

발전기 냉각용 On-site 수소 생산 시스템 적용연구

문전수[†], 이재근, 박필양, 박경일*

*전력연구원 녹색성장연구소

Application Study of An On-site Hydrogen Production System for Power Generator Cooling

JEONSOO MOON[†], JAEKUN LEE*, PYLYANG PARK*, KYOUNGIL PARK*

Green Growth Laboratory Korea Electric Power Research Institute, 65 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-760, Korea

ABSTRACT

A hydrogen cooling method is used in a power generator for removing the unnecessary heat due to the windage loss of a rotor and the joule heat of a stator. A MEA (Membrane Electrolyte Assembly) hydrogen generator has been developed and applied as a hydrogen supplying system for the cooling of a 350MW power generator. As a field application result, the average potential of eleven cells and the voltage efficiency were measured 2.26V/cell and 65.4% (Higher Heating Value) respectively at the hydrogen pressure of 6 Bar, the hydrogen flow rate of 9.1L/min, and the current of 150A.

KEY WORDS : Hydrogen(수소), MEA(막전극 집합체), Power plant(발전소), Generator cooling(발전기 냉각), Hydrogen pressure control(수소압력제어)

Nomenclature

BPR : back pressure regulator
FPR : fore pressure regulator
MEA : membrane electrolyte assembly
PLC : program logic controller
HHV : higher heating value

1. 서 론

발전소에서는 대용량 발전기의 냉각을 위하여 열전도율이 높고 점도가 낮은 수소기체를 가압하여 냉매로써 이용하고 있다. 기존 고압 수소용기에 의한 공급 방법은 발전설비의 안정적 운영을 위해 수소가스 상시 재고량을 확보하여야 하기 때문에 가스 저장 시설의 설치와 관리가 필요하고 원거리 소재 발전소와 도서 발전소의 경우 수송에 따른 가스 구입가격이 고가이고 운송에 따른 위험성이 높다. 또한, 발전기 풍손(windage loss)를 줄이고 및 발전기 수명 연장을 위하여 순도가 높은 수소기체

[†]Corresponding author : jsmoon@kepco.co.kr

[접수일 : 2009.9.8 수정일 : 2009.10.14 게재확정일 : 2009.10.23]

의 사용이 요구되고 있다¹⁾.

발전소 보일러 보급용 순수와 소내 전원을 이용하면 발전기에 필요한 고 순도 수소 기체를 안전하게 생산하여 공급할 수 있다. 발전기에 소요되는 양만을 생산하여 공급하기 때문에 기존의 고압 수소용기 저장 시설이나 용기 교체 작업이 불필요하고 수소공급설비 자동화 운전이 가능하여 고순도 수소 사용으로 발전효율을 개선할 수 있다.

본 논문에서는 MEA(membrane electrolyte assembly) 및 수소 생산 스택(stack) 개발 후^{2,3)} 350MW급 발전기에 소요되는 수소(하루 12Nm³)를 공급할 수 있는 수소 생산 시스템을 설계, 제작하여 발전기 수소 공급 시스템으로써 현장 적용한 결과에 대해 논하고자 한다.

2. 실험 및 설계

2.1 MEA 합성

수소 발생 스택은 알루미늄 프레임, 티타늄 end plate, 티타늄 bi-polar plate, sintered 파이버 집전체, 막전극 접합체, polycarbonate 유로 프레임 등으로 구성하였다. 막전극 접합체는 나피온막(nafion-117) 표면을 sand blasting으로 거칠기를 부여하고 과산화수소와 황산 수용액으로 유기물과 불순이온을 제거한 후 순수 177ml에 88mg의 비올로 Pt(NH₃)₄Cl₂·xH₂O를 녹인 수용액으로 막을 코팅하였고 막에 담지된 platinum이온은 sodium borohydride 수용액으로 환원처리하였다. 이어서 양극측은 iridium 코팅 metal전극을 DSA(dimensionally stable anode) 전극으로 사용하고 음극측은 Pt/nafion막을 연결한 후 변색 점까지 HClO₄가 첨가된 (NH₄)₂IrCl₆ 수용액에서 iridium dioxide를 10분간 무전해 도금법으로 코팅하였다. 집전체의 접촉저항을 줄이기 위하여 티타늄 표면을 이소프로필 알코올로 세척하고 염산 10% 및 옥살산 10% 수용액 중에서 30분간 끓여 산화물 피막을 제거한후 platinum을 코팅하였다. sintered 파이버 집전체는 bekaert사의 bekinit ST/Ti/20 /400/65 제품을 사용하였다.

