

100 kW급 용융탄산염 연료전지 발전시스템 개발

임희천, 김도형, 서해경, 박성연, 안교상
한전 전력연구원

Abstract

The molten carbonate fuel cell (MCFC) is endowed with the high potential especially in future electric power generation industry by its own outstanding characteristics. KEPCO (KEPRI) started a 100 kW MCFC system development program in 1993 and has been executed 100kW system development pilot plant successfully completed first phase operation by 2005 on the basis of successful results of 25kW system development. In this program, the components and mechanical structure for 100 kW stack and system construction were completed on last year and now system pre - commissioning was being executed. A 100 kW MCFC power plant was constructed at the site of Boryeong Thermal Power Plant . A 100 kW MCFC system has characterized as a high pressure operation mode, CO₂ recycle, and externally reforming power generation system. The 100 kW MCFC system consisted with stacks which was made by two 50 kW sub-stacks, 90 cells with 6,000 cm² active area and BOP including a reformer, a recycle blower, a catalytic burner, an inverter, and etc. The system has been operated from 13th of September on this year and produced 50 kW AC under atmospheric pressure condition and expected to operate by the end of this year.

1. 서 론

분산형 전원 및 석탄 가스화와 연계한 복합 발전이 가능한 용융탄산염 연료전지(MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell)는 천연가스, 석탄가스 등 다양한 연료를 사용할 수 있고, 공해요인이 적고, 높은 에너지 변환효율을 가지고 있어 전력사업 분야에 적용 가능성이 가장 큰 새로운 발전방식이다. 국내에서도 1993년부터 선도기술개발 사업의 하나로 시작하여 현재 100 kW급 발전시스템 개발 연구가 진

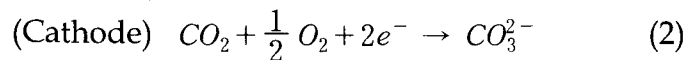
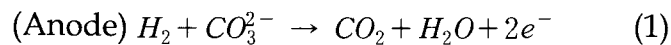
행되고 있다. 2001년부터 시작된 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 연구는 현재 100 kW MCFC 스택 운전 평가를 위한 시스템을 완성하고 스택운전에 필요한 시스템 내 단위기기들에 대한 시운전을 진행하고 있다. 여기에서는 MCFC 발전 시스템의 개요와 시스템의 운전을 위한 운전 모드 그리고 스택 운전 내용을 요약하여 소개하고자 한다.

2. 본 론

가. MCFC 발전 시스템 개요

1) MCFC 발전 원리

MCFC 연료전지는 다공성 연료 극(anode)과 공기 극(cathode) 층 사이에 전해질인 용융 탄산염을 지지하는 전해질 판으로 구성되어 있다. 두 전극 중 공기 극에서는 CO₂-를 생성하는 산소의 환원 반응이 일어나고 연료 극에서는 CO₂-를 소모하는 수소의 산화 반응이 일어난다. 양극에서 만들어진 CO₂-는 전해질을 통하여 확산, 전달되어 연료 극 반응에 참여하고 산화에 의해 음극에서 생성된 전자는 외부회로를 통해 공기 극으로 전달되어 환원 반응에 참여한다.



따라서 전지 전체에서의 총괄 반응은 다음과 같다.



2) MCFC 발전시스템 구성

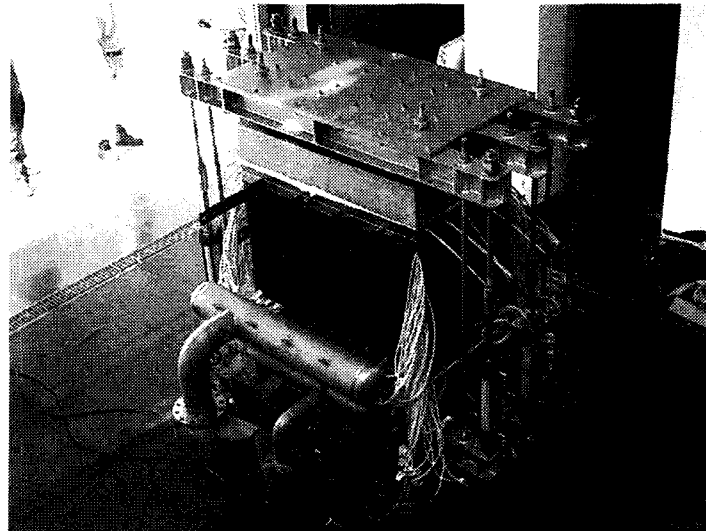
연료전지 반응을 일으키는 전극 및 전해질 등 구성요소로 이루어진 부분을 단위전지라 하며 이를 여러 장 적층하여 필요로 하는 전력을 얻게 된다. 이를 적층 전지 혹은 스택(stack)이라 한다. 또한 연료전지 스택은 주변 기기와 연결되어 전체 시스템으로 구성된다. 전체 시스템은 연료 처리계, 스택 주변 계, 배열 회수 계 그리고 직 교류 변환 계 등으로 나누어진다. 연료 처리계는 연료가 천연가스인 경

