

초산화칼륨이 포함된 화학 폐를 이용한 이산화탄소의 산소로의 전환 반응

김진호* · 정태훈** · 박윤국*[†] · 정순관***[†]

*홍익대학교 화학시스템공학과
339-701 충남 연기군 조치원읍 신안리 300
**J. C. Technology
133-831 서울시 성동구 성수 3동 275-16 제일빌딩 4층
***한국에너지기술연구원
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2009년 5월 21일 접수, 2009년 6월 20일 채택)

O₂ Production from CO₂ by using Chemical Lung Containing Potassium Superoxide

Jinho Kim*, Tae-Hoon Jurng**, YoonKook Park*[†] and Soon Kwan Jeong***[†]

*Department of Chemical System Engineering, Hongik University, 300 Shian-ri, Yeongi-gun, Chungnam 339-701, Korea

**J. C. Technology, Cheil Bld., 4th Floor, 275-16 Sungsoo-3-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-831, Korea

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

(Received 21 May 2009; accepted 20 June 2009)

요 약

본 연구에서는 초산화칼륨이 포함된 화학 폐를 이용하여 이산화탄소를 산소로 전환시켰다. 우선 초산화칼륨을 수산화칼슘과 혼합하여 초산화칼륨의 반응성을 낮추었다. 기체조한 수산화칼슘-초산화칼륨 혼합물을 수분제거에 용이한 실리콘 고분자 매트릭스에 여러 가지 비율로 분산시켜 화학 폐를 제조하였다. 일반적으로 화학 폐에 있는 초산화칼륨의 양이 많아질수록 변환되는 이산화탄소와 발생하는 산소의 양이 증가하였다. 후리에 적외선 분광기 분석결과 화학 폐에 분산되어 있는 규소-산소의 단일결합이 1,050 cm⁻¹에서 나타났다. 규소-산소 단일결합의 흡수도는 화학 폐에 있는 규소고분자의 함량이 높을수록 높았다. 본 실험결과는 이산화황이나 이산화질소같은 산성 가스의 전환에도 이용될 수 있음을 보여준다.

Abstract – This study demonstrates the use of a chemical lung containing potassium superoxide to convert carbon dioxide in air to oxygen. In order to reduce its extremely high reactivity, potassium superoxide was first mixed with calcium hydroxide and then combined at various ratios with polysiloxane. Silicone polymer used here served as both a water repellent and the polymer matrix. In general, the amount of carbon dioxide captured as well as that of oxygen produced increased as the proportion of potassium superoxide in the chemical lung increased. FT-IR spectroscopy revealed that the Si-O bond in chemical lung appeared at 1,050 cm⁻¹ and absorbance of chemical lung containing higher amounts of silicone was higher than that of chemical lung containing lower amounts. These results indicate that such a chemical lung may also be a useful sorbent for other acid gases, such as sulfur oxides and nitrogen oxides.

Key words: Carbon Dioxide, Oxygen, Polysiloxane, Chemical Lung, Superoxide

1. 서 론

지구온난화의 가속으로 이산화탄소에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이에 발맞추어 다양한 형태의 이산화탄소 회수기술도 개발되고 있다. 대표적인 이산화탄소 제거 기술에는 흡수[1], 흡착[2-5], 유기 금속 틀, 이온성 액체[6], 효소를 이용한 기술, 그리고 반응이 포함된 기술 등이 있다. Table 1에 요약한 바와 같이, 반응을 이용한 이산화탄소 제거 기술은 일반적으로 높은 재생온도를 필요하거나 많

은 공간을 차지하는 단점을 보이고, 흡수의 경우 재생온도는 낮지만 연속적으로 사용하는데 많은 제약이 있으며, 흡착의 경우 흡착층에 있는 수분을 제거시켜야 하며, 이온성 액체의 경우 그 가격이 너무 비싸다는 단점이 있다. 초산화칼륨의 경우 제한된 공간 내에서 제거되는 이산화탄소의 1.5배 만큼의 산소를 발생시킨다는 점에서 다른 이산화탄소 제거 기술과 대별된다.

