



구리 용해로 설계

최현오, 김수연 | 한국기계연구원 이원창 | 창원대학교

1. Introduction

오늘날 비철금속 용해 방식으로 용해 용량이 적은 경우 oil burner에 의한 연소 열을 이용하고 있고 중·대형 용량인 경우 고가의 전기 유도 용해로를 사용하고 있다. 전기 유도 용해로는 통상 3 ton 이상의 대용량으로 열효율은 60% 정도로 낮은 편이다. 대부분의 중소 업체가 용량이 1 ton 미만의 용해로를 사용하고 있으며 열원으로 oil burner를 사용하고 있다. 전열 메커니즘이 용해 도가니에 국부 가열 방식이므로 도가니 온도 편차로 열 변형으로 인한 용해로의 수명 단축, 용탕 내의 온도 불균형으로 인한 용해물의 품질 저하, 연소용 공기 공급을 위한 팬 소음 및 연소 가스에 의한 나쁜 작업 환경, burner 효율 저하 및 온도 불균형에 의한 에너지 과소비 등의 많은 문제를 안고 있다. 따라서 품질, 작업 환경, 에너지 효율, 도가니 수명 등 여러 가지 문제를 해결할 수 있는 방안으로 고온 발열체를 이용한 소형 전기 용해로의 개발이 요구되고 있다. 비철금속 중 용융 온도가 1250℃로 비교적 높은 구리용 용해로에서 고온을 발생·유지하는데 필요한 발열체의 종류와 개수의 선정이나 내화 구조물의 안정성을 실험적으로 찾기에는 막대한 비용과 시간이 든다. 따라서 구리 용해로와 같이 고온 발생을 위한 고온 발열체의 적절한 배치와 내화물 적용, 고온과 저온으로의 온도 cycle에 의한 열 변형과 이로부터 야기되는 용해로의 구조적인 안정성 평가 등 용해로 실물 제작에 앞서 용해로 내부의 전열 시스템을 효과적으로 예측할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 소형 전기 용해로 설계 및 제작에 필요한 핵심 기술인 고온 발열체의 전열 효과에 따른 용해로 내의 열전도, 열복사, 열대류를 고려하여 용해로 내부의 온도 분포와 정상 상태 도달에 소요되는 시간을 예측할 수 있는 열 전달 거동 예측용 전산 해석 모델을 개발하고 이를 적용하여 용해로의 구리 용융 정상 상태 온도 분포 및 도달 소요시간을 측정하여 전산 열 전달 거동 예측 모델의 실효성을 검증하고자 한다.

2. 과도 상태 비선형 열 전달 해석 모델

일반적으로 열 전달 모델을 이용한 전산 해석용 모델을 만들 경우 용해로가 cylinder 형태인 경우 axisymmetric model을 사용하거나 단순히 2차원 면 대칭의 단순화된 해석 모델을 이용하였다. 이러한 단순 모델을 이용할 경우 경계 조건과 구속 조건을 적절히 이용하여 목적으로 하는 경향의 결과를 분석할 수 있는 모델을 구성한다. 하지만

본 연구와 같이 열원의 복사 에너지에 의한 공간상에서 일어나는 열대류와 복사와 대류에 의해 구조물 내부에서의 열전달과 다시 구조물의 내·외부로의 열전도를 동시에 고려해야 할 경우에는 2차원의 단순 해석 모델로는 다양한 열전달 현상을 동시에 고려하여야 하는 문제에서 정확한 결과를 얻기에는 많은 한계점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 시간에 따른 설계 조건의 변경에 따른 열전달 경향을 파악하기 위해서는 정상 상태에 도달하기 위한 시간과 그때의 온도 변화를 고찰하기 위해서는 비선형 과도 해석이 필요하다.

2.1 비선형 과도 해석 열 전달 문제 정의

선형 해석은 많은 공학 문제를 빠르고 효과적으로 해석한다. 하지만 문제에서 비선형성을 무시할 수 없고 보다 정확한 해석 결과 예측을 위해서는 비선형 해석을 해야만 한다.

일반적인 선형 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$[C] \{T'\} + [K] \{T\} = \{Q\} \quad (1)$$

$[k]$: Conductivity matrix

$\{Q\}$: Heat flow rate vector

$\{T\}$: Nodal temperature vector

$[C]$: Specific heat matrix

T' : Time derivative of $\{T\}$

일반적으로 다음의 항이 나오는 경우 비선형 열 전달 해석이 되는 것이다.

