

## 제품생산체계의 수명주기영향평가방법

오남철, 량혁철

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《환경보호, 자연보호관리사업은 조국산천을 더욱 아름답게 만들고 자원을 보호증식시키며 사람들의 건강을 보호하고 그들에게 보다 훌륭한 생활환경을 마련해주기 위한 중요하고도 책임적인 사업입니다.》

수명주기평가는 원료의 채취로부터 제품의 생산 및 리용, 폐기물의 최종처분에 이르는 전과정에서 발생하는 환경영향을 정량화하는 방법론으로서 목표 및 범위설정, 수명주기목록분석, 수명주기영향평가, 수명주기해석의 4단계로 구성되어있다.[1, 2] 이 가운데서 수명주기영향평가는 제품생산체계나 처리공정의 잠재적환경영향의 규모와 중요성정도를 평가하는 단계로서 수명주기평가에서 중요한 부분이다.

론문에서는 수명주기영향평가를 위한 평가지표와 특성결수의 설정과 정량화방법, 제품생산체계에서 수명주기영향평가방법의 적용실례에 대하여 서술하였다.

### 1. 수명주기영향평가를 위한 평가지표와 특성결수의 설정과 정량화

수명주기영향평가에서 중요한것은 평가지표와 특성결수와 같은 필수요소들을 바로 정하는것이다. 여기서 평가지표는 환경문제들(실례로 기후변화, 산성화, 부영양화 등)에 영향을 주는 오염물질지표들을 말하며 특성결수는 오염물질지표들이 해당 환경문제에 영향을 주는 상대적척도를 의미한다. 상대적척도를 위하여 기준물질이 리용된다. 실례로 기후변화, 산성화, 부영양화에 대하여 각각 탄산가스, 이산화황, 린산염이 기준물질로 리용되며 기타 물질들은 그것의 배수로 표시된다. 이것을 특성결수라고 하며 특성결수는 무차원량이다.

기후변화에 대한 영향 기후변화에 가장 큰 영향을 주는것은 탄산가스, 메탄, 아산화질소와 같은 온실효과기체의 방출이며 이 온실효과기체들은 기후변화영향의 평가지표로 리용된다.[2, 3]

상대적척도는 탄산가스, 메탄, 아산화질소를 비롯한 온실효과기체들이 기후변화에 주는 영향정도(실례로 1kg의 메탄은 25kg의 탄산가스에 대응)를 고려하여 정하며 그 상대적척도가 온실효과기체들의 특성결수로 리용된다. 온실효과기체들이 대기속에 존재하는 시간(실례로 메탄은 대체로 10년정도로서 상대적으로 짧음.)을 상대적척도에 고려할 수 있다.

표 1에 일반적인 온실효과기체들의 특성결수를 주었다.

표 1을 통하여 알수 있는것처럼 일부 온실효과기체들은 비록 적은 량이 방출되지만 탄산가스에 비하여 20 000배이상의 기후변화영향을 나타낼수 있다.

기후변화에서 가장 중요한 자리를 차지하는 탄산가스는 화석연료의 연소에 의하여 발생하는 탄산가스량과 생물질에 의하여 발생하는 탄산가스량을 구분하여 분석하여야 한다.

표 1. 일반적인 온실효과기체들의 특성결수[2]

온실효과기체	대류권에서 수명시간/y	특성결수( $GWP_i$ )
탄산가스( $\text{CO}_2$ )	탄소순환에 따라 결정	1
메탄가스( $\text{CH}_4$ )	12.0	25
아산화질소( $\text{N}_2\text{O}$ )	120	298
HFC-23( $\text{CHF}_3$ )	270	14 800
HFC-32( $\text{CH}_2\text{F}_2$ )	4.9	675
HCF-125( $\text{C}_2\text{HF}_5$ )	29	3 500
HCF-134( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ )	14	1 430
HFC-152( $\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$ )	1.4	124
HCF-143( $\text{CH}_3\text{CF}_3$ )	52	4 470
HFC-227( $\text{CF}_3\text{CHF}_2\text{CF}_3$ )	34.2	3 220
HCF-236( $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$ )	240	9 810
HFC-245( $\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$ )	7.6	1 030
HFC-365( $\text{CH}_3\text{CF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$ )	8.6	794
HFC-43-10( $\text{CF}_3\text{CHFCHFCF}_2\text{CF}_3$ )	15.9	1 640
육불화류황( $\text{SF}_6$ )	3 200	22 800
삼불화질소( $\text{NF}_3$ )	740	17 200
PFC-14( $\text{CF}_4$ )	50 000	7 390
PFC-116( $\text{C}_2\text{F}_6$ )	10 000	12 200
PFC-218( $\text{C}_3\text{F}_8$ )	2 600	8 830
PFC-318( $\text{C}_4\text{F}_8$ )	3 200	10 300
PFC-3-1-10( $\text{C}_4\text{F}_{10}$ )	2 600	8 860
PFC-5-1-14( $\text{C}_6\text{F}_{14}$ )	3 200	9 300
HFE-449( $\text{CH}_3\text{O}(\text{CF}_2)_3\text{CF}_3$ )	5	297
HFE-569( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}(\text{CF}_2)_3\text{CF}_3$ )	0.77	59
HFE-347( $\text{CF}_3-\text{CH}_2\text{OCF}_2\text{CHF}_2$ )	7.1	580

