

태양열복합발전 기술개발 동향 및 설계

김진수¹⁾, 강용혁²⁾, 이상남³⁾, 윤환기⁴⁾, 유창균⁵⁾, 김종규⁶⁾

Solar Thermal Hybrid Power Generation: technology review and system design

Jin-Soo Kim, Yong-Heack Kang, Sang-Nam Lee, Hwan-Ki Yun, Chang-Kyun Yu, Jong-Kyu Kim

Key words : solar thermal(태양열), power generation(발전), hybrid power generation(복합발전), solar concentration (태양열 집열)

Abstract : Research on the solar thermal hybrid power generation technology which uses solar thermal chemical reaction has been carried out in KIER. The research covers development of solar concentration system and solar reactor for methane steam reforming reaction. This paper introduces a brief review and prospects of oversea's researches in similar areas and KIER's research progresses up to now.

1. 태양열 복합발전

태양에너지는 일조시간 및 기후조건에 따른 자원 활용의 시간적 한계를 가지고 있다. 이러한 약점을 보완할 수 있는 방법은 크게 두 가지로, 첫째는 태양에너지를 일정한 저장매체를 통하여 저장하는 방법이고, 두 번째는 태양에너지와 천연 가스 등의 화석연료를 동시에 이용하는 복합시스템을 구축하는 것으로, 이러한 방식은 일조조건에 따라 화석연료의 사용량을 조절하여 최적의 조건에서 최대용량으로 운전하여 일정한 량을 전기를 지속적으로 생산할 수 있다.

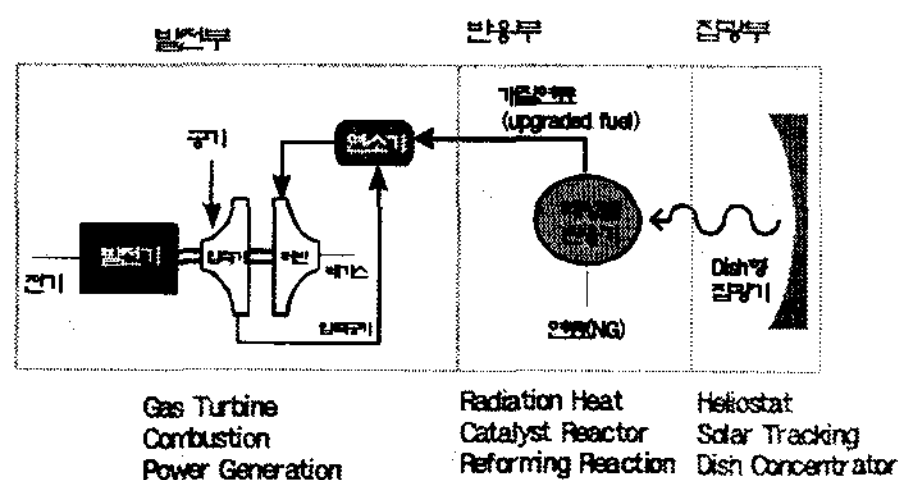


Fig. 1 화학반응 복합발전시스템 개념도

이러한 태양열 복합발전은 단순히 태양열원이 부족할 때에 추가적인 열을 화석연료로 공급하여 발전기를 가동하는 방법 이외에, 열화학적 방법을 통하여서도 구현이 가능하다. 즉, 메탄 등의 화석연료를 보다 열 함량이 높은 다른 화합물로 전

환시키기 위한 반응의 열원으로 태양열을 사용하여 upgraded fuel을 생산하여 이를 발전기에서 연료로 사용하는 것이다. 이러한 기술을 적용할 경우 가스터빈을 발전장치로 사용할 수 있으며 화학반응에 의해 생성된 새로운 연료를 일정한 용기에 저장하는 화학축열장치로서의 이용도 동시에 가능하게 된다. 또한 화석연료 개질의 주요 생성물인 수소를 분리하여 사용할 경우 신재생에너지를 이용한 수소생산이라는 매우 매력적인 분야로 응용이 가능해진다.

