

연성 공정변수를 포함하는 설계 평가를 위한 방법론

이경수* · 차성운** · 황운동*

A Study of Method for Design Appraisal Including Coupled Process Variables

Kyung Soo Lee, Sung Woon Cha and Yun Dong Hwang

Key Words : Axiomatic Approach Method(공리적 접근 방법), Design Matrix(설계행렬), Process Variables(공정변수), Design Domains(설계영역), Mapping(사상), CBR(사례기반추론)

Abstract

In axiomatic approach for design evaluation, even if a mutual relation don't appear physical mapping of high level, it can appear in process mapping of low level through coupled PVs(Process Variables), but we must solve it for correct design evaluation. This paper handle a method for solving of coupled PVs by using axiomatic approach and CBR(Case-Based Reasoning). The methodology of proposal took still more shape through the instance of MCPs(Microcellular Plastics).

1. 서론

설계란, 기능적 요구사항들(FRs)을 만족시키는 설계요소(DPs)를 적절히 선택하여 기능적 영역의 FRs와 물리적 영역의 DPs간의 사상에 의해 인지된 요구를 만족시키는 제품, 과정 및 시스템의 형태로, 종합된 해를 창조하는 것이라고 정의할 수 있다. 하지만, 이런 창조적인 종합적 해, 즉 설계를 결정 및 평가한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 설계에 존재하는 많은 요소들은 정량적으로 평가할 수 없는 많은 상호 연관성을 가지고 있기 때문에, 이런 어려움이 존재하고, 올바른 설계 평가 및 의사결정을 위해서는 각 요소들의 상호 연

관성을 고려한 평가가 이루어져야 한다.

본 논문은 공리적 접근법에 의한 올바른 설계 평가를 위하여 연성 공정변수를 해결하기 위한 방법론에 대해서 다룬다. 공리적 접근 방법만으로는 해결하기 힘든 문제를 인공지능 기법의 하나인 사례기반추론(CBR:Case-Based Reasoning)을 도입하여 해결하는 것을 보여준다. 제안된 방법론은 초미세 발포 플라스틱에 적용한 예를 통해 보다 구체화되었다.

2. 공리적 접근 설계와 방법론

2.1. 공리적 접근 설계 방법

‘공리적 접근 설계’란, 제품이나 공정설계를 수행하는 경우에 공리적 접근의 두 가지 공리인 ‘독립의 공리’와 ‘정보의 공리’를 이용하여 설계초기시 나타날 수 있는 문제점을 발견하고, 이를 평가하는 설계방법이다. 이 공리적 설계방법의

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계전자공학부

가장 중요한 요소는 설계자의 경험과 지식에 의한 FRs와 DPs의 적절한 선택이다. 특히, 공리적 설계는 설계 시 나타나는 인자들의 상호 연관성을 설계행렬을 통해 보여줌으로써 보다 올바른 설계과정이 이루어지도록 도와준다.

공리적 설계에 있어서 설계과정은 여러 영역 사이의 사상에 의해 수행된다. 여기서 존재하는 각 영역은 소비자 영역, 기능적 영역, 물리적 영역 그리고 공정적 영역이다. 이 영역들을 간단히 정의해 보면, 소비자 영역은 “소비자의 욕구(요구)”, 기능적 영역은 “소비자의 요구를 달성하기 위한 목표”, 물리적 영역은 “목표를 달성하기 위한 수단” 그리고 공정적 영역은 “수단을 달성하기 위한 고려사항”이다.

