

용융탄산염 연료전지 시스템

최 영 재*, 전 재 호**, 전 중 환***

(포항산업과학연구원 연료전지연구단 *선임연구원, **책임연구원, ***수석연구원)

1. 서론

현재 세계는 산업발전, 인구 증가 등으로 에너지 수요는 계속 증가하고 있으나 석유자원의 고갈 및 산유국의 감산정책으로 유가는 상승하고 있고, 화석연료를 인간이 무분별하게 사용함으로써 환경이 파괴되고 이상기후가 나타나고 있다. 세계는 석유나 석탄 등 화석연료의 고갈이 점점 현실로 나타남에 따라 화석연료를 대체할 에너지 개발에 주력하고 있다. 대체 에너지는 석유에 주로 의존해 온 에너지원을 대신할 에너지원을 말하며 대체에너지 중에서 신·재생에너지에 대한 관심이 높아가고 있다.

신·재생에너지는 수소, 연료전지, 석탄액화가스, 태양열, 태양광, 바이오 에너지, 풍력, 지열, 해양 및 폐기물 등을 말하며, 이들 중에서 연료전지는 연료의 화학적 에너지를 전기화학 반응을 통하여 직접 전기로 변환시키는 장치로서 화학적 반응에 의해 전기를 발생시킨다는 점에서 배터리와 비슷하지만 연료전지는 반응물질인 수소와 산소를 외부로부터 공급받으므로 배터리와는 달리 충전이 필요 없고, 연료가 공급되는 한 전기를 계속 생산할 수 있다. 연료전지는 에너지 전환효율이 높고 연료의 연소반응 없이 에너지를 발생시키기 때문에 공해물질을 배출하지 않는 환경친화적인 고효율 발전방식이며, 고온형 연료전지의 경우 배열을 이용한 열병합 발전으로의 활용성이 높기 때문에 연료전지가 가지는 장점은 매우 크다.

연료전지는 전해질의 종류에 따라 전해질의 내부를 흘러가

는 이온의 종류가 다르며 따라서 전해질에 의해 여러 연료전지로 분류된다. 연료전지를 사용전해질에 따라 분류해보면 인산형 연료전지(PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell), 직접메탄올 연료전지(DMFC: Direct Methanol Fuel Cell), 고분자전해질 연료전지(PEMFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell), 용융탄산염 연료전지(MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell), 고체산화물 연료전지(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) 등이 있다. 또한 이들 연료전지는 응용분야별로 휴대용, 가정용, 수송용 및 발전용으로 구분된다.

본 원고에서는 고온에서 작동하고 열병합이 가능하며 분산 전원 및 발전소를 대체할 수 있는 용융탄산염 연료전지에 대한 기본원리, 연료개질에 대하여 설명하고, 용융탄산염 연료전지 시스템의 구성, 용융탄산염 연료전지 시스템의 예 및 실증현황에 대하여 소개하고자 한다.

2. 용융탄산염 연료전지

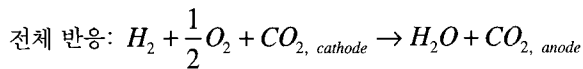
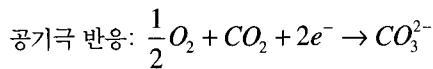
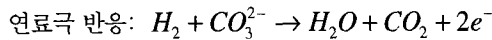
용융탄산염 연료전지는 액체상태로 용융된 탄산염을 전해질로 사용하는 연료전지이다. 운전온도는 650℃의 고온에서 운전하며, 490℃에서 탄산염이 용해된다. 발전연료의 공급에 의한 직접발전으로 발전효율이 높고 환경 친화성이 우수한 장점이 있다. 고온에서의 빠른 전기화학반응은 전극재료를 백금 대신 저렴한 니켈의 사용을 가능케 하여 경제성에서 유리할 뿐만 아니라, 백금 전극에 피독물질로 작용하는 일산화탄소도

수성가스 전환 반응(water-gas shift reaction)을 통하여 연료로 이용하는 니켈전극의 특성은 석탄가스, 천연가스, 메탄올, 바이오 매스 등 다양한 연료 선택성을 제공한다^{(1), (2)}.

본 내용에서는 용융탄산염 연료전지의 기본원리와 용융탄산염 연료전지의 연료가스를 이용하여 수소를 생성하는 개질 방법에 대하여 설명하고자 한다.

