

# 일반연구자지원사업 최종보고서(최종분)

양식A101

① 부처사업명(대)	기초연구사업			보안등급(보안, 일반)	일반			
② 사업명(중)	일반연구자지원사업			공개가능여부(공개, 비공개)	공개			
③ 세부사업명(소)	기초연구 유형1							
④ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초	④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화)						
⑤ 과제명	국문	고분자 전해질 연료전지의 전압 안정화를 위한 제어 시스템 개발						
	영문	Development Control system for voltage stabilization of PEMFC						
⑥ 주관연구기관	연세대학교							
⑦ 협동연구기관								
⑧ 주관연구책임자	성명	박진배	직급(직위)	정교수				
	소속부서	전기 전자 공학과	전공	제어 공학				
⑨ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, M·Y)								
년도	정부출연금(A)	기업체부담금			정부외출연금(B)	상대국부담금(F)	합계 G=(A+B+E)	참여연구원수
		현금(C)	현물(D)	소계 E=(C+D)				
1차년도	59,800			0			59,800	3
2차년도				0			0	
3차년도				0			0	
4차년도				0			0	
5차년도				0			0	
합계	59,800	0	0	0	0	0	59,800	3
⑩ 총연구기간	2010. 09. 01 ~ 2011. 08. 31(12개월)							
⑪ 다년도협약연구기간	2010. 09. 01 ~ 2011. 08. 31(12개월)							
⑫ 당해연도연구기간	2010. 09. 01 ~ 2011. 08. 31(12개월)							
⑬ 참여기업	중소기업수	대기업수	기타	계				
				0				
⑭ 국제공동연구	상대국연구기관수	상대국연구개발비	상대국연구책임자수					

관계 규정과 모든 지시사항을 준수하면서 국가연구개발사업에 따라 수행 중인 연구개발과제의 최종보고서를 붙임과 같이 제출 합니다.

2011 년 10 월 7 일

주관연구책임자 : 박진배 (인)

주관연구기관장 : 홍대식 (직인)

**교육과학기술부장관 귀하**

# 〈 목 차 〉

## I. 연구 계획 요약문

1. 국문 요약문 .....	3
-----------------	---

## II. 연구 결과 요약문

1. 국문 요약문 .....	4
2. 영문 요약문 .....	5

## III. 연구 내용

1. 연구 개발 과제의 개요 .....	6
2. 국내·외 기술 개발 현황 .....	10
3. 연구 수행 내용 및 결과 .....	13
4. 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도 .....	29
5. 연구 결과의 활용 계획 .....	30
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....	31
7. 주관연구책임자 대표적 연구 실적 .....	32
8. 참고 문헌 .....	33
9. 연구 성과 .....	34
10. 기타 성과 .....	35

## 〈 연구 계획 요약문 〉

양식 A 201

연구의 목적 및 내용	<p>본 연구 과제에서는 차세대 신재생 에너지로 각광받고 있는 고분자 전해질 연료전지의 안정적 전압 추종을 위해 고분자 전해질 연료전지 발전시스템에 대한 비선형 관측기를 설계하고, 이를 바탕으로 강인 제어 기법을 개발한다. 비선형 연료전지 시스템의 정확한 모델링을 위해 퍼지 기법을 사용하고, 모델링된 퍼지 시스템을 기반으로 관측기 및 제어기를 설계한다. 연료전지 시스템에서 생길 수 있는 불확실성 문제를 고려하고, 이를 해결할 방법을 제시한다.</p> <p><b>최종 목표</b> : 고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 전압 안정도를 위한 퍼지 관측기 및 강인 퍼지 제어기 설계</p>		
연구결과	<p>고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 전력 생산은 시스템의 캐소드와 애노드의 압력에 가장 많은 영향을 받는다. 하지만 현재까지 압력의 관측 및 제어의 중요성에 비해 그 연구 진척이 매우 더딘 편이다. 따라서 본 연구에서는 발전시스템의 캐소드 및 애노드의 압력을 실시간으로 추정할 수 있는 비선형 관측기를 설계하고, 이를 바탕으로 전력 안정화를 위한 강인 제어 시스템을 제안하고자 한다. 구체적인 연구내용은 다음과 같다.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><b>1. 고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 비선형 모델링 연구</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연료전지 시스템의 구성 요소를 연구하고 이를 바탕으로 특성 곡선에 일치하는 동적 방정식을 제시한다. 그리고 퍼지 기법을 이용하여 발전시스템의 비선형 모델링을 제시하고, 제시된 시스템의 불확실성 및 시간 지연 문제 등을 고찰한다.</li> </ul> </li> <li><b>2. 캐소드와 애노드의 압력을 추정할 수 있는 비선형 관측기 설계</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 내부 센서 없이 발전시스템의 출력과 동적 방정식만을 이용하여 연료전지 시스템 내부의 모든 상태를 관측할 수 있는 비선형 관측기를 설계한다. 그리고 이를 이용하여 발전시스템의 전력 생산에 가장 중요한 캐소드의 산소압력과 애노드의 수소압력을 실시간으로 추정할 수 있도록 한다.</li> </ul> </li> <li><b>3. 불확실성 문제를 해결하는 비선형 제어기 설계</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연료전지 발전시스템의 정확한 제어를 위해 불확실성 문제를 해결할 수 있는 제어 기법을 연구하고 이를 바탕으로 다양한 문제를 포함한 발전시스템의 과도상태 및 정상상태를 정확하게 제어할 수 있는 비선형 제어기를 설계한다.</li> </ul> </li> <li><b>4. 제시된 관측 및 제어 기법의 모의실험을 위한 시뮬레이터 개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 상기 기법들의 통합 및 유용성 확인을 위해 시뮬레이터를 설계한다.</li> </ul> </li> </ol>		
연구결과 의 활용계획	<p><b>학문적 측면</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연료전지 발전시스템의 제어 연구에 관한 확고한 이론적 배경 제시, 새로운 제어 기법 연구에 관한 배경 제시, 연료전지 자동차 및 컨버터 등과의 연계를 위한 이론 배경 제시</li> </ul> <p><b>경제적 측면</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 신재생 에너지의 새로운 기술 분야 개척, 자동차 및 휴대기기와의 연계를 통한 고부가 가치 산업 창출, 미래 지향적 기술 개발을 통한 기술적, 경제적 발전 및 국제적 기술 선점</li> </ul> <p><b>연구인력 양성 측면</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연료전지 시스템, 제어</li> </ul>		
중심어	고분자 전해질 연료전지	캐소드 및 애노드의 압력	비선형 모델링
	실시간 비선형 관측기	발전시스템의 전력 안정화	불확실성 문제
	강인 제어 시스템	퍼지 시스템	

☞ 작성 시 유의사항

- 1) 연구계획서(지원신청서) 제출 시의 국문 연구 요약문을 그대로 작성함(당초 내용을 복사 사용 가능함)
- 2) 본 요약문의 내용은 외부에 공개할 수 있음
- 3) 반드시 1페이지 이내로만 작성함

# 〈 연구 결과 요약문 〉

## 〈 한글 요약문 〉

양식 A 202

연구의 목적 및 내용	<p><b>최종 목표</b> : 고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 전압 안정도를 위한 퍼지 관측기 및 강인 퍼지 제어기 설계</p> <p><b>내용</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 고분자 전해질 연료전지의 안정적 전압 추종을 위해 고분자 전해질 연료전지 발전시스템에 대한 비선형 관측기를 설계</li> <li>2. 연료전지 시스템의 불확실성 문제를 해결할 수 있는 강인 제어 기법 제시</li> <li>3. 비선형 연료전지 시스템의 정확한 모델링을 위한 퍼지 모델링 기법 활용 및 모델링된 퍼지 시스템 기반의 퍼지 관측기 및 퍼지 제어기 설계</li> </ol>		
연구결과	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 동적 방정식 연구 및 비선형 특성 분석</li> <li>2. 퍼지 기법을 이용한 발전시스템의 비선형 모델링 제시</li> <li>3. 연료전지 시스템의 파라미터들이 가지는 불확실성 문제 연구</li> <li>4. 연료전지 특성을 가지는 상호결합 시스템에 대한 공통 입력 문제 제시</li> <li>5. 퍼지 모델 기반의 연료전지 발전시스템을 위한 퍼지 관측기 및 퍼지 제어기 개발</li> <li>6. 불확실성 문제를 해결할 수 있는 강인 제어 기법 연구</li> <li>7. 공통 입력 문제를 해결할 수 있는 상호결합 시스템에 대한 분산 제어기 개발</li> <li>8. 관측기와 제어를 포함한 시스템의 안정도 조건 해석</li> <li>9. 발전시스템의 원격 제어를 위한 시스템의 이산화 기법 및 디지털 제어 기술 연구</li> <li>10. 컴퓨터 모의실험을 통한 결과 해석과 연료전지 발전시스템의 성능 검증</li> </ol>		
연구결과 의 활용계획	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 발전용 연료전지의 실시간 원격 감시 장치 개발에 활용</li> <li>2. 가정용 연료전지의 안정성 확보 및 전력 안정화 시스템에 적용</li> <li>3. 온도와 압력 변화가 심한 자동차용 연료전지에 적용을 통한 강인 안정성 확보</li> <li>4. 빠른 응답 속도를 요구하는 휴대용 연료전지를 위한 실시간 제어에 활용</li> <li>5. 이산화 및 디지털 제어를 통한 인버터 및 컨버터와의 연계</li> <li>6. 연료전지 시스템과 같은 공통 입력 특성을 가지는 타 시스템에 적용</li> </ol>		
중심어	고분자 전해질 연료전지	캐소드 및 애노드의 압력	비선형 모델링
	실시간 비선형 관측기	발전시스템의 전력 안정화	불확실성 문제
	강인 제어 시스템	퍼지 시스템	공통 입력 문제

☞ 작성 시 유의사항

- 1) 표 양식 변경 및 삭제 불가능하며 이미지, 수식, 표의 삽입을 금지하고 특수문자 기호는 전각기호만을 이용하여 작성함
- 2) 본 요약문은 정보 제공용으로 활용되므로 핵심적인 내용을 중심으로 이해하기 쉽도록 기재하고 1페이지 이내로 작성함

## < SUMMARY >

양식 A 203

Purpose& contents	<p><b>Final Goal:</b> Development of a robust fuzzy controller and nonlinear observer for a PEM fuel cell system</p> <p><b>Contents</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estimator design for power point tracking of polymer electrolyte membrane(PEM) fuel cell system</li> <li>2. Robust control technique proposal for the fuel cell system with parametric uncertainties problem</li> <li>3. Fuzzy modeling for the nonlinear fuel cell system and fuzzy-model-based observer and controller design</li> </ol>		
Result	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nonlinear property analysis of PEM fuel cell dynamics</li> <li>2. Nonlinear modeling for the fuel cell system using fuzzy technique</li> <li>3. Research of parametric uncertainties for the fuel cell system</li> <li>4. Study for the interconnected system with the common input</li> <li>5. Fuzzy observer and fuzzy controller design for the fuzzy-model-based fuel cell system</li> <li>6. Robust control technique to solve the uncertainty problem</li> <li>7. Decentralized controller design for the interconnected system with the common input</li> <li>8. Stability condition analysis for the closed-loop system with the observer and the controller</li> <li>9. Discretization technique and the digital control for the remote control of the fuel cell system</li> <li>10. Result analysis from computer simulation and performance verification of the fuel cell system</li> </ol>		
Expected Contribution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Developing a real-time remote observation device for the generating fuel cell system</li> <li>2. Guaranteeing the stability of the fuel cell system for home use and applying the power stabilization system</li> <li>3. Guaranteeing the robust stability for the fuel cell system for automobile changed the temperature and the pressure rapidly</li> <li>4. Developing a remote control for the portable fuel cell system desiring the fast response</li> <li>5. Connecting with the converter or inverter using the discretization and the digital controller</li> <li>6. Improving the other system with the common input property</li> </ol>		
Keywords	PEM fuel cell	cathode and anode	nonlinear modeling
	real-time observer	voltage stabilization	parametric uncertainty
	robust control system	fuzzy system	common input

☞ 작성 시 유의사항

- 1) 표 양식 변경 및 삭제 불가능하며 이미지, 수식, 표의 삽입을 금지하고 특수문자 기호는 전각기호만을 이용하여 작성함
- 2) 본 요약문은 한글요약문과 동일한 내용을 영어로 작성하며 정보 제공용으로 활용되므로 핵심적인 내용을 중심으로 이해하기 쉽도록 기재하고 1페이지 이내로 작성함

## < 연구내용 및 결과 >

양식 A301

- ◎ 1. 연구개발과제의 개요 ~ 10. 중요 연구변경 사항을 항목에 따라 작성함
- ◎ 제목 14point, 소제목 12point, 본문내용은 10point로 작성하며, 줄 간 간격은 조정 가능함
- ◎ 연구내용 및 결과는 50페이지 이내로 작성함
- ◎ 내용 작성과 관련한 설명내용(청색 박스로 표시된 부분)은 내용 작성 시 제거하고 기술함

### 1. 연구개발과제의 개요

#### 1.1 연구 개발의 목적

최근 고도의 산업성장 및 인구증가에 따른 에너지 소비가 급증하고 있다. 많은 전문가들이 기존의 화석 연료에 의존하는 현 에너지 수급 현황에 문제점을 시사하고 있으며, 화석 연료의 사용으로 발생하는 유해 가스의 증가는 인류의 미래를 위협하는 존재가 되어가고 있다. 이러한 이유로 우리나라를 포함한 여러 선진국에서 기후변화 협약 등을 체결함으로써 화석 연료 사용에 제약을 두게 되었으며, 해외에서 97% 이상의 에너지를 수입하는 우리나라의 경우 고유가 시대를 맞이하여 석유의 계속적 수입이 국내 경제 상황에도 악영향으로 미치고 있다. 이에, 화석연료를 대체할 수 있는 신재생 에너지가 각광받고 있으며 정부에서는 2011년까지 신재생 에너지 보급률을 5%까지 확대, 국내 기술 수준을 선진국의 70~90%까지 제고한다는 『제 2차 신·재생에너지 개발·보급기본계획』을 2003년에 수립하였고, 기술개발 및 보급지원 정책을 적극 추진하고 있다. 특히, 보급 잠재력 및 산업적 파급효과가 큰 수소·연료전지, 태양광, 풍력 등을 3대 핵심 분야로 선정하여 집중 지원하고 있으며, 이 중에서도 연료전지는 친환경적이며, 높은 에너지 변환 효율을 발현함으로써 자동차용, 가정용 에너지 변환기로 크게 주목을 받고 있다.

연료전지란, 연료가 가진 화학에너지를 전기화학반응에 의해 직접 전기에너지로 변환하는 장치로 공해물질 배출이 거의 없어 친환경 기술로 손꼽힐 뿐만 아니라, 석유 외에 다양한 연료를 사용할 수 있기에 자원고갈 문제도 덜 수 있다. 또한, 전지를 충전하는데 소모되는 연료 가격이 리튬이온 등 다른 2차 전지를 충전하는 비용보다 저렴하며, 건설과 증설이 용이하고 용량이 다양하기 때문에 다른 신재생 에너지 기술보다 활용 방안이 다양하다. 현재 국내에서는 2008년까지 연료전지 연구개발비로 4610억원을 투자하였으며, 자동차용, 발전용, 가정용, 휴대용의 4가지 산업 중심으로 발전을 꾀하고 있다. 특히, 자동차 분야와 휴대용 전자기기 분야에서 많이 응용되고 있으며 시장성도 가장 넓다고 추측되며 에너지 공급안정화, 지구온난화 문제, 신규 산업의 창출 등을 위해서도 연료전지의 보급이 필수적이라 하겠다.

연료전지는 전해질의 종류에 따라 고분자 전해질 연료전지(PEMFC), 직접메탄올 연료전지(DMFC), 인산형 연료전지(PAFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC), 알칼리 연료전지(AFC) 등으로 구분할 수 있다. 이 중에서도 PEMFC는 연료극(anode, 애노드)에서 공급되는 수소와 공기극(cathode, 캐소드)에서 공급되는 산소의 전기화학 반응에 의해 전기와 물이 생성된다. 이 PEMFC는 인산형에 비해 저온에서 동작되며, 출력 밀도가 커서 소형화가 가능하며 응용 기술의 적용이 용이해 적은 이용 규모에도 상업화가 가능하다는 장점을 가진다. 하지만 이러한 장점들에 반해 아직까지 해결해야 할 문제들이 많이 남아있다.

먼저 발전용 연료전지는 발전 시스템의 복잡한 비선형성과 느린 동특성에 의한 낮은 성능 문제가 있다. 또한 기존 배터리에 비해 낮은 전력 밀도 문제를 해결해야 한다. 자동차용 연료전지는 출력 전류에 따라 크게 변하는 출력 전압 문제를 갖고 있으며 고효율과 고안정성을 요구한다. 휴대용 연료전지는 온도, 압력 등의 많은 불안정한 제어 요소들이 존재한다. 이러한 연료전지 시스템이 가지고 있는 다양한 문제들을 해결할 수 있는 연료전지 발전시스템의 새로운 제어 알고리즘을

설계필수적이다. 이에, 본 연구과제는 연료전지 발전시스템 중에서 최근 가장 많이 각광받고 있는 **고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell : PEMFC) 발전 시스템의 전압 안정도를 위한 퍼지 관측기 및 강인 퍼지 제어기 설계**를 목표로 한다.

