

황-요오드 열화학 수소 제조 공정에서 분젠 반응과 상 분리 비교

이광진*, 안승혁*, 김영호*[†], 박주식**, 배기광**

* 충남대학교 공과대학 정밀공업화학과, BK21-에너지환경소재사업단,
305-764 대전시 유성구 궁동 220

** 한국에너지기술연구원, 305-343 대전시 유성구 장동 71-2

The Comparison of Bunsen Reaction with Phase Separation in Sulfur-Iodine Thermochemical Hydrogen Production Process

Kwang-Jin Lee*, Sueng-Hyuk Ahn*, Young-Ho Kim*[†], Chu-Sik Park** and Ki-Kwang Bae**

* Department of Fine Chemical Engineering and Chemistry, BK21-E²M,
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

** Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT

A Bunsen reaction section is a primary stage of Sulfur-Iodine thermochemical hydrogen production cycle. This section is important, because it decides the efficiency of next stages. In order to produce hydrogen very efficiently, the characteristics of Bunsen reaction were investigated via two experimental methods. The one is a phase separation of H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ mixture system, and the other is a direct Bunsen reaction. The characteristics of each method were investigated and compared. As the result of this study, the amount of HI and I₂ in H₂SO₄ phase via Bunsen reaction was more decreased than that via H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ mixture system with increasing I₂ concentration. However, the amount of H₂SO₄ in HI_x phase via Bunsen reaction was remarkably increased with increasing I₂ concentration, while that via H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ mixture system was decreased. On the other hand, the range of initial composition which is able to separate into two liquid phases without I₂ solidification was almost alike.

KEY WORDS : Sulfur-Iodine cycle(SI 사이클), hydrogen production(수소 제조), bunsen reaction (분젠 반응), phase separation(상 분리).

1. 서 론

화석 연료는 고도의 경제 발전을 위한 에너지원

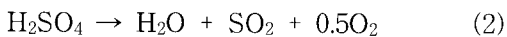
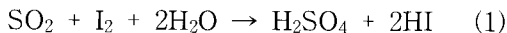
으로 사용되어 왔지만 연료의 고갈 및 대기 오염 등의 문제를 유발하고 있다. 이로 인해 최근에는 대체 에너지 개발을 위한 노력이 집중 연구되고 있으며, 그 중 한 방법으로서 수소 에너지의 도입

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

을 위한 노력이 세계적으로 진행되고 있다. 특히, 수소 에너지의 제조 측면에서 물로부터 수소를 제조하는 방법은 연소 후 열과 물만을 생성하여 다시 순환되기 때문에 청정 에너지 시스템의 달성이 가능하다는 장점이 있다.

물로부터 수소를 제조하는 방법의 하나로서 열화학 사이클을 이용하면 물의 직접 열분해보다 낮은 온도에서 수소를 제조할 수 있고 사이클의 운전에 적절한 열을 태양 및 원자력 열원으로부터 공급받을 수 있다.

황-요오드(SI; sulfur-iodine) 열화학 수소 제조 기술은 VHTR(very high temperature reactor)과 연계 가능한 수소 제조 기술로서 최적 운전 조건에서 50%의 효율을 갖는 것으로 알려져 있으며¹⁻⁴⁾, bench 규모의 연속운전에도 성공하여⁵⁾ 실현 가능성이 가장 높은 것으로 평가 받고 있다. SI 사이클은 아래와 같이 세 단계의 기초 화학반응으로 구성된다⁶⁾.

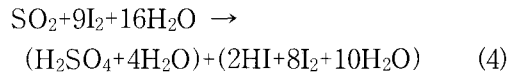


(1)식은 분젠(Bunsen) 반응이라 불리며, 이 반응으로 H₂SO₄와 HI가 생성된다. 이때 I₂를 과량 넣는 경우 두 산이 H₂SO₄ 상과 HI_x 상으로 상 분리되고, 분리된 두 산은 (2)식의 황산 분해 반응과 (3)식의 요오드화수소 분해 반응에서 각각 분해된다. 최종 생성물 중 H₂와 O₂를 제외한 모든 화합물(H₂O, SO₂) 및 홀원소 물질(I₂)은 재순환된다.

