

산소 발생 폐쇄식 SCBA를 위한 이산화칼륨과 이산화탄소의 반응 정량화

양원호[†] · 송영웅

대구가톨릭대학교 산업보건학과

Quantification of Oxygen Production from Carbon Dioxide Using Potassium Superoxide for Oxygen Generating Closed-Circuit SCBA

Wonho Yang[†] · Young-Woong Song

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

This study demonstrates the use of a chemical containing potassium superoxide (KO₂) to convert carbon dioxide (CO₂) in air to oxygen (O₂). A oxygen generating closed-circuit SCBA (self contained breathing apparatus) removes carbon dioxide by a chemical reaction with potassium dioxide that consumes the carbon dioxide and produces oxygen. Considering the disasters, there is a need to develop strategies to enable the introduction of self-contained self rescuers (SCSR). The potassium superoxide reacts with the wears breath to produce oxygen and absorb

carbon dioxide. If the respiration rate of a person is 5 MET (metabolic equivalent), to say 30 L/min, at disaster such as fire, mass of potassium superoxide was evaluated as 33.3 g with yield and safety factor. Four researchers tested on a laboratory treadmill breathing through SCSRs in a closed circuit, it appears useable for 9 minutes.

Key Words: Potassium dioxide, Carbon dioxide, Oxygen generating closed-circuit SCBA

접수일: 2010년 10월 27일, 채택일: 2010년 11월 30일

† 교신저자: 양원호(경북 경산시 하양읍 금락 1리,

Tel: 053-850-3739, Fax: 053-850-3739, E-mail: whyang@cu.ac.kr)

I. 서론

WHO의 2002년 보고서에서는 질병을 야기할 수 있는 다양한 위해 요인의 기여율을 평가하였는데, 실내공기 오염물질 중 고체연료(석탄, 나무 등) 연소에 따른 실내 스모크(indoor smoke)는 전 세계적으로 질병의 2.7% 정도가 원인 이었다(WHO, 2002). 실내환경에서 재질자는 끊임없이 호흡하며, 호흡은 폐포 내에서 공기를 구성하고 있는 화학성분의 분압 현상에 의하여 이루어지는데 산소(O₂)를 취하고 이산화탄소(CO₂) 및 수증기를 배출함으로써 흡기(吸氣, inspiration air)와 호기(呼氣, expiration air)의 공기조성 성분은 변화된다. 호흡을 통해서 취해진 O₂는 혈중 헤모글로빈(Hb)과 결합하여 HbO₂로서 각 세포조직에 운반되고 조직에서 발생된 CO₂는 폐포로 운반되어 호기로 배출된다. 이때 동맥혈 내의 대략 O₂ 19%, CO₂ 47%, 정맥혈에서 대략 O₂ 13%, CO₂ 52%로 변화되어, 흡기 중의 대략 O₂ 20.94%, CO₂ 0.03%이며, 호기 중의 대략 O₂는 약 16.44%, CO₂는 3.84%이다(정영태, 1996).

환경부가 보고한 것에 따르면 CO₂의 다중이용시설 기준치인 1,000 ppm을 초과하는 경우가 많으며, CO₂ 농도가 증가시 다른 유해 공기오염물질의 농도가 높을 수 있음을 제시하고 있다(환경부, 2006). 이런 이유로 CO₂는 실내공기질의 지표로 이용되고 있다(Bishop et al., 1999). CO₂는 무색, 무취의 가스로 사람의 신진대사 과정에서 생성되어 호흡시 배출된다. CO₂는 완전연소 생성물로 가스, 케로센, 나무, 석탄, 석유 연소시 발생된다. 일반적인 실내의 CO₂ 농도는 700~2,000 ppm 범위이며 비 배기 연소장치를 사용할 경우 3,000 ppm을 초과할 수도 있다.

한편 실내환경내 화재로 야기되는 사상자들은 대부분 직접적인 화상보다는 화학섭유가 불에 타면서 내뿜는 유독가스로 인해 숨지거나 크게 호흡기가 손상된 것으로 나타났다(Donova et al., 1999). 이에 따라 전동차내 의자 등 구조물을 불에 잘 타지 않고, 유독가스를 덜 내는 소재로 바꿔야 한다는 지적도 제기되어 지하철 내장재를 교체하였으나, 화재 실험시 여전히 상당한 양의 유독가스가 화재 초기 단계에 배출되는 것으로 나타났다. 따라서, 부가적인 안전장치로 화재시 유독가스가 배포된 외부 공기에 의존하지 않고 외부로 대피하기에 필요한 3분에서 5분 정도 자체적으로 호흡할 수 있는 자가공기공급 호흡기보호구(SCBA: Self Contained Breathing Apparatus)가 요구되고 있는 실정이다(한국표준협회, 2004; 한돈희 등, 2007).

