

# 친환경 제품 개발 프로세스 조사

김성호<sup>1</sup>, 이지형<sup>1</sup>, 이승훈<sup>1</sup>, 연영희<sup>2</sup>, Batbileg Tsolmonbaatar<sup>3</sup>, 유희천<sup>1</sup>

<sup>1</sup>포항공과대학교 산업경영공학과  
<sup>2</sup>포항공과대학교 기술경영대학원과정  
<sup>3</sup>포항공과대학교 화학공학과

## A Survey of Eco Product Development Process

Sungho Kim<sup>1</sup>, Jihyung Lee<sup>1</sup>, Seunghoon Lee<sup>1</sup>, Younghee Yeon<sup>2</sup>, Batbileg Tsolmonbaatar<sup>3</sup>, and Heecheon You<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology  
<sup>2</sup>Graduate Program for Technology & Innovation Management, Pohang University of Science and Technology  
<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology

### Abstract

친환경 제품 개발에 대한 고객들의 관심과 외부적 요인(예: 국제 환경 규제, 지속가능한 성장)이 증가함에 따라 다양한 친환경 제품 개발 방법 및 전략 연구가 수행되어 왔으나 기업 측면에서 각 방법과 전략을 효과적으로 활용하기 위해서는 이들을 제품 개발 프로세스에 연계시킬 필요가 있다. 본 연구는 친환경 제품 개발과 관련된 방법과 전략을 연구한 논문들을 조사하고, 각 논문에서 연구된 방법과 전략들을 추출하여 ISO TR 14062에서 제안하고 있는 친환경 제품 개발 프로세스에 mapping 하였다. 조사된 논문을 최종 선별한 결과, 친환경 제품 개발 방법 관련 논문 6건, 마케팅을 포함한 전략 관련 논문 12건, 그리고 방법과 전략을 함께 다루고 있는 논문 2건을 포함하여 총 20건의 논문이 선정되었다. 최종 선정된 논문들은 방법과 전략을 동시에 다룬 논문을 포함하여 ISO TR 14062의 친환경 제품 개발 프로세스 planning 단계에 14건, conceptual design 단계에 3건, 그리고 detail design 단계에 6건으로 mapping 되었다. 본 연구에서 mapping을 통해 다양한 연구 결과를 통합시킨 친환경 제품 개발 프로세스는 기업의 제품 개발 시, 제품의 환경영향은 감소시키고, 경제성과 품질은 향상시킬 수 있는 solution 도출과 다양한 이해관계자(고객, 기업, 정부 등)를 만족시킬 수 있는 친환경 제품 개발에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

### 1. Introduction

국제 환경 규제 강화와 지속가능한 성장에 대한 관심의 증대는 기업이 다양한 고객 요구 사항을 충족시킬 수 있는 보다 차별화된 친환경 제품을 개발하도록 요구하고 있다. 국제 환경 규제는 다자간 환경협약(Multilateral environmental agreements, MEAs)과 개별 경제권 또는 개별 국가가 취하는 환경규제로 구성되어 있다(민혁기, 2010). 특히, 유럽연합(EU)은 에코디자인이 적용되지 않은 제품의 시장 진입 금지에 관한 친환경설계의무지침(Eco-design of energy using products, EuP)을 시행하고 있어 기업의 제품 개발에 친환경성 고려가

요구된다(한기주, 2010). 또한 기업은 지속가능한 성장을 위해 에코디자인 도입 및 확대를 적극적으로 고려하고 있다. 고객들은 친환경 제품이 시장에 출시되기 시작할 때와 달리 제품의 친환경성뿐만 아니라 가격 경쟁력, 품질, 사용성, 가치 등 다양한 요구사항을 충족시킬 수 있는 제품을 구매하고자 한다. 그러나 기업이 다양한 고객의 요구사항을 만족시킬 수 있는 친환경 제품을 개발하기 위한 통합적 제품 개발 프로세스, 가이드라인, 고려사항 등에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