우 천연가스 개질기를 필요로 하며 배열 회수계 및 전력변환장치 등으로 구성되어 이들 기기들이 유기적으로 연결되어 종합시스템으로 구성된다. 또한 시스템을 안전하고 안정적으로 운전하기 위하여 플랜트의 운전을 제어시스템이 필요하게 된다. 이번 개발되는 100 kW급 MCFC 발전 시스템은 천연가스를 연료로 하는 외부 개질형 내부 매니폴드 방식의 발전시스템이다.

나. MCFC 스택 제작 및 시스템 건설

1) MCFC 스택 설계 및 제작

100 kW급 MCFC 스택은 내부 매니폴드 형식 및 연료가스가 외부에서 공급되는 외부 개질 형 스택으로 설계하였다. 100 kW급 MCFC 스택에서는 단위전지 전지 면적은 약 6000 cm² 단위전지가 90장으로 구성된 50 kW급 sub-stack으로 2기로 제작되었다. 스택 내에서의 가스 흐름은 역 U-shape이고 적층 후 clamping하여 일정한 압력을 가한 후에 단열재로 보온하고 별도의 설비에서 전 처리 한다. 스택 내 걸리는 부하 전류량은 두개 sub stack을 병렬로 연결시켜 최대 900A 로 되도록 하였다. 전류단자 및 전기선은 이에 맞는 용량으로 결정되며 전류 및 전압 측정 단자 등은 압력 용기와 완전 절연될 수 있도록 제작하였다.



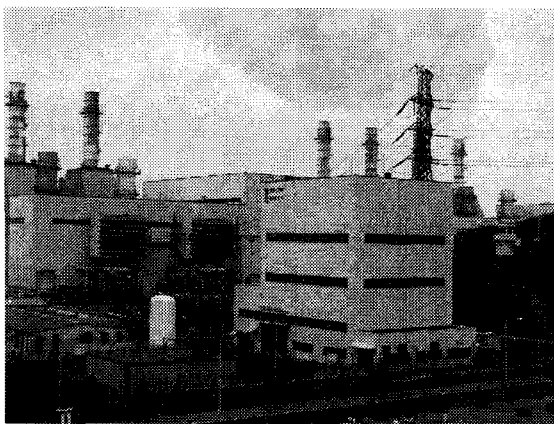
[그림 1 : 50kW substack]

2) 100 kW급 MCFC 시스템 건설

100 kW급 MCFC 발전 시스템은 외부 개질형으로 연료로 천연가스를 사용하며 운전압력 3기압에서 650℃조건에서 운전된다. 연료 및 공기 이용률은 각각 60%,

30%이며, 연료극 미반응 가스는 촉매 연소기의 연소용 연료로 공급되어 미 반응 가스를 최대한 활용하도록 구성되었다. 연료로 사용되는 천연가스는 외부 개질기를 통하여 수성가스 전이반응을 고려한 스팀 개질 방식을 이용하여 다량의 수소가 포함된 탄산가스 연료로 공급된다. 반응 후 남은 연료극 가스는 촉매 연소 시에서 연소되어 공기극 연료에 이산화탄소 및 열에너지 공급원으로 사용된다. 연료 전지 스택에서 반응한 가스들은 열 교환기를 이용하여 배열회수 과정을 거치게 되며 리사이클을 이용하여 스택 냉각과 연료 이용률을 증가시키는 시스템으로 구성하였다.

