

개념 설계 단계에서 인공 신경망을 이용한 제품의 Life Cycle Cost 평가 방법론

서광규*, 박지형#

A Methodology on Estimating the Product Life Cycle Cost using Artificial Neural Networks in the Conceptual Design Phase

Kwang-Kyu Seo*, Ji-Hyung Park#

ABSTRACT

As over 70 % of the total life cycle cost (LCC) of a product is committed at the early design stage, designers are in an important position to substantially reduce the LCC of the products they design by giving due to life cycle implications of their design decisions. During early design stages, there may be competing concepts with dramatic differences. In addition, the detailed information is scarce and decisions must be made quickly. Thus, both the overhead in developing parametric LCC models for a wide range of concepts, and the lack of detailed information make the application of traditional LCC models impractical. A different approach is needed, because a traditional LCC method is to be incorporated in the very early design stages. This paper explores an approximate method for providing the preliminary LCC. Learning algorithms trained to use the known characteristics of existing products might allow the LCC of new products to be approximated quickly during the conceptual design phase without the overhead of defining new LCC models. Artificial neural networks are trained to generalize product attributes and LCC data from pre-existing LCC studies. Then the product designers query the trained artificial model with new high-level product attribute data to quickly obtain an LCC for a new product concept. Foundations for the learning LCC approach are established, and then an application is provided.

Key Words: Life Cycle Cost (LCC), Product attribute (제품 속성), Artificial neural networks (인공신경망)

1. 서론

최근 제품 생산 형식은 주로 소비자의 다양한 요구를 충족시키기 위한 다품종 적량생산체제로 바뀌어 가고 있다. 제품소비 패턴도 크게 달라져

제품 교체 시점이 종래에는 내구 한계이던 것이 최근에는 유행의 변화로 전환되어 가는 경향을 보이고 있다. 소득의 증가와 함께 인건비의 상승, 고급재료의 사용 등으로 인한 대형 폐기물의 처리 문제가 점점 더 심각해지고 있는 실정이다.

접수일: 2004년 3월 12일; 게재승인일: 2004년 5월 7일

* 상명대학교 산업정보시스템공학과

교신저자: 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터

E-mail : jhpar@kist.re.kr, Tel. (02) 958-5631

이러한 현실을 타개하기 위하여 최근 환경 법규는 폐기물의 감량화 또는 재자원화를 유도하는 방향으로 법규의 제정 또는 개정이 이루어지고 있다. 우리나라에서 이미 시행 중인 폐기물의 회수 및 처리 비용 등과 같은 예치금 제도는 이러한 개념을 바탕으로 하고 있으며 이미 유럽연합 (EU)에서 시행 중인 "Take-Back Law" 나, 미국의 캘리포니아 주의 경우처럼 궁극적인 폐기자 역할을 소비자가 하는 대신 이 비용을 생산자가 부담하는 "Front-End Fee" 법안이 입안되어 이미 실행되고 있는 경우가 대표적인 사례이다. 이처럼 점차 심화되어 가고 있는 환경규제 속에서 기업이 경쟁력을 가지고 살아 남기 위해서는 이러한 추가적인 비용을 피하거나 절감하는 노력이 절실히 요구된다.

환경 보호를 위한 관심이 전 지구적인 차원에서 증대되면서 환경문제는 가장 민감하고 긴급한 국제 협력 과제의 하나로 등장하고 있다. 수많은 비정부 조직 (NGO)이 활발하고 강력한 활동을 벌이고 있으며, 각국 정부의 이에 대한 노력의 결과는 다양한 형태의 국제적 협약으로 나타나고 있는데, 이들은 실효성을 확보하기 위해 다양한 형태의 무역규제 조치를 취하고 있다.

1993년 말 타결된 우루과이 라운드 (UR)를 계기로 환경과 무역을 연계한 다자간 협상인 그린 라운드 (GR)의 등장에 따라 향후 환경문제는 제품뿐 아니라 제조공정, 국가별 환경기준의 차이에 따른 상계관세 부과, 기업활동 전반에 걸친 환경 표준의 설정 등으로 구체화 되고 있다.

환경에 대한 관심이 고조되고 이에 대응하기 위한 국내·외의 규제와 무역장벽이 강화되면서 이에 대한 적절한 대응책이 요구되며, 적절히 대처하지 못하는 기업들은 결국에는 시장 경쟁력을 잃게 되어, 세계 시장에서 살아 남지 못하게 된다. 이에 대한 요구로써 제품의 life cycle 동안의 환경성을 평가하기 위한 대한 개념으로 시작된 방법이 LCA (Life Cycle Assessment; 전과정평가) 기법인데¹, LCA 수행결과는 회사를 운영하는 경영자나, 설계자, 엔지니어들에게는 이해하기 어려운 전문적인 환경 지식이다.

이와 같이, LCA 결과를 회사의 경영이나 제품 설계 그리고 생산관리 분야에 잘 적용하기 어렵기 때문에, 제품의 life cycle 동안 발생하는 비용을 평가하기 위한 연구가 절실히 요구된다. 제품의

life cycle 동안에 발생하는 비용 평가치를 제공하여 주면, 경영자가 회사를 경영하고 설계자가 제품을 설계하고 그리고 엔지니어들은 생산공정을 관리하는데 많은 도움을 받을 수 있다.

