

# 사출성형산업의 CAE 응용

최 철 주

삼성종합기술원 그룹 CAE 센터



●1959년생  
●플라스틱 제품과 관련된 CAE 적용을 통한 제품과 공정의 최적화에 관심을 가지고 있다.

이 호 관

삼성종합기술원 그룹 CAE 센터



●1962년생  
●플라스틱 제품과 관련된 CAE의 활용을 통하여 제품설계 및 생산 현장의 적용에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리 말

최근 산업전반에서 플라스틱의 사용량이 급증하면서 그 용도도 가정용 기구에서 항공등의 첨단산업분야에까지 다양해지고 있다. 그에 따라, 플라스틱은 그 종류의 다양화와 계열화를 형성하였으며, 산업의 제품화에 박차를 가하고 있다. 이러한 관점에서 각 제품군별로 사출성형의 과학적 접근이라는 명제 아래 컴퓨터 이용공학 CAE(computer aided engineering)에 대한 관심이 집중되고 있다.

CAE의 활용으로 제품개발에 대한 설계효율을 극대화 시키고 원가절감과 개발기간의 단축, 고품질 제품 확보 및 제품개발에 대한 실패율을 극소화 시킬 수 있다. 특히, 첨단산업분야와 신기술제품개발에 CAE를 적극 활용함으로써, 선진기술과의 차를 감소시키고, 차후 개발되는 제품에 대한 설계 지침을 확보할 수 있다.

사출성형에서의 금형개발은 매우 중요한 비중을 차지하고 있는데, 최근 금형은 대형화와 고가격화의 추세를 보이고 있다. 이에 따라서,

금형개발에 대한 성공여부가 제품개발의 승패를 결정하는 요소가 되었으며 이에 대한 기술축적이 첨예화되고 있다. 본 글에서는, 사출성형해석용 소프트웨어를 이용하여 에어콘그릴의 유동해석과 냉각해석을 실시하고, 이 결과에서 구조해석용 소프트웨어를 이용하여 금형온도차에 의한 휨 현상을 분석한 결과와 실제 적용된 결과의 사례를 소개코자 한다. 본 사례는 해석과 실제생산 현장과의 접목성을 고려하여 실시되었으며, 해석시 생산현장의 환경을 최대한 반영하였으며, 이를 기준으로 해석을 수행하였다.

## 2. 해석과 각종 환경의 개요

### 2.1 업무 방향의 정의

해석의 경우는 크게 3가지 부류로 구분할 수 있으며, 실제 사출작업의 과정과 밀접한 관계를 가지고 있다. 사출유동과 관계되는 유동해석, 사출냉각과 관계되는 냉각해석, 금형의 국부적 온도차에 의해 발생하는 휨양을 분석하는 열응력 해석을 실시하였다. 본 해석에서 특이한 사항은 냉각해석의 결과와 구조해석간의 연

결을 위하여 연결 프로그램(interface program)을 개발 한 것이다.

효과를 기준으로 한 해석의 방향은 사용플라스틱의 변경, 피이드시스템(feed system)의 재료 절감, 사출공정의 시간단축을 통한 생산성 향상, 사출기기 변경을 통한 효율화 달성과 시 사출감소를 통한 금형개발기간의 단축등을 주 고려사항으로 진행하였다.

### 2.2 생산 현장 환경

사출성형의 주요환경은 사출기기와 냉각기 구분할 수 있다. 다음의 표 1과 표 2는 이에 대해 각각 도시한 것이다. 사출기기의 용량은 금형의 기계면적을 고려한 형체력에 의해 결정된다. 표 1과 같이 사출기기의 각종사양을 확보 함으로써 해석의 기준을 설정하고 이에 대한 적응력과 목표를 설정할 수 있다. 표 2의 냉각기의 사양은 냉각해석에서 해석에 대한 중요한 기준표가 된다.

