

사출성형 제품의 지식형 설계시스템 연구

김 상 국
한국 과학 기술원 CAD/CAM 연구실

Knowledge-Based Synthesis System for Injection Molding

Sang Gook Kim
KAIST CAD/CAM LAB.

Abstract

The design and manufacture of injection molded polymeric parts with desired mechanical properties is a costly process dominated by empiricism, including the modification of actual tooling. This paper presents an interactive computer-based design system for injection molded plastic parts. This knowledge-based synthesis system provides a rational design strategy for injection molding and molded parts. It synergistically combines a rule-based expert system for heuristic knowledge with analytical process simulation programs. The thermomechanical properties of a molded part such as the effect of molecular orientation and weldline strength are predicted by the analysis programs; while the expert system interprets the analytical results from the process simulation, evaluates the design, and generates recommendations for optimal design alternatives. The heuristic knowledge of injection molding is formalized as production rules of the expert consultation system.

1. 서 론

설계라 함은 개념영역(Conceptual domain)안에서의 어떤 필요성을 기능상의 묘사로 부터 실현영역(physical

domain)안의 제품실체에 이르기까지의 계층적인 변환과정이라고 말할수 있다. (1, 2)

개념설계우의 설계작업은 설계된 제품이 원하는 기능을 갖도록 필요한 요소의 기하적인 형상과 재료, 그리고 알맞은 제조공정과 변수를 정하는 과정에서 창조적이고 해석적이며, 이론적인 경험에 의하여 반복되는 시도이며, 이와 같은 관점에서 합리적인 설계(rational design)란 제품의 설계, 제조 및 그 이용에 있어서 최소의 인적, 물적 자원과 정보를 소모토록 하는 것이라고 정의 될수 있다. (2, 3) 따라서 합리적인 설계가 되기 위해서는 반복시도여 의한 설계를 지양하고 시제품(prototype)을 만들기 전에 설계를 평가할 수 있어야 하며, 이를 토대로 최적의 설계에 이룰수 있는 방법이 체계적으로 마련 되어야 한다.

지금까지 여러가지의 합리적인 설계방법들이 연구되어 왔으나 대부분의 경우 제품설계에 있어서 설계자가 조직적이고 창의적으로 목표에 접근할 수 있는 방법론에 치중 되어 왔으며, 설계된 제품의 제조공정을 포함한 종합적인 합리화와 최적화는 간과되어 왔었다. 한편 공정중 재료의 상변화가 발생하는 대부분의 고분자 재료 성형가공법과 금속재료의 주조 및 열간 단조등의 제조공정들은 공정여 관한 지식없이 설계가 이루어 지면, 기하적인 형상과 가공조건등 설계변수간의 상관 관계에 의하여 기계적 이방성 및 국소적인 결함들이 발생하여 최종제품의 질이 현격히 저하되거나 심지어는 제조가 불가능하게 되는 예가 빈번하다. (5, 7, 12) 따라서 이와같은 공정을 이용한 제품설계의 경우 제조공정에 대한 깊은 이해를 갖고

제품설계가 이루어져야 하며, 제조공정을 포함한 설계의 평가와 최적화를 통하여 합리적인 설계(rational design)가 이루어질 수 있을 것이다.

2. 사출성형제품의 합리적 설계

사출성형은 분말 또는 pellet 상태의 고분자 재료를 열을 가하여 유동상태로 만들고 압력을 가하여 금형 내부의 공극으로 충전한뒤 냉각고화 시켜서 복잡한 3차원 형상의 제품을 단일공정으로 연속제조 할 수 있는 고분자 재료의 주된 가공방법이다. (5) 사출성형의 설계는 제품과 금형의 기하적 형상을 정하고 재료 및 가공조건을 선택하는 일들이 포함되며, 각 설계변수들이 상관하여 최종 사출 제품의 기계적 및 외형적 질이 결정되게 된다.

