

열병합발전 시스템과 에너지환경Ⅲ

-일본 열병합 발전 심포지움을 다녀와서-

글/도 유 봉(에너지관리공단 과장/기술사)

- 목 차 -

1. 서 론
2. 심포지움 동정
3. 현장기술 답사
4. 화학섬유 공장에서의 열병합발전 실적
5. 배기재연소형 산업용 Repowering System
6. 인산형 연료전지의 개발상황
7. 결 론

6. 인산형 연료전지의 개발상황

바. 연구개발 도입례

1) 전력사업용 연료전지 발전플랜트

A) NEDO(신에너지·산업기술종합개발기구) 프로젝트 : 1,000kW 플랜트

'81년부터 '87년까지 7년간에 걸쳐 "1,000kW급 인산형 연료전지 발전시스템의 연구개발"이 석유대체·생(省)에너지형 전원의 실용화를 목표로 하여 분산배치용(저온저압형)과 화력대체용(고온고압형)의 2기종이 개발되었다.

저온저압형은 전지의 작동압력 4kg/cm², 작동온도 190°C에서, 고온고압형은 전지의 작동압력 6kg/cm², 작동온도 205°C이다. 전지의 시방은 저온저압형은 2스택 직렬×2스택 병렬, 고온고압형은 4스택 직렬로 되어 있다. 1Cell당 전지특성의 설계치는 저온저압형이 200mA/cm²으로 0.72V, 고온고압형이 200mA/cm²으로 0.72V이다.

B) 동경전력 오정화력발전소 : 4.5MW 발전플랜트
뉴욕의 컨소리테트 에디슨사에 설치된 플랜트의 자매기로서 4.5MW급이 동경전력 오정화력발전소내에 설치되어 '83년부터 '85년에 걸쳐서 운전연구가 수행되어 왔다. 본 플랜트는 운전시간 24, 23시간, 발전량 540만kWh의 성과를 거두었고, 대용량기 개발의 가능성을 보여 주었다.

<표 3> NEDO 저온 저압형과 고온 고압형의 주요사항

구분	형식	저온 저압	고온 고압
	주요항목		
전지계	• 전지 작동 압력 (kg/cm ²)	4	6
	• 전지 작동 온도(°C)	190	205
	• 스택 전기 접속	2스택 직렬×2병렬	4스택 직렬
개질계	• 탈류 방법	물+산화아연	활성탄
	• 개질관 동작 압력 (kg/cm ²)	5.9	7
	• 개질관 동작 온도(°C)	820	800
	• 연소버너 압력 (kg/cm ²)	3.7	5.7
공기계	• CO변성기 동작 압력 (kg/cm ²)	5.5	6.9
	• 터빈·압축기 호출 압력		
	- 저압단(kg/cm ²)	1.3	1.7
	- 고압단(kg/cm ²)	4.3	6.2
냉각계	수중기분리기압력 (kg/cm ²)	65	81
교류변환계	인버터	500kVA×2대	1,000kVA×1대