표 1 사출기기의 각종사양

| 구 분      | 단 위      | 1 호   | 2 호   | 3 호   |
|----------|----------|-------|-------|-------|
| 모 델 명    |          | K6601 | K4501 | K3651 |
| 나사직경     | mm       | 110   | 95    | 80    |
| 사출압력     | kg/cm.cm | 1800  | 1800  | 1800  |
| 사출중량     | Oz       | 120   | 80    | 50    |
| 항 체 력    | ton      | 660   | 480   | 365   |
| 형체stroke | mm       | 1850  | 1590  | 1365  |
| 전기용량     | kW       | 129.1 | 101.5 | 73.7  |

표 2 냉각기의 각종사양

| 구 분      | 단 위       | 내 역    |
|----------|-----------|--------|
| 압축기정력출력  | kW        | 3.75   |
| 순환기펌프용량  | kW        | 0.4    |
| 최대 토출 량  | l/min     | 42     |
| 최대 토출 압력 | kg/cm.cm  | 1~2    |
| 탱 크 용 량  | l         | 140    |
| 냉 각 능 력  | kcal/hour | 9840   |
| 사용 온도 범위 | Deg.c     | -15~30 |

## 3. 유동해석

### 3.1 물성치

수지의 거동은 점성과 탄성의 성질을 동시에 갖는 점탄성물질이라고 할 수 있다. 점성재료의 유동형태에는 여러 가지가 있으나, 그 중에서 사출 유동의 거동은 PSEUDO 플라스틱과 유사한 전단시닝(shear thinning)의 개념으로 설명된다. 이는 작은 단면유로에 높은 전단률(shear rate)의 형태를 나타내는 것으로서, 그림 1과 같다. 점성(viscosity)에 대한 계산은 식 (1)과 같이 압력 효과를 고려하지 않는 power-law model을 사용한다.

A는 점성계수(viscosity index)이고, B는 전단시닝인자(shear thinning factor), C는 온도 감수성(temperature sensitivity),  $\dot{\gamma}$ 는 전단률(shear rate)이다.

$$h = A (\dot{\gamma})^B e^{CT} \quad (1)$$

본 해석에서 사용된 수지는 기존에서 사용되던 ABS 대신 이보다 가격이 싼 수지로 변경하였으며 이에 대한 수지의 물성은 표 3과 같다.

본 해석 실시 이전에 사용되던 재료는 ABS로서, 변경된 수지보다 가격이 훨씬 비싸다 (ABS=1300원/kg, 해석 수지=800원/kg). ABS 보다 광택도는 다소 떨어지지만 유동성에 크게 차이가 나지 않고 가격이 훨씬 싼 장점을 소유하고 있는 재료로 변경하여 추진하였다.

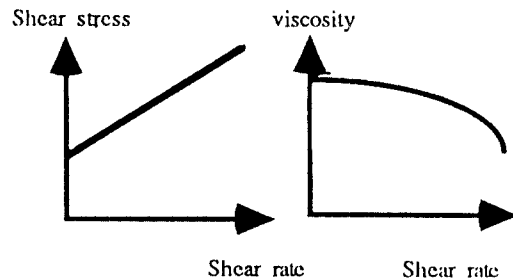


그림 1 수지유동에서 거동형태

표 3 플라스틱 수지의 물성치

|               |                     |           |
|---------------|---------------------|-----------|
| Conductivity  | 0.112 J/m.deg.c.sec |           |
| Specific Heat | 1771 J/kg.deg.c     |           |
| Density       | 901 kg/cu.m         |           |
| Freeze Temp   | 98                  | Deg.c     |
| No-Flow Temp  | 140                 | Deg.c     |
| Viscosity     |                     |           |
| Temp          | Shear Rrte          | Viscosity |
| 200           | 1000.               | 180.7     |
| 220           | 100.0               | 575.3     |
| 220           | 1000.               | 128.7     |
| 220           | 10000               | 25.96     |
| 240           | 100.0               | 445.8     |
| 240           | 1000.               | 101.4     |

3.2 게이트와 피이드 시스템(Feed System)

CAE을 활용하지 않고 제작하던 기존개발금형의 시행착오적(try and error) 방식은 게이트 수의 증가로 인하여 제품으로 사용하지 않는 부분의 재료소비가 심하였다. 유동양상을 검사하고 난후 게이트 위치를 최적화하고, 게

이트를 최소화 함으로써 피이드시스템으로 인한 재료의 질감을 획득할 수 있다. 제품 구조의 특성으로 인하여 게이트 위치가 편중되어 있을 경우에는 런너균형(runner balance)의 기법을 이용하여 복수런너(multi runner)의 단면 조정으로 균형을 맞춘다.

