

활성탄의 분무 여과에 의한 소각로 배가스 중의 유기 염소계 화합물의 제거 공정 연구

주창업* · 황재동 · 이조영 · 조철훈 · 신병철

삼성엔지니어링 기술연구소
*한성대학교 안전기술연구소

A Study on the Activated Carbon Injection and Filtration Process for Removal of Chlorinated Organic Compound in the Incinerator Flue Gas

Changupp Choo, Jaedong Whang, Joyoung Lee, Chulhoon Cho, and Byungchul Shin*
R & D Center of Samsung Engineering Co., Ltd.
*Center for Safety Science and Technology of Hansung University

요 약

소각로 배가스 중의 유해물질중 다이옥신은 그 유해성이 알려지면서 심각한 사회문제로 대두되었다. 이러한 유해가스를 제거하기 위한 방법중의 하나인 활성탄의 분무 및 백필터의 여과 공정에 의한 유해물질 제거 효율을 조사하였다. 다이옥신은 그 독성이 강한 관계로 1,2-dichlorobenzene(o-DCB)을 전구물질로 사용하였으며, 공기 유량, 백필터 압력 손실, 백필터 운전온도, 활성탄 종류에 따른 o-DCB의 제거 효율을 조사하였다. 각 경우에 대한 실험 결과 소각로의 운전조건을 고려할 때 백필터에서의 운전온도 범위는 140~170°C가 적합하며, 백필터에서의 압력손실은 백필터에 부착된 활성탄층에 의한 흡착성능을 고려할 때, 120 mmH₂O를 유지하는 것이 필요하였다. 활성탄과 규조토를 혼합하여 주입한 결과 활성탄과 동일량의 규조토를 투입할 시에는 90% 이상의 o-DCB를 제거할 수 있었고 또한 활성탄 투입량도 줄일 수 있었다.

ABSTRACT - Due to the toxicity of dioxin in the incinerator flue gas, it becomes a severe social problem. Activated carbon adsorption process is one of the methods for removing dioxin in the flue gas and was investigated its performance for removing hazardous organic compounds. Since dioxin is very hazardous material, 1,2-dichlorobenzene(o-DCB), one of the precursor material of dioxin, was used as adsorbate. The effects of air flow rate, pressure drop in the bag filter, operation temperature of bag filter, and kinds of adsorbents on the removal of o-DCB were measured and analysed. Experimental results showed that the operating temperature was recommended within the range of 140-170°C considering the operating condition of incinerator. Also it was necessary to maintain the pressure drop of bag filter 120mmH₂O for enhancing the adsorption at the surface layer of activated carbon formed on the bag filter. The use of mixture of same amount of activated carbon and diatomite showed more than 90% removal of o-DCB and also reduced the consumption of activated carbon.

1. 서론

산업의 발달로 인한 증가되는 폐기물량을 처리하기 위해서 소각에 의한 방식이 대안으로 추진되고 있다. 폐기물의 소각은 부피를 95% 이상 줄일 수 있다는 장점과 경제성 등의 이유로 매립지가 포화되어 가는 국내 상황을 고려할 때 소각에 의한 폐기물의 처리방법은 지속적으로 증가될 것이다. 그러나 소각로 배가스 중의 포함되어 있는 여러 유해물질 특히 다이옥신에 대한 유해성으로 인하여 소각장 건설에 많은 어려움을 겪고 있다. 쓰레기 소각에서 발생하는 다이옥신을 줄이기 위한 방법으로는 소각로 상에서 생성되는 다이옥신의 양을 줄이는 방법과 발생한 다이옥신을 제거하는 방법으로 나눌 수 있다. 소각로의 연소 과정에서 생성되는 다이옥신의 양을 줄이기 위해서는 소각로내의 연소온도, 공기 주입량, 소각로 내의 체류시간 등의 조절을 통해서 줄일 수 있으며 이에 대해서는 소각로의 운전 조건 변화를 통한 여러 연구 결과가 있다.[1-4] 그러나 소각로내에서의 다이옥신 발생을 줄이기 위해 충분한 공기를 공급할 경우에는 NOx의 생성을 증가시키게 되므로 이에 대한 적절한 조건을 선정해야 한다. 따라서 일반적으로는 먼저 다이옥신의 생성을 줄이고 이에 따라 발생하는 NOx는 배가스를 환원촉매를 이용한 처리를 통해서 제거하고 있다. 생성된 다이옥신을 제거하기 위한 방법으로는 촉매를 이용한 다이옥신 분해 방법[5] 및 활성탄 등의 흡착제를 이용한 흡착제거 방법[6,7] 등이 연구되고 있으며 일부 소각장에서는 현재 적용되고 있다. 촉매를 이용한 다이옥신의 분해공정에 비해서 활성탄을 이용한 다이옥신의 흡착 제거 공정은 기존 공정에 적용하기가 간단하고 비용도 저렴한 관계로 현재 여러 소각장에서 이용하고 있으나 투입되는 활성탄의 양, 활성탄의 종류, 운전조건 등에 대한 자세한 검토 없이 외국의 적용 사례를 통하여 국내에 적용되고 있다.