하지만 초산화칼륨은 반응성이 대단히 크기 때문에 취급에 각별한 주의가 요구된다[7]. 반응성이 높은 초산화칼륨의 안정성을 증가시키기 위해 수산화칼슘을 첨가하여 사용하는 연구가 진행되었다[8]. 수산화칼슘을 첨가하기 전에는 약 110에서 자연발화를 하였지

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: parky@hongik.ac.kr and jeongsk@kier.re.kr

Table 1. Capacity and disadvantages of CO₂ sorbents [11]

Category	Candidates	Capacity g CO ₂ /g sorbent	Regeneration Temp. (°C)	Use	Disadvantages
Reaction	LiOH $2\text{LiOH} + \text{CO}_2 = \text{Li}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	0.920	1310	-Extravehicular mobility unit life support back pack	-High regen. T. -Short duration -One time use
	Dolomite $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$	0.786	600~900	-coal mines -IGCC plants	-Kinetically slow at low temp. -High regen. T
	KO ₂ $2\text{KO}_2 + \text{CO}_2 = \text{K}_2\text{CO}_3 + 1.5\text{O}_2$	0.31 Plus 1.5 mol O ₂ generated	>2000	-Air Regeneration systems (Drager)	-High regen. T -One time use
	K ₂ CO ₃ $\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{KHCO}_3$	0.318	180~250	-Ammonia and syngas production [1]	-Liquid phase absorption -Large space required -Not readily amendable to random orientation
Absorption	Amine absorption	0.088 (PEI: [2])	150	-shuttle extended duration orbiter	-Excess moisture increases ΔP and reduces capacity
Adsorption	Molecular Sieves (adsorption)	0.066 (MS 5A) [4]	250~350	-skylab mission [5]	-Protective bed is needed to remove H ₂ O -Easy to degrade

만 수산화칼륨을 첨가한 후에는 그 이상의 온도에서도 자연발화하지 않았다[7]. 그러나 초산화칼륨과 수산화칼륨 모두 고체 분말이기 때문에 초산화칼륨을 균일하게 분포시키면서 제조를 원활하기 위해서는 적절한 물질을 매트릭스로 이용하는 것이 필요하다.

실리콘 고분자는 분자간의 인력이 작기 때문에 낮은 온도에서도 고화되지 않는다. 또한, 일반 유기 고분자에 비하여 온도 의존성이 적다. 무엇보다도 중요한 실리콘 고분자의 특성은 다른 유기 고분자에 비하여 분자사이의 거리가 길어 기체의 투과성이 크다는 것이다[9]. 실리콘 고무의 산소 투과성은 폴리에틸렌보다는 100배 가까이 크고, 폴리스티렌보다는 1,000배 이상 크다[8].

환경부가 발표한 자료[10]에 따르면 이산화탄소의 다중이용시설 기준치인 1,000 ppm을 초과하는 경우가 버스의 경우 91%이고, 지하철은 80% 이상인 것으로 나타났다. 이에 환경부는 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인을 마련하여 열차 및 버스의 경우 평소 2,000 ppm, 혼잡시 3,000 ppm 이하를 권고하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 반응성이 높은 초산화칼륨의 안정성을 증가시키기 위해 수산화칼륨을 첨가하고, 수산화칼륨과 초산화칼륨 혼합고체의 분산능과 표면적을 넓히기 위하여 실리콘 고분자를 매트릭스로 이용하여 화학 폐를 제조하였다. 수산화칼륨과 초산화칼륨의 비율을 무게비로 7:3으로 혼합하고, 혼합된 고체와 실리콘 고분자의 질량비를 변화시키면서 이산화탄소의 산소로의 전환반응을 수행하였다. 초기 이산화탄소의 농도는 2,000 ppm을 유지하였고, 실온 하에서 반응을 진행하였다. 반응 후 얻어진 화학 폐를 분석하기 위하여, SEM, FT-IR, BET 그리고 TGA를 이용하였다.

