

침단섬유강화 복합재료 시트프레임 설계를 위한 CAE 연구 A Study on CAE for the Design of the Seat Frame of Fiber-reinforced Composite Material

허용정(한국기술교육대), 이순홍(자동차부품연구원), 최금호(국립기술품질원)

Y.J.Huh(Korea Univ. of Technology and Education), S.H.Lee(Korea Automotive Technology Institute),

K.H.Choi(National Technology and Quality Institute)

Abstract

The design of injection molded polymeric parts has been done empirically, since it requires profound knowledge about the moldability and causal effects on the properties of the parts. This study shows CAE approach for the design of the seat frame of fiber-reinforced composite material in order to realize the concept of rational design for the productivity and quality of mold making. The knowledge-based CAE system is constructed by adding the knowledge-base module for the design evaluation and appropriate CAE programs for mold design analysis in order to provide designers, at the initial design stage, with comprehensive process knowledge for the performance analysis and the design evaluation. A knowledge-based CAE system is a new tool which enables the concurrent design with integrated and balanced design decisions at the initial design stage of injection molding.

Key Words : Seat Frame(시트프레임), Knowledge-based CAE System(지식형 CAE 시스템), Moldability(성형성), Fiber-reinforced Composite Material(섬유강화 복합재료)

1. 서 론

사출성형제품은 자동차분야로부터 침단 전자광학 제품, 우주항공분야, 일상용품에 이르기까지 그 수요가 기하급수적으로 증가하고 있다. 사출성형제품의 설계 및 제조는 전문가의 축적된 경험과 시제품 제작을 통한 각종 시험평가를 거쳐서 만족할 만한 제품이 나올 때까지 반복적인 작업을 수행함으로써 이루어져 왔다(1). 사출제품 형상의 설계는 사출성형에 관련된 광범위한 지식을 필요로 하며 설계의 성형성, 제품의 기계적 성능, 웰드라인(weldline), 싱크마크(sinkmark), 변형등과 같은 기계적 결함의 발생가능성등을 설계 초기 단계에서부터 종합적으로 고려하여 수행되어야 한다(2,3).

최근에는 철강재료나 알루미늄 대체재료, 섬유강화 고분자 재료 및 세라믹 혼합재료등 신소재의 성형시에도 사출성형 공정을 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 신소재의 사출성형시에는 기존의 고분자 재료의 사출성형에서는 경험하지 못

한 현상이 발생된다. 이 경우 시행착오에 의한 경험적 방법으로는 경제적, 시간적 노력이 과도하게 요구될 뿐 아니라 사출성형에 성공하더라도 최적조건이 얻어지기 어렵고, 궁극적으로 저급한 제품, 생산성 저하, 생산단가의 상승등의 문제를 유발하게 된다.

이러한 문제에 대한 해결방안으로서 사출성형 공정의 물리적 현상을 수학적 모델화하여 컴퓨터를 이용한 해석과 예측에 의해 설계합리화와 과학화를 추구하는 연구가 지속적으로 수행되어 왔다(4,5). 사출성형 공정중에 플라스틱 재료가 겪게되는 각종 물리적 현상을 이론적으로 해석할 수 있다면 경험과 직관의존성을 탈피하여 과학적 설계 및 시행착오 최소화를 통해 사출성형 제품급형의 설계 및 제조 전반에 걸쳐 큰 파급효과를 거둘 수 있을 것이다.

미국, 호주, 일본, 독일등 선진국에서는 1980년 초기부터 이러한 점에 착안하여 수학적 모델 개발 및 실험에 의한 보완등의 방법으로 부단한 노력을 경주해 왔으나 현 기술수준으로는 복잡한 실제의 사출성

형 공정을 모델링하기 위해서 단순화 가정이 필연적으로 도입되어 있으며, 실험에 의한 보완도 한계를 갖고 있기 때문에 해석프로그램을 운용하는 전문가의 이러한 점을 고려한 설계평가 능력이 필수적이다.

