

산업 생태학의 개념

최우진, 홍순성

*수원대학교 환경공학과

수원대학교 전자공학과

The Concept of Industrial Ecology

Woo Zin Choi*, Soon Sung Hong

*Dept. of Environ., The Univ. of Suwon

Dept. of Electron. The Univ. of Suwon

ABSTRACT : The interactions of the societal-industrial system with the environment form one of the most critical issues in today's world. The inadequacy of current environmental regulatory structures and of traditional ways of analyzing environmental issues, together with the continuing need to mitigate the environmental perturbations arising from this complex relationship, have led to the development of a new conceptual framework termed industrial ecology.

Industrial ecology (IE), defined by Graedel and Allenby, is the means by which humanity can deliberately and rationally approach and maintain a desirable carrying capacity, given continued economic, cultural and technological evolution. The concept requires that an industrial system be viewed not in isolation from its surrounding systems, but in concert with them. IE is a systems view in which one seeks to optimize the total materials cycle from virgin material, to finished material, to component, to product, to obsolete product, and to ultimate disposal. Factors to be optimized include resources, energy, and capital.

In the present paper, the concept of Industrial Ecology and its application through efficient and practical Design for Environment (DFE) methodologies and tools will be introduced to Korea. This paper will also emphasize on the industrial environment within which DFE methodologies must be used, including the fundamentals of industrial design activities, concurrent engineering, constraints on design choices and existing technological infrastructure.

1. 서론

산업과 환경간의 상호작용(Interactions)은 오늘날 세계에 있어서 가장 중요한 관심사 중의 하나이다. 현재의 환경규제 방식의 부적절성, 환경문제 해석에 있어서 전통적인 방식의 채택, 그리고 복잡한 상호관계에서 형성되고 있는 환경소요와 혼란을 완화하기

위한 지속적인 요구 등으로 인하여 Industrial Ecology (IE) 라는 새로운 개념이 Graedel 과 Allenby 에 의해 최초로 개발되었다.

IE란 인간이 보다 신중하고 합리적인 접근방식과 주어진 경제, 문화 및 기술발전하에서 바람직한 수용 능력(Carrying Capacity)을 유지하는 것을 의미한다. IE의 개념은 산업시스템이 주변의 시스템으로부터

분리된 개념으로 보는 것이 아니라 주변의 시스템과 함께 협력할 것을 요구한다. IE는 원료로부터 재료, 부품, 제품, 폐품(Obsolete Product) 및 최종처분 단계까지 총체적인 물질순환의 최적화를 이루기 위한 접근방식이라 할 수 있다. IE에서 최적화를 이루고자 하는 요소들은 자원, 에너지, 그리고 자본이며, IE의 참여자는 정부는 물론 시민, 특정관심집단 및 산업체 등을 포함한다.

우리나라도 날로 강화되는 환경규제에 능동적으로 대처하고 국내산업의 지속적인 발전을 도모하기 위해서는 환경문제를 고려한 새로운 산업전략의 수립이 필요하며, 이를 위해 산업 전 분야에 새로운 IE 개념의 도입과 실제적인 응용이 이루어질 수 있는 효율적인 체제의 구축이 시급한 실정이다. 본 논문에서는 앞서 언급한 Graedel 과 Allenby에 의해 정의된 IE의 기본개념을 국내에 소개하고자 하며, 또한 실제적인 Design for Environment 방법을 통한 IE의 응용에 관해 기술하고자 한다.

2. Industrial Ecology : The Concept

산업활동의 결과로 야기된 환경문제와 위기는 새로운 현상이 아니다. 지속적인 세계인구의 증가와 삶의 질을 향상시키고자 하는 욕구가 환경의 질에 대한 주요한 압박(Stresses)이다. 산업활동에 따른 환경문제를 평가하고 최소화하는 것을 돕는 접근방식을 Industrial Ecology라 부른다. 이 개념을 제조업(Manufacturing)에 적용하면 제품의 경쟁력 제고와 환경과의 상호반응 등을 고려한 산업공정과 제품이 설계되어야 한다. 제조분야에서 이러한 접근방식은 적절한 지원체제 등의 수립하에 오랜기간동안 지속되어야 한다. 이러한 시스템 지향적인 시각은 산업과 제조공정이 주변과 분리되어 이루어져서는 안되며, 따라서 주변으로부터 영향을 받을 뿐만 아니라 한편 주변에 영향을 준다는 전제를 수용해야 한다. 앞서 서론에서 언급하였듯이 IE는 원료로부터 재료 (Finished Material), 부품, 제품, 사용 후의 폐품 및 최종처분 단계까지 총체적인 물질순환의 최적화를 이루기 위한 접근방식이다. IE의 요체(Essence)를 간략히 영문으로 서술하면 다음과 같다 [1].

「 Industrial Ecology is the means by which humanity can deliberately and rationally approach and maintain a desirable carrying capacity, given continued

economic, cultural and technology evolution. The concept requires that an industrial system be viewed not in isolation from its surrounding systems, but in concert with them. It is a systems view in which one seeks to optimize the total materials cycle from virgin material, to finished material, to component, to product, to obsolete product, and to ultimate disposal. Factors to be optimized include resources, energy, and capital.

위의 정의에서 Deliberate와 Rational은 Industrial Ecology의 방향이 무계획적이고, 경솔하며, 비용이 많이 들고 또한 혼돈스러운 대안과는 구별되는 점을 강조하고 있다. 같은 맥락으로 Desirable은 Industrial Ecology가 모든 사람들이 높은 삶의 질을 유지하는 지속적인 세계를 이루는 것을 목표로 함을 의미한다. 따라서 IE의 기초가 되는 중요한 개념은 지속적인 개발(Sustainable Development)이다.

IE의 가장 중요한 개념의 다른 하나는 생태계와 마찬가지로 폐기물(Waste)을 배출한다는 점이다. Waste란 쓸모 없고 효용가치가 없는 것으로 정의된다. 그러나 자연에서는 궁극적으로 버려지는 것 없이 순환이 되며, 모든 물질이 여러 방향으로 효율적으로 재이용되고 있다. Ecology라는 용어는 순환(Cyclization)을 의미하며, 이러한 순환의 개념은 IE에도 똑같이 적용하므로써 산업활동에서 사용되는 모든 물질이 산업체 내에서 완전한 순환 즉 Zero-discharge 개념을 이루고자 하는 것이 IE의 목표이다.

