

# 가전제품의 제조와 관련된 열공학 문제



●1955년생.  
●연소공학을 전공하였으며, 유체역학의 전산해석을 통한 응용에 관심을 가지고 있다.

**이 형 인**

삼성종합기술원 그룹CAE센터



●1960년생.  
●소성가공을 전공하였으며, 비선형구조해석의 응용과 관심을 가지고 있다.

**정 완 진**

삼성종합기술원 그룹CAE센터



●1964년생.  
●전산유체역학을 전공하였으며, 제조공정에서의 열전달해석에 관심을 가지고 있다.

**신 승 주**

삼성종합기술원 그룹CAE센터

## 1. 머리말

이 글에서는 가전제품의 제조과정에서 발생하는 열공학적 문제를 고려하여, 현장의 문제를 다룰 때에 필요한 기술들의 상호관계를 살피고 연구방향을 바르게 설정하는 데에 기여하고자 한다. 여기에서는, 열공학문제를 열전달현상과 이에 관련된 각종 물성치의 확보가 매우 중요하다는 측면에서 다루기로 한다. 이를 위하여 냉장고, VTR(video-tape recorder), TV 등 특정제품들의 제조과정의 일부를 예로 들었다. 반도체의 제조과정에 큰 영향을 받는 소자(chip)의 열응력문제도 그밖의 몇 가지 사례와 아울러 간단히 언급하기로 한다. 플라스틱의 사출성형에 의한 생산공정도 매우 중요한 응용분야인데 다른 여러 문헌에서 언급되었으므로 이 글에서는 생략한다.

산업체의 활동은 대부분이 전체적인 시스템에 관한 문제로 귀착되는데, 굳이 분류한 열공학분야도 예외는 아니어서 여러가지 인접분야와 긴밀하게 연관된다. 위에서 들은 사례에서의 제조과정에서는, 공통적으로 가열과정과 부수적인 단열과 냉각과정 등이 일어난다. 그림 1은 몇 가지 가전제품의 기계적 품질을 결정짓는 요인들을 몇 가지 단계별로 보이고 있다. 재료의 성형을 위하여는, 금형이나 도가니 등

의 틀을 사용한다. 이러한 틀을 가열, 냉각, 단열하는 기술이 최종 제품의 품질에 직접 또는 간접적으로 관여한다. 열전달의 전도와 대류과정이 함께 일어나는 연계된 문제(conjugate heat transfer)는 일상적으로 일어나며, 흔히 복사열전달도 동반한다. 구조물 내부의 열응력이 클 경우에는 제품의 변형이 과다하여, 제품의 치수가 원래의 설계사양에서 벗어나서 불량품이 될 수도 있다. 또한, 전자기적인 제품의 재질은 구조물 내의 균열(crack)의 존재여부나 전위(dislocation)의 체적당 밀도 등 미세구조(microscopic structure)에 상당히 영향을 받는다. 이들 미세구조는 구조물 내의 열응력의 분포에 크게 의존한다. 열응력의 존

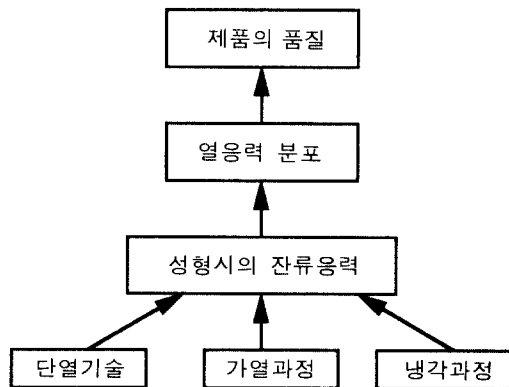


그림 1 제품의 품질과 열공학적 관계의 일면

재여부와 그의 크기는 제품의 성형과정에서 발생하는 잔류응력의 영향을 받는데, 이는 재료가 변형하는 진공정과정(time history)에 의존할 수도 있다.

