

비선형 만족도 함수를 이용한 설계평가 방법의 개발

문 용 략*·차 성 운**

Development of Design Evaluation Method Through Nonlinear Satisfaction Function

Y. R. Moon and S. W. Cha

Key Words: Nonlinear Satisfaction Function (비선형 만족도 함수), Axiomatic Approach(공리적 접근), Information Content(정보량)

Abstract

The information content is determined by establishing the system range for each of the FRs and by determining the overlap between system range and the design range (i.e the designer-specified range). However, conventional information content doesn't include designer's intention sufficiently. In this paper, the satisfaction function is presented to embody designer's intention by calculating information contents. The satisfaction function is created in order to deal with the uncertainties involved in determining the design range and the system range in terms of a given physical parameter. So, the satisfaction function help designer to choose the optimal design among many proposed design.

1. 서론

제조회사의 경제적 성공은 고객의 필요성과 이 필요성을 충족시키는 제품을 빠르게 생성하고 낮은 비용으로 생산할 수 있는 능력에 좌우된다. 이러한 목표를 달성시키는 것은 전적으로 마케팅 문제나 설계문제 또는 제조문제 등 어느 한 문제가 아니고 이러한 기능 모두가 관련된 제품 개발의 문제이다. 모든 초기 제품 개발단계는 최후의 제품성공에 매우 큰 영향을 준다. 제품에 대한 시장의 반응은 제품 개념에 결정적으로 의존하는 것이 확실하다. 또한, 많은 실무 종사자들과 연구자들은 제품 개념의 선택이 최종적인 제품 제조 비용을 절대적으로 결정한다고 확신한다.

설계는 제품의 최종 만족도를 결정하는 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 잘못된 설계에 의한

제품의 생산은 고비용과 오랜 생산시간에 비하여 품질이 낮은 제품을 생산하게 된다. 이런 결과는 설계자의 제품에 대한 이해부족과 경험적이고 주관적인 설계판단에 의하여 나타나게 된다. 두 가지 이상의 설계안이 도출되었을 때 설계자의 순간적인 판단이 돌이킬 수 없는 치명적인 제품의 결함이나 막대한 자원의 낭비를 가져올 수 있다. 위와 같은 오류를 방지하기 위해서는 객관적이고 정량적으로 도출된 설계를 평가하는 방법이 필요하게 된다.

제품의 구상이나 상세 설계단계에서 문제점을 해결하고 최적의 설계를 구현할 수 있다면 생산 비용의 많은 부분이 절감될 수 있다. 따라서 제품의 설계시 최종 사용자의 만족도를 최대한으로 높일 수 있는 설계를 구현하는 것이 생산효율을 높일 수 있는 중요한 요소 중 하나라는 것은 자명하다.

본 논문에서 제시되는 비선형 만족도 함수를 이용한 설계평가 방법은 최종 사용자의 필요도를 공리적 설계의 평가방법에 집목시켜 초기 제품 개발시 설계자의 의사결정에 도움이 되며, 동일 품목의 여러 설계를 평가할 때 설계평가의 척도

* 연세대 기계공학과 대학원

** 연세대 기계전자공학부

가 되는 설계평가 방법이다.

2. 정보의 공리

정보라는 개념은 상당히 모호하고 주관적인 개념이다. 대부분의 사람은 자기 나름대로의 정보에 관한 개념을 가지고 있다. 공리적 접근에서의 정보는 ‘복잡성’을 나타내는 척도로 사용된다. 정보와 복잡성의 관계는 다음과 같은 문장으로 요약되어질 수 있다. ‘어떤 현상이나 사물이 복잡할수록 묘사하거나 구현하기 위해서는 더욱 많은 정보가 필요하다.’

