

사출성형에서의 CAE 적용과 S/W

김 월 룡 · 이 시 호

1. 서 론

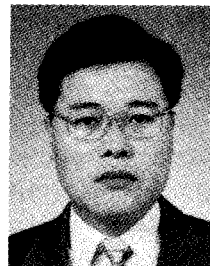
사출성형은 다음과 같은 특징으로 인해 가장 대표적인 플라스틱 가공 방법으로 평가된다. 단순한 형상의 제품은 물론이고 복잡한 형상의 플라스틱 제품의 생산에 가장 널리 사용되고, 다양한 플라스틱 소재를 재료로 하여 가공할 수 있으며, 상대적으로 생산 cycle time이 짧아서 다른 생산 방식보다 저렴한 생산가로 복잡한 형태의 제품을 효율적으로 생산할 수 있는 방식이다.

이상과 같은 특징으로 인해 사출성형은 전세계에서 가장 널리 사용되는 플라스틱 가공 방식이 되었고, 사출성형 제품을 개발하기 위해 많은 인원과 비용과 시간을 투자하고 있다. 그런데 국내에서는 86년 이전만 해도 중요 금형은 외국에서 설계·개발하여 수입하였고, 사출성형 분야의 과학적이고도 학문적인 연구 및 투자가 이루어지지 않아서 일부 경험이 많은 숙련된 기술자의 숨겨진 노하우에 의해 양품의 생산여부가 결정되는 수준이었다. 86년부터 국내의 일부 수지업체들이 과학적이고도 실제적인 지원을 하고자 사출성형에 CAE를 적용하기 시작하였다. 이렇게 적용되기 시작한 사출성형 분야의 CAE는 점차 비수지 업체 즉, 사출제품의 개발·생산업체 또는 금형개발 관련업체 등으로 확산되어 지금은 제품개발시 CAE를 적용하지 않으면 상사의 결재를 받지 못하는 경우가 있을 정도로 확대되었다(그림 1).

사출제품의 개발은 일반적으로 ① 수지선정·제품설계 ② 금형설계 ③ 금형제작 ④ 시성형 ⑤ 금형수정 ⑥ 시성형 ⑦ 양산 등의 과정을 거쳐 이루어진다. 따라서 사출성형에서 CAE를 적용하고자 할 때 수지선정·제품설계 등 개발 초기단계부터 CAE를 이용해야 효과를 극대화할 수 있다. 예를 들어 시성형시 발생한 문제점을 해결하고자 CAE를 적용하게 되면, 수지 선정이 잘못되어 재선정

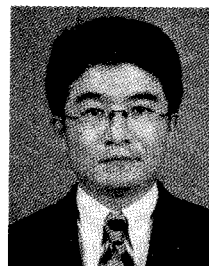
해야 하거나, 제품의 강도가 충분치 못해 구조설계를 다시 해야 하거나, 혹은 금형의 많은 부분을 수정해야 하므로 이를 위한 수정 비용과 시간이 중복투자되어 낭비가 심할 수도 있고, 제한된 금형수정만 해야 할 경우에는 CAE를 이용하더라도 양품의 생산을 기대할 수 없기 때문이다.

그림 2와 같이 CAE를 적용하지 않은 사출제품의 개발과정은 한 단계가 완료되어야 다음 단계로 진행될 수 있다. 또한 여기에 컴퓨터를 이용한다면 수작업으로 하던 도면작업을 2차원 평면의 CAD data로 옮기는 수준이다. 그러므로 금형수정이 있을 경우 각 설계도면의 자동연결이 불가능하여 일일이 수정해야 한다. 이와 반대로



김월룡

1987 서울대학교 섬유고분자공학과 (학사)
1989 서울대학교 섬유고분자공학과 (석사)
1989~1997 삼양사 중앙연구소
1997~ LG화학 테크센타 응용기술팀 선임연구원



이시호

1981 서울대학교 섬유고분자공학과 (학사)
1983 서울대학교 섬유고분자공학과 (석사)
1996 The U. of Akron, Dept. of Polymer Engineering (박사)
1984~1996 (주)LG화학 기술연구원 고분자 연구소 책임연구원
1997~ (주)LG화학 테크센타 응용기술팀 팀장

CAE Applications in Injection Molding and Its Software

LG화학/테크센타 응용기술팀(Worlyong Kim and Shi-Ho Lee, Polymer Processing Technology Team, LG Chem/Tech. Center, 84 Jang Dong, Yu-Sung, Taejon 305-343, Korea)

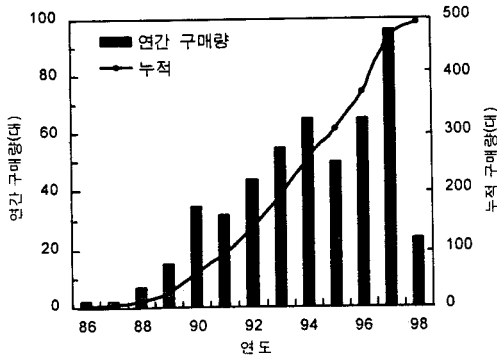


그림 1. 도입된 사출성형 CAE S/W의 연도별 누적 대수.

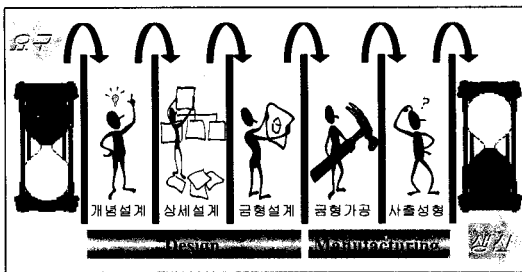


그림 2. 기존의 시행착오법에 의한 제품생산('Over the Wall' Engineering).

CAE를 적용하게 되면 컴퓨터 상에서 3차원 CAD S/W로 제품의 설계가 가능하므로 복잡한 도면을 보지 않아도 제품의 형상을 눈으로 확인할 수 있고, 이를 제품의 구조 해석에 사용할 수 있으며, 그 결과가 설계에 반영되고, 단지 몇 개의 명령만으로 즉각적인 금형 설계로 연결되며, STL(Stereo Lithographic) file을 생성시켜서 NC 공작기계의 입력 data를 만들 수 있다. 설계부터 제작까지의 과정이 그림 3과 같이 컴퓨터 상에서 이루어지므로, 기존 방식보다는 모든 과정을 동시에 진행할 수 있고, 수정과 정보전달이 용이하다. 기존 방식과 동시공학을 이용한 특징을 표 1에 비교하여 나타내었다.

2. 본 론

사출성형 CAE S/W는 70년대부터 개발되기 시작하여 76년 Moldflow(호주)의 'Flow Analysis' S/W가 최초로 상용화되었고, 10년 후 C-Mold(미국)가 상용화되었다. 그 후 유럽과 일본의 많은 회사에서 각종 상용 S/W들이 개발되었고, 90년대에 국내에서도 삼성과 LG에서 유동·보압·냉각 해석용 CAE S/W가 발표되었다. 하지만 이들 S/W의 꾸준한 성능확장 및 version-up을 위해서는 많은 연구인력과 비용이 계속 지원되어야 하

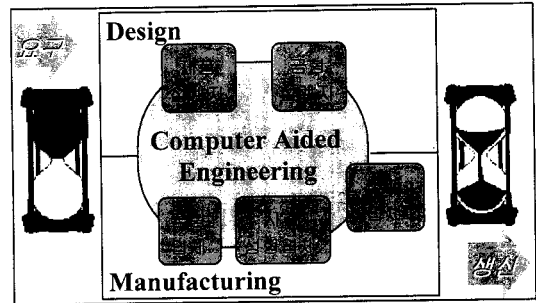


그림 3. 동시공학(Concurrent Engineering)을 이용한 제품 설계('Lean Plastic' Engineering).