2. 실험

2-1. 시약 및 재료

본 연구에 사용된 실리콘 고분자인 dimethyl polysiloxane-hydroxy terminated(viscosity 3000 cSt@25 °C)는 다미폴리캠에서 구입하였다. 망상구조의 실리콘고분자 매트릭스를 얻기 위해 이용된 methyl triacetoxysilane(90%)과 dibutyltin diaurate(95%)는 Aldrich Co.에서 구입하였다. 공기 중에서 매우 불안정한 초산화칼륨의 반응성을 약화시키기 위하여 수산화칼륨을 사용하였다. 초산화칼륨과 수산화칼륨의 혼합물(무게비로 3:7)은 J.C. 테크놀로지 회사에서 제공하였다.

이산화탄소가스(99.99% 순도), 산소가스(O₂ 20% N₂ balance) 그리고 질소가스(99.9999% 순도)는 SeiBo Tec.에서 구입하였다. 초기 이산화탄소의 농도를 조절하기 위해 이산화탄소와 질소 질량 조절기(TSC-120, 엠케이프리시전을 이용하였다. 초기 이산화탄소와 산소 농도 및 시간에 따른 이들 가스의 농도를 측정하기 위해 이산화탄소 센서(Telaire 6004 CO₂ module, GE Sensing)와 산소 센서(PTB-18.10, AO3 oxygen sensor)를 이용하였다. 질량 조절기와 가스 농도 측정은 National Instruments사의 데이터 수집장치(data acquisition card; USB-6008)를 이용하였다.

2-2. 실험방법

가로, 세로 그리고 높이(cm)가 각각 33×33×44인 반응기는 아르탈을 이용하여 제작하였다. 제조된 화학 폐를 반응기에 투입하기 위하여 윗면 개방이 가능하되, 외부와의 공기가 차단되도록 2개의 잠금장치를 부착하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 반응기 좌우에는 가스의 유입과 배출을 원활히 할 수 있도록 1/8" 스테인리스스틸 튜브와 connector(HiP Inc., Erie, PA, USA)로 연결하였다. 이산화탄소와 질소 가스 용기는 질량 유량기로 연결하였다. 가스의 역류를 방지하기 위하여 질량 유량기와 반응기 사이에 역행 방지판(HiP Inc.)을 부착하였다. 질소와 이산화탄소의 질량 유량기를 제어하기 위하여 데이터 수집장치를 이용하였다.

이산화탄소의 농도를 측정하기 위하여 이산화탄소의 센서 범위가 0~5,000 ppm인 이산화탄소 센서를 사용하였다. 네 가지 다른 이산

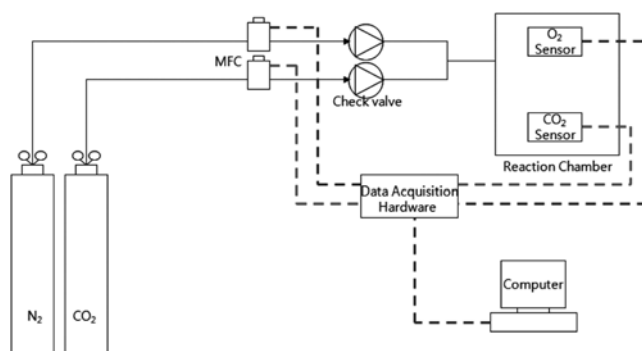


Fig. 1. Experimental setup.

화탄소의 농도(0, 998, 1,998 그리고 3,000 ppm, N₂ balance)로 이산화탄소 센서를 보정하였다. 산소농도 측정은 산소농도의 범위가 0~100%인 산소 센서를 이용하였다. 순수한 질소를 이용하여 산소 센서가 가장 낮은 값을 출력할 때를 0%로 보았고 산소농도가 20% (N₂ balance)일 때를 사용하여 산소가 20%인 곳과의 직선의 기울기를 얻을 수 있어 중간 값은 내삽하여 측정하였다. 하지만 이산화탄소 센서와 산소 센서의 분해능에는 차이가 분명하였다.