기존 제품과 관련된 비용은 제품의 제조단계에서의 비용만을 주로 고려해 왔으나, 제품의 제조 단계 외에 제품의 사용 단계 그리고 제품의 폐기 단계에 이르는 제품의 life cycle 동안에 발생하는 모든 비용을 고려하는 기법이 바로 life cycle cost (LCC) 개념이다. 이는 보다 환경친화적인 회사의 경영과 제품의 설계 그리고 생산활동을 이루게 되어 회사 전체 및 제품의 환경우위성은 물론 비용의 절감 등 다양한 효과를 얻을 수 있다. 그러나 이렇게 LCC 를 고려하는 것은 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 많은 시간과 비용이 소요되는 작업이므로 이를 좀 더 효과적으로 수행할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 LCC 방법의 적용 시 많은 시간과 비용이 소요되는 점을 개선하기 위하여, 설계초기단계에서 제품의 LCC 를 평가할 수 있는 새로운 방법론을 제안한다. 이를 위해서 본 연구에서는 제품의 전과정 동안의 모든 비용들을 평가할 수 있는 상위 단위의 제품 속성들 (product attributes)을 개발하고, 실제 LCC 를 수행한 결과를 조사한다. 제품 속성들과 LCC 결과를 가지고 인공 신경망 (artificial neural networks; ANNs) 기법을 이용하여 제품의 LCC 를 초기설계단계에서 평가할 수 있는 방법을 개발하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 관련 연구 고찰

최초의 LCC 개념은 미국 국방부 (US Department of Defense; DoD)에 의해 도입되었는데, 이 개념을 이용해 재래 무기 시스템의 운용 및 유지 비용이 총비용의 75 %를 차지한다는 시뮬레이션 결과가 보고되었다.² 미국 국방부에서 개발한 방법론은 제품의 설계를 위한 방법이 아니라 예방·보전의 목적으로 개발되었다. 제품이나 서비스 생산 시스템을 위한 계획이나 통제 분야에 광범위한 부분의 경제성 평가를 위한 필요성이 인식되었고, 이에 따라 미국 국립 과학

재단의 후원으로 광범위한 부분의 경제성을 평가하기 위한 산학간의 학술대회 등이 활성화되기 시작하였다. 이를 바탕으로 LCC 에 대한 논의가 활발하게 진행되었고, LCC 를 평가하기 위한 경제성 모델 등과 이의 적용 사례들에 관한 연구들이 수행되고 있다.

제품의 LCC 를 평가하기 위해 수행된 선행 연구들은 다음과 같다.

LCC 분석을 위한 비용 모델은 크게 LCC 분석을 위해 사용될 프레임 워크를 개발하거나, 비용 평가를 위해 사용될 모델을 개발하는 두 가지 방향으로 진행되었다. 대부분 이러한 모델들은 제품 life cycle 의 특정한 단계에서 사용하기 위한 모델이거나 특정한 life cycle 단계의 작업들을 평가하기 위해 개발되었다.

Greenwood 와 Reeve³ 는 대안이 있는 제품 설계나 제품 생산에서 활동과 공정 비용을 예측하여 운용 의사결정을 도와줄 수 있는 모델을 개발하였다. 이 모델은 공정 분석, 제품 비용 그리고 시뮬레이션 기법을 이용하여 분석되거나 전체 프레임 워크에 대한 이해가 어렵고, 실제로 비용 예측을 위해 사용하기 위한 의도로 개발되었으나 다루기가 어려워 적용하기에 적합하지 않다.

Noble 와 Tanchoco⁴ 는 시스템의 동시공학적인 설계와 경제성 평가를 위한 개념적 프레임 워크를 제안하였다. 이들은 시스템의 서로 다른 설계 대안들의 잠재적 비용을 평가하여 최적의 의사결정을 내리기 위한 방법을 제안하였다. 이 모델의 프레임 워크 자체는 매우 유용하나, 비용 평가 방법이 과거의 평가 방법이기 때문에 정확한 비용의 추적이 용이하지 않은 단점이 있다.

다단계를 통합한 의사결정 모델은 제조공정의 각 단계에서 경제성 평가에 의한 제품과 공정 설계의 의사 결정을 내릴 수 있는 것으로 Oh 와 Park⁵ 에 의해서 제안되었다. 이 연구에서는 총 제조 비용을 생산 비용, 품질 비용, 유연성 비용, 그리고 재고 비용의 네 범주로 구분하여 설계 대안 별 비용 평가를 가능하게 하였다. 최적화는 동적 프로그래밍 방법을 이용하여 총 생산 비용을 최소로 하는 대안을 구하였다.

Ong⁶ 은 초기 개념 설계 단계에서 PCB 조립공정의 비용 평가에서 설계자들에게 도움을 줄 수 있는 ABC (activity-based cost) 평가 시스템을

개발하였다. PCB 조립에 투입되는 활동들의 총량에 기반을 두어 비용을 할당하는 방법이다. Ong 은 이 방법을 개념 설계 단계에서 적용하려고 하였으나, 실제 데이터들은 개념 설계에서 활용이 어려운 점이 있었다.

제조를 위한 설계 연구프로그램으로 미국의 Rhode Island 대학에서 수행한 조립 부품들에 대한 비용 평가 연구들이 있다.^{7, 8} 이 연구들의 목적은 설계자나 설계 팀들이 상세 설계를 수행하기 전에 재빨리 비용 정보를 획득하는데 있다. 연구들은 기계 부분, 인젝션 몰딩 부분, 다이 캐스트 부분 그리고 스위트-메탈 스탬핑으로 나누어서 수행되었다.