본 연구에서는 세계적으로 사출성형 연구를 선도하고 있는 미국 코넬대학의 CIMP(Cornell Injection Molding Program)연구진에 의해 개발된 C-MOLD 프로그램을 이용하여 승용차용 복합재료 시트프레임의 충전, 압입과정의 해석을 수행하였다. 제품 및 금형설계에 필수적인 시간에 따른 유동선단의 위치, 속도분포, 압력분포, 온도분포를 해석을 통해 예측함으로써 금형 캐비티의 충전여부, 충전 소요시간, 웰드라인의 위치, 형체력 크기등의 정보를 얻으려는 것이다. 또한 최적 공정조건의 선정, 캐비티, 런너, 게이트 설계, 제품형상, 제품두께등 제품 및 금형설계에 관련된 유용한 정보를 아울러 얻기 위한 것이다. 시트프레임의 성형중 열기계적 시간적 변천과정을 해석하고 해석전문가의 해석 결과 평가지식을 규칙베이스의 형태로 구축하여 해석과 평가가 함께 이루어질 수 있는 지식형 CAE 시스템을 구축하려고 시도하였다.

2. 시스템 개요

본 논문은 사출성형제품과 금형의 설계를 위한 지식형 CAE 시스템의 구축에 대하여 기술하였다. 지식형 CAE 시스템은 해석 전문가의 해석결과 평가지식을 전산정보화하는 지식베이스 모듈(knowledge-base module) 그리고 필요한 해석을 수행하는 CAE 프로그램 모듈의 2가지 기능적 그룹으로 크게 구분할 수 있다. 각 그룹간의 전반적인 제어와 사용자와의 연계는 전문가 시스템의 기능에 의존한다.

해석을 위한 결정은 지식베이스 모듈에서 하게 되는 데 성형성의 평가가 필요한 경우에 이루어진다. 유동해석을 위하여 코넬대학에서 개발된 C-MOLD 프로그램이 이용되었다. CAE프로그램은 지식베이스 모듈의 결정에 의해 요구된 해석을 수행하고 결과 데이터를 공급하게 된다. 지식베이스 모듈은 해석 결과 데이터를 읽어들이 평가규칙에 근거하여 결과를 평가하고 재설계 대안을 생성하게 된다.

먼저 전문가 시스템의 주 제어기에 의해 전체 시스템이 가동되게 되고 사용자로부터 정보를 대화식으로 공급받아 이를 바탕으로 다음 단계를 계속하기 위한 판단을 얻기 위해 전문가 시스템을 동작시키게

된다. 이러한 구동의 과정이 Fig. 1에 나타나 있다.

유동해석 프로그램이 다양한 설계를 위한 과학적 평가가 요구될 때마다 가동되게 된다. 이러한 프로그램이 구동된 후 주어진 설계에 대한 열기계적 데이터 베이스가 구축되게 된다. 전문가 시스템은 이 중에서 필요한 정보만을 읽어들이 이와 관련된 결정을 내리게 되며 이 결정에 근거하여 다음의 과정이 결정된다. 결정에 요구되는 모든 해석 프로그램이 구동되고 난 후, 그 결과에 따라 전문가 시스템은 설계를 최종 평가하게 된다. 설계가 불량으로 판정될 경우, 재설계 대안을 제시하게 된다. 이와같은 과정을 만족한 설계를 얻을 때까지 반복 수행하게 된다.

3. 지식형 CAE시스템 구축

3.1 유동해석 모듈

3.1.1 기하학적 모델링과 유한요소 메쉬 생성

본 연구에서 사용된 사출성형 해석 상용 프로그램인 C-MOLD 프로그램은 프로그램 자체가 C-VIEW라고 하는 모델러를 내장하고 있으나 통합적 설계의 시도라는 관점에서 상용 모델러인 CATIA에서 모델링된 솔리드 모델을 이용하여 기하학적 모델을 생성하였다. CATIA로부터 솔리드 모델을 IGES 포맷으로 전달받아 C-MOLD 프로그램의 모델러인 C-VIEW상에서 읽어들이 해석을 위한 기하학적 모델로 변환하였다. 해석을 위하여 사용된 메쉬 유형은 삼각형 메쉬이고 총 노드 개수는 1969개이며 요소의 총 개수는 3968개이다. 생성된 유한요소 모델이 Fig. 2에 나타나 있다.

3.1.2 물성데이터 입력

고분자 용액의 점성이 전단률, 온도 및 압력에 의존하는 정도를 모델링하기 위해 수정 Cross모델이 사용되었다. 본 연구에서 사용된 고분자 재료는 나일론 66와 폴리카아보네이트이다. 상태방정식은 수정 Tait 방정식이 이용되었다.