본 논문에서는 이러한 화학반응 복합발전과 유사한 국외의 대표적 연구과제의 수행결과를 살펴보고 및 향후 전망을 대해 간략히 소개하였으며, 현재 KIER(한국에너지기술연구원)에서 수행

- 1) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : jnskim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3549 Fax : (042)860-3739
- 2) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3518 Fax : (042)860-3739
- 3) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : snlee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3223 Fax : (042)860-3739
- 4) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : hkyoon@kier.re.kr
Tel : (042)860-3513 Fax : (042)860-3739
- 5) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : ckyu@kier.re.kr
Tel : (042)860-3515 Fax : (042)860-3739
- 6) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : rnokim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3477 Fax : (042)860-3739

중인 화학반응 복합발전(Fig. 1) 연구의 현황에 관하여 소개하였다.

2. 국외 기술개발 동향

2.1 SOLASYS Project

SOLASYS(Novel Solar Assisted Fuel Driven Power System) Project는 JOULE/THERMIE Framework하에서 EC의 지원으로 독일의 DLR, 이스라엘의 WIS 등이 참여하여 수행하였던 화석연료 수증기개질 연구과제이다. 개질 반응은 VRR(volumetric receiver reactor) 개질기를 이용하여 수행되었으며 집광태양열의 공급은 이스라엘 WIS의 집광장치를 이용하여 이루어졌다. 개질 반응에 사용된 화석연료는 현지에 NG공급 배관이 없는 관계로 LPG로 대신하여 이루어졌다.

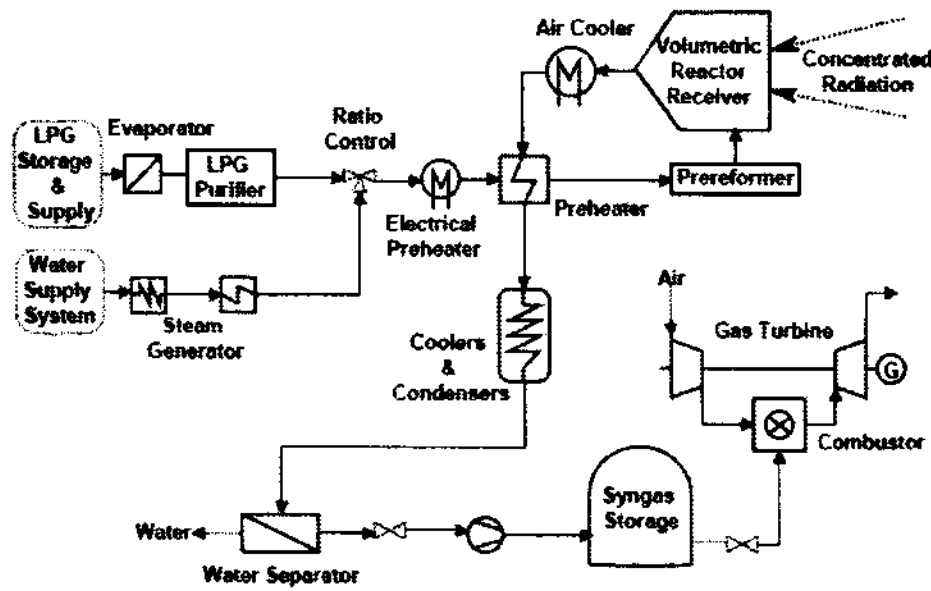


Fig. 2 SOLASYS Project 플랜트 구성도

2.1.1 Flow Process

SOLASYS Plant는 기존에 WIS Solar Tower에 있던 NG의 closed roof CO₂ 개질 반응 장치를 NG의 수증기개질을 위한 open roof로 수정·보완하여 구성한 장치이다. 다만 현지에 NG feedstock이 없는 관계로 반응을 위한 개질 원료는 NG 대신에 LPG를 사용하였다. 공급되는 LPG는 사전에 탈황 과정을 거친 후 superheated 수증기와 혼합되어 tower의 반응기로 전달된다. 반응기로 들어가는 LPG와 수증기 혼합물을 약 400°C로 예열과정을 거치고 태양열에 의한 전환과정을 거치기 전에 약 490°C에서 사전 개질반응을 거치게 된다. 집광된 태양열에 의해 개질반응이 수행되는 반응기는 약 400kW의 열량 공급이 가능하며, 0.12 kg h⁻¹의 반응물을 처리할 수 있으며, 약 825°C 및 10bar의 출구 조건의 생성물을 배출할 수 있다. 반응기로부터 배출된 생성물은 6단계의 냉각과정을 거쳐 약 60°C의 온도까지 냉각되며 잔존 수증기는 응축되어 분리된다.

