

가정용 고분자연료전지 시스템의 운전 방법에 따른 성능 비교

이원용[†], 정귀성^{**}, 유상필^{*}, 엄석기^{*}, 김창수^{*}

*한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단, **현대자동차

Operation Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell Cogeneration System for Residential Application

W.Y. Lee[†], K.S. Jeong^{**}, S.P. Yu^{*}, S.K. Um^{*}, and C.S. Kim^{*}

*Fuel Cell Research Center Korea Institute Energy Research, **Hyundai Motor

ABSTRACT

Fuel cell systems(FCS) have a financial and environmental advantage by providing electricity at a high efficiency and useful heat. For use in a residence, a polymer electrolyte fuel cell system(PEFCS) with a battery pack and a hot water storage tank has been modelled and simulated. The system is operated without connection to grid line. Its electric conversion efficiency and heat recovery performance are highly dependent on operation strategies and also on the seasonal thermal and electric load pattern. The output of the fuel cell is controlled stepwise as a function of the state of the battery and/or the storage water tank. In this study various operation strategies for cogeneration fuel cell systems are investigated. Average fuel saving rates at different seasons are calculated to find proper load management strategy. The scheme can be used to determine the optimal operating strategies of PEFCS for residential and building applications.

주요기술용어 : Polymer Electrolyte Fuel Cell(고분자연료전지), Operation Strategy(운전 방법)

1. 서 론

지구온난화 가스와 환경오염에 대한 규제가 강화되고 있으며 한정된 자원에 의해 유가상승이 예측되고 있어 친환경적이며 에너지 변환효율이 높은 발전 시스템에 대한 관심이 증대되고 있다.

[†] Corresponding author : WY82LEE@kier.re.kr

이와 같은 기대를 충족시킬 수 있는 최적의 대안으로 연료전지가 전 세계적으로 경쟁적으로 개발되고 있다. 연료전지는 높은 에너지 변환효율과 환경 친화성, 에너지 공급원의 다원화, 수소 사회 대비 등의 다양한 장점을 가지고 있다. 현재 연료전지시스템은 대규모의 발전 설비보다는 5kW 이하의 주택용과 200kW급 분산전원용으로 전력과 열을 동시에 공급할 수 있는 열병합 시스템으로 집중적으로 개발되어 실증 운전되고 있다. 본 논문

문은 독립적으로 운전되는 가정용 고분자 전해질 연료전지 시스템의 제어 전략을 확립위한 것으로 코제너레이션으로서의 연료전지 시스템 설계 및 구성에 관한 연구는 Wallmark^{1,2)}, Inaka³⁾ 등에 의해 수행되었으며 실증 운전에 대해서는 Hamada⁴⁾ 등에 의해 수행되었다. Mehmet⁵⁾는 미국의 대표적인 기후 조건과 전기히터 등 미국의 사용조건에 맞는 종합 에너지 시스템을 구성하여 연료전지 시스템 및 열저장조 온도에 따른 운전 방법을 설정한 후 열 해석 위주로 가정용 코제너레이션 연료전지 시스템의 계절별 성능을 분석하였다. 본 논문에서는 연료전지와 축전지 복합전원으로 설계된 고분자 전해질 연료전지 코제너레이션 시스템의 온도 조건과 축전지 상태 등에 의해 결정되는 운전 방법에 따른 시스템의 계절별 성능을 분석하였다. 연료전지는 1.5kW급 고분자 전해질 연료전지스택을 중심으로 개질기 전력변환기 등으로 구성되어 있으며 계통선과 연계없이 독립 운전을 위해 축전지와 하이브리드로 구성하였으며, 열저장을 위해 300ℓ 정도의 열저장조가 연결되어 있다. 연료전지에서 발생하는 열과 전기를 최적으로 이용하기 위한 운전 방안을 찾는 것이 본 논문의 목적으로 주어진 단위 주택의 계절별 부하 패턴에 따른 다양한 운전 방법을 비교 분석하였다.