3.1.3 성형조건

해석 결과의 비교검토를 위한 방안으로서 Table 1과 같이 3가지의 경우에 대해 사례연구를 수행하였

다. 3.1.1-3.1.3의 조건 입력이 만족되면 유동해석이 가능하게 된다.

3.2 지식 베이스 모듈

3.2.1 설계평가 모듈 구축에 대한 고찰

제안된 설계는 수학적 모델링, 실험에 의한 모델링 그리고 고분자 재료의 물성치 측정등의 방법에 의하여 과학적이고 체계적인 방식으로 해석될 수 있다. 이와같은 해석을 통한 예측은 시제품 제작 이전에 설계의 평가를 가능하게 해 준다. 그러나 모델링 시에 불가피하게 수반되는 가정 및 단순화 과정과 고분자 재료의 복잡한 거동등의 이유로 실제 상황을 정확하게 재현하기에는 한계가 존재한다.

그러므로 해석 결과를 평가하고 재설계 대안을 생성하거나 설계에 반영하기 위해서 이론 및 경험적 지식을 겸비한 전문가가 요구되게 된다. 이러한 전문가의 지식을 전산정보화함으로써 CAE프로그램과 연계된 지식형 CAE시스템을 구축하여 설계를 초기 단계에서 해석하고 평가할 수 있도록 하였다

설계의 성형성 및 미세조직 이방성은 본 연구를 통해 개발된 각종 해석 프로그램에 의해 예측될 수 있다. 기계적 파괴는 응력집중현상이 미세조직 이방성의 취약방향에서 발생하게 될 경우 일어난다. 임의의 하중 조건에 있어서 응력집중현상은 구멍부위, 코너부위, 모서리 부위 그리고 상대적으로 두께가 얇은 단면등에서 발생한다. 이러한 영역에서의 미세조직 이방성의 분포는 제품의 기계적 거동의 취약성이 높아지는 원인이 된다. 이상의 관측을 통하여 성형제품의 성능에 대한 설계 평가 규칙이 연역적으로 도출될 수 있다.

* 기계적 허용도 판정에 관한 규칙: 미세조직 이방성과 기하학적 형상의 잘못된 결합은 사출성형제품의 성능을 저하시킨다.

설계의 국부적 위험상태만을 예측하기 위한 전략이 위의 판정 규칙에 의거하여 구성될 수 있다. 미세조직과 부수되는 이방성은 응력집중현상이 발생할 수 있는 부위에서만 예측되고 설계의 허용성 여부는 규칙에 의해 판정된다.

설계의 성형성은 유동해석으로부터 쉽게 결정될 수 있는 설계평가의 중요한 항목이다. 유동해석 동안에 사출압력이 사용될 기계의 한도를 초과하게 될 때 미성형이 발생하였다고 결론을 내리게 된다. 미성형은 가장 중요시되는 결함중의 하나이다(3,6). 미성형의 발생 원인으로는 포획된 공기, 높은 유동 저항과 유동 경로의 제한으로 인한 사출압력의 부족, 고분자 용융액의 조기 고화및 부적절한 기계의 선택등이 있다. 본 연구에서는 부적절한 기계를 선택한 경우는 고려하지 않기로 한다. 본 연구의 목적중의 하나는 미성형을 판정하고 미성형 현상을 방지하기 위한 체계적 방법론을 얻으려는 것이다. 성형성에 관한 설계 규칙은 다음과 같이 얻어질 수 있다.

* 성형성 판정에 관한 규칙: 요구되는 사출압력이 사용되는 사출기의 용량을 초과하게 되면 미충전 현상이 발생되고 설계는 성형불능으로 판정된다.

미성형의 판정을 위한 규칙은 다음과 같이 생성 규칙의 형태로 표현될 수 있다(6).

IF: The machine capacity is $[p*Q]$

AND The required for the cavity filling is higher than $[p]$

THEN: Short shot is possible.

여기서 Q는 용량을 의미한다. 이상의 2가지 주된 규칙이외에도 사출성형의 다양한 측면에서 설계를 평가하기 위해 여러가지 규칙이 첨가될 수 있다.

3.2.2. 재설계 대안 생성

사출 전문가들은 시사출 결과에 근거하여 간단한 명료한 직관적 재설계 대안을 제시한다. 설계 평가의 기준으로서 성형성과 기계적 허용도가 채택되었다. 채택된 근거는 수치해석을 통하여 과학적으로 검증될 수 있는가에 주안점을 두었다. 그러므로 각 경우에 있어서 경험적 지식과 이론적인 해석을 통한 지식이 상호보완적으로 작용하여 최상의 결과를 도출할 수 있게 한다.

