

# 모델러와 CAE 를 활용한 최적 금형 방안 설계 기술 개발

임채호<sup>#</sup> · 객시영<sup>1</sup> · 조인성<sup>1</sup> · 황호영<sup>1</sup>

## The Development of the Optimum Mould Design System by Utilizing Simulation and Modeler

C. H. Lim, S. Y. Kwak, I. S. Cho, H. Y. Hwang  
(Received February 23, 2009)

### Abstract

In the casting industry field, a lot of researches have been carried out to maximize soundness and productivity and improve quality of mass produced products. The researches on the optimum mould design by using computer simulation have achieved a lot of accomplishments in the die-casting process especially. Their results are utilized to mass-produce sound products in their field. But there are some difficulties to use the simulation in order to make the design of product and mould. In general, repetitive calculations of computer simulation require much analyzing time in order to make sound design of them. Another difficulty is that only expertise technicians can analyze results of the simulation. In order to solve such a problem, we are building mould design optimization system which consists of knowledge-based module, simulation, optimization module and interactive modeler(it is based on the commercial modeler). By using and interacting between these modules of that system, we can easily make an optimum design of mould and construct the database. This study introduce the general process of the system and connection method between the modules is mentioned above and some examples to apply it to real product.

**Key Words** : Simulation, Optimization, Database, Modeler, Die-Casting

### 1. 서 론

주물분야에서는 여러 형태의 제품을 생산함에 있어서 다양한 방식이 개발되었고 사용되고 있다. 여러 방식 모두 금속재료를 용융시켜서 일정한 틀 안에 주입시켜 최종적으로 원하는 제품을 얻어낸다는 점에서는 공통점이 있다. 그러나 제품의 형태나 재질 등에 따라 주입하는 방법과 틀의 재료가 결정이 되고 이에 따라 여러 주조방법이 결정된다. 특히 최근에는 알루미늄과 마그네슘 소형 박육제품의 생산과 대량 주조제품 생산을 위해 금형틀을 이용하는 다이캐스팅과 중력주조 분야

가 급속히 발전하고 있다. 금형을 이용한 주조제품의 생산분야에 있어서 건전성, 생산성 극대화 및 품질의 안정성 등을 얻기 위해서는 제품 생산 방안 및 공정설계를 최적화, 합리화할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 특히 생산 공정의 각종 노하우가 결집되어 있는 금형 설계 기술이 매우 중요하다(주조분야에서의 금형 설계기술은 단순한 금형 제작기술을 뜻하는 것이 아닌 건전한 제품생산을 위한 각종 주조 방안 설계를 의미한다.). 다른 산업분야에서도 마찬가지지만 특히 주조분야에서의 금형 설계 기술은 제품의 품질과 생산성, 원가를 좌우하는 핵심요소이다. 요즘은 국내에서

1. 한국생산기술연구원 사이버설계지원센터  
# 교신저자: 한국생산기술연구원 사이버설계지원,  
E-mail: chlim@kitech.re.kr

는 단순 생산 공정에 의한 조립기술은 선진국과 비교해도 손색이 없을 정도로 근접해있으나, 금형 설계기술 분야는 크게 뒤쳐져 있고, 이러한 금형 설계 기술의 부족은 주물 산업의 경쟁력을 약화시키는 근본적인 원인이 되고 있다. 또한 산업현장에서 젊은 설계기술자들의 부족과 이에 따른 설계기술의 노하우 전수에 어려움으로 인해 기업의 경쟁력 약화가 심각한 문제로 대두되고 있다. 최근에 이러한 어려움을 극복하고 과학적인 방안설계기술과 효과적인 기술 노하우 축적을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 적극적으로 활용하고 새로운 개념의 기술데이터 베이스 시스템의 구축에 많은 노력과 연구들이 진행되고 있다. 그리고 이러한 노력의 결과로 여러 형태의 최적 설계 시스템이 개발되고 있다. 만약 제품의 효과적인 생산을 위해 시뮬레이션과 축적된 설계데이터 등을 활용하여 최적의 방안을 설계 시스템에서 제시해 줄 수 있다면 제품 생산에 필요한 금형의 제작과 수정등의 많은 어려움을 해결할 수 있게 된다.

국내에서는 이러한 시스템을 단조 및 프레스 성형분야에 적용하려는 시도가 몇몇 학교와 연구소를 중심으로 시도되었다. 그러나 대부분 2 차원 형상 및 간단한 3 차원 형상으로 제한되어 아직 본격적으로 실용화 단계에는 이르지 못하고 있다. 특히 주조분야에서는 이러한 시스템의 개발이 시도된 사례가 없다.