서비스를 고려한 설계의 평가방법으로서의 서비스 모델 분석 개념은 Gershenson 와 Ishii⁹ 에 의해 제안되었다. 이 모델은 제품의 life cycle 동안에 필요한 서비스를 제시하고 그 비용을 평가하는 방법이다.

Navinchandra¹⁰ 는 ReStar 로 불리는 CAD 도구를 개발하였다. ReStar 는 최적 분해 순서를 결정하기 위한 도구로, 이를 위해 분해 단계의 비용 평가를 수행하였고, 이를 기반으로 한 최적 분해 순서를 결정하였다.

Emblemsvag 와 Bras¹¹ 는 ABC 기반의 비용 모델을 제안하였는데, 이 모델은 비용적으로 가장 효율적인 설계안을 얻기 위한 의사결정과정을 설명하고 있다. 이 논문에서는 제품의 재활용에 대한 사례를 들었는데 재활용 공정의 활동들을 계층적으로 구분하고 각 활동들의 비용 요인들을 추적하여 총 비용을 줄일 수 있는 방안을 제시하였다.

Emblemsvag 와 Bras¹² 는 그들의 연구를 확장하였는데, 이 연구에서는 과거의 비용 평가 시 제시된 불확실성을 평가할 수 있는 함수를 제시하여 불확실성을 다룰 수 있는 방안을 제안하였다.

기존의 연구들이 여러 면에서 유용성을 갖춘 방법들이긴 하지만 제품의 개념 설계 단계에서 제품의 LCC 를 평가하기에는 적절하지 못한 부분이 있다. 선행 연구 방법들로는 개념 설계 단계에서 높은 차원의 다중 제품 속성의 정량적 정보들의 획득이 용이하지 않기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 단점들을 극복하고 개념 설계 단계에서 제품의 속성 정의 및 LCC 를 평가하기

위한 연구가 수행된다

2.2 개념 설계

Ulrich 와 Eppinger¹³ 는 제품 개발 단계를 개념 개발, 시스템 수준의 설계, 상세 설계 평가 및 개선 그리고 생산의 다섯 단계로 정의하였다. 이 중에서 개념 설계동안에 발생하는 중요한 활동들을 Fig. 1 과 같은 단계들로 구분하였는데, 개념 설계 단계에서는 기본적인 제품의 형태, 기능 그리고 특징을 묘사할 뿐만 아니라 제품 전과정의 특징들에 많은 영향을 미친다고 하여 그 중요성을 강조하였다.

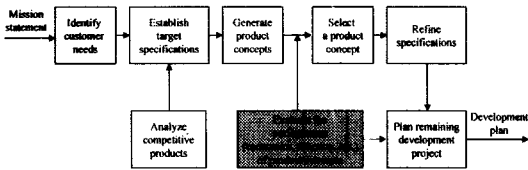


Fig. 1 The concept development process

개념 설계 단계는 비용에서부터 환경 영향에 이르기까지의 제품의 기본적인 특성들이 정의되는 단계이다. 이 단계동안에 결정하는 제품의 속성들은 제품수명의 전과정을 이루고 있는 다른 모든 단계에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 개념 설계 단계에서는 반드시 환경적인 측면뿐만 아니라 제품수명의 전과정에서 발생하는 비용 요인들도 고려해야 한다. 만약 이 단계에서 제품수명의 전과정 동안의 비용에 대하여 적절히 평가를 내릴 수 있다면, 이는 제품의 가격이나 성능 그리고 환경에 대한 경쟁우위를 확보할 수 있다. 즉, 제품을 설계하는 설계자는 설계 과정 중 초기 단계인 제품의 개념 설계 단계에서 반드시 제품의 LCC 를 평가해야만 한다.

개념 설계 단계에서 내린 의사결정은 추후에 변화시키기가 매우 어렵다. 만약 차후에 개념 설계 단계에서 설계한 내용을 변경하려면 시간, 노동력 그리고 비용을 비롯한 많은 자원의 소모가 발생한다. 따라서 개념 설계 단계에서 제품의 환경에 대한 고려와 제품수명 전과정 동안에 발생하는 비용에 대한 고려는 매우 중요하다.

일반적으로 제품을 개발하는 동안에 시간은 부족하다. 제품 개발 시간은 산업 현장에서

제품의 출시 시기와 직결되어 제품이 시장에서 선도제품이 되느냐 후발제품이 되느냐를 결정하여 회사의 수익에 막대한 영향을 미치게 된다. 따라서 제품의 개념 설계 단계에서 다양한 제품의 개념을 상세히 설계하는 것은 시간 부족이라는 제약성에 부딪히게 된다. 또한, 개념 설계 단계에서는 정보가 부족하여 서로 다른 아이디어들을 평가하는데 필요한 모델을 만드는 데 중요한 장벽이 된다.

3. 학습 LCC 모델의 개발

3.1 학습 LCC 개념

본 연구에서 제안하는 학습 LCC 모델 (Learning LCC model)은 기존의 방법들과 달리 제품 수명의 전과정에 대한 비용 평가 모델을 자세히 모델링 할 필요가 없다. 학습 알고리즘은 개발한 상위 레벨의 제품 속성들과 이에 대응하는 제품의 LCC 결과를 이용하여, 인공 신경망(ANNs)에 적용하여 학습시킨다. 여기에서 학습 데이터로 사용되는 LCC 결과는 문헌상의 데이터와 실제로 제품의 LCC 를 수행한 결과를 이용한다. 이 학습을 통하여, ANN 은 기존의 LCC 연구의 결과를 학습시킬 수 있고, 제품들간의 LCC 를 일반화시킬 수 있는데 이에 대한 절차는 Fig. 2 에 나타나 있다.