2.1 기본원리

용융탄산염 연료전지는 일반적으로 그림 1과 같이 Ni를 주성분으로 하는 다공체인 연료극(anode)과 NiO의 다공체인 공기극(cathode) 사이에 Li₂CO₃와 K₂CO₃의 혼합 용융탄산염 전해질(electrolyte)을 함유하는 다공성의 LiAlO₂ 매트릭스(matrix) 및 연료극 가스와 공기극 가스를 격리하고 공정 가스의 흐름을 형성하며 집전역할을 하는 분리판(separator)으로 구성된다. 용융탄산염 연료전지의 발전원리는 수소가 주성분인 연료극 가스와 산소와 이산화탄소로 구성된 공기극 가스가 각각 연료극과 공기극으로 공급되면 다음과 같은 전기화학반응에 의하여 용융탄산염 연료전지는 전기와 열 및 물을 생산한다^{(1), (2)}.



연료극에서는 수소가 전해질과 전극에서 촉매작용에 의해 수소이온과 전자가 분리되고, 전자 e⁻는 전극을 통해 외부로 방출되고, 수소이온은 전해질 통과 후 탄산이온과 반응한다. 공기극에서는 산소가 연료극의 전자 e⁻와 전해질/전극의 촉

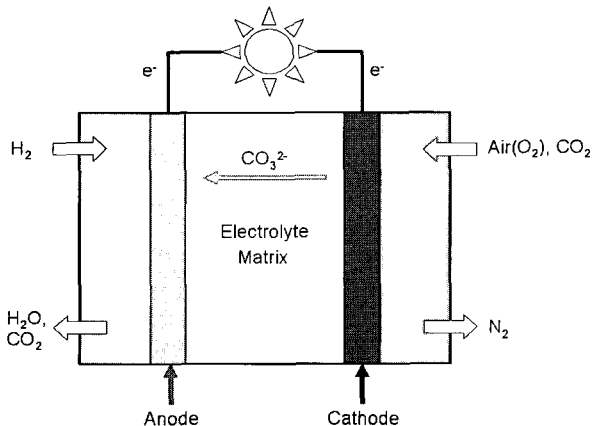


그림 1 용융탄산염 연료전지 개념도

매작용에 의해 산소이온으로 반응하고 공기극 측에 공급된 이산화탄소는 전해질에서 용해, 산소이온과 결합하여 탄산이온으로 반응하며, 탄산이온은 전해질을 통과하여 연료극에 보내진다.

2.2 연료개질

연료전지의 연료는 천연가스, 메탄올, 석탄 등의 모든 탄화수소를 사용할 수 있으나 용융탄산염 연료전지의 경우 일반적으로 천연가스를 연료로 하여 개질(Reforming)반응에 의해 수소를 생산한다. 개질이란 액체나 기체 상태의 메탄이 주성분인 탄화수소화합물로부터 수소를 발생시키는 것을 말한다. 개질공정은 수증기 개질(SR: Steam Reforming), 부분산화(POX: Partial Oxidation) 및 자열 개질(ATR: Autothermal Reforming)반응이 있으며, 용융탄산염 연료전지는 수증기 개질에 의해 수소를 제조한다. 메탄을 이용한 수증기 개질의 기본반응은 다음과 같다.



용융탄산염 연료전지에서의 수증기 개질 반응은 크게 연료전지 스택 외부의 개질기에서 일어나는 외부개질(ER: External Reforming)과 연료전지 스택(stack) 내부에서 일어나는 내부개질(IR: Internal Reforming)로 구분되며, 내부개질은 직접 내부개질(DIR: Direct Internal Reforming) 및 간접 내부개질(IIR: Indirect Internal Reforming)로 구분되며, 각 개질 방법에 대한 개념도를 그림 2에 나타내었다. 외부개질형 용융탄산염 연료전지는 스택 외부의 개질기에서 수증기 개질 반응이 일어나며 촉매의 선정에 있어서 내부개질형에 비해 폭이 넓어 다양한 연료를 사용할 수 있는 장점이 있으나 개질 반응에 필요한 열을 별도로 공급해야 하기 때문에 연료의 이용효율이 낮아진다는 단점이 있다. 내부개질형 용융탄산염 연료전지 중에서 간접 내부개질의 경우 평판형의 개질기가 여러 개의 단위전지 마다 하나씩 번갈아 배치되어 있으며, 여러 단위전지에서 발생하는 열이 인접하여 있는 개질기에 전달되어 열적으로 긴밀하게 결합되어 있고 개질된 연료가스는 인접 단위전지들에게 공급되는 구조이다. 직접 내부개질은 스택의 연료극 내에서 이루어지며 개질 반응에 의해 수소가 생성되면 연료극에서 전극반응에 의해 바로 소비하여 비평형 조건을 유지하므로 메탄의 전환율이 높아진다. 이와같이 내부개질형 용융탄산염 연료전지는 연료전지에서 발생하는 열을 이용하므로 연료의 이용효율이 높으나 촉매의 선정에 있어서 폭이 좁아 한정된 연료만 사용할 수 있다