해외의 경우에도 주조분야에서 생산설계 및 공정 최적화에 관한 시스템개발이 비교적 최근에 시작되었다. 미국에서는 1993년부터 Illinois 대학의 J.A. Dantzing 교수 연구팀에서 응고 시뮬레이션 패키지와 최적화의 수학적 기법을 연결하려는 연구를 시작하여 주물내의 미세결함 제거 방안등을 연구한 사례가 있다.[17] 또한 독일에서는 Aachen 공대 주물연구소의 P.R. Sahm 교수 연구팀에서 1992년부터 주조 공정의 최적화 과정을 자동화하려는 연구를 시작했다.[18]

최종 제품에서 요구되는 기계적 성질을 지정하면 압탕의 크기 및 위치 선정, 주입온도 결정 등에 최적의 주조 방안을 결정해주는 소프트웨어 개발이 진행되었다. 우리는 최근에 이러한 사례들을 바탕으로 주조분야 특히 금형을 사용하는 중력주조[1] [4], 다이캐스팅 생산방식을 위한 시뮬레이션과 데이터베이스[2], 그리고 모델러를 활용한 최적 금형 설계 시스템의 개발을 위해 연구를 진행해 왔다[7]. 또한 우리는 시스템을 통해 설계자

는 간단한 마우스 조작으로 최적화 알고리즘에 따른 반복해석을 통하여 1 차적인 최적의 금형 설계를 수행할 수 있도록 시스템의 시제품을 개발하였다. 이 논문에서는 시스템 프레임이 어떻게 구성되어 있는지 알아보고, 또한 예제를 사용하여 중력주조와 다이캐스팅주조 분야에서 실제 어떻게 최적 금형 방안설계가 이루어지는지에 대해서 설명한다.

## 2. 본론

### 2.1 최적 금형 방안 설계 시스템의 구성

Fig. 1은 현재 개발된 최적 금형 방안설계 시스템의 구성도이다. 이 시스템은 크게 설계디자인, 해석, 설계추론영역의 3개의 영역으로 구성되어 있다. 첫 번째로 살펴볼 해석영역(Analysis Layer)은 일반적으로 알려져 있는 시뮬레이션 영역이다. 전/후처리기와 수리적계산을 수행하는 영역으로 구성되어 있다.

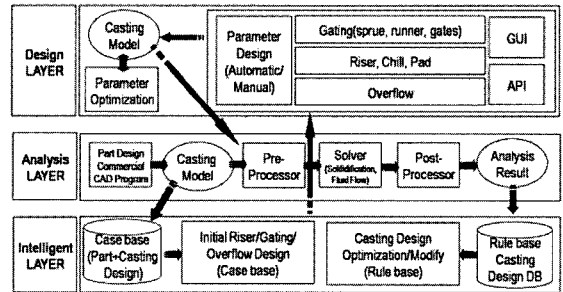


Fig. 1 Casting expert system frame design

두 번째로 살펴볼 설계디자인영역(Design Layer)은 최초 해석된 결과물과 데이터베이스로부터 추론이 가능한 설계추론영역의 제안을 바탕으로 압탕, 칠, 패딩, 게이트 등의 여러 방안들을 설정, 디자인을 수행하는 영역이다. 이 설계 디자인 영역에서는 크게 각종 방안들을 생성, 모델링 기능을 수행하는 영역과 최적화를 수행하기 위한 변수 결정 영역 등으로 이루어져 있다. 이 부분에서 가장 중요한 기능은 우리가 원하는 부분의 변수를 변경시킬 때 변경 값만큼 자동으로 3 차원 형상모델을 생성시킬 수 있도록 방안들에 대해서 파라메트릭(parametric) 모델링이 되어야 한다는 것이다. 이 부분을 해결하기 위하여 파라메트릭 모델링을 수행할 수 있도록 모델링 모듈을 설계하였고, 우리는 연구를 통하여 최적화 알고리즘과

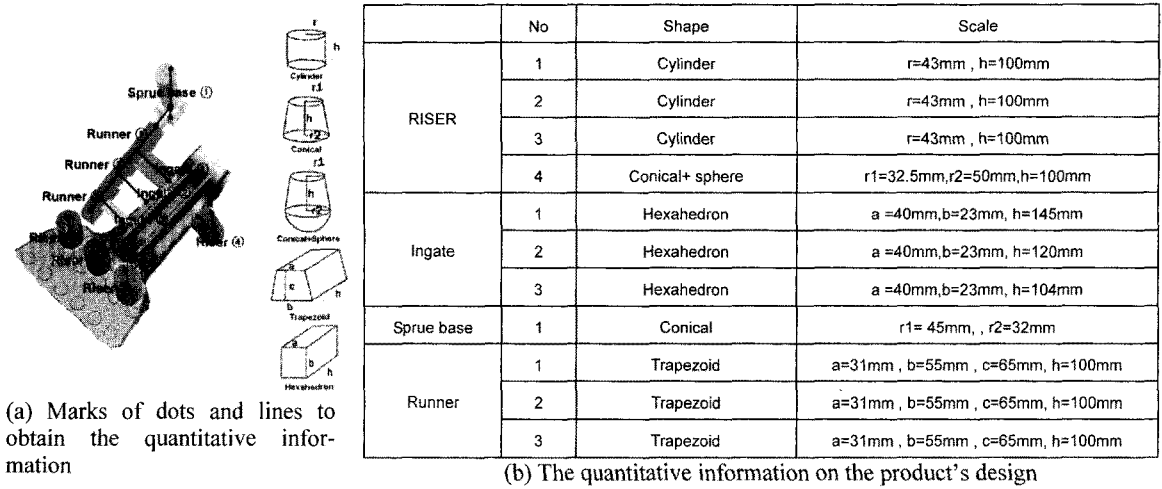


Fig. 2 Example about the modeller to link the database results with casting design modelling of a product

시물레이션과의 연동이 잘 이루어지는 파라메트릭 설계 지원 모델러를 개발 구축하였다[4].

