

## 활성탄 성능시험에서의 사염화탄소 대체물질 연구

정용준  
국방기술품질원

### A Study of Carbon Tetrachloride Substitutes in the Activated Carbon Performance Test

Yongjun Jeong  
Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 본 연구에서는 활성탄 성능시험에서의 사염화탄소 대체물질에 관한 연구를 수행하였다. 오존층 파괴, 건강 유해성과 같은 문제가 제기됨에 따라 사염화탄소 사용은 제재를 받게 되었고 여러 대체물질이 제시되었다. 그중에서 사이클로헥세인은 여러 물성의 유사성을 인정받아 해외 각국의 기준서에 대체물질로서 제시된 바 있으나 국내에서는 현재까지 두 물질의 상관관계에 대한 연구자료를 제시한 바가 없다. 이에 본 연구에서는 사이클로헥세인이 국내 환경에서도 사염화탄소 대체물질로서 적용 가능한지를 검증하였으며 군 K5 정화통용 입상형 활성탄을 활용하여 파과시간 비교실험을 수행하였다. 사이클로헥세인의 대체 가능성은 사염화탄소와 사이클로헥세인의 가스 발생 용이성과 농도 조절 용이성 등을 비교하는 방식으로 검증되었다. 실험결과 사이클로헥세인 가스는 사염화탄소 가스보다 단시간에 유입 농도를 형성하였으며 형성된 농도의 변동성도 작았다. 한편, 입상형 활성탄을 이용하여 각 물질의 파과시간을 비교하고 파과비를 도출한 시험에서는 사염화탄소의 파과시간이 사이클로헥세인의 그것보다 1.36배 길다는 결과가 도출되었다. 본 연구의 결과는 국방기술품질원에서 수행 중인 실험과 유사한 조건에서 수행되는 실험들에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** This study was undertaken to identify carbon tetrachloride substitutes for the activated carbon performance test. Cyclohexane has been suggested as a replacement in some countries' standards. However, no comparative study has been performed in Korea on these two substances. Therefore, in this study, we investigated whether cyclohexane could be used as an alternative and performed a comparative experiment on breakthrough times using granular activated carbon for use in a military K5 canister. The substitutability of cyclohexane was verified by comparing carbon tetrachloride and cyclohexane for vapor generation. Cyclohexane formed a vapor more rapidly than carbon tetrachloride, and vapor concentration showed little variability. When granular activated carbon was used to compare breakthrough times, the breakthrough time of carbon tetrachloride was 1.36 times greater than that of cyclohexane. It is believed that the results of this study can be applied to experiments performed under conditions similar to the one being conducted in DTaQ.

**Keywords** : Carbon Tetrachloride, Cyclohexane, Activated Carbon Performance Test, Replacing Compound, Breakthrough Time, Breakthrough Ratio

---

\*Corresponding Author : Yongjun Jeong(Defense Agency for Technology and Quality)

email: yongjunjeong@dtaq.re.kr

Received June 15, 2022

Accepted August 3, 2022

Revised July 12, 2022

Published August 31, 2022

## 1. 서론

활성탄은 목재류, 갈탄, 야자수 등 탄소질 원료를 활성화하여 만든 다공성 탄소를 말하며 목적에 따라 분말형, 입상형, 펠릿형 등으로 제조된다[1]. 다공성 구조가 발달된 활성탄은 1 g 당 1000 m<sup>3</sup> 이상이라는 넓은 표면적을 특징으로 한다[2]. 넓은 표면적으로 인해 활성탄은 높은 흡착 성능을 보이며 다양한 분야에서 불순물과 오염물 제거를 위해 활용되고 있다. 특히 민수 및 군사용 방독면 정화통, 군용 여과기류, 군용 화생방보호의 등 각종 독성물질로부터 인체를 보호하는 장비에도 활성탄은 다양한 형태로 활용된다.

활성탄의 품질은 다양한 시험을 통해 평가하며 그중에서도 흡착 성능은 활성탄이 흡착할 수 있는 용량을 나타내는 지표로서 활성탄의 성능을 직접 나타내는 주요 기준 중 하나이다. 활성탄 흡착 성능은 사염화탄소, 요오드, 벤젠 등의 물질을 이용하여 측정하며 그중에서도 사염화탄소는 활성탄 성능을 측정하는 가장 대표적인 물질로 사용돼왔다[3]. 이 때문에 사염화탄소는 활성탄이 사용된 정화통, 필터류 등의 제조 산업 현장에서도 시험용 용매로서 널리 사용된 바 있다.