[표 1] 연료전지의 종류와 그 특성

종류	발전온도	전해질	촉매	주연료	기술수준	적용
PEMFC	상온 ~ 100 °C	이온( $H^+$ )전도성 고분자 막	platinum on carbon	수소	개발 및 실증단계	소형전원 자동차
DMFC	상온 ~ 100 °C	이온( $H^+$ )전도성 고분자 막	Pt-Ru or Pt/C	메탄올	개발 및 실증단계	소형전원 자동차
PAFC	150 ~ 200 °C	인산( $H_3PO_4$ )	platinum or PTFE/carbon	천연가스 메탄올	상용화단계	복합발전 열병합발전
MCFC	600 ~ 700 °C	용융탄산염 ( $Li_2CO_3 - K_2CO_3$ )	니켈 또는 니켈 화합물	천연가스 석탄가스	개발단계	복합발전 열병합발전
SOFC	700 ~ 1000 °C	고체산화물 Yttira-stabilized zirconia	니켈/ Zirconia cermet	천연가스 석탄가스	개발단계	특수목적
AFC	상온 ~ 100 °C		platinum on carbon	수소	사용중	

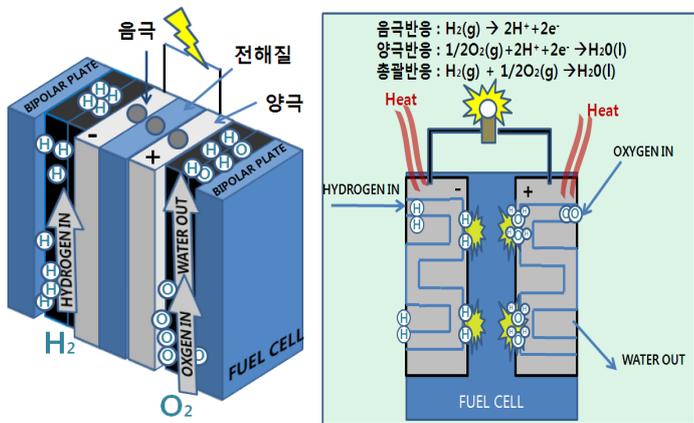


그림 1. 연료전지 원리

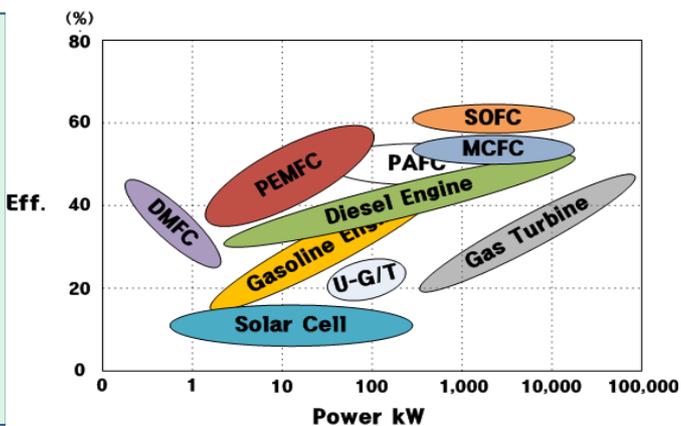


그림 2. 연료전지 및 기타 발전 체계의 효율

## 1.2 연구 개발의 필요성

### ○ 기술 개발의 중요성

- **연료전지가 차세대 발전설비로 주목받는 이유는 고효율·친환경적인 특성을 갖고 있기 때문이다.** 연료전지는 화학에너지를 직접 전기에너지로 바꾸기 때문에 상대적으로 에너지 손실이 적다. 기존발전기술의 전기효율이 25~35% 수준인데 비해 연료전지는 40~60%로 더욱 뛰어나다. 또한 연료전지는 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 소음 등이 극소로 배출

된다.

- PEM 연료전지는 스택의 각 셀이 1.1V에서 1.23V 사이의 전압을 발생시킨다. 각 셀의 양극 및 음극을 통과하는 수소 및 산소 가스의 유속이 동일하지 않기 때문에 셀에 전위차가 발생하게 되고 개별 셀의 이상 유무를 측정하기 위해 이들 **전압을 감시하고 최적의 에너지 발생을 위해 가스 유속을 제어**해야 한다.

- 다른 대체 에너지는 태양, 바람, 진동 등 에너지원에 대한 제어의 여지가 거의 없는 데 반해, **연료 전지는 에너지원뿐만 아니라 펌프, 팬 등 다양한 주변 기기에 대한 제어가 필요하다.**

- 고체 산화물 연료전지, 능동형 직접메탄올 연료전지 등 **고출력, 고효율의 연료전지는 고도의 제어 기술** 요구된다.

- 기존 연료전지 연구는 셀 스택 물질, 유로 설계 등 화학, 기계 분야의 요소 연구에 국한되었으나, 실용화를 앞두고 연료전지 시스템 전체를 효율적이고 안정적으로 제어하는 내장형 시스템의 설계를 위해 IT기술의 주도가 필요하다.

- 연료전지의 전력 공급 특성은 기존 배터리와 크게 달라, 효율적으로 이용하기 위해서는 에너지를 소비하는 장치에서의 에너지 관리 정책의 역할이 중요하다.

#### ○ 연구과제의 중요성

##### - 기술적인 측면

원천기술 및 사용화 기술은 우리나라가 미국, 일본, 유럽 등에 비해 열위에 있으나, 인프라와 산업화는 초기 단계로 대등한 수준이다. 반면에 선진국에서는 일찍부터 연료전지 연구에 착수하여 핵심 원천기술을 확보하고 상용화 기술을 추진 중이다.

- 1) 한국은 연료전지와 연계할 수 있는 자동차 산업과 휴대용 기기 산업이 크게 발전해 있다
- 2) 연료전지 스택 설계 및 제작 기술 등 일부 기술 부문에서는 선진국과 대등한 수준의 기술력 확보
- 3) 반면에 선진국에서는 일찍부터 연료전지 연구에 착수하여 핵심 원천기술을 확보하고 상용화기술 개발을 추진 중
- 4) 우리나라가 세계 시장에서 경쟁력을 가질 수 있는 산업: 연료전지 연계 산업 부문인 자동차, 무선 단말기 등에서 세계적인 경쟁력을 확보하고 있어, 이들을 기반으로 연료전지 개발 역시 비교우위 산업으로 육성 가능함
- 5) 상용화 기술 기반 확립 : 실증 평가 등을 통한 기술 신뢰성 확보 및 기술 표준화가 필요하다. 또한 그린홈 연계 부품 및 시스템 상용화가 이뤄져야 한다.
- 6) 핵심 원천기술 확보 : 연료전지 전용의 인버터 및 BOP의 국내 개발 수준이 미비하며, 대부분이 외국제품 수입에 의존하고 있다. 따라서 시스템 내구성 확보를 위한 기초 기술 연구와 함께, BOP 국산화 개발이 필수적이다.

##### - 경제적인 측면

신재생 에너지에 대한 관심과 함께, 수소 등을 이용한 연료전지의 산업화가 가속되고 있다. 특히, 자동차용과 휴대 기기용 연료전지 산업은 급속한 발전 속도를 보이고 있으며, 발전용과 가정용 역시 점차 그 산업 크기가 확대되고 있다.

- 1) 건물용 연료전지 세계 시장은 2012년 200 MW규모에서 2015년 1000 MW, 2020년엔 3100MW 규모의 빠른 성장을 전망하고 있다. 또한, 발전용 연료전지 시장 역시 2020년엔 70~80억 달러 규모로 크게 성장할 것으로 추측된다.
- 2) 연료전지 사업은 엄청난 세계 시장 잠재력을 가지고 있으며, 표 2은 세계 시장 잠재력을 보여주는 예이다.
- 3) 연료전지 사업은 발전용, 자동차용을 중심으로 가정용으로까지 빠르게 확산되고 발전되고 있다.
- 4) 연료전지를 통한 화석연료 사용 절감은 고유가 시대에 새로운 전환점으로 돌아설 수 있다.



그림 3. 북미와 일본의 건물용 연료전지 시장 전망

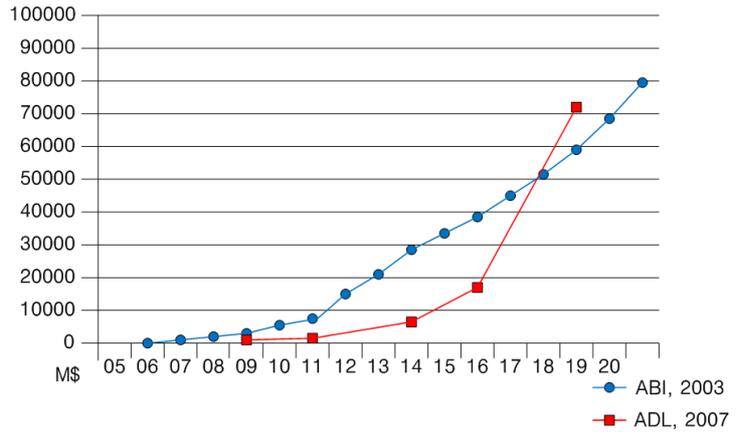


그림 4. 발전용 연료전지 세계시장 규모 예측

[표 2] 일본의 건물용 연료전지 단기적 보급 수량 및 목표 가격

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2015
보급대수	930대	1,120대	8,000대	20,000대	50,000대	100,000대	
시스템 단가	420만 엔	300만 엔	200만 엔	150만 엔	120만 엔	80만 엔	60만 엔
정부 보조금	350만 엔	220만 엔	130만 엔	75만 엔	60만 엔	20만 엔	

### - 사회/정책적인 측면

에너지 보유 강국 실현과 신재생 에너지 산업 성장을 위한 견인차 역할을 함으로써 친환경적 국가 이미지와 함께 사회 전반적 순기능을 얻을 수 있다. 현재, 우리나라의 경우는 원재료를 전량 외국제품 수입에 의존하고 있으며, 촉매, 버너 등의 핵심 부품 역시 외국제품에 의존하고 있다. 따라서 정부차원의 체계적인 기술개발 전략수립과 집중적인 정책지원이 요구된다. 또한 시스템 내구성 확보를 위한 기초 핵심 기술 확보가 중요하기 때문에 성장 잠재력과 산업 파급효과가 연료전지 발전시스템의 제어 기술을 국가의 전략기술로 집중 개발하여야 한다.

### o 연구과제의 파급효과

구분	이슈사항	파급효과
정치	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 에너지 안보에 대한 중요성</li> <li>- 교토의정서에 따른 온실 가스 감축 의무</li> <li>- 신재생 에너지 분야 SMP 및 RPS 추진</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 교토의정서에 기초한 기후변화협약에 따라 온실가스 감축의무 시행</li> <li>- 국가의 신재생에너지 보급을 2011년까지 총 전력 소비량의 7%까지 증대시키려는 목표 달성</li> </ul>
경제	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 신재생 에너지의 에너지 자립도를 위한 국산화 필요</li> <li>- 신재생 에너지 시장의 확대</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기술적인 종속을 방지하고자 하는 연료전지 국산화 연구 개발성공</li> <li>- 신재생 에너지 보급으로 인한 고효율 발전 시스템의 개발 및 실용화</li> </ul>
사회	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 환경 및 에너지 문제의 심각성 대두</li> <li>- 에너지 소비 증가</li> <li>- 고용량 전원 요구 증가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후 변화 대응 기술 확보를 위한 관심 고조</li> <li>- 친환경 제품에 대한 관심 증가로 인한 발전 사업의 신재생 에너지원으로서의 변화 유도</li> </ul>

기술	- 연료전지 관련 기술 및 융합기술의 발전 및 관심	- 발전 설비 및 발전 서비스까지의 공급 기술력 확보로 인한 선진국 대비 동등 기술 경쟁력 확보
기타	- 수소 경제로의 에너지 패러다임의 변화	- 에너지 수입국에서 에너지 수출국으로 가치의 변화가 가능

### 1.3 연구 개발의 범위

본 연구는 현재 차세대 성장 동력 산업으로 추진 중인 고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 지능형 관측기 및 제어기 개발을 수행하게 된다. 특히 이번 연구는 기존 연료전지 분야에서 소홀히 다뤘던 연료전지 전용의 인버터 및 BOP 기술의 원천 기술이 되는 것으로 향후 연료전지 산업의 핵심 기술이 될 것으로 사료된다.

[표 3] 세부 기술별 개발 범위 및 평가 지표

세부기술별 개발목표의 성격			
세부기술명	개발범위	성격	평가방법
발전 시스템 구성 및 모델링	<b>연료전지 시스템 분석 및 퍼지 모델링 수행</b>	기타	기존기술분석/모의실험/학술지
관측기 설계	<b>연료전지 시스템의 전압 추종을 위한 관측기 설계</b>	아이디어 개발	기존기술분석/모의실험/학술지
제어 기법	<b>불확실성에 강인한 비선형 제어시스템</b>	아이디어 개발	기존기술분석/모의실험/학술지
실험 시뮬레이터	<b>연료전지 발전시스템에 대한 시뮬레이터 개발</b>	공정 개발	기존기술분석/모의실험/학술지

## 2. 국내의 기술개발 현황

### 2.1 국내의 기술 개발 현황

#### ○ 국내 기술 동향 및 수준

미래 수소경제 사회로의 전환에 대비하여 선진국들은 몇 년 전부터 중장기적 계획을 수립하고 이에 맞춰, 기술개발, 보급

사업, 표준화 사업을 진행 중에 있다. 국내의 경우 부품 국산화와 시스템 설계·제작·운전기술 개발 중심으로 기술 개발 투자가 확대 중에 있다. 특히, 국내의 고분자 연료전지 및 연료전지 시스템 개발 연구는 주로 RPG(Residential Power Generation)용과 승용차용으로 개발되고 있다. RPG용의 경우 5kW이하의 연료전지 및 연료전지 시스템 개발이 현재 진행 중이며, 승용차용의 경우 30kW급의 연료전지 스택 및 연료전지 시스템의 개발이 완료되어 차량에 탑재되어 평가되고 있는 중이다. 또한, 발전용 MCFC는 기술도입 제품 실증 및 독자모델 개발 중에 있고, SOFC는 산·학·연 중심으로 핵심개발에 주력, 투자 중에 있다. 아래 표는 국내 주요 업체들의 연료전지에 관한 최근 동향이다.

[표 4] 국내 업체들의 연료전지 동향

주요 업체	연구 내용
GS퓨얼셀 퓨얼셀파워 효성	1kW 급 건물용 PEMFC 시스템을 제작, 공급하고 있으며, 모니터링 사업 진행과 함께 연료전지 시스템의 국산화율 70%이상을 달성, 1kW급 시스템의 성능 및 효율은 세계 최고 수준의 일본에 비하여 85% 이상의 기술력을 확보하였으나, 내구성 및 시스템 가격 면에서 격차를 보이고 있음
포스코 파워	기술개발과 더불어 미국 FCE사의 선진 기술 인수를 통하여 2008년에 MCFC 공장을 포함에 건설하였으며, 현재 1.4MW, 2.8MW 등 분산발전형 제품을 생산 중
두산중공업	2007년부터 300kW급 내부개질형, 2008년부터 MW급 MCFC 시스템 개발에 착수하여 구성요소, 스택 및 BOP 시스템을 순수 자체기술로 독자개발 중. 스택의 구성 요소에 대한 기술 수준은 선진국 대비 80%이상 도달하였음
삼성SDI	2013년까지 100kW급 분산발전용 SOFC 시스템을 개발할 계획
포스코	2007년부터 2012년까지 180kW급 SOFC 스택 및 발전시스템 개발을 수행 중

○ 국외 기술 동향 및 수준

- 일본의 경우 수소·연료전지 관련 중장기 계획을 통해 기초기술 개발과 함께 실용화 기술개발, 상용화를 위한 보급사업, 표준화 사업을 진행 중에 있다. 특히, NEDO Project를 통해 2조원을 투입하여 SOFC 개발을 진행하고 있으며, 주요 개발사로는 미쓰비시 중공업, 미쓰비시 Materials, TOTO, Kyocera 등이 참여하고 있다.

- 미국의 경우 수소에너지와 발전용 연료전지 R&D를 국가에너지정책의 최우선 R&D 분야로 선정하고 대규모 지원을 해오고 있다. 또한, 연방정부에서 국방성과 에너지성의 주관으로 Federal Stationary Fuel Cell Incentive Program을 실시하여 연료전지 구매/설치자에게 설치비용을 지원함으로써 연료전지의 보급, 확대에 힘쓰고 있다.

