

황-요오드 수소 제조 공정에서 저온 분젠 반응의 상 분리 특성

한상진*, 이광진*, 김효섭*, 김영호*[†], 박주식**, 배기광**, 이종규***

*충남대학교 정밀응용화학과, **한국에너지기술연구원, ***포항산업과학연구원

Phase Separation Characteristics of Low Temperature Bunsen Reactions In Sulfur-Iodine Hydrogen Production Process

SANGJIN HAN*, KWANGJIN LEE*, HYOSUB KIM*, YOUNGHO KIM*[†],
CHUSIK PARK**, KIKWANG BAE**, JONGGYU LEE***

*Department of Fine Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University,
220 Gung-dong Yuseong-gu Daejeon 305-764, Korea

**Hydrogen Energy Research Group, Korea Institute of Energy Research 71-2 Jang-dong
Yuseon-gu Daejeon 305-343, Korea

***Energy & Resources Research Department, Research Institute of Industrial Science & Technology,
San32, Hyoja-dong, Nam-gu Pohang 790-330, Korea

ABSTRACT

The Sulfur-Iodine(SI) thermochemical hydrogen production process consists of three sections, which are so called the Bunsen reaction section, the H₂SO₄ decomposition section and the HI decomposition section. In order to identify the phase separation characteristics in the reaction conditions with the high solubility of SO₂, we conducted the Bunsen reaction at the low temperatures, ranging from 283 to 298K, with the I₂/H₂O molar ratios of 2.5/16.0 and 3.5/16.0. The molar ratios of HI/H₂SO₄ products obtained from low temperature Bunsen reactions were ca. 2, indicating that there were no side reactions. The amount of reacted SO₂ was increased with decreasing the temperature, while the amounts of unreacted I₂ and H₂O were decreased. In the phase separation of the products, the amount of a H₂SO₄ impurity in HI_x phase was increased with decreasing the temperature, though the temperature has little affected on HI and I₂ impurities in H₂SO₄ phase.

KEY WORDS : Sulfur-Iodine cycle(SI 사이클), Hydrogen production(수소 제조), Bunsen reaction(분젠 반응), Phase separation(상 분리)

1. 서 론

화석 연료는 연소 시 각종 공해 물질과 지구온난

화현상의 주원인인 이산화탄소를 다량 배출하는 문제점이 있다. 이로 인해 화석 연료를 대체할 수 있는 에너지 개발의 필요성이 대두되고 있다. 대체에너지 중 수소는 현재의 거의 모든 에너지 분야에 이용이 가능하며, 물로부터 제조될 경우 환경오염 물질

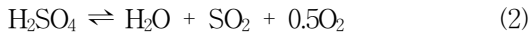
[†]Corresponding author : yh_kim@cnu.ac.kr

[접수일 : 2011.7.12수정일 : 2011.8.18 게재확정일 : 2011.8.22]

을 배출하지 않는 장점을 갖는다. 이에 따라 전 세계적으로 물로부터 수소를 제조하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Funk와 Reinstrom¹⁾에 의해 제안된 열화학 물 분해 수소 제조법은 물로부터 수소를 제조하는 방법 중 하나이다. 이는 여러 단계의 화학 반응들을 조합하여 물을 분해하고자 하는 것으로서 물의 직접 열 분해 온도보다 낮은 온도에서 수소를 제조하는 방법이다. Brown 등²⁾은 그동안 제안되거나 연구된 수백의 열화학 사이클들을 조사했으며, 실현 가능성이 있는 25개의 열화학 사이클을 선별하여 보고한 바 있다. 이들 중에서도 가장 많은 연구가 이루어졌으며 가장 유망한 것으로 알려진 열화학 물 분해 수소 제조법은 황-요오드(SI; sulfur-iodine) 열화학 수소 제조 공정이다^{3,4)}.

SI 공정은 GA(general atomic)사에 의해 처음 제안되어 연구되었으며, 다음과 같이 3단계의 화학 반응식으로 구성되어 있다.