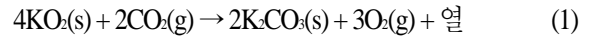
본 연구는 화재 등의 재난시 사상자들의 대부분은 직접적인 화상보다는 불에 의한 연소로 발생하는 유독가스로 인해 숨지거나 크게 호흡기를 손상된 것을 감안하여, 산소 발생장치 및 이를 이용한 산소마스크(산소발생 폐쇄식 SCBA)에 관

한 것이다. 특히 호흡시 내쉬 숨(호기) 중에 발생하는 CO₂ 및 수증기를 이용하여 산소를 발생시키는 기전을 정량화함으로써 재 호흡함이 가능한 산소발생 폐쇄식 SCBA 개발을 위한 기초 연구이다.

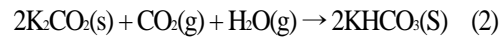
II. 연구방법

1. 반응 정량화 실험

이산화칼륨(KO₂)은 공기중 또는 호기시 발생하는 이산화탄소(CO₂)와 반응하여 산소를 발생을 발생시킬 수 있다(Lokesh와 Cunningham, 1986).



(1)의 반응 후 수증기가 존재하면 계속해서 K₂CO₃(s)는 CO₂ 및 H₂O(g)와 반응하여 KHCO₃(s)을 생성한다.



또한 공기중 또는 호기중 발생하는 수증기(H₂O)는 KO₂와 반응하여 수산화칼륨(KOH)과 산소를 발생시킨다. 동시에 CO₂가 존재할 때 KOH와 반응하여 K₂CO₃ 또는 KHCO₃ 생성한다. 산화칼슘(CaO)도 공기중 또는 호기시 발생하는 H₂O와 반응하여 O₂를 생성시킬 수 있다.



본 연구에서는 반응기전을 파악하기 위하여 Fig. 1과 반응장치를 설계하여 실험하였다. 가스실린더(gas cylinder)의 조성을 호기 공기와 비슷하게 질소(N₂) 75%, O₂ 16%, CO₂ 9%로 하였고, 유량은 1 L/min로 고정하고 질량유량 조절기(mass flow controller, MFC, PJKODIVAC Ltd.)를 이용하였다. 가스실린더에서 유출되는 CO₂는 반응기(reactor)에서 KO₂와 직접적으로 반응하도록 하였고, 반응기에는 테프론(teflon) 필터위에 KO₂ 주입하여 층(layer)을 이루도록 하였다. CO₂와 KO₂의 반응으로 발생된 O₂는 혼합기(mixing chamber)에서 혼합된 후 O₂ 측정기와 CO₂를 측정기(IAQRAE PGM-5210)를 이용하여 분석하였다. 반응에 의한 열과 습도 동시에 측정하였다. 수증기와 KO₂의 반응은 water bath를 이용하여 일정 습도를 온도에 의하여 발생시키고 그 반응 기전을 분석하였다. A社와 B社의 KO₂를 이용하였으며, KO₂는 A社는 알갱이(granule)의 형태이며 B社는 분말(powder) 형태이었다.

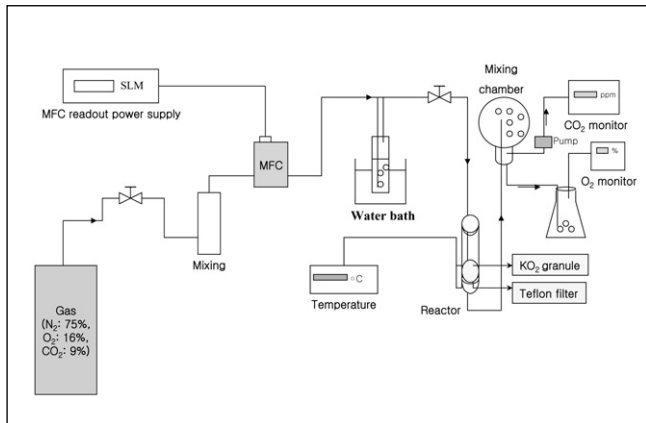


Fig. 1. Experimental setup to quantify the reaction between CO₂ and KO₂

2. 열 및 분진발생 평가

CO₂ 및 KO₂ 반응에서 발생하는 열(heat) 및 분진은 각각 온도측정기와 디지털 분진계(LD-1H 3411, Kanomax, Japan)를 이용하여 측정하였다. 발생하는 열은 직접적으로 측정할 수 있으며, KO₂ 조각 분진 및 발생 가능한 KOH fume 형태는 분진계를 이용하였다.