한편, 연속 공정을 위하여 분젠 반응 생성물은 2 액상으로 분리되어야 하고 I₂ 포화점 이하에서 운전되어 I₂가 석출되지 않아야만 한다. 또한 공정 효율의 증가를 위해서는 각 상의 불순물 및 부반응을 최소화하고 각 상의 주요 성분을 최대한 상 분리시켜야 한다. 이러한 조건을 찾기 위하여 다양한 공정 변수 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 Nomura 등⁷⁾이 최적화된 분젠

반응식으로 제안한 (4)식의 양론비를 기초로 서로 대응되는 H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ 혼합계(이하 4-성분계로 약칭)의 상 분리 연구와 분젠 반응 연구를 진행하여 각각의 특성을 관찰하였다.



또한 2 액상 분리에 대한 두 방법의 연구 결과를 비교 고찰하여 실제 공정의 운전을 위하여 보다 진전된 결과를 도출하고자 하였다.

2. 실험

2.1 H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ 혼합계 상 분리

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 250 mL 부피의 초차 반응기와 기계식 교반기를 이용하여 관찰이 용이 하면서 과량의 요오드가 빠르게 용해되도록 하였고 항온조로부터 온도 조절된 물이 순환할 수 있도록 하여 온도를 일정하게 유지 하였다. 실험을 위하여 원하는 조성으로 계산된 양의 H₂SO₄(95 wt%, Junsei), HI(55~58 wt%, Kanto Chemical), H₂O(초순수) 및 I₂(99 wt%, Junsei)를 혼합하여 H₂SO₄/HI/H₂O/I₂=1/2/14/0.5~3.0 몰 비의 모의 용액을 제조한 뒤 298 K에서 200 rpm으로 교반하며 4시간 동안 충분히 혼합하였다⁸⁻⁹⁾.

2.2 분젠 반응

분젠 반응의 현상 및 상 분리 특성의 용이한 관찰을 위하여 Fig. 2와 같이 350 mL 부피의 초차 반응기를 사용하였으며 부식을 방지하기 위하여 유리 외의 부분은 테프론으로 코팅 처리하였다. 또한 기계적 교반방식으로 과량의 I₂가 빠르게 용해되도록 하였다. 온도 조절된 물은 항온조로부터 순환하여 반응기의 온도를 일정하게 유지하였다.

반응을 위하여 I₂/H₂O=1.5~4/16 몰 비로 계산된 I₂(99 wt%, Junsei)와 H₂O(초순수)를 넣고 250

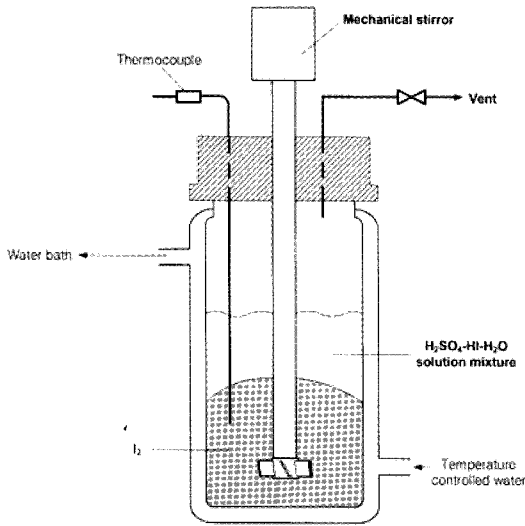


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for the phase separation of H_2SO_4 -HI- H_2O - I_2 system.

rpm으로 교반하며 SO_2 (99.95 vol%)를 110 mL/min의 유속으로 공급하였다. SO_2 공급을 시작으로 5시간 40분 동안 298 K에서 충분히 반응시켰다.

2.3 2-액상 분리 용액의 분석

두 실험 모두 반응이 종료되면 생성된 용액을 100 mL 메스실린더로 옮겨 상 분리 여부 및 I_2 석출 등을 확인하였다. 상 분리가 일어나는 경우, 피펫을 이용하여 각 상을 분리하고 각 상의 무게를 측정 후 조성 및 밀도를 분석하였다. 4-성분계 상 분리의 경우 물질수지를 이용하여 HI_x 상의 조성을 구하였고 분젠 반응의 경우 물질수지를 이용하여 전체계의 조성을 구하였다.

