

에폭시 수지 용출물질에서의 내분비계장애물질 Bisphenol-A의 정량과 용출특성 파악

배 범 한 , 최 명 수 , 임 남 웅 , 정 재 훈

경원대학교 토목환경공학과, * 대한주택공사, ** 중앙대학교 건설대학원 환경공학과

A Study on the Quantification and Chracterization of Endocrine Disruptor Bisphenol-A Leaching from Epoxy Resin

Bumhan, Bae, Myoung-soo, Choi*, Nam-woong, Lim**, Jae-hoon, Jeong**

Dept. of Civil & Environmental Engineering, KyungWon University

**Korea National Housing Corporation*

***Dept. of Environmental Eng. Graduated School of Construction Eng., Chung-Ang
University*

Abstract

Bisphenol-A(BPA), a known endocrine disruptor, is a main building block of epoxy resin which is widely used as a coating agent in residential water storage tanks. Therefore, BPA leaching from the epoxy resin may have adverse effects on human health. The possibility of BPA leaching from three epoxy resins were tested with a modified KS D 8502 method at 20, 50, 75 and 100°C in deionized water and the specified test water, respectively. BPA leached to the test water was identified using GC-MS and quantified with GC-FID after a sequential extraction and concentration. The results showed that BPA leaching has occurred in all three samples tested. The quantify of BPA leaching from unit area of epoxy resin coating was in the range of 10.677~273.120 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ for sample A, 29.737~1734.045 for sample B and 52.857~548.778 for sample C depending on the test temperature, respectively. In general, the amount of BPA leaching increased as the water temperature increases. This result implies a higher risk of BPA leaching to drinking water during a hot summer season.

In addition, microbial growth, measured by colony forming units, in epoxy coated water tanks was higher than that in a stainless steel tank suggesting that compounds leaching from epoxy resin may support the growth of microorganisms in a residential water holding tank.

KEYWORDS : Bisphenol-A, Endocrine disruptor, Epoxy resin, Microbial growth

1. 서 론

최근 각종 화학물의 생태계 및 인체에 미치는 악영향에 대한 지속적인 연구가 진행되면서 많은 새로운 사실들이 밝혀지고 있다. 그 중 인간의 산업활동에 의하여 자연계로 방출된 이종화합물(xenobiotic compounds) 가운데 인체 혹은 생물체내의 호르몬과 유사한 물질이 인체 내 정상적인 생리작용을 교란한다는 사실이 확인되었는데, 이를 내분비계장애물질(Endocrine disruptor) 혹은 환경호르몬이라 부르고 있다.¹⁾ 지금까지 확인된 내분비계장애물질은 약 70여종으로 공업약품 및 환경오염물질, 플라스틱 원료 및 첨가제, 농약 및 살충제와 중금속 등 4가지로 분류된다. 이 중에서 사용량으로 볼 때, 페놀, 비스페놀-A, Dibutyl-phthalate 등의 플라스틱의 원료 및 첨가제가 가장 널리 사용되는 내분비계장애물질이 사회적 문제로 크게 대두되고 있다.²⁾ 플라스틱은 현대인간의 삶과 밀접한 관계를 이루고 있으며, 현대사회의 발전은 플라스틱이라는 혁신적 소재에 힘입은 바 크고, 또한 이를 생산하는 산업이 현대사회의 경제구조에 한 축을 이루고 있어, 플라스틱류에서 용출되어 인체 및 생물체로 유입될 수 있는 내분비계장애물질에 대한 환경 동역학적 조사와 이를 바탕으로 한 위험도 평가(risk assessment)가 가장 절실한 것으로 판단되며, 이를 위해서는 무엇보다도 환경으로 용출되는 물질에 대한 정성 및 정량적 조사가 선행되어야 할 것이다. 따라서, 본 연구는 각종 수조의 코팅제로 사용되는 에폭시 수지에서 용출되는 여러 화학물질을 공정시험법 및 축진시험법을 사용하여 용출실험을 행한 후, 화학적 산소요구량을 gross parameter로 이용하여 총용출물질을 정량하고, 내분비계장애물질인 비스페놀 A의 용출을 정량 및 정성하였다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 용출시험방법