다이옥신은 그 유해성이 매우 높으며 분석 방법 또한 고가의 장비와 시료 채취의 어려움으로 인하여 일반적인 연구에서는 다이옥신의 전구 물질을 이용하여 수행하고 있다. 일반적으로 사용하는 전구 물질은 염소계 유기화합물로서 o-DCB, Chlorophenol[8] 등이 이용되고 있다. 본 연구에서는 전구물질인 o-DCB를 사용하여 활성탄의 주입에 의한 흡착 및 백필터에 의한 여과공정을 이용한 염소계 유기화합물의 제거 효율을 조사하고 기존 공정에 적용하였을 경우의 최적의 운전조건을 확립함을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 시료

흡착제

본 실험에서 사용된 흡착제는 일반 활성탄(A-1)과 다이옥신을 분해하거나 흡착하는 효율을 증가시키기 위하여 전이 금속을 함침시킨 침착활성탄(B-1), 그리고 외국에서 제조한 흡수제와 흡착제로 많이 사용하고 있는 활성탄 혼합 흡수제(C-1)를 사용하였다. 일반 활성탄은 해외 A사의 제품으로 Table 1에 사양을 나타내었다. 침착활성탄으로는 촉매로 많이 사용되고 있는 V₂O₅ 3%를 국내산 325 mesh 분말활성탄에 함침시켜 사용하였다. 침착방법은 V₂O₅ 용액에 분말활성탄을 함침시키는 함침법을 사용하였는데 함침시키고자 하는 활성탄을 준비한 후 이 활성탄의 3%에 해당하는 V₂O₅를 물에 용해시켜 3% 용액으로 제조 후 이 용액에 활성탄을 넣고 반응시킨 후 열풍으로 건조하였다. 활성탄 혼합 흡수제의 경우 ICP를 이용하여 성분을 분석한 결과를 Table 2에 표시하였다. C-1의 성분은 Ca(OH)₂와 활성탄으로 구성되어 있다고 알려져 있는데 분석결과 주성분은 Ca가 약 49.9% 이었다. 이것을 Ca(OH)₂로 환산하면 94%로 Mg, Al 등을 포함하면 활성탄소가 약 5%임을 알 수 있다.

Table 1. Characteristics of Activated Carbon used in the study

Material	Iodine No.(mg/g)	Moisture(%)	Ash(%)	Size(325 USA mesh)
Charcoal	700	8	15	90%

Table 2. Component Analysis Results of C-1 used in the study

Component	Ca (%)	Mg(%)	Na(ppm)	Al(%)	Ni(ppm)	Zn(ppm)
Amount	49.9	0.3	241	0.3	0.6	0.5