식 (1)은 분젠(Bunsen) 반응으로 SO₂, I₂ 및 H₂O가 반응하여 H₂SO₄와 HI가 생성된다. 이때 생성물들은 과량의 I₂ 존재 하에서 밀도 차이에 의해 2-액상으로 분리된다. H₂SO₄는 황산 분해 단계인 식 (2)에 의해 H₂O, SO₂ 및 O₂로 분해되고 HI는 요오드화 수소 분해 단계인 식 (3)에 의해 H₂와 I₂로 분해된다. 전체 반응을 통해서 H₂O는 H₂와 O₂로 분해되며, 이외의 화합물들은 SI 폐사이클 공정 내에서 재순환한다.

SI 공정은 초고온 가스료(VHTR; very high temperature reactor)와 연계할 수 있는 공정으로서 JAEA(Japan atomic energy agency)에서 bench 규모의 폐-사이클 연속 운전을 성공함에 따라 실현 가능성이 큰 기술로 평가되고 있다⁵⁻⁸⁾. 국내의 경우에도 최근 SI 공정의 연속운전을 목적으로 각 단위 반

응 부분인 분젠 반응, HI 분해 반응 및 황산 분해 반응 부분에서의 효율 향상을 위한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다⁹⁻²⁴⁾. 본 연구와 관련된 분젠 반응 부분의 경우, 특히 I₂가 석출되지 않는 범위 하에서 2-액상 분리가 일어나야 하며, 각 상내 불순물이 최소화되어야 한다. 이에 따라 본 연구실에서는 분젠 반응의 운전 가능 범위, 불순물과 관련된 최적의 운전 조건, 반응 온도와 I₂의 양에 따른 부반응 제어 방법 등을 포함한 다양한 공정 연구 결과들을 보고한 바 있다⁹⁻¹⁶⁾.

한편, Goldstein 등⁸⁾은 분젠 반응 단계의 최적 조건을 2bar로 예측했으며, GA사의 Brown 등²⁵⁾도 SI 공정 내 운전 조건을 가압 조건이 유리한 것으로 보고하고 있다. 가압의 분젠 반응 조건의 경우 SO₂ 용해도가 상대적으로 증가할 것이며, 이로 인해 반응의 평형 전환율 혹은 반응 속도가 영향 받을 것으로 예상할 수 있을 것이다. 그러나 이 경우 반응 생성물의 분석이 어려워 아직까지 전환율 및 상 분리 특성이 보고된 바 없다.

따라서 우리는 SO₂의 용해도가 높은 조건에서의 현상을 규명하기 위한 다른 방법의 하나로 용해도가 급격히 증가하는 상온 이하의 조건에서 분젠 반응을 수행하고자 했다. 이때 반응 온도는 283, 290 및 298K로 고정했으며, I₂/H₂O의 몰 비는 2.5/16.0과 3.5/16.0으로 고정했다. 이때 우리는 반응 후 생성물 내에 SO₂가 상대적으로 높게 존재할 수 있는 반응 조건에서 SO₂를 제외한 생성물 상들의 분석과 상 분리 특성을 규명하는 데 초점을 두었다.

2. 실험

Fig. 1은 분젠 반응 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 350mL 부피의 반응기는 관찰이 용이하도록 유리로 구성했고 유리 이외의 부분은 생성물에 의한 장치 부식을 방지하기 위해 테프론으로 코팅 처리했다. 또한 기계적 교반 방식으로 과량의 I₂가 빠르게 용해되도록 했다. 반응기의 온도는 항온조로부터 일정한 온도로 조절된 물이 반응기 외부를 순환할 수 있도록 하여 일정하게 유지시켰다.

