

## MHD 발전 기술의 개발 동향과 전망

박이준 · 손응권 · 최영희 · 전홍석

한국에너지기술연구소

### MHD Technologies ; State of the Art and Prospects

Ijun Park, Eungkwon Shon, Youngchi Chea and Hongseok jeon

Korea Institute of Energy Research

#### 요 약

MHD(MagnetoHydroDynamic) 발전의 원리와 기술 개발의 역사적 배경을 조감하고, 세계적인 개발 동향을 살펴 기술 개발의 방향과 앞으로의 가능성을 전망하였다.

**Abstract**— State of the art, including historical backgrounds of developments, and prospects of MHD(MagnetoHydroDynamic) energy conversion technologies were reviewed. Availabilities for power sources and environmental aspects of MHD technologies were discussed. And, the pressing necessities for commercialization of MHD technologies were examined.

#### 1. 서 론

20세기에 들어서 지구상의 인구와 에너지 소비는 폭발적이라고 말할 수 있을 정도로 증가하였고, 환경 파괴의 주범인 SO<sub>x</sub>나 NO<sub>x</sub>로 인한 산성비나 CO<sub>2</sub>로 인한 온실 효과는 과도한 에너지 소비의 필연적인 결과로서 이제는 인류의 생존 자체를 위협하고 있다. 21세기에는 세계의 인구와 에너지 소비는 지구 환경의 보존을 위한 규제책을 적극적으로 강구해야 할 수준인 지금의 2배로 늘어날 전망이다. 더구나 2차 에너지 수요의 대부분을 차지하는 전력 수요 증가율은 1차 에너지 소비 증가율을 훨씬 웃돌 것으로 예상된다.

현재 세계적으로 1차 에너지의 90% 이상은 화석 연료에 의존하고 있으며, CO<sub>2</sub> 배출이 규제된다라도 화석 연료는 21세기에 가장 중요한 에너지 자원으로서의 자리를 계속 유지할 것으로 예상된다. 따라서 21세기에 사용할 수 있는 새로운 발전 기술은 화석 연료의 유효 이용과 지구 환경 보존이라는 두가지 문제를 동시에 해결할 수 있어야 한다.

열 에너지를 전기 에너지로 직접 변환시키는 MHD(MagnetoHydroDynamic) 발전은 지금까지 개발된 발전 기술 중에서 가장 높은 온도 영역에서 동작시킬 수

있으므로 화석 연료가 가지고 있는 에너지를 가장 효율이 높게 전기 에너지로 변환시킬 수 있는 발전 기술이다. MHD 발전은 재래식 화력 발전에 비해 환경에 미치는 영향이 상대적으로 적기 때문에 환경 측면에서 많은 문제를 안고 있는 석탄을 효율적으로 이용하는 기술로서도 기대를 모으고 있다.<sup>1)</sup>

MHD 발전은 그 열역학적 사이클에 따라 열린 사이클(open cycle)과 닫힌 사이클(closed cycle)로 나눌 수 있다. 열린 사이클은 열역학적 작동 유체가 가스 상태로 사이클을 마치는 Brayton 사이클이며, 닫힌 사이클은 열역학적 작동 유체가 응축을 거쳐 순환하는 Rankine 사이클이다. 이제껏 MHD 발전에 관한 연구가 열린 사이클인 Brayton 사이클에 편중된 까닭은 고온 Rankine 사이클은 작동 유체를 큰 압력차와 온도차로 팽창시킬 수 있어야 하므로 구성이 매우 복잡해지기 때문이다. 또한 Brayton 사이클은 큰 압력차가 필요 없고 고온부와 저온부의 온도차가 크면 효율을 Rankine 사이클보다 높일 수 있다는 사실이 잇점으로 작용했다.<sup>2)</sup>

열린 사이클 MHD 발전의 예로는 고온 연소 가스를 직접 MHD 발전기를 지나게 하는 이른바 플라즈마 MHD를 들 수 있고, 닫힌 사이클 MHD로는 비활성

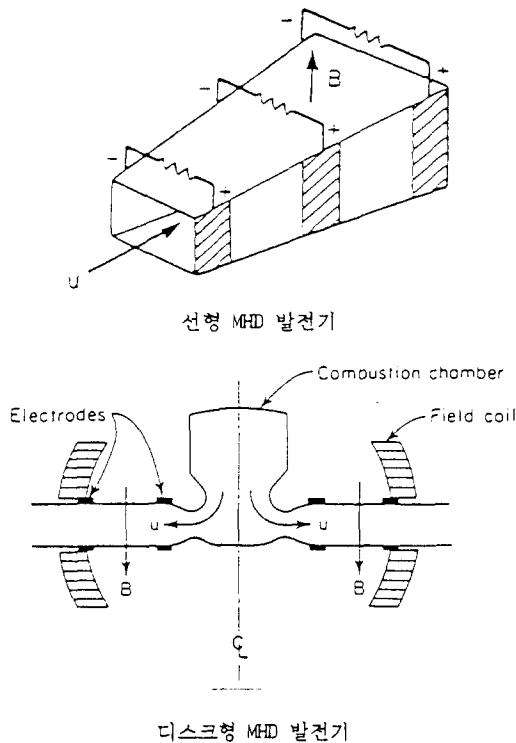


Fig. 1. Principle of MHD generation.

