

# 유리제조 공정내의 열전달 문제들



송 태 호

한국과학기술원 기계공학과 교수

●1954년생.  
●복사열전달을 전공하였으며, 열전달 전반에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

유리는 우리가 일상적으로 사용하는 재료중 가장 높은 온도에서 녹는다. 또한 상온에서의 취성이 매우 커서 단순한 절단 및 부식작업을 빼고 나면 거의 모든 제조 공정이 고온에서 이루어진다. 따라서 유리의 제조 공정은 대부분 열전달 문제를 동반하고 있다. 유리의 연화점(softening point)은 섭씨 700°C 근처이며 실제 용융 및 성형은 이보다 훨씬 높은 온도에서 이루어진다.<sup>(1)</sup> 유리용해로는 국부적으로 1500°C가 넘는 고온을 유지하고 있으며, 용융유리는 아주 느린 속도로 자연대류가 일어나는 가운데 성형라인으로 흘러간다. 용해로 내부의 제반 현상은 유리의 형성, 청징의 물리화학적 반응과 함께, 용융유리 내의 열 및 물질전달, 유동현상, 그리고 연소실내의 연소, 열전달 등이 복합적으로 나타난다. 현상이 다양할 뿐 아니라, 환경이 악조건이라서 예측과 측정이 매우 어렵다. 용해 및 청징을 둘러싼 관련기기는 용해 및 청징로뿐 아니라 전로(forehearth), 재생기(regenerator), 연소기, 필터 등이 있으며, 이들의 열 및 유체역학적 거동도 매우 중요하다. 유리의 성형라인에서는 곱(gob)의 형성, 물드 내의 열전달 문제, 혹은 판유리 공정에서의 열전달 문제 등이 해결되어야 한다. 또한 성형후의 열처리와 곡유리 공정에서의 문제도

열전달의 이해가 필요한 것이다.

이와 같이 유리의 제조공정이 수많은 열전달 문제를 보이고 있는 데에도 그간 기계공학의 관심분야에서는 다소 소외된 것이 사실이다. 이것은 열전달의 주요관심이 에너지 기기의 효율향상과 사고방지의 차원에 머물러 있었고 유리제조공정에 관련된 복잡한 현상을 다룰 만큼 다변화되지 못하였기 때문이다. 최근의 전산기의 발달과 열전달 관심분야의 확대에 의하여 유리 제조공정에서의 열전달의 이해가 도모되고 있으며, 이 글에서는 그러한 관심분야 및 문제들을 제시하고자 한다. 자칫, 이 글이 유리제조공정에 관한 소개로 흐를 염려가 있어서 독자들이 유리제조공정에 관하여 기본적인 사항들을 알고 있다고 가정하였으며, 또한 관련 연구가 적지, 아니 미발표 기밀사항이므로 관련문헌의 망라를 시도하지도 않았다.

## 2. 용해 및 청징

그림 1은 연속용해로의 대표적인 형태를 보여주고 있다. 소다, 석회, 규사와 기타 철가물을 섞은 원자재(batch)가 용해로(melter)에 공급된다. 용해로는 상부에 연소실이 있고 하부에 용융유리가 차 있다. 원자재는 용융유리 위에 떠서 연소실로부터 가열되어 용융된다. 그리고 원자재는 용해로 한 쪽의 재생기(regenerator)를 통과하며 예열된 공기를 이용