기존 친환경 제품 개발은 부품 개선, 플랫폼 변경 등과 같이 부분적 개선(partial improvement)을 통해 이루어지고 있으나 친환경적 혁신 제품의 개발을 위해서는 제품 개발 전과정에 친환경성과 경제성 측면이 고려된 통합 프로세스 연구가 필요하다. 친환경 제품 설계는 제품 전과정의 환경측면을 비용, 품질 등의 요소와 함께 통합적으로 고려하여 환경·경제적으로 우수한 제품을 설계, 생산 및 판매하는 기업경영의 새로운 전략기법이다(환경부, 2002). 기업이 손쉽게 접근할 수 있는 친환경 제품 설계는 기존 제품의 전과정(life cycle)에서 환경영향이 높은 단계와 부품을 분석하고 환경영향을 낮출 수 있도록 부분적인 개선을 수행하는 것이다. Lee et al.(2012)은 환경산업기술원(2010)에서 발간한 에코디자인 프로세스 적용 제품군별 매뉴얼을 사용하여 스탠드형 전기온풍기에 대해 전과정평가(life cycle assessment, LCA)를 수행하고, 환경영향이 가장 높은 것으로 분석된 사용단계에서의 환경영향을 줄이기 위해 모터부 개선을 친환경 제품 설계안으로 제시하였다. 그러나 이러한 부분적인 개선 설계는 제품의 친환경성을 향상시킬 수는 있으나 경제성 측면에 대한 고려가 부족하고, 점진적 혁신(incremental innovation)이 될 수는 있으나 환경, 고객, 기업, 그리고 정부를 포함하는 이해관계자를 모두 만족시킬 수 있는 급진적 혁신(radical innovation)을 성취하는 데에는 한계가 있다.

기존의 친환경 제품 개발 프로세스 연구는 환경영향 평가 방법, conceptual framework 제안 등의 측면에서 이루어지고 있으나 친환경성과 경제성 측면을 프로세스에 통합시키기 위해서는 각 연구결과가 활용될 수 있는 프로세스와 mapping이 필요하다. 전과정평가(LCA)는 환경영향을 평가하는 대표적 방법 중 하나로 제품의 원료 채취 단계에서부터 부품과 제품의 제조, 제품 포장 및 수송, 사용, 그리고 폐기/재활용 단계까지 각 단계의 환경영향을 적절한 지표(예: Kg-CO<sub>2</sub>-eq)를 사용하여 정량적으로 평가하는 방법이다(이지훈, 2013). 친환경 제품 개발을 위한 conceptual framework는 친환경 제품 개발과 관련된 제품의 특성, 이해관계자, 마케팅 방법 등이 다양한 요소가 고려될 수 있는 framework를 제안하고 있다(Umeda et al., 2012). 최근 연구들은 보다 다양한 conceptual framework와 환경영향 평가 및 개선 방법을 개발하고 있는데, 이 새로운 방법들이 친환경 제품 개발 프로세스의 어떤 단계에 적용되는 것이 적합한지 또는 각 단계에서 어떤 방식으로 활용될 것인가에 대한 언급은 미비한 것으로 파악되었다.

본 연구는 친환경 제품 개발 프로세스를 실제 제품 개발에 유용하게 사용할 수 있는 방법과 전략을 다룬 20편의 literature를 review하고 mapping하였다. 먼저, 친환경 제품 개발에 활용될 수 있는 방법과 전략을 다룬 논문을 논문 검색 사이트(Sciverse)를 사용하여 검색하고 관련성이 높은 논문을 선별하였다. 다음으로 최종 선별된 논문은 핵심내용을 파악하여 ISO TR 14062의 친환경 제품 개발 프로세스의 각 단계에 mapping하고, 구체적인 활용방안을 제시하였다.

