CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 16, No. 3, September 2010, pp. 172~181

C_5계 수소불화에테르를 기반으로 하는 배합 세정제의 CFC 대체세정제 적용 연구

민혜진, 배재흠,* 장윤상*†

수원대학교 화학공학과, †기계공학과
445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산 2-2

(2010년 8월 17일 접수; 2010년 9월 2일 수정본 접수; 2010년 9월 6일 채택)

A Study on the Applicability of C_5 Hydrofluoroether-based Formulated Cleaning Agents as CFC-Alternatives

Hye Jin Min, Jae Heum Bae,* and Yoonsang Chang*†

Dept. of Chemical Engineering and †Dept. of Mechanical Engineering, The University of Suwon
San 2-2 Wau-ri, bongdam-eup, Hwasung city, Gyeonggi 445-743, Korea

(Received for review August 17, 2010; Revision received September 2, 2010; Accepted September 6, 2010)

요 약

CFC 세정제의 제3 세대 대체세정제로 평가되는 수소불화에테르(hydrofluoroether; HFE)는 불소분자를 함유하고 있어 표면장력이 낮고 습윤지수가 커서 미세입자제거와 불소계 오염물 제거에 우수하고 인화점이 없고 건조성이 뛰어난 물성을 가지고 있지만, 유기물의 용해력은 떨어져 유기 오염물 제거에는 효율적이지 못하다. 본 연구에서는 C_5계 HFE인 HFE-7100 [$CF_3CF_2CF_2CF_2OCH_3$]와 HFE-mec-f[$CF_3CHF=CF_2OCH_2CF_3$]에 유기물질의 용해력이 비교적으로 뛰어난 isopropyl alcohol (IPA), ethyleneglycol monoether (EG), propyleneglycol monoethylether (PM)를 인화점이 나타나지 않는 최대량을 각각 첨가하여 C_5계 HFE 기반의 배합세정제를 제조하여 물성과 여러 종류의 플럭스, 비수용성 절삭유, 불소계 오일에 대한 세정성 평가를 수행하였다. 실험 결과 C_5계 기반의 배합세정제는 단일 불소계 세정제의 여러 가지 물리적 성질의 장점을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 C_5계 기반의 배합세정제는 첨가된 용제에 따라 약간의 차이는 있지만 대체적으로 플럭스, 비수용성 절삭유, 불소계 오일에 우수한 세정력을 나타내어 여러 산업세정 분야에 적용가능성을 보여주었다.

주제어 : 수소불화에테르, 세정제 배합, 대체세정제, 세정성 평가

Abstract : Hydrofluoroethers (HFEs) with fluoride molecules in their structure which are evaluated as the third generation replacement alternatives to chlorofluorocarbons (CFCs) are known to be excellent for removal of nanoparticles and fluoride-type soils due to their low surface tension and high wetting index. In addition, HFEs have good physical properties with no flash point and excellent drying characteristics. But, HFEs also have shortcomings in that they are not effective for removal of organic soils due to their poor solubility in soil.

In this study, C_5 HFE-based cleaning agents were formulated through addition of solvents such as isopropyl alcohol (IPA), ethyleneglycol monoether (EG), propyleneglycol monoethylether (PM) to HFE-7100 [$CF_3CF_2CF_2CF_2OCH_3$] or HFE-mec-f [$CF_3CHF=CF_2OCH_2CF_3$] with its maximum amount, respectively, in order to have no flash point for the safety in the working environment. These solvents are known to be excellent for dissolving organics in soil. Their physical properties and cleaning abilities for fluxes, water-insoluble cutting oils, and fluoride-type oils were evaluated and compared with those of other cleaning agents with single

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail : jhbae@suwon.ac.kr, yschang@suwon.ac.kr

components.

The experimental results show that the HFE-based formulated cleaning agents have various good physical properties which are almost similar to those of a single type of HFE cleaner. They show excellent cleaning ability for fluxes, water-insoluble cutting oils, and fluoride-type oils. These results indicate that the HFE-based formulated cleaning agents can be applicable to various industrial cleaning fields because of their good physical properties and cleaning abilities for various soils.

Keywords : Hydrofluoroether, Formulation of cleaning agents, Alternative cleaning agents, Evaluation of cleaning ability

1. 서 론

CFC-113, 1,1,1-trichloroethane 등과 같은 성층권의 오존 파괴 성질을 갖는 세정제는 대부분의 오염물에 대한 세정력과 건조성이 우수하며, 피세정물 재질에 대한 영향이 없고, 비독성이며 인화성이 없어 안전하므로 거의 모든 산업분야에서 오랫동안 세정제로 사용되어 왔다. 그러나 이들 물질들은 안정적으로 지구성층권까지 도달하여 그 곳에 머무르면서 태양에서 오는 자외선을 차단하여 지구의 생태계와 인류의 안전을 지켜주는 오존의 파괴물질로 알려져서 몬트리올의정서에 의거하여 생산과 사용이 금지되기에 이르렀다[1]. 오존파괴물질인 CFC계 세정제의 제1 세대 대체물질로 CFC계 세정제와 유사한 물리화학적 성질과 세정력을 가진 hydrofluorocarbons(HCFs)의 물질이 개발되어 현재 여러 분야에서 CFC계 세정제를 대체하여 많이 사용하고 있다. 그러나 이들 물질도 CFC계 세정제보다 작지만 오존파괴지수(ODP; ozone-depletion potential)를 가지고 있어 국제협약에 따라 일정기간 후에는 전폐하도록 되어 있다[2]. CFC계 세정제의 제2 세대 대체물질로 오존파괴지수가 0인 hydrofluorocarbons (HFCs)과 perfluorocarbons (PFCs)가 개발되어 HFC43-10-mee [$CF_3CHFCHFCF_2CF_3$]와 같은 일부 물질이 세정제로 사용되고 있으나 이들 물질들은 지구온난화지수(GWP; global-warming potential)가 매우 커서 교토기후변화협약에 의거하여 사용에 규제를 받고 있다[1]. CFC계세정제의 제3세대 대체물질로 미국의 3M사와 일본의 Ashai Glass사에서 hydrofluoroethers(HFEs)계 세정제를 개발하였다. 이들 물질들은 HFCs에 ether결합을 추가해서 제조하여 대기 중의 수명(lifetime)을 줄여 오존파괴지수가 0이 되었고, HFCs 에 비하여 지구온난화지수가 비교적 작다.

