

신뢰성 분석을 통한 침투성보호의 저장수명에 대한 연구

김도현, 권미현, 배만재*
국방기술품질원

A Study on Shelf-life for the Permeable Protective Suit using Reliability Analysis

Do Hyun Kim, Mi Hyun Kwon, Man Jae Bae*
Defense Agency for Technology and Quality

요약 본 연구에서는 시험 데이터와 저장화생방장비·물자 신뢰성평가(CSRP: Chemical materiel Stockpile Reliability Program, 이하 CSRP) 평가 결과를 이용하여 침투성보호의 저장수명을 분석하였다. 침투성보호의 화생방전을 대비하여 부대에서 장기 저장되고 있으며, CSRP를 통하여 보관 및 폐기가 결정되고 있다. 군에서의 효율적인 관리를 위해서 수명에 대한 연구가 필요하다. 저장수명 분석을 위하여 CSRP 업무에서 실시된 실제 시험데이터를 이용하여 분석하였다. 부적합의 주요 요소로 판단된 각 시험 간의 연관성을 분석하였다. 또한, 각 시험 항목별로 저장 기간에 따른 경향성을 분석하고 회귀분석을 통해 수명을 추정하여 개발 당시 설정된 수명과 비교하였다. 침투성보호의 수명을 결정짓는 요소로 포장재 누출시험과 사염화탄소 흡착성능 시험, 화학작용제 방호성능시험으로 선정하고 분석하였다. 시험간의 상관관계는 없었으나, 저장 기간에 따른 경향성은 확인되었다. 시험 항목별로 구분하였을 때, 저장수명이 가장 짧은 것으로 분석된 시험 항목은 포장 누출 시험으로 6.44년으로 추정되었다. 본 연구를 통하여 설정된 저장수명의 유효성 및 타당성을 검증하여 향후 화생방 물자의 관리에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract In this study, the shelf-life of a permeable protective suit was analyzed using test data and CSRP results. The CBRN (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear defense) group had stored the suit for a long time. Experimental data were used to determine shelf-life. The correlation among tests, which is the main factor contributing to nonconformity, was analyzed. In addition, the tendency according to the storage period was analyzed for each test, and the shelf-life was analyzed using regression analysis and compared with the shelf-life at the time of development. The factors that determined the shelf-life of permeable protective suits were package leakage, carbon tetrachloride adsorption performance, and ability to protect against chemical warfare agents. Storage period tended to be correlated with suit shelf-life, but no correlation was found for any other test. When the tests were classified by test items, the test analyzed to have the shortest shelf-life was estimated to be 6.44 years due to package leakage. These results on shelf-life are expected to contribute to the management of CBRN materials.

Keywords : CSRP, Shelf-Life, Permeable Protective Suit, Chemical Protective Suit, Reliability

*Corresponding Author : Man Jae Bae(Defense Agency for Technology and Quality)

email: mjbae@dtqaq.re.kr

Received July 20, 2023

Accepted August 10, 2023

Revised August 8, 2023

Published August 31, 2023

1. 서론

1.1 장기 저장 화생방장비물자

화생방물자는 적군의 화학 공격 및 테러전에 대비해 생명을 보호할 수 있는 방어수단으로 군의 생존과 전투력 유지에 필수적인 무기체계이다. 이처럼 전투력 보장을 목적으로 비축 및 저장된 화생방물자는 오랜 기간 저장되어야 하며, 장기 저장 중에 화생방물자는 화학성분의 변화나 물성의 저하로 신규 제품의 성능을 유지하지 못하고 열화가 일어난다[1]. 이러한 이유로 화생방물자들은 품목특성에 따라 저장수명이 설정되어 있으며, 저장수명이 초과되면 성능 발휘 여부를 평가하고 계속 저장을 하거나 폐기 등으로 관리하고 있다. 미군은 70년대부터 화생방신뢰성 평가를 실시하였고, 한국에서는 국방기술품질원 주관으로 06년부터 장기저장되어 있는 화생방 품목들을 평가, 관리하고 있다. 그중에서도 화생방 보호의는 방독면과 함께 개인보호 체계에서 핵심적인 역할을 담당하고 있으며 화생방 공격 위협에 대비하여 아군의 생존 가능성을 높이고 전투력을 보전할 수 있는 중요한 수단이라고 할 수 있다[2]. 이에 본 연구에서는 침투성 보호의의 저장 신뢰성 결과를 종합하여 저장 기간에 따른 경향성을 분석하고 회귀분석, 신뢰수준 등을 이용하여 저장수명을 추정하였다. 또한, 부적합을 결정 짓는 시험 항목을 식별하여 주요 시험인자간에 어떤 상관관계를 가지고 있는지 분석하고자 하며, 이를 통해 저장시험평가 기준과 설정된 저장수명의 유효성 및 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본론