기체를 핵반응열이나 화석 연료의 연소열을 이용하여 가열하고 알칼리 금속을 seed로 첨가하여 유로로 흐리는 전리 기체(ionized gas) MHD와 비활성 기체와 액체 금속의 혼합물인 2상류(2-phase flow)를 발전 유로로 흐리는 이른바 액체 금속(liquid metal) MHD를 들 수 있다. 액체 금속 MHD는 낮은 온도에서 동작시킬 수 있기 때문에 열교환 등이 손쉬운 장점을 가지고 있으며, 최근에는 폐열이나 태양열 같은 저온의 열원을 이용할 수 있는 방식도 개발되고 있다.<sup>1)</sup>

21세기 중반까지는 실용화될 것으로 전망되는 화석 연료를 사용하는 MHD 발전 기술의 효율과 가능성을 살펴보고자 한다.

## 2. MHD발전의 원리

MHD 발전은 자기장 안에서 자기장과 직교하는 방향으로 도선이 움직일 때, 자기장과 도선의 운동 방향에 대해 직교하는 방향으로 기전력(electromotive force)이 생기는 현상인 Faraday의 전자기 유도 법칙에 바탕을 두고 있다. Fig. 1과 같이 자기장과 직교하는 방향으로 유로(channel)에 전도성을 가진 유체가 흐르면 기전력이 발생하여 유로의 벽에 설치되어 있는 전극을 통해

부하에 전류가 흐르게 된다. 유로에서 발생하는 전력은 유체의 전기 전도도와 속도 및 자속 밀도에 비례하여, 전도도가 크거나 자속 밀도와 유속이 클수록 출력 밀도가 커진다. 전도성 유체는 작동 유체(working fluid)라 부르며, 전리된 기체인 플라즈마나 액체 금속 등이 이용된다. 플라즈마는 열 에너지를 이용하여 가속하기 쉬워 고속을 얻을 수 있으므로 규모가 큰 MHD 발전은 대부분 플라즈마 MHD이다.

Faraday가 전자기 유도 법칙을 발견했을 때, Faraday는 도체뿐 아니라 전도성 유체에도 적용해서 발전이 가능하다고 생각했으며, Faraday가 1832년에 Thames 강변에서 지자기와 전자기 유도 현상을 이용하여 발전 실험을 한 것이 역사적인 사실로 기록되어 있다. 그러나 당시에는 열역학의 개념도 정립되지 않았고, 더구나 유체의 전기적 특성에 대해서는 전혀 알려지지 않은 상태였기 때문에 Faraday의 발상은 생각으로만 그치고 말았다.

MHD에 관한 개념이 정립되기 시작한 것은 열역학과 같은 거시적인 물리적 체계가 정립되고, 원자나 분자 크기의 미시적인 물리 현상을 설명할 수 있는 기체 운동론, 통계 역학, 양자론 등이 등장한 이후이다. 20 세기에 들어서면서 1910년경에 벌써 MHD 원리를 이용하는 특허가 등장하나 막연히 그런 것도 가능하리라는 생각의 정도를 넘지 않고 있었다.

MHD 현상이 관심의 대상이 되기 시작한 것은 천체 물리학자들이 태양에서 일어나는 물리 현상의 설명을 시도하면서부터이다. 1940년대 초에 미국의 Westinghouse 사에서 Hall형 MHD 발전을 구상하였으나 당시에는 이온화된 가스의 특성이 규명되지 않았기 때문에 실패하였다. 2차대전 이후에는 핵융합 연구와 연관되어 MHD 연구도 활발해지기 시작하였다.

본격적인 MHD 발전 연구는 1950년대초 미국 Cornell 대학의 Arthur. R. Kantrowitz 교수로부터 비롯되었다. Kantrowitz의 연구 결과는 Avco Everett Research Laboratory에 전수되어 1959년 R.J. Rosa는 Mark-I 시스템으로 11.5kW의 MHD 발전에 성공하여 본격적인 MHD 발전 연구의 문을 열었다.<sup>2)</sup> Rosa는 3000K의 Ar 플라즈마를 열원으로 이용하였다. 대표적인 연구용 MHD 발전 시스템으로는 미국의 Mark-II, Mark-V, Mark-VI, Mark-VII, LRHO, HPDE, CDIF, 구 소련의 U-02, ENIN, U-25, U-25B, U-500, 일본의 Mark-I, Mark-II, Mark-III, Mark-V, Mark-VII, FUJI-I 등을 들 수 있다.<sup>3)</sup>

### 2-1. 열린 사이클 MHD

일반적으로 연소 가스는 연소에서 얻을 수 있는 온도인 2000~3000K 범위에서는 전기 전도도가 매우

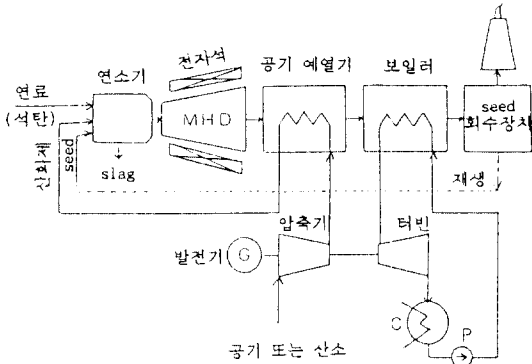


Fig 2. Open cycle MHD generation system.

