

# 변압기 오일 내 PCBs의 화학적 탈염소공정: 실용적인 접근

유건상 · 변상혁 · 최종하

국립 안동대학교 응용화학과

(2009년 3월 31일 접수; 2009년 7월 16일 수정; 2009년 7월 22일 채택)

## Chemical Dechlorination Process of PCBs in Industrial Transformer Oil: Approach to Practical Use

Keon Sang Ryoo, Sang Hyuk Byun and Jong-Ha Choi

Department of Applied Chemistry, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Manuscript received 31 March, 2009; revised 16 July, 2009; accepted 22 July, 2009)

### Abstract

A practical and efficient disposal method for chemical dechlorination of PCBs (polychlorinated biphenyls) in transformer oil was evaluated. The transformer oil containing PCBs was treated by the PEG 600 (polyethylene glycol 600) and potassium hydroxide (KOH) along with different reaction temperatures (25, 50, 100 and 150°C) and times (30, 60, 240 and 480 min). The best disposal efficiency of PCBs in transformer oil was attained under the experimental conditions of PEG 600 (2.5 w/w%)/KOH (2.5 w/w%)/150°C/4 hrs, showing completely removal of all PCBs containing 3-9 chlorines on two rings of biphenyl. In studying the reaction of PEG/KOH with PCBs, it confirmed that the process led to less chlorinated PCBs through a stepwise process with the successive elimination of chlorines.

**Key Words :** Aryl polyglycol, Dechlorination, PCBs, PEG 600, Transformer oil

### 1. 서 론

PCBs (polychlorinated biphenyls)는 바이페닐에 수 소원자가 1개 이상의 염소(chlorine)로 치환된 물질을 총칭하는 것으로 치환된 염소의 수(1~10)와 위치에 따라 209종의 유사체(congener)가 존재한다. 일반적으로 PCBs는 산이나 알칼리와 같은 화학 시료에 강하고, 열에 안정하며, 전기절연성이 뛰어난 성질을 지니고 있어 변압기나 축전기와 같은 전기장치의 절연유, 각종 화학공업의 열매체, 윤활유, 가소

제 등 상업적 목적을 위해 대량 생산되어 왔다<sup>1~3)</sup>. 그러나 PCBs는 동물의 독성실험 결과 발암성, 돌연변이, 생식 장애를 일으키는 원인물질로 알려짐으로써 현재 내분비계 장애물질로 분류되어 있다<sup>4~6)</sup>.

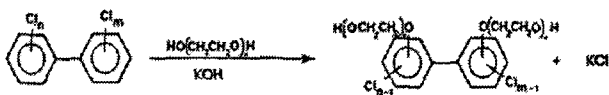
또한 PCBs는 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutant)에 대한 배출의 저감 및 제거를 위한 스톡홀름 협약(2004년 5월 발효)에 의해 규제 및 관리대상 물질로 선정되었다<sup>7)</sup>. 이로 인해, PCBs 함유 제품의 규제, 관리, 처리문제가 협약의 현안으로 부각되었고 협약 국가들은 2025년까지 PCBs를 사용한 장치들을 확인하여야 하며, 늦어도 2028년까지는 PCBs의 관리체계를 만들어야만 한다. 이러한 목표를 위해 우리나라에서도 PCBs 함유 제품 및 폐기

Corresponding Author : Keon Sang Ryoo, Department of Applied Chemistry, Andong National University, Andong 760-749, Korea  
Phone: +82-54-820-5453  
E-mail: ksr@andong.ac.kr

물의 실태조사와 안전관리 방안을 수립 중에 있다. 현재 우리나라의 PCBs 함량 폐기물 발생량에 대해서 정확한 통계는 아직 없으나 한국 전력, 철도청, 민간 기업 등에서 발생하는 PCBs 함유 폐 변압기의 양은 연간 60,000대 이상으로 추정하고 있다.

국내 PCBs 폐기물관리법에 의하면 2 ppm 이상의 PCBs를 함유한 폐 변압기는 지정폐기물로 관리하여 고온 소각(high temperature incineration) 처리하도록 되어 있다. 그러나 소각처리의 경우 다이옥신류(PCDDs/PCDFs)의 발생과 같은 고독성 유해물질의 생성 가능성으로 민원문제가 제기되어 실제로 소각에 의한 PCBs의 처리는 불가능한 실정이다. 이로 인해 한국 전력과 기타 발전사에서는 50 ppm 이상의 고농도 지상변압기를 영국이나 네덜란드로 이전하여 폐기 시켜왔으나, 바젤협약으로 경유국의 동의 절차 등의 문제로 적기처리가 곤란하여 전량 국내에서 보관하고 있는 실정이다.

