

MHD발전기에서 발전후 배출되는 고온의 가스는 그림4에서 설명된 바와 같이 기존의 화력 발전소로 보내져 증기터빈을 돌리기 위한 열원으로 다시 사용된다. 따라서 연료의 종합이용 효율을 대폭 증가시킬 수 있으며 경제적인 복합 발전시스템으로 이용이 기대되는 시스템이다.

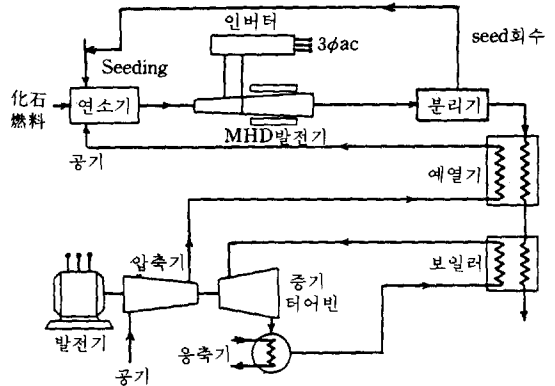


그림 4. Open cycle MHD 發電시스템 개념도

##### (나) Closed cycle MHD 발전시스템

전기전도성을 갖는 작동유체가 순환되는 개념으로서 전도성이 높으나 가격면에서 비싼 액체금속을 사용할 때 적용된다.

주로 원자력발전에서의 반응열을 이용하여 열교환기를 통하여 액체금속을 가열시킨 후 Ar, He와 같은 불활성가스와 혼합시키며 이때 혼합된 가스는 팽창되면서 MHD발전기로 주입되도록 설계된다.

최근에는 액체금속을 가열시키는 열원으로서

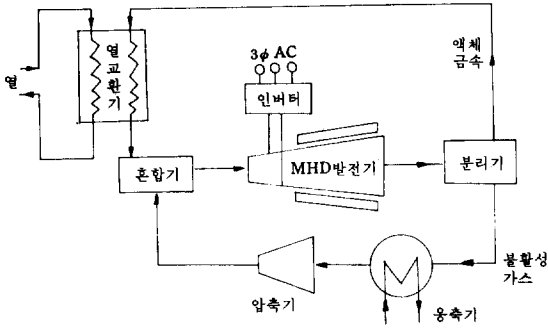


그림 5. Closed cycle MHD발전시스템 개념도  
태양열을 이용하는 기술이 미국, 이스라엘에서 개발되고 있다.

### 3.2. MHD-증기터어빈 복합발전시스템

대규모 발전용량의 MHD 발전기술 실용화에 가장 유망시되고 있는 개념으로서 石炭과 같은 화석연료를 사용하며 앞에서 설명된 Open cycle 발전방식이 적용된다.

증기터어빈을 사용하는 기존 화력발전기술과 복합시킨 발전소의 구성은 그림 6 과 같다. 여기서 기존 화력발전소의 구성요소를 제외한 MHD 발전시스템은 아래와 같은 주요 구성요소들을 포함한다.

- 연소기(Combuster)
- MHD발전기(MHD generator)
- 전자석(Magnet)
- 전력변환설비-인버터, 전압조정, 회로보

호장치등.

- 공기가열기(Air preheater)
- Seed 회수 및 재생기
- 기타 부속기기

#### (가) 연소기

석탄, 석유, 천연가스등이 모두 연료로 사용 가능하나 현재의 개발추세는 석탄연소 방식이 가장 우수하다. 공기를 미리 가열시켜 이용하므로서 2500~3000°K의 고온의 연소온도를 얻은 후 연소가스의 전기전도도를 향상시키기 위하여 미량(1%정도)의 알칼리금속(K, Cs)을 첨가시킨다.

#### (나) MHD 발전기

연소기에서 얻어진 고온의 전기전도성 가스를 적정의 속도로 주입시키기 위한 노즐, 실제 전기가 발전되는 MHD 발전부와 MHD 발전부를 통과한 고온 가스의 열을 증기터어빈발전기에 이용할 수 있기 위한 적정의 온도 및 압력조건을 형성하게 하는 Diffuser로 구성된다.

특히 MHD 발전부에서의 전극(Electrode)과 절연체(Insulator)는 MHD 발전기술의 실용화를 위한 가장 핵심적인 요소로서 전극은 전기전도도가 우수하면서 고온에서 유지되어야 하며 절연체는 완전히 절연되어야 한다.