산업공정에 필요한 자원과 원료의 이상적인 사용 형태는 생태학적 모델과 유사하게 생각할 수 있다. Fig. 1.은 물질의 순환 또는 흐름에 대한 형태를 도식화한 것이다. 옛날에는 사용 가능한 자원이 무한정이었으나 인간이 사용하는 양은 극히 적었기 때문에 자원에 대한 영향은 거의 없었다. 이러한 형태의 물질흐름을 선형적 물질흐름(Linear Materials Flows)라 부른다(Type I Ecology). 이 경우는 물질흐름이 각 단계별로 독립적임을 의미한다. 그러나, 인구증가 등으로 인한 산업의 다양화가 이루어지면서 한정된 자원에 대한 외부적인 제약이 있게 되어 Type I Ecology는 몰락하게 된다. 에너지와 자원의 한계를 인식하므로써 Feedback, Cycling Loops가 개발되어 시스템 내에 투입되는 물질의 양과 나오는 물질의 양은 점차 감소하게 된다. 이러한 형태의 물질흐름을 유사 순환적 물질흐름 (Quasicyclic Materials Flow)이

라 부른다(Type II Ecology). 물질사용면에서 Type II가 Type I보다 훨씬 효율적이기는 하나 궁극적으로 자원의 사용이 가능하려면 앞서 언급하였듯이 자연생태계와 유사한 물질의 완전순환이 이루어져야 한다. 이러한 물질흐름의 형태를 순환적 물질흐름(Cyclic Materials Flows)라 부른다 (Type III Ecology). Type III에서 주목할 점은 Waste가 다른 것의 자원이 되며 에너지는 외부로부터 투입된다. 따라서, IE는 공정과 물질의 흐름간의 상호작용을 이해 함으로서 또한 관련된 고려 사항과의 전체적인 조화를 극대화 시킴으로서 Type I에서 Type II 그리고 궁극적으로 Type III의 공정발전(Manufacturing Evolution)을 목표로 두고서 수행되어야 한다. IE 개념의 요체는 Cyclization을 극대화시키는 것이며 IE의 고려대상은 광업, 농업, 산림, 제조업 및 Consumer Behavior등과 같은 경제활동의 모든 영역을 포함시켜야 한다.

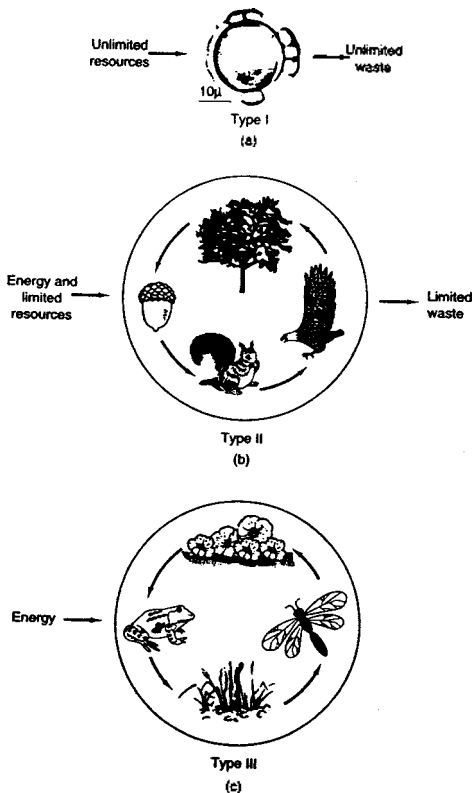


Fig. 1. Types of Ecology.
 (a) Linear Materials Flows in Type I Ecology.
 (b) Quasicyclic Materials Flows in Type II Ecology.
 (c) Cyclic Materials Flows in Type III Ecology.

3. Linking Industrial Ecology and Environmental Science

IE는 앞서 언급하였듯이 산업과 환경간의 상호관계를 새로운 방식으로 접근한다. Table 1에서 알 수 있듯이 산업과 환경간의 상호작용을 검토해 보면 다음과 같이 크게 세 시기(Time Scales)로 구분할 수 있다. 첫 번째 시기는 과거로서 산업폐기물의 부적절한 처리, 처분으로 인해 복구(Remediation)에 전적으로 의존하거나 관심이 집중되었던 시기이다. 두 번째 시기는 현재로서 주로 법규나 규제에 따라 폐기물을 처리, 저장, 처분하며 과거의 명백한 실수를 방지하느라 사후 관리(End-of-pipe)를 강조해 왔다. 세 번째 시기는 미래로서 오늘날 IE 개념으로 고안되고 개발된 산업제품과 공정이 향후 몇십 년에 걸쳐서 산업과 환경간의 상호작용에 중요한 부분을 차지한다는 점이다. 따라서, 미래의 Industry-environment Interactions이 공정과 제품의 Design Engineer의 손에 달려 있으며, 이들 모두가 환경에 유익하고 친화적인 제품을 설계하는데 노력해야 함을 강조하고 있다. 미래에는 그 동안 환경분야에서 강조해 온 Remediation과 Compliance를 지양하고 기업체내에 자발적인 규제적 환경경영시스템(Regulatory Environmental Management System)의 구축이 이루어져야 할 것이다.

IE는 단지 Materials Budgets을 최적화 하는 것이 상을 의미한다. 그 이유는 산업활동에 의한 환경과의 상호반응이 Environmental Science Community로 부터 Input과 Guidance가 요구되기 때문이다.

IE의 기초적인 형태는 기술자가 산업시스템내에서 효율증진을 위해 또한 외부반응(External Interaction)을 최소화하려는 노력을 할때 발생된다. IE의 발전된 형태는 기술자의 노력이 Environmental Scientists의 지침에 따라 두 분야의 고려사항이 통합적으로 이루어질 때 발생된다.

따라서 IE는 산업활동이 Environmental Science와 연계되므로서 구체화 될 수 있어야 한다. IE의 목표가 환경문제가 명백하게 나타난 후 해결하는 것이 아니라, 환경문제의 원인을 사전에 제거하는데 있다. 현재 급격한 기술개발을 추구하고 있는 국가나 사회가 산업혁명 이후 선진국 등이 산업과 환경분야에서 당면하고 있는 실수를 되풀이하는 것을 막음으로서 향후 세계가 보다 이상적인 상태를 이루는데 있다.

