

연료 전지 발전 기술의 현황과 전망

최수현

(한국에너지기술연구소)

●1947년생
●전기공학에서 MHD를 전공하였으며 신발전 기술 및 에너지 절약 기술에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

연료전지(fuel cells)는 기존의 발전기술과는 달리, 사용되는 연료의 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 발전(發電)기술로서, 발전용 연료와 공기의 전기화학 반응에 의해 지속적으로 전력을 생산하는 새로운 개념의 발전기(發電機)이다.

연료전지용 연료로는 천연가스, 도시가스, 메탄올, 석탄가스 등 탄화수소계열의 화석연료가 사용된다. 국내에서는 광범위한 의미로 대체에너지로도 분류하고 있으나 엄밀한 의미로는 발전효율을 획기적으로 향상시킬 수 있는 에너지절약형의 새로운 발전기술이다.

연료전지의 기본적인 원리는 오래 전부터 알려진 바 있으나 수소를 사용한 최초의 연료전지는 1839년에 Grove에 의해 실험된 바 있으며 1950년대에 Bacon 등에 의해 연구된 바 있다.⁽¹⁾ 연료전지로서의 실제 이용은 미국에서 유인우주선에 사용된 것이 처음이며 일반 에너지기술로의 개발은 1967년 미국의 가스 회사들이 천연가스연료의 판매확대를 목적으로 연구 개발비를 지원하면서 본격화되었다.⁽²⁾

화력발전기와 같은 열기관이 갖는 이론적 최대 열효율인, 카르노 사이클의 열효율의 제약을 받지 않는, 높은 효율의 새로운 발전방식으로서 연료전지기술 이외에도 MHD발전기술

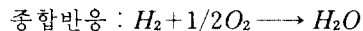
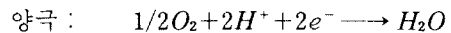
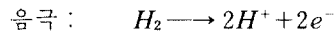
등이 1960년대부터 연구개발되어 왔으나 실용화 면에서 연료전지가 가장 근접해 있다고 할 수 있다. 연료전지기술은 현재 출력 40KW~11MW 용량의 설비들이 개발되어 시험되고 있으며^(3~6) 1990년대 후반부터 일부 실용화되면서 21세기의 주요 에너지기술로 이용될 것으로 전망된다.

2. 연료전지 발전기술의 개요

2.1 발전(發電)의 기본원리

기본적인 연료전지의 구성은 두 개의 전극 사이에 이온 전달매체인 전해질이 포함되어 있으며, 수소가 음극으로 공급되고 산소가 양극으로 공급되면 전극표면에서 전기화학반응이 이루어지면서 발전(發電)된다.

연료전지의 기본적인 발전원리는 그림 1에 나타낸 바와 같다. 일반용 연료전지에서는 수소를 많이 포함하고 있는 탄화수소계열의 연료를 개질시켜 사용하며 산소는 공기중의 산소성분을 이용한다.



2.2 발전시스템 구성

연료전지가 발전설비로서 수용가가 필요로한

상용전력을 공급하기 위한 주요 구성요소는 그림 2에서 보는 바와 같다.

- 연료개질기 : 천연가스, 도시가스 또는 메탄올과 같은 발전연료를 수소성분이 많은 가스로 전환시켜 필요량만큼 연료전지 본체로 공급함.

- 연료전지 본체 : 직류전력을 발전하는 핵심 장치로서 필요 용량에 따라 여러 개의 스택으로 구성된다. 그림 1에 나타낸 연료전지의 기본인 단위전지(single cell)를 수십 내지는 수백 장을 직렬시켜 적정 전기용량을 발전할 수 있는 하나의 뭉치를 스택(stack)이라 함.

- 전력변환기 : 연료전지본체에서 발전된 직류전력을 필요한 상용전력으로 바꾸어 주는 직/교류 변환, 주파수제어, 전압제어 및 위상제어의 기능과 발전기로서의 부하추종을 포함한 각종 제어기능을 수행함.

- 열 회수 및 공급 : 발전시의 반응열을 회수하여 필요시에 사용함으로써 열병합발전이 가능함. 회수된 열의 일부는 연료개질기에서의 반응열원으로 사용되기도 함.

3. 기술의 종류와 특성

3.1 연료전지의 종류

일반적으로 사용되는 전해질의 종류에 따라 구분하며 표 1에서 보는 바와 같이 종류에 따라 작동온도가 상이하며 고온(高温)연료전지의 경우는 증기터어빈과의 복합발전도 가능하다.