#### (다) 전자석

대형 상업발전의 실용화를 위하여는 5~6 Tesla 정도의 강한 자장을 형성시킬 수 있어야 하며 현재 실험용으로는 일반자석이 사용되고

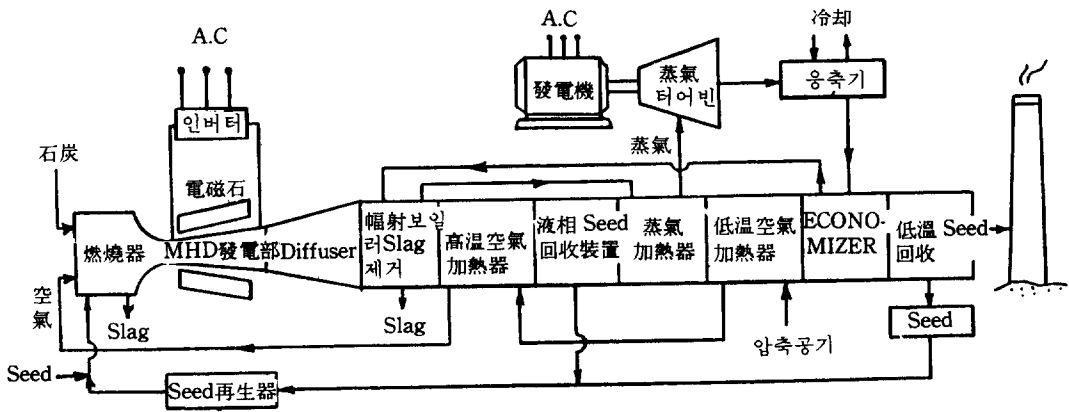


그림 6. MHD-증기터어빈 복합발전소 구성

있으나 경제성 향상을 위하여 초전도자석이 이용될 전망이다.

(라) 전력변환설비

MHD발전은 직류발전이므로 이를 교류로 변환시키기 위한 인버터, 전압 및 위상조정설비, 주파수제어 및 출력안정화를 위한 설비 그리고 전자석을 포함한 자체설비에의 전력공급장치등으로 구성된다.

(마) 공기가열기

산화제인 공기를 미리 가열시키는 장치로서 MHD 발전후의 열을 이용하여 가열시키는 기술이 주로 사용된다.

(바) Seed 회수 및 재생기

전기전도성이 낮은 연소가스의 전도도를 높이기 위하여 첨가된(Seeding) 알카리금속은 가격이 비싸기 때문에 발전후에 혼합가스로부터 분리회수하여 재사용하도록 설계된다.

3.3 MHD 발전특성

MHD 발전은 발전효율면에서 제한받고 있는 현재의 화력발전을 대체할 새로운 발전기술로 개발되고 있으며 연료전지발전 및 FBR을 주축으로 한 원자력발전과 경쟁될 것으로 전망된다.

(가) 효율특성

기존 화력발전의 효율은 42%선에서 기술적 한계를 갖고 있는 반면 MHD발전은 직접발전방식으로서 50~60%의 전환효율이 가능한 것으로 평가된다.

현재기술로서는 증기터어빈과 복합할 때 50%

효율이 가능하며 경쟁대상은 연료전지발전의 경우 현재 40%선이며 용융탄산염 연료전지기술이 개발될 경우 45~50%의 효율이 가능할 것으로 전망된다.

(나) 운전특성

MHD-증기터어빈 복합발전에서의 출력제어는 MHD부분과 증기터어빈부분을 동시에 수행하는 것이 통상 개념이나 MHD 발전부는 기존 발전방식에 비하여 빠른 부하응답성을 갖는다.

따라서 MHD 발전이 계통에 투입될 때에는 고효율특성으로서 기본부하용에 주로 적용될 것으로 전망되나 빠른 부하응답성에 의한 부하추종 능력으로 중간부하용으로의 운전도 가능하다.

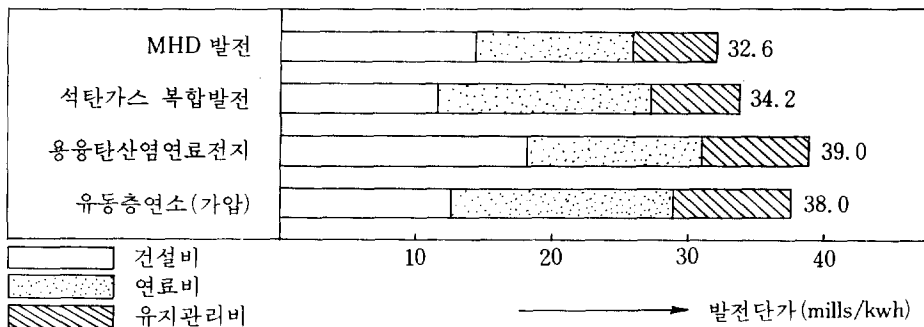
(다) 경제성

아직 상용화되지 않은 MHD 발전기술의 경제성을 판단하기에는 어려운 점이 있으나 단편적으로 비교된 발전단가는 표 1에 비교된 바와 같이 다른 기술에 비하여 다소 우세한 것으로 평가되고 있다.