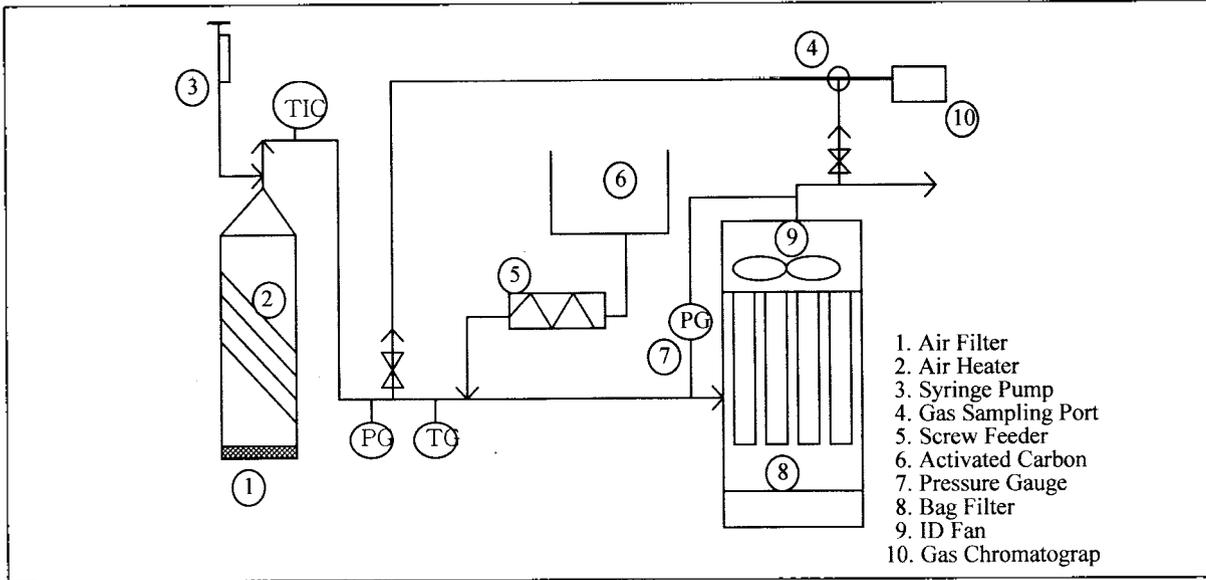


Fig. 1. Experimental Apparatus

또한 활성탄과 규조토를 혼합하여 주입하였다. 소각로 배가스 처리 공정에서 백 필터에 코팅을 위하여 규조토를 사용한다. 규조토는 활성탄 보다 흡착능이 떨어지지만 경제적인 이점과 백 필터의 분진 여과 효율을 증가시키므로 활성탄과 혼합하여 실험에 사용하였다.

다이옥신 전구물질

본 실험에서 사용한 배가스 중의 오염물질 중 다이옥신은 쉽게 측정하기 어렵고 실험실에서 Bench 규모로 실험하기에는 상당히 위독하기 때문에 다이옥신의 전구물질중의 하나인 Dichlorobenzene 중 가장 무해한 1,2(ortho)-dichlorobenzene을 다이옥신의 모델 성분으로 사용하였다.

실험장치

활성탄의 분무 및 여과에 의한 소각로 배가스 중의 오염물질 제거 효율을 조사하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 볼 수

있듯이 실험장치는 소각로 배가스의 온도 조절을 위한 Air Heater, 다이옥신 전구물질의 주입설비, 흡착제(활성탄)를 건조 상태로 Duct에 주입하는 흡착제 주입장치, 그리고 입자의 분리 성능이 우수하며 흡착제와 배가스의 접촉시간을 충분히 제공할 수 있는 백 필터로 구성되었다.

ID Fan으로 유입된 공기는 Air Heater에서 가열되어 공급되고 Air Heater 출구에서 o-DCB가 Syringe Pump로 공급된다. o-DCB와 혼합된 공기는 Duct를 통과하면서 Screw Feeder로 공급되는 흡착제와 혼합된다. 활성탄과 혼합된 공기 및 o-DCB는 백 필터에서 분리되어 배가스는 배기구로 나간다.

2.2 실험방법

활성탄의 분무/백필터 실험은 활성탄을 덕트에 분무하여 백필터에 부착, 여과하는 활성탄 분무공정으로 진행되었다. ID Fan의 흡입 능력을 이용하여 배

가스의 유량을 조절하였으며 최대 $5\text{Nm}^3/\text{min}$ 으로 설계하였다. 배가스의 온도는 전기히터로 조절하였으며 다이옥신 재형성 방지와 소각시설 설치 및 관리 기준에 따라 200°C 로 설정하였다.