Table 1. Three stages of environmental regulation

Time	Activity	Focus	Geographical/ Temporal Scale	Regulation	Leader
Past	Remediation	Waste substances	Local, Immediate	Command-and-control	USA
Present	Compliance	Emitted substances	Point source, Immediate	Command-and-control, end of pipe	More developed countries
Future	IE/DFE	Products and services over the life cycle	Regional and global systems, all time scales	Establish boundary conditions	European Union, especially The Netherlands and Germany

그 예로서 Fig. 2 는 18세기 산업혁명에 참가한 선진국들의 개발에 따른 자원사용 패턴을 도식화한 것이다.

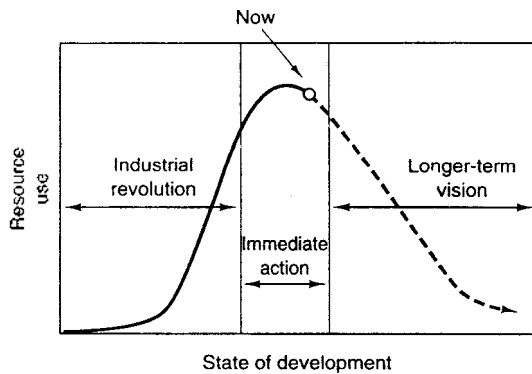


Fig. 2. The typical life cycle of the relationship between the state of technological development of society and its resulting environmental impact.

기술개발의 초기에는 자원의 사용과 waste의 발생 등이 급격히 증가했으나 현재는 점차 감소 추세에 있으며 미래에는 급격한 감소를 예측하고 있다. 이는 그 동안 선진국들이 개발에 따른 환경문제의 최소화 를 위해 적극적인 노력을 기울였기 때문이다.

Fig. 3에는 개발도상국들이 앞으로 선진국의 발전 패턴을 쫓아갈 것이 아니라 산업활동으로 인한 환경

에 미치는 악영향을 감소시킬 수 있는 방향으로 발전 궤도가 변경되어야 함을 제시하고 있다. Fig. 2 와 비교해서 Fig. 3에서 설명하고자 하는 요지는 개발이 진행되고 있는 국가들이 과거에 선진국들이 행한 실수를 되풀이하지 않고 환경문제의 최소화를 이루면서 이상적인 발전을 이루어야 한다는 점이다. 따라서, 선진국이나 개발도상국들이 IE의 기본개념을 철저히 실행할 경우에만 이러한 목표의 달성이 가능하다.

4. Design for Environment and Life Cycle Approaches

제품의 설계는 복잡한 제품일수록 작업이 매우 어려워지며 또한 이를 위해 많은 투자가 요구된다. 예를 들면, Ford사의 새로운 자동차 개발에는 60억불이 넘는 비용이 드는 것으로 알려져 있다.

제품의 설계는 점차 개인 혼자서 아닌 R&D, manufacturing, marketing 및 관련 조직(Legal, environmental, purchasing)등으로 구성된 engineering team의 작업에 의해 이루어지고 있다.

제품의 설계시 고려해야 할 여러 사항 중 가장 중요한 사항은 quality, cost와 time-to-market 이다.

그밖에 환경친화적인 제품과 공정의 설계를 위해

서는 Design for Environment와 Life-Cycle approaches의 원리를 적극적으로 도입해야 한다. DFE는 환경적인 고려와 관심사항을 제품의 설계단계에서 개입시키는 방법이다. LCA는 최종제품이 환경적으로 신뢰할 수 있는가의 여부를 알아내는 평가기법이다.

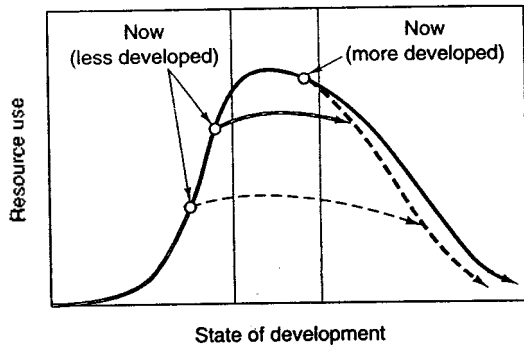


Fig. 3. Desired redirections (dashed lines) of the typical historical development path, treated as the relationship between the state of technological development of society and its resulting environmental impact. "Now" refers to the approximate positions of countries at different levels of industrialization: compare with Fig. 2.

이 개념의 기본은 제품의 환경영향을 제조 공정뿐만 아니라 모든 life stages에 대해 고려해야 한다. 즉 LCA의 요체는 원료, 공정, 제품의 환경, 경제 및 기술과 연관된 제반사항을 평가하는 것을 말한다. 이 경우 각각의 수명기간(Life span)에 걸쳐서 평가되어야 함은 물론이며, waste나 residue는 같은 형태 또는 다른 유용한 형태로 재사용하는 것도 포함하고 있다. LCA는 우선 평가코자 하는 범위를 설정해야 하며, 목록(Inventory)분석과 에너지와 물질의 사용에 따른 환경영향 등의 평가가 포함된다. 특히 환경영향에 대한 우선 순위는 LCA에 있어서 가장 논쟁의 여지가 많은 부분이다. 목록분석에서 얻어진 결과를 바탕으로 우선 순위를 정하는 것은 사회적인 관점에서뿐만 아니라 과학적이어야 하나 순위에 대한 의견의 일치를 달성하기는 매우 어려운 문제이다. 종합적인 LCA는 매우 복잡할 뿐만 아니라 비용도 많이 들기 때문에 수행하는데 어려움이 많다. 따라서 최근에는 축소된 LCA(Abridged LCA)가 개발되어 사용되고 있으나 모든 life stages와 환경영향을 분석하는데는 주의가 필요하다. 본 논문에서는 이미 잘 알려진 LCA기법보

다 DFE방법에 대해 자세히 기술하고자 한다.