표 1. CAE 적용 전 후 효과 비교

	CAE 적용 전 (Over the Wall Engineering)	CAE 적용 후 (Concurrent Engineering)
특징	· 각 단계가 분리·단절되어 수직적으로 연결되며, 의사 전달과 정보의 정확한 전송이 어렵다. · 숙련자의 과거의 경험에 의존 · Cut-and-Try(금형 제작 후 시성형시 문제점을 수정, 제품설계, 금형설계, 성형조건 등으로 분석하여 수정 후 재시도)	· 제품개발의 모든 단계를 통합하여 동시에 추진할 수 있다. · 사출성형·컴퓨터·CAE S/W 등의 기초교육으로 직용이 가능하다. · CAE Before Cut(금형 제작 전에 컴퓨터를 통한 공학적인 계산으로 평가·확인하여 불량 요인을 사전에 해결) · 최종 제품의 품질을 정확하게 예측 · 시사출 단계를 단축
장점 또는 단점	· 개발기간이 지연된다. · 원가 상승의 요인이다. · 품질의 균일성 확보가 어렵다. · 경쟁력 저하의 원인이 된다.	· 시행착오를 최소화 · 개발 및 생산과정의 전체적인 생산성 향상(Cost Down) · 제품개발 기간을 현저하게 단축 · 최적 설계로 제품의 품질과 신뢰성 향상

로 지속적인 연구가 가능한 Moldflow와 C-Mold를 제외하고는 현재 대부분이 명맥만 유지하거나 사라졌다. 국내에서도 학계의 연구가 일부 있으나 그 성과는 크지 않은 것으로 보인다. 필자의 견해로는 연구인력 저변이 취약한 국내에서 사출성형 CAE S/W의 자체개발보다는 기존의 상업용 S/W들이 지원하지 못하는 분야나 이들 S/W의 취약점을 보완하여 실제 성형을 더욱 잘 해석할 수 있는 이론을 기존 S/W개발사들과 project를 통해 연구하거나 혹은 특허판매를 통해 접근하는 것이 우리의 실정에 맞을 것으로 본다.

본 고에서는 전세계적으로 사출성형 분야의 양대 산맥인 Moldflow와 C-Mold를 중심으로 기술하고자 한다. 사출성형에서 CAE S/W의 적용은 표 2와 같이 일반 사출성형 분야로 충전해석, 보압해석, Runner Balancing 해석, 섬유배향 해석, 최적화 해석, 냉각해석 등이 가능하고, 가스주입 사출성형(gas-assisted injection molding), 공사출 성형(co-injection molding), 사출압축 성

표 2. 사출성형에서의 CAE 적용분야 및 해당 Module

분 야	기 능	Moldflow	C-Mold
일반 사출성형	충진과정 해석	MF/FLOW	Filling
	보압과정 해석	MF/FLOW	Post-Filling
	Runner Balancing 해석	MF/FLOW	Filling
	섬유배향 해석	MF/FIBER	Fiber Orientation
	최적화 해석	MF/OPTIM	-
	냉각 해석	MF/COOL	Cooling
가스주입 사출성형	Gas 주입 유동(충진), 보압 해석	MF/GAS	Gas-Assisted Injection Molding
공사출 성형	2개의 사출 Nozzle를 통한 수지의 유동해석	-	Co-injection Molding
사출압축 성형	사출 후 이동판의 압축을 통한 보압전달 해석	-	Injection/Compression
반응 사출성형	미반응 혼합물의 금형 내 사출 후 반응 해석	MF/TSET	Reactive Molding
IC칩 봉지성형	반도체용 IC칩의 유동·Curing 해석	MF/TSET	Reactive Molding, Microchip Encapsulation
블로우 성형	Bottle 제조에 적용	-	Blow Molding
열 성형	발포 성형과 압축의 해석	-	Thermoforming
수축 해석	성형 후 수축에 따른 금형 수축률 결정	MF/SHRINK	Shrinkage and Warpage
변형 해석	성형 후 취출품의 변형거동 해석	MF/WARP	Shrinkage and Warpage
구조 해석	제품 설계시 또는 변형된 성형품의 하중(열, 하중)에 따른 구조설계	MF/STRESS	-
사출기 성형 조건 해석	사출기, 금형, 수지에 따른 최적 성형 조건 계산	Smart Mold	Dr. C-Mold
간이 유동해석	설계자를 위한 3D Solid CAD data를 이용한 성형 해석	Part Adviser	3D QuickFill

형(injection-compression molding), 반응 사출성형(reaction injection molding), IC칩 봉지성형(encapsulation molding), 블로우 성형(blow injection molding), 열성형(thermoforming) 등 특수성형도 가능하다. 또한 수축·변형해석(shrinkage and warpage analysis), 구조해석(stress analysis) 등 냉각공정 이후의 제품의 형상에 대한 예측 등도 가능하다. 기타 사출기, 금형, 수지에 따른 실제 성형기의 작업조건을 반영한 성형조건 예측, 설계자를 위해 3차원 solid CAD로 만든 model을 별도의 변환을 통하지 않고 직접 이용하여 간단한 유동해석을 하여 설계시점부터 충진에 대한 고려가 이루어지게 하는 간이 유동해석 등 다양한 응용 S/W가 있다.

표 2에서 살펴보면 두 회사 모두 유사한 분야의 CAE를 개발하였음을 알 수 있다. 약간의 차이점이라면 Moldflow는 성형해석 결과를 실제 사출기에 적용할 수 있는 IPC(Intelligent Process Control)분야로 접근하여 MF/OPTIM을 개발하였고, C-Mold에서는 co-injection molding, injection/compression molding, blow molding, thermoforming 등 특수 성형분야로 많이 접근해 있다는 것이다.

2.1 일반 사출성형의 CAE 적용

사출성형에 CAE를 적용할 때 응용 가능한 범위는 다음과 같다. 첫째, 제품설계 단계에서는 정·동역학을 이용한 구조해석으로 제품의 살 두께와 리브(rib), 보스(boss), 그릴(grill) 등 제품구조를 설계할 수 있으며, 이에 따라 사용할 수지를 결정할 수 있다. 둘째, 금형설계에서는 sprue, runner, gate 등의 수지 주입구의 설계가

가능하고, runner balancing, gate balancing 등을 이룰 수 있으며, 최적화된 냉각회로의 설계가 가능하다. 셋째, 사출성형 공정 측면에서는 수지온도·금형온도를 결정하며, 사출시간과 다단 속도 제어, 다단 보압 profile 등을 결정할 수 있으며, cycle time을 단축하여 원가절감을 이룰 수 있다. 넷째, 수지개발 측면에서는 고객의 요구에 부응하는 수지를 개발할 수 있고, 수지 회사의 체계적이고 과학적인 기술지원 및 material D/B의 구축이 가능하다.