이처럼 사염화탄소가 활성탄 성능시험용 물질로 활용된 것은 고농도 형성 용이성, 비폭발성, 불연성, 소수성과 같은 고유 특성들이 시험에 최적화된 것으로 평가받았기 때문이다[4]. 그러나 1989년 발효된 몬트리올 의정서에 사염화탄소가 오존층 파괴물질로 명시되면서 사염화탄소의 사용과 생산은 강력한 제재를 받게 되었고 대체물질에 대한 필요성이 증가하게 되었다. 더욱이 암 유발 가능성, 간 손상 가능성 등 사염화탄소의 인체 유해성은 사염화탄소 대체물질에 대한 수요를 더욱 증가시켰다.

사염화탄소가 사용되었던 다양한 분야에서는 각각 대체물질을 찾기 위한 연구가 활발하게 수행되었다. 활성탄 성능시험에서도 시험 용매인 사염화탄소를 대체하기 위해 몇 가지 유기화합물을 연구하였으며 그중에서도 사이클로헥세인과 부탄에 관한 연구가 가장 활발하게 수행되었다. 부탄은 상대적으로 유해성이 낮고 오존층을 파괴하지 않아 활성탄의 활성도를 측정하기 위한 대체물질로 ASTM D 5742 문서에 명시된 바 있으나[5] 가연성, 폭발성의 위험 특성이 있다. 사이클로헥세인 역시 오존층을 파괴하지 않으며 사염화탄소보다 유해성이 낮은 것으로 알려져 있다. 더욱이 사이클로헥세인의 증기압, 끓는점, 몰 질량과 같은 물성값은 사염화탄소의 그것과 유사하여 사이클로헥세인은 부탄과 비교하면 사염화탄소와

더욱 유사한 물질로 알려져 있다[6,7]. 이러한 특성으로 인해 사이클로헥세인은 미국 국립직업안전위생연구소(NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health)의 STP[8]와 UN 환경계획(UNEP Fact Sheet No 26)[9] 등 다양한 기준서에 정화통, 필터류의 성능시험을 위한 대체물질로 명시된 바 있다.

Lee A. Greenawald 등은 2020년 발표한 논문에서 정화통 시험용 물질 후보군을 고찰하고 적합성에 대한 의견을 제시하였다[10]. 해당 논문에서는 시험용 유기화합물 선정에 있어 가장 중요한 요소를 증기압으로 보았다. 이는 적합한 증기압을 가진 물질만이 활성탄과 적절한 인력으로 결합하고 결과적으로는 유효한 파괴시간을 형성하여 재현성 있는 결과를 보장하기 때문이다. 논문에서는 이처럼 까다로운 증기압 조건을 가장 잘 만족하는 물질이 사이클로헥세인이라 판단하였으며 부탄은 증기압이 높아 시험물질로 사용하는 것이 적합하지 않다고 결론을 내렸다.

해외 각국에서도 여러 후보군 중 사이클로헥세인을 대체물질로 선정하여 연구를 수행하고 기준서를 작성하였다. 유럽에서는 사염화탄소 사용 중단에 따라 호흡 보호구에 대한 성능 기준을 사이클로헥세인으로 변경하여 제시하였으며 사이클로헥세인 사용 시 파괴시간 대비 사염화탄소 사용 시 파괴시간인 파괴비를 1.14로 제시한 바 있다[4]. 일본 역시 호흡 보호구에 대한 성능 기준을 사이클로헥세인으로 변경하여 제시한 바 있으며 제시한 파괴비는 1.0이었다[4]. 파괴비는 사염화탄소를 사용하지 않으면서도 사염화탄소 사용 시의 파괴시간을 도출할 수 있는 주요 수치이다. 사이클로헥세인으로 수행한 실험에서 얻어진 파괴시간에 단순히 파괴비를 곱해주는 것만으로 사염화탄소 사용 시 파괴시간은 어땠는지 추측할 수 있으므로 유해물질을 사용하지 않으면서도 성능시험을 수행할 수 있는 것이다.

