

## 시간-부하(Time-Load) LCA에서 시간 산출을 위한 방법론

H. Phungrassami · 박정건 · 천윤영 · 이건모<sup>†</sup>

아주대학교 환경공학과

### Time Estimation Methodologies in Time-Load LCA

H. Phungrassami · Jeounggun Park · Youn-young Chun · Kun-Mo Lee<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Ajou University

#### 1. 서론

전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA)는 제품의 전과정에서 발생하는 환경부하 및 잠재적인 환경영향을 분석하는 체계적인 도구이다.<sup>1)</sup> 하지만 LCA 방법에서 시간에 관한 연구는 미진한 상태이다. 몇몇 수행된 연구의 예로, Hofstetter는 Developments in LCA Valuation: Time in Life Cycle Assessment에서 환경 부하의 양상(배경 부하와 민감도)이 변할 수 있기 때문에 투입 및 산출과 관련된 시간이 중요할 수 있다는 사실을 지적했다.<sup>2)</sup> 그리고 Sundqvist는 Life Cycles Assessments and Solid Waste-Guidelines for solid waste treatment and disposal in LCA에서, LCA에서 시간에 관한 정보와 관련하여, 배출물은 제품의 전과정 단계 대부분에서 순간적으로 발생한다고 보고했다. 예를 들어, 운송으로 인한 배출물은 운송 도중에 발생하며, 전체 운송 시간은 하루에서 일주일 정도이다. 제품의 제조 시간 역시 짧고, 폐기물 처리 과정 역시 즉각적인 것으로 간주된다. 소각 공장에서 폐기물이 머무르는 시간은 30분 정도로 다소 짧기 때문이다.<sup>3)</sup>

기존 LCA에서 시간과 관련하여 주목해야 할 것은 목록 분석에서 시간에 대해 명확하게 고려하지 않고, 단지 목록 데이터 수집 기간(보통 1년)만 존재한다는 사실이다. 현재 수행되고 있는 LCA역시 실제 시간을 기존 LCA에 통합하고 있지 않다. 제품의 전과정(원료물질 취득 단계에서부터 폐기 단계까지) 각각의 단계에서 소요되는 시간이 목록분석 단계에서 측정되어야 한다. 환경적으로 민감한 지역은 오염물질 수용력이 낮기 때문에 배출율(emission rate)이 중요하게 고려되어야 한다. 이러한 이유로 목록 분석 단계에서 시간을 산출하는 방법론을 제안하였으며, 이는 제조생산소요시간(Manufacturing throughput time; 이하 MTT)과 임계경로시간(Critical Path Time; 이하 CPT)에 기반을 두고 있다.

제조생산소요시간(MTT)은 지시가 공정에 내려진 후부터 완제품이 된 이후 재고품목이 되거나 소비자에게 운송되기 위해 선적되기까지 소요된 시간의 길이로 정의된다.<sup>4)</sup> MTT

는 제조사이클시간(manufacturing cycle time; MCT)으로 지칭되기도 한다. 제조 시스템에서 지시가 내려지고, 완성되기까지의 작업에 걸린 전체 시간을 총제조사이클시간(total manufacturing cycle time)이라 하고, 이것은 단위공정제조시간(the workstation manufacturing cycle times) 또는 제조공정시간(Throughput Time)의 합과 같다.<sup>5)</sup>

MIT는 공정(processing), 준비(setup), 이동(move), 큐(queue), 배치전대기(wait-in-batch), 배치후대기(wait-to-batch)시간 및 기타 시간의 합이다. 준비시간은 제품 시스템을 구성하는 부품의 가공에 필요한 모든 작업대를 준비시키는데 걸리는 시간이다. 이동시간은 제품이 생산 라인의 작업대 사이를 이동할 때 걸리는 전체 시간이다. 대기시간은 각각의 생산 라인의 작업대에서 소요되는 배치(batch)전대기시간과 배치(batch) 후 대기시간을 합한 시간을 말한다. 배치전대기시간은 부품이 작업대에서 가공되기 시작할 때까지 배치(batch)에서 기다리는 시간을 말하며, 배치후대기시간은 가공 후 배치에서 다른 부품을 기다릴 때 소요되는 시간을 말한다.<sup>4)</sup>

