

## 합리적 사출제품금형설계를 위한 지식형 통합설계시스템

허용정\*

### An Integrated Design System Using Knowledge-Based Approach for the Rational Design of Injection-Molded Part and Mold

Yong Jeong Huh\*

**요약** 본 논문은 사출금형설계 관련 지식과 경험을 전산정보화 하고 유동해석프로그램과 기계적 성능예측 프로그램을 결합시켜 지식형 설계해석 및 평가시스템을 구축하였다. 지식형 설계시스템은 주어진 설계에 대해 유동해석프로그램을 구동시켜 열기계적 데이터베이스를 얻고, 필요에 따라 기계적 성능예측 프로그램을 수행시켜 설계의 최종적인 진단 및 평가를 수행하게 된다. 설계에 대한 평가 결과에 의하여, 단일 설계가 잘못된 것으로 판정이 되면 그에 해당하는 재설계 대안을 자동으로 생성하도록 하여 합리적인 설계가 가능하도록 하였다.

**Abstract** The design and manufacture of injection molded polymeric parts with desired properties is a costly process dominated by empiricism, including the repeated modification of actual tooling. This paper presents an knowledge-based synthesis system which can predict the mechanical performance of a molded product and diagnose the design before the actual mold is machined. The knowledge-based system synergistically combines a rule-based system with CAE programs. Hueristic knowledge of injection molding, flow simulation, and mechanical performance prediction is formalized as rules of an expert consultation system. The expert system interprets the analytical results of the process simulation, predicts the performance, evaluates the design and generates recommendation for optimal design alternatives.

**Key Words** : Knowledge-based synthesis system, Injection molding, Flow simulation, Knowledge formalization

#### 1. 개 요

공학적 범위에 있어서, 설계된 제품의 기능적 기술상 태로부터 물리적 실체로 변환하기 위한 계층적 변환과정이라고 정의될 수 있다. 설계업무란 실제적인 부품요소, 기하학적 형상, 그리고 사용자가 필요로 하는 기능들을 수행할 수 있는 제품을 가공하기 위한 공정을 자세히 기술하는 것이다. 이러한 설계를 합리적으로 수행하기 위해서는 시간과 비용이 많이 소모되는 시작품 제작 이전에 설계를 평가할 수 있는 기준과 재설계를 생성할 수 있는 척도가 필요하다. 사출성형의 경우 초기설계시에 제조공정에서의 성형성이 적절하게 미리 고려되지 않으면 최종제품의 품질이 저하되게 된다. 예를들면 공정조건 선정, 부품의 치수결정, 금형설계 등 모든 사

항들이 최종제품의 불량, 이방성 문제 등과 밀접하게 관련이 되어 있다. 이러한 결정은 예측이 대단히 어렵기 때문에 주로 경험에 의존해 왔다. 이러한 경험적 방법의 단점은 시제품 제작을 통하지 않고서는 설계가 평가되기 힘들다는 데 있다(Figure 1(a)). 더구나 진본성은 오랜기간 훈련과 경험축적에 의해 얻어진다. 최근의 해석기술의 발달로 인하여 시제품 제작 이전에 설계를 해석적으로 평가하는 것이 가능해졌다(Figure 1(b)).

지식형 설계시스템은 유동해석 및 기계적 성능예측 프로그램과 사출성형 전문가시스템을 결합시켜 고가의 시제품 제작을 통한 반복시험의 과정이 없이도 설계의 평가를 가능하게 하였으며, 설계가 잘못되었을 경우에는 설계대안을 제시함으로써 미숙련 설계자도 숙련 설계자와 똑같은 전문성을 가지고 설계를 할 수 있도록 하였다.

\*한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

본 논문은 (주)대양ENG, 중소기업청과 충청남도, 한국기술교육대학교가 공동 지원하는 2001년도 산학연지역 컨소시엄 사업과제의 소과제인 정밀 플라스틱 금형 설계·해석·평가에 관하여 개발된 논문임을 확인합니다. (Tel: 041-560-1135)

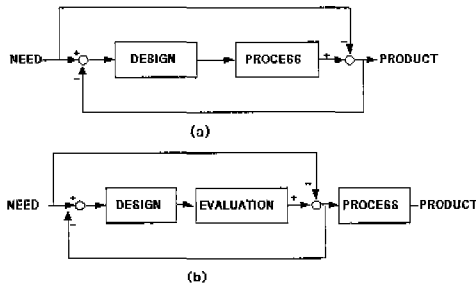


Figure 1. Block diagrams of synthesis, (a) Conventional synthesis, (b) Computer-based rational synthesis.