이처럼 국외에서는 활성탄 성능시험용 사염화탄소의 대체물질로 사이클로헥세인을 제시하고 두 물질 간의 파괴시간을 비교하여 파괴비를 제시하였으나 국내에서는 두 물질의 연관성에 관한 결과를 제시한 바가 없다. 일례로 활성탄이 사용된 방독마스크 성능 기준 고시는 2008년 보호구 성능검정 규정 고시[11]에서 보호구 안전인증 고시[12]로 변경되었으며 이때 시험물질 또한 사염화탄소에서 사이클로헥세인으로 변경되었다. 이처럼 고시가 변경되며 시험가스의 종류도 변경되었지만, 마스크의 종류가 함께 변경되며 두 물질 간의 직접적인 연관성은 확인할 수 없었다. 즉, 보호구 성능검정 규정 고시에서는

방독마스크 시험을 형태에 따라 구분(직결식, 소결식 등) 하였으나 보호구 안전인증 고시에서는 사용 농도에 따라 구분(고농도, 저농도 등)하였기 때문에 두 물질의 직접적인 연관성을 파악하는 것은 불가능하였다.

본 연구에서는 활성탄 성능시험용 사염화탄소의 대체 물질을 국내 환경에서 검증하고 그것의 파과비를 확인하고자 하였다. 이를 위해 앞서 언급한 사례들을 종합하여 사이클로헥세인을 대체 후보물질로 선정하였으며 가스 형성 용이성 및 농도 유지 경향 등과 같은 특성을 사염화탄소와 직접 비교하여 대체 가능성을 확인하였다. 또한, 군용 K5 정화통에 사용되는 입상형 활성탄을 이용하여 각 물질의 파과시간을 측정 및 비교하는 방식으로 파과비를 도출하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서는 삼전순약공업으로부터 구매하여 국방 기술품질원 내에 보관 중인 사염화탄소(Carbon tetrachloride 99%, Extra pure, CAS 등록번호 : 56-23-5)를 기준물질로 사용하였다. 대체물질은 J.T.Baker로부터 구매한 사이클로헥세인(Cyclohexane 99.5%, HPLC grade, CAS 등록번호 : 110-82-7)을 사용하였다. 질소 가스(N50, 99.999%)는 (주)스페셜가스로부터 구매하여 사용하였으며 해당 가스는 가스 발생 및 농도 조절과 분석 장비 운용을 위한 용도로 사용하였다. 파과비 도출을 위한 표준 활성탄 시료는 군 K5 정화통용 입상형 활성탄을 SG생활안전으로부터 전달받아 사용하였다.

### 2.2 실험방법

사이클로헥세인은 사염화탄소와의 물성 유사성이 부탄보다 뛰어나다. 특히 끓는점, 증기압과 같이 가스 형성에 중요한 물성들의 유사성이 높아 가스 형성 경향과 가스의 거동이 유사할 것으로 기대되며, 이에 해외 각국에서는 활성탄 성능시험에 사용되는 사염화탄소의 대체물질로서 사이클로헥세인을 도입하였다. 따라서 본 연구에서도 사염화탄소 대체 후보물질로 사이클로헥세인을 우선 선정하였으며 가스 형성 용이성 및 농도 유지 안정성 등을 검토하고자 가스 발생 장치를 이용하여 직접 형성한 가스를 통해 사이클로헥세인의 적합성을 검증하였다. 본 연구에서는 가스 형성을 위해 액체 상태의 사염화탄

소 또는 사이클로헥세인에 질소 기체를 직접 통과시키는 버블링 방식의 가스 발생 장치를 사용하였다.

사염화탄소 대체물질로서의 사이클로헥세인 적합성을 검증한 후에는 K5 정화통용 입상형 활성탄에 각 가스를 직접 통과시켜 파과시간을 비교하는 방식으로 파과비를 도출하였다. 이를 위해 본 연구에서는 아래 Fig. 1에 제시된 모식도와 같은 실험 챔버를 구성하였다.