최근에 폐 변압기 중의 PCBs를 처리하기 위해 소각을 대체할 수 있는 여러 방법들이 개발되었거나 개발 중에 있으며<sup>8-11)</sup>, 이의 일환으로 본 연구도 국내에 적용 가능한 PCBs 처리 기술을 제시하고자 한다. 제시한 PCBs 처리방법은 탈염소화(dehalogenation) 기술로서 폴리에틸렌글리콜(polyethylene glycol)과 수산화칼륨(KOH)을 변압기 오일에 첨가하여 PCBs의 바이페닐(biphenyl) 골격에 붙어 있는 염소원자를 염화칼륨(KCl)으로 분리하는 방법이다. 알칼리 조건 하에서 PCBs와 PEG의 반응은 친핵 방향족 치환반응의 결과로 아릴 폴리글리콜(aryl polyglycols)을 생산한다.



최종적인 연구의 목표는 화학시료의 양, 반응 온도, 반응시간과 같은 변수를 고려하여 폐 변압기 오일 내 PCBs의 농도를 2 ppm 이하까지 처리하는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료 및 실험장치

폐 변압기 오일 중의 PCBs를 처리하기 위하여

PEG 600 (H(OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>OH; polyethylene glycol # 600), 수산화칼륨(potassium hydroxide, pellet)을 Samchun Pure Chemical사(Korea)에서 각각 구입하였다. 시료 전처리를 위해 사용한 n-hexane, hexane, ethanol, dichloromethane (Malinckrodt Baker, Inc., USA)과 같은 유기용매는 모두 HPLC급이었다. 검정선을 위한 Aroclor 1242, 1254, 1260의 PCBs 혼합물은 순도가 99.9% 이상인 고상으로 AccuStandard사(USA)에서 구입하였다. 플로리실(Florisil, 600-800, J.T. Baker)과 실리카겔(Silica gel 60, Merck, Germany)은 130°C 오븐에서 18시간 동안 활성화시켜 사용하였다. 질소(N<sub>2</sub>)는 99.99% 이상의 고순도로 탈염소화 반응 동안 폐 변압기 오일의 산화방지를 위해 사용하였다.

폐 변압기 오일 내 PCBs의 처리를 위해 온도 조절기(temperature controller)와 교반기(mechanical agitator)가 부착된 회분식 형태(batch-type)의 반응장치를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 반응조의 재질은 스테인레스 스틸(stainless steel)을 사용하였고 반응조는 이중 자켓으로 만들어 내부에는 폐 변압기 오일을, 외부에는 실리콘 오일을 넣어 반응온도를 유지하였다. 또한 반응조 내부에 온도센서를 넣어 반응의 온도를 측정하였다.

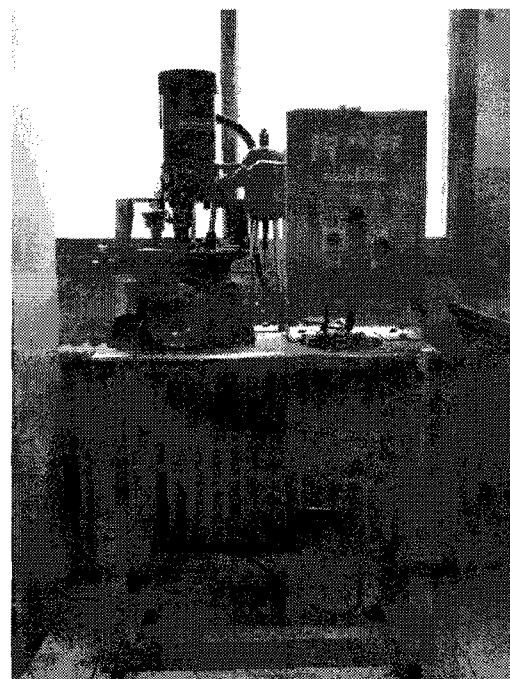


Fig. 1. Schematic illustration of apparatus to dispose of PCBs in transformer oil.