5. DFE: Energy, Materials, and Processes

공정을 설계하는 사람은 공정중 에너지와 물질의 투입과 공정배출물(Residue stream outputs)을 규정하는데 중요한 역할을 담당한다. 공정의 설계자는 DFE의 접근방식과 개념을 제품과 공정설계시 우선적으로 고려해야 한다. DFE 고려시 중요한 사항은 제품의 설계 초기 단계에 DFE 개념을 적용해야 하며 제품 완성 단계에 추가되어서는 안된다는 점이다. DFE 고려사항중 에너지 사용, 산업공정의 잔류물 및 원료의 선택에 대해 우선 살펴보고자 한다.

① 에너지 사용(Energy use)

에너지는 IE의 논제 중에서 중심이 되는데 첫째 이유는 에너지는 한정된 자원으로부터 생산되기 때문이며, 두 번째 이유는 에너지 사용과 환경영향 간에는 tradeoffs가 존재하기 때문이다. Table 2에는 어떻게 에너지가 생산되는가와 그로 인한 대기 환경영향을 보여주고 있다. Table 2에서 보듯이 화석연료 연소에 의한 에너지 공급은 원자력이나 기타 자연 에너지원에 비해 대기 환경피해가 훨씬 큰 것으로 이미 잘 알려져 있다. 소각에 의한 에너지의 이용은 화석연료에 비해 환경영향이 적으므로 폐기물의 처분 차원뿐만 아니라 에너지원으로서 산업분야에 확대 이용이 되도록 해야 한다. 산업에 이용되는 에너지는 가능한 한 환경에 유익한 자원으로부터 얻어져야 함은 물론이다. 전통적으로 우리 나라의 산업구조는 에너지 과소비형 업종이 차지하는 비중이 높은 편이며 제조업에서 사용되는 에너지의 양은 국내 전체 에너지 소비량의 적어도 50%이상인 점에 주목할 필요가 있다. 따라서 제조공정시 사용되는 에너지 형태를 조사하는 것이 유익하며 특히 원료(Virgin material)를 단독으로 사용하는가 또는 일부 재활용 원료와 혼합하여 사용하는가를 조사하는 것이 필요하다. 이러한 조사는 energy 및 materials budgets을 검토하므로써 가능하다.

Fig. 4는 에너지의 사용 효율 비교를 위해 한국을 비롯한 6개국의 carbon intensity를 industrial value added 함수로 표시한 것이다. carbon intensity는 사용된 에너지의 양을 측정하는 것이 아니라 에너지 생

산을 위해 연소된 carbon양을 측정한 것이다. carbon intensity는 monetary unit당 사용된 carbon의 양(kg)으로 표시되며 에너지 사용의 상대적인 효율을 나타낸다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 carbon intensity값은 국별로 큰 차이를 보여주고 있다.

공정간에 교환 하거나 열병합발전(Cogeneration)을 하므로서 이룰 수가 있다. 앞서 언급하였듯이 공정 및 제품 designer간의 협력이 제조공정의 효율을 향상시킬 뿐만 아니라 에너지 절약을 이루는데 크게 기여한다.

Table 2. Gaseous species emitted by energy generation processes

PROCESS	Gaseous Species						
	CO ₂	CH ₄	NO _x	SO ₂	H ₂ S	HCl	Particles
Fossil Fuel							
Energy Sources:							
Coal	*	*	*	*			*
Petroleum	*	*	*	*			
Natural gas	*	*	*				
Other Anthropogenic							
Energy Sources:							
Nuclear power							
Refuse incineration	*					*	*
Biomass incineration	*	*	*				*
Natural							
Energy Sources:							
Hydrothermal steam					*		
Solar power							
Hydropower							
Wind power							

미국을 비롯한 일본, 영국은 지난 30년간 carbon intensity가 2배 이상 급격히 감소하였다. waste 발생의 최소화 관점에서 이들 국가의 산업공정은 이 기간동안 2~3배의 효율증가를 이루었다. 이에 반해 브라질과 나이지리아는 이 기간 동안에 carbon사용량은 2배이상 증가하였음에도 불구하고 산업제품의 부가가치는 향상되지 못하였음을 보여주고 있다. 우리나라의 경우는 carbon intensity는 2배이상 감소하였으나 산업제품의 부가가치는 선진국에 비해 크게 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 4는 IE를 어떻게 실행하여야 하는가를 보여주는 가장 좋은 예이며 또한, 개발도상국에 있어서 에너지와 자원의 과도한 사용을 반영하고 있다. 에너지 사용에 있어서 중요한 점은 에너지 사용의 최소화와 excess heat의 재이용이다.

에너지 사용의 최소화는 전등, 에어컨 등에 새로운 방식을 조합 시키므로써 가능하며, 또한 과잉열을

공정의 단계적 변화와 전체적인 공정변경을 통해 에너지 사용의 최소화를 이룩할 수 있다. 에너지 사용과 관련하여 유럽연합은 탄소배출에 대한 세금부과, 네덜란드에서는 산업제품에 대한 energy-use requirements를 검토하고 있다. 에너지 사용에 있어서 절약과 사용 패턴의 변화는 향후 기업의 수익성 차원과 환경적인 책임면에서 매우 유익한 투자로 볼 수 있다.

② 산업공정 잔류물(Industrial process residues)

IE 개념은 앞서 언급하였듯이 물질순환의 개념이기 때문에 공정에서 나오는 어떤 형태의 물질이라도 폐기물(Waste)로 간주하지 않는다. 따라서 IE에서는 폐기물은 잔류물(Residues)로 불리며 이러한 잔류물이 공정내에 재순환 되거나 다른 공정의 원료가 되도록 공정과 제품을 설계하여야 한다.

산업활동의 결과로 상당량의 물질이 환경에 배출

된다. 금속제조 및 화학공업 분야는 상당량의 고체 잔류물을 주로 발생시킨다. 따라서 제조업에서 DFE가 강조될 부문은 제품이 아니라 공정분야이다. 그 이유는 공정은 일단 정해진 곳에 설치되면 제품보다도 훨씬 장기간에 걸쳐 존속하기 때문이다. 산업공정에서 배출되는 잔류물은 공정, 제품, 포장 잔류물(Packaging residues) 등으로 크게 구분할 수 있으며 잔류물 발생은 공정 및 설비 design의 함수로 볼 수 있다. process residue streams은 회수와 재활용이 촉진되도록 설계되어야 한다. packaging의 경우는 사업체 내로 유입되는 포장재는 공급 업자가 다시 회수해갈 수 있는 적절한 시스템을 구축하는 것이 매우 중요하다.

