

# QFD 기법을 이용한 특정 유해가스 노출제어 이온선택성 보호복 소재개발연구

송화선 \* · 구일섭 \*\* · 김인식 \*\*

\*† 남서울대학교 산업경영공학과

\*\* 충남대학교 화학공학과

## Study of Development of Selective Removal Adsorption Ion Exchange Resin Materials for Fabricated with Chemical-biological Cloth by QFD

Song, Hwa Seon \* · Koo, Il Seob \*\* · Kim, In Sik \*\*

\*† Department of Industrial Management Engineering, Namseoul University

\*\* Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Chungnam National University

### ABSTRACT

**Purpose:** Through studying the expert's and non-experts panel responses to the questions regarding the attributes of chemical-biological protection cloth quality in terms of the levels of customer demand and technical factors has been studied. We are applied to a QFD matrix with find out the relationship between the selective removal efficiency of chemical-biological cloth and the guidelines of technical approach.

**Methods:** We fabricated several composite of ion-exchange resins with selectively permeable performance designed to facilities water vapor transport and selective adsorption of the harmful gases. With these materials, we characterized on the selectively permeable performance to identify ion-exchange resin with chemical-biological protective cloth.

**Results:** Results showed that ion exchange materials possessed performance with selectively efficiencies as NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> and HCl gas. The selective adsorption amount of ammonia and hydrogen gases were 90-80  $\mu\text{g/g}$  with TRILITE SCR-BH sulfonated ion exchange resin. The PP non-woven/ion exchange resin adsorbent materials possessed performance with water vapor permeability were 1,100-1,350 g/m<sup>2</sup>/day, it's was two times high value compare with activated carbon. With these materials, we characterized selectively removal efficiency to identify new ion-exchange material with chemical-biological protective capability.

**Conclusion:** This study shows that a QFD aids in deciding with of the adsorption parameters to optimized with chemical-biological protection cloth manufacturing.

● Received 3 July 2015, 1st revised 7 August 2015, accepted 13 August 2015

† Corresponding Author(ilsukoo@nsu.ac.kr)

© 2015, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Key Words:** QFD(Quality Function Deployment), Ion Exchange Resin, Selective Removal Adsorption, Chemical-Biological Cloth

## 1. 서 론

최근 산업의 발전과 복잡한 융합시스템의 확충으로 예기치 못한 각종 화학 산업의 사고와 화재로 인한 유해가스의 발생이 빈번하여 국민의 건강에 치명적인 위협을 주고 있기 때문에 이에 대비해 사고현장을 수습해야 할 산업안전 처리요원들을 위한 효율적이고 안전한 작업 활동방안이 시급히 강구되고 있다.

산업안전보호 관리시스템에 의거한 특정유해가스 노출을 차단할 수 있는 보호복에 관한 연구(Wilusz 2002)들은 유해가스가 인체로 전달되는 것을 차단하는 방호력과 내구성을 개선하는데 목표를 두고 있으며, 활동성이나 착용감의 편리성을 추구하는 연구(Yun et al 2006)가 수행되었다.

전통적인 보호복의 개념은 나일론 직물에 부틸계 고무를 도포하여 방호성능을 향상시킨 것으로 공기와 수증기 및 체내에서 발생하는 열의 방출이 이루어지지 않아 장시간 착용했을 때 습진, 알러지 등 피부 트러블을 일으키는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 물리적 흡착 특성이 있는 활성탄 및 구형활성탄, 제올라이트 등을 원단에 함침하거나 라미네이팅하여 유해물질의 흡착능은 증가시켰으나 중량의 증가로 인하여 착용피로도도 높으며 단순한 물리적 흡착으로 흡착능의 지속적인 유지와 복합 화학가스 제거에 한계점을 갖고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 암모니아, 황화수소, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 유해가스 흡착용량이 크고 선택적인 흡착능을 증진시키기 위하여 이온교환 부직포 소재 연구가 이루어졌다. 이온교환 부직포는 성형가공이 용이한 장점을 갖고 있으며 각종 관능기를 부여하여 여러 흡착기능을 갖는 이온선택성 보호복의 소재로 연구(Kim 2004, Yang 2003, Yang et al 2011)가 진행되고 있다.

이온선택 투과막은 투습성, 방풍/방수성을 기초로 하여 소재내의 작용기(Functional group)에 의해 인체에서 발생하는 수분은 배출시키고 외부에서 유입되는 유해물질과 공기는 완벽히 차단하는 기술로써 2000년대 이후 Amine 계, Cellulose 계, Sulfonated polymer 계, Nafion 등의 이온교환 수지를 사용하는 연구(Kang et al 2012)와 외부의 모든 물질을 유기막을 통해 지속적으로 차단할 수 있어 활성탄의 흡착 한계성을 극복할 수 있는 장점의 소재로 부각되었다.

그러나 투과막은 가격이 비싸고 이온선택성 효율이 낮아 이들의 단점을 개선한 새로운 소재의 개발이 필요한 실정이다. 또한 투과막은 보호복 적용시 안정성과 재현성이 검증되지 않아 이들에 대한 연구가 이루어져야 하며, 보호복의 품질 안전성에 대한 개념의 모순성을 객관화하여 이에 따른 기술적 접근이 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 소재의 단점을 개선하기 위한 새로운 기능성 복합 보호복 소재를 개발할 목적으로 국가 안전기준에 부합하는 품질성능을 구현하기 위하여 QFD(Quality Function Deployment, 품질기능 전개기법)를 적용하고자 한다. 이 기법을 적용하면 방호 보호복의 소재개발 목표를 두고 보호복의 기능을 소비자관점에서 고객의 요구속성(CA: Customer Attributes)을 설정하여 이를 구현할 수 있는 기술특성(EC: Engineering Characteristics)을 도출할 수 있다. CA와 EC간의 상호관계를 해석하고 보호복 제품의 소재특성 가치를 제품개발 전 정량적으로 예측할 수 있는지 여부에 대하여 검토할 수 있다.

QFD 방법을 적용한 의류학에서의 연구로는 Scheurell(2001)의 연구에서 디자인의 기술적 측면을 중요시하는 보호복의 제품개발과정 프로세스에서 QFD를 적용한 연구와 의류제품 디자인 설계요소의 연구(Row and Park 2008) 등이 있다.