세 번째로 살펴볼 설계추론영역(Intelligent Layer)은 크게 규칙기반추론과 사례기반추론영역으로 구성되었으며 이는 전체 시스템 내에서 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 특히 사례기반추론모듈과 관련해서는 먼저 설계하고자 하는 제품과 유사한 제품의 정보를 형상 자동 인식 프로그램을 이용하여 검색하고, 검색된 유사제품의 방안 정보를 이용하여 만들고자 하는 제품의 방안설계에 이용하는 방식이다[4].

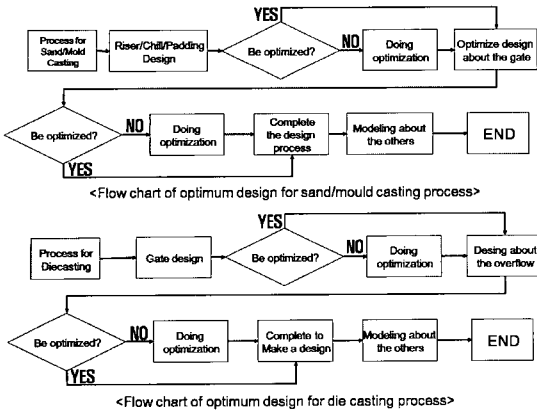
규칙기반추론모듈은 비전문가도 컴퓨터의 도움으로 의미 있는 제품방안설계를 수행할 수 있으며 이를 이용하여 최적의 금형 설계를 쉽게 수행할 수 있는 모듈로서 데이터베이스와 시스템 내에 탑재된 정식, 정규화된 요소들로 구성되어 있다. 최종적으로는 이러한 각 모듈들의 기능을 하나의 통합시스템으로 만들었으며 시물레이션과 모델러의 연동을 통해 초기 방안 설계에 대해 최적화 알고리즘을 활용한 반복해석을 자동으로 수행함으로써 최적의 방안이 얻어질 수 있도록 하였다[1, 4].

구체적으로 통합 시스템은 메인 프로그램에서 필요한 시물레이션 해석 결과 및 데이터베이스 시스템의 연동 그리고 설계추론 모듈들을 모두 포함하고 있고, 독립적인 파라메트릭 모델러 프로그램이 존재하여 메인 프로그램과 유기적인 연동이 가능하도록 설계 제작되었다. 메인 프로그램과 모델러의 연동에는 SDB(Standard DataBase)파일과

VAR(Variable)파일이 사용된다. Fig. 2에서 간단히 예제로 소개한 SDB파일은 방안을 결정하는 파라메트릭 모델링과 관련된 정식화된 텍스트형식의 파일이며, VAR파일은 최적화 변수를 결정하고 이와 관련된 변수들을 정리해 놓은 파일이다. 또한 SDB 파일과 VAR파일의 I/O기능을 수행하는 역할을 담당하는 독립적인 변환 프로그램을 통하여 설계자의 간섭 없이 메인 프로그램과 파라메트릭 모델링 모듈간에 유기적인 통신이 가능하게 되며 이를 통해 시물레이션을 기반으로 한 최적 금형 설계가 가능하게 된다. 다시 말하면 이러한 텍스트파일 정보를 통해 3D 형상모델을 생성/변경할 수 있으며 이를 통해 효과적인 데이터베이스 구축 및 반복 시물레이션 수행이 가능하게 된다. 다음으로 제품이 시스템에 입력된 이후 사례기반추론모듈과 규칙기반추론모듈로 구분되어 진행되는 프로세스에 관해서 설명하도록 하겠다.

### 2.2 사례기반추론모듈을 기반으로 한 최적 금형 방안 설계 시스템 구현

설계자가 제품의 설계방안을 수립하기 위해 시스템에 제품의 3D 형상파일 중 하나인 STL 파일이 입력되면 먼저 규칙기반추론모듈과 사례기반추론모듈의 어느 프로세스를 따를 것인지 선택하게 된다. 먼저 사례기반추론모듈이 선택이 되면 입력된 제품은 형상 자동 검색 시스템에 의해서 형상 데이터베이스를 검색하게 된다. 만약 입력된 제품과 비슷한 제품이 검색되면 파라메트릭 모델링을 수행할 수 있는 모델러가 실행이 되고 그

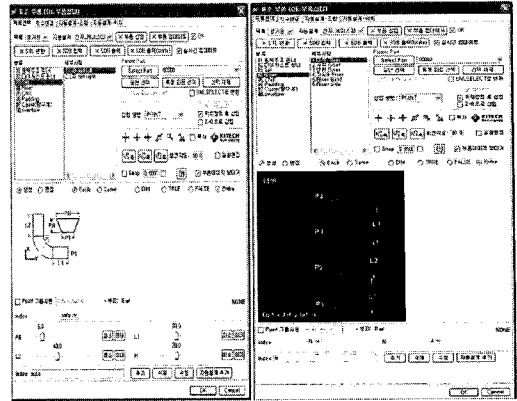


**Fig. 3 Flow chart of optimum casting product design for sand/mould and die-casting casting process among case-based modules**

이후에 사형/중력주조 및 다이캐스팅 모델링 및 주프로그램과 연동되어 시뮬레이션 최적화가 수행된다. 이후 사형/중력주조 공정과 다이캐스팅 공정에 대해서는 Fig. 3 과 같은 프로세스로 최적설계가 진행된다.