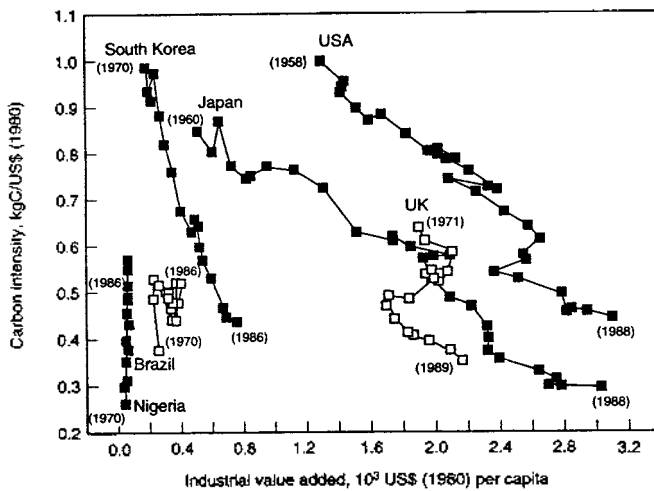


Fig. 4. The evolution of industrial carbon intensity (expressed as kg C per 1980 U.S. dollar) as a function of the per capita level of industrialization.

산업공정에서 배출되는 잔류물을 처리, 처분하는 일은 잔류물의 종류에 따라 크게 다르다. 특히 중금속 등을 함유하는 잔류물의 경우 토양오염과 직접적인 관련이 있으므로 독성의 안정화 문제와 처분비용의 최소화 등에 많은 관심을 가져야 한다. 플라스틱이나 종이류 등의 고체 잔류물은 최대한 재활용이 되도록 해야 하며, 재활용에 적합치 않은 경우는 소각 등을 통한 에너지 회수를 이루어야 한다. 생물학적, 방사능 잔류물의 경우는 공정을 효율적으로 개선해서 잔류물의 발생을 최소화시켜야 하며 발생된 잔류물은 노출이나 전염이 없도록 처분해야 한다.

산업공정은 고체 이외에도 액체 및 기체 상태의

잔류물을 배출시킨다. 산업공정 및 제품 중에서 액체상의 잔류물을 많이 배출하는 업종은 화학공업, 피혁, 도금, metal cleaning, 광산 및 제련업, 농업분야 등이다. 액체상으로 배출되는 잔류물중 가장 문제가 되는 것은 중금속이 함유된 폐수, 용매 및 기름, 유기성 화학 물질, 강산성 잔류물 등을 들 수 있다. 특히 도금폐수 등의 경우에는 중금속 이외에도 품질향상을 위해 독성이 있는 cyanide용액 및 계면활성제, 유기 광택제 등을 사용하므로써 재해처리의 어려움을 증대시키는 결과가 되고 있다. 각종 유기성 용매 등의 사용은 독성, 오존층 파괴, 스모그 형성의 원인을 제공하게 되므로 용매 사용의 최소화과 대체 가능 물질을 찾는 데 노력해야 한다. 미국 Polaroid사는 일반적으로 염색 공정에서 용매제로 사용되는 toluene을 trimethyl orthoacetate로 대체하므로써 공정시 발생하는 toluene residues를 소각하는 것을 피할 수 있을 뿐 아니라 사용된 trimethyl orthoacetate를 증류시키므로써 회수가 가능하였다. 용매의 재이용을 고려한다면 plant designers는 residue streams에서 발생하는 각종 물질이 혼합되지 않도록 공정을 설계하는 것이 중요하다. Industrial ecologist는 residue streams이 일종의 부산물흐름(By-product streams)으로 되도록 공정을 설계하여야 한다. 그 한 예로 전자 산업에서 사용된 용매는 일반적으로 페인트용 용매로 사용이 가능해서 공급이 되고 있다. Table 3은 주요 제조 공정과 환경영향을 요약한 것이다. 공정에서 배출되는 잔류물의 양을 줄이기 위해서는 residue streams의 제거, 탈아온수 사용의 최소화, 새로운 residue streams의 도입금지, 독성물질을 사용하는 residue streams의 제거, 유기성 용매 대신 water-based용매의 사용, 휘발성이 적은 화학물질로 대체, 공정의 온도를 내리는 것을 시도해야 하며 또한, 중금속 등이 함유된 촉매사용 등을 금지하는 노력이 이루어져야 할 것이다.

③ 원료의 선택 (Choosing materials)

목적에 적합한 물리, 화학적 특성을 갖는 원료의 선택은 designer가 갖고 있는 특권이기도 하나 원료의 공급이나 가격에 의해 선택이 제한을 받게 된다. 원료의 선택과 관련된 기본개념은 아래와 같이 4가지 기본 규칙으로 설명할 수 있다.

첫째 양이 풍부하고, 독성이 없고 규제 대상이 아닌 원료를 선택할 것, 두번째는 합성물질이 아닌 자연적인 물질을 선택할 것, 셋째로 원료의 사용을 최소화하도록 설계를 할 것, 마지막으로 순수한 원료

(Virgin materials)보다 가능한 한 재활용(Recycled) 원 high-strength steel, 알루미늄, 구리 및 플라스틱 사용
료를 사용할 것 등이다. 량은 대폭 증가하였다.