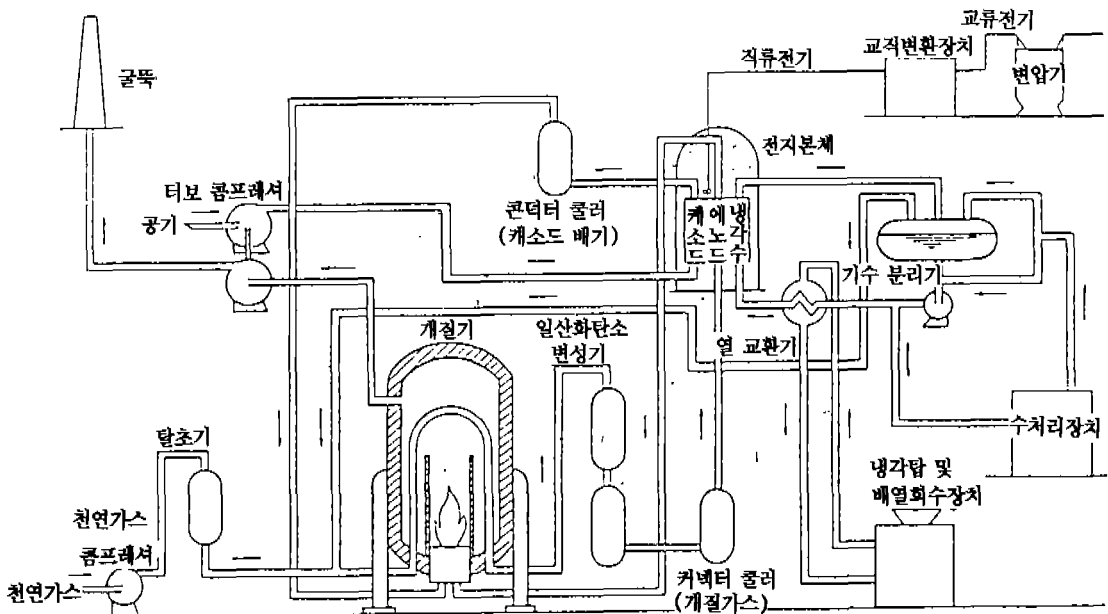
<표 4> NEDO 1,000kW급 발전플랜트의 운전실적

항 목	저온 저압형	고온 고압형
발전시간		
최장 연속 발전시간 (4스테)	[118시간(500~750kW)]	[440시간 (300kW)]
최장 연속 발전시간 (2스테)	[705시간(250~500kW)]	-
발전 전력량	697,151kWh	367,583kWh
발전 회수	40회	46회
발전단 효율 (1,000kW시, HHV)	37.1%	38.4%
(터빈압축기 효율을 보정)	(60%)	(69%)
플랜트 열간기동시간 (기동시의 개질 촉매 층 온도)	5시간 1분 (250℃)	4시간 20분 (359℃)
부하 추종성 (부하대)	±11%/분 (125~450kW)	±10%/분 (150~400kW)
정지시간	통상47분/긴급10초	통상60분/긴급10초
NO _x (1,000kW)	10ppm	8.5ppm
소 음 (A 레벨 : 1,000kW)	58~71dB	59~74.5dB

C) 동경전력 오정화력발전소 : 11MW 발전플랜트
본 플랜트는 도시개개발 지점 등에 이용하는 것을 목적으로 한 것으로, 도시바가 주계약자로서 플랜트 전체의 제작·건설·조정시험을 담당하고, IFC가 연료전지 본체를 제작한 것으로 DC모듈이라고 불리는 주요기기·배관부분과 주변설비·전기설비·제어 등으로 구성되어 있다.

DC모듈은 연료전지에 연료가스와 공기를 공급하여 직류전력을 발생시키는 플랜트의 핵심부분으로서, 전지본체 외에 원 연료인 천연가스로부터 수소를 생성하는 연료개질계, 반응공기를 공급하기 위한 공기처리계, 전지에서 반응열을 처리하여 그것을 열에너지로서 공급하는 열처리계로 구성되어 있다. 주변설비로는 천연가스·질소가스·수소가스·계장공기 등 플랜트에서 필요한 외부가스를 공급하는 장치나 수처리설비가 있으며, 또한 전기설비에는 연료전지가 발생하는 직류전력을 교류로 변환하는 교직변환 장치와 주변압기, 소내변압기 등이 있다. 표 5에는 본 플랜트의 설비개요를, 그림 5에 프로세스 흐름도를 나타낸다.