신제품개발전략 수립에 있어서 QFD의 활용은 많은 연구(Chao and Kosuke 2004, Cho and Yoon 2006, Park 1997)에서 발전해왔다. 특정제품에 대한 고객 수요 변동 속성과 기술의 합목적적인 융합은 시장에서의 성공과 직접적인 상관관계를 갖고 있지만 상품으로써의 전환은 고객의 소리를 어떻게 인식하고 이를 기술적으로 구현하느냐에 따라서 크게 영향을 받는다. QFD 분석결과에 있어서 인간판단과정의 모호성과 기술의 불확실성을 극복하는 것이 연구의 핵심적 과제로 생각된다.

특히 보호복은 특정계층의 안전을 담보해야 하며 지속적인 Safety 보증을 위해서는 착용 당사자의 입장에서 안전과 편리성을 동시에 만족시킴으로써 가능하다고 생각된다. 이러한 제품의 기능과 고도의 기술을 융합해야하는 방호 보호복의 특성상 Positive 속성과 Negative 속성을 동시에 구현하기 위해서는 새로운 제품개발 전략과 소비자 만족도를 증진시킬 필요성이 매우 높다.

본 연구에서는 고객이 요구하는 보호복의 기능을 선택적인 유해가스 흡착제의 발굴과 보호복을 제조하는 과정에서 기술적 특성가치가 어느 정도 변화하는지 여부를 QFD의 기본 기술인 HOQ(품질주택, House of Quality)를 수립하여 진단하고, 특정유해가스의 물리화학적 흡착특성과 제거효율을 평가하여 CA와의 관련성에 관하여 연구하였다.

## 2. 이론적 배경

방호 보호복은 유해환경과 화생방 공격에 노출되었을 때 피부노출 방지와 신체대사에서 발생하는 내부열을 배출하고 Heat stress로부터 안전하게 보호 받아야 하는 물리화학적 특성을 갖추어야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 보호복 소재의 조건들은,

- 유해물질의 높은 제거효율 및 제거 흡착능의 지속성
- 진동 풍속등과 같은 물리적 충격에 견디는 힘
- 압력의 손실을 최소화할 수 있는 특성
- 통기성(체내 대사물질의 방출)과 선택적 제거능의 이중성을 갖추어야 한다.

또한 방호보호복의 섬유원단은,

- 경제성과 보호성능을 고려한 기재 소재 선정
- 방호 보호복 안전섬유 섬유 소재 발굴과 라미네이팅 기술의 진보를 위한 Technology 개발 진보
- 최적 용도별 요구 규격 및 성능 설계를 위한 체계적인 평가 분석 시스템이 적용되어야 하는 필연성이 있다.

위의 목적을 달성하기 위해 미립자 및 유기화합물로부터 착용자를 보호하기 위한 소재로는 부직포(Non-woven fabrics)와 멤브레인(Membrane fabrics)이 갖고 있는 물리화학적 특성을 최적의 상태로 융합하는 기술이 핵심 연구의 대상이 될 수 있다. 부직포는 울이 풀리지 않고 방수가 잘되고 가볍다. 그러나 부직포는 땀뻘룩하고 세탁성, 촉감, 작용제 방호 등이 부족하여 섬유 원단에 얇게 코팅하는 막으로 외부 빗방울의 방수 기능과 바람으로부터 방풍이 되면서도 내부의 땀으로 인한 수증기는 투습하는 기능을 부여할 수 있어야 한다.

핵심기술로는 반투과막(Semipermeable membrane)과 흡착제(Adsorptive material) 및 선택투과막(Selective permeable membrane)의 융합으로 선택투과기능을 갖추어야 한다. 선택투과기능은 공기, 수증기, 에어로졸, 액체 성분은 선택적으로 투과해야 하며 동시에 불침투 기능도 갖추어야 하는 모순성을 갖고 있다. 투과기능 멤브레인은 공기, 에어로졸은 통과하고, 땀은 배출하고, 수증기는 흡수하고, 장기 노출 시 액체성분은 통과 되어야 하는 다중성을 갖고 있어야 한다. 일부 투과기능을 갖는 멤브레인은 공기는 통과하고, 땀은 배출되어야 하며, 수증기는 흡수하고,

액체성분 및 에어로졸은 통과되지 않아야한다. 위와 같은 목적을 동시에 달성하기 위해서는 선택적 투과성을 부여하는 새로운 개념의 보호복이 요구된다. 즉 불침투성으로 열 피로도를 낮추고, 침투성의 방호성능 한계를 극복하는 연구이다.

이를 위해 보호복에 사용되는 각종 소재의 기능에 대하여 물리화학적인 완벽한 이해와 각종소재를 융합할 수 있는 기술과 통합하였을 때 원래 기능을 지속적으로 유지할 수 있어야 한다. 다양한 기능을 구현해야하는 실제 현장에서는 기술특성들 간에 대립이 발생하고, 기술들 간의 상호 연관성에 대한 모순이 나타날 수 있다. 전통적으로 이러한 문제가 발생할 때에는 기술 및 기능간 적당한 절충에 의해서 제품을 규격화하였기 때문에 최적의 기능품질 제품을 설계하고 개발하는데 한계가 있었다. 실제적으로 CA는 제품 설계 시 설계자가 조절할 수 없기 때문에 제품 설계자가 조절 및 최적화할 수 있는 기술특성을 도출하는 것이 설계자의 입장에서는 유리한 부분이다.

HOQ는 QFD(Kim et al 1999)의 고객의 요구사항을 제품의 기술특성으로 변환시키는 시각적 도표이며, 일반적으로 7개의 구성요소를 갖고 있다. 이 연구에서는 고객요구, 품질특성, 고객 요구사항과 품질특성과의 상호관계(중요도 평가 척도), 기술 중요도, 특성 목표치, 기술벤치마킹 및 고객경쟁력 평가의 항목을 설정하여 품질보증요건의 중요도를 도출해내는 방식으로 HOQ를 활용하였다.

고객중심의 기술 중요도 결정방법은 Yoon 등(2004)의 방법을 준용하여 중요도와 기술관계성의 정도를 정량화함에 있어서 치우침이나 왜곡을 막기 위하여 상대적 가중치에 대하여 정량화 하고자 하였다.