알칼리 연료전지는 특수용으로 이미 사용중이며 일반용으로는 인산형 연료전지가 기술적으로 실용화에 가장 근접해 있다.

3.2 기술의 특성

연료전지는 전기화학반응에 의한 에너지의 직접변환기술이기 때문에 이상적인 열기관의 최대효율인 카르노 사이클의 열효율에 제한을 받지 않으므로 발전효율이 매우 높으며 환경공해 발생요인이 거의 없다는 뚜렷한 특성을 갖고 있으며 이외에도 전력기술로서의 필요한 여러 가지 장점을 갖고 있다.

- 효율특성 : 50%를 능가하는 발전효율이 가능하며 출력용량 규모에 무관하게 높은 효율로 발전하므로 발전부문에서의 대규모 에너지절약

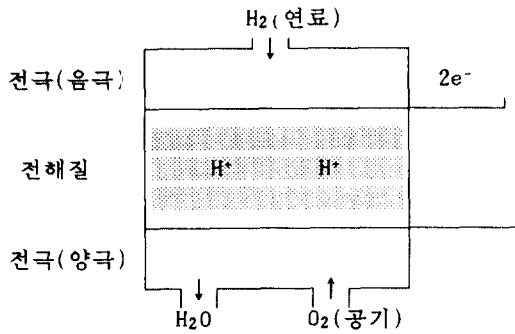


그림 1 연료전지의 기본원리

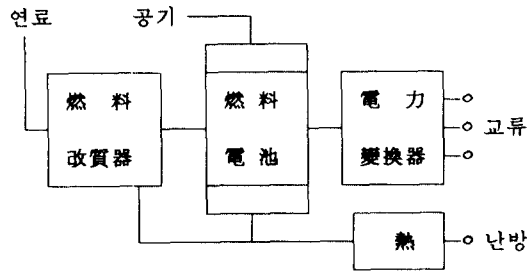


그림 2 연료전지 발전시스템 구성

표 1 연료전지의 종류

종 류	작동 온도	연 료	기술 수준
알칼리(AFC)	상온~100℃	순수 수소	사용중(우주선)
인산형(PAFC)	150~220℃	천연가스, 메탄올 등	실용화단계
용융탄산염형(MCFC)	600~700℃	천연가스, 석탄가스	개발단계
고체전해질(SOFC)	800~1000℃	석탄가스	연구단계
고분자전해질(PEFC)	상온~120℃	수소, 메탄올 등	실용화단계

이 가능하다.

- 열병합발전 : 반응열의 회수이용으로 에너지의 종합 이용효율을 높일 수 있으며 중소 용량규모로 건물 또는 지역단위 열병합발전용과 공장용으로서의 다양한 이용이 가능하다.

- 환경특성 : NO_x , SO_x 및 분진 등의 발생이 기존 화력에 비하여 무시할 정도이며 터빈 등에 의한 소음발생 요인이 없으므로 실내 설치도 가능하다.

- 기타특성 : 기동정지가 용이하고 부하추종성도 매우 양호하며 설비 용량규모 또는 부하율에 관계없이 비교적 일정한 효율로 발전함. 건설면적이 상대적으로 적으며 모듈화 생산으로 단기간 건설이 가능함.

3.3 경제성

일반용으로서의 연료전지기술은 아직은 개발 단계이므로, 많은 연구개발비가 투입된 실정이기는 하지만, 제한적으로 prototype이 생산되

표 2 화력발전과 연료전지발전의 특성비교⁽⁷⁾

		화력전지	연료전지
발전 효율		38~42%	50~60%
공해 배출		석탄, 석유 화력에 비해 無視	
立地	면적	310坪/MW	120坪/MW
	위치	원격지역	도심지
건설기간		6년	3년

표 3 연료전지 설치비(\$/KW)⁽⁷⁾

연도	미국	일본
'70년대 후기	12,000	—
'80년대 초기	10,000	—
1990년	2,500	20,000('89)
1992년	—	7,000
1995년	1,500	2,400
상용화 목표	1,000~1,300	1,500~2,000

참고) ○ 환산기준 : \$1=120엔

○ 미국은 200KW급, 일본은 50KW급 prototype 기준이며 상용화목표는 대용량기준임

기 시작한 인산연료전지의 경우 단위용량당의 설치비용이 표 3에서 보는 것과 같이 매우 빠르게 낮추어 지고 있다.