Table 3. Manufacturing processes and their environmental implications

Process	Impacts
Smelting	Energy use, sulfur gases
Molding, Stamping	Solid waste
Chemical processing	Smog forming gases
Cleaning	CFCs, Organic solvents
Soldering	Lead use
Welding	Energy use, disassembly difficulty
Plating	Cyanides residue, eventual loss of plating
Bonding	Disassembly difficulty
Painting	Smog forming gases
Incoming packaging	Solid waste

원료의 풍부한 정도는 designer가 통제할 수 있는 영역이 아니나 희귀한 자원의 사용은 정책적으로 통제가 가능하다. 만일 공정이나 제품 designer가 자원의 상대적인 회소가치에 대한 지식을 갖고 있다면 원료를 임의적으로 선택하는 것을 피할 수 있을 것이다. 제품생산을 위해 어떤 물질이 선택되는지 간에 일반적으로 설계를 신중히 하므로써 사용되는 양을 최소화시킬 수 있다. 또한 사용되는 원료가 매우 드문 경우에는 대체물질의 사용 가능성을 검토해야 한다. 대체 물질 개발에 대한 예로서 자동차 배기 정화 장치에 기존에 사용하던 platinum(Pt) 과 rhodium(Rh) 대신에 palladium을 active agent로 사용하였다. 그 이유는 palladium이 Pt나 Rh 보다 양이 훨씬 풍부하며 가격 또한 싸기 때문에, resource sustainability 측면뿐만 아니라 market advantage가 훨씬 크다는 사실이다. 일반적인 상황은 제품에는 여러 종류의 물질을 사용하며 따라서 이러한 사용물질의 대체 가능성이 크다는 점이다. Table 4에는 전형적인 미국 자동차의 원료 구성과 사용된 원료의 변화를 보여주고 있다. Table 4에서 알 수 있듯이 1978년과 1988년 사이에 자동차에서 사용된 재료 중에서 carbon steel, iron, zinc die castings의 사용량은 현저하게 감소한 반면에

그 결과로 자동차의 전체적인 중량도 11%나 감소하였다.

제품을 설계하는 사람은 불가피한 경우를 제외하고는 독성이 있는 물질이나 방사능 물질의 사용을 피해야 하며, 불가피하게 사용할 경우는 사용량을 최소화하는데 노력해야 한다. 마지막으로 제품 designer들이 유의해야 할 사항은 현재 사용에 제한이 없는 물질이라도 미래에 제한 가능성이 있는 물질은 사용하지 않도록 해야 한다.

IE를 수행하는 사람은 최종제품에 chlorine을 함유한 물질이 있는 경우 대체방안을 검토해야 하며, 공정 내에서도 chlorinated compounds의 사용을 최소화하도록 해야 한다.

결론적으로 원료의 선택은 제품, 공정은 물론 service 차원까지를 고려해서 원료의 사용을 최소화할 수 있는 설계가 이루어져야 할 것이며, 필요한 원료는 추출공정(Raw materials extraction)을 통해 유입되는 것보다 recycling streams에서 얻도록 최선의 노력을 기울여야 한다는 점이다.

6. DFE: Packaging, Use, and Recycling

제품과 연관된 대부분의 환경영향은 제조 공정 후

에 발생한다. 광범위하게 사용되는 제품 즉, 비료, motor oil, 페인트, 약(Drugs) 또는 식품(Food) 등은 환경에 미치는 영향이 명확하게 나타나며, 사용된 원료의 성분에 따라 그 영향은 상당히 클 수가 있다. 잠재적으로 재이용 또는 재활용이 가능한 물품에 대한 문제는 그러한 물품을 재이용 하거나 재처리가 가능한 하부조직이 실제로 존재하는가 하는 점이다. 자동차 등과 같이 매우 복잡하게 제조된 제품의 경우, 제조 후 life-cycle stages와 연관된 환경영향의 정도는 특히 사용과 유지(Maintenance)와 관련된 부문과 energy intensity 등과 같은 몇 가지 특성에 크게 좌우된다.

① 포장(Packaging)

포장분야의 life-cycle stage는 종종 무시될 때가 많으며 게다가 포장재는 사용량이 많기 때문에 환경영향을 야기시킨다. 포장 문제는 공급 업자로부터 공장내 유입되는 것과 자기 제품의 포장을 위해 제조, 사용되는 것 등으로 양쪽 모두를 고려해야 한다. 미국과 유럽이 분석에 의하면 모든 생활 폐기물의 약 30%가 포장재이며, 따라서 포장재는 consumer use의 주요한 잔류물로 간주되고 있다. 대형 화학 물질로부터 소형 품목에 이르기까지 모든 종류의 제품에 대한 적절한 포장은 환경을 지속적으로 유지시키는데 중요한 역할을 한다. 독일에서 시행하고 있는 "Blue Angel" program에 의하면 사용되는 포장재는 완전히 재활용이 가능해야 하며, 또한 포장재중 재활용(Recycled) 원료의 함량이 가능한 한 최대가 되도록 해야한다. 특히, 독성 물질이나 불필요한 안료(Pigments)가 포함되어서는 안되며, 만일 종이인 경우는 표백된 것을 사용해서는 안되도록 요구하고 있다. 미국의 예를 보면 개인 구매가 아닌 정부 구매인 경우 corporation-to-corporation간에 포장재의 개선과 감소를 협의토록 권장하고 있다.

IE에 있어서 packaging은 중요한 topic이지만 physical designer의 영역에 있지 않은 경우가 많은 실정이다. 대부분의 기업체에 있어서 packaging engineers는 engineering teams의 구성원이 아니며 따라서, 어떤 제품이 설계되고 생산되든지 간에 protective packaging을 설계해야만 한다. 포장분야에 DFE사고를 구체화시키는데 추가적인 제약은 실제적으로 어떤 packaging engineers도 환경분야의 훈련을 받은 적이 없다는데 있다.

포장분야에 있어서 trade-offs의 역할은 매우 중요하다. 포장재의 감소는 다른 목적과 상반될 수 있으며, 즉 식품 안전(Food safety)과 식품 포장(Food packaging)에 있어서 재활용 플라스틱의 사용이 좋은 예이다. 다른 예로서 static build-up을 방지하기 위해 전자 부품의 플라스틱 포장재에 금속을 첨가 함으로서 포장재의 재활용이 불가능하게 된다.

포장재는 재활용 또는 재사용 되어야 하며 따라서, 가능한 한 하나의 물질, 많아야 두종류의 물질로 만들어져야 한다. 포장재가 하나 이상의 물질로 구성된 경우는 쉽게 분리가 가능하도록 만들어져야 한다. 적용되는 물질마다 다를 수 있으나 제품의 포장은 포장단계를 최소화하는 것이 무엇보다 중요하다.

미국의 북동부 주지사 협의체에서 제안하는 포장분야의 접근방식은 우선 순위별로 아래의 4단계와 같다.