총기후변화영향( $GWP$ )은 표 1의 특성결수를 리용하여 계산된 탄산가스등가량( $\text{CO}_2\text{eq. kg}$ )의 합으로 정량화될 수 있다.

$$GWP = \sum_i (m_i \times GWP_i) \quad (1)$$

여기서  $m_i$ 는  $i$ 번째 온실효과기체의 량(kg)이며  $GWP_i$ 는  $i$ 번째 온실효과기체의 특성결수이다.

수명주기영향평가를 위하여 대부분 리용되는 기후변화영향은  $GWP_{100}$ 이다. 만일 수명주기영향평가에서 각이한 시간범위가 적용된다면 같은 시간범위의 기후변화영향만이 식 (1)에 따라 계산되도록 하여야 한다. 매우 긴 수명을 가진 온실효과기체들의 각이한 시간범위에 대한 기후변화영향은 서로 차이하며 표 1에 있는 수명을 고려하여야 한다.

산성화에 대한 영향 산성화는 수생생태계, 산림, 건물, 조각품을 비롯한 야외미술작품 등에 부정적영향을 준다. 산성화를 일으키는  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ 과 같은 물질들의 방출이 평가지표로 리용될 수 있다.[3, 4] 산성화에 대한 특성결수들은 화학량론의 법칙에 기초하여 계산할 수 있다. 실례로 1kg의 질산이  $\text{SO}_2$ 등가량으로 전환되는 과정을 보자.

물질량비가  $n(\text{HNO}_3):n(\text{H}_3\text{O}^+)=1:1$ ,  $n(\text{H}_2\text{SO}_3):n(\text{H}_3\text{O}^+)=1:2$ ,  $n(\text{H}_2\text{SO}_3):n(\text{SO}_2)=1:1$ 일 때

$$m(\text{SO}_2) = \frac{m(\text{HNO}_3) \times M(\text{SO}_2)}{M(\text{HNO}_3) \times 2}$$

이다. 여기서  $M(\text{HNO}_3)=63\text{g mol}^{-1}$ 이며  $M(\text{SO}_2)=64\text{g mol}^{-1}$ 이다. 따라서  $\text{HNO}_3$ 이 1kg이라면  $0.51\text{SO}_2$

등가량이 얻어진다. 한편 1kg의 암모니아가  $\text{SO}_2$ 등가량으로 전환되는 과정은 질산의 전환과정과 유사하다. 즉 물질량비가  $n(\text{NH}_3):n(\text{HNO}_3)=1:1$ ,  $n(\text{HNO}_3):n(\text{H}_3\text{O}^+)=1:1$ ,  $n(\text{H}_2\text{SO}_3):n(\text{H}_3\text{O}^+)=1:2$ ,  $n(\text{H}_2\text{SO}_3):n(\text{SO}_2)=1:1$  일 때

$$m(\text{SO}_2) = \frac{m(\text{NH}_3) \times M(\text{SO}_2)}{M(\text{NH}_3) \times 2}$$

이다. 여기서  $M(\text{NH}_3)=17\text{g mol}^{-1}$ 이며  $M(\text{SO}_2)=64\text{g mol}^{-1}$ 이다. 따라서  $\text{NH}_3$ 이 1kg이라면  $1.88\text{SO}_2$ 등가량이 얻어진다.

이와 같은 방법으로 얻은 주요산형성물질의 특성결수들을 표 2에 주었다.