이를 위하여 요구속성의 중요도를 10인으로 구성된 보호복 소재 관련 물리화학적 특성분야 전문가 그룹과 10인으로 구성된 비전문가 그룹을 선정하여 중요도와 기능과 기술의 상호 연관성에 대한 10점 척도법에 따라 투표에 의한 값을 산출하여 판단하였다(Kim and Kim 2012, Jeong 2013). 또한 기술특성 측면에서 고객 요구속성과 기술특성과의 상호관계를 평가하고 기술특성 측면에서 기술들 간의 상호관계, 기술특성치의 비교, 기술특성의 중요도 순위 작성, 기술특성의 목표 값을 고객 인지도 비교와 만족도를 예측하고자 하였다.

### 3. 소재개발을 위한 실험

#### 3.1 시약 및 재료

본 연구에서 사용된 화생방 보호복의 섬유는 PP계 부직포였으며 Figure 1과 같은 방법으로 흡착제를 점착시켜 시료로 사용하였다. 이 때 시용된 흡착제의 종류와 물리화학적 특성을 Table 1에 보였다. 이온교환수지는 Styrene 계 강산성 양이온 교환수지 분말 (Polystyrene + DVB) -SO<sub>3</sub>(Sulfonate) 관능기를 갖는 것으로 이온교환 용량 1.8 eg/L 이상의 0.3~1.2 mm size를 (㈜삼양사에서 구입하여 사용하였다.

약염기성 음이온 교환수지(High porous type, Polystyrene + DVB) Tertiary amine((-CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) 관능기를 갖는 것으로 이온교환 용량 1.5 eg/L 이상의 0.3~1.2 mm 크기의 것을 (㈜삼양사에서 구입하여 사용하였다. 또한 활성탄은 Activate 분말활성탄 (AG airtech㈜ AG -1000로써 겉보기중량 270~320 g/m<sup>2</sup>, 비표면적 900~1000 m<sup>2</sup>/g을 사용하였으며, 피흡착재료와 흡착제를 라미네이팅 시키기 위하여 수계바인더 점착제(Samwon사의 Samvinol ATE-701 아크릴계 점착제)를 사용하였으며, 흡착제와 섬유면의 점착력을 증진시키기 위하여 고온 경화기(Rolling type)를 사용하여 온도를 80~150 °C 범위로 조절하면서 라미네이팅 시켰다.

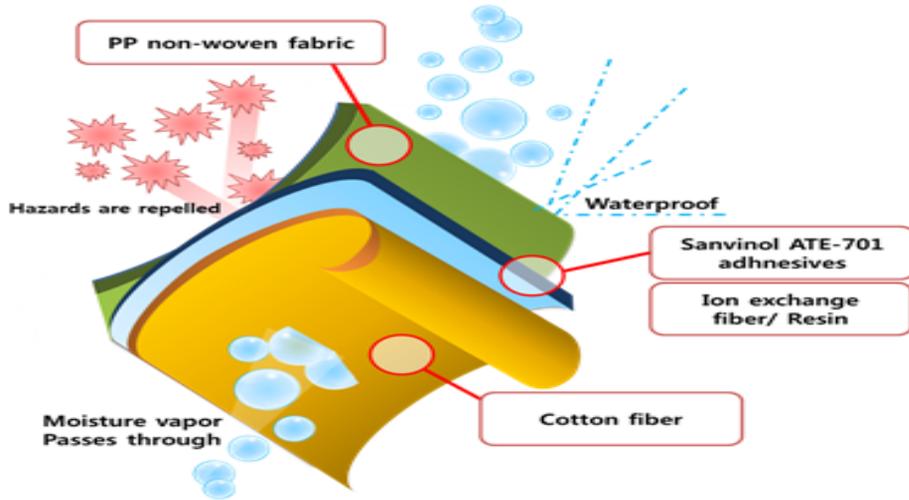


Figure 1. Design of selectively permeable materials for chemical protection.

Table 1. Physicochemical properties of ion exchange resin

Resin Parameter	TRILITE SCR-BH strong acid, (-SO <sub>3</sub> )	AMP-160 strong base, (-NH <sub>2</sub> )	IXE-100, (-SO <sub>3</sub> H)	IXE-700F, (-NH <sub>3</sub> )
Ion exchange Capacity (meq/g)	1.9	1.2	3.3	2.0
Water uptake (%)	43~50	38~45	-	-
Surface area (m <sup>2</sup> /g)	300	300	200	200
Air permeability (cc/m <sup>2</sup> )	>200	>200	>250	>250

### 3.2 보호복 소재 발굴을 위한 흡착소재 성능 실험

흡착제와 부직포가 라미네이팅 된 시료를 Figure 2와 같은 흡착관을 이용하여 NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl의 흡착특성을 측정하였다. 이 흡착관은 ASTM F 1383-99a(1999)와 KS K ISO 6529(2011)를 참조하여 아래 그림과 같이 제작하였다. 이 때의 흡착관은 탐지가 가능한 기체들의 최소 투과율을 0.1 μg/cm<sup>2</sup>min에서 1.0 μg/cm<sup>2</sup>min 범위로 조절이 가능하도록 제작하였다.

가스흡착성능 시험은 Hwang(2010)의 연구에서 합성한 숄폰형 양이온교환 섬유와 복합 이온교환 섬유 및 QFD에 의하여 선발된 흡착소재들의 암모니아에 대한 흡착성능을 알아보기 위하여 흡착칼럼을 제작하고, 여기에 일정량의 흡착소재를 충전 시킨 후 가스 유량을 정밀하게 조절할 수 있는 MFC(Mass Flow Controller)장치를 이용하여 주입 되는 NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl 농도와 유속을 변화시켜 가면서 시료의 가스에 대한 흡착성능을 시험하였다. NH<sub>3</sub>의 분석은 Interscan co.Ltd., 의 Gas analyzer 4000 series를 이용하여 분석하였다. NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl 가스의 Detection 은 SO<sub>x</sub> 분석은 Thermo Environmental Ins. 사의 Model 43C를 사용하였고, NO<sub>x</sub> 분석은 Thermo Environmental Ins 사의 model 42C를, HCl은 FT-IR(20M-Cell)을 각각 사용하여 분석하였다.