## 2. 지식형 CAE 기술

본 논문은 사출성형설계에 있어 주어진 설계에 대한 진단·평가 및 대안제시를 위한 전문가시스템의 구축에 관한 것으로, 이는 성형성과 기계적 성능, 웬드라인(weld line)에 대한 지식과 문제가 발생했을 때의 경험적 대책에 대한 노하우들을 전문가시스템 도구인 EXSYS를 이용하여 지식베이스화하고, 유동해석프로그램과의 결합에 의해 실현되었다[1,2]. 시스템의 전반적인 구성은 다음과 같다(Figure 2).

### 2.1. 공정 시뮬레이션

사출성형제품은 두께가 얇은 준 3차원 형상이다. 이러한 이유로 일반화된 헬레쇼우 모델을 채택할 수 있다. 이에 수반되는 가정조건은 관성효과, 흐름방향 열전도, 두께방향 열대류가 무시된다는 것이다. 사출성형제품의 공정해석을 위한 해석모델은 다음과 같이 주어진다.

#### 2.1.1. 지배방정식

얇은 캐비티에 있어서 헬레쇼우 유동 모델은 비등온 조건하에서 비탄성 비뉴턴 유체로 일반화될 수 있다. 이 경우 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\nabla \cdot (\mathbf{S} \nabla P) = 0 \tag{1}$$

$$u = -\frac{1}{b} \frac{\partial p}{\partial x} S, \quad v = -\frac{1}{b} \frac{\partial p}{\partial y} S \tag{2}$$

여기서

$$S = \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz \tag{3}$$

에너지 방정식은

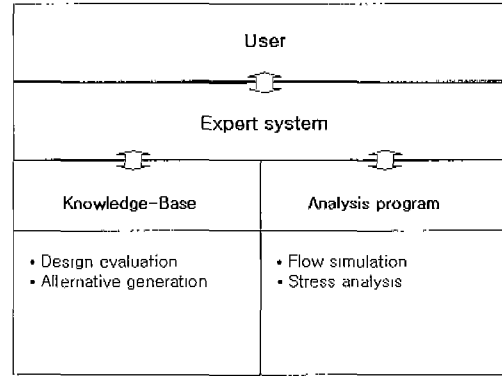


Figure 2. A framework of expert system in injection molding.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \tag{4}$$

여기서

$$\eta = m(T) \dot{\gamma}^{n-1} = A \exp\left(\frac{T_a}{T}\right) \dot{\gamma}^{n-1} \tag{5}$$

$$\dot{\gamma} = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{6}$$

### 2.2. 지식의 논리화 및 지식베이스 구축방안

#### 2.2.1. 초기설계 생성

초기설계를 얻는 방법에는 3가지 경로가 있다. 첫째는 기존의 설계를 그대로 이용하는 경우이다. 둘째는 기존의 설계를 수정하여 실제안을 얻는 방법이다. 마지막은 설계전문가가 새로운 설계를 만들어 내거나 설계전문가의 지식을 지식베이스화하여 이를 이용하여 새로운 설계를 얻어내는 방안이다. 위의 어떠한 방법에 의해 설계가 생성된다 하더라도 얻어진 설계가 최적설계안이라고 보기는 어려우며 이러한 설계안들을 평가하여 최적에 가까운 설계로 만들어 나가야 한다.

설계하고자 하는 제품형상이 정해졌다고 하더라도 사출성형을 이용하여 제품을 성형하는 경우 사용되는 고분자 재료의 물성, 사출성형 공정 특성을 완벽히 이해하지 않고서는 원하는 제품을 인기가 거의 불가능하다.

일례를 들면 사출제품의 설계에 있어서 강성조건을 만족시키기 위해 제품두께가 일정두께를 넘어서는 경우, 플라스틱재료는 열전도율이 낮아 두께가 재료별로 주어지는 임계값을 넘게되면 커다란 수축과 과도한 변형이 발생하여 원하는 제품형상을 얻기가 불가능하게

된다. 이 경우 사출성형 특유의 부형상이 추가되게 된다. 여기서 원하는 제품형상은 주형상, 사출성형에서 부가되는 형상은 부형상이라고 한다. 이러한 이유로 전문가 시스템 기법을 이용한 지식형 설계시스템 구축에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

2.2.2. 설계에 대한 평가

일단 초기설계가 얻어지면 다음 단계로 얻어진 설계의 성형성과 기계적 허용성에 대한 평가가 필요하다. 설계의 성형성 및 미세조직의 이방성은 코넬대학에서 1989년에 개발된 상용 유동해석 프로그램인 C-MOLD에 의해 정량적 예측이 가능하다.