D) 도시에너지 센터형 5,000kW급 발전플랜트



<그림 5> 11MW발전 플랜트의 프로세스 흐름도

<표 5> 11MW 발전플랜트의 설비개요

플랜트 사양	장치 사양
<ul style="list-style-type: none"> • 정격출력 : 11MW(AC) • 연료 : 천연가스(LNG) • 출력전압 : 66kV • 주파수 : 50Hz • 전지냉각방식 : 수냉식 • 발전효율 : 41.1% (HHV·송전단) • 종합열효율 : 72.7% • 기동시간 : 8시간 • 운전방식 : 자동/수동운전 	<ul style="list-style-type: none"> ① 연료전지 <ul style="list-style-type: none"> • 스택 출력 : 670kW(DC) • / 분수 : 18분 • 작동압력 : 7.4kg/cmG • 작동온도 : 207°C ② 개질기 <ul style="list-style-type: none"> • 형식 : 다관식/가압연소방식 ③ 터보 콤프레서 <ul style="list-style-type: none"> • 형식 : 2축2단

'81년부터 시작된 문라이트 계획중에서 NEDO 1,000kW급 파일럿플랜트가 건설되었으며, 이 경험을 바탕으로 5MW 실증플랜트를 건설하기 위한 추진모체로서 인산형 연료전지발전 연구조합이 '91년 4월에 설립되었다. 이 플랜트는 후지전기가 설계·제작을 담당하였고, 도시에너지 센터용으로로서 관서전력 테크노랜드에 건설되어, '94년부터 전력은 계통에 연계하고, 배열은 야채공장이나 건물의 냉난방에 이용하면서 운전될 것이다.

이 플랜트는 가압형으로 발전효율 42% (HHV) 이상의 고효율을 목표로 하여 전동기구동 공기압축기로 전지반응용 공기를 공급하고, 미반응공기를 개질기 연소용으로 사용하며, 개질기 연소배가스로 소내용 가스터빈을 구동시킴으로써 공기압축기에서 소비된 전력을 회수한다. 전지 본체는 1분 860kW(DC)로서 세계 최대용량의 전지 스택 6분으로 구성되어 있고, 전류밀도 300mA/cm²에서 사방 1m인 대형 Cell이 사용되고 있다. 본 플랜트의 계획사양을 표 6에, 각 구성기기의 배치를 그림 6에 나타낸다.

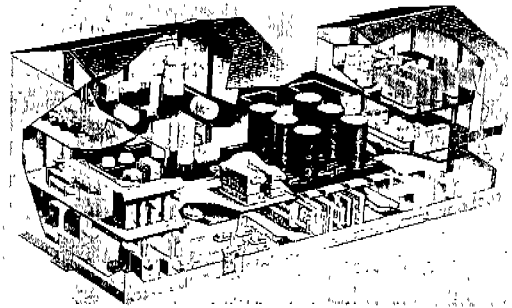
2) 자가발전용 연료전지 발전장치

자가발전용 연료전지는 호텔, 병원, 오피스빌딩 등

<표 6> 5MW 발전플랜트의 계획사양

형식	상압, 수냉식	연료	도시가스
전기출력	5MW(교류 송전단)	연간기동시간	30시간
	3상 60Hz 6,600V		
발전효율	42%이상(HHV)	부하변화속도	20%/분
동작압력	6kg/cmG	NO _x	10ppm 이하
열출력	중기, 고온수	설치면적	0.27㎡/kW

의 건물에 연료전지를 설치하여 발전을 하는 시스템으로 이제까지 가장 많이 제작·시험된 실적을 가지고 있다.



<그림 6> 5MW 발전 플랜트의 기기구성 배치도

A) 50kW/100kW 연료전지 발전장치

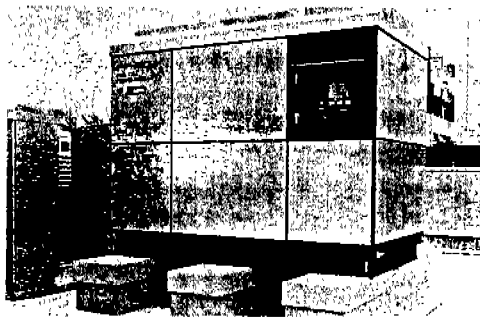
대형가스 3사는 후지전기와 공동으로 50kW, 100kW의 개발을 '89년에 개시하였다. 50kW기의 개발계획에서는 1차 시제품 및 2차 시제품을 가스회사의 연구시설에서 시험운전(Running test)을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 '92년부터 '93년에 걸쳐 양산시제품을 특정고객의 시설내에 설치하여 신뢰성운전(Feild test)을 행하고 있다. 표 7에 50kW/100kW 발전장치의 기본사양을, 그림 7에 50kW발전장치의 사진의관을 나타낸다.