본 에어콘그릴의 제품은 기존의 시행착오적 방식일 때 게이트 수가 15~20개 였으나, 본 해석에서는 6개의 게이트시스템을 채용하여 런너균형을 형성시켰다. 해석에서 채용된 게이트 시스템은 사이드게이트(side gate)와 서브아린 게이트(sub-marine gate)을 적절히 조합하였다(그림 1 참조).

3.3 제품 설계 사양의 변경

에어콘그릴은 구조적으로 중앙부에 많은 그릴을 보유하고 있으며 많은 유동형상의 변화로 인하여 불규칙한 웰드라인(weld-line)과 미성형을 발생하기 쉽다. 이에 대한 불량률의 대책으로 단일한 유동형상의 형성과 균일한 충전압력의 구배를 달성하기 위하여 초기 제품설계에 대한 사양을 변경하였다(그림 2 참조). 초기

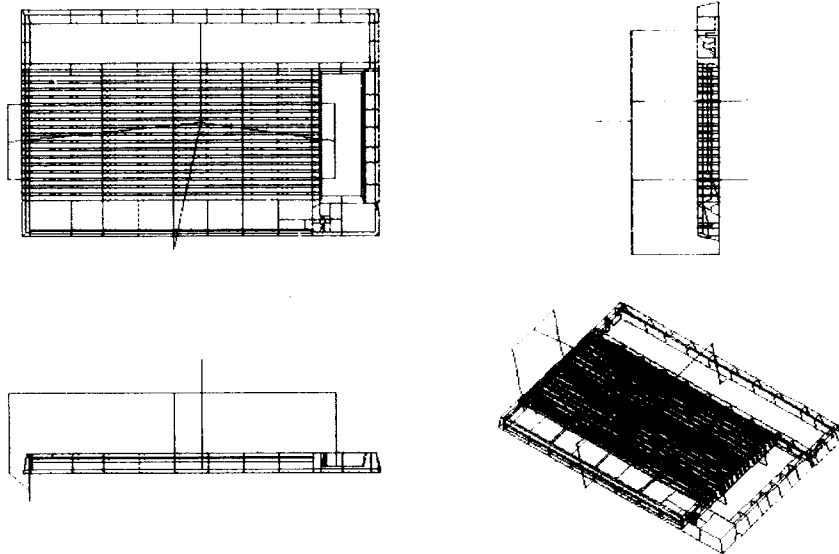


그림 2 에어콘 그릴의 3차원 형상 모델링

제품 설계의 기본두께는 3 mm 였으나, 웰드라인의 위치제어와 전단스트레스를 고려하여 국부적인 두께변경 및 설계사양을 변경하였다.

### 3.4 3차원 유동해석

유동해석은 구속방정식과 제품의 형상을 이용하여 주어진 경계조건과 수지의 물성을 이용하여 지배방정식의 미지수를 푼다. 이 때, 수지의 비압축성효과와 두께 방향에 대한 속도 및 압력이 미소하다고 가정하고 무시하며, 평면방향의 전단응력도 두께방향에 대하여 지극히 작다고 가정하였다. 또한 관성력은 점성력에 비하여 미소하므로 무시한다. 유동해석시 사용되는 유동방정식은 식 (2)와 식 (3)은 같고, 에너지방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$0 = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (3)$$

$$\text{B.C. : } u = v = 0 \quad z = \pm b$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad z = 0$$

$$\eta = f(\text{shear-rate, } P, T)$$

$$\begin{aligned} \text{shear-rate} &= \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}^{1/2} \\ \text{Density} \times C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] \\ &= k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta (\bar{\gamma})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