보호복 소재에 대한 각 기체들의 흡착용량은 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$\text{흡착용량 } Q \text{ [mmol/g]} = g/w \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{가스흡착량 } q \text{ [mmol]} = (C_o - C_i) \times 10^{-6} \times L / C \quad 22.4 \times (298/273) \times 10^{-3} \dots\dots (2)$$

여기서 W는 보호복의 중량이고, Co, Ci는 각 각 초기농도와 최종 샘플링의 각 가스 농도이며 L은 Chamber의 체적이다.

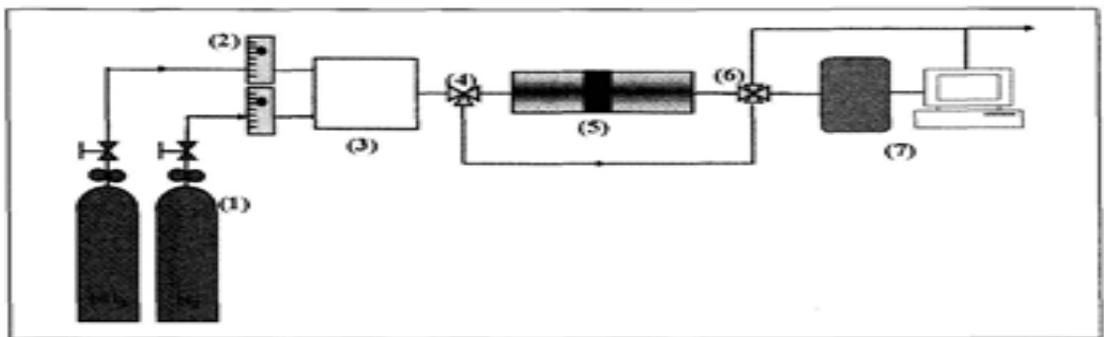


Figure 2. Schematic diagram of gas analyzer system. (1) gas, (2) mass flow controller, (3) gas mixing chamber, (4) 3-way valve, (5) adsorption column, (6) 6-port valve and (7) analyzer.

### 3.3 수증기 투과율 측정

수증기 투과율(VTR, Vapor Transfer Rate)은 Kang 등(2013)의 방법에 따라 측정하였다. 흡착제와 PP 부직포에 라미네이팅 시킨 시료를 바이알의 Septa 크기와 같이 자른 후 증류수를 바이알에 10 mL 채운 후 32 °C에서 24시간 저장하면서 바이알의 무게 감소를 측정하여 투과율을 다음 식으로 계산하였다.

$$VTR = G/t \cdot A \dots\dots\dots (3)$$

G: Weight of penetrant(g), t: time(day), A: Cross-sectional area of samples(1.54cm<sup>2</sup>),

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 QFD에 의한 보호복 소재의 적합성 평가

QFD에 의한 보호복 소재의 적합성 판단 순서는 아래 Figure 3의 HOQ에서 보는 바와 같이 고객 요구속성을 도출하고, 요구속성의 중요도를 10인으로 각각 구성된 전문가 그룹과 비전문가 그룹을 선정하여 중요도와 기능과 기술의 상호 연관성에 대한 10점 척도법에 따라 투표에 의한 값을 산출하여 판단하였다(Kim and Kim 2012, Jeong 2013).

이 그림에서 알 수 있듯이 고객요구항목을 유해가스가 100% 차단되어야 하며 무게가 가벼워야 한다는 것이 다른 요구속성보다도 우선하였다. 또한 고객 요구중요도 면에서 유해가스가 100% 차단되어야 한다는 것이 가장 높았으며, 이때의 소재 특성의 기술적 관계는 고체임계 표면장력과 섬유기공도, Sulfon산 관능기의 관계가 매우 강하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 관련성은 기술의 중요도 평가에서도 유사하였으며 고객의 요구속성과 제품의 품질경쟁요소에서도 밀접한 관계를 도출할 수 있었다. 특히 PP부직포에 이온교환 섬유를 라미네이팅 시키는 선택적 흡착소재는 Nafion에 의한 흡착소재 보다도 공기투과도, 섬유기공도, 이온교환용량 등에서 상관성이 높았다.

QFD의 전문가 Group으로부터 얻어진 각 소재들의 특성 목표치는 고체임계 표면장력이 24.5 mN/m, 공기투과도 39.6 cm/min, 이온교환용량이 2.0 meq/g 이었으며, 이러한 흡착소재의 물리화학적 특성을 구현하기 위해서는 Sulfonic acid의 중합율은 70% 수준임을 알 수 있었다.

HOQ로부터 알 수 있듯이 고객 요구사항으로는 유해가스가 완전 차단되어야 한다는 항목과 무게가 가볍고 체열이 배출되어야 한다는 속성을 갖고 있으며, 이에 따른 품질특성으로는 고체임계 표면장력과 공기 투과도 및 이온교환용량이 높아야 한다는 점으로 기술연관성이 높은 항목으로 판단되었다. 이러한 특성을 해결하기 위해서는 기술의 중요도 평가에서도 높은 점수를 가지며 고객 경쟁력 확보 측면에서 중요한 경쟁요소로 조사되었다. 이와 같은 각 요소의 품질특성으로 연관되어지는 보호복 소재의 유해가스 흡착제의 선별이 신뢰성을 갖는 선별적 요소임을 이 연구를 통해 알 수 있었다.

HOQ에서 얻어진 품질 특성과 기술 중요도 및 특성 목표치에 부합하는 방호 보호복 소재의 흡착제로는 이 연구에서 얻어진 유해가스들의 흡착 특성 효율 및 라미네이팅 구성 요소를 종합해 보면, TRILITE SCR-BH strong acid,(-SO<sub>3</sub>)와 IXE-700 소재가 가장 목표에 부합하는 흡착제임을 알 수 있었다. 물론 이러한 이온교환수지의 선택적 흡착특성에도 불구하고 QFD에서 얻어진 고객 요구사항과 경쟁력 확보를 위해서는 위 몇 가지 흡착제의 적절한 배합으로 달성할 수 있을 것으로 생각되며 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

향후 연구의 방향은 유해가스 제거용 흡착소재로 고효율성, 낮은 투과성, 내구성 및 저가의 소재 개발과 적용이 연구개발의 핵심사항이다. 이온교환수지를 이용한 선택적 화학적 작용 Site가 막히는 등의 소재 특성을 갖고 있으며 성형 후 물리적 강도가 떨어지기 때문에 지속적인 흡착효율을 유지할 수 있는 소재의 연구가 필요하다.