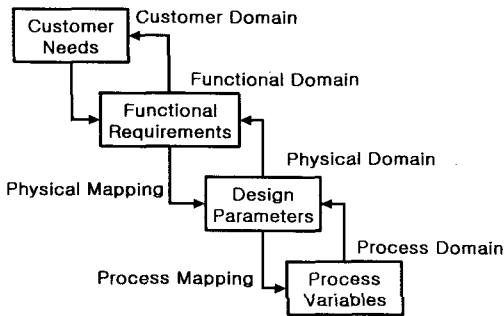


Fig. 1 Design Domains and Design Process Mapping in Axiomatic Design

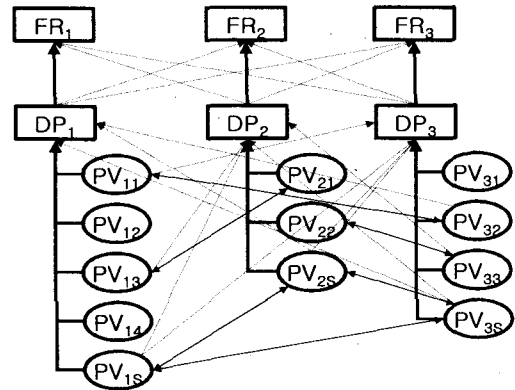
2.2 연성 공정변수(PVs)해결을 위한 방법론

공리적 설계의 규칙에 따르면, 설계과정의 본질은 계층구조에 있다. 이 계층구조는 각 영역들의 계층적인 분해가 즉, 설계가 더 하위단계로 갈수록 더 자세한 내용이 고려되어야 한다.

설계영역 사이의 설계과정 역시 하나의 계층구조로 볼 수 있다. Fig. 1에서 보듯이 소비자 영역에서 공정변수 영역으로 갈수록 설계에 필요한 것들이 보다 자세히 나타나야 하는 것이다. 즉, 여기에서의 계층구조는 구체화의 과정을 나타내는 것이다.

하지만, 올바른 설계의 평가를 위해서는 각 영역의 원소인 FRs, DPs 그리고 PVs가 같은 개수로 사상(mapping)되어질 때 설계의 평가가 올바르게 이루어질 수 있다. 하지만, 하위단계로 생각할 수 있는 PVs에 이르러서는 DPs에 적합한 하나의 변수를 선택하는 것이 상당히 어렵다. 이의 해결

을 위해, 다수의 PVs를 선택한다 할지라도 그 상위 단계인 물리적 사상에서 나타나지 않은 상호 연관성이 공정사상 단계에서는 나타날 수 있다. Fig. 2에서 보듯이 연성 PVs가 각각의 DPs에 연성되어 나타나는 것이다. 따라서 설계의 평가를 위해서는 이런 연성 PVs의 해결이 무엇보다도 필요하다. 이 연성 PVs의 해결은 설계문제의 단순화를 가져올 수 있다. Fig. 2에서 보면, 연성 PVs가 각각의 독립적인 값(설계를 위한 최적의 값)을 가질 때, 설계의 평가 및 해결을 위해 시도해야 할 방법이 급속히 줄어들을 알 수 있다. 즉, 설계 평가를 위한 DPs와 PVs간의 조합으로 이루어질 설계행렬의 수가 급속히 줄어드는 것이다.



Coupled PVs : $PV_{11}=PV_{32}$, $PV_{13}=PV_{21}$, $PV_{22}=PV_{33}$,
 $PV_{15}=PV_{25}=PV_{35}$

Fig. 2 Schematic representation of coupled PVs

Fig. 3은 다수의 연성 PVs가 존재할 때 설계평가의 과정을 나타낸 것이다. 공리적 접근의 적용시 연성 PVs의 해결을 통해 설계의 평가가 이루어지는 것이다. 하지만, 연성 PVs가 많을 시에는 그에 대한 최적의 PVs를 찾기란 쉽지가 않다. 이것은 공리적 접근에 의한 설계평가의 어려움을 의미하는 것이다.

연성 PVs의 독립된 값을 찾기 위해서는 각 상황에 대한 실험은 필수불가결한 것이다. 하지만, 모든 경우에 대한 실험을 통해 최적의 독립적인 PVs의 값을 얻는다는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 보다 빠르고 정확한 문제의 해결을 위해서는 실험의 범위를 줄일 수 있는 방법을 모색하는 것이 중요한 과제이다. 따라서 일정량의 데이터

를 통한 실험값의 예측이 무엇보다도 중요하다.