본 실험은 KS D 8502 수도용 액상 에폭시 수지 도료 및 도장 방법에 제시된 용출시험법에 따라 국내에서 생산되는 3종의 2액성 에폭시 도료를 120×70mm, 두께 3mm의 유리판에 도장하여 경화시킨 후 D.I. water와 KS D 8502시험법에 의한 공시수를 조제하여 각 2L씩 스테인레스강 밀폐용기 안에 도장한 시험편 6매와 함께 넣고 Autoclave에서 50℃, 75℃, 100℃의 온도 조건에서 6시간, 실온(20℃)에서 24시간 용출시킨 후, 용출수를 pesticide grade dichloromethane(DCM) 100ml, 50ml, 50ml로 3단계 추출하고 추출액을 Kuderna Danish농축기를 사용하여 2mL까지 농축하여 GC로 분석하였다.^{3,4)} 용출실험은 동일한 실험조건으로 2회 반복하였다. 1차 용출실험에서는 용출수용액을 그대로 용매로 추출하였으며, 2차 용출실험에서는 용출수용액을 0.45µm pore size의 glass fiber filter(Gelman社, Metrigard)를 사용하여 흡시 포함되어 있을 지도 모르는 에폭시 시료의 파편을 제거한 후에 용매로 추출하였다. 또한, 용출 실험 전·후의 시료수 약 50ml로 pH와 CODCr 및 CODMn을 측정하였다.^{6),7)} pH의 측정은 ORION社의 Model 550을 사용하였다.

2.2 분석 방법 및 화학약품

농축액은 GC/MS로 정성한 후 불꽃이온화검출기(Flame Ionization Detector, FID)가 장착되어 있는 Finnigan 9001 GC를 이용하여 정량 하였으며, 분석조건은 Ruthann 등의 분석 조건을 바탕으로 여러 번 수정하여 최적화 하였다.⁵⁾

용출 실험 후 농축된 시료를 GC-FID로 직접 분석할 경우 약 5%의 Memory 효과로 인해 재현성이 떨어진다. 이를 제거하고 검출 감도를 높이기 위해 시료를 Pierce社의 BSTFA(N,O-bis(trimethylsilyl)-trifluoroacetamide)로 유도체화하여 정량하였다. 유도체화 과정은 농축된 시료 1ml을 Graduated vial(2ml)에 옮기고 BSTFA 200 µL를 첨가하여

실온에서 10분 방치한 뒤, 0.2ml이 될 때까지 질소가스(99.999%)로 건조시키고 DCM으로 1ml로 보정하였다. 정량 분석시 정확도(Accuracy) 및 정밀성(Precision)을 유지하기 위하여 엄격한 QC/QA를 실시하였다. 시료의 추출, 보관 및 분석시 BPA가 용출될 수 있는 플라스틱 용기를 사용하지 않고 550℃에서 24시간 유기물을 산화하고 pesticide grade DCM(Fisher)으로 세척한 유리용기만 사용하였고, teflon 재질의 liner를 사용하였다. 또한, 용출에 사용되는 시료수 및 용매를 시료 준비와 동일한 방법으로 추출하거나 농축하여 실험실내 오염을 검사하였다. 검사 방법으로 각 시료를 GC/FID로 분석할 때 용매를 주입하여 BPA가 검출되는지 확인한 후 시료를 분석하였다.

본 실험에서 용출되는 BPA량이 극히 미량이므로 GC-FID 분석시 signal/noise비율을 구분하기 위해서 IDL(Instrument Detection Limit)과 MDL(Method Detection Limit)을 구하였다.⁶⁾ IDL은 77ppb, MDL값은 297ppb로 관측되었다.

$$MDL = tv \cdot \sigma_{\alpha=0.01} \cdot s \quad \text{식(1)}$$

여기서, s는 표준편차, $tv \cdot \sigma_{\alpha=0.01}$ 은 각각 자유도 $v=n-1$ 로 계산된 표준편차 추정치와 99% 신뢰수준에 해당되는 Student의 t수치이다.

또한, 용출된 시료의 전처리 과정에서의 손실량을 알아보기 위해 10ppm의 Internal Standard를 주입해서 회수율 실험을 행하였는데, 6회의 회수율 실험 결과 62.6~118%의 범위로 신뢰할 수 있는 회수율을 나타내었다 (Table 1)

2.3 일반세균 실험방법

수조내부 도장재로 사용되는 에폭시 수지에서 유기물질이 용출될 경우, 물질의 생물학적 분해도에 따라 미생물의 성장기질(growth substrate)로 사용되어 미생물이 번식할 수

Table 1 Result of recovery test

Sample No.	Recovery (%)		
	1st	2nd	average
1	116	118	117
2	74.4	77.2	75.8
3	107	99.8	103.4
4	64.2	68.5	66.4
5	62.6	70.5	66.6
6	80.8	82.3	81.6

있다. 용출실험 결과, 에폭시 수지에서 BPA를 포함한 여러 유기물질의 용출이 관측되어 용출된 물질에 의한 수중의 미생물 농도의 변화를 연구하였다.