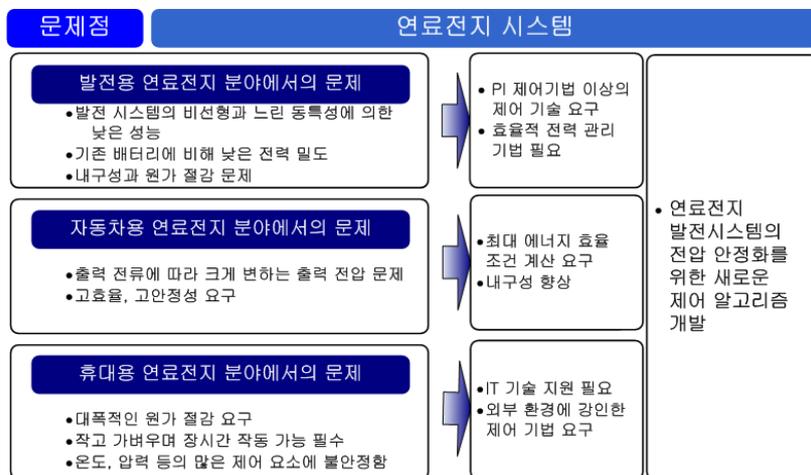
- 캐나다의 경우 수소 및 연료전지산업은 연료전지 개발기술, 부품품, 시스템 통합, 연료공급장치, 엔지니어링 등 다양한 분야에서 폭 넓게 발전하고 있다. 특히, 고분자 전해질형 연료전지와 고체산화물형 연료전지의 개발이 주를 이루고 있다. 독일과 이태리를 중심으로 한 유럽 2개국은 미국과의 기술제휴 또는 EC 및 정부 프로그램으로 연료전지 상용화를 추진 중에 있다. 세계 주요 기업별 연료전지 연구 현황은 다음과 같다.

[표 5] 세계 주요 업체들의 연료전지 동향

주요 업체	연구 내용
Ebara-Ballard (일본)	세계 최고 수준의 건물용 PEMFC 스택 적용 시스템 기술 보유, 내구성 확보 및 가격저감에 주력
Fuel Cell Energy (미국)	300kW급, 1.2MW급 그리고 2.4MW급 MCFC 모듈을 기본으로 하여 50MW까지 scale-up 할 수 있는 시스템을 상용화 연구를 지속하고 있음. 또한 MCFC를 이용한 수소생산, CO <sub>2</sub> 농축, 가스터빈과 연계를 통한 초고효율 구현 등 차세대 응용제품을 위한 기술개발을 적극 추진하고 있는 중
Rolls-Royce (영국)	SOFC 시스템 전반에 걸친 원천핵심 기술 확보 중
Siemens (독일)	SOFC 상용화에 가장 앞선 단계에 있어 3~250kW급 SOFC를 제작하여 20기를 실증 중이며 2015년 700kW급 (효율 70%, 가압형) SOFC 개발을 목표로 하고 있음
Kyocera (일본)	2010년 700W급 건물용 연료전지 상품화를 목표로 개발을 진행 중
Ansaldo (이태리)	2008년도까지 분산발전용 외부개질형 MCFC를 개발하였으나 현재는 내부개질형의 개발에도 큰 관심을 보이고 있음
MTU Onsite Energy (독일)	미국의 Fuel Cell Energy사와 기술제휴를 통해 먼저 300kW급 내부개질형 상용제품 개발에 성공하였으며, 이 기술을 바탕으로 현재 2.8MW급 제품을 생산 보급 중에 있음

## 2.2 연구 결과의 의의

- 현재 국제적으로는 연료전지에 대한 산업화가 점차 커지고 있는 것에 맞추어 연료전지의 제어 기법에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다. 하지만 국내에서는 연료전지의 관심도와 연구의 중요성에 비해 제어 분야에서의 연료전지 연구는 많이 소홀한 편이다. 현재까지 제어 측면에서 바라본 연료전지의 문제점은 다음과 같다.



이에, 본 연구를 통한 연료전지의 제어 기술의 개발은 원천 기술 확보를 통한 국가 경쟁력 제고에 크게 기여할 것으로 기대되며, 특히 공통입력을 갖는 분산 제어 기법은 아직 국내외적으로 연구가 되어 있지 않기 때문에 학문적으로 매우 의미 있는 성과물이라고 할 수 있다.

- 고분자 전해질 연료전지의 경우에는 각 셀의 양극 및 음극을 통과하는 수소 및 산소 가스의 유속이 동일하지 않기 때문에 셀의 전위차가 발생하게 되고, 개별 셀의 이상 유무를 측정하기 위해서는 이들 전압을 감시하고 최적의 에너지 발생을 위한 가스 유속을 제어할 필요가 있다. 또한 고출력, 고효율의 연료전지 개발을 위해서는 고도의 제어 기술도 요구된다. 본 연구는 이러한 연료전지의 최적제어 기법을 제안하고 있으며, 이를 통해 국내 산업의 국제 경쟁력을 얻을 수 있는 기회가 될 것으로 사료된다.

### 3. 연구수행 내용 및 결과

#### 3.1 연구 내용

고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 전압 안정도를 위한 퍼지 관측기 및 강인 퍼지 제어기 설계

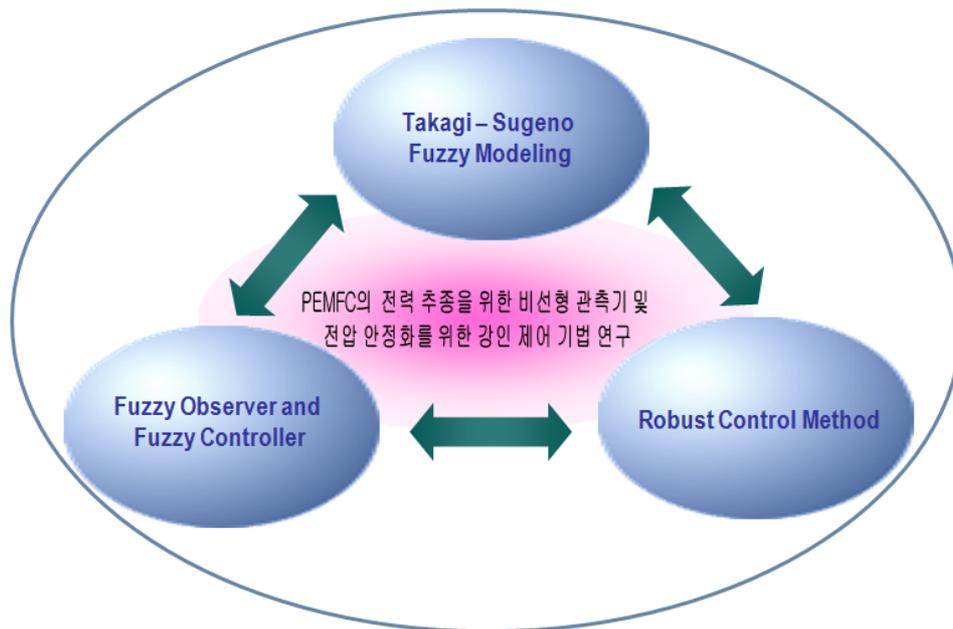


그림 5. 최종 연구 목표

- 보다 효율적이고 안정적인 고분자 전해질 연료전지 발전시스템 구성
- 연료전지 발전시스템으로부터 얻는 전압의 정확한 추종을 위한 애노드 및 캐소드 내부 압력 관측기 설계
- 복잡한 고차 미분 방정식으로 표현된 발전시스템에 대한 해결책 마련
- 연료전지 전압의 안정화를 위한 제어기법 연구 및 내·외부 환경의 영향에 강인한 제어기법 마련
- 각 상황별 대처가 가능하면서도 유저 친화적인 시뮬레이션 환경 마련

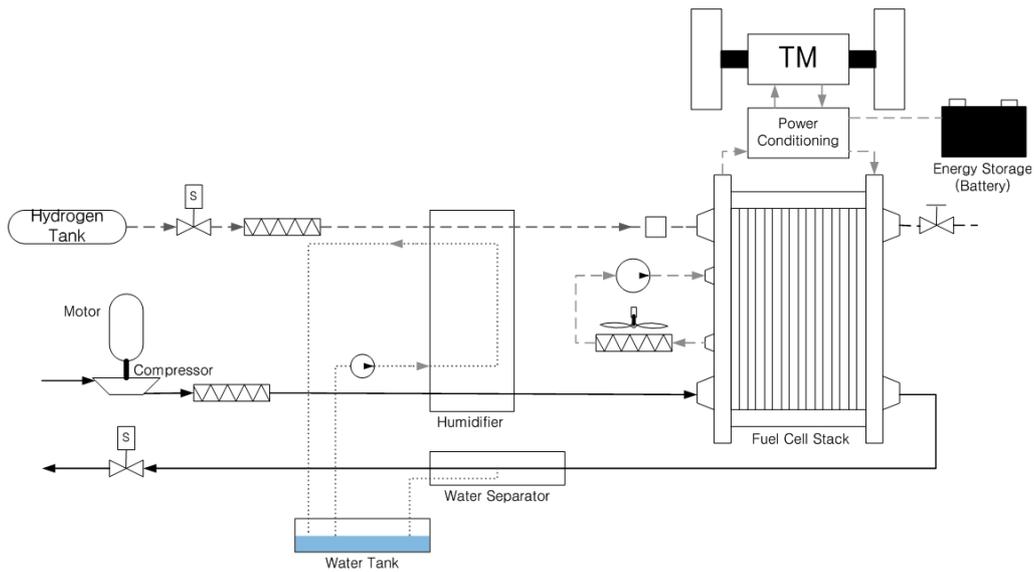


그림 6. 고분자 전해질 연료전지 시스템의 구성도

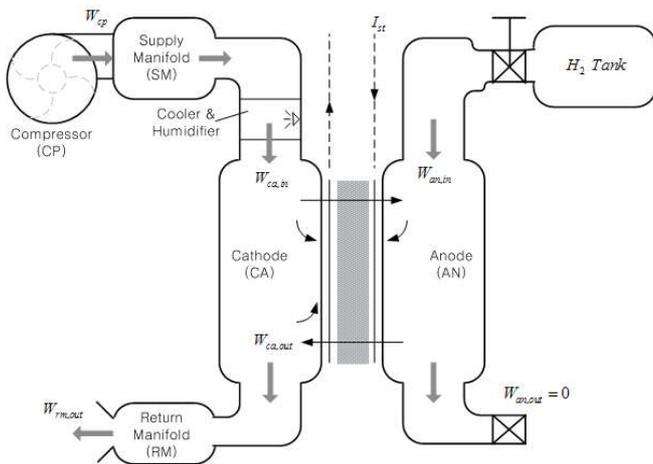


그림 7. 연료전지 시스템의 간략도

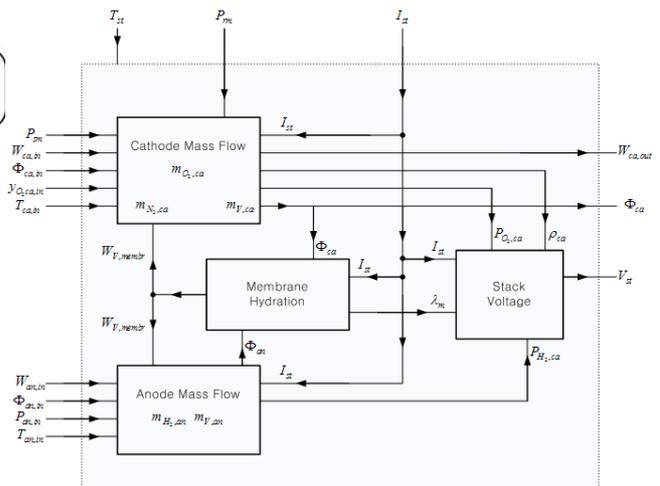


그림 8. 연료전지 시스템의 블록 다이어그램

### 3.2 이론적 접근 방법

#### ◦ PEM 연료전지 시스템의 동적 현상 규명 및 수학적 모델링 연구

고분자 전해질(PEM) 연료전지 시스템은 크게 Stack Voltage Model, Cathode Flow Model, Anode Flow Model, Membrane Hydration Model의 네 가지 구성으로 이루어져 있다. 이 중, 가장 중요한 구성요소인 Stack Voltage Model에서 나오는 최종 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{fc} = E - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc} \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 open circuit voltage를 의미하며,  $v_{act}$ ,  $v_{ohm}$ 와  $v_{conc}$ 는 각각 activation, ohmic, concentration voltage를 의미하며 이 들은 시스템의 물리적, 화학적 특성 때문에 생기는 손실 전압으로 볼 수 있다. 결국, PEM 연료전지 시스템의

전압 크기를 구하는 데에 있어서  $E$ 가 가장 중요한 요소라 볼 수 있다. 이 open circuit voltage를 구하는 식은 다음과 같다.

$$E = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left( \ln(p_{H_2,an}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2,ca}) \right) \quad (2)$$

여기서,  $T_{fc}$ 는 연료전지의 Kelvin 온도를 나타내며,  $p_{H_2,an}$ 와  $p_{O_2,ca}$ 는 각각 atm으로 표시되는 압력 크기를 나타낸다. 즉, 연료전지 전압을 결정하는 요소에는 수소와 산소의 압력이 가장 중요하다고 볼 수 있다. 이러한 수소와 산소의 압력 크기는 각각 Anode Flow model과 Cathod Flow Model 구성요소에서 얻을 수 있고, 이에 관한 식은 동적 방정식 형태로 나타낼 수 있다. 먼저 cathode flow model의 동적 방정식은 다음과 같다.

**cathode flow model :**

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{cp}}{dt} &= -\eta \frac{k_t k_v}{R_{cm} J_{cp}} \omega_{cp} + \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm} J_{cp}} v_{cm} - \frac{c_p T_{atm} k_{cp}}{\eta_{cp}} \left\{ \left( \frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\} \Phi \\ \frac{dp_{sm}}{dt} &= -\frac{\gamma R_a T_{sm} k_{sm,out}}{V_{sm}} p_{sm} + \frac{\gamma R_a T_{cp} k_{cp} \Phi}{V_{sm}} \omega_{cp} + \frac{\gamma R_a T_{sm} k_{sm,out}}{V_{sm}} p_{ca} \\ \frac{dp_{O_2}}{dt} &= -\frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} M_{O_2} \frac{n}{4F} I_{st} - \frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} \left( \frac{x_{O_2,in} k_{ca,in}}{1 + \omega_{ca,in}} + \frac{x_{O_2,out} k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}} \right) (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) \\ &\quad + \frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{x_{O_2,in} k_{ca,in}}{1 + \omega_{ca,in}} p_{sm} + \frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{x_{O_2,out} k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}} p_{rm} \\ \frac{dp_{N_2}}{dt} &= \frac{R_{N_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{(1 - x_{O_2,in}) k_{ca,1}}{1 + \omega_{ca,in}} p_{sm} + \frac{R_{N_2} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{(1 - x_{O_2,out}) k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}} p_{rm} \\ &\quad - \frac{R_{N_2} T_{ca}}{V_{ca}} \left\{ \frac{(1 - x_{O_2,in}) k_{ca,1}}{1 + \omega_{ca,in}} + \frac{(1 - x_{O_2,out}) k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}} \right\} (p_{N_2} + p_{O_2} + p_{v,ca}) \\ \frac{dp_{v,ca}}{dt} &= \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{M_v n (1 + 2A_{fc} n_d)}{2F} I_{st} - \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{M_v A_{fc} n D_w}{t_m} (f(p_{v,ca}) p_{v,ca} - f(p_{v,an}) p_{v,an}) \\ &\quad - \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \left( \frac{\omega_{ca,in} k_{ca,1}}{1 + \omega_{ca,in}} + \frac{\omega_{ca,out} k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}} \right) (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) + \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{\omega_{ca,in} k_{ca,1}}{1 + \omega_{ca,in}} p_{sm} \\ &\quad + \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}} \frac{\omega_{ca,out} k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}} p_{rm} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\omega_{cp}$ 는 compressor의 회전 속도,  $p_{sm}$ 은 supply manifold의 압력,  $p_{O_2}$ 는 산소의 압력,  $p_{N_2}$ 는 질소의 압력,  $p_{v,ca}$ 는 캐소드의 증기 압력을 의미한다. 또한, anode flow model의 동적 방정식은 다음과 같다.