## 2. Literature Survey Method

본 연구는 친환경 제품 개발에 활용될 수 있는 방법과 전략 등을 조사하고 조사된 내용을 제품 개발 프로세스에 적용하기 위해 3단계 절차인 (S1) 친환경 제품 개발 프로세스 관련 keyword 선정, (S2) 유관 논문 검색 및 선별, (S3) 제품 개발 프로세스 mapping & integration을 수행하였다. 첫 번째 단계(S1)에서는 다양한 친환경 제품 개발 프로세스 관련

방법 및 전략과 관련하여 eco product design process, life cycle assessment, sustainability, new product development, innovation, 그리고 strategy를 keyword로 선정하였다. 두 번째 단계(S2)에서는 논문 검색 사이트인 Sciverse(<http://www.hub.scivers.com>)에서 선정된 keyword들을 활용하여 친환경 제품 개발 프로세스 유관 논문 600여건을 검색하였다. 검색된 논문은 친환경 제품 개발 프로세스 관련 여부를 title screening을 통해 1차 선별(198건), abstract screening을 통해 2차 선별(74건)하였고, 관련성 정도에 따라 상·중·하로 분류하여 상과 중에 속하는 20건의 논문을 최종적으로 선정하였다(Table 1). 마지막 단계(S3)에서는 최종 선정된 20건의 논문을 review하여 친환경 제품 개발 프로세스에 활용될 수 있는 방법과 전략들을 조사하였다. 조사된 결과는 Schischke et al.(2005)에 인용된 ISO TR 14062의 친환경 제품 개발 프로세스(S1. planning, S2. Conceptual design, S3. detail design, S4. Testing/Prototype, S5. Market launch, S6. Product review)의 각 단계에 mapping하고 통합하였다.

Table 1. Eco product design process related papers

No.	Category	Authors(year)	Title	Journal, Vol., Pages
1	Method	Bocken et al. (2012)	Development of a tool for rapidly assessing the implementation difficulty and emissions benefits of innovations	Technovation, 32(1), pp.19–31
2	Method	Chu et al. (2012)	A concurrent approach to reducing environmental impact of product development at the system design stage	IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 9(3), pp.482–495
3	Method	Yeh et al. (2011)	Integration of four-phase QFD and TRIZ in product R&D: A notebook case study	Research in Engineering Design, 22(3), pp.125–141
4	Method	Gehin et al. (2009)	Integrated design of product lifecycles: The fridge case study	CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 1(4), pp.214–220
5	Method	Dufulou et al. (2008)	Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study	CIRP Annals-Manufacturing Technology, 57(2), pp.583–600
6	Method	Parlikad & McFarlane (2007)	RFID-based product information in end-of-life decision making	Control Engineering Practice, 15(11), pp.1348–1363
7	Strategy	Driessen et al. (2013)	Green new product development: The pivotal role of product greenness	IEEE Transactions on Engineering Management, 60(2), pp.315–326
8	Strategy	Piekarski et al. (2013)	Life cycle assessment as entrepreneurial tool for business management and green innovations	Journal of Technology Management & Innovation, 8(1), pp.44–53
9	Strategy	Ramirez et al. (2013)	Barriers and bridges to the adoption of environmentally-sustainable offerings	Industrial Marketing Management, in press
10	Strategy	Epstein et al. (2012)	Managing social, environmental and financial performance simultaneously	Long Range Planning, in press
11	Strategy	Lee & Lam (2012)	Managing reverse logistics to enhance sustainability of industrial marketing	Industrial Marketing Management, 41(4), pp.589–598
12	Strategy	Liu et al. (2012)	A hub-and-spoke model for multi-dimensional integration of green marketing and sustainable supply chain management	Industrial Marketing Management, 41(4), pp.581–588
13	Strategy	Masoudi et al. (2012)	Characterization of eco-design checklists.	Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 29(9), pp.946–970.
14	Strategy	Umeda et al. (2012)	Toward integrated product and process life cycle planning: An environmental perspective	CIRP Annals-Manufacturing Technology, 61(2), pp.681–702
15	Strategy	Hockerts & Wustenhagen (2010)	Greening Goliaths versus emerging Davids: Theorizing about the role of incumbents and new entrants in sustainable entrepreneurship	Journal of Business Venturing, 25(5), pp.481–492
16	Strategy	Holt & Barnes (2010)	Towards an integrated approach to “Design for X”: An agenda for decision-based DFX research	Research in Engineering Design, 21(2), pp.123–136
17	Strategy	Coley & Lemon (2009)	Exploring the design and perceived benefit of sustainable solutions: A review	Journal of Engineering Design, 20(6), pp.543–554
18	Strategy	Pujari (2006)	Eco-innovation and new product development: Understanding the influences on market performance	Technovation, 26(1), pp.76–85
19	Method & Strategy	Kuo (2006)	Enhancing disassembly and recycling planning using life-cycle analysis	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22(5–6), pp.420–428
20	Method & Strategy	Kobayashi (2005)	Strategic evolution of eco-products: A product life cycle planning methodology	Research in Engineering Design, 16(1–2), pp.1–16