HFEs는 여러 가지 물리화학적 성질이 CFC와 유사하여 산업적으로 세정제뿐만 아니라 냉매, 발포제, 소화제 등에 활용되고 있다. HFEs를 세정제로 활용하는 연구는 국내외적으로 그리 많지 않다. Flecher 등이 발화가 우려되고 세정제에 의한 재질의 영향이 우려되는 고농축 산소 환경의 항공기 배관 연결부에서의 hydraulic oil, grease 등의 오염물을 제거하는데 HFE계 세정제인 HFE-7100, HFE71-DE (50% HFE-7100+50% trans-1-2-dichloroethylene) 적용한 사례가 있다[4]. Middleman 등은 10^{-9} mbar의 초진공을 요구하는 입자가속기 진공시스템에서 탄화수소 오염물질을 제거하는데 유해물질인 기존의 세정제 trichloroethylene를 HFE계 세정제로 대체하는 사례를 발표하였다[5]. 그리고 미국의 Naval Surface Warfare Center (NSWC)에서 비산소 계기(non-oxygen gauge) 세정용으로 기존의 HCFC-141b[$CFCl_2CH_3$]를 HFE71-DE로 대체하였다는 보고가 있다[6]. 국내에서는 민 등이 단일 성분의 HFE계 세정제를 CFC 세정제 대체 가능성에 대한 연구를 최근에 실시한 바 있다[7]. 이들 연구에서 보는 바와 같이 HFE계 세정제는 밀도가 크고 표면장력이 극히 작고(13 dyne/cm 이하) 습윤지수가 커서 입자 제거에는 우수하지만 KB값(Kauri-butanol value)이 작아 불소계 오염물을 제외하고는 유기오염물을 제거하기가 어려운 단점이 있다[7,8]. 또한 HFE의 가격이 고가이기 때문에 단일 물질로는 특정 정밀세정 분야나 난연성이 요구되는 방위산업 분야에서 제한적으로 사용되고 있다. 그리고 그 동안 HFE 배합세정제로 사용되어 왔던 HFE71-DE은 세정성이 좋고 건조성이 좋고 난연성이 우수하지만 유해물질인 염소계 세정제와의 배합이므로 특수한 영역에서 밀폐분위기에서만 사용해야 하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 HFE계 세정제의 산업체에서의 적용가능성을 판단하기 위하여 1차적으로 탄소수가 5개인 C_5-HFE계 세정제 단일 성분인 HFE-7100, HFE-476mec, HFE- 449mec-f의 물성과 세정력을 CFC-113, 삼염화에탄(1,1,1-trichloroethane), HCFC-141b, 염화메틸렌(methylene chloride, MC), 이소프로필알코올(isopropyl alcohol, IPA), 글리콜에테르계 세정제 PM (propylene glycol monomethyl ether), EG (ethylene glycol monothyl ether) 등의 물질과 비교 평가하였다. 또한 HFE계 세정제의 단점인 유기물 용해도를 향상시키기 위하여 HFE-7100와 HFE-449mec-f에 염소계 세정제보다 유해하지 않아 대체세정제로 많이 사용하지만, 인화성이 있어 사용에 주의가 필요한 IPA, EG, PM을 각각 인화점이 측정되지 않는 최대 배합 비율로 첨가하여 배합세정제를 제조하고 물성과 세정성능평가를 시행하여 HFE를 기반으로 하는 배합세정제의 세정분야 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실 험

2.1. 실험재료

본 연구에 사용한 세정제와 세정 대상 오염물에 대해서 Table 1과 Table 2에 요약하여 나타내었다. 세정제는 한국과학기술연구원

Table 1. Mixing ratio of HFEs to additives in the HFE-base formulated cleaning agents

Classification	HFEs	Additives	Mixing ratio
Formulated cleaning agents	HFE-7100	IPA	80:20
	HFE-7100	EG	50:50
	HFE-7100	PM	30:70
	HFE-449mec-f	IPA	80:20
	HFE-449mec-f	EG	60:40
	HFE-449mec-f	PM	50:50

(KIST)에서 합성한 HFE-476mec [$CF_3CHF= CF_2OCH_2CF_3$]와 HFE-449mec-f [CF_3CHFCF_2 OCH_2CH_3]를 공급받아 사용하였다. 이들 제품 중에 HFE-476mec는 순도가 73.3%, 75.3%, 94.2%의 3종류였고, HFE-449mec-f는 순도 88.0%이었으며, 나머지 성분은 IPA 및 여러 불순물이 함유되어있는 것으로 확인되었다. HFE-476-mec와 HFE-449mec-f는 두 물질 모두 C_5계 HFE 물질이지만 HFE-476-mec-f가 구조식에서 불소원자수가 3개 더 많고 수소원자수가 3개 더 적다[9]. 이들 KIST의 합성 제품들과 비교 대상 제품으로 상용화되어 시판 중인 HFE-7100 ($CF_3CF_2CF_2CF_2OCH_3$; methyl nonafluorobutyl ether; 3M Novec^{TM})을 사용하였다. 그리고 이들 HFE계 세정제와 비교 대상의 세정제로 CFC-113. 1,1,1,-TCE, MC, HCFC-141b, IPA, PM, EG는 시중에서 구입하여 정제 없이 사용하였다. 배합 세정제로는 Table 1과 같이 첨가제 IPA, EG, PM을 HFE- 7100과 HFE-449mec-f(88.0%)와 각각 인화점이 측정되지 않는 최대 혼합비율을 선정하여 물성과 세정성능평가를 시행하였다.