4. 선진국 기술개발 동향

4.1 개발 배경

일반 에너지기술로서의 연료전지기술개발의 배경은 미국의 가스회사들이 가스연료의 판매 확대 목적으로 연구개발비를 지원하기 시작한 것이다. 즉, 1967년에 미국의 28개 가스회사(캐나다 1개 회사 포함)가 TARGET(team to advanced research for gas energy transformation) 계획으로 출력 12.5KW의 인산연료전지의 개발을 위한 연구개발비 지원을 시작하면서 본격화되었다.

일본은 1972년부터 미국의 개발계획에 참여하고 있으며, 에너지 여건의 악화와 대도시 지역의 안정적인 전력공급의 필요성 등으로 자체 기술에 의한 개발도 병행하고 있다. 유럽의 경우는 미국과 일본이 강력한 기술보호정책을 추진하면서 이들 국가의 기술독점에 대응하기 위해 1980년대부터 개발을 추진하게 되었다.

현재로서는 기술보유면에서는 미국이 가장 앞서고 있으나 실용화를 위한 노력에서는 일본이 앞서가고 있는 추세이다.

4.2 미국의 개발동향^(8,9)

(1) PC-11, PC-18, PC-25의 개발

건물단위로 설치하여 전기와 열을 동시에 공급하기 위한 소규모 연료전지설비는 1967년 가스회사들의 지원과 UTC의 기술개발로 1976년까지 기초연구(4년), 현장실험(3년) 및 제품화 연구(3년)로 구분되어 총 10년간 수행되어 PC-11이라고 불리우는 출력 12.5KW급이 최초로 개발되어 시험되었다.

PC-11의 시험결과로 연료전지기술의 우수한 에너지절약 효과와 환경특성이 실증되면서 1977년부터는 DOE(department of energy)가 국가계획으로 출력 40KW의 열병합발전용(PC

-18) 연료전지발전기의 개발을 추진하였다. 1985년까지 추진된 계획은 GRI(gas research institute)도 연구개발비를 지원하고 있으며 기술개발은 UTC가 담당하여 총 5,600만 달러의 개발비를 투입하여 49기를 제작 실험한 바 있다.

현재는 건물단위용의 200KW급(PC-25)을 상용화시키기 위한 prototype에 제한적으로 생산·공급되고 있다. 상용화를 목표로 개발중인 PC-25 기종의 성능은 표 4에 주어진 바와 같다.

(2) 대형 발전기술

1971년부터 9개 전력회사의 연구비지원으로 UTC에 의해 출력 1,000KW급 1기가 처음으로 건설되어 Northeast Utility 회사의 전력계통선에 연결되어 1979년까지 시험되었다. 본 계획에는 총 3,500만 달러 규모가 투입되었으며 1973년부터 EPRI(electric power research institute)도 연구비를 지원하였고 1975년부터는 DOE가 기술개발을 주도한 바 있다. 1979~1985년 기간중에는 교류출력 4.5MW의 발전소가 2기 개발되어 Con. Edison 전력회사에 의해 뉴욕 맨하탄과 일본 동경전력 회사에 의해 五井발전소에 각각 건설되어 실증시험된 바 있으며 일본에 건설된 2호기에서 세계 최초로 정격 4.5MW 발전에 성공하였다. 최근에는 11MW급 연료전지 발전소(PC-20)가 미국 기술에 의해 일본에 건설되어 전력기술로서의 신뢰도시험을 위하여 시험 가동중에 있다. (설계특성은 표 4 참조)

표 4 인상 연료전지 발전설비의 최근 기술수준

	FP-50	PC-25	PC-20
정격 출력	50KW	200KW	11MW
송전단 효율(HHV)	36%	36%	41.1%
발전 연료	도시가스	도시가스	천연가스
전극 면적	2,000cm ²	4,000Cm ²	1m ²
전류 밀도(mA/Cm ²)	~240	~300	~200
단위스택 용량(KW)	50	200	670
스택기술 개발국	일 본	미 국	미 국

(3) 개발 체계

기술개발은 국가주도로서 DOE가 총괄하며 개발초기에는 인산연료전지의 개발은 항공우주국(NASA)의 Lewis Center가 주관하였으며 용융탄산염 연료전지기술은 ANL(argonne national laboratory)에서 주관하였으나 현재는 DOE 산하의 METC(morgantown energy technology center)에서 정부가 주도하는 모든 종류의 연료전지기술의 개발을 주관하고 있다.

