

PCBs 함유 변압기 절연유의 화학적처리

유건상* · 최종하 · 최진환¹⁾

안동대학교 응용화학과, ¹⁾(주)학산금속공업
(2011년 10월 17일 접수; 2011년 11월 1일 수정; 2011년 11월 22일 채택)

Chemical Treatment of the PCBs-laden Transformer Insulation Oil

Keon-Sang Ryoo*, Jong-Ha Choi, Jin-Whan Choi¹⁾

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

¹⁾Haksan Metal Industry, Kimhae 621-823, Korea

(Manuscript received 17 October, 2011; revised 1 November, 2011; accepted 22 November, 2011)

Abstract

Practical disposal of transformer insulation oil laden with PCBs (polychlorinated biphenyls) by a chemical treatment has been studied in field work. The transformer insulation oil containing PCBs was treated by the required amounts of PEG (polyethylene glycol) and KOH, along with different reaction conditions such as temperatures and times. The reaction of PEG with PCBs under basic condition produces arylpolyglycols, the products of nucleophilic aromatic substitution. Removal efficiencies of PCBs in insulation oil before and after chemical treatment were examined.

The removal efficiency of PCBs was very low at lower temperatures of 25 and 50°C. Under the reaction condition of PEG 600/KOH/100°C/2hr, removal efficiency of PCBs was approximately 70%, showing completely removal of PCBs containing 7~9 chlorines on biphenyl frame which appear later than PCB IUPAC Number 183 (2,2',3,4,4',5',6-heptaCB) in retention time of GC/ECD. However, when increasing the reaction temperature and time to 150°C and 4 hours, removal efficiency of PCBs reached 99.99% without any formation of PCDDs/PCDFs during the process. Such reaction conditions were verified by several official analytical institutions. In studying the reaction of PEG with PCBs, it confirmed that the process of chemical treatment led to less chlorinated PCBs through a stepwise process with the successive elimination of chlorines.

Key Words : PCBs, Transformer insulation oil, PEG, Chemical treatment, Chlorine

1. 서론

PCBs (polychlorinated biphenyls)는 두 개의 페닐기에 수소원자가 1개 이상의 염소로 치환되어 있는 물질을 총칭하며 치환된 염소의 수와 위치에 따라 총 209종의 유사체(congener)로 존재한다(PCBs 환경연구회, 2007; Schultz 등, 1989). PCBs는 산이나 알칼리와 같은 화학시료에 강하고, 열에 안정적이며, 전기 절연성이 뛰어나기 때문에 1970년대 사용이 중지될

때까지 전 세계적으로 변압기 및 축전기와 같은 전기 장치의 절연유, 각종 화학공업의 윤활유, 도료, 감압지, 가스제 등에 널리 사용되어 왔다(Sedlak 등, 1991; Wu 등, 2005).

그러나 PCBs는 발암성, 돌연변이, 생식장애를 일으키는 원인물질로 규명되었고 이 외에도 독성이 강하고 분해가 매우 느려 생태계에 오랫동안 남아 있는 잔류성 유기오염물질(POPs; Persistent Organic Pollutants) 중의 한 종으로 선정되었다(Gschwend 등, 1985; World Health Organization, 2000). 이로 인해 PCBs 함유 제품의 규제, 관리, 처리 문제가 현안으로 부각되었고 스톡홀름 협약에 의해 협약국들은 늦어도 2028년까지는 PCBs를 모두 친환경적으로 처리하겠다고 국제사회에 약속하였다(이와 서, 2005). 우리나라의

*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

경우에는 국제기구에 2015년까지 PCBs를 완전 제거 하겠다고 공언하였다.

2009년 8월 한국전력은 전국 16개 사업소에 약 17만 8천대의 폐변압기를 보관 중이다. 현행 유해화학물질관리법은 PCBs가 50 ppm 이상 함유된 물질의 제조·수입·사용을 금지하고 있으며, 폐기물관리법은 PCBs가 2 ppm 이상 함유된 폐기물은 지정폐기물로 분류해 적정 처리하도록 돼 있다(이와 서, 2005). 이 때문에 환경부는 PCBs가 2 ppm 이상 함유된 장비는 폐기될 때까지 지속적인 관리가 가능하도록 인식표를 부착하고 관리대장을 작성·비치, 정기적인 오염도 시험 등을 통해 PCBs를 관리하고 있다.