2.2. 실험 방법

폐 변압기 오일 중의 PCBs 처리의 최적 조건은 오일과 상대적인 PEG 600과 KOH의 양(w/w%), 반응온도 및 반응시간을 변화시켜 확인하였다. PCBs의 처리를 위해 오일과 화학시약들을 반응기에 각각 넣은 후 교반기를 이용하여 완만하게 교반하면서 온도를 실온에서 최고 150°C까지 증가시켰고, 시료를 0 min, 30 min, 1 hr, 2 hrs 그리고 4 hrs와 같이 반응시간별로 채취하여 이들 조건에서의 PCBs의 처리 효율을 측정하였다. 처리 후 폐 변압기 오일 중의 PCBs 시료 전처리와 분석은 국립 환경원에서 제시하는 분석절차(Fig. 2)에 따라 시행하였다.

탈염소화 반응에 의한 PCBs 처리 전과 후의 PCBs는 가스크로마토그래프/전자 포획검출기(GC/ECD, Trace 2000, Italy)를 이용하여 분석하였다. 각각의 PCB는 30 m (length)×0.25 mm (I. D.) 용융 실리카 컬럼(DB 5, Supelco Inc., USA)을 사용하여 분리하였다. GC는 2단계 온도상승을 통해서 온도 프로그램화(temperature program) 하였다. 첫 번째 온도 상승 단계는 10°C/min로 80°C로부터 180°C로, 두 번째 단계는 3°C/min의 상승 속도로 260°C까지 온도를 증

가시켰다. 운반가스로는 아르곤(Ar)에 10% 메탄(CH<sub>4</sub>)이 섞여 있는 혼합물을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Aroclor 혼합물(Aroclor 1242, 1254, 1260)

Fig. 3은 Aroclor 1242, 1254 및 1260을 무게 비로 1:1:1로 첨가하여 총 210 ppm의 농도를 나타낸 GC/ECD 크로마토그램이다. 4자리의 숫자 중 처음 2 숫자는 바이페닐에 있는 탄소원자의 수를 마지막 2자리 수는 염소의 함유량(%)을 나타낸다. 본 연구를 위해서 채택한 Aroclor 혼합물은 총 123개의 PCBs로 되어 있으며 다수의 PCBs [IUPAC # (7, 9), # (5, 8), # (16, 32), # (28, 31), # (66, 95), # (90, 101, 89), # (118, 123, 149), # (105, 132, 153) 등]는 Fig. 3에서 보듯 GC 컬럼(column)에서 완전히 서로 분리되지 못하여 하나의 무리(cluster)로 존재한다. 또한 Aroclor 혼합물 중에서 Aroclor 1242의 경우는 2~5, Aroclor 1254는 4~7, 그리고 Aroclor 1260은 5~8의 염소치환체로 주로 구성되어 있으며 전형적으로 GC/ECD에 의한 PCBs의 머무름 시간은 Aroclor 1242, 1254, 1260의 순으로 검출된다.

일반적으로 PCBs는 염소의 수와 치환위치에 따라 독성의 정도가 다르며, 위의 크로마토그램에서 나타낸 PCB IUPAC # 77 (3,3',4,4'-tetraCB), # 169 (3,3',4,4',5,5'-hexaCB), # 105 (2,3,3',4,4'-pentaCB), # 118 (2,3',4,4',5-pentaCB), # 123 (2',3,4,4',5-pentaCB),

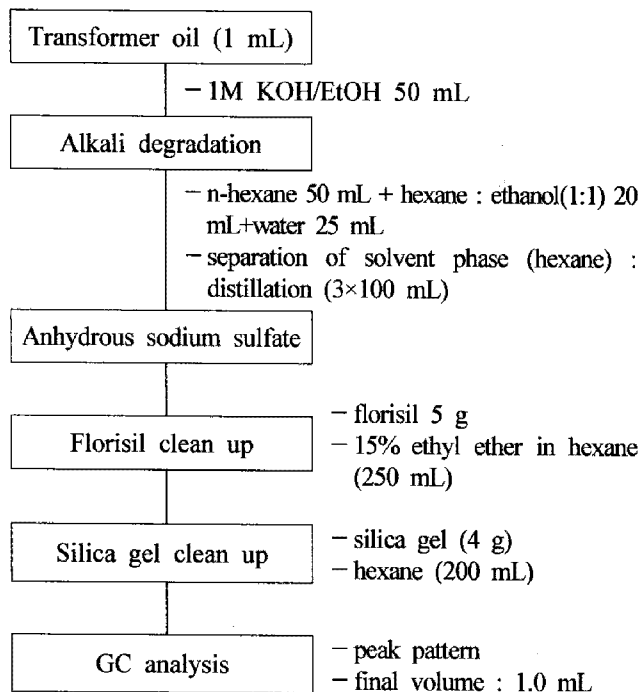


Fig. 2. Analytical procedure for determination of PCBs in transformer oil by National Institute of Environmental Research.