이산화탄소의 분해능은 12 bit이어서 ± 10 V 사이에서 2¹²개만큼을 분할할 수 있고, 측정상 약 7 ppm 내외의 분해능을 갖는데다 Non Dispersive Infrared(NDIR) 방식으로 매우 정확한 측정치를 보였다. 이에 반해 산소센서의 분해능은 0.01%이지만 측정상 최대 0.1%까지도 오차를 보이고, 측정방식 또한 전기화학식으로 이산화탄소 센서에 비해 측정치가 정확하지는 못하였다. 그래서 데이터 수집장치를 이용하여 1초당 한 번씩 데이터를 수집하였고 수집된 데이터는 1분간의 산술평균을 사용하여 가스의 농도를 측정하였다.

반응기 내에서 원활한 가스 혼합을 위해 반응기 바닥에 직경 50 mm의 팬을 설치하였다. 실험직전 습도의 영향을 최소화하기 위해 하루 동안 100 °C에서 건조한 분자 여과기를 이용하여 습도가 최대 10%가 넘지 않도록 조절하였다. 반응온도는 295 \pm 2 K로 유지하였다.

초산화칼륨-수산화칼슘의 혼합 비율에서 초산화칼륨의 비율이 높을수록 이산화탄소의 산소로의 전환 반응율은 높아지지만 그에 따른 공기 중에서의 불안정성을 보이므로 최적화된 안정성을 보장하는 비율로 초산화칼륨과 수산화칼슘을 무게비로 3:7인 혼합물을 이용하였다[8]. Table 2에 실험에 사용된 화학 폐의 질량 조성을 표시하였다. 초산화칼륨-수산화칼슘의 혼합물은 흰색인 수산화칼슘의 영향으로 연한노란색을 띠며 직접 불을 붙이지 않는 이상 자연발화하지 않았다. 하지만 실리콘 고분자에 분산된 초산화칼륨-수산화칼슘 혼합물 또한 공기 중에서 이미 이산화탄소와 반응하고 있으므로 반응기에 신속하게 옮겨 실험을 하여야 한다.

2-3. 분석

전환반응이 끝나고 난 후의 화학 폐를 분석하기 위하여 감쇄전반사 셀(Attenuated Total Reflection cell; PIKE, MIRacle™)이 부착된 후리에 적외선 분광기(IRPrestige-21, Shimadzu)를 이용하였고, 화학 폐의 표면을 분석하기 위하여 주사전자현미경(Scanning Electron microscope; Seron technologies Inc., AIS 2100)을 이용하였고, 표면적 분석을 위하여 BET 표면분석기(BELSORP-max, BEL-Japan, Inc.)를 이용하였다. 열중량분석기(Thermogravimetric Analyzer)는 TA instrument의 (Q500IR-TGA)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

주어진 반응기의 이산화탄소 농도가 시간에 따라 일정하게 유지되는지 확인하기 위하여 반응기 내에 화학 폐를 넣지 않고 이산화탄소의 농도를 시간에 따라 측정하는 blank test를 실시하였다. 1,000 분 이상 지났을 때 이산화탄소 농도는 초기 이산화탄소 농도와 비교하여 약 4% 감소하였다[8]. 화학 폐 존재 하에 이산화탄소의 산소로의 전환반응은 약 200분 이내에 거의 모든 이산화탄소가 산소로 전환되는 실험결과에 비추어 자연화산에 따른 이산화탄소 농도 변화는 적은 것으로 간주하였다.