생산된 최종 개질 가스는 압축기를 통하여 약 9m³의 저장탱크에 저장되며 저장된 가스는 Capston사의 60W급 마이크로 가스터빈을 이용하여 전력을 생산하는 데 사용된다. 이때 가스터빈에 공급되는 연료는 개질가스가 아닌 순수한 LPG

의 공급으로부터 개질가스의 비율이 점차로 높아진 연료가 순차적으로 공급되도록 운전되었다.

WIS의 Solar Tower에 구축된 SOLASYS 테스트 플랜트의 개요도는 Fig. 2와 같다.

2.1.2 개질 반응기 (Reformer)

SOLASYS Project에 사용된 개질 반응기는 독일의 DLR에 의하여 개발되었다. 반응기의 개구부 전면에는 집광효율을 높이기 위한 2차 집광 장치가 부착되었다. 개질반응기는 압력용기로 dome 형태의 quartz 윈도우로 외부와 분리되어 반응가스가 외부로 유출되지 않으면서 집광된 태양복사에너지가 반응기 내부로 유입될 수 있도록 설계되었다. 반응기 내부에는 concave형상의 volumetric receiver가 태양빛을 흡수하여 표면에 코팅된 촉매에 의한 반응이 수행되도록 하였다. 흡수기는 다공성 세라믹 foam을 지지체로 표면에 촉매를 코팅하였다. 그 밖의 단열 및 구조물 들은 세라믹 섬유를 이용하여 제작되었다. 개질 반응기의 형상은 Fig. 3과 같다.

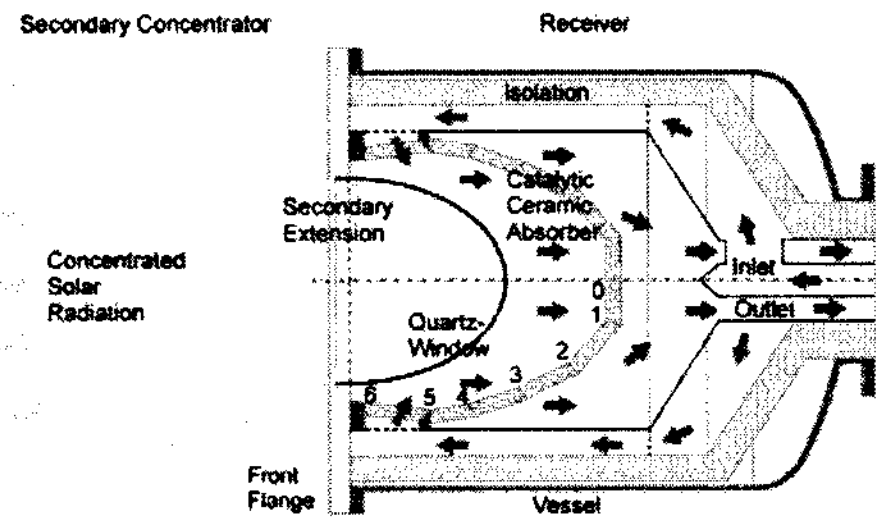


Fig. 3 DLR 개발 SOLASYS 태양열 화학반응기 개요도

2.1.3 Catalyst

개질반응기의 핵심은 촉매흡수기이다. 흡수의 역할은 크게 두 가지로, 한가지는 흡수기로 전달된 복사에너지를 흡수하여 열에너지로 전달하는 역할이며 두 번째는 반응을 수행하는 역할이다. 촉매흡수기는 세 가지 구성물로 이루어져 있는데 구조를 지지하는 matrix 물질, 보다 넓은 면적의 촉매 지지를 가능토록 표면적을 넓히는 washcoat, 그리고 촉매자체가 그것이다. SOLASYS 개질 반응기에서 사용된 촉매흡수기의 matrix 물질은 claybonded SiC로 이루어진 다공성 세라믹 foam으로 제조상의 편의를 위하여 평판형 제작 후 여러조각(각각 12조각으로 구성된 12개의 링과 1개의 disc)으로 돔 형상을 가지도록 배치하여 사용하였다. 사용된 SiC 세라믹 foam은 40mm 두께로 약 92%의 기공도와 10ppi의 기공크기를 가진다. 촉매지지를 위한 washcoat는 r-Al₂O₃가 dip 코팅 기법을 이용하여 적용되었으며 촉매로 사용된 Rh의 담지는 wet impregnation 기법을 이용하였다.