세정 대상 오염물로는 인쇄회로기판(printed circuit board)의 조립 생산과정에서 납땜을 원활히 하기 위해 사용되는 4가지의 플럭스를 대상으로 하였다. 비수용성 플럭스는 DF-500 (두성공업화학), Alpha615-15(Alpha Metals)를 대상으로 하였으며. 수용성 플럭스는 WS609(Alpha Metals), WF6063M (Senju Metals)을 대상으로 하였다. 위의 4가지 flux에 대한 조성을 Table 2에 나타내었다. 또한 가공성 향상을 위해 사용되는 유제인 비수용성 절삭유(bath oil 70%, lard oil 15%, chlorinated paraffin 15%; KOTON 226G, 한국하우톤), 여러 기계류의 윤활제로 사용되는 불소계 오일(polyfluoro polyether)을 선정하여 실험하였다. 오염물 도포에는 오염물과 세정제에 의한 부식성이 거의 없는 스테인레스 평판(SUS 304 plate :25×75×2)을 재질호환성 평가 후 사용하였다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서는 각 세정제의 기본성질을 알아보기 위해 우선 pH, 비등점, 밀도, 점도, 표면장력 등을 측정하였다. pH는 pH meter(Istec 125PD)를 이용하여 25±1℃에서 3회 측정 후 평균하였으며. 비등점은 distillation tester(Maker?, AD-6)를 이용하여 플라스크 에 100 ml의 세정제를 넣고 끓기 시작하는 지점의 온도를 자동적으로 측정하였다. 밀도는 density/specific gravity meter (KEM Kyoto Electronics, DA-110M)를 이용하여 25±1℃에서 3회 측정하여 평균하였으며. 점도는 viscometer (Brookfield, LVDV∏ +CP), 표면장력은 surface tensionmeter (Fisher Scientific, Surface Tensionmat 21)를 이용하여 25±1℃에서 3회 측정하여 평균하였다.

Table 2. Composition of various flux tested in this work

	Flux Model (Company, Country)	Composition
Water-insoluble flux	DF-500 (Doosung, Korea)	IPA 78%, Rosin 17%, Other 5%
	Alpha 615-15 (Alpha Metals, Korea)	IPA 75%, Mineral Spirits 10%, Tail Oil Rosin 10%, Other 5%
Water-soluble flux	WS609 (Alpha Metals, Korea)	Dipropylene Glycol Methyl ether 20~25% 30~35% Nonionis Surfactant 15~20% Amine Surfactant 25~30%
	WF6063M (Senju Metals, Japan)	Sn-Ag-Cu-In metal alloy

또한 세정제의 세정성능을 예측할 수 있는 지수인 습윤지수(wetting index)를 구하였다. 습윤지수는 밀도(ρ), 점도(μ), 표면장력(γ)의 관계식으로 다음 식과 같이 무차원값으로 계산된다.

$$W= \frac{\rho \times 1000}{\mu\gamma} \quad (1)$$

습윤지수가 큰 값을 갖는 세정제일수록 오염물질에 용이하게 침투하고, 오염물질을 쉽게 수중으로 탈착시켜 세정효율을 증가시키는 것으로 알려져 있다.

인화점 측정은 인화점 측정기(Grabner, MINIFLASH FLPH Tester)을 사용하여 ASTM D 6450 표준시험법에 따라 측정하였다. 또한 증기압 측정은 automatic vapor pressure tester(TANAKA Scientific Limeted, AVP-30D)를 사용하여 ASTM D 323의 표준 시험법에 따라 측정하였다. 그리고 세정제의 유기물질의 용해력을 판단하기 위하여 세정제가 같은 부피의 아닐린과 완전히 용해하는 최저 온도인 아닐린점(aniline point)을 KS M2053 시험법에 따라 측정하였다.

세정성능평가는 오염물질인 플럭스의 경우 피세정물에 일정량을 도포하고, 105℃에서 12시간동안 baking하여 용매를 제거한 후 사용하였으며, 불소계 오일, 비수용성 절삭유 등은 시편을 오염물질에 침적하여 도포한 후 desiccator에서 24시간 동안 상온 건조하여 사용하였다. 세정성능평가는 세정, 건조의 2단계로 이루어졌으며, 오염물질을 균일하게 도포한 시편을 교반 없이 세정제에 일정시간 동안 담금으로써 단순침적 세정하고, 60℃의 강제대류오븐(forced convection oven)에서 잔류 세정제를 건조시켜 중량법으로 반복 측정하여 진행하

Table 3. Physical properties of cleaning agents with single component

Physical properties / Cleaning agents	pH	Boilig point (℃)	Density (g/cm^3)	Viscosity (cP, at 25℃)	Surface tension (dyne/cm)	Flash point (℃)	Vapor pressure (kPa, at 37.8℃)	Wetting index	Aniline point (℃)
CFC-113	5.01	48	1.5136	0.65	20.7	none	123.7	112	<-20
1,1,1-TCE	5.78	87	1.3105	0.86	28.7	none	29.9	53	<-20
MC	6.13	40	1.2933	0.17	31.8	none	82.4	239	<-20
HCFC-141b	5.02	30.8	1.2360	0.58	21.4	none	129.3	100	<-20
IPA	6.66	80	0.7832	2.74	23.6	18.9	20.9	12	<-20
EG	5.70	135	0.9300	1.22	28.8	44	9.2	26	<-20
PM	3.91	120	0.9201	1.58	25.8	38	3.1	23	<-20
HFE-7100	6.00	61	1.5097	0.61	13.6	none	54.2	182	<-20
HFE-476mec(73.3%)	4.08	71	1.3006	1.02	14.8	none	32.7	86	<-20
HFE-476mec(75.3%)	5.29	71	1.3105	0.98	14.3	none	31.8	94	<-20
HFE-476mec(94.2%)	5.61	70	1.4371	0.72	13.8	none	32.0	145	<-20
HFE-476mecf(88.0%)	5.32	69	1.5354	1.05	14.0	none	31.5	104	<-20

였다. 구체적인 실험방법은 여러 문헌에 자세히 기록되어 있다 [10,11].

