

결합지수를 이용한 강화된 공리적 설계 프로세스

고희병*, 문용락*, 김주호*, 김영돈**, 이수홍***, 장민호****, 차성운***

An Enhanced Axiomatic Design Process Using Combinative Index

H.B. Koh*, Y.R. Moon*, J.H. Kim*, Y.D. Kim**, S.H Lee***, M.H. Chang****, S.W. Cha***

ABSTRACT

This paper describes an Axiomatic Design Process enhanced by the Combinative Index that represents combinative strength between function requirements and design parameters. This method combines the advantages of these two methods : 1) Combinative Index that represents combinative strength between function requirements and design parameters so that we clearly understand these information. 2) engineering specifications are categorized into strategies, constraints and Functional Requirements.

In this paper, relationship of FR's and DP's is regarded as one in which uncertainty of information are fundamentally involved. In the reduction of problem with uncertainty, we propose an enhanced Axiomatic Design Process using Combinative Index.

Key Words : 공리적 설계 과정(Axiomatic Design Process), 결합지수(Combinative Index)

1. 서론

인류는 아주 오랜 옛날부터 설계를 하면서 진화하여 왔다. 태고 시대에는 생존을 위한 도구들을 만들어 생명을 부지 하였고, 보다 시대가 복잡해짐에 따라 새로운 도구, 제품들을 설계하여 지금은 인류의 생활에서 설계라는 단어가 들어가지 않는 부분이 없을 만큼 다양한 분야에서 사용되게 되었다.

현대사회에 이르러 소비자의 요구는 다양해 지며 그 변화의 추이는 매우 빠르게 변화하고 있다. 소비자의 요구경향을 만족하지 못하는 제품은 당연히 경쟁력을 잃게 된다. 따라서 현대사회에서 제품생산에 걸리는 시간이 짧아질수록 설계단계에서 제품의 기능적 오차가 적은 설계를 빠른 시간 내에 해 내는 것이 중요해 지고 있다.

많은 새로운 제품들이 하루에도 수백가지씩 시장에 나오고 사라진다. 이러한 상황에서 제품이 시장에서 좀더 오랜 시간 생존해 나갈 수 있는 방법은

시장 선점이라고 하겠다.

비슷한 제품보다 미리 시장을 선점하여 다른 경쟁제품의 진출 시기를 늦추는 것이다. 이러한 조기 시장선점을 하기 위해서는 개발시간을 단축하고 효과적인 설계방법과 도구가 필요하게 된다.⁽¹⁾

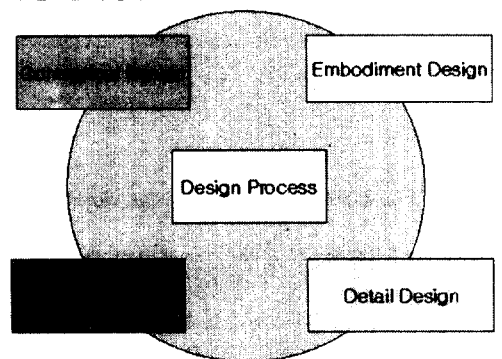


Fig. 1 A design process

제품의 전체 개발 단계에서 설계가 차지하는 부분은 약 70%를 차지한다⁽²⁾. 이러한 제품 개발단계에서 설계요류는 제품이나 공정의 구체화에 있어서 높은 가격과 생산시간의 지연을 초래한다⁽³⁾. Dxiom

- * 연세대학교 기계공학과
- ** PTC 코리아
- *** 연세대학교 기계전자공학부
- **** 한국과학기술연구원

과 Poli(1995)는 설계 프로세스를 다음의 단계(개념 설계, 구체적 설계, 변수 설계, 상세설계)로 설명하였다. 개념설계는 설계 프로세스의 대문과 같은 것으로 이것은 생산 단계와 성능의 가장 큰 요소이다. Suh(1990)에 의해 개발된 공리적 설계 방법은 개념적 설계의 단계에서 주로 응용된다. 그러나 이러한 접근방법을 사용할 때 적절한 FRs(Functional Requirements)과 DPs(Design Parameters)의 연관관계의 정도를 나타내는데 몇 가지 어려움이 발생한다.

본 논문에서는 Combinative Index (CI) 방법을 이용하여 개선된 공리적 설계방법을 제안하는 동시에 FR's 과 DP's 들 사이에서의 불확실하고 불명확한 정도를 명확한 방법으로 그들의 관계를 제시하여 줄 수 있다.