**anode flow model :**

$$\begin{aligned} \frac{dp_{sm,an}}{dt} &= -\frac{R_{H_2} T_{sm,an} k_{sm,an,out}}{V_{sm,an}} p_{sm,an} + \frac{R_{H_2} T_{sm,an} k_{sm,an,out}}{V_{sm,an}} p_{an} \\ \frac{dp_{H_2}}{dt} &= -\left( \frac{k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{H_2,out} \right) \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} p_{H_2} - \left( \frac{k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{H_2,out} \right) \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} p_{v,an} + k_{H_2,out} \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) \\ &\quad - \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} M_{H_2} \frac{n}{2F} I_{st} + \frac{k_1}{1 + \omega_{an,in}} \frac{R_H T_{an}}{V_{an}} p_{sm,an} \\ \frac{dp_{v,an}}{dt} &= -\left( \frac{\omega_{an,in} k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{v,an,out} \right) \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} p_{v,an} - \left( \frac{\omega_{an,in} k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{v,an,out} \right) \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} p_{H_2} \\ &\quad + k_{v,an,out} \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} (p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca}) + \frac{\omega_{an,in} k_1}{1 + \omega_{an,in}} \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} p_{sm,an} \\ &\quad + \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} \frac{M_v A_{fc} n D_w}{t_m} (f(p_{v,ca}) p_{v,ca} - f(p_{v,an}) p_{v,an}) - \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}} \frac{M_v A_{fc} n n_d}{F} I_{st} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $p_{sm,an}$ 는 supply manifold가 애노드에 미치는 압력을 의미하고,  $p_{H_2}$ 는 수소의 압력,  $p_{v,an}$ 은 애노드의 증기 압력을 의미한다. 위의 캐소드와 애노드 동적 방정식에서 나오는 값들을 이용해 스택 전압에 들어가는 입력 값은 다음의 방정식을 통해서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} p_{H_2,an} &= p_{H_2} + p_{v,an} \\ p_{O_2,ca} &= p_{O_2} + p_{N_2} + p_{v,ca} \end{aligned} \quad (5)$$

#### ◦ 비선형성 해결을 위한 퍼지 모델링

PEM 연료전지 시스템의 캐소드 동적 방정식과 애노드 동적 방정식에서  $f(p_{v,an})$ 와  $f(p_{v,ca})$ 의 비선형성을 살펴볼 수 있다. 이 비선형성은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} 0 < \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \leq 1 \text{ 일 때, } & f(p_{v,i}) = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \frac{1}{p_{sat,i}} \left( 17.81 - 39.85 \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} + 36 \left( \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \right)^2 \right) \\ 1 < \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \leq 3 \text{ 일 때, } & f(p_{v,i}) = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \frac{1.4}{p_{sat,i}} \end{aligned}$$

이와 같은 비선형을 포함한 시스템은 T-S (Takagi-Sugeno) 퍼지 시스템으로 표현될 수 있다. T-S 퍼지 시스템은 퍼지 결합 법칙 (fuzzy inference engine)과 몇몇의 국소 선형 시스템 (local linear system)의 결합으로써 표현된다. 좀 더 정확히,  $i$ 번째 법칙에서의 T-S 퍼지 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R^i: & \text{ IF } z_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\ & \text{ THEN } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t). \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $i = 1, 2, \dots, q$ ,  $\Gamma_j^i$ 는 퍼지 집합(fuzzy set),  $z(t) \in R^n$ 는 상태 벡터(state vector),  $u(t) \in R^m$ 는 제어 입력 벡터(control input vector),  $A_i \in R^{n \times n}$  과  $B_i \in R^{n \times m}$ 은 각각 시스템 행렬(system matrix)과 입력 벡터(input matrix)를 말한다. 그리고  $q$ 는 T-S 퍼지 모델의 개수를 의미한다. 식 (6)의 비퍼지화(defuzzified) 된 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^q \mu_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)), \quad (7)$$

여기서

$$\omega_i(z(t)) = \prod_{j=1}^n \Gamma_j^i(z_j(t)), \quad \mu_i(z(t)) = \frac{\omega_i(z(t))}{\sum_{i=1}^q \omega_i(z(t))},$$

$\Gamma_j^i(z_j(t))$ 는  $\Gamma_j^i$ 에 속해 있는  $z_j(t)$ 의 소속 정도(grade of membership function)을 의미한다.  $\omega_i(t)$ 의 기본적인 특성은 다음과 같다:

$$\omega_i(z(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^q \omega_i(z(t)) > 0, \quad i = 1, 2, \dots, q. \quad (8)$$

따라서 다음 특성 역시 성립하게 된다.

$$\mu_i(z(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^q \mu_i(z(t)) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, q. \quad (9)$$

PEM 연료 전지 시스템에서의 퍼지 모델링을 위하여 각 변수에 대한 변위를 지정한다.

◦ 캐소드 및 애노드 측 내부 압력을 측정하기 위한 퍼지 관측기 설계

캐소드와 애노드에서 나오는 압력은 연료전지의 스택 전압을 결정짓는 중요한 요소이다. 뿐만 아니라, 이들 전압은 연료 전지 발생 전력 및 효율에도 커다란 영향을 준다. 하지만 캐소드 와 애노드의 압력을 센서를 이용해 직접적으로 측정하는 것은 거의 불가능하다. 그것은 캐소드와 애노드의 내부 압력을 측정해야 하기 때문에, 측정기를 달기도 어려울 뿐만 아니라, 측정기에 의해서 연료전지의 성능이 많이 저하될 수도 있기 때문이다. 따라서 이러한 측정의 문제는 자연스럽게 관측기 설계로 이어질 수 있다. 연료전지 시스템은 비선형성을 내포하고 있기 때문에 기존의 선형 관측기로는 관측의 성능을 높일 수 없다. 따라서 퍼지 관측기를 통하여 보다 정확한 압력을 측정하게 된다.

일반적인 비선형 퍼지 관측기의 규칙은 다음과 같이 표시되기 된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Observer Rule } i: \\
 & \text{IF } z_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i \text{ and } z_2(t) \text{ is } \Gamma_2^i, \dots, \text{ and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i \\
 & \text{THEN} \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + F_i (y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C_i \hat{x}(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, q
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서  $F_i \in R^{n \times l}$ 은 관측기 이득 행렬이다.

위의 퍼지 규칙을 디퍼지화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}(t) &= \sum_{i=1}^q \mu_i(z(t)) (A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + F_i (y(t) - \hat{y}(t))) \\
 \hat{y}(t) &= \sum_{i=1}^q \mu_i(z(t)) C_i \hat{x}(t)
 \end{aligned} \tag{11}$$

퍼지 관측기를 통해서 얻은 추정치와 원래 시스템의 상태 변수 사이의 추정 오차는 아래와 같이 구성된다.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \tag{12}$$

이를 양변에 시간에 대해서 미분을 해주게 되면

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^q \mu_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) - \sum_{i=1}^q \mu_i(z(t)) (A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + F_i (y(t) - \hat{y}(t))) \tag{13}$$

와 같은 결과를 얻게 되고, 최종적으로 다음과 같은 식으로 도출된다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) ((A_i + F_i C_j) \tilde{x}(t)) \tag{14}$$

여기서  $\tilde{x}(t)$ 를 안정화 시킨다는 것은 추정 오차가 0으로 수렴한다는 뜻으로 추정치의 상태변수  $\hat{x}(t)$ 가 본래 시스템의 상태변수  $x(t)$ 를 따라간다는 것을 의미한다. 결국, 위의 동적 방정식을 안정화 시킬 수 있는 이득값  $F_i$ 를 찾는 것이 목적이 된다.

◦ 연료전지 시스템의 안정화를 위한 퍼지 제어기 설계

연료전지 시스템은 기본적으로 비선형 시스템이다. 따라서 연료전지 스택의 캐소드 및 애노드의 압력 제어기를 설계하기 위해서는 기존의 선형 제어기로는 거의 불가능하다. 퍼지 관측기를 통해 얻은 캐소드와 애노드의 압력을 이용해서 퍼지 제어기의 규칙을 만들면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Controller Rule } i: \\
 & \text{IF } z_1(t) \text{ is } \Gamma_1^i, \dots, \text{ and } z_n(t) \text{ is } \Gamma_n^i, \\
 & \text{THEN } u(t) = K_i \hat{x}(t), \quad (1 \leq i \leq q)
 \end{aligned} \tag{15}$$

여기서  $K_i$ 는 적절한 크기를 가지는 제어 이득 행렬이다.

위의 퍼지 규칙을 디퍼지화하면 다음의 퍼지 제어기를 얻을 수 있다.

$$u(t) = \sum_{i=1}^q \mu_i(z(t)) K_i \hat{x}(t) \quad (16)$$

위에서 구한 퍼지 관측기와 퍼지 제어기를 이용해서 비선형 시스템의 페루프 퍼지 시스템을 구하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) ((A_i + B_i K_j) x(t) - B_i K_j \tilde{x}(t)) \\ \dot{\tilde{x}}(t) &= \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) ((A_i + F_i C_j) \tilde{x}(t)) \end{aligned} \quad (17)$$

정리된 페루프 시스템은 그림 14와 같은 형태로 나타난다. 1차년도의 연구 목적은 PEMFC 발전시스템의 페루프 시스템 (17)이 안정화되는 충분조건을 구하고 이를 통해, 이득 행렬  $F_i$ 와  $K_i$ 를 구하는 것이다. 그리고 구해진 이득행렬을 이용해서 안정한 전압이 나오는 것을 확인하는 것이다.

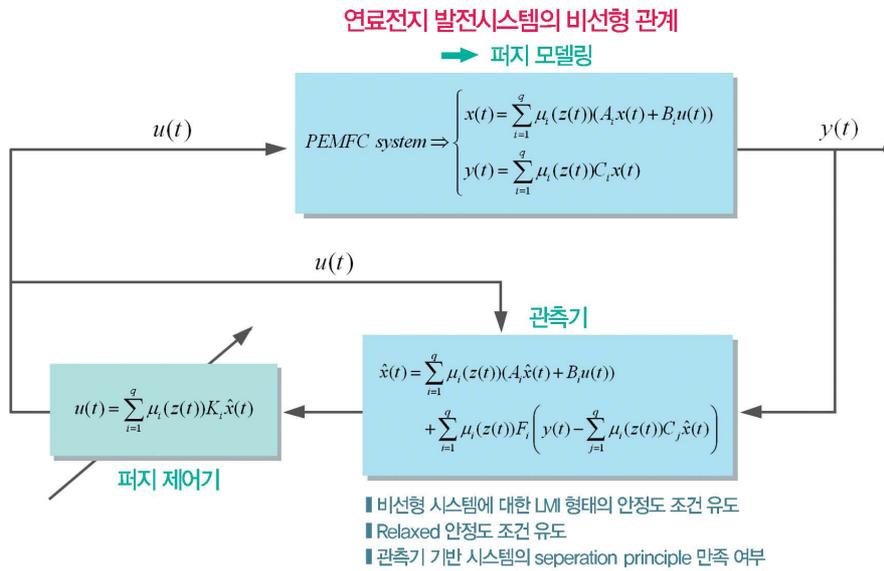


그림 9. 연료전지 발전시스템의 퍼지 관측기 및 퍼지 제어기 구성도

### ○ 외부 환경에 강인한 제어기 설계

PEM 연료전지 발전시스템은 수소와 산소간의 화학반응을 이용하여 발전하는 방식으로 온도나 주변 압력 등에 의해서 많은 영향을 받게 된다. 이와 같은 제약으로 인하여 연료전지 발전시스템의 모델링이 완벽히 수행되었다 하더라도 파라미터 상의 변동은 존재 할 수밖에 없으며, 이는 곧 시스템의 안정화에 악영향을 미치게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 1차년도 때 설계되었던 퍼지 모델 기반 제어 방식에서 보다 발전하여, 각 파라미터에 존재하는 불확실성을 고려한 퍼지 제어 알고리즘을 개발하게 된다.

다음과 같은 불확실성이 포함된 연속시간 시스템을 가정하자.

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) \quad (18)$$

여기서,  $x_c(t) \in R^n$  은 상태 벡터 이며,  $y_c(t) \in R^p$  이다. 그리고  $A$  와  $B$  는 일반 상태 벡터를 의미하며,  $\Delta A$  와  $\Delta B$  는 적당한 크기를 갖는 불확실성을 나타내는 벡터이다. 본 논문 전체를 통틀어 우리는 모든 상태들이 직접적으로 측정되는 않지만,  $(A, B)$ 는 제어 가능하고  $(A, C)$ 는 관측 가능하다고 가정하게 된다. 또한 우리는 불확실성을 나타내는 벡터

$(\Delta A, \Delta B)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다고 가정한다.

가정 1) 불확실성을 나타내는 두 식,  $\Delta A$  와  $\Delta B$  는 다음과 같이 놈(norm) 바운드 되어 있다.

$$[\Delta A \ \Delta B] = DF(t)[E_1 \ E_2] \quad (19)$$

여기서  $D$ ,  $E_1$ , 와  $E_2$  는 불확실성을 나타내는, 충분한 공간을 가진 결정된 행렬이며,  $F(t)$  는 불확실성을 내포한 Lebesgue-measurable 값으로  $F^T(t)F(t) \leq I$  를 만족하게 된다.

### 3.3 연구 결과

#### ◦ PEM 연료 전지 시스템의 퍼지 모델링

PEM 연료전지 발전시스템에서 비선형성을 포함하고 있는 함수는  $f(p_{v,an})$ 와  $f(p_{v,ca})$ 는 다음의 식으로 간략히 표현할 수 있다.

$$f(p_{v,i}) = \frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \frac{1}{p_{sat,i}} \left( 17.81 - 39.85 \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} + 36 \left( \frac{p_{v,i}}{p_{sat,i}} \right)^2 \right) \quad (20)$$

여기서  $p_{v,i}/p_{sat,i}$ 는 0에서 1사이의 값을 가진다. 위의 비선형 함수를 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하기 위해서 다음 두 개의 방정식을 고려한다.

$$\begin{aligned} f(p_{v,i}) &= \Gamma_i^1(p_{v,i}) \alpha_i p_{v,i} + \Gamma_i^2(p_{v,i}) \beta_i p_{v,i} \\ 1 &= \Gamma_i^1(p_{v,i}) + \Gamma_i^2(p_{v,i}) \end{aligned}$$

여기서,  $\alpha_i$ 는  $(39.85^2 - 4 \cdot 17.81 \cdot 36)/(4 \cdot 36)$ 이고  $\beta_i$ 는  $\max(f(0), f(1))$ 이다. 위의 두 방정식을 이용하여 다음의 T-S 퍼지 규칙을 정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Rule } (i, j) \text{ of subsystem } k \\ & R_{ij}^k: \text{IF } p_{v,ca} \text{ is } \Gamma_{v,ca}^i \text{ and } p_{v,an} \text{ is } \Gamma_{v,an}^j \\ & \text{THEN } \dot{x}_k(t) = A_{ij}^k x_k(t) + B_{ij}^k u(t) + \sum_{l=1, l \neq k}^q A_{ij}^{kl} x_l(t) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_{1j}^1 &= \begin{bmatrix} -a_1 a_2 & -a_1 a_2 & -a_1 a_2 \\ -a_1 a_4 & -a_1 a_4 & -a_1 a_4 \\ -a_1 a_7 & -a_1 a_7 & -a_1 a_7 - a_1 a_6 a_{12} \alpha_{ca} \end{bmatrix}, & A_{2j}^1 &= \begin{bmatrix} -a_1 a_2 & -a_1 a_2 & -a_1 a_2 \\ -a_1 a_4 & -a_1 a_4 & -a_1 a_4 \\ -a_1 a_7 & -a_1 a_7 & -a_1 a_7 - a_1 a_6 a_{12} \beta_{ca} \end{bmatrix}, \\ A_{i1}^{12} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & r a_1 a_6 a_{12} \alpha_{an} \end{bmatrix}, & A_{i2}^{12} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & r a_1 a_6 a_{12} \beta_{an} \end{bmatrix}, & A_{1j}^2 &= \begin{bmatrix} -a_9 a_8 & -a_9 a_8 \\ -a_{11} a_8 & -a_{11} a_8 - r a_8 a_6 a_{12} \alpha_{an} \end{bmatrix}, \\ A_{2j}^2 &= \begin{bmatrix} -a_9 a_8 & -a_9 a_8 \\ -a_{11} a_8 & -a_{11} a_8 - r a_8 a_6 a_{12} \beta_{an} \end{bmatrix}, & A_{i1}^{21} &= \begin{bmatrix} k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 \\ k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 + r a_8 a_6 a_{12} \alpha_{ca} \end{bmatrix}, \\ A_{i2}^{21} &= \begin{bmatrix} k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 \\ k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 & k_{H_2, out} a_8 + r a_8 a_6 a_{12} \beta_{ca} \end{bmatrix}, & B_{ij}^1 &= \begin{bmatrix} -a_1 a_3 \\ 0 \\ a_1 a_5 \end{bmatrix}, & B_{ij}^2 &= \begin{bmatrix} -a_8 a_{10} \\ -a_8 a_{13} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

이고,  $r = 0.01$ ,  $h_{H_2, out} = 0.2 \times 10^{-7}$ 이다.  $(i, j) \in I_2$ 는 퍼지 규칙수를 나타내고,  $k \in I_q$ 는 하위 시스템의 수를 나타낸다. 고분자 연료전지 시스템의 경우는 cathode와 anode로 두 개의 하위 시스템으로 구성되어 있다. 각 파라미터의 의미와 값은 표 6에 나타나 있다.