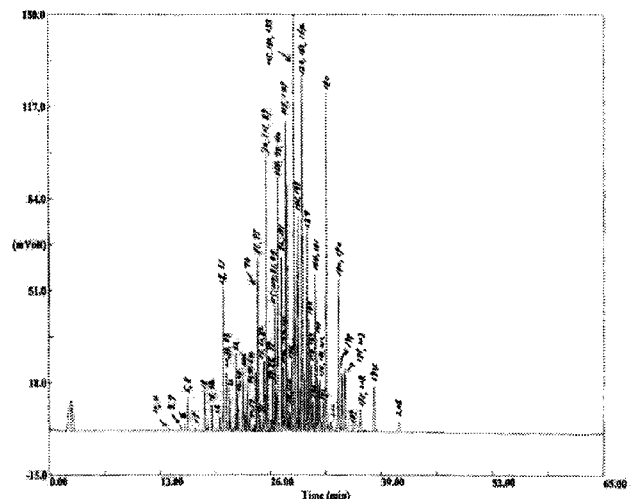


Fig. 3. GC/ECD chromatogram of Aroclor mixture (Aroclor 1242, 1254, 1260).

# 156 (2,2',4,4',6,6'-hexaCB), # 157 (2,3,3',4,4',5'-hexaCB), # 167 (2,3',4,4',5,5'-hexaCB) 그리고 # 189 (2,3,3',4,4',5,5'-heptaCB)는 ortho 위치에 염소치환이 없거나 단지 하나의 염소치환이 있어 편평 구조(coplanar structure)를 띠며 이로 인해 다이옥신류(PCDDS/Fs)-유사 PCBs라 일컫는다. 특히 PCB IUPAC # 169와 77은 실험동물들의 생물학적인 응답을 바탕으로 하여 2,3,7,8-TCDD (tetrachlorodibenzo-p-dioxin)의 TEF (toxicity equivalence factor) 값의 0.05와 0.01배 정도의 독성을 가지고 있다고 알려져 있다.

**3.2. 폐 변압기 오일 중의 PCBs**

Fig. 4는 폐 변압기 오일을 (주) 학산금속으로부터 구하여 오일에 들어있는 PCBs를 Fig. 2에 따라 분석한 결과를 나타낸 크로마토그램이다. 폐 변압기 오일 내의 개개의 PCB는 상업용 Aroclor 혼합물(Aroclor 1242, 1254, 1260) 중의 PCBs의 상대적 머무름 시간(retention time)과 상호 비교하여 확인하였다. PCBs의 정량은 국립 환경연구원에서 제시한 절연류 중 PCBs 세부 분석지침에 따른 피크 패턴(peak pattern)법으로 구하였다. 피크 패턴법에 의한 PCBs의 총 농도를 측정하기 위해서 우선적으로 PCB 혼합 표준용액의 검량선을 작성하였다. 그 후 폐 변압기 오일에 있는 PCBs 중에서 가장 높은 피크(peak intensity)의 25% 이상인 9종의 PCBs만을 선별하였고 선택한 PCBs와 검량선의 각 PCB의 피크 높이와

의 상대적인 차이를 구하였다. 피크 높이의 차이로 폐 변압기 오일 중의 개개의 PCB 농도를 측정하였으며 이렇게 산정한 PCBs의 총 농도는 54.6 ppm이었다.