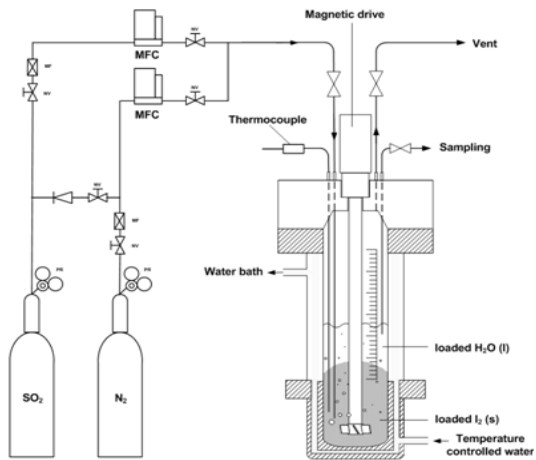


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for the Bunsen reaction

반응을 위해 H₂O(초순수) 50g과 H₂O를 기준으로 I₂/H₂O의 몰 비가 2.5/16.0 또는 3.5/16.0로 계산된 I₂ (99wt%, Junsei)를 반응기에 공급하고 250rpm으로 교반했다. 반응기 내부의 온도가 원하는 반응 온도에 도달했을 때, SO₂(99.95vol%)를 110mL/min의 유속으로 계속적으로 공급하며 340분 동안 충분히 반응시켰다.

반응 종료 후 생성된 용액을 메스실린더로 옮겨 2-액상 분리 및 I₂ 석출 유무를 확인했다. 2-액상 분리가 확인된 경우 피펫을 이용해 각 상을 분리하고 무게를 측정 후 조성 및 밀도 분석을 수행했다. 전체 생성물의 양과 조성은 각 상의 양과 조성의 합으로 나타났다. 반응 생성물 내 I₂가 분석되지 않을 경우 N₂를 공급하며 탈기를 진행했다.

HI와 I₂의 조성은 각각 AgNO₃ 용액과 Na₂S₂O₃ 용액으로 I⁻ 및 I₂를 적정하여 결정했고 H₂SO₄의 조성은 NaOH 용액으로 H⁺를 적정한 후 I⁻의 적정 값을 제외하여 결정했다. H₂O의 조성은 전체 시료의 무게에 대한 물질 수지를 이용하여 결정했다. 적정을 위한 장치로는 자동 전위차 적정기(automelectrode; KEM C-171, redox titration electrode; KEM C-272 및 precipitation titration electrode; KEM C-373)가 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분젠 반응의 역반응을 통한 조성 예측

283 및 290K 조건의 전체적인 실험에서 반응 후 얻어진 생성물 내 I₂가 분석되지 않는 것을 확인했다. 그 이유는 반응 후 생성물 용액 내 잔류하는 SO₂로 인해 I₂ 분석을 위해 H₂O로 희석하는 과정에서 분젠 반응이 더 진행되었기 때문이다. 그러므로 반응 종료 후 생성물 용액 내 존재하는 SO₂의 제거가 필수적으로 요구되었다. 따라서 우리는 SO₂를 제거할 목적으로 반응 후 일정 유속의 N₂를 이용하여 탈기하는 방법을 고려했다. 이때 발생된 또 하나의 문제점은 N₂로 탈기한 시간에 비례하여 생성물의 조성이 변하는 것이었다. 그 이유는 N₂ 탈기 과정에서 식 (4)와 같은 생성물들의 역반응이 일부 진행되었기 때문이다. 이때 생성물의 조성이 일정 유속의 N₂ 탈기 시간과 거의 비례한다는 결과를 기초로 분젠 반응계 내 SO₂를 제외한 생성물들의 분석이 가능할 것으로 판단되었다.

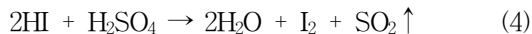


Fig. 2는 290K 및 I₂/H₂O의 몰 비가 3.5/16.0인 조건에서 N₂의 탈기 시간에 따른 전체상 내 조성과의 관계를 통해 예측된 탈기 전 조성을 나타낸 것이다. N₂

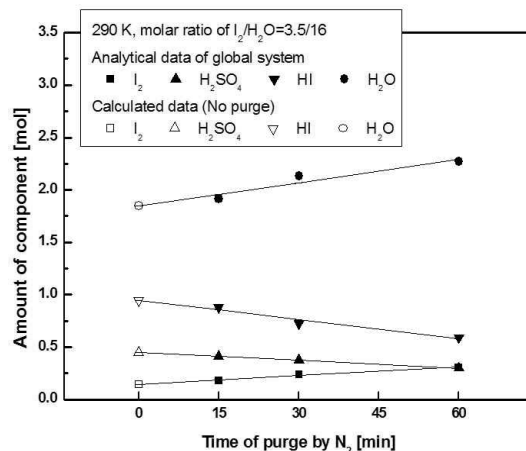


Fig. 2 Composition of global system with N₂ purge time

의 탈기 시간은 15, 30 및 60분으로 결정했다.