(1), (3), (4)

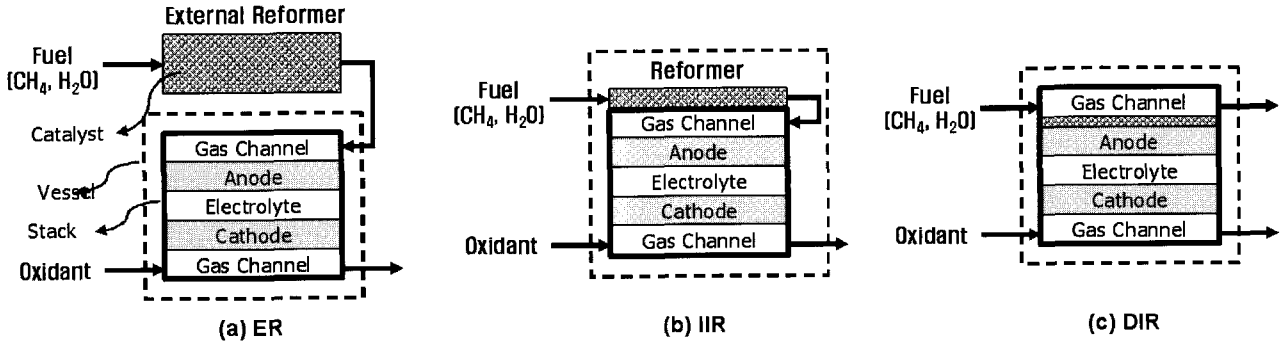


그림 2 외부개질, 간접 내부개질 및 직접 내부개질 개념도

3. 용융탄산염 연료전지 시스템

연료전지 발전시스템은 연료전지의 핵심인 스택 이외에 여러 기계장치와 주변설비 및 제어시스템 등의 hardware 및 software가 스택과 연동하도록 구성되어 있다. 용융탄산염 연료전지 시스템은 그림 3과 같이 스택(Stack)과 그 외의 주변장치인 기계 주변장치(MBOP) 및 전기 주변설비(EBOP)로 구성되어 있다⁽⁵⁾. 현재 국내에는 천연가스 및 소화조가스(ADG: Anaerobic Digester Gas)를 연료로 사용하는 250kW급 용융탄산염 연료전지 시스템에 대한 실증연구가 진행중에 있다.

본 내용에서는 시스템 구성요소인 스택, 기계 주변장치 및 전기 주변설비와 용융탄산염 연료전지 시스템의 예 및 실증 현황에 대하여 정리하였다.

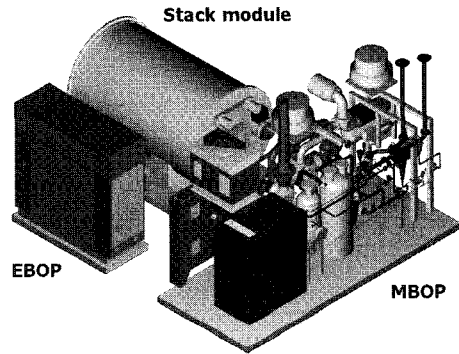


그림 3 용융탄산염 연료전지 시스템

3.1 스택, 기계 주변장치 및 전기 주변설비

연료전지에 있어서 발전을 위한 기본단위를 셀(Cell)이라고 하며, 하나의 셀은 전해질과 매트릭스를 사이에 두고 서로 반대쪽에 위치한 한쌍의 전극인 연료극 및 공기극으로 이루어진다. 하나의 셀이 생산하는 전력의 기전력은 0.8V 내외에 불과하며, 연료전지에 실용성을 부여하기 위해서 여러 개의 셀을 쌓은 것이 연료전지 스택(Stack)이다. 그림 4와 같이 스택을 구성하는 각각의 셀은 분리판이라는 구성요소를 사이에 두고 전기적으로 직렬로 연결된 구조를 갖고 있다. 연료전지의 발전량은 셀의 면적과 쌓은 셀의 수량에 의해서 결정된다.