표 2. 주요산형성물질의 특성결수

산형성물질	화학식	반응식	특성결수( $AP_i$ )
이산화류황	$\text{SO}_2$	$\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_3 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{SO}_3^{2-}$	1
삼산화류황	$\text{SO}_3$	$\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$	0.80
일산화질소	$\text{NO}$	$\text{NO} + \text{O}_3 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{NO}_3^- + 3/4\text{O}_2$	1.07
이산화질소	$\text{NO}_2$	$\text{NO}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} + 1/4\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{NO}_3^-$	0.70
질산	$\text{HNO}_3$	$\text{HNO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{NO}_3^-$	0.51
암모니아	$\text{NH}_3$	$\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	1.88
린산	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_3\text{PO}_4 \rightleftharpoons 3\text{H}^+ + \text{PO}_4^{3-}$	0.98
염산	$\text{HCl}$	$\text{HCl} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{Cl}^-$	0.88
불화수소	$\text{HF}$	$\text{HF} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{F}^-$	1.60
류화수소	$\text{H}_2\text{S}$	$\text{H}_2\text{S} + 3/2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_3 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{SO}_3^{2-}$	1.88
류산	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$	0.65

총산성화영향( $AP$ )은 표 2의 특성결수를 리용하여 계산된 이산화류황등가량( $\text{SO}_2\text{eq. kg}$ )의 합으로 정량화될 수 있다. 즉

$$AP = \sum_i (m_i \times AP_i) \quad (2)$$

이다. 여기서  $m_i$ 는 산성화를 일으키는  $i$ 번째 산형성물질의 방출량(kg)이며  $AP_i$ 는  $i$ 번째 산형성물질의 특성결수이다.

부영양화에 대한 영향 수역의 부

영양화에 영향을 주는 평가지표에는 린과 질소를 포함하는 모든 화합물들이 포함된다. 주요 부영양화물질들의 특성결수를 표 3에 주었다.

표 3의 특성결수를 리용하여 총부영양화영향( $EP$ )은 다음의 식에 따라 린산염등가량( $\text{PO}_4^{3-}\text{eq. kg}$ )으로 정량화된다.

$$EP = \sum_i (m_i \times EP_i) \quad (3)$$

여기서  $m_i$ 는 부영양화에 영향을 주는  $i$ 번째 물질의 량(kg)이며  $EP_i$ 는  $i$ 번째 부영양화물질의 특성결수이다.

표 3. 주요부영양화물질의 특성결수 [2]

부영양화물질(류입경로)	화학식	특성결수( $EP_i$ )
일산화질소 (대기)	$\text{NO}$	0.20
이산화질소 (대기)	$\text{NO}_2$	0.13
질소산화물 (대기)	$\text{NO}_x$	0.13
질산염(물)	$\text{NO}_3^-$	0.1
암모니움(물)	$\text{NH}_4^+$	0.33
질소	$\text{N}$	0.42
린산염	$\text{PO}_4^{3-}$	1
린 (물)	$\text{P}$	3.06
화학적산소요구량 (COD)	$\text{O}_2$	0.022

## 2. 제품생산체계에 대한 수명주기영향평가의 적용사례

론문에서는 식료품생산체계를 기본으로 제품생산체계에 대한 수명주기영향평가를 진행하였다.

식료품생산체계에 대한 수명주기영향평가의 적용대상으로 3개의 식료품생산체계를 선정하였다. 즉 식료품1, 식료품2, 식료품3을 생산하는 식료품생산체계(1, 2, 3)들에 대한 연구를 진행하였다. 해당 식료품생산체계들에는 알곡생산단계와 식료품생산공정들과 주원료 및 부원료생산공정, 전력생산공정, 석탄연소공정, 수송공정 등을 비롯한 기타 공정들이 포함되며 그것들은 서로 밀접히 연관되어 공간적결합을 이루고있다.

론문에서 리용된 모든 자료는 현장조사를 통하여 수집하였다.

론문에서는 수명주기평가를 위한 소프트웨어로서 OpenLCA를 리용하였다. OpenLCA는 단위공정들에 대한 수명주기목록을 작성할수 있으며 지금까지 개발된 각이한 수명주기영향평가방법론을 리용하여 제품생산체계의 에네르기분석, 수명주기영향평가, 수명주기해석을 진행할수 있다.[5]

론문에서는 식료품생산체계에 대한 수명주기영향평가를 진행하여 영향규모가 가장 큰 공정들을 밝혀내는데 기본을 두고 연구를 진행하였다. 평가결과를 표 4—6에 제시하였다.