(라) 환경특성

석탄과 같은 화석연료를 사용하는 MHD 발전은 일반화력발전에 비하여 상당한 고온에서 운전되며 Seed 물질인 알카리금속이 유황분 제거에 기여하기 때문에 대기오염문제는 쉽게 제어될 수 있는 것으로 분석된다. MHD 발전소에서의 환경공해문제를 시험하기 위하여 일본에 15 MW급의 발전설비가 운전되고 있으며 상당히 좋은 결과를 얻고 있는 것으로 보고되고 있다.

표 1. 석탄연료발전기술의 발전단가 비교



자료) Modern Power Systems (1982. 6.)

#### 4 외국의 기술개발동향

##### (가) 미국

1959년 AVCO社에서 출력 11.5KW의 MHD 발전성공이래 선도적 역할을 담당하고 있으며 소련의 천연가스 연소방식과 달리 석탄연소방식에 주력하고 있다.

본격적인 개발은 1975년 EPRI에서 기술개발 계획을 확정하여 에너지성(DOE) 주도하에 수행되었으며 기초연구는 대학에서, 내구성 향상을 위한 재료개발은 일반기업체 및 대학에서, 구성품들의 평가 및 시스템 종합실험은 주로 AVCO社 및 테네시대학 우주연구소의 설비를 이용하여 수행하고 있다.

현재로서는 주로 상용화를 위한 고온작동용 전극재료의 개발 및 장시간 운전시험에 중점을 두고 있으며 석탄연소 MHD-증기터어빈 복합발전시스템 성능시험을 위한 열입력 250MW급의 발전설비가 운전되고 있다.

이외에도 액체금속을 이용한 발전설비의 개발을 위한 연구가 알콘연구소를 중심으로 수행된 바 있다.

##### (나) 일본

일본에서의 MHD 발전기술연구는 세계적인 연구추세에서 초기단계부터 시작되었으며 전자기술종합연구소, 대학 및 기업체가 주축이 되었다.

특히 1966년 통산성 공업기술원의 7개년 장기개발계획이 수립되면서 중유를 연료로 사용하는 MHD 발전기술 실용화에 주력하였다.

이와같은 1단계 장기개발에서의 연구결과를 기초로 1976년부터는 Moonlight계획하에서 각 구성요소의 내구성향상에 의한 장시간 운전을 주 목표로한 기술개발이 수행되었다. 2단계 개발에서는 주로 MarkⅦ을 대상으로 출력100KW 규모에서 200시간 연속운전을 목표로 시험되었다.

##### (다) 소련

주로 천연가스를 연료로 하는 MHD 발전시스템 개발에 주력하였으며 60년대 초반부터 고온연구소를 중심으로 개발하고 있다.

미국의 각 구성요소별 개발개념과는 달리 초

기부터 전시스템을 대상으로 보완개발하고 있다. 즉, 1971년에 MHD발전 출력 20MW, 증기터어빈 출력 50MW의 MHD-증기복합발전소를 건설하여 전력계통에 연결하여 실험하고 있다.

현재는 석탄연소방식을 90년대 초반에 실용화시킬 것을 목표로 MHD 출력 200MW, 증기 출력 300MW의 복합발전소가 건설되고 있다.

이외에도 인도가 소규모 MHD발전설비를 건설하여 실험하고 있으며 중공, 호주, 이태리, 화란, 프랑스등 여러국가에서 기술개발을 적극 추진하고 있다.

#### 5 맺는말

전력은 우리생활에서의 필수요소로서 그 수요가 지속적으로 증가되고 있는 반면에 기존 화력발전기술은 기술적으로 효율향상에 한계가 있기 때문에 고효율의 새로운 발전기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.

여기서는 대체발전기술로서 선진국에서 적극 개발되고 있는 MHD 발전기술에 대하여 살펴보았다.

국내에서의 본격적인 연구는 전무한 상태이나 기초연구를 통한 기술축적이 절실히 요구되는 분야이며 선진국에서의 기술개발 동향을 계속 추적분석할 필요가 있겠다.

#### 참고문헌

- 1) R. Rosa, Magnetohydrodynamic Energy Conversion, McGraw-Hill, New York (1968)
- 2) W. D. Jackson, et al, Development of a Baseline Design for an Open Cycle MHD Power Plant for Commercial Service, Proc. 15th Symposium on Engineering Aspects of MHD, Philadelphia (1976)
- 3) W. D. Jackson, E. Levi, Magnetohydrodynamic Power Generation, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, p. 2022 (1979)
- 4) H. K. Messerle, Coal Fired MHD Electric Power Generation, J. Electrical and Electronic

- Engr., Australia, Vol. 3, p.188 (1983)
- 5) MHD Electrical Power Generation-1984 Status Report, International Liaison Group on MHD Electrical Power Generation, UNESCO (1984)
  - 6) 崔壽鉉, 에너지절약을 위한 MHD발전기술 개  
발동향조사, 과학기술처(1985)
  - 7) MHD發電, 石炭利用發電フロント技術, 総合資料集, p.578 (1980)
  - 8) 池田 茂; MHD發電-最近の進展, 電子技術 総合研 彙報, 47卷, p.581 (1983)