국내 PCBs 폐기물관리법에 의하면 2 ppm 이상의 PCBs를 함유한 폐변압기는 고온 소각하도록 되어있다. 그러나 소각처리의 경우 소각과정에서 생기는 다이옥신류(PCDDs/PDDCFs)의 발생과 같은 고독성 유해물질의 생성가능성으로 민원문제가 제기되어 실제로 소각에 의한 PCBs의 처리는 전무한 실정이다. 따라서 최근에 PCBs를 처리하기 위해 소각을 대체할 수 있는 여러 방법들이 개발되었거나 개발 중에 있다(Liu 등, 2006; Manzano 등, 2004; Ning 등, 2002; Ryoo 등, 1992; Sun 등, 2006).

본 연구는 국내의 PCBs 처리업체인 (주)학산금속공업 현장 내에서 실제적으로 적용 가능한 화학적 처

리기술인 탈염소화반응을 제시하고자 한다. 이 처리 기술은 알칼리성 환경 하에서 PEG(polyethylene glycol)를 이용하여 PCBs로부터 염소원자를 분리 제거하는 기술이다. 연구의 최종 목표는 반응농도, 반응 온도, 반응시간과 같은 변수를 고려하여 변압기 절연류 내 PCBs 농도를 2 ppm 이하까지 처리하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 재료

Polyethylene glycol 600(PEG 600, Samchun Pure Chemical Co. Ltd., Korea), 수산화칼륨(KOH, Samchun Pure Chemical Co. Ltd., Korea), Aroclor 1242, 1254, 1260과 같은 PCBs 혼합물(AccuStandard, Inc., USA)을 본 연구의 주재료로 사용하였다. Acetone, n-hexane, iso-octane, MTBE, dichloromethane (Malinkrodt Baker, Inc., USA)과 같은 유기용매는 모두 HPLC급이었다. 플로리실(Florisil, 600-800, J.T. Baker, Mallinckrodt Baker, Inc., USA)과 실리카겔(Silica gel 60, Merck, Germany)은 130°C 오븐에서 18시간 동안 활성화시킨 후 사용하였다.

2.2. 실험방법

현장 내 PCBs 처리시설의 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다. 반응기는 외부열원에 의한 가온방식을 채택

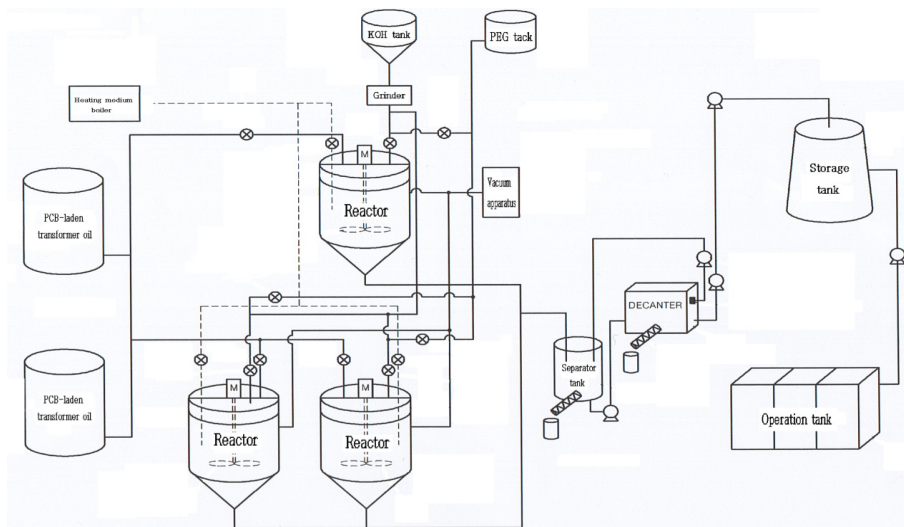


Fig. 1. Flow chart for disposal of PCBs in field work.