비슷한 제품을 검색하는 방법에 대해서는 이전 논문에서 자세히 설명하였다[2]. 이러한 설계공정이 효과적이기 위해서는 다양하고 방대한 형상 데이터베이스가 구축되어야 한다. 기존의 제품들이 데이터베이스 시스템에 효과적으로 정리, 구축되어 있어야 하는데 이를 위해 각 제품의 방안에 대해서 파라메트릭 모델링 모듈을 활용하여 앞에서 잠깐 소개한 SDB 란 이름의 텍스트 파일을 이용하여 데이터베이스화 하였다. 이러한 형상방안을 데이터베이스에 저장하기 위해서는 먼저 제품 또는 금형 방안이 3D CAD 파일로 제공되어야 한다. 제공된 3D CAD 파일은 미리 정해진 규칙에 따라서 모델러와 역설계 기법등을 통하여 텍스트 파일로 변환되게 되며 이를 이용하여 형상 데이터베이스를 구축할 수 있게 된다[4].

비슷한 제품이 검색된 이후에 파라메트릭 모델링을 수행할 수 있는 모델러를 이용하여 초기 제품의 방안을 설계한다. 그런 다음 초기방안은 시뮬레이션과 연동하여 반복해석을 수행하여 최적방안으로 만들어 진다. 개발된 시스템에서는 3D 상용 CAD 프로그램인 Unigraphics 의 강력한 설계 API 들을 이용하여 사용자 친화적 주조 방안 설계용 모델러를 만들었다. Fig. 4 는 모델러의 기본창



**Fig. 4 Modeler's several UI**

들을 나타내고 있다. 위에서 언급하였듯이 이 모델러는 시스템 내에서 크게 두 가지의 기능을 수행한다. 첫 번째는 3D 형상 데이터베이스를 구성할 때 손쉽게 정확한 형상정보들을 저장할 수 있으며 두 번째는 쉽게 형상정보로부터 3D 모델을 생성할 수 있으며 또한 해석에 필요한 파라메트릭 모델링을 수행할 수 있다.

### 2.3 규칙기반추론모듈을 기반으로 한 최적 금형 방안 설계 시스템 구현

다음은 STL 파일이 입력되고 초기에 설계 공정으로 규칙기반추론모듈이 선택이 될 경우이다. 데이터베이스와 형상 정보 획득 프로그램 그리고 파라메트릭 모델링 모듈을 통한 응고 및 유동 시뮬레이션 해석을 통하여 최적화를 반복적으로 수행하게 되고 최종적으로 최적방안을 설계할 수 있게 된다[2].

지금까지의 언급된 프로세스 내에서 반복적인 시뮬레이션을 수행하여 최적 금형 설계를 알아내는 부분에 있어서 소요시간의 단축과 최적의 결과를 얻어내기 위해서 최적화 알고리즘을 이용한다. 그러나 시뮬레이션과 최적화 알고리즘을 통한 최적 설계방안을 얻어내기 위해서는 해결해야만 하는 큰 문제점이 있다. 그것은 최적화를 이루기 위해 소요되는 시간(반복시뮬레이션 해석 소요시간)이 굉장히 오래 걸린다는 것과 의미 있는 결과물을 얻어내기 위하여 올바른 목적함수와 설계변수 설정이 필요한 점이다. 의미 있는 결과물을 얻어내기 위한 몇 가지의 목적함수와 설계변수 설정에 관한 내용은 다른 논문에서 자세히 설명한

Table 1 Efficiency of the SOA

method	Number of call function	Optimum variables				Function value
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
SOA	28	0	1	2	-1	-44
ASA	358	0	1	2	-1	-44
MIGA	1000	-1	1	2	-1	-24

Exact Solution :  $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (0, 1, 2, -1)$

ASA : Advanced Simulated annealing/MIGA : Multi-Island Generic Algorithm

Find  $x_1, x_2, x_3, x_4$   
 to minimize  $f(x) = 100(x_2 - x_1)^2 + (1 - x_1)^2 + 90(x_4 - x_3^2)^2 + (1 - x_3)^2 + 10.1((x_2 - 1)^2 + (x_4 - 1)^2) + 19.8(x_2 - 1)(x_4 - 1)$   
 subject to  $-10 \leq x_i \leq 10 \quad i=1,2,3,4$

바 있다[1, 2, 4, 7, 8].

일반적으로 최적설계시 설계변수는 연속설계변수(continuous design variable)와 이산설계변수(discrete design variable)로 나눌 수 있다.