보호복의 착용상황이 강제적인 경우가 많아 규격이 정하는 요구사항을 만족시키는 것이 우선적일 수 있기 때문에 HOQ에서 Part planning matrix와 Process planning matrix 까지 실행하여 전반적인 QFD를 적용하는 것이 제품의 생산에 기여할 것이라는 Schenrell(2001)의 제안이 의미가 있다.

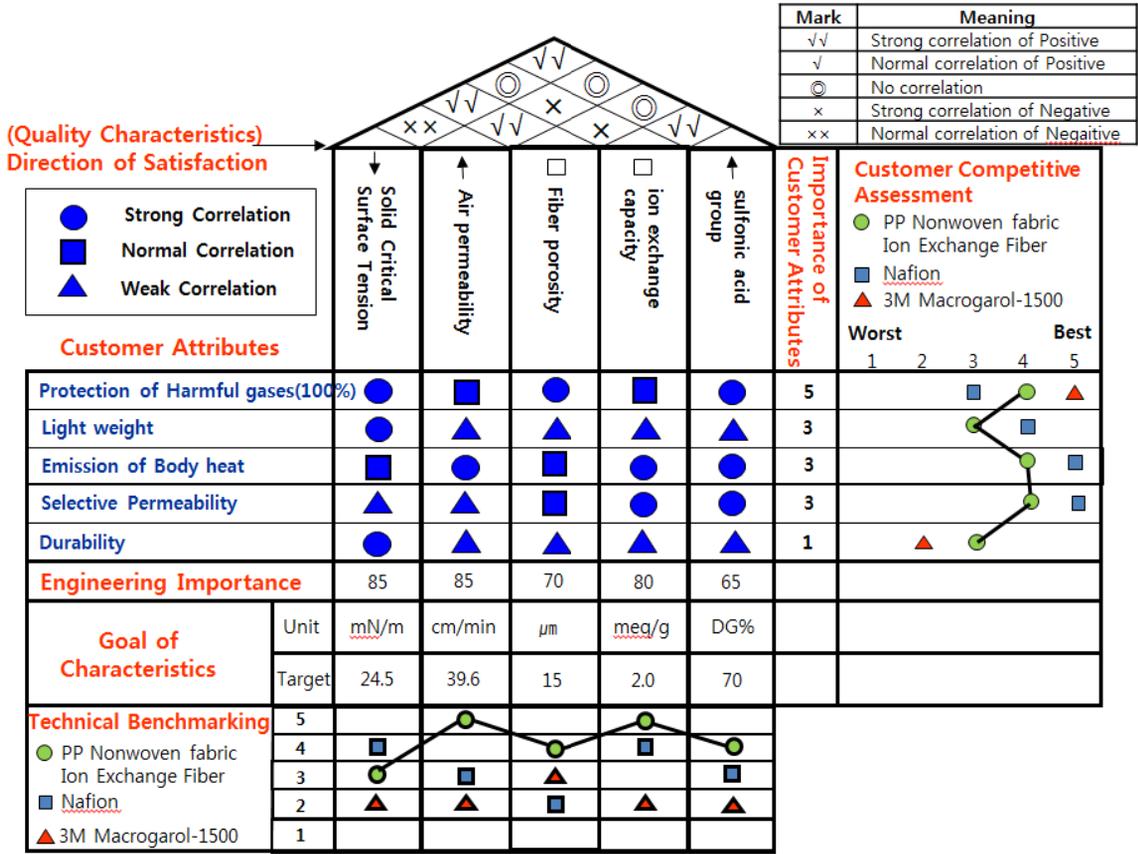


Figure 3. HOQ of chemical-biological protection capability with ion exchange resin.

## 4.2 보호복 소재의 기본 성능시험

### 4.2.1 흡착제와 PP계 부직포와의 라미네이팅

HOQ에서 도출된 기술적 특성에 따른 유해가스의 선택적 흡착소재 만족을 위하여 PP 부직포에 비드형 이온교환수지와 분말 활성탄을 수계바인더 점착제(Samvinol ATE-701, 아크릴계)를 사용하여 흡착제와 섬유면의 접착력을 증진시키기 위하여 고온 경화기(Rolling type)를 사용하여 라미네이팅 시켰다. 각 이온교환수지에 따라서 접착력과 수중의 내구성 차이는 나타나지 않았으며, PP 부직포의 밀도는 0.7474 g/mL - 0.7699 g/mL 범위였으며 분말 활성탄은 0.4013 g/mL이었다. 또한 부직포의 면적당 흡착제의 점착량은 이온교환수지는 313.5 g/m<sup>2</sup> - 356.7 g/m<sup>2</sup>이었고 분말 활성탄은 129.9 g/m<sup>2</sup>이었다. 이러한 무게와 부피의 차이는 보호복의 전체 중량에 미치는 영향이 클 것으로 생각된다(Kang et al 2013). HOQ에서 CA의 두 번째 항목인 보호복의 무게가 가벼워야 한다는 속성을 만족시키기 위해서는 Kang 등(2012)의 연구에서 제시한 화재방호의 설계개념연구에서 멤브레인 소재 중량이 300 g/m<sup>2</sup> 수준이었다.

#### 4.2.2 수증기투과율

실험에서 제시한 흡착제별 수증기 투과율을 측정한 결과 이온교환수지는 수증기 투과율이 1,100-1,350 g/m<sup>2</sup>/day 범위에 있었으며 분말 활성탄은 640 g/m<sup>2</sup>/day로 상대적으로 더 낮았다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 분말활성탄은 수증기의 투과율이 이온교환수지보다 약 2배 정도의 낮은 수증기 투과율을 보였으며, 이 연구에서 사용된 이온교환수지들의 수증기 투과율은 Kang 등(2014)이 보고한 ePTFE계 멤브레인 소재에서 얻은 결과와 유사한 값이었다. 선택 투과막 소재들의 투습도는 1,800 g/m<sup>2</sup>/day 범위를 목표로 개발 되고 있는 점을 고려할 때 부직포의 선정과 라미네이팅 기술을 보완한다면 충분히 이 연구에서 검토된 이온교환수지들은 보호복 소재로써 가치가 있을 것으로 생각된다. 수증기 투과율은 HOQ의 CA에서 체열이 배출되어야 한다는 속성과 선택적 투과성이 이어야 한다는 요구속성과 보호복의 기능과 해당 기능을 구현하기 위한 기술 관련성이 매우 높은 평가항목이다. 따라서 이 연구에서 선택된 이온교환수지의 수증기 투과율은 방호보호복 설계에서 중요한 요소로 작용할 것이다.