첫째 가능한 한 포장을 배제(No packaging)하며 둘째로는 불가피한 경우는 최소한의 포장(Minimal packaging)만을 실행한다. 세 번째는 반환 가능 또는 재이용 가능한 포장 (Consumable, returnable, or refillable/reusable packaging)이며 마지막으로 재활용 가능한 포장(Recyclable packaging)이다. 일부 선진국에서 실행되고 있는 포장재 환수제도(Packaging takeback system) 등도 고려해 볼 수 있으나 이를 위한 하부구조(Infrastructure)가 요구되기 때문에 전이(Transition)비용이 많이 추가되는 점을 고려해야 한다.

포장재의 환수제도가 성공하려면 포장재의 폐쇄 순환루프(Closed-loop)가 이루어져야 하며, 다시 말해서 일단 회수된 물질은 어떻게 경제 체제에 투입시키는가 하는 점이다. 이러한 문제점에도 불구하고 이러한 진취적인 제도는 산업분야에 보다 효율적인 포장 시스템을 만드는 데 기여 할 것이다. 마지막으로 포장 설계시는 공학 및 social system issues를 모두 반영시켜야 하는 점이 중요하다.

② 제품 사용(Product use)

많은 경우 제품의 사용은, 예를 들면 자동차의 경우 매우 중요한 life-cycle stage 이다. 제품이 사용되는 기간동안 에너지와 원료의 사용을 최소화하도록 제품이 설계되어야 한다. 그밖에, 제품이 사용되는 기간동안에 여러 형태의 잔류물이 발생하는 것을 최소화 할 수 있도록 제품이 설계되어야 한다. Table 5는 스웨덴 Volvo사가 자동차 제품의 사용기간중 환

경영향을 줄일 수 있는 options을 검토한 예이다. Table 5에는 자동차의 life cycle 분석결과를 토대로 연료 종류에 따른 CO₂ 방출량을 보여주고 있다.

물의 발생이 없도록 해야한다. 제품의 보존성을 설계 시 고려하는 것은 소비자에게 제품의 신뢰성을 제공한다는 점에서 매우 바람직하다.

Table 4. Material in a typical U. S. A. automobile(kg)

Material	1978	1988	%change
Carbon steel	870	654	-25
High-strength steel	60	105	74
Stainless steel	12	14	19
Other steels	25	20	-19
Iron	232	207	-11
Plastics	82	101	23
Fluids	90	81	-10
Rubber	67	61	-8
Aluminum	51	68	32
Glass	39	38	-2
Copper	17	22	32
Zinc castings	14	9	-33
Other	62	57	-9
Total	1621	1437	-11

대부분의 CO₂는 운행기간 동안 방출되고 있으며 디젤을 연료로 사용하는 엔진이 휘발유나 메탄올을 사용하는 경우보다 환경적으로 우수함을 알 수 있다.

에너지 효율 측면에서도 디젤연료가 다른 연료보다도 훨씬 우수한 것으로 조사되었다. 많은 제품이 사용기간 중 에너지를 사용하기 때문에 에너지효율이 높은 제품의 설계는 매우 중요하다.

제품을 사용할 때 마지막으로 고려해야 할 사항은 제품의 보존성(Maintainability)이다. 그 이유는 제품의 maintenance activities는 많은 환경영향을 야기하기 때문이다. 무기체계(Weapon systems)의 경우 대부분의 무기가 제조될 당시의 목적대로 사용되는 것이 아니기 때문에 보수유지(Maintenance)가 환경에 커다란 영향을 미친다. 제품의 maintenance는 routine maintenance (Painting, fuel, oil, etc.)와 제품의 수명연장을 위한 maintenance (beyond design life, as in B52s)등으로 나눌 수 있다. 제품이 지속적으로 사용되려면 부품 등의 교체나 수리가 쉬워야 하며, system upgrading이 가능해야하며, 또한 통상적인 수리를 수행할 때 잔류

③ 재활용(Design for Recycling)

제품이 사용된 후 회수되면 가능한 한 최대한으로 부품과 원료를 재활용해야 한다. 재활용의 일반적인 규칙은 다음 2가지로 요약할 수 있다. 첫째, 항상 갖고 있는 기능(Embedded functionality)을 가장 높은 수준에서 재활용이 되도록 시도해야 한다. 바꾸어 설명하면, 우선 사용된 제품 그 자체를 다른 수요처(Market)에 사용 가능한가를 찾아 봐야 하며, 그 후에는 조립품(Subassemblies), 부품(Components), 마지막으로 원료(Materials) 순으로 재활용 해야 한다. 두 번째로 재활용이 항상 가장 환경적으로 친화적 일수는 없다는 점을 인식해야 한다. 예를 들면, 금속 첨가물이 없는 non-halogenated plastics의 경우는 재활용하는 것보다 현지에서 소각해서 열병합발전소에서 에너지를 회수하는 것이 환경적으로 유리하다. 두 번째 예로서 비효율적인 낡은 차를 저개발 국가의 시장에서 재활용하는 것은 새롭고 값싼 모델을 생산하는 것보다 지구환경 차원에서 유리하지 못하다.

Table 5. Equivalent CO₂ emissions (g/km) from a Volvo 740 GL using various fuels

Fuel	Extraction	Refining	Distribution	Operation	Total
Diesel	17	10	7	205	239
Gasoline	18	15	8	225	266
Methanol	13	51	12	186	263
Methane	10	7	41	187	245

IE의 개념은 가능한 높은 순도(Purity)를 유지하며, 또한 재이용 수준이 가장 높은 상태에서 물질의 순환을 이루는 것이 중요하다. IE를 완벽하게 실행한다면 처분 또는 매립되는 것이 거의 없음을 의미한다. 재활용을 통한 물질의 최대 이용은 공정과 제품의 설계에 크게 의존한다. 따라서 Designing for Recycling(DFR)은 IE에 있어서 가장 중요하게 고려해야 할 사항 중의 하나이다. 미국 Carnegie Mellon대학의 연구 결과에 의하면 개인용 컴퓨터의 개발초기에 DFR을 적절히 적용하지 못함으로써 2005년까지 약 1억5천만대의 컴퓨터가 매립 등으로 폐기될 것으로 예측하였으며, 이로 인한 처분비용도 약 4억달러에 이를 것으로 추산하였다. 현재 우리가 사용하고 있는 제품 즉, 세탁기, 냉장고, 자동차 플라스틱 및 기타 제품들이 재활용을 염두에 두지 않고 설계되었다면 사용후 폐기되는 양은 아마 상상을 초월할 것이다. 따라서, DFR은 권장 사항이 아니라 사회가 지속되는데 커다란 장애 요인이 될 수 있음을 인지해야 한다.