- i) Temperature-dependent material properties
- ii) Temperature-dependent film coefficients
- iii) Using radiation element
- iv) Temperature-dependent heat sources (flow of flux)
- v) Using coupled-field element

선형 열 전달 방정식에서 비선형은 $[C]$, $[k]$, $\{Q\}$ 가 온도의 함수로 온도에 따라 변화하는 것으로 비선형 열 전달 문제를 해석하기 위한 식은 다음과 같다.

$$[C(T)] \{T'\} + [k(T)] \{T\} = \{Q(T)\} \quad (2)$$

이때 정상 상태에서는 물체의 비열에 따른 온도 변화를 고려하지 않아도 되므로 비선형 정상 상태 열 전달 해석 식은 $[C]$ 를 제거한 다음과 같은 식이 된다.

$$[k(T)] \{T\} = \{Q(T)\} \quad (3)$$

정상 상태 열전달 해석은 시간에 따른 변화를 고려하지 않은 것이다. 물체를 가열로에서 가열 하는 경우 물체와 가열로에서의 상태는 정상 상태에 이를 때까지 물체의 온도 변화에 따른 전도, 복사와 대류를 반복하게 된다. 과도 해석은 고체 내의 온도와 열전달 상태를 시간과 위치의 함수로 볼 수 있는 것으로 온도의 시간에 따른 변화율이 남아 있는 것이다.

따라서, 비선형 과도 열 전달 문제를 해석하기 위한 식은 Q가 시간에 따라 변하는 함수이며 C와 k가 온도에 따라 변하는 식으로 변환이 된다.

$$[C(T)]\{T'\} + [k(T)]\{T\} = \{Q(t)\} \quad (4)$$

여기서, [C]는 열용량을 나타내는 것으로 비열과 질량의 곱으로 표현된다. [C]는 lumped mass 나 consistent mass의 형태로 처리하며 과도 해석에서는 물체의 비열에 따른 온도 변화가 정상 상태 도달에 소요되는 시간에 미치는 영향을 무시할 수 없다.

2.2 비선형 과도 해석

하중 조건이나 경계 조건이 시간에 따라 변화하는 경우로 인해 시간 간격에 따라 시스템의 응답이 요구되며 과도 해석이 수행된다. 이때 Thermal energy의 저장 효과가 정상 상태 해석 시에는 무시되지만 과도 해석 시에는 포함 시켜야 한다. 뿐만 아니라 상변화가 일어나는 경우는 항상 과도 해석(transient analysis)을 실시해야 한다. 과도 해석을 수행하는 경우 많은 잠재적인 error항목들이 있으므로 수치 적분의 매 해석 결과 후 결과의 정확도를 평가해야 한다.

3. 구리 용해로의 3차원 열 전달 해석

3.1 비선형 과도 해석 열 전달 모델

구리용 용해로는 그림 1과 같이 원형 type으로 도가니를 내화 벽돌로 둘러싸서 제작이 된다. 제작될 구리 용해로는 실린더의 힘을 이용하여 용해로가 지지대를 중심으로 90° 회전시켜 용융된 구리가 나오도록 하는 구조이다.

해석 모델 개발에 이용될 SiC발열체는 표면 온도가 1600°C까지 승온이 가능하며 단위 면적당 발열량이 니크롬선과 같은 금속 발열체의 10배 정도 높으면서 화학적으로 안정되어 있다.

그림 2는 구리 용해로의 비선형 과도 상태 열전달 해석을 위한 유한 요소 모델이다. 과도 해석 모델에 상용 전산 해석 코드인 ANSYS를 이용하여 3차원 symmetrical model로 작성하였으며 사용된 요소(Element)는 solid70, shell57, matrix50을 사용하였다. 전체적으로 solid70로 구성되어있으며, 열원으로부터 복사 방향을 설정하기 위하여 shell57를 사용하였고, radiation matrix 적용을 위한 matrix50을 사용하였다. 최대한 현물과 유사한 모델이 되도록 하였다. 열원의 복사 및 대류 열전달 및 내벽의 전도 열전달 효과를 고려하였으며 하중 및 경계 조건은 정상 상태 해석과 동일하게 하였다.



그림 1. 원형 구리용해로

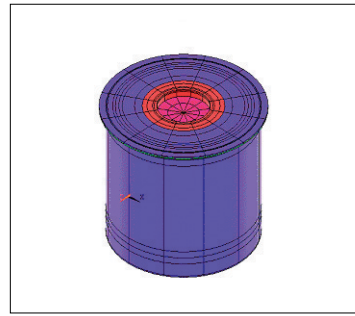


그림 2. 구리 용해로의 비선형 과도 상태 열전달 해석 모델

해석 목적은 구리 용해로 실물 제작에 사용될 발열체의 개수를 결정하는 것으로 구리 용융 온도인 1250℃에 3 시간 이내에 도달하기 위한 발열체 개수를 선정하는 것으로 하였다. 발열체는 봉 형태로 구성하여 용해로 내부의 구조와 공간을 감안하여 최소 12개, 최대 24개인 두 가지 경우에 대해 과도 해석을 시도하고 결과를 분석하였다. 초기 조건 설정은 표 1과 같다. 초기 상태는 상온과 같은 25℃로 해석을 수행한다.