100 kW급 MCFC 발전 시스템 건설은 2003년 8월에 착공하여 2004년 12월 모든 설비를 완성하였다. 설비는 충남 보령에 있는 중부발전 보령화력본부 내 복합 발전 단지 내에 건설되었다. 약 400 평의 부지위에 토목 및 건축설비 그리고 기계설비, 전기설비 및 Utility 등으로 구성되어있고 수전 및 송전은 보령화력 구내에서 이루어지게 되어있다. 주요 기계설비로는 천연가스 개질기, 공기압축기, 증기발생기, 촉매연소기 및 각종 Blower가 있고 전기설비로는 수 배전반, 전력변환기 등이 설치되었다. 이외 전기 및 시수 가스 등을 공급 할 수 있는 유틸리티 설비들을 갖추고 있다. 그림 1은 설비의 외관과 스택 구조물의 모습을 보여주고 있다.



[그림 2 : 100 kW MCFC 시스템 전경 및 스택]

다. MCFC 발전시스템 시운전

1) MCFC 발전시스템 설비개요

시스템을 살펴보면, 연료로 사용되는 천연가스(CH_4) 개질기(Reformer)에서 H_2 -riched gas로 전환되어 Anode측에 공급된다. 한편 공기압축기에서 공급하는 공기는 촉매연소기에서 NG와 연소하여 이산화탄산가스(CO_2)가 되어, Cathode측에 보내지며, Stack 내부에서는 이들 가스가 반응하여 전기 및 물이 생성된다. 반

응 후 Anode 및 Cathode 가스는 열교환기를 통해 배열회수 및 냉각과정을 거쳐 물은 회수되고, Anode 미 반응가스는 Recycle Blower를 통해 촉매연소기에서 연소되어 Stack Cathode측에 재순환된다.

2) 개질기(Reformer)

발전소 내 천연가스는 4기압으로 조절된 후 시스템에 공급된다. 정상 운전상태에서는 천연가스가 28.8 Nm³/h는 개질기의 원료로 사용된다. 개질기는 Burner, Furnace, 개질기 반응관으로 구성되어 있고 개질기 반응관이 총18개가 설치되어 Ni 촉매 하에 수증기 개질반응이 수소, 일산화탄소 및 이산화탄소로 전환된다. 개질기에서 생성되는 가스는 Volume %로 H₂ 51.2%, CO 8.7%, CO₂ 7.28% 그리고 물이 31.40%이다. 반응에 필요한 수증기는 탄소와의 몰비(S/C ratio)가 3.5가 되도록 조절되어 천연가스와 혼합되어 공급되며, 스택 입구온도에 맞출 수 있도록 다시 한번 열교환 되어 공급된다.

3) Steam generator

연료전지 배출가스는 680oC 고온으로 5기압 증기의 생산과 촉매연소기에 공기의 예열을 위해 사용된다. 따라서 Anode 및 cathode 배출 가스는 Kettle형 열교환기에 공급되어 5기압의 증기를 생산한 후 200oC로 냉각된다. Anode 출구가스와 Cathode 출구가스 중의 CO₂는 스택에서 재사용하기 위해, 열교환기에서 냉각된 후, 물은 Knock Out Drum으로 보내지고, 물이 제거된 가스는 Recycle Blower에 의해 촉매연소기로 보내진다.

4) 열교환기(Heat Exchanger)

스택내 전기화학 반응 후 Anode측 미 반응가스 및 공기압축기에서 나온 공기를 촉매연소기에서 연소시켜, Cathode에서 필요한 고온의 CO₂를 생성한다. 촉매연소기 출구가스 온도는 622°C, Cathode 입구온도는 580oC이며, 출구가스 온도조절은 촉매연소기 연소용 연료량을 조절함으로써 가능하다.