미생물 성장 실험을 위한 반응조는 6개의 1L 용량의 유리용기 내벽에 각각 2개씩 세 종류의 시료를 도포하고 건조하여 사용하였다. 시료수로는 경원대학교 공과대학 환경실험실의 수도수를 사용하였고, 대조군으로 유기물의 용출우려가 없는 스테인레스강 반응조를 사용하여 동일한 실험을 실시하였고, 공시험군으로는 멸균 여과한 D.I. water를 사용하여 시료의 이송 및 도포과정에서 일어날 수 있는 평판배지의 오염을 검증하였다. 미생물은 부유미생물과 부착미생물로 구분하여 측정하였다. 부유미생물은 용액 1mL를, 부착미생물은 멸균된 면봉을 사용하여 단위면적(cm²)상의 미생물을 채취한 후, 각각 평판배지에 도말하여 CFUs(colony forming units)를 측정하였다.

평판배지는 일반 미생물 배지인 Difco 社의 Nutrient Broth를 사용하여 조제하였고 부유미생물은 Standard Methods(19th Edition)의 pour plate technique를, 부착미생물은 spread plate technique를 사용하여 측정하였다.⁶⁾ 미생물의 배양은 20±0.1℃의 암소에서 배양하였는데 일반적인 저수조의 환경을 재현하기 위하여 상부는 기밀하지 않고 차폐하였다. 또한, 모든 미생물 측정 시료에 대하여 3배수 측정을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도변화에 따른 pH 변화

용출 시험 후 시료수의 pH를 측정하여 온도 변화에 따른 3종의 에폭시수지에서의 용출물에 의한 pH 변화를 관찰한 결과, 에폭시 수지의 D.I. water 및 공시수를 이용한 온도변화에 따른 시료수의 pH 값은 6.68~8.49의 범위로 거의 중성을 크게 넘지는 않았고 D.I. water, 공시수 모두 0.5 정도의 pH 증가를 나타내고 있다. 이는 에폭시 수지의 조성물질인 amine 류의 pKa 값이 7.0에 가까우며, pH에 큰 영향을 미칠 수 있는 산과 염기 등의 무기물질이 사용되지 않기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 온도변화에 따른 COD의 변화

에폭시 수지는 아민류, 이미다졸류, 혹은 프탈산 무수물과 같은 첨가물이 매우 많기 때문에 사용되는 모든 유기물질을 정량적으로 분석하기는 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 용출 물질의 gross parameter로 공시수 및 시험수 용액의 COD를 측정하였다. COD 측정방법으로는 CODCr법과 CODMn법을 이용하여 산화가 어려운 용출 유기물질의 양을 간접적으로 추정하였다.

그 결과, D.I. water를 이용한 경우 용액의 CODCr은 Sample A에서 15.5~48mg/L, B는 0.5~331.8mg/L, C는 163~301.8mg/L의 범위로 나타났으며, 공시수의 경우 Sample A는 25.5~63.0, B는 24.3~358.0, C는 108.0~269.3mg/L의 범위를 각각 나타내었으며 온도에 따라 증가되는 경향을 나타냈다. 공정시험법에 의한 CODMn의 실험결과에 의하면 D.I water를 사용한 경우 Sample A는 5.5~31.2 mg/L, B는 23.4~145.2mg/L, C는 114.6~131.4mg/L의 범위로 나타났으며, 공시수의 경우 Sample A는 12.9~35.5, B는 12.6~141.2, C는 81.3 ~152.7mg/L의 범위를 각각 나타내었다(Fig.1 및 Fig.2).