정보의 공리는 설계의 복잡성과 관계가 있으며 상대적으로 단순한 설계가 더 좋은 설계라는 것은 의미한다. 정보의 공리는 기능적 요구를 만족시킬 수 있는 성공률에 의해서 설계요소를 선택한다. 즉, n 개의 기능적 요구를 갖고 있을 때 “정보의 량”을 다음과 같이 정의한다.

$$I = \sum_{i=1}^n \ln(1/P_i) \quad (1)$$

여기서 P 는 성공률이며 I 는 정보량이 된다. 성공률이 100%일 때 $P=1$ 이 되어 가장 좋은 설계가 되므로 정보량 I 가 적을수록 단순한 설계가 된다.

설계나 제조에서의 정보는 길이, 정도, 표면품질, 가격과 같은 요소들이며, 이러한 정보들을 동시에 최적의 상태로 만드는 것이 필요하다. 제품의 설계나 제조시, 설계자의 원하는 바가 100% 만족될 때는 그 제품을 설계하거나 제조할 때 필요한 정보량이 0이 된다. 그러나 대부분의 경우에는 설계자의 설계나 가공의 오차 때문에 만족할 만한 제품을 설계하거나 생산하기 위해서는 정보가 필요하게 된다.

대부분의 설계와, 생산과정에서 설계자는 구체적인 기능적 요구사항을 설정해야 한다. 설계자의 설계가 주어진 제조 시스템에 의해 100% 만족되어질 때 요구되는 정보는 없다. 그와는 반대로, 설계가 생산시스템에 의해 만족되어지지 못하면 무한한 양의 정보가 제공되더라도 만족할 만한 제품이 생산되지 않는다. 그러므로 필요한 정보는 설계자의 설계와 생산시스템의 성능과 관계가 있다.

design range는 설계변수와 관계가 있는 설계자

가 원하는 공차이고, system range는 주어진 공차에 대하여 제조설비의 성능이다. 이 두 가지 range가 겹치는 부분을 common range라고 한다. 식 (1)을 사용하여 정보량을 표현하면 다음과 같다.

$$I = \log\left(\frac{\text{System range}}{\text{Common range}}\right) \quad (2)$$

식 (2)이 나타내는 정보량은 제품을 만들기 위하여 선택한 특정 제조설비가 설계자의 원하는 바를 만족시킬 수 있는 확률을 나타내는 것이다. 만일 design range가 system range 전체를 포함하고 있다면 확률이 1이 되므로 정보량 I 는 0이 된다. 이것은 추가적인 노력이나 정보가 없이도 항상 원하는 제품을 생산해 낼 수 있다는 것이다. 반면에 design range와 system range의 중복된 부분이 없다면 common range가 0이므로 정보량 I 는 무한대가 된다. 이것은 설계자의 요구를 맞추기 위해서는 제조설비에 무한대의 정보가 필요하게 된다. 따라서 이러한 경우에는 원하는 제품을 만들 확률은 0이 된다.

필요한 정보량을 줄이는 방안은 system range의 크기를 줄이거나, common range의 크기를 늘이는 두 가지 방안이 있다.

3. 비선형 만족도 함수

비선형 만족도 함수는 설계평가에 있어서 소비자의 요구사항의 정도를 초기설계 평가에서부터 적용시켜 제안된 설계의 최종 사용자의 만족도를 고려하여 평가하는 방법이다. 앞선 논문 즉, ‘만족도 함수를 이용한 설계평가 (문용락, 차성운, 2000)’에 의하면 만족도 함수의 도입의 타당성은 다음과 같다고 할 수 있다. 먼저 공리적 설계에서 정보량을 정의한 식 (1)은 정보량의 개념을 확률로서 표현하고 있다. 확률은 설계자가 원하는 것을 만족시킬 수 있는 정도이다. 즉, 설계자가 원하는 사양의 범위와 실제 물리적인 공정이 가질 수 있는 범위의 공통범위의 크기가 확률이라 할 수 있다. 따라서, 확률은 공리적 설계에서 설계변수가 가지고 있는 정보를 이용하여 기능적 요구사항을 만족시킬 수 있는 정도라고 정의하고 있다. 그러나 앞선 논문에서는 사용자의 만족도

를 단지 선형적으로 파악하였기 때문에 실제적인 사용자의 의도를 제대로 평가단계에 적용하지 못했다는 약점이 있다.