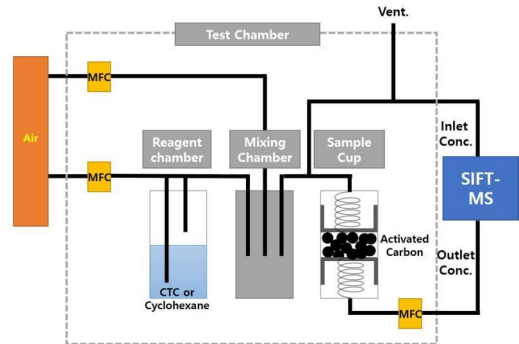


Fig. 1. Schematic Illustration of the Experimental Equipment

실험 챔버 내에 위치한 시약부에는 액상의 사염화탄소 또는 사이클로헥세인이 담기며 질소 가스가 유기화합물 액체를 직접 통과함으로써 버블링 방식에 의해 가스가 형성된다. 이렇게 형성된 가스는 혼합부로 이동하여 질소 가스와 혼합되며 요구 농도를 형성하기 위해 적정 비율로 희석된다. 본 연구에서는 실험을 위한 유입 가스 농도를 800 ppm으로 설정하였다.



Fig. 2. Images of Granular Activated Carbon and the Sample Cup

희석된 가스는 유입 농도 측정을 위해 분석 장비로 유

입되며 파과시간 측정을 위해 입상형 활성탄이 충전된 실험컵으로 유입된다. 아래 Fig. 2에서 보는 바와 같이 실험컵에는 K5 정화통용 입상형 활성탄 2 g이 충전되며 같은 규격의 용수철을 사용하여 공극을 일정하게 유지하고자 하였다. 실험에 사용되는 활성탄은 수분 제거 및 노화 상태 균일화 등을 위해 실험 수행 전 50 °C 오븐에서 하룻밤 동안 건조되었다.

실험컵을 통과한 유기화합물 가스는 유출 농도 측정을 위해 분석 장비로 유입된다. 실험이 진행됨에 따라 유기화합물에 대한 활성탄의 흡착 능력은 저하되며 유출 농도는 지수함수로 증가하게 된다. 본 연구에서는 파과시간을 판단하기 위한 파과농도를 유입 농도의 4 %인 32 ppm으로 설정하였다.

본 연구에서 사용된 실험 조건은 아래 Table 1과 같다. 실험 조건은 국방기술품질원에서 기존에 수행하던 사염화탄소 성능시험 조건을 반영하여 설정하였다.

Table 1. Experimental Conditions

Test Material	Carbon tetrachloride Cyclohexane
Vapor Flow Rate	1 L/min
Vapor Concentration	800 ppm
Breakthrough Concentration	32 ppm
Test Temperature	32.5 °C

본 연구에서는 유기화합물 가스의 농도 측정을 위해 선택이온흐름관질량분석기(Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry)(Voice200 Ultra, Syft)를 사용하였다. 해당 장비는 유입과 유출 라인 모두에 연결되어 실시간으로 유기화합물 가스의 농도를 관찰하는 용도로 사용되었다. 본 연구에서는 장비의 신뢰 범위를 고려하여 유입 가스 농도 분석에 한해 가스 희석 시스템을 적용하였으며 유입 농도는 100배 희석되어 측정되었다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 사이클로헥세인 적합성 검토

본 연구에서는 활성탄 성능시험에서의 사염화탄소 대체물질로 사이클로헥세인을 선정하였다. 사이클로헥세인은 국외의 각종 기준서와 연구 결과를 참조하여 선정되

었으나 실제 적용을 위해서는 국내 환경에서의 실험결과가 필수적으로 제시되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 사이클로헥세인 가스를 발생시켜 가스 형성 용이성, 농도 유지 안정성과 같은 특성을 사염화탄소와 비교하였다.