작아 전도성이 없다. 그러나 연소 가스에 보통 seed라 부르는 K, Cs 같은 알칼리 금속을 소량(1% 이하) 첨가하면 전기 전도도가 MHD 발전에 충분한 수준(~10 mho/m)까지 커진다. 연소 가스에 알칼리 금속 seed를 첨가하는 방법으로 미국의 R.J. Rosa는 1959년 11.5kW의 MHD 발전에 성공하여 MHD발전 기술 개발의 기폭제가 되었다.

이와 같이 고온의 연소 가스 플라즈마를 이용하는 MHD 발전의 열역학적 사이클은 열린 사이클인 Brayton 사이클이며, 열린 사이클 MHD의 발전 유로는 형태가 매우 단순하기 때문에 slag가 많은 석탄 연소 가스으로도 직접 발전이 가능하다. 발전 시스템의 기본 구성은 Fig. 2와 같다.

2-2. 닫힌 사이클 MHD

Ar 이나 He과 같은 비활성 가스는 전자의 온도가 가스의 온도보다 훨씬 높은 비평형 상태가 존재할 수 있으며, 단원자 분자이기 때문에 전리되기 쉽다. 비평형 상태의 비활성 가스에서는 기체의 온도가 2000K 정도일 때 전자의 온도는 5000K 이상이 될 수 있고 기체의 온도가 내려가더라도 자유 전자의 수는 그대로 유지되므로 전기 전도도가 높은 상태로 유지될 수 있다. 이런 고온의 비활성 가스에 K이나 Cs 같은 알칼리 금속 seed를 첨가하면 2000K 정도의 온도에서도 ~100 mho/m 정도의 높은 전기 전도도를 얻을 수 있다.

비평형 상태의 플라즈마를 이용한 닫힌 사이클(closed cycle)의 MHD 발전의 기본 구성은 Fig. 3과 같으며, 플라즈마를 가속시키기 위해서는 고압의 비활성 가스를 열교환기에서 2000 K 정도로 가열하고 소량(~0.01%)의 K이나 Cs를 첨가하여 발전 유로를 통과시켜 기전력을 발생시킨다. MHD 발전 후단에서는 냉각기를 이용하여 일과 seed를 회수하고 재압축하여 순환시킨다."

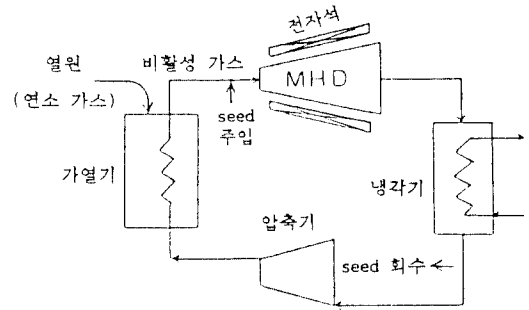


Fig 3. Closed cycle MHD generation system.

3. 연구 개발 동향

3-1. 열린 사이클 MHD

천연가스를 사용하는 열린 사이클 MHD 발전 기술은 세계적으로 pilot plant를 건설할 수 있는 정도의 기술 수준에 도달하였다. MHD 발전기의 성능은 엔탈피 변환 효율과 내구성으로 대표된다. MHD 발전이 실용화되려면 20~25%의 엔탈피 변환 효율과 발전 유로가 6000시간 이상의 내구성을 가져야 한다고 평가되고 있다. 아직까지 엔탈피 변환 효율은 12%선에 머물러 있으나 내구성은 현재의 기술로도 8000 시간 이상이 가능하다."

구 소련에서는 세계 최대 규모인 500MW급의 천연 가스 MHD pilot plant(U-500)의 건설에 착수하여 1988년 말경 증기 plant가 완성되어 운전을 시작하였으나 연방의 붕괴로 인한 경제 사정의 악화와 초전도 전자석 문제로 건설이 중단되었다. 현재 구 소련을 포함한 여러 나라에서 그 나라의 에너지 사정에 맞추어 천연 가스나 석탄의 이용 효율을 높이는데 주안점을 두고 MHD 발전 기술의 개발을 추진하고 있다.

구 소련은 1960년대초부터 고온물리연구소(IVTAN)를 중심으로 천연 가스와 석탄을 연료로 사용하는 열린 사이클 MHD의 개발과 실용화를 추진하였으며, 1970년대초에 이미 MHD 출력 50MW급의 U-25 plant를 건설하여 전력 계통에 연계시키는 실험을 수행하였다. U-25 plant를 개수한 U-25B plant는 미국과의 공동 MHD 연구에도 이용되었다. 이 밖에도 천연 가스 MHD 설비를 석탄 연소 설비로 개조하는 연구도 수행되었다. 이제까지 기록된 MHD 발전 효율은 45.6%에 이르고 있으며, 세계 최대 규모인 Ryazan plant(U-500)가 완성되면 50%에 근접한 효율이 기대되고 있다."