2. Axiomatic Design

공리적 설계 방법에서 Suh(1990)는 Fig. 2 에서와 같이 3 개의 사상(mapping)에 의해 연결되는 4 개의 영역에서의 제품개발 단계를 나누었다. 이 네개의 영역은 각각 고객의 영역(Customer Domain), 기능적 영역(functional Domain), 물리적 영역(Physical Domain) 그리고 과정영역(Process Domain) 이다. Fig. 2 에서의 CA's, FR's, DP's 그리고 PV's 는 각각 고객의 요구사항(Customer Attributes), 기능적 요구사항(Functional Requirements), 설계요소(Design Parameters) 그리고 설계변수(Process Variables)를 나타낸다.

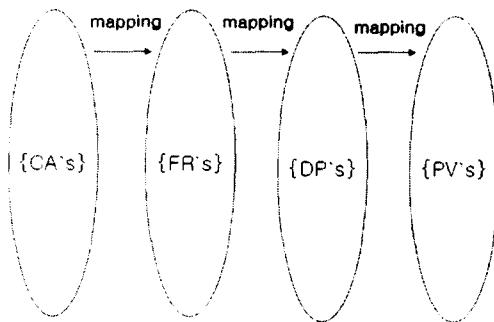


Fig. 2 Four domains of design world

한 영역, “이것을 달성하기 위해서는 무엇이 필요한가?”에서 다른 영역, “이것을 만족하기 위해서는 어떻게 해야 하는가?”으로 성공적인 사상(mapping)을 하기 위해서는 다음의 두 가지 공리에 의해 결정된다.

2.1 독립의 공리

독립의 공리는 객관적인 사상을 통한 설계과정에 있어서 물리적 영역에 포함되어 있는 설계요소

를 가지고 기능적 영역에 포함되어져 있는 기능적 요구사항을 만족시킬 때 특정한 설계요소의 변화가 그와 관련된 기능적 요구사항에만 영향을 미쳐야 한다는 것을 의미한다.

독립의 공리: 각각의 기능적 요구사항 들은 서로 독립성을 유지하여야 한다

2.2 정보의 공리

정보의 공리는 설계에서 필요한 정보를 최소화시키는 것에 관련이 있다. 즉 독립의 공리를 만족시키는 모든 설계 중에서 최소정보를 가지는 것이 최적의 설계를 의미한다.

정보의 공리: 설계의 내용정보를 최소화 해야 한다.

Fig.2 에서 구체적 설계(Embodiment Design) 단계에서 사상(mapping)이 일어나는데 이것이 {FR's}에서 {DP's}로 사상(mapping)이 일어나는 것이다. 여기서 {FR's}과 {DP's}간의 사상관계를 설계행렬(Design Matrix) [A]로 나타내면 다음과 같다.

$$\{FR's\} = [A]\{DP's\}$$

설계행렬 [A]의 Aij 의 요소는 DPj 와 FRi 의 관계를 나타낸다. 만일 DPj 가 FRi 에 강한 영향을 미친다면, Aij 의 값은 “0”이 아니고 “X”라고 표기한다. 만일 DPj 가 FRi 에 아주 미미한 영향을 미치거나 영향을 미치지 못한다면, Aij 의 값은 “0”이며 “0”라고 표기한다. 독립의 공리를 만족하기 위해서 설계행렬 [A]는 반드시 대각이나 삼각행렬을 만족해야 한다. 대각 설계행렬은 독립적 설계인 반면, 삼각 설계행렬은 부분 독립적 설계 행렬이다.⁽⁴⁾

위의 설계행렬에서는 DP's 가 FR's 에 미치는 영향을 이분법적인 관점에서 고찰 하였다. 그러나 설계라는 영역은 매우 유연하고 또한 복잡한 영역으로 이분법적인 요소로 완벽하게 구분하거나 관별해 낼 수 없는 것은 아주 자명한 일이다. 이러한 이유로 본 논문에서는 각각의 DP's 와 FR's 의 연관관계를 수식적으로 표현하여 DP'가 FR's 에 영향을 미치는 정도를 결합지수(Combinative Index)를 이용하여 표현 하였다. 이런 표현 방식을 통해 좀더 객관화 되고 정확한 설계를 할 수 있다.