Fig. 2에 의하면 분젠 반응의 반응물인 I₂와 H₂O의 양(mol)은 탈기 시간이 증가함에 따라 각각 0.18 및 1.91에서 0.31 및 2.27로 증가되었다. 반면에 분젠 반응의 생성물인 HI와 H₂SO₄의 양(mol)은 각각 0.88 및 0.42에서 0.59 및 0.30으로 감소되었다. 이를 바탕으로 최소자승법을 이용하여 탈기가 진행되지 않은 생성물의 조성을 예측했다. 그 결과 I₂ 및 H₂O의 양(mol)은 각각 0.14 및 1.85이었고 HI 및 H₂SO₄의 양(mol)은 각각 0.95 및 0.45이었다. 이 방법에 의해 얻어진 283 및 290K에서의 전체상과 각 상내 조성 값들을 결과 값으로 사용했다. 최소자승법을 이용하여 구한 결과 값들과 실험값들은 모두 ±5%의 오차 범위 이내에 있었다.

3.2 SO₂ 용해도 효과

Fig. 3은 온도 및 I₂/H₂O의 몰 비 변화에 따른 생성 용액의 전체 조성을 SO₂-H₂O-I₂ 분젠 반응계로 나타낸 것이다. Fig. 3에 의하면 반응에 참여하는 SO₂ 몰 분율은 I₂/H₂O의 몰 비가 3.5/16.0인 조건에서 298, 290 및 283K로 온도가 감소함에 따라 각각 0.10, 0.12 및 0.13으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 SO₂ 몰 분율은 I₂/H₂O 몰 비의 변화에 대하여 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 온도가 감

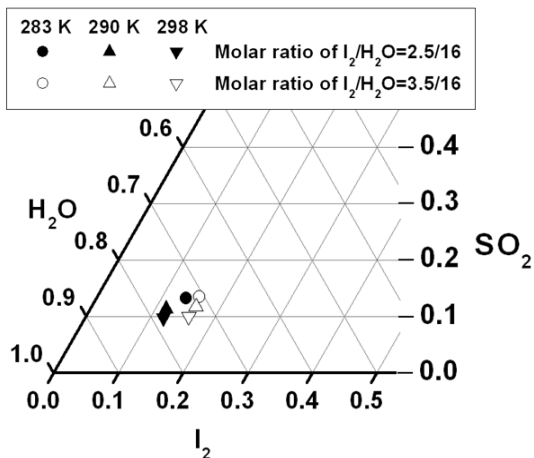


Fig. 3 Conditions of SO₂-H₂O-I₂ via Bunsen reaction

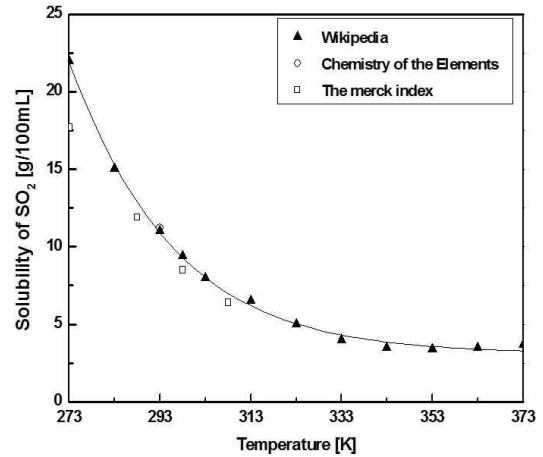


Fig. 4 Solubility of SO₂

소함에 따라 반응에 참여하는 SO₂의 양이 증가한다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 참고문헌⁽²⁶⁻²⁸⁾을 바탕으로 H₂O에 대한 SO₂의 용해도를 나타낸 것이다. SO₂의 용해도는 298, 290 및 283K로 온도가 감소함에 따라 각각 9.40g/100mL, 12.00g/100mL, 및 15.00g/100mL로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이를 기초로 온도 감소에 따른 SO₂의 용해도 증가가 분젠 반응에서 SO₂의 소모량 증가에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 즉, SO₂ 용해도 증가는 평형 전환율의 증가(반응에 참여하는 I₂ 및 H₂O의 양과 생성되는 H₂SO₄ 및 HI의 양의 증가)에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

