

## 새로운 Pollution Index를 이용한 배출 최소화 공정 연구

최경희, 유계상, 문승현\*, 장영수\*\*

광주과학기술원 환경공학과

\*\*Argonne National Laboratory

### New Pollution Indices for Use in Minimizing Environmental Impacts from Industrial Processes

Kyeong-Hee Choi, Kye-Sang Yoo, Seung-Hyeon Moon and Young-Soo Chang\*\*

\*Dept. of Environ. Sci. & Eng., KJIST, Kwangju 506-303, Korea

\*\*Argonne National Laboratory, 9700 S. Cass Ave., Argonne, IL 60439, USA

#### 요약

환경 문제에 대한 사회적 관심이 높아지고 정부의 환경 규제도 강화되면서 환경 오염물질을 줄이기 위한 공정개선 필요성이 대두되고 있다. 공정 개선을 위해서는 각 공정이 환경에 미치는 영향을 나타내는 정량적인 기준이 필요하다. 본 연구에서는 물질수지식으로부터 정의되는 오염 지수(Pollution Index)를 폐기물의 질량(mass), BOD, toxicity에 따라 세 가지로 구분하여 정의하였으며, 각 Pollution Index는 최적의 대안을 결정할 때 환경영향평가에 대한 정량적인 척도를 제시할 수 있으므로 비용평가와 더불어 공정 선택의 객관적인 기준이 될 수 있다. 정의된 Pollution Index를 문헌에 보고된 세계 제조 공정에 적용하여 기존의 공정과 개선된 공정에 대하여 Pollution Index를 계산하여 각 공정이 환경에 미치는 영향을 정량적인 수치로 비교하였다.

**ABSTRACT :** This paper proposes new pollution indices as a quantitative measure of environmental impact. The pollution index for a process is defined by using pollution balance equations. Three pollution indices were defined on the basis of waste characteristics: mass, BOD, and toxicity. Such pollution indices can be effective and valuable tools for minimizing the waste production of a process in terms of environmental impacts, and, when used with cost estimates, for objectively determining the optimal process. In this paper, the application of these indices was demonstrated in a case study involving the production of detergent, as reported in the literature. Pollution indices for the existing process and two improved processes were calculated and compared to evaluate environmental impacts of these processes.

\* corresponding author

#### 1. 서론

지금까지의 공정 개발 또는 개선의 우선 목표는 제품의 수율과 생산성 향상, 그리고 고정 비용(인건비, 시설유지비 등)을 포함한 기타 제반 비용의 감소에 있었다. 그 결과 공정이 환경에 미치는 영향을 줄이기 보다는 제조비용을 최소화 하는 것이 전통적인 공정 설계의 목표가 되었다. 최근 환경문제에 대한

사회적 관심이 높아지고 정부의 환경 규제 강화와 처리비용의 증가에 따라 환경 오염물질을 줄이기 위한 공정개선의 필요성이 증대되었고 그 결과 기존의 공정 최적화 목표에 대한 기본 개념이 변화하고 있다.

현재까지 화학공장은 배출후 처리 방법(End-of-pipe Treatment)을 이용하여 규제치를 초과하지 않는 범위 내에서 폐기물을 방출하고 있다. 그러

나 이 규제방식은 자연의 자정능력의 한계를 인식하여 총량규제 또는 무방류제의 실천 등으로 전환되어 가고 있다. 폐기물의 최소화(Waste Minimization), 오염 방지기술(Pollution Prevention), 청정기술(Clean Technology)과 같은 용어는 배출후 처리 방법이 갖는 한계를 극복하기 위해서 제시된 개념으로 부분적으로 다른 내용을 포함하고 있지만 공정 중간에 발생되는 오염물질을 줄이거나 공정의 최종 폐기물을 재활용하는 공통적인 목표를 가지고 있다. 이런 오염방지 기술에서 주된 문제는 한 공정이 환경에 미치는 영향을 나타낼 수 있는 객관적이고 정량적인 척도를 선정하는 것이다.

이러한 정량적인 척도로 Pollution Index는 기존의 공정과 Waste Minimization을 고려하여 개선된 새로운 공정의 비교 기준이 될 수 있다. 즉 어느 공정에 대한 여러 가지 대안중에서 최적안을 선택할 때 환경 영향에 대한 정량적인 척도를 제시할 수 있으므로 비용 평가와 더불어 객관적인 기준이 될 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 Pollution Index는 화학공정의 전과정 평가(LCA)에서 핵심이 되는 분석목록으로 응용될 수 있다. Hilarly와 Sikdar[1]는 화학공정의 환경영향평가 기준으로서 Pollution Index를 제품생산량에 대한 폐기물 발생량의 비로 정의하고 적용방법을 제시하였다. 그러나 이 Pollution Index는 폐기물의 중량을 기준으로 함으로써 폐기물의 화학적 특성이 무시되어 화학공정의 환경영향평가에서 주요 분석목록으로 이용되는데 한계가 있다. 실제 폐기물의 처리를 위한 기술 선정 및 비용산정 등은 폐기물의 양 이외에도 환경오염의 지수가 되는 물리화학적 성질이 고려되어야 하기 때문이다. 환경오염의 지수가 되는 물리화학적 성질은 BOD, COD, 부유물질, 용존산소, 중금속 함유량, 유기용매 농도 등이 있으며 생체에 미치는 2차적인 영향을 고려한 toxicity도 있다.