3. 결합지수(Combinative Index)

어떠한 연관관계를 정형화된 수식으로 나타내고, 이 연관관계의 정량적 연결 강도를 나타내는 방법으로 결합지수(Combinative Index)를 제시 했다.⁽⁵⁾ 이러한 방법은 설계 분야에서 적용된 것이 아니라 조립 강체의 해석부분에서 처음 시도 되었었다. 이리

한 방법을 초기설계분야에 적용하여 각각의 DP's 와 FR's 의 연결관계를 보다 정량적으로 표현 할 필요가 있다.

DP's 가 FR's 에 미치는 영향을 이분법적인 관점에서 고찰 하였으나 설계라는 영역은 매우 유연하고 또한 복잡한 영역으로 이분법적인 요소로 완벽하게 구분하거나 판별해 낼 수 없는 것은 아주 자명한 일이다. 이러한 이유로 본 논문에서는 각각의 DP's 와 FR's 의 연관관계를 수식적으로 표현하여 DP'가 FR's 에 영향을 미치는 정도를 결합지수 (Combinative Index)를 이용하여 표현 하였다. 이런 표현 방식을 통해 좀더 객관화 되고 정확한 설계를 할 수 있다

$$CI = \frac{\sum_{i=1}^n R_i P_i}{\sum_{i=1}^n R_i P_i}, \quad CI_N = \frac{\sum_{i=1}^n R_i P_i C_i}{\sum_{i=1}^n R_i P_i}$$

위의 식에서 Ri 는 현재 FR's 영역에서 연관된 DP's 의 수를 나타낸다. 그리고 Pi 는 FR's 영역에서 연관된 PV's 의 수를 나타낸다. 그리고 Rt 는 현재 FR's 수를 나타내고, Pt 는 PV's 의 수를 나타낸다.

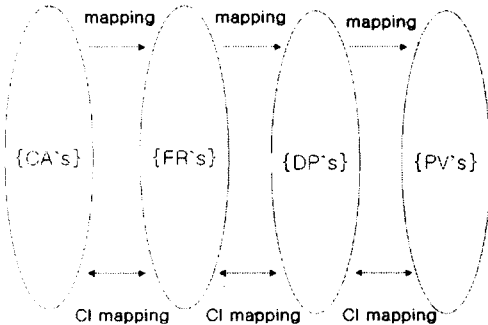


Fig. 3 Four domains and combinative index mapping in design world

FR 에 연관된 DP 의 숫자가 적을수록 현재 만들어진 FR 들이 서로 독립적으로 만들어졌다고 생각되며, 이 FR's 들이 서로에게 영향을 미치지 않고 독립의 공리를 충실히 따랐다고 볼 수 있다.

위에서 언급한 CI 의 값이 작을수록 서로의 FR 에 대한 간섭도가 낮아져서 건전한 설계가 되었다고 판단한다. 설계하는 과정에 불충분한 정보들에 의해 설계자들의 판단을 흐리게 하는 요소들을 초기 설계부터 과감히 배제할 수 있어, 전체 생산 사이클을 줄일 수 있어 빠른 시장진입을 할 수 있게 된다. 그리고 리드타임을 줄여 새로운 제품의 개발 기간을 현격하게 줄일 수 있다.

4. 적용사례

제품의 모든 생산 공정에서는 오차가 발생하기 때문에 제품을 설계할 때, 중요 치수에 대해 공차를 두어 관리한다. 공차의 합리적 설계를 위해서는 부품 및 공정에서 발생한 오차가 최종 조립품의 형상에 미치는 영향에 대한 정량적 관계를 분석하는 일이 필요하다(6).

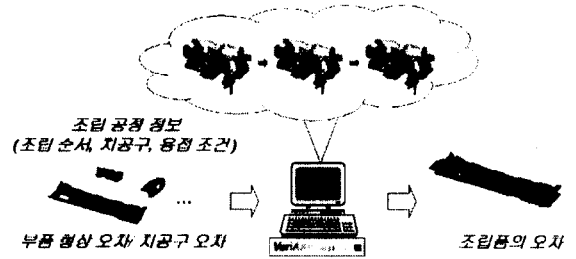


Fig. 4 The framework of VariAns system

자동차 차체의 경우는 100-200 개의 단품(panel) 이 200-300 개의 조립 단계를 통해 조립되어 최종 조립품(B.I.W.)를 이루는 복잡한 공정이다(7). 이와 같은 경우 단품의 오차가 최종 조립품의 오차에 미치는 영향을 예측하기란 쉽지 않아, 컴퓨터를 이용한 조립 오차 해석에 관한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 특히, 차체 조립에 사용되는 강판은 변형이 많은 부품으로 부품을 강체로 가정한 기구학적 오차 해석 방법은 맞지 않으며, FEM 을 이용한 해석 방법이 연구되고 있다(8,9).