사출성형은 barrel 내에서 스크류의 회전 마찰열로 수지를 녹이는 가소화 단계, 용융수지가 금형으로 유입되는 충진단계, 충진 후 수지의 체적수축을 보상하는 보압단계, 고온의 수지를 금형온도 수준으로 냉각하는 냉각단계, 제품을 꺼내고 다음 공정을 준비하는 형개폐 단계로 1 cycle이 이루어진다. 성형된 제품은 후수축으로 변형이 발생할 수 있고, 사용 중에 외부 환경에 의해 제품이 파괴되거나 심한 변형을 나타내기도 한다. 따라서 사출성형에서의 CAE는 사출성형의 기본공정에 대한 해석은 물론 성형 후 변형과 구조해석을 수행할 수 있어야 한다.

2.1.1 전·후 처리기(Pre/Post Processor)

성형해석을 하기 위해서는 우선 성형할 제품을 컴퓨터 상에서 재현하는 모델링 기능과 해석에 필요한 boundary condition을 입력할 수 있는 전처리가 있어야 하고, 해석결과를 효과적으로 처리하여 결과를 분석·판단할 수 있도록 지원하는 후처리가 있어야 한다.

CAD S/W에서 만든 모델을 그대로 사용할 수 있으면 가장 좋으나 현실적으로는 완벽한 호환을 기대하기 어렵

다. 그래서 해석 S/W의 전처리기에서 직접 모델링을 하거나 CAD data를 변환하여 전처리기에 맞게 수정하여 사용한다. CAD data를 IGES 방식이나 STL 방식으로 저장한 후 변환 S/W를 통해 전처리기가 읽어들이 수 있는 형태로 변환 후 수정하여 모델을 완성한다. 최근 모델링의 추세인 solid CAD data는 유체해석에서 사용할 수 없으므로, 두께방향의 중간면을 따라 shell surface를 따로 만들어 사용하는데, 두께변화가 심하거나 전체 크기에 비해 두께가 두꺼운 제품은 실제와 유사한 shell surface를 만들기 쉽다.

유한요소해석을 위해 shell surface를 요소(mesh, element)로 분할한다. 분할을 많이 하면 요소의 수가 증가되고 요소의 크기가 작아지며 해석의 정밀도는 향상된다. 그러나 해석할 요소가 많아지므로 해석시간이 많이 소요된다. 따라서 제품의 크기에 따라서 해석의 정확성과 해석시간을 원하는 수준으로 미리 정한 후 적당한 개수의 요소로 만드는 것이 필요하다.

후처리기는 시간, 온도, 압력, 충전패턴 등의 해석결과를 모델형상에 등고선 형상의 line contour나 solid filled color 혹은 그래프로 나타내거나, 전체적인 분포로 표시한다. 특히 변형해석 결과를 적당한 배율로 확대하여 나타내면 실제로 뒤뜰어진 형태로 관찰할 수 있어서 결과의 이해에 도움을 준다.

2.1.2 충전·보압 과정

2.1.2.1 일반 유동해석

유동해석으로 노즐을 지나 금형 내로 충전되는 용융수지의 유동현상을 해석하여 제품설계를 최적화하고 적절한 수지를 선정하고 gate와 runner의 수, 위치, 크기 등을 결정하며, 공정조건의 최적화를 이룰 수 있다.

그림 4의 좌측과 같이 두께방향으로 온도가 일정하다고 가정된 3차원 유동해석 S/W가 발표되었고, computer의 성능 향상으로 그림 4의 우측과 같이 두께의 중심에서 표면으로까지 두께방향의 온도가 다르지만 이 중심으로부터 양측 표면까지의 온도분포가 대칭이라고 가정한 유동해석까지 발전하였다. 이 해석 S/W는 제품의 중심에서 표면까지를 10개 이상의 다층으로 분리한 후 플라스틱의 PVT(압력-부피-온도) data를 사용하여 두께

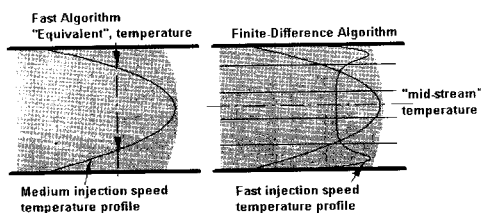


그림 4. 두께방향의 유동특성과 온도 profile 비교.

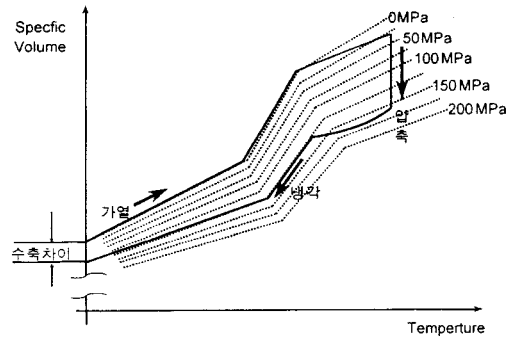


그림 5. 사출과정의 수지의 PVT 거동.

방향으로 온도, 전단변형, 점도 등의 변화에 대해 고분자의 압축 거동을 고려한 3차원 해석을 수행하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다(그림 5 참조).

최근에는 양측 표면까지의 온도 분포를 비대칭으로 가정하여 보다 실제현상에 근접하는 유동해석 S/W까지 개발되었다.

여러가지 사출성형 방식 중에서 일반 사출성형에 CAE가 가장 먼저 적용된 만큼 정확성 및 공정모사도 우수하다. 단 여기서 호퍼를 통해 들어간 고체의 수지를 녹이는 가소화 과정도 사출성형 공정에 포함되나 동일한 온도로 가소화되었다고 가정하므로 해석할 필요없이 입력값을 이용한다.

C-Mold에서의 유동해석은 비등온 조건에서의 점성 고분자의 일반화된 Hele-Shaw flow에 근거한다. 수치계산은 hybrid FEM/FDM(Finite Element Method/Finite Difference Method)을 기초로 하여 수행된다.

2.1.2.2 섬유배향 유동해석

일반적인 수지로 사출할 경우 CAE S/W로 해석한 변형 결과는 실제와 많이 일치하나, 유리섬유나 탄소섬유가 보강된 수지의 경우에는 유동과정에서 수지의 흐름방향으로 섬유들이 많이 배향되는데 섬유의 배향은 수축과 재료의 물성 측면에서 이방성을 유발한다. 수축의 이방성은 배향방향과 직각방향의 수축률 편차를 발생시켜 변형의 원인이 된다. 물성의 이방성은 제품의 강도를 변화시키는데, 배향방향의 인장강도는 향상되지만 충격강도는 감소한다. 따라서 일반적인 유동해석·변형해석 S/W로는 실제와 잘 맞지 않는 경우가 적지 않기 때문에 개발한 것이 'Fiber Orientation'을 고려한 섬유배향 유동해석이다. Moldflow의 배향예측은 개선된 Folgar-Tucker Model에 의한다. 배향해석의 결과는 정렬된 섬유의 방향성과 부분적으로 변화되는 탄성계수값의 분포를 나타낸다.