활성탄의 Duct 주입시에는 스크류 타입의 주입 장치에 의해서 활성탄 단독, 또는 규조토와 혼합하여 주입하도록 하였으며 다른 분말 흡착제의 주입도 가능하게 하였다. 또한 활성탄 주입량의 조절이 가능하도록 설계하였다.

다이옥신 전구물질인 o-DCB의 주입은 GC의 검출 한계까지 주입하여 처리가스 농도가 유입농도 대비 99.5%가 제거되는 농도가 될 수 있도록 유입 농도를 정하였다. 시료 채취지점은 유입 농도를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 활성탄 분무 지점 이전에 설치하였고 출구의 농도를 측정하기 위하여 백필터 후단에 설치하였다. 시료 채취는 20분~60분 간격으로 연속적으로 수행하였으며 시료채취 지점의 음압 때문에 흡입 펌프를 이용하여 일정한 유속으로 흡입하였다. 시료 채취시에 유입되는 활성탄 입자를 제거하기 위하여 Line Filter를 설치하였다. Gas Chromatography는 Varian 사의 3400CX를 사용하였다. Detector는 FID이고 분석조건은 o-DCB의 용융점을 고려하여 Injector 온도는 170°C , Column 온도는 200°C , Detector의 온도는 250°C 로 하였다. 유속은 백필터의 출구 배관에 밸브를 설치하여 Kano-max 유속계로 유속과 온도를 측정 후 유량을 계산하였다. 유량은 0°C 1기압인 Nm^3/min 을 기준으로 하였다.

백필터는 압력 손실이 $100\text{--}120\text{ mmH}_2\text{O}$ 를 유지하도록 Air Compressor를 이용하여 Air Pulse로 탈진 시켰다. Air Compressor의 밸브는 제어기에 연결되어 설정된 압력 손실이 되면 제어기가 밸브를 열게 된다. 이때 압축공기의 압력과 시간 간격은 조절기에 의하여 조절하였다. 본 실험에서의 실험변수로는 활성탄의 분무량, 백필터에서의 압력손실, ACR (Air/Cloth Ratio), 활성탄의 종류 등으로 각각에 대해서 o-DCB의 흡착에 미치는 영향을 조사하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 ACR (Air/Cloth Ratio)과 백필터 압력손실의 영향

백필터의 ACR은 백필터 공정에서 중요하게 고려되어야 할 변수로 ACR은 탈진형식과 대상입자에 따라서 변하는 값으로 $0.5\text{m}/\text{min} \sim 1.5\text{m}/\text{min}$ 이 통상적인 범위이다. ACR 비가 크게 되면 백필터의 설비투자비가 적어지지만 처리 효율이 저하되기 때문에 적당한 ACR 비를 선정하여야 한다.

백필터의 압력 손실은 먼지의 퇴적으로 인한 손실과 여과포 자체의 압력 손실, 백하우스 구조에서 발생하는 압력 손실의 합으로 나타난다. 여기서 여과포 자체의 압력손실과 백 하우스 구조에서 발생하는 압력손실은 시간에 따라서 변화하지 않는 값이고 먼지 퇴적에 의한 압력손실은 배가스량과 입자농도에 영향을 받는다. 압력손실은 활성탄이 백에 흡착되는 두께와 비례하게 된다. 일반적으로 소각로의 배가스 처리 설비에 사용되는 백필터의 압력손실은 백필터의 재질과 형태에 따라 다르지만 통산 $100\text{--}150\text{mmH}_2\text{O}$ 를 유지한다. 그러나 경우에 따라서는 $200\text{mmH}_2\text{O}$ 까지 올리기도 한다.