## 2. 제조공정의 사례

### 2.1 냉장고 내부상자의 성형

그림 2는 냉장고의 내부상자를, 진공을 사용하여 열성형(thermoforming)하는 과정의 한 순간을 보여준다.<sup>(1)</sup> 여기에서 내부상자란 냉장고를 열면 주로 흰색으로 보이는 냉장고의 내부벽면을 가르키는데, 흔히 플라스틱계의 ABS수지를 재료로 하여 만들어진다. 냉장고 내부상자의 두께는 얇을수록 생산공정이 쉬워지고 수지도 적게 사용하여 제품의 원가를 감소시키므로 바람직하나 변형 후에 충분한 강도를 가질 수 있는 한도로 두꺼워야 한다.

본 열공정을 순서대로 간단히 요약해 보면 다음과 같다.

- ① 평면사각형의 약간 두꺼운 수지를 전열기로 가열하여 쉽게 변형이 되게 연화시킨다.
- ② 수지를, 공기압을 이용하여 벌브(bulb)의 형태로 부풀려서 변형이 쉽게 만든다.
- ③ 플러그(plug)로 위에서 눌러서 대변형을 일으킨다.
- ④ 그런 다음, 수지가 아래부분에 위치한 몰드(mold)에 거의 다다르면 플러그를 정지시킨 후에, 공기를 아래쪽으로 불면서 빨아내어 공기압으로 내부상자의 최종형상까지 변형을 시킨다.

이들 과정 중에서, 우선 전기적 가열기구가 수지를 연화시키는 과정은 주로 복사열전달을 고려하여 해석하였으나, 보다 정량적인 해석을 위하여는 주위의 분위기로 손실되는 대류열전달 양까지 고려한 좀더 자세한 계산이 요구된다. 성형과정을 수치해석을 함에 있어서는, 수지의 변형과정 중의 응력과 변형도, 그리고 변형률의 관계에 알맞고 열응력을 고려한 구성방정식(constitutive equation)의 선정에 주의를

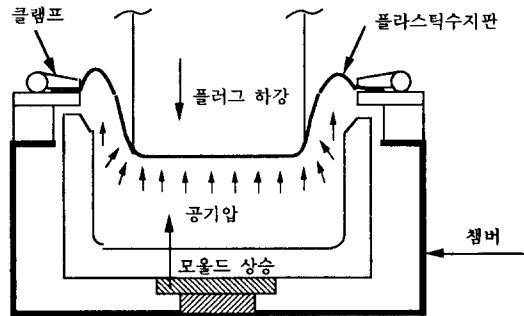


그림 2 가정용 냉장고 내부 상자의 진공성형과정

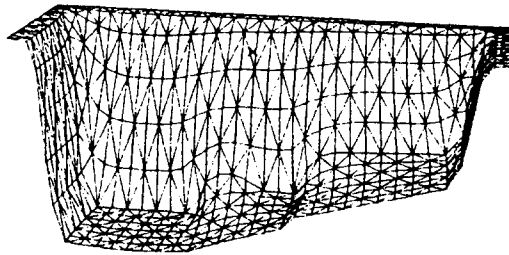


그림 3 최종성형된 내부 상자의 형태

하여야 한다. 또한, 이들 모델식에 따른 물성치의 확보도 단순하지 않다. 성형후에 진행되는 냉각과정도 잔류응력과 최종제품의 강도에 영향을 미친다. 그림 3은 내부상자가 최종적으로 성형된 형태를 보이는데, 이는 변형과정을 수치 해석하는 데에 사용된 소프트웨어인 Abaqus에서 채택된 계산격자도 보여주고 있다. 본 계산에서는, 변형과정 중의 수지와 플러그, 그리고 수지와 몰드 사이의 마찰현상을 간단히 상수의 마찰계수를 사용하여 기술하였는데, 이에 대한 좀더 자세한 분석이 요구된다.

### 2.2 단결정 성장

자성을 가져야 하는 VTR 헤드의 전자기적인 특성에 맞도록 망간, 아연, 철 등의 원소성분들의 조성을 조절하여 혼합물을 만든다. 입자형태의 이러한 혼합물을 가열로에서 녹인 후, 천천히 굳혀 단결정으로 성장시킨다. 이렇게 성장된 단결정을 기계적인 가공을 통하여

원하는 헤드형상으로 만든다. 그림 4는 가열로, 가열로의 중앙에 위치하고 혼합물을 녹이는 도가니(crucible), 그리고 도가니를 아래쪽으로 움직여 냉각시키는 도가니의 이송장치 등을 보인다. 성장된 단결정의 품질은 액상이 고화하는 경계면이 평면에 가까울수록, 성장도중에 조성물질의 농도가 공간적으로 균일하게 유지될수록 좋아진다. 단결정의 특성은 가열체의 형상, 가열과정, 그리고 도가니를 이동시키는 속도 등의 운전조건에 따라 달라질 수 있다.