사출성형의 한 공정주기는 재료의 가열(heating), 충전(filling), 압입(packing) 및 냉각고화(solidification) 등의 단위과정으로 이루어 지게되며, 한 주기를 거치면서 분말 또는 pellet 형태의 고분자 재료는 고체 상태에서 유체상태로, 다시 고체상태로 환원이 되면서 복잡하게 분포된 미세조직을 갖게된다. 사출중의 고분자 재료는 유동중 외력에 의한 점탄성적 변형과 금형표면으로 부터의 열전달에 의한 냉각이 동시에 일어나게 되어, cavity 의 형상과 가공조건, 재료의 특성에 따라서 불균일 하게 분포된 기계적 이방 성질을 갖게되는바, 사출 제품의 질은 재료가 가공중 거치게 되는 열-기계적(thermo-mechanical) 시간적 변천과정을 해석함으로써 예측될 수가 있다. (12 - 14) 그러나 이론적인 사출공정의 해석은 실질적으로 단순한 경우 이외에는 가능하지가 않았으며, 종래의 사출성형 설계는 제품설계후 금형을 가공하여 시작품을 제작하고, 각종 시험을 거쳐서 만족할 만한 제품이 나올때까지 재설계, 재가공의 반복을 통하여 이루어져 왔다. (그림 1. a) 금형의 설계 및 가공은 신제품 개발기간의 약 70%, 개발비용의 약 30%가 소요되는 병목과정으로, 사출제품의 품질을 향상시키고 제조원가를 절감시키며 납기를 단축하기 위해서는 금형가공 전에 설계를 평가하고 필요한 만큼 재설계를 할수있는 합리적인 설계방법이 마련되어야 한다. (13) (그림 1,b)

사출성형 설계의 이론적인 해석 및 평가가 실질적으로

가능하지 않은 이유는 복잡한 실제의 성형공정을 모델링하고 simulation 하는 과정에서 단순화하는 가정이 필연적으로 부수되게 되어, 결과적으로 해석결과가 부정확해지며 동시에 막대한 계산노력만 소모되기 때문이다. (13) 따라서 전문가의 축적된 경험적 지식만이 좋은 설계를 얻을수 있는 길이었다.

그러나 경험에 의한 설계는 좋은 제품이 한번에 설계되는 경우도 있으나 실제 시작품을 만들기 전에는 확인될수가 없으며, 제품의 형상이 복잡해질 수록 빈번히 재설계를 요하게 된다. 또한 경험적인 지식은 체계적으로 논리적인 축적이 불가능 하기 때문에 전문가로 부터 비전문가에게 쉽게 전달이 될수 없으며, 오직 오랜기간을 거친 숙련과 경험에 의해서만 얻을수 있는 폐쇄적인 지식인 이유로 합리적인 설계방법에 응용될수가 없었다.

본 연구에서는 전문가들의 경험적인 지식을 과학적이고 논리적으로 전산 정보화 할수있는 지식형 전문가 시스템과, 비록 제한된 범위이지만 성형공정을 이론적으로 해석하고 제품성능을 예측할수있는 해석시스템을 상호 보완적으로 결합하여, 사출성형의 전문가 뿐만이 아니라 비전문가도 좋은 품질의 사출제품을 짧은 기간내에 최소의 노력과 경비로 설계할수 있는 대화식 지식형 설계시스템의 개발에 관하여 기술하였다.

3. 지식형 설계시스템

인공지능(AI)의 한 응용분야로서, 풍부한 경험적 지식을 바탕으로 전문가들이 각 응용분야의 실제문제들을 효과적으로 해결하는, 반 논리적인(semi-logical) 문제해결 방식을 조직적이고 과학적으로 전산정보화하여 이용하는 전문가 시스템은 의학(15), 지질탐사 및 석유추출(8, 18, 19) 및 분자생물학(6, 8)등의 분야에서 성공적으로 이용되어 왔다. (4) 지식형 전문가 시스템은 전문가들의 합리적인 문제해결방법을 논리적으로 체계화하여, 비근한 문제에 대하여 전문가들이 내는 결론과 같은 결론을 낼수 있는 문제해결의 새로운 방법이며, 사출성형과 같이 주로 경험에 의하여 설계 및 제조가 이루어져온 분야에서는 합리적, 과학적 설계를 위한 최적의 시스템이라 할수 있다.

한편 경험에만 의존하는 설계는 비록 최선의 전문가 시스

템이 구성되더라도 그 설계의 평가가 작품 제조후에나 확인되는 점에서는 마찬가지로 해석적인 지식과의 접합을 통하여 설계의 압리화를 기하였다. 이와같은 목적으로 전문가 시스템의 지식구조를 2중으로 하였으며 이와같은 다중구조의 지식형 시스템은 Hart(9) 등에 의하여 제안되었었다. 본 연구에서는 사출성형에 관한 경험적인 지식들은 표면구조를 이루고, 사출공정의 수학적 모델 및 해석평가 시스템은 내면구조를 구성하도록 하였으며 전문가 시스템과 해석시스템이 같은 FORTRAN 언어를 사용하여 용이하게 결합되도록 하였다. (그림 2)

본 연구에서 개발된 지식형 사출성형 설계 시스템은 그림 2와 같은 구조를 갖게되며 설계자는 설계시스템과 주 Controller를 통하여서만 접하게되어 사출에 대한 경험적인 지식없이도 설계를 하게되며, 열 및 초점성 유체, 유한요소법에 관한 깊은 지식없이도 이론적 해석을 할수 있게 되었다.