<표 7> 50kW/100kW 발전장치의 기본사양

항 목	50kW기	100kW기
발전효율(LHV)	40%	40%
열출력(LHV)	온수(40%)	온수(15%) 중기(25%)
종합열효율(LHV)	80%	80%
운전방식	계통연계	계통연계
기동시간	15시간	20시간
NO _x (O ₂ =0%)	5ppm이하	5ppm이하
설치면적(㎡/kW)	0.11	0.08

(1) 발전장치의 운전

연료전지 발전장치의 운전에는 다른 발전플랜트와 전혀 다른 제어가 필요하다. 즉 내부에 수소를 제조하는 개질장치가 있으므로 운전상태로 하기 위해서는 각부의 온도나 압력을 조정하면서 공급하는 연료 가스량을 제어하지 않으면 안된다. 또 부하변화에 대응해서 수소나 공기의 공급을 추종시키는 등의 제어가 필요하다. 발전장치의 운전모드에는 정지·기동



<그림 7> 50kW 발전장치의 외관

·대기·단독운전·연계운전 등의 상태가 있고, 각 운전모드는 조작패널의 액정표시 화면에 나타나며 이러한 운전은 모두 전자동으로 행해지고 있다.

(2) 발전장치의 안전과 보호

발전장치의 이상이 발생한 경우, 안전과 장치의 파손을 방지하기 위해 보호시스템이 설치되어 있다. 보호의 검출로서는 각부의 온도, 개질기의 실화감지, 전지의 전압·전류, 증기나 급수계의 압력과 레벨, 순수의 전기전도 등이 있고 보호설정치에 도달하면 자동적으로 운전을 정지한다.

인버터는 보호속도가 빠르므로 보호정지를 독립적으로 하고 있으며, 방폭대책으로는 발전장치 패키지 내를 환기시키고 있으므로 장치내에 가연성가스가 만약 누설되어도 체류되지 않고 배출시킨다. 또한 장치내에는 가연성가스 감지기가 설치되고 있다. 그리고 옥내에 발전장치를 설치할 때는 실내의 환기가 필요하다.

(3) 발전장치의 보수

연료전지는 화학반응에 의하여 발전하는 정지형 발전장치이므로 보조기기인 Fan이나 Pump 이외에는 회전부분이 없고 보수가 용이하다. 냉각수계 등에 사용하는 순수를 제조하기 위한 이온교환수지는 2,000~3,000시간에서 교환이 필요하지만 배관계의 누설점검, 펌프·밸브류·보조기기류의 점검정비, 필터류의 청소, 열전대의 교환, 전지의 인산보급은 연 1회, 개질기의 촉매는 5년에 1회 교환하는 것이 좋다.

B) 200kW 연료전지 발전장치

업무용 200kW 연료전지 발전장치의 연구개발은 정부의 문라이트계획의 일환으로 NEDO에서 관서전력과 대판가스가 운전·연구를, 미쯔비시전기가 발전장치의 제작을 수탁받아 5개년 계획으로 개발되어

89년 7월부터 열병합발전 시스템으로 실증운전이 실시되었다.