본 연구의 목적은 기존의 Pollution Index를 화학공정에서 배출되는 폐기물의 화학적 성질을 포함하는 지표로 개선하여 환경영향평가에 실질적으로 적용하고 배출최소화 과정에서 환경부담의 최소화를 확인하는 기준으로 이용하는데 있다. 본 연구에서 고려한 화학적 성질은 생물학적 처리의 기준이 되는 BOD와 생체에 대한 영향을 종합적으로 나타내는 toxicity이다. 즉 폐기물이 갖는 BOD나 toxicity에 관한 정보를 정량화 함으로써 질량에 의한 Pollution

Index의 단점을 보완하고자 하였다. 따라서 Pollution Index를 물리화학적 성질에 따라 세분화하여 기존의 Pollution Index를 Mass Index로 구분하고 폐기물의 BOD나 toxicity를 나타내는 BOD Index와 Toxicity Index를 정의하였다. 그리고 이 세가지 Pollution Index를 사례연구를 통해 공정에 적용하고 계산함으로써 폐기물의 양이나 BOD, toxicity 측면에서 공정의 개선 정도를 비교하였다.

## 2. 물질수지의 개념과 Pollution Index

### 2.1. 물질수지의 개념

일반적으로 단위 공정 혹은 전체 공정에 대한 오염물질 수지(Pollution Balance) 식은 아래와 같다.[1]

[오염물질 축적] = [오염물질 유입] + [오염물질 생성] - [오염물질 유출] - [오염물질 누출]

$$\frac{d}{dt} \left( \sum_k \sum_i V_k \rho_k X_{i,k} \right) = \sum_k \sum_j \sum_i I_{j,k} X_{i,k} + \sum_k V_k \sum_i r_i W_i - \sum_k \sum_l \sum_i O_{l,k} X_{i,k} - \sum_k \sum_l F_{k,l} X_{i,k} \quad (1)$$

$I_j$  : 단위 공정으로 들어오는 유입 흐름의 질량유속

$x_i$  : 각  $I_j$ 에 포함된 오염물질의 질량분율

$k$  : 전체 공정에 포함된 단위 공정

$O_j$  : 한 단위 공정에서 다음 단위 공정으로 유출되는 흐름의 질량유속

$r_i$  : 화학 반응에서 오염물질  $i$ 의 반응속도

$W_i$  : 오염물질  $i$ 의 분자량

$V$  : reactor의 부피

$\rho$  : 어느 단위 공정안에 포함된 물질의 평균 밀도

$F_k$  :  $k$ 번째 단위 공정에서 누출되는 질량유속

만약 공정의 운전 조건이 정상상태라면 위의 (1)식에서 물질 축적항이 사라지게 되므로 물질 수지 식은 아래와 같게 된다.

$$\sum_k \sum_j \sum_i I_{j,k} X_{i,k} + \sum_k V_k \sum_i r_i W_i = \sum_k \sum_l \sum_i O_{l,k} X_{i,k} - \sum_k \sum_l F_{k,l} X_{i,k} \quad (2)$$

따라서, 위의 물질 수지식 (2)를 이용하여 공정에서 생산된 제품의 Pollution Index를 정의 할 수 있다.

2.2. Pollution Index

제품의 Pollution Index를 정의하는데 있어서 현재까지의 연구는 폐기물과 제품의 질량비로 Pollution Index를 정의하고 있지만, 본 연구에서는 기존의 Pollution Index를 Mass Index로 구분하고 그 외에 BOD Index와 Toxicity Index를 추가로 정의하였다.

2.2.1. Mass Index

Mass Index는 제품의 단위 질량당 생성된 폐기물의 양을 나타내고 아래 식(3)으로 표현할 수 있다.[1][2]

$$\begin{aligned} \phi_M &= \frac{1}{P} (\sum_k \sum_j \sum_i I_{j,k} x_{i,k} + \sum_k V_k \sum_i r_i W_i) \\ &= \frac{1}{P} (\sum_k \sum_i \sum_j O_{l,k} x_{i,k} - \sum_k \sum_i F_k x_{i,k}) \end{aligned} \quad (3)$$

( P : 공정에서 생산된 제품의 질량 )

오염물질의 성상에 대한 Mass Index는 전체 폐기물 중에서 고형 폐기물, 액상 폐기물, 기상 폐기물의 질량분율을 이용하여 나타낼 수 있다.[1] 고형 폐기물에 대한 Mass Index (M,S)는 (4)식으로 표시되며 총 Mass Index에 대한 분율(W<sub>s</sub>)은 (5)식으로 표현된다. 기상과 액상 폐기물에 대하여도 같은 방법으로 정의되며 그 합은 (6)식과 같이 표현된다

$$\phi_{M,S} = \frac{1}{P} (\sum_k \sum_i \sum_j I_{j,k} x_{i,k} + \sum_k V_k \sum_i r_i W_i)_{Solid} \quad (4)$$

$$W_s = \frac{\phi_{M,S}}{\phi_M} \quad (5)$$

$$W_s + W_L + W_G = 1 \quad (6)$$

Mass Index는 폐기물의 발생량을 비교하는 가장 간단한 기준으로 반응성, 독성, 분해성 등이 없어 화학적으로 안정한 형태의 폐기물을 단순매립 또는 저장할 경우 적용할 수 있는 Pollution Index이다. 또한

2차 처리 없이 재활용할 수 있는 폐기물 들은 폐기물의 화학적 성질에 관계 없이 Mass Index를 이용한 공정의 환경영향평가가 가능하다.