(4) 기업의 역할

인산연료전지와 용융탄산염 연료전지 관련 기술은 이미 기업에 완전 이전되어 정부지원에 의한 개발과 GRI와 EPRI 지원의 기술개발에 참여하고 있다.

인산연료전지의 개발에는 IEC(미국의 UTC와 일본 東芝의 합자회사)와 Westinghouse/ERC가 주도하고 있으며 용융탄산염 연료전지는 IFC, ERC 및 M-C Power 회사가 주도하고 있다. 상대적으로 기초연구단계인 고체 전해질 연료전지는 Westinghouse가 주력하고 있으나 국가연구소와 대학에서도 전국개발을 추진하고 있다.

민간기업의 기술보유는 미국정부의 기술보호 정책의 일부로서 연료전지와 같은 최첨단기술의 타국으로의 이전을 거의 불가능하게 하는 주요 원인이 되고 있다.

4.3 일본의 기술개발 동향^(8,9)

1960년대부터 대학, 국가연구소 및 기업에서 기술개발을 추진하였으며 1972년부터는 동경가스회사와 대판가스회사가 미국의 TAR-GET계획에 참여하여 미국에서 개발된 신제품을 도입 운전하기 시작하였다.

정부주도의 자체 개발은 1973년 에너지과동 이후 통산성 산하의 공업기술원이 주도한 Sunshine계획에서 알칼리연료전지와 고체전해질연료전지에 대한 기반연구를 수행하였으며, 1981년부터는 Moonlight계획에서 장기 국책과제로 실용화 개발을 적극 추진하고 있다.

(1) Moonlight 계획

에너지절약을 위한 새로운 기술의 실용화를 목적으로 통산성 공업기술원 주관으로 추진되고 있는 본 계획에서의 연료전지개발은 표 5에 나타낸 바와 같다.

특수용의 알칼리연료전지는 1984년 출력 1KW 스택을 개발하여 시험한 바 있으며 일반 기술로서 실용화에 가장 근접된 인산연료전지는 1,000KW 발전소 2기가 개발되어 중부전력과 관서전력에서 각각 실증 시험되었으며 현지 설치용 200KW급 발전설비가 2기 개발되어 시험중에 있다. 용융탄산염 연료전지기술은 기반기술연구에 이어 10KW급이 시험된 바 있으며 1MW급 발전설비가 개발중이다.

Moonlight계획에서 1981~1990년 기간중에 연료전지기술의 개발을 위해 총280억 엔 규모의 연구개발비가 투입된 것으로 보고되고 있다.

(2) 기술개발 체계

국가주도의 연구개발은 통산성 공업기술원에서 주관한다. 기반기술의 연구단계에서는 대학이나 여러 국가연구소에서 연구를 수행하도록 공업기술원이 지원하며 기반 기술이 확보된 후의 실용화개발은 공업기술원 산하의 신에너지 산업기술 종합개발기구(NEDO)의 주관으로 기업주도의 기술개발을 추진하고 있다.

즉, Moonlight 계획에서 1970년대 기반기술이 확립된 인산연료전지는 1981년부터 NEDO

주관의 기업기술로 개발되었으며 용융탄산염 연료전지는 1984년부터 NEDO에서 주관하고 있다. 고체전해질 연료전지는 공업기술원에서 국가연구소 등으로 기반기술 연구를 계속 지원하였으며 금년부터 부분적으로 NEDO에서 주관하여 기술의 실용화 준비를 하고 있다.

(3) 민간기업의 역할

민간기업에서의 관련기술에 대한 개발투자는 매우 적극적으로 수행되고 있다. 대부분 중견 기기회사들이 업종 변경의 대상기술로 연료전지기술을 선택하여 개발을 추진하고 있으며 특히 東芝, 富士, 日立, 三菱, IHI, 日本鋼管, 三洋 등이 정부의 연료전지개발계획에 적극 참여하고 있다.

또한 기술을 직접 개발하는 여러 민간 기업 이외에 전력회사와 가스회사와 같은 민간기업들도 연료전지의 이용을 위하여 많은 연구개발비를 지원함으로써 일본에서의 관련기술의 실용화에 크게 기여하고 있다.

4.4 유럽의 기술개발^(8,9)

독일 Siemens 등에서의 특수용도의 연료전지개발을 제외하고는 미국과 일본의 기술독점에 대한 방어적인 개념에서 1980년대에 들어서 개발이 본격적으로 추진되었다.