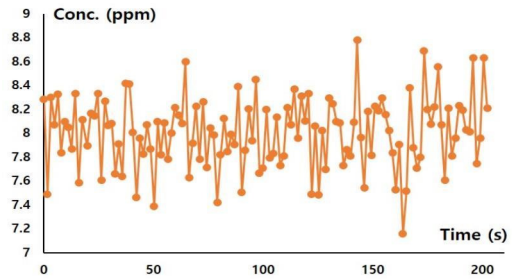


Fig. 3. Inlet Concentration of Carbon Tetrachloride

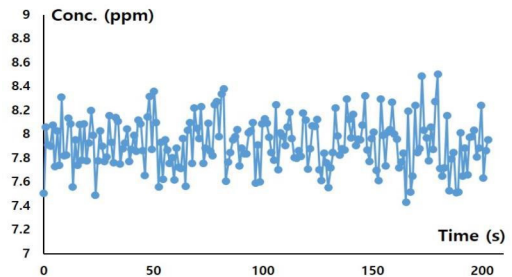


Fig. 4. Inlet Concentration of Cyclohexane

실험결과 사이클로헥세인 가스는 사염화탄소 가스보다 단시간에 유입 농도를 형성하였으며 형성된 농도의 변동성도 작았다. 상단에 나타난 Fig. 3과 Fig. 4는 각각 사염화탄소와 사이클로헥세인을 이용하여 유입 농도 800 ppm(각 Fig에서는 100배 희석된 농도로 표시)을 형성하였을 때의 농도 변화 양상을 약 200초간 관찰한 결과이다. Fig. 3에서 사염화탄소 가스는 800 ppm을 기준으로 안정적인 농도를 유지하고 있으나 최저 농도가 약 720 ppm, 최고 농도가 약 880 ppm으로 농도의 순간적인 변동성이 비교적 큰 것으로 파악되었다. Fig. 4의 사이클로헥세인 역시 800 ppm을 기준으로 안정적인 농도를 유지하였으며 최저 농도는 약 740 ppm, 최고 농도는 약 850 ppm으로 사염화탄소와 비교하면 순간적인 변동성이 작은 것을 알 수 있다.

이를 통해 사이클로헥세인 가스의 발생 및 농도 유지 안정성 등을 확인할 수 있었으며 사이클로헥세인의 사용성이 사염화탄소의 그것과 비교하여 동등 이상임을 예측할 수 있었다.

### 3.2 파과시간 비교

본 연구에서는 사염화탄소와 사이클로헥세인의 파과시간 비교를 위해 유입 가스 농도 800 ppm에서 각 물질의 가스를 이용하여 파과시간을 측정하였다. 파과시간은 활성탄이 충전된 실험컵에 가스가 유입되는 시점부터 실험컵을 통과한 유출 가스의 농도가 파과농도인 32 ppm에 도달하는 지점까지의 소요시간을 의미한다. 실험 초기에는 활성탄의 흡착 능력으로 인해 유출 가스의 농도가 0 ppm을 유지하나 실험이 진행됨에 따라 활성탄의 흡착 능력은 저하되고 유출 가스의 농도는 지수함수 형태로 급증한다.

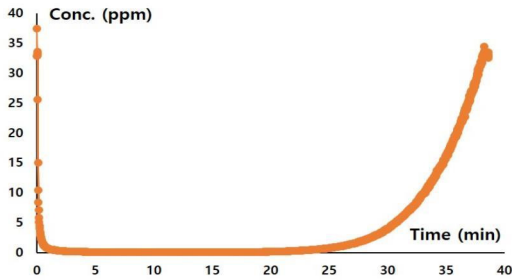


Fig. 5. Breakthrough Curve of Carbon Tetrachloride

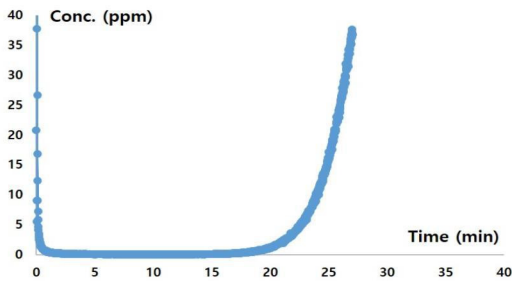


Fig. 6. Breakthrough Curve of Cyclohexane

상단의 Fig. 5과 Fig. 6은 각각 사염화탄소와 사이클로헥세인 가스를 실험컵에 통과시킨 후 유출 가스의 농도 변화를 관찰한 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이 두 물질 모두에서 시간이 지남에 따라 유출 가스 농도가 지수함수 형태로 급증함을 알 수 있다.

본 연구에서는 두 물질 간의 파과시간 비교를 위해 각 물질당 10회씩 반복 실험을 수행하였다. 파과시간 비교 실험의 결과는 Table 2와 Fig. 7에 나타내었다. Table 2의 결과는 파과시간을 오름차순으로 정리한 것이다. Table 2의 상대 표준편차(Relative Standard Deviation)는 표준편차를 평균으로 나뉜 값이며 측정

단위가 서로 다른 자료를 비교할 때 상대적인 산포도를 비교하기 위하여 사용하는 수치이다. 상대 표준편차의 통상적 기준인 0.1과 비교하면 본 실험결과의 재현성은 양호한 것으로 판단된다. 더욱이 두 물질 간의 상대 표준편차가 유사하므로 각 물질로부터 얻어진 실험결과는 상호 간에 통계적 유사성이 존재한다고 판단할 수 있다.