3. 산소발생 효율성 평가

연구방법 1 및 2의 실험결과를 이용하여 정량화한 KO₂ 등의 값을 이용하여 산소발생 폐쇄식 SCBA 형태로 사람을 대상으로 직접 산소발생 효율성을 평가하였다. 이 때 산소농도, 온도 및 습도를 동시에 측정하였다. 측정시간을 5분 이상을 측정하였으며, 실험대상자는 본 연구진으로 마스크를 최대한 얼굴에 밀착시켜 마스크 외부에서 공기 유입이 없도록 하고 breathing bag에 온도센서와 습도 센서를 넣어 산소농도, 온도 및 습도를 측정하도록 하였다(한돈희, 1999; 이기영과 양원호, 2002). 이 실험은 인간실험(human experimentation)으로 대상자에게 충분히 위험성을 사전에 설명하였고 위해성에 대해 문서로 답하게 하였고, 호흡시 이상이 있으면 즉시 실험을 멈추도록 하였다.

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

1. CO₂와 KO₂ 반응 정량화 실험

가스실린더에서 배출되어 반응기로 유입되는 유입량 1 L/min에서 100%의 CO₂를 10 g의 KO₂와 반응시켰을 때, 최고

발생 산소(O₂)는 평균 49% 최소 발생은 평균 22% 이었다. 이것은 전체 유량(1 L/min)에서 최고 발생 O₂ 49%에서는 0.49 L의 O₂, 최소 발생 22%에서는 0.22 L의 O₂가 발생된 것을 알 수 있다. 따라서 1 g KO₂는 대략 0.022~0.049 L의 O₂를 발생시킨 것으로 분석할 수 있다. 하지만 본 실험에서는 KO₂의 형태가 분말상으로 수분 발생에 의한 영김, 부분압력 감소로 KO₂와 CO₂의 반응이 완전하지 못한 결과를 나타내었다. CO₂와 KO₂의 반응으로 발생하는 열(heat)은 최고 69°C까지 증가하였다. 따라서 이 결과는 KO₂의 형태가 분말보다는 알갱이(granule)가 압력을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었으며, 이후 연구에서는 알갱이 형태의 KO₂를 이용하였다.

화재 등의 재난시 사람의 호흡률을 5 MET(metabolic equivalent, 경작업)로 가정하여 호흡률 30 L/min로 할 때, CO₂ 발생률은 대략 1.20 L/min 및 O₂ 소비율(필요량)은 대략 1.45 L/min이다. 개발된 산소발생 폐쇄식 SCBA의 지속시간(duration) 5분과 CO₂ 및 수증기의 반응 할 때, 실내환경의 표준상태인 21°C, 1기압에서 이론적인 화학양론적 필요 KO₂량은 28.2 g으로 계산되었다. 본 실험의 정량화(유량 1 LPM, KO₂ 0.94 g)에서 수득율(어떤 반응에서 생성된 생성물의 값을 이론적으로 가능한 값으로 나눈 %)을 고려하면 (Fig. 2), 5분 동안 KO₂ 1 g 당 산소 발생은 평균 0.034 L(±1.4)로 계산되었다. 18%의 O₂까지는 사람에게 영향이 비교적 없는 것을 고려할 수 있지만, 안전계수(safety factor)를 고려하여 O₂를 20%까지 증가시키려면 KO₂량을 1.18 g 정도 증가시켜야 한다. 따라서 호흡률을 고려할 때 필요 KO₂량 28.2g에 적용시키면, 산소발생 폐쇄식 SCBA의 필요한 KO₂은 33.3 g이 적정한 것으로 분석되었다. 100% CO₂와 KO₂ 반응과 비교하여 온도는 최고 28°C까지였으며, 색깔의 변화도 진한 노란색이었다. 이것은 다른 가스인 N₂ 때문인 것으로 생각한다.