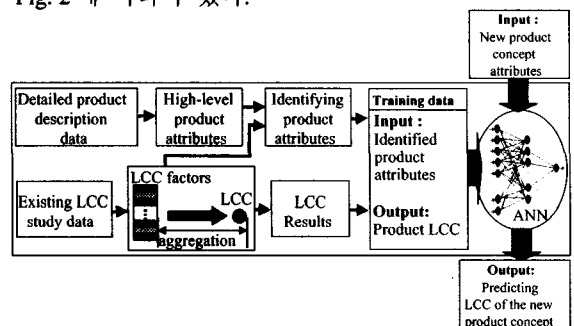


Fig. 2 Training process of a learning LCC model

제품 설계자는 새로운 개념의 제품에 대한 LCC 결과를 빨리 얻으려면, 새로운 개념의 제품에 상위 레벨의 제품 속성들을 가지고 이 학습된 신경망 모델에 질의하면 된다. 설계자는 단지 새로운 개념의 제품에 상위 레벨의 제품 속성들을 제공하기만 하면, 실제의 제품들과 LCC 연구들을

학습시킨 인공 신경망에 의해 새로운 제품의 LCC 결과를 얻을 수 있다.

이 학습 LCC 모델은 상세하게 수행된 LCC 결과들로부터 학습하게 되나, 개념 설계단계에서 사용할 수 있는 데이터를 가지고 학습을 수행할 수 있게 해 주는 상위 수준의 인터페이스를 가지고 있다. 제안된 인터페이스는 새로운 제품의 개념들의 LCC 예측을 위해 복잡하고 시간이 오래 걸리는 새로운 LCC 모델을 만들 필요 없이, 학습 LCC 모델을 통하여 새로운 LCC 정보를 활용하게 해줌으로써 이 모델의 유연성을 증가시킨다. 결국, 이를 통해 새로운 제품의 개념들에 대한 LCC 성능을 빠르게 비교해 봄으로써, 제품의 개발 시기를 단축시킬 수 있다.

그러나, 학습 LCC 모델이 기존의 상세한 LCC 평가를 완전히 대신할 수 있다는 것은 아니며, 다만 상세한 LCC 평가를 어느 정도 보완할 수는 있다. 설계초기단계에서 학습 LCC 모델은 매우 다양하게 존재하는 새로운 제품의 개념들에 대한 LCC 결과를 빠르게 제공해 줄 수 있다. 제품 개발 시, 개념 설계 단계에서 학습 LCC 모델을 통해 얻은 가장 낮은 LCC 를 가지고 있는 제품의 개념을 선택하고, 제품 설계의 차후 단계에서는 필요하다면 상세한 LCC 를 수행하여 보다 좋은 제품의 설계를 수행하는 것이 바람직한 방법이라고 할 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안하는 개념설계단계에서 학습 LCC 와 상세한 LCC 를 상호 보완하여 사용하는 것이 가장 좋은 방법이라고 할 수 있다.

3.2 학습 LCC 모델의 개발

학습 LCC 모델은 다음과 같은 주요 구성 요소로 구성되어 있고, LCC 모델을 위해서는 이 요소들이 개발되어야 한다.

- (1) 입력값 (Input)으로 사용되는 의미 있는 제품 속성들 (product attributes)
- (2) 출력값 (Output)으로 사용되는 유용한 제품의 LCC factors
- (3) LCC 평가를 위한 입·출력 학습 데이터
- (4) 인공신경망을 이용한 학습 LCC 모델

인공신경망의 입력값으로 사용되는 제품 속성들은 설계자들에게 의미 있어야 하고, 개념

설계 단계 동안 전형적으로 알려진 제품의 속성들로 구성되어야 한다. 출력값으로 사용되는 LCC 결과들도 설계자나 환경 전문가 그리고 비용 평가 전문가들이 이해하기 쉽고 활용하기 쉬운 유용한 형태를 가지고 있어야 한다. 일반적으로 이 두 데이터들은 데이터베이스를 구축하여 관리하는 것이 바람직한데, 학습 LCC 데이터베이스는 제품들의 범위를 표현하여야 하고, 많은 완벽한 제품 속성 데이터로 이루어진 입력값과 이에 대응하는 LCC 출력값을 포함하고 있어야만 한다.

마지막으로 학습 모델의 구조가 선택되고, 학습되고 그 유효성이 증명되어야 한다. 실제 적용시, 학습 LCC 모델은 빠르고 합당한 LCC 평가결과를 제공해 주어야만 한다.

따라서, LCC 모델의 개발을 위해서는 LCC 데이터와 상관관계를 가지고 있고, 이를 확인할 수 있는 적당한 제품 속성들과 이에 대응하는 제품의 LCC 결과를 개발하여야만 한다. 그리고 이를 기반으로 제품 개념 설계 단계에서 LCC 를 예측할 수 있는 학습 LCC 모델이 개발되어야만 한다. LCC 학습 데이터베이스는 이러한 연구 내용을 평가할 정보들을 수집하는 과정을 통해서 개발된다.

3.2.1 LCC Factors 의 확인

본 절에서는 학습 모델에서 출력값으로 사용되는 LCC factors 를 확인한다.

제품의 LCC 는 제품의 life cycle 동안의 개발 단계별로 그리고 회사 비용(Company cost), 사용자 비용(User cost), 그리고 사회 비용(Society cost)으로 구분할 수 있다. 제품의 life cycle 단계와 비용 요소(Cost factors)는 Table 1 에 잘 나타나 있다.