Koyama등은 autoclave를 사용한 에폭시

수지의 열안정성 실험에서 160℃의 온도에서 10시간사이에 0.61%의 감량이 발생하였다고 보고하였다.⁸⁾ 이와 동일하게 본 실험에서도 용출온도가 증가할수록 용출물의 증가로 인하여 COD의 값이 증가하여, 에폭시 수지 코팅이 온도에 대한 열안정성이 약함을 보이고 있다. 또한, CODMn에 비하여 CODCr이 1.5~2배 가량 높은 값을 보여주는 점으로 보아, 용출물

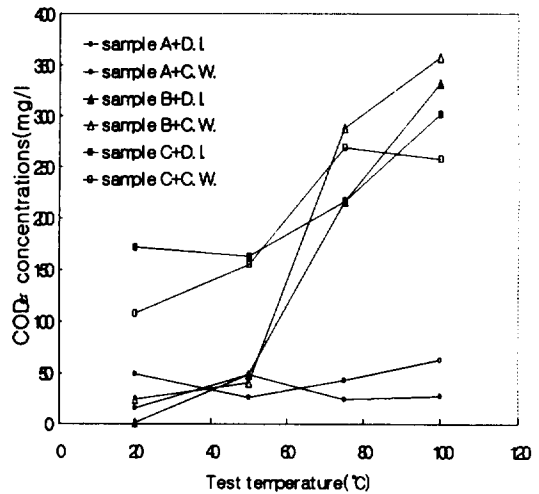


Fig. 1 Effect of temperature on the leached COD_{Cr} concentrations in the test water

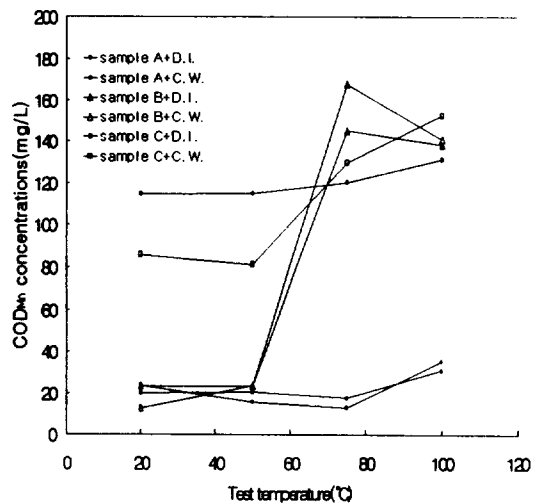


Fig. 2 Effect of temperature on the leached COD_{Mn} concentrations in the test water

질은 약한 산화제인 permanganate로는 산화가 잘 일어나지 않는 고분자 혹은 아민류의 물질로 사료된다.

KS D 8502에 의한 에폭시 수지 도막 용출 시험 CODMn값은 2mg/L 이하로 제한하고 있는데, 규제치를 넘는 경우가 많은 것으로 관측되었다. 에폭시 수지에서 용출되어 GC-FID detector에 검출된 peak의 총면적과 CODCr 값 사이에는 Fig. 3에서와 같이, 선형적 비례 관계가 관측되었다. 상관계수는 0.63으로 다소 낮으나, 소수의 outlier를 제외할 경우는 0.90을 상회한다. 따라서, 고농도의 COD는 에폭시 수지에서 용출 물질에 의하여 발생하며, 이는 BPA이외의 filler로 사용되는 아민류 등의 물질로 사료된다.

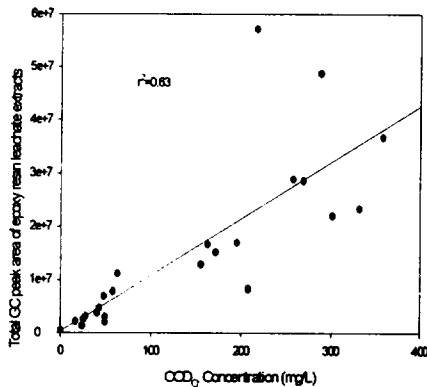


Fig. 3 Relationship between total GC peak area and COD_{Cr}

3.3 온도변화에 따른 시료내 BPA 농도변화

Sample A의 경우, D.I. water를 사용하여 용출한 경우 실온(20℃) 및 50℃에서는 BPA가 검출되지 않았으나, 75℃와 100℃에서는 농축전의 시료수 농도로 환산할 경우 2.64 및 5.06 μg/L가 검출되었다. 공시수를 사용할 경우에는 20℃에서 실험한 1차 용출의 경우에만 BPA가 검출되지 않았고 그 이외의 모든 경우에서 0.57~14.53 μg/L의 BPA가 검출되었다. 특히, 온도가 75℃까지는 용출량이 큰 증

가를 보이지 않았으나, 100℃에서는 75℃에 비하여 최소 1.9배 최대 7.6배의 BPA가 검출되었다. 그러므로, Sample A는 100℃에서 상대적으로 불안정한 시료로 관측되었다.