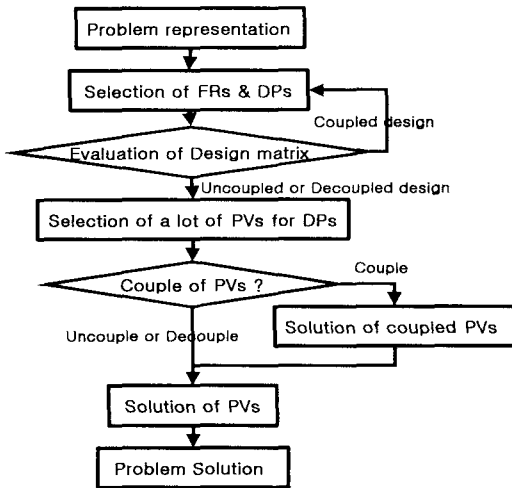


Fig. 3 Axiomatic approach design process for solution of coupled PVs

실험 값의 예측을 위해 적용할 수 있는 방법들로는 유전자 알고리즘과 인공 신경망 등의 방법을 사용할 수 있을 것이다. 하지만, 이 방법들은 스트링의 길이나 표현방법의 문제, 학습방법의 문제 그리고 과정의 이해에 있어서 주어진 문제에는 적합하지 않다. 따라서 여기서 제시하는 방법은 사례기반 추론(CBR:Case-Based Reasoning) 기법을 이용한 연성 PVs의 해결이다.

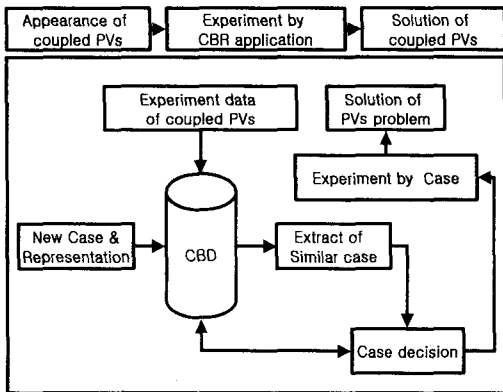


Fig. 4 CBR process for solution of coupled PVs

2.3 사례기반추론 (CBR)

CBR은 인공지능 기법의 하나로서, 과거 문제

로부터 얻은 경험이나 지식을 사례베이스에 저장한 후, 현재의 문제에 대하여 사례 베이스에서 가장 유사한 사례를 선택하여 그 사례가 제시하는 해를 활용하여 문제를 해결하는 기법이다. 이 방법은 표본(sample)의 수가 많지 않을 때, 고려 요소가 많을 때 적용하는 것이 유리하고, 과정 및 결과의 이해가 인공 신경망이나 유전자 알고리즘에 비해 쉽다.

3. 공리적 접근 설계의 적용

3.1 초미세 발포 플라스틱

초미세 발포의 원리는 플라스틱 재료 내부에 고압·저온의 가스를 용해시킨 후 압력을 낮추거나 온도를 높여 열역학적 불안정 상태를 유발시킴으로써 용해도 차이에 의해 플라스틱 내부에 기포가 생성되도록 하는 것이다. 이런 원리에 의해 만들어진 초미세 발포 플라스틱은 재료 내부에 10 μ m 이하의 기포를 가지게 된다. 특히, 초미세 발포 플라스틱은 일반 플라스틱과 기존의 발포 플라스틱이 가지고 있는 장점을 극대화할 뿐만 아니라, 그 동안 단점으로 지적되었던 대표적 기계적 물성인 인성과 충격강도까지 좋아지게 하는 결과를 낳았다.

3.2 초미세 발포 플라스틱의 평가

초미세 발포 플라스틱의 평가를 위하여 공리적 접근 방법을 적용하면, 기능적 요구사항은 다음과 같다.

- FR_1 : 무게의 감량
- FR_2 : 물성의 향상
- FR_3 : 표면품위의 유지

기능적 영역의 FRs에 대한 DP는 다음과 같이 생각할 수 있다.

