

철강재료 가공용 수산소 혼합가스 발생기

김홍건⁺, 광이구^{*}, 이우금⁺⁺, 차화동⁺⁺, 신중달⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 04. 19, 심사완료일 2011. 06. 02)

Hydrox Generator for Steel Manufacturing

Hong-Gun Kim⁺, Lee-Ku Kwac^{*}, Woo-Gum Lee⁺⁺, Hwa-Dong Cha⁺⁺, Jooung-Dal Shin⁺⁺⁺

Abstract

A low capacity generator converted to high capacity of 40m³ is designed and developed in order to use the hydroxy gas in the steel manufacturing process. For efficient design, it is increased from 8 electrode tubes to 10 electrode tubes as well as expanding the diameter of cell integument up to two times bigger, which can increase the amount of hydrogen occurrence per a cell significantly. In addition, circulating pump and pipe, heat exchanger of affiliated SUS material have been used in the circulation of electrolysis catalyst, and circulating cooling section and piping design are also developed. The flame trap is designed into all-in-one suitable check valve in the flow rate of 28-35m³/h and its application is possibly applied in work operation. It is found that the efficiency of generator developed is enhanced substantially up to 84%. It is expected that the application in this field can be expanded significantly by this study.

Key Words : Hydroxy Gas(수산소 혼합가스), Flame Trap(역화방지기), LPG(Liquified Petroleum Gas), Ethylene Gas(에틸렌 가스)

1. 서론

최근 세계적으로 녹색기술에 대한 다양한 기술이 이슈가 되고 있으며, 특히 제조생산의 CO₂ 저감 기술에 대해 많은 노력과 관심이 집중되고 있다. 하지만 제조생산 분야에서 가장 많은 CO₂를 배출하고 있는 철강재료 제조생산 분야에서는 기존의 화석연료를 대체할 만한 에너지원의 부재로 많은 양의 CO₂를 그대로 배출하고 있는 실정이다. 이러한 CO₂를 대기중에 방출 없이 지하에 매장하는 '온실가스 포집·저장(CCS·Carbon Capture and Storage) 기술'이 많은 관심을 끌고 있다. 하지만 원천적으로 CO₂를 줄이는 방안에 대해서는 뚜렷한 대처가 없는

것으로 보고되고 있어, 화석에너지 (Fossil energy)를 최대한 적게 쓰면서 동일한 성능과 효율을 유지할 수 있는 기술에 대한 필요성이 절실히 부각되고 있다⁽¹⁾. 특히 철강 재료의 제조생산에 있어서 절단과 열처리 등의 공정에서 LPG나 에틸렌 가스 등을 사용하여 다량의 CO₂를 배출하고 있다. 이를 대체 할 수 있는 에너지원이 수산소 혼합가스이다⁽¹⁾. 수산소 혼합가스란 물(H₂O)의 구성비 그대로 수소와 산소가 2:1로 혼합된 상태의 혼합가스를 말하며, 이를 이용하여 철강재료의 절단, 용접, 열처리 등의 에너지원으로 사용하는 연구가 학계와 산업현장에서 많이 이루어지고 있다. [Kim]은 수산소 혼합가스와 LPG를 연료로 이용한 철강재료 절단의 열적특성 비교에 관한 연구와

⁺ 전주대학교 기계자동차공학과

^{*} 교신저자, 전주대학교 탄소나노부품소재공학과 (kwac29@jj.ac.kr)

주소: 560-759 전북 전주시 완산구 백마길 45

⁺⁺ 전라북도 테크노파크

⁺⁺⁺ (주)이투오엔지니어링

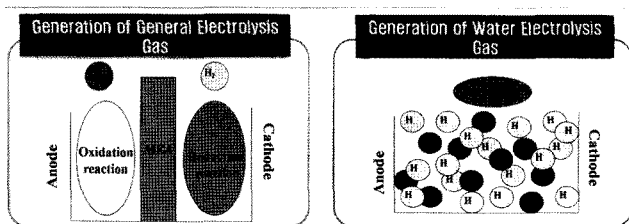
열화상 카메라를 이용하여 수산소 혼합가스의 연소특성을 실험적으로 연구 하였다⁽¹⁻²⁾. [Min]은 수산소 혼합가스를 이용하여 석면을 녹이는 방법에 대해 연구하였다⁽³⁾. 그리고 [Kim]은 수산소 혼합가스를 이용하여 연소기에 대한 다양한 특허를 등록하였다⁽⁴⁻⁶⁾. [Hyun]은 수산소 혼합가스를 이용하여 소각로의 CO₂저감에 대한 연구를 진행하였다⁽⁸⁾.