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 세정제의 물성측정 결과

각 단일 세정제의 물성측정 결과를 Table 3 에 나타내었다. pH를 측정한 결과 대부분의 세정제가 3.9~6.7로 약산성임을 나타내었다. 비점측정 결과 EG와 PM을 제외한 모든 실험 대상 세정제의 비점이 물보다 낮아 쉽게 상압에서 기화가 잘 일어날 것으로 판단되었다. HFE-476mec는 순도가 높아질수록 밀도는 높아지고 점도와 표면장력이 낮아짐에 따라 습윤지수가 높아져 세정성능 효율이 높아질 것으로 기대되었다. 그리고 HFE계 세정제들은 표면장력이 13.6~14.8 dyne/cm로 타 세정제보다 월등히 낮고 습윤지수가 높아 오염물에 대한 침투력이 높을 것으로 기대되며, 인화점이 없어 안전하지만 증기압이 높아 증발손실이 우려된다. 그리고 아닐린점도 낮아 오염물질에 대한 큰 용해력이 기대된다.

HFE 기반의 배합 세정제의 물성은 Table 4에 나타내었다. pH를 측정한 결과 단일 세정제와 같이 대부분의 세정제가 3.3~6.2로 약산성 또는 중성세제임을 나타내었다. 비점은 53~71℃로 물보다 낮아 쉽게 상압에서 기화가 잘 일어날 것으로 판단되었다. 점도측정 결과 배합세정제 중 HFE-449mec-f 과 IPA를 배합한 세정제의 점도가 0.42 cP로 가장 낮은 값을 나타내었으며. 습윤지수가 다른 배합세정제보다 가장 높아 높은 세정효율을 보일 것으로 기대되었다. 표면장력은 HFE-7100과 IPA를 배합한 세정제가 13.6 dyne/cm로 가장 낮은 표면장력을 보였다.

HFE-7100과 HFE-449mec-f에 배합 세정제 중 PM과 배합된 세정제가 다른 배합세정제보다 점도(1.15, 1.05 cP)와 표면장력 (16.4, 17.5 dyne/cm)이 가장 높음을 알 수 있었다. HFE계 세정제가 인화점이 없는 점을 활용하여 HFE계세정제를 기반으로 하여 배합한 세정제들도 인화점이 없어 사용하고 취급하기에 안전하며 IPA, EG 및 PM가 함유되어 있어 HFE계 세정제가 취약한 유기물질 세정에 적합할 것으로 기대된다. 또한 이들 배합세정제들은 증기압도 높아 건조에 용이하지만 세정제의 증발손실에 유의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2. 세정제의 세정성 평가

3.2.1. 단일 세정제의 비교 평가

각 단일 세정제의 세정성 평가 결과를 Table 5~10에 나타내었다. 각 단일 세정제의 세정성 평가 결과 모든 오염물에 대해서 HFE-476mec는 순도가 높아짐에 따라 높은 세정효율을 보

Table 4. Physical properties of formulated cleaning agents

Formulated cleaning agents / Physical properties		pH	Boiling point (℃)	Density (g/cm^3)	Viscosity (cP, at 25℃)	Surface tension (dyne/cm)	Flash point (℃)	Vapor pressure (kPa, at 37.8,℃)	Wetting index	Aniline point (℃)
HFE-7100:IPA	8:2	5.50	53.3	1.3409	0.56	13.6	none	59.4	176	<-20
HFE-7100:EG	5:5	6.23	58.1	1.2101	0.86	14.8	none	43.2	95	<-20
HFE-7100:PM	3:7	4.11	56.6	1.0901	1.15	16.4	none	44.7	58	<-20
HFE-449mec-f:IPA	8:2	4.74	64.8	1.3709	0.42	14.7	none	42.9	222	<-20
HFE-449mec-f: EG	6:4	4.13	67.8	1.2705	0.95	16.3	none	30.8	84	<-20
HFE-449mec-f:PM	5:5	3.34	70.7	1.2100	1.05	17.5	none	29.4	66	<-20

Table 5. Cleaning efficiency of water-insoluble DF500 flux by single cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning time	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1,1,1-TCE	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	42.00	42.00	48.00
MC	99.04	99.04	99.04	99.24	99.27	99.27	99.19	99.33
HCFC-141b	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
IPA	29.17	52.78	52.78	55.56	55.56	55.56	55.94	55.94
EG	28.57	28.57	38.10	38.10	47.62	61.90	61.00	80.94
PM	14.29	17.86	42.86	71.43	71.43	71.43	71.43	71.43
HFE-7100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.31	40.00	40.00
HFE-476mec(73.3%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HFE-476mec(75.3%)	34.38	40.63	46.88	46.88	56.25	62.50	68.75	68.75
HFE-476mec(94.2%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-449mec-f(88.0%)	50.00	73.33	73.33	73.33	73.33	80.00	86.67	86.67