미성형 발생의 원인은 대략 3가지로 볼 수 있다.

첫째는 사용된 사출기의 용량이 미달되는 경우, 둘째는 공정조건을 잘못 선정된 경우, 셋째는 포획 공기 빼기 장치가 잘못된 경우이다. 본 연구에서는 세 번째의 경우는 고려하지 않았다. 첫 번째의 경우는 큰 용량의 사출기를 사용하거나, 사용된 사출기 용량 내에서 사출이 가능하도록 공정조건을 변경하는 것이 해결 방안으로서 제시될 수 있다. 두 번째의 경우는 적절한 공정 조건을 찾아냄으로써 해결될 수 있다. 미성형 해결을 위하여 공정 조건을 변화하기 위해서는 용융 수지 온도 증가, 금형 온도 증가, 사출 유량의 증가 등의 경험적 대안이 활용한다. 그러나 이러한 공정 변수들은 제품의 미세조직 결정에도 중요하게 작용하므로 기계적 허용성에 대한 대책과 함께 고려되어야 한다.

사출제품의 기계적 파손의 일반적 이유는 미세조직 및 기하학적 형상이 가장 취약한 방향으로 결합되었기 때문이다. 이러한 경우에는 보강재 부가, 게이트 위치 변경, 공정 변수의 변경 등의 대안을 사용하여 해결가능하다. 이론적 관점에서 고찰해 볼때, 이러한 경험적 대책들은 기계적 이방성의 가장 취약한 방향에 응력집중이 발생하는 것을 방지하기 위한 시도로 보여지며 이는 기계적 허용도에 관한 규칙에 의해 고찰될 수 있다. 이상의 논의를 통하여 고찰할 때 경험적 규칙들은 이론적 관점에서 보더라도 상당한 합리성을 띠고 있음을 알 수 있다.

이러한 유용한 경험적 지식을 규칙의 형태로 정형화하기 위한 시도로써 설계변수, 열기계적 성질, 미세조직 이방성간의 인과관계를 연구하였다. 많은 연구자들의 실험과 이론 규명에 의해 얻어진 결과를 근거로 Fig. 3에 그 결과를 도식적으로 나타내었다.

* 일반적 인과관계:

- 이방성의 방향은 제품의 주형상, 부형상, 게이트 위치 및 형상등과 같은 기하학적 변수에 주로 의존한다.

- 이방성의 크기와 성형성은 용융 수지 온도, 금형 온도, 사출 유량, 제품 두께등의 열적 변수 및 공정 변수에 주로 의존한다.

이상의 사항들은 순수하게 이론적으로 추론된 것은 아니지만 설계대안 생성에 유용하게 사용될 수

있다. 그 이유는 재설계 대안이 실시간 시뮬레이션 프로그램에 의해 쉽게 검증될 수 있기 때문이다. 이러한 지식들은 Fig. 4과 같은 과정을 통하여 생성 규칙으로 정형화되었다. 설계해석 평가를 위한 규칙 베이스가 이러한 논의를 바탕으로 구축되었다.

유동해석 결과중 유동선단의 위치 계산 결과가 Fig. 5에 도시되어 있다.

4. 결 론

본 연구에 있어서 사출성형 공정의 유동해석을 위한 모델링과 해석 이 수행되었다. 사례연구로서 승용차용 복합재료 시트프레임을 선정하였으며 이를 합리적으로 설계하기 위한 방안이 연구되었다. 해석 프로그램과 설계평가 규칙베이스를 연계하여 미성형 판정, 기계적 허용도 판정을 위한 지식형 CAE시스템이 이러한 목적으로 구축되었다. 지식형 시스템이 미성형을 판정하게 되면 미성형 문제해결을 위한 재설계 대안이 생성되게 된다.

기계적 허용도의 평가가 성형성 평가와 병행하여 수행됨으로써 종합적인 견지에서 설계 평가와 재설계 대안 생성이 가능할 수 있도록 하였다.