일반 활성탄(A-1)을 이용하여 백필터의 압력손실을 서서히 증가시키고 이때의 o-DCB 제거 효율을 관찰한 결과 백필터의 압력손실이 증가할수록 o-DCB의 제거 효율은 증가하였지만 일정한 압력손실 이상에서는 큰 증가를 보이지 않는 것을 Fig. 2에서 볼 수 있다. ACR 비가 큰 경우가 작은 경우보다 제거 효율은 작았다. 이는 ACR 비가 큰 경우에는 백필터로 이동하는 동안의 체류시간이 짧고 백필터에 형성된 활성탄 층과의 접촉시간이 작아서 흡착량이 적기 때문인 것으로 파악된다. 압력손실이 $100\text{ mmH}_2\text{O}$ 이상이 되었을 때 ACR 비가 $0.8\text{m}/\text{min}$ 인 경우에는 90% 이상, $0.5\text{m}/\text{min}$ 에서는 거의 100% 제거되었다. 따라서 백필터의 압력손실은 o-DCB의 90% 이상 제거를 위해서 $100\text{mmH}_2\text{O}$ 이상을 유지하는 것이 필요하다. 즉 여과포만의 압력 손실을 고려할 경우 형성된 활성탄

층의 일부가 탈착되지 않도록 유지할 때에 o-DCB의 높은 제거율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 실제로 실험에서 Air Pulse로 활성탄 층을 탈착하여도 백필터에 부착된 활성탄층의 일부만 탈착되며 결과적으로 여과포만의 압력손실 이상으로 유지되었다. 운전시간에 따른 압력손실 변화와 이에 따른 o-DCB 흡착제거 효율을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 시간에 따라 압력손실 증가와 함께 o-DCB의 제거율도 증가하지만 120mmH₂O 이상에서는 제거율 변화가 비교적 적었다. 백필터 표층에 도포된 활성탄의 두께는 압력 손실이 120mmH₂O 일 때 약 4mm 정도였다. 참고로 이때의 활성탄층의 투과 시간은 ACR 이 0.8m/min일 때 0.3초, 0.5m/min 일 때 0.48초이다.

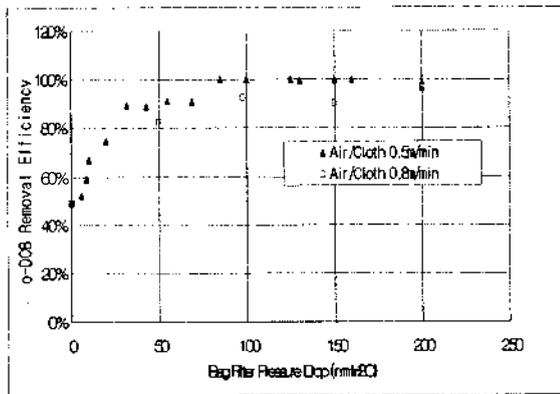


Fig. 2. o-DCB removal efficiency vs. pressure drop in the bag filter and air/cloth ratio Experimental condition : gas flow = 2.7Nm³/min, o-DCB inlet concentration = 12.3 ppmv, bag filter inlet temperature = 150°C