HI와 I_2 의 조성은 각각 $AgNO_3$ 용액과 $Na_2S_2O_3$ 용액으로 I^- 및 I_2 를 적정하여 결정하였고 H_2SO_4 는 NaOH 용액으로 H^+ 를 적정한 뒤 I^- 의 적정 값을 제외하여 조성을 결정하였다. 마지막으로 H_2O 의 조성은 전체 시료의 무게에 대한 물지 수지를 이용하여 결정하였다. 모든 측정은 한 시료 당 7회 반복 측정 후 최대와 최소를 제외하고 평균한

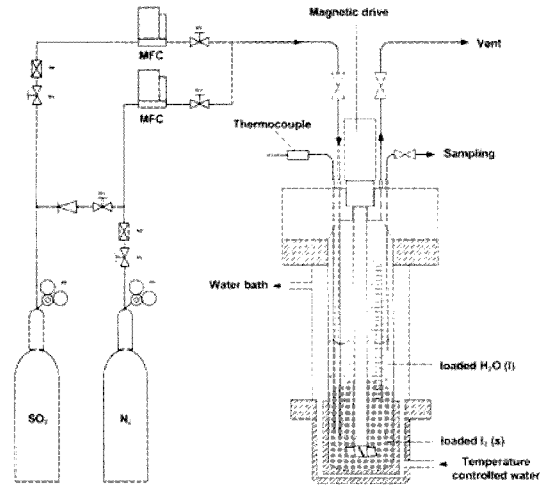


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for the Bunsen reaction.

값으로 농도 값을 얻었다. 보다 정확한 적정을 위해서 자동 전위차 적정기 (Automatic Potentiometric Titrator, KEM AT-510)와 각 적정 방법에 따른 전극(Acid-base titration electrode; KEM C-171, Redox titration electrode; KEM C-272, Precipitation titration electrode; KEM C-373)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 H_2SO_4 -HI- H_2O - I_2 혼합계 상 분리 특성

Fig. 3에서 검정색으로 표시된 기호들은 4-성분계 상 분리의 성분 변화를 H_2O 를 제외한 H_2SO_4 -HI- I_2 계를 중심으로 나타낸 것이다. 여기서 HI 분율(HI fraction)과 I_2 분율(I_2 fraction)은 몰 비를 기초로 각각 $HI/(H_2SO_4 + HI + I_2)$ 와 $I_2/(H_2SO_4 + HI + I_2)$ 에 의해 계산되었다. 4-성분계 용액의 전체 조성(Global system)은 거의 직선상에 존재하였으며, 초기 I_2 농도의 증가에 따라 상 분리 후 H_2SO_4 상(H_2SO_4 phase)내 불순물로 존재하는 I_2 및 HI의 분율과 HI_x 상(HI_x phase)내 불순물인 H_2SO_4 의 분율은 감소하였다. 상온에서

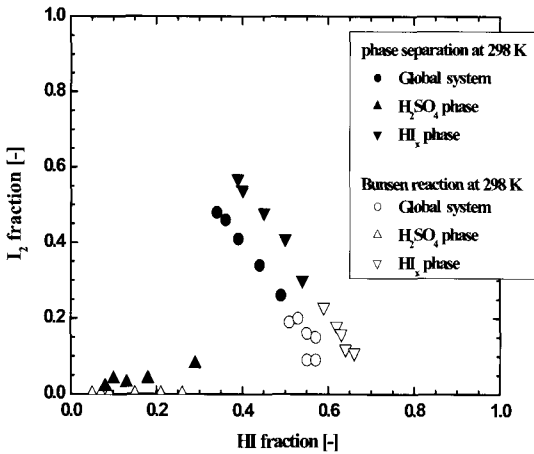


Fig. 3 Effect of I_2 concentration on I_2 and HI fractions in each liquid phase. I_2 and HI fractions are calculated by $I_2/(H_2SO_4+HI+I_2)$ and $HI/(H_2SO_4+HI+I_2)$, respectively, based on molar ratios of the H_2SO_4 -HI- H_2O - I_2 mixture system.