### 3. Results

최종 선정된 20개의 논문은 핵심 내용을 중심으로 친환경 제품 개발 방법(6건), 전략(12건), 그리고 방법과 전략을 동시에 다루고 있는 논문(2건)으로 분류되었다(Table 1). 친환경 제품 개발 방법은 총 여덟 가지가 조사되었으며, 각 방법들은 conceptual design과 detail design 단계에 적용 가능한 것으로 파악되었다(Fig. 1). Bocken et al.(2012)의 pain measurement model은 conceptual design 단계에서 친환경적 혁신(eco-innovative) 아이디어의 적용 가능성을 정량적으로 평가하는 방법으로 기술(technology), 공급 사슬(supply chain) 그리고 제품 컨셉(product concept)을 신규성 측면에서 평가하여 아이디어의 효용성 판단과 제품 개발의 의사 결정에 활용된다. Gehin et al.(2009)의 lifecycle brick은 개발자들이 제품의 life cycle을 쉽게 고려할 수 있도록 간단한 고려사항 목록과 해당 목록에 관련된 데이터를 수집할 수 있도록 한 방법으로 detail design 단계에 적용되어 제품의 상세 life cycle 설계에 유용하게 활용될 수 있다. Chu et al.(2012)의 CAD와 LCA를 통합한 방법은 detail design 단계에서 제품의 기능적 필요조건을 충족시키는 동시에 환경영향을 최소화하는 자재 명세서(BOM, bill of materials) 생성에 사용될 수 있다. Yeh et al.(2011)의 QFD(quality function deployment)와 TRIZ(theory of inventive problem solving) 통합 방법은 고객 needs 파악, 제품 특성 결정, 그리고 부품 제작 방식 및 방법 전반의 친환경적 solution을 찾아내는 방법으로 conceptual design과 detail design 단계에 활용될 수 있다. Parlikad and McFarlnae(2004)의 RFID(radio frequency identification) 시스템 도입 방법은 제품의 제조부터 폐기 단계까지 제품의 모든 이력을 데이터베이스화하여 제공함으로써 개발자가 수집된 정보를 활용하여 제품을 설계할 수 있도록 detail design 단계에 활용된다. Kuo(2006)의 full modeling technique은 제품의 구성 성분을 module로 구분하고 module간 연관관계를 LCA에 기반하여 분석함으로써 제품설계 시 환경적 영향을 줄이는 동시에 제품의 기능적 필요조건을 충족시키는 설계가 가능하도록 하여 detail design에 적용 가능한 방법이다. Kobayashi(2005)의 LCA와 QFD 통합 방법은 LCA 결과를 QFD 수행에 활용하는 방법으로 conceptual design과 detail design 단계에 활용될 수 있다.