하였으며, 150°C 정도까지 승온되면 반응기에 약품 투입 후 외부 열원을 중단하고 절연유와 약품의 발열 반응으로 운전을 진행하였다. 반응기의 압력은 인위적으로 25~50 mmHg로 조절하였으며, 교반기는 21 RPM으로 운전하였다. 반응기의 온도는 디지털 조절기로 측정하였다. 투입된 절연유 양에 대비하여 KOH와 PEG 600의 양은 2.5 w/w%로 일정하게 유지시켰다. 가동 중 처리의 최적조건을 측정하기 위하여 반응 시간(30분, 1시간, 2시간, 4시간)과 반응온도(25°C, 50°C, 100°C, 150°C)별로 시료들을 채취하였다. 반응 완료 후 절연유 및 슬러지 중의 PCBs는 Fig. 2에 따라 시료전처리 하였다.

2.3. 측정기기 및 분석

절연유 내의 PCBs 농도는 GC/ECD (Trace 2000, Italy)를 이용하여 분석하였다. 각 PCB 유사체의 분리는 30 m length x 0.25 mm I. D. 용융 실리카 컬럼 (DB 5, Suleco Inc., USA)을 사용하였다. GC는 2단계 온도상승을 통해서 온도 프로그래밍화 (temperature program) 하였다. 첫 번째 온도 상승 단계는 10°C/min

로 80°C로부터 180°C로, 두 번째 단계는 3°C/min의 상승 속도로 260°C까지 온도를 증가하였다. 운반가스로는 Ar에 10% CH₄가 섞여 있는 혼합물을 사용하였다. 분리된 각각의 PCB 유사체의 정량은 국립환경연구원에서 제시하는 ‘절연유 중 PCBs 세부 분석지침’에 따른 피크 패턴(peak pattern)법으로 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 변압기 절연유 중의 PCBs 함유량

Fig. 3은 상업적으로 구입한 Aroclor 1242, 1254, 1260을 각각 동등한 농도로 첨가하여 최종 농도가 15 ppm인 GC/ECD 크로마토그램이다. Aroclor 4자리 숫자 중 처음 2자리는 PCBs에 부착되어 있는 탄소원자의 수를 나머지 2자리는 염소의 % 함유량을 나타낸다. 일반적으로 Aroclor 1242의 경우는 2~5, Aroclor 1254는 4~7, Aroclor 1260은 5~8의 염소치환체로 된 PCBs로 구성 되어있으며, 머무름 시간 전반부의 경우는 Aroclor 1242, 중반부는 Aroclor 1254, 후반부는 Aroclor 1260의 순으로 검출된다. 따라서 바이페닐

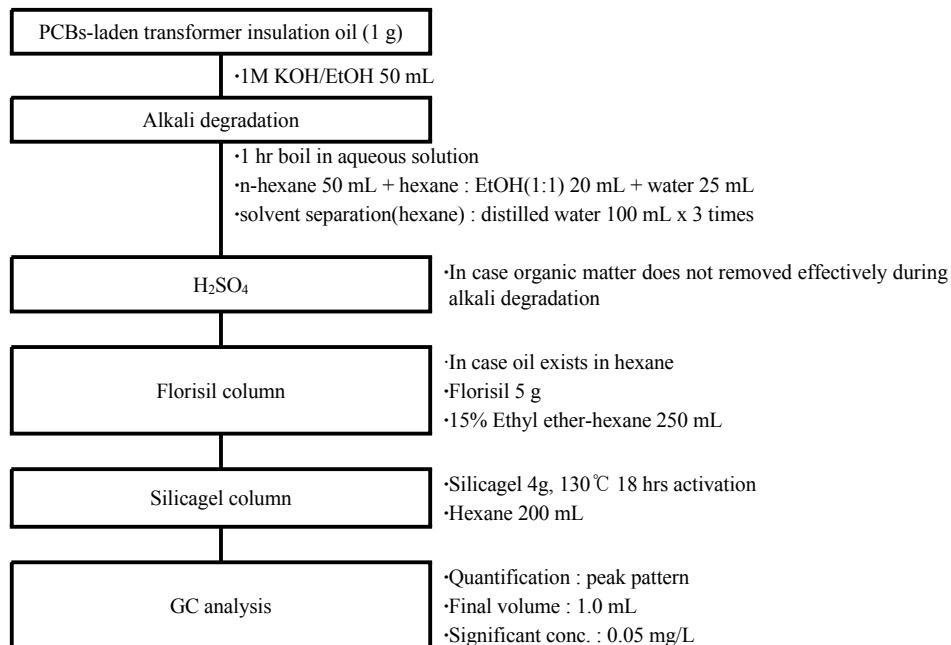


Fig. 2. Flow chart of PCBs analytical method.