미국은 1959년 AVCO사에서 세계 최초로 11.5kW의 MHD 발전에 성공한 이래 Argonne 연구소사가 중심이 되어 MHD 발전 기술의 개발을 선도하고 있으며, 구 소련과는 달리 석탄 연소 MHD 발전의 실용화에

주력하고 있다. 1960년대 중반부터 미국 정부는 MHD 발전 기술의 가능성을 인식하고 MHD 연구에 관심을 가지기 시작하였고, 1970년대 중반의 석유 파동 이후 본격적인 정부 차원의 개발을 추진하였다. 미국은 구 소련과의 공동 연구로 전극 개발을 추진한 바 있으며, 1980년대 중반경 몬타나주에 건설된 CDIF(Component Development Integration Facility)는 열출력 50MW급으로 세계 최대의 석탄 연소 MHD 발전 설비이다. 미국은 이 밖에도 Argonne 연구소를 중심으로 액체 금속을 이용하는 MHD에 관한 연구도 꾸준히 계속하고 있으나 연구 성과는 알려지지 않고 있다.<sup>14)</sup>

현재 미국에서는 에너지부의 지원하에 민간 기업 주도로 석탄 연소 MHD 발전 기술의 실용화가 추진되고 있으며, 이러한 민간 기업의 석탄 연소 MHD 발전 실용화 사업의 지원을 목적으로 실증 사업도 추진되고 있다. 미국은 실증 사업으로 열입력 50MW의 장치를 이용하여 석탄 연소기와 MHD 발전기를 결합한 MHD topping cycle 실증 시험을 추진하고 있으며, 이와 동시에 열입력 30MW의 장치를 이용하여 보일러와 seed 회수 등의 bottoming cycle 실증 시험도 추진되고 있다. 실증 사업의 다음 단계로는 출력 25~30 MW 급의 재래식 화력 발전소를 개수한 상업용 MHD 발전소가 민간 자금으로 건설될 수 있을 것으로 기대되고 있다.<sup>3)</sup>

일본에서는 1966년에 통상산업성의 대형 사업으로 석유를 연료로 하는 열린 사이클 MHD 발전에 관한 연구가 수행되었다. 일본은 Mark I으로부터 Mark VII까지의 연구용 시스템으로 500kW의 MHD 발전에 성공하였고, 100kW의 발전 율에서 총 430시간의 내구성 시험에도 성공하였다. 이후에 열린 사이클 MHD 연구는 에너지 정세의 변화로 연구의 방향이 석탄 연소에 관한 기초 연구로 바뀌어 고온 공기 예열기나 석탄 연소기 등의 개발 과제를 제시하고, 1988년부터는 닫힌 사이클 MHD 연구로 이어지고 있다.<sup>3)</sup>

3-2. 닫힌 사이클 MHD

닫힌 사이클 MHD에 관한 연구는 처음에 원자력을 이용하는 방법의 하나로 여러 나라의 원자력 관련 연구 기관에서 시작되었다. 그러나 2300K 정도의 고온 연소 가스를 얻는 것이 어렵다는 것이 밝혀지면서 일본과 화란의 기초 연구를 제외하고는 1970년대 중반까지 거의 연구가 중단되었다.

닫힌 사이클은 열린 사이클 MHD와 비교할 때 다음과 같은 많은 장점을 가지고 있다.<sup>5)</sup>

1) 작동 온도가 2000~2300K 정도로 상대적으로 저온이기 때문에 소재의 열화나 냉각으로 인한 열손실

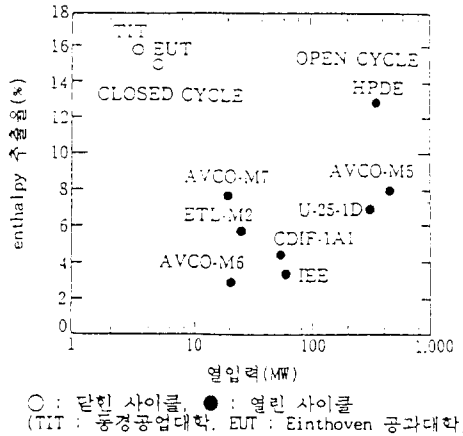


Fig. 4. Enthalpy extraction efficiencies of the MHD technologies.

문제가 적다.

2) 상대적으로 저온에서 동작하기 때문에 공기의 예열이 필요 없고, 1500~1800K 영역에서 MHD-가스터빈 복합 사이클이 가능하다.

3) 비평형 전리로 인해서 전자의 온도가 작동 유체인 비활성 가스의 온도보다 높기 때문에 엔탈피 변환 효율이 열린 사이클에 비해 높다.

4) 작동 유체의 전기 전도도가 크기 때문에 출력 밀도가 크다.

5) 열교환기가 seed와 접촉하지 않기 때문에 부식 문제가 발생하지 않는다.

6) 열린 사이클에 비해 seed 요구량이 훨씬 적고, 재생이 쉽다.

이와 같이 닫힌 사이클 MHD가 여러가지 장점을 가지고 있음에도 불구하고 각국이 열린 사이클 MHD에 주력한 까닭은 각국의 에너지 정세와 밀접한 관련이 있고, 또 기술적으로도 원자력을 이용하는데 따르는 안전 문제와 플라즈마의 안정성 확보가 쉽지 않았다는데 있었다. 그러나 1970년대 중반을 넘으면서 고온 열원 문제는 고온 연소 가스를 이용하는 축열형 열교환기가 등장하면서 열원이 원자력으로부터 화석 연료로 바뀌어 해결되었다. 그리고 플라즈마의 안정성 문제도 열원 문제가 해결됨에 따라 동작 온도를 올릴 수 있게 되어 seed의 완전 이온화가 가능해짐으로써 해소되었다. 이런 바탕 위에서 1980년대에 화란의 Eindhoven 공과대학(EUT)과 일본의 동경공업대학(TIT)은 천연 가스를 연료로 해서 열교환기를 이용한 닫힌 사이클 MHD 발전 실험을 수행하였고, 일련의 실험에서 플라즈마 주입 온도 1900K, 열입력 3~5MW에서

엔탈피 변환 효율 16%가 기록되었다(Fig. 4 참조).