3-1. 이산화탄소의 산소로의 전환반응

Fig. 2에서 보는 바와 같이 화학 폐 존재(S5KC5) 하의 이산화탄소의 농도는 시간이 경과함에 따라 감소하고, 산소의 농도는 증가하는 것을 알 수 있다. 이산화탄소 농도는 초기 0.2%에서 10시간 후에는 거의 모든 이산화탄소가 산소로 전환됨을 알 수 있다. 산소의 농도는 초기 12.5%에서 화학 폐의 이산화탄소의 전환반응으로 10 시간 후에는 14%로 증가하는 것을 알 수 있다. 다른 질량비의 화학 폐 존재하의 반응도 이산화탄소가 산소로 전환되는 것을 쉽게 관찰할 수 있었지만, 산소의 농도 증가율은 달랐다[8]. 각기 다른 화학 폐가 각각 다른 산소 농도 증가율을 보이는 이유들 중 하나는 반응기내 초기 산소의 농도를 일정하게 조절하는 것이 대단히 어렵기 때문이다. 초기 이산화탄소의 농도를 0.2%로 일정하게 조절하기 위해서 이산화탄소와 질소의 양만을 질량유량기로 조절하기 때문에 산소의 농도를 일정하게 조절하기 어려웠다.

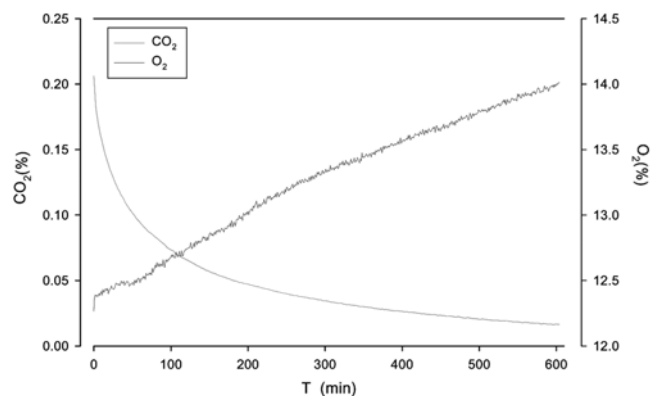


Fig. 2. Conversion of CO₂ to O₂ in the presence of chemical lung (S5KC5) composed of silicone:KO₂+Ca(OH)₂=5:5.

Table 2. Composition of chemical lung^a

No.	Ratio ^b	Silicone polymer [g]				KO ₂ in Ca(OH) ₂ ^c [g]
		Dimethyl polysiloxane	Methyltriacetoxysilane	Dibutyltin diacetate	Total	
S3KC7	3:7	1.366	0.143	0.003	1.512	3.5
S4KC6	4:6	1.812	0.196	0.005	2.013	3.0
S5KC5	5:5	2.273	0.227	0.007	2.507	2.5
S6KC4	6:4	2.737	0.303	0.008	3.048	2.0
S7KC3	7:3	3.185	0.317	0.009	3.511	1.5

basis: 5 g sample

^ainitial carbon dioxide concentration is 0.2% with nitrogen balance

^bmass ratio between silicone polymer and KO₂

^cmass ratio between KO₂ and Ca(OH)₂ is 3:7

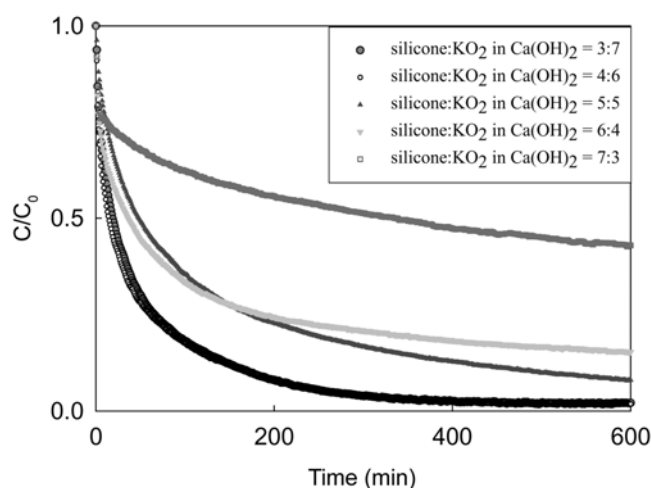


Fig. 3. CO₂ conversion reaction in the presence of different amounts of potassium superoxide in silicon polymer matrix at 0.2% CO₂ initial concentration(N₂ balance).