#### 4.3 흡착소재에 따른 유해가스 흡착효율

보호복 소재를 QFD 기법에 의하여 선별하기 위해 선택적 흡착 특성을 갖는 흡착제의 물리화학적 특성을 기본으로 하여 염기성 가스 NH<sub>3</sub>와 산성가스인 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl 가스에 대한 흡착 효율을 Figure 4에서 8까지 수록하였다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 이온교환수지 SCR-BH(-SO<sub>3</sub>)는 암모니아의 흡착율이 흡착시간 80 분에 이르면 100%의 흡착효율을 보인 반면 NO<sub>x</sub>는 흡착시간이 100 분에서도 80% 정도의 효율을 보이고 있다. 또한 HCl과 SO<sub>x</sub>의 흡착효율은 20% 전후의 낮은 흡착효율 특성을 보이고 있다. 이러한 가스별 흡착 특성은 IXE-100 이온교환 수지와 유사한 흡착 특성을 갖고 있었다. 이러한 결과는 이온교환수지의 물리화학적 특성에 따라 산성, 염기성 가스들의 선택적 흡착량이 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다.

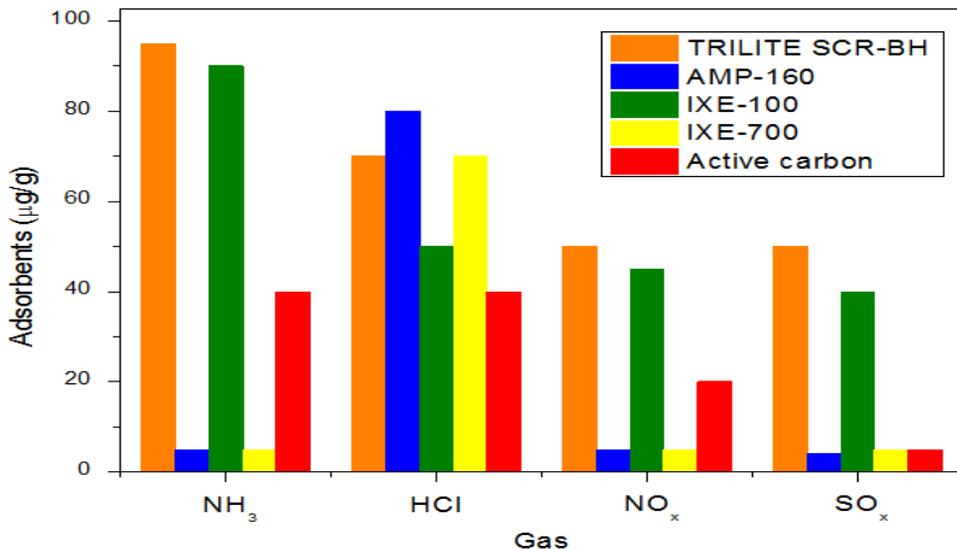


Figure 4. Comparison of the hazardous gases adsorption capacity with ion exchange resin adsorption materials.

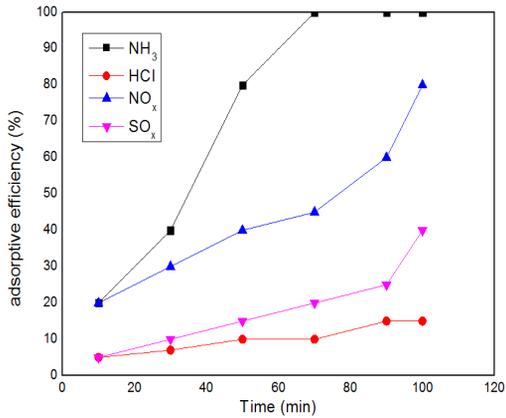


Figure 5. Adsorption efficiency curve of the TRILITE SCR-BH.

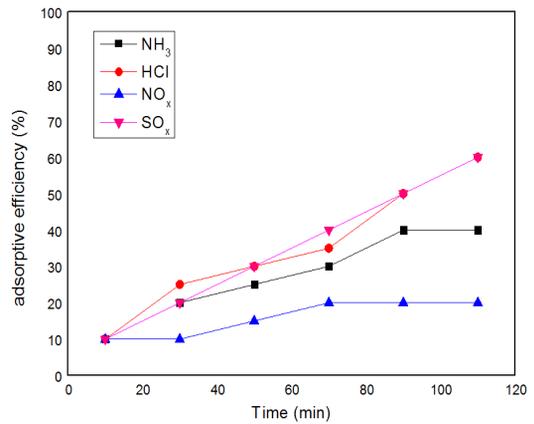


Figure 6. Adsorption efficiency curve of the AMP-160.

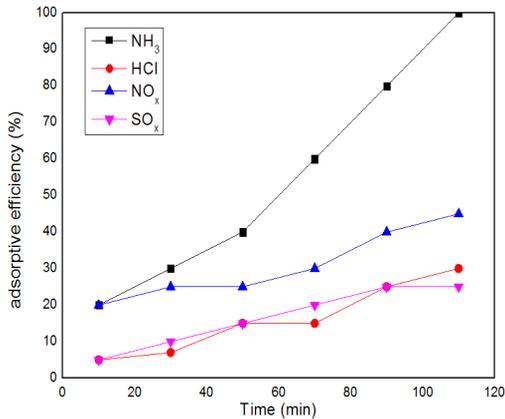


Figure 7. Adsorption efficiency curve of the IXE-100.