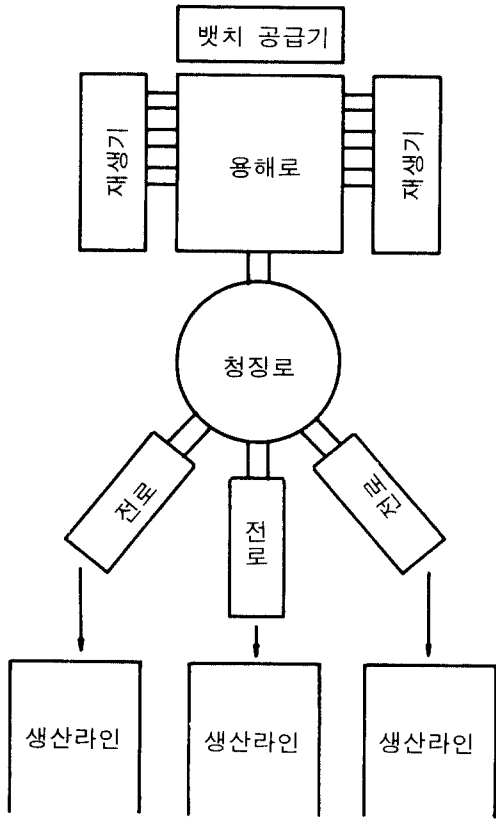


그림 1 연속용해공정의 한 예

하여 기름이나 가스를 태운 후 맞은 편 재생기를 지나 굴뚝으로 나간다. 적당한 시간이 지나면 연소방향을 바꾼다. 용해로에서 녹은 유리는 청징로(refiner)로 가면서 청징된다. 청징로에서는 생산라인에 들어가기 전에 전로(forehearth)를 지나며 정확한 공급온도, 공급(god) 질량을 맞춘다. 용해 및 청징과정은 다음의 두 가지 면에서 매우 중요하다.

첫째, 전체 공정중에서 에너지의 소비가 가장 집중된 부분이다.

둘째, 기포(blisters), 돌(stone), 줄(cord) 등의 용해불량이 발생할 소지가 있다.

이 두 가지 인자는 때로는 서로 상충되기도 하며 보완되기도 한다. 이 두 가지 인자에 관한 지식은 아직 초보적인 단계로서 그 특성을

살펴보면 다음과 같다.

첫째, 연소실 내의 열전달이 거의 대부분 복사전열에 의존하고 있는데 기하학적으로 단순한 직육면체의 구조를 하고 있기는 하나 삼차원적인 특성이 명백하며, 유동, 연소 및 기체 복사의 이해가 완벽하지 않아 정확한 예측이 어렵다.

둘째, 용해로 내부가 지나치게 고온인 관계로 온도 측정에 신뢰도가 떨어지며 내부유동 관찰은 거의 불가능한 상태이다. 기체조성이나 유리의 조성 등은 샘플링 프로브를 넣기가 어려워 좀처럼 측정되지 않고 있으며 열유속 등도 거의 측정된 바가 없다.

셋째, 용해 불량률의 정확한 원인과 발생 메커니즘이 잘 알려져 있지 않다.

넷째, 고온에서 용융유리의 물성치 측정이 어려워서 상온에서부터 1000°C 이하까지의 데이터를 외삽(extrapolation)하여 쓰고 있는 형편이다.

이러한 제반 어려움으로 인하여 용해과정을 모사하기도 어렵고 또한 그 결과를 평가하기도 곤란하다. 현재 시도하고 있는 기술적 방법들을 대별하면, 첫째, 용해 및 청징로 내의 유동, 연소 및 열전달을 수치해석하거나 모델 시험하여 구명하는 연구들과, 둘째, 유리의 청징, 특히 기포의 생성과 성장, 소멸 메커니즘을 구명하고 용해불량률 예측하고자 하는 시도, 끝으로 실제 용해로에서의 각종 데이터의 측정을 통한 경험적 방법 등이 있다. 이중 첫 번째의 연구가 가장 활발한데, 이는 유동 및 열전달의 과정이 에너지 소비를 예측하는 면과 유리의 품질을 예측하는 두 가지 면에서 모두 중요한 영향이 있기 때문이다.

그림 2는 용해로와 청징로 내부의 용융유리의 유선과 등온선을 표본적으로 그린 것이다. 연소공간에서 복사열을 받아 용융된 유리는 왼쪽의 대류 셀을 따라 내려왔다가 오른편 셀을 따라 표면에 떠오른다. 이 과정에서 용융유리 내의 기체 성분(주로 CO<sub>2</sub>)이 재비등(reboil)되면서 떠오른다. 이후 천천히 온도가 감소하면