생시하게 된다. 직류전기는 축전지에 저장하거나 인버터에서 교류로 변화되어 부하전력으로 사용하게 된다. 열에너지를 이용하기 위해서 온수탱크와 열교환기를 설치하였으며, 겨울철과 같이 열에너지의 수요가 많은 경우를 위해 별도의 보조 가스버너가 설치되어있다. 연료전지/축전지 복합시스템은 구성과 운전제어 시스템이 복잡해지는 단점은 있지만 부하를 분담하여 연료전지와 축전지를 효율이 높고 안정된 영역에서 작동시킬 수 있는 장점이 있어 전체 효율과 신뢰성을 향상시킬 수가 있다. 또한 기존의 계통선에 연계시키지 않고 독립적으로 운전하기 위해서는 시동과 정지에 필요한 에너지 공급과 빠른 전기 부하 추종을 위해 축전지가 필요하다.

2.2 연료전지 시스템 해석

고분자 연료전지/축전지 복합시스템의 성능은 연료전지 본체뿐만 아니라 압축기 등의 주변 설비의 성능에도 크게 좌우될 수 있으므로 설계 및 운전기술 개발단계에서 전체 설비의 종합적인 구성과, 구성된 설비의 성능을 예측하는 것이 필요하다. 고분자 전해질 연료전지의 경우 실제로 연료전지 본체만을 고려할 경우 전기 변환효율이 약 40~60% 정도로 매우 높다. 그러나 부속 설비의 동

2. 연료전지 시스템 구성 및 해석

2.1 가정용 연료전지 시스템 구성

본 연구의 주택용 연료전지 코제너레이션 시스템은 Fig. 1과 같이 1.5kW급 연료전지 스택 이외에 연료변환설비인 개질기(Steam reformer)와 전력변환설비인 DC/DC 변환기와 인버터, 그리고 온수 탱크와 연계된 냉각설비 등으로 구성되어 있다. 이들 설비들이 연료전지 특성에 맞게 설계되고 연계되어 운전될 때 연료전지의 장점인 고효율을 유지할 수 있다. 연료변환장치는 천연가스와 같은 연료를 수소로 전환시켜주는 장치이며, 압축기 혹은 송풍기에 의해 공급되는 공기 중의 산소가 연료전지에서 전기화학반응을 일으켜 직류전기를 받

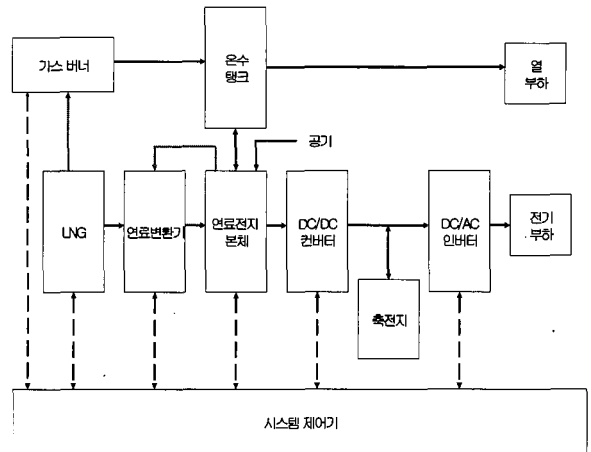


Fig. 1 Fuel cell cogeneration system.

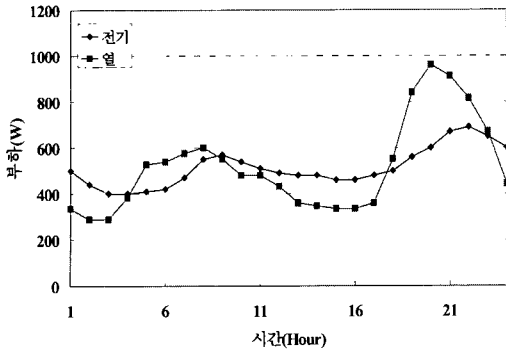


Fig. 2 Energy use in the Spring(Fall) for a single family residence.

력 등을 고려할 경우에도 최대 35% 정도로 낮아져 시스템의 구성은 물론 운전 방법에 영향을 받으므로 종합화된 시스템 측면에서 해석할 필요가 있다.