회사 비용은 설계 개발, 제조 그리고 제품의 품질 관리 등의 활동을 수행하는데 드는 비용을 의미한다. 이 비용은 또한 제품의 서비스 보증 비용도 포함한다. 회사 비용은 크게 직접비와 간접비 두 종류가 있다.

사용자 비용은 사용자가 제품을 구매할 시점에서부터 제품을 사용하고 폐기할 때까지 사용자에게 의해 초래되는 모든 활동에 대한 비용을 의미한다. 사용자 비용에서는 재활용과 폐기를 위한 비용도 포함된다.

Table 1 Life-cycle stages and cost factors¹⁴

	Company Cost	Users Cost	Society Cost
Design	Market Recognition Development		
Production	Materials Energy Facilities Wages, Salaries Etc.		Waste Pollution Health Damages
Usage	Transportation Storage Waste Breakage Warranty Service	Transportation Storage Energy Materials Maintenance	Packaging Waste Pollution Health Damages
Disposal/ Recycling		Disposal/ Recycling Dues	Waste Disposal Pollution Health Damages

사회 비용은 제품이 사용 수명을 다하고 폐기되거나 재활용될 때 사회가 부담하는 비용이다. 폐기된 제품에서 추출된 재료들이 재활용 될 수 있는 능력이나 환경에 미치는 영향은 모두 사회 비용의 원인이 된다. 이러한 비용들은 점점 더 증가하고 있으며 보이지 않는 무형의 형태로 정량적으로 정확히 측정하기가 어렵다. 그럼에도 이 사회 비용의 중요성은 점점 더 증가하고 있고, 이를 평가하는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

Table 1 의 비용요소(Cost factors)는 LCC 를 예측하기 위한 학습 LCC 모델에서 출력값으로 사용된다.

3.2.2 제품 속성(Product attributes)의 개발

본 절에서는 학습 모델에서 학습을 위해 입력값으로 사용하기 위한 의미 있는 제품 속성들을 정의하는 절차를 기술한다.

제품 속성들은 LCC 요소들과 논리적으로나 통계적으로 잘 연결되어야 하고, 또한 개념 설계 단계에서 활용 가능한 것이어야 한다. 이러한 목표들을 가지고, 문헌 조사¹⁵⁻²⁹ 와 전문가들의 경험을 토대로 기본적인 제품 속성들의 집합을 만들었다. 제품, 환경친화설계 그리고 비용 평가 전문가들과의 인터뷰나 e-mail 을 통한 설문 조사나 질의를 통하여 설계 단계의 제품 속성들을

정의하였는데, 그들의 공통된 의견은 개념 단계에서 제품 속성의 정의는 제품 특징 설명 용어 내에서 간단·명료하게 표현되어야 한다는 것이다. 또한 제품의 향상이나 혁신을 위해서는 상위 수준의 정보들 외에 다른 수준의 제품 정보도 제품 설계의 초기 단계에 사용할 수 있다.

개념 설계 단계에서 제품의 life cycle 을 고려한 제품 속성들의 예는 Table 2 와 같다.

Table 2 Candidate Product Attribute Set

Durability	Selling Price	In use energy source
Strength	Product Liability	In use power consumption
Conductivity	Distribution mass	Modularity
Mass	Distribution volume	Upgradeability
Volume	Transport distance	Serviceability
Materials (Various)	Transportation means	In use flexibility
Performance	Lifetime	Recycled content
Functionality	Use time	Recyclability
Process	Mode of operation	Reusability
Assemblability	Additional consumable	Disassemblability

이처럼 형성되고 확인된 제품 속성들을 가지고, LCC 요소들과 개념적으로 연결하고 제품의 life cycle 을 모두 고려하기 위해 본 연구에서는 품질기능 전개 (Quality Function Deployment ; QFD)²¹ 에서 기능이나 요구사항을 전개시키는 House-of-quality (HOQ)의 방법을 사용하였다. HOQ 에 의해 전개된 제품 속성들이 어떤 LCC 요소에 영향을 미치는지도 확인할 수 있고 LCC 요소와 제품 속성간의 관계도 개념적으로 정의할 수 있다.

이렇게 개발된 제품 속성들은 다음과 같은 척도로 구분되어진다. 만약 설계자가 제품 속성들에 대하여 적절하게 정량적 혹은 정성적인 의미를 평가하여 명세화할 수 있다면, 이 속성은 “명세화(Specified)” 되고, 제품 속성을 명세화할 수 없다면 이 속성은 순위 개념을 도입하여 “순위화(Ranked)” 한다. 명세화나 순위화로 표현할 수 없으면, 이 속성은 “예/아니오”의 개념인 “이진화(Binary)”로 표현한다. 설계자가 제품 속성에 대한 정보를 하나도 알고 있지 못하다면, “모른다(Unknown)”라고 표현하고, 정의된 제품 속성이 제품 설계에 적용할 수 없다면, “적용 불가(N/A)”로 표현한다. 제품 속성들의 척도화에 대한 내용이 Fig. 3 에 나타나 있는데, 이는 설문 조사에 의해 작동 속성에 대한 제품 속성 평가 결과를 나타낸 것이다