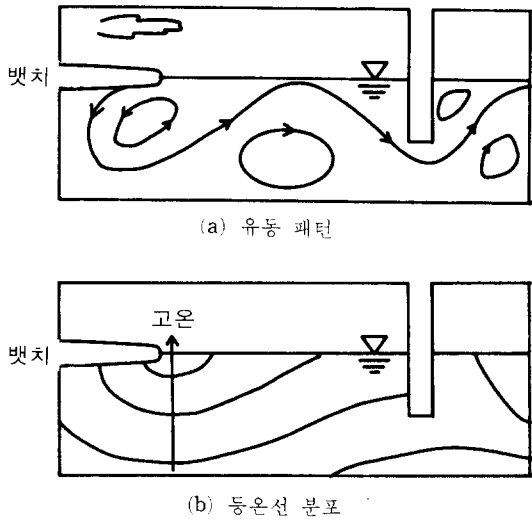


그림 2 용해로내의 유동 및 온도분포 패턴

서 기체성분은 다시 유리 내에 흡수되며 결정화 온도를 충분히 빠른 속도로 지남으로써 실투(devitrification)를 막는다. 유동패턴에서 좌우의 두 셀은 그 역할이 매우 중요하여 존재 여부와 상대적인 크기 등이 용해 품질에 많은 영향을 끼친다.

유동장의 형상은 최근 발달한 수치 유체역학의 방법으로 많이 해석하며, 그러한 예들로는 참고문헌 (2)부터 (12)에서 찾아볼 수 있다. 수치해석에 동반되는 문제점들은 용융유리의 프란틀 수가 아주 커다란 데에 따른 수렴안정성,<sup>(7,8)</sup> 전기로에서의 전기장 해석문제,<sup>(6,11)</sup> 연소 공간의 모델,<sup>(7,10)</sup> 그외 버블러 등 관련기기 문제<sup>(12)</sup> 등이 있다.

유동장 해석 코드는 완벽한 것이 아니므로, 한편으로 글리세린 등을 이용하여 물리적 모델을 만들어 유동을 모사하기도 한다.<sup>(3)</sup> 물리적 모델은 용해로를 모사하는 것 외에도 수치 모델을 검증하는 데에 이용될 수도 있다. 물리적 모델의 제작과 실험기법은 상당한 숙련을 필요로 한다. 이와 관련된 자료는 공개된 것이 매우 적으나 최근 활발히 진행되고 있다. 물리적인 모델을 만들 때에 주의하여 맞추어 주어야 할 무차원 인자는 다음과 같은 것들이다. 우선

기하학적인 형상이 동일하여야 한다. 대체로 수십분의 일 정도의 크기로 아크릴이나 유리로 축소제작한다. 둘째, 작동 온도 범위에서의 최대, 최소 점성비가 실제 용해로에서의 모델에서 서로 가깝게 맞아야 한다. 이것을 맞추기가 어려우면 글리세린과 물을 적절히 섞는 방법 등이 동원될 수 있다. (이때 표면증발이 있으면 곤란하다.) 셋째, 실제와 모델의 프란틀 수가 맞아야 한다. 전체 작동 온도 범위에서 맞추기가 어려우면 대표온도에서 맞추는 정도로 만족한다. 넷째, 유리 추출량(pull)에 따른 레이놀즈 수가 맞아야 한다. 이것은 모사 액체의 공급량을 조절함으로써 이루어지는데, 이와 동시에 배출량도 적극 제어할 필요가 있다. 다섯째, 실제와 모델에서 표면 온도구배의 무차원 분포가 동일하여야 하고 특히 대표 온도차로써 주어지는 그라쇼프 수( $Gr$ )가 서로 같아야 한다. 그라쇼프 수의 산출에 필요한 열전도 계수는 용융유리의 경우 Rosseland한계, 즉 광학 두께가 큰 경우 전도와 복사를 망라한 유효 열전도계수<sup>(13)</sup>로써 주어지며 모사액체의 경우는 다만 전도에 의한 열전도 계수를 이용하게 된다. 명백히, 용융유리의 표면과 바닥 근처에서 Rosseland근사와 다소의 모순이 예상된다. 끝으로, 이론상 용해로의 바닥과 옆면에서 외기와 적당한 총괄 전열 계수(이 값은 내화물, 보온재 및 외기 대류의 단위면적당 총괄 열저항의 역수이다.)가 있게 되고 이에 입각한 비오수( $Bi$ )가 서로 같아야 한다. 그러나 실제로 모델에서 이렇게 하려면 모델을 다시 단열하고 그 바깥에 극저온의 환경을 만들어 주어야 한다. 이것은 실제적이지 않으므로 실제 용해로에서 실측한 유리바닥과 옆면온도에 상응하는 모델온도를 설정하여 모델외부로 강제대류되는 순환수 등으로 맞추어 준다. 이와 같이 무차원 수가 서로 맞는 모델과 용해로 사이에는 푸리에 수( $Fo$ )의 등식을 이용하여 시간 스케일이 1:10 정도로 될 수 있고 이로써 모델내 측정 속도, 체류시간(material residence time) 등을 실제 용해로에서의 그것들로 환산할 수 있

다. 이외에도 물리적 모델의 제작 및 운전에 있어서 고려해야 할 것은 표면 온도 구배를 설정하기 위한 가열 및 냉각방법, 모사액의 유동 가시화 및 온도, 속도 측정기술, 배치(batch)의 모사방법 등이 있다.