[표 6] 연료전지 시스템의 각 파라미터들의 의미

Parameter	Meaning	Parameter	Meaning
$a_1$	$\frac{R_{O_2} T_{ca}}{V_{ca}} = \frac{R_{N_2} T_{ca}}{V_{ca}} = \frac{R_{v,ca} T_{ca}}{V_{ca}}$	$a_8$	$\frac{R_H T_{an}}{V_{an}} = \frac{R_{v,an} T_{an}}{V_{an}}$
$a_2$	$\frac{x_{O_2,in} k_{ca,in}}{1 + \omega_{ca,in}} + \frac{x_{O_2,out} k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}}$	$a_9$	$\frac{k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{H_2,out}$
$a_3$	$M_{O_2} \frac{n}{4F}$	$a_{10}$	$M_{H_2} \frac{n}{2F}$
$a_4$	$\frac{(1 - x_{O_2,in}) k_{ca,in}}{1 + \omega_{ca,in}} + \frac{(1 - x_{O_2,out}) k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}}$	$a_{11}$	$\frac{\omega_{an,in} k_1}{1 + \omega_{an,in}} + k_{v,an,out}$
$a_5$	$\frac{M_v n (1 + 2A_{fc} n_d)}{2F}$	$a_{12}$	$\frac{\rho_{m,dry}}{M_{m,dry}} \frac{1}{p_{sat,i}}$
$a_6$	$\frac{M_v A_{fc} n D_w}{t_m}$	$a_{13}$	$\frac{M_v A_{fc} n n_d}{F}$
$a_7$	$\frac{\omega_{ca,in} k_{ca,in}}{1 + \omega_{ca,in}} + \frac{\omega_{ca,out} k_{ca,out}}{1 + \omega_{ca,out}}$		

위의 퍼지 규칙을 통해 PEM 연료전지 시스템을 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{x}_k(t) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \mu_i(x_k(t)) \mu_j(x_k(t)) \left( A_{ij}^k x_k(t) + B_{ij}^k u(t) + \sum_{l=1, l \neq k}^q A_{ij}^{kl} x_l(t) \right) \quad (22)$$

여기서,  $\mu_i(x_k(t)) = \left( \prod_{s=1}^t \Gamma_i^s(x_k(t)) \right) / \sum_{i=1}^2 \left( \prod_{s=1}^t \Gamma_i^s(x_k(t)) \right)$  이고,  $\Gamma_i^s(x_k(t))$  는 소속함수의 소속정도를 나타낸다. 그림 10은 소속함수의 값을 나타낸 것으로, 각 소속함수들이 0과 1 사이에 언제나 존재하며, 그 합들이 언제나 1이라는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 11와 12는 연료전지 시스템의 비선형 함수를 T-S 퍼지 모델링한 것과 비교한 것으로 그림을 통해, 퍼지 모델링 이후에도 원래 시스템과 그 특성이 동일하다는 것을 알 수 있다.

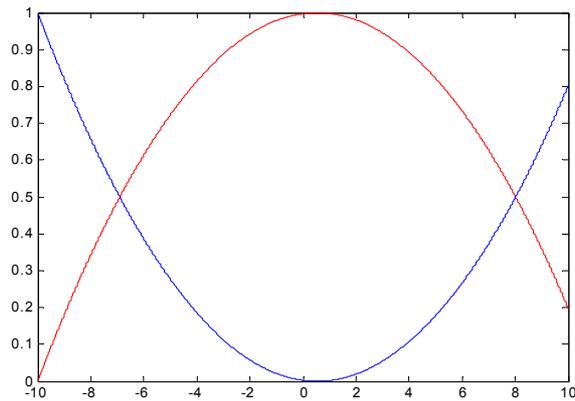


그림 10. 연료전지 시스템의 소속함수

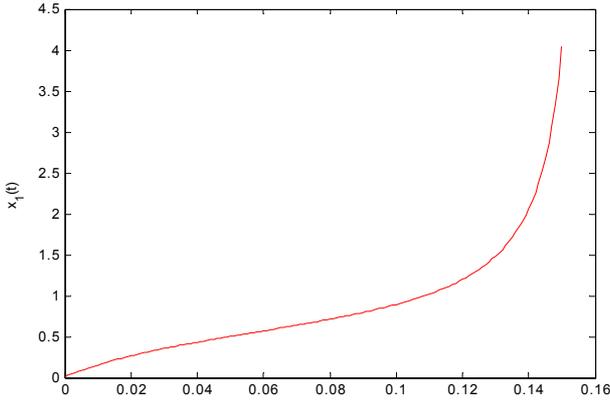


그림 11. 연료전지 시스템의 상태 변수 곡선

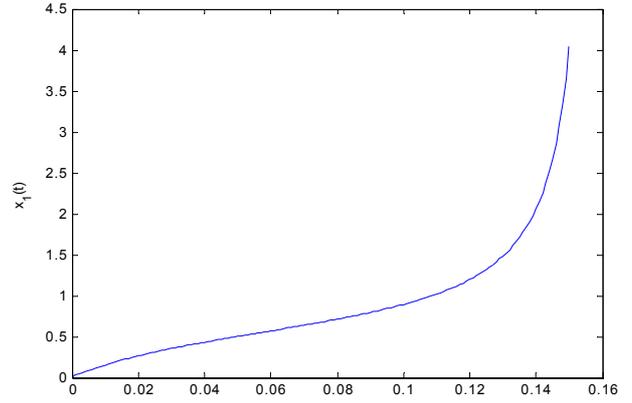


그림 12. 퍼지 모델링된 시스템의 상태 변수 곡선

### ◦ PEM 연료 전지 시스템의 안정화를 위한 관측기 기반 분산 퍼지 제어기 설계

PEMFC는 기본적으로 캐소드 모델과 애노드 모델의 상호결합 형태를 띄고 있다. 하지만 일반적인 상호결합 시스템과는 달리 입력 부분은 stack current의 공통 입력을 갖고 있다. 따라서 기존의 상호결합 시스템에 대한 분산 제어 기법이 아닌 새로운 제어 기법이 필요하다. 이를 위해 다음과 같은 공통 입력을 갖는 퍼지 상호결합 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) &= \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) \left( A_i^k x_k(t) + B_i^k u(t) + \sum_{l=1, l \neq k}^q A_i^{kl} x_l(t) \right) \\ y_k(t) &= C^k x_k(t) \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,

$$h_i^k(z_k(t)) = \left( \prod_{m=1}^p \Gamma_m^i(z_{km}(t)) \right) / \sum_{i=1}^r \left( \prod_{m=1}^p \Gamma_m^i(z_{km}(t)) \right)$$

이고,  $\Gamma_m^i(z_{km}(k))$ 는 소속함수의 소속정도를 나타낸다. 또한,  $r$ 은 퍼지 규칙수를 나타내고  $A_i^k$ ,  $B_i^k$ ,  $C^k$ 와  $A_i^{kl}$ 는 적절한 크기를 가지는 선형 행렬이다.

위의 퍼지 상호결합 시스템을 바탕으로 관측기 기반 퍼지 분산 퍼지 제어기를 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_k(t) &= \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) (A_i^k \hat{x}_k(t) + B_i^k u(t) - L_i^k (y_k(t) - \hat{y}_k(t))) \\ y_k(t) &= C^k \hat{x}_k(t) \\ u(t) &= \sum_{i=1}^r \sum_{k=1}^q h_i^k(z_k(k)) K_i^k \hat{x}_k(t) \end{aligned} \quad (24)$$

위 시스템의 안정도를 구하기 위해 상태변수와 상태변수 추정치 간의 오차를 고려한다.

$$e_k(t) = x_k(t) - \hat{x}_k(t) \quad (25)$$

설계된 제어기 식 (24)을 식 (23)와 (25)에 대입하면 다음과 같은 폐루프 시스템을 얻을 수 있다.

$$\dot{\chi}_k = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^k(z_k(t)) h_j^k(z_k(t)) \left( \Phi_{ij}^k \chi_k + \sum_{l=1, l \neq k}^q h_j^l(z_k(t)) \Phi_{ij}^{kl} \chi_l \right) \quad (26)$$

여기서,

$$\chi_k = \begin{bmatrix} x_k(t) \\ e_k(t) \end{bmatrix}, \quad \Phi_{ij}^k = \begin{bmatrix} A_i^k + B_i^k K_j^k & -B_i^k K_j^k \\ 0 & A_i^k + L_i^k C^k \end{bmatrix}, \quad \Phi_{ij}^{kl} = \begin{bmatrix} A_i^{kl} + B_i^k K_j^l & -B_i^k K_j^l \\ 0 & A_i^{kl} \end{bmatrix}.$$

본 연구의 목적은 페루프 시스템 (26)이 안정화되는 충분조건을 구하고 이를 통해, 이득 행렬  $L_i^k$ 와  $K_i^k$ 를 구하는 것이다. 이를 위해서는 다음의 보조 정리가 필요하다.

**보조 정리 1)** 적합한 차원의 어떤 양한정 행렬  $P^k$ 와 양수  $\alpha$ 가 주어졌을 때 다음의 방정식은 항상 성립한다.

$$\sum_{k=1}^q \sum_{l=1, l \neq k}^q \alpha \chi_l(t)^T P^l \chi_l(t) = \sum_{k=1}^q \sum_{l=1, l \neq k}^q \alpha \chi_k(t)^T P^k \chi_k(t)$$

위의 보조 정리를 이용하여 페루프 상호결합 시스템의 안정도 조건을 구하기 위해 다음과 같은 Lyapunov 함수 후보를 정의한다.

$$V = \sum_{k=1}^q (x_k(t)^T P_1^k x_k(t) + e_k(t)^T P_2^k e_k(t)) \quad (27)$$

여기서  $P_1^k$ 와  $P_2^k$ 는 양한정 행렬이다. 위의 Lyapunov 함수 후보의 변화율을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{k=1}^q (\dot{\chi}_k^T P^k \chi_k + \chi_k^T P^k \dot{\chi}_k) \\ &= \sum_{k=1}^q \sum_{l=1, l \neq k}^q \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^k(z_k(t)) h_j^k(z_k(t)) h_j^l(z_l(t)) \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \chi_k \\ \chi_l \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{1}{q-1} ((\Phi_{ij}^k)^T P^k + P^k \Phi_{ij}^k) & P^k \Phi_{ij}^{kl} \\ (\Phi_{ij}^{kl})^T P^k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_k \\ \chi_l \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

식 (28)에 보조 정리 1을 대입하고 풀어주면, 다음의 두 부등식이 성립하면 상호결합 시스템이 안정화됨을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{q-1} ((\Phi_{ii}^k)^T P^k + P^k \Phi_{ii}^k + \alpha P^k) & P^k \Phi_{ii}^{kl} \\ (\Phi_{ii}^{kl})^T P^k & -\frac{\alpha}{q-1} P^l \end{bmatrix} < 0 \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{q-1} ((\Phi_{ij}^k)^T P^k + P^k \Phi_{ij}^k + (\Phi_{ji}^k)^T P^k + P^k \Phi_{ji}^k + 2\alpha P^k) & P^k \Phi_{ij}^{kl} + P^k \Phi_{ji}^{kl} \\ (\Phi_{ij}^{kl})^T P^k + (\Phi_{ji}^{kl})^T P^k & -\frac{2\alpha}{q-1} P^l \end{bmatrix} < 0 \quad (30)$$

위의 두 부등식의 양변에  $\text{diag}\{(P_1^k)^{-1}, I, (P_1^l)^{-1}, I\}$ 를 곱해주고  $(P_1^k)^{-1} = Q_1^k$ ,  $K_i^k (P_1^k)^{-1} = M_i^k$ 와  $N_i^k = P_2^k L_i^k$ 를 치환해주면 다음의 정리를 얻을 수 있다.

**정리 1)** 만약 다음의 선형 행렬 부등식들을 만족하는 양한정 행렬  $Q_1^k$ ,  $P_2^k$ 와 어떤 행렬  $M_i^k$ ,  $N_i^k$ 가 존재하게 된다면, 관측기 기반 분산 퍼지 제어를 가지는 비선형 상호결합 시스템은 점근적으로 안정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ij}^k & * & * & * \\ -\frac{1}{q-1} (B_i^k M_j^k)^T & \Omega_{ij}^k & * & * \\ (\Psi_{ij}^{kl})^T & 0 & -\frac{\alpha}{q-1} Q_1^l & * \\ -(B_i^k M_j^l)^T & (A_i^{kl})^T P^k & 0 & -\frac{\alpha}{q-1} P_2^l \end{bmatrix} < 0 \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ij}^k + \Psi_{ji}^k & * & * & * \\ -\frac{1}{q-1}(B_i^k M_j^k)^T & \Omega_i^k + \Omega_j^k & * & * \\ (\Psi_{ij}^{kl} + \Psi_{ji}^{kl})^T & 0 & -\frac{2\alpha}{q-1}Q_1^l & * \\ - (B_i^k M_j^l + B_j^k M_i^l)^T & (A_i^{kl} + A_j^{kl})^T P_2^k & 0 & -\frac{2\alpha}{q-1}P_2^l \end{bmatrix} < 0 \quad (32)$$

여기서

$$\Psi_{ij}^k = \frac{1}{q-1}(A_i^k Q_1^k + Q_1^k (A_i^k)^T + B_i^k M_j^k + (B_i^k M_j^k)^T + \alpha Q_1^k),$$

$$\Omega_{ij}^k = \frac{1}{q-1}(P_2^k A_i^k + (A_i^k)^T P_2^k + N_i^k C^k + (N_i^k C^k)^T + \alpha P_2^k),$$

$$\Psi_{ij}^{kl} = A_i^{kl} Q_1^l + B_i^k M_j^l$$

이고,  $1 \leq i < j \leq r$ , \*는 행렬에서의 전칭요소를 의미한다.

위의 정리에서 구한 선형 행렬 부등식을 이용하여 고분자 전해질 연료전지 시스템의 관측기 기반 분산 퍼지 제어기를 설계한다. 제어기 설계에 필요한 각 파라미터의 값들은 표 7에 나타나 있다. 이때,  $\alpha=1$ 로 정하면 관측기와 제어기의 이득값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_1^1 &= [0.061902 \quad -0.013162 \quad 0.00021868], & K_2^1 &= [0.059157 - 0.012579 \quad 0.00054425], \\ K_3^1 &= [0.09284 \quad -0.019747 \quad 0.00020013], & K_4^1 &= [0.091384 \quad -0.019437 \quad 0.00057374], \\ K_1^2 &= [-9.6905 \times 10^{-6} \quad 1.541 \times 10^{-5}], & K_2^2 &= [-8.7456 \times 10^{-6} \quad 9.7873 \times 10^{-6}], \\ K_1^2 &= [8.511 \times 10^{-6} \quad -0.00011937], & K_4^2 &= [9.4927 \times 10^{-6} \quad -0.00019153], \\ L_1^1 &= \begin{bmatrix} -0.98895 \\ 1.2755 \\ 201.47 \end{bmatrix}, & L_2^1 &= \begin{bmatrix} -0.98894 \\ 1.2755 \\ 201.88 \end{bmatrix}, & L_3^1 &= \begin{bmatrix} -0.98807 \\ 1.2725 \\ 198.42 \end{bmatrix}, & L_4^1 &= \begin{bmatrix} -0.98805 \\ 1.2725 \\ 198.95 \end{bmatrix}, \\ L_1^2 &= \begin{bmatrix} 0.65798 \\ 586.67 \end{bmatrix}, & L_2^2 &= \begin{bmatrix} 0.72224 \\ 660.95 \end{bmatrix}, & L_3^2 &= \begin{bmatrix} -0.038529 \\ -278.12 \end{bmatrix}, & L_4^2 &= \begin{bmatrix} 0.0094748 \\ -231.28 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

그림 13, 14, 15, 16는 모의실험의 결과로 시스템의 상태변수  $x_k(t)$ 와 상태변수와 추정치 간의 오차  $e_k(t)$ 를 나타내는 것으로 시스템이 안정화되었다는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 우리는 공통 입력을 갖는 비선형 상호결합 시스템의 분산 퍼지 제어기를 설계하였으며, 제어기를 통하여 PEMFC가 안정화되었다는 것을 알 수 있다.