3.3 온도에 따른 조성 변화

Fig. 5는 분젠 반응 생성물 내에 존재하는 I₂ 및 H₂O 성분의 양적 변화를 관찰하기 위해 각각 I₂/H₂SO₄ 몰 비 및 H₂O/H₂SO₄ 몰 비로 나타낸 것이다. Fig. 5에 의하면 3.5/16.0의 I₂/H₂O 몰 비 조건에서 298, 290 및 283K로 온도가 감소함에 따라 전체계의 I₂/H₂SO₄ 몰 비는 각각 0.55, 0.32 및 0.11로 감소되었으며 H₂O/H₂SO₄ 몰 비는 각각 5.36, 4.08 및 3.16으로 감소되었다. 그 이유는 앞에서 언급된 바와 같이 온도 감소에 따라 SO₂의 용해도가 증가하였으며, 이로 인해 평형 전환율의 증가와 함께 상대적으

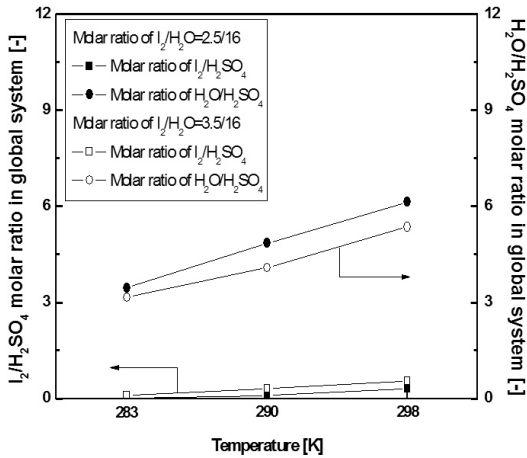


Fig. 5 Effect of the I₂/H₂O molar ratio and temperature on the I₂/H₂SO₄ and H₂O/H₂SO₄ molar ratio in global system

로 반응하지 않은 I₂ 및 H₂O의 양이 감소했기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 동일한 온도에서 I₂/H₂O의 몰 비가 증가한 경우 H₂O/H₂SO₄ 몰 비는 상대적으로 낮은 값을 나타냈다. 이는 반응물 내 I₂/H₂O의 몰 비가 증가하여 용액내 I₂의 양이 많을 때 식 (1)의 분해 반응의 평형 전환율은 더 증가한다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 온도 및 I₂/H₂O의 몰 비 변화에 따른 전

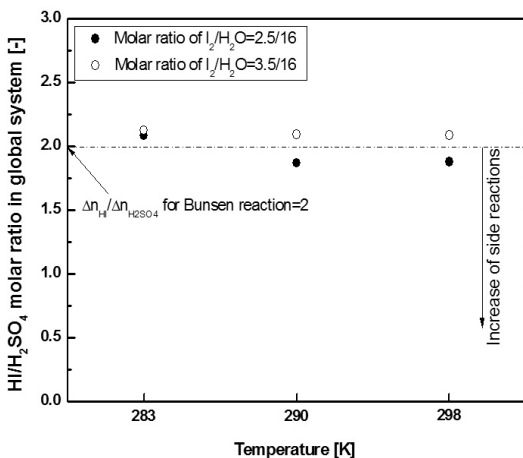


Fig. 6 HI/H₂SO₄ production molar ratio in global system on the I₂/H₂O molar ratio and temperature