최적의 결과가 초기 I_2/H_2SO_4 의 몰 비가 2.75/14(I_2 포화점)인 경우에 얻어졌다. 이때 H_2SO_4 상내 HI 및 I_2 분율은 각각 0.08 및 0.02 이며 HI_x 상내 H_2SO_4 분율은 0.04 로 나타났다⁹⁾. 이 결과들은 다른 조성들의 4-성분계(H_2SO_4 /HI/ H_2O 몰 비 =1/1.46/18.36)를 유사한 온도 조건에서 연구한 Sakurai 등¹⁰⁾의 결과와 매우 유사했다. 이 결과로부터 불순물들의 양은 혼합계 내 H_2SO_4 /HI/ H_2O 의 몰 비 보다 I_2 농도에 크게 의존하는 것으로 판단 되었다.

3.2 분젠 반응의 상 분리 특성

Fig. 4는 SO_2 를 충분히 공급한 경우, 상 분리가 일어나는 조성($I_2/H_2O=3.5/16$ 몰 비)과 일어나지 않는 조성($I_2/H_2O=1.5/16$ 몰 비)의 반응물을 시간에 따라 분젠 반응시키고 생성된 HI와 H_2SO_4 의 농도와 소모된 I_2 의 농도를 전체계의 결과로 나타 낸 것이다.

상 분리가 일어나지 않는 조성인 $I_2/H_2O=1.5/16$ 몰 비의 분젠 반응 결과, 150분 후 I_2 가 반응에 의해 모두 소모됨에 따라 분젠 반응이 종료된 것을 확인하였다. 그러나 상 분리가 일어나는 조성인

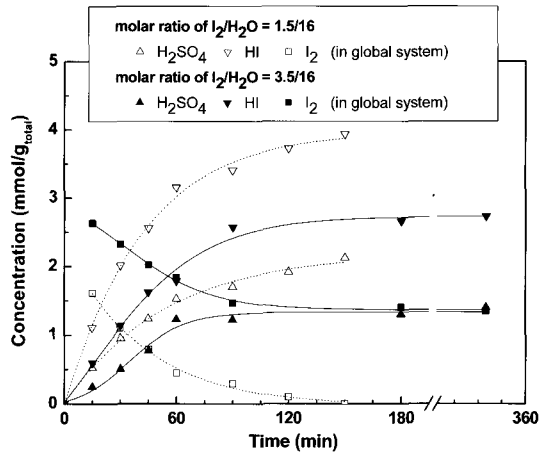


Fig. 4 Concentration of components in global system on the time.

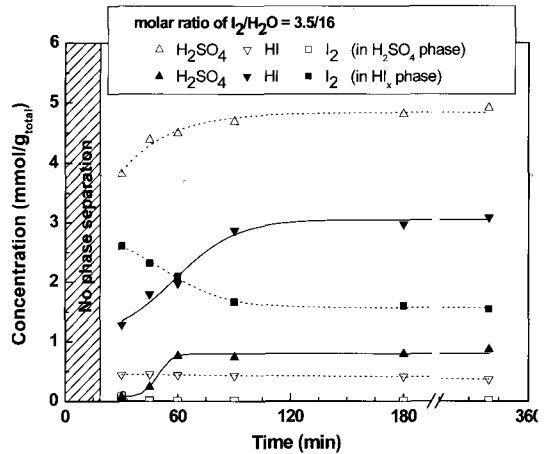


Fig. 5 Concentration of components in H_2SO_4 phase and HI phase on the time.

$I_2/H_2O=3.5/16$ 몰 비의 경우에는 약 100분 이후에 비교적 안정화되기 시작하여 5시간의 경과 뒤에도 안정된 상태를 유지하고 있었다. 따라서 초기 I_2 몰 비를 달리한 분젠 반응의 반응 시간은 충분히 안정화되었다고 판단되는 5시간 40분으로 설정하였다.