이상 언급한 두 가지 모사의 방법은 유동 및 열전달에 관련된 것인데, 이외에도 청정에 관한 물리 화학적 기구를 구명하고자 하는 노력이 꾸준히 있어 왔다. 용융유리 내의 기포의 성장은 주로 확산과 화학반응에 의한 것으로 부력에 의하여 표면으로 떠오르거나 가스가 유리로 다시 녹아 들어가 기포가 소멸됨으로써 청정이 완료된다. Nemec 등<sup>(14~16)</sup>은 이러한 과정에 대하여 이론 및 실험적 고찰을 행하였고 Suzuki 등<sup>(17)</sup>은 실제 용해로에서의 유동데이터와 연관짓고자 시도하였다. 전반적으로 보아, 청정의 문제는 아직 결정적인 메카니즘이 밝혀져 있지 않은 의문사항이라 하겠다. 그 시나리오에는 많은 가능성이 있으나 특히 심각한 의문점들은 다음과 같은 것들이다.

○기포 발생은 균질 핵발생(homogeneous nucleation)인가, 비균질 핵발생(inhomogeneous nucleation)인가, 아니면 배치 공급으로부터 공급된 것인가?

○돌(stone)은 유리의 결정화 온도 구역 서냉에 따른 실패가 주된 원인인가, 아니면 내화물의 침식에 의한 핵의 공급이 주된 원인인가?

○줄(cord)은 무엇 때문에 생기는 것인가?

○청정과정에서 위 표면의 냉각에 따른 임계 베나드 대류 조건은 무엇이며 베나드 대류의 존재여부에 의한 영향은 무엇인가?

한편 용해로에 대한 직접적 실험은 앞서 언급한 여러가지 이유로 인하여 용이하지가 않아 체계적인 자료를 찾기가 어렵다. 현재까지의 데이터는 노내의 온도분포(일부 그 결과가 의문시된다.), 동위원소 혹은 추적물(tracer)을 이용한 체류시간 측정, 비디오 카메라를 이용한 연소공간의 거동기록, 포트(pot)로를 이용한 실험실적 특성파악과 물성측정 등이 있는

데, 이외에도 특히 다음과 같은 측정의 필요성을 제시하고자 한다.

○노벽 재질의 성질이 잘 알려져 있으므로, 노벽의 깊이별 온도측정을 행함으로써 내벽온도, 열유속, 총괄 전열계수 등을 파악할 수 있다.

○연소공간 내의 온도측정과 복사열유속측정이 정확하여야 한다.

○유리나 배치의 조성분석을 위하여 샘플링 프로브를 개발하여야 한다.

○내화물의 침식에 따른 두께변화를 측정할 수 있어야 한다.

○용융유리 내의 속도와 온도분포를 정확히 측정할 방안이 강구되어야 한다.

현재로서는 이같은 제1의 원칙(first principles)에 입각한 데이터 창출 및 예측이 잘 이루어지지 않는 관계로 용해과정 전체를 블랙박스로 보아 그 입출력의 관계(입력은 각종 주변 측정치 및 추출량 등이며 출력은 에너지 소비라든가 불량률 등)를 경험적으로 시스템 해석하려는 시도가 또한 있다. 이 방법은 그 연관 관계가 선형적으로 알려져 있지 않아 새로운 용해로의 성능예측에는 부적절하나, 기존의 용해에서는 매우 유용한 도구가 될 수 있다.