2.1.2.3 최적화 유동해석

사출성형시 이상적인 속도와 압력 제어는 1단 속도, 1단 압력이다. 그러나 제품의 설계는 두께변화가 심하고 형상이 복잡해지는 추세이고 충전시 또는 보압시 1단으

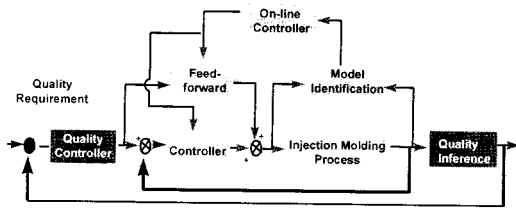


그림 6. 지능형 공정제어 구성도.

로 속도와 압력으로 제품을 성형하면 표면 불량 및 수축·변형 등이 심하여 성형 불량이 생길 수 밖에 없다. 성형품의 표면 품질은 수지 유동시 특정 위치에서의 전단 변형속도와 관계가 있다. 살 두께 편차가 큰 부분에서는 전단 변형속도 변화가 심하여 순간적인 불균일 유동이 발생하므로 표면에 silver streak나 flow mark 등이 나타난다. 이를 개선하기 위해 적절한 다단 속도제어를 통해 일정한 전단변형 속도를 유지하면 표면 불량이 개선된다.

보압이 불균일하게 전달되면 금형에 충전된 수지가 고화하면서 압력손실이 증가하게 되고 체적 수축 편차가 생기고 후변형을 유발한다. 즉 금형 내의 수지 전체에 균일한 보압 전달이 이루어지면 체적 수축 편차가 감소하여 성형품의 후변형을 방지할 수 있다. 이를 위한 것이 최적화 유동해석이다. C-Mold에는 적용되지 않고 Moldflow에만 있는 기능으로 사출기의 제원(최대 형체력, 최대 사출속도, screw stroke length, screw diameter, 최대 다단속도/보압 수, 사출기의 응답시간 등)을 입력하면, 반복계산(iteration method)을 통해 수지와 설계된 제품의 형상에 적합한 성형조건(속도, 압력, 시간 등)을 제공하며 성형 조건에 따른 제품의 성형결과를 예측하게 해준다. 이 성형조건을 사출기에 자동으로 전송하고 제어할 수 있는 인터페이스를 일본의 유명 수지메이커이자 사출기 메이커인 우베(Ube)에서 독점으로 개발하였다. 바로 이것이 지능형 공정제어(intelligent process control, 그림 6)이다. 그러므로 IPC 해석결과를 쉽게 입수할 수 있고 우베사출기와 이 인터페이스가 있다면 신개발품 금형의 사출성형 조건 설정시 시간과 수지의 낭비를 줄일 수 있다.

2.1.3 냉각과정

사출성형에서 금형은 수지로부터 받은 열을 금형의 열전도와 냉각수의 대류·순환과 대기 중으로 방출하는 복사효과 등을 통해 외부로 방출하는 열교환기라고 말할 수 있다. 이 과정을 통해 사출시 고온의 수지를 금형온도 근처로 냉각하여 고화시킨다. 냉각과정에서 중요한 것은 '빠른 냉각'과 '균일한 냉각'으로 이것은 그림 7과 같이 제품의 생산성 측면과 품질이라는 양면성을 가지고 있다. 이 두 마리 토끼를 균형있게 잡을 수 있어야 최적의 냉각과정을 수행할 수 있다.

냉각을 빨리 하게 되면 냉각시간은 단축되나 불균일한

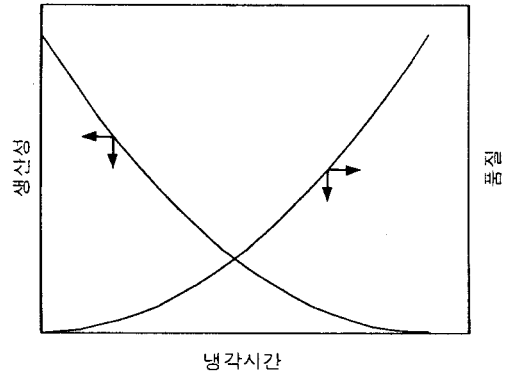


그림 7. 냉각시간에 따른 생산성과 품질 경향.

온도분포로 인한 수축 차이로 제품 취출 후 후변형을 야기시킬 가능성이 높아질 수도 있다. 수지가 미리 결정되고, 제품의 두께 등 형상을 변경시킬 수 없는 상황이라면 사출시 냉각회로 구성방법, 냉매의 종류, 입수온도, 냉매 유량 등을 통해 빠른 냉각시간을 얻을 수 있다.

냉각을 균일하게 하기 위해서는 우선 제품 두께의 불균일을 피해야 하고 냉각회로의 배열을 적절하게 하여 제품과 맞닿는 금형 표면온도 차이를 줄여야 한다. 그렇지 못하면 수축 차이가 커서 변형의 원인이 되고 표면불량의 원인이 된다.

냉각해석의 설계조건은 금형면과 냉각관과의 거리와 냉각관의 직경, 냉각회로의 간격, 냉각회로의 입출수 개수 등이다. 금형면과 냉각관과의 거리가 너무 가까우면 냉각되는 부위와 그렇지 않은 부위의 온도차이가 심해지고, 이를 개선키 위해 냉각회로의 간격을 줄이면 금형 내의 수많은 취출핀과 간섭될 우려가 있을 뿐만 아니라 냉각수를 흐르게 하는 펌프의 용량도 지나치게 커야 한다는 불합리한 점들이 많이 발생할 수 있다. 그러므로 적절한 거리와 간격을 설정해야 하고, 균일한 냉각이 되도록 해야 한다. 또한 제품의 살 두께가 두꺼운 부분이나 열이 집중되는 제품의 구성진 부분에서 냉각효과를 크게 하려면 입수구를 이런 부분에 위치시키는 것이 좋다.

냉각회로를 흐르는 냉매가 층류(laminar flow)를 이루면 냉각관 표면과 냉매 사이의 열전도 효과가 떨어진 다. 그러므로 Reynolds 수가 10,000 이상인 적당한 난류의 형태로 냉매가 흐를 수 있어야 냉매가 냉각관 표면과 접촉할 확률이 높아져 열전도가 좋다. 그렇지만 과도한 난류는 냉매 중 기포를 형성하게 되어 냉매가 냉각관 표면에 부딪힐 확률을 낮추어 오히려 냉각효과가 떨어진다. 그러므로 Reynolds 수는 10,000~11,000 정도가 되도록 냉매의 유량을 조절해야 한다.

2.1.4 변형과정

용융된 고분자는 압력과 온도에 따라 체적이 변한다. 사출성형에서도 screw 내에서 수지가 열을 받아 고체에

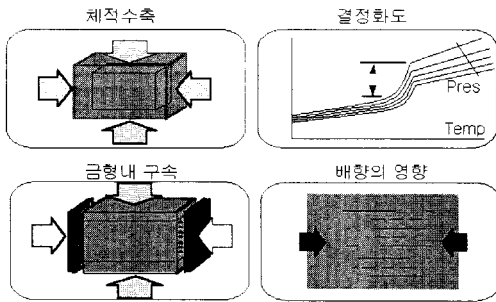


그림 8. 성형품의 수축과 변형의 원인.