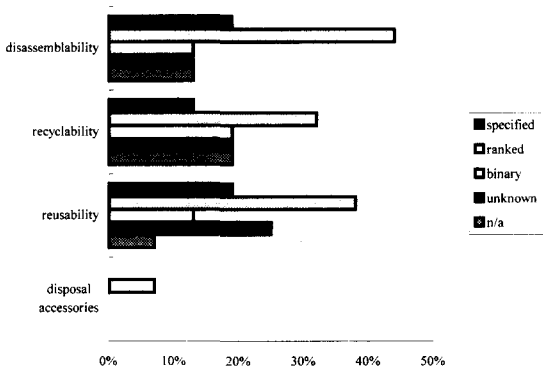


Fig. 3 Survey results for end-of-life properties

제안된 제품 속성들은 LCC 요소들과의 관계 평가를 통해 다시 한번 선별된다. 이 과정에서 두 요소들 간에 상관관계가 약한 것은 제품 속성 목록에서 제외하고, 강한 상관관계를 나타내는 것은 제품 속성에 포함시킨다.

진술한 분석방법에 의해 제안된 최종 제품 속성들은 개념 설계단계의 제품의 LCC 평가에 대한 신뢰성 있는 결과를 제공해 줄 수 있다.

본 연구에서는 개념 설계 단계에서 설계자, 비용 평가 전문가 그리고 환경 전문가 등에게 의미 있고, 이해하기 쉬운 제품 속성을 개발하기 위하여, 제품의 LCC 를 구성하는 비용 요소들 중에서 life cycle energy 를 대상으로 하여 제품에 대한 전과정 비용을 평가하기로 하였다. Life cycle energy 는 제품의 life cycle 동안 소모되는 총 에너지를 조사하는 것으로 제품을 구성하는 부품들을 만들기 위한 원료 획득에서부터 원료에서 부품의 원자재 생성과정, 부품을 만드는 과정, 부품들이 조립되어 완제품으로 완성되는 과정에 소모되는 에너지 그리고 제품의 사용수명 기간동안에 소모되는 에너지 및 제품의 폐기 시에 소모되는 에너지를 모두 조사하여 이를 합산한 값이다. Life cycle energy 는 LCC 를 구성하는 일부분의 값이지만 LCC 를 구성하는 중요한 요소이고, 이 값으로 제품의 LCC 를 평가할 수 있는 훌륭한 척도가 될 수 있으며, 차후에 다른 비용 요인들까지 고려한 LCC 데이터베이스의 구축으로 그 범위를 확대할 수 있다.

이를 위해 life cycle energy 와 관련 있는 개념

설계 단계에서의 제품 속성들을 정의하였는데 최초로 제안된 제품 속성들은 Table 3 과 같다. Table 3 에서 제안된 제품 속성들은 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) r 을 이용하여 제품 속성들과 life cycle energy 의 상관관계를 검정하였다.

Table 3 An example of correlation coefficients and tests: product attributes vs. LCC factor (life cycle energy)

The list of product attributes	The coefficient of correlation
Mass	0.9656
Lifetime	-0.1092
Use time	-0.3760
Operation mode	0.2320
Additional consumable	0.6035
Energy source	0.6658
Power consumption	0.9890
Modularity	0.4610
Durability	0.0933
.....
Upgradability	-0.0100
Serviceability	0.5807
Flexibility	-0.0295
Post consumable material	-0.0060
Reusability	-0.0455
Recyclability	-0.0325
Disassemblability	0.7730

이를 통해 상관성이 낮은 제품 속성들은 제외하고 상관성이 높은 제품 속성들이 최종 제품 속성들로 정의되었는데, 경계값은 $r = \pm 0.3$ 으로 하였다. 제품 속성들과 제품 LCC 간의 상관관계 테스트 결과는 Table 4 에 나타나 있다. 이 과정을 거쳐 life cycle energy 와 관련된 제품 속성들은 총 19 개의 제품 속성들로 최종 결정되었다.

Table 4 Product attribute list used in training the learning LCC model

Q - Mass (kg)	Q - Chemicals (%mass)	D - In use energy source
Q - Ceramics (%mass)	Q - Wood (%mass)	Q - In use power consumption (W)
Q - Fibers (%mass)	Q - Other materials (%mass)	B - Modularity
Q - Ferrous metals (%mass)	Q - Lifetime (hours)	B - Serviceability
Q - Non-ferrous metals (%mass)	Q - Use time (hours)	B - Disassemblability
Q - Plastics (%mass)	D - Mode of operation	(* Q: Quantitative, or Qualitative
Q - Paper/Cardboard (%mass)	B - Additional consumable	D: Dimensionless, B: Binary)

Table 4 에 정의된 제품 속성들은 개념 설계 단계에서 제품의 비용을 예측하기 위해 학습 LCC 모델 입력층의 입력값으로 사용되고, life cycle

energy 는 학습 LCC 모델 출력층의 출력값으로 사용된다.

4. 학습 LCC 모델의 실험

정의된 제품 속성들과 LCC 결과들을 가지고, 학습 LCC 모델의 개념을 입증하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 총 150 개 제품에 대한 제품 속성들과 LCC 데이터를 수집하였고, 총 150 개의 데이터를 이용하여 학습 LCC 분석을 통하여 LCC 의 예측 결과를 구하였다.

4.1 제품속성들과 LCC 데이터 수집

학습 데이터는 연구논문, 환경성을 평가할 수 있는 소프트웨어의 데이터베이스, 연구소의 연구자료 그리고 기업체들의 데이터를 기반으로 조사하였다. 이렇게 완성된 150 개 제품에 대한 제품속성과 LCC 데이터는 학습 LCC 모델의 실험을 위한 데이터로 사용된다(Table 5 참조).