표 1. Initial condition setting of analysis method

Case	초기 온도 분포	초기 온도 값	방법
①	일정한 경우	Known	전체 모델에 초기 온도를 준다
②	일정하지 않은 경우	Known	초기 온도를 알지만 온도 분포가 일정하지 않은 경우이다. [IC]명령어로 온도 분포가 다른 곳의 NODE에 온도 조건을 준다.
③	일정하지 않은 경우	Unknown	정상 상태 해석을 하여 초기 온도를 구한다. 그 다음 과도 해석을 한다.

모델에 사용된 물성치(Material properties)는 표 2와 같으며 해석 모델에 적용은 그림 3과 같다.

열전달 모델에 적용된 하중 조건(load)과 경계조건(boundary condition)은 그림 4와 같다. 용해로 외곽에 25℃ 공기의 자연 대류를 적용시켰으며 외벽 영역에 대류 열 전달 $h=8 \text{ W/m}^2\text{C}$ 을 적용 하였다. 또한 용해로 각 재질에 대한 전도 열 전달 적용하였으며 해석 모델의 빈 절점(Space node)에 용해로 외곽의 온도인 상온을 적용하였다. 열원의 외곽 영역에 열원의 온도 1300℃를 적용하고 열원과 내벽, 도가니 사이의 빈 공간에 복사 열 전달 적용하였다. 스테판 볼츠만 상수는 $5.67 \times 108 \text{ W/m}^2 \text{K}^4$, 방사율은 0.7을 적용하였다.

그림 5와 그림 6은 구리 용해로의 외벽에 각각 대류 열전달과 복사 열전달을 적용한 것이다.

표 2. Material properties

Material	Specific heat (J/Kg °C)	Density(Kg/m)	Heat transfer coefficient (W/m °C)
crucible	698.06	3000	38.38
B-1	1100	700	0.198
B-5	900	800	0.268
SK34	740	2150	0.2
Cerac wool	900	500	0.256
KCC ceramic board	800	600	0.209
LB128	1100	700	0.314
Air	1000	1.2	0.027
S45C	500	7850	15
CRESTO-60	840	1000	1
copper	385	8000	384