본 연구에서의 연료전지 코제너레이션 시스템은 가정에서 열과 전기를 동시에 사용하는 경우에 독립적으로 외부의 계통 연계 없이 운전되는 것을 기준으로 하였다.

가정용 연료전지는 도시가스를 연료로 이용하기 때문에 수소를 생산하기 위해 개질기가 사용된다. 연료전지의 전기화학적 반응에 비해 수소 생산을 위한 개질기의 반응이 느려 소규모 시스템의 경우 부하에 대응하여 연속적인 운전이 어려우며 2단계내지 4단계 정도의 단계적인 부하운전을 수행하게 된다. 본 연구에서도 부하 운전 범위를 10%에서 100%까지 4단계로 나누어 운전되는 시스템을 해석하였다.

해석을 위하여 외부부하로서는 가정에서 필요

Table 1 Energy Demand for 4 seasons.

구분	봄·가을철		여름철		겨울철	
	전기	열	전기	열	전기	열
총부하 (kW)	12.3	12.4	12.5	7.3	12.3	44.6
평균부하 (kW)	0.51	0.52	0.52	0.3	0.51	1.86

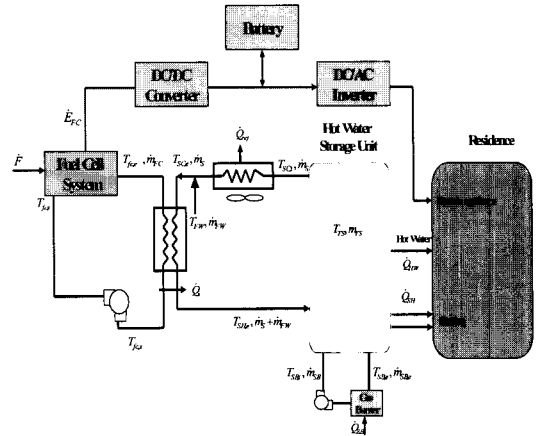


Fig. 3 Schematic of the fuel cell cogeneration system.

로 하는 열과 전기 부하 패턴을 사용하였으며 시스템의 종합 열효율을 성능지수로 고려하여 최적의 운전방법을 결정하였다.

본 연구에서는 24평형 주택의 계절별 전기 및 열에너지 사용량을 입력으로 하여 시스템을 해석하였으며 운전방법에 따른 효율을 비교 평가 하였다.

Fig. 2는 봄·가을철의 전기에너지 및 열에너지의 사용 형태를 나타낸 것이고, Table 1은 계절별 하루의 전기 및 열에너지의 사용량과 평균 열 및 전기 부하를 나타낸 것이다. 평균적인 전기 사

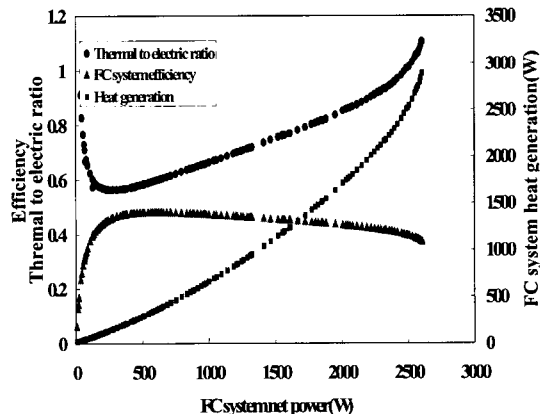


Fig. 4 Fuel cell performance.

Table 2 Operating strategy for the thermal energy system.

번호	저장조 온도	설명
1	$T_{ts} < T_{hwx}$	가스보일러 작동, 연료 전지 발생열 전부 열교환
2	$T_{hwx} < T_{ts} < T_{fcx}$	가스보일러 작동중지, 연료 전지 발생열 전부 열교환
3	$T_{fcx} < T_{ts}$	가스보일러 작동 중지, 연료 전지 발생열 일부 열교환, 연료전지 나머지 발생열 제거

용량은 계절별로 큰 차이가 없으나 열사용에 있어서는 차이가 큰 것을 알 수 있다. 연료전지 시스템 해석을 위하여 계절별로 하루 주기의 열 및 전기부하 형태를 시간단위로 입력하여 부하자료로 사용하였다.