5) Recycle Blower

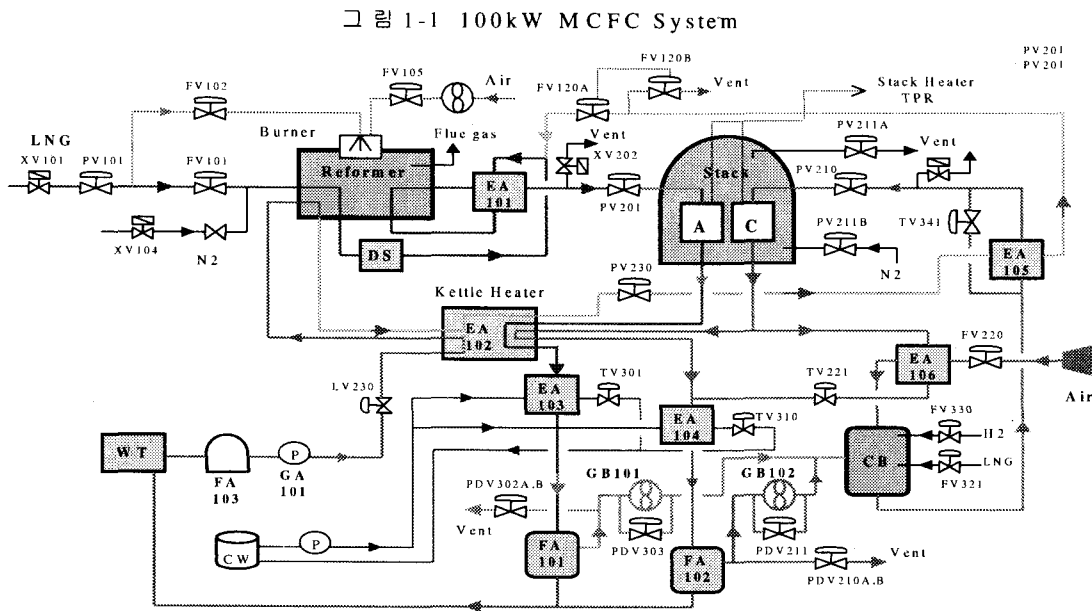
Stack에서 반응하고 나온 Anode 및 Cathode gas를 순환시켜 시스템 효율의 향상을 도모하기 위해 CO₂ gas recycle용 Recycle blower를 설치하였다. 시스템 효율 향상을 도모하기 위해서는 고온의 blower가 설치됨이 바람직하나, 국내기술의 여건상 Blower 입구가스 허용온도는 50°C로 제한되었고, Anode 및 Cathode Blower의 Inlet/Outlet 측의 차압은 절대압 기준으로 각각 0.6kg/cm² 및 0.8kg/cm²이다.

6) R/O system

NG 가스 개질 및 Carbon deposition을 방지하기 위해 순수물의 공급이 필요하다. 순수물 제조방법은 역 삼투압·(Reverse Osmosis)법을 사용하는 R/O system을 채택하였다.

7) Pretreatment 설비

MCFC 스택을 운전 전에 Stack을 CO₂, 공기, 질소, 수소, CO로 소성하여 바인더 및 기타 불순물을 제거하고 In situ된 전극을 제작하기 위하여 스택 전처리 장치가 필요하다. Stack을 소성하기 위한 가스의 가열은 전기 heater 및 열교환기에 의한 폐열회수 방법을 사용하며, 가스의 조성은 별도의 방법에 따라 시행한다.



[그림 3 : 100kW MCFC 발전시스템 구성도]

8) MCFC 발전시스템 운전 개요

① MCFC 운전모드

100 kW MCFC 발전 시스템은 현재 기술 개발 중으로 체계화되고 표준화된 운전형태는 없다. 시스템의 운전모드는 표 1-1 과 같이 상압 운전Mode와 가압 운전Mode의 운전형태로 나눌 수 있다. 운전Mode의 전환 방법은 상압운전형태에서 가압운전형태로 이루어지며, 기동 시는 그림1-2에서 보는바와 같이 NS(I)→NS(II)→PS→PR 로 되며, 정지 시는 그 역순이 된다.

② MCFC 운전 모드형태

NS(I) Mode는 상압 운전형태로서 Stack 전처리 및 직후 MCFC 운전형태로, Station gas에 의해 반응가스가 공급되는 형태이다. NS(II) Mode는 Reformer 및 촉매연소기를 운전, Stack을 가압운전(PS Mode)으로 전환 하기까지 운전이다. Anode가스는 Reformer gas로 절환되며, 증기는 증기발생기에서 Kettle heater로 전환된다.