에 붙어있는 염소의 수가 많아질수록 PCBs의 머무름 시간이 길어지는 경향이 지닌다. Fig. 3의 크로마토그램에서 나타낸 바와 같이, 몇몇의 PCBs는 예를 들어, PCB IUPAC Number (4, 10), (7, 9), (5, 8), (15, 17, 18), (28, 31), (66, 95), (118, 123, 149), (105, 132, 153) 등은 GC 컬럼에서 완전히 서로 분리되지 못하여 피크 내에서 하나의 무리(cluster)로 존재한다.

Fig. 4는 변압기 절연유에 들어 있는 PCBs를 나타낸 GC/ECD 크로마토그램이다. 변압기 절연유 중의 PCB 유사체는 상업용 Aroclor 혼합물(Aroclor 1242, 1254, 1260)의 PCBs와의 상대적 머무름 시간과 비교하여 확인하였다. 변압기 절연유에 함유되어 있는 PCBs의 정량은 국립환경연구원에서 제시한 분석지침인 피크 패턴법으로 구하였다. 피크 패턴법에 의한 PCBs의 총 농도를 측정하기 위해서 우선적으로 PCB 혼합 표준용액의 검량선을 작성하였다. 이 후 변압기 절연유에 있는 PCBs 중에서 가장 높은 피크의 25% 이상인 9 종의 PCBs를 선별하였고 선택한 PCBs와 검량선의 각 PCB의 피크 높이와의 상대적인 차이를 구하였다. 피크 높이의 차이로 변압기 절연유 중의 개개의 PCB 농도를 측정하였으며 이렇게 산정한 PCBs의 총 농도는 34.9 ppm이었다.

Fig. 3과 4의 크로마토그램을 상호 비교하였을 때, Fig. 4의 PCB 피크들의 전체적인 형태는, 전반부에 있는 PCB IUPAC Number (10, 4), (9, 7), (5, 8), 19, 18, (16, 32), 26을 제외하고는, Fig. 3과 거의 비슷하였다. 제외된 PCB 유사체들의 화학식을 나열하면

IUPAC Number 10은 2,6-diCB, Number 4는 2,2'-diCB, Number 16은 2,2',3-triCB, Number 32는 2,4',6-triCB로서, 이들은 모두 PCB에 2개 또는 3개의 염소치환기를 가지고 있어 Aroclor 1242에 속하는 PCBs이다. 따라서 변압기 절연유 중의 PCBs는 일부분의 Aroclor 1242와 Aroclor 1254/1260에 속하는 PCBs로 구성되어 있는 것으로 확인되었다.

3.2. 반응온도에 따른 PCBs의 제거효율

변압기 절연유 중에 함유되어 있는 PCBs의 화학적 처리효율의 최적조건을 찾기 위해서 우선적으로 25°C에서부터 150°C까지의 온도변화에 관한 실험을 시행하였다. 반응 조건은 PEG 600과 KOH 양을 절연유 대비 무게비로 각각 2.5%로 하였고 반응시간은 1시간으로 고정시켰다. PCBs의 제거효율은 다음 식으로 계산하였다.

% Removal Efficiency of PCBs

$$= \frac{\text{Initial amount of PCBs} - \text{Residual amount of PCBs}}{\text{Initial amount of PCBs}}$$

Fig. 5는 25°C와 1시간의 반응조건에서 화학적 처리 후 변압기 절연유에 남아 있는 PCBs의 GC/ECD 크로마토그램이다. 그림에서 보듯 25°C의 반응온도에서 전반, 중반, 후반부에 있는 전체적인 PCB 피크들의 윤곽은 Fig. 4와 비교해서 거의 변화를 보이지 않았다. 예를 들어, 후반부에 있는 PCB IUPAC Number 206, 194, (195, 208), (196, 203), 199 등이 화학적 처리 후에도