네덜란드는 미국으로부터 25KW의 인산연료전지 스택을 도입하여 실험한 바 있으나 자체

표 5 일본의 연료전지 개발계획(Moonlight계획)

	1981	1983	1985	1987	1989	1991	1993	1995
인산형 (PAFC)	1,000KW 발전소		현지설치용 200KW					
용융탄산염형 (MCFC)	1KW	10KW			100KW급			1MW급
고체전해질형 (SOFC)	500W							
알칼리형 (AFC)	1KW							

개발을 용융탄산염 연료전지 개발에 주력하고 있다. 1986년부터 국가계획으로 추진하고 있는 용융탄산염 연료전지의 개발은 1989년에 1KW 스택을 개발한 바 있으며 현재 10KW급의 개발을 추진하고 있다.

이태리는 1986년부터 VOLTA계획을 수립하여 연료전지 자체 개발을 추진하고 있다. 1KW급 인산연료전지 스택을 개발한 바 있으며 미국 IFC의 스택으로 1MW급 발전소를 건설

중이다. 특히 국민투표에 의한 원자력발전소의 건설 반대는 연료전지기술의 개발을 적극 추진시키는 계기가 된 것으로 알려져 있다.

연료전지의 각 종류별로 각국의 기술 수준에 대한 비교는 표 6에 요약된 바와 같다.

5. 국내 기술개발 현황^(7,9,10)

전반적으로는 연구개발의 초기단계이나 최근

표 6 국가별 기술수준 비교(1991년)

	PAFC	MCFC	SOFC
미 국	11MW(P)/-	100KW(S)	5KW(S)
일 본	1MW(P)/11MW(P)	10KW(S)	500W(S)
독 일	-/-	10KW(S)개발중	개발중
이 태 리	1KW(S)/1MW(P)	50KW(S)추진	기초연구
네덜란드	- /25KW(P)	1KW(S)	기초연구
한 국	0.5KW(S)/5KW(P)	기초연구	기초연구

전류밀도(mA/cm²) ~300(美), ~240(日), ~170(韓)

○ (P) = 발전설비(plant), (S) = 연료전지본체(stack)를 표시하며, PAFC의 경우 A/B에서 A = 자국기술, B = 연료전지본체 도입을 의미함.

표 7 연료전지기술 관련 주요 국내 연구개발 현황

연구과제	기간	주요내용	수행기관	연구비지원
연료전지 기초실험 (인산형)	'85.12. ~'89.3	5KW급 발전설비 특성 실험(연료전지 수입)	동자연/한전	한국전력
*연료전지기술개발 (인산형)	'87.12. ~'93.10.	핵심 기반기술 확보 · 2KW 연료전지개발 · 개질기, 전력변환 기술 및 시스템기술	동자연 주관 (표준연, 과기원 서울 대, 연대, 충남대)	과기처, 국책사업
5KW급 발전설비 성능개선연구	'90~'92	5KW 발전설비 시스템 효율 개선	동자연	한국전력
*40KW급 실용화 개발(인산형)	'89.10. ~'93	40KW 발전설비 실용화	가스공사 주관 (호남정유, 유공 금성산전, 대학)	동자부, 대체에너지 사업
일반 대체에너지 개발사업	'89~	용융탄산염연료전지, 고체전해질연료전지 관련 기초연구	과기연, 고려대 포항공대 등	동자부, 대체에너지 사업

○ *는 범국가적 사업임(과기처/동자부)

2~3년 동안 연구인력의 확대와 함께 관련 기술의 개발에 대한 관심이 빠르게 확산되고 있다.

연료전지에 대한 본격적인 연구는 1985년부터 동자연·한국전력에서 5KW급 인산 연료전지발전설비 특성에 대한 연구가 수행된 바 있다. 직류추력 5.9KW의 일본 Fuji전기 제작의 공랭식 연료전지본체(스택)가 도입되어 동자연의 시험설비에 연결되어 1988년 6월 13일 국내에서는 최초로 발전에 성공하였으며 메탄올 연료개질기, 인버터, 운전을 위한 각종 제어장치 및 데이터 자동처리시스템 등이 국내에서 설계·제작되어 주변 기술에 대한 기술 축적과 연료전지시스템 종합기술에 대한 경험을 얻은 바 있다.