임계경로법(Critical Path Method; 이하 CPM)은 대단위 프로젝트에서 비용과 완성 날짜 사이의 트레이드오프와 관련이 있다.<sup>6)</sup> CPM의 핵심 부분은 임계경로(Critical Path; 이하 CP)를 규명하는 것이다.<sup>7)</sup> CP는 일련의 의존공정(dependent tasks)으로 구성되어 있으며, 이들 각각은 전 단계 공정에 영향을 받는다. 이러한 의존공정은 차례대로 완성되어야 하며, 각각의 공정상의 작업은 다음 공정의 작업이 시작되기 전까지 완료되어야 한다. 의존공정은 순차공정(sequential tasks) 또는 순차작업(sequential activities)이라 불리기도 한다. 의존공정 이외의 공정은 다른 공정의 완료 여부에 상관없으며, 특정 단계에 도달하기 전까지에 동시에 진행되어도 된다. 이러한 것을 비의존(non-dependent) 또는 병렬(parallel)공정이라 한다.<sup>8)</sup>

#### 2. 실험재료 및 방법

##### 2.1. 시간-부하 LCA 방법론

시간-부하 LCA 방법의 LCI 단계에서 목록 파라미터는 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

E-mail: kunlee@ajou.ac.kr

Tel: 031-219-2409

Fax: 031-215-5145

$$L^*_{j,m} = \frac{Load_{j,m}}{T_m} \tag{1}$$

여기서,  $L^*_{j,m}$  = m번째 전과정 단계, j번째 목록 파라미터의 시간-환경부하, g(fu-time),  
 $Load_{j,m}$  = m번째 전과정 단계, j번째 목록 파라미터의 환경부하 g /fu,  
 $T_m$  = m번째 전과정 단계에서 주요 산출품에 대한 시간 소비, 일(day)  
 fu = 기능 단위.

시간-부하 LCA 방법을 사용하여 계산된 제품의 특성화된 환경영향(Characterized Impact)은 아래 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$CI^*_{i,j,m} = L^*_{j,m} \times eqv_{i,j} \tag{2}$$

여기서,  $CI^*_{i,j,m}$  = m번째 전과정 단계에서 j번째 목록 파라미터의 시간-부하가 i번째 영향범주에 미치는 특성화된 환경영향, g x-eq/(fu-time),  
 $eqv_{i,j}$  = i번째 영향 범주의 j번째 목록 파라미터의 등가(특성화) 계수

## 2.2. 시간-부하 LCA 방법에 의한 시간 산출

### 2.2.1. 제조 단계에서의 소요 시간( $T_M$ )

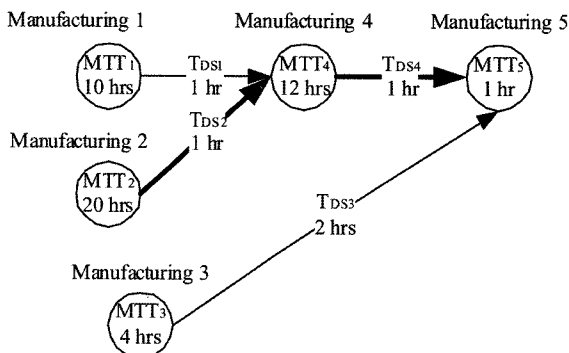


Fig. 1. Time duration model in the manufacturing stage.

각각의 제조 지역에서 생산에 걸리는 시간을 산출하기 위해 각각의 제조 지역에 MTT가 적용된다.

Fig. 1의 예에서  $T_M$ 은 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$T_M = MTT_1 + T_{DS1} + MTT_4 + T_{DS4} + MTT_5 = 25 \text{ hrs} \tag{3}$$

또는

$$T_M = MTT_2 + T_{DS2} + MTT_4 + T_{DS4} + MTT_5 = 35 \text{ hrs} \tag{4}$$

또는

$$T_M = MTT_3 + T_{DS3} + MTT_5 = 7 \text{ hrs} \tag{5}$$

여기서,

$MTT_1, MTT_2, MTT_3, MTT_4, MTT_5 = 1$ 에서 5까지 제조과정에 각각 걸린 시간

$T_{DS1}, T_{DS2}, T_{DS3}, T_{DS4} =$  제조 1에서 제조 4까지 이송 시간, 제조 2에서 제조 4까지 이송 시간, 제조 3에서 제조 4까지 이송 시간, 제조 4에서 제조 5까지 이송 시간.