Anode 가스공급은 Reformer온도가 750℃ 정도로 충분히 올라가면 천연가스로 치환한다. 또한 Cathode용 가스는 Stack온도 550℃정도에서 촉매 연소기를 가동시켜 촉매연소기는 초기 운전 시 수소를 그리고 일정 온도 이상이 되면 천연가스로 전환한다. PS Mode는 Cell Stack을 정상운전압력으로 운전하는 형태로서, Anode, Cathode 및 Stack Vessel을 각각 3kg/cm²abs의 가스압력으로 가압한다. 이때 Anode gas는 Carbon deposition을 방지하기위하여 Reformer 입구 측에 110℃의 포화증기를 넣어 운전한다. PR Mode는 MCFC 시스템 정상운전형태로, Stack에서 1차 반응하고 배출된 가스 중에서 미 반응 가스는 Recycle Blower를 이용하여 Cathode측으로 재순환시킴으로서 연료이용을 극대화시켜 시스템의 효율을 높힐수 있도록 한 운전Mode이다. 한편 Stack Cell의 내부온도조절을 위해 Recycle Blower의 Bypass MOV를 설치, Cathode측으로 재순환되는 gas flow량을 조절하도록 설계하였다.

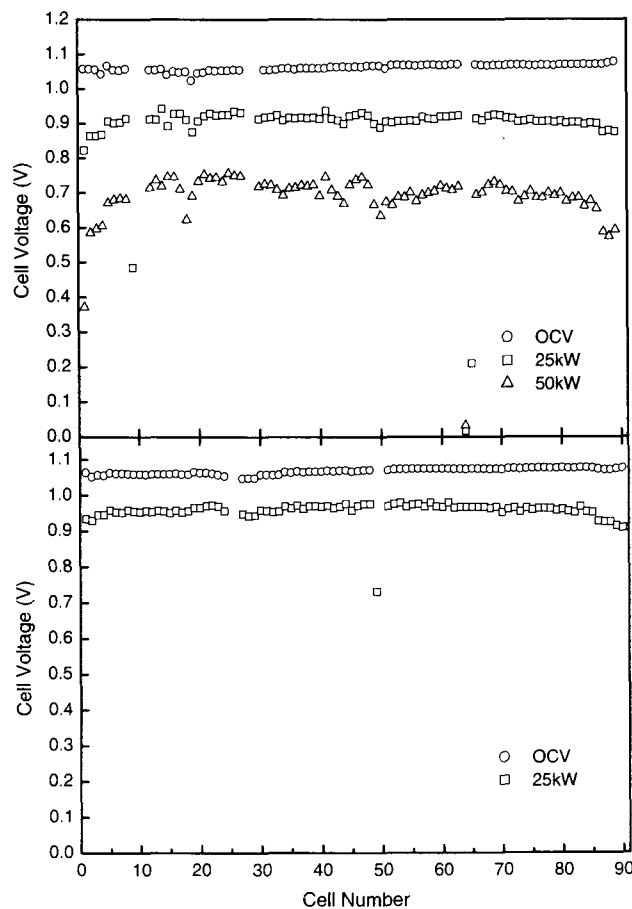
9) MCFC 운전

MCFC 스택은 8월4일 보령 MCFC 운전 현장에서 장착되었다. 스택을 운전하기 전 Stack 내 단위전지 제작 시 사용된 바인더 및 용매를 제거하고, 공기 극 Nickel 전극을 산화시켜 NiO로 만들어 주기위한 전처리 과정을 해 주어야한다. 100 kW급 MCFC 전 처리 운전 공정은 2 kW급 스택 실험을 포함한 여러 가지 모의실험의 결과를 토대로 결정하였다. 이론적으로 용융탄산염 연료전지 스택의 전 처리 공정은 전 처리 시간 조건은 변화하지 않고 용량에 따라 유량만 변화시켜주어도 같은 효과를 갖게 된다. 전처리 총 시간은 약 800 시간 정도를 소요한다.