서 액체로 상변화가 생기면서 압력을 받는다. 이후 사출시 압력변화도 생기고, 금형표면에 닿는 부위는 온도변화도 생길 뿐만 아니라 액체에서 다시 고체로의 상변화도 생긴다. 이런 온도·압력·체적 변화·상변화가 균일하게 변하는 것이 아니라 예측이 쉽지 않을 정도로 불균일하다. 이러한 이유로 인해 또 제품의 두께 불균일과 구조적인 측면에 따라 각 부위의 수축이 서로 다르게 작용한다. 이에 따라 성형품 내에 응력이 발생하고, 이 응력을 해소 또는 완화하고자 하는 수지 자체의 특성이 성형품 전체에 영향을 주어 비틀리거나 휘는 등 형상이 변하게 된다(그림 8 참조).

성형품의 변형은 크게 세 가지 원인에 의한다. 첫째, 금형 온도의 영향으로 인한 불균일한 냉각 차이가 변형의 원인이 된다. 즉 냉각판과 가까이 있는 부분은 급냉되고, 떨어져 있는 부분은 서냉됨으로써 이 부분이 많이 수축하여 변형을 일으킨다.

둘째, 제품 두께의 편차가 심하여 생기는 불균일한 수축 차이가 변형의 원인으로 작용한다. 얇은 부분은 수축이 심하지 않고, 두꺼운 부분은 수축이 심하기 때문에 응력이 생기고 이에 따라 변형이 유발된다.

셋째, 고분자의 배향 및 유리섬유·탄소섬유의 배향으로 인해 수지 유동방향과 유동에 직각인 폭방향의 수축이 달라서 변형이 생긴다. 결정성이 큰 고분자의 경우 고온·고압에 의해 충전시의 유동방향으로 배향이 되면 분자의 main chain의 carbon-carbon 공유결합이 늘어나게 된다. 유동에 직각인 폭방향의 side chain의 이온결합이나 분자간의 간격도 늘어난다. 흐름이 종료되면 열역학 제 2 법칙에 의해 분자들은 엔탈피가 감소되고자 하는 방향으로 진행되기 때문에 수축하는데, 배향방향의 C-C 공유결합의 복원되는 힘이 side chain의 이온결합이나 분자간 반데르발스힘보다 강하기 때문에 유동방향의 수축이 더 크다. 유리섬유나 탄소섬유가 보강된 수지의 경우 이들 섬유는 유동방향으로 배향된 후 수축시 수축을 저해하는 보강재의 역할을 하고, 유동에 직각인 폭방향으로는 상대적으로 섬유의 보강 효과가 작기 때문에 유동에 직각인 폭방향으로의 수축이 더 크다.

CAE S/W를 사용하면 최종 제품의 변형 형태를 사전에 정확히 예측하고, 변형의 원인을 분석하여 정밀한 치수를 갖는 제품을 개발할 수 있다. 변형의 원인 중 어떤 영향이 더 큰 지를 분석한 후 해당 원인을 제거하거나 줄임으로써 변형을 개선할 수 있다. 불균일한 냉각이 원인이라면 냉각회로를 수정하거나 냉각조건을 개선하고, 불균일한 수축차이가 원인이라면 제품의 두께를 보다 더 균일하게 개선하고, 배향이 원인이라면 배향을 줄일 수 있는 gate 설계를 하거나 제품의 두께를 변화시켜 개선할 수 있다.

2.2 가스주입 사출성형의 CAE 적용

가스주입 사출성형은 일반사출에 비해 많은 성형변수들이 연관되어 있고 성형조건에 따라 가스의 거동이 매우 민감하여 그 결과를 예상하기가 쉽지 않다. 제품설계, 수지물성, 성형공정 변수 등에서 미세한 변경이 gas penetration 결과를 매우 다르게 변화시킬 수 있다. 수지와 가스 주입구의 위치를 어디에 두어야 좋을지, 수지와 가스의 양을 어느 정도 주입해야 좋을지, gas channel의 위치를 어디에 두어야 할 지, 이 channel의 크기는 어느 정도로 설계해야 할 지 등을 알기란 어렵다. 따라서 CAE를 적용하지 않고 가스주입 사출성형에서 설계조건, 성형조건 등을 최적의 상태로 설정하여 양품을 생산하기란 무척 어렵고 설사 최적 조건을 설정하더라도 많은 시간이 소요된다. 그래서 가스주입 사출성형에는 반드시 CAE를 이용해야 한다.

CAE를 가스주입 사출성형에 적용하게 되면, 고분자와 가스 충전 거동, 고분자와 가스충의 비율, 부피수축 등의 다양한 정보를 알 수 있고, 이를 활용하여 gas channel의 적합성과 성형 조건에 따른 고분자와 가스의 유동현상을 미리 예측함으로써 불량 요인을 제거하고 현장작업시 양질의 성형품을 제작할 수 있다.

Moldflow와 C-Mold의 가스주입 사출성형 CAE module은 CINPRESS 방식, GAIN 방식, PFP(Partial Frame Process) 방식 등 여러 가스주입 사출성형 방식에 적용할 수 있다. 이 CAE module의 기능들은 최적의 gas channel 구성, air trap, short shot, fingering, gas penetration 불량, 수축 등 문제의 해결, gate 위치와 수량의 최적화, gas injection point의 최적화, 최적 사출조건과 최적 가스주입 조건의 산출 등이다.

가스주입 사출성형의 장점으로 제품 중량을 줄일 수 있고, gas channel의 외경이 크고 내부는 비어있는 파이프 구조로 인해 구조강도를 증가시킬 수 있다. 또한 rib 등 두꺼운 부분에 gas channel을 설치하여 sink mark를 방지하며, 수축을 방지하는 보압과정에 가스로 보압력을 일부 지원하므로 저압사출이 가능하여 사출기의 형체력을 줄일 수 있다.

2.3 간이 유동해석

현재 국내 CAD S/W는 물론 autoCAD가 중소기업체

를 중심으로 많이 사용되고 있다. 이는 대부분 예전에 수작업하던 도면 제도를 컴퓨터 상에서 2차원적으로 나타내는 역할에 주로 사용되고 있는 실정이다. 물론 3차원 solid modeling이 가능하지만 이 기능을 사용하는 경우는 거의 없을 것이다. Pro/Engineer, I-Deas 등 워크스테이션용 3차원 solid CAD S/W는 이미 많이 사용되고 있고, 97년에 PC에서 3차원 solid modeling이 가능한 저렴한 가격의 CAD S/W인 SolidWorks가 발표되었다.

최근의 설계 추세는 3차원 solid modeling으로부터 시작하여 이를 구조해석·성형해석 등의 필요한 해석과정을 거치고 수정된 후 NC data 생성·NC 공작기계 작업 등의 금형제작 과정까지 일괄적으로 연결되도록 하고 있다. 즉 개발업의 중복을 방지하여 최소의 노력으로 충분한 효과를 얻기 위한 '동시공학'의 적용이 보편화될 것이다.

현재 이와 같은 추세에 있어 가장 방해되는 분야가 FEM을 사용하는 CAE 해석분야이다. Solid로 생성한 3차원 model을 FEM이 가능하도록 가상의 mid-plane으로 된 shell surface로 변환하는 과정이 상당히 어려우며 많은 시간이 걸린다. Solid model을 그대로 사용할 수 있는 3차원 입방체 요소를 이용한 해석 기술이 실용화되어야 하나 현재는 미완성인 상태이다.