연료전지 코제너레이션 시스템을 Fig. 3과 같이 구성하여 해석하였다. 사용될 연료전지, 축전지, 온수 탱크 등의 운전 범위를 결정한 후, 축전지의 상태 및 온수의 온도를 기준으로 연료전지의 운전 조건을 결정하였다. 열 및 전기 부하를 입력하고, 연료전지의 작동 조건에 따른 연료전지, 축전지, 전력 변환기 등의 운전 조건 및 손실 에너지를 계산하였다. 온수의 온도를 기준으로 열 부하와 연료전지 발생열의 비교를 통해 냉각기에 의한 열 방출이나 보일러의 작동 여부를 결정한 후 열적인 계산을 하였다. 온수 사용량과 난방에 필요한 에너지에 대한 자료는 구분하지 않았다. 연료전지의 작동 온도 및 연료전지 냉각수의 온도 자료를 계산하지 않고 연료전지에서 발생한 모든 열은 열교환기를 통해 온수의 에너지로 회수된다고 가정하였으며 가스버너로 열에너지가 입력되면 온수탱크의 온도가 상승하는 것으로 계산하였다. 온수탱크의 온도가 설정값 이상이 되면 방열기를 통해 설정값을 유지하도록 스택에서 발생한 열은 모두 방출 되는 것으로 계산하였다. 연료전지에서의 열과 전기 발생량의 관계는 Fig. 4와 같다.

Table 2는 온수 탱크의 온도(T_{ts})에 따른 보조

Table 3 Operating Strategy for the fuel cell system Depending SoC and T_{ts} .

조건	축전지 충전상태(SoC)	온수탱크 온도	시스템 작동율(%)	
			I	II
1	$SoC < 0.5$		100	100
2	$0.54 \leq SoC \leq 0.55$		80	70
3	$0.64 \leq SoC \leq 0.65$		60	40
4	$71 < SoC$		10	10
5	$SoC < SoC_{hm}$	$T_{ts} < T_{lts}$	100	100
6	$SoC_{lm} < SoC$	$T_{ts} > T_{hts}$	10	10
7	else		기존출력 유지	

보일러의 작동조건 및 연료전지의 냉각을 위한 방열기의 작동 조건을 요약한 것이다.

2.3 부하 운전제어 방법

본 논문은 주어진 연료전지 시스템에서 운전방법에 따른 종합 효율을 비교하여 정격상태가 아닌 평균적인 운전효율을 높일 수 있는 연료전지 제어방법을 찾기 위한 것이다.

외부 전력계통과 연계되지 않는 독립적인 시스템이므로 연료전지의 전력을 저장하고 시동이나 급격한 부하 변동시 등에 사용할 수 있는 전기저장장치로서 축전지가 있어야 한다. 부하 변동에 대응하여 전기에너지를 항상 공급할 수 있도록 축전지는 적절한 충전상태를 유지하도록 연료전지 하이브리드 시스템이 운전되어야 한다. 열에너지의 경우에도 전기가 많이 사용되는 시간대와 열에너지가 필요한 시간이 일치하지 않기 때문에 열저장탱크를 이용하여 저장해 두어야 한다. 가정용 연료전지가 가장 활발하게 개발되고 있는 일본의 경우 열저장탱크 용량이 일반적으로 150-300l 정도로 제작되며⁶⁾ 본 논문에서는 한국의 겨울철을 고려하여 비교적 용량이 큰 300l 정도로 설계하였다. 겨울철에 필요한 열을 보충하기