끝으로, 용해와 관련된 기타 시설의 해석도 행하여지고 있는데, 특히 재생기<sup>(18~20)</sup>와 전로,<sup>(21~23)</sup> 곱(gob) 공급<sup>(24)</sup> 등의 문제들이 많이 다루어지고 있다. 특히 출구에서 유리의 온도와 용융유리면의 높이를 정확히 제어하는 기술이 필수적이다. 용해로의 열효율 문제는 일반적으로 복사전열에서 많이 다루는 문제로서 많은 참고문헌이 있으며 특히 Essenhigh<sup>(25)</sup>의 실험적 연구와 Song<sup>(16)</sup>의 수치적 연구가 실제에 가깝다.

### 3. 성형, 열처리 및 기타문제

유리의 성형공정은 판유리처럼 물드가 없이 성형하는 방식과, 병 그릇, 밸브와 같이 물드로 압착하는 방식, 유리섬유제조에 쓰이는 인

발방식, 그리고 크리스탈 그릇처럼 사람이 일 일이 취입하거나 절단하는 방식이 있다. 열적 측면에서 중요한 제작방식은 전자의 두 가지 방식으로서, 이 공정을 극단적으로 단순화시켜서 생각하면 일차원 평판 내의 비정상 열전달의 문제로 볼 수 있다. 열전달의 모드는 전도 및 복사에 의하는데, 후자의 거동이 상당히 복잡하다.<sup>(27,28)</sup> 용해로 내에서 다루던 것처럼 유효 전도 계수를 사용하는 예도 없지 않으나,<sup>(29,30)</sup> 유리의 광학적 두께가 크지 않고 경계면에서의 거동이 특히 중요하므로 적분형의 복사방정식을 다루어야만 한다.<sup>(31)</sup>

몰드 내의 열전달은 전도에만 의하는데 형상이 복잡한 관계로 유한요소법을 사용하여 해석하는 예가 많으며,<sup>(32)</sup> 또한 실험적 접근도 행하여지고 있다.<sup>(33)</sup> 몰드와 유리의 접촉면에서는 접촉 열저항이 발생하는데 몰드와 유리를 각각 따로 떼어 해석할 때에 그 경계조건 설정이 매우 어렵다.<sup>(34)</sup> 유리의 입장에서 보아 그 적절한 경계조건의 설정은 몰드를 사용하지 않는 관유리 공정에서도 매우 중요한 문제이다. 한편 몰드와 유리를 한꺼번에 실험적으로 연구하여 몰드 설계데이터를 찾아내려는 시도도 있었으나,<sup>(35)</sup> 인자가 너무나 다양하여 어려움을 겪고 있다. 몰드 내부의 유리의 온도분포와 미세한 유동은 성형된 모양의 정밀도와 잔류응력분포에 결정적인 영향을 준다. 따라서 실제 공정에 있어서 비접촉 복사측정을 통하여 내부 온도분포를 읽어 내리는 역의 문제(inverse heat transfer)가 시도되고도 있다.<sup>(36,37)</sup> 아직까지 시도된 여러 방법들은 비교적 단순한 기하학적 형상에서 유동과 응력분포가 무시된 해석을 하였으나, 보다 현실적인 해석은 복잡한 형상에서 복사, 유동 및 응력, 변형을 모두 고려한 것이라야 응용가능하며, 이러한 해석이 여의치 않는 한, 몰드의 설계는 경험적 지식과 물리적 유추, 그리고 단순한 해석에 의하여 다소의 시행착오를 반복하며 행하여 질 수 밖에 없다.

관유리를 곡유리로 재가공하는 공정, 잔류응

력제거 열처리, 강화유리의 제조공정 등에서 내부응력과 변형, 열전달, 미세유동의 관계를 망라한 이론적 수치적 해석이 필요하다. 이때에 연화점 주위의 유리의 점탄성 거동을 해석하고 측정하여야 한다. 이 분야는 국내에 다소 생소한 분야로 생각되나,<sup>(38)</sup> 독특한 성질의 특질유리를 개발하기 위하여 꼭 개척되어야 할 분야이다.

한편, 기타의 문제로서 용해로 및 관련 장치들의 초기 가동문제가 있는데, 이는 그다지 어렵지 않다고 생각되나 국내의 대부분 기업이 자체경험이 없어서 많은 외화를 지출하며 해외 업체에 의존하고 있는 분야이며, 마찬가지로 용해로의 설계, 보수설계, 공정의 설계 등도 향후 많은 노력을 기울여야 할 것으로 보인다. 유리의 제조공정은 다만 열적 과정뿐 아니라, 응력분포, 측정(응력, 온도, 유량, 성질 등), 제어(온도, 표면의 높이) 등의 매우 다양한 문제점들이 제시된다. 이러한 문제점들을 상호 관련하여 풀어내기 위하여는 개방적이고도 학제적인(interdisciplinary) 태도가 요구된다.