2.1.4 실험결과

DLR의 개질 반응기는 2001년 WIS의 개질 plant에 설치되었으며, 2002년 5월 첫 개질 반응이 수행되었다. Fig. 4는 각각 WIS의 tower집광설비와, 반응기 전면 개구부와 2차 집광장치로 집광이 이루어지고 있는 사진이다.

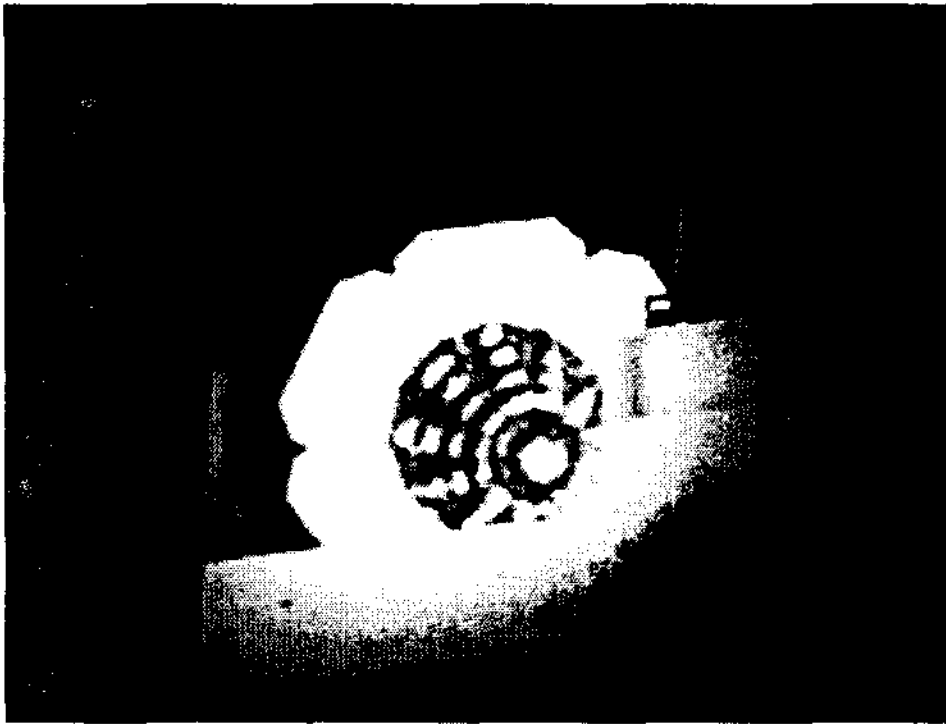


Fig. 4 이스라엘 WIS에 장착하여 집광 태양열에 의해 구동중인 SOLASYS 태양열 화학반응기 (개구부에 2차 집광기 포함)