2.2 스택의 전기화학 특성 실험

스택에 사용한 막전극 접합체는 직경 20cm, 유효면적 314cm²이며 11개의 막전극 접합체를 적층하여 스택을 완성하였다. 스택의 단위 셀(cell) 전압은 인가 전류에 따라 2.0V에서 2.26V까지 증가되었다. 그림 1은 전류 변화에 따른 11개의 셀 위치별 전압 측정 결과를 나타낸 것이다.

이론적인 수소 발생 유량은 스택에 공급되는 전류에 비례한다. 그림 2는 전류 변화에 따른 수소 발생 이론값과 실측값을 나타낸 것이다. 실험으로부터 원하는 수소 기체 유량을 발생시키기 위한 소요 전류는 다음 상관 식으로 표현되었다.

$$\text{전류(A)} = 16.41 \times \text{수소유량(L/min)}$$

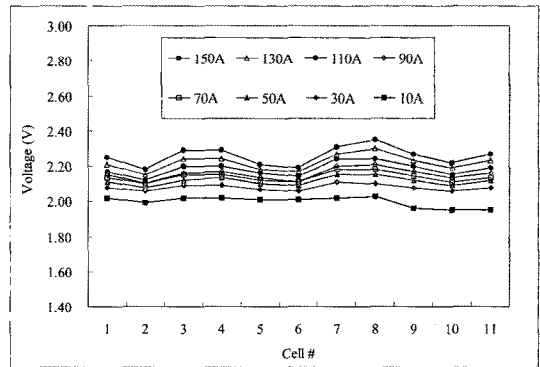


Fig. 1 Cell potential distribution as a function of current.

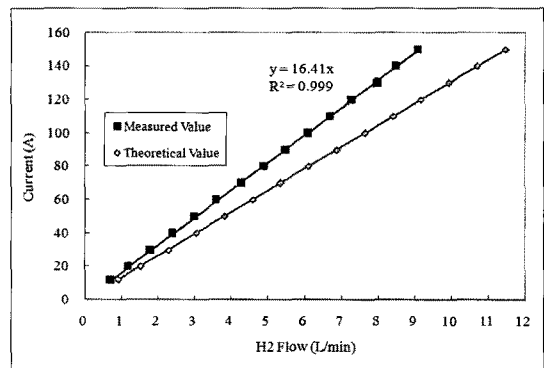


Fig. 2 Relationship between current and hydrogen flow rate.

2.3 순수 공급 및 순환시스템 구성

수소 발생 물분자 공급과 스택의 불필요한 반응열을 제거하기 위해 순수가 스택과 냉각기를 통해 연속적으로 순환되어야 한다. 물에 불순물 이온이 함유되어 있으면 막전극 접합체 귀금속 촉매 피독과 성능 저하를 유발하기 때문에 고순도 수질을 유지하였다.

스택 내부의 순환 유량이 너무 낮으면 hot spot가 발생되어 막전극 접합체가 손상될 수 있기 때문에 순환수 온도와 유량이 적정 범위에 들어오도록 유지 및 감시가 필수적이다.

본 연구에서는 스택 내부에서 순환되는 순수의 전기전도도는 $1\mu\text{S}/\text{cm}$ 미만 조건에서 운전되도록 하였다. 이를 위해 발전소의 순수생산설비(2B3T 및 MBP)에서 처리하여 생산된 고순수를 보급하였고, 스택의 순환 배관으로부터 불순물 유입에 의한 전기전도도의 상승을 방지 위하여 배관에 혼상수지 컬럼과 정밀여과 컬럼을 설치하여 순환수가 정화되도록 하였다. 공냉식 냉각기(radiator), 웨스코 순환 펌프를 적용하여 수온은 50°C 미만, 순환유량은 $2\text{L}/\text{min}$ 이상으로 유지되도록 하였다.