그리고 출력 밀도도 열린 사이클 MHD 발전의 20~25MW/m<sup>3</sup>를 크게 앞서는 70MW/m<sup>3</sup>가 달성되었다. EUT와 TIT의 초기 실험에서는 작동 유체로 Ar이 사용되었으나 이후의 실험에서는 분자량이 Ar보다 작아 좀 더 고속으로 가속할 수 있는 He이 사용되어 2000K의 온도와 엔탈피 변환 효율 20%가 기록되었다. 이와 같은 성과에 힘입어 일본에서는 TIT가 중심이 되어 전력회사와 민간 기업이 참여하는 위원회가 구성되어 여러가지 MHD 발전 시스템에 관한 타당성 조사가 수행되고 있다. 동 위원회는 500MW의 MHD-가스 터빈 복합 시스템으로 54%의 열효율(고압 송전단 기준)을 실현할 수 있다는 결론을 잠정적으로 내리고, 기본적인 연구에 8년, 실용화까지는 15년 정도가 걸릴 것이라고 예상하였다.<sup>3)</sup>

## 4. MHD 발전의 문제점과 가능성

### 4-1. 고온 연소 기술

MHD 발전은 열린 사이클의 경우 약 3000K, 닫힌 사이클은 약 2300K 정도의 고온을 필요로 한다. MHD 발전 시스템은 작동 유체의 흐름 이외에는 기계적으로 움직여야 되는 부분이 없고 가스 터빈과 같이 회전기의 원심력으로 인한 고온에서의 소재 열화, 열응력 문제가 발생하지 않기 때문에 고온 동작이 가능하다. 또한 작동 유체를 고속으로 가속시키기 위해서는 고압 연소가 필수적으로 요구된다.

천연 가스나 석탄 등을 상온의 공기로 연소시키면 최고 2400K 정도의 연소 온도를 얻을 수 있으나 산소를 연소제로 사용하면 3000K 정도의 연소 온도를 얻을 수 있다. 열기관을 이용하는 발전 시스템은 열원이 가지고 있는 유효 에너지를 고온 영역으로부터 저온 영역에 이르기까지 이용할 수 있게 되면 그 열효율이 높아지며, 열효율을 높이는 가장 기본적인 수단은 열역학적 사이클의 고온부 온도를 올리는 방법이다. MHD 발전은 화석 연료의 연소 온도와 비슷한 고온에서 발전이 가능하고, 후단에 가스 터빈이나 증기 사이클을 결합시킨 복합 사이클을 구성하면 상용화되어 있는 증기 사이클보다 훨씬 높은 효율을 실현할 수 있다. 지금까지 여러 나라에서 보고된 MHD 발전 효율은 47~62%에 이르고 있어 개발 단계인 발전 기술로서는 대단히 높다.<sup>4)</sup>

고온 연소 가스 MHD 발전의 핵심적인 문제는 연소 가스의 온도를 3000K 정도까지 올리려면 공기를 1800K 정도로 예열해야 하므로 고온에서 동작해야 하는 공기 예열기의 문제라고도 할 수 있다. 열린 사이클에서는

고온 연소 가스가 직접 발전 유로를 통과해야 하므로 열교환기는 부식성이 강한 알칼리 금속을 함유한 연소 가스와 직접 접촉하기 때문에 이로 인한 부식은 동작 온도 이상으로 심각한 문제이다. 따라서 열린 사이클 MHD에는 열교환기 소재로 아직은 기술적으로 문제가 있는 세라믹을 사용해야 하며, 닫힌 사이클 MHD는 동작 온도가 2000K 정도이므로 고온 열교환 문제가 열린 사이클에 비하여 적다.

고온용 합금으로 만든 회수 열교환기(recuperative heat exchanger)는 1300K 이상의 온도에서는 사용이 불가능하므로 이를 사용하려면 플라즈마의 온도를 낮춰야 하고, 플라즈마의 온도를 낮추면 효율이 떨어지는 또 다른 문제가 발생한다. 이를 피하기 위하여 산소 부화(oxygen enrichment) 연소가 이용될 수 있으며, 산소 부화 연소는 열효율이 약간 떨어지나 건설비가 싸지는 장점을 가지고 있다. 공기 예열에 별도의 연소기를 가진 예열기를 사용하면 열교환이 필요없으므로 플라즈마의 온도를 낮춰야 하는 문제는 발생하지 않는다.<sup>5)</sup>