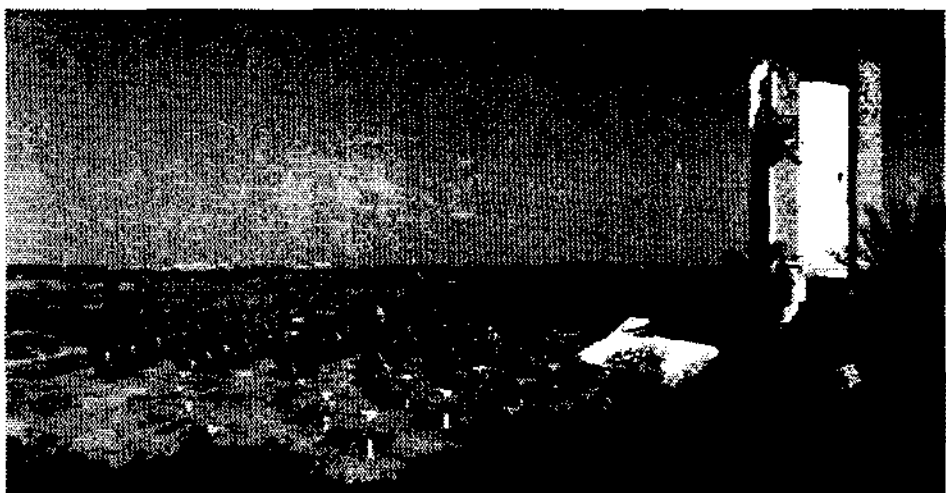


Fig. 5 이스라엘 WIS의 타워형 태양열 집광시스템

개질반응 실험이 이루어지고있는 동안 흡수된 태양열은 약 100~220kW 였으며 생성물인 합성가스는 700~765°C 온도 및 약 9bar의 압력으로 생성되었다. 이를 통하여 반응을 통하여 화학에너지로 저장된 태양에너지의 비율은 약 75%로 분석되었다. 또한 두 가지 서로 다른 압력조건에서의 정상상태 가동 성능에 관한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 SOLASYS 화학반응기 운전 결과

Pressure in reformer	bar,	4.9	8.0
Temperature of reforming	°C	716	710
Steam mass flow	kg/h	100	250
LPG mass flow	kg/h	33	82
Total absorbed power	kW	100.6 (99.9)	220.3 (211.7)
CH ₄ -conversion	%	72.0 (73.3)	61.5 (59.0)
Absorbed chemical power	kW	75.4	154.8
Calorific upgrading	%	18.4	14.4
Fuel saving	%	15.6	12.6

Table 1을 통하여 알수 있는바와 같이 SOLASYS 개질 반응기에 의한 실험결과, 4.9bar의 압력조건

의 경우 약 72%의 메탄 전환율을 유지하며 약 18%의 열함량 증가 및 약 16%의 연료절약 효과가 있음이 확인되었다. 이와 같은 반응은 수소생산의 관점에서 볼 경우, 추가적인 수소생산 반응(수성가스반응)을 추가하면 기존의 상업적 방법과 비교하여 볼 때 약 40%에 이르는 연료절약 효과가 있는 것으로 분석되었다.

2.2 SOLREF Project

SOLREF(Solar Steam Reforming) project는 2004년부터 2007년까지 수행되는 SOLASYS project의 후속 연구사업으로 화석연료(NG)로부터 태양열을 이용한 수소생산을 목적으로 SOLASYS project 개발기술을 보다 진보시켜 상용화 전 단계까지 접근시키는 것을 목표로 하고 있다. SOLREF project는 독일 DLR을 비롯하여 9개의 연구기관 및 기업이 공동으로 참여하는 연구과제로 400kW급 태양열 개질 반응기를 개발하고 다양한 촉매반응시스템을 시험하고 검증하며 시스템의 대형화를 위한 운전전략을 수립 및 평가하는 것을 주요 연구내용으로 하고 있다. 또한 연구과제의 수행결과를 이용하여 향후 이탈리아 남부에 약 1MW급 플랜트를 건설하기 위한 기초설계를 얻고자 목표하고 있으며, 나아가 약 50MW급 상용화 플랜트의 건설을 위한 개념설계를 계획하고 있다.

SOLREF project의 핵심은 태양열 반응시스템의 가동을 수소생산의 관점에서 접근한다는 것으로, 이전의 연구개발 결과와 비교하여 보다 높은 활성과 보다 높은, 보다 태양에너지 흡수율을 유지하면서도 가격경쟁력을 지니는 촉매반응시스템을 개발하는 것에 주력하고 있다.