2.4 수소 수분제거 및 순도 측정 방법

막전극 접합체를 통해 양극 측의 물분자가 음극 측으로 확산되어 음극에서 발생하는 수소 기체에 미량 수분이 함유되어 있기 때문에 수소 품질을 만족시키기 위해서는 수분제거가 필요하다. 수소의 수분 제거는 2단계에 거쳐 진행하였다. 1단계는 편형 냉각기에서 응축 수분을 제거하였고, 2단계에서는 제올라이트(5A)와 알루미늄의 혼상 드라이어 컬럼을 통과시켜 미량의 수분을 제거하여 99.99% 이상 순도가 유지되도록 하였다. 드라이어를 2개의 컬럼으로 구성하여 1개는 수분 제거공정, 나머지 1개는 부차 수분을 제거하는 재생공정에 사용되도록 하였다. 재생공정의 캐리어 기체는 발생된 수소 기체의 약 10%를 취하여 통과시켰다. 수소 순도는 이슬점 분석기를 이용하여 주어진 온도에서 수분 양(ppm)을 산출한 후 계산하였다. 그림 3은 미량 수

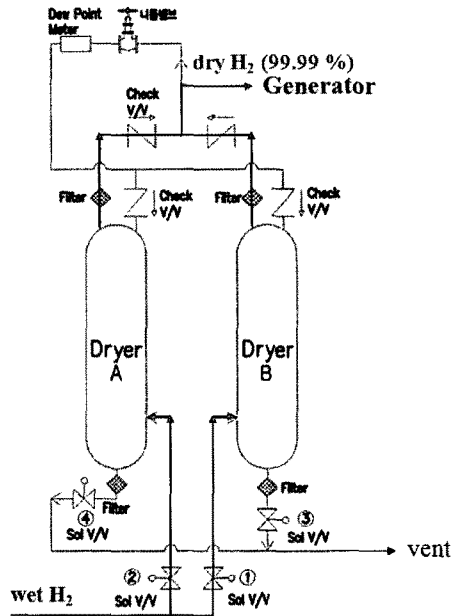


Fig. 3 Schematic diagram of a hydrogen purification system.

분 제거를 위한 드라이어 구성을 나타낸 그림이다.

2.5 수소 압력제어 및 유량 측정설비

발전기에 공급되는 수소압력을 제어하기 위하여 BPR(back pressure regulator), FPR(fores pressure regulator) 및 pressure transmitter로 공급설비를 구성하였다. BPR은 드라이어를 거친 99.99% 이상 고순도 수소를 가압하는 역할을 하며, FPR은 발전기에 공급되는 수소 압력을 일정하게 유지하는 역할을 한다. BPR과 FPR 사이에는 3-way 밸브를 부가하여 발전기 수소 공급이 불필요할 경우 3-way 밸브 조작으로 바로 외부로 배출되도록 하였다. 3-way 밸브 조작으로 FPR로 수소가 공급되면 별도의 압력 제어기에서 설정한 수소압력이 유지되도록, 수소 공급 압력이 초과되면 FPR에서 대기로 수소 기체의 일부를 배출시키고 낮으면 배출 밸브가 자동으로 닫히어 수소 공급 압력이 설정치에서 일정하게 유지된다. 그림 4는 수소공급 압력 및 유량변화 그래프로써 수소공급 압력이 잘 제어되고 있음을

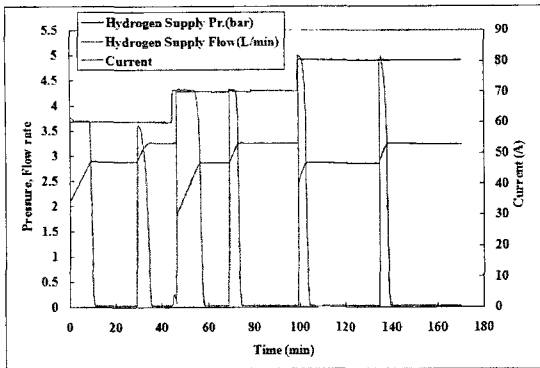


Fig. 4 Hydrogen pressure and flow rate as a function of current.