에어콘그릴의 3차원유동해석은 금형온도 30°, 사출온도 245°, 사출시간 6.1초이며 사출압력은 79 MPa의 결과를 얻었다. 또한 클램프력(clamp force)는 300 ton. 유동과정에서의 전단률(shear rate)에 의한 최대 응력은 0.38 MPa이다. 유동이 완료된상태에서의 최대온도는 276°이고, 최소온도는 205°이며, 그림 3은 사출시간에 대한 충전결과를 나타낸 것이다. 결과는 각시간별에 대한 isochrone으로 나타나 있으며 웰드라인의 위치를 확인할 수 있다.

## 4. 냉각해석

### 4.1 냉각과 열전달

냉각해석의 열전달관계는 제품의 열량과 냉각선의 관계를 주로 이용하여 그 해를 구한다.

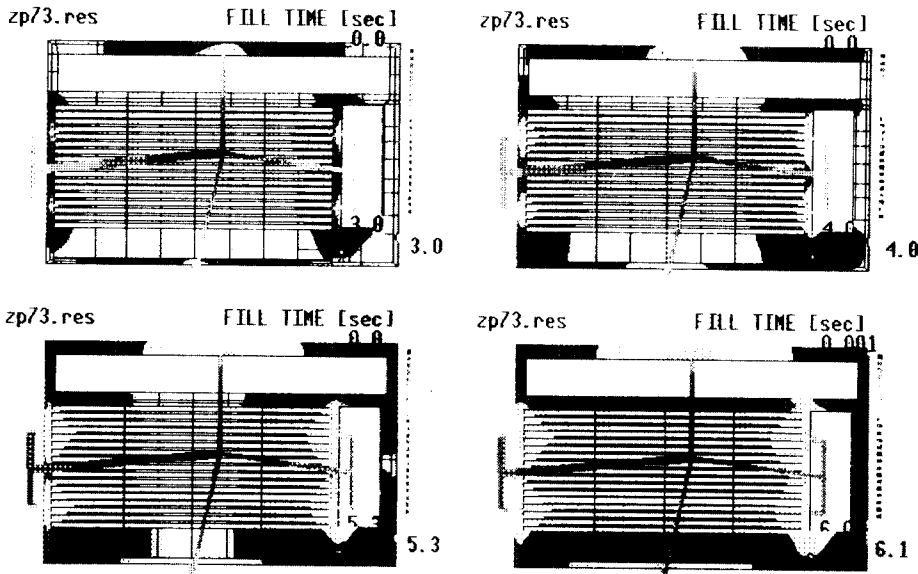


그림 3 수지충진에 대한 시간별 결과

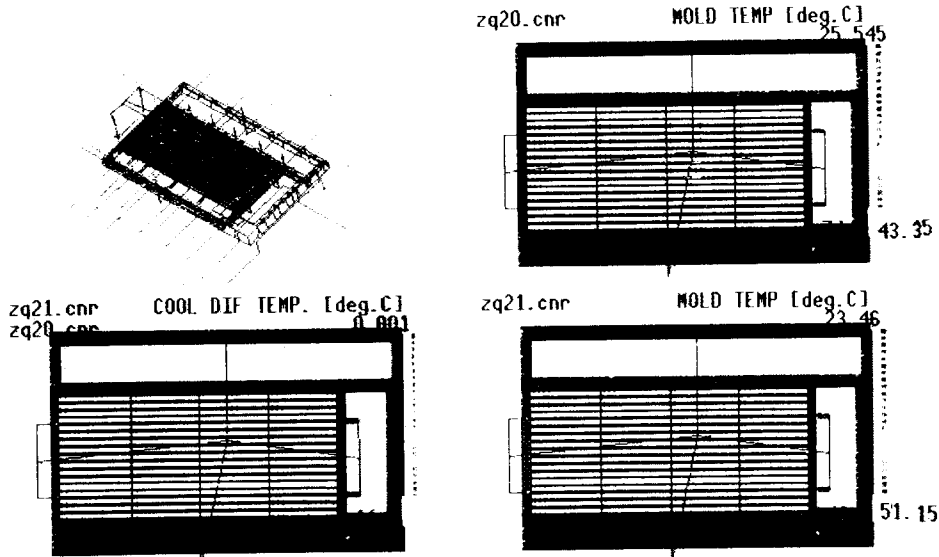


그림 4 냉각선의 형상과 냉각해석 결과에 의한 온도분포

사출제품에 대한 열전달관계는 식 (5)와 같은 전도방정식을 이용하고, 냉각선내의 냉각수의 열전달관계는 식 (6)과 같은 대류방정식을 이용한다. 금형표면의 대한 복사에너지는 금형의 온도가 85°가 이상일 경우에만 적용을 하여 계산을 한다.

$$\text{Density} \times C_p \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dz^2} \quad (5)$$

$$Q = h(T_w - T_b) \quad (6)$$

계산시 금형내의 시간에 대한 사항은 고려하지 않고 3차원적인 문제를 열전달 매개저항을 이용하여 1차원으로 단순화시켜 계산한다. 또한, 금형내 수평적인 관계의 열전달은 고려하지 않음으로 인해서 발생한 오차는, 전체에 대하여 미소함으로 무시할 수 있다. 계산에서는 유동 해석 결과에서 제품의 온도를 이용하여 냉각수와와의 반복해법을 실시하여 최종적인 해를 구한다.

#### 4.2 에어콘그릴의 냉각해석

에어콘그릴의 금형구조는 3단금형의 구조를 채택하였으며, 냉각해석에서는 상원판과 하원판에 대해서 각각 계산을 수행한다. 해석시 사