#### 4. 맺음말

이상으로 유리의 제조공정에 있어서 열적 문제들을 고찰하여 보았다. 비단 유리뿐 아니라, 여러가지 다른 재료의 공정(예컨대 철강, 세라믹 등)에 있어서도 다양한 열적 문제가 관찰되며, 이러한 점에서 열공학자들의 관심의 확대가 절실하다고 하겠다. 이 글이 우리 열공학자들의 시야를 넓히는 데 일조를 하였기를 바라 마지 않는다.

#### 참고문헌

- (1) 연상현, 1986, 유리의 개념과 실제, 학연사, 서울.
- (2) Moul, A., 1982, "Two and Three Dimensional Mathematical Models of Glass Tank Furnaces," Glass Technology, Vol.23, No.2,

- pp.106~112.
- (3) Noble, J.J., Clomburg, L.A., Sarofim A.F. and Hottel, H.C., 1972, "Mathematical and Experimental Modeling of the Circulation Patterns in Glass Melts," J.Heat Transfer, pp.149~154.
  - (4) Leyens, V.G. and Moreau, R., 1978, "Mathematische und Messtechnische Untersuchung Verschiedener Glaswannen," Glastechnische Berichte, Vol. 51, pp.43~47.
  - (5) Chen, T, -S. and Goodson, R.E., 1972, "Computation of Three-Dimensional Temperature and Convective Flow Profiles for an Electric Glass Furnace," Glass Technology, Vol.13, pp.161~167.
  - (6) Curran, R.L., 1971, "Use of Mathematical Modeling in Determining the Effects of Electrode Configuration on Convection Currents in an Electric Glass Melter," IEEE Trans. on Industry and General Applications, Vol.IGA07, pp.116~129.
  - (7) Mase, H. and Oda, K., 1980, "Mathematical Model of Glass Tank Furnace with Batch Melting Process," J.Non-Crystalline Solids, Vol.38 and 39, pp. 807~812.
  - (8) Wright, S. and Rawson, H., 1973, "Calculation of Natural Convection in a Rectangular Cell Containing Glass with Specified Temperatures on the Boundaries," Glass Technology, Vol.14, pp.42~49.
  - (9) Ugan, A. and Viskanta, R., 1987, "Three-Dimensional Numerical Modeling of Circulation and Heat Transfer in a Glass Melting Tank, Part 1. Mathematical Formulation," Glass Technische Berichte, Vol.60, pp. 71~78.
  - (10) 송태호, 김옥중, 1988, "유리용해로의 삼차원 비정상 수치 시뮬레이션," 한국기계연구원 보고서 BS 1587~1119.C(대외비).
  - (11) Ugan, A. and Viskanta, R., 1986, "Three-Dimensional Numerical Simulation of Circulation and Heat Transfer in an Electrically Boosted Glass Melting Tank," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 1A-22, pp.922~933.
  - (12) Ugan, A. and Viskanta, R., 1986, "Effect of Air Bubbling on Circulation and Heat Transfer in a Glass Melting Tank," J. of the American Ceramic Society, Vol.69, pp. 382~391.
  - (13) Siegel, R. and Howell, J.R., 1981, Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd edi., McGraw-Hill, New York.
  - (14) Nemec, L., 1980, "The Behavior of Bubbles in Glass Melts. Part 1. Bubble Size Controlled by Diffusion," Glass Technology, Vol.21, pp.134~138.
  - (15) Nemec, L., 1980, "The Behavior of Bubbles in Glass Melts. Part 2. Bubble Size Controlled by Diffusion and Chemical Reaction," Glass Technology, Vol.21, pp.139~144.
  - (16) Nemec, L. and Mühlbauer, M., 1981, "Verhalten von Gasblasen in der Glasschmelze bei Konstanter Temperature," Glastechnische Berichte, Vol.54, pp.99~108.
  - (17) Suzuki, J., Kato, K. and Mishima, M, 1980, "Studies on Refining and Homogenizing Process by the Two-Dimensional Numerical Model," J. Non-Crystalline Solids, Vol.38 and 39, pp.861~866.
  - (18) Clark-Monks, C., 1977, "The Cost of Regenerator Efficiency," Glass Technology, Vol.18, pp.66~71.
  - (19) Abbott, K.M., 1980, "Modelling and Optimal Switching of Regenerators," Glass Technology, Vol.21, pp.284~289.
  - (20) Gilbert, S.V. and Lippert, J.W., 1986, "Computer Model Used to Evaluate Regenerator Systems," Glass Industry, pp.20