설계된 부품 전체에 대한 응력 및 변형도에 관한 계산은 응력해석을 통해서 직접적으로 얻어질 수 있으나 과도한 계산시간과 기억용량이 소요되는 관계로 큰 응력이 예상되는 경우와 복잡한 응력 분포가 예상되는 경우 외에는 별로 채택되지 않는다. 이렇게 설계를 평가하는데 있어 맹목적인 응력해석을 회피하기 위하여 경험적 방법이 도입될 수 있다.

기계적 이방성을 가진 부품의 경우 가장 약한 방향으로 응력 집중이 발생하면 기계적 파괴가 일어나게 된다. 그리고 위의 하중조건에 있어서 응력집중은 구멍(holes), 코너(corners), 가장자리(edges), 얇은 단면에서 발생하게 된다. 그러므로 이러한 부분에 미세 조직의 이방성이 나타나는 경우 부품의 파괴가 예상된다. 이상의 관찰 및 논의를 통하여 성형제품의 기계적 성능에 대한 규칙이 설계 평가를 위하여 세안될 수 있다. 성형성의 경우는 유동해석을 통해서 쉽게 설계 평가를 수행할 수 있는데, 유동해석에서 계산된 사출압력이 사용기계의 한도론 초과하게 되면, 성형이 불가능하게 되고 설계는 성형불능으로 평가되어진다. 이러한 평가들을 근거로 하여 성형성과 기계적 성능, 웬드라인에 대한 지식들을 전산정보화 하였다.

이러한 평가과정을 통과할 경우 실제 성형시에도 불량 발생 확률이 줄어들게 되는 것이다. 제안된 초기 설계를 설계단계에서 해석 및 시뮬레이션을 통하여 평가함으로써 합리적인 설계를 얻을 수 있게 되는 것이다.

이 단계에서 평가가 불량으로 판정될 경우 합리적인 재설계 방안을 생성할 수 있는 방안이 요구된다.

2.2.3. 재설계를 위한 방안

재설계를 생성하기 위해서는 사출성형과 관련된 변수들 간에 인과관계가 필요하게 되는데 본 연구에서는 많은 문헌을 참조하고 현장전문가들과의 논의를 거쳐 합리적 근거를 제시하였다.

사출 전문가들은 시제품의 시험결과에 근거하여 간단하고 직관적인 방법으로 재 설계에 대한 대책을 제시하는데, Table 1에 그러한 예들이 나타나 있다.

규형의 불완전한 충전상태가 발생하는 3가지 주요 원인은 다음과 같다.

- 1) 용량이 적은 기계를 사용한 경우
- 2) 제조공정의 파라미터 설정이 잘못된 경우
- 3) 공기나 가스가 규형의 공극내에 흡입되어 배압이 생긴 경우

1)의 경우는 요구되는 사출압력과 사용기계의 용량을 비교하여 쉽게 판단할 수 있다. 즉 사출성형을 위해 소요되는 동력  $Wr = Q$  (사출유량) x P (소요사출압력)의 식에서 계산 가능하므로 이 값과 기계의 최대 동력을 비교함으로써 쉽게 성형성을 판별할 수 있다. 이러한 경우 대책은 보다 큰 용량의 기계로 대체하거나 기계용량 한도내로 사출압력을 강하시킴으로써 최적 사출유량을 선정하면 된다.

3)의 경우는 규형의 설계에 있어 특히 벤트의 설계가 잘못된 경우이며 본 연구에서는 부품 설계만을 고려하였으므로 이 경우는 제외하였다. 그러므로 성형불능의 주된 원인은 1)과 2)의 경우로서 유동물질이 미리 고화됨으로써 배압이 형성되어 성형이 불가능하게 되는 경우이다. 이 문제에 대한 경험적 대책은 유동물질의 온도, 규형의 온도 또는 사출 유량을 증가시키는 것이다. 그러나 이러한 공정 파라미터들은 부품의 미세 조직 결정에도 중요한 인자로 작용하므로 성형불능에 대한 대책은 기계적 허용성에 대한 대책과 함께 논의되어야 할 것이다.