Sample B의 시료수내의 BPA 농도는 D.I. water에서는 1.43~89.79 μg/L, 공시수의 경우 3.48~106.40 μg/L로 변화하였다. 특히, 100℃에서 보다는 75℃에서 용출량이 더욱 큰 값을 나타내고 있다. 2차 용출시험에서도 1차 실험과 같이 모든 온도조건에서 BPA가 검출되었다. 그러나 1차 용출시험에 비하여 농도가 현저히 줄어든 것으로 관측되었는데 이는 Sample B 시료의 특성에 기인하는 것으로 사료된다(Table 2). Sample B의 경우, 실험 온도 75℃이상에서 도장된 부분에 균열이 발생하고 박리되는 현상이 나타났다. 도장 부분에 균열이 발생할 경우, 시료수와의 접촉면적이 증가하여 용출되는 양이 증가할 수 있고, 미세한 에폭시 조각이 부유하게 될 경우 용매추출 과정에 포함됨으로써 고농도의 BPA와 유기물(COD)이 많이 용출될 수 있다. 이로 인하여 여과단계를 추가한 2차 용출시험에서의 용출량이 감소한 것이다.

Sample C의 경우에도 다른 두 시료들과 마찬가지로 용출온도가 증가할수록 많이 용출되어 시료수중의 BPA 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 1차 용출실험에서 온도 75℃에서 시료수를 D.I. water로 사용한 경우 시료수내의 BPA 농도는 1.56 μg/L로 매우 낮게 측정되었는데, 이는 농축시 analyte의 손실로 인하여 낮은 농도가 검출된 것으로 사료되며, 이를 보완하기 위하여 실시한 2차 용출실험에서는 온도가 증가할수록 용출되는 BPA의 양도 증가함을 보이고 있다. Sample C의 시료수에서는 BPA가 2.81~29.20 μg/L로 검출되었으며 이는 Sample A와 B에서 용출되는 중간정도의 농도이다. 또한, 시료수내 BPA와 COD의 농도사이에는 비례적인 상관관계가 성립함을 알 수 있다. 그러므로, 상기의 실험시료들에서는 에폭시 수지의 물리화학적 불안정성에 기인하여 용출되는 유기물의 양이 증가할수록, 내

분비계장애물질 BPA의 용출도 증가하므로 COD는 에폭시 수지의 불안정성에 대한 지표일 뿐 아니라, BPA 용출량의 간접적 지표로 사용됨을 알 수 있다. 에폭시 수지 상호간의 BPA 용출량을 비교하기 위해서는 각 에폭시 수지 시험편의 단위 면적당 용출되는 BPA의 양으로 환산할 필요가 있어 이를 환산하여 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다.

3.4 BPA의 정성

본 실험에서 정량한 BPA가 우연히 retention time이 일치한 유사화합물이 아닌 noble

BPA인지의 여부를 가리기 위하여, 추출된 시료를 GC-MSD로 분석하여 mass spectra를 검출하였다.

그 결과 시료와 noble BPA의 m/z값을 비교해보면 228(BPA의 분자량), 213, 119, 107, 및 73에서 일치하고 있음을 알 수 있다 (Fig. 6).

Sample B에서 용출된 물질은 BPA임이 확인되었으나, sample A와 C에서 용출된 시료에서는 농도가 낮고, 주변의 오염물질과 분리되지 않아 mass spectra에 확인되지 않았다. 그러나 다른 시료와 같이 GC-FID로 분석하였

Table 2 Effect of temperature on the leaching of BPA from three epoxy samples (leaching time, 24hours at 20℃, 6 hours at the other temperature)