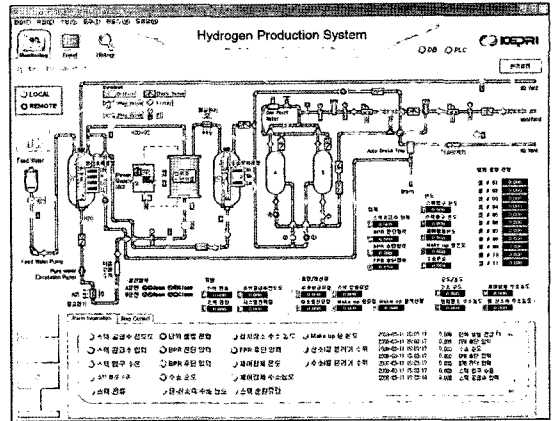


Fig. 5 Control and monitoring screen of a hydrogen production system.

알 수 있다.

2.6 수소 생산시스템 안전장치 설계

본 수소발생 시스템에는 여러 가지 안전장치를 추가하여 설계하였다. 운전중 스택의 막 전극 접합체가 손상되면 가압된 수소기체가 양극측의 산소 및 물 순환 배관으로 유입될 수 있다. 막전극 접합체의 손상을 감지하기 위하여 물 순환 탱크 상부에 수소 기체 탐지기를 설치하여, 수소 기체 폭발범위 하한치의 절반인 2%에 도달되면 자동으로 경보가 울리고 수소기체의 외기 배출 후 시스템이 안전하게 정지되도록 하였다. 수소 발생 배관부와 전기, 전자 제어부는 서로 분리하여 차폐 구조로 설계하였다. 수소기체가 통과하는 수소 배관과 수분 제거 드라이어 상부 및 제어함체 내부에도 수소 누출 탐지기를 추가로 부착하여 수소 누출 여부를 상시 감시하도록 하였다. 또한, 수소 배관에는 방폭형 솔레노이드 밸브를 사용하고 수소기체가 누출되더라도 외부로 바로 배출되도록 환기시스템을 설치하여 미량 수소가 누출하여도 설비가 안전하게 운전되도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소생산시스템 설치 결과

본 수소생산 시스템은 하루 12Nm³ 수소를 공급

할 수 있고 PLC(program logic controller)에 의한 자동화 운전이 가능하도록 설계 제작하였다. 그림 5는 본 시스템의 제어 및 감시화면을 나타낸 것이다. 전체 P&ID를 표시하고 주요 부위별 운전 조건인 순환수 수온, 순환수 유량, 셀(cell) 전압, 스택 전류, 수소 순도, 수소 발생 유량, 수소 공급 유량, 수소 공급 압력, 수소 누출 농도 등이 표시되도록 하였다. 본 시스템의 설치 장소는 환기가 잘 되는 평택화력발전소 수소저장 창고로 하였고 시스템에서 배출되는 불필요한 수소 기체는 옥상으로 배출되도록 하였다.

3.2 Off-line 수소생산시스템 시운전 결과

수소공급설비를 외부 배기 배관에 연결하여 시운전을 수행하였다. 스택 전류를 30~100A까지 30분당 10A씩 상승시키면서 주요 성능 변화를 관찰하였으며 시험결과는 그림 6~7과 같다. 스택전류가 30A에서 100A로 상승하는 동안 스택온도는 초기 30분간 상승하다가 47℃ 부근에서 안정화되었으며, 스택전압은 23.8V에서 27.6V로 증가하였다. 시운전 동안 수분양은 18~6.5ppm값을 보여 주었으며 이로써 생성되는 수소 순도가 99.99% 이상임을 확인할 수 있었다. 수소 압력은 전류값이 변화하여도 일정한 설정값(약 4.1 Bar)에서 유지되었다. 수소 발생 유량은 전류가 상승함에 따라 비례