위해 보조 버너가 설치되어 있다. 연료전지는 여름철의 전기 사용량을 고려하여 사계절 평균부하보다 많은 1.5kW급으로 설계되었으며 침두부하를 고려하여 정격상태에서 축전지와 동시에 3kW 출력을 낼 수 있도록 하였다. 열관리를 위해선 겨울철에 열이 모자라는 경우에는 보일러를 작동하여 온수 저장조의 온도를 조절해야 하며 여름철의 경우에는 열교환기를 통해 열을 방출시켜 스택의 온도를 일정하게 유지시키도록 하였다. 외부와의 계통연계 없이 독립적인 시스템으로 운전되기 때문에 축전지의 정상적인 운전 범위에서는 온수 저장 온도를 기준으로 설정온도 이하로 내려가면 연료전지의 출력을 증가시켜 열 발생량을 올려서 온수의 온도를 상승시킬 수 있으며 이 경우 외부의 전기부하 이상으로 생산된 전기는 축전지에 저장된다. 반대로 온수 저장조의 온도가 설정온도 이상으로 상승하면 연료전지의 출력을 낮추어 별도의 방열기 작동 없이 연료전지의 열 발생량을 줄여 온수조의 온도를 낮출 수 있다.

온수의 온도만을 기준으로 연료전지의 운전 조건을 결정하는 경우에는 항상 축전지의 충전상태가 일정 범위 내에 있을 경우에 가능하며 축전지가 과충전되거나 과방전되면 축전지의 충전 상태를 기준으로 연료전지의 운전 조건을 조절하여야 한다. 이러한 조건들을 고려하여 축전지 충전상태 및 온수 온도를 기준으로 연료전지의 출력을 조절하는 방법

을 Case별로 요약한 것 Table 3, 4, 5, 6 이다.

case 1과 case 2 는 온수탱크의 온수 온도가 일정한 범위 내에 있을 경우 축전지의 충전 상태만을 기준으로 하여 연료전지 출력을 제어하는 운전 방식이다. 온수 탱크의 온도가 한계값을 벗어나지 않는 정상 범위 내에 있을 때에 축전지 충전상태가 낮으면 연료전지 출력을 높이고 충전 상태가 높으면 연료전지 출력을 낮추는 방식으로 운전하는 방식이다. 온수의 온도는 한계값을 벗어나는 경우에만 연료전지 출력을 제어하는 신호로 사용한다.

case 3과 case 4는 온수 탱크의 온도와 관계없이 연료전지의 출력조건을 축전지의 충전 상태만을 기준으로 결정하는 것이다. case 5와 case 6은 축전지의 충전 상태가 기준 범위에 있을 때는 연료전지의 운전 조건은 온수의 온도에 의해 결정된다. 축전지의 충전 상태가 기준 보다 낮으면 연료전지 출력을 증가시켜 충전지를 충전하고 축전지 충전 상태가 기준 보다 높으면 연료전지 출력을 감소시켜 축전지 충전상태를 낮추는 방법이다.

case 7은 축전지의 충전 상태와 온수탱크의 온도를 동시에 입력으로 하여 연료전지의 출력을 조절하는 방법이다.

2.4 시스템 해석 결과

Table 4 Operating Strategy for the fuel cell system Depending battery SoC

조건	축전지 충전상태(SoC)	연료전지 시스템 작동율(%)	
		case III	caseIV
		1	SoC<0.5
2	0.54<=SoC<=0.55	80	70
3	0.64<=SoC<=0.65	60	40
4	71<SoC	10	10
5	else	기존 출력 유지	

Table 5 Operating Strategy for the fuel cell system Depending SoC and T_{ts}.

조건	축전지 충전 상태	온수탱크 온도	연료전지 시스템 작동율(%)	
			case V	case VI
1		T _{ts} <59	100	100
2		59<T _{ts} <=60	80	70
3		60<T _{ts} <=62	60	40
4		62<T _{ts}	10	10
5	SoC<50		100	100
6	71<SoC		10	10
7	else		기존 출력 유지	

Table 6 Operating Strategy for the fuel cell system Depending SoC and T_{ts} (case 7).