주 Controller 는 전문가 시스템의 판단에 의하여 설계자로 부터 필요한 정보를 문답식으로 구하고, 해석 시스템을 수행하게 하며, 설계평가에 대한 결과를 설계자에게 전달하는 역할을 하게된다.

해석시스템은 다섯개의 기능조직으로 구성되어 있는데, 성형중의 초점성유체의 해석 및 simulation 이 그 중심을 이루며 그 결과를 이용하여 고분자 재료의 미세조직과 그 기계적 성질, 국소적인 결함(weld line) 등의 예측과 그들의 기계적 성질 등을 계산하는 program 들이 연결되어 있다.

사출성형제품은 공정의 제약상 제품의 두께가 비교적 얇아야 하므로 준 3차원적인 박판의 형상을 갖게된다. 따라서 2차원적인 layflat 으로 변환이 일반적으로 가능하게 되어, 초점성유체의 유동해석은 2차원계에서 프로그램이 개발되었다. 일반화된 Hele-Shaw 모델(17, 20)이 사용되었으며 관성력 및 유동방향으로의 열전달 및 두께 방향으로의 열대류는 무시되었다. 유체상태에서는 Non-Newtonian 이고 비탄성적이며, 비등온 조건으로 해석을 하였고, 전달점성계수는 전달율과 power-law 관계를 갖으며 Arrhenius 영의 온도관계를 갖는 것으로 간주하였다. 한편 초점성 유체의 충전시 유체의 경계가 시간에 따라 변하는 가변 경계 문제이기 때문에, 매 시간

단계마다 새로운 유한요소의 발생이 필요하게 되며, 사용자의 노력을 최소화 하고 짧은 시간내에 Simulation 을 수행하기 위하여 자동 매쉬 발생 프로그램을 독자적으로 개발하여 사용하였다. (13) 그림 3은 김영준의 Simulation 결과를 보여주고 있다. L자 영상의 제품이 2차원 layflat으로 변환되어 주어진 가공 조건에서의 충전 상태를 매시간 단계마다 나타내고 있다.

사출성형제품의 기계적인 성질은 고분자 재료가 유체 상태시 받은 외부응력에 의한 변형이 일부는 완전히 일부는 냉각과확시 잔류되어, 불균일하게 분포되어있는 상태에 따라 전반적으로 결정되며, 또한 국소적으로 발생한 결함(weldline 등)에도 영향을 받게된다. 유동중 고분자 재료는 normal stress 에 의하여 한방향으로 신장되게 되어 압입냉각 과정 중 일부는 relax 되고, 재료의 온도가 고화점 이하로 내려갈때 orientation 이 잔류하게 된다.

(7) 그림 4는 고분자 재료의 orientation 정도에 따른 인장강도의 변화를 보여주며 외부응력이 orientation 에 수직방향으로 적용되는 경우에는 매우 불량한 기계적 성질을 갖게된다. 본 연구에서는 유동해석 program 에서 예측된 열-기계적 성질의 정보 base 를 고분자 재료의 stress-optical 관계에 의하여 birefringence 로 변환하고(16, 20), 측정된 재료의 인장강도와 birefringence 간의 관계를 이용하여 사출제품의 기계적 성질 예측에 적용하였다.

그림 5에서 표시된 타원들은 예측되는 기계적 성질을 각 저점에서 효과적으로 나타내고, 정보처리를 하기 위해서 고안된 강도타원으로서 주축의 방향이 분자 orientation 을 나타내고 주축의 반경은 그 방향으로 orientation 없는 상태의 인장강도에 대한 비강도이며 부축의 반경은 그에 수직된 방향으로의 비강도이다. 따라서 타원의 찌그러짐의 정도에 따라 기계적인 이방성의 정도를 시각적으로도 나타내게 되어 추후의 설계평가에도 효과적으로 사용할 수 있게 되었다.