비성형이 발생했을 경우 재설계 방안을 생성하는 규칙중의 하나를 예시하면 다음과 같다.

Table. 1 Heuristic rules for curing defects of Injection molding

Fault	Generalized cause	Possible cures
Short Molding Sinks and Voids Weld and Flow Marks Poor Surface Finish	Cavity not filling properly	Increase injection pressure Increase injection rate Increase melt and mold temperature Increase lead Improve mold venting Increase size of gate, sprue and runner
Burn Marks	Lack of mold venting	Improve mold venting
Mechanical Sticking Flash Warping	Over-pressurization of cavity	Reduce injection pressure Use minimum hold-on pressure and time Fill more quickly
Silvering and Splash Marks Decomposition	Overheating of material	Reduce cylinder temperature Reduce effects of mechanical heating
Distortion	Ejecting too hot	Increase cooling time Eject over large areas
Jetting	Linear velocity of melt too high	Reduce velocity or break up stream of melt
Lamination, crazing Surface Cracking	Frozen-in stresses	Ensure mold filling at lowest possible pressure

IF : Short Shot is Occurred  
 THEN : Increase Melt Temperature  
 AND Increase Injection Speed  
 AND Increase Mold Temperature

위의 경우는 실제 현장에서 사용되는 전문가의 경험적 규칙의 예이며 이같은 규칙들이 지식베이스 내에 다수 포함되어 있다.

사출성형제품 사용 중의 기계적 파손의 일반적 이유는 미세 조직 및 기하학적 형상의 부적절한 결합 때문이라고 볼 수 있다. 이러한 경우에는 보강재 부가, 게이트의 위치 및 형상변경, 공정파라미터 조절 등의 방법이 있을 수 있다. 이러한 모든 것들이 기계적 허용성의 규칙으로서 포함되어 있다[3-6].

Figure 3은 연구를 통해 실험적, 이론적으로 입증된 결과들을 보여주고 있다. 이들 각각의 관계들이 다중 결합적인 성격으로 인하여 명확하게 구분될 수는 없다고 하더라도 일반적으로 인과관계는 나타낼 수 있다.

● 일반적인 인과관계

이방성의 방향은 주형상, 부형상, 게이트의 기하학적 형상 및 위치 등의 기하학적 변수에 주로 의존한다.

이방성의 크기와 성형성은 주로 유동물질 및 금형의 온도, 사출유량 등의 열 및 온도관계 변수들에 의존한다.

비록 이같은 사실들이 순수하게 이론적으로 추론된 것은 아니라고 할지라도, 설계대안을 제시하는데 효율적으로 사용될 수 있다. 이러한 경험적 지식들은 Figure 4와 같은 생성규칙에 의해 논리적으로 표현되어 전문가 시스템이 만들어졌다[7].

2.3. 지식형 설계시스템 구축

지식형 설계시스템은 유동해석 프로그램과 기계적 성능예측 프로그램이 전문가시스템과 결합되어 구축되었으며, Figure 5는 이렇게 구축된 시스템의 구조를 보여주고 있다. Master controller는 사용자로부터 초기정보를 부여받아 다음 단계를 위한 조건을 요청하기 위하여 전문가시스템을 동작시키게 된다. 전문가시스템으로부터의 결정사항에 따라 Controller는 유동해석프로그램을 가동시키거나 추가적 질문 및 결정을 요청하기 위해 사용자에게 전문가시스템의 결정사항을 되돌려 보내게 된다. 유동해석프로그램은 열 기계적 데이터베이스를 구성하기 위한 핵심이 되며, 새로운 설계 진단이 요청될 때마다 프로그램이 수행되게 된다. 이러한 설계순서가 Figure 6에 도시되어 있다.

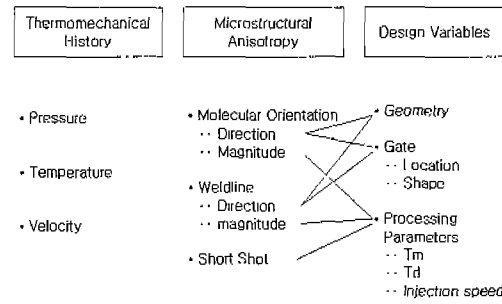


Figure 3. Causal relationships between design variables and process variables.