대부분의 최적설계 기법들은 연속 설계 변수를 다루는데 관심을 두고 많은 연구들이 진행되고 있다. 그러나 실제 주조공정상에서는 특정한 값들만을 이용하거나, 이미 규격화되어 있는 부품의 치수를 이용하여 최적의 결과물을 얻어내는 경우가 많다[9~11]. 그 동안 이러한 이산변수처리를 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔다. SOA(Sequential algorithm with Orthogonal Arrays), ASA(Advanced Simulated Annealing), GA(Genetic Algorithm) 그리고 MIGA(Multi-Island Generic Algorithm) 등이 그 대표적인 예이다[12~17]. 이러한 이산 최적화 알고리즘 중 우리는 SOA가 개발 시스템에 가장 효과적인 것을 알 수 있었으며 이 알고리즘을 통하여 최소한의 반복 시뮬레이션을 통해 최적의 금형 설계가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

실제 Table 1 같이 간단한 수학적 계산 예제에서 볼 수 있듯이 함수를 실행하는 횟수가 SOA 방법이 28 회로서 다른 최적화 알고리즘인 ASA(358 회), MIGA(1000 회) 보다 훨씬 적다는 것을 알 수 있다. 이는 곧 보다 적은 계산량으로 최적의 해를 찾아 낼 수 있다는 것이고, 이는 SOA 방법이 다른 최적화 알고리즘에 비해서 효율적인 최적화 방법이란 것을 확인할 수 있다[1]. 또한 이 방법은 여러 대의 컴퓨터를 동시에 사용하여 최적의 설계를 진행할 수 있도록 알고리즘이 구성되어 있어서 계산에 투입된 컴퓨터의 수만큼 반복 계산 시간을 획기적으로 줄일 수 있는 효과를 얻을 수 있었다.

Fig. 5는 유동 시뮬레이션을 활용하여 사형/중력 주조 그리고 다이캐스팅 공정에서의 최적 탕구

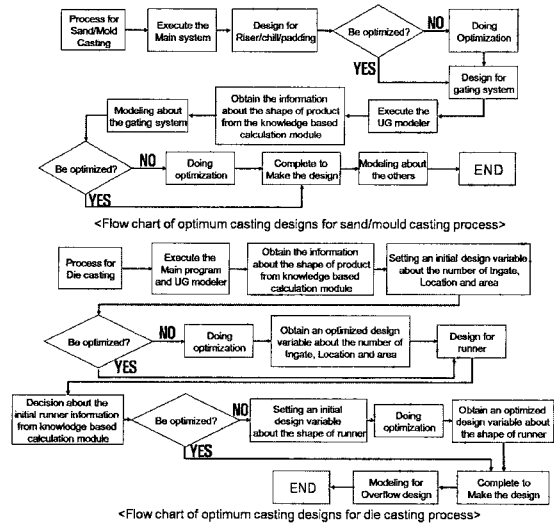


Fig. 5 Flow chart of optimum casting design for sand/mould and die-casting process among rule-based modules

설정 프로세스를 나타낸다.

프로세스 중간과정 중 초기 게이트 디자인 설계요소 값을 얻어내기 위해 각종 문헌자료와 전문가의 경험자료를 활용하여 개발된 계산 프로그램을 이용한다.

이 계산 프로그램은 3D CAD 데이터만 주어지면 기본적인 형상정보를 얻어내고 benett 식과 Diertert 식등을 활용하여 최적 게이트 단면적과 주입 게이트의 단면적을 얻어낼 수 있도록 만들어 졌다 [6~7].

이 프로세스에서도 최적화된 방안설계를 수행하기 위해 최적화 알고리즘에 따른 반복해석을 수행하게 되는데 가장 최선의 결과로 용탕 충전 시간차, 제품내부의 유동계면 조건, 유탕차이등의 요소를 고려하여 최적의 게이트 방안 및 overflow 방안을 얻어낼 수 있다.

### 3. 적용사례에 대한 고찰

앞 절에서 설명한 프로세스 중 먼저 사례기반 추론 모듈을 이용하여 주조방안을 설계하는 예를 살펴보자.

Fig. 6(a)은 방안설계를 하고자 하는 제품의 3D 모델링 데이터가 입력된 경우이다. Fig. 6(b)는 형상 자동 검색 시스템을 통해 형상데이터베이스로