축전지 충전 상태 온수 탱크온도	SoC <=0.4	0.4<=	0.5<=	0.6<=	0.7<=
		SoC <0.5	SoC <0.6	SoC <0.7	SoC
$T_{ts}<60$	100	100	80	80	10
$60\leq T_{ts}<61$	100	80	50	50	10
$61\leq T_{ts}<62$	100	80	50	10	10
$62\leq T_{ts}$	100	50	10	10	10

Table 7은 연료전지 부하 조절 알고리즘에 따른 전체 시스템 해석 결과를 정리한 것이다. 전체 효율은 보일러의 작동까지 포함한 시스템의 효율을 계산한 것이며, 연료전지 시스템 효율은 보일러의 열에너지 공급량 및 효율을 배제한 것으로 연료전지, 축전지, 전력변환기 등이 포함된 시스템의 성능을 나타낸다. 전체 시스템 효율은 보일러에서 공급되는 에너지 비율이 큰 겨울철이 가장 높았다. 이는 보일러의 효율이 85%로 연료전지 시스템의 효율에 비하여 높은 값을 유지하기 때문이다. 연료전지 시스템의 효율은 봄과 겨울철이 63%정도로 높고, 여름철은 열에너지의 사용량이 전기에너지에 비하여 적기 때문에 연료전지를 냉각하기 위해 연료전지에서 생성된 열을 대부분 방출하기 때문에 상대적으로 낮다. 연료절감율은 봄·가을철이 가장 높고, 전체 시스템 효율은 겨울철에 가장 높고 및 연료전지 시스템의 효율도 높지만 연료 절감율은 여름철에 비하여도 높지 않다. 봄철은 전기에너지와 열에너지의 소비가 1:1정도로 고분자 연료전지 시스템의 출력 특성과 비슷하다. 그러므로 연료전지에서 냉각을 위해 외부로 방출되는 에너지가 없고, 열에너지를 공급하기 위해 외부에서 열을 공급하지 않아도 되기 때문에 연료 절감율이 높게 나타난다.

겨울철은 전기에너지에 비해 열에너지의 비율이 높기 때문에 연료 절감율이 크지 않다. 봄·가

Table 7 Efficiency and energy saving rate for different operating strategies(%).

구분	계절	I	II	III	IV	V	VI	VII
전체 효율	봄·가을	64	64	65	67	64	64	64
	여름	51	57	57	60	53	55	61
	겨울	77	72	74	76	75	74	74
연료전지 시스템 효율 (보일러제외)	봄·가을	64	64	63	62	64	64	64
	여름	51	57	57	60	53	55	61
	겨울	63	63	64	65	63	63	64

을철의 경우 case 3과 4가 보일러를 포함한 전체 시스템의 효율은 우수하나 보일러를 제외한 연료전지 시스템만의 효율을 고려할 경우에는 case 7이 가장 우수하다. case 3, 4와 달리 case 7의 경우에는 봄·가을에 보일러가 전혀 작동되지 않은 상태로 운전된 것이다.

봄·가을은 적용된 모든 부하 조절 방법에 대해 시스템효율은 62%이상, 연료 절감율은 13%이상으로 나타났다. 여름철의 경우는 운전 방법에 따라 시스템 효율 및 연료절감율의 차이가 크다. 온수탱크의 온도와 축전지의 열을 모두 고려하여 연료전지의 출력을 조절하는 case 7의 경우가 모든 계절을 통해 상대적으로 연료전지 시스템의 성능이 우수하며 저장조의 온도 및 축전지의 충전상태를 가장 효율적으로 유지할 수 있는 장점이 있다. 연료전지 출력제어 방법 중 case 7을 기준으로 계절별 해석한 결과에 대하여 정리하면 다음과 같다.

Fig. 5는 봄·가을철에 전체 시스템의 효율 및 손실을 나타낸 것이다. 전체 입력에너지에 비해 사용된 열에너지의 비율은 31~32%이며, 전기에너지의 비율은 32%였다. 에너지 손실은 연료 전지 시스템 부분에서 가장 크고 DC/DC 컨버터, 축전지의 손실과 보조 동력에 사용되는 에너지는 19%정도였

Table 8 Fuel Cell Performance for different operating strategies in the Spring(Fall).