2.2.2. BOD Index

BOD는 생화학적 산소 요구량(Biochemical Oxygen Demand)으로 어떠한 유기물을 미생물에 의해 호기성 상태에서 분해 안정시키는데 요구되는 산소량이다.[3] 실험실에서는 일반적으로 20℃에서 5일간 시료를 배양했을 때 소모된 산소량을 측정하는데 그 값을 BOD 또는 BOD5라고 한다. BOD 수치는 시간이 지나감에 따라 증가하다가 일정시간이 지나면 더 이상 증가하지 않게 되는데 이 접근치를 최종 산소 소모량, 즉 최종 BOD (ultimate BOD, BOD<sub>u</sub>)라고 한다. BOD Index는 제품의 단위 질량당 폐기물의 BOD<sub>u</sub> 수치로 정의되며 아래와 같이 표현할 수 있다. 단, 본 연구에서 전체 폐기물의 BOD를 계산할 때 혼합물의 상호 영향에 의한 BOD 수치의 변화는 무시하고 각 성분의 BOD합으로 가정하였다.

$$\begin{aligned} \phi_B &= \frac{1}{P} \sum_i B_i (\sum_k \sum_j \rho_k^{-1} I_{j,k} x_{i,k} + \sum_k \rho_k^{-1} V_k r_i W_i) \\ &= \frac{1}{P} \sum_i B_i (\sum_k \sum_j \rho_k^{-1} O_{l,k} x_{i,k} + \sum_k \rho_k^{-1} F_k x_{i,k}) \end{aligned} \quad (7)$$

( B<sub>i</sub> : 오염 물질 i의 BOD<sub>u</sub> )

( ρ<sub>k</sub> : 단위공정내에 포함된 물질의 평균밀도 )

BOD Index는 폐기물 처리 시 생물학적 처리 공정의 부하량을 예측하는데 필요하다. 즉 생물학적 처리 공정이 선택되면 BOD Index의 정도에 따라 세부 공정을 결정하고 공정의 운전 시간, 처리량 등을 추산할 수 있으므로 생물학적 처리시설의 규모를 결정하는데 활용될 수 있다. 일반적으로 기상 폐기물의 경우 일단 배출 후 공학적인 생물학적 처리가 불가능하지만 공정에서는 기상으로 배출되는 양을 산출하여 2차 처리가 필요한 경우 biofilter 또는 흡착 반응 흡수, 응집 등의 분리 공정에 이어지는 생물학적 처리의 부하량을 산정하는데 기준이 될 수 있다.

2.2.3. Toxicity Index

Toxicity(毒性)는 "생명체에 역효과를 유발하는 시험 재료의 능력 또는 잠재력"으로 정의된다.[4]

Toxicity를 정량적으로 표현하는 용어에는 여러 가지가 있는데 대표적인 것으로는 Lethal Dose (LD50), Lethal Concentration (LC50), Effective Concentration (EC), Inhibiting Concentration (IC), Median Tolerance Limit (TLm) 등이 있다.

Toxicity Index는 제품의 단위 질량 당 폐기물의 독성을 정량적으로 표현한다. 본 연구에서 Toxicity Index는 폐기물에 포함된 각 성분의 표준 독성의 합으로 정의하고, 표준 독성으로는 LD 50의 역수를 이용하였다. LD50는 Test organism의 어느 부분에서 50%의 죽음을 유발할 때 까지 넣어 준 독성 물질의 양으로 정의 되는데 MSDS (Material Safety Data Sheet)에 주로 나타나 있다.

$$\begin{aligned} \phi_T &= \frac{1}{P} \sum_i T_i^{-1} (\sum_k \sum_j I_{j,k} x_{i,k} + \sum_k V_{k,i} W_i) \\ &= \frac{1}{P} \sum_i T_i^{-1} (\sum_k \sum_j O_{i,k} x_{i,k} + \sum_k F_k x_{i,k}) \end{aligned} \quad (8)$$

(  $T_i$  : 오염 물질  $i$ 의 LD50)

제조 과정에서 발생하는 폐기물의 toxicity는 mass나 BOD와는 달리 유출시 인간 건강과 환경에 직접적인 영향을 주기 때문에 환경 영향 평가 시 중

요한 인자가 된다. 일반적으로 폐기물의 Toxicity Index가 높으면 처리 과정이 어려워지고 처리 시 드는 시간이나 비용이 증가하게 된다. 또 매립했을 경우, 토양 뿐 아니라 대기 및 지하수를 오염시킬 가능성을 나타낼 수 있는 지표가 될 수 있다.

### 3. 사례 연구

본 연구에서는 Hilaly와 Sikdar가 사례로 든 세계 제조 공정에서 폐기물을 최소화 하기 위해 공정 개선을 고려하고 기존의 공정과 개선된 공정에서 Mass Index외에 본 연구에서 정의한 BOD Index와 Toxicity Index를 추가로 비교해 봄으로써 각 공정들이 환경에 미치는 영향을 정량적인 수치로 파악 하였다. 이 연구에 사용된 공정모사 Software는 Intelligen ( Intelligen Inc., Scotch Plain, NJ )사에서 개발된 SuperPro-Designer로 화학, 생화학, 의약, 식품 공정에서 수행되는 폐기물 재활용, 처리, 처분의 공정을 설계하고 환경적 영향을 계산하는데 이용된다.