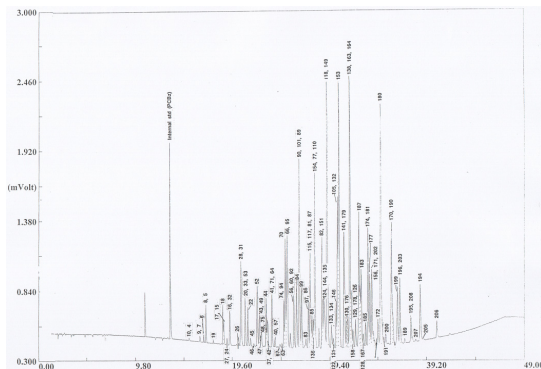


Fig. 3. GC/ECD chromatogram of a mixture of Aroclor 1241, 1254 and 1260.

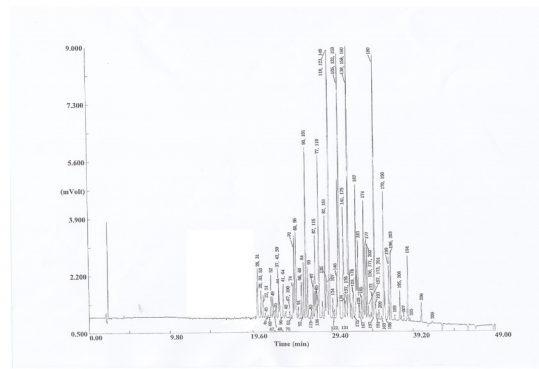


Fig. 4. GC/ECD chromatogram of PCBs in transformer insulation oil.

3.3. 반응시간에 따른 PCBs 처리효율

온도 변화에 따른 PCBs의 화학적 처리 실험을 통해, 반응온도를 증가시키면 절연유 중의 PCBs의 제거효율도 점진적으로 증가한다는 연구결과를 얻을 수 있었다. 그러나 100°C의 온도조건에서 PCBs의 화학적 처리 후 절연유에 남아 있는 10.4 ppm의 농도는 아직 환경기준치인 2 ppm보다 매우 높은 수준이었다. 이러한 이유로 인해 PEG 600과 KOH 양을 절연유 대비 각각 2.5 w/w%로 일정하게 하고 온도는 150°C까지 증가시켜 반응시간을 1시간, 2시간, 3시간, 4시간별로 절연유를 채취하여 시간별에 따른 PCBs의 제거효율의 변화에 관한 연구를 시행하였다.

Fig. 8은 150°C의 온도조건에서 화학반응을 1시간 동안 진행한 후 절연유에 잔류하여 남아 있는 PCBs의 GC/ECD 크로마토그램이다. Fig. 7과 8을 서로 비교하였을 때, Fig. 8의 PCBs는 피크높이 뿐만 아니라 피크의 개수도 많이 줄어 있었고 확실히 머무름 시간이 짧은 전반부보다는 후반부에 있는 피크들이 사라져 없어진 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 절연유 중의 PCBs를 화학적으로 처리 할 경우, 100°C보다는 반응온도가 다소 높은 150°C에서 PCBs가 더 효과적으로 제거된다는 것을 알 수 있었다. Fig. 8에서 보듯, IUPAC Number가 (28, 31), (20, 33, 53), 22, 51, 49, 44, (41, 64), (66, 95), (90, 101)의 PCB 피크들만이 150°C의 화학적 처리 반응조건 후에도 제거되지 않고 절연유에 남아 있었다. Fig. 8의 크로마토그램에서 제