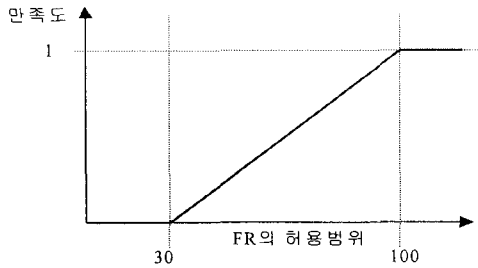


Fig. 1. Graph of linear satisfaction function

Fig. 1.에서 볼 수 있듯이 FR의 허용범위에 따라 사용자나 설계자의 만족도가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. FR의 허용범위가 30 이하 일때는 만족도가 0이고 허용범위가 100 이상 일때는 만족도가 1로 표현된다. 그러나 이러한 만족도의 분포는 설계자나 사용자의 의도를 정확히 나타낼 수 없다는 단점이 있다. 그 이유는 위의 그래프에서 볼 수 있듯이 임의의 구간에서 측정하는 것이 아니라 그래프상의 한 점에서 만족도를 측정하기 때문에 정확한 만족도를 측정하기가 어렵다. 실제로 사용자나 설계자의 요구사항은 임의의 한점이 아니라 일정한 범위이기 때문이다. 따라서 사용자나 설계자의 의도를 정확히 표현할 수 있는 비선형적인 만족도의 도입이 필요하고 또한 비선형 만족도를 이용하여 정보량을 측정할 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

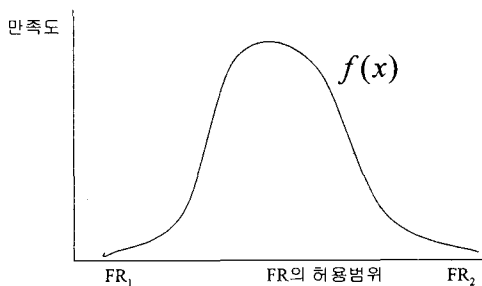


Fig. 2. Graph of nonlinear satisfaction function

Fig. 2는 설계자의 요구사항에 대한 만족도를 나타내는 그래프이다. 만족도는 설계자에 따라서

그 형태가 다르게 된다. 만일, 설계자가 FR의 허용범위에 대하여 위와 같은 만족도를 나타낼 때 만족도 함수를 통한 정보량의 측정은 다음과 같이 정의할 수 있다.

공리적 설계에서 정의되어진 정보량의 측정은 식 (1)에 의하여 계산되어진다. 따라서, 만족도는 사용자나 설계자의 요구사항을 만족시킬 수 있는 확률의 개념이기 때문에 다음 식 (3)과 같다.

$$I = \ln\left(\frac{1}{P}\right) = \ln\left(\frac{1}{SF}\right) \quad (3)$$

SF의 의미는 만족도 함수의 값이다.

비선형 만족도 함수는 요구사항의 허용범위의 모든 구간에서 정보량을 측정하기 위해서 다음과 같이 만족도 함수를 정의할 수 있다. 식 (4)는 만족도 함수의 전 범위의 확률을 1로 정의하는 것을 의미한다.

$$\sum_{FR_1}^{FR_2} f(x) = \int f(x) = 1 \quad (4)$$

식 (4)는 만족도를 나타내는 것으로 제안된 설계가 모든 허용범위를 만족시키면 만족도가 100% 즉, 1이라는 것을 나타낸다. 따라서 만족도는 설계가 만족시키는 범위의 면적을 의미하는 것으로 정의할 수 있다.