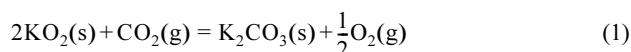
Table 3. Experimental results

No.	Ratio	Amount of CO ₂ converted ^a	k [$\frac{\text{lit}^2}{\text{mol}^2 \cdot \text{min}}$]
S3KC7	3:7	6.377	1549
S4KC6	4:6	6.261	850
S5KC5	5:5	5.241	607
S6KC4	6:4	4.119	451
S7KC3	7:3	2.314	N/A

^areaction time of 1 hr(mg of CO₂/g of chemical lung)

각기 다른 양의 초산화칼륨 존재 하의 이산화탄소의 시간에 따른 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 초산화칼륨의 양이 적은 화학 폐(S7KC3)보다 초산화칼륨의 양이 많은 화학 폐(S3KC7)가 더 빨리 이산화탄소를 산소로 전환시켰다. Table 3에 보인 바와 같이 30%의 초산화칼륨 존재 하에서는 (S7KC3) 반응 시작 후 1시간 이 지난 후의 화학 폐 단위 그래당 전환된 이산화탄소의 양은 2.3 mg 이었다. 하지만 70%의 초산화칼륨 존재 하에서는 (S3KC7) 6.3 mg으로 3배 가까운 이산화탄소가 산소로 전환됨을 알 수 있었다.

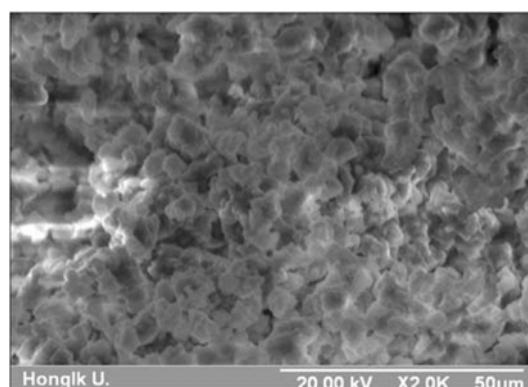
아래 식 (1)은 초산화칼륨을 이용하여 이산화탄소를 산소로 변환하는 반응을 나타낸다.



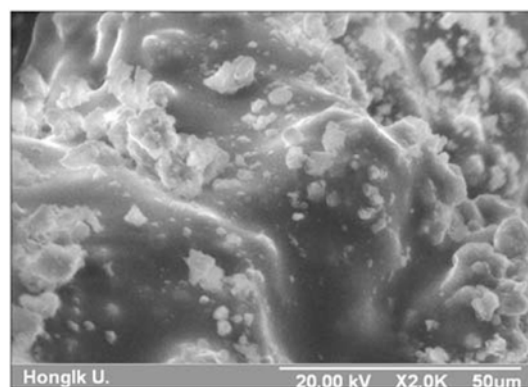
이산화탄소(속도식에서는 A로 표시)를 한계반응물로 간주하고 비가역 3차 초기 반응 속도식을 세우고 이산화탄소의 부분압력에 관하여 풀면 식 (2)를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{P_A} - \frac{1}{P_{A0}} \right) = \frac{k}{R^2 T^2} t \quad (2)$$

여기서, P_A와 P_{A0}는 이산화탄소의 시간 t에서의 부분압과 초기 부분압이고, R은 기체상수를 T는 절대온도를 나타낸다. 시간에 따른 식 (2)의 좌변을 표시하면 반응속도상수 k를 얻을 수 있다. Table 3에 초산화칼륨의 질량비에 따른 이산화탄소 전환량과 반응속도상수를 나타내었다.



(a) S3KC7



(b) S7KC3

Fig. 4. SEM of chemical lung at different ratio between silicone polymer and potassium superoxide in calcium hydroxide.