2.1 침투성 보호의 개요

화생방 상황 및 테러 목적으로 사용되는 화학작용제 중에서 신경작용제(nerve agents)와 수포작용제(vesicating agents)의 경우 액체상태로 피부에 오염될 경우 극소량에 의해서도 사망에 이를 수 있다[3]. 침투성 보호의는 화생방전 하에서 화학작용제(신경, 수포)가 피부에 침투되는 것을 보호하기 위하여 사용되며[4] 공기 중에 각종 화학작용제를 물리적으로 차단하는 외피와 흡착작용을 하는 내피로 구성되어 있으며, 작용원리는 다음과 같다. 먼저 외피는 액체형태로 침투하는 화학작용제를 일차적으로 방호하는 것으로 액체 발유도/발수도 성능을 발휘하는 고분자복합체(탄소불소계열)를 섬유에 코팅하여 액

체형태의 화학작용제를 방호하는 원리이며[5], 내피는 활성탄이 침착되어 있는 폴리우레탄폼 형태로 기체 형태로 침투하는 화학작용제를 흡착하여 방호하는 원리이다[6].

2.2 등급 판정 영향인자

침투성 보호의에 대한 시험은 2007년부터 2023년까지 17년간 이루어졌으며, 전체 시료수는 3,419개였으며, 이것으로부터 획득된 총 데이터 수는 39,976개이다. 보호의 추천 등급은 3가지로 시효연장(A, Extension), 조건부 시효연장(A1, Conditional Extension), 폐기(B, Discard)로 구분하고 있다. 이번 연구에 사용되는 침투성보호의의 시험 항목은 Table 1과 같으며, 이 시험 항목 이외에도 보호의의 포장재, 외피, 내피에 대한 물리적 시험과 방호 성능시험이 있다.

Table 1. Major Remark of Test Item

Test Item	Remark
Package leakage	Pollution and moisture content effects
CCl ₄ absorption	absorption ability judgment
protective performance to chemical warfare agents	Resistance to penetration by liquid chemical agents

매년 약 10개의 시험항목에 대한 결과를 통해 등급이 판정되고 있다. 부적합결과를 살펴보면 보호의 전체 시험 항목 중에서 몇 개의 주요 시험 항목만이 수명 연장 여부에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 침투성보호의의 등급 판정에 주요하게 영향을 미치는 시험 항목을 빈도 순으로 식별하면 Table 2와 같다. 이에 본 연구에서 분석하는 시험항목으로 포장재 누출시험, 사염화탄소 흡착성능 시험, 화학작용제 성능시험을 선정하였다.

Table 2. Major Factor for Discard

Test item	Package leakage	CCl ₄ absorption	nerve agents	vesica ting agents
Total	64	18	15	6

이에 식별된 주요 시험 항목인 포장재 누출시험, 사염화탄소 흡착성능 시험, 화학작용제 방호 성능 시험 간의 상관관계를 분석하고 각 시험 항목별 저장 기간에 대한 회귀분석을 실시하고자 한다.

3. 실험

3.1 실험 대상 및 재료

실험 시료는 1986년도부터 2017년도까지 생산된 침투성보호의가 사용되었다. 침투성보호의 시료는 생산된 연도와 월을 기준으로 구분된다. 포장재 누출시험은 밀폐 포장되어 있는 침투성 보호의를 베리어백 상태에서 평가한다. 사염화탄소 성능시험은 활성탄이 첨착되어있는 내피를 이음새가 포함된 규정돼있는 부위에서 기준 유효면적을 채취하여 시험한다. 화학작용제 방호성능 시험은 보호의의 정해진 부분을 채취하여 시험한다. 전체적인 시험 단계는 Fig. 1과 같다.