출금형내의 냉각선 뿐만이 아니라 금형과 냉각 펌프간의 공장환경도 고려하여 해석을 실시하였다. 해석의 주된 목표는 냉각시간의 감소와 고정적인 금형 온도를 달성하는 방향으로 설정하였다. 해석의 과정은 금형의 구조적 제약사항 이젝터핀의 위치, 슬라이드코어를 고려하여 초기 냉각선을 모델링하고 이에 대한 해석결과와 분석을 통하여 효율적인 최종냉각선을 결정하였다. 해석의 결과에서 전체적으로 효율적인 냉각에 의하여 온도차 10° 미만의 균일한 온도 분포를 획득할 수 있었다.

그림 4는 상원판과 하원판의 온도차에 대한 결과를 나타낸 것으로서, 온도차가 심할 경우에는 사출 후 제품의 휨으로 불량이나 나타난다. 본 결과는 상당히 양호한 현상을 보이고 있으며, 온도차에 의한 휨의 영향은 휨 해석에서 상세히 고찰하기로 한다.

### 5. 사출제품과 휨해석

#### 5.1 휨의 고찰

기존의 상품화된 사출성형해석용 소프트웨어

는 보압과정과 수축 및 휨에 대해서 해석을 실시하지 못하였다. 첨단산업에서 플라스틱의 적용이 활발해지면서 이에 대한 필요성과 잔류응력에 대한 해석의 요구가 증가하게 되었다. 4~5년 전부터 정립된 이론을 이용하여 활발한 연구와 관심으로 최근에는 이에 대한 상품화가 완료되었다. 상품화된 소프트웨어마다 방법적인 면에서 다소간의 차이는 있지만, 기존의 사출성형용 소프트웨어에 보압해석에 대한 기능을 첨가하고 수지의 상변화에 대한 수축량을 계산하여 구조해석용 소프트웨어와 접목하여 휨의 양상을 분석하도록 되어 있다. 특이한 사항은 휨에 대한 기능이 첨가되면서 기존의 유동 및 냉각의 해석방법들이 더욱더 세밀하고 정확하게 변하였다. 사출제품에 대해 단면의 층을 구분하여 프로즌층(frozen layer)에 대한 효과를 고려할 수 있게 되었고, 수지유동의 방향성고려, 보압에 대한 PVT 데이터 사용, 냉각에서 금형내 열전달의 층구분등이 대표적인 예이다. 이에 따라 해석의 신뢰도는 증가하였으나 방대한 해석수행으로 하드웨어 기억용량의 대형화와 더 많은 해석시간의 요구로 인하여, 개발시간이 점차적으로 단축되어지는 산업체에서는 적용에 있어서 다소간의 어려움이 예상되고 있다.