전문가 시스템은 3개의 기능구조로 되어 있는데, 필요정보의 취득 및 해석, 설계의 평가, 재설계에 대한 조언 등이 이를 구성하게 된다. 이를 위하여 Rutgers 대학에서 FORTRAN 언어로 개발된 EXPERT (18, 19)라는 inference engine 이 본 연구에 사용되었다.

사출제품의 설계에 대한 평가에는 성형성(short shot)

에 대한 판단관 기계적인 성능의 예측 및 국소적인 결함 (예 : Weldline, sinkmark, warpage 등)의 발생 가능성 이외에도 금형제작에 대한 판단등 해석적 및 경험적으로 많은 양의 지식이 필요하나 본연구에서는 성형성과 기계적 성능 그리고 weldline 에 관한 지식들만 EXPERT 를 이용하여 논리화하였다. (그림 6)

재설계에 대한 논리를 문제발생시 전문가들이 경험에 의하여 추론하는 인과관계에 대한 지식들과 이론적으로 연구되어온 지식들을 종합하여 그림 7과 같은 일반적 인과관계를 구성하여 전문가 시스템에 포함시켰으며 굵은선은 강한 인과관계를 나타내고 나머지 변수들간에도 항상 약한 상관관계는 존재하게 된다.

앞서 언급된 해석 시스템과 전문가 시스템을 실질적으로 체결하여 그림 8에서 보는바와 같은 지식영 설계시스템을 구성하였다. 최종설계가 나오기 전까지는 전문가 시스템의 판단에 의하여 설계평가와 재설계의 반복을 하게되며 설계에 대한 확신이 생긴뒤 설계 금형을 제작하고 시작품을 제작하게 된다. 병목과정인 금형의 가공을 Software 적으로 설계에 대한 평가한뒤에 하게되므로 개발상 소모되는 경비와 시간을 최소한도로 줄일수 있게 된다.

4. 결 론

종래의 사출제품 설계는 주로 경험에 의존하여 이루어져 왔으며, 제품설계후 금형을 가공하여 시작품을 제작하고, 각종시험을 거쳐서 만족할만한 제품이 나올때까지 재설계, 재가공의 반복을 통하여 수행되어 왔다. 사출성형 제품의 품질을 향상시키고, 제조원가를 절감시키며 납기를 단축하기 위하여 합리적인 설계방식의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 인공지능의 한 분야인 전문가 시스템을 통하여 오랜기간 축적된 사출전문가의 경험적인 지식들을 논리적으로 전산정보화 하고, 이론적인 공정해석 Software 들을 개발하여 두근의 지식을 상호 보완적으로 종합해서 합리적으로 사출제품을 설계할수 있는 지식영 설계시스템을 개발하였다.

본 설계시스템은 이론적인 해석에 의한 공정 Simulation 과 경험적 지식에 의거하여 효과적으로 설계를 평가하게 되며, 문제발생시 적합한 재설계에 대한 조언을

주게된다. 복잡한 해석 program 및 경험적 지식들이 비전문가 일지라도 설계에 이용될수 있게 되었으며, 성형성 조건과 기계적인 적합성 조건 이외에도 계속적으로 사출성형에 관한 지식들을 용이하게 추가할수가 있다. 앞으로 금형제작에 관한 지식들과 Weldline 이외의 결함들(예 : Sinkmark, Warpage, Jetting 등)에 대한 이론적인 모델들이 개발되어 추가되게 되면 종합적인 사출재출설계의 자동화를 이룰수 있게 될것이다.