이러한 연구 중에 하나가 VariAns 란 차체 조립 오차 해석 및 시뮬레이션 시스템이다.(10,11,12) 이 시스템은 조립 순서, 조립 치공구, 용접점, 부품 등 조립 공정에 관련된 모든 생산 공정 정보와 FEM 해석 기법의 하나인 부구조화 방법을 이용하여, 다양한 오차에 대해 오차 해석을 하는 프로그램이다

VariAns 시스템에서 해석의 순서는 다음과 같이 이루어지게 된다.

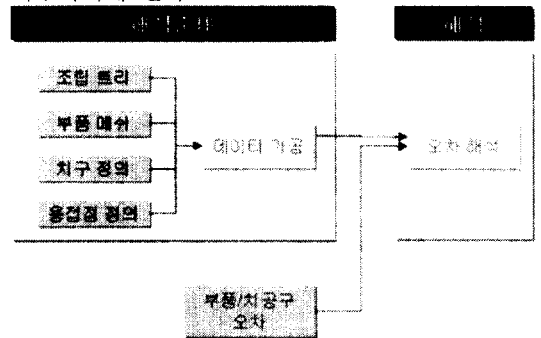


Fig. 5 The process of VariAns system

이러한 해석과정을 갖는 VariAns 시스템을 개발하였다. 하지만 개발된 VariAns 시스템은 그 성능상에서 아주 취약한 결점을 갖게 되었다. Mesh의 수가 1000 개 이상이 될 경우 해석 시간의 수 주일까지 되어 상업적으로 가치를 잃어버리게 되었다. 이러한 시스템의 결점을 개선하기 위해 결합지수를 이용한 강화된 공리적 설계 프로세스 방법을 이용하여 해석의 속도와 양을 증가 시키기로 하였다.

본 논문에서 제기한 방법으로 VariAns 시스템의 주요기능을 나누어 보았다. VariAns 시스템은 Fig. 6와 같이 크게 3 가지의 모듈로 구성되어 있다.

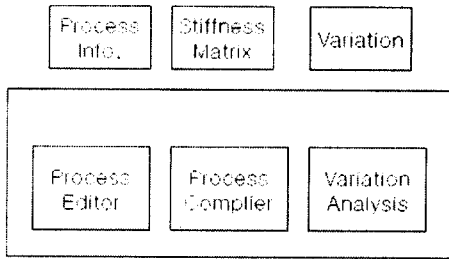


Fig. 6 The structure of VariAns system

이러한 관계를 상위계층관계를 이용하여 FR's 을 나타내고 이것을 다시 DP's 와 VP's 로 나타내면 다음 Fig. 7 와 같다.

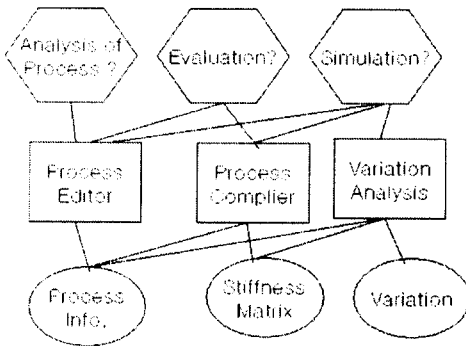


Fig. 7 FR's, DP's and VP's in VariAns system

기존의 방법으로 디자인 행렬을 구현했을 때는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix}$$

위의 디자인 행렬은 decoupled 된 형태 이므로 해석이 가능하다. 즉 적절하게 만들어진 FR's 이라는 것을 나타낸다. 그러나 이것만을 가지고 각각의 FR 이 전체 시스템에 미치는 정도를 알기에는 부족한

점이 많다. 이것은 이분법적인 사고로 관계가 “있다 혹은 없다” 로만 서로의 관계를 나타내어서는 FR 이 전체 시스템에서 어떤 영향을 미치고 어느 정도 파급효과를 미치는 지는 알 수가 없다.

이러한 이유로 Combinative Index 를 Axiom 이론에 적용하여 설계행렬을 구한 것이 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.111 & 0 & 0 \\ 0.444 & 0.111 & 0 \\ 1 & 0.444 & 0.111 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix}$$

위의 디자인 행렬과 비교하여 보았을 때 DP1 이 FR3 에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 전체 시스템에서 제일 많이 고려해야 할 것이 DP1 임을 쉽게 알 수 있다. 개발과정에서도 DP1 을 중점을 두어 개발이 필요할 필요성이 있다.