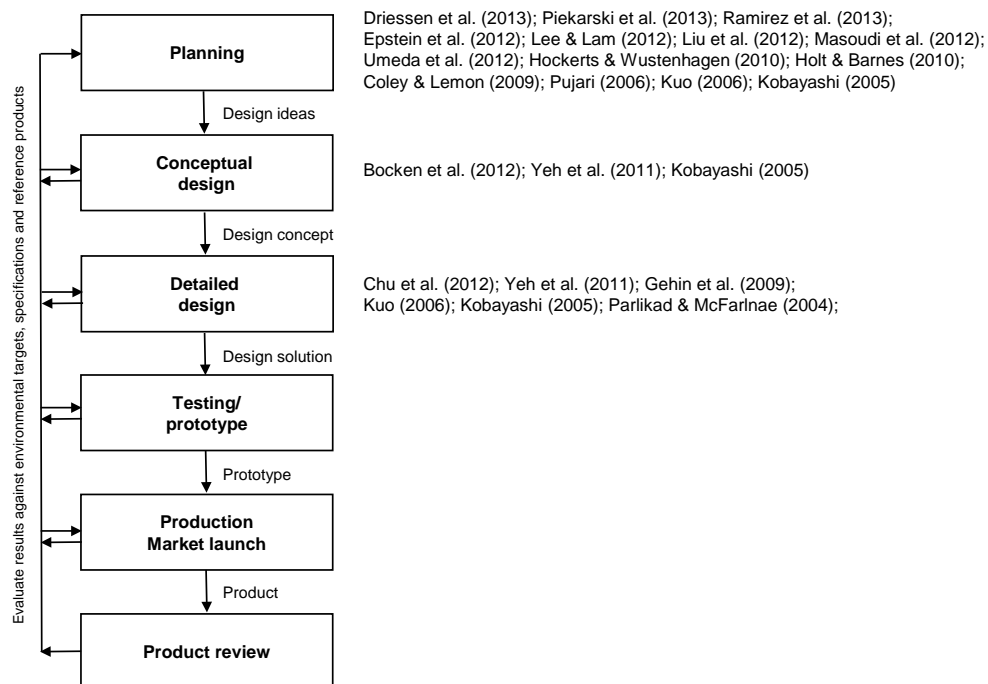


Fig. 1. The mapping tools and strategies on eco-product development process

친환경 제품 개발 전략은 총 14가지가 조사되었고 이들은 *planning* 단계에서 활용될 수 있는 것으로 파악되었다. Holt and Barnes(2010)는 다양한 친환경 제품 개발 시, 이해관계자들의 요구 조건인 *virtue*와 제품의 *life cycle*을 *planning* 단계에서 고려하는 전략을 제안하였다. Pujari(2006)은 *eco-innovation activities*와 시장에 영향을 미치는 *factor*들을 탐색하여 *planning*에 활용될 수 있는 전략을 제시하였다. Driessen et al.(2013)은 고객, 경쟁사, 시장과 직접 관련되지 않은 이해관계자, 그리고 정부 정책을 고려하여 친환경 제품을 개발하는 *integrative framework*를 전략으로 제안하였다. Umeda et al.(2012)은 제품 컨셉, *life cycle* 옵션, *business* 옵션을 통합하여 *planning*할 수 있는 *framework*를 전략으로 제안하고 있다. Coley and Lemon(2009)은 *PSS*(*product service system*), *Eco-efficient PSS*, *SOP*(*solution-oriented partnership*), 그리고 *WSD*(*whole-system design*)의 네 가지 *design* 접근법을 제안하여 *designer*가 폭넓을 시야를 가지고 *planning*할 수 있는 전략이 제시되었다. Ramirez et al.(2013)는 환경적으로 지속가능한 *offerings*의 채택에 영향을 미치는 *factor*들을 극복할 수 있는 전략을 제시하고 있어 *planning* 단계에서 적용될 수 있다. Piekarski et al.(2013)은 *LCA*를 *management*와 *green innovation* 단계에서 활용할 수 있도록 전략을 제시하고 있어 경제적 측면의 *planning*이 가능하다. Hockerts and Wustenhagen(2010)은 중소기업과 대기업이 성공적으로 친환경 제품을 시장에 도입시킬 수 있는 전략을 제시함으로써 기업 규모에 적합한 *planning* 수립에 활용될 수 있다. Epstein et al.