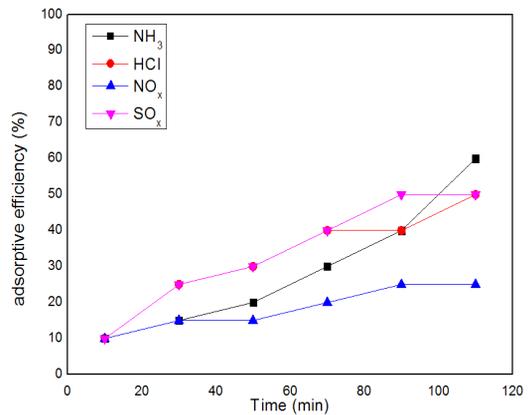


Figure 8. Adsorption efficiency curve of the IXE-700

AMP-160(NH<sub>2</sub>)과 IXE-700 이온교환 수지는 SO<sub>x</sub>와 HCl 가스의 흡착 효율이 암모니아와 NO<sub>x</sub>의 흡착효율보다 상대적으로 2배정도 높게 나타났다. 특히 IXE-700 수지는 NO<sub>x</sub>를 제외한 NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl 가스의 흡착 효율 특성이 선택성을 발견할 수 없었으며 특히 흡착 시간이 경과할수록 흡착 효율은 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다.

이온교환수지의 특성에 따른 염기성, 산성 가스들의 흡착효율 특성들을 종합해 보면 단일 가스에 대한 흡착효율 특성에서 혼합 가스에 노출되었을 때의 흡착 특성을 예측하기 위해서는 이온교환수지의 Matrix 구성에 대한 심도 있는 연구가 병행되어야 할 것이다.

다음 Figure 9는 본 연구에서 제작한 보호복 흡착제 AMP-160 수지 함량 증가에 따른 HCl 산 가스에 대한 흡착 제거 성능 시험을 한 결과를 보였다. Figure 9에서 보는 바와 같이 보호복 소재의 AMP-160 수지 부착량에 따른 HCl 가스 흡착량과의 관계를 나타낸 것으로 HCl 흡착량은 수지의 함량이 증가함에 따라 증가하였으며, 99 % 이상으로 매우 높게 나타났다. 또한 흡착시간에 따른 HCl 파괴곡선을 보면 흡착시간 60 분에서 파괴 되기 시작 하였으며 수지 함량이 증가할수록 파괴시간이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 화학보호복의 화학적 투과시험을 통한 파괴시간 산정에 관한 실험적 연구결과(Ko and Park 2010)와 유사한 파괴곡선을 갖고 있었다.

이온교환섬유에 의한 유해가스 및 VOC 제거기술에 관한 연구는(Kim 2004) Polypropylene 부직포에 라디칼을 형성시켜 스티렌을 그래프트 중합시켜 산성 및 알칼리성 가스를 흡착제거 시킬 수 있는 섬유상의 흡착제에 관한 연구인데, 이 중합반응은 고분자 내부까지 균일하게 개질이 가능하며 교체 중에서도 용이하게 화학반응을 진행시킬 수 있어 유해가스를 효과적으로 제거할 수 있는 능력을 갖는 것으로 알려져 있다.

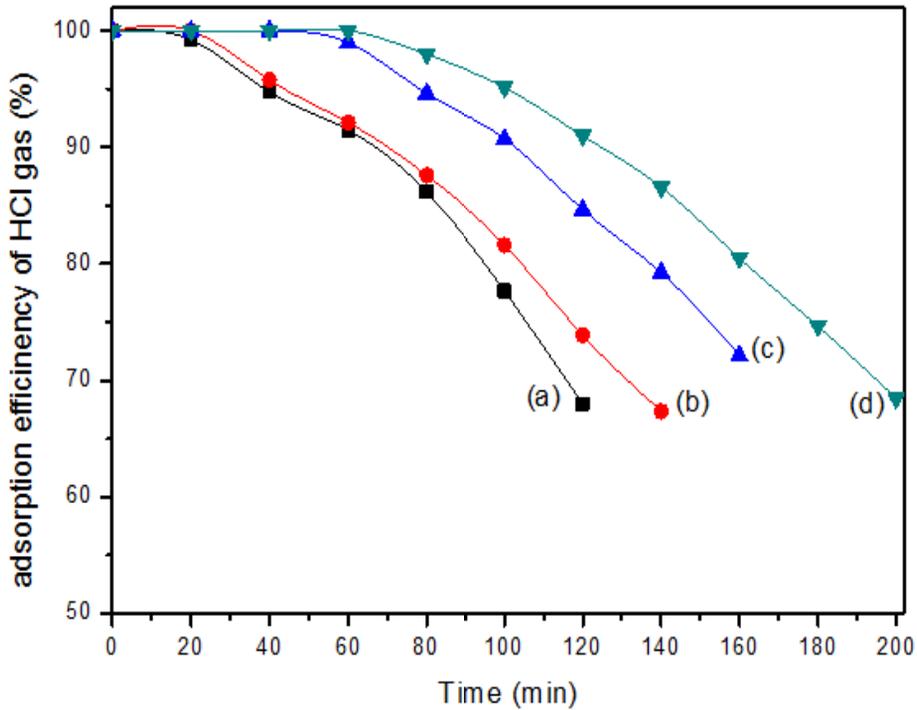


Figure 9. Breakthrough curve of HCl gas according to AMP-160 resin content;  
(a) 180 g, (b) 250 g, (c)300 g, (d) 320 g.

이러한 결과를 종합적으로 살펴보면 흡착제의 물리화학적 특성과 흡착 가스의 선택적 흡착 효율 및 특성이 차이가 있음을 알 수 있고, 보호복 소재의 흡착제의 선정에 있어서는 단일 흡착제 보다는 이 연구에서 검토된 흡착제를 적절히 혼합하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이 연구에서 검토된 방호보호복의 각종 원료 소재들의 특성과 유해화학가스의 선택적 제거율은 HOQ에서 도출된 CA의 기능을 기술적으로 실제 보호복의 품질로 구현해야 극복될 것으로 판단된다. 따라서 목표하는 품질특성 즉 고체임계 표면장력, 공기투과도, 섬유기공도 등을 달성하기 위해서는 HOQ의 특성목표치가 각 EC에서 달성되어야 할 것이다. 따라서 방호 보호복 제품개발 설계 시 각 소재들의 선별과 융합기술의 구현에 있어서 실제 실험 전에 범위 내에서 정량적으로 예측이 가능함을 알 수 있었으며, QFD를 이용하면 제품의 개발 기간을 단축시킬 수 있는 장점이 있었다.