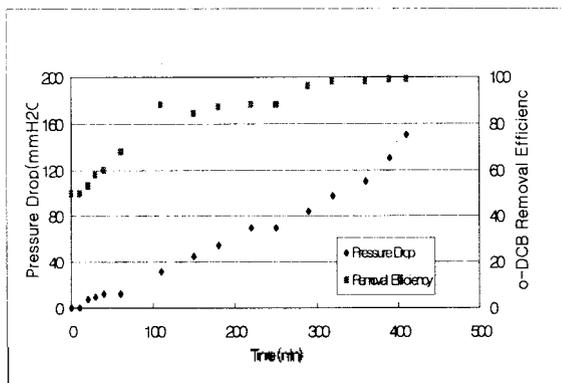


Fig. 3. o-DCB removal efficiency and pressure drop vs. operating time

3.2 백필터 유입 온도의 영향

백필터에서 흡착온도는 소각공정을 고려하고 백필터의 재질이 허용하는 범위에서 수행되어야 한다. 일반적으로 백필터에서의 운전온도는 130~200°C이다. 본 실험에서 백필터 운전온도를 130, 150, 170, 190°C로 각각 변화시키면서 흡착실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 백필터의 배가스 유입온도를 130°C에서 190°C로 증가시켰을 때 o-DCB의 제거 효율은 98%에서 79%로 급격히 저하되었다. 특히 170°C 이상에서는 90% 미만으로 감소하였다. 따라서 o-DCB를 90%이상 제거하기 위해서는 170°C 이하로 백필터의 유입온도를 유지하여 운전하여야 한다. 백필터의 운전온도를 낮출수록 다이옥신의 제거 효율은 증가하지만 너무 낮으면 산 가스의 응축으로 백필터와 배관이 부식될 수 있고 백연 현상이 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해서는 140°C 이상으로 운전하여야 하며 이 경우 o-DCB는 최대 97% 정도 제거됨을 알 수 있다.

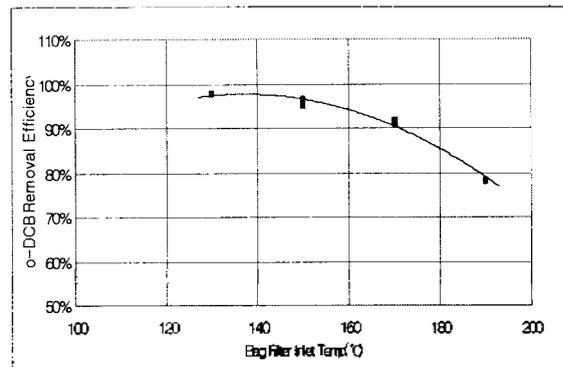


Fig. 4. o-DCB removal efficiency vs. bag filter operating temperature Experimental condition : gas flow = 2.5Nm³/min, o-DCB inlet concentration = 17.3 ppmv, bag filter pressure drop = 200 mmH₂O, activated carbon = A-1

3.3 Duct에서의 활성탄 주입량의 영향

활성탄의 분무량은 백필터 흡착공정의 중요한 운전인자이다. 활성탄의 분무량은 가스상 흡착질의 농도와 운전온도에 따라서 다른 값을 가지지만 온도 150°C 내외의 도시 쓰레기 폐기물 소각장의 경우 백필터 전단에서 다이옥신을 제거하기 위한 분무량을

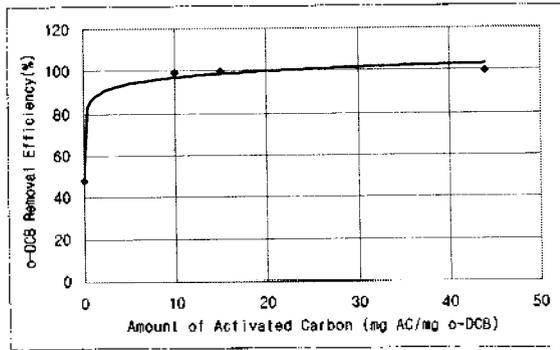


Fig. 5. o-DCB removal efficiency vs. amount of activated carbon Experimental condition : ACR = 0.9 m/min, o-DCB = 20 mg/Nm³, bag filter temperature = 140°C, bag filter pressure drop = 110 mmH₂O, activated carbon = A-1