성장로의 제조업체는 최적의 운전조건을 경험에 의해 근사적으로 찾은 후에 이를 수식화하여 온도를 제어하도록 제시하고 있으나, 여전히 실제 성장로의 운전자들의 수작업에 의한 보정을 요구한다. 새로운 가열로 등의 설계를 위하여 성장실험을 할 경우에는 하나의 단결정 성장에 일주일 정도의 시간이 걸린다. 망간-아연 헤드는 검은색으로 불투명하기 때문에 성장과정을 관측하기가 매우 어려우므로, 재질의 불량원인을 주로 최종제품의 검사를 통하여

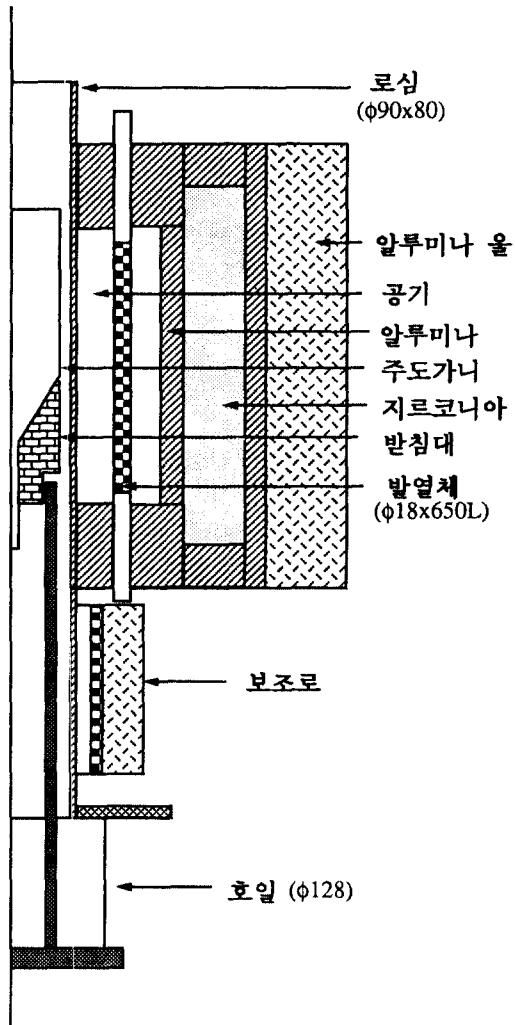


그림 4 단결정 성장로의 개념도

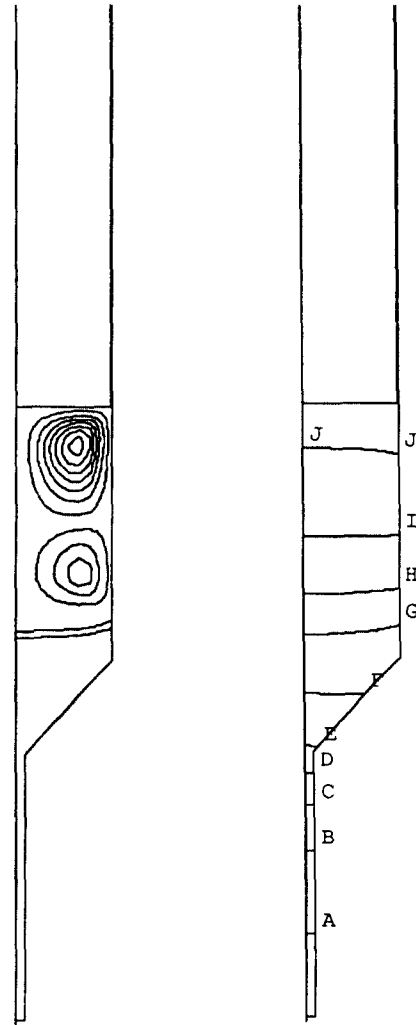


그림 5 도가니 내 용융층 내의 유선과 등온선

추측하고 있다.