Fig. 5는 상 분리가 일어나는 조성인 $I_2/H_2O=3.5/16$ 몰 비의 각 상에 대한 분젠 반응 결과이다. 초기 1시간 동안은 15분 간격으로 실험 하

Table 1 Data for two liquid phase separation in Bunsen reaction and H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ system

Bunsen reaction (SO ₂ continuous feeding)												
Initial I ₂ /H ₂ O molar ratio	Global system (mol%)				H ₂ SO ₄ phase (mol%)				HI _x phase (mol%)			
	H ₂ SO ₄	HI	H ₂ O	I ₂	H ₂ SO ₄	HI	H ₂ O	I ₂	H ₂ SO ₄	HI	H ₂ O	I ₂
1.50/16	no phase separation				no phase separation				no phase separation			
1.75/16	9.81	14.75	73.04	2.40	12.25	4.38	83.37	N.D. ^a	8.12	21.89	65.94	4.05
2.00/16	10.49	17.65	69.23	2.63	13.44	3.48	83.08	N.D. ^a	8.88	25.34	61.71	4.06
2.50/16	9.09	15.17	70.22	5.51	14.11	2.40	83.50	N.D. ^a	6.52	21.74	63.39	8.35
3.00/16	10.52	19.23	64.72	5.53	15.24	1.45	83.32	N.D. ^a	8.48	26.95	56.65	7.93
3.50/16	10.56	20.26	61.56	7.62	15.82	1.20	82.98	N.D. ^a	8.49	27.78	53.10	10.63
3.75/16	13.41	27.20	52.38	7.02	15.73	0.86	83.41	N.D. ^a	12.47	37.77	39.92	9.84
4.00/16	solidification				solidification				solidification			

H ₂ SO ₄ -HI-H ₂ O-I ₂ system (with initial molar ratio of H ₂ SO ₄ /HI/H ₂ O=1/2/14)												
Initial I ₂ /H ₂ O molar ratio	Global system (mol%)				H ₂ SO ₄ phase (mol%)				HI _x phase (mol%)			
	H ₂ SO ₄	HI	H ₂ O	I ₂	H ₂ SO ₄	HI	H ₂ O	I ₂	H ₂ SO ₄	HI	H ₂ O	I ₂
0.50/14	no phase separation				no phase separation				no phase separation			
0.75/14	no phase separation				no phase separation				no phase separation			
1.00/14	5.52	10.87	77.91	5.69	10.14	4.79	83.71	1.36	3.85	13.07	75.81	7.26
1.50/14	5.37	10.58	75.80	8.25	12.97	2.96	83.32	0.75	2.53	13.43	72.98	11.05
2.00/14	5.23	10.30	73.81	10.66	14.05	2.11	83.33	0.51	2.14	13.17	70.47	14.22
2.50/14	5.10	10.04	71.91	12.96	13.86	1.56	83.96	0.62	1.86	13.16	67.47	17.51
2.75/14	5.03	9.91	71.00	14.06	16.30	1.36	82.04	0.29	1.37	12.68	67.41	18.53
3.00/14	solidification				solidification				solidification			

^aN.D.: not detected

였으나 15분 실험의 경우 2 액상 분리 현상이 관찰되지 않았다. Fig. 5에 의하면, H₂SO₄ 상의 I₂ 농도는 30분에 약 0.08 mmol/g_{total}로 작은 값을 보였고 45분 후로는 분석한계에 도달하였다. 따라서 I₂ 농도가 낮은 H₂SO₄ 상은 45분 이후 비교적 안정화 되었으나 HI_x 상의 I₂는 90분에 약 1.7 mmol/g_{total} 까지 감소된 뒤에 안정된 상태를 유지하였다. 따라서 SO₂의 공급에 따른 분젠 반응은 I₂가 과량 존재하는 HI_x 상에서 활발히 진행되며 분젠 반응시 하부 상에 H₂SO₄가 증가하는 현상은 이러한 특성에 기인한 것으로 사료된다.

3.3 I₂ 몰 비에 따른 상 분리 결과 비교

Table 1은 분젠 반응과 4-성분계 상 분리 실험

결과⁹⁾를 비교하기 위하여 (4)식의 양론비에 따라 대응되는 상온에서의 실험 결과를 각각 나타낸 것이다. 3-성분계인 SO₂-I₂-H₂O 혼합계와 4-성분계인 H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ 혼합계의 보다 쉬운 비교를 위하여 각 계의 조성은 공통으로 존재하는 I₂/H₂O의 몰 비로 표현되었다. (예를 들어, (4)식의 양론비를 통해 각 성분계의 조성으로 전환하면 분젠 반응(3성분계)의 I₂/H₂O=1.5/16 몰 비와 4-성분계의 I₂/H₂O=0.5/14 몰 비는 같은 조성이다.)