	I	II	II	IV	V	VI	VII
연료전지 공급열	13	13	12	10	13	13	13
보일러 열공급량	0	0	2	3	0	0	0
열사용량 (저장포함)	13	13	13	13	13	13	13
전기에너지량	12	12	12	12	12	12	12
전체시스템효율	64	64	65	67	64	64	64
연료전지효율	64	64	63	62	64	64	64
열 대 전기비율 (%)	90	90	110	120	90	90	100

다.

실제 연료전지 시스템은 정격상태 보다는 외부 부하와 연동되어 다양한 부하 조건에서 운전되기 때문에 평균 운전 효율이 중요하다. Fig 4에서 알 수 있는 바와 같이 해석에 사용된 연료전지 본체의 최대 전기 효율은 40%가 넘으나 주변 운전장치의 구성과 운전 방법에 의해 평균 전기 효율은 이보다 낮은 32% 정도가 되며 최적 시스템 구성과 더불어 최적 운전 방법의 확립이 중요하다.

3. 결 론

독립적으로 운전되는 주택용 연료전지 코제너레이션 시스템의 운전 제어방법을 개발하기 위하여 시스템 구성과 이론적인 해석을 수행하였다. 정격용량 1.5kW의 연료전지 스택을 중심으로 연료변환기, 공기 공급설비, 전력변환기와 제어기로 연료전지시스템을 구성하였으며 축전지와 온수 저장조를 연결하여 코제너레이션 시스템을 구성하였다. 연료로는 도시가스를 사용하였다. 봄·가을, 여름, 겨울철의 열과 전기 에너지 소비 패턴을 이용하여 연료전지 코제너레이션 시스템의 효율을 분석하였다. 외부 부하 변화를 고려한 코제너

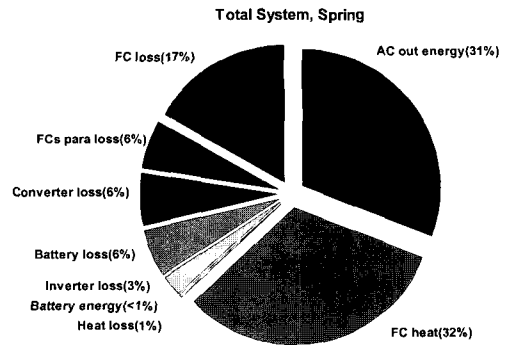


Fig. 5 Fuel utilization in the Spring(Fall).

레이션 시스템의 운전 방식에 따른 성능을 비교할 수 있었으며 이를 통해 열과 전기 부하를 종합적인 측면에서 최적으로 대응하기 위한 운전기술을 확보할 수 있었다.

본 논문은 설계 제원이 결정된 연료전지 시스템에 대한 해석을 수행한 것으로 최적 시스템을 설계하기 위해서는 부하 패턴에 맞는 연료전지와 축전지 그리고 열저장장치의 용량을 결정하기 위한 연구가 더 수행될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과기부 국제공동과제 및 산자부 대체에너지과제로 수행된 것입니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Wallmark, C. and Alvfors, P., "Design of stationary PEFC system configurations to meet heat and power demands," Journal of Power Sources, Vol. 106, 2002, pp. 83-92.
- 2) Wallmark, C. and Alvfors, P., "Technical design and economic evaluation of a stand-alone PEFC system for buildings in Sweden", Journal of Power Sources, Vol. 118, 2003, pp. 358-366.

- 3) Inaka H., Sumi S., Nishizaki K., Tabata, T. Kataoka, A. and Shinkai, H., "The development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC co-generation system," *Journal of Power Sources*, Vol. 106, 2002, pp. 60-67.
- 4) Hamada, Y., Nakanura M., Kubota, H. Ochifuji, K., Murase, M., Goto, M., "Field performance of a polymer electrolyte fuel cell for a residential energy system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 9, 2004, pp. 345-362.
- 5) Mehmet Burak Gunes, "Investigation of a Fuel Cell Based Total Energy System for Residential Applications," MS Thesis, VIT, 2001.
- 6) 田島 收, 2001, "固体高分子形燃料電池の實用化に向けた各社の開発状況", *電氣*, 2002.