그림 5는 성장과정을 상용 해석 소프트웨어인 FIDAP으로 수치해석한 결과인데, 도가니 부분만을 보이고 있다. 그림 5의 왼편그림에서 유선이 보이는 부분은 혼합물의 용융상태이며, 도가니 아래부위는 고체로서 성장된 단결정이다. 용융상태의 유동속도는 약 1mm/sec 정도이다.<sup>(2)</sup> 그림 5의 왼편그림에서 거의 평행한 두 선으로 구분된 구역에는 액상과 고상의 중간부분인 천이(mushy) 구역이 자리잡고 있다. 그림 5의 오른편 그림은 등온선들을 보이는데, 아래로 갈수록 낮은 온도에 해당된다. 이 그림에서, G라고 표시된 등온선은 고상의 표면을 가르킨다.

그림 5의 수치해석결과는 그림 4에서 보는 바와 같이 전체 시스템을 문제의 구역으로 잡아 수행되었으므로 실제현상에 근접해졌다고 볼 수 있다. 그러나 대신에 계산격자를 과다하게 넣어야 하므로 계산시간이 현재 삼성이 보유한 Cray Y-MP4E/464 계산기로서도 수 시

간 이상이 걸렸다. 이보다 더 한 어려움은 계산에 필요한 물성치와 실험식 등의 각종 입력치들의 정확한 값들을 얻기 어렵다는 데에 있다. 이들 중 몇 가지 중요한 항목들을 들어 보면 다음과 같다.

- ① 전기적인 가열소자의 특성에측.
- ② 전체 시스템에서 대기로 자연대류 등으로 손실되는 열전달의 추정.
- ③ 용융금속의 이동형상에 관한 물성치.
- ④ 단결정의 열탄성 응력분포와 미시적 결합 존재와의 상관관계, 등.

그림 6은 단결정성장 중에 진행되는 복합적인 열전달현상을 요약하여 보여준다. 구조물들 사이의 공간에서와 성장로로부터 대기로의 자연대류열전달과, 구조물들을 통한 전도열전달은 기본적으로 중요하다. 복사열전달은 가열체로부터의 발열에 의해 생성된 에너지의 전달에 주로 관여하는데, 용융물이 투명한 단결정의 경우에는 단결정 고체 내부로 투과되는 성분도 고려하여야 한다. 잠열의 발생에 따라 단결정의 성장특성, 특히 계면의 형성에 상당한 차이가 있다.