이에 따르면 전체계의 조성으로부터 분젠 반응의 경우가 4-성분계를 이용한 상 분리의 경우보다 I₂와 H₂O의 조성비가 낮고 H₂SO₄와 HI의 조성비가 높은 것으로 나타났다. 한편, H₂SO₄ 상의 불순물인 HI와 I₂는 두 실험의 H₂SO₄ 상 내에서 공통적으로 초기 I₂ 몰 비의 증가에 따라 감소하는 것

으로 나타났다. 특히, 분젠 반응에서는 불순물 감소 효과가 더욱 뛰어나 I₂ 포화점(초기 I₂/H₂O=3.75/16 몰 비)에서의 HI 조성비는 0.86 mol%로 매우 낮았고 I₂는 모든 조성에서 측정되지 않았다. 따라서 고농도의 I₂ 조건과 이에 따른 과량의 SO₂ 공급은 H₂SO₄ 상에 유리하게 작용하는 것으로 나타났다. 그러나 H₂SO₄ 상과는 달리 HI_x 상의 불순물인 H₂SO₄는 HI_x 상 내에서 초기 I₂ 몰 비의 증가에 따라 분젠 반응의 경우에 오히려 현저하게 증가하였다. 이러한 현상은 Fig. 3에서 보다 쉽게 관찰할 수 있다. Fig. 3에서 색이 없는 기호들은 분젠 반응 후 전체 조성 및 각 상의 성분 변화를 앞서 3.1 절에서 설명한 방법과 같은 계산으로 나타낸 것이다. 이 결과에 따르면 4-성분계의 상 분리와 비교하여 분젠 반응 후 H₂SO₄ 상 내 불순물들의 분율은 크게 감소하였음을 알 수 있다. I₂ 포화점에서 H₂SO₄ 상 내 HI 분율은 0.05까지 감소되었다. 한편, HI_x 상에서는 I₂ 분율이 감소하였으나 상대적으로 H₂SO₄ 분율이 매우 크게 증가하여 I₂ 포화점에서 0.21을 나타내었다.

3.4 SO₂-H₂O-I₂ 몰 비 비교

Fig. 6은 분젠 반응 후 생성물의 조성과 4-성분계 상 분리의 평형 조성을 다시 분젠 반응의 반응물인 SO₂-H₂O-I₂의 조성비로 나타낸 것이다.

Fig. 6에 따르면, I₂ 석출이 없으면서 2-액상 분리가 유지되는 영역의 초기 I₂ 몰 비는 분젠 반응과 4-성분계 상 분리의 범위가 각각 I₂/H₂O=1.75/16~3.75/16 몰 비와 I₂/H₂O=1/14~2.75/14 몰 비로 양론비에 의하여 거의 같은 범위인 것으로 나타났다. 그러나 SO₂-H₂O-I₂의 조성비로부터 분젠 반응의 SO₂ 조성비는 최소 0.09에서 최대 0.12까지 초기 I₂ 몰 비의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 약 0.05로 일정한 SO₂ 조성비를 갖는 4-성분계 상 분리와 비교했을 때 SO₂의 과량 공급시 4-성분계 상 분리 보다 반응이 더 진행된 상태에서 평형을 이룬다는 앞서 언급된 결과와 동일하게 해석할 수 있다. 또한 분

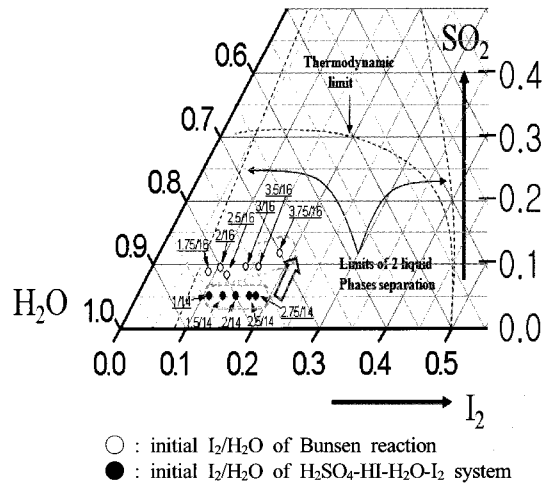


Fig. 6 Conditions of SO₂-H₂O-I₂ via Bunsen reaction and H₂SO₄-HI-H₂O-I₂ system.