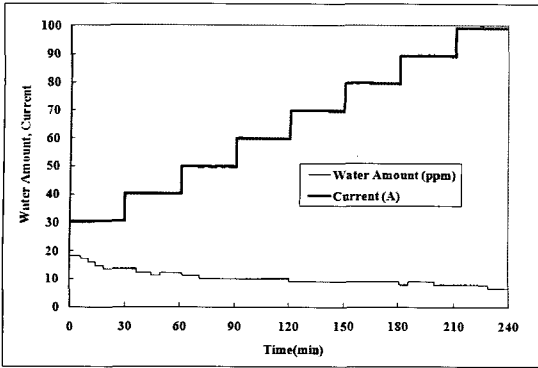


Fig. 6 Relationship between stack current and moisture amount.

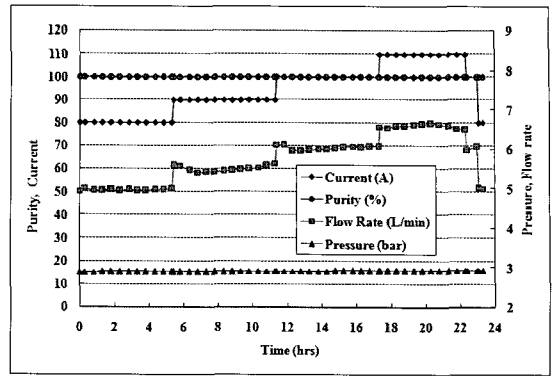


Fig. 8 Performance data of a hydrogen production system.

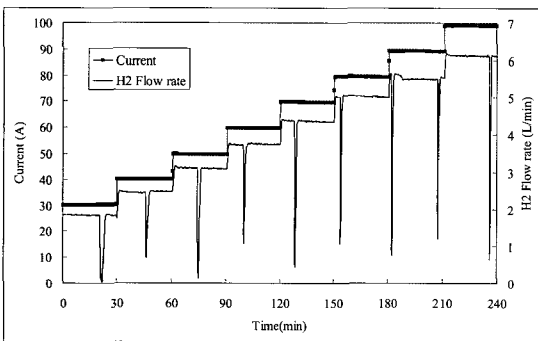


Fig. 7 Relationship between stack current and hydrogen flow rate.

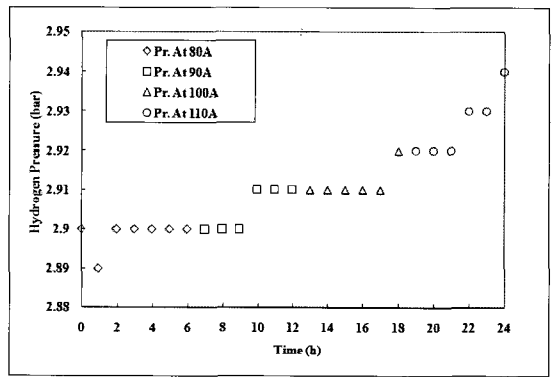


Fig. 9 Relationship between hydrogen pressure of a power generator and hydrogen flow rate.

하여 증가하였으며 동일 전류에서는 일정한 값을 보였다. 수소 용기 1개(120kg/cm², 47L 기준)를 하루에 발생시키기 위해서는 약 63A의 전류가 필요한 것으로 평가되었다. 또한, 각종 수소기체 누출 감지기에는 수소기체의 누출이 전혀 없는 것으로 확인되었다.

3.3 발전기 수소공급 개시 및 압력유지 결과

평택화력 2호기에 수소 공급을 통해 발전기 내부의 수소 압력이 일정하게 유지되는지를 평가하였다. 발전기 내부 수소압력은 2.9~3.0 Bar 사이에서 유지되어야 한다. 하루에 보통 1.5병의 수소가 소모되어 2병을 생산할 수 있는 본 수소생산시스템으로 발전기에 필요로 하는 수소를 충분히 공급할