Table 6. Cleaning efficiency of water-insoluble Alpha 615-15 flux by single cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning time	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1,1,1-TCE	97.71	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
MC	93.13	96.95	96.95	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HCFC-141b	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
IPA	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100	12.50	16.67	16.67	19.17	22.50	24.17	24.17	25.00
HFE-476mec(73.3%)	8.80	16.00	24.80	24.80	28.00	32.80	36.80	37.60
HFE-476mec(75.3%)	74.62	88.46	93.08	95.38	99.23	100.00	100.00	100.00
HFE-476mec(94.2%)	73.96	89.58	96.88	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-449mec-f(88.0%)	5.47	14.84	22.66	28.13	32.81	35.94	97.50	44.53

Table 7. Cleaning efficiency of water-soluble WS609 flux by single cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning time	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1,1,1-TCE	77.51	86.60	88.04	88.04	93.78	94.26	97.13	97.13
MC	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HCFC-141b	76.77	82.26	83.87	83.87	83.87	84.84	88.39	88.39
IPA	98.42	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100	11.68	12.18	14.59	14.59	17.39	17.39	18.65	18.65
HFE-476mec(73.3%)	23.26	52.56	59.07	60.93	61.40	61.40	64.19	64.65
HFE-476mec(75.3%)	69.05	85.71	92.86	96.03	96.03	99.21	100.00	100.00
HFE-476mec(94.2%)	63.60	88.00	94.80	96.80	96.80	100.00	100.00	100.00
HFE-449mec-f(88.0%)	0.00	15.52	17.24	23.28	23.28	30.17	31.03	37.93

여주었다. 이는 순도가 높아짐에 따라 표면장력이 낮고 습윤지수가 높아 오염물에 더 잘 침투하여 세정효율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 그리고 일반적으로 비수계 오염물인 경우 불소함유량이 적은 HFE-476mec가 불소함유량이 많은 HFE-476mec-f보다 특히 세정성이 우수하였으며 수계 오염물인 WF6063M flux의 경우는 HFE-476mec-f세정제의 세정성이 MC, EG와 같이 아주 우수하였다. 오염물이 불소계 오일인 경우 HFE계 세정제와 불소를 함유하고 있는 CFC-113과 HCFC-141b 세정제는 모두 100%의 세정효율을 보였다. 반면에 MC, 1,1,1-TCE를 포함한 불소를 함유하고 있지 않은 나머지 세정제는 저조한 세정효율을 보여주었다. 이와 같은 세정실험 결과는 이전의 Trifluoroethanol 등과 같은 불소계 세정제

Table 8. Cleaning efficiency of water-soluble WF6063M flux by single cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning time	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1,1,1-TCE	89.35	93.23	96.13	95.16	96.13	97.10	100.00	100.00
MC	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HCFC-141b	76.89	86.67	94.22	94.22	94.22	94.22	98.22	98.22
IPA	16.17	27.17	31.13	34.78	36.35	40.87	94.96	96.52
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	94.58	98.52	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100	5.44	38.77	40.88	40.88	40.88	44.21	48.25	49.85
HFE-476mec(73.3%)	18.60	27.27	30.17	32.23	32.23	32.23	35.12	35.54
HFE-476mec(75.3%)	42.55	59.57	76.60	80.85	85.11	85.11	87.23	91.49
HFE-476mec(94.2%)	72.73	84.21	88.04	91.87	91.87	92.34	92.34	92.34
HFE-449mec-f(88.0%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 9. Cleaning efficiency of water-insoluble cutting oil by single cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning time	1 min	2 min	3 min	4 min	6 min	8 min	10 min
CFC-113	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1,1,1-TCE	99.62	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
MC	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HCFC-141b	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
IPA	98.84	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100	41.20	51.80	69.50	76.30	87.60	92.80	95.90
HFE-476mec(73.3%)	57.19	71.88	78.13	78.13	78.13	78.13	78.75
HFE-476mec(75.3%)	76.14	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-476mec(94.2%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-449mec-f(88.0%)	55.63	69.72	76.06	79.58	86.62	90.14	94.37

Table 10. Cleaning efficiency of polyfluoropolyether lubricating oil by single cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning time	1 min	2 min	3 min	4 min	6 min	8 min	10 min
CFC-113	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1,1,1-TCE	71.01	71.01	71.43	71.43	71.43	71.43	71.43
MC	16.79	19.08	22.52	25.19	32.06	32.06	33.97
HCFC-141b	44.28	73.19	94.58	100.00	100.00	100.00	100.00
IPA	46.34	46.88	47.97	49.59	52.30	52.30	52.30
EG	13.21	18.93	24.29	25.71	25.71	25.71	25.71
PM	37.87	40.83	47.04	48.52	50.89	50.89	50.89
HFE-7100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-476mec(73.3%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-476mec(75.3%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-476mec(94.2%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-449mec-f(88.0%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

의 세정성 평가결과와 일치하였다[7]. 또한 비수용성 flux인 DF500과 불소계 오일을 제외하고는 HFE계 단일 세정제보다 EG, PM의 세정성이 뛰어나 이들 물질을 적절히 배합하면 좋은 배합세정제가 기대된다.

3.2.2. HFE계 배합세정제의 비교 평가

HFE계세정제인 HFE-7100과 HFE-mec-f(88.0%)에 각각 인화점이 나타나지 않도록 IPA, EG, PM을 최대로 첨가하여 제조한 HFE계 배합 세정제의 세정성 평가 결과를 Table

Table 11. Cleaning efficiency for water-insoluble DF500 flux by formulated cleaning agents

Cleaning time / Cleaning agents	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
IPA	29.17	52.78	52.78	55.56	55.56	55.56	55.94	55.94
EG	28.57	28.57	38.10	38.10	47.62	61.90	61.90	80.95
PM	14.29	17.86	42.86	71.43	71.43	71.43	71.43	71.43
HFE-7100[H1]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.31	40.00	40.00
HFE-449mec-f(88.8%)[H4]	50.00	73.33	73.33	73.33	73.33	80.00	86.67	86.67
H1:IPA = 80:20	13.64	22.73	25.76	28.79	28.79	29.39	48.48	50.00
H1:EG = 50:50	30.95	42.86	52.38	61.09	71.43	71.43	71.43	71.43
H1:PM = 30:70	0.00	9.09	63.64	70.45	84.09	84.09	95.45	95.45
H4:IPA = 80: 20	40.74	48.15	74.07	74.07	74.07	74.07	74.07	74.07
H4:EG = 60:40	81.25	96.88	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:PM = 50:50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 12. Cleaning efficiency of water-insoluble Alpha 615-15 flux by formulated cleaning agents