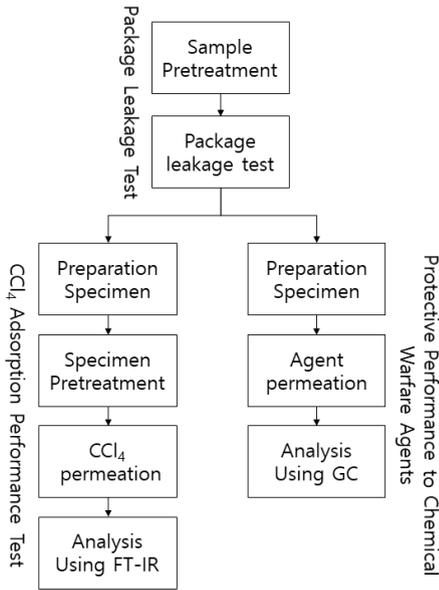


Fig. 1. Test Flow diagram

3.2 실험 방법

3.2.1 포장 누출시험

포장 누출시험은 단위 포장마다 Fig. 2와 같이 누출 시험기(HS-168A, 국산)를 사용하여 시험한다. 시험규격은 FED-STD-101 5009번에 따라 모든 시료는 온수 시험에 앞서 상온에서 4시간 이상 노출시켜야 한다. 단위 포장의 표면에 나타나 방출되지 않거나 감소하면서 방출되는 기포는 결함의 원인이 되지 않는다. 표면이나 이음매로부터 기포가 계속 방출될 경우 결함으로 간주되어야 한다.



Fig. 2. Leak Tester

3.2.2 사염화탄소 흡착시험

사염화탄소 흡착성능 시험 절차는 다음과 같다. 시험편(내피)을 폴리우레탄폼이 위를 향하도록 시험컵에 위치시킨 후 시험 중 누설방지를 위해 시험컵을 밀봉시킨다. 시험컵 상단부에 일정 농도로 형성된 사염화탄소 증기를 유입시켜 시험편에 일정 유량으로 통과시킨다. 유출 가스 분석기를 이용하여 시험컵을 통과한 사염화탄소 증기의 농도가 시험편이 파괴되어 유출부에서 사염화탄소가 감지될 때까지 시험을 진행한다. 시험은 Fig. 3과 같이 챔버 내에 시험컵을 위치하여, 항온항습을 유지한다. 시험컵에 사염화탄소 증기가 유입되기 시작한 시간부터 파괴농도에 도달할 때까지의 시간을 투과시간으로 기록하고 시험을 종료한다. 흡착성능은 사염화탄소 유입농도, 투과시간, 유량, 시험의 유효넓이를 활용하여 흡착성능을 평가한다[7].

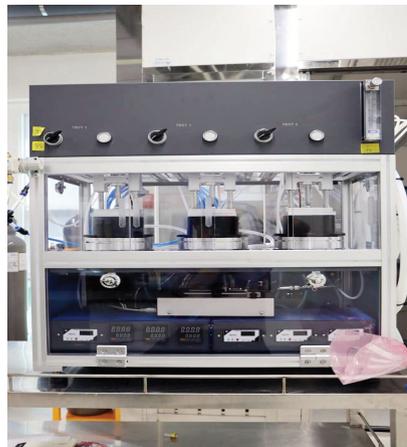


Fig. 3. CCl₄ Gas Tester

3.2.3 화학작용제 시험

보호의 화학방호력 평가는 확산 침투성 시험법에 따라 시험한다. 시험 셀에 시편을 장착하고 작용제 적하 장치로 시편 표면에 작용제 방울을 떨어뜨린다. 시편을 통과한 작용제는 흡착제판을 통해 흡착되고 열탈착기를 이용하여 흡착제에 흡착되어 있던 작용제를 탈착시킨 후 기기분석을 통해 평균 투과량을 계산하여 평가한다. 시험 시편을 통과하는 작용제의 24시간 누적농도를 $0.001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 까지 측정한다[8].

4. 결과 및 고찰

4.1 분석 방법

침투성보호의에 대한 시험결과는 아래와 같이 회귀분석과 95% 신뢰수준을 적용하여 분석하였다. 신뢰성 분석은 엑셀을 이용하여 분석하였다. 저장수명을 연장하는 결정에 영향을 주는 포장누출시험, 사염화탄소 시험, 화학작용제 시험 항목 간의 상관관계를 분석하고 각 시험 항목별 저장수명을 추정하였다.

4.2 분석 결과

4.2.1 시험 항목 간의 상관관계

침투성보호의의 시험 간의 상관관계를 분석하기 위하여 포장누출시험과 사염화탄소 흡착성능시험 간의 관계를 분석하면 Fig. 4와 같다.