Temperature (°C)	sample A						sample B						sample C					
	D.I water			S.T water			D.I water			S.T water			D.I water			S.T water		
	1st	2nd	T M S	1st	2nd	T M S	1st	2nd	T M S	1st	2nd	T M S	1st	2nd	T M S	1st	2nd	T M S
20	ND (0)	ND (0)	0.64 (0)	ND (0)	0.57 (0.1)	0.60 (0.1)	1.43 (0.1)	0.32 (0)	0.71 (0)	3.48 (0.9)	1.58 (0.5)	4.60 (0.3)	2.10 (0.2)	4.86 (0.4)	0.45 (0)	2.86 (0.3)	2.81 (0.8)	1.06 (0.1)
50	ND (0)	ND (0)	-	1.66 (0.2)	0.69 (0.1)	-	1.48 (0.4)	0.69 (0)	-	10.47 (5.0)	15.10 (0.6)	-	12.11 (0)	5.70 (0.4)	-	10.64 (0)	3.29 (1.1)	-
75	2.64 (0)	1.67 (0.6)	-	1.85 (0.3)	3.16 (0.2)	-	89.79 (12.6)	25.20 (1.4)	-	106.4 (7.8)	65.60 (7.0)	-	1.56 (0.3)	7.23 (0.6)	-	14.16 (0.3)	8.01 (0.7)	-
100	5.06 (2.4)	6.98 (0.3)	0.88 (0)	14.15 (1.3)	14.53 (2.4)	20.01 (0.6)	54.14 (14.6)	52.22 (3.2)	237.4 (13.6)	92.39 (1.9)	92.35 (13.1)	179.8 (13.9)	11.03 (2.6)	24.81 (2.5)	24.96 (0.6)	27.83 (1.5)	29.20 (10.6)	25.40 (8.6)

※ () standard deviation

unit : μg/L

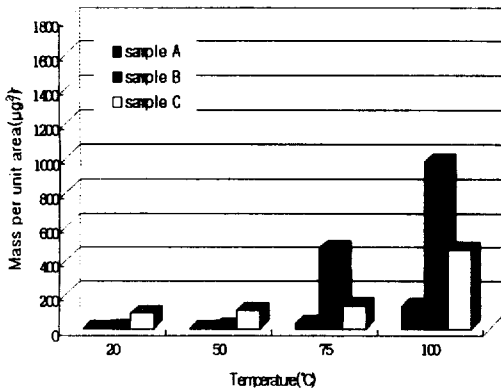


Fig. 4 The amount of BPA leaching normalized to the unit coating area (D.I. water)

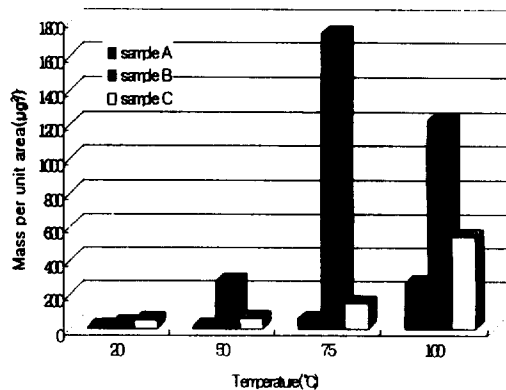


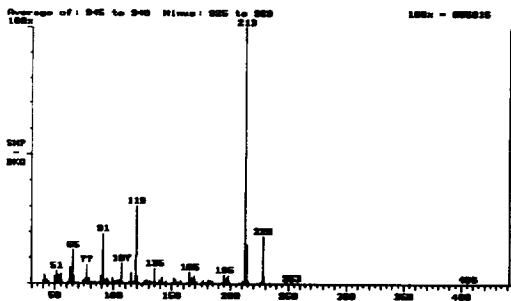
Fig. 5 The amount of BPA leaching normalized to the unit coating area (specified test water)

을 경우 retention time이 sample B에서의 BPA와 동일하여 본 연구에서 분석된 물질은 BPA라고 할 수 있을 것이다. 또한, 주입시험 (spike test)한 결과 noble BPA임을 확인하였다.

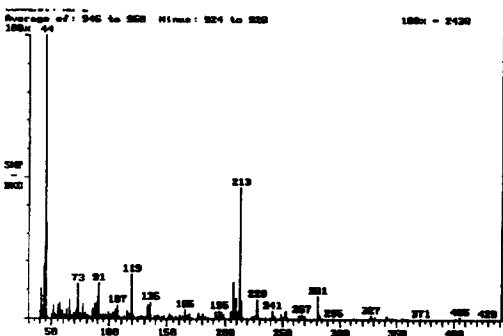
3.5 일반세균 실험결과

미생물의 CFUs 측정 결과, 에폭시 수지의 종류에 따라 반응조내의 미생물의 양은 큰 차이를 보여주었다. 도장한 에폭시 수지의 종류에 따라, 초기 CFUs/mL은 369 ± 167 의 변화를 보였고, 스테인레스강 반응조에서는 84 ± 40 의 CFUs/mL이 측정되었다. 공시험군 (blank)에서의 미생물수는 1일째의 92를 제외한 모든 경우에서 10 이하가 검출되어 시료의 도장과정에서 발생한 오염은 무시할 수 있을 만큼 작았다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 에폭시 반응조내 미생물은 크게 증가하였다. 특