앞의 결과를 바탕으로 가스실린더(호기 조건으로 N₂: 75%, O₂: 16%, CO₂ 및 수증기: 9%)에서 유출량 1 L/min, KO₂량 2.36 g (1.18 g의 2배)을 반응기에 넣고 실험한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 5분에서의 O₂%는 21.5%이었고, 10분후에는 16.3%를 나타내었다. 이 결과는 (1)의 결과와 비슷하게 2배 정도 연장 가능한 것으로 생각할 수 있다. 온도는 최고 35°C까지 증가하였다. 이 결과도 KO₂량의 2배에 의한 것으로 생각할 수 있다.

2. 분진발생 평가

본 연구에서 이용된 호흡량에 의한 공기와 반응하는 KO₂ 알갱이(granule)의 부서짐 등에 의한 분진 발생은 산소발생 폐쇄식 SCBA 이용시 직접적으로 착용자에게 건강영향을 줄 수 있기 때문에 전체반응 장치에서 최종 산소측정시 동시에 분진을 측정하였다. 그 결과를 살펴보면 미세먼지(PM₁₀)의

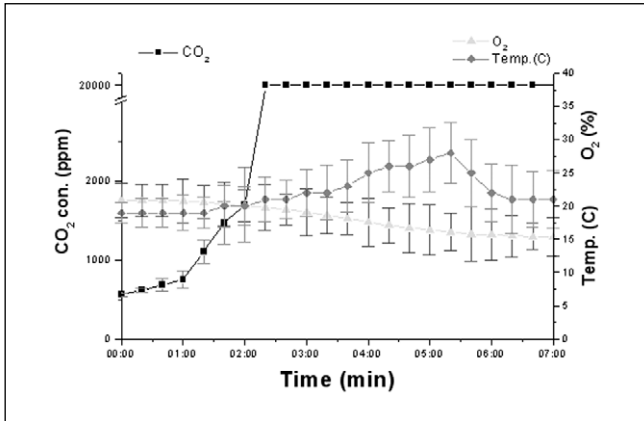


Fig. 2. Oxygen production by reaction between CO₂ and KO₂ (0.94 g)

농도는 평균 10 ug/m³ 이하를 나타내어 그 영향을 무시할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 측정 분석된 먼지의 유해성을 고려하여 산소발생 폐쇄식 SCBA 제작시 분진 제어용 필터를 사용해야 하며, 필터의 종류는 KO₂와 반응하지 않는 재질을 사용해야 할 것으로 판단하였다.

3. 산소발생 효율성 평가

결과 1과 2를 바탕으로 KO₂ 33 g으로 Fig. 4에서 보는 것과 같이 주입하고 breathing bag에서 사람이 직접 호흡하여 산소 발생을 측정하였다. 이용된 마스크는 시판되는 산소발생 효율성 평가용으로, 총 4회 실시하였다 (Fig. 5). 본 실험에 응시한 사람은 연구진에서 수행되었다. 시험결과에서 5분 기준으로 할 때 산소 % (평균 25%)가 호흡에 충분한 것으로 나타났다. 실험실 정량화보다 산소발생이 더 높은 것으로 나타났다. 이 결과는 호기시 발생하는 수증기(H₂O)의 영향으로 생각할 수 있다. 온도의 경우 최고 38°C까지 증가하였고, 상대 습도는 최고 70% 이었다.



Fig. 4. Mask for oxygen generating

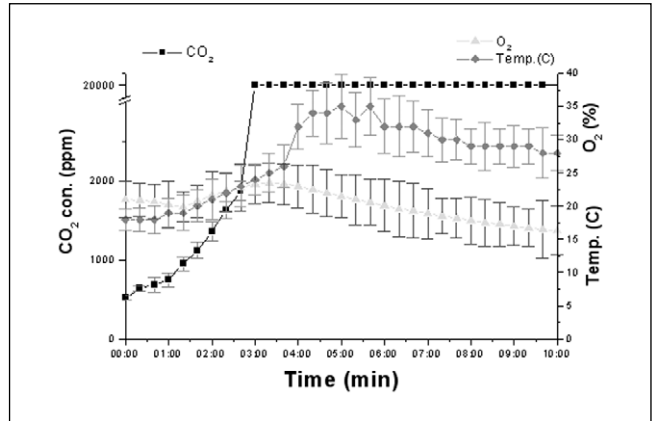


Fig. 3. Oxygen production by reaction between CO₂ and KO₂ (2.36 g)