석탄 가스화 등 에너지 전환 기술과 MHD를 결합시키면 석탄 직접 연소의 문제점인 slag 발생이나 환경 오염 문제를 최소화시킬 수 있고, 열역학적 사이클에 열화학 반응에 의한 재열 과정(regeneration)을 부가시킬 수 있게 되므로 시스템의 효율을 더 높일 수 있다(thermochemical conversion MHD ; TCC-MHD). MHD 사이클에서 화학적인 재열 과정은 높은 온도인 상태로 유로를 지난 연소 가스에 다시 연료를 투입함으로써 이루어진다. 연소 가스에 연료가 혼합되면 연료의 탄소 성분이 수분이나 CO<sub>2</sub>와 반응하여 수성 가스나 CO 같은 가연성 가스가 생성된다. 생성된 가연성 가스는 연소로에 주입되는 산화제의 예열에 이용될 수 있으며, 가연성 가스의 생성으로 연소 가스의 온도가 내려가므로 열교환이 쉬워지고 'MHD-가스 터빈-증기터빈'의 3원 사이클이 가능해지므로 열효율을 60% 이상으로 높일 수 있다. 그러나 아직은 3원 사이클에는 석탄 가스화가 선행되어야 하고 고온용 열교환기의 개발도 아직은 숙제로 남아 있으며, 석탄을 연료로 사용하려면 연소 온도를 더 높여야 하는 문제가 있다.<sup>6)</sup>

### 4-2. MHD 발전의 환경 성능

MHD 발전은 효율이 높고 열린 사이클이든 닫힌 사이클이든 본질적으로 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> 등의 배출이 적어 환경에 미치는 영향이 적다. 뿐만 아니라 열린 사이클에서는 seed로 첨가한 알칼리 금속이 연료에 함유된 유황 성분과 결합하여 고온에서 안정되고 물에

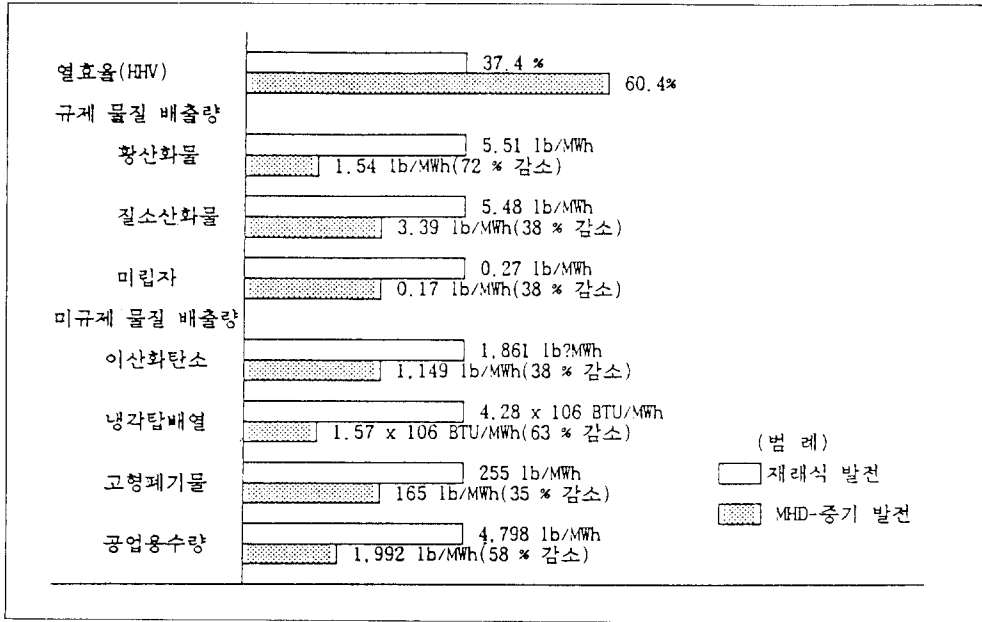


Fig. 5. Characteristics of the coal fired MHD generation.

녹지 않는 황산염이 형성되므로 자동적으로 탈황이 이루어진다. 또한 고온 연소에서는 초기에 NOx가 다량 발생하나 2 단 연소 기법으로 연료가 과농도인 상태에서 연소 온도를 NOx 분해점 이상으로 적절히 유지시키면 연료에 함유된 질소 성분은 열 평형 상태가 되므로 NOx는 거의 제거된다. 이와 같은 SOx나 NOx 제거 방법은 미국, 러시아, 일본 등의 수십 MW 급 MHD 발전 시스템에서 실증되었다.

석탄을 연료로 사용하는 MHD에서는 사이클론 방식의 연소기를 이용하면 석탄에 함유된 회분도 거의 모두 회수하여 제거할 수 있다. 배가스에 포함되어 있는 잔류 고형 물질은 seed와 결합하여 화합물 형태로 완전히 회수 제거된다. 이러한 석탄 연소 MHD 발전은 SOx나 NOx, 회분의 배출을 대폭 줄일 수 있는 이른바 clean coal technology 의 하나로 평가되고 있다. Fig. 5는 미래의 MHD-중기 발전 시스템의 환경 성능을 래식 석탄 화력 발전과 비교한 것이다. MHD 발전은 환경 영향 물질의 배출량을 35~70% 정도 대폭 줄일 수 있음을 쉽게 알 수 있다."