히 Sample A를 도장한 반응조에서의 부유미생물은 지속적으로 증가하여 배양 6일 후에는 일반 세균수가 3396 ± 518 CFUs/mL에 달하는 것으로 측정되었다. Sample A는 용출실험에서 시료수의 COD가 3가지의 시료중 가장 낮은 값을 보인 시료이다. 그러므로 Sample A의 경우, 용출량은 작으나 용출되는 물질이 미생물이 손쉽게 성장기질로 사용할 수 있는 물질, 예를 들어 분자량이 작은 지방족 혹은 방향족 화합물을 방출하는 것으로 사료된다. Sample B의 경우 2번째로 높은 미생물수를 나타내었다. Sample B의 경우, 배양 4-5일째



a) Mass spectra of BPA standard 10ppm



b) Mass spectra of Sample B

Fig. 6 Mass spectra of noble BPA and BPA in sample B

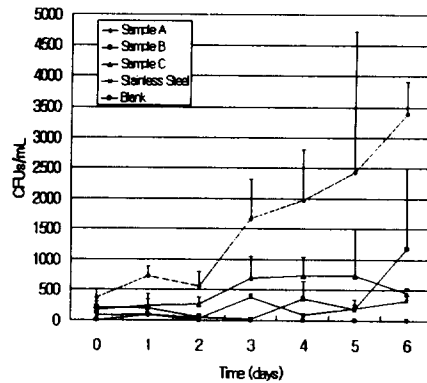


Fig.7 The changes of suspended microorganisms measured by colony forming unit in epoxy resin coated reactors vs. stainless steel tank

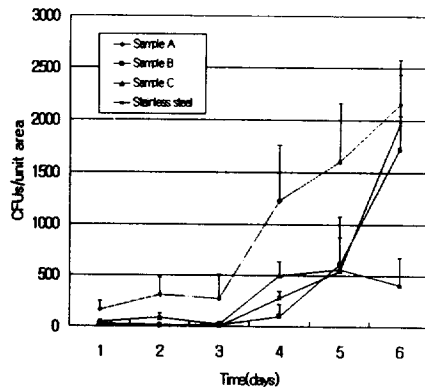


Fig. 8 The changes of attached microorganisms measured by colony forming units in epoxy resin coated reactors vs. stainless steel tank

까지는 미생물의 수가 증가하지 않다가 6일경에 크게 증가하였다.

Sample C는 배양 후부터 미생물의 양이 꾸준히 증가하여 배양 5일 경에는 최대값인 732 ± 773 CFUs/mL에 도달하였으며, 6일 경에는 조금 감소하였다. 스테인레스강 수조의 경우에는 5일까지 약 100CFUs/mL의 매우 낮은 미생물수가 관찰되었으나 배양 6일에는 그 값이 300을 초과하는 높은 값을 보이고 있다.

이상의 실험 결과에서 에폭시 수지로 도장한 반응조 보다 스테인레스강 수조에서의 미생물의 성장이 훨씬 느리게 일어난다는 것을 알 수 있다. 이는 에폭시 수지에서 용출되는 물질을 미생물이 분해하여 사용하기 때문으로 사료된다. 그러나, Sample B의 경우에서와 같이 용출된 COD값은 높음에도 불구하고 미생물의 성장이 느린 경우와 Sample A의 경우와 같이 용출된 COD값이 낮음에도 불구하고 미생물의 성장이 빠르게 측정된 것은 용출된 물질의 생분해도가 수중의 미생물 성장에 가장 큰 영향을 미친다는 사실을 간접적으로 보여주고 있다 (Fig. 7 및 Fig. 8).