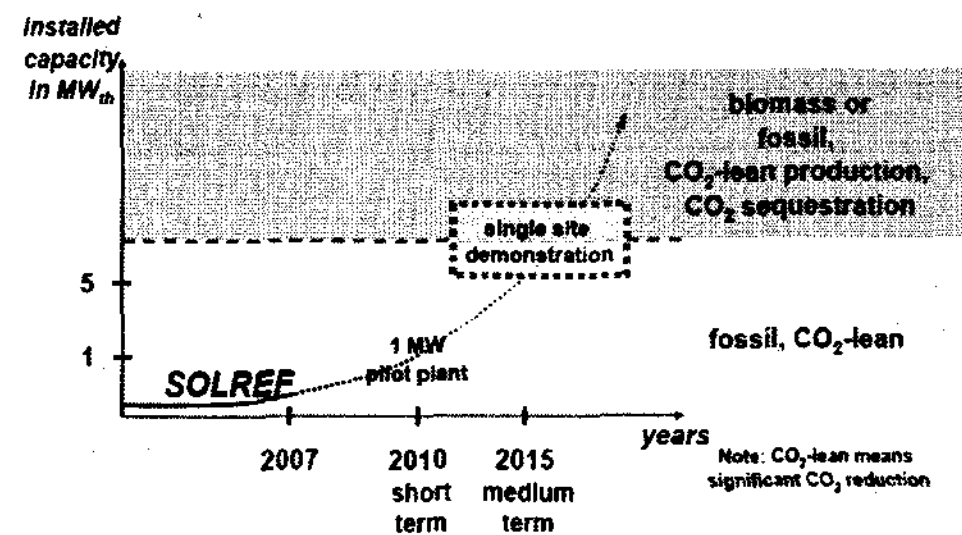


Fig. 6 SOLREF 기술개발의 향후 전망

SOLREF project의 연구그룹이 지향하고 있는 태양열 개질반응 플랜트의 향후 전망에 관한 예측은 Fig. 6과 같다.

3. 국내(KIER) 연구개발 현황

3.1 집광시스템 구축

태양열 화학반응 복합발전 연구과제를 위한 국내(KIER)의 연구를 위해 구축된 집광시스템은

Fig. 2과 같다. 집광장치는 약 90m²의 반사면적을 가지는 태양추적 heliostat와 약 50m²의 집광면적을 가지는 고정형 dish concentrator로 구성되어 있다. heliostat는 태양의 위치에 따라 각도를 달리하여 dish형 concentrator로 항상 일정한 수평광을 반사시킬 수 있도록 제어되며, dish형 concentrator는 전면의 초점(초점거리 약 5M)에 위치한 반응기에 빛을 모아 고 flux의 태양빛을 반응시스템에 전달토록 하는 집광장치이다. 구축된 집광장치는 계절과 시간에 따라 최고 약 35kW의 열원(일사량 1kW/m²기준)을 태양에너지로부터 공급할 수 있다.



Fig. 7 KIER 복합발전 시스템을 위한 집광장치

3.2 반응시스템 개발

메탄개질 화학반응을 위해 1차로 제작된 반응기는 형상은 Fig. 8과 같다. 반응기는 전면에 2차 집광을 위한 CPC가 장착되어 있으며 반응기 내부와 외부는 Disc형태의 quartz 윈도우로 분리되어 있다. 반응기 내부는 2중관 형태로 제작되어 바깥관과 안쪽 사이의 유로로 메탄과 수증기 혼합물이 유입되어 반응기 전면으로 이동토록 하였으며 반응기 전면에서 태양복사에너지에 노출된 혼합물은, 내부관에 장착된 촉매층을 통과하면서 흡수되는 태양열에 의한 반응이 일어나도록 설계되었다.

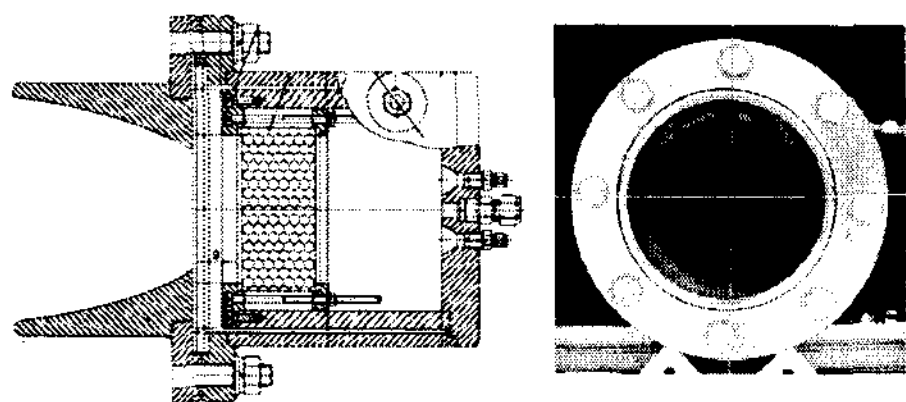


Fig. 8 KIER 복합발전 시스템을 화학반응기 시제품 (2차집광기 포함)

화학반응을 위해 사용된 촉매는 금속 honeycomb 구조로 Fe-Cr-Al의 지지체 위에 활성물질로 Pt-Pd가 코팅되었다. 반응기 내부에 장착된 금속

honeycomb 촉매의 형상은 Fig. 9와 같다.