표 4. 식료품생산체계1의 공정별 평가결과

기후변화			산성화			부영양화		
기여몹/%	공정	량 /(CO <sub>2</sub> eq. kg)	기여몹/%	공정	량 /(SO <sub>2</sub> eq. kg)	기여 몹 /%	공정	량 (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. kg)
29.66	전력	389.43	37.30	석탄연소	0.92	63.25	생산공정	0.57
17.03	물엿	223.56	31.97	기름	0.79	23.84	포장주머니	0.21
9.85	석탄연소	129.39	31.97	석탄연소	0.79	1.52	물엿	0.01
6.17	강냉이농마	81.02	30.34	물엿	0.75			
2.84	석탄연소	37.29	23.55	석탄연소	0.58			
1.87	전력	24.61	6.79	강냉이농마	0.16			
1.46	강냉이	19.11	6.79	석탄연소	0.16			
	1.13	농부산물	14.89					
1.00	전력	13.13						
15.61	석탄연소	204.92						
14.46	기름	189.90						
1338	석탄연소	175.65						
2.34	유기물질	30.74						
-1.75	유기질비료	-23.03						
12.83	밀가루	168.47						
9.69	전력	127.22						
3.14	밀	41.25						
9.62	농부산물	126.24						
-7.20	두엄	-94.58						
8.30	사탕가루	108.91						
1.40	포장주머니	18.37						
1.22	전력	15.96						

론문에서는 식료품생산체계의 수명주기영향평가를 통하여 얻어진 결과를 공정별로 비교하기 위하여 기여몫을 분석하였다. 표 4-6에서 기여몫을 앞뒤로 배열하였는데 이것은 식료품생산체계에서 공정들의 종속관계를 반영한다. 즉 앞렬의 기여몫은 뒤렬의 기여몫들의 합과 같다.

식료품생산체계1의 공정별 평가결과(표 4)에 의하면 식료품1의 생산에 리용되는 전력, 물엿, 석탄연소가 각각 기후변화영향의 29.66%, 17.03%, 15.61%를 차지한다. 반면에 주원료인 밀가루생산이 기후변화영향의 12.83%만을 차지하며 포장공정은 매우 작은 몫을 차지하고있다.

다음으로 산성화영향의 37.30%가 석탄연소에 의하여, 31.97%가 기름생산에 의하여, 30.34%가 물엿생산으로 방출된다. 콩 및 밀생산과정에 나오는 농부산물물의 두엄생산공정은 방출량삭감을 나타내고있다. 또한 비교적 큰 부영양화영향이 식료품생산공정에서 방출하는 폐수에 의하여 나타나고있으며 그밖의 공정들인 포장주머니생산공정과 물엿생산공정도 일정한 몫을 차지하고있다.

식료품생산체계2의 공정별 평가결과(표 5)를 보면 기름생산공정이 기후변화영향의 45.00%, 산성화영향의 72.80%로서 가장 큰 환경부하를 나타내고있다. 이것은 기름생산에 리용되는 석탄연소공정이 기후변화영향의 41.62%를 차지하는것과 관련된다. 또한 식료품2의 생산에 소비되는 전력은 간접방출로서 기후변화영향의 21.21%를 차지한다. 반면에 밀가루생산공정은 총부하의 8.62%만을 차지하며 물엿생산공정은 4.42%로서 비교적 적다.

표 5. 식료품생산체계2의 공정별 평가결과

기후변화			산성화			부영양화		
기여몫/%	공정	량/ (CO <sub>2</sub> eq. kg)	기여몫/%	공정	량/ (SO <sub>2</sub> eq. kg)	기여 몫 /%	공정	량/ (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. kg)
45.00	기름	778.88	72.80	기름	3.26	65.73	생산공정	0.56
41.62	석탄연소	720.44	72.80	석탄연소	3.26	22.77	포장주머니	0.19
2.94	콩	50.91	21.24	석탄연소	0.95	1.43	물엿	0.01
7.29	농부산물	126.11	5.77	물엿	0.25			
-5.46	두엄	-94.48	4.48	석탄연소	0.20			
-4.90	질소비료	-84.77	1.29	강냉이농마	0.05			
21.21	전력	367.17	1.29	석탄연소	0.05			
12.15	석탄연소	210.24						
8.62	밀가루	149.15						
6.51	전력	112.63						
2.11	밀	36.52						
6.46	농부산물	111.77						
-4.84	두엄	-83.74						
7.13	사탕가루	123.46						
4.42	물엿	76.56						
2.56	석탄연소	44.31						
1.60	강냉이농마	27.74						