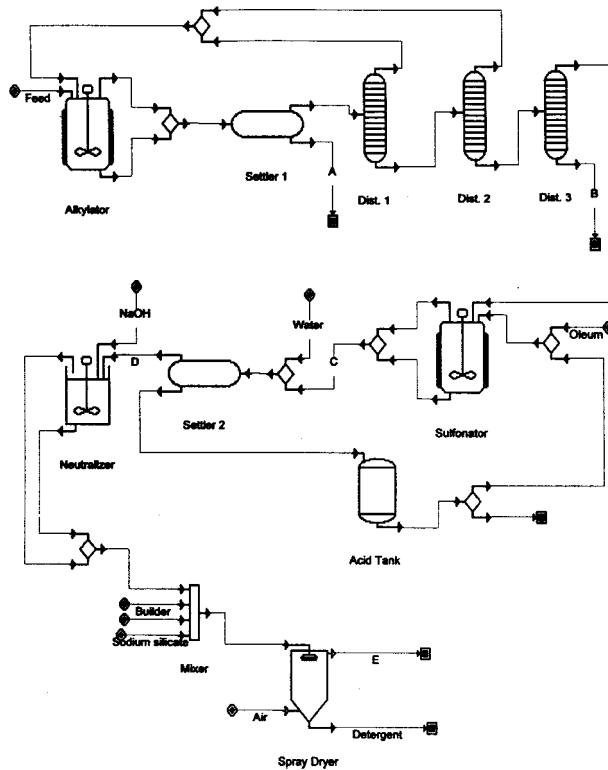


Figure 1. A simplified flowsheet for the production of a detergent.

Table 1. Overall material balance(kg/h) of the existing process

| Component                        | Total In       | Total Out      | Out as Solid  | Out as Liquid |
|----------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
|                                  | (kg/h)         | (kg/h)         | Waste (kg/h)  | Waste (kg/h)  |
| AlCl <sub>3</sub>                | 14.18          | 14.18          | 14.18         | 0.00          |
| Benzene                          | 180.00         | 0.45           | 0.45          | 0.00          |
| Dodecyl benzene sulfonic acid    | 0.00           | 0.00           | 0.00          | 0.00          |
| Dodecene                         | 387.89         | 0.97           | 0.97          | 0.00          |
| Disulfone                        | 0.00           | 0.00           | 0.00          | 0.00          |
| Dodecyl benzene                  | 0.00           | 29.80          | 0.00          | 29.80         |
| Oleum                            | 536.65         | 130.52         | 0.00          | 0.00          |
| Sodium dodecyl benzene sulfonate | 0.00           | 724.43         | 0.00          | 0.00          |
| Sodium disulfonate               | 0.00           | 42.76          | 42.67         | 0.00          |
| Sodium hydroxide                 | 123.75         | 0.01           | 0.00          | 0.00          |
| Sodium sulfate                   | 0.00           | 64.74          | 64.74         | 0.00          |
| Sodium polyphosphate             | 72.12          | 72.12          | 0.00          | 0.00          |
| Sodium silicate                  | 36.05          | 36.05          | 0.00          | 0.00          |
| Sulfuric acid                    | 0.00           | 178.88         | 0.00          | 0.00          |
| Water                            | 965.83         | 1021.53        | 0.00          | 0.00          |
| <b>Total</b>                     | <b>2316.47</b> | <b>2316.44</b> | <b>123.10</b> | <b>29.80</b>  |

3.1. 기존 공정의 설명

Figure 1은 세제를 생산하기 위한 개략적인 공정도이다. 원료 물질인 Benzene(C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)과 Dodecene(C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>)은 Aluminum Chloride(AlCl<sub>3</sub>)를 촉매로 alkylator에서 반응하여 90%의 전환율로 Dodecylbenzene(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>-C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>)이 생성된다. 촉매제 AlCl<sub>3</sub>는 crude alkylate로부터 첫번째 slurry settler에서 분리되어 sludge로 배출된다. Settler에서 분리된 액상의 alkylate 혼합물은 3개의 직렬 증류탑을 통하여 분리되는데 alkylator의 미반응 물질인 Benzene과 Dodecene은 재활용하여 원료물질로 사용한다. 세번째 증류탑에서는 heavy alkylate fraction으로부터 Dodecylbenzene이 분리되고 남은 heavy alkylate fraction은 배출된다. 증류탑에서 분리된 Dodecylbenzene은 sulfonation reactor(sulfonator)로 보내지고 거기서 Oleum(20% SO<sub>3</sub>)과 반응하여 Dodecylbenzene sulfonic acid(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>12</sub>H<sub>12</sub>-SO<sub>3</sub>H)를 형성한다. 이 때의 전환율은 95% 가량이고 나머지는 부산물로 5% 정도의 Disulfone (SO<sub>3</sub>H-C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>-C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>-SO<sub>3</sub>H)을 형성한다. 두번째 Settler에서는 사용된 Sulfuric acid(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)가 제거되고 산(acid)의 농도를 회색시키

기 위해서 많은 양의 물이 첨가된다. Neutralizer에서 Dodecylbenzene sulfonic acid(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>12</sub>H<sub>12</sub>-SO<sub>3</sub>H)는 Sodium hydroxide(NaOH)로 중화되어 Sodium dodecylbenzene sulfonate(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>-SO<sub>3</sub>Na)와 폐기물인 Sodium disulfonate(SO<sub>3</sub>H-C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>-C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>-SO<sub>3</sub>Na), Sodium sulfate(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)로 형성되고, Mixer에서 builder인 Sodium polyphosphate (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), Sodium silicate(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)와 혼합된다. 이 혼합물이 spray dryer에서 폐기물과 건조한 세제 분말로 분리되어 세제가 생산된다. 이 공정의 물질 수지(Material Balance)는 Table 1에 나타내었다.