그래서 유한요소를 사용하지 않는 새로운 유체해석 기술이 생겨났다. 이들은 solid model을 shell surface로 변환하지 않고 있는 그대로 사용한다. 따라서 3차원 개념설계부터 성형해석·NC data 생성·NC 공작기계 작업 등의 과정에서 model을 변환하지 않고 공통적으로 사용하므로 개발기간을 획기적으로 단축할 수 있다. 이 기술은 3차원 solid modeling 기능을 제공하는 어떠한 설계 S/W와도 완벽하게 호환된다. 이렇게 solid model을 성형해석할 수 있는 S/W는 그 수요처가 제품설계자들이다.

간이 성형해석 S/W를 이용하여 개념적인 설계 제품의 유동성을 즉시 분석할 수 있으므로 제품의 살 두께를 결정하며, 사용할 수지를 선택하고, 제품의 제한조건을 지키는 한계 내에서 최적의 성형조건과 runner-gate system을 결정할 수 있다. 자신이 설계한 제품에 어떤 수지를 적용해야 유동성이 적절한지, 미성형이 발생할 소지가 있는지, 사출압력이 지나치게 높지는 않는지, weldline은 어디에 나타나는지, air trap은 어디에 설치하면 좋을 것인지 등에 대해 간이 해석으로 사전에 문제점이 생길 부분을 예측하고 즉각적인 model 수정과 재해석을 통해 성형 상의 문제를 개선할 수 있다.

이렇게 함으로써 제품개발시 빈번하게 발생하는 시행착오를 과학적으로 검증하며, 3차원 형상을 해석에 바로 이용하여 모델변환에 따른 오차가 전혀 없으므로 해석의 정밀도를 더욱 향상시키고, 제품의 품질을 향상시키고, 원가를 절감시킬 수 있다.

Moldflow에서는 'Part Adviser'라는 S/W를 출시하

였고, C-Mold에서는 '3D QuickFill'이라는 S/W를 출시하였다. CAD S/W와 직접 통합되어 작동될 수도 있고, 독립적으로 사용될 수도 있다. 독립적으로 사용될 때는 CAD data를 STL로 변환한 model을 사용한다. 현재 Moldflow만이 CAD S/W와 직접 통합되어 사용가능한데 CAD S/W의 메뉴 중에 'Part Adviser'를 실행하는 명령이 있다. CAD 상에서 model을 불러들이고 실행명령을 내리면 해석이 가능하고 결과도 CAD S/W로 확인할 수 있다. Part Adviser와 직접 통합된 CAD S/W는 AutoDesk사의 Mechanical Desktop, IBM & Dassault Systems사의 CATIA, CoCreate사의 SolidDesigner, Parametric Technology 사의 Pro / Engineer, SolidWorks사의 SolidWorks, Unigraphics Solutions사의 Unigraphics 등이고, 3D QuickFill과 직접 통합된 CAD S/W는 없다.

2.4 Moldflow와 C-Mold의 점도 Model 비교

2.4.1 C-Mold의 점도 모델

C-Mold의 점도모델은 Cross-WLF model이 사용된다. 7개의 상수로 구성된 모델이 온도와 shear rate와 압력을 종속·통합한다. 이 모델은 다음과 같다.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left[- \frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right]$$

$$T^* = D_2 + D_3 p, \quad A_2 = \bar{A}_2 + D_3 p$$

여기서 zero shear viscosity는 WLF 함수형태에 근거한다. D_2 는 저압에서 유리전이온도에 상응하고 D_3 는 T^* 의 선형압력 의존성을 나타낸다.

2.4.2 Moldflow의 점도 모델

Moldflow의 점도 모델은 초기에는 단순히 3점을 이용한 1st order 모델(power law model)이었으나, shear rate에 따른 점도변화를 보다 더 실제와 접근시키기 위해서 2nd order 모델(power law의 변형 모델)로 변경하였다. 또한 액정 고분자의 해석 등에 적용되는 Matrix model이 있다. 그러다가 최근에는 Cross model, Cross-WLF model, Carreau model 등을 적용하여 해석 전에 원하는 점도모델을 선택하여 수치해석을 할 수 있게 하였다. 각 점도 모델의 수식은 아래와 같다.

1st order Model : $\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \exp(cT)$, m, n, c 는 상수

2st order Model : $\ln \eta = m A_1 + A_2 \ln(\dot{\gamma}) + A_3 T + A_4 (\ln(\dot{\gamma}))^2 + A_5 \ln(\dot{\gamma}) T + A_6 T^2$, A_i 는 상수

Matrix Model : 실험에 의한 점도, 온도, 전단변이를 등의 단순한 조합으로 함수 의존성 없음.

$$\text{Cross Model} : \eta = \frac{\eta_0}{1 + \left[1 + \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{(1-n)}},$$

$$\eta_0 = B \exp \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp (\beta P), B, T_0, \beta, \tau^*, n \text{은 상수.}$$

$$\text{Carreau Model} : \eta = \frac{\eta_0}{\left[1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^2 \right]^{\frac{(1-n)}{2}}},$$

$$\eta_0 = B \exp \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp (\beta P), B, T_0, \beta, \tau^*, n \text{은 상수.}$$

$$\text{Cross-WLF Model} : \eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}},$$

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left[- \frac{A_1 (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right]$$

$T^* = D_2 + D_3 p$, $A_2 = \bar{A}_2 + D_3 p$, $D_1, D_2, D_3, A_1, A_2, \tau^*, n$ 은 상수.

2.5 Material D/B

사출성형 과정에서 고분자의 충전형태는 grade에 따라 매우 복잡하고 다양하게 나타나며 완제품의 외관 및 성능에 큰 영향을 미친다. CAE 해석이 제품개발에 잘 적용되기 위해서는 재료의 물성 data가 정확해야 한다. Moldflow와 C-Mold의 물성 data는 표 3과 같다. Moldflow에만 적용되는 것은 shrinkage data 등이며, C-Mold에서만 사용되는 것은 선팽창계수와 shear modulus이다.

국내에서 shrinkage data를 제외하고 Moldflow로부터 물성측정 기술을 공인받은 수지회사는 단 하나이다. 이 회사에서 측정한 물성 data는 D/B 등록 요청시 검증을 거치지 않고 Moldflow material D/B에 등록할 수 있다. 하지만 이 업체도 측정에 필요한 인원을 유지하기가 쉽지 않고, 측정에 시간도 많이 걸리므로 외부의뢰를 사절하는 형편이다. C-Mold로부터 물성측정 기술을 공인받은 곳은 없는 것으로 알고 있다. 현재 Moldflow Material D/B에 총 4,000여 grade의 수지물성이 등록되어 있고, 이중 국내 업체 grade가 120여개 등록되어 있다.

이들 물성 중에서 특히 중요한 점도, PVT, 선팽창계수와 shrinkage data 등에 대해 나타내면 아래와 같다.

2.5.1 점도

C-Mold와 Moldflow의 점도 모델은 각각 2.4.1과 2.4.2에 언급한 바와 같다. C-Mold에서 점도 측정시 사용하고, 추천하는 측정기기는 Rosand RH-7 Dual-Bore Capillary Rheometer이다.