Fig. 3 (Aroclor 혼합물 중의 PCBs)과 4 (폐 변압기 오일 중의 PCBs)의 크로마토그램들을 서로 비교해 보았을 때, Fig. 4에서 보는바와 같이 PCBs 피크들의 전체적인 모습은 전반부에 있는 PCB [PCB IUPAC # (10, 4), (9, 7), (5, 8), 19, 18, (16, 32), 26]들을 제외하고는 Fig. 3과 거의 유사한 모습을 띠었다. 제외된 PCB IUPAC # 10의 화학식은 2,6-diCB, # 4는 2,2'-diCB, # 16은 2,2',3-triCB 그리고 # 32는 2,4',6-triCB로, 이들은 모두 바이페닐에 2개 혹은 3개의 염소치환기를 가지고 있어 Aroclor 1242에 속하는 PCBs이다. 따라서 실제 폐 변압기 오일 중의 PCBs는 일부분의 Aroclor 1242와 Aroclor 1254/1260에 속하는 PCBs들로 구성되어 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

**3.3. PEG 600의 양에 따른 PCBs 처리**

폐 변압기 오일 중에 들어 있는 PCBs를 처리하기 위해서 우선적으로 KOH의 양(2.5%)과 반응시간(120 min) 그리고 반응온도(25°C)를 고정시키고 오일에 상대적인 PEG 600의 무게 비만을 변화시켜 PCBs 처리효율을 측정하였다. 실험에서 사용한 PEG 600의 양은 각각 0.5%, 1.0%, 2.5%, 5.0%이었다. 실험 결과 PEG 600의 양을 2.5%까지 증가하였을 때 PCBs의 처리효율도 점차적으로 증가하는 경향을 띠었다. 그러나 PEG 600의 양을 5.0%까지 증가하였다더라도 PCBs의 처리 효율은 2.5%의 PEG 양과 비교해서 PCBs의 처리효율은 그다지 커다란 변화가 없었다. 따라서 경제적인 비용을 고려하여 PEG 600의 양을 2.5%로 고정시켰다.

**3.4. 반응온도에 따른 PCBs 처리**

폐 변압기 오일 중에 들어 있는 PCBs 처리의 극대화를 위해서 화학시료의 양(오일에 상대적인 PEG 600와 KOH의 무게 비는 각각 2.5%)과 반응시간(120 min)을 고정시키고 온도 변화에 따른 PCBs 처리효율을 측정하였다.

25°C와 50°C의 반응온도 조건에서 오일 중의 PCBs를 탈염소화 처리하였을 때 오일에 남아 있는

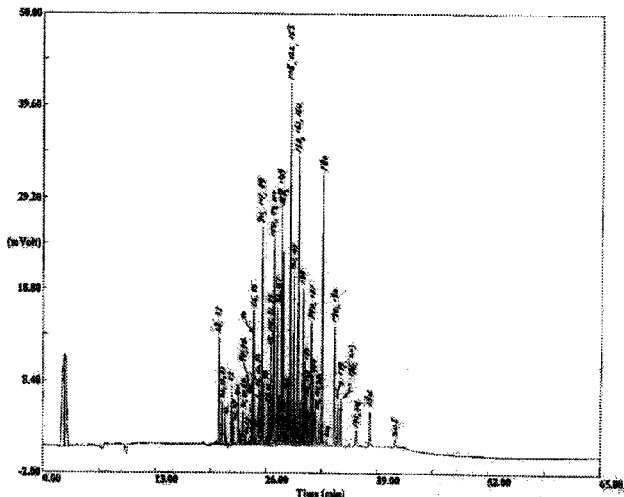


Fig. 4. GC/ECD chromatogram of PCBs in transformer oil.

PCBs의 피크 높이(peak height)나 피크의 형태는 전반적으로 Fig. 4의 크로마토그램과 거의 비슷한 양상을 보였다. 그리고 위의 온도조건에서 PCBs의 처리 후 오일 내에 남아 있는 PCBs 농도가 각각 48.6 ppm과 44.3 ppm으로 매우 높은 수준이었다(자료 미제시). 폐 변압기 오일 내 PCBs를 처리할 때 위와 같은 반응온도는 근본적으로 적합하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 반응온도를 조금 더 올려 100°C까지 증가시켰을 때 25°C와 50°C의 결과와는 달리 전체적으로 각 PCBs의 피크 높이가 많이 줄어들었고, PCBs의 처리효율도 가파르게 상승하여 오일에 남아 있는 PCBs의 농도가 25.4 ppm까지 감소하였다(자료 미제시). 이외에도 100°C의 반응온도에서 확실히 머무름 시간이 짧은 전반부의 PCBs보다는 후반부에 있는 PCBs가 많이 사라져 없어진 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해서, 폐 변압기 오일 중의 PCBs를 탈염소화 처리 할 경우 25°C와 50°C와 같이 비교적 낮은 반응온도에서 보다는 더 높은 온도에서 PCBs가 효과적으로 제거된다는 것을 알 수 있었다. 그러나 반응온도를 100°C까지 증가시켰다 하더라도 PCBs 처리는 아직 국내의 환경부에서 제시하고 있는 PCBs의 처리 후 잔존농도(2 ppm이하)에는 훨씬 못 미치는 미흡한 수준이라 하겠다.