Table 2. Raw Data of the Breakthrough Time Comparison Test

	Breakthrough Time (s)	
	Carbon Tetrachloride	Cyclohexane
1	1905	1448
2	1958	1472
3	2073	1580
4	2110	1594
5	2228	1608
6	2292	1645
7	2341	1710
8	2449	1767
9	2490	1806
10	2580	1866
Average	2242.6	1649.6
Standard Deviation	228.8	137.7
Relative Standard Deviation	0.102	0.083

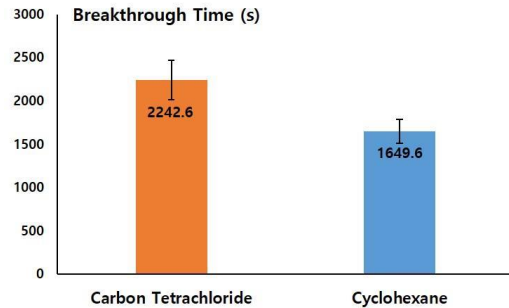


Fig. 7. Comparison of Breakthrough Time. The error bars indicate standard deviation (n=10).

본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 파과비를 도출하였다. 파과비는 사염화탄소 사용 시의 파과시간을 사이클로헥세인 사용 시의 파과시간으로 나눈 값이다. 즉, 사이클로헥세인을 이용하여 성능시험을 수행할 때의 파과시간을 1이라고 가정했을 때, 사염화탄소를 이용한 성능시험에서의 파과시간 값을 표현한 것이 파과비라 할

수 있다. 아래 Table 3에는 본 연구에서 도출한 파과비와 유럽과 일본의 기준서에 명시된 파과비를 비교하여 명시하였다[4].

Table 3. Comparison of Breakthrough Ratio between the Study and Other Countries' Standards

	Breakthrough Ratio
This Study	1.36
Europe	1.14
Japan	1.00

본 연구에서 도출된 파과비는 국외 기준서의 값과 다소 차이를 보이며 이 차이는 다양한 원인으로부터 비롯된 것으로 보인다. 우선 국외 기준서가 정화통 완제품을 대상으로 한 것에 반해 본 연구에서는 정화통 내부의 활성탄만을 대상으로 실험을 수행하였다. 따라서 정화통 구조, 부속품 및 활성탄 공극에 의한 복합적인 영향이 차이를 발생시켰을 수 있다. 더욱이 정화통에 사용되는 활성탄 규격은 국가마다 다를 수 있으므로 활성탄의 크기와 성분 등의 조건에 따라라도 다른 결과가 도출될 수 있다. 마지막으로 상이한 파과농도가 상이한 결과를 도출하였을 수 있다. 본 연구에서 사용한 파과농도는 유입 농도의 4 %인 32 ppm이었으나 국외 기준서에서는 유입 농도와 관계없이 10 ppm을 파과농도로 사용하였다. 본 연구에서는 국방기술품질원에서 기준에 수행하던 실험 조건을 반영하여 실험을 수행하였으므로 국외 조건과는 다소 차이가 존재하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 활성탄 성능시험용 사염화탄소의 대체 후보물질인 사이클로헥세인에 관한 연구를 수행하였다. 각 가스의 거동을 비교하여 사이클로헥세인이 국내 환경에서도 대체 시험물질로서 적합함을 확인하였으며 군 K5 정화통용 입상형 활성탄에 각 가스를 직접 투과시켜 파과시간을 비교함으로써 사염화탄소와 사이클로헥세인의 파과비를 도출하였다.

본 연구에서 얻은 파과비(1.36)는 국내에서 처음 제시된 값이지만, 국외(유럽 : 1.14, 일본 : 1.00)에서는 기준에 제시된 바가 있다. 본 연구와 국외의 사례가 다소 차이를 보이는 것은 복합적인 요인이 작용하였기 때문으로

보인다. 국외 사례와는 달리 본 연구에서는 정화통 완제품이 아닌 활성탄만을 취하여 실험하였으며 파과농도의 기준 또한 다르게 설정하였다. 더욱이 활성탄의 성분과 크기가 나라마다 다를 수 있으므로 직접적인 비교는 불가능하다 할 수 있겠다.