- DP_1 : 발포율의 증가
- DP_2 : 균일한 셀의 크기
- DP_3 : 금형 조건의 최적화

이 기능적 영역과 물리적 영역의 사상을 설계 행렬을 통해서 나타내어 보면 다음과 같은 설계

방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & X \\ X & X & X \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에 주어진 설계행렬에 의하면, 이 설계는 연성 설계라고 할 수 있지만, FRs와 DPs의 적절한 재배치에 의해 비연성화 시킬 수 있다. 그것의 결과가 식 (2)이다.

$$\begin{pmatrix} FR_2 \\ FR_1 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ O & X & X \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_2 \\ DP_1 \\ DP_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

따라서 주어진 설계는 비연성화 설계임을 알 수 있다. 따라서 초미세 발포 플라스틱은 좋은 설계 즉, 각 영역을 만족하는 좋은 제품임을 알 수 있다.

3.3 DP에 대한 PVs의 선정

DPs에 영향을 줄 수 있는 PVs를 나열해 보면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 발포율(DP₁) : 6개의 PVs

가스 용해량 및 용해속도, 캐비티의 형상, 금형의 압력 및 온도, 게이트의 위치 및 수, 핵생성률 및 핵성장속도, 포화압력 및 온도

- 균일한 셀 크기(DP₂) : 4개의 PVs

가스 용해량 및 용해속도, 가스주입 압력, 가스주입량 및 주입위치, 포화압력 및 온도

- 금형 조건의 최적화(DP₃) : 5개의 PVs

금형의 압력 및 온도, 게이트의 위치 및 수, 냉각 채널의 형상, 스프루의 기울기, 러너의 모양

위의 PVs에 대하여 연성 PVs를 찾아보면 다음과 같다.

- DP₁과 DP₂에 연성된 PVs (2개)

가스 용해량 및 용해속도, 포화압력 및 온도

- DP₁과 DP₃에 연성된 PVs (2개)

금형의 압력 및 온도, 게이트의 위치 및 수

물리적 사상 단계에서 나타난 설계행렬의 평가

에 의해서 초미세 발포 플라스틱은 좋은 설계(제품)임을 알 수 있었다. 하지만, 공정사상 단계에서 나타난 다수의 연성 PVs에 의해 물리적 사상 단계에서 나타나지 않은 상호 연관성이 나타났다. 따라서, 올바른 설계의 평가 및 의사결정을 위해서는 공정사상 단계에서 나타난 연성 PVs의 해결이 반드시 필요하다.

3.4 설계 해결의 순서

식 (2)의 설계행렬에 의해서, 주어진 기능적 요구사항을 만족시키기 위해서는 설계 해결의 순서가 정해짐을 알 수 있다. 그 순서는 DP₃(금형조건의 최적화) → DP₁(발포율의 증가) → DP₂(균일한 셀의 크기)이다.

따라서, 적용된 초미세 발포 플라스틱에 있어서 연성 PVs의 해결은 DPs에 근거하여 DP₁과 DP₃에 연성된 PVs(금형의 압력 및 온도, 게이트의 위치 및 수) → DP₁과 DP₂에 연성된 PVs의 순서(가스 용해량 및 용해속도, 포화압력 및 온도)로 진행되어야 한다.

해결된 PVs(최적의 값을 지닌 PVs)에 의해서 DPs와 PVs간에 나타날 수 있는 설계행렬의 수는 Table 1에서 보는바와 같이 120개에서 12개로 줄어들었다.

Table 1 Change of design matrix number
(unit : each)

Selection	Before solving of coupled PVs	After solving of coupled PVs
DP ₁	6	2
DP ₂	4	2
DP ₃	5	3
Case Num	120	12

하지만, 주어진 연성 PVs의 해결에 있어서 각각의 PVs가 두 개의 DPs와 관계가 있으므로, PVs의 값(최적값)을 찾는다는 것은 쉬운 일이 아니다.

4. 연성 PVs의 해결을 위한 CBR 적용

CBR의 적용에 있어서 가장 중요한 것은 사례베이스 설계, 그 중에서도 사례의 표현 방법이다.