본 논문에서는 철강재료 제조생산 분야에서 수산소 혼합가스를 이용한 철강재료 가공에 적용 가능하도록 기존의 20Nm³/h 용량의 수산소 혼합가스발생기를 40m³/h의 대용량으로 늘리기 위한 설계 및 제작에 관한 내용으로 철강산업현장의 적용성을 넓히고자 하였다.

2. 수산소 혼합가스 발생원리^(1~2)

수산소혼합가스란 물(H₂O)의 구성비 그대로 수소와 산소가 2 : 1로 혼합된 상태의 혼합가스를 말하며, 물연료 자동 공급장치에서 생산되는 완전무공해 연료를 말한다. 고도의 전기분해 기술에 의한 물의 해리작용으로 생성되는 수산소 혼합가스는 자체산소에 의해 완전 연소되는 이상적인 혼합기체로서 임플로전(implosion)현상에 의해 수산소 혼합가스만의 독특한 연소특성을 나타낸다. Fig. 1은 물의 전기분해에 의한 수산소 혼합가스의 발생 메카니즘을 나타내었다.

본 논문에서의 수산소 혼합가스 발생은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 일반적인 전기분해장치와 달리 분리격막이 없으며, 전극간의 거리를 최적화 하여 효율을 증대시켰으며, 양 전극사이에 형성되는 저항을 최소화하였고, 전기분해 속도를 향상하여 효과적인 실용화장치를 개발하였다. 또한 전기분해시 발생하는 열을 최소화하여 효율을 극대화 하였다. 수산소혼합가스는 수소와 산소의 혼합가스로서 일반적인 열현상에서 보이는 보편적인 폭발현상이 나타나지 않으며 대신에 독특한 내폭현상이 발생한다. 수산소혼합가스가 연소하면 완전한 중성의 물만이 생성될 뿐 화재의 위험이 전혀 없으며 그 외의 일체의 부산물이 생성되지 않으며, 수소와 산소로 이루어진 혼합기체이므로 직접연소가 가능하며, 밀폐된 장소에서 연소시 외부에서 별도의 기체를 공급할 필요가 없어 환기나 배기설비가 필요없다. 또한



Principle of electrolysis decomposition :
Cathode : 4H⁺ + 4e⁻ → 2H<sub>2}, Anode : 2OH⁻ → 2H⁺ + O₂ + 4e⁻
Therefore, whole reaction is 2H₂O → 2H₂ + O₂</sub>