(1) 발전시스템의 개요

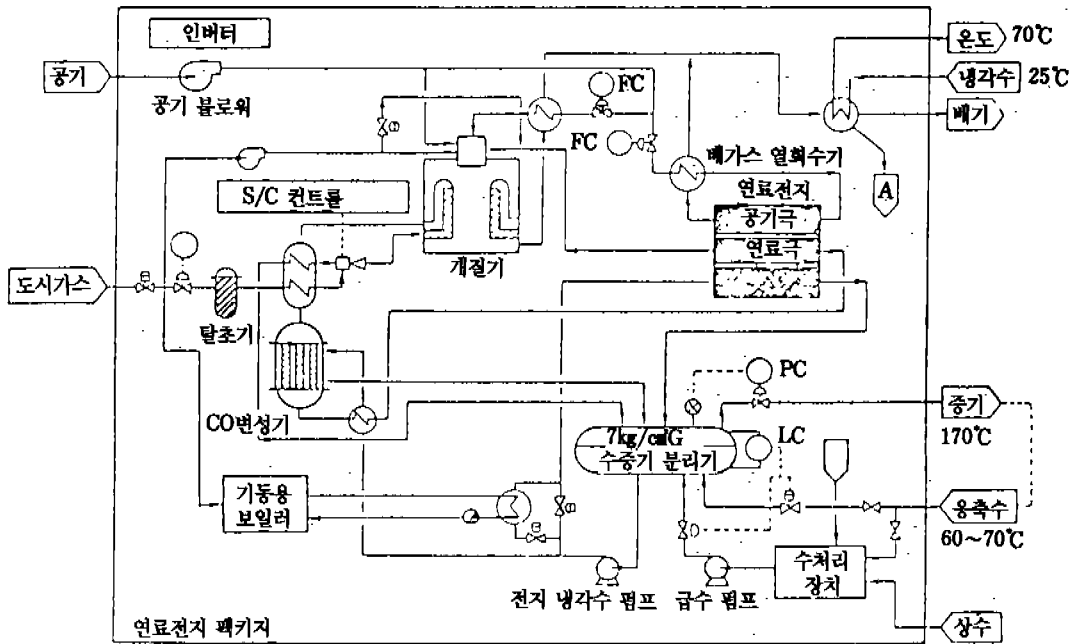
이 업무용 연료전지 발전장치 전체는 패키지 속에 수납되어 있다. 연료전지의 주요 사양을 표 8에 나타낸다. 연료는 앞으로 실용화를 고려하여 저압공급 도시가스를 사용하고 있다. 그림 8에는 장치의 주요 계통도를 나타낸다. 배열온도 조건으로는 2중 효율 흡수식냉온수기를 사용 가능하도록 배열온도를 170℃ 이상의 포화증기로 하고, 급탕에 이용되도록 저온 배열 70℃ 이상의 온수로 하고 있다.

<표 8> 업무용 200kW연료전지 발전장치 사양

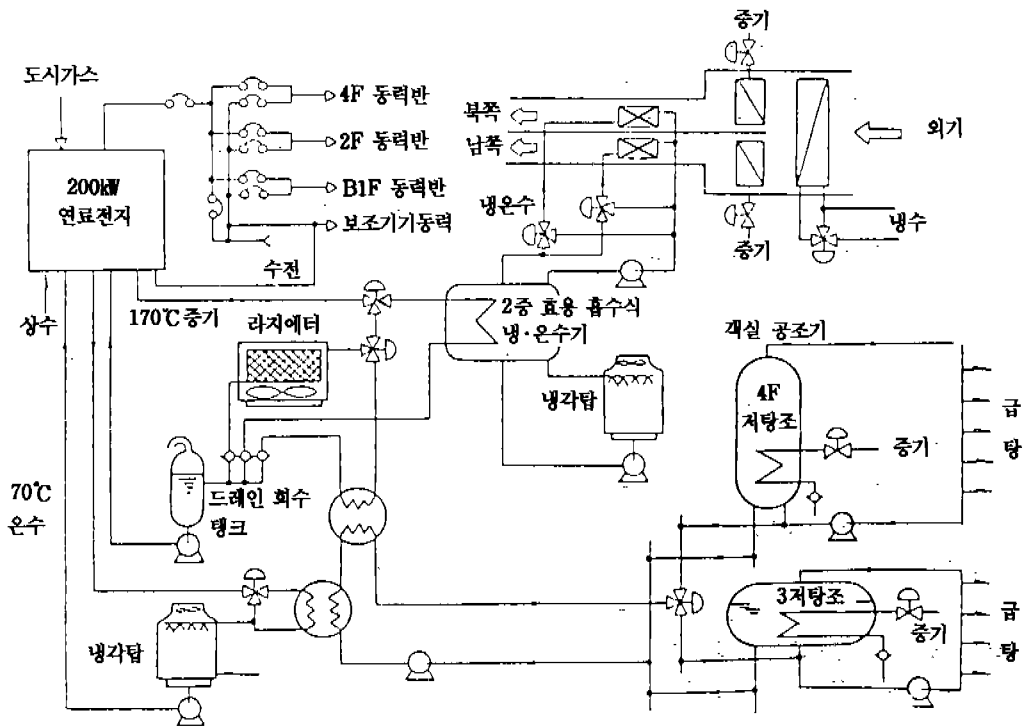
항 목	사 양
·형식	수냉식 인산형(상압) 전력·열병합형
·형태·치수	패키지형 10m(L)×3.1m(W)×3.2m(H)
·연료(압력)	저압 도시가스(100~250mmH ₂ O)
·발전출력	200kW(AC송전단)
·발전효율	36%(HHV)
·종합효율	80%(HHV)
·전압·주파수	440V, 3φ, 60Hz
·고조파	20%이하(계통연계시), 5%(단독 운전시)
·운전형태	무인에 의한 연속운전 가능 계통연계 운전 및 단독운전 가능(무정전 전환)
·기동시간	3시간 이하
·배열온도조건	고위 : 170℃이상, 저위 : 70℃이상
·환경성	범람 기준치 이상