참고문헌

References

- [1] Suh, N.P. Manufacturing and Productivity. In . key note paper at the Sagamore Conference, 1984.
- [2] Rinderle, J.R. Measures of Functional Coupling in Design. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [3] Suh, N.P., Bell, A.C. and Gossard, D.C. On An Axiomatic Approach to Manufacturing and Manufacturing Systems. J. of Eng. for Industry, Trans. ASME 100(2), May, 1978.
- [4] Winston, P.H. Artificial Intelligence. Addison Wesley, 1984.
- [5] Bown, J. Injection Molding of Plastic Components. McGraw Hill, London, 1979.
- [6] Buchanan, B. and Feigenbaum, E. Dendral and MetaDendral: Their Applications and Dimensions. Artificial Intelligence 11:5-24, 1978.
- [7] Curtis, J.W. The Effect of Pre-Orientation on the Fracture Properties of Glassy Polymers. Journal of Physics D: Appl. Phys. 3:1413, 1970.
- [8] Duda, R.O. and Gaschnig, J.G. Knowledge-Based System Come of Age. BYTE Magazine, September, 1981.
- [9] Hart, P. Directions for Artificial Intelligence in the Eighties. SIGNART Newsletter 79:11-16, 1982.
- [10] Hoare, Linda and Hull, D. The Effect of Orientation on the Mechanical Properties of Injection Molded Polystyrene. Polym. Eng. Sci. 17(3), March, 1977.
- [11] Hull, D. An Introduction to Composite Materials. Cambridge Univ. Press, 1981.
- [12] Kim, S.G. and Suh, N.P. Performance Prediction of Weldline Strength in Amorphous Polymers. In . SPE 42th ANTEC Tech. Papers, New Orleans, May, 1984.
- [13] Kim, S.G. Knowledge-Based Synthesis System for Injection Molding. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1985.
- [14] Menges, G. and Wubken, G. Influence of Processing Conditions on Molecular Orientation in Injection Moldings. In . SPE 31st ANTEC, Montreal, May, 1973.
- [15] Shortliffe, E.H. Computer Based Medical Consultation: MYCIN. Elsevier, N.Y., 1976.
- [16] Wales, L.L.S. The Application of Flow Birefringence to Rheological Studies to Polymer Melts. Delft Univ. Press, 1976.
- [17] Wang, K.K., et al. Computer Aided Injection Molding System. Technical Report 2-10, Cornell Injection Molding Program, .
- [18] Weiss, S.M. and Kutikowski, C.A. A Practical Guide to Designing Expert System. Rowman and Allanheld Publishers, N.J., 1984.
- [19] Weiss, S.M., Kern, K.B., et al. A Guide to the Expert Consultation System. Technical Report CBM-TR-01, Rutgers University, December, 1984.
- [20] White, I.L. and Dietz, W. Some Relationships between Injection Molding Conditions and the Characteristics of Vitrified Molded Parts. Polym. Eng. Sci. 10(15):1081, 1970.

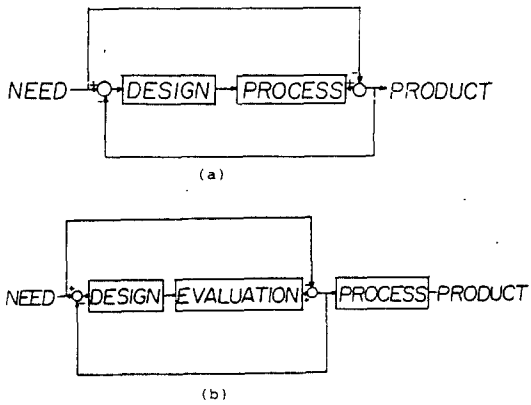


그림 1. Block Diagrams of Synthesis
 (a) Conventional Synthesis
 (b) Computer-Based Rational Synthesis

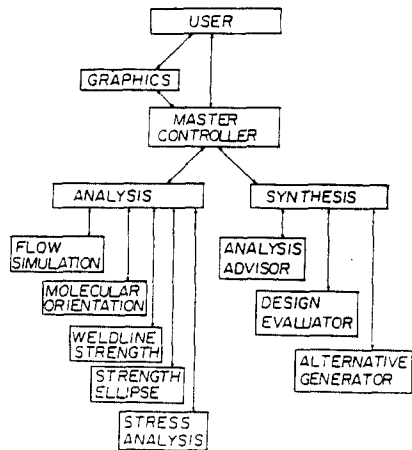


그림 2. Functional Structure of the Knowledge-Based Synthesis System for Injection Molding

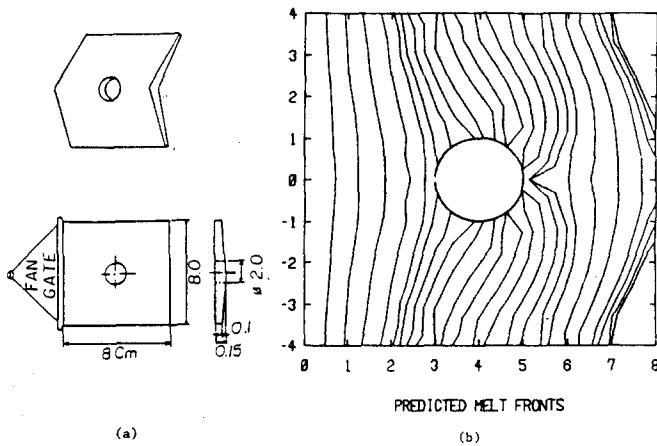


그림 3. Case Study of a Flow Simulation for L-shaped Injection Molded Polystyrene Part.
 (a) The Part Shape and Lay Flat Approximation
 (b) Predicted Melt Fronts