Fig. 1 Generation of hydrox gas

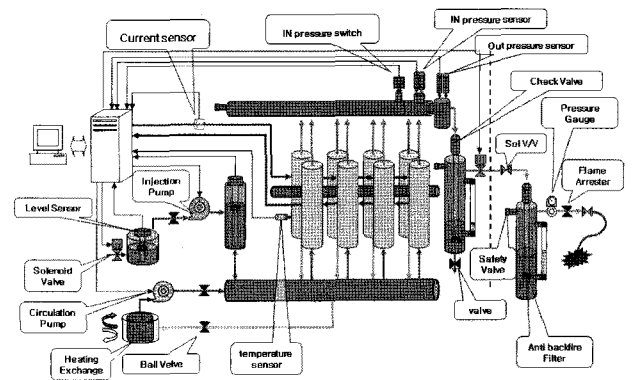


Fig. 2 Schematic diagram of hydrox gas generator

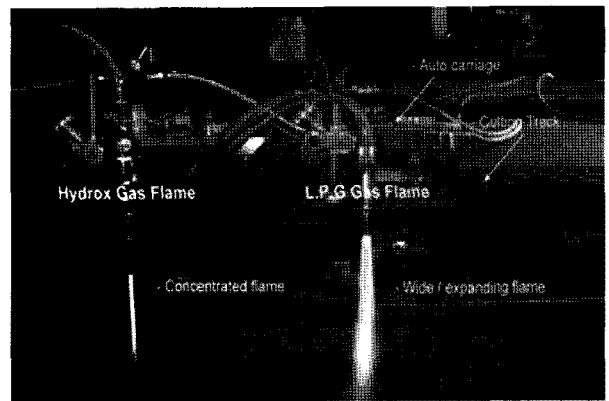


Fig. 3 Flames of LPG and hydrox gas

초고온의 열의 발생과 진공을 유도하여 Fig. 3과 같이 불꽃이 분산되지 않고 초점을 형성하고, 주위로 열선을 방출하지 않는 특성을 가지고 있다⁽¹⁾.

3. 수산소 혼합가스발생기

일반적으로 전기분해에 의한 수소제조는 KOH나 NaOH등의 수용액을 전기분해하여 얻어진다. 이때의 전기화학적 반응은 양극과 음극에서 동시에 발생한다. 전기화학적 반응에서 음극의 equilibrium potential E_c 과 양극의 E_a 는 다음 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다⁽⁹⁾.

여기서 E^0 는 normal electrode potential, F 는 Faraday 상수, R 은 가스상수, a 는 activity이다.

$$E_c = E_{H_2}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{H_2O}^2}{a_{H_2O}^2 - a_{H_2}} \quad (1)$$

$$E_a = E_{H_2}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{O_2}^{1/2} a_{H_2O}}{a_{OH}^2} \quad (2)$$

만일 물, 수소, 그리고 산소의 activity가 1이라면, 식 (1)과 식 (2)는 25°C에서 식 (3)과 식 (4)와 같이 정의 된다.

$$E_c = -0.828 - 0.591 \log a_{OH^-} \quad (3)$$

$$E_c = 0.401 - 0.0591 \log a_{OH^-} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 $E_c - E_a$, 즉 25°C에서 물을 전기분해하여 수소를 얻을 수 있는 최소한의 이론적인 전압은 1.229V로 계산될 수 있다. 하지만 이 과정에서 전극의 간극과 반응물이 금속표면(면적)과 어떻게 상호작용을 하는지에 따라 과전압이 달라지며 과전압에는 촉매활동에 기인한 활성화 과전압과 반응물과 생성물에서 기인한 농도 과전압, 그리고 셀의 ohmic 저항에 관련된 옴 과전압 등이 있다. 따라서 셀을 제작할 때는 이러한 과전압을 최소화 할 수 있는 전극의 간극과 면적 등을 고려한 최적의 인가전압을 선정해야한다. 또한 패러데이 법칙은 발생하거나 소멸하는 물질량은 전류량에 비례한다는 법칙으로서 수소의 발생량은 전류와도 밀접한 상관관계를 가지고 있다.

본 논문에서는 수소의 발생량과 효율을 향상시키기위해 상용 수산소혼합가스 발생기(20Nm³/h) 셀의 설계변경과 부가적인 장치에 대한 연구를 수행하였다.