3.2. 개선된 공정의 설명

Figure 1의 공정에서 Pollution Index를 증가시키는 오염물질이 포함된 Stream은 A,B,C,D,E이다. 배출 최소화를 위해서 위 흐름을 포함한 공정 전체를 대상으로 Pollution Index를 줄일 수 있는 방법을 고려한다. Hilaly와 Sikdar는 각 흐름 A,B,C,D,E에서 Pollution Index를 줄이기 위해 다음과 같은 공정 개

선을 제시하였다.[1]

- A : 건조기를 설치하여 sludge에 포함된 Benzene 과 Dodecene을 분리해서 alkylator에서 재활용한다.
- B : 세 번째 증류 탑에서 분리되는 heavy alkylated fraction은 윤활유 제조업체로 공급될 수 있다.
- C : 반응 온도의 최적화를 통하여 부산물인 Disulfone의 양을 1% 정도 줄일 수 있다.
- D : 두 번째 settler에 첨가되는 세척수의 질량 유속을 134.2 kg/h에서 365.11 kg/h로 증가시키면 흐름 D에 포함되는 산의 농도가 73.6%에서 50%로 줄여 폐기물 sodium sulfate의 양을 감소시키는 효과를 가져 온다.
- E : Spray dryer에서 배출되는 effluent 속에는 작은 양이지만 고형 폐기물이 포함되어 있다. 이 effluent를 cyclone separator를 설치하여 처리하면 고형 폐기물을 회수할 수 있다.

기존의 공정을 위에서 설명한 방법에 따라 개선한 공정 I의 공정도가 Figure 2이고 개선된 공정 I의 물질수지(material balance)는 Table 2에 나타내었다.

Figure 2의 개선된 공정 I에서 AlCl<sub>3</sub> sludge를 건조기에서 AlCl<sub>3</sub>를 분리하여 촉매 회수 및 황산화 공정을 통하여 반응에 재사용 한다면 배출을 감소시킬 수 있다. 이 과정을 나타낸 것이 Figure 3이고 개선된 공정 II의 물질 수지는 Table 3에 나타내었다.

3.3. 결과 및 고찰

공정 모사 software인 Superpro-Designer를 이용하여 공정에서 발생하는 폐기물의 양을 계산한 후, Pollution Index를 식 (3),(7),(8)을 이용하여 얻을 수 있었다. 기존의 공정과 개선된 공정 I, II의 Pollution Index를 그 종류에 따라 계산하는 과정을 Table 4에 나타내었고 Figure 4에서는 각 공정에 대한 Pollution Index를 비교하였다.

먼저 Mass Index에 대한 비교에서, 기존의 공정에 대해 개선된 공정 I은 0.18에서 0.12로 약 37% 정도의 폐기물 양이 감소되었음을 알 수 있다. 기존의