식 (3)은 위의 정의를 통하여 다음과 같은 식 (5)로 표현된다.

$$I = \ln\left(\frac{1}{\frac{\int_{FR_1}^{FR_2} f(x)}{\int_{DR_1}^{DR_2} f(x)}}\right) = \ln\left(\frac{1}{\frac{FR_2 - DR_2}{FR_1 - DR_1}}\right) \quad (5)$$

식 (5)은 제안된 설계가 만족시키는 범위가 DR_1 부터 DR_2 범위로서 이 범위는 만족도 함수의 그래프내에 존재하는 경우를 나타낸다.

위의 비선형 만족도 함수는 사용자나 설계자의 기능적 요구사항을 선형적 측정방법에 비하여 임의의 설계범위에 대해 만족도를 측정할 수 있는 효율적인 정보량 측정방법이다.

4. 비선형 만족도 함수를 이용한 설계범위의 선정

비선형 만족도 함수를 이용하여 사용자나 설계자가 요구하는 기능적 요구사항들을 만족시키는 방법을 개발하는 것이 이 논문의 주제와 부합된다고 할 수 있다. 즉, 제안된 설계들을 평가함으로써 경제적, 기술적으로 요구사항들의 최대 만족을 위해서 가장 효율적인 설계를 도출하는 것이다.

이를 위하여 다음과 같은 두 개의 서로 다른 요구범위를 갖는 설계를 고려하여 효율적인 설계범위를 정하는 방법을 제시한다.

앞장에서 설명한 것과 같이 공리적 설계의 이론에 따라 각 제안된 설계들에게서 측정된 정보량은 상대적 최소값을 가질 때 최대의 만족도를 갖는다고 할 수 있다. 따라서 기존의 설계방법에서는 고려하지 않은 요소를 도입해야 한다. 즉, 만족도의 집중도이다.

만족도의 집중은 다음의 예를 통하여 쉽게 이해할 수 있다. 만일 설계자의 만족도는 FR의 범위가 10부터 20사이의 값에 모두 집중되어 있다면 설계는 요구사항의 범위를 만족시키는 10부터 20까지만을 고려하여 설계하면 최대 만족도를 얻을 수 있다. 그러나 설계자가 원하는 FR의 범위가 10부터 100사이에 있다고 하면 설계범위가 10부터 70가지를 만족시킨다고 할지라도 최대의 만족도를 얻을 수는 없다. 즉, 기존의 설계평가에서는 설계의 범위의 크기가 정보량을 측정하는 가장 큰 요소이지만 만족도의 집중범위를 고려하지 않았으므로 사용자나 설계자의 의도에 부합되는 설계평가가 이루어졌다고 할 수 없다. 따라서 위의 간단한 예를 통해서 알 수 있듯이 더 넓은 범위를 만족시키는 설계가 항상 정보량이 적은 설계라 할 수 없다.

Fig. 3은 위에서 설명한 만족도의 집중에 따른 상대적 정보량 평가를 나타내는 그래프이다. $f(x_1)$ 과 $f(x_2)$ 가 위의 그래프와 같이 존재한다고 가정할 때 두 만족도의 분포는 서로 다르다는 것을 알 수 있다. $f(x_1)$ 은 $f(x_2)$ 에 비하여 요구사항의 범위가 더 좁고 만족도는 좁은 범위에 집중되어진다. 그리고 $f(x_1)$ 과 $f(x_2)$ 의 그래프의 면적은 두 만족도함수가 같다. 위와 같은 만족도의 분포

에 대해서 제안된 설계의 범위는 DR_1 , DR_2 으로 표현된다고 할 때 제안된 설계에 대하여 각 만족도 함수 $f(x_1)$ 과 $f(x_2)$ 의 만족도는 다음 식 (6)과 같은 경향을 나타낸다

$$SF(f(x_1)) > SF(f(x_2)) \quad (6)$$

식 (6)은 제안된 설계의 범위가 각 만족도 함수를 포함하는 범위의 넓이가 만족도라는 것을 의미하는 식 (3)과 식 (5)를 나타내고 있다.