(2) 200kW 연료전지 발전장치의 열병합시스템

연료전지를 주체로한 열병합시스템의 구성을 그림 9에 나타낸다. 발생전력은 전력계통(440V)에 접속한 계통연계 운전을 주로하고 있지만 부하를 선택하여 단독운전도 가능하다. 연료전지에서의 열회수는 고온배열과 저온배열 2가지로 구분하며, 고온배열은 170℃의 포화증기(정격운전시 약88Mcal/h)로서 배내어 2중 효율 흡수식냉온수기(20냉동톤×2)에서 냉열로서 회수하여 호텔객실 약140실의 베이스(Base)공조에 이용된다. 저온배열(정격운전시 약 120Mcal/h)은 70℃의 온수가 열교환기를 통하여 저장조에 공급하여 주방용과 객실용으로 사용되며, 1일 수요량을 선택하여 열회수가 가능한 시스템으로 되어 있다. 이 호텔은 객실수 535실, 계약전력



<그림 8> 200kW 연료전지 발전장치의 주요 계통도



<그림 9> 200kW 연료전지 발전장치 열병합 발전 시스템 개요

2,200kW로서 이 연료전지에 의하여 호텔전체 전력의 약10%, 열수요의 5%를 담당하고 있다.

(3) 운전연구실적

① 운전경과 : '91년 10월말까지의 누적발전 시간은 13,002시간 47분, 누적송전 전력량은 약180만 kWh이다. 송전단 효율은 36%, 고온배열 회수효율은 18%, 저온배열 회수효율은 26%로서 종합효율은 80% (HHV기준)이다. 표 9에 본 발전장치의 운전 실적과 운전성능을 나타낸다.

② 운전제어성 : 발전설비의 기동·정지 시퀀스는 보터 조작에 의한 자동화로 이루어지고, 운전중의 감시도 자동으로 되어 무인운전이 가능하다.

<표 9> 200kW 연료전지 발전장치의 운전실적과 성능

운전 실적	· 누적 발전 시간	13,002시간 47분
	· 최장 연속 발전 시간	2,656시간 46분
	· 송전단 전력량	1,793,000kWh
	· 기동회수	60회
운전 성능	· 발전효율(HHV 기준)	36.0%
	· 종합열효율(HHV 기준)	80.2%
	· 열회수 :	
	저온배열 70℃온수	26.1%
	고온배열 170℃증기	18.1%
	· 기동시간(냉간기동)	3시간
	· 배가스 중 질소산화물	4ppm(O ₂ : 7%)
· 고조파(전압 종합 왜율)	0.4%(계통 연계시)	

③ 보수성 : 보수면에 대해서는 2개월에 1회정도 수처리장치의 이온교환수지와 필터류를 교환하는 외에는 연 1회의 정기점검(배관의 청소, 필터의 교환, 조정밸브 및 계장기기의 점검·조정 등)을 행하는 정도로 충분하다.