상용 수산소혼합가스 발생기(20Nm³/h)의 셀(셀당 약 1Nm³/h)을 40Nm³/h의 수산소혼합가스가 발생되도록 셀을 나열하면 많은 공간을 차지하며, 철강재료 가공현장의 특성상 높이의 제약 보다는 가로, 세로의 공간이 부족하여 공장 상황에 맞도록 셀의 크기를 변경 하여 발생량을 증가 시키고 좀 더 콤팩트한 수산소 혼합가스 발생기를 개발하였다. Fig. 4은 극관의 설계 변경 도면을 보여주고 있다. 셀 외피와 관련 된 보완 설계는 반응 면적을 넓이기 위해 1.96Mpa 압력에 견디도록 설계 되어 있는 8극관을 10극관으로 변경하였으며 외피의 직경은 113.4mm에서 139.8mm로 확장 하였고, 길이를 2배로 하여 발생면적을 증가 시켜 셀당 수산소혼합가스의 발생량 증가시켰다. 또한 전류 흐름과 최적화된 전압은 발생효율 극대화와 전류 소모량을 최소화 할 수 있기 때문에 셀의 전류 흐름 및 변경 셀의 특성에 맞게 최적화된 전압을 선정 하였다. 이러한 설계변경 결과 기존 셀 대비 약 8% 정도의 유량이 증가 하는 것을 확인 하였으며 트랜스의 변경 및 전력제어 컨트롤에 의한 효율을 테스트를 진행하였다. Fig. 5는 최종 설계된 3D 조립도면을 보여주고 있다. 기존 개발된 콘트롤러에서 얻어진 데이터를 기반으로 SCR의 용량을 재선정 하고 제어 유닛을 재구성하여 고효율 셀의 전력 제어가 가능하도록 하였으며 과전류 감지 및 기타 정전압기능과 정전류 기능을 할 수하도록 제어 프로그램을 구성하였다. 또한 셀 당 온도와 KOH의 비중 그리고 전압과 전류의 조절을

통하여 시스템의 효율을 최대한 발휘 할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. Fig. 5는 전력제어 순서도를 보여주고 있다.

Fig. 6에서와 같이 노이즈가 포함된 센서의 신호를 아날로그 디지털 컨버터에서 필터링하고 디지털신호로 변환하며 변환된 디지털 값을 마이크로프로세서 내의 메모리영역에 저장하고 시스템 컨트롤러의 설정에 의해 디스플레이어로 출력하여 그 값을 다시 파워팩에 전송한다. 이렇게 셀에 필요한 전압 및 전류를 일정하게 제어함으로써 수산소 혼합가스가 발생하게 된다. 또한 전기분해시 셀의 내부온도가 상승하는데 온도가 너무 상승하게 되면 수산소 혼합가스의 발생량이 줄어들며 전력 제어 시에 영향을 주게 된다. 이러한 온도를 조절하기 위해 냉각장치를 사용하였으며 전기분해 촉매제(KOH) 순환에 사용되는 2마력 순환 펌프와 열교환기, SUS계열의 순환 배관을 사용하였다. Fig. 6은 순환 냉각부 및 배관설계 도면을 보여주고 있다.

수산소 혼합가스의 연소속도는 약 9m/sec로 LPG(4cm/sec)나 에틸렌가스에 비하여 연소 속도가 무척 빠르다. 수소소 혼합가스의 전체 압력이 낮고 내폭 하므로 LPG나 에틸렌가스처럼 폭발하는 사고는 없다. 하지만 철강재료 가공에서는 연속적인 작업이 필요하고 역화로 인한 발생기의 압력측정 센서류의 보호를 위해서 역화방지기는 중요하다. 현재 개발된 것은 약 20 Nm³/h 미만으로 설계 되었으며 철강재료 가공 시 평균 28~35 Nm³/h의 소모 노즐을 사용하므로 역화 방지기의 개발이 필요하다. 역화 방지기는 Fig. 8과 같이 체크밸브일체형으로 설계 하고 28~35Nm³/h의 수산소 혼합가스가 통과 하도록 설계 적용하였다. 현장에서 적용이 가능하게 최대한 슬립하게 제작하며 연결 토치와의 체결 성을 고려하여 제작하였다. Table 1에서는 기존의 발생기 제원과 대용량 수산소 혼합가스발생기 40 M-H(40Nm³/h)의 제원 및 변경되는 내용을 비교하여 나타내었다.

수산소 혼합가스 발생기의 정확한 효율을 계산하기 위해서는 이 시스템에 공급되는 총 에너지(공급되는 전기 에너지)에 대한 전자분해과정 이후 얻어지는 수소, 산소 혼합기의 엔탈피를 고려하여 계산하여야 한다. 이를 위해서는 시스템에 유입되는 전력량과 온도, 그리고 발생하는 수산소 혼합가스의 정확한 유량과 온도의 측정이 필요하다.