여기서 이 행렬의 역행렬을 취하면

$$\{DP's\} = [A]^{-1} \{FR's\}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 CI 를 이용한 DP 에 대한 FR 의 가장 디자인 행렬을 구할 수 있다. 여기에서는 가중치가 큰 것이 독립의 공리를 충실하게 따르지 않았다고 판단되어, 시스템에 종속되는 FR 이라고 판단 할 수 있다.

각각의 요소들은 각기 다른 방향으로 영향을 미치고, 기존의 방법들로는 서로 연관성이 있어 보이지만, 본 논문에서 제시한 방법으로 보다 복잡한 문제를 쉬운 방법으로 해결해 낼 수 있었다.

5. 결론

공리 접근의 두 가지 공리, 즉 독립의 공리와 정보의 공리를 이용하여 현재 개발하고 있는 자동차 차체 조립 오차 시뮬레이션 시스템을 구현하는 초기설계 프로세스에 적용하여 보았고, 설계방안을 제시한 결과, 자동차 차체에 걸리던 공차 해석 기간이 5 개월에서 1 개월 15 일로 급격하게 감소 되었다. 이러한 결과를 근거로 복잡한 시스템변수 설계를 필요로 하는 (예를 들면 자동차 차체 조립) 작업에서의 오차 시뮬레이션을 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 해결하였다.

개발자로 하여금 개발의 방향과 성과를 제시할 수 있고 초기에 설계 변경의 번거로움을 제거할 수 있기 위해서는 본 논문에서 제시한 ‘결합지수를 이용한 강화된 공리적 설계방법’을 사용해야 된다. 또한 이러한 방법을 사용하여 기존의 공리적 접근 방법을 풀 수 있었던 문제는 물론이고 연관성 관계를 정확하게 정의할 수 있어서 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 본 논문의 방법을 이용하여 부품의 해석 속도를 향상시켜서 부품 해석의 성능을 향상시킬 수 있고, 작업 프로세스에 대한 분석을 용이하게 하여 작업을 최적화할 수 있게 만들어 제품

개발시간을 단축할 수 있다.

참고문헌

1. Prasad, Biren., *Concurrent Engineering Fundamentals*, Prentice Hall PTR., 1996
2. Suh, Nam P., *The Principles of Design*, Oxford University Press., 1990.
3. YU, Hongqian, SHU, Lily H and Venter, Ron, "An Enhanced axiomatic Design Process", Proceeding of DETC'98., 1998.
4. 문용락, 공리적 접근을 이용한 설계평가 도구의 개발, 연세대학교 기계공학과, 공학석사 학위 논문, 1999
5. 고희병, 조립설계시 상충해결을 위한 결합지수 연구. 연세대학교 기계공학과, 공학석사 학위 논문, 1999
6. Chang M., Gossard, "Modeling the Assembly of Compliant, non-ideal Parts", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 10, pp. 701-708, 1997.
7. Chang M., "Modeling the Assembly of Compliant, non-ideal Parts", PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1996.
8. Nguyen, V., "Constructing Force-closure Grasps", *International Journal of Robotics Research*", Vol. 7, No. 3, pp. 3-16, 1988.
9. W. Cai, S. J. Hu, J. X. Yuan, "Deformable Sheet Metal Fixturing: Principles, Algorithms, and Simulations", *Transaction of the ASME*, Vol. 118, pp. 318-324, Aug, 1996.
10. 김주호, "자동차 차체의 공차 설계를 위한 조립 시뮬레이션 시스템 개발", 연세대학교 기계공학과 공학석사 학위논문, 1998.
11. 김주호, 장민호, "자동차 차체의 공차 설계를 위한 조립 시뮬레이션 시스템 개발", 1998 한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집, pp.265-271
12. 김영돈, "자동차 차체 조립해석에서 조립 치공구 및 부품 오차 모델링", 고려대학교 기계공학과 공학석사 학위 논문, 1999.
13. Long, Y., Hu, J. "A unified model for variation simulation of sheet metal assemblies," *Proceedings of 5 th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*, pp. 149-160, Toronto, Ontario, Canada
14. Sellem, E., Riviere, A., "Tolerance analysis of deformable assemblies," *Proceedings of DETC 98, 1998 ASME Design Engineering Technical Conference*, Atlanta, GA, U.S.A.