[표 7] 연료전지 시스템의 각 파라미터들의 값

Parameter	Value	Parameter	Value
$a_1$	293498.32	$a_8$	586996.64
$a_2$	0.00000045385	$a_9$	0.00000202
$a_3$	0.00003159	$a_{10}$	0.000039488
$a_4$	0.2	$a_{11}$	0.00000202
$a_5$	0.00000213465	$a_{12}$	0.00036364
$a_6$	0.46688	$a_{13}$	0.025244
$a_7$	0.0000025885		

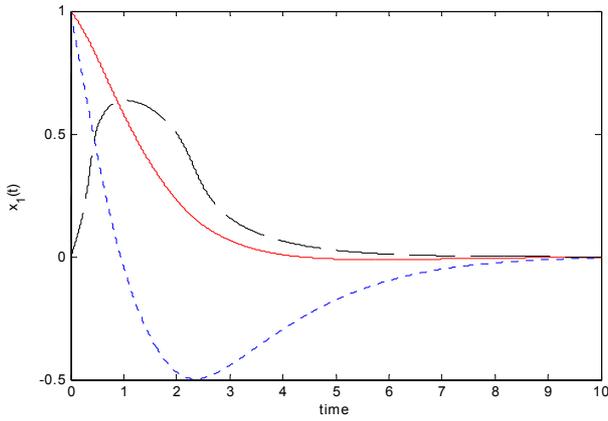


그림 13. 캐소드 모델의 상태변수들

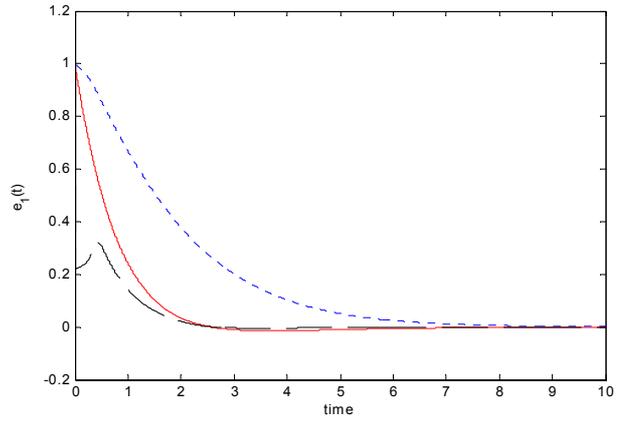


그림 14. 캐소드의 상태변수와 추정치 간의 오차

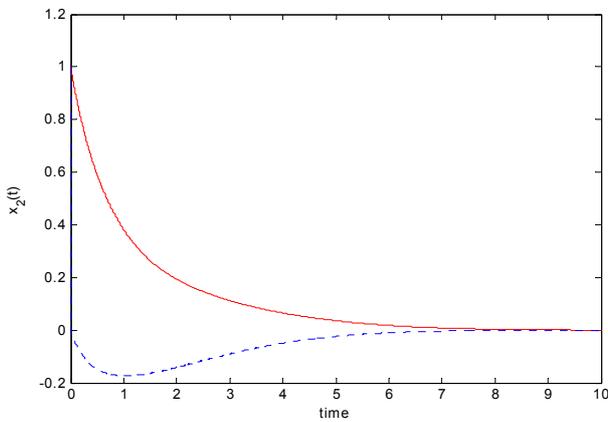


그림 15. 애노드 모델의 상태변수들

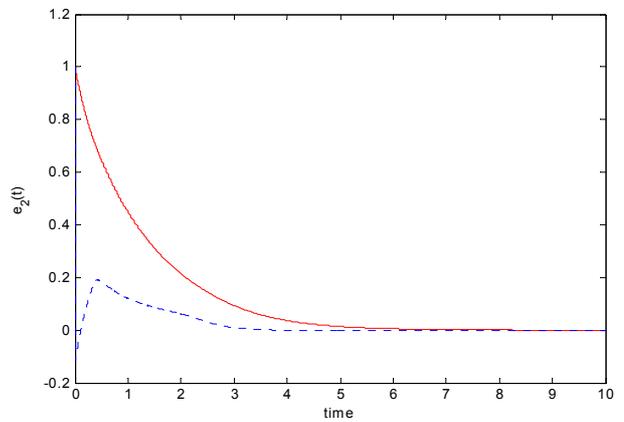


그림 16. 애노드 모델의 상태변수와 추정치 간의 오차

### ○ 이산시간 연료전지 시스템의 안정도 조건

최근, 연료전지의 제어는 직접적인 회로를 통한 제어보다는 원격 제어나 컴퓨터를 통한 디지털 제어가 더욱 많이 사용되고 있다. 따라서 연료전지 시스템의 효율성을 높이기 위해서는 이산시간에 대한 해석이 필수적이라 하겠다. 이를 위해, 다음과 같은  $q$ 개의 하위 시스템을 갖는 이산 시간 비선형 상호결합 시스템을 고려한다.

$$x(t+1) = f_k(x_k(t)) + g_k(u_k(t)) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q f_{kl}(x_l(t)) \quad (33)$$

$$y_k(t) = C^k x_k(t)$$

여기서,  $x_k(t) \in R^{n_k}$ 는 상태변수,  $u_k(t) \in R^{m_k}$ 는 입력변수,  $y_k(t) \in R^{l_k}$ 는 출력변수를 나타낸다. 또한 출력 함수는 선형이라 가정한다. 식 (34)를 T-S 퍼지 시스템 모델링하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$x_k(t+1) = \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) \left( A_i^k x_k(t) + B_i^k u_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q A_i^{kl} x_l(t) \right) \quad (34)$$

$$y_k(t) = C^k x_k(t)$$

여기서,

$$h_i^k(z_k(t)) = \left( \prod_{q=1}^p \Gamma_{iq}^k(z_q^k(t)) \right) / \sum_{i=1}^r \left( \prod_{q=1}^p \Gamma_{iq}^k(z_q^k(t)) \right)$$

이고,  $\Gamma_{iq}^k(z_q(k))$ 는 소속함수의 소속정도를 나타낸다.

제시된 퍼지 시스템의 제어를 위한 공동 입력을 가지는 출력 궤환 제어기는 다음과 같은 형태를 나타내게 된다.

$$u_k(t) = u(t) = \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) K_i^k y_k(t) \quad (35)$$

위의 제어기 (35)에서 볼 수 있듯이 각 하위 시스템에 포함되는 입력  $u_k(t)$ 은 하나의 입력  $u(t)$ 로 통일된다. 퍼지 출력 궤환 제어기 (35)를 상호결합 시스템 (34)에 대입하면 다음과 같은 페루프 시스템을 얻을 수 있다.

$$x_k(t+1) = \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) \left( A_i^k x_k(t) + B_i^k \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^r h_j^k(z_k(t)) K_j^k y_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q A_i^{kl} x_l(t) \right) \quad (36)$$

페루프 시스템 (37)을 안정화시키는 조건을 구하기 위해서는 다음의 가정과 보조 정리가 필요하다.

**가정 1)** 입력행렬에 해당하는  $C^k$ 는 항상 선행계수를 만족한다.

**보조 정리 2)** 적합한 차원의 어떤 상수 대칭 행렬  $N, O, L$ 이 주어졌을 때 다음의 두 개의 부등식은 서로 필요충분조건이 된다:

$$O > 0, \quad N + L^T O L < 0$$

$$\begin{bmatrix} N & L^T \\ L & -O^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} -O^{-1} & L \\ L^T & N \end{bmatrix} < 0.$$

**보조 정리 3)** 적합한 차원의 어떤 상수 행렬  $X_{ij}, Y_{ij}$ 가 주어지고, 양한정 행렬  $S$ 가 주어졌을 때 다음의 부등식이 성립하게 된다:

$$2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^r h_i h_j h_k h_l X_{ij}^T S Y_{kl} \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (X_{ij}^T S X_{ij} + Y_{ij}^T S Y_{ij})$$

여기서,  $h_i$ 는  $h_i \geq 0$ 와  $\sum_{i=1}^r h_i = 1$ 을 만족한다.

위의 가정과 보조 정리들을 바탕으로 Lyapunov 함수  $V = \sum_{k=1}^q x_k^T P^k x_k$ 를 잡는다. 이 Lyapunov 함수의 이산 시간 변화율을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sum_{k=1}^q (x_k^T(t+1) P^k x_k(t+1) - x_k^T(t) P^k x_k(t)) \\ &= \sum_{k=1}^q \left( \sum_{l=1, l \neq k}^q \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^k(z_k(t)) h_j^k(z_k(t)) h_j^l(z_l(t)) (\Phi_{ij}^k x_k(t) + \Phi_{ij}^{kl} x_l(t)) \right)^T P^k \\ &\quad \times \left( \sum_{l=1, l \neq k}^q \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^k(z_k(t)) h_j^k(z_k(t)) h_j^l(z_l(t)) (\Phi_{ij}^k x_k(t) + \Phi_{ij}^{kl} x_l(t)) \right) - \sum_{k=1}^q x_k^T(t) P^k x_k(t) \\ &\leq \frac{1}{4} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1, l \neq k}^q \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^k(z_k(t)) h_j^k(z_k(t)) h_j^l(z_l(t)) (q-1) \left( (\Phi_{ij}^k + \Phi_{ji}^k) x_k(t) + (\Phi_{ij}^{kl} + \Phi_{ji}^{kl}) x_l(t) \right)^T P^k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left( (\Phi_{ij}^k + \Phi_{ji}^k)x_k(t) + (\Phi_{ij}^{kl} + \Phi_{ji}^{kl})x_l(t) - \sum_{k=1}^q x_k^T(t)P^k x_k(t) \right) \\
& = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1, l \neq k}^q \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^k(z_k(t))h_j^k(z_k(t))h_j^l(z_l(t))(q-1) \begin{bmatrix} x_k(t) \\ x_l(t) \end{bmatrix}^T \\
& \quad \times \begin{bmatrix} \Phi_{ij}^k + \Phi_{ji}^k & \Phi_{ij}^{kl} + \Phi_{ji}^{kl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k(t) \\ x_l(t) \end{bmatrix} - \sum_{k=1}^q x_k^T(t)P^k x_k(t) \tag{37}
\end{aligned}$$

여기서,  $\Phi_{ij}^k = \frac{1}{q-1}(A_i^k + B_i^k K_j^k C^k)$ 이고,  $\Phi_{ij}^{kl} = A_i^k + B_i^k K_j^l C^l$ 이다. 위의 식 (37)로부터 다음의 정리를 이끌어 낼 수 있다.

**정리 2)** 만약 다음의 선형 행렬 부등식들과 특정한 조건을 만족하는 양한정 행렬  $Q^k$ 와 임의의 행렬  $M_i^k$ 가 존재하게 된다면, 출력 제한 퍼지 제어를 가지는 이산시간 비선형 상호결합 시스템 (36)은 안정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} -(4-\alpha)Q^k & * & * \\ 0 & -\alpha Q^l & * \\ \Phi_{ii}^k & \Phi_{ii}^{kl} & -\frac{1}{4(q-1)}Q^k \end{bmatrix} < 0, \tag{38}$$

$(1 \leq i \leq r)$

$$\begin{bmatrix} -(4-\alpha)Q^k & * & * \\ 0 & -\alpha Q^l & * \\ \Phi_{ij}^k + \Phi_{ji}^k & \Phi_{ij}^{kl} + \Phi_{ji}^{kl} & -\frac{1}{(q-1)}Q^k \end{bmatrix} < 0, \tag{39}$$

$(1 \leq i < j \leq r)$

그리고

$$C^k Q^k = N^k C^k \tag{40}$$

여기서 \*는 행렬에서의 전칭요소를 의미한다. 구해진 값을 통해 제어기 이득값은 다음과 같이 구한다.

$$K_i^k = M_i^k \{ C^k Q^k (C^k (C^k)^T)^{-1} \}^{-1}$$

그리고 비선형 상호결합 시스템에서 출력행렬  $C^k$ 의 경우 역행렬을 가지고 있을 필요는 없다. 하지만, 선형계수는 항상 만족해야 한다. 즉, 선형계수라는 가정을 통해  $C^k (C^k)^T$ 의 역행렬은 항상 존재해야 한다. 또한, 정리 2에서  $\alpha$ 값은 임의의 양수값이다. 하지만 선형 행렬 부등식이 만족하기 위해서는  $0 \leq \alpha \leq 4$ 의 조건을 같이 만족해야 한다.

이산시간 제어기의 모의실험을 위해 PEM 연료전지의 퍼지 모델을 이산화한다. 퍼지 모델의 이산화는 다음의 세 개의 식을 이용한다.

$$G_i^k = \exp(A_i^k T), \quad H_i^k = (G_i^k - I)(A_i^k)^{-1} B_i^k, \quad G_i^{kl} = (G_i^k - I)(A_i^k)^{-1} A_i^{kl}.$$

샘플링 시간  $T=0.02$ 라고 가정하고 위의 식을 이용해서 PEM 연료전지 시스템의 이산화 퍼지 모델을 구하면 다음과 같다.

$$x_k(t+1) = \sum_{i=1}^4 h_i^k(z_k(t)) \left( G_i^k x_k(t) + H_i^k u_k(t) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^2 G_i^{kl} x_l(t) \right)$$

여기서,

$$G_1^1 = G_3^1 = \begin{bmatrix} 0.985 & -0.0043 \\ -0.0043 & 0.0336 \end{bmatrix}, \quad G_2^1 = G_4^1 = \begin{bmatrix} 0.985 & -0.0017 \\ -0.0017 & 0.0001 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
G_1^{12} = G_3^{12} &= \begin{bmatrix} 0 & -0.0001 \\ 0 & 0.0096 \end{bmatrix}, & G_2^{12} = G_4^{12} &= \begin{bmatrix} 0 & -0.0001 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \\
G_1^2 = G_3^2 &= \begin{bmatrix} 0.9766 & -0.0034 \\ -0.0034 & 0.0011 \end{bmatrix}, & G_2^2 = G_4^2 &= \begin{bmatrix} 0.9766 & -0.0013 \\ -0.0013 & 0 \end{bmatrix}, \\
G_1^{21} = G_3^{21} &= \begin{bmatrix} 0.0002 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, & G_2^{21} = G_4^{21} &= \begin{bmatrix} 0.0002 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \\
H_1^1 = H_3^1 &= \begin{bmatrix} -0.6562 \\ 42.248 \end{bmatrix}, & H_2^1 = H_4^1 &= \begin{bmatrix} -0.4076 \\ 16.69 \end{bmatrix}, \\
H_1^2 = H_3^2 &= \begin{bmatrix} 0.8287 \\ -43.6471 \end{bmatrix}, & H_2^2 = H_4^2 &= \begin{bmatrix} 0.3232 \\ -16.6753 \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

이산화된 모델을 정리 2에서 구한 선형 행렬 부등식을 이용하여 고분자 전해질 연료전지 시스템 분산 퍼지 제어기를 설계한다. LMI를 통해 제어기의 이득값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_1^1 = 0.22374, \quad K_2^1 = 0.34032, \quad K_1^2 = -0.12571, \quad K_2^2 = -0.19307$$

시스템의 초기값은  $x_1(0) = [1 \ 3.5]^T$ ,  $x_2(0) = [1 \ 2.5]^T$ 로 설정한다. 그림 17, 18, 19, 20는 모의실험의 결과로 시스템의 각각의 상태변수를 나타내는 것으로 시스템이 안정화되었다는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 우리는 공통 입력을 갖는 비선형 상호결합 시스템의 분산 퍼지 제어기를 설계하였으며, 제어기를 통하여 PEMFC가 안정화되었다는 것을 알 수 있다.

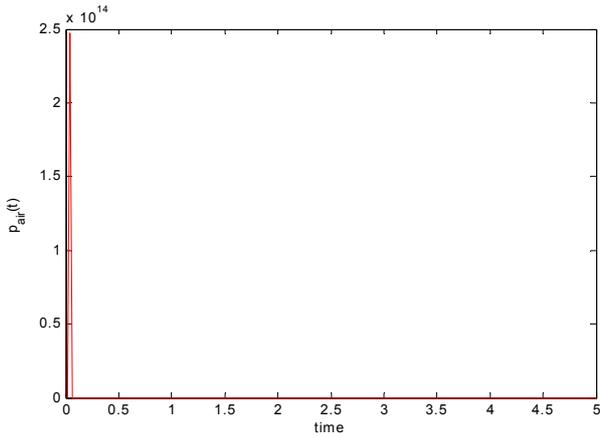


그림 17. 캐소드 모델의 공기 압력 값

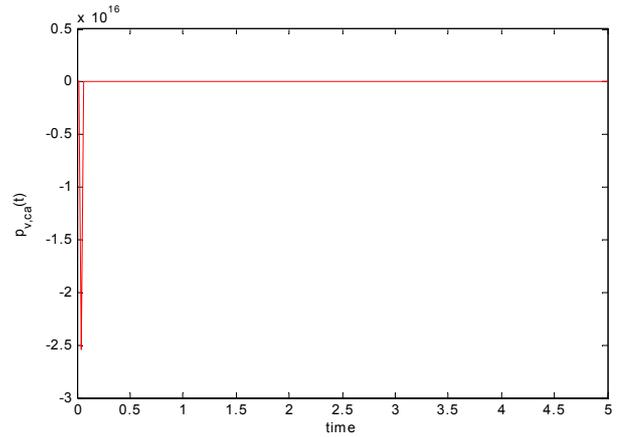


그림 18. 캐소드 모델의 증기 압력 값

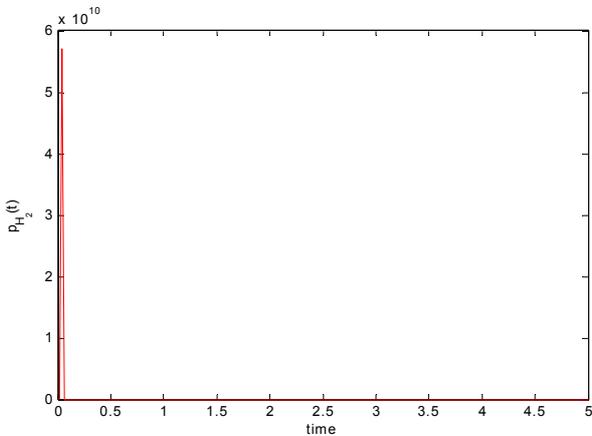


그림 19. 애노드 모델의 수소 압력 값

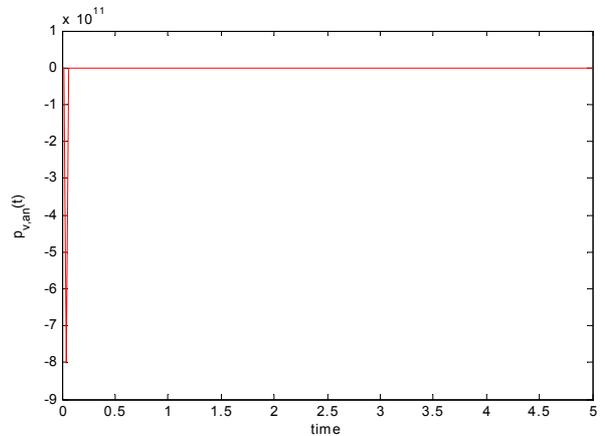


그림 20. 애노드 모델의 증기 압력 값

◦ 불확실성을 포함한 연료전지 시스템을 위한 상호결합 시스템의 안정도 조건

연료전지 시스템의 경우 시스템에 영향을 주는 파라미터 들이 매우 많으며, 특히 온도나 압력 등의 변화에 의해 값이 변하는 경우도 있다. 따라서 연료전지 시스템의 안정화를 위해서는 불확실성이 포함하는 시스템에 대한 강인 제어가 설계가 필수적이라 하겠다. 이를 위해 다음과 같이 불확실성이 포함된 상호결합 시스템을 고려한다.

$$\dot{x}_k(t) = \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) \left( (A_i^k + \Delta A_i^k)x_k(t) + (B_i^k + \Delta B_i^k)u_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q (A_i^{kl} + \Delta A_i^{kl})x_l(t) \right) \quad (41)$$

$$y_k(t) = \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) C_i^k x_k(t)$$

그리고, 위의 식 (41)의 안정화를 위한 출력궤환 분산 퍼지 제어기는 다음과 같이 설정한다.

$$u_k(t) = \sum_{i=1}^r h_i^k(z_k(t)) K_i^k y_k \quad (42)$$

식 (42)을 식 (41)에 대입하면 페루프 시스템을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) = & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{h=1}^r h_i^k(z_k(t)) h_j^k(z_k(t)) h_h^k(z_k(t)) \\ & \times \left( (A_i^k + \Delta A_i^k + (B_i^k + \Delta B_i^k) K_j^c C_h^k) x_k(t) + \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq k}}^q (A_i^{kl} + \Delta A_i^{kl}) x_l(t) \right) \end{aligned} \quad (43)$$

위의 페루프 시스템 (43)의 안정도 조건은 다음의 정리로 나타내어진다.