본 연구에서 수산소 혼합가스의 성분은 물을 전기분해해서 이론적으로 얻을 수 있는 수소 66.67%, 산소 33.33%로 하였다. 참고로 수산소 혼합가스의 정확한 성분은 한국표준과학연구원에 성분분석을 의뢰한 결과 불순물의 성분은 매우 미소하여 이론치와 거의 유사함을 확인하였다.

유입되는 전력량은 SCOPE Meter 199C/438을 이용하여 측정하였으며, 또한, 최종 발생하는 수산소 혼합가스의 유량은 F-133AC-HGD-99V와 VORTEX유량계 M22로 측정하였다.

수산소 혼합가스 발생기의 정격 운전시 시스템에 공급되는

전력량은 82kW~87kW정도에 이르며, 이때 수산소 혼합가스의 배출유량은 31,000L/h~32,500L/h가 됨을 상기 계측기를 통해 확인하였다. 단, 측정된 전력량과 수산소 혼합가스 배출유량은 물펌프의 작동 등 시스템의 동작과 연관이 되어 측정량과 수산소 혼합가스 배출유량은 물펌프의 작동 등 시스템의 동작과 연관이 되어 측정중에 완전한 정상상태(Steady State)가 되지 못하기 때문에 단일 값을 갖지 못함을 확인하였다. 따라서, 보다 정확한 효율을 측정하기 위해서는 장시간동안 지속적으로 전력량과 수산소 혼합가스의 유량을 측정하여 평균값을 이용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 따라서 보다 정확한 효율을 측정하기 위해서 1시간동안 연속적으로 전력량과 수산소 혼합가스의 유량을 측정하여 반복 평균값을 이용 하였다. 효율계산은 다음과 같다.

1) 시스템에 공급되는 최대 전력량은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$87.0[kW] = 87.0[kJ/s] = 20.813[kcal/s] \quad (5)$$

$$\therefore 1[kJ] = 1/1.18[kcal]$$

(시스템에 공급되는 사용전력의 최대치를 기준으로 산정)

2) 시스템에서 생성, 배출되는 수산소 혼합가스 최소유량은 식 (6)와 같이 31,000L/h (계측치)를 $8.611 \times 10^{-3} [m^3/s]$ 로 단위 환산하여 계산하였으며, 식 (7)과 같이 수산소 혼합가스 중에서 2/3의 비중을 차지하는 H₂의 유량을 계산하여 식 (8)과 같이

발열량을 계산하였다.

$$31,000[L/h] = 8.611[L/s] = 8.611 \times 10^{-3} [m^3/s] \quad (6)$$

$$H_2 \text{ 유량} = 8.611 \times 10^{-3} [m^3/s] \times \frac{2}{3} = 5.740 \times 10^{-3} [m^3/s] \quad (7)$$

(수소의 발열량은 3047[kcal/m³] =>25°C 기준)

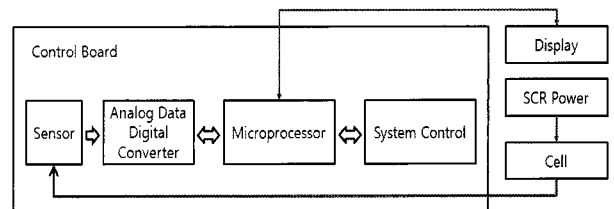
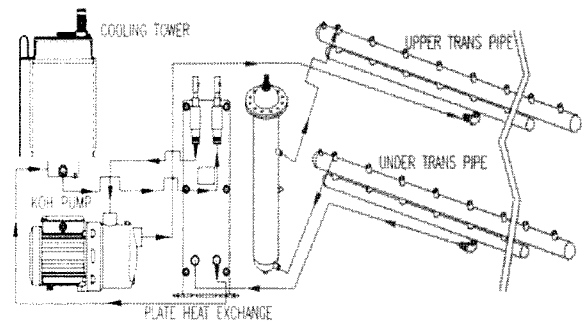
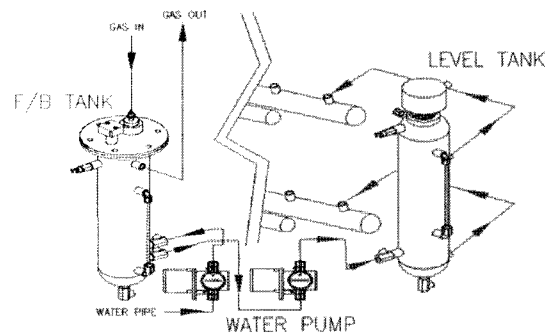