4-3. CO<sub>2</sub> 회수 문제

연료를 사용하는 발전 시스템에서 배출되는 CO<sub>2</sub>의 양을 제어하기 위해서는, CO<sub>2</sub> 자체를 발생시키지 않는 것은 불가능하므로, 발생한 CO<sub>2</sub>를 회수하는 것이 우선 필요하다. 대표적인 CO<sub>2</sub> 회수 방법으로는 CO가 쉽게

녹는 유기 용매에 용해시키는 방법과 순수한 산소를 산화제로 해서 배가스가 수분과 CO<sub>2</sub>만으로 이루어지게 하여 회수하는 방법이 있다. 열린 사이클 MHD에서는 순수한 산소를 사용하는 방법이 CO<sub>2</sub> 회수 방법으로 적합하다고 평가되고 있다. 화석 연료를 산소만을 이용하여 연소시키면 3000 K 정도의 고온을 얻을 수 있으며, 복합 사이클 발전을 위해서는 MHD 발전 유로를 지난 연소 가스의 온도를 가스 터빈이나 열교환기의 적정 동작 온도까지 낮춰야 한다.

EC에서는 'MHD-중기 터빈 방식'과 '석탄 화력 증기 터빈 방식', 그리고 '가압 유동층 복합 사이클 방식'을 비교하여 배출되는 CO<sub>2</sub>를 완전 제거하는 경우에는 MHD 발전이 가장 경제적이라고 평가하고 있다."

4-4. 기타 문제

MHD발전 유로에서는 Faraday의 전자기 유도 법칙에 의하여 Faraday 전류가 발생하고, 동시에 자기장 속을 전하를 가진 이온이 지나가므로 전하의 운동에 의한 Hall 전류도 발생한다. Faraday 전류와 Hall 전류는 발생 기구(mechanism)가 다르기 때문에 이들 두 전류 성분은 발전 유로 안에서 서로 간섭을 일으키므로 MHD 발전에서는 어느 한 성분만을 이용해야 하며, MHD발전기는 어느 전류 성분을 출력으로 이용하느냐에 따라 Faraday형과 Hall형으로 나뉜다.

Faraday형 MHD 발전기에서 Hall 전류에 의한 간섭

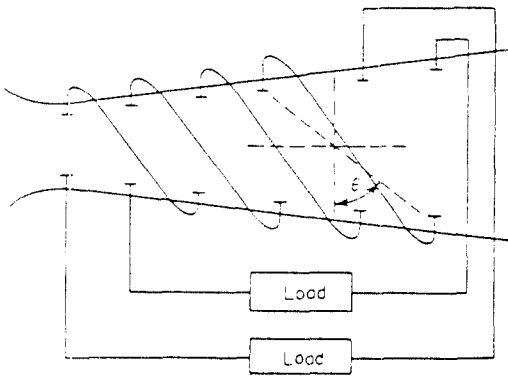


Fig. 6. Diagonally connected Faraday type MHD generator.

문제는 여러 조각으로 분리된(segmented) 전극을 Fig. 6과 같이 대각선 방향으로 건설하면 자기장과 평행한 결선면이 등전위면이 되어 대부분 제거된다. 결선 각도  $\theta$ 는 작동 유체가 발전 유로를 지날 때 발생하는 기전력의 흐름 방향 성분과, 자기장과 흐름에 일치인 방향 성분이 이루는 각도이다. 최근에는 대각선 방향으로 결선된 전극의 짝(electrode pair)에 흐르는 전류가 같이 지도록 부하쪽에 제어하는 방법이 고안되어 전류 간섭을 줄이는 보조 수단으로 이용되고 있다.”

대표적인 Hall형 MHD 발전기로는 Fig. 1과 같은 disk 형 발전기를 들 수 있다. disk형 발전기는 seed의 이온화(전리) 효율이 높으므로 seed 요구량이 적고, 작동 유체의 감속 효과가 큰 특징이 있다. 그리고 전극에 seed가 붙어붙는 응착율이 낮아 전극의 수명이 Faraday형에 비해 길고, 단한 사이클의 경우는 작동 온도가 낮으므로 수냉식 구리 전극을 사용할 수 있는 등의 장점을 가지고 있기 때문에 단한 사이클 MHD 발전 시스템에는 disk형 발전기가 많이 채택되고 있다.”

### 5. 국내의 MHD 연구 현황

우리나라의 MHD 관련 연구 현황은 한마디로 불모지라고 표현해도 지나치지 않다. MHD의 개념은 핵물리학이나 유체역학 관련 분야에 종사하는 사람들 사이에는 일찍부터 알려져 있었으나 실제적인 연구가 이루어진 것은 1985년 한국동력자원연구소(현 한국에너지기술연구소)에서 수행한 기초 연구가 효시이다. 동 연구는 짧은 기간에 문헌 조사를 위주로 수행되어 MHD가 무엇이라는 것을 소개하는데 그쳤다고 할 수 있으나 불모지에 MHD 연구의 씨앗을 뿌렸다는 점에서 높이 평가되고 있다. 이후 MHD에 관한 연구는 그 백이

끓었다가 1990년대에 들어서서 한국에너지기술연구소에서 저온에서 녹는 합금을 전도성 유체로 사용해서 저온 열원을 이용할 수 있는 단한 사이클의 액체 금속(liquid metal) MHD 발전에 관한 연구가 수행되었다. 동 연구는 경험 부족으로 기대했던 만큼의 성과를 거두지는 못하였으나 우리나라에서도 본격적인 MHD 발전 기술 연구의 길이 열릴 가능성이 있음을 보여주었다.