3-2. 주사전자 현미경(SEM)

Fig. 4와 같이 실리콘의 비율이 높으면 혼합되어진 초산화칼륨-수산화칼슘의 절대적인 양이 적음을 확인할 수 있다. 육안으로 볼 때 실리콘과 초산화칼륨-수산화칼슘이 마치 녹은 것과 같이 섞여 있는 것처럼 보인다. 하지만, 전자현미경으로 확대하여 살펴보면 초산화칼륨-수산화칼슘이 실리콘 고분자 표면뿐만 아니라 실리콘 내부에도 일정양이 분산되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이산화탄소는 실리콘 고분자를 통과하여 초산화칼륨과 반응하여 산소로 변환된다. 따라서 고분자에 분산된 초산화칼륨의 양을 조절함으로써 이산화탄소의 전환반응을 조절할 수 있다.

3-3. 열중량 분석기(TGA)

이산화탄소 전환반응 후 얻은 고체에 대한 열중량분석기 결과는 Fig. 5에 보였다. 반응 후 얻은 고체에 함유된 수분은 100 °C 이하에서 질량감소를 보이며 이는 전체질량의 5% 정도에 해당된다. 250 °C에서 질량의 50% 감소는 실리콘 분해 때문이다. 600 °C 이후에 발생하는 질량감소는 수산화칼슘의 분해 때문이다. 탄산칼륨(K₂CO₃)의 분해는 600 °C보다 높은 온도에서 일어나기 때문에 본 실험조건에서는 탄산칼륨의 분해는 관찰하지 못했다.

3-4. 후리에 변화 적외선 분광기(FT-IR)와 표면적 분석(BET)

이산화탄소 전환반응 전의 화학 폐는 후리에 변환 적외선 분광기를 이용하기에는 반응성이 아직도 크기 때문에 전환반응 후의 시료를

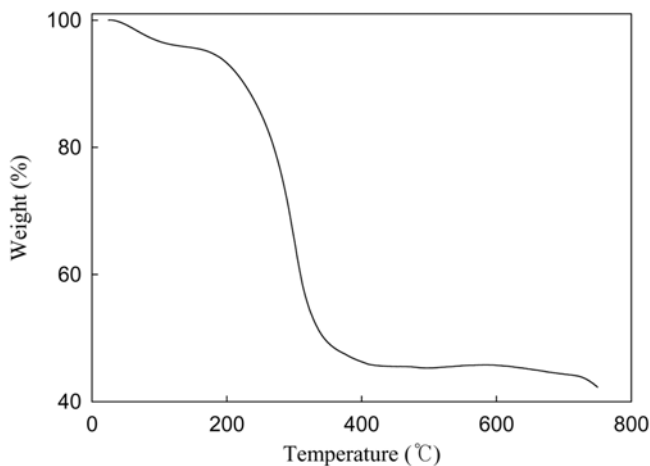


Fig. 5. TGA results of chemical lung of S5KC5.

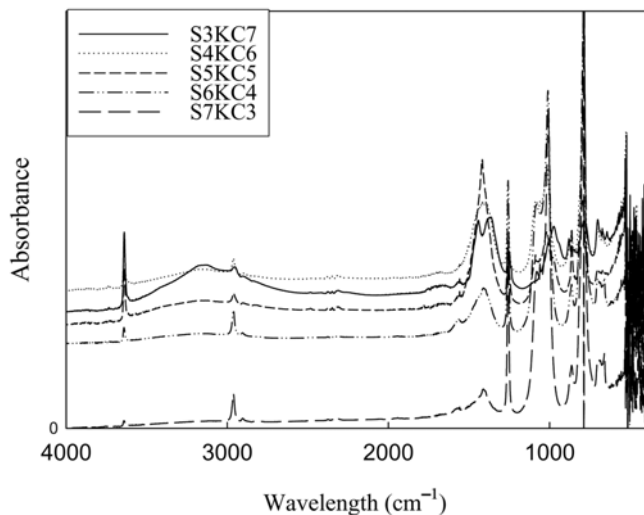


Fig. 6. Fourier transform infrared spectra of chemical lung containing different amounts of potassium superoxide in silicon polymer matrix.