3.5. 반응시간에 따른 PCBs 처리

Fig. 5는 폐 변압기 오일에 각각 2.5% (w/w)의 PEG 600과 KOH를 첨가하여 150°C에서 30분간 반

응시켜 오일에 잔존하는 PCBs의 GC/ECD 크로마토그램이다. Fig. 4와 5의 크로마토그램들을 비교했을 때 Fig. 5 (전압이 15 mVolt인 크로마토그램)에 있는 PCBs 피크들의 높이가 Fig. 4 (전압이 50 mVolt인 크로마토그램)에서 보다 확연히 줄었음을 확인할 수 있었고, 특히 PCB IUPAC # (66, 95)의 머무름 시간보다 앞서 있는 전반부의 PCBs보다는 후반부의 PCBs들이 많이 줄었다. 그러나 초기 폐 변압기 오일에 있는 PCBs의 거의 대부분이 Fig. 5에서 보는 바와 같이 모두 검출되었으며, 오일에 남아 있는 PCBs 총 농도도 14.7 ppm으로 아직 국내에서 제시하고 있는 PCBs 처리 수준에 미치지 못했다. 위의 실험결과 반응온도를 150°C까지 증가시키고 30분간 반응시키더라도 광유 내 PCBs의 처리 효율은 향상되기는 하나 PCBs를 완전히 제거하지는 못 하였다.

Fig. 6은 2.5%(광유와의 상대적인 중량비)의 PEG 600과 2.5%의 KOH로 150°C에서 1시간 처리하여 오일에 잔존하는 PCBs를 측정된 결과이다. Fig. 5와 6의 크로마토그램을 비교했을 때 Fig. 6에 있는 PCBs의 피크들의 높이가 Fig. 5보다도 많이 낮아졌고, 전체적으로 PCBs 피크들의 개수도 상당히 줄어들었다. Fig. 6에서 PCBs의 피크는 7개로 PCB IUPAC # (28, 31), (20, 33, 53), 22, 52, 44, (66, 95) 그리고 (90, 101, 89)이었다. 위의 PCBs 중에서 머무름 시간이 가장 늦은 PCBs는 PCB IUPAC # 90, 101, 89들이다. 이들의 화학식은 각각 2,2',3,4',5-pentaCB, 2,2',4,5,5'-

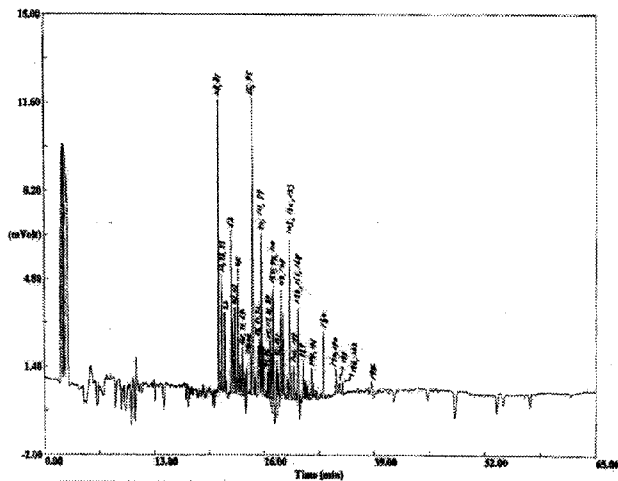


Fig. 5. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 30 min.