표 3. C-Mold와 Moldflow의 물성 Data 항목 비교

분류	C-Mold	Moldflow
Density	Melt density	Melt density
	Solid density	Solid density
	PVT relationship	PVT relationship
Rheology	Melt flow rate	
	Capillary rheology	Shear Viscosity
	Dynamic viscosity	Extensional Viscosity
	Slit-die rheology	Mold-verification Rheology
Thermal Properties	Specific heat	Specific heat
	Thermal conductivity	Thermal conductivity
	No-flow temperature	No-flow temperature
	Ejection temperature	Ejection temperature
	Coefficient of linear thermal expansion	Shrinkage data
Mechanical Properties	Elastic modulus	Elastic modulus
	Shear modulus	
	Poisson's ratio	Poisson's ratio

초기에 Moldflow에서는 사출기 노즐과 배럴에 압력센서를 장착하여 실제 사출시의 전단변형률 범위 내에서 점도를 측정하여 환산하였다. 측정시 수지의 낭비가 심하여 인장시험기에 장착되는 capillary rheometer를 사용하였는데, 높은 전단변형률에서의 점도를 얻을 수 없고 배럴 내 수지의 온도분포가 불균일하고 배럴과 plunger 사이에서 수지가 새어나오는 단점이 있었다. High Shear Viscometer(HSV)를 사용하면 사출성형 과정의 높은 전단변형률에 대한 수치 특성을 예측할 수 있어서 좋으나 수지의 온도분포가 불균일하고, 측정시 온도 평형을 위해 대기시간을 길게 하면 수지가 분해되는 문제가 발생하였다. 그래서 Moldflow에서는 다시 소형 사출기를 이용하여 수지 사용량을 줄이고 낮은 범위에서 높은 범위의 전단변형률을 측정할 수 있게 하였다. Moldflow에서 추천하는 점도측정기는 특별히 정하지는 않지만 국내에서 유일하고 물성측정 기술을 공인받은 수지업체에서는 Rosand Capillary Rheometer를 사용하고 있다.

2.5.2 PVT

압축성 고분자의 충전·보압 과정을 보다 정확히 계산하기 위해서는 PVT data가 필수적이다. 또한 결정성 수지는 그림 9와 같이 고체-액체 전이온도 거동이 급격하게 차이가 나고, 비결정성 수지는 그림 10과 같이 구간별로 기울기가 다른 1차식으로 표현할 수 있다. C-Mold와 Moldflow의 PVT data의 모델링 수식이 서로 다르다. C-Mold에서는 다음과 같이 비결정성 고분자에 대한 PVT 거동을 수식화하고 결정성 고분자에 대한 거동을 추가하는 방식으로 modified two-domain Tait equation을 사용한다. 특정온도 T , 압력 p , 압력이 0일 때의 부피를 v_0 라고 하면 $v(T, p)$ 는 다음과 같다.

$$v(T, p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_1(T, P)$$

단, $C=0.0894$ (Universal constant)

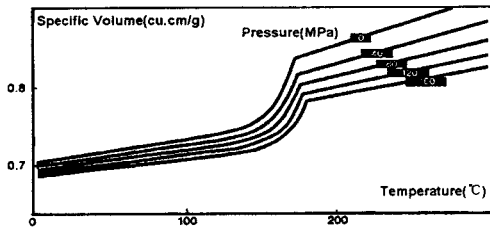


그림 9. 결정성 수지의 PVT diagram.

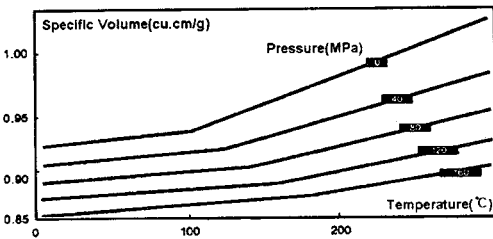


그림 10. 비결정성 수지의 PVT diagram.

if $T > T_{trans}$ $v_0 = b_{1m} + b_{2m}(T - b_5)$, 고분자의 압력 민감도 $B(T) = b_{3m} \exp[-b_{4m}(T - b_5)]$

if $T < T_{trans}$ $v_0 = b_{1m} + b_{1m}(T - b_5)$, 고분자의 압력 민감도 $B(T) = b_{3m} \exp[-b_{4s}(T - b_5)]$

결정화로 인해 부피변화가 심한 경우 T_{trans} 보다 낮은 온도에서는 전이함수가 추가되어야 한다. 그래서 고체영역에서는 다음 식과 같다.

$$v_i(T, p) = b_7 \exp[b_8(T - b_5 + b_9 p)] \quad \text{단, } b_7 = b_{1m} - b_{1s}$$

Moldflow에서는 이와 반대로 결정성 고분자의 PVT 거동을 수식화하고, 비결정성 고분자의 경우 결정성 거동 부분의 상수 a_5 가 0가 되는 방식으로 다음과 같이 계산한다.

$$\text{낮은 온도 영역에서는 } v(T, p) = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + T} + a_5 \exp(a_6 T - a_7 P)$$

$$\text{높은 온도 영역에서는 } v(T, p) = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + T}$$

단, 여기서 v 는 비체적, T 는 온도, p 는 압력, a_i 는 고분자에 따르는 상수이다.

이 두 영역의 경계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p = b_1 + b_2 T$$

C-Mold에서는 GNOMIX사의 PVT apparatus를 사용하고, Moldflow에서도 이 PVT apparatus를 사용하다가 현재 이를 보완한 PVT-100을 사용한다.

2.5.3 Shrinkage Data와 선팽창 계수

C-Mold에서는 성형수축과 변형해석에 PVT와 선팽창 계수가 사용된다. 선팽창 계수는 그림 11과 같이 Quartz tube dilatometer를 사용하여 길이방향과 폭방향으로 측정한다.

Moldflow에서는 각 성형조건을 변화시켜 1,152회로 조합되는 성형조건을 다구찌법을 이용하여 28회로 줄여

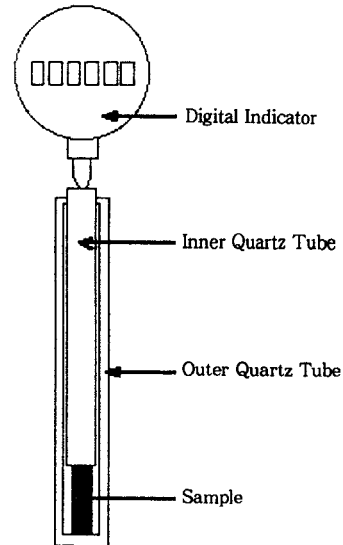


그림 11. The quartz tube dilatometer.

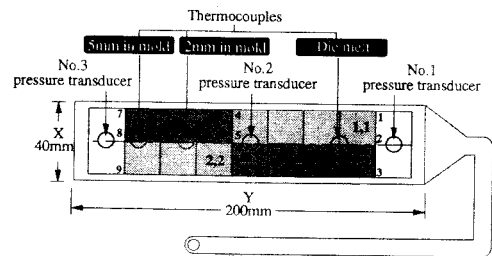


그림 12. Shrinkage data 측정용 시편과 측정위치.