Fig. 1은 제조 2-제조 4-제조 5의 경로에서 생산시간이 가장 많이 소요됨을 보여준다. 그러므로 Fig. 1의 예에 해당되는  $T_M$ 의 계산식은 식 (4)가 되어야 한다.

### 2.2.2. 원료물질 취득 단계에서의 소요 시간( $T_R$ )

원료물질 취득 및 가공 시간의 산출 예로 아래 Fig. 2에 나타나는 모델이 활용된다. 원료물질 취득 및 가공에 가장 많은 시간이 소요되는 경로( $T_R$ )를 찾기 위해 CPM이 적용된다.

Fig. 2에서, 원료물질 취득 단계 전체에서, 각각의 원료물질 취득 및 가공 경로에서 소요되는 시간은 아래 식 (6), (7), (8)에 의해 계산될 수 있으며, 이중 가장 긴 시간이  $T_R$ 이 된다.

$$T_R = T_{R1} + T_{DR1} + T_{R4} + T_{DR4} + T_{R6} + T_{DR6} = 19 \text{ days} \tag{6}$$

또는

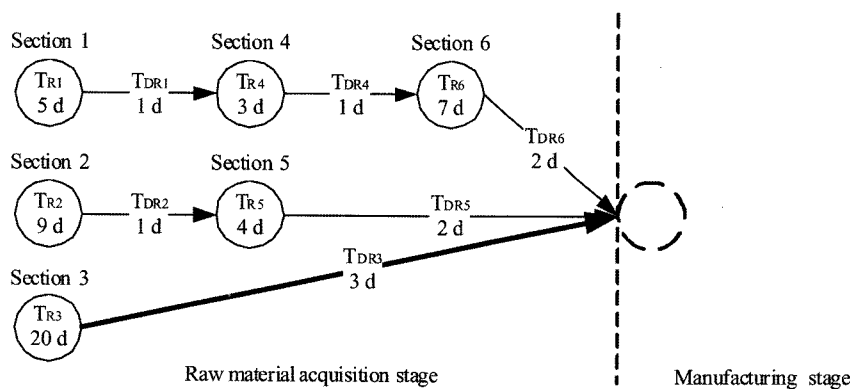


Fig. 2. Time duration model in the raw material acquisition stage.

$$T_R = T_{R2} + T_{DR2} + T_{R5} + T_{DR5} = 16 \text{ days} \quad (7)$$

또는

$$T_R = T_{R3} + T_{DR3} = 23 \text{ days} \quad (8)$$

여기서,

$T_{R1}, T_{R2}, T_{R3}, T_{R4}, T_{R5}, T_{R6}$  = 섹션 1에서 6까지 각각 걸린 시간

$T_{DR1}, T_{DR2}, T_{DR3}, T_{DR4}, T_{DR5}, T_{DR6}$  = 섹션 1에서 섹션 4까지 이송 시간, 섹션 2에서 섹션 5까지 이송 시간, 섹션 3에서 섹션 제조 단계까지 이송 시간, 섹션 4에서 섹션 6까지 이송 시간, 섹션 5에서 제조 단계까지 이송 시간, 섹션 6에서 제조 단계까지 각각 이송 시간.

Fig. 2는 전체 원료물질 취득 단계에서 원료물질 취득 및 가공에 가장 많은 시간이 소요되는 것은 섹션 3이라는 것을 보여준다. 그러므로 Fig. 2의 예에 해당되는  $T_R$ 의 계산식은 식 (8)이 되어야 한다.

### 2.2.3. 운송 단계에서의 소요 시간( $T_D$ )

$T_D$ 란 공장 문을 나서서 소비자에게 제품이 전달될 때까지의 전체 소요 시간을 말한다.

### 2.2.4. 사용 단계에서의 소요 시간( $T_U$ )

$T_U$ 는 사용자에게 의해 실제로 제품이 작동되는 시간과 사용 대기 시간을 포함하는 개념이다. 이것은 사용자가 제품을 단지 소유하고 있는 시간을 의미하는 것은 아니다.