따라서 엄격한 기준에서는 본 연구에서 얻은 파과비를 본 연구와 동일한 조건에서만 적용할 수 있다. 즉, 본 연구에서 사용한 군 정화통용 활성탄과 실험 조건을 사용한 경우에 한해 1.36이라는 파과비를 적용할 수 있는 것이다. 본 연구는 이러한 점에서 한계점을 가지며 다양한 산업 현장에서 범용적으로 활용될 수 있는 파과비를 도출하기 위해서는 향후 여러 활성탄과 실험 조건에서 추가 실험들을 수행하여야 한다. 다양한 조건에서 수행한 실험결과들을 수집하고 분석하여 범용적으로 적용 가능한 파과비를 도출할 필요가 있는 것이다.

또한 향후 연구에서는 흡착 모델을 이용하여 이론에 근거한 파과비를 도출할 필요가 있다. 실제 실험결과는 이론에서 예측한 값과 차이가 있으나 파과비의 거동과 적용 범위를 사전에 예측하기 위해서는 이론에 근거한 예측값을 도출하여 기준으로 삼아야 한다. 이러한 연구는 실험에 대한 예상값을 제공할 뿐만 아니라 기준에 수행된 실험결과의 신뢰성을 확보하는 데 중요한 역할을 수행한다.

이러한 한계점에도 불구하고 본 연구는 사이클로헥세인과 사염화탄소의 파과비를 국내에서 처음으로 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 특히 국방기술품질원에서 기준에 수행하던 실험 조건을 기반으로 한 유사 실험들에서는 본 연구에서 얻은 결과를 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] Global Market Trend Report, p.16, Korea Innovation Foundation, pp.1, 2021.
- [2] M. A. Tadda, A. Ahsan, A. Shitu, M. ElSergany, T. Arunkumar, B. Jose, M. A. Razzaque, N. N. NikDaud, "A review on activated carbon: process, application and prospects", *Journal of Advanced Civil Engineering Practice and Research*, Vol.2, No.1, pp.7-13, 2016.
- [3] O. A. Babatunde, S. Garba, Z. N. Ali, "Surface Modification of Activated Carbon for Improved Iodine and Carbon Tetrachloride Adsorption", *American Journal of Chemistry*, Vol.6, No.3, pp.74-79, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.chemistry.20160603.02>



- [4] E. S. Moyer, S. J. Smith, G. O. Wood, "Carbon Tetrachloride Replacement Compounds for Organic Vapor Air-Purifying Respirator Cartridge and Activated Carbon Testing-A Review", *American Industrial Hygiene Association*, Vol.62, No.4, pp.494-507, 2001.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/15298660108984652>
- [5] Standard Test Method for Determination of Butane Activity of Activated Carbon, p.4, ASTM International, pp.1, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1520/D5742-16>
- [6] N. Nevers, Physical and Chemical Equilibrium for Chemical Engineers, p.384, John Wiley & Sons, Inc., pp.303-305, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118135341>
- [7] G. Scatchard, S. E. Wood, J. M. Mochel, "Vapor-Liquid Equilibrium. IV. Carbon Tetrachloride-Cyclohexane Mixtures", *Journal of the American Chemical Society*, Vol.61, No.11, pp.3206-3210, 1939.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01266a066>
- [8] Determination of CBRN Organic Vapor(Cyclohexane) Service Life Test, Air-Purifying Respirators Standard Test Procedure(STP), p.11, National Institute for Occupational Safety and Health, pp.1-11, 2005.
- [9] Alternatives for Carbon Tetrachloride - CCl<sub>4</sub>(CTC) in Laboratory and Analytical Uses, p.4, United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics, pp.4, 2010.
- [10] L. A. Greenawald, C. J. Karwacki, F. Palya, M. A. Browe, D. Bradley, J. V. Szalajda, "Conducting an Evaluation of CBRN Canister Protection Capabilities Against Emerging Chemical and Radiological Hazards", *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol.17, No.10, pp.480-494, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1798452>
- [11] Notice of Protective Equipment Performance Test Regulations, p.194, Ministry of Labor, pp.132, 2004.
- [12] Notice of Protective Equipment Safety Certification, p.257, Ministry of Employment and Labor, pp.119, 2020.

정 용 준(Yongjun Jeong)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한국과학기술원 생명화학공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 한국과학기술원 생명화학공학과 (공학석사)
- 2016년 10월 ~ 2019년 10월 : 한미약품 연구센터 연구원
- 2020년 9월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 신뢰성, 화생방물질, 화학공학