- ~23.
- (21) Carling, J.C., 1982, "A Reappraisal of the Mathematical Modelling of Flow and Heat Transfer in Glass Tank Forehearths," *Glass Technology*, Vol.23, pp.201~222.
- (22) Weir, G.J. and White, S.P., 1982, "A Two-Dimensional Mathematical Model of a Forehearth," *Glass Technology*, Vol.23, pp. 113~119.
- (23) McSheehy, C.J., Carling, J.C. and Rawson, H., 1981, "A Two-Dimensional Model to Determine the Temperature and Velocity Distributions in a Forehearth," *Glass Technology*, Vol.22, pp.34~37.
- (24) Flom, Z.G. and Grossman, I.N., 1985, "Selecting the Optimum Glass-Gob Temperature in the Production of Glassware on Automatic Glass-Molding Machines," *Steklo i Keramika*, No. 10, pp. 12~13.
- (25) Essenhigh, R.H., 1986, "Using Furnace Analysis to Establish Potential Fuel Savings," *Glass Industry*, pp.26~28.
- (26) Song, T.H. and Viskanta, R., 1988, "Prediction of the Thermal Performance of an Industrial Natural Gas-Fired Furnace," *Wärme Gas International*, Vol. 37, pp. 22~30.
- (27) McMahan, H.O., 1951, "Thermal Radiation Characteristics of Some Glasses," *J. of the American Ceramic Society*, Vol.40, pp.91~96.
- (28) Beattie, J.R. and Coen, E., 1960, "Spectral Emission of Radiation by Glass," *British J. of Applied Physics*, Vol. 11, pp. 151~157.
- (29) McGraw, D.A., 1961, "Transfer of Heat in Glass during Forming," *J. of the American Ceramic Society*, Vol.44, pp.353~363.
- (30) Mishchenko, N.A., 1977, "Heat Processes in Press-Molding of Glassware," *Steklo i Keramika*, No.10, pp.18~20.
- (31) Gardon, R., 1958, "Calculation of Temperature Distributions in Glass Plates Undergoing Heat-Treatment," *J. of the American Ceramic Society*, Vol.41, pp.200~208.
- (32) Bonacina, C., Strada, M. and Gottardi, V., 1982, "Finite Element Analysis of the Temperature Fields in Glass Moulds," *Glass Technology*, Vol.23, pp.172~176.
- (33) Pleskach, V.M., Volchok, I.P., Larionov, V.V., Mamedov, B.Sh., Lisovskii, A.V. and Mironenko, N.A., 1982, "Cooling Glass Molds with Running Water," *Steklo i Keramika*, No.3, pp.20~21.
- (34) Capurso, T., Petropoulos, J., Meunier, H. and Henriette, J., 1979, "Heat Transfer through Glass and Mould during the Glass Forming Process. Part 1-Heat Transfer at the Glass-Mould Interface during Periodic Forming Processes," *Glass International*, pp. 48~59.
- (35) Giegerich, W., 1951, "Heat Problems in the Design of Glassworking Molds," *The Glass Industry*, pp.71~92.
- (36) Howse, T.K.G., Kant, R. and Rawson, H., 1971, "The Determination of Glass-Mould Heat Fluxes from Mould Temperature Measurements," *Glass Technology*, Vol.12, pp.84~93.
- (37) van Laethem, R., Leger, L., Boffe, M. and Plumet, E., 1961, "Temperature Measurement of Glass by Radiation Analysis," *J. of the American Ceramic Society*, Vol.44, pp. 321~332.
- (38) Uhlmann, D.R. and Kreidl, N.J. (Edi.), 1986, *Glass : Science and Technology*, Vol.3, Viscosity and Relaxation, Academic Press, New York. 