4. 결론

본 연구는 호흡시 내쉬 숨(호기) 중에 발생하는 이산화탄소(CO₂) 및 수증기(H₂O)를 이용하여 산소를 발생기전을 분석하였다. 화재 등의 재난시 사람의 호흡률을 5MET(중노동)로 가정하여 호흡률 30 L/min로 할 때, CO₂ 발생률은 대략 1.20 L/min 및 O₂ 소비율(필요량)은 대략 1.45 L/min이다. 개발된 산소발생 폐쇄식 SCBA의 지속시간(duration) 5분과 CO₂ 및 수증기의 반응 할 때, 실내환경의 표준상태인 25°C, 1기압에서 이론적인 화학양론적 필요 KO₂량은 28.2g로 계산되었다. 본 실험의 정량화(유량 1 LPM, KO₂ 0.94 g)에서 수득율을 고려하면, 안전계수(safety factor)를 고려하여 O₂를 20%까지 증가시키려면 KO₂는 1.18 g 정도 증가시켜야 한다. 따라서 호흡률을 고려할 때 필요 KO₂량 28.2 g에 적용시키면, 산소발생 폐쇄식 SCBA의 필요한 KO₂은 33.3 g 이 적정한 것으로 분석되었다. 실험결과를 기본으로 하여 제작된 산소발생 폐쇄식 SCBA 형태에 의하면 사람의 호기에서 배출되는 공기는 KO₂ 반응부에 향류식(counter current)으로 유입되며, KO₂ 반응부에서 생성된 O₂, 미반응 CO₂, 수증기는 breathing bag(3 L)로 유입된

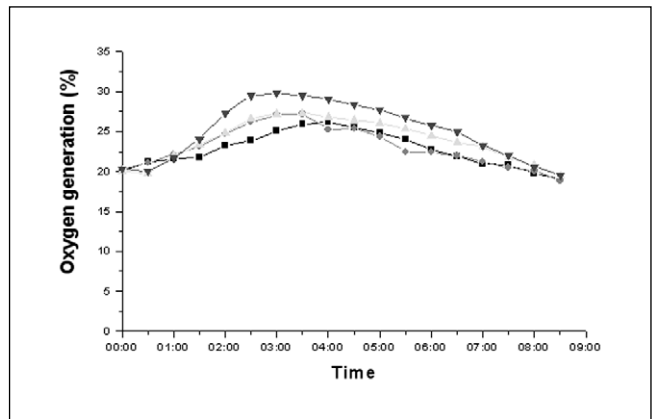


Fig. 5. Oxygen generating efficiency by mask test

다. Breathing bag에서 CO₂ 및 습기 제거부와 필터링(활성탄 필터) 통하여 착용자의 호흡기로 유입될 수 있도록 설계되었을 때 산소발생 폐쇄식 SCBA의 이용이 가능하였다.

REFERENCES

- 김강윤, 김현욱, 이 중, 이용대, 김동욱. 한국인 얼굴의 3차원 형상해석을 통한 반면형 호흡보호구용 신개념 3D test panel 개발, 한국산업위생학회 2003;13(3):217-226.
- 이기영, 양원호. NIOSH 인증 N95 호흡용보호구의 정량적 밀착도 검사, 한국산업위생학회 2002;12(3):141-145.
- 정영태. 인체해부생리학 1996, 청구문화사.
- 환경부. 다중이용시설 실내공기질 실태조사 2006.
- 한국표준협회. KS 화재 대피용 마스크 KS M 6766 2004.
- 한돈희. 호흡기보호구의 밀착도 검사와 안면규격 Panel의 개발. 한국산업위생학회지 1999; 9(1):1-13.
- 한돈희, 김동천, 강민선. 산소발생 폐쇄식 SCBA의 서비스 수명 예측 프로그램 -예비연구-. 한국산업위생학회지 2007;17(2):120130.
- Bishop PA, Lee SM, Conza NE, Clapp LL, Moore AD Jr, Williams WJ, Williams ME, Greenisen MC. Carbon dioxide accumulation, walking performance, and metabolic cost in the NASA launch and entry suit. *Aviation, Space and Environmental Medicine* 1999; 70(7): 656-665.
- Donovan KJ, McConnel AK. Do fire-fighters develop specific ventilatory response in order to cope with exercise whilst wearing self-contained breathing apparatus?. *Eur J Appl Physiol.* 1999;80:107-112.
- Lokesh BR, Cunningham ML. Further studies on the formation of oxygen radicals by potassium superoxide in aqueous medium for biochemical investigations. *Toxicology Letters* 1986;34: 75-84.
- WHO. The world health report, Reducing risks promoting healthy life 2002.