(2012)는 기업의 의사결정 시 사회적, 환경적 성과와 재정적 성과를 동시에 성취할 수 있도록 하는 시나리오를 제시하고 있어 친환경 제품이 가격 경쟁력을 가질 수 있도록 *planning* 하는데 활용될 수 있다. Liu et al. (2012)는 친환경 제품의 지속적 공급을 위해 *sustainable supply chain management*에 *green marketing*이 통합된 *framework*를 제안하고 통합 과정의 *drivers*와 방해요소를 제시하고 있기 때문에 보다 친환경적으로 제품의 보급이 이루어 질 수 있도록 *planning*하는데 활용될 수 있다. Lee and Lam(2012)의 친환경 지속가능 마케팅 *framework*는 기업이 경쟁적 우위를 달성하기 위한 친환경 브랜드 전략 수립 도구로 활용될 수 있기 때문에 *planning* 단계에서 사용될 수 있다. Masoudi et al.(2012)는 *LCA*, *MET Matrix*, *Eco design priority matrix* 등과 다양한 *checklist*들의 특성을 분석하고 있어 *planning* 단계 수행에 적합한 *checklist*를 선정하여 사전에 제품 전과정의 환경성을 검증해 볼 수 있다. Kuo(2006)는 *LCA*를 기반으로 제품 조립 및 분해와 재활용을 *module* 측면에서 분석하기 때문에 친환경 제품 개발 시 제품 분해와 재활용 측면을 고려한 *planning*에 도움을 줄 수 있다. Kobayashi(2005)는 *LCA* 결과를 *QFD*에 활용함으로써 제품의 *life cycle*을 효율적으로 *planning*할 수 있는 방법을 제시하고 있어 친환경 제품 개발 *planning* 단계에 유용하게 활용될 수 있다.

#### 4. Discussion

본 연구는 산발적으로 수행되어 온 친환경 제품 개발 방법 및 전략에 관한 연구 결과를 친환경 제품 개발 프로세스 ISO TR 14062(2002)의 각 단계에 *mapping* 함으로써 제품 개발 초기 단계부터 친환경성과 경제성을 동시에 고려할 수 있다는 점에서 그 의미가 있다. 기존 연구에서는 친환경 제품 개발과 관련된 연구들이 각 연구의 목적에 따라 부분적으로 수행되었다. 예를 들면, Bocken et al.(2012)은 친환경 제품의 *idea*를 선정할 때 *pain measurement model*을 개발하여 *idea*의 실현가능성을 검토하고자 하였고, Masoudi et al.(2012)는 제품의 특성에 따른 *eco-design checklist*를 적용하여 제품의 환경성을 평가하고자 하였다. 그러나 각 논문에서 제시된 방법과 전략들이 활용될 수 있는 제품 개발 프로세스를 명확하게 제시하고 있지 않아 기업과 개발자들이 연구결과를 실제 제품 개발에 사용하는 데에는 어려움이 있었다. 본 연구는 친환경 제품 개발에 활용될 수 있는 다양한 전략들은