대략 30~200 mg/Nm³으로 제시된다. 이 양은 소각로 배출가스의 다이옥신 농도를 20ng/Nm³으로 가정했을 때 6~100×10⁶ mgAC/mg 다이옥신 양이다. 그러나 실제 활성탄 분무 시설이 설치된 도시 생활 폐기물 소각로에서는 거의 완벽에 가까운 다이옥신 배출 농도의 저감을 위해 이보다 많은 활성탄을 분무하기도 한다. 본 실험에서는 일반 활성탄(A-1) 10, 15, 45 mg AC/mg o-DCB로 투입하였으며 이에 따른 영향을 Fig. 5에 표시하였다. 활성탄의 주입량에 따른 o-DCB 제거 효율 변화는 적었다. 이는 순수한 활성탄만을 공급하였고 투입된 활성탄의 양이 공급된 o-DCB를 충분히 흡착할 수 있었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6은 활성탄 제조업체가 제공한 활성탄의 흡착등온 그래프로 실험온도에서는 활성탄 100mg 당 약 15mg의 o-DCB가 흡착되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 o-DCB의 양에 대해서 활성탄의 흡착능력을 고려할 때 약 1.5, 2.25, 6.75 배의 활성탄이 주입된 것이며 압력손실을 일정하게 유지하였기 때문에 활성탄 주입량에 대한 영향이 적었다. 즉 불포화된 백필터 표면에 도포된 활성탄층이 지속적으로 흡착을 수행하기 때문에 활성탄 주입량이 적어도 높은 o-DCB의 제거효율을 나타내었다. 따라서 o-DCB의 제거 효율은 활성탄을 o-DCB의 10배 이내로 주입하여도 90% 이상의 o-DCB 제거 효율을 얻을 것으로 사료된다. 또한 Fig. 5에서 활성탄 투입량이 없을 때에도 o-DCB가 약 50% 제거되는 것은 o-DCB가 일부 백필터에 흡착되고 백필터 탈진시에 도포된 활성탄 층이

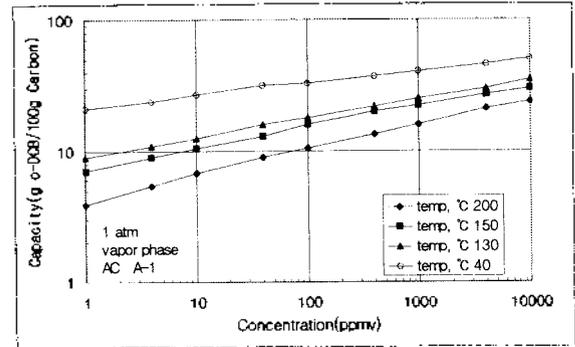


Fig. 6. Adsorption isotherm of o-DCB on activated carbon

모두 제거되지 않았기 때문에 미탈착된 활성탄에 의해 o-DCB가 흡착된 것에 기인된 것으로 사료된다.

3.4 활성탄의 종류

활성탄의 종류에 대한 o-DCB의 흡착제거능의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. o-DCB의 흡착 효율을 비교하였을 때 일반 활성탄(A-1) 99%, 첨착활성탄(B-1) 90%, 활성탄 혼합흡수제(C-1) 50%의 제거효율을 보였다. 일반 활성탄의 처리 효율이 가장 좋았다. C-1의 흡착 효율은 50% 정도로 타 흡착제보다 낮았는데 이는 C-1의 활성탄 함유량이 5%기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 그러나 활성탄의 함유량이 5%인 점을 고려하면 상대적으로 다량의 o-DCB가 흡착되었고, 본 흡수제를 실제공정에 적용할 경우 산개스와의 동시제거에 이용될 수 있는 장점이 있음을 알 수 있다.

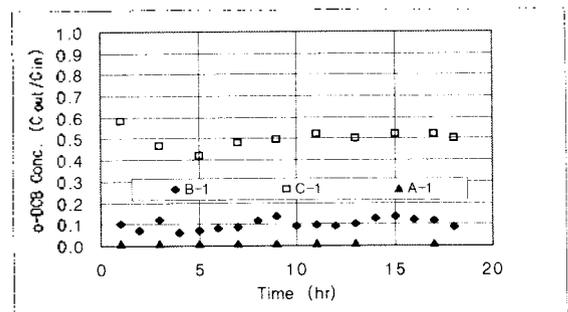


Fig. 7. Effect of adsorbents on o-DCB adsorption Experimental condition : gas flow rate = 3Nm³/min o-DCB inlet concentration = 20 mg/Nm³, bag filter pressure drop = 120 mmH₂O, activated carbon amount = 200 mg/Nm³

3.5 규조토 혼합실험

규조토를 소각로 배가스에 투입할 경우 산가스를 흡착하고 백 필터에서의 분진제거 효율을 증가시킬 수 있으므로 많이 사용한다. 규조토와 일반 활성탄(A-1)을 혼합하여 투입하였을 경우의 o-DCB의 흡착 제거 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 규조토만을 투입하였을 때 o-DCB의 흡착량은 10% 미만이었고 규조토와 활성탄을 80 : 20으로 혼합하여 투입하였을 때에는 약 30%, 규조토와 활성탄을 50 : 50으로 혼합하여 투입하였을 때에는 90%의 제거율을 보였다. 따라서 규조토와 활성탄을 동일량 혼합하여 투입하면 활성탄의 양을 절약할 수 있고 처리 효율도 큰 차이가 없을 것으로 사료된다.