스택을 제외한 주변설비인 기계 주변장치(MBOP)와 전기 주변설비(EBOP)는 표 1과 같이 구성되어 있다. 기계 주변장치는 연료전지 스택에서 전기를 생산하기 위한 연료와 공기, 그리고 물 공급에 필요한 기계적 장치들로 구성되어 있다. 전기 주변설비(EBOP)는 스택에서 생산된 직류(DC)를 교류(AC)로 변환해주는 전력 변환설비와 전력을 공급하기 위한 전력 공급설비 그리고 시스템의 감시와 제어를 위한 감시 및 제어 모듈로 구성되어 있다^{(1),(5),(6)}.

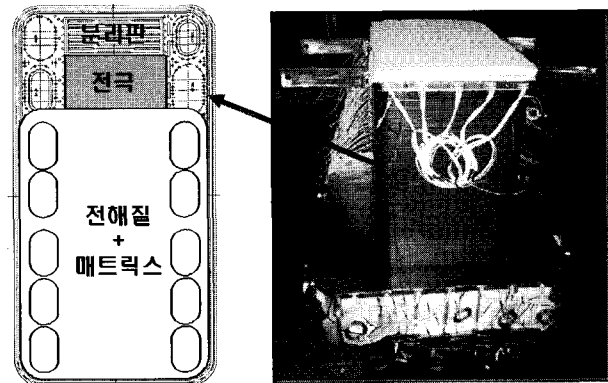


그림 4 용융탄산염 연료전지 스택

3.2 용융탄산염 연료전지 시스템 예

그림 5는 미국 Fuel Cell Energy사의 Direct FuelCell[®] DFC300™ 시스템의 공정을 개략적으로 나타낸 그림이다⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾. 시스템에 대하여 설명하면 먼저 외부에서 공급된 메탄이 주성분인 연료가스는 탈황기에서 연료가스중의 황성분이 제거된 후 가습기로 유입된다. 외부에서 공급된 물은 수처리 장

표 1 기계주변 장치 및 전기 주변설비 구성

| 구분 | 모듈 | 장치 |
|------|---------|---|
| MBOP | 수처리 | 필터, 연수기, 역삼투압 장치, 탈이온 장치 |
| | 연료공급 | 탈황기, 필터, preconverter, 가습기, 제어밸브 |
| | 공기공급 | 필터, 송풍기, 가열장치, 제어밸브 |
| | 배가스 재순환 | 송풍기, 압력계, 필터 |
| EBOP | 전력변환 | DC/DC(chopper), DC/AC(inverter) |
| | 전력공급 | Distribution Panel, E&C panel, Breaker, Transformer |
| | 감시 및 제어 | PLC, HMI, UPS |

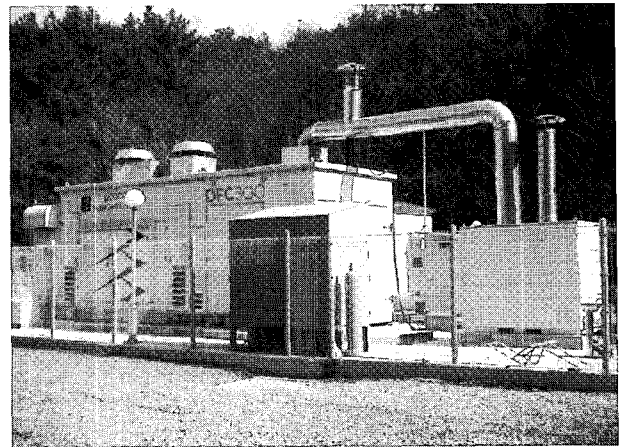


그림 6 250kW MCFC 실증 1호기 설치 전경(포항 RIST 실험동)