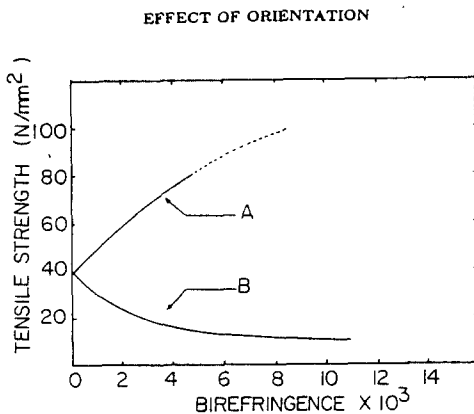


그림 4. The Effect of Molecular Orientation on the Tensile Strengths of Polystyrene[7].
 A: Longitudinal Strength
 B: Transverse Strength

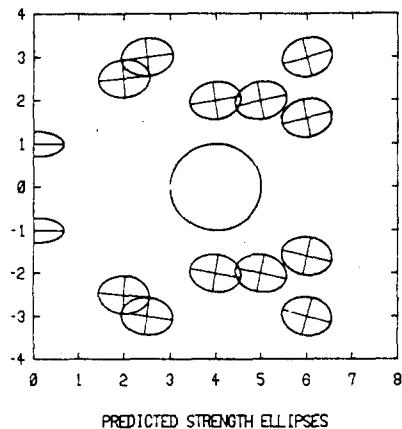


그림 5. Predicted Strength Ellipses at Different Locations. Major Axis Represents the Stretched Direction and Major and Minor Axes represent Longitudinal and Transverse Tensile Strength.

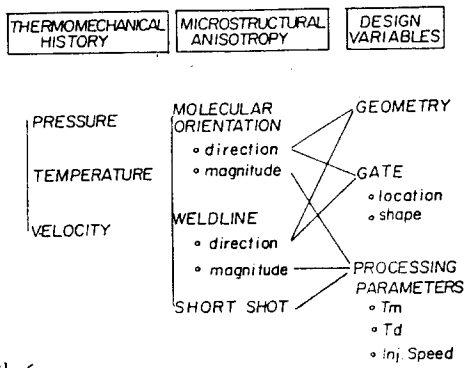


그림 6. Causal Relations Between Major Design Variables and Microstructural Anisotropies. Solid Lines Mean Strong Causality.

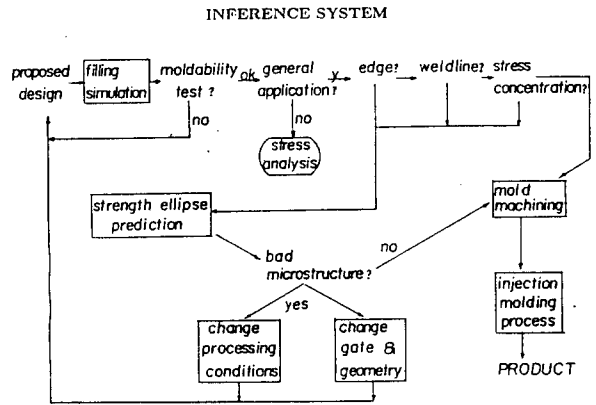


그림 7. Decision Rules for Design Diagnosis and Redesign. Both the Analytical Results and Empirical Findings are Integrated into this Inference Engine.

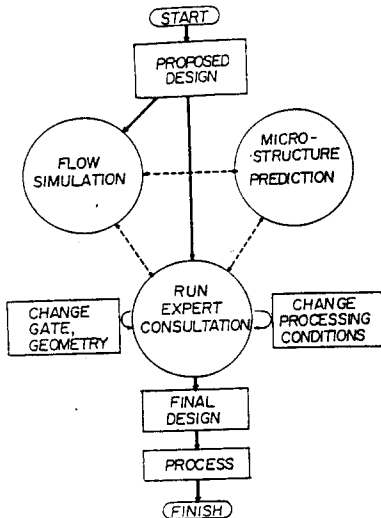


그림 8. The Prototype Expert Synthesis System for Injection Molding.