planning 단계에, 친환경 제품 개발 방법들은 각 방법의 특성과 용도에 맞게 conceptual design 또는 detail design 단계에 mapping하였다. 따라서 개발자들은 친환경 제품 개발 시 제품 개발 프로세스의 각 단계별 고려사항을 쉽게 파악할 수 있고, 제품의 특성에 따라 선택적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 조사된 논문의 약 60% 이상이 친환경 제품 개발 프로세스 중 planning 단계에 활용되는 논문으로 친환경 제품 개발을 위해서는 planning 단계가 중요한 것으로 사료된다. 본 연구에서 조사된 총 20개의 논문 중 6개의 논문은 conceptual design과 detail design 단계에만 활용될 수 있으며 12개의 논문은 planning 단계에만, 그리고 마지막 2개의 논문은 planning과 conceptual design 또는 detail design 단계에 활용될 수 있는 것으로 파악되었다. Planning 단계에 활용 가능한 14개의 논문의 게재연도를 살펴본 결과, 12개의 논문이 최근 5년 이내 게재된 논문으로 파악되었다. 그 이유는 친환경 제품에 대한 관심이 증대된 것뿐만 아니라 친환경 제품은 개발 과정에서 제품의 전과정을 고려해야 하고 폐기 단계 이후에는 재사용 및 재활용도 고려해야 하기 때문에, planning 단계가 중요함을 파악하였기 때문으로 사료된다. 또한 친환경 제품일지라도 제품의 품질, 가격, 그리고 디자인이 만족스럽지 않은 경우 소비자 대부분이 해당 제품을 구매하지 않는 소비성향이 나타나고 있다(범상균과 송균석, 2010). 이로 인해 친환경 제품의 가치를 효과적으로 보여줄 수 있는 그린마케팅의 중요성이 증가되고 있어, planning 단계에 활용할 수 있는 논문의 비율이 증가 추세에 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 제안된 친환경 제품 개발 프로세스의 효용성 파악을 위해서는 실제 친환경 제품 개발에 제안된 프로세스를 활용하고 제품의 환경성, 경제성을 정량적으로 평가하는 사례 연구가 필요하다. 본 연구에서는 친환경 제품 개발 프로세스에 기존 연구들의 방법과 전략을 mapping하여 통합 프로세스를 수립하였다. 그러나 친환경 제품 개발은 제품의 특성과 기업의 의도에 따라 추구하는 친환경성과 경제성의 방향이 달라질 수 있다. 따라서, 새롭게 수립된 프로세스의 효용성 파악을 위해서는 본 프로세스를 다양한 친환경 제품 개발에 적용해 보고 그 제품의 환경성과 경제성에 대한 정량적 평가가 필요할 것으로 생각된다. 또한 앞으로 축적될 case study 결과는 제품의 특성에 적합한 친환경 제품 개발 프로세스를 간편하게 파악할 수 있는 supporting system 개발에 활용될 수 있다.

## 사 사

This work is financially supported by Korea Ministry of Environment (MOE) as “EcoDesign Human Resource Development Project.”

## Reference

- 1) 범상균, 송균석, “NON 호모이코노미쿠스”, 네시간(2010).
- 2) 민혁기, “글로벌 환경규제의 현황과 시사점”, 산업연구원 산업경제, 139(1), pp. 40-49(2010).
- 3) 이지형, 곽원식, 김재정, 박장호, 권력환, 장필중, 서응수, 송창민, 이준만, 이화조, 유희천, “전과정평가를 통한 스탠드형 전기 온풍기의 친환경적 제품 설계 개선 전략”, 대한산업공학회, *대한산업공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 2049-2053(2012).
- 4) 이지훈, “전과정 평가 방법에 의한 한국 대형선망의 온실가스 배출량 정량적 분석”, 한국어업기술학회지, 49(3), pp. 282-290(2013).

- 5) 환경산업기술원, “에코디자인 프로세스 적용 제품군별 매뉴얼”(2009).
- 6) 한기주, 광대중, “환경규제를 역이용한 세계시장 선점 전략 발굴연구”, 산업연구원(2010).
- 7) Schischke, K., Hagelucken, M., Steffenhagen, G., “An Introduction to EcoDesign Strategies – Why, What and How?”, Brussels(2005).
- 8) Umeda, Y., Takata, S., Kimura, F., Tomiyama, T., Sutherland, J., Karaf, S., Herrmann, C., Duflou, J., “Toward integrated product and process life cycle planning: An environmental perspective”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 61, pp. 681-702(2012).