Fig. 8에서와 같이 부유미생물의 증가와 거의 동일한 추세로 부착미생물도 증가하였다. 미생물량으로는 Sample A > Sample B > Sample C로 측정되었다. 이는 부착미생물 혹은 부유미생물의 상호관계를 보여주는 것으로

부착미생물이 탈착되어 부유하거나, 반대로 부유미생물이 벽면에 부착하여 부착미생물로 전환되는 미생물막의 전형적인 발달과정을 보여주고 있다. 상기의 측정결과를 살펴보면, 미생물막의 성장이 크게 증가하는 것은 배양 3-4일 경이므로 미생물의 부착에서 성장에 걸리는 지체기(lag time)가 3일임을 알 수 있다. 또 다른 부착 미생물 측정 결과에서 중요한 점은 스테인레스강 수조의 경우, 미생물의 절대 다수가 부착상태로 존재한다는 사실이다. 상기의 부유미생물에 비하여 많은 미생물이 부착된 상태로 존재하는 데, 이는 수중의 유기물 부족으로 인한 것으로 사료된다. 스테인레스강 수조에서 미생물의 성장에 필요한 유기물이 용출될 가능성이 없으므로 미생물은 원래의 수도수내에 존재하는 유기물을 이용하여 성장할 수밖에 없다. 대부분의 경우, 부착미생물이 열악한 환경조건을 견디기에 유리하기 때문에 부착미생물이 상대적으로 우위를 점한 것으로 볼 수 있다. 두 번째로 중요한 점은 스테인레스강에서도 수류의 체류시간이 오래동안 지속될 경우, 미생물이 증식한다는 점이다. 따라서, 스테인레스강 수조에서도 미생물(특히 부착미생물막)의 증식을 억제하기 위해서는 최소한 3일 이내의 체류시간을 가져야 할 것으로 추정할 수 있다.

4. 결 론

1. 세 종류의 에폭시 수지 시험편의 용출후 수질의 pH는 6.68~8.49의 범위로 거의 중성을 나타내었다.

2. 세 종류의 에폭시 수지 시험편의 용출후 수질의 CODMn값은 K.S D 8502 용출시험법의 규제 농도인 2mg/L 이하보다 훨씬 높은 수치인 CODMn의 경우 Sample A 12.9~35.5, Sample B 12.6~167.9, Sample C 81.3~152.7 mg/L의 범위를 나타내었지만, 이것은 BPA의 영향 외에도 다른 용출물의 유기물 성분의 영향에 의한 것으로 사료된다.

3. 세 종류의 시료에서 모두 BPA가 용출되었으며, 용출량은 시료의 종류 및 용출온도에 따라 변화하는 경향을 나타내었다.

4. 세 종류의 에폭시 수지 용기와 스테인레스 강 용기에서의 미생물 증식을 조사한 결과, 부유미생물의 경우, 에폭시 수지에서의 미생물 증식이 스테인레스강 용기에서의 미생물 증식 속도에 비하여 매우 빠른 것으로 확인되었고 미생물의 양도 최고 19.7배 이상 검출되었다. 부착 미생물의 경우, 부유미생물과 동일한 증식 경향을 보이고 있으나, 스테인레스강 용기에서 6일 이상 배양할 경우 부착미생물의 급속한 증식이 관측되었다.

5. BPA의 인체 위해도 및 규제기준이 아직 마련되어 있지 않아, 위해 여부에 대해서는 판정할 수 없으며 지속적인 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. Colborn, T., Cumannoski, D., and Myers, J.P., Our Stolen Future (1996).
2. U.S. EPA, Special report on environmental endocrine disruption : An effects assessment and analysis, Risk Assessment Forum, U.S. EPA, Washington D.C., 116 (1997).
3. U.S. EPA, Test method for evaluating solid waste, 3rd. edition (1996).
4. K.S. D 8502, 수도용 액상 에폭시수지도료 및 도장방법 (1994).
5. Ruthan, A., Rudel., S. I., et al, Identification of Alkylphenols and Other Estrogenic Phenolic Compounds in Wastewater, Septage, and Groundwater on Cape Cod, Massachusetts Environmental Science & Technology, vol. 32, 861-869 (1998).
6. APHA, AWWA, and WEF, Standards Methods 19th Edition (1995).
7. 환경부, 수질오염공정시험법 (1999).
8. Koyama, M., Gota, K. Shimizu, T., and M., Koyamada, Long Term Degradation of Epoxy Molding Resins, International Symposium on Electrical Insulating Materials, Tokyo, Japan, 363-366 (1995).