최근에는 이러한 DFR의 근본원리를 제품에 조화시키려는 노력이 계속되고 있다. 1991년에는 U. S. Government Executive Order가 제정이 되어서 정부기관의 경우, 재활용 원료로 만든 제품을 구입토록 하였으며 공급 업체들이 폐기물 회수 프로그램에 적극 참여토록 권장하고 있다. 뉴욕주의 경우도 개인용 컴퓨터 구입시 재활용성(Recyclability)이 선택의 기준이 되고 있다. 독일의 "Blue Angel" 환경마크 심의 경우에도 재활용성이 주요 평가 항목이 되고 있다. 원료를 재활용해야 하는 또다른 이유중의 하나는 이들이 상당히 상업적 가치를 갖고 있기 때문이다. 자동차의 경우, 예를 들면 알루미늄 및 철 scrap은 각각 톤당 \$7000, \$100의 가치가 있다. DFR에 있어서 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 사용하는 원료의 수와

설계에서 사용되는 부품의 수를 최소화해야 한다. 두 번째는 독성이 있는 물질은 사용치 않도록 해야 하며 그 이유는 독성물질이 있는 경우는 분해, 재사용, 소각은 물론 에너지 회수시에 여러 가지 문제를 야기하기 때문이다. 마지막으로 고려해야 할 사항은 상이한 물질을 접합시키면 분리를 어렵게 만들기 때문에 사용후 쉽게 분리가 가능한지를 검토해야 한다. DFR의 일반적인 개념은 design modular를 만드는 것이며 그 예로 최근 TV sets에 있어서 콘센트 식의 circuit boards를 사용한다. 수명이 다해 폐기되는 제품으로부터 사용 가능한 부품을 회수해서 새로운 제품을 생산(Remanufacturing)하는 방법도 재활용 측면에서 매우 바람직하다. 재활용에는 closed-loop 및 open-loop recycling의 두 가지 형태가 있으며 두 방식의 차이는 재생되는 원료로 같은 제품을 만드는가의 차이이다. 물질순환의 견지에서 볼 때는 closed-loop 방식이 더 바람직하다. 금속, 플라스틱, 종이류 등의 재활용은 이들 물질의 순도에 크게 좌우된다. 금속의 경우 plated metal은 회수가 어려울 뿐만 아니라 경계성도 낮으며 플라스틱 경우도 페인트, 접착제 등으로 인하여 순도 저하가 재활용을 어렵게 만든다. 종이는 재활용 단계가 늘어날수록 질이 저하되어 사용처가 제한을 받게 된다. 종이의 경우도 플라스틱 코팅, 중금속이 함유된 방부제를 나무에 사용하는 점 등은 종이를 재활용하는데 제한이 되고 있다. 따라서 재활용을 촉진시키기 위해서는 설계단계에서 재활용에 방해되는 요인을 철저히 제거하는데 노력을 기울여야 한다.

7. Summary

본 논문에서는 IE의 기본개념과 원리를 소개하였으며, 또한 Design for Environment방법을 통한 IE의

응용에 관해 설명하였다. Fig. 5에서와 같이 IE는 오염사건예방(Pollution Prevention, PP)과 환경친화적 제품설계(Design for Environment, DFE) 즉, 두 가지 활동의 합으로 간주할 수 있다. 오염사건예방은 주로 현재의 공정과 제품을 개선하므로써 환경오염의 최소화를 이루고자 하는것이며, 예를 들면 누출방지, 에너지절약, 포장개선 등이다.

두 번째 DFE는 오염사건예방의 효과가 1~2년 이내인데 비해 훨씬 장기적인 시간목표를 갖고 있으며 때때로 제품과 공정을 도입하기 전에 관여한다. DFE의 전형적인 활동은 modularity의 개발, 사용원료종류의 최소화(Minimization of materials diversity) 및 공정대체(Process substitution)등이다. IE의 성공적 수행은 PP와 DFE의 두 개념을 적절히 조합시킬 때만이 가능하다. IE가 10년또는 20년후의 소비자의 성향, 법적규제의 변화 및 환경변화 등의 예상을 포함시키므로써 IE의 목표를 달성할 수 있기 때문이다. 현재는 IE개발의 초기단계이며 따라서, 기업체는 주도권을 갖고서 정부 및 관련조직의 지원하에 DFE의 실행을 위해 노력해야한다.

경규제에 능동적으로 대처하고 국내산업의 지속적인 발전을 도모하기 위해서는 환경문제를 고려한 새로운 산업전략의 수립이 필요하며, 이를 위해 산업 분야에 새로운 IE개념의 도입과 실제적인 DFE의 응용이 이루어질 수 있는 효율적인 체제의 구축과 지원이 있어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) Graedel, T. E. and Allenby, B. R. : Industrial Ecology, Prentice Hall, Inc. (1995)
- 2) Johansson, A. : Clean Technology, Lewis Publishers (1992)
- 3) Jackson, T. : Clean Production Strategies, Lewis Publishers (1993)
- 4) Fisher, K. and Schot, J. : Environmental Strategies for Industry, Island Press (1993)

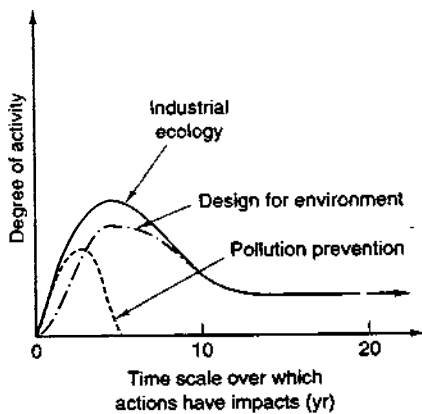


Fig. 5. The action-impact distribution for pollution prevention, design for environment, and industrial ecology.

결론적으로 환경적으로 제약적인 세계에서 산업의 관행과 구조는 변화가 있어야한다. 또한 산업체는 물질사용과 환경에 영향을 주는 활동을 규제할 수 있는 기능적인 조직이 산업내에서 활성화되도록 관심을 가져야 할 것이다. 우리나라도 날로 강화되는 환