그리고 MHD를 이용한 발전 기술에 관한 연구는 아니다, MHD 개념의 응용 측면에서 상당한 가능성을 엿볼 수 있는 연구의 싹이 트고 있어 고무적인 평가를 받고 있다. 1990년대초부터 국방과학연구소와 한국해양대학에서 MHD 개념을 응용한 선박 등의 추진(propulsion)에 관한 연구가 꾸준히 계속되고 있어 활발한 연구 투자가 따른다면 상당한 성과를 거둘 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다.

이상의 몇몇 사례 외에는 우리나라에서는 아직까지 MHD에 관련하여 본격적인 연구가 시도된 바가 없다고 해도 그다지 틀린 말은 아니다.

## 6. 결 론

열린 사이클 MHD의 개발은 1970년대에 활발하게 이루어지다가 1980년대에 들어서면서 개발 속도가 눈에 띄게 느려졌다. 이는 개발 실험에 대규모의 장치가 필요할 뿐만 아니라 근본적으로 고온 공기 예열기의 개발 전망이 밝지 못하였고, 위험 부담이 큰 실증 실험에 필요한 대규모 실험 설비 건설 재원을 마련하기 어려웠기 때문이다.

단한 사이클 MHD는 비교적 소규모 실험으로도 앞서 말한 것과 같은 획기적인 성과를 거두었다. 단한 사이클 MHD는 열린 사이클에 비해 출력 밀도가 높고, 동작 온도가 2300K 정도로 낮기 때문에 재료 문제 등에서 기술적인 어려움이 적다. 특히 소규모 실험으로도 발전 성능의 실증이 가능하기 때문에 100MW 급의 비교적 소규모 시스템이 21세기 전반에 실용화된 가능성을 가지고 있다. 아직까지 세계적으로 MHD 발전 기술 개발은 전인 가스를 연료로 사용하는 열린 사이클이 주류를 이루고 있으나 단한 사이클의 경우는 필요한 고온만 얻을 수 있으면 일원이나 연료의 종류에는 관계가 없다는 것이 큰 잇점이다.

그러나 단한 사이클이 열린 사이클에 비하여 실용화의 가능성이 크다 하더라도 MHD 발전의 잇점은 석탄이나 천연 가스의 직접 연소에 의한 고효율 발전에 있다고 할 수 있으며, 고온의 연소 가스에 사용할 수 있는 열교환기 문제가 해결된다면 단한 사이클보다

효율이 높은 열린 사이클 MHD 발전도 충분히 가능하다. 열린 사이클 MHD 발전은 인류 생존을 위한 화석 연료 자원을 거의 전적으로 석탄에 의존하게 되는 21세기 중반까지는 실용화가 예상되므로 이를 위한 개발 투자도 지속되어야 할 필요성이 크다. 최근에는 MHD 발전을 태양열, 또는 고속 증식로나 핵융합로에 이용하는 방안도 미국, 일본, 유럽 등지에서 다각도로 연구되고 있다.<sup>7)</sup>

MHD 발전 기술은 21세기의 에너지 환경을 그려낼 수 있는 미래의 기술로서 실용화까지는 막대한 인력과 자금, 그리고 시간이 요구되는 거대 과학이며, 몇 세대 후의 후손을 위한 기술이다. 이제 우리나라도 고난에 찬 20세기를 되풀이 하지 않으려면 구호에 그치고 있다는 느낌을 주고, 있는 국가적 차원의 과학 기술 개발 정책의 내실화가 시급히 이루어져야 하며, 21세기에 인류의 미래를 이끌어 나갈 수 있는 선도적 위치를 확보하기 위한 MHD와 같은 거대 과학에도 본격적으로 도전해야만 한다. 그러나 MHD와 같은 거대 과학 기술의 개발에는 완벽에 가까운 기획이 필수적으로 요구되므로 충분한 인력과 시간을 동원하여 국가적 차원의 개발 계획이 수립되어야 할 것이다. 지금까지 수도 없이 보아왔듯이 계획 수립이 졸속으로 흘러 아니함만 같지 못하게 되는 일은 피해야 한다.

## 참고문헌

1. 최수현 외 : 에너지절약을 위한 MHD발전기술 개발동향 조사연구 ; 한국동력자원연구소 연구보고서, KE-85(B)-1, (1985).
  2. R. J. Rosa : Magnetohydrodynamic Energy Conversion ; Hemisphere Publishing Corp., (1987).
  3. 高野 清南 : 21世紀を目指す發電技術, MHD發電の展望 ; サンシィアインジャナル, 13(1), 1992, pp. 19 - 22, (1992).
  4. A. E. Sheindlin, V. I. Kovbasyuk, Open-cycle Magnetohydrodynamic Energy Conversion, State of the Art and Prospects for the Future : Perspectives in Energy, 1(2), Moscow International Energy Club, pp. 179 - 192, (1991).
  5. 鹽田 進 : 最近のクロ-ズドサイクルMHD發電の研究, 日本電氣學會論文集, III-B, 1991, pp. 237 - 241, (1991).
  6. MHD Electrical Power Generation, 1984 Status Report, International Liaison Group on MHD Electrical Power Generation Sponsored by UNESCO, April (1984).
  7. Siegfried Malaug et al, MHD Work on Self-cooled Liquid-Metal Blankets under Development at the Nuclear Research Centre, Karlsruhe : Perspective in Energy, 1992 - 1993 ; 2(3), Moscow International Energy Club, pp 303 - 312, (1992 - 1993).
1. 최수현 외 : 에너지절약을 위한 MHD발전기술 개