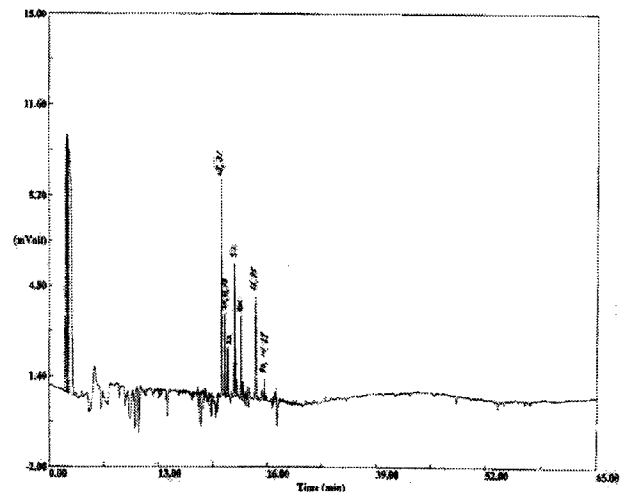


Fig. 6. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 1 hr.

pentaCB, 2,2',3,4,6'-pentaCB로 구성되어 있으며 모두 5개의 염소치환기를 가지고 있다. 일반적으로 바이페닐에 붙어 있는 염소의 수가 많아질수록 PCBs의 머무름 시간이 길어지는 경향을 보인다. 결과적으로, 150°C에서 1시간 처리했을 경우 PCB IUPAC # 90, 101, 89 이후에 있는 PCBs, 즉 hepta-, octa- 그리고 nona-CB로 되어 있는 PCBs들은 모두 탈염소화 반응에 의해서 거의 혹은 완전히 제거된다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 150°C에서 2시간 반응시켜 오일에 있는 PCBs를 탈염소화 처리한 후 오일에 남아 있는 PCBs를 분석한 결과이다. Fig. 7과 6의 크로마토그램들을 비교하였을 때 PCB IUPAC # 44 (2,2',3,5'-tetraCB)의 머무름 시간 이후에 있는 PCBs (PCB IUPAC # (66, 95), (90, 101 89)들의 피크들은 없어졌으며, 바이페닐에 3개나 4개의 염소치환기를 가지고 있는 나머지 PCB 피크들 (IUPAC # 44, 52, (20, 33, 53), (28, 31) 등)의 높이도 상당히 줄어들었다. 즉 염소치환기가 4개 이상인 PCBs는 위의 반응조건에서 완전히 제거되며, 염소의 치환기가 3 혹은 4개인 PCBs는 서서히 탈염소 반응이 진행 중인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 150°C에서 4시간 반응시켜 오일에 존재하고 있는 PCBs를 탈염소 처리한 후 오일에 잔존하고 있는 PCBs를 나타낸 크로마토그램이다. Fig. 7과 8을 비교해보면, Fig. 8에서는 Fig. 7에 있는 PCBs들의 피크들을 전혀 볼 수 없었다. 따라서 바이페닐에

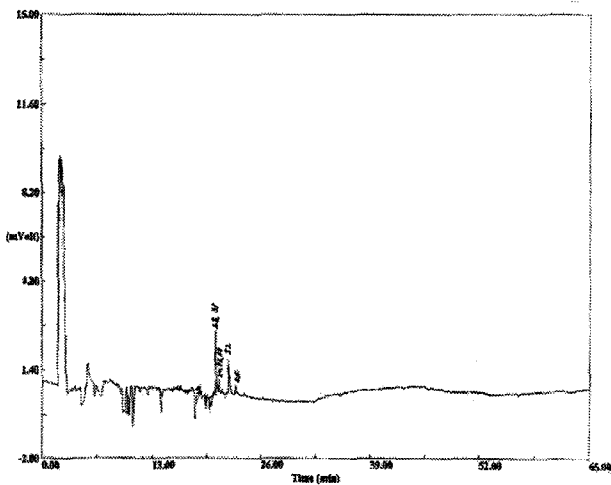


Fig. 7. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 2 hrs.

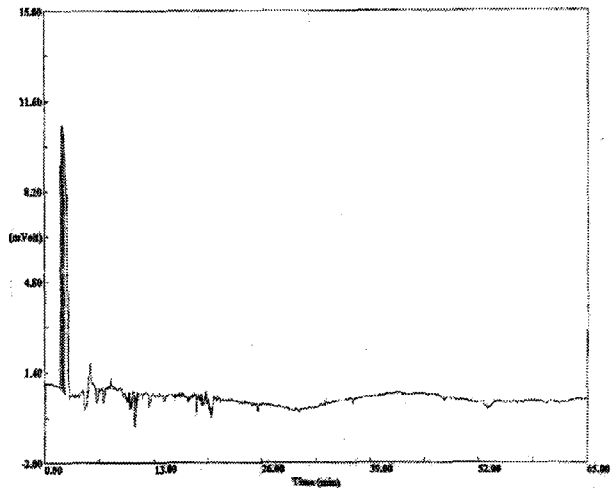


Fig. 8. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 4 hrs.