수 있을 것으로 예상하였다. 24시간 동안 측정된 수소공급설비 성능 데이터는 그림 8과 같다. 전류가 80A, 90A, 100A일 때 수소발생량은 4.96L/min, 5.51L/min, 6.04L/min이었고 이때 평균 수소공급압력은 2.904 Bar, 2.914 Bar, 2.936 Bar로 측정되었다. 24시간 동안 평균 수소유량은 약 5.8L/min으로써 이를 수소용기로 환산하면 약 1.5병이 되는데, 이는 발전기의 일일 수소 소모량과 일치한다. 그러나, 발전기 내부 수소 압력이 초기의 2.90 Bar에서 최종적으로 2.94 Bar로 증가하여 연속적인 수소 공급 방법이 수소 용기의 일회성 주입 방법 보다 압력 감소가 적음을 알 수 있다.

발전소 제어반에서 측정한 발전기 내부 수소변화를 그림 9에 도시하였다. 수소공급설비를 연결한

2호기의 발전기 내부 수소압력은 운전 범위 내에서 수소압력이 일정하게 증가함을 보여주고 있고, 이에 반해 1호기는 수소공급설비를 연결하지 않았을 때의 수소압력 측정 결과로써 시간당 0.0039 Bar가 감소하여 초기 2.71 Bar에서 최종 2.62 Bar로 0.09 Bar가 감소하였다.

본 수소생산시스템에서 공급되는 수소 양과 발전기 내부 수소압력과의 관계를 확인하기 위하여 스택전류 변화시킨 시험결과는 그림 11과 같다. 초기 80A에서는 6시간 동안 2.90 Bar가 유지되었고, 이후 90A로 전류를 증가시키면 3시간 후에 2.91 Bar로 압력이 상승된 후 유지되었다. 이어서 100A로 올리면 3시간 뒤에 2.93 Bar로 증가하여 2.94 Bar에서 유지되었다. 이를 통해 스택 전류를 증가시키면 수소 유량이 증가하여 발전기 내부 수소압력 변화 시간이 짧아지고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

고체 고분자 수전해 수소생산 방식에 의한 발전기 수소공급 시스템을 설계, 제작하여 발전소 현장 적용을 성공적으로 완료하였다. 수소생산시스템 개발과정 및 현장 적용시 시험결과에 대한 주요 사항을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 양극 촉매로는 이리듐 산화물, 음극 촉매로는 백금을 사용하여 막전극 접합체를 제조한 후 하루 12Nm³ 수소를 발생시킬 수 있는 시스템 제작하여 성능을 평가한 결과, 수소발생을 위해 소요되는 전류는 다음 식으로 표현되었다.

$$\text{전류(A)} = 16.41 \times \text{수소유량(L/min)}$$

- 2) 스택전류 150A, 수소압력 6 Bar, 수소유량 9.1 L/min에서 평균 단위 셀(cell) 전압은 2.26V로, 전압효율은 65.4%(HHV 기준)로 평가되었다.
- 3) 수소 생산시스템의 내부 압력은 BPR을 이용하여 약 4 Bar로 유지하고, 수소 공급단은 FPR를 이용하여 발생된 수소를 공급함으로써 최적의 발전기 내부 수소압력을 유지할 수 있었다.

본 연구를 통해 국내 최초로 고체고분자 수전해 방식의 발전기 냉각용 수소 공급 시스템을 개발하였으며, 현장 적용을 통하여 발전소 가동에 필요한 고순도 수소를 안전하게 발생시켜 공급할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 과제는 한국서부발전(주) 협약으로 수행되었으며, 현장 적용에 협조해 주신 평택화력본부 환경화학부, 기력발전1부 실무자 여러분들에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 한국전력, “평택화력발전소 보수지침서”, 1992.
- 2) P. Millet, R.Durand, E. Dartyge, G. Tourrillon, A. Fontaine, “Precipitation of Metallic Platinum into Nafion Ionomer Membranes”, J. Electrochem. Soc., Vol. 140, No. 5, 1993, 1373-1380.
- 3) A. Marshall, B. Borresen, G. Gagen, M. Tsyppin, R. Tunold, “Hydrogen Production by Advanced Proton Exchange membrane Water Electrolysers-Reduced Energy Consumption by Improved Electrocatalysis”, Energy 32, 2007, 431-436.