체계의 HI/H₂SO₄ 생성 비 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6에 의하면 전체적인 온도 범위에서 HI/H₂SO₄ 몰 비는 I₂/H₂O의 몰 비에 관계없이 약 2의 값을 나타냈다. 상온 이상에서의 분해 반응을 연구했던 이전 연구 결과에 의하면, I₂/H₂O의 몰 비 감소에 의해 반응 용액내 I₂의 양을 포화점 이하로 감소시킬 경우 HI/H₂SO₄의 몰 비는 2 이하의 값을 나타냈다. 그 이유는 분해 반응과 동시에 발생하는 부 반응으로 인해 원하지 않는 황(S) 또는 황화수소(H₂S) 같은 부산물이 생성되기 때문인 것으로 보고하고 있다¹³⁾. 본 연구에서 수행된 상온 이하의 저온 분해 반응 조건의 경우 반응 용액내 I₂의 양이 포화점 이하로 다소 감소했을지라도 약 2의 HI/H₂SO₄ 생성물 몰 비를 나타낸 것은 부반응이 거의 없다는 것을 의미한다. 그러므로 상온이하의 저온으로 반응 온도를 감소시키는 방법은 부반응을 억제할 수 있는 중요한 방법 중의 하나임을 확인할 수 있었다.

3.4 각 상의 불순물

불순물은 부반응 및 공정 효율 저하의 원인이 되므로 SI 공정의 효율 증가를 위해서는 불순물의 최소화가 요구된다. Fig. 7은 각 상의 불순물(H₂SO₄ 상내 HI 및 I₂ 그리고 HI_x 상내 H₂SO₄)을 각 상의

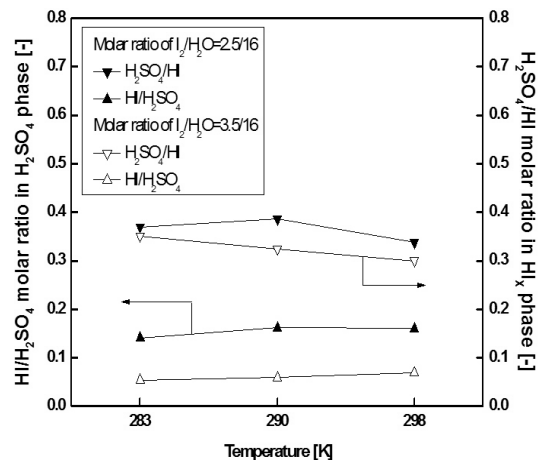


Fig. 7 Effects of the I₂/H₂O molar ratio and temperature on the impurities in each phase

주요 성분(H_2SO_4 상의 H_2SO_4 그리고 HI_x 상의 HI) 을 기준으로 나타낸 것이다.

Fig. 7에 의하면 전체적인 I_2/H_2O 몰 비 조건에서 온도가 감소함에 따라 HI_x 상내 불순물의 양은 약간 증가하였으나, H_2SO_4 상내 불순물의 양은 온도 변화에 관계없이 거의 일정했다. 또한, 동일한 온도 조건에서 I_2/H_2O 의 몰 비가 증가함에 따라 각 상내 불순물은 감소했다. 이를 통해 HI_x 상내 불순물의 양은 온도가 감소함에 따라 증가된 반면, H_2SO_4 상내 불순물의 양은 온도에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 I_2/H_2O 의 몰 비를 증가시킴에 따라 감소되는 것을 확인했다.

Fig. 8은 온도 및 I_2/H_2O 의 몰 비에 따른 각 상내 존재하는 I_2 를 나타낸 것이다. HI_x 상내 I_2 는 온도가 감소함에 따라 감소하였으나, H_2SO_4 상내 I_2 는 전체적인 조건에서 관찰할 수 없었다. 이는 반응 후 미반응된 I_2 가 대부분 HI_x 상내에 존재한다는 것을 의미하며, 반응 온도 감소에 따른 SO_2 의 용해도 증가로 인해 반응에 참여한 I_2 가 상대적으로 많다는 것을 지시한다.

한편, Fig. 7의 온도 및 I_2/H_2O 의 몰 비에 따른 HI_x 상내 불순물은 Fig. 8에 나타난 HI_x 상내 용해되는 I_2 의 양과 관계가 있다. 온도가 증가함에 따라 상대적으로 미반응된 I_2 의 양이 증가하며 이로 인해