### 2.2.5. 폐기단계에서의 소요 시간( $T_{EoL}$ )

폐기단계에서의 소요시간은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 분리, 재활용 및 소각 시설에서 폐제품을 수거 하고 가공하기 위해 필요한 운반에 소요된 시간을 포함하고 있다. 수거 시간은 고품폐기물 수거시간 공식을 사용하여 측정할 수 있다. 분리 시설, 재활용 및 소각 시설에서 소요되는 시간을 측정하기 위해 제조 단계 시간 소요 모델과 동일한 모델을 적용한다. 최종적으로 폐기단계에서 가장 많이 소요되는 시간( $T_{EoL}$ )을 찾기 위해 CPM을 적용한다.

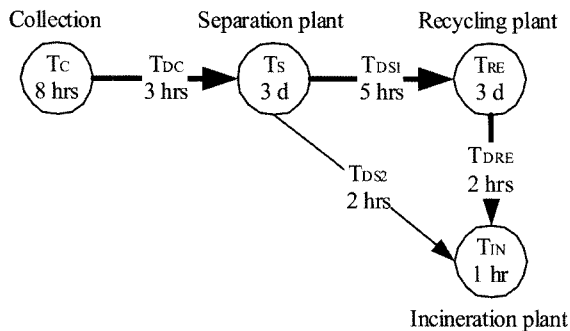


Fig. 3. Time duration model in the end of life stage.

Fig. 3은 폐기 단계에서 가장 많이 소요되는 시간은 아래와 같다는 것을 보여준다.

$$T_{EoL} = T_C + T_{DC} + T_S + T_{DS1} + T_{RE} + T_{DRE} + T_{IN} = 6 \text{ days } 19 \text{ hrs} \quad (9)$$

여기서,

$T_C, T_S, T_{RE}, T_{IN}$  = 수거 시간, 분리 시설에서 소요된 시간, 재활용 시설 및 소각 시설에서 각각 소요된 시간을 의미한다.

$T_{DC}, T_{DS1}, T_{DRE}$  = 수거에서 분리 시설까지 운반하는데 소요된 시간, 분리에서 재활용 시설까지 운반하는데 소요된 시간, 재활용에서 소각 시설까지 각각 소요된 시간을 의미한다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1. 사례 연구: 냉장고

두 가지 전과정평가 방법, 즉 기존-부하 LCA 방법 및 시간-부하 LCA 방법을 동일한 냉장고의 전과정 목록 데이터에 적용시켜 각각의 방법에 따른 결과를 비교할 수 있다. 여기서는 지구온난화만을 영향범주로 고려하였다.

사례연구의 목적은 기존-부하 LCA 및 시간-부하 LCA의 특성과 결과 값으로부터 규명된 각각의 주요 이슈(key issue)를 비교하는 것이다. Table 1은 전과정단계의 소요시간과 더불어 전과정 단계 각각의 목록 파라미터 데이터를 나타내고 있다.

매립지로부터 발생하는 배출물은 매우 긴 시간에 걸쳐 압도적인 환경영향을 나타낼 수 있다.<sup>3,12,13)</sup> 하지만, 이 연구에서는 폐기단계의 시간을 산출하는데 매립지에서의 소요시간을 고려하지 않았다. 그 이유는 산업제품, 그중에서도 특히 전기전자제품 및 자동차 폐기물의 최근 및 앞으로의 관리 동향 때문이다. 매립되는 폐기물을 최소화시키기 위해, 전기전자폐기물(Waste Electrical and Electronic Equipment; 이하 WEEE)지침<sup>14)</sup> 및 폐차처리(End of Life Vehicles; 이하 ELV) 지침<sup>15)</sup>은 제조자에게 더 높은 재사용률, 재활용률 및 재생율을 달성하도록 요구하고 있다. 예를 들면, 대형 가전제품인 냉장고의 경우 재생율이 최소 80%를 달성해야 한다.(최소 75%

Table 1. Modified inventory data<sup>11)</sup>

	원료물질 취득	제조	운송	사용	폐기	계
CO <sub>2</sub> (g/fu)	168,000	50,300	4,100	779,000	-3,400	998,000
CO(g/fu)	840	10	60	130	-20	1,020
NO <sub>x</sub> (g/fu)	510	200	60	2,900	-40	3,630
SO <sub>2</sub> (g/fu)	780	440	10	4,140	-10	5,360
N <sub>2</sub> O(g/fu)	6	2	0	50	0	58
CFC11(g/fu)	0	30	0	180	0	210
CFC12(g/fu)	0	0	0	20	0	20
Time(day)	30	5	3	4,745	10	4,793