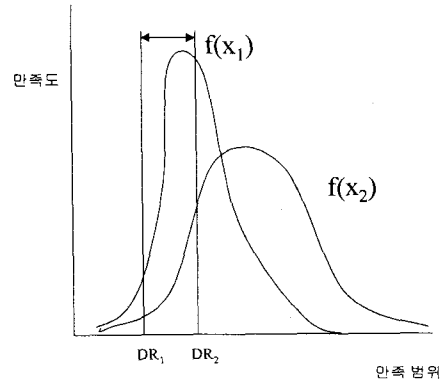


Fig. 3. Graph of relative design satisfaction with same design specification

위의 방법을 사용하여 만족도 함수의 값을 측정할 수 있으므로 두 가지 만족도 함수에 대한 정보량을 다음과 같다.

$$I(f(x_1)) = \ln \left(\frac{1}{\int_{FR_{11}-DR_1}^{FR_{12}-DR_2} f(x_1)} \right) \quad (7)$$

$$I(f(x_2)) = \ln \left(\frac{1}{\int_{FR_{21}-DR_1}^{FR_{22}-DR_2} f(x_2)} \right) \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)은 설계가 가지는 정보량이 사용자나 설계자의 요구사항 범위에 따라서 다르다는 것을 나타낸다.

비선형 만족도 함수를 이용한 설계의 정보량을 측정하는 또 다른 예는 다음과 같다.

만일 동일한 만족도 함수가 있다고 가정할 때 요구사항을 만족시키기 위한 두 가지 이상의 설계가 제안되는 경우가 있다. 이러한 경우에는 기존의 설계평가 방법에서는 설계의 정보량은 요구사항의 범위를 많이 포함하고 있는 설계가 정보량이 적다고 평가하고 있다. 그러나 만족도를 고려하지 않은 평가이기 때문에 실제적으로는 그

결과값이 잘 못 될 경우가 발생한다. 즉, 요구사항의 범위가 20부터 120까지라고 할 때 제안된 설계1은 20부터 70까지를 만족시키고 설계2는 50부터 90까지를 만족시킨다고 할 때 기존의 설계 평가 방법은 설계1의 정보량이 더 적다고 평가한다. 그러나 만족도의 집중에 따라 그 결과는 달라질 수 있다. 따라서 만족도의 집중을 고려한 평가가 필요하다.

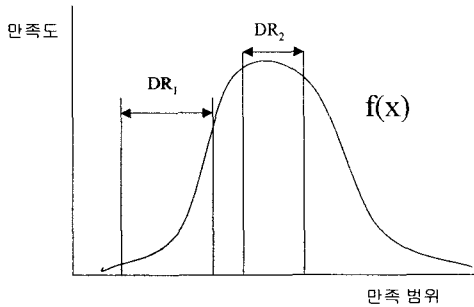


Fig. 4. Graph of relative design satisfaction with same design range

Fig. 4는 하나의 만족도를 나타내는 $f(x)$ 에 대하여 서로 다른 설계범위를 가지는 두 가지의 설계가 제안되어 있는 것을 나타낸다. 제안된 설계범위의 비교는 다음 식 (9)와 같다.

$$DR1 > DR2 \quad (9)$$

기존의 공리적 설계에서 설계범위가 넓을수록 정보량이 감소한다고 한다. 그러나 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 $DR1$ 의 설계범위가 가지는 정보량과 $DR2$ 가 가지는 설계범위는 다음 식 (10), (11)과 같이 계산되어진다.

$$I(f(x_{DR_1})) = \ln\left(\frac{1}{\int_{FR_{11}-DR_{11}}^{FR_{12}-DR_{12}} f(x)}\right) \quad (10)$$

$$I(f(x_{DR_2})) = \ln\left(\frac{1}{\int_{FR_{21}-DR_{21}}^{FR_{22}-DR_{22}} f(x)}\right) \quad (11)$$

식 (10), (11)의 결과는 만족도 함수 $f(x)$ 에 대하여 서로 다른 설계범위를 가지는 설계들의 정보량을 평가하는 경우 만족도의 분포를 고려해야만 실제적인 정보량의 측정이 이루어진다는 것을 나타내고 있다. 그러므로, 설계범위가 넓다고 해서 반드시 그 설계의 정보량이 적다는 것을 의미하지는 않는다.