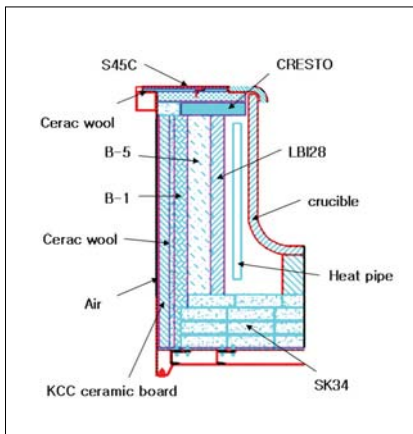


그림 3. Display for material properties

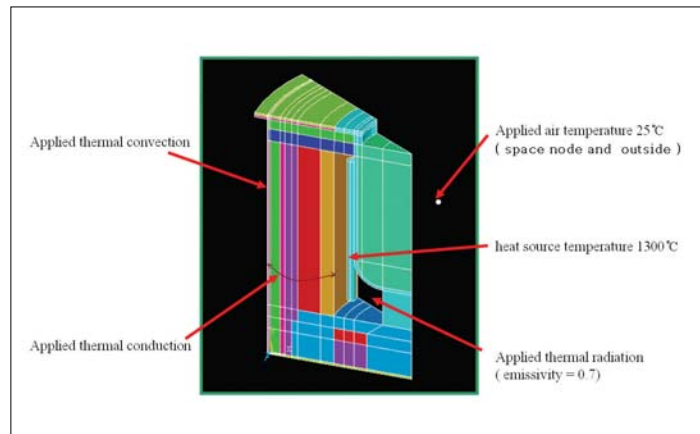


그림 4. Loading condition and boundary condition

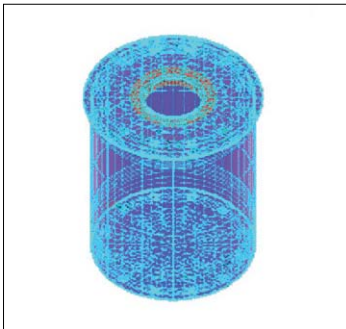


그림 5. 대류 열 전달 조건 적용 모델

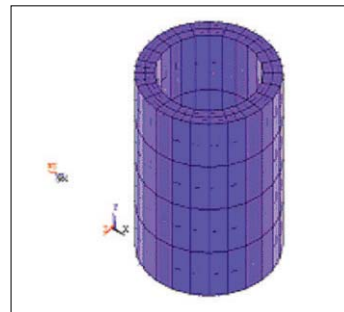
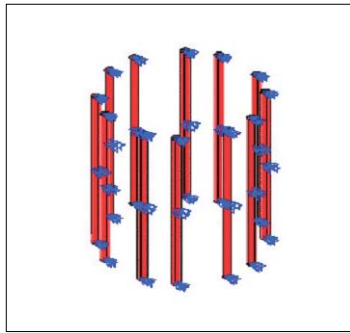
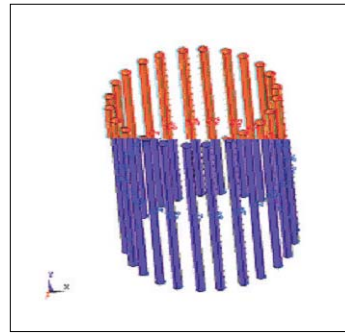


그림 6. 복사 열 전달 조건 적용 모델



(a) 열봉 12개의 하중조건



(b) 열봉 24개의 하중 조건

그림 7. 열봉에 따른 하중 조건

그림 7에 용해로의 온도 상승용 발열체로 사용되어지는 열봉을 12개와 24개를 이용하여 각각의 경우에 대해 용해로 내부에 배치와 하중 조건을 나타내고 있다.

3.2 3차원 열전달 모델의 해석 및 결과

앞에서 구축된 3차원 열 전달 모델을 상용 유한 요소 해석 코드인 ANSYS를 이용하여 과도 해석을 수행하였다. 구리가 용융하는데 필요한 1250°C이상의 온도에서 정상 상태를 유지하는데 필요한 시간을 예측하였다. 그림 8은 용해로 내부의 온도 분포를 3차원 용해로 모델의 일부분을 절단하여 보여주고 있다.

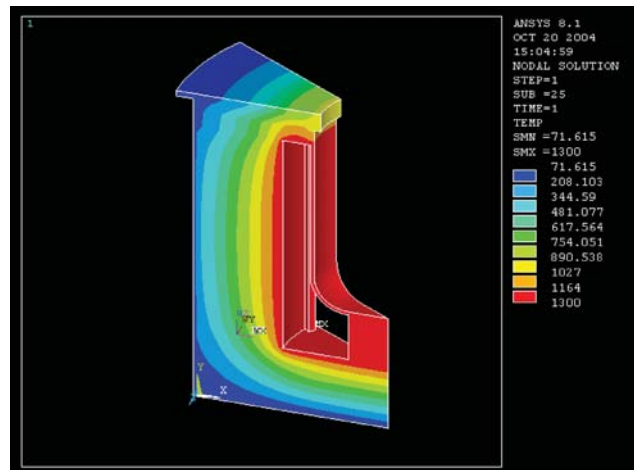


그림 8. 3차원 용해로 해석 모델의 온도 분포

그림 9과 그림 10은 열봉을 12개를 사용하였을 때와 24개를 사용하였을 때의 결과를 나타내고 있다. 그림 9는 3차원 과도 상태 열전달 해석 모델에서 12개의 열봉을 사용하였을 때 1250°C까지 온도 상승 시 소요되는 시간을 나타낸 과도 열전달 해석의 결과이다. 비열과 잠열을 감안하였을 때 260분이 소요됨을 알 수 있다.

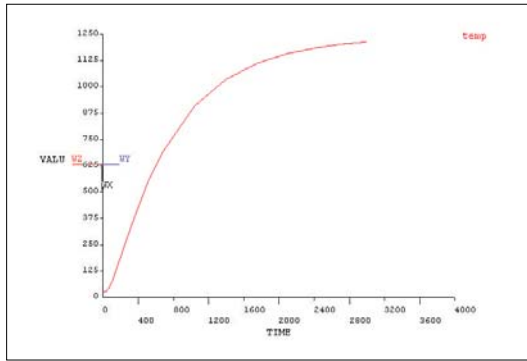


그림 9. 열봉 12개 하중 조건에서의 과도 해석 결과

그림 10은 24개의 열봉을 사용하였을 때의 해석 결과로 비열과 잠열을 포함하여 1250°C에 도달하는데 205분이 소요됨을 알 수 있다.