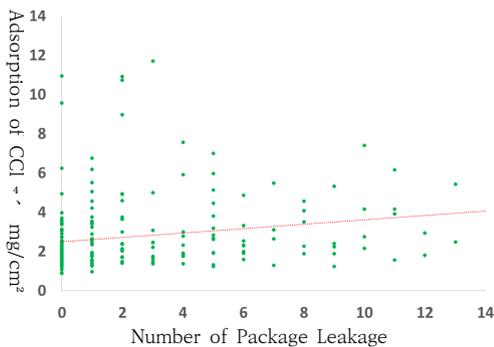


Fig. 4. Relationship Between Adsorption of CCl_4 and package leakage

침투성보호의의 포장누출과 사염화탄소 흡착성능은 포장누출이 많을수록 흡착성능이 저하될 것으로 예측하

였으나, 그 경향성을 보이지 않았다.

또한, 시험간의 상관관계를 분석하기 위하여 다른 시험 항목 간의 관계를 분석하면 Fig. 5와 같다.

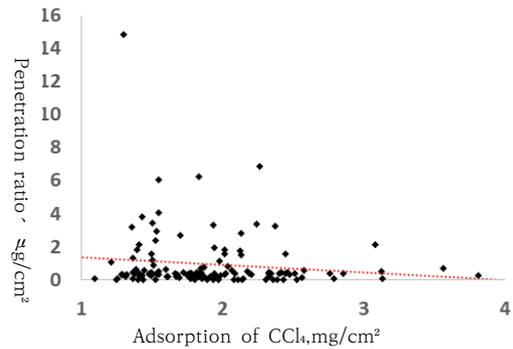


Fig. 5. Relationship Between Adsorption of CCl_4 and Vesicating Agents Penetration ratio

사염화탄소 흡착성능시험과 화학작용제 시험 간의 상관관계도 매우 낮다. 이는 사염화탄소와 화학작용제의 방호 방법이 다르기 때문으로 추정된다.

4.2.2 포장 누출시험

저장 기간 경과에 따른 전체 시험로트 대비 포장 누출이 발생한 로트의 비율은 그래프로 도식하면 Fig. 6과 같다.

그래프를 보면 포장누출의 경우 저장 기간 경과에 따라 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 포장누출로 부적합 판정된 로트의 비율이 증가하고 있으며, 시험을 실시한 대상 시료 수 대비하여 누출이 발생한 시료 수의 비율도 증가하는 경향을 보이고 있다.

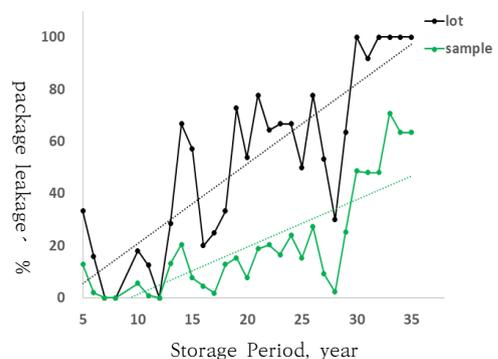


Fig. 6. Relationship Between Rate of Package leakage and Storage Period

위 추세를 기준으로 하여 전체에서 10% 누출이 발생하는 시점을 계산해 보면 Table 3과 같다. 10% 누출이 발생하는 시점은 로트수 기준으로 하여 약 6.44년인 것으로 추정되었으며, 시료 수 기준으로는 14.74년으로 추정되었다.

Table 3. Shelf-Life in Lot, sample

Test item	Slope	Intercept	Shelf Life (10%)
Lot	3.0615	9.72	6.44
sample	1.8184	16.80	14.74

4.2.3 사염화탄소 흡착시험

사염화탄소 흡착성능 시험은 시료에서는 각각 상의에서 3개, 하의에서 3개 로트 당 18개 시편으로 시험한다. 그 결과를 저장 기간에 따라 도식하면 Fig. 7과 같다.

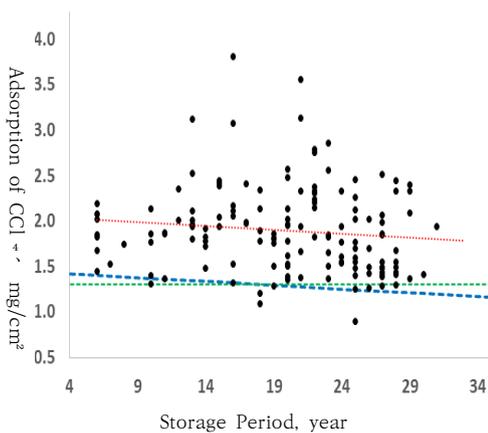


Fig. 7. Relationship Between Adsorption of CCl₄ and Storage Period

사염화탄소 흡착성능 측정값과 저장 기간과의 회귀분석으로 계산한 규격상의 기준에 도달하는 평균수명은 91년으로 추정되었다.