연료전지의 핵심기술인 전극을 비롯한 본체(스택)의 국내개발은 1987년부터 과학기술처 특정연구사업(현재는 국책사업)으로 추진되고 있으며 1989년부터는 동자부의 대체에너지 개발사업이 추진되면서 더욱 확산되고 있다. 현재까지는 한국에너지기술연구소(구 동력자원연구소)에서 30W급의 연료전지본체(스택)가 설계·제작되어 실험된 것이 가장 앞선 것으로 보고되고 있다.⁽¹¹⁾

국내에서의 연료전지기술 관련 주요 연구과제를 요약하면 표 7과 같으며 과기처, 동자부의 범국가사업의 추진 내용은 아래와 같다.

(인산 연료전지개발)

○메탄올 연료의 2KW급 개발로 기반기술 확보

- 동력자원연구소 종합관리 및 시스템종합
- 출연연구소, 대학이 협동연구

○천연가스 연료의 40KW급 실용화 추진

· 에너지관리공단 종합관리, 가스공사 시스템 종합

· 기업(유공, 호남정유, 금성산전) 주도 개발

6. 맺 음 말


에너지의 이용효율이 높으며 환경면에서 개

끗한 기술인 연료전지는 에너지 여건이 악화되고 지구환경 문제가 심각해 지면서 21세기의 중요 에너지 기술로서 더욱 부각되고 있다. 이러한 연료전지는 30여 년의 기술개발을 통해 1990년대 후반부터는 도심지의 전기와 열의 공급수단으로써 실용화될 것으로 전망되며 또한 도심지운행 시내버스의 동력원으로의 이용도 매우 밝은 전망을 갖고 있다.

90% 이상의 에너지를 수입하고 있으며, 석유 의존도를 낮추기 위해 천연가스의 도입을 확대하고 있는 국내의 경우 천연가스를 주연료로 하는 고효율의 새로운 발전기술인 연료전지 기술은 에너지절약과 환경측면에서 매우 유망한 기술이 될 것이다. 도입에 의한 이용과 에너지기술 자립측면에서의 과감한 기술개발 투자가 병행하여 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Kettani, M.A., 1970, "Direct Energy Conversion", Addison-Wesley, p. 222.
- (2) 최수현, 1981, 에너지연구, Vol.7, p.55.
- (3) Warshay, M., 1987, "Status of Commercial Fuel Cell Power Plant System Development", IECEC '87, Philadelphia.
- (4) Feerraro, V.D., 1986, "Field Experience with 40KW Fuel Cell Power Plant at Military Bases", Program and Abstracts, p. 18, Fuel Cell Seminar, Tucson.
- (5) Kato, N. 1990, PAC Test Operation of 11MW PAFC Power Plant at TEPCO Goi Therma 16 Power Station", Program and Abstracts, p. 264, Fuel Cell Seminar Phoenix, USA.
- (6) 최수현, 전기학회지, 제39권, 제1호, p. 18.
- (7) 최수현, 1991, "연료전지기술", 과기처 기술동향 발표자료.
- (8) 최수현, 최영희, 유상진, 김창수, 1987, 新發電技術開發을 위한 사전조사연구, 과학

- 기술처,
- (9) 최수현 외, 1990, 소출력 연료전지발전기 개발, 과학기술처.
- (10) WEC Reprot, 1990, "Fuel Cells-Current Trends and Future Prospects", World Energy Council, London.
- (11) 김창수, 최병우, 송락현, 한성욱, 최수현 1991, "인산형 연료 전지 30W급 스택제조 및 발전실험", 대한전기학회, 1991 하계 학술대회 논문집, p. 78. 

■ 국제학술대회 참가안내 ■

Third International Symposium on Magnetic Bearings/MAG '92—Magnetic Devices and Dry Seals Conference

장 소 : Alexandria, VA, USA

일 시 : 1992. 7. 29. —7. 31.

논문제출일정 : 초록제출마감(1991. 11. 1.)

논문제출마감(1991. 12. 1)

수락 통보(1992. 3. 1)

분 야 : Bearing Modeling ; Magnetic Circuits ; Analog/Digital Control ; Stability ; Unbalance Control ; Bearing Design ; Industrial Applications ; Rotor Dynamics ; Adaptive Control ; Sensors ; Diagnostics ;

연락처 : 문의사항이나 참가희망회원은 서울대학교 기계설계학과 한동철 교수(전화 : 880-7139)께 연락바랍니다.