**정리 3)** 만약 다음의 선형 행렬 부등식들과 특정한 조건을 만족하는 양한정 행렬  $Q^k$ , 임의의 행렬  $a_{ij}^{kl}$ ,  $b_{ij}^{kl}$ ,  $c_{ij}^{kl}$ ,  $d_{ij}^{kl}$ ,  $W_i^k$ ,  $M^k$ 와 임의의 상수  $\epsilon_i^k$ 가 존재하게 된다면, 출력 궤환 분산 퍼지 제어기를 가지는 비선형 상호결합 시스템 (43)는 점근적으로 안정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} \Omega_{iii}^{kl} + X_{iii}^{kl} & * \\ \begin{bmatrix} \tilde{E}_{iii}^{kl} \\ \tilde{D}_i^k \end{bmatrix} & -\tilde{\epsilon}_i^k \end{bmatrix} < 0 \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} \left( \begin{array}{c} \Omega_{iiij}^{kl} + \Omega_{ijji}^{kl} + \Omega_{jii}^{kl} \\ + X_{iiij}^{kl} + X_{ijji}^{kl} + X_{jij}^{kl} \end{array} \right) & * \\ \begin{bmatrix} \tilde{E}_{iiij}^{kl} + \tilde{E}_{ijji}^{kl} \\ \tilde{E}_{jii}^{kl} \\ \tilde{D}_i^k \\ \tilde{D}_j^k \end{bmatrix} & -\tilde{\epsilon}_{ij}^k \end{bmatrix} < 0 \quad (45)$$

$$\begin{bmatrix} \left( \begin{array}{c} \Omega_{ijjh}^{kl} + \Omega_{ihj}^{kl} + \Omega_{jih}^{kl} + \Omega_{jhi}^{kl} + \Omega_{hij}^{kl} + \Omega_{hji}^{kl} \\ + X_{ijjh}^{kl} + X_{ihj}^{kl} + X_{jih}^{kl} + X_{jhi}^{kl} + X_{hij}^{kl} + X_{hji}^{kl} \end{array} \right) & * \\ \begin{bmatrix} \tilde{E}_{ijjh}^{kl} + \tilde{E}_{ihj}^{kl} \\ \tilde{E}_{jih}^{kl} + \tilde{E}_{jhi}^{kl} \\ \tilde{E}_{hij}^{kl} + \tilde{E}_{hji}^{kl} \\ \tilde{D}_i^k \\ \tilde{D}_j^k \\ \tilde{D}_h^k \end{bmatrix} & -\tilde{\epsilon}_{ijh}^k \end{bmatrix} < 0 \quad (46)$$

$$\tilde{X}_i^{kl} = (\tilde{X}_i^{kl})^T = \begin{bmatrix} X_{i11}^{kl} & \cdots & X_{i1r}^{kl} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{ir1}^{kl} & \cdots & X_{irr}^{kl} \end{bmatrix} > 0 \quad (47)$$

그리고

$$C_i^k Q^k = M^k C_i^k \quad (48)$$

여기서

$$\Omega_{ijh}^{kl} = \begin{bmatrix} \frac{1}{q-1} (A_i^k Q^k + B_i^k W_j^k C_h^k) + 2Q^k & * \\ + Q^k (A_i^k)^T + (B_i^k W_j^k C_h^k)^T & \\ (A_i^{kl})^T & -2Q^l \end{bmatrix},$$

$$\tilde{E}_{ijk}^{kl} = \left[ \frac{1}{q-1} (E_{i_1}^k Q^k + E_{i_2}^k W_j^k C_h^k) \quad E_{i_3}^{kl} Q^l \right], \quad \tilde{D}_i^{kl} = [\epsilon_i^k (D_i^k)^T \quad 0], \quad X_{ijh}^{kl} = (X_{ijh}^{kl})^T = \begin{bmatrix} a_{ijh}^{kl} & d_{ijh}^{kl} \\ b_{ijh}^{kl} & c_{ijh}^{kl} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\epsilon}_i^k = \text{diag}\{\epsilon_i^k I, \epsilon_i^k I\}, \quad \tilde{\epsilon}_{ij}^k = \text{diag}\{\epsilon_i^k I, \epsilon_j^k I, \epsilon_i^k I, \epsilon_j^k I\}, \quad \tilde{\epsilon}_{ijh}^k = \text{diag}\{\epsilon_i^k I, \epsilon_j^k I, \epsilon_h^k I, \epsilon_i^k I, \epsilon_j^k I, \epsilon_h^k I\}$$

이고, \*는 행렬에서의 전치요소를 의미한다.

## 4. 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도

### 4.1 목표 달성도

일련 번호	세부 개발내용	세부 추진 일정 (개월)												목표 달성도(%)		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	PEM 연료전지 발전시스템의 모델 조사와 선정	■														100
2	연료전지 발전시스템의 동역학을 다룰 수 있는 제어기 기술 조사		■													100
3	연료전지 발전시스템을 위한 퍼지 관측기 및 퍼지 제어기 개발			■	■	■										100
4	PEM 연료전지 발전시스템의 불확실성 문제 조사					■	■									90
5	미지의 불확실성을 갖는 연료전지 발전시스템의 퍼지 제어 기술 개발						■	■	■							100
6	안정도 분석 기법 개발									■	■	■				100
7	컴퓨터 모의실험											■	■			100
8	시뮬레이터를 이용한 실제 연료전지 발전시스템에 대한 성능 검증												■	■	■	90

## 4.2 개발기술의 관련분야 기여 성과

본 연구에 성공적 수행은 관련 연구 활성화의 초석을 구축할 수 있으며 국내 관련 분야의 취약한 기술 수준 발전에 기여할 것으로 기대된다. 세부적으로는

- 연료전지 발전시스템의 제어 분야에 대한 확고한 이론적 배경 확립을 통해 고분자 전해질 연료전지 이외의 기타 여러 형태의 연료전지의 제어 연구에 기반이 된다. 특히, 최근 활발히 연구되고 있는 자동차 및 휴대용 연료 전지의 고급 제어를 통해 관련 기술에 커다란 기여를 할 것으로 기대된다.
- 비선형 시스템에 대한 새로운 고급 제어 기술을 내세워, 연료전지 이외의 복잡한 비선형 시스템에 대해서도 적용 가능한 제어기 설계가 가능하다. 특히, 다수의 시스템이 연동되는 네트워크 시스템이나 발전 시스템과 같은 상호결합 시스템에 대한 새로운 제어 기법을 제시함으로써 많은 분야에 걸친 제어 연구에 커다란 공헌을 할 것으로 기대된다.
- 연료전지와 연계가 가능한 새로운 분야에 적용 및 확장된 기술 개발이 가능하다. 연료전지는 인버터나 컨버터와의 연계가 필수적이다. 이에, 인버터와 컨버터의 제어 연구에 도움이 될 수 있는 디지털 제어 기법에 대해 연구하였고, 각 시스템의 불확실성에 대한 강인 제어 기법을 제시하였다. 또한, 새로운 실시간 관측 기술 개발을 통해 관측기 기반의 새로운 제어 기법을 제시하여 보다 폭넓은 기술 개발이 가능토록 하였다.

## 5. 연구결과의 활용계획

### 5.1 추가 연구의 필요성

본 연구를 통해 연료전지 시스템의 전압 안정화를 위한 다양한 제어 기법들을 제시하였다. 하지만 아직도 해결해야 할 연구과제들이 많이 남아있다. 세부적으로는

- 연료전지 발전시스템의 인버터와 컨버터 연동에 대한 고려가 없다. 실제 연료전지 발전시스템은 인버터와 컨버터가 필수적이다. 또한, 인버터와 컨버터의 연결에서 발생하는 전압 강하나 부하 문제들이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 부하의 변화에 민감하게 반응하여 최대 전력을 추종할 수 있는 제어 기술이 필요하다.
- 최근 연료전지의 제어는 아날로그 제어보다는 컴퓨터를 이용한 디지털 제어가 일반적이다. 하지만 연료전지 시스템 자체는 아날로그 시스템이기 때문에, 제어기와 연계될 때, 샘플링의 문제가 발생한다. 이러한 샘플링의 문제를 해결하기 위해서는 샘플치 제어에 대한 연구가 필요하다. 특히, 연료전지 시스템은 비선형성을 포함하고 있기 때문에 완벽한 이산화가 불가능하다. 이를 위해서는 고급 샘플치 제어 기법이 연구될 필요가 있다.
- 자동차용 연료전지나 휴대용 연료전지의 경우 빠른 반응에 민감해야 한다. 이러한 시스템의 빠른 반응을 위해서는 시간 지연 문제를 해결할 필요가 있다. 더욱이 연료전지 시스템의 형태가 상호결합의 형태를 띠고 있으므로, 각 하위 시스템 사이에는 시간 지연 문제가 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 시간 지연 문제는 시스템의 성능에 커다란 영향을 미칠 수 있으므로 이를 해결할 수 있는 제어 기법 연구가 필요하다.
- 발전용 연료전지 시스템의 연구를 위해서는 단기의 연료전지 시스템이 아닌 복수로 연결된 연료전지 시스템에 대한 연구가 필요하다. 특히, 각 셀에서 발생하는 전압을 일정하게 하여 최종 출력을 높이는 연구가 필요하다.

### 5.2 기업화 추진방안 및 응용방안

현재까지 연료전지 발전에 대한 지자체와 기업들의 관심이 적다. 하지만 다른 신재생에너지에 비해 효율성이 매우 높고, 안정적인 발전이 가능하다. 특히, 우리나라의 경우 국토의 면적이 작기 때문에 다른 신재생에너지

의 효율이 떨어지게 되고, 이를 보완할 수 있는 방법으로 연료전지는 매우 고부가 가치 사업이 될 수 있다. 연세대학교 안에 연료전지 자동차를 위한 수소 스테이션이 있는 만큼, 여러 연구실 및 기업들과의 연계를 통한 지속적인 연구발전이 가능하다. 또한, 기업의 입장에서는 연료전지 발전시스템에 대한 투자를 통한 새로운 고부가 산업 증진으로의 이윤 환원과 고용 창출이 가능함과 동시에 정부로부터 인센티브를 받을 수도 있다. 연료전지의 경우, 자동차 산업이나 휴대기기 산업과의 연계가 쉽기 때문에 이 분야에 관련된 기업들의 참여를 이끌어 낼 수도 있을 것으로 보인다.

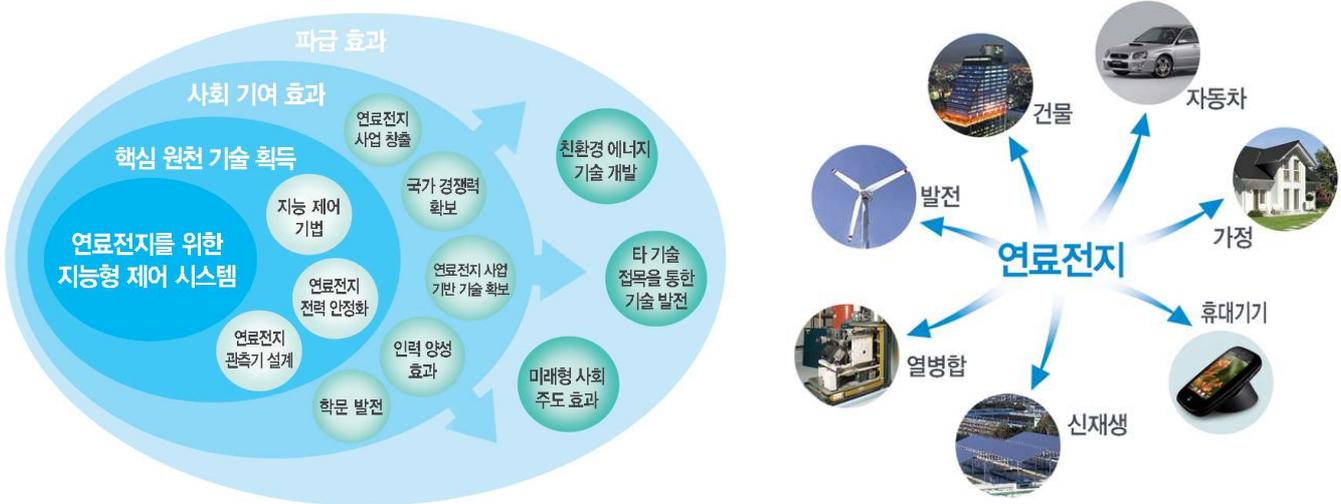


그림 21. 중·장기적인 기대효과 및 활용가능 분야

## 6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 6.1 High Megawatt Converter Workshop (2007년~)

미국 에너지부의 Solid State Energy Conversion Alliance 프로그램에서 제시한 연료전지 발전 시스템의 2020년 목표단가는 SOFC 스택을 기반으로 한 Integrated coal Gasification Fuel Cell (IGFC) 파워플랜트를 100~800MW급으로 구축한다고 했을 때 \$400/kW이다. 이에, 전체시스템의 목표가격을 낮추기 위한 전력변환기술의 중요성이 더욱 강조된 전망이다. 이와 같이 연료전지 PCS의 단가목표 달성 및 대규모화를 위한 전력변환 기술개발의 중요성이 대두됨에 따라 미국의 경우 2007년부터 매년 에너지부 주관으로 "High Megawatt Converter Workshop"이 개최되고 있다. 제 1회 워크숍은 2007년 1월 메릴랜드 주 소재 미국 국립기술표준원(National Institute of Standard and Technology, NIST)에서 열렸는데 아래의 표와 같이 미국 내 발전용 연료전지와 관련된 정부, 기업, 연구소 및 대학에서 40여명의 PCS 전문가들이 참가하여 차세대 대규모 발전용 PCS의 기술 개발과 관련한 다음의 같은 주제를 논의하였다.

- MW 전력변환 최신기술에 관한 정보교환
- 발전용 연료전지 PCS의 저가격화 방안 토론
- PCS 대규모화에 필요한 요소기술 개발동향
- 산업주도 로드맵 위원회 및 R&D 자금운용 논의

[표 8] 2007 High Megawatt Converter Workshop 참가기관

기관종류	참가기관
정부	DOE, DOD
연구소	NIST, NETL, EPRI, ORNL
시스템 업체	FCE, Siemens
PCS 업체	Satcon, ABB
부품 업체	Cree, Powerex
대학	Texas A&M, Virginia Tech

## 6.2 Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project (2002년~2010년)

일본은 온실가스 감축을 위한 정부차원의 장기적 프로젝트로 수소연료전지가 연구되어왔다. 이 수소연료전지 프로젝트는 가정용 연료전지와 자동차용 연료전지로 나뉘 각각 정부와 업계, 학계가 참여하는 형태로 진행되었으며, 다양한 수소연료전지의 기초데이터와 환경영향, 연료효율, 안전성, 내구성, 효율성 등을 연구개발과 실증사업을 통해 확인하였다.

이 JHFC 프로젝트는 연도별로 2002년부터 2005년까지를 제 1기로, 2006년부터 2010년까지를 제 2기로 정해 과제를 수행하였으며, 그 결과로 연료전지차량 총 60대 이상을 운행 중이며, 2002~2004년간 76대의 가정용 연료전지 실증사업을 추진하였고, 2005년부터 대규모 실증사업(실증사업 대수 : 12기(02년) → 31기(03년) → 33기(04년) → 480기(05년) → 777기(06년) → 930기(07년))으로 전환하고 있다.

또한 2010년까지 진행된 제 2기 프로젝트에서는 실제에 근접하는 조건 아래서 실용성을 보다 명확히 하고, 각종 규격과 법규, 기준 등을 재정립했으며, 도요타, 닛산, 혼다, 다임러 크라이슬러, GM, 스즈키, 마쯔다, BMW 등 9개사의 자동차를 대상으로 이뤄졌다.