## 5. 결 론

본 연구는 QFD를 이용하여 방호 보호복에 대한 CA와 EC와의 관계를 품질특성으로 정의하고 방호 보호복이 갖추어야 할 유해가스에 대한 선택적 흡착소재를 발굴하기 위해 연구한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) HOQ를 통하여 얻어진 고객 요구속성을 구현하기 위한 방호 보호복의 선택 투과막 소재 발굴은 PP 부직포에 선택적 유해가스 흡착특성을 갖는 4종의 이온교환수지들의 NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl 가스들의 선택적 화학 흡착능으로 평가하였으며, 그 중 TRILITE SCR-BH Ion Exchange Resin은 NH<sub>3</sub>와 HCl이 90 ~ 80 µg/g 수준으로 가장 높았다.

2) 소재들의 유해가스 흡착특성은 이온교환수지의 화학적 특성에 따라서 차이가 있었으나 최적의 방호 보호복의 선택 투과막 제조는 흡착제의 물리화학적 특성과 QFD 기법을 이용하여 평가된 품질요소의 기술적 구현을 위해 적합한 선발 기준으로 활용이 가능할 것이다.

3) 이온교환수지를 이용한 선택투과막 소재들의 수증기 투과율이 1.100 ~ 1350 g/m<sup>2</sup>/day 수준이었다. 이러한 투과율은 분말활성탄 보다 2배정도 높았다.

4) 흡착소재의 발굴과 성능평가는 HOQ에 의해서 도출된 보호복의 CA에 대한 EC의 상호관계와 연계된 기술의 구현으로 가능할 것이다. 제품의 기능향상을 위한 기술의 구현은 QFD 기법을 활용하면 그 가치는 증대될 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- ASTM F 1383-99. 1999. Standard Test Method for Resistance of Protective Clothing Materials to Permeation by Liquids or Gases under Conditions of Intermittent Contact.
- Chao, Lawrence P, and Kosuke, Ishii. 2004. "Project Quality Function Deployment." *International Journal of Quality and Reliability Management* 21(9):938-958.
- Cho, Taeyeon, and Yoon, Seongpil. 2006. "Improving New Product Development Strategy by Integrating Kamo Model and QFD." *Journal of Korea Safety Management & Science* 8(5):57-70.
- Hwang, Taeksung. 2010. "Development of High Selective Ion-Exchange Nanofiber." *Small and Medium Business Administration*.
- Jeong, Haisung. 2013. "Integration of QFD and TRIZ to Solve the Inventive Problem in the Design Process." *Journal of Applied Reliability* 13(3):153-163.
- Kang, Jaesung, Kwon, Taegeun, Kim, Jinwon, Park, Hyenbae, Lee, Haewan, and Seo, Hyeonkwan. 2014. "Preparation of Selectively Permeable Membrane Materials with Enhanced Protective Capability against Blister Agents." *Membrane Journal* 24(2):167-175.
- Kang, Jaesung, Seo, Hyeonkwan, Kwon, Taegeun, Park, Hyenbae, and Lee, Haewan. 2013. "Research about Chemical-biological Protection Capacity of Selectively Permeable Membrane Materials Based on Polyvinyl Alcohol." *Membrane Journal* 23(3):237-244.
- Kang, Jaesung, Seo, Hyeonkwan, Park, Hyenbae, Ryu, Samgon, and Park, Sanghoon. 2012. "A Study on the Design Concept for NBC Clothing." *Journal of the KIMST* 15(2):193-200.
- Kim, Changhee, and Kim, Kwangsoo. 2012. "Optimization of Wiring Process in Semiconductor with 6sigma and QFD." *Asia-Pacific Journal of Business Venturing and Entrepreneurship* 7(3):17-25.
- Kim, Dongwon. 2004. "Technology of Harmful Gas and Hazardous Order Using Physico-Chemical Adsorption With Ion-Exchange Fiber." *Korea Environmental Engineers Federation* 211:82-92.
- Kim, Yeonsung, Park, Youngtaek, Suh, Yungho, Yoo, Wangjin, and Yoo, Hanjoo. 1999. *Total Quality*

- Management. Seoul, Korea: Parkyoung Publishers.
- Ko, Jaesun, and Park, Pyoungkyu. 2010. "An Experimental Study on the Fire Risk Assessment & Calculation Breakthrough Time through Permeation Test of Chemical Protective Clothing." *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering* 24(2):21-30
- KS K ISO 6529. 2011. Protective Clothing - Protection against Chemicals - Determination of Resistance of Protective Clothing Materials to Permeation by Liquids and Gases.
- Park, Youngtaek. 1997. "An Extension of Quality Function Deployment." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 25(4):27-49
- Row, Young, and Park, Jaeok. 2008. "A Study on Apparel Product Design Elements according to Image Preference -Applied to Quality Function Development Focused on Middle Aged and Aged Women's Formal Wear-." *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles* 32(10):1509-1521.
- Schenrell, Diane M. 2001. "Creating Protective Clothing in the Context of the Product Developing Process." *Journal of The Society of Living Environment System* 8(2):119-126.
- Wilusz, E. 2002. "Material Technology for Chemical/biological Protective Clothing." Massachusetts: Natick Solider Center.
- Yang, Jeonghan, Yoon, Namsik, Kim, Inkyo, and Yeum, Jeonghyun. 2011. "Fabrication of Waterproof and Moisture Permeable Polyurethane Nanofiber Multi-membrane." *Journal of Textile Coloration and Finishing* 23(2):107-117.
- Yang, Kabsuk. 2003. "Synthesis and Adsorption properties of Ion-Exchange Non Woven Fabrics for Hanful Gas Adsorption." *Proceedings of the Korean Institute of Industrial Safety Conference, The Korean Society of Safety.*
- Yoon, Cheolhwoan, Kim, Youngpil, and Yun, Deokkyun. 2004. "On How to Determine Customer-oriented Technical Importance Ratings: An Evaluation Study." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 32(3):29-44.
- Yun, Taeil, Seo, Mooyoung, Cho, Hyunil, Ha, Seongyong, Nam, Sangyong, and Rhim, Jiwon. 2006. "Performance Investigation of Water Vapor Permeation Using PVA/PSSA-MA Membrane." *Membrane Journal* 16(2):153-158.