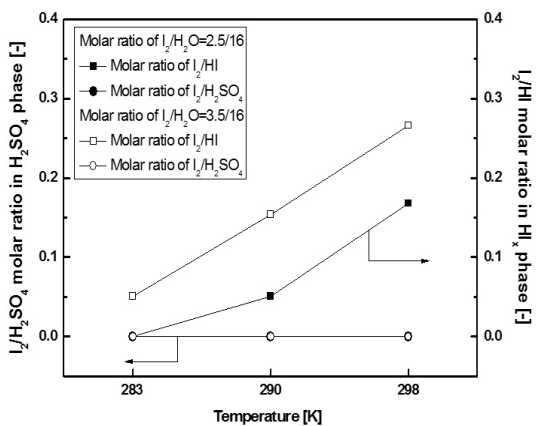


Fig. 8 Effects of the I_2/H_2O molar ratio and temperature on the I_2 in each phase

HI_x 상내 I_2/HI 몰 비가 증가하여 고밀도의 HI_x 상을 형성한다. 형성된 고밀도의 HI_x 상은 H_2SO_4 상과 밀도 차이를 증가시킴으로서 더 우수한 상 분리를 나타낸다. 결론적으로 저온에서의 분젠 반응은 반응에 참여하는 SO_2 의 양을 증가시키는 장점이 있으나, 미시적으로 HI_x 상내 용해되는 I_2 의 양이 적어 아직까지 상 분리 특성을 감소시키는 단점이 존재한다.

4. 결 론

본 연구는 SI 열화학 수소 제조 공정의 저온 분젠 반응으로부터 얻어진 생성물들의 상 분리 특성을 규명하기 위해 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반응 온도가 감소함에 따라 반응에 참여하는 SO_2 의 소모량은 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 SO_2 의 용해도 증가가 원인인 것으로 판단되었으며, 분젠 반응의 평형 전환율이 증가되었음을 의미한다.
- 2) 전체적인 저온의 온도 범위에서 전체계의 HI/H_2SO_4 몰 비는 I_2/H_2O 의 몰 비에 관계없이 약 2의 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 이와 같이 저온의 반응 조건에서 부반응은 거의 일어나지 않는다는 것이 확인되었다.
- 3) 저온에서의 분젠 반응은 상대적으로 반응 후 존재하는 I_2 및 H_2O 의 양을 감소시키는데 효과가 있는 것을 발견했다. 그러나 상 분리 후 HI_x 상내에 존재하는 불순물인 H_2SO_4 의 양이 상대적으로 이전의 연구^{11,12)}보다 높은 단점이 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 “원자력수소 핵심기술개발사업”의 일환으로 추진된 것이며 과학기술부의 재정지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. E. Funk, and R. M. Reinstrom, "Energy Requirements in the Production of Hydrogen from Water", *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Develop.*, Vol. 5, No. 3, 1966, p. 336.
- 2) L. C. Brown, J. F. Funk, and S. K. Showalter, "High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power", GA-A 23451, 2000.
- 3) J. H. Norman, G. E. Besenbruch, and D. R. O'keefe, "Thermochemical water-splitting for hydrogen production", GRI-80/0105, Gas Research Institute, 1981.
- 4) J. H. Norman, G. E. Besenbruch, L. C. Brown, D. R. O'Keefe, and C. L. Allen, "Thermochemical water-splitting cycle: Bench-scale investigations, and process engineering", GA-A16713, 1982.
- 5) K. Onuki, H. Nakajima, I. Ioka, M. Futakawa, and S. Shimizu, "IS process for thermochemical hydrogen production", *JAERI Review* 94-006, 1994.
- 6) S. Kasahara, G. J. Hwang, H. Nakajima, H. S. Choi, K. Onuki, and M. Nomura, "Effects of process parameters of the IS process on total thermal efficiency to produce hydrogen from water", *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 36, No. 7, 2003, p. 887.
- 7) S. Kasahara, S. Kubo, K. Onuki, and M. Nomura, "Thermal efficiency evaluation of HI synthesis/concentration procedures in the thermochemical water splitting IS process", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 29, No. 6, 2004, p. 579.
- 8) S. Goldstein, J. M. Borgard, and X. Vitart, "Upper bound and best estimate of the efficiency of the iodine sulfur cycle", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 30, No. 6, 2005, p. 619.
- 9) 강영한, 류재춘, 박주식, 황갑진, 이상호, 배기광, 김영호, "요오드-황 열화학 수소 제조를 위한 분젠 반응 공정 연구", *화학공학*, Vol. 44, No. 4, 2006, pp. 410-416.
- 10) 이동희, 이광진, 강영한, 김영호, 박주식, 황갑진, 배기광, "Iodine-Sulfur 수소제조 공정에서 H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ 계의 고온 상분리", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 17, No. 4, 2006, pp. 395-402.
- 11) 이광진, 안승혁, 김영호, 박주식, 배기광, "황-요오드 열화학 수소 제조 공정에서 분젠 반응과 상 분리 비교", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 19, No. 2, 2008, pp. 111-117.
- 12) 이광진, 김영호, 박주식, 배기광, "SI 열화학 수소 제조 공정에서 분젠 반응을 통한 상 분리 특성", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 19, No. 5, 2008, pp. 386-393.
- 13) 이광진, 홍동우, 김영호, 박주식, 배기광, "황-요오드 수소 생산 공정의 분젠 반응 부분에서 부반응 제어", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 19, No. 6, 2008, pp. 490-497.
- 14) 차광서, 김영호, 강영한, 김효섭, 박주식, 배기광, "황-요오드 수소 제조 공정에서 분젠 반응 생성물의 정제", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 158-166.
- 15) 홍동우, 김효섭, 김영호, 박주식, 배기광, "황-요오드 수소 제조 공정의 분젠 반응 부분에서 O₂의 역할", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 21, No. 4, 2010, pp. 278-285.
- 16) 김효섭, 홍동우, 한상진, 김영호, 박주식, 배기광, "황-요오드 수소 제조 공정에서 HIx 용액을 이용한 분젠 반응의 상 분리 특성", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 21, No. 6, 2010, pp. 479-486.
- 17) 홍성대, 김정근, 이상호, 최상일, 배기광, 황갑진, "IS 프로세스의 HI 분해반응공정을 위한 전해 - 전기투석(EED) 농축", *한국수소 및 신에너지학회 논문집*, Vol. 17, No. 2, 2006, pp. 212-217.
- 18) 김정민, 김영호, 강경수, 김창희, 박주식, 배