서 사출한 shrinkage 측정용 시편(그림 12)을 2일 이상 열처리시킨 후 시편에 표시된 9개 점의 좌표를 측정함으로써 이들 사이의 종횡 각각 6개의 수축량을 계산하여 data를 얻는다.

이상과 같이 shrinkage data를 얻기 위해 사출·열처리·좌표측정이란 복잡한 과정을 거친다. 이러다 보니 국내의 수지회사에서 이 data를 측정하여 D/B에 입력하기에는 인력·시간·장비의 부족으로 포기하게 된다.

2.6 CAE 결과의 실제 사출성형 적용시 정확성을 저해하는 요소

2.6.1 Modeling

현재의 shell surface 모델로는 실제 형상을 정확하게 표현하기가 어렵다. 따라서 기하학적인 측면에서 제품과 모델간의 오차들이 해석결과에 영향을 미칠 수 있다. 이를 개선하기 위한 방법으로는 현재 주로 사용되고 있는 shell mesh가 아니라 volume mesh를 이용해야 한다. 그러나 대부분의 3차원 solid CAD S/W가 volume mesh를 만들어내지 못한다.

현재로는 구조해석 S/W인 PATRAN에서 3차원 volume mesh가 가능하지만 mesh 설계에 많은 시간을 요한다. 현재 Moldflow에서 진행되는 project 중에 3차원 volume mesh를 이용한 성형해석이 있다. 모든 제품을 3차원 volume mesh로 해석을 하면 정확도는 향상되겠지만, 계산속도가 떨어지는 단점이 있다. 그래서 두껍거나 복잡한 부분은 3차원 volume mesh를 적용하고 두께가 비교적 얇고 형상이 간단한 부분은 해석시간이 짧은 shell mesh를 사용하는 hybrid model에 대한 연구도 진행 중이다.

2.6.2 Material Data

현재의 각종 물성 data의 측정방법은 아직도 많은 오차를 갖고 있다. 고분자의 점탄성적인 특징 중 점성만을 고려 대상으로 삼고 탄성영역은 고려하지 않았으므로 탄성에 의한 오차가 있다. 온도에 따라 비열 및 열전도도가 달라지는데 이들 물성을 측정온도 구간의 평균값으로 계산하는 것에 따른 오차도 있고, 결정화 속도 및 결정화도의 영향이 제대로 고려되지 않으므로 해서 생기는 오차도 있다. 고분자가 수분을 함유했을 때에 물성변화가 일어나는데 이에 대한 고려가 되지 않았다. 또 금형 내에서 고분자는 급냉을 하는데, 저속 냉각으로 실험한 PVT 결과를 급냉한 사출성형 공정해석에 적용하는 것도 문제이다. 이를 개선하기 위해서는 단지 측정설비나 기술만 개선되어서는 실제와 맞다고 말할 수 없다. 이를 뒷받침하고 해석 S/W에 적용 가능한 이론도 함께 개발되어야 한다.

2.6.3 해석의 한계

현재의 성형해석 S/W는 다층별로 온도와 점도 차이에 따라 weldline이 생길 수 있는 부위를 예측할 수는 있다. 그러나 점탄성 거동을 하는 고분자의 흐름 특성에 따른 jetting과, 용융수지의 속도와 수분·가스에 의해 일어나는 silver streak, cloudy surface 등의 여러가지 표면 불량을 예측하지 못한다.

3. 결 론

국내에서 사출성형 분야에 CAE 도입이 된지 벌써 12년이 지났다. 짧은 시간에 급속한 신장세를 보였고 특히 최근 2~3년 사이에 많이 늘어났다. 이는 특히 간이 유동해석 CAE S/W 때문이다. CAE보다 CAD의 보유수가 많기 때문에 이를 위한 설계지원 tool은 당연히 호응이 좋다.

사출성형 분야의 CAE가 이렇게 발전할 수 있었던 큰

이유는 국내 사출성형 분야가 낮은 기술 수준 상태에서 급속히 높은 수준으로 올라왔기 때문이다. 하지만 국내 대부분의 사출업체나 금형개발 분야 종사자들이 함께 기술수준이 향상된 것은 아니라고 본다. 아직도 손으로 그려도 될 정도의 도면제도 작업에만 CAD S/W를 사용하는 사례가 많기 때문이다. 그래서 이 분야는 앞으로도 발전할 여지가 많다고 볼 수 있다.

또한 차세대 제품개발 processing인 동시공학도 아직은 시작단계라고 보아도 무방하다. CAD S/W와 CAE S/W간의 data interface 문제가 걸림돌이 될 수도 있고, 설계 부문과 생산 부문의 이중 S/W로 인한 data interface 문제도 발전을 저해하는 요소가 된다. 이런 문제점들을 보완해가면서 상호 협력을 통한 기술개발을 추구하다 보면 동시공학을 자연스럽게 적용할 수 있을 것이라고 기대한다.

참 고 문 헌

1. *Plastic Technology*, **43**, No. 11, 10 (1998).
2. *Plastic Technology*, **43**, No. 11, 27 (1998).
3. *Plastic Technology*, **44**, No. 1, 32 (1998).
4. *Plastic Technology*, **44**, No. 1, 40 (1998).
5. *Plastic Technology*, **44**, No. 3, 17 (1998).
6. *Plastic Technology*, **44**, No. 3, 31 (1998).
7. *Modern Plastic*, **27**, No. 11, 29 (1998).
8. Y. Y. Nie, L. S. Turnge, and K. K. Wang, *Advances in Polymer Technology*, 31, Fall (1997).
9. S. Y. Yang, S. J. Liou, and W. N. Liou, *Advances in Polymer Technology*, 31, Fall (1997).
10. '95 Moldflow Korea User Symposium, Sep. (1995).
11. '96 Moldflow Korea User Symposium, Oct. (1996).
12. '97 Moldflow Korea User Symposium, Oct. (1997).
13. Moldflow Data Theory, Aug. (1992).
14. 前川佳徳, 플라스틱 성형기술, **85**, 60, Apr. (1996).
15. 鷲塚修, 플라스틱 성형기술, **85**, 67, Apr. (1996).
16. 石島 守, 山部 昌, 플라스틱 성형기술, **85**, 71, Apr. (1996).
17. 中田公明, 小早川益律, 東 啓二, 플라스틱 성형기술, **85**, 81, Apr. (1996).
18. 泉田敏明, 플라스틱 성형기술, **89**, 73, Aug. (1996).
19. 飯田勇夫, 플라스틱 성형기술, **89**, 81, Aug. (1996).
20. 木元英俊, 플라스틱 성형기술, **89**, 86, Aug. (1996).
21. 加藤和典, 安原鋭辛, 플라스틱 성형기술, **104**, 104, Nov. (1996).
22. 片岡紘, 플라스틱 성형기술, **104**, 120, Nov. (1996).
23. 河野憲治, 플라스틱 성형기술, **105**, 122, Dec. (1996).
24. 館山弘文, 플라스틱 성형기술, **105**, 146, Dec. (1996).
25. 成澤郁夫, 數面則義, 플라스틱 성형기술, **105**, 159, Dec. (1996).
26. Peter Kennedy, "Flow Analysis Reference Manual", Moldflow Pty. Ltd., 1993.