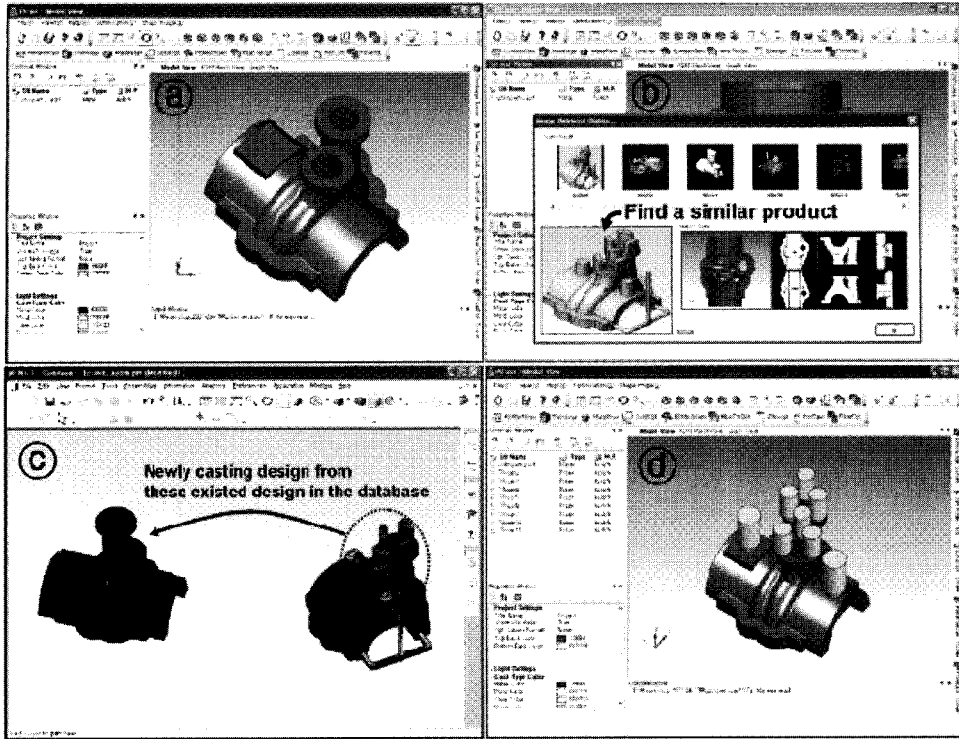


Fig. 6 Flow chart of optimum casting product design for sand/mould and die-casting casting process among case-based modules

부터 가장 근사한 제품이 검색된 상태이다. Fig. 6(c)은 자동으로 모델러가 실행되어 설계자가 간단한 마우스 조작을 통하여 초기 방안설계를 하는 모습을 나타내고 있다.

이후에 우리는 메인 시스템과의 연계를 통해 자동으로 응고해석을 반복하여 Fig. 6(d)와 같은 결과를 얻어낼 수 있다.

다음은 규칙기반추론모듈을 이용하는 예제 중 응고해석을 기반으로 압탕, 칠, 패딩 방안을 수립하는 예를 살펴보자.

Fig. 7 에 소개된 제품은 자동차에서 사용되는 기어박스커버로서 재질은 AC4CH 이고 금형을 이용한 중력주조 생산제품이다.

Fig. 7(b)는 무압탕 수축공 해석을 수행한 결과이다. 이 해석결과를 바탕으로 우리가 정해놓은 규칙에 의해 Fig. 7(c)와 같이 초기 압탕과 칠 방안을 결정할 수 있다.

Fig. 7(d)는 앞에서 결정된 초기방안에 대해 최적화 알고리즘에 의해서 얻어진 최적화된 설계 방안을 나타내고 있다. 또한 Fig. 7(d) 그림의 아래

쪽부분에 나타난 그래프를 통해 반복해석의 결과를 확인할 수 있다. 사각형의 그래프는 압탕과 칠의 부피 정보를 나타내고 있고 동그라미 그래프는 수축결함의 양을 알아 낼 수 있다. 그리고 그래프를 나타내는 부분에서 수직선으로 표시된 부분이 최적 주조방안 디자인으로 결정된 경우를 나타내고 있다.

이와 같은 시스템 내에서의 설계 결과물을 이용하여 금형을 설계/제작 후 시제품 제작 결과 Fig. 7(a) 와 같은 무결함 제품을 얻을 수 있었으며, 이를 바탕으로 실제 제품을 양산하고 있다.

다음으로 Fig. 8 에서는 유동해석을 기반으로 규칙기반모듈을 이용, 오버플로우를 설계하는 경우의 예를 살펴보기로 하자. 예제로 사용되는 제품은 HDD의 케이스 제품이다. Fig. 8(a)에서는 제품의 특정영역에서 초기 오버플로우를 결정하는 모습을 나타내고 있다.

Fig. 8(b), (c)에서는 서로 계산자료를 주고 받을 수 있도록 연결된 여러 대의 컴퓨터들을 이용하여 유동시뮬레이션의 분산계산을 수행하고 있는