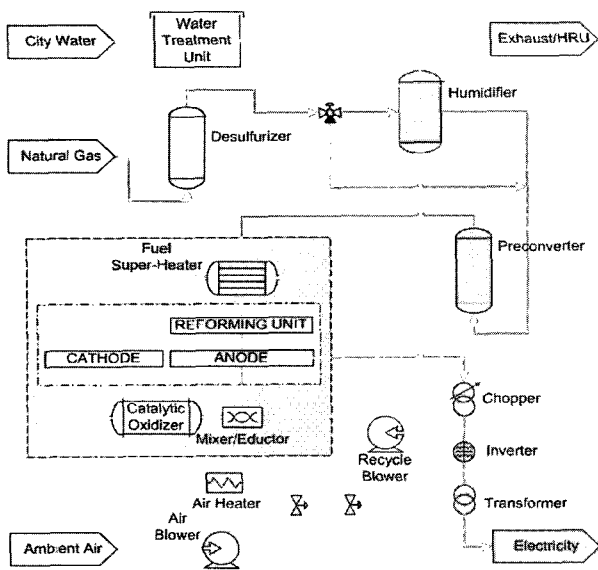


그림 5 용융탄산염 연료전지 시스템(DFC300TM) 공정도

치에서 정수된 후 가습기에서 열교환을 통해 수증기 상태로 연료가스와 일정한 비율로 혼합된다. 가습기에서 혼합된 연료가스와 수증기는 낮은 온도의 단열 개질기인 preconverter를 지난 다음 열교환기를 거치면서 가열되어 내부 개질반응에 의해 수소를 생성한 후 스택의 연료극으로 공급된다. 한편 공기극에 필요한 공기는 송풍기를 통해 연료극에서 나온 배가스와 함께 eductor에서 혼합된 후 촉매연소기로 공급되어 촉매 연소에 의하여 형성된 이산화탄소와 함께 공기극으로 공급된다. 공기극에서 배출된 가스는 연료극 연료가스와 열교환 후 중 일부는 재순환되며, 나머지는 가습기에서 열교환

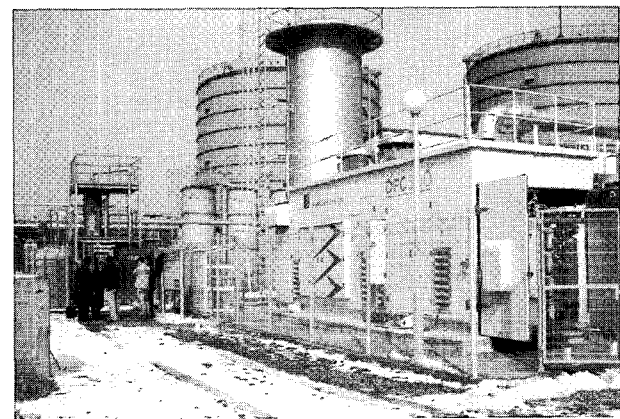


그림 7 250kW MCFC 실증 2호기 설치 전경(서울 탄천환경)

된 후 시스템 외부로 배출된다. 350℃ 정도의 배가스는 보통 배열회수장치를 통해 온수 및 냉수를 발생하는데 사용된다.

3.3 용융탄산염 연료전지 시스템 국내 실증 현황

현재 국내에는 3대의 내부개질형 250kW급 MCFC 시스템에 대한 실증연구가 진행 중에 있으며, 1대의 상용화기가 남동발전에서 설치되어 운전 중에 있다. 본 장에서는 대체에너지 실용화 평가사업의 일환으로 진행되고 있는 실증 1호기와 실증 2호기에 대한 현황을 소개하고자 한다.

LNG를 연료로 사용하는 250kW급 MCFC 실증 1호기는 2005년 3월 경북 포항의 포항산업과학연구원(RIST)에 설치되어(그림 6), 2005년 4월에 발전을 시작하였다. 초기 성능을 측정된 결과, 저위발열량(LHV: Lower Heating Value) 기준 전기효율은 47.8%, 연료이용률은 72.8%로 분석되었다. 본 실증 1호기에서 발생한 전기는 포항산업과학연구원

(RIST)의 연료전지 실험동에 공급되고 있으며, 배열회수장치를 이용하여 온수 및 냉수를 발생하고 있다. 2007년 7월 현재 실증 1호기는 17,000시간 이상의 가동시간을 달성하였으며 가동률은 약 93.8%를 기록하였다.