감쇄전반사 셀을 이용하여 분석하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 Si-CH₂에 있는 CH₂ 결합이 1,000 cm⁻¹에서, dimethylpolysiloxane에 있는 Si-O 결합은 1,050 cm⁻¹에서 흡수되는 것을 보였다. 이산화탄소의 제거가 식 (1)에서 보인 바와 같이 산소로의 전환반응이 주된 이유겠지만, 화학 폐에 이용된 물질이 흡착의 특성을 확인하기 위해 표면적 분석을 실시하였다. 실시 결과 본 연구에 사용된 화학 폐를 표면적은 대단히 적어 무시할 만하여 흡착의 영향은 고려하지 않아도 됨을 알 수 있었다[8].

4. 결 론

밀폐된 공간의 이산화탄소를 제거하고 산소를 발생시키기 위하여 초산화칼륨과 수산화칼슘분말을 실리콘 고분자에 고르게 분산시킨 화학 폐를 이용하였다. 실리콘 고분자와 초산화칼륨-수산화칼슘 혼

합물의 가공 용이성과 이산화탄소의 전환속도를 고려한 실리콘 고분자와 초산화칼륨-수산화칼슘의 최적 혼합 비율은 7대 3이다. 초산화칼륨의 양이 증가됨에 따라 이산화탄소가 제거되는 속도가 증가한다. 이산화탄소의 산소발생 반응에서 이산화탄소를 한계반응물로 하여 초기 반응속도식을 세우면 이산화탄소 농도의 3차에 비례함을 밝혔다. 주사전자현미경 분석결과 실리콘 고분자에 분산된 초산화칼륨은 전반적으로 고르게 분산되어 있음을 알 수 있었다. 정해진 용적내의 이산화탄소를 제거하고 산소를 발생시키기 위해 필요한 초산화칼륨을 구할 수 있고, 이는 제한된 공간 내에 생활해야 하는 우주인이나 잠수부, 군인 등은 물론 일반인들의 주거공간과 대중교통수단의 공기 정화에 기여할 수 있을 것이다.

감 사

본 논문은 2008학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Wang, B., Jin, H. and Zheng, D., "Recovery of CO₂ with MEA and K₂CO₃ Absorption in the IGCC System," *Int. J. Energy Res.*, **28**(6), 521-535(2004).
2. Xu, X., Song, C., Miller B. G. and Scaroni, A. W., "Adsorption Separation of Carbon Dioxide from Flue Gas of Natural Gas-fired Boiler by a Novel Nanoporous "molecular basket" Adsorbent," *Fuel Process Technol.*, **86**(14-15), 1457-1472(2005).
3. Jang, H. T., Park, Y., Ko, Y., Lee, J. Y. and Margandan, B., "Highly Siliceous MCM-48 from Rice Husk Ash for CO₂ Adsorption," *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **3**(5), 545-549(2009).
4. Defu, L. and Jinqu, W., "The Adsorption and Separation of Ethylene, Oxygen and Carbon Dioxide Gases on Molecular Sieves," *Adsorpt. Sci. Technol.*, **20**(1), 83-90(2002).
5. Barker, R. S., Russel, M. R. and Whitmer, L. R., "Mathematical Modelling of a Four-bed Molecular Sieve with CO₂ and H₂O Collection," SAE Technical Paper Series No. 911470, 21st Int'l Conf. on Env. Systems, San Francisco, CA, July 15-18(1991).
6. Jeong, S. K., Kim, D. H., Baek, I. H. and Lee, S. H., "CO₂ Absorption in Ionic Liquids," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(3), 492-497(2008).
7. Rho, M. K. and Jurng, T.-H., "Polymer Composition for Air Purification," PCT/KR2005/003184(2005).
8. Kim, J. H., MS Thesis, Hongik University(2009).
9. McGregor, R. R., *Silicon and Their Uses*, McGraw-Hill, New York, NY(1954).
10. http://epic.kdi.re.kr/epic/epic_view.jsp?num=81594&menu=1, accessed on 19 May(2009).
11. Sathitsuksanoh, N. and Tatarchuk, B. J., "Room Temperature CO₂ Removal over K₂CO₃ on Porous Microfibrous Media," AIChE National Meeting, paper 333e, San Francisco, CA, Nov. 15(2006).