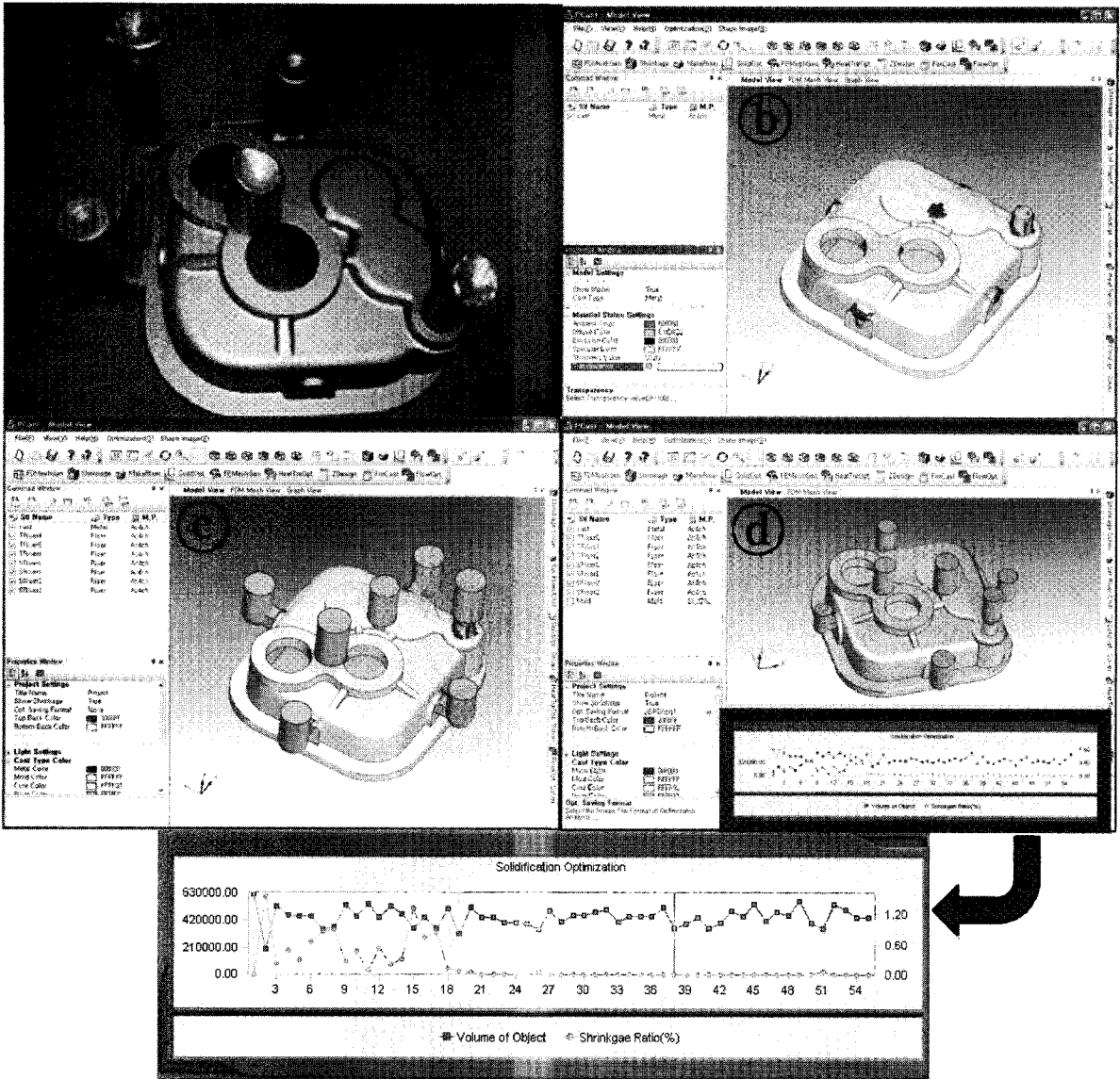


Fig. 7 Example about making the optimum overflow design for die-casting process at rule-based modules

내용을 나타내고 있다. 이 예제의 계산에서는 4개의 CPU를 가지고 있는 서로 연결된 컴퓨터 5대를 활용하여 20개의 시뮬레이션을 동시에 계산하였다. 그림 아래에서 표시된 Bar 그래프들을 통해 각 시뮬레이션의 진행사항을 한눈에 파악할 수 있도록 하였다. 최종적으로 Fig. 8 (d)에서와 같이 반복 유동시뮬레이션에 의하여 최종적으로 얻어진 최적 오버플로우 설계 결과를 볼 수 있고, 이러한 구조방안설계를 바탕으로 최적 금형 설계를 완료할 수 있게 된다.

#### 4. 결론

위와 같이 우리는 형상데이터베이스, 모델러 그리고 최적화 알고리즘을 통한 응고, 유동해석의 반복실행을 통해 현장 설계자가 쉽게 최적의 금형 방안설계를 얻어낼 수 있도록 시스템을 개발하였다. 그러나 개발된 시스템은 시뮬레이션을 기반으로 하고 있기 때문에 시뮬레이션 자체의 수리적 계산 오차로 인한 잘못된 예측결과가 얻어질 수 있는 문제점을 고스란히 지니고 있다. 또한