Cleaning time / Cleaning Agent	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
IPA	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100[H1]	12.50	16.67	16.67	19.17	22.50	24.17	24.17	25.00
HFE-449mec-f(88.8%)[H4]	5.47	14.84	22.66	28.13	32.81	35.94	37.50	44.53
H1 : IPA = 80 : 20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1 : EG = 50 : 50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1 : PM = 30 : 70	87.50	98.08	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4 : IPA = 80 : 20	97.56	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4 : EG = 60 : 40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4 : PM = 50 : 50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 13. Cleaning efficiency of water-soluble WS609 flux by formulated cleaning agents

Cleaning time / Cleaning agents	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
IPA	98.42	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100[H1]	11.68	12.18	14.59	14.59	17.39	18.65	18.65	18.65
HFE-449mec-f(88.8%)[H4]	0.00	15.52	17.24	23.28	23.28	30.17	31.03	37.93
H1:IPA = 80:20	39.37	58.95	69.63	76.66	88.53	93.37	95.75	97.63
H1:EG = 50:50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1:PM = 30:70	93.37	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:IPA = 80: 20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:EG = 60:40	97.54	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:PM = 50:50	61.88	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

11~16 에 나타내었다. Table 11에는 비수계 flux인 DF-500의 세정효율을 나타내었는데 HFE-7100는 단일로 사용한 경우 40%의 세정효율을 나타냈지만, IPA, EG, PM과 각각 배합한 경우 단일로 사용하였을 때보다 세정효율이 상승되었으며, PM과 배합한 세정제가 가장 높은 효율을 보여주었다. 그리고 HFE-449mec-f에 IPA, EG, PM을 각각 배합한 세정제는 단일로 사용한 세정제들보다 우수한 세정효율을 보여 주었다. 특히 EG와 PM과 배합한 세정제는 10분 이내에 100% 세정효율을 보여주었으며 EG, PM 단일 세정제 보다 세정효율이 훨씬 높아 두 세정제의 배합에 따른 상승(synergy)효과가 있음을 나타내었다. Table12에서는 비수용성 플럭스 Alpha 615-15에 대한 배합세정제의 우수한 세정효율을 보여주고 있다.

Table 14. Cleaning efficiency of water-soluble WF6063M flux by formulated cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning Time	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
IPA	16.17	27.17	31.13	34.78	36.35	40.87	94.96	96.52
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	94.58	98.52	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100[H1]	5.44	38.77	40.88	40.88	40.88	44.21	48.25	49.82
HFE-449mec-f(88.8%)[H4]	42.55	59.57	76.60	80.85	85.11	85.11	87.23	91.49
H1:IPA = 80:20	9.62	15.95	52.38	55.54	81.56	85.07	87.10	84.39
H1:EG = 50:50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1:PM = 30:70	91.49	98.58	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:IPA = 80: 20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:EG = 60:40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:PM = 50:50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 15. Cleaning efficiency of water-insoluble cutting oil by formulated cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning Time	1 min	2 min	3 min	4 min	6 min	8 min	10 min
IPA	98.84	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
EG	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PM	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-7100[H1]	41.20	51.80	69.50	76.30	87.60	92.80	95.90
HFE-449mec-f(88.8%)[H4]	55.63	69.72	76.06	79.58	86.62	90.14	94.37
H1:IPA = 80:20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1:EG = 50:50	74.79	98.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1:PM = 30:70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:IPA = 80: 20	45.17	61.39	72.97	80.31	89.19	98.07	100.00
H4:EG = 60:40	64.36	88.83	94.68	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:PM = 50:50	50.13	64.00	74.13	82.93	92.00	94.93	99.47

Table 16. Cleaning efficiency of polyfluoropolyether lubricating oil by formulated cleaning agents

Cleaning agents \ Cleaning Time	1 min	2 min	3 min	4 min	6 min	8 min	10 min
IPA	46.34	46.88	47.97	49.59	52.30	52.30	52.30
EG	13.21	18.93	24.29	25.71	25.71	25.71	25.71
PM	37.87	40.83	47.04	48.52	50.89	50.89	50.89
HFE-7100[H1]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
HFE-449mec-f(88.8%)[H4]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1:IPA = 80:20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H1:EG = 50:50	5.46	6.26	6.40	6.60	6.69	6.69	6.69
H1:PM = 30:70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:IPA = 80: 20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:EG = 60:40	75.88	91.87	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
H4:PM = 50:50	30.21	59.38	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00

HFE계 세정제에 단일 세정제로는 세정효율이 극히 저조하지만 IPA, EG, PM을 배합하여 세정효율이 IPA, EG, PM 세정효율과 같아짐을 볼 수 있다.

Table 13에는 수용성 플럭스 WS609의 세정효율을 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이 HFE-7100와 HFE-449mec-f 모두 단일로 사용하였을 경우보다 IPA, EG, PM을 배합하였을 경우 매우 우수한 세정효율을 나타내었다. Table 14에는 수용성 플럭스 WF 6063M에 대한 세정효율을 나타내었다. 수용성 플럭스 WS609DML 세정 결과가 마찬가지로 HFE계 세정제인 HFE-7100와 HFE-449mec-f는 세정 효율이 저조하였지만 IPA, EG, PM을 배합할 경우 세정효율이 상승함을 알 수 있다.