이밖에도 석탄연소공정과 물엿생산공정은 각각 산성화영향의 21.21, 5.77%를 차지하고있다. 한편 식료품생산체계1과 마찬가지로 콩 및 밀생산과정에 나오는 농부산물물에 의한 두엄생산은 화학비료를 대신할수 있으므로 일정한 정도의 방출량삭감을 나타내고있으며 부영양화영향이 식료품생산공정, 포장주머니생산공정, 물엿생산공정에서 발생하고있다. 이와 같은 결과는 식료품생산체계3에서도 찾아볼수 있다.

식품생산체계의 공정별 평가결과(표 6)를 분석하여보면 전력소비가 기후변화영향의 28.24%에 대응하는 간접방출을 초래하며 석탄연소와 밀가루생산공정이 각각 25.88, 15.13%를 차지하고있다. 또한 건조효모생산에 전력과 석탄이 많이 소비되므로 건조효모생산은 제품생산체계의 14.03%에 해당되는 환경부하를 나타낸다. 한편 산성화영향부문에도 석탄연소, 기름생산, 건조효모생산공정들이 비교적 큰 환경영향을 주고있다.

표 6. 식품생산체계3의 공정별 평가결과

기후변화			산성화			부영양화		
기여몹/%	공정	량 /(CO <sub>2</sub> eq. kg)	기여몹/%	공정	량 /(SO <sub>2</sub> eq. kg)	기여몹 /%	공정	량 /(PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq. kg)
28.24	전력	331.75	69.19	석탄연소	1.37	57.31	생산공정	0.71
25.88	석탄연소	303.94	20.33	기름	0.40	33.99	포장주머니	0.42
15.13	밀가루	177.70	20.33	석탄연소	0.40	1.02	밀가루	0.01
11.42	전력	134.18	9.56	건조효모	0.19			
3.70	밀	43.51	9.56	석탄연소	0.19			
11.34	농부산물	133.16						
-8.49	두엄	-99.76						
-7.62	질소비료	-89.51						
14.03	건조효모	164.81						
10.46	전력	122.80						
3.58	석탄연소	42.00						
8.22	기름	96.54						
7.60	석탄연소	89.29						
1.33	농부산물	15.63						
-1.00	두엄	-11.71						
3.06	포장주머니	35.93						
2.66	전력	31.23						
1.99	사탕가루	23.38						
1.87	빠다	21.95						
1.37	우유가루	16.04						

식품생산체계가 환경에 주는 부정적영향을 공정별로 분석한 결과를 통하여 알수 있는 것처럼 제품단위당 석탄 및 전력소비기준을 낮추고 석탄연소효율과 발전기효율을 높여야 하며 연소과정에 방출되는 오염물질을 제거하고 식품생산공정에서 방출하는 폐수를 정화하기 위한 대책을 철저히 세워야 깨끗한 생산체계를 구축할수 있다.

## 맺 는 말

론문에서 제기한 수명주기영향평가방법은 제품생산체계의 매개 수명주기단계 또는 공정들이 환경에 주는 부정적영향을 정량적으로 평가하여 대책을 세울수 있는 평가방법으로서 여러 생산체계들에 효과적으로 적용할수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 오남철, 수명주기평가, 김일성종합대학출판사, 57~79, 주체109(2020).
- [2] Walter Klopffer et al.; Life Cycle Assessment(LCA), A Guide to Best Practice, 25~42, 2014.
- [3] A. Del Borghi et al.; Journal of Cleaner Production, 78, 121, 2014.
- [4] M. Saarinen et al.; Journal of Cleaner Production, 149, 828, 2017.
- [5] T. Ponsioen et al.; Journal of Cleaner Production, 153, 457, 2017.

주체110(2021)년 4월 5일 원고접수

## **Life Cycle Impact Assessment Methodologies in Production Systems**

*O Nam Chol, Ryang Hyok Chol*

This paper addressed methodologies of life cycle impact assessment in production systems: a few examples of applications, assessment indicators, characterization factors, and evaluations.

Keywords: assessment indicator, characterization factor, production system