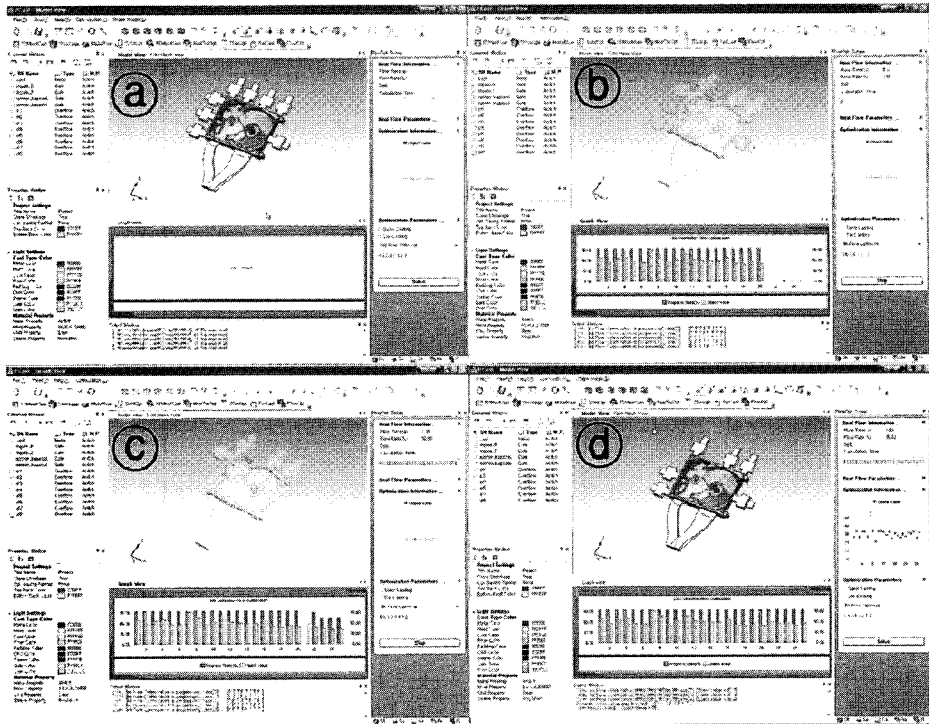


Fig. 8 Example about making the optimum overflow design for die-casting process at rule-based modules

작업현장에서는 여러 공정상의 제약으로 인하여, 시스템에서 얻어지는 최적의 설계 결과물을 그대로 적용하기에 어려움이 많다.

그러므로 실제 생산현장에서 쓰기까지에는 많은 수정과 변형이 가해져야만 하고 시스템을 보다 쓰기 편하고 효율적으로 만들기 위해 많은 현장 관련자들과의 조언이 필요하며 보다 많은 현장작업요소를 정식화 하여야만 한다. 그러기 위해 향후에도 지속적인 연구를 진행할 예정이다. 전체적으로 많은 연구가 진행되어 왔고 결과물이 나와 있기 때문에 최종 결과물은 조기에 얻어질 것으로 예상된다. 우리는 이러한 연구의 결과물들이 주조현장에서 보다 정확하고 빠른 최적의 금형 방안설계를 제공해 줄 수 있으리라 확신한다.

### 참 고 문 헌

- [1] C. H. Lim, Y. C. Lee, J. K. Choi, 2004, 'Intelligent expert system for casting design using simulation and optimization', WFC66, Sept., Istanbul Turkey.
- [2] C. H. Lim, Y. C. Lee, J. K. Choi, 2005, Int. J. Cast. Met. Res., Vol. 18, pp. 195~201.
- [3] K. H. Lee, B. S. Kang, J. S. Park, G. J. Park, 2003, Finite element in analysis and design, Vol. 40, pp. 121~135.
- [4] C. H. Lim, Y. C. Lee, J. K. Choi, 2006, Int. J. Cast. Met. Res., Vol. 4, pp. 259~264.
- [5] Jasbir S. Arora, Introduction to optimum design : McGRAW-HILL.
- [6] J. C. Sturm, 2004, Optimisation integration casting property prediction, WFC66, Sept., Istanbul Turkey.
- [7] C. H. Lim, I. S. Cho, S. Y. Yoo, J. K. Choi, June 2006, Intelligent riser/chill/gating design system using simulations and discrete optimization algorithm, WFC67, UK., p. 173.
- [8] C. H. Lim, I. S. Cho, S. Y. Yoo, J. K. Choi, 2007, The construction of the casting expert system based on the database by utilizing simulation and modeler, MCSP7, Dailen, China, pp. 361~370.
- [9] J. S. Arora, M. W. Huang, 1994, Structural Optimization, Vol. 8, pp. 69~85.
- [10] M. W. Huang, J. S. Arora, 1997, Int. J. for Numerical Method Eng., Vol. 40, pp. 165~188.
- [11] P. B. Thaneda, G. N. Vanderplaats, 1994, J. of



- Structural Eng., Vol. 121, pp. 301~306.
- [12] J. W. Yi, 2004, A sequential Algorithm using OA in discrete space, Ph.D. Thesis, Hangyang Univ. Korea.
- [13] J. W. Yi, J. S. Park, K. H. Lee, G. J. Park, 2001, Trans. of the KSME, Vol. 25, pp. 1651~1656.
- [14] J. W. Yi, G. J. Park, 2004, Trans. of the KSME(A), Vol.28, pp. 1399~1407.
- [15] D. T. Pham, D. Karaboga, 1997, Intelligent optimization techniques, Springer-Verlag, NewYork.
- [16] I. H. Osman, J. P. Kelly, Meta-Heuristics, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [17] M. Gen, R. Cheng, 2000, Genetic Algorithm and Engineering Optimization, John-Wiley & Sons Inc., NewYork.
- [18] R. M. McDavid, J. A. Dantzig, 1998, Int. J. for Numerical Method in fluid, Vol. 28. pp. 419~ 442.
- [19] N. Hofmann, S. Olive, G. Laschet, F. Hediger, J. Wolf, P. R. Sahn, 1997, Modeling and Simulatioin in Material Science and Engineering 5, Vol. 1, pp. 22~ 34.