일 마지막에 있는 PCB IUPAC Number 90과 101의 화학식은 바이페닐 위에 염소수가 5개가 붙어 있는 2,2',3,4',5-pentaCB와 2,2',4,5,5'-pentaCB로 되어 있는 PCBs이다. 결과적으로, 반응온도 150°C의 조건에서 PCB IUPAC Number가 (90, 101) 이후에 있는 PCB 유사체들, 즉 hexa, hepta, octa, 그리고 nona-CB로 되어 있는 PCBs은 화학적 처리에 의해서 거의 완전히 제거된다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 반응온도와 반응시간을 150°C와 2시간으로 일정하게 하여 화학적 처리한 후 절연유에 남아 있는 PCBs의 GC/ECD 크로마토그램이다. Fig. 8과 9에 있는 PCBs의 피크를 살펴보면, Fig. 9의 PCBs 피크는 Fig. 8에 비해서 PCBs의 높이가 조금 더 낮아져 위의 조건보다 반응시간을 1시간 더 연장하였을 때 PCBs의 제거효율이 약간 더 좋아졌음을 알 수 있었다. PCBs의 화학적 처리 후에 PCB IUPAC Number 28 (2,4,4'-triCB), 31 (2,4',5-triCB), 52 (2,2',5,5'-tetraCB), 그리고 44 (2,2',3,5'-tetraCB)와 같이 바이페닐 위에 염소의 개수가 3~4로 치환되어 있는 즉 단지 몇 개의 PCBs가 절연유에서 미량으로 검출되었다. 따라서 5개 이상의 염소치환기로 이루어져 있는 PCBs는 150°C, 2시간의 반응조건에서의 화학적 처리에 의해 모두 제거된다는 것을 확인하였다.

반응온도와 반응시간을 150°C와 3시간으로 고정시켜 화학적 처리한 이후 절연유에 남아 있는 PCBs의 GC/ECD 크로마토그램을 Fig. 10에 나타내었다. 반응

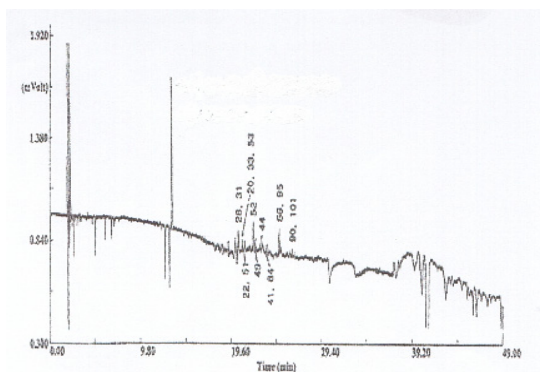


Fig. 8. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 1 hr.

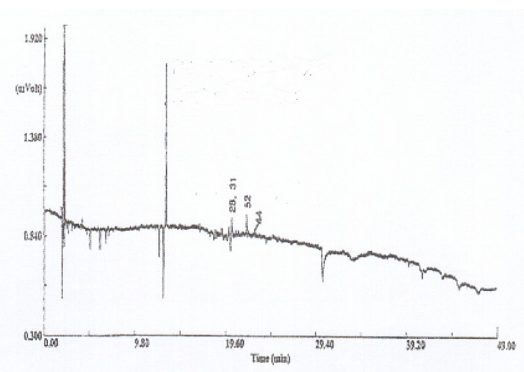


Fig. 9. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 2 hr.

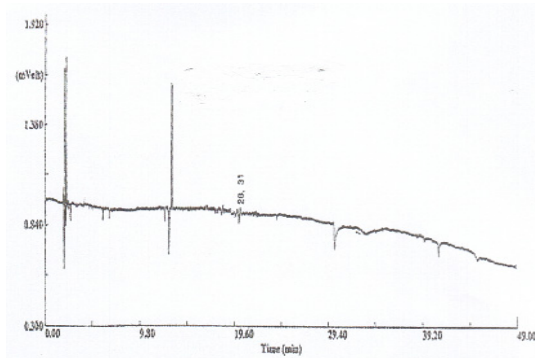


Fig. 10. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 3 hr.

을 시작하여 3시간이 경과되었을 때 PCBs의 수가 점차적으로 줄어들어 단지 PCB IUPAC Number가 28과 31인 PCBs만이 절연유에 남아 있었다. 150°C와 2시간의 화학적 반응 조건에서 절연유에 있었던 4개의 염소치환기를 가지고 있는 PCB IUPAC Number가 44와 52는 더 이상 Fig. 10의 크로마토그램에서 확인할 수 없었다.