Fig. 4 는 개발된 역전파 신경망 알고리즘의 구조를 보여주고 있다. 학습 LCC 모델은 100 cycle 마다 평균제곱오차(Mean Square Error ; MSE)를 출력하여 실제의 학습이 이루어지는 과정을 살펴볼 수 있도록 하였다. 본 실험은 2,688 초만에 학습이 끝났고 이때의 MSE 는 0.000143 을 기록하였다

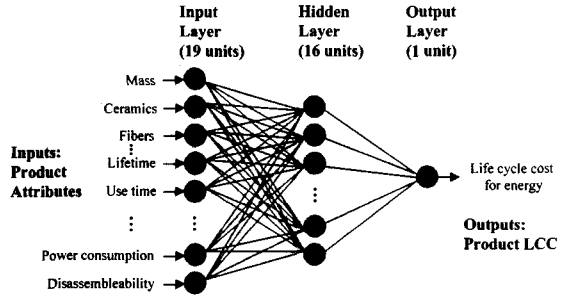


Fig. 4 Structure of the back propagation neural network for predicting the product LCC

인공 신경망에서 연결 강도의 조정이 끝난 후에는 학습에 사용되지 않은 5 개의 제품에 대한 LCC 예측을 수행하였는데 그 실험 결과는 Table 6 과 Fig. 5 와 같다.

그리고 제품 속성을 변화시켰을 경우의 학습 LCC 모델의 예측 결과에 대하여 실험하였는데, 세탁기(Washing machine)를 대상으로 질량 (Mass)과 에너지 소모량 (Energy consumption)을 변화시켰을 경우의 실험 결과는 Fig. 6 과 Fig. 7 과 같다.

4.2 실험결과 토의

5 개의 제품에 대한 실제(Actual) LCC 와 학습 LCC 모델을 이용하여 예측한 LCC 결과는 Table 4 에 나타내었다. Table 6 에서 보듯이 학습 LCC 모델을 이용한 LCC 결과치는 매우 정확하였고 그 절대오차는 0.11 % ~ 12.02 %로 매우 작음을 확인할 수 있었다.

일반적으로 제품의 개념 설계 단계에서의 비용 평가는 데이터의 제한 등으로 정확한 비용 평가가 어렵다. 문헌에서 개념 설계 단계에서의 비용평가의 정확도는 -30 % ~ +50 %로 알려져 있다.²³

Table 5 Examples of learning data for the learning LCC model

Prod.	Inputs				Output
	Mass (kg)	Energy source	Power Consump. (Watt)	Modularity (yes: 1, no: 0)	Actual LCC (\$)
1	8.17	3	1064	1	596.21
2	1.04	3	57.6	1	20.53
3	0.18	2	0	1	1.65
4	0.64	3	13	1	11.47
5	0.95	3	864.62	0	2893.56
6	1.93	3	616.44	1	83.54
7	81.6	3	1500	0	6358.84
8	49.78	3	12.5	0	1467.29
9	40.46	3	615.94	0	2935.2
10	35.01	3	18.75	0	313.41

Table 6 Comparison of the LCC of products as predicted by the learning LCC model with the actual LCC

Product	Actual LCC	Learning LCC	Relative Error (%)
Vacuum Cleaner	595.96	572.03	4.06
Heater	2893.22	3241.38	12.02
Washing machine	6359.30	6365.62	0.11
Refrigerator	2220.72	2193.78	1.23
TV	2935.70	3023.57	3.01

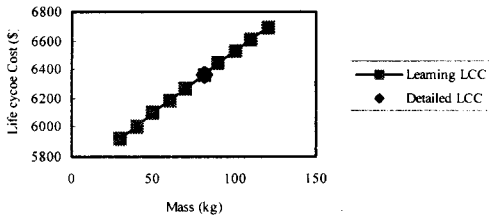


Fig. 6 Results of mass trends for the washing machine

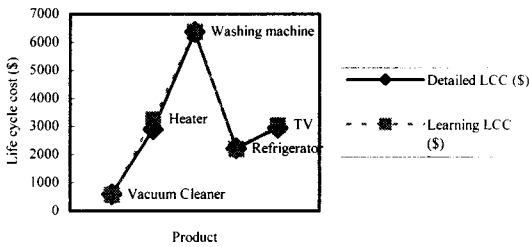


Fig. 7 Results of energy consumption trends for the washing machine

그러므로, 본 연구에서 제한한 방법으로 평가된 LCC 예측값은 매우 정확하다. 또한 제품 속성들을 변화시켰을 경우에도 제안한 학습 LCC 모델을 통하여 매우 우수한 LCC 예측 결과를 얻을 수 있었다.

이상에서 확인하였듯이 인공 신경망에 기반을 둔 학습 LCC 모델을 이용하여 개념설계단계에서 제품의 속성들을 이용한 LCC 결과를 예측해 본 결과 학습 LCC 예측치가 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 그러므로 향후 개념 설계 단계에서 인공 신경망에 기반을 둔 학습 LCC 모델의 적용하면 비용 측면에서 보다 효과적인 제품설계가 가능할 것이다.

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 제품의 개념 설계 단계에서 설계자나 비용평가 전문가 그리고 환경 전문가 등이 간단하고, 의미 있고, 이해하기 쉬운 제품 속성들을 확인하였고, 인공신경망 기반의 학습 LCC 모델을 개발하여 제품의 개념 설계단계에서

제품의 LCC 를 평가하였다.