3) 차량용 연료전지

자동차의 배기가스에 의한 대기오염이 커다란 사회문제로 대두되고 있으므로 청정한 배기가스·저소음·고효율의 연료전지를 차량의 구동전원으로 이용하는 전기자동차의 개발이 기대되고 있다. 차량용의 연료전지로서는 연료의 취급(저장·수송)과 운전이 용이하고, 컴팩트하며 안전성이 높을 것이 요구된다.

5kW 포크리프트용 전원으로로서 개발한 기술을 토대로, 미국 에너지성의 연료전지버스 프로젝트를 참고하여 25kW시험용 연료전지를 제작하였으며, 현재 차량탑재용의 50kW발전시스템을 개발하고 있다. 이 프

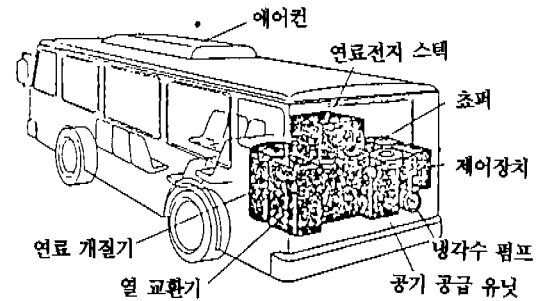
젝트는 엔진차량 특히 디젤차의 공해대책으로서 메타놀을 연료로 한 인산형 연료전지와 배터리의 하이브리드식 전기버스를 개발하는 것으로 '96년까지 노선버스로서 시작품을 완성시키는 것으로 되어 있다. 이 개발에는 후지전기 이외에 버스메이커·배터리메이커가 참여하고 있고, 엔지니어링 회사가 종합하여 수행하고 있다. 표 10에 버스용 50kW연료전지 발전장치 시방을, 그림 10에 연료전지 탑재버스의 구상도를 나타낸다.

사. 연료전지의 상품화와 시장도입으로의 과제

연료전지를 상품화하는 데 해결할 과제로서 연료전지 발전장치의 신뢰성 향상·조작성·보수성 향상 및 코스트 절감을 도모할 필요가 있다. 특히 신뢰성 향상 및 코스트 절감을 도모하는 것이 급선무이다.

<표 10> 버스용 50kW 연료전지 시방

설치출력	50kW
효율	30%(LHV)
연료소비량	23.6kg/h (메타놀)
순수소비량	20.0kg/h
기동시간	25분 이내
사이즈(mm)	1,300(L)×2,100(W)×1,450(H)
중량(kg)	1,200



<그림 10> 연료전지 탑재 버스의 구상도

1) 신뢰성의 향상

현재 연료전지 발전장치는 여러 군데에서 신뢰성 시험이 실시되고 있으며, 운전시간이 15,000시간을 넘는 것도 있지만, 전지의 개발목표치인 40,000시간의 수명이 확인된 플랜트는 없다. 이제까지 연료프로세스계, 전기계, 밸브·계장품 등 각종 초기고장을

경험으로 개량해 왔기 때문에 운전기간이 길어질 수록 고장빈도가 감소하고 있지만 개발목표를 달성시키기 위해서는 신뢰성 향상을 한층 더 도모할 필요가 있다.

2) 코스트 저감

A) 현재의 코스트

자가발전용 50kW 및 분산전원용 11MW의 인산형 연료전지 발전시스템의 코스트 비교를 표 11에 나타낸다. 본체가격이 전체 코스트의 50% 가까이를 점하고 있고, 그 태반은 전지의 주구성 재료인 카본재료의 코스트 저감이 강하게 요구되고 있다. 또 보조기기, 열교환기, 파이프 등의 주변기기도 전체의 16~18%를 점하고 있어서 가일층 표준화·복합화·간소화 등이 필요할 것으로 생각된다.