Fig. 11은 위에서와 반응온도 조건은 똑같이 하고 반응시간을 점차적으로 4시간 까지 증가시켰을 때 절연유에 남아 있는 PCBs의 크로마토그램이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 크로마토그램에 어떠한 PCB 피크도 더 이상 존재하지 않았다. 이에 따라 절연유에 함유되어 있는 모든 PCBs를 처리하기 위해서는 최대로 150°C와 4시간의 반응조건이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

위 실험조건에서의 화학적 처리 후 변압기 절연유 중의 PCBs 농도와 제거효율은 다음과 같았다. 150°C와 30분인 반응온도와 시간에서 절연유에 남아 있는 PCBs의 농도는 0.8 ppm이었고 이때의 PCB 제거효율은 97.7%이었다. 위와 같은 온도조건에서 반응시간만을 1시간, 2시간씩 점차적으로 늘림으로써 PCBs 농도는 점점 더 감소하였으며 이에 대응하는 PCBs의 제거효율은 각각 99.73%와 99.93%에 이르렀다. 최종적으로 반응시간이 4시간의 경우에는 PCBs가 절연유로부터 전혀 검출되지 않았고 제거효율은 거의 99.99%에 이르렀다.

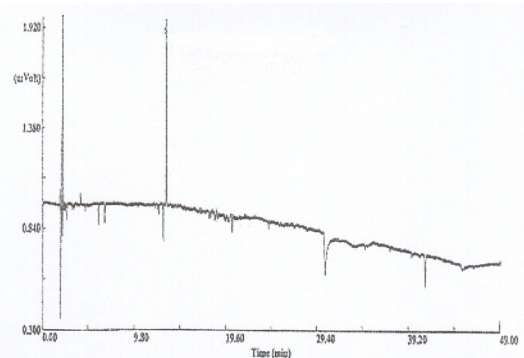


Fig. 11. GC/ECD chromatogram of PCBs remained in transformer oil after dechlorination reaction at the condition of 150°C and 4 hr.

3.4. 공인기관에 의한 PCBs 분석

화학적 처리 전 실제 변압기 절연유에 함유되어 있는 PCBs의 농도와 화학적 처리 후 절연유에 남아있는 PCBs의 농도를 알기 위해서 국내의 PCBs 분석 공인기관에 절연유 시료의 분석을 의뢰하였다. 의뢰한 시료들은 전부 150°C/4 hrs 반응조건에서 채취한 시료들이었다. 공인분석기관은 (주) 한국환경분석센터, 전북대학교 화학물질 안전관리연구센터 그리고 기초과학연구원 3곳이었다. Table 1은 의뢰한 PCBs를 3회 분석하여 평균한 값을 나타낸 PCBs 농도표이다. 화학적 처리 전 절연유 내의 PCBs의 농도는 (주) 한국환경분석센터의 경우에는 평균하여 30.35 ppm, 전북대학교 화학물질 안전관리연구센터는 29.23 ppm, 기초과학연구원은 33.56 ppm을 각각 나타내었다. 표에서 보듯, 위 공인기관 3곳에서 분석한 화학적 처리 전 PCBs 농도는 거의 비슷한 수준이었고, 화학적 처리 후에는 PCBs가 절연유 내에서 모두 검출되지 않는다는 것을 보였다. 이러한 공인분석기관의 결과는 안동대학교 응용화학 과에서 제시한 150°C와 4 시간의 반응조건에서 절연유 내의 모든 PCBs가 제거된다는 것을 검증하였다.

4. 결론

본 연구는 염기성 조건하에서 변압기 절연유에 들어있는 PCBs를 PEG 600을 사용하여 화학적 탈염소화시켜 PCBs를 제거하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 1. Analysis of PCBs in transformer insulation oil before and after chemical treatment by official analytical institutions

Category	Chemical treatment				
	First (ppm)	Second (ppm)	Third (ppm)	Average (ppm)	
PCB concentration in transformer insulation oil	Korea environmental analysis center	29.63	31.12	30.29	30.35
	Chemical safety management research center in Jeonbuk National University	29.10	29.29	29.30	29.23
	Basic science institute	34.94	33.21	32.53	33.56
Residual PCB concentration in transformer insulation oil at conditions of 150°C and 4 hr	Korea environmental analysis center	N.D.*	N.D.	N.D.	N.D.
	Chemical safety management research center in Jeonbuk National University	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Basic science institute	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