여기서는 사례 표현방법을 중심으로 DP₁과 DP₂에 연성된 PVs를 대상으로 그것의 적용된 예를 보일 것이다.

4.1 사례표현을 위한 입력값과 결과값

DP₁과 DP₂에 연성된 PVs에서 연성 PVs는 입력값이고, 그에 대한 DP는 출력값으로 정의한다. 이를 DP₁과 DP₂에 연성된 PVs에 적용하면 다음과 같다.

- 입력값 : 가스 용해량, 가스 용해속도, 포화압력, 포화온도
- 결과값 : 발포율(DP₁), 셀의 크기(DP₂)

4.2 사례의 표현 방법

실질적으로 실험을 통한 최적의 값을 찾아내는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 최소의 실험으로 최적의 결과값을 얻기 위해서는 한정된 표본 실험 데이터를 바탕으로 결과값을 예측하는 것이 필요하다.

각각의 입력값들과 결과값들은 설계자에 의해 결정된 기준에 따라 분류되게 된다. Table 2에서 보듯이 여기에서는 변수의 값들을 설계자의 기준에 따라 A, B, C라는 3가지 분류로 나누었다. 물론, 각 변수에 따라 이런 분류는 4가지, 5가지 등으로 설계자의 판단에 따라 임의로 정할 수 있을 것이다.

Table 2 Classification of input and output values for case representation

Input/Output	Classification 1	Classification 2	Classification 3
Gas meltage	Condition 1	Condition 2	Condition 3
	A	B	C
The velocity of gas dissolution	Condition 1	Condition 2	Condition 3
	A	B	C
Saturation pressure	Condition 1	Condition 2	Condition 3
	A	B	C
Saturation temperature	Condition 1	Condition 2	Condition 3
	A	B	C
Foaming rate	Condition 1	Condition 2	Condition 3
	A	B	C
Cell size	Condition 1	Condition 2	Condition 3
	A	B	C

이와 같은 방법에 의하여 6개의 변수는 Table 3에서 보듯이 하나의 사례를 구성하게 된다. 이런 구성된 변수들의 사례는 하나의 패턴을 형성하게 된다. 이 패턴은 CBR의 과정에 의해 새로운 문제에 대한 결과 값의 예측에 적용되는 것이다.

Table 3 Establishment of case pattern of case representation

Selection	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	...
Gas meltage	A	B	A	C	A	...
The velocity of gas dissolution	A	A	B	C	A	...
Saturation pressure	B	B	B	B	C	...
Saturation temperature	C	A	A	B	C	...
Foaming rate	C	A	A	B	B	...
Cell size	B	A	B	A	B	...

사례 1의 경우를 살펴보면, 입력변수의 패턴은 AABC이고, 이런 패턴에 의한 출력변수의 패턴은 CB임을 나타낸다. 여기에서 사용되는 사례기반의 패턴들은 정확한 예측값들을 나타내지는 않지만, 결과값들의 범위 예측은 가능하게 한다. 하지만 이런 범위에측 또한 별도의 추가 실험(예측된 범위에 의한 실험)을 통해 극복이 가능하다. 즉, CBR과 실험을 병행하는 방법은 실험만을 통한 최적값의 도출이나 인공지능 기법에 의한 최적값 도출보다는 정확도면이나 특히, 시간이라는 비용적 측면에서 상당히 우수한 성과를 나타낼 수 있는 것이다. 하지만, 여기서 가장 중요하게 생각해야 할 것은 공리적 설계에 의해 해결이 힘들었던 문제를 해결할 수 있다는 사실이다.