<표 11> 인산형 연료전지 발전 플랜트의 내역

구 분	50kW	11MW
본 체	45%	42%
개질장치	7%	17%
보기, 열교환기, 배관	18%	16%
인버터, 전기장치	7%	8%
제어장치	8%	9%
제작, 설치, 조정	15%	8%
합 계	100%	100%

B) 코스트 저감 대책

연료전지 발전시스템과 경합하는 다른 발전시스템의 코스트에 비해 훨씬 높기 때문에 도입보급을 도모하기 위해서는 인산형연료전지 발전시스템의 kW당 코스트는 25만엔 정도로 고려되고 있다. 이것을 목표로 한 코스트 저감 대책을 표 12에 나타낸다.

아. 연료전지 발전장치의 금후전망

최근의 에너지정책, 지구환경문제가 고조되어 가고 있는 가운데 수요지에 근접 설치할 수 있는 분산전원, 열병합발전원으로서 연료전지의 조기실용화가 강하게 요망되고 있다. '90년 6월에 발표한 종합에너지조사회 및 전기사업심의회의 보고를 기본으로 하여 상정된 분산형전원 도입량에 있어서도 연료전지는 2,000년에 225만kW, 2010년에는 1,070만kW가 계획되어 있어 신에너지 중에서 가장 기대가 큰 것으로 되어 있다. 표 13에 연료전지 도입 상정량을 나타낸다. 도입형태를 보면 2,000년까지 인산형이 주체로서 전기사업용으로서 도시재개발지점, 대형

뉴타운 등의 열병합발전 가능지점에 분산전원으로서 자가발전용은 호텔·병원·오피스빌딩 등의 소형 열병합시스템 도입의 추진이 고려되고 있다.

2010년에는 용융탄산염형이 실용화되어 도심지에서의 노후화력 대체전원으로서 도입됨과 아울러 인산형도 계속 전기사업용 분산전원, 자가용 열병합발전용으로 도입될 것으로 보여진다. 그러나 이 연료전지 도입량을 확실하게 달성하기 위해서는 도입초기에 있어서 정부의 경제적 지원, 제도면에서의 환경정비 등이 강력하게 요망되고 있다.

<표 12> 코스트 저감 대책

소프트면의 대책	하드면의 대책
<ul style="list-style-type: none"> 전지의 표준 계열화 모듈방식의 채용 	<ul style="list-style-type: none"> 전지성능 향상 등 기술확립 시스템의 간소화, 복합화 셀소재·기타 재료 코스트 저감 표준화 제조기술의 향상(양산화)

<표 13> 연료전지 도입 상정량

구 분	2,000년도	2010년도
인산형 연료전지	225만kW	1,070만kW
내역	전기사업용	550만kW
	자가발전용	520만kW

7. 결 론

필자가 근무하고 있는 에너지관리공단 집단에너지사업본부의 주요업무는 1) 공업단지 열병합발전 도입촉진지원, 2) 지역난방 및 폐기물에너지 자원화 확대, 3) 산업체 및 건물의 열병합발전 유도, 4) 국내의 공업단지와 지역난방사업을 열병합발전방식에 의하여 시범적으로 추진하고 있으며, 집단에너지 공급효과로는 1) 에너지이용 효율향상에 의한 대규모 에너지절약(20~30%), 2) 대기오염 배출원의 집중관리로 대기환경개선, 3) 가연성폐기물 및 폐열의 효율적이용, 4) 발전설비 용량증대로 전력안정공급을 꼽을 수 있다.

향후 세계 각국의 에너지정책은 지구환경문제에 적극적으로 대처하기 위한 에너지 소비절약과 환경오염이 없는 대체에너지 기술개발에 더욱 심혈을 기울일 것이며, 이에 따라 열병합발전 분야도 청정연료인 천연가스를 사용한 열병합발전 시스템이나 연료전지(Fuel cell)를 이용한 열병합발전 시스템적용의 확대가 예상되고 있다.