저장 기간에 따른 흡착성능의 상관계수(R²)는 Table 4에서 확인할 수 있으며, 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 저장 기간에 따른 변화값보다 로트간 차이, 저장환경간의 차이가 상대적으로 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 저장 기간에 따른 사염화탄소 흡착도의 변화 기울기가 연간 약 0.00847씩 그 값이 아주 미미하나 그래프에서 동일시점에서의 상하 분산을 의미하는 표준오차는 약 0.473으로 55배에 달한다. 따라서 저장수명을 추

정하기 위해서는 이러한 표준오차 값을 고려해서 신뢰하한값을 적용해야 동일시점에서의 분산을 고려한 수명을 추정할 수 있다.

Table 4. Result of Permeable Suit's Regression Analysis for Adsorption of CCl₄ vs Storage Period

Multiple R	0.116639
R-Square	0.013605
Adjusted R-square	0.006609
Std. Err. of Estimate	0.473777
Number of sample	143

사염화탄소 흡착성능의 경우 표준오차 값이 커서 95% 신뢰하한을 기준으로 수명을 추정할 경우 저장 기간 “0년”에서부터 흡착성능 기준을 하회 하므로 신뢰구간을 80% 신뢰하한으로 적용하면 18.5년의 수명이 추정된다.

4.2.4 화학작용제 시험

화학작용제 시험은 08년부터 시작하였고, 전체시험 현황은 1841개이다. 작용제별로 저장수명을 분석하였다. 신경작용제는 Fig. 8과 같이 저장 기간이 길어짐에 따라 성능이 증가하여 저장수명을 예측할 수 없었다. 이는 일부 저장 기간에서 편차가 큰 데이터가 포함되어 있는 것이 원인으로 판단된다.

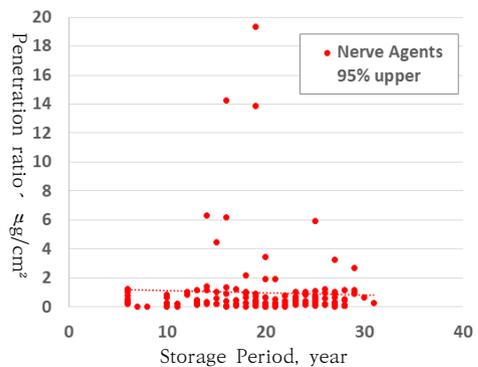


Fig. 8. Relationship Between Nerve Agents Penetration ratio and Storage Period

수포 작용제는 저장 기간별 투과율을 Fig. 9와 같이 회귀분석과 95% 신뢰상한을 적용해서 구한 그래프를 다음과 같다. 기준을 초과하는 저장수명은 10.5년으로 추정되었다.

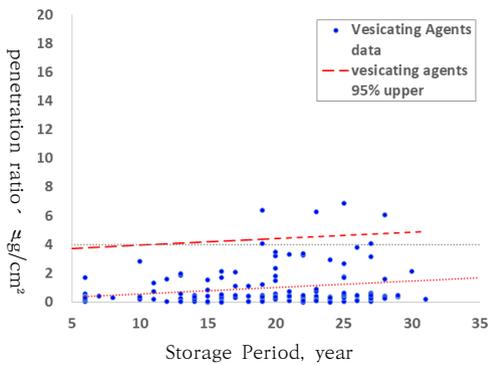


Fig. 9. Relationship Between Vesicating Agents Penetration ratio and Storage Period

4.3 고찰

주요 시험 항목별 회귀분석을 통해 수명을 추정하고, 시험 항목 간의 상관관계 분석을 통해 저장수명에 미치는 영향을 예측하였다.

현재 포장누출 시험은 제품의 성능과 직접적으로 연관성이 없다고 판단하여 부적합된 로트 중 누출된 제품은 운영용으로 관리하고 나머지는 시효연장하고 있어 직접적인 폐기 조건의 시험 항목이 아니다. 다만 보호의에 주요 성능 저하 원인이 활성탄의 성능 저하이고, 활성탄이 수분에 취약하므로 포장 누출시험의 부적합이 사염화탄소 흡착성능, 작용제 방호성능에 영향을 미칠 것으로 예측하였으나, 포장재의 누출 여부에 따른 사염화탄소 흡착성능, 화학작용제 방호성능은 상관관계가 없었다. 다만 각 주요시험 항목에서 추정하고 있는 저장수명과 실제 설계된 저장수명은 유사하게 산출되었다.