Table 15에는 비수용성 절삭유에 대한 세정효율을 나타내었다. 모든 배합 세정제 모두 단일의 HFE계 세정제보다 세정시간이 단축되었고, 세정효율이 상승함을 볼 수 있었다. 비수용성 절삭유 역시 앞의 플럭스와 마찬가지로 IPA, PM, EG을 배합할 경우 세정력을 상승시킴으로 HFE 세정제와 타세정제와 적절히 배합하여 각 세정제의 단점을 보완할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 16은 불소계 오일에 대한 세정효율을 나타내었다. 불소계 오일에서는 HFE-7100 과 각각 IPA, PM 을 배합한 세정제는 100%의 매우 높은 세정효율을 보인 반면 EG 배합한 세정제는 10% 미만의 매우 저조한 세정효율을 보여주었다. 이것은 EG가 저조한 세정력을 가지고 있어 세정력이 우수한 HFE-7100의 세정효율에 영향을 끼쳐 세정력이 낮추기 때문인 것으로 판단되어진다. 그러나 HFE-449mec-f와 EG와 배합한 세정제는 이러한 현상이 나타나지 않았는데 이것은 HFE-449mec-f 중에 IPA 등의 불순물이 영향을 주었기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 Table 16에서 보는 바와 같이 HFE-449mec-f와 배합한 모든 세정제는 4분 이내 100%의 세정효율을 나타내어 불소계 오염물에 대하여 HFE 세정제에 적절히 타세정제를 혼합하여 세정효율을 유지하면서 고가의 HFE 세정제 사용량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

Figure 1~3은 앞의 결과들 중에서 HFE-449-mec-f[H4]에 PM, EG, IPA에 첨가하여 각각 비수용성 flux, 수용성 flux, 비수용성 절삭유 및 불소계 오일을 세정한 결과를 구체적으로 도시한 그래프이다. Figure 1는 H4, PM, 그리고 이들의 배합물 세정제의 비수용성 flux인 DF 500와 Alpha 615-15에 대한 세정결과를 요약한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 H4, PM는 단일 세정제로 사용할 경우 DF500에 대하여 저조한 세정효율을 보여 주었지만 두 물질을 5:5로 배합한 세정제가 훨씬 세정력이 좋게 나타났다. 그리고 비수용성 flux인 Alpha 615- 15에 대해서는 PM은 아주 좋은 세정효율을 보여 주었지만 불소계 세정제는 아주 저조한 세정효율을 나타내었고 이들 두 물질을 배합하였을 경우 PM과 같은 우수한 세정효율을 보여 주었다.

Figure 2는 H4, IPA, 그리고 이들의 배합물세정제의 수용성 flux인 WS609와 WF6063M에 대한 세정결과를 요약한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수용성 flux인 WS609 에 대해서 IPA는 탁월한 세정력을 보여주지만 불소계 세정제인 H4는 극히 저조한 세정력을 보여 주었고 이들을 8:2로 배합한 세정제는 IPA만큼 우수한 세정력을 보여주었다. 그러나 또 다른 타입의 수용성 flux인 WF6063M는 반대로 IPA에 대해서는 세정력이 떨어지고 불소계 세정제가 초기에 더 높은 세정력을 보여주었는데 이들 물질을 8:2로 배합하였을 때 개별 세정제보다 세정력이 월등하게 향상됨을 보여주고 있다.

Figure 3은 H4, EG, 그리고 이들의 배합세정제의 비수용성 절삭유와 불소계 오일에 대한 세정결과를 나타낸 것이다. 불소계세정제인 H4의 비수용성 절삭유에 대한 세정력은 그리 나쁘지는 않지만 EG의 세정력은 이보다 좋고 이들 물질을 6:4로 배합하였을 경우 더욱 좋아지는 것으로 나타났다. 그리고 H4의 불소계 오일에 대한 세정력은 탁월하였고 IPA의 불소계 오염물에 대한 세정력은 저조하였으며 이들 물질을 6:4로 배합하였을 경우 인화점이 없으면서 불소계 오염물에 대한 우수한 세정력을 보여주었다.

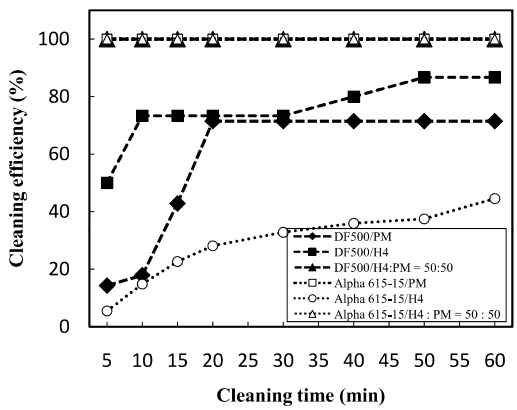

Figure 1. Comparison of cleaning efficiency for two types of water-insoluble flux by single and formulated cleaning agents.

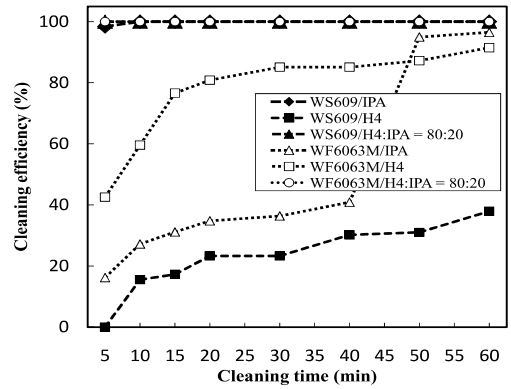

Figure 2. Comparison of cleaning efficiency for two types of water-soluble flux by single and formulated cleaning agents.