염소 치환기가 3개 이상인 PCBs는 위의 반응 조건에서 완전처리가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 실험 결과, 오일 내 PCBs의 탈염소 반응 시 낮은 온도보다는 높은 온도에서 그리고 반응시간을 순차적으로 증가하였을 때 PCBs의 처리 효율이 높아졌다. 실제 폐 변압기 오일 중의 PCBs를 처리할 때 최적의 반응조건은 PEG 600 (2.5%)/KOH (2.5%)/150°C/4 hrs로 판명되었고, 이와 같은 조건에서 PCBs는 완전히 제거되었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 알칼리(alkali) 조건하에서 PCBs와 PEG 600의 화학반응은 친핵 방향족 치환반응의 결과로서 아릴 폴리글리콜(aryl polyglycols)을 생성하는 화학적 탈염소화 반응에 의한 폐 변압기 오일 내 PCBs의 처리에 관한 내용으로 결론은 다음과 같다.

1) PEG 600과 KOH에 의한 폐 변압기 오일 내 PCBs의 처리 시 낮은 온도보다는 높은 온도에서 그리고 반응시간이 길수록 PCBs의 처리효율이 증가하는 경향을 보이고 있으며 PEG 600 (2.5%)/KOH (2.5%)/150°C/240 min의 반응조건에서 PCBs를 완전히 제거할 수 있었다.

2) PCBs의 염소 치환체가 적은 전반부의 PCBs보다는 염소치환체가 많은 후반부의 PCBs들이 우선적으로 줄어드는 경향을 보여 본 연구의 화학적 처

리 반응은 단계적 염소 제거 반응을 통해 염소가 제거되었다.

### 감사의 글

이 논문은 2007학년도 안동대학교 국제학술교류 보조금에 의하여 지원되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

- 1) Takkasuga T., K. Senthilkumar, T. Matsumura, K. Shiozaki and S. Sakai, 2006, Isotope dilution analysis of polychlorinated biphenyls (PCBs) in transformer oil and global commercial PCB formulations by high resolution gas chromatography-high resolution mass spectrometry, *Chemosphere*, 62, 469-484.
- 2) Na Y., K. Kim, J. Hong and J. Seo, 2008, Determination of polychlorinated biphenyls in transformer oil using various adsorbents for solid phase extraction, *Chemosphere*, 73, 7-12.
- 3) Sedlak D. L. and A. W. Andren, 1991, Aqueous phase oxidation of polychlorinated biphenyls by hydroxyl radicals, *Environ. Sci. Technol.*, 25, 1419-1427.
- 4) Sun Y., M. Takaoka, N. Takeda, T. Matsumoto and K. Oshita, 2006, Kinetics on the decomposition of polychlorinated biphenyls with activated carbon-supported iron, *Chemosphere*, 65, 183-189.
- 5) Bergeron J. M., D. Crews and J. A. McLachlan, 1994, PCBs as environment estrogens: turtle sex determination as a biomarker of environmental contamination, *Environ. Health Perspect*, 102, 780-781.
- 6) PCBs 환경연구회, 2007, PCBs 이해와 대응, 학술진흥재단 PCBs 환경연구회, 5-12.
- 7) Lee S. H. and B. Seo, 2005, The state of the art on Technologies for treatment of polychlorinated biphenyls (PCBs) pollutants, *Clean Technology*, 11(1), 29-39.
- 8) Nollet H., M. Roles, P. Lutgen, P. Van der Meeren and W. Verstraete, 2003, Removal of PCBs from wastewater using fly ash, *Chemosphere*, 53, 655-665.
- 9) Manzano M. A., J. A. Perales, D. Sales and J. M. Quiroga, 2004, Using solar and ultraviolet light to degrade PCBs in sand and transformer oils, *Chemosphere*, 57, 645-654.
- 10) Ryoo K. S., S. Kapila, R. K. Puri, A. F. Yanders and A. A. Elseewi, 2002, Evaluation of carbon for removal of PCBs from transformer mineral oil, *Chemosphere*, 25, 1569-1575.
- 11) Liu X. and G. Yu, 2006, Combined effect of microwave and activated carbon on the remediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil, *Chemosphere*, 63, 228-235.