5. 결론

본 연구에서는 침투성보호의에 대한 CSRP 결과를 이용하여 회귀분석을 통해 수명을 추정하였다.

저장수명이 가장 짧은 것으로 분석된 항목은 포장누출 시험으로 6.44년으로 추정되었으며 저장수명이 다음으로 짧게 분석된 항목은 수포 작용제 시험으로 10.5년으로 추정되었다. 해당 항목은 일반검사로 확인되는 고장 이므로 주기적 점검을 통해서 확인하고 교체할 수 있다.

주요 시험 항목 시험데이터와 저장 기간의 상관계수가 낮았다. 이는 제품의 품질이 저장시간 이외의 요소에 상당한 영향을 받고 있음을 의미한다. 이번 연구에서 구분한 상·하의 구분, 포장재 개선 전후 이외에도, 생산 월별,

제조사별, 저장환경 등에 관한 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다.

또한, 이번 연구에서는 부적합에 영향을 미치는 주요 시험 항목을 분석하여 저장수명을 예측하였으나, 향후에는 침투성보호의의 물리적 성능을 판단하는 시험에 대한 데이터를 분석하는 연구가 필요한 것으로 보인다.

References

- [1] D.I. Park, H.G. Shim, "A Study on Shelf-life Management Program of Long-term Storage One-shot System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Volume 21, No. 1, pp.628-633, 2020. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.1.628>
- [2] G.H. Yoon, Y.J. Jeong, Y.S. Lee, N.R. Lee, "Research on Producing Quality Information by Building CSRP Database and Developing Integrated Database Management Program", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Volume 22, No. 9, pp.84-91, 2021. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.9.84>
- [3] S.W. Kim, D.S. Seo, H.H. Son, C.H. Yu, Y. Cho, "Study on the formulations for Topical Skin Protectant against Liquid-Phase Chemical Warfare Agents", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Volume 25, No. 2, pp.210-217, 2022. DOI: <http://doi.org/10.9766/KIMST.2022.25.2.210>
- [4] H.S. Yoon, D.H. Kwon, J.S. Kang, H.K. Seo, H.W. Lee, "A Study of the Permeation Test Method for the Evaluation of Protective Clothing against Chemical Warfare Agent Simulants", *Textile Science and Engineering*, Volume 51, No. 6, pp.277-284, 2014. DOI: <http://doi.org/10.12772/TSE.2014.51.277>
- [5] J.Y. Yoon, , "A Study on Comparison of Efficiency for Water and Repellent Agents with Fluoro Carbon Resin", *Korean Industrial Technology Convergence Society*, Volume 21, No. 4, pp.1-6, 2016.
- [6] Y.J. Jeong, "A Study of Carbon Tetrachloride Substitutes in the Activated Carbon Performance Test", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Volume 23, No. 8, pp.357-363, 2022. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.8.357>
- [7] J.O. Stull, "Considerations for design and selection of chemical-protective clothing", *Journal of Hazardous Materials*, Volume 14, Issue 2, pp.165-189, 1987. DOI: [http://doi.org/10.1016/0304-3894\(87\)87012-7](http://doi.org/10.1016/0304-3894(87)87012-7)
- [8] M. L. Daugherty, A. P. Watson, T. Vo-Dinh, "Currently available permeability and breakthrough data characterizing chemical warfare agents and their simulants in civilian protective clothing mater", *Journal of Hazardous Materials*, Volume 30, Issue 3, pp.243-267, May 1992. DOI: [http://doi.org/10.1016/0304-3894\(92\)87002-W](http://doi.org/10.1016/0304-3894(92)87002-W)

김 도 현(Do Hyun Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 경희대학교 화학공학
학과 (공학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 연구원

<관심분야>

국방품질경영, 화생방물자

권 미 현(Mi Hyun Kwon)

[정회원]



- 2009년 2월 : 광운대학교 화학과
(이학사)
- 2011년 2월 : 광운대학교 화학과
(이학석사)
- 2014년 4월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 선임연구원

<관심분야>

신뢰성, 화생방물자

배 만 재(Man Jae Bae)

[정회원]



- 1995년 2월 : 성균관대학교 화학과
(이학사)
- 2004년 2월 : 부산대학교 고분자
공학과 (공학석사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 책임연구원

<관심분야>

정보경영, 품질경영