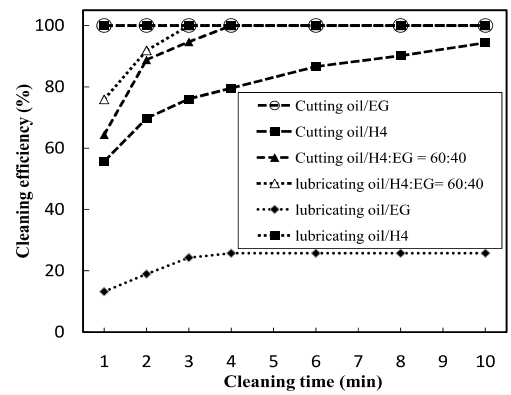

Figure 3. Comparison of cleaning efficiency for two types of water-insoluble and fluoride-type oils by single and formulated cleaning agents.

4. 결 론

본 연구에서는 단일 C_5계 HFE계 세정제, 그리고 이들 세정제에 최근 CFC 대체세정제로 널리 사용되는 IPA, EG, PM를 첨가하여 제조한 배합세정제의 물성과 이들 세정제에 대한 물성 및 세정성능평가를 진행하였다. 단일 세정제의 물성측정 결과 HFE계 세정제는 표면장력이 낮고 습윤지수가 커서 오염물질에 대한 침투력에 의하여 세정력이 지배될 것으로 추정되었다. 또한 불연성이므로 안전하지만 증기압이 커서 건조성이 우수하지만 증발손실이 우려되었다. HFE-476-mec의 경우 순도가 높아짐에 따라 표면장력이 작아지고 습윤지수가 커져서 오염물질에 대한 침투력이 높아 세정력이 우수할 것으로 기대되었다.

단일 세정제의 세정성능실험 결과 불소계세정제는 유기성 오염물에 대한 세정력이 떨어지지만 IPA, EG, PM등은 유기물 세정력이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 불소계세정제는 유사한 구조를 가진 물질은 서로 잘 녹는다(like dissolves like)는 원리에 따라 불소계 오염물질에 대하여 세정효율이 매우 뛰어남을 확인할 수가 있었다. HFE-476-mec은 순도가 높아짐에 따라 세정효율이 증가함을 볼 수 있었으며, DF500, alpha615-15, WS609, WF6063M 등의 flux 세정 결과 매우 우수한 세정효율을 보여주었다.

배합세정제의 물성 측정 결과 IPA, EG, PM의 영향으로 단일 HFE계 세정제의 표면장력보다 배합한 세정제 모두 표면장력이 소폭 증가하였으며. IPA와 HFE-449-mec-f를 배합한 세정제를 제외한 나머지 배합세정제 모두 습윤지수가 감소하여 오염물질에 대한 침투력이 떨어질 것으로 추정되었다. 그러나 IPA, EG, PM은 인화점이 있지만 HFE계 세정제와 적절히 배합한 세정제는 인화점이 없음을 확인할 수 있었다. 각 배합 세정제의 대부분의 오염물질에 대한 세정성능 결과 낮은 표면장력, 높은 오염물질 침투력, 극성의 증가 등의 물리화학적 성질의 향상으로 더 우수한 세정력을 나타내었다. 이로써 고가인 HFE계 세정제에 오염물질에 종류에 따른 적절한 용제 및 첨가제를 배합함으로써 HFE계 세정제를 효율적으로 활용 가능함을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 지식경제부의 CFC 대체실용화기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Tsai, W. T., "Environmental Risk Assessment of Hydrofluororethers (HFEs)," *J Hazard. Mater.,* A119, 69-78 (2005).
2. Lim, S. Y., "Montreol Protocol and Status of Supply and Demand of Ozone Destruction Material in Domestic Market," Seminar and Workshop for Environmental-friendly Industrial Cleaning, Korea Testing and Research Institute/The University of Suwon, 2-22 (2010).
3. Seika, A., and Misaki, S., "The Potential of Hydrofluoroethers to Replace CFCs, HCFCs and PFCs," *J Fluorine Chem.*, **101**(2), 215-221 (2000).
4. Flecher, L. E., Zugno, R., and Dimas, J., "Pipe Cleaning Using HFE Solvents and Assesment of Particle Contamination Found during Pipe Connection," Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Tenth Volume ASTM STP 1454, Steinberg , T. A. Beeson, H. D. and Newton, B. E., Eds., ASTM International, West Conshhocken, PA, 2003.
5. Middleman, K. J., Herbert, J. D. and Reid, R. J., "Cleaning Stainless Steel for Use in Accelerators - Phase 1" *Vacuum*, **81**, 793-798 (2007).
6. Bishop, M., "Cautions on Using HFE-71DE for Gauge Cleaning," *Currents* (3M Corp.), 56-58 (2006).
7. Min, H. J., Shin, J. H., Bae, J. H. Kim, H. G., and Lee, H. J., "A Syudy on Applicability of Hydrofluoroethers as CFC-Aternative Cleaning Agents," *Clean Tech.*, **14**(3), 184-192 (2008).
8. Robins Air Force Base, "Process and Alternative Evaluation Report - BLDG 169 Vapor Degreasing," WR-ALC/EMP Robins Air Force Base, Georgia, January 2000.
9. Lee, H. J., "A Study on the Development of C_5 Hydrofluoroethers," Final Report, UCM2199-8649-6, Korea Institute of Science and Technology, September, 2009.
10. Min, H. J., "Studies on Applicability of Hydrofluoroether- based Cleaning Agents as CFC-alternative Ones and Evaluation of Cleaning Ability of Ionic Reductive Water and Investigation of its Emulsification Effect in Formulated Lotion," Master Thesis of Chemical Engineering, the University of Suwon 2009.
11. Yoon, H. J., and Lim, C. S., "A Study on Evaluation of Cleaning Ability of Hydrofluoroethers as Alternative Cleaning Agents," Bachelor Thesis of Chemical Engineering, the University of Suwon 2008.