전 처리 시험 완료 후 최초의 부하운전 시험은 9월16일 실시하였다. 전 처리용 가스를 이용한 부분 부하 운전 시험에서 최대 출력은 50 kW 발전 전력을 기록하였고, 이는 상압상태에서의 공기극에 주어지는 가스 유량이 제한되기 때문이다. 25 kW 출력에서 하부 스택의 단위전지 평균 전압은 0.91V이고 상부스택은 0.96 V를 나타내었다. 50 kW 출력에서 하부 스택의 단위전지 평균 전압은 0.66 V이고, 상부 스택은 0.82 V를 나타내었다. 상부 스택은 매우 양호한 출력 성능을 보이는 반면에 하부 스택의 경우는 전체적으로 성능이 떨어지는 것으로 나타났다.

개질 가스를 이용한 무 부하 운전시험에서 하부 스택의 평균 전압은 1.07 V이었고, 상부 스택의 평균 전압은 1.08V를 보여주었다. 부하 운전에서는 앞선 결과를 토대로 하부 스택의 성능이 상부 스택보다 낮은 점을 착안하여 하부 스택에 40% 그리고 상부 스택에 60% 부하가 걸리게 하였다. 20 kW 출력에서 하부 스택의 평균 전압은 0.96V, 상부 스택의 평균 전압은 0.95V이었고, 50 kW 출력에서 하부 스택의 평균 전압은 0.82V, 상부 스택의 평균 전압은 0.78V이었다.

현재 상압 운전에서 최대 출력은 50 kW이었고, 총 출력량은 2.3 MWh 이다. 향후 운전 계획은 가압 하에서 가스 유량과 온도를 확보하여 100 kW 발전을 할 계획이며, 가압 recycle 운전 통하여 2005년 12월말까지 연속 운전을 할 계획이다.



[그림 4 : MCFC 부분부하 운전 단위전지 전압 분포]

10) MCFC 향후 운전 방향

향후 운전절차는 전체 시스템으로서 고온 테스트로 안정적인 운전성능을 확인한 후 100 kW급 부하운전시험을 실시 할 예정이다. 또한 운전시험, 연료가스 이용율 시험, 가압시험 및 부분부하시험과 함께 연속 운전시험을 실시 할 예정이다.

본 시스템은 설치 후 약 5,000 시간 운전 후 운전후 시험을 통하여 향후 개발될 250 kW급 Package 개발에 활용될 예정이다.

3. 결 론

본 연구에서는 전력사업용 100 kW MCFC 시스템 개발을 위하여 필요한 스택 제작을 완료하였고 스택 운전 평가를 위한 pilot plant를 중부발전 보령화력 발전소 구내에 건설하였다. 완성된 시스템의 운전을 위하여 100 kW급 MCFC 시스템 운전모드를 개발하였고 현재 시스템 내 기계설비 및 전기 계측 설비들에 대한 시운전을 진행하고 있다. 100 kW MCFC 스택은 6000 cm^2 전지 90장으로 구성된 2개의 Sub stack 으로 구성되며 이를 운전하기위한 조건으로 시스템 압력은 3 기압, 이때 125 mA/cm^2 의 부하와 0.6의 수소 이용률에서 산소 이용률이 0.3, 그리고 공기극 가스 리사이클 비는 0.5가 필요한 것으로 예상된다.

최초의 부하운전 시험은 9월16일 실시하였고 최대 출력은 50 kW 발전 전력을 기록하였다. 50 kW 출력에서 하부 스택의 단위전지 평균 전압은 0.66 V이고, 상부 스택은 0.82 V를 나타내었다. 향후 100 kW급 MCFC 스택에 대한 가압, 가압 리사이클 운전시험을 실시 할 예정이며 가압시험 및 부분부하시험과 함께 연속 운전시험을 실시 할 예정이다. 본 시스템은 설치 후 약 5,000 시간 운전 후 운전 후 시험을 통하여 향후 개발될 250 kW급 Package 개발에 활용될 예정이다.

참 고 문 헌

1. 임희천, 안교상 :“ 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 I,II, 2003년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2001, 2002.
2. 엄영창, 임희천, “100 kW급 MCFC 발전 시스템 전기 및 제어 시스템 설계”, 전력연구원, TM00EC01.P2003. 048. 2003
- [3]임 희천외, “100 kW급 외부개질형 MCFC 발전 시스템 개발 중간 보고서, 전력연구원, 2000
- 4.임희천, 안교상 엄영창:“ 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 III, 2004년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2004
5. 임희천, 안교상 “ 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 IV, 2005년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2005