앞서 논의된 비선형 만족도 함수는 제품의 최

적화된 개발 범위를 선정할 수 있을 뿐만 아니라 경제적 측면에서 만족도 함수를 이용하여 최적의 제품을 설계할 수 있다.

선형 만족도 함수를 이용하여 경제적 측면을 고려하여 제품을 설계하는 경우는 다음과 같은 의미를 갖는다. Fig. 1에서 살펴볼 수 있듯이 기능적 요구사항의 범위는 30에서 100이다. 따라서, 만일 설계요소가 가지는 특성치가 30이하가 되면 만족도가 0이 된다. 즉, 선정된 설계요소는 기능적 요구사항을 절대로 만족시킬 수 없다는 결론을 도출하게 된다. 또한, 선정된 설계요소의 특성치가 100이상이 되면 만족도는 1이므로 항상 만족시킨다는 결론을 얻을 수 있다. 그러나, 설계요소의 특성치가 크다고 해서 모두 좋은 것은 아니다. 그 이유는 100이상에서 만족도는 항상 1이기 때문에 경제적 측면에서 보면 설계요소의 특성치가 100을 초과하게 되면 불필요한 비용의 투입이 있다는 것으로 해석할 수 있다. 따라서, 설계요소의 특성치가 100이 가장 경제적으로 좋다고 할 수 있다는 결론을 도출할 수 있다. 그러나 선형 만족도 함수를 이용한 정보량 측정은 설계자의 만족도를 선형적으로 해석하였기 때문에 동일한 조건하에서 만족도를 극대화시킬 수 없다.

비선형 만족도 함수를 고려하여 경제적인 효과를 극대화하기 위하여 다음과 같은 예를 생각해 볼 수 있다. 설계자의 요구범위는 선형함수의 범위와 동일한 30에서 100까지라고 정의한다면 다음 Fig. 5는 경제적인 만족도를 나타낸다.

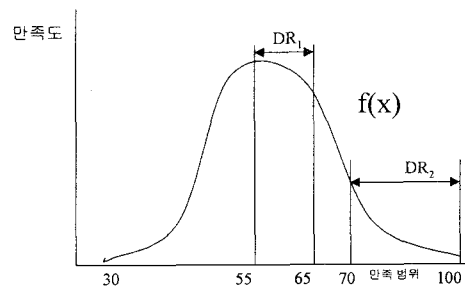


Fig. 5. Graph of relative design satisfaction of economical respect

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 설계범위가 70에서 100까지를 만족시키는 설계와 55에서 65까지를 만족시키는 두 가지 설계를 고려하는 경우에 제품을 생산할 때 드는 비용은 설계범위가 증가할수록 늘어나기 때문에 DR_2 의 범위를 가지는 제

품이 DR1의 범위를 가지는 제품에 비하여 생산 비용이 더 높다. 그러나 만족도는 DR1의 범위를 가지는 제품이 더 높기 때문에 경제적 효과는 DR1의 범위를 가지는 제품이 더 크다고 할 수 있다. 식 (12), (13)은 경제적 효과를 고려한 정보량 측정의 식이다.