제안한 제품 개념 설계 단계에서의 제품의 LCC 예측을 위한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 본 연구에서는 먼저 제품의 life cycle 단계의 비용요소(Cost factors)와 설계초기단계에서의 제품 속성들을 개발하였다. 개발된 제품개념 설계 단계의 제품 속성들과 제품의 LCC 는 총 150 개 제품에 대하여 조사 및 분석한 데이터를 수집하였다.

수집한 데이터들의 이용하여 본 연구에서 제안한 학습 LCC 모델을 이용하여 새로운 제품의 LCC 결과를 예측하였다. 학습 LCC 모델을 이용하여 LCC 를 예측한 결과값의 절대오차의 범위는 0.11 % ~ 12.02 %로 매우 우수한 예측값을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었고, 제품 속성을 변화시켰을 경우에도 좋은 예측값을 얻을 수 있었다.

향후 연구과제로는 보다 다양한 제품 속성들을 정의할 수 있도록 지속적인 제품 속성 개발이 필요하다. 그리고 본 연구에서는 LCC 평가 방법으로 life cycle energy 를 조사하여 비용으로 환산한 LCC 를 사용하였는데, 향후에는 다른 비용 요소들 모두를 고려한 LCC 비용 평가와 이를 통한 데이터베이스 구축이 필요하다.

참고문헌

1. Park, J.-H. and Seo, K.-K., "Approximate Life Cycle Assessment of Classified Products Using Artificial Neural Network and Statistical Analysis in Conceptual Product Design," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 3, pp. 207-213, 2003.
2. Gupta, Y. P., "Life Cycle Cost Models and Associated Uncertainties," In Electronics Systems Effectiveness and Life Cycle Costing, NATO ASI Series, F, J. K. Skwirzynski (ed.) (Berlin: Springer) pp. 535-549, 1983.
3. Greenwood, T. G. and Reeve, J. M., "Activity-based Costing Management for Continuous Improvement: A Process Design Framework," Cost Management, Winter, pp. 22-40, 1992.
4. Noble, J. S. and Tanchoco, J. M. A., "Concurrent Design and Economic Justification in Developing a Product," International Journal of Production

- Research, Vol. 28, No. 1, pp. 1225-1238, 1990.
5. Oh, C. J. and Park, C. S., "An Economic Evaluation Model for Product Design Decisions under Concurrent Engineering," *The Engineering Economist*, Vol. 38, No. 4, pp. 275-296, 1993.
 6. Ong, N. S., "Manufacturing Cost Estimation for PCB Assembly: An Activity-based Approach," *International Journal of Production Research*, 38, pp. 159-172, 1995.
 7. Boothroyd, G. and Dewhurst, P., "Design for Assembly Selecting the Right Method," *Machine Design*, November 10, pp. 94-98, 1983.
 8. Dewhurst, P., "Computer-aided Assessment of Injection Moulding Cost: A Tool for DFA Analyses," Report #24, Department of Mechanical Eng. University of Rhode Island, 1988.
 9. Gershenson, J. and Ishii, K., "Life Cycle for Serviceability," In *Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, A. Kusiak (ed.) (New York: Wiley), pp. 363-384, 1993.
 10. Navinchandra, D., "ReStar: a Design Tool for Environmental Recovery Analysis," *International Conference on Engineering Design, IECD '93, The Hague*, pp 17-19, August 1993.
 11. Emblemavag, J. and bras, B. A., "Activity-Based Costing in Designing for Product Retirement," *Proceedings of ASME Design Technical Conference, DE-Vol. 69-2*, pp. 351-362, 1994.
 12. Bras, B. A. and Emblemavag, J., "Activity-based Costing and Uncertainty in Design for the Life Cycle," In *Design for X: Concurrent Engineering Imperative*, G. Q. Huang (ed.) (London: Chapman & Hall), 1995.
 13. Ulrich, K. and Eppinger, S., *Product Design and Development*, New York, NY: McGraw-Hill, Inc., 1995.
 14. Alting, L., "Life Cycle Design of Products: a New Opportunity for Manufacturing Enterprises," In *Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, A. Kusiak (ed.) (New York: Wiley), pp. 1-17, 1993.
 15. Bhamra, T. A., Evans, S., McAloone, T. C., Simon, M., Poole, S. and Sweatman, A., "Integrating Environmental Decisions into the Product Development Process: Part 1 The Early Stages," *Proceedings of the First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan, pp.329-333, February 1999.
 16. Hubka, V. and Eder, W. E., *Engineering Design: General Procedural Model of Engineering Design*. Zurich, Switzerland: Heurista, 1992.
 17. Brezet, H. and Van Hemel, C., *Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption*. Paris, France: United Nations Environmental Program (UNEP) Industry and Environment, 1997.
 18. Rombouts, J. P., "LEADS-II, A Knowledge-based System for Ranking DfE-Options," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp.287-291, 1998.
 19. Sousa, I., Eisenhard, J. L. and Wallace, D., "Approximate Life-Cycle Assessment of Product Concepts Using Learning Systems," *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 4, No. 4, pp. 61-81, 2002.
 20. Potts, A., Personal Communication, Principal Designer, Potts Design, Stoneham, MA, 2000.
 21. ReVelle, J. B. and Moran, J. W., *The QFD handbook*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
 22. Haykin, S. and Simon, S., *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, 1998.
 23. Creese, R. C. and Moore, L. T., "Cost Modelling for Concurrent Engineering," *Cost Engineering*, Vol. 32, No. 6, pp. 23-27, 1990.