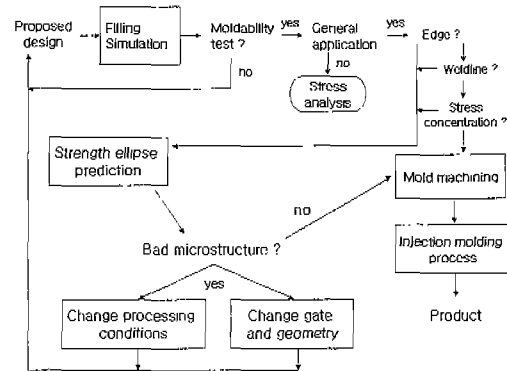


Figure 4. Conceptual representation of the decision rules for design diagnosis and redesign.

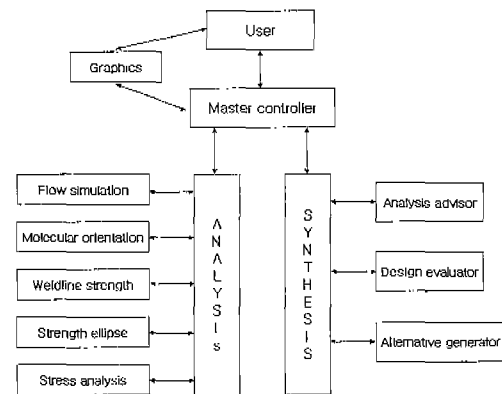


Figure 5. Ultimate structure of a knowledge-based synthesis system in injection molding.

기계적 성능예측 프로그램들은 전문가시스템이 그 프로그램들 중의 특정 프로그램의 수행을 요청할 경우에만 수행되어 진다. 이러한 수행과정을 거쳐 얻어진 결과는 전문가시스템으로 보내지고 설계의 최종적 진단이 수행된다. 만일 설계가 잘못된 것으로 판정이 나면 사용자는 전문가시스템의 조언에 따라 설계대안을 강구하게 되며 만족된 결과를 얻을 때까지 앞의 과정을 계속 반

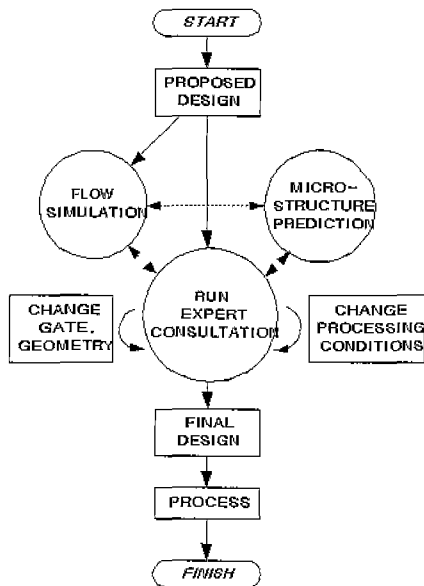


Figure 6. The prototype expert synthesis system for injection molding.

복하게 된다.

### 3. 결 론

1) 사출제품 급형설계에 있어 주어진 설계에 대한 진단 및 평가를 수행하고, 평가분량 또는 실계가 잘못된 것일 경우에는 재설계 대안을 제시할 수 있는 지식형 설계해석평가시스템을 구축하였다.

2) 지식베이스 내에는 설계의 진단·평가분 위한 관련 지식과 경험들이 생성규칙으로 전산정보화 되어 있으며, 기계적 허용성과 성형성 평가를 위한 프로그램들이 상호보완적으로 작성·결합되어 있다.

3) 본 연구에서 제안한 지식형 설계해석평가시스템은 설계 현장에서 급형 제작 이전에 제안된 설계를 해석 및 평가하여 합리적 설계를 얻는 데 필수적으로 이용될 수 있다. 또한 현장 및 교육기관에서 급형 설계자 교육용으로 활용도 가능하다.

### 참 고 문 헌

- [1] Waterman, D. A, "A Guide to Expert System," Addisonwesley, 1985.
- [2] Weiss, S. M, Kulikowski, C. A, "A Practical Guide to Designing Expert Systems," Rowman & Allanheld, 1984.
- [3] Bown, J, "Injection Molding of Plastic Components," McGraw Hill, 1979.
- [4] Cogswell, F. N, "Polymer Melt Rheology," John Wiley and Sons, 1981.
- [5] Postans, J. H, "Plastic Molding," Oxford Univ. Press, 1978.
- [6] Rheinfeld, D, "Influencing Molding Quality during Injection Molding," Injection Molding Technology, VDI-Verlag GmbH, 1981.
- [7] "EXSYS User's Manual," EXSYS, Inc., 1985.