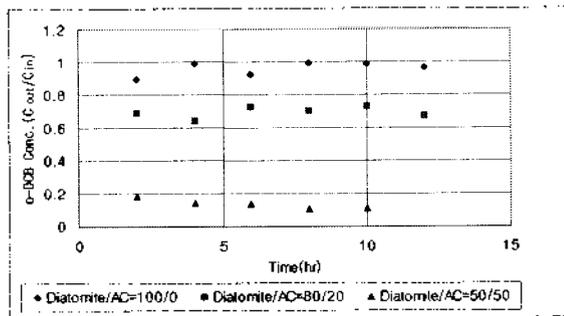


Fig. 8. Effect of the mixture of activated carbon and diatomite on o-DCB adsorption. Experimental condition : gas flow rate = 3Nm³/min, o-DCB inlet concentration = 18 mg/Nm³, bag filter pressure drop = 120 mmH₂O, Diatomite and activated carbon amount = 200 mg/Nm³

4. 결 론

본 연구에서 수행된 소각로 배가스 중의 다이옥신의 활성탄에 의한 제거를 연구하기 위하여 다이옥신의 전구물질인 o-DCB의 제거를 위한 활성탄 흡착 실험은 활성탄을 분말 건조 상태로 배가스 관내에 주입하여 백필터에서 흡착제거하는 실험을 수행하였다. 본 실험결과 o-DCB의 99% 이상을 제거하기 위해서는 10배수 이상의 활성탄을 투입하는 것이 필요하다. 백필터의 운전 조건은 백연 현상을 줄이고 높은 o-DCB 제거 효율을 얻기 위해서는 140 - 170 °C 정도가 적

합함을 알 수 있었다. 또한 규조토와의 혼합 분무 시에는 규조토와 활성탄을 동일량 투입할 경우가 효율이 높았으며 백 필터에서 분진 제거 효율도 높이며 활성탄의 사용량도 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 기존의 소각로에서 생성되는 다이옥신의 경우 활성탄에 대한 흡착능이 다르고 또한 소각로 배가스에는 분진과 수분, 중금속, 기타 여러 종류의 유기화합물이 존재하는 관계로 다이옥신에 대한 활성탄의 흡착능이 감소되므로 이보다는 매우 많은 양의 활성탄이 투입되어야 함을 알 수 있다. 현재 운전중인 기존의 소각로에서는 이보다 훨씬 많은 양의 활성탄이 배가스중의 다이옥신 농도에 대한 고려 없이 투입되고 있는 실정이다. 향후 다이옥신의 성질에 대한 명확한 파악이 이루어 질 경우 소요되는 활성탄의 양을 줄이고 효율을 높일 수 있는 방안이 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 신선경, 정영희, 이재인, 분석과학, 12(6), 540 (1999)
2. 문만상, 이상원, 김삼권, 한국 폐기물학회지, 17(1), 61 (2000)
3. 문만상, 이상원, 김삼권, 한국폐기물 학회지, 17(1), 70 (2000)
4. 신동훈, 최진환, 양원, 최상민, 한국폐기물학회지, 15(7), 705 (1998)
5. Wey, M. Y., Yu, L.J., and Jou, S.I., J of Environ. Eng., 125(10), 925 (1999)
6. Yang, R. T., Long, R. Q., Padin, J., Takahashi, A., and Takahashi, T., Ind. Eng. Chem. Res. 38(7), 2726(1999)
7. Ida, T., Murakami, H., and Kawabata, H., Kobelco Technology Review, 22, 29(1999)
8. 정태섭, 김종국, 김경수, 윤병석, 대한 환경공학회지, 22(1), 179 (2000)