- 기광, “SI 공정에서 HI 분해를 위한 백금담지 활성탄 촉매의 특성”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 19, No. 3, 2008, pp. 199-208.
- 19) 이기용, 송광호, 유계상, 김홍곤, 정광덕, 김창수, “IS cycle에서의 [DMIm]MeSO₄를 이용한 SO₂/O₂ 분리”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 19, No. 1, 2008, pp. 49-55.
 - 20) 유계상, 정광덕, “황-요오드 열화학 수소제조 공정에서 다양한 크기의 Cu/Fe/Al₂O₃ 구형 촉매를 이용한 삼산화황 분해”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 19, No. 3, 2008, pp. 226-231.
 - 21) 이기용, 김홍곤, 정광덕, 김창수, “물분해 수소 제조를 위한 SI cycle에서의 EMIm[EtSO₄]를 이용한 SO₂/O₂ 분리공정”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 1, 2011, pp. 13-20.
 - 22) 김태호, 신채호, 주오심, 정광덕, “SI 원자력 수소생산을 위한 SO₃ 분해반응촉매에 관한 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 1, 2011, pp. 21-28.
 - 23) 공경택, 김홍곤, “관형 Pt-라이닝 반응기를 이용한 가압 황산분해반응”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 1, 2011, pp. 51-59.
 - 24) 전동근, 이기용, 김홍곤, 김창수, “SI 열화학 사이클 황산분해공정의 Bench-scale 상압 실험”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 2, 2011, pp. 139-151.
 - 25) L. C. Brown, G. E. Besenbruch, R. D. Lentsch, K. R. Schultz, J. F. Funk, P. S. Pickard, A. C. Marshall, and S. K. Showalter, “High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power”, GA-A 24285, 2003.
 - 26) <http://en.wikipedia.org/wiki/SO2>.
 - 27) M. Windholz, S. Budacari, R. R. Blumetti, and E. S. Otterbein, The merck index. 10th ed, Merck & Co., Inc., New Jersey. 1983, p. 1288.
 - 28) N. N. Greenwood and A. Earnshaw, “Chemistry of the elements”, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, London, 1997, p. 698.