$$\text{경제적효과} = \frac{\text{만족도}}{\text{생산비용}} \quad (12)$$

$$I = \ln\left(\frac{1}{\frac{\int_{FR_1 - DR_1}^{FR_2 - DR_2} f(x)}{\text{생산비용}}}\right) \quad (13)$$

$$= \ln\left(\frac{\text{생산비용}}{\int_{FR_1 - DR_1}^{FR_2 - DR_2} f(x)}\right)$$

식 (12)는 생산에 소요되는 비용에 비하여 만족도가 높은 제품이 경제적 효과가 더 크다는 것을 나타내고 있다. 제품의 설계자는 이러한 경제적 효과를 고려하여 설계를 수행해야 한다. 식 (13)은 경제성을 고려하여 정보량을 계산하는 식이다. 정보량은 제안된 설계의 만족도가 클수록, 생산에 소요되는 비용이 적을수록 정보량이 적다는 것을 의미한다.

경제적 효과를 고려할 때 선형적 만족도를 이용하여 정보량을 측정하는 것은 비선형 만족도를 이용하여 측정하는 것에 비하여 경제적 효율성이 떨어진다고 할 수 있다. 그 이유는 만족도의 차이와 생산비용을 고려하기 때문이다. 따라서 제품의 설계시 비선형 만족도 함수를 이용하여 만족도를 고려하는 것과 동시에 제품의 생산에 필요한 생산비용도 함께 고려하여야만 한다.

5. 결론

본 논문에서는 3장과 4장에서 제시된 바와 같이 비선형 만족도 함수를 이용하여 정보량을 측정하는 방법과 그 타당성을 제시하였다. 또한 선형 만족도를 이용한 정보량 측정과 비교하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 선형 만족도를 이용한 정보량 평가는 실제적인 사용자의 의도를 제대로 평가단계에 적용하지 못했다는 약점이 있다. 기존의 설계평가에서는 설계의 범위의 크기가 정보량을 측정하는 가

장 큰 요소이지만 만족도의 집중범위를 고려하지 않았으므로 사용자나 설계자의 의도에 부합되는 설계평가가 이루어졌다고 할 수 없다. 이러한 약점을 비선형 만족도를 도입하여 설계가 가지는 정보량이 사용자나 설계자의 요구사항 범위를 고려한 정보량 평가방법으로 해결할 수 있다.

2. 동일한 만족도 함수가 있다고 가정할 때 요구사항을 만족시키기 위한 두 가지 이상의 설계가 제안되는 경우가 있다. 이러한 경우에는 기존의 설계평가 방법에서는 설계의 정보량은 요구사항의 범위를 많이 포함하고 있는 설계가 정보량이 적다고 평가하고 있다. 그러나 만족도를 고려하지 않은 평가이기 때문에 실제적으로는 그 결과값이 잘 못 될 경우가 발생한다. 따라서 서로 다른 설계범위를 가지는 설계들의 정보량을 평가하는 경우 비선형적 만족도의 분포를 고려해야만 실제적인 정보량의 측정이 이루어진다.

3. 선형 만족도 함수를 이용한 정보량 측정은 설계자의 만족도를 선형적으로 해석하였기 때문에 동일한 조건하에서 만족도를 극대화시킬 수 없다. 그러므로 제품의 설계시 비선형 만족도 함수를 이용하여 만족도를 고려하는 것과 동시에 제품의 생산에 필요한 생산비용도 함께 고려하여야만 한다.

참고문헌

- (1) Yong Rak Moon, Sung Woon Cha, 2000, "Development of Design Evaluation Tool Through Axiomatic Approach", ICAD2000, pp. 259~263.
- (2) Nam P. Suh, 1990, "The Principles of Design", Oxford University Press, pp. 156~160.
- (3) Tribus, M., Weill. R., 1981, "Information Theory as the Basis for Thermoplastics and Thermodynamics," journal of Applied Mechanics 28, pp. 1~8.
- (4) Rinderle, J.R., 1982, "Measures of Functional Coupling in Design," Transaction of A.S.M.E./Journal of Engineering for Industry, 104(4), pp. 383~388.