참 고 문 헌

- (1) 김태수,허용정,사출제품/금형의 통합설계 시스템 개발,과기처 첨단 보고서, 1992.
- (2) Pye, R.G.W.,Injection Mould Design,Pitman Press, 1983.
- (3) Rosato,D.V. and Rosato,D.V.,Injection Molding Handbook, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986.
- (4) Wang,V.W. et al.,"Dynamic Simulation and Graphics for the Injection Molding of Three-Dimensional Thin Parts", J. of Polymer Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 21-45, 1986.
- (5) Chiang,H.H.,Simulation and Verification of Filling and Post-Filling Stages of the Injection Process,Ph.D Thesis, Cornell University, 1989.
- (6) Kim, S.G., 1985, Knowledge-based Synthesis System for Injection Molding, Ph.D Dissertation, MIT.

Table 1. Process conditions for case study.

	고분자재료	유리전이온도 (°C)	충전시간 (Sec)	후 충전시간 (Sec)	압입시간 (Sec)	입구 용융액 온도(°C)
사례 1	폴리 카보네이트 (GE Plastics PC LEXAN 3413)	144	3.0	15.0	5.0	300
사례 2	나일론 66 (DUPONT PA66 ZYTEL 71G33)	229	1.0	15.0	5.0	300
사례 3	나일론 66 (DUPONT PA66 ZYTEL 71G33)	229	3.0	15.0	5.0	300

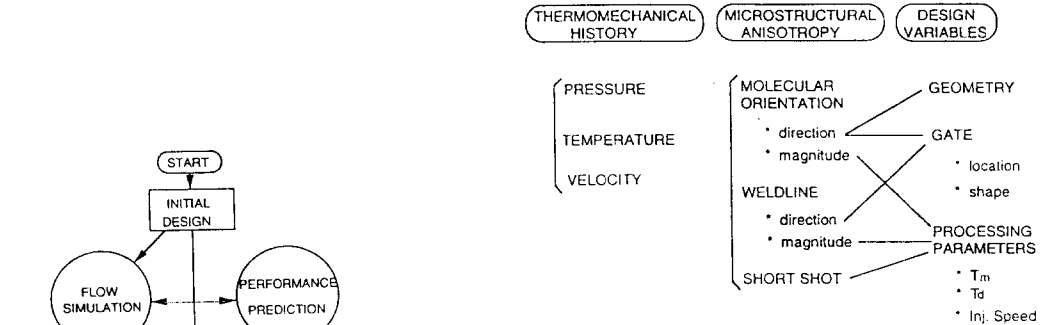


Fig.3 Causal relations between major design variables and microstructural anisotropies.

Fig.1 The prototype CAE system for injection molding.

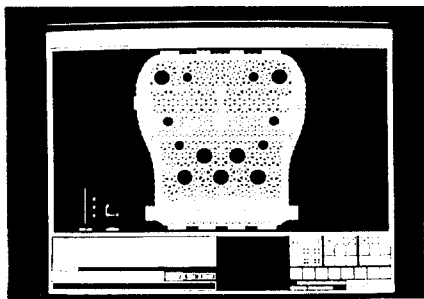


Fig.2 Finite element model.

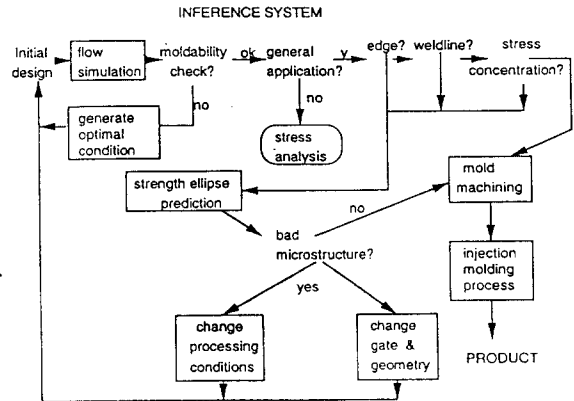


Fig.4 Decision rules for design diagnosis and redesign.

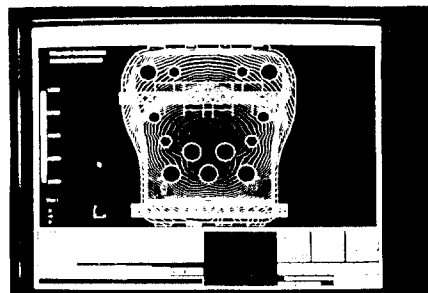


Fig.5 Predicted melt-front advancement.