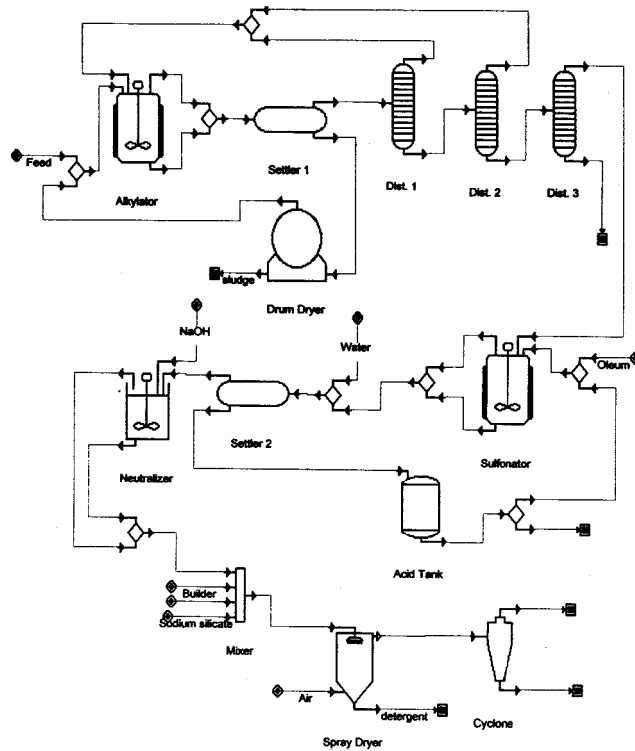


Figure 2. The flowsheet of the improved process I

Table 2. Overall material balance(kg/h) of the improved process I

| Component                        | Total In<br>(kg/h) | Total Out<br>(kg/h) | Out as Solid<br>Waste (kg/h) | Out as Liquid<br>Waste (kg/h) |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|
| AlCl <sub>3</sub>                | 14.18              | 14.18               | 14.18                        | 0.00                          |
| Benzene                          | 0.00               | 0.00                | 0.45                         | 0.00                          |
| Dodecyl benzene sulfonic acid    | 0.00               | 0.00                | 0.00                         | 0.00                          |
| Dodecene                         | 387.89             | 0.00                | 0.97                         | 0.00                          |
| Disulfone                        | 0.00               | 0.00                | 0.00                         | 0.00                          |
| Dodecyl benzene                  | 0.00               | 29.87               | 0.00                         | 0.00                          |
| Oleum                            | 536.65             | 135.56              | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium dodecyl benzene sulfonate | 0.00               | 724.07              | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium disulfonate               | 0.00               | 28.32               | 26.91                        | 0.00                          |
| Sodium hydroxide                 | 123.52             | 0.01                | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium sulfate                   | 0.00               | 63.94               | 57.55                        | 0.00                          |
| Sodium polyphosphate             | 72.12              | 72.12               | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium silicate                  | 36.05              | 36.05               | 0.00                         | 0.00                          |
| Sulfuric acid                    | 0.00               | 176.66              | 0.00                         | 0.00                          |
| Water                            | 1,196.20           | 1,251.79            | 0.00                         | 0.00                          |
| <b>Total</b>                     | <b>2,546.61</b>    | <b>2,546.57</b>     | <b>98.64</b>                 | <b>0.00</b>                   |

공정에 대해 개선된 공정 II는 약 46% 정도의 감소율을 나타내었다. 이것은 기존의 공정에서 오염 물질을 줄이기 위하여 공정에서 배출되는 sludge나 액상 폐기물을 재활용, 재처리하여 다시 사용함으로써 배출되는 오염 물질을 줄일 수 있었기 때문이다. 다음으로 BOD Index를 비교하면, 기존의 공정에 대해 개선된 공정 I은 1.83에서 0.69로 약 62% 정도 전체 폐기물의 BOD가 감소되었다. 그러나 개선된 공정 I에서 II로 공정이 변화될 때에는 Mass Index는 14% 가량 감소한 반면, BOD Index는 변하지 않았다. Toxicity Index는 기존의 공정에 대해 개선된 공정 I은 88.86에서 83.53으로 감소율이 약 6% 정도이지만 기존의 공정에 대해 개선된 공정 II는 88.86에서 30.43로 약 66% 정도의 감소율을 보여준다. 이것은 폐기물의 Toxicity Index를 계산할 때 AlCl<sub>3</sub> sludge가 큰 부분을 차지하고 있었기 때문에 공정 II에서 이 AlCl<sub>3</sub> sludge를 재활용함으로써 얻어진 결과이다. 결국 BOD Index와는 달리 개선된 공정 II의 형태로 공정을 개선하는 것

이 전체 폐기물의 toxicity를 감소하는데 큰 효과

를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 폐기물의 성상에 따른 Mass Index를 식 (5), (6)에 따라 계산한 결과를 Table 5에서는 고형 폐기물의 Mass Index를, Table 6에서는 액상 폐기물의 Mass Index를 정리하였다. 고형 폐기물의 Mass Index를 Table 5에서 살펴보면 기존의 공정에 대해 개선된 공정 I은 0.15에서 0.12으로 약 21% 감소율을 나타내었고 기존의 공정에 대해 개선된 공정 II는 0.15에서 0.10으로 약 32% 정도의 감소율을 나타내었다.

액상 폐기물의 Mass Index를 Table 6에서 살펴보면 기존의 공정이 0.04인데 반해 개선된 공정 I, II는 0.00으로 100% 감소율을 나타내었다. 액상 폐기물은 고형 폐기물에 비해 재활용이나 공정처리가 용이하기 때문에 폐기물의 배출 감소가 쉽게 이루어질 수 있다. 그러므로 공정을 설계할 때에는 일반적으로 고형 폐기물의 발생을 억제하는 것이 폐기물의 최소화 측면에서 우선적인 목표가 되어야 함을 알 수 있다.