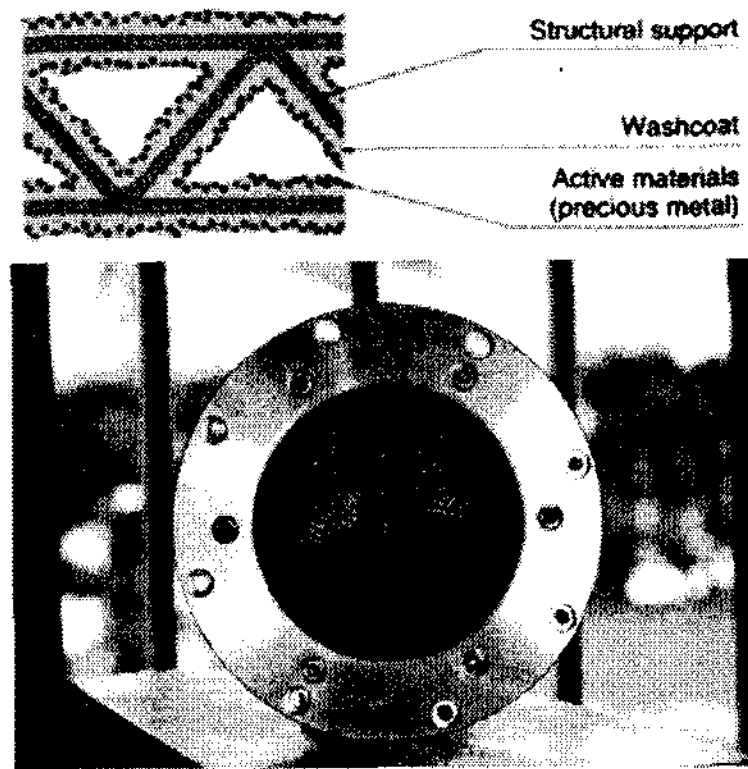


Fig. 9 KIER의 화학반응용 촉매

4. 향후계획

화학반응 복합발전을 목표로 하는 기술개발에서 태양열에 의한 메탄의 수증기 개질을 위한 반응시스템의 개발은 가장 중요한 핵심기술 중 하나이다. 나아가 이러한 개질 반응시스템의 개발의 성패는 탄소침적, sintering, spinel 등의 촉매활성 저해 요소들을 효과적으로 막을 수 있는 촉매반응시스템을 개발하는 것에 달려있다. 따라서 현재 1차 시제품으로 개발한 촉매반응시스템을 운전하고 반응성능 및 운전에 따른 촉매활성 유지에 관한 실험적 관찰이 우선적으로 이루어져야하며, 이를 통해 발견되는 문제점들을 보완하여 태양열 개질 반응기를 보완 및 최적화되어야 한다.

향후 정상상태를 유지하며 운전 가능한 화학반응시스템이 완성되면, 생산된 합성가스를 단계적으로 이용하여 마이크로 터빈을 구동, 태양열 화학반응을 이용한 최종적인 전기생산 과정이 연계될 예정이며, 이를 위한 터빈 발전시스템의 구축은 별도로 진행되고 있다.

References

- [1] Tamme R., Buck R., Epstein M., Fisher. U., Sugarmen C., 2001 "Solar Upgrading of Fuels for Generation of Electricity" J. of Solar Energy Eng. vol. 123, pp160-163.
- [2] IEA SolarPACES Annual Report 2002, 2003, 2004.
- [3] 김진수, 강용혁, 이상남, 유환기, 유창균, 2005, "태양열 복합발전기술의 개요와 국내 연구개발 현황" pp412-415