## 5.2 휨현상의 이해

휨의 근본적인 원인은 수축차에 의해서 발생한다. 제품 측면에서의 주된 수축차 요인은 다음과 같다.

첫째로, 수지유동방향에 따라 수직방향과 수평방향의 수축량이 다르다.

둘째로, 복합적인 요인에 의한 국부적인 수축량의 차가 발생한다.

사출후 제품의 휨양상을 예측하는 데 사출조건은 중요한 요소가 된다. 휨해석을 위한 사출조건의 고려에 있어서 중요한 사항은 크게 네 가지 이다.

첫째로, 잔류응고층의 전단응력과 냉각속도 및 유동각(flow angle)에 의한 수지 방향성 효과.

둘째로, 수지의 결정화(crystallisation) 효과 셋째로, 보압해석과정에서 수지의 PVT 데이터를 이용하여 계산되어지는 체적감소

네째로, 수지의 수축하려는 현상에 대한 금형의 구조적 조건에 의한 잔류응력의 몰드억제(mold restraint) 효과

휨을 발생시키는 원인의 변수는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 휨의 양상은 세 가지 요인이 복합적으로 형성되어 제품에 나타난다.

첫째로, 제품 국부의 두께 및 단면형상의 차에 의한 면적 수축차

둘째로, 제품부위별의 수지유동 방향성의 효과.

셋째로, 냉각에 의한 제품부위별 온도차

상기 언급된 각종 요인들에 의해서 사출품의 멤브레인 응력등급(membrane stress level)이 너무 높게 되면 제품은 좌굴현상을 일으키게 되고, 이는 물리적으로 멤브레인 응력에너지(membrane stress energy)가 굽힘응력 에너지(bending strain energy)로 바뀌어서 발생하게 된다.

대체적으로 사출제품의 두께는 얇고 굽힘강성보다 멤브레인(membrain) 강성이 큰 양상을 보이는데, 예를들어 굽힘 강성이 너무 작을 경우의 좌굴은 대변형을 일으키게 된다. 이 경우에는 비선형해석에 대한 분석이 요구되고 이 결과가 최종적인 휨이 되는 것이다.

## 5.3 에어크그릴의 온도차 휨해석

앞에서 언급한 바와 같이 휨을 일으키는 주된 원인에는 여러 가지 요인이 있으나, 본 해석에서는 온도차에 의한 원인만을 고려하여 열응력 해석을 유도 하였다.

사출형성용 소프트웨어에서의 제품형상과 냉각 해석의 온도결과를 구조해석용 소프트웨어에 접목하여 열변형해석을 실시하였으며, 이 때 두가지 소프트웨어의 접목을 위하여 C언어로 연결프로그램(interface program)을 개발하였다. 제품의 요소는 삼각요소의 데이터를 전송하고 온도하중은 냉각해석의 금형온도결과를 전송하였다.