## 7. 주관연구책임자(공동연구원) 대표적 연구 실적

번호	논문명/특허명/기타	소속기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국가	논문게재일 /특허등록일	특기사항 (SCI여부)
1	고분자 전해질 연료전지 시스템을 위한 비선형 상호결합 시스템의 관측기 기반 분산 퍼지 제어기 설계	연세대학교	교신저자	한국 지능시스템학회 논문지	2011.08	국내 논문
2	고분자 전해질 연료전지 시스템의 퍼지 출력 궤환 제어기 설계 : 공통 입력을 갖는 이산시간 비선형 상호결합 시스템 접근	연세대학교	교신저자	제어·로봇·시스템학회 논문지	2011.09	국내 논문
3	Digital controller design for fuzzy systems with packet loss : intelligent digital redesign approach	연세대학교	교신저자	2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems	2011.06.29	국제 학회
4	고분자 전해질 연료전지 시스템의 전압 안정화를 위한 샘플치 분산 퍼지 제어기 설계	연세대학교	교신저자	한국지능시스템학회 2011년도 춘계학술대회	2011.04.02	국내 학회
5	패킷 손실을 가지는 비선형 시스템을 위한 샘플치 퍼지 제어기 설계	연세대학교	교신저자	한국지능시스템학회 2010년도 추계학술대회	2010.11.06	국내 학회

## 8. 참고 문헌

- [1] J. T. Pukrushpan, H. Peng, and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems," Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 126, pp. 14–25, 2004.
- [2] D. H. Kim, H. O. Wang, and E. S. Kim, "Cascade observers for nonlinear systems and application to nonlinear output feedback control," JSME International Journal, Vol. 49, No. 2, pp. 463–472, 2006.
- [3] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer, 2004.
- [4] K. Dannenberg, P. Ekdunge, and G. Lindbergh, "Mathematical model of the PEMFC," Journal of Applied Electrochemistry, vol. 30, pp. 1377–1387, 2000.
- [5] M. Arcak, H. Gorgun, L. M. Pedersen, and S. Varigonda, "An adaptive observer design for fuel cell hydrogen estimation," Proc. American Contr. Conf., pp. 2037–2042, 2003.
- [6] T. Kurz, A. Hakenjos, J. Krämer, M. Zedda, and C. Agert, "An impedance-based predictive control strategy for the state-of-health of PEM fuel cell stacks," Journal of Power Sources, vol. 180, pp. 742–747, 2008.
- [7] M. A. Danzer, J. Wilhelm, H. Aschemann, and E. P. Hofer, "Model-based control of cathode pressure and oxygen excess ratio of a PEM fuel cell system," Journal of Power Sources, vol. 176, pp. 515–522, 2008.
- [8] D. Chen, W. Li, and H. Peng, "An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control," Journal of Power Sources, vol. 180, pp. 461–467, 2008.
- [9] F. Grasser, and A. Rufer, "A fully analytical PEM fuel cell system model for control applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 6, pp. 1499–1506, 2007.
- [10] J. V. Mierlo, and G. Maggetto, "Fuel cell or battery: electric cars are the future," Fuel Cells, vol. 7, pp. 165–173, 2007.
- [11] Y. B. Kim, "Improving dynamic performance of proton-exchange membrane fuel cell system using time delay control," Journal of Power Sources, vol. 195, pp. 6329–6341, 2010.
- [12] C. Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw, "Dynamic model and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp. 442–451, 2005.
- [13] 김응석, 김철진, "고분자 연료전지 발전시스템에 대한 비선형 관측기 설계," 전기학회논문지, 제58권, 제2호, pp. 314–321, 2009.
- [14] 이정민, 정홍주, 정준모, 서인영, 한세희, "계통연계형 가정용 연료전지 시스템의 전력제어에 관한 연구," 전력전자학술대회 논문집, pp. 263–265, 2006.
- [15] 정유라, 최용성, 이경섭, "고분자 전해질형 연료전지의 최적운전을 위한 전압-전류, 전류-전력 특성 연구," 전기학회 논문지 P, 제59P권, 제1호, pp. 112–116, 2010.
- [16] 고정민, 김종수, 조규영, 강현수, 이병국, "부하의 변화를 고려한 연료전지 스택 동특성 모델링," 전기학회논문지, 제58권, 제1호, pp. 93–99, 2009.
- [17] 이원용, 문현주, "연료전지 현황 및 전망," 설비저널, 제39권, 제1호, pp. 45–54, 2010.
- [18] 지식경제부, 그린에너지 전략 로드맵 - 연료전지, 2009.
- [19] <http://www.globalwindow.org/>
- [20] <http://search.wips.co.kr/>

## 9. 연구 성과

사업명	기본연구지원사업	연구책임자	박진배	주관기관	연세대학교 산학협력단
과제번호	2010-0024352	과제명	고분자 전해질 연료전지의 전압 안정화를 위한 제어 시스템 개발		

과학기술/학술적 연구성과(단위 : 건)													
전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
0	2	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0

인력양성 및 연구시설(단위 : 명,건)							
학위배출		국내외 연수지원				산학강좌	연구기자재
박사	석사	장기		단기			
		국내	국외	국내	국외		
0	0	0	0	0	0	0	0

국제협력(단위 :명,건)						
과학자교류		국제협력기반			학술회의개최	
국내과학자 해외파견	외국과학자 국내유치	MOU체결	국제공동연구	국제사업참여	국내	국제
0	0	0	0	0	0	0

산업지원 및 연구성과 활용(단위 : 건)					
기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)		
기술이전	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료
0	0	0	0	0	0

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	SCI여부	IF	국제공동연구 논문여부	기여도
2010-002 4352	2011.08	고분자 전해질 연료전지 시스템을 위한 비선형 상호결합 시스템의 관측기 기반 분산 퍼지 제어기 설계	구근범;박진배;주영훈	직접입력	한국지능시스템학회 논문지	21(4)	국내	SCI미등재		아니오	100%
2010-002 4352	2011.09	고분자 전해질 연료전지 시스템의 퍼지 출력 제한 제어기 설계: 공통 입력을 갖는 이산시간 비선형 상호결합 시스템 접근	구근범;박진배;주영훈	직접입력	제어.로봇.시스템학회 논문지	17(9)	국내	SCI미등재		아니오	100%

### 학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국
2010-0024352	201106	IEEE_FUZZ 2011	구근범, 박진배, 주영훈, 전형석	Digital controller design for fuzzy systems with packet loss: intelligent digital redesign approach	국제학술대회	대만
2010-0024352	201009	한국지능시스템학회 2010년 추계학술대회	구근범, 주영훈, 박진배	패킷 손실을 가지는 비선형 시스템을 위한 샘플치 퍼지 제어기 설계	국내학술대회	대한민국
2010-0024352	201104	한국지능시스템학회 2011년 춘계학술대회	구근범, 주영훈, 박진배	고분자 전해질 연료전지 시스템의 전압 안정화를 위한 샘플치 분산 퍼지 제어기 설계	국내학술대회	대한민국

### 10. 기타사항(중요 연구 변경사항 등)

[별첨1]

## 〈 대표 연구 성과 〉

대표연구업적 요약문			
연구업적 제목	고분자 전해질 연료전지 시스템을 위한 비선형 상호결합 시스템의 관측기 기반 분산 퍼지 제어기 설계		
연구업적 유형	학술지게재논문(o)    특허( )    저서( )    역서( )		
주관연구책임자 또는 공동연구원 성명	박진배	참여자수	3
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 참여자의 역할 : 교신저자</li> <li>- 사업명 : 일반 연구자 지원 사업</li> <li>- 과제명 : 고분자 전해질 연료전지의 전압 안정화를 위한 제어 시스템 개발</li> <li>- 과제번호 : 2010-0024352</li> <li>- 논문 게재지 : 한국 지능 시스템학회 논문지 (Journal of Korean Institute of Intelligent Systems) (연구재단 등재 논문지)</li> <li>- 논문 게재일 : 2011.08</li> <li>- 논문 요약 :</li> </ul> <p>This paper deals with the observer-based decentralized fuzzy controller design for nonlinear interconnected system for PEMFC. The nonlinear interconnected system is represented by a Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model. Based on T-S fuzzy interconnected system, the fuzzy observer and the decentralized fuzzy controller are designed. The stability condition of the closed-loop system with the proposed controller is represented to the linear matrix inequality (LMI) form, and the observer and control gain s are obtained by LMI. An example is given to show the verification discussed throughout the paper.</p>			

[별첨1]

## 〈 대표 연구 성과 〉

대표연구업적 요약문			
연구업적 제목	고분자 전해질 연료전지 시스템의 퍼지 출력 궤환 제어기 설계 : 공통 입력을 갖는 이산시간 비선형 상호결합 시스템 접근		
연구업적 유형	학술지게재논문(o)   특허( )   저서( )   역서( )		
주관연구책임자 또는 공동연구원 성명	박진배	참여자수	3
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 참여자의 역할 : 교신저자</li> <li>- 사업명 : 일반 연구자 지원 사업</li> <li>- 과제명 : 고분자 전해질 연료전지의 전압 안정화를 위한 제어 시스템 개발</li> <li>- 과제번호 : 2010-0024352</li> <li>- 논문 게재지 : 제어 로봇 시스템 논문지(Journal of Control, Robotics and Systems) (연구재단 등재 논문지)</li> <li>- 논문 게재일 : 2011.09</li> <li>- 논문 요약 :</li> </ul> <p>In this paper, the fuzzy output-feedback controller is addressed for a discrete-time nonlinear interconnected systems with common input. The nonlinear interconnected system is represented by a Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model. Based on T-S fuzzy interconnected system, the fuzzy output-feedback controller is designed with common input. The stability condition of the closed-loop system is represented to the linear matrix inequality (LMI) form. PEMFC model is given to show the verification of the controller discussed throughout the paper.</p>			

# 자체평가 의견서

## 1. 과제 현황

	과제번호		기재하지 않음		
사업구분	기초연구사업				
연구분야	기재하지 않음	기재하지 않음	과제구분	단위(✓)	
사업명	일반연구자지원사업(기본)			주관	
총괄과제	기재하지 않음		총괄책임자	기재하지 않음	
과제명	고분자 전해질 연료전지의 전압 안정화를 위한 제어 시스템 개발		과제유형	(기초, 응용, 개발)	
연구기관	연세대학교		연구책임자	박진배	
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간 (yyyy.mmdd ~ yyyy.mmdd)	정부	민간	계
	1차년도	2010.09.01~2011.08.31	59,800		59,800
	2차년도				0
	3차년도				
	4차년도				
	5차년도				
	계(총연구기간)	2010.09.01~2011.08.31	59,800		59,800
참여기업					
상대국			상대국연구기관		

## 2. 평가일 : 2011년 8월

## 3. 평가자(연구책임자)

소속	직위	성명
연세대학교	교수	박진배

## 4. 평가자(연구책임자) 확인

본인은 평가 대상 과제에 대한 연구 결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을  
확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초 자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	박진배
----	-----

# I. 연구 개발 실적

※ 다음 각 평가 항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

## 1. 연구 개발 결과의 우수성 및 창의성

■ 등급 : 아주 우수

연료전지 시스템을 위한 제어 기술은 아직 국내외적으로 연구가 많이 진행되지 않고 있으며, 특히 연료전지 시스템과 같이 공통 입력 특성을 가지는 시스템에 대한 제어 연구는 아직까지 진행된 바가 없다. 본 연구에서는 공통 입력 특성을 가지는 상호결합 시스템에 대한 제어 기법을 제시하였으며 그밖에도 디지털 제어 문제, 비선형 문제, 불확실성 문제에 대한 해결책을 제시하였다. (국내 논문 2편 게재)

## 2. 연구 개발 결과의 파급 효과

■ 등급 : 우수

개발된 기술은 연료전지 시스템의 특성인 공통 입력 문제를 해결하는 제어 기술로 연료전지의 제어를 단일 입력만으로도 가능토록 하여 연료전지의 활용도를 더욱 높였다. 또한, 연료전지 시스템에 대한 관측기와 디지털 제어기를 설계하여 시스템의 원격 제어가 가능토록 하여 기존에 활용되지 못한 분야까지 연료전지의 활용도를 높였다는 점에서 그 파급효과가 크다고 할 수 있다.

## 3. 연구 개발 결과에 대한 활용 가능성

■ 등급 : 우수

개발된 기술은 연료전지 시스템과 같은 공통 입력을 갖는 상호결합 시스템에 대한 제어 기술로, 연료전지 시스템뿐만 아니라 네트워크 시스템이나 전력 시스템 등과 같은 상호결합 특성을 갖는 시스템에도 이용이 가능하다. 뿐만 아니라, 비선형성, 불확실성 문제를 해결할 수 있는 제어 기법을 제시하여 활용 가능성을 높였다.

## 4. 연구 개발 수행 노력의 성실도

■ 등급 : 아주 우수

연구 제안서의 세부 목표 대부분을 완벽하게 수행하였으며, 그 이상으로 연료전지 시스템이 가지는 다른 문제들을 파악하여 그 해결책을 제시하였다. 또한 꾸준히 학회에 참석하고 논문을 발표하여 연구의 우수성을 입증하였고 향후 연구 방향을 설정하여 지속적인 연구가 가능토록 하였다.

## 5. 공개 발표된 연구 개발 성과(논문, 지식재산권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수

연구 개발 기간 동안 성과는 다음과 같다.  
 학회 발표 : 국내 학회 2편, 국제 학회 1편(IEEE FUZZ)  
 논문 게재 확정 : 국내 논문 2편(학진 등재지)  
 심사 중 논문 : 국제 논문 2편.  
 위와 같이 학진 등재지에 논문 게재 확정되었으며, IEEE FUZZ와 같은 유명 국제 학회 발표를 하는 등의 우수한 성과를 이루었다.

## II. 연구 목표 달성도

세부 연구 목표 (연구계획서 상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
PEM 연료전지 발전시스템의 모델 조사와 선정	5	100	PEM 연료전지 발전시스템의 모델 조사와 그에 대한 퍼지 모델링을 완료함
연료전지 발전시스템의 동역학을 다룰 수 있는 제어기 기술 조사	5	100	연료전지 발전시스템의 특성을 파악하고 그에 맞는 제어 기법에 대해 조사함
연료전지 발전시스템을 위한 퍼지 관측기 및 퍼지 제어기 개발	20	100	연료전지 발전시스템의 퍼지 모델을 기반으로 퍼지 관측기 및 제어기 개발함
PEM 연료전지 발전시스템의 불확실성 문제 조사	10	100	PEM 연료전지 발전시스템의 각 파라미터의 특성을 분석하고 그 특성 곡선을 비선형 함수로 바꾸어 제시함
미지의 불확실성을 갖는 연료전지 발전시스템의 퍼지 제어 기술 개발	10	90	불확실성을 포함하는 비선형 시스템에 대한 강인 분산 제어기를 설계함
안정도 분석 기법 개발	20	100	관측기와 제어기를 포함하는 시스템에 대한 안정도 분석을 하고 선형 행렬 부등식의 형태로 안정도 조건을 제시함
컴퓨터 모의실험	20	100	컴퓨터 모의실험을 통해 제시한 관측기 및 제어기의 성능을 분석함
시뮬레이터를 이용한 실제 연료전지 발전시스템에 대한 성능 검증	10	90	연료전지 발전시스템의 안정도 조건과 제어기를 연동하여 상황별 조건에 따른 연료전지 발전시스템의 성능을 검증함
합계	100	98	

### Ⅲ. 종합 의견

#### 1. 연구 개발 결과에 대한 종합 의견

연구 계획서 상에서 목표로 삼은 고분자 전해질 연료전지 발전시스템의 전압 안정화를 위한 제어 기법 개발을 완료했으며, 계획서 상에 고려되지 않았던 문제들에 대한 해결책도 제시하였음. 그리고 관련 연구 결과를 통해 다수의 논문을 제출 또는 게재 확정하였다는 것을 통해 연구 수행을 충실히 이행하였다고 판단함.

#### 2. 평가 시 고려할 사항 또는 요구사항

연료전지 발전시스템의 제어를 위해 제시된 상호결합 시스템의 공통 입력 문제는 기존의 제어 기법에서는 논의되지 않았던 새로운 문제임. 이를 해결하였다는 점에서 연구의 참신성을 파악할 수 있음.

#### 3. 연구 결과의 활용 방안 및 향후 조치에 대한 의견

제안된 연구 결과는 연료전지 시스템과 같은 비선형 상호결합 시스템에 대한 제어 기반 기술임. 이는 연료전지 시스템과 같은 특성을 갖는 시스템에 다양하게 활용할 수 있다는 점에서 필요한 산업 분야에 유용할 것으로 기대됨. 또한 연구결과들은 논문 결과로 발표하였거나 발표를 기다리고 있음.

## IV. 보안성 검토

○ 연구책임자의 보안성 검토 의견, 연구기관 자체의 보안성 검토 결과를 기재함

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우에만 작성함

### 1. 연구책임자의 의견

### 2. 연구기관 자체의 검토 결과

※ 협약당사자(산학협력단장 등)의 의견을 기재함