4.3 CBR의 적용 및 연성 PVs의 해결

앞에서 사례베이스 설계를 위한 사례표현방법을 살펴보았다. 이 사례표현 방법은 앞에서 언급했듯이 정확한 예측값을 얻을 수는 없고, 예측값의 패턴 즉, 값이 존재하는 범위만을 나타낼 수 있다. 하지만, 이런 예측은 실제 실험에 있어서 실험자의 시행착오를 상당히 줄여줄 수 있을 뿐

만 아니라 실험의 양 그리고 설계의 평가에 있어서도 시간이라는 비용을 현격히 줄여준다. 여기에서는 CBR의 과정인 조회, 적용, 테스트 등의 각 부분에 대한 언급은 피하겠다. 이 과정들은 기존의 CBR 방법들에 각각의 문제에 맞는 유사성 계산방법 등의 수정이 가해지면 가능하기 때문이다.

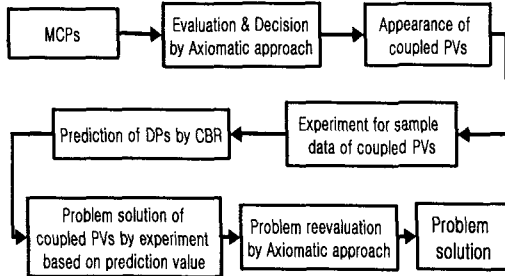


Fig. 5 Process applied to Mcps for solution of coupled PVs

Fig. 5는 전체적인 연성 PVs의 해결을 위한 과정을 나타낸 것이다. 즉, 공리적 방법과 CBR 그리고 실험의 병합을 통한 설계평가 및 해결에 있어서 간과 혹은 어려웠던 문제의 해결 과정을 초미세 발포 플라스틱(MCPs)의 적용을 통한 방법론을 보인 것이다.

5. 결론

지금까지 연성 PVs의 해결을 위한 방법론을 제시하였다. 또, 방법론의 타당성을 위하여 초미세 발포 플라스틱에 적용해 보았다. 이는 공리적 접근 설계가 자신의 방법이 갖고 있는 한계를 CBR이라는 방법을 통하여 극복되어 보다 올바른 의사결정의 도구가 될 수 있음을 보인 것이다. 또, CBR과 실험의 병합은 실험만에 의한 결과값 도출 혹은 인공 신경망이나 유전자 알고리즘에 의한 최적값 도출의 방법 등 보다 더 정확하고, 시간이라는 비용적 측면에서 우수성을 보일 것으로 기대된다. 하지만, 이 방법론의 보다 구체적인 검증을 위해서는 다른 응용분야에 적용해 보아야 할 것이고, 실질적인 표본 데이터를 통한 검증이 필요하다.

공리적 접근 방법과 CBR의 병합은 의사결정에 있어서 보다 강력한 도구로서 사용될 수 있다.

그리고, 연성 PVs의 해결뿐만이 아니라 다른 방법으로도 접근이 가능할 것으로 보인다. 하지만 가장 중요한 점은 설계자가 과연 그 문제를 CBR에 적용이 가능한가를 판단하는 것이다. 앞에서 적용한 초미세 발포 플라스틱의 경우는 평가에 있어서 고려사항이 많이 존재하기 때문에 이 방법이 좋았지만, 문제에 따라서는 적용이 불가능할 수도 있다. 하지만, 연성 PVs와 결과의 도출에 있어서 많은 제한적 요인이 있는 경우에 국한된다면, 이 방법은 상당히 유용할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Nam P. Suh, 1990, "The Principles of Design", The Oxford University Press
- (2) Nam P. Suh, 2000, "Axiomatic Design : Advances and Applications", The Oxford University Press
- (3) Sung Woon Cha, 2001, "Creative Design Method", Yonsei University
- (4) Michael J.A.Berry, 1997, "Data Mining Techniques", John Wiley & Sons, Inc.
- (5) Kyumg Shik Shin, 2000, "Machine Learning : Theory and Practice", Course Bulk Pack
- (6) 정대진, 차성운, 윤계동, 2001년 1월, "공리적 설계를 이용한 초미세 발포 공정설계", 한국정밀 공학회지, 제 18권 제 1호, pp 195-200
- (7) 황윤동, 차성운, 2001년 4월, "발포배울의 향상을 위한 금형시스템의 공리적 설계", 대한기계학회논문집 A권, 제 25권 제 4호, pp 637-644