젠 반응으로부터, 가압을 통한 공정 변수 연구는 2액상 분리 한계 및 열역학적 한계 내의 다양한 영역에서 효율적인 운영 조건을 위한 상 분리 결과를 도출할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

SI 열화학 수소 제조 공정을 높은 효율로 운전하기 위하여 본 연구에서는 SI 사이클 공정 부분의 하나인 분젠 반응 공정을 연구하였다. 분젠 반응은 I₂/H₂O=1.5~4/16 몰 비 조성에서 SO₂를 일정한 유속으로 공급하면서 상온에서 관찰되었다. 4-성분계 상 분리의 특성과 분젠 반응 특성을 각각 고찰하였고 서로 비교해 보았다. 그 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) 2-액상 분리가 일어나지 않는 경우에는 SO₂의 공급에 따라 I₂가 모두 반응할 때까지 반응이 진행되었다.
- 2) 2-액상 분리가 일어나는 경우, 분젠 반응은 I₂가 모두 소모되지 않은 상태에서 안정화되었다. 또한 H₂SO₄ 상이 먼저 안정화된 뒤 I₂가 남아 있는 HI_x 상에서 반응이 진행되며 생성된

H_2SO_4 는 HI_x 상에 대부분 남게 되는 것으로 사료된다.

- 3) 분젠 반응과 4-성분계 상 분리 모두 초기 I_2 몰비의 증가에 따라 H_2SO_4 상의 불순물들(HI , I_2)은 감소하였다. 그러나 HI_x 상의 불순물(H_2SO_4)은 초기 I_2 몰비 증가에 따라 4-성분계 상 분리 결과에서는 감소한 반면 분젠 반응에서는 약 12.5 mol%까지 매우 증가한 결과를 나타냈다.
- 4) SO_2 가 과량 공급되면 4-성분계로부터 상 분리된 결과 보다 반응이 더 진행될 수 있으며 2-액상 분리 범위(2 액상 분리 시작~ I_2 포화지점)는 두 실험 결과가 거의 같은 것으로 나타났다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 1) K. Onuki, H. Nakajima, I. Ioka, M. Futakawa, and S. Shimizu, "IS Process for Thermochemical Hydrogen Production", JAERI Review 94-006, 1994.
- 2) 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, 2003, pp. 887-899.
- 3) 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, 2004, pp. 579-587.
- 4) S. Goldstein, J. Borgard, and X. Vitart, "Upper Bound and Best Estimate of the Efficiency of the Iodine Sulfur Cycle", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 30, 2005, pp. 619-626.
- 5) S. Kubo, H. Nakajima, S. Kasahara, S. Higashi, T. Masaki, H. Abe, and K. Onuki, "A Demonstration Study on a Closed Cycle Hydrogen Production by the Thermochemical Water-Splitting Iodine-Sulfur Process", Nuclear Engineering and Design, Vol. 233, 2004, pp. 347-354.
- 6) 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-A 16713, 1982.
- 7) M. Nomura, S. Fujiwara, K. Ikenoya, S. Kasahara, H. Nakajima, S. Kubo, G. J. Hwang, H. S. Choi, and K. Onuki, "Application of an Electrochemical Membrane Reactor to the Thermochemical Water Splitting IS Process for Hydrogen Production", J. Membrane Sci., Vol. 240, 2004, pp. 221-226.
- 8) 이동희, 이광진, 강영한, 김영호, 박주식, 황갑진, 배기광, "Iodine-Sulfur 수소 제조 공정에서 H_2SO_4 - HI - H_2O - I_2 계의 고온 상 분리", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 17, No. 4, 2006, pp. 395-402.
- 9) 강영한, 류재춘, 박주식, 황갑진, 이상호, 배기광, 김영호, "요오드-황 열화학 수소 제조를 위한 분젠 반응 공정 연구", J. Chem. Eng. Korea, Vol. 44, 2006, pp. 410-416.
- 10) M. Sakurai, H. Nakajima, K. Onuki, and S. Shimizu, "Investigation of 2 Liquid Phase Separation Characteristics on the Iodine-Sulfur Thermochemical Hydrogen Production Process", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 25, 2000, pp. 605-611.