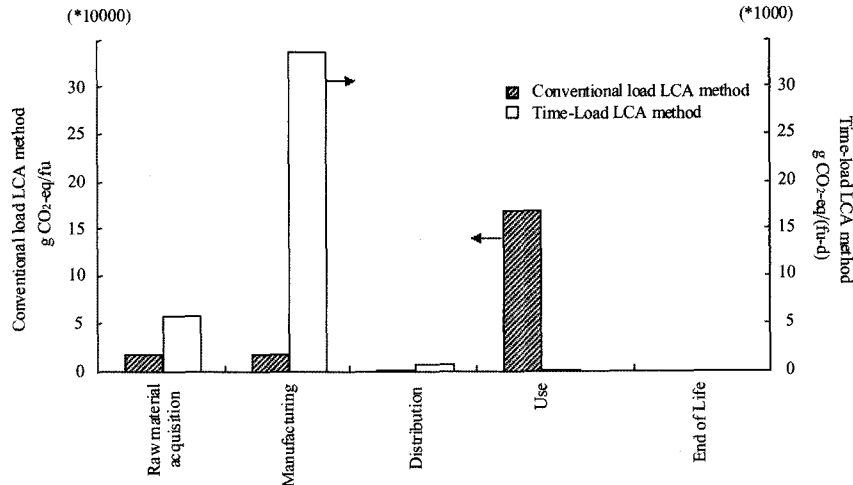


Fig. 4. Characterized impact by the conventional load LCA method and the time-load LCA method.

의 재사용률 및 재활용률 포함) 이것은 폐기물이 매립될 가능성이 줄어드는 것임에 분명하다. 재생, 재사용 및 재활용되는 폐기물의 강제순수사항은 앞으로 더욱 엄격해질 것으로 보인다. 이것이 폐기단계의 시간을 산출하는데 매립지에서의 소요시간을 포함시키지 않은 근거이다.

Fig. 4를 통해 냉장고의 주요 이슈는 기존-부하 LCA 방법을 이용했을 경우 사용단계, 시간-부하 LCA 방법을 이용했을 경우 제조 단계임을 알 수 있다. 각각의 LCA 방법에 의해 도출된 주요 이슈가 다르다는 것은 각 전과정 단계의 소요시간을 고려한 직접적인 결과라고 볼 수 있다.

수명이 긴 제품일수록 더 짧은 수명을 가진 제품에 비해 원료물질 취득, 제조 및 폐기단계에 걸친 자원 소모 및 환경 배출물을 저감시킬 수 있다는 것은 일반적인 사실이다. 그러나 수명이 긴 제품은 제품 수명이 더 길기 때문에, 불가피하게 사용 단계에서 더 많은 환경 부하를 일으키는 것으로 나타난다. 제품 시스템의 주요 이슈 규명에 있어서, 기존-부하 LCA 방법론에서는 전체 환경 영향에 대한 각 전과정 단계의 부분적 기여도를 고려한다. 그 결과, 기존의 LCA 방법론에서 대부분의 오염물질을 배출하는 주요단계가 사용단계로 규명되는 것이 당연하다. 이는 폐기단계를 제외한 여타 전과정 단계가 최대 몇 주나 혹은 몇 달에 이르는 반면 사용단계는 수년에 걸쳐 있기 때문이다.

주요 이슈를 규명하는 목적은 에코디자인(Ecodesign)을 통해 제품을 개선하기 위한 주요 공정 및 주요 활동을 규명하기 위해서이다. 제품 시스템의 주요 이슈를 규명하는데 기존-부하 LCA 방법을 배타적으로 적용함으로써 인해, 다른 주요 이슈를 규명할 수 있는 기회를 놓칠 수 있다. 시간-부하 관점을 주요 이슈 규명에 통합시킨다면, 보다 더 합리적인 이슈 규명이 가능할 것이다.

시간-부하 LCA 방법론의 기본적 전제는 짧은 시간 동안의 환경부하가 긴 시간 동안의 동일한 양의 환경부하보다 환경에 더 심각한 영향을 줄 수 있다는 것이다. 그러므로 시간당 환경부하(load/time)는 환경에 대한 목록 파라미터의 영향을 평가하는데 필수적이다.