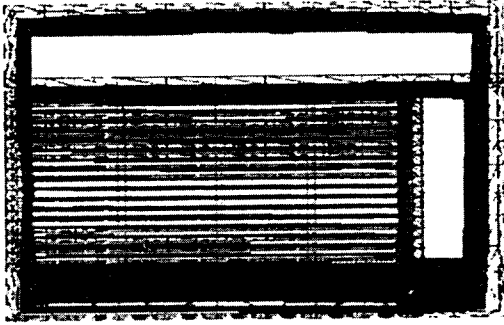


그림 5 온도차에 의한 사출후의 휨해석 결과

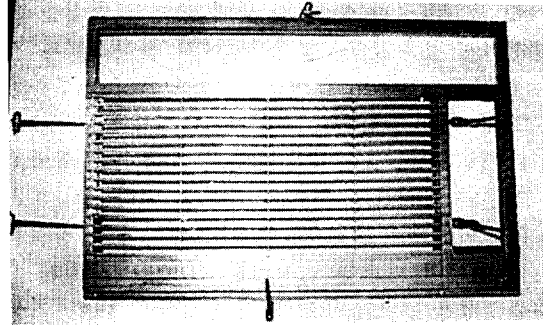


그림 6 실제 사출된 제품의 형상

해석의 수식전개상 가정은 요소단면의 전단 변형을 무시하였고 전체 변형을 작은변위 (small displacement)로 가정하였다. 제품의 곡면 형상은 세분된 평면으로 표현하였으며, 온도하중은 제품의 두께방향에 대한 온도변화와 평면에 대한 온도변화를 적용하여 각절점에 하중을 적용하였다.

에어콘그릴의 열변형해석을 실시한 결과는 그림 5와 같고, 실제수치보다 확대하여 도시하였다. 결과에서 알 수 있듯이 온도에 의한 변형량은 제품 전체 크기에 비하여 무시할 수 있을 정도로 미소함을 확인할 수 있다. 휨에 대한 관계도 다른 부품과의 형합성에서 양호한 상태이다.

## 6. 금형 적용 결과

### 6.1 적용 결과 분석

이상 언급한 해석의 결과를 실제 금형에 적용하여 가공을 실시하였고, 이에 대한 시사출을 실시하였다. 1차 시사출에서 미려한 외관의 고품질의 제품을 확보하였고, 이는 기존의 금형 개발시에 발생하는 4~5회 걸친 금형수정과 시사출작업등을 비교하였을 때 많은 원가의 절감을 획득할 수 있었다. 온도차에 의한 휨해석 결과와 비교하였을 때, 해석의 결과와 실제 제품 사이에서 변형량이 수치적으로 미소한 차이를 발생했것 외에는 거의 유사하였다.

그림 6은 실제 사출된 제품을 촬영한 것이

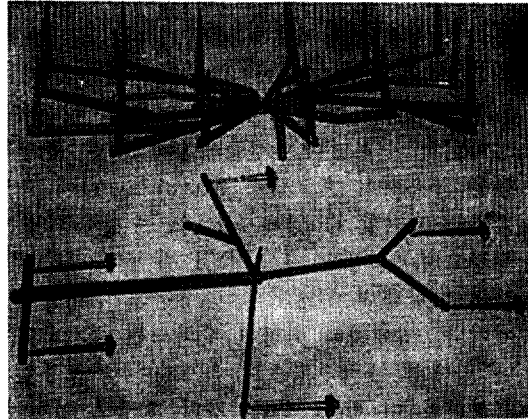


그림 7 기존대비 개발 피이드 시스템의 비교  
상측: 기존 방식에 의한 피이드 시스템  
하측: 해석에 의해 개발된 피이드 시스템

고, 그림 7은 해석을 실시 하기전에 개발된 금형의 피이드 시스템과 해석에 의해서 적용된 피이드시스템을 비교한 것이다. 사진에서, 기존보다 피이드시스템 체적이 많이 축소되었음을 알 수 있다.

### 6.2 효과 고찰

에어콘 그릴에 CAE를 적용함으로써, 초기 제품은 개발기간은 다소 증가하였으나 1회에 걸친 제품개발 완성으로 전체 개발일정은 단축되었다. 기존에 사용되던 ABS 대신 싼 수지로 재료를 변경하였으며, 사출공정의 단축으로 생산성을 향상시켰다. 최적 피이드 시스템의 산출로 재료의 절감을 획득할 수 있었다. 이에 대한 효과로는 표 4와 같다.