- 1) 절연유에 들어 있는 PCBs의 피크 형태는 일부분의 Aroclor 1242와 Arclor 1254/1260에 속하는 PCBs로 구성되어 있었다.
- 2) 온도가 25~50°C와 시간이 1시간인 화학적 처리 반응조건에서 PCBs의 제거효율은 25% 정도로 매우 미비하였다.
- 3) 반응온도가 100°C이며 반응시간이 1시간인 반응조건에서 PCBs의 제거효율은 70%에 이르렀으며 GC/ECD에서 PCB IUPAC Number 183 이후의 머무름 시간을 갖는 즉, 바이페닐에 염소 치환체가 6~9로 구성되어 있는 PCB 유사체들은 거의 완전히 제거되었다.
- 4) 반응시간이 1시간이며 온도가 150°C의 화학적 처리 반응조건에서 절연유 중에 남아 있는 PCBs의 농도는 0.8 ppm이었고 이때의 PCB 제거효율은 97.7%이었다.
- 5) 150°C의 온도조건에서, 반응시간을 더 연장하였을 때 PCBs의 제거효율도 점차적으로 증가하는 경향을 보였다.
- 6) 최종적으로, 150°C와 4 시간의 반응조건에서 절연유 중의 PCBs는 거의 완전히 제거되었고 이러한 연구 결과는 공인분석기관의 분석에 의해 검증되었다.
- 7) 본 연구는 변압기 절연유 중의 PCBs를 화학적 처리 시 제거효율이 99.99% 이상이며 농도가 2

ppm 이하가 가능한 기술을 제시하였다.

- 8) 본 연구에 의한 화학적 처리는 바이페닐에 있는 염소의 치환수가 많은 PCBs부터 염소가 순차적으로 탈착되어지는 탈염소화 반응이다.

감사의 글

본 연구는 산학협동재단(2010년, 과제번호 95)에서 지원하는 학술연구비에 의해서 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 이상훈, 서광국, 2005, 잔류성 유기오염물질 분해 처리 기술 현황, *Clean Technology*, 11(1), 29-39.
- Gschwend, P. M., Wu, S., 1985, On the constancy of sediment-water partition coefficients of hydrophobic organic pollutants, *Environ. Sci. Technol.*, 19, 90-96.
- Liu, X., Yu, G., 2006, Combined effect of microwave and activated carbon on the remediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil, *Chemosphere*, 63, 228-235.
- Manzano, M. A., Peralers, J. A., Sales, D., Quiroga, J. M., 2004, Using solar and ultraviolet light to degrade PCBs in sand and transformer oils, *Chemosphere*, 57, 645-654.
- Ning, H., Myers, T. E., 2002, PCB removal from

- contaminated dredged material, *Chemosphere*, 46, 477-484.
- PCBs 환경연구회, 2007, PCBs 이해와 대응, 학술진흥재단 PCBs 환경연구회, 5-12.
- Ryoo, K. S., Kapila, S., Puri, R. K., Yanders, A. F., Elsewi, A. A., 1992, Evaluation of carbon for removal of PCBs from transformer mineral oils, *Chemosphere*, 25, 1569-1575.
- Schulz, D. E., Petrick, G., Uuinker, J. C., 1989, Complete characterization of polychlorinated biphenyls congeners in commercial Aroclor and Clophen mixtures by multidimensional gas chromatography-electron capture detection, *Environ. Sci. Technol.*, 23, 852-859.
- Sedlak, D. L., Andren, A. W., 1991, Aqueous-phase oxidation of polychlorinated biphenyls by hydroxyl radicals, *Environ. Sci. Technol.*, 25, 1419-1427.
- Sun, Y., Takaoka, M., Takeda, N., Matsumoto, T., Oshita, K., 2006, Kinetics on the decomposition of polychlorinated biphenyls with activated carbon-supported iron, 2006, 65, 183-189.
- World Health Organization (WHO), 2000, Air quality guideline, Copenhagen, 2, 1-21.
- Wu, W., Xu, J., Zhao, H., Zhang, Q., Liao, S., 2005, A practical approach to the degradation of polychlorinated biphenyls in transformer oil, *Chemosphere*, 60, 944-950.