소화조 가스인 ADG 가스를 연료로 활용하는 실증 2호기는 서울특별시 하수처리장인 (주)탄천환경에 설치되어(그림 7), 2006년 4월에 발전을 시작하였다. 초기 성능을 측정한 결과, 평균 출력 250kW의 교류(AC)를 송전하는데, 537kJ/mol의 LHV를 가지는 ADG 연료를 사용하여 45.1%의 전기효율을 보여주었다. 2007년 7월 현재 실증 2호기는 7,000시간 이상 운전 중에 있으며, 발생한 전기 및 온수는 (주)탄천환경 내부에 공급되고 있다.

본 MCFC 발전시스템의 국내 실증사업을 통해 설치기술, 장기 운전기술, 평가기술, 연료 운영기술 및 정비기술 등을 확보하고 있으며, 향후 MCFC 시스템의 국산화를 통해 국내 발전용 연료전지의 생산 및 판매를 추진 중에 있다. 더불어 국내 발전용 연료전지의 개발 및 보급을 활성화시키고, 빠른 시일 내에 시장에 진입하여 발전용 연료전지의 상용화를 촉진시키는데 기여할 것으로 기대한다.

5. 결론

본 원고에서는 용융탄산염 연료전지에 대한 기본원리, 연료 개질에 대하여 설명하고, 용융탄산염 연료전지 시스템의 구성, 연료전지 시스템의 예 및 실증현황에 대하여 소개하였다.

용융탄산염 연료전지 시스템은 호텔, 병원 및 대형건물 등의 분산전원 및 화력발전소를 대체할 수 있는 열병합발전용으로 적합한 연료전지 시스템으로서, 지속적인 연구 개발을 기반으로 국내 자체 상용화 모델의 개발이 필요하다. 이를 위해서는 스택 및 BOP의 연구를 통해 신뢰성 및 경제성을 확보하는 것이 절실히 요구된다. 향후 기술 경쟁력을 갖추어 국내 고유 시스템의 생산과 이를 통한 발전용 연료전지 시장의 확대를 기대해 본다.

참고문헌

[1] EG&G Technical Services, Inc., "Fuel Cell Handbook", 7th Ed., Report DE-AM26-99FT40575, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004.
 [2] 한중희, "용융탄산염 연료전지 기술개발 현황", <http://www.cheric.org/ippage/p/ipdata/2004/07/file/p200407-101.pdf>, 2004.
 [3] G. Hoogers, "Fuel Cell Technology Handbook",

CRC press LLC, 2003.

[4] J. James and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
 [5] FuelCell Energ, Inc., "Direct Fuelcell DFC300 MATM Standard powerplant specification summary", http://www.albanconsultantscorner.com/pdf/DFC300_specsheet.pdf, 2005.
 [6] 전재호외, "250kW급 용융탄산염 연료전지인 DFC의 실증실험", RIST 연구논문, pp.86-91, 2006.
 [7] FuelCell Energy, Inc., "Fuel Cell System with Mixer/Eductor", US patent 6902840, 2005.
 [8] Sumitomo Precision Products Co. Ltd., Inc., "Plate Fin Heat Exchanger for a High Temperature", US patent 6910528, 2005.
 [9] H. C. Maru, and H. Ghezal-Ayagh, "Direct Carbonate Fuel Cell - Gas Turbine Combined Cycle Power Plant", European Fuel Cell Forum, Switzerland, A10-4, 2005.
 [10] J. D. Leitman, and H. C. Maru, "Carbonate Fuel Cells Convert Waste Gases into Useful Energy" European fuel cell forum, Switzerland, A10-2, 2005.

<저 자 소 개>



최영재(崔榮載)

1972년 11월 9일생. 1999년 인하대 화학공학과 졸업. 2001년 동 대학원 졸업(석사). 2005년 인하대 화학공학과 졸업(공학). 현재 포항산업과학연구원 선임연구원.



전재호(田宰昊)

1964년 2월 18일생. 1987년 서울대 금속공학과 졸업. 1992년 POSTECH 재료금속공학과 졸업(석사). 2003년 POSTECH 신소재공학과 졸업(공학). 현재 포항산업과학연구원 책임연구원.



전중환(全中煥)

1960년 11월 22일생. 1983년 서울대 금속공학과 졸업. 1985년 서울대 금속공학과 졸업(석사). 1988년 서울대 금속공학과 졸업(공학). 현재 포항산업과학연구원 수석연구원 연료전지연구단 단장.