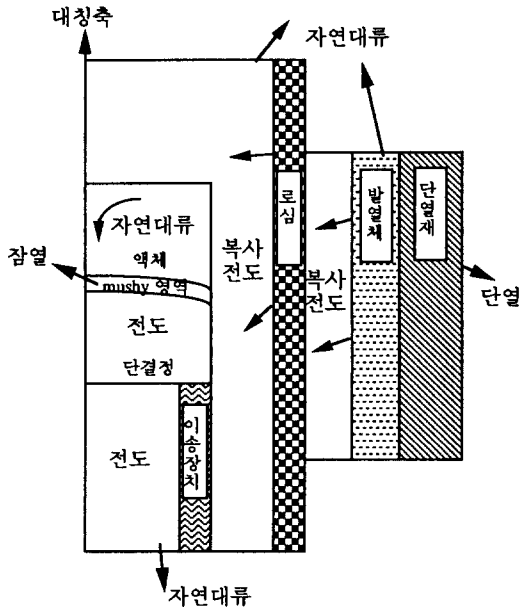


그림 6 단결정 성장중 복합적인 열전달형태의 개념도

### 2.3 TV Funnel부의 유리성형

용해로와 청정로를 통하여 생성된 유리의 덩어리는 계속하여 가공공정을 거치는 경우가 있다.<sup>(3)</sup> 그림 7은 금속형의 금형위에 용융상태의 유리를 떨어뜨린 후에 플런저로 눌러 유리를 변형시키는 과정을 보이는데, TV의 funnel부를 만드는데 적용된다. 이 그림은 대칭축을 중심으로 회전대칭이고, 냉각관의 형상은 매우 단순화되었다. Funnel부는 TV의 전면유리부와 함께, TV의 전자총의 경로가 되는 공간을 이루는데 매우 낮은 진공을 견뎌야 한다. 그러므로 제조후에 깨지는 경우가 가끔 생기므로, 구조적으로 강하고 불균일한 응력이 분포되지 않도록 하여야 한다. 그러나 funnel부는 TV의 전면유리부와 달리 상대적으로 얇게 성형되므로, 플런저의 수직운동, 금형의 냉각 등의 과정을 유리의 변형과정을 고려하여 결정하여야

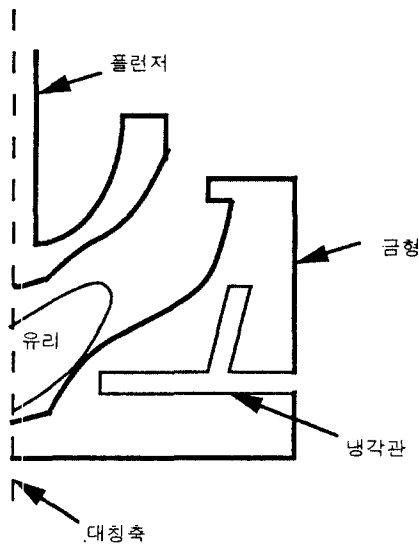


그림 7 유리를 성형하여 두께가 얇은 TV의 funnel 부를 만드는 과정

한다. 유리가 금형의 형상에 따라 변형하는 과정은 용융상태의 점도에 크게 의존하는데, 점도는 온도분포에 따라 변하므로 플러저, 용융 유리, 금형 등의 시스템을 고려한 온도분포에 유의하여야 한다.

공정의 최적화를 달성하기 위해 수치해석에 의한 방법을 고려할 수 있다. 유리의 변형을 수치해석하는 데에는 변형하는 구간을 처리하는 데에 주의하여야 하고, 두께가 매우 얇게 되는 성형의 나중 단계는 윤회현상으로 근사시킬 수 있다. 플라스틱을 성형하는 방법중에서 압출(compression molding) 방법의 해석기법이 본 공정의 연구에 응용될 수도 있다. 유리의 변형은 거의 준정상적이기는 하지만, 시간에 따라 내부의 온도분포가 변하므로 이를 고려하여야 한다. 금형의 온도를 낮추기 위해 냉각액을 사용하는데, 냉각관의 위치와 갯수 등에도 유의해야 한다. 흔치는 않으나, 냉각액이 냉각경로의 일부분에서 비등하여 냉각효과가 크게 변하는 수도 있다.

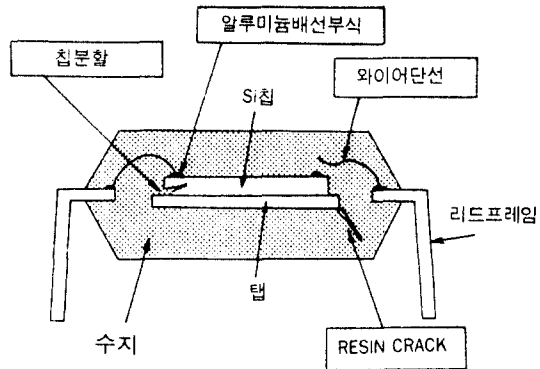


그림 8 플라스틱 봉지의 불량

#### 2.4 열응력

많은 전자부품들은 구성재료가 온도에 따라 물성 특히 열팽창계수와 탄성계수 등이 다르기 때문에 제조과정에서 또는 사용시의 온도변화에 따라서 열응력이 발생하여 제품의 신뢰성에 많은 문제점을 일으킨다.<sup>(4)</sup> 따라서 이러한 열적 물성계수의 적절한 조합 및 구조설계가 신뢰성확보를 위하여 매우 필요하다. 이러한 예의 하나로 반도체 봉지(package)의 열응력문제를 들 수 있다. 반도체 실리콘 소자는 반도체 기기(device)의 고집적화와 미세화에 따라 점점 복잡해지고 대형화하는 한편 이의 봉지는 더욱 소형화, 박형화되어 가는 추세이다. 실제 반도체의 구조는 그림 8과 비슷하다.