#### 4. 결론

시간-부하 LCA 방법론의 사용함으로써, 제품 시스템의 자원 소모 특성 및 환경 배출물에 관한 새로운 통찰력을 제시할 수 있다. 제품을 개선하기 위한 의사결정에 시간-부하 LCA 방법을 적용할 때에는, 앞에서 기술한 바와 같이 의사 결정자는 사용 단계뿐만 아니라 제조 단계도 유의해야 한다. 그러나 시간-부하 LCA는 기존-부하 LCA 방법론과 상호보완적인 관계에 있다. 새로운 LCA 방법은 기존-부하 LCA 방법과 병행하여 사용되어, 더 많은 환경영향에 대한 정보를 반영하도록 해야 한다.

#### 참고문헌

1. Lee, K. M. and Inaba, A., Life Cycle Assessment; Best Practices of ISO14040 series, APEC(2004).
2. Hofstetter, P., Developments in LCA Valuation: Time in Life Cycle Assessment, Final Report of the project nr. 5001-35066 from the Swiss National Science Foundation (1996).
3. Sundqvist, J. O., Life Cycles Assessments and Solid Waste-Guidelines for solid waste treatment and disposal in LCA: Final Report, 1999; accessed at <http://www.naturvardsverket.se/bokhandeln/pdf/afr-r-279-se.pdf>.
4. Johnson, Danny J, A Framework for Reducing Manufacturing Throughput Time, Journal of Manufacturing System, 2003, accessed at [http://www.findarticles.com/p/articles/mi\\_qa3685/is\\_200301/ai\\_n9223107](http://www.findarticles.com/p/articles/mi_qa3685/is_200301/ai_n9223107).
5. Herrmann, J. W., Chincholkar, M. M., and Burroughs, T., Estimating Manufacturing Cycle Time and Throughput in Flow Shops with Process Drift and Inspection, 2004, accessed at <http://www.isr.umd.edu/Labs/CIM/projects/dfp/flowshop.pdf>.
6. Wiest, J. D., Levy, F. K., A management Guide to PERT/CPM with GERT/ PDM/DCPM and other Net-

- works, 2nd ed., Prentice-Hall(1997).
7. LINDO Systems. Project Planning with PERT/CPM accessed at [www.lindo.com/library/pertcpm4.pdf](http://www.lindo.com/library/pertcpm4.pdf).
  8. Modell, M. E., A Professional's Guide to Systems Analysis, 2nd ed. McGraw Hill(1996).
  9. Abernethy, V. D., Carrying Capacity: The Tradition and Policy Implications of Limits, Minnesotans For Sustainability, 2001, accessed at [http://www.mnforsustain.org/abernethy\\_v\\_carrying\\_capacity\\_policy\\_and\\_limits.htm](http://www.mnforsustain.org/abernethy_v_carrying_capacity_policy_and_limits.htm).
  10. Heijung, R. and Huijbregts, M., Threshold-based life cycle impact assessment and marginal change: incompatible?, CML-SSP Working Paper 99.002(1999).
  11. Wenzel, H., et al., Environmental Assessment of Products: Volume 1 Methodology, tools and case studies in product development, Chapman&Hall(1997).
  12. Finnveden, G., "Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management system," *J. Resources, Convention and Recycling*, **26**(1996).
  13. Finnveden, G., Nielsen, P. H., "Long-Term Emissions from Landfills Should Not be Disregarded," *Int. J. LCA*, **4**(3), 125 ~ 126(1999).
  14. WEEE, 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment(2003).
  15. ELV, 2000/53/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 September 2000 on end-of life vehicles(2000).
  16. Huijbregts, M. A., et al., "Spatially Explicit Characterization of Acidifying and Eutrophying Air Pollution in Life Cycle Assessment," *Journal of Industrial Ecology*, **4**(3), (2001).
  17. Klaassen, G., Cofala, J., Amann, M., and Mechler, R., Synergies between the mitigation of greenhouse gases and air pollution: why climate policy might be a free lunch, IIASA, 2004, accessed at <http://eaere2004.bkae.hu/download/paper/klaassen2paper.doc>.