다음으로 세계를 만드는 이 공정이 환경에 미치

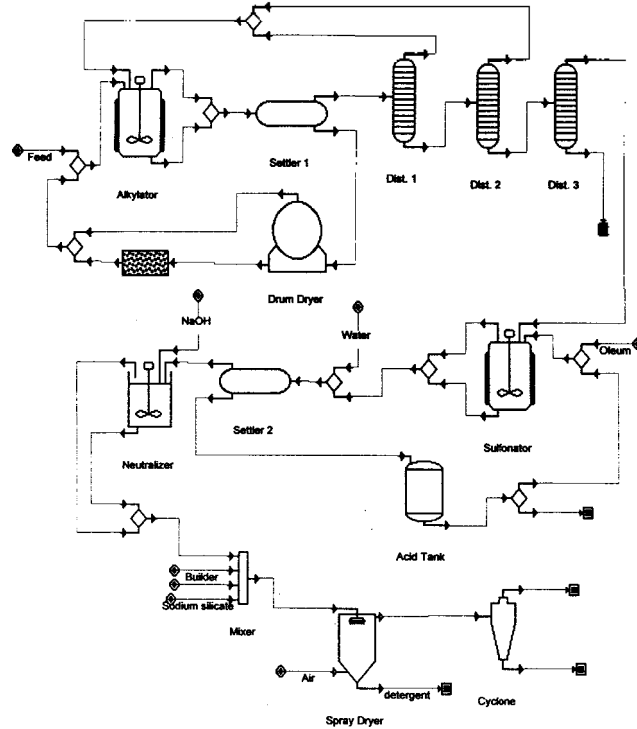


Figure 3. The flowsheet of the improved process II

는 영향에 대하여 알아 보았다. 공정이 환경에 미치는 영향을 나타낼 수 있는 척도에는 여러 가지가 있다. 그 중에서 가장 대표적인 지표는 COD, BOD<sub>5</sub>, TKN(Total Kjeldahl Nitrogen), TP(Total Phosphate), TSS(Total Suspended Solids)이다. 각 공정에서 폐기물의 환경 수치를 비교한 것을 Table 7에 나타내었다. COD와 BOD<sub>5</sub>의 경우 기존의 공정을 개선했을 때 각각 100%의 감소율을 나타내었다. 이것은 유기물로만 이루어진 액상 폐기물 heavy fraction을 100% 재사용함으로써 COD, BOD<sub>5</sub>를 나타내던 주된 요인이 사라지게 되었기 때문이다. 이 결과로 부터 유기 물질의 처리로 인해 환경에 미치는 영향을 대폭 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 세제를 만드는 공정에 이용된 물질들은 대부분 질소와 인을 포함하고 있지 않으므로 TKN과 TP는 수치상 거의 영향을 미치지 않는다. TSS의 경우에는 AlCl<sub>3</sub> Sludge와 마지막 공정에서 나오는 고형 폐기물이 TSS 수치를 나타낸다. AlCl<sub>3</sub> Sludge의 경우, 개선된 공정 I에서 건조기를 통한 처리 과정 중 액상의 증발로 인하여 TSS 수치가 1,862,000에서 2,440,000으로 31% 증가율을 보였다. 전체 TSS 수치는 기존의 공정에서 effluent에 포함되어 있던 고형 폐기물을 분리, 재활용함으로써 기존의

공정에 대한 개선된 공정 I의 감소율은 15%이고, 기존의 공정에 대한 개선된 공정 II의 감소율은 99.98%를 나타내었다. 이것은 AlCl<sub>3</sub> sludge를 재활용 함으로써 얻어진 결과이다. 이와 같이 폐기물의 최소화를 위한 공정의 개선을 통하여 환경에 대한 영향을 감소시키는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 공정이 환경에 미치는 영향을 나타내는 정량적인 척도로 기존의 Mass Index 외에 폐기물의 BOD와 Toxicity에 대한 정보를 줄 수 있는 BOD Index와 Toxicity Index를 제시하고 사례 연구를 통하여 기존의 공정과 Waste Minimization을 고려하여 개선된 새로운 공정의 Pollution Index를 계산하고 비교하여 공정의 개선 정도를 평가하였다.

Pollution Index는 공정의 오염 물질 배출의 정량적인 척도가 되기 때문에 환경 유해도가 낮은 공정을 개발하는데 매우 중요하게 적용된다. 특히 여러 공정을 비교하여 선택해야 할 경우 객관적인 기준이 될 수 있다. 본 연구에서는 Pollution Index를 폐기물의 Mass, BOD, Toxicity 세가지 측면에서 정의하



Table 3. Overall material balance(kg/h) of the improved process II

| Component                        | Toatal In<br>(kg/h) | Total Out<br>(kg/h) | Out as Solid<br>Waste (kg/h) | Out as Liquid<br>Waste (kg/h) |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|
| AlCl <sub>3</sub>                | 14.18               | 0.00                | 0.00                         | 0.00                          |
| Benzene                          | 180.00              | 0.00                | 0.00                         | 0.00                          |
| Dodecyl benzene sulfonic acid    | 0.00                | 0.00                | 0.00                         | 0.00                          |
| Dodecene                         | 387.89              | 0.00                | 0.00                         | 0.00                          |
| Disulfone                        | 0.00                | 0.00                | 0.00                         | 0.00                          |
| Dodecyl benzene                  | 0.00                | 29.87               | 0.00                         | 0.00                          |
| Oleum                            | 536.65              | 135.56              | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium dodecyl benzene sulfonate | 0.00                | 738.07              | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium disulfonate               | 0.00                | 28.32               | 26.91                        | 0.00                          |
| Sodium hydroxide                 | 123.52              | 0.01                | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium sulfate                   | 0.00                | 64.74               | 57.55                        | 0.00                          |
| Sodium polyphosphate             | 72.12               | 72.12               | 0.00                         | 0.00                          |
| Sodium silicate                  | 36.05               | 36.05               | 0.00                         | 0.00                          |
| Sulfuric acid                    | 0.00                | 176.66              | 0.00                         | 0.00                          |
| Water                            | 1,196.20            | 1,251.79            | 0.00                         | 0.00                          |
| <b>Total</b>                     | <b>2,546.61</b>     | <b>2,532.39</b>     | <b>84.46</b>                 | <b>0.00</b>                   |