대부분 전자기적 특성의 요구에 따라, 칩의 다층구조에서 각 층의 두께는 점점 작아지고 있다. 따라서, 흔히  $1\mu\text{m}$  정도의 미세한 길이 척도 내에서 응력분포를 고려하여야 한다. 봉지의 신뢰성 실험 중에는 저온에서 고온으로, 또는 고온에서 저온으로 수차 반복하는 과정을 거치는데, 이때 응력집중부위에서 균열이 발생하여 어느 정도 이상 균열이 성장하게 되면 기기의 작동불량을 일으킨다. 이러한 균열은 주로 소자와 봉지제의 접합부에서 발생하기 쉽다. 표 1은 봉지제를 생산하는 데에 있어서 고려할 항목들과 이에 대한 대책을 열거하고 있다. 공극(void)이란 금형에 수지가 차들어 가

표 1 반도체봉지 생산과정중의 문제점과 대책

기술과제	대책
온도 사이클 및 납땀시의 크랙	응력해석에 의한 최적구조 결정
내습성 저하	저응력, 저열팽창계수 수지의 채용
공극(void)저감	금형설계 최적화
내납땀열	납땀시 내열거동해석

는 과정에서 수지가 금형의 어느 부분에는 불충분하게 충전되므로 인하여 발생하는데, 수지의 유동경로를 고려하여 금형을 설계함으로써 다소간 피할 수 있다. 반도체소자에 단자들을 납땀하는 과정에 따른 열전달해석도 매우 중요한 과제이다.

### 3. 맺음말

가전제품의 제조와 관련된 열공학문제를 몇 가지 예를 들어 검토하여 보았다. 제품은 강도가 커야 하고 설계공차 내에 들어야 하는 등의 조건을 만족함과 아울러, 그의 생산공정은 가급적으로 쉬워야 하고 재료를 절감할 수 있어야 한다. 제조과정 중의 열공학적인 과정이 제품 구조내의 열응력분포를 결정지우므로 열전달과정의 세심한 제어가 필요하다.

근래에 들어 컴퓨터의 발달로 열전달과정의 수치해석이 제조장비의 설계와 제조과정의 최적제어의 보조수단으로 등장하고 있다. 실제의 문제에서는 대부분 삼차원형상을 가지고 있고,

시스템을 고려하여야 하므로 여러가지 현상이 연계되어 있다. 그러므로 수치계산에는 여전히 종래의 실험기법에 의한 실험식들과 여러가지 축적된 경험의 도움을 필요로 한다. 이러한 측면에서 볼 때, 종래의 실험식, 경험식, 물성치, 기존의 수치해석의 결과 등을 컴퓨터에 데이터베이스(data base)화하여 소위 전문가 시스템(expert system)을 구축하는 편이 단순히 공정의 극히 일부분 현상들을 수치해석하는 작업보다 선행되어야 함이 바람직할 수 있다.

또한, 가전제품의 제조에는 열공학 또는 열전달현상에만 따로 주의를 기울이지 말고, 재료의 선택, 그의 유변학(rheology), 구조내의 균열문제 등을 연계하여 고려하여야 한다.

### 참고문헌

- (1) Thorne, J.L., 1986, "Thermoforming," Hanser Publishers, New York.
- (2) Shin, S.J., Lee, H.I. and Park, W.T., 1992, "System-Integrated Simulation of Crystal Growth of MnZn Ferrite by Vertical Bridgman Technique," to Appear in Forum on Advances in Finite Element Analysis in Fluid Dynamics, ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, USA.
- (3) 송태호, 1992, "우리 제조 공정내의 열전달문제들," 대한기계학회 '92년도 열 및 유체공학부문 학술강연회 강연집, pp. 3~12.
- (4) 유제홍, 1992, "반도체 Package의 개발동향," INFOSAIT, 삼성종합기술원 기술정보지, Vol.4, No.12, pp. 10~16.