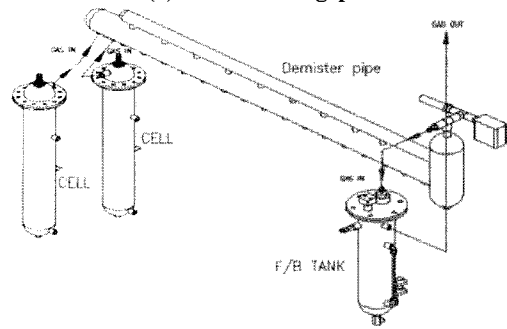
Fig. 6 Flow chart of power control



(a) Water cooling part



(b) Water feeding part



(c) Gas collector part

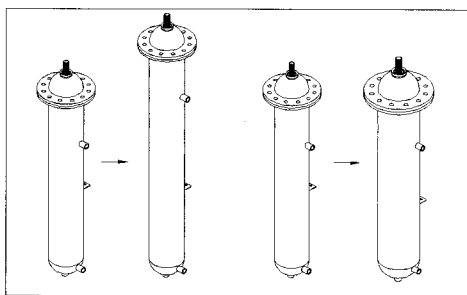


Fig. 4 Change of design for electrode tube

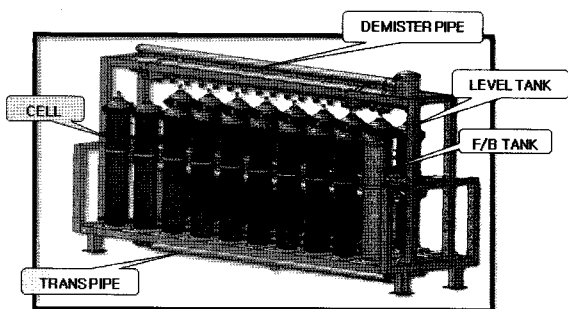


Fig. 5 Final design of cell assembly

Fig. 7 Water cooling and feeding part design

배출되는 수산소 혼합가스의 발열량 =
 $5.740 \times 10^{-3} [m^3/s] \times 3047 [kcal/m^3] = 17.487 [kcal/s]$ (8)

3) 정격 운전시 시스템 최소 효율
 전력량은 최대로 공급되지만 수산소 혼합가스 배출유량은 최소가 되는 순간의 시스템 효율을 의미한다.

$\eta = \frac{17.489 [kcal/s]}{20.813 [kcal/s]} = 0.840 = 84\%$ (9)

식 (9)에서 계산된 수산소 혼합가스 발생장치의 효율은 일반적으로 알려진 물을 전기분해하여 수소를 얻는 시스템의 효율 (60~75%)에 비하여 다소 높은 것으로 판단한다. 통상의 물 전기분해 시스템은 물을 전기분해하여 수소 및 산소가스를 분리 생산하는 것이 일반적이다. 그러나 수산소 혼합가스 발생기는 수소와 산소가 혼합된 상태로 배출되므로 수소-산소 분리공정에 필요한 동력이 절감되어 통상의 물 전기분해 시스템보다 효율이 다소 높게 산정되는 것으로 판단된다.