Table 4. Pollution Index Calculation

|                     | Product<br>(kg/h) | Total Waste<br>(kg/h) | BODu<br>(kg/h) | Toxicity<br>(kg/h) | Mass Index<br>(kg/h) | BOD Index | Toxicity<br>Index |
|---------------------|-------------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------------|-----------|-------------------|
| Existing process    | 823.6             | 152.9                 | 1524.6         | 73989.9            | 0.18                 | 1.83      | 88.9              |
| Improved process I  | 846.3             | 98.6                  | 585.4          | 70685.7            | 0.12                 | 0.69      | 83.5              |
| Improved process II | 846.3             | 84.5                  | 585.4          | 25751.7            | 0.10                 | 0.69      | 30.43             |

Table 5. Comparision of the solid waste

|                          | Existing process | Improved process I | Improved process II |
|--------------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| AlCl <sub>3</sub> Sludge | 15.60            | 14.18              | 0.00                |
| Sodium Disulfonate       | 42.76            | 26.81              | 26.91               |
| Sodium Sulfate           | 64.74            | 57.55              | 57.55               |
| <b>Total</b>             | <b>123.10</b>    | <b>98.64</b>       | <b>84.46</b>        |
| <b>Mass Index</b>        | <b>0.15</b>      | <b>0.12</b>        | <b>0.10</b>         |

Table 6. Comparision of the liquid waste

|                   | Existing process | Improved process I | Improved process II |
|-------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| Heavy Fractions   | 29.80            | 0.00               | 0.00                |
| <b>Mass Index</b> | <b>0.0358</b>    | <b>0.00</b>        | <b>0.00</b>         |

Table 7. Environmental impact of the waste

|                           | Existing process | Improved process I | Improved process II |
|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| COD(mg O/L)               | 4378260.3        | 331.4              | 331.4               |
| BOD <sub>5</sub> (mg O/L) | 1567527.7        | 116                | 116                 |
| TKN(mg/ N/L)              | 0                | 0                  | 0                   |
| TP(mg P/L)                | 0                | 0                  | 0                   |
| TSS(mg Slds/L)            | 2863061.3        | 2440573.7          | 573.7               |

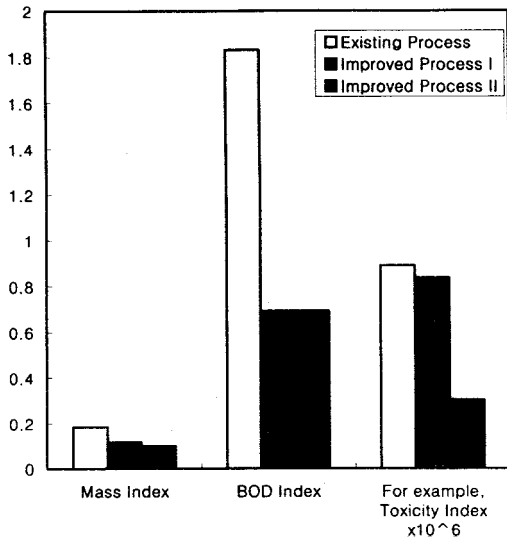


Figure 4. Comparison of the pollution indices of existing and improved processes.

였다. Mass Index는 공정의 오염 물질 배출량의 정량적인 척도가 되므로 배출 처리 시설의 용량을 결정하는데 기준이 되고 폐기물 처리 비용 산출의 근거가 될 수 있다. 그러나 Mass Index는 공정이 환경에 미치는 영향을 평가할 때 배출 물의 화학적 성질이 고려되지 않는 지수를 제공하게 된다. 본 연구에서 제안된 BOD Index나 Toxicity Index는 기존의 Mass Index가 갖는 한계를 보완하여, 환경 영향 평가 시 Pollution Index가 더 정확하고 객관적인 환경 부담의 기준으로 이용되도록 하였다. BOD Index는 유기물로 구성된 폐기물을 처리할 때 처리 용량이나 비용을 추산할 수 있는 근거가 되고 Toxicity Index는 배출 물의 유해성을 정량적인 수치로 표현하게 된다. 본 연구에서 고찰된 BOD Index나 Toxicity Index 외에 생산된 제품 단위 질량 당 폐기물 처리 비용으로 정의되는 Waste Treatment Cost Index도 생각해 볼 수 있다. 다만 처리 비용에 관한 자료를 BOD나 toxicity 처럼 각각의 성분에 대하여 일반화하기가 어렵기 때문에 Waste Treatment Cost에 대한 통계적인 자료에

서 얻은 경험적인 자료구축이 필요하다.

본 연구에서는 공정의 경제성 평가에 관한 부분은 수행하지 않았다. 일반적으로 오염 배출을 최소화하기 위해 공정을 개선할 때 추가되는 시설에 대한 시설 비용과 운전 비용의 증가는 불가피한 일이다. 공정개선을 위한 비용과 폐기물 처리에 따른 폐기물 처리시설의 운전 비용과 법에 따른 부담금 등을 비교해 봄으로써 개선된 공정의 경제성을 검토하는 것은 추후에 연구해야 할 과제이다.

## 참고 문헌

1. Hilaly A. K. and Sikdar S. K. : Pollution Balance : A New Methodology Minimizing Waste Production in Manufacturing Process, J. of Air & Waste Management Assoc., 44, pp1303-1308 (1994)
2. Hilaly A. K. and Sikdar S. K.: "Process Simulation Tools for Pollution Prevention" Chem. Eng., 103(2), pp98-105 (1996)
3. 최의소, 조광명 : 환경공학, 청문각, 71 (1995)
4. AHPA, AWWA, and WEF : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed., p2-8 (1992)