표 4 원가절감 요약표 단위:천원

| 구 분     | 해석전    | 해석후    | 효 과     |
|---------|--------|--------|---------|
| 수 지 변 경 | 77,350 | 47,600 | 29,750  |
| 재 료 절 감 | 31,200 | 7,600  | 23,600  |
| 공 정 단 축 | 26,890 | 9,430  | 17,460  |
| 사 출 기 기 |        |        | 2,230   |
| 금형비절감   | 15,000 | 0      | 15,000  |
| 기 회 비 용 | 5,000  | 0      | 5,000   |
| 경 비 절 감 |        |        | 93,040  |
| 물 량 증 가 |        |        | 140,000 |

### 7. 맺 음 말

이상에서 사출성형산업의 CAE 활용을 에어 큰그릴의 사례를 중심으로 고찰하였다. 기술 개발과 기술 축적이라는 거대한 명제하에서 CAE의 응용은 점점 더 크게 느껴지고 있다.

그러나, 위에서 언급된 강점에도 불구하고, CAE의 실제 산업 적용에는 넘어야 할 문제가 산적해 있다.

첫째로, 초기시설투자의 비용이 많이 든다는 것이다. 빠른 해석결과와 확보를 위하여 CAE 전용 하드웨어와 고가격의 소프트웨어, 숙련된 CAE 고급전문인력등이 필요하다. 국내 금형 산업의 영세성을 감안할 때 돈과 인력이 모두 문제이다.

둘째로, 제품개발 단계에서 CAE를 적용할 때, 초기개발일정이 지연될 수 있다. 이 부분은 주로 국내 대기업이 해당되는 사항으로서, 제품개발 주기는 전세계적으로 단축되는 데 비해, 초기 CAE 적용시에는 누구나 경험하게 될 시행착오로 인하여 일정의 지연이 발생할 수 있다. 그러나, 이 부분에 있어서는 각 기업의 환경에 맞는 해석의 기법이 정착화되고 데이터베이스화 될 경우 단기간내에 해결될 수 있다.

셋째로, 기술적인 사항으로서, 상품화된 사출성형 소프트웨어 여러 산업분야의 공용성을 고려하여 개발되어 있다. CAE의 활용을 극대화하기 위해서는 각 산업별 기업별 공장환경별

의 특성에 맞는 활용방안을 구체적으로 확보해야 한다는 것이다. 이 문제는 각 경우마다 방안을 체계화 하여야 하고 전문부서에서 전문적으로 수행할 경우 비교적 쉽게 해결 될 수 있다. 그외, 실제 과제를 수행할 경우 CAE를 위한 2차원 데이터의 3차원 데이터 변경방법 또는 재모델링의 기간 소요, 차기 제품개발에 대한 해석결과와 활용방안등 문제점도 산적해 있다.

그러나, 선진첨단산업구조를 고찰해보면 CAE의 응용은 거의 필연적으로 강조되고 있으며, 국내외적인 원가상승의 압박과 기술력의 축적, 신제품 개발등의 난안을 비교적 단기간 내에 해결하기 위해서는 CAE 응용의 정착화가 시급하다.

### 참 고 문 헌

- (1) John, D. Ferry., 1980, "Viscoelastic Properties of Polymers," Ch1, Ch2, John Wilcy and Sons, Inc.
- (2) Frank, M. White., 1974, "Viscous Fluid Flow," McGraw-Hill Book Company
- (3) Brydson, J.A., 1970, "Flow Properties of Polymer Melts," Ch1, Ch2, Ch5, Published for the Plastics Institute.
- (4) Reddy, J.N., 1985, "An Introduction to the Finite Element Method," Mc-Graw Hill Book Company.
- (5) Friedl, C. and Austin C., 1983, "Melt Compressibility and Expansivity in Mold Filling Simulation."
- (6) McCaffrey, N.J. and Friedl, C., 1988, "Prediction of Crystallisation During Injection Molding Simulation."
- (7) Colin, Austin., 1984, "Moldflow Design Philosophy."
- (8) Wang, K.K., 1988, "Intergration of DAD/CAM for Injection-Molded Plastic Parts," Progress Report No. 14.
- (9) Wang, K.K. and Shen, S.F., 1975~1986, "Computer-Aided Injection Molding System." Progress Report No. 2~14.
- (10) Holman, J.P., 1986, "Heat Transfer," McGraw-Hill Book Company.