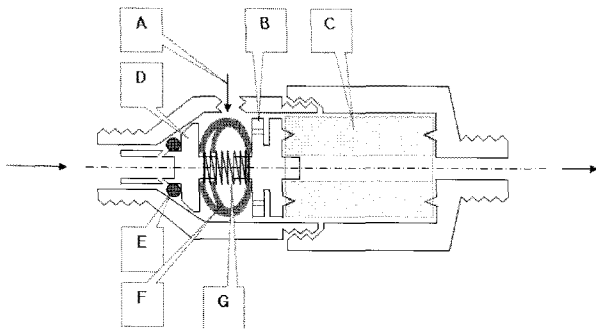


Fig. 8 Flame trap design

Table 1 Specification of hydrox gas generator(40M-H)

	Model	20M	40M-H	Notes
Specification	Size	2.3*1.8*3.6	2.6*1.5*2.7	40% down
	Weight	2500kg	2000kg	40% down
	Gas production	1m ³ /h	1.8m ³ /h	1.8 time Up
Function	Flow Control	Non	Motor operated flow control	-
	Flame trap	20m ³ /h	40m ³ /h	-
	Pressure monitoring	Non	Apply	-
	Extinguishing system	Non	Apply	-
	Water level controller	Non	Apply	-

4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 통하여 최종 수산소 혼합가스 발생기를 완성하였으며, 현장에서 사용함이 불편함이 없는 40m³/h의 용량으로 개발에 성공하였고, 효율은 84%로 측정되어 에너지 절약 측면에서도 만족할 만한 성과를 보여 주었다.

- (1) Cell 외피는 기존의 1.96Mpa의 압력에 견디도록 설계되어 있는 8극관을 10극관 하고 외피의 직경은 113.4mm에서 139.8mm로 확장 하였으며, 길이를 2배로 하여 cell당 수소발생량 증가시켰으며 기존 셀 대비 약 8% 정도의 유량이 증가 하는 것을 확인 하였다.
- (2) 전기분해시 셀의 내부 온도를 조절하기 위해 냉각장치를 사용하였으며 전기분해 촉매제(KOH) 순환에 사용되는 2마력 순환 PUMP와 열교환기, SUS계열의 순환 배관을 사용하여 순환 냉각부 및 배관설계 제작하였다.
- (3) 역화방지기는 사용 유량 28~35Nm³/h에 적합한 체크밸브 일체형으로 설계하고 현업에 적용이 가능하게 최대한 슬립하게 제작하여 연결 토치와의 체결성을 최대한 고려하였다.m³
- (4) 제작된 발생기의 최소 유량은 31Nm³/h, 효율은 84%로서 철강재료가공 현장에서 대량 가공이 가능하게 제작되어 현장의 적용성을 확대하고 현재 사용되고 있는 LPG 및 에틸렌 가스의 대체 재원으로 손색이 없을 것으로 사료된다.

후 기

“이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0023764)”

참 고 문 헌

- (1) Kim, H. G., and Kwac, L. K., 2010, “A Study on the Thermal Characteristics of LPG and Hydrox Gas Cutting,” *KSMTE*, Vol.19, No.2, pp. 301~305.
- (2) Kim, H. G., and Kwac, L. K., 2010, “A Study on the Characteristics of Mixed Combustion for Hydrox Gas,” *KSMTE*, Vol.19, No.2, pp. 203~234.
- (3) Min, S. Y. , Maken, S. , Park, J. W., Gaur, A., and Hyun, S., 2008, “Melting Treatment of Waste Asbestos using Mixture of Hydrogen and Oxygen Produced from Water Electrolysis,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol.25, No.2, pp. 323~328.

- (4) Kim, S.-N., 2002, *Brown Gas Heating Furnace Made of Mineral Stone*, US Patent: 6397834.
- (5) Kim, S.-N., 2004, *Brown Gas Combustion Apparatus and Heating System using the Same*, US Patent 20040013988A1.
- (6) Kim, S.-N., 2004, *Heating Apparatus using Thermal Reaction of Brown Gas*, US Patent: 6761558.
- (7) Brown, Y., 1978, *Arc-assisted Oxy/Hydrogen Welding*, US Patent: 4081656 .
- (8) Hyun, J. S., Park, J. W., Maken, S., Gaur, A., and Hyun, S., 2004, "Vitrification of Fly and Bottom Ashes from Municipal Solid Waste Incinerator using Brown's Gas", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol.10, No.3, pp. 361~367.
- (9) Kim, C, H, "Evaluation of Pseudo-scientific Feature of Brown Gas", *Korea Ministry of Science and Technology*, Reserch report No.A-6-1, pp.7~11.