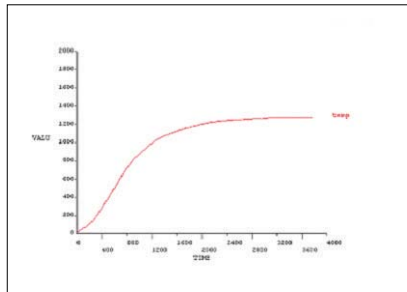


그림 10. 열봉 24개 하중 조건에서의 과도 해석 결과

3.3 구리 용해로 온도 측정

해석 결과를 토대로 24개의 열봉을 사용하여 시험용 구리 용해로를 제작하고 1250°C 이상에서 실제 구리를 용융 시키는 시간을 측정하였다.

표 3은 3회에 걸쳐 측정한 용융 시간을 나타내고 있다. 3회에 걸친 용융 시간의 평균은 196분으로 해석 시 제안한 결과와 4%의 오차로 우수한 예측 결과를 나타내고 있다.

표 3. Measurement data of copper melting time

시험일시 : 2005년 6월 28일 (대당 용해량 - 500kg/ch)				
횟수	시간	용해량	전력지침계	실제 전력소비량
1	4.5HR	500kg	200kw	295kwh
2	2.7HR	500kg		
3	2.6HR	500kg		
Total	9.8HR	1500kg	-	197kwh/ton
평균 용해시간		3.26HR		

4. 결 론

본 연구에서는 실물 제작 시 막대한 비용이 소요되는 고온의 비철합금 용해로인 구리 용해로의 제작에 앞서 전산 열해석 모델을 구축하고 비선형 과도 해석을 통하여 구리 용융 온도에 도달하는데 소요되는 시간을 용해로 내부에 열봉의 배치와 개 수에 따라 예측하고 이를 바탕으로 테스트용 실물을 제작하고 해석을 통한 유효성을 확인하고자 하였다.

- 1) 비선형 과도 해석과 실험을 통한 측정 결과 24개의 열봉을 사용하여 구리 용융 온도 1250℃에 도달하는데 비열과 잠열을 고려하여 총 205분이 소요되었다. 12개의 열봉을 이용하였을 경우에는 260분이 소요됨으로 24개를 사용한 것보다 55분의 추가 시간이 필요하였다.
- 2) 24개의 열봉을 사용한 해석 모델과 같은 실험용 구리 용해로를 제작하고 실제 구리를 용융 시키며 구리가 모두 용해 될 때까지의 시간을 측정한 결과 평균 196분이 소요됨을 확인하였다.

이상에서 해석 모델과 실험을 통한 측정 데이터 사이에 약 9분의 차이로 5% 미만의 오차가 발생하였다. 이는 측정 오차나 모델의 간략화에 따른 오차를 감안한다면 우수한 예측 결과라 하겠다. 본 연구에서 실물을 기반으로 하는 정확한 3차원 해석 모델을 이용한 열 해석과 실험을 통한 측정을 통하여 비교해본 결과 해석을 통한 예측 결과로 제한적으로나마 많은 부분의 실험을 대체할 수 있다는 것을 확인하였다.

❁ 참고 문헌

- [1] Son C. H., Introduction to finite element analysis using ANSYS. Gae Lim Press. 1999, 438-446.
- [2] Jung S. J., Analysis of heat transfer. T.S Co. Press, 1999, 201-214.
- [3] Min O. G., "A study of finite element solutions of nonlinear heat conduction problems". Yonsei University, Journal of yonsei UNIV. industrial technology institute, Vol. 16 No.2, 1984, 175-181.
- [4] Kim M. H., Kim K. U., Choi J. M., Suk H. T., Kang J. S., "A study on the analysis of heat transfer through walls considering the change of outdoor surface heat transfer coefficients". Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 12 No. 1, 1992, 239-244.



최 현 오

· 한국기계연구원 공인시험평가부 책임연구원
· 관심분야 : 열 유체 시스템 설계, 부품소재 신뢰성 평가, 신기능재료 물성 평가
· E-mail : choi1488@kmail.re.kr



김 수 연

· 한국기계연구원 공인시험평가부 위촉연구원
· 관심분야 : 부품소재 신뢰성 시험평가, 진동/소음 계속 및 시험평가
· E-mail : ksy7624@kmail.kimm.re.kr



이 원 창

· 창원대학교 기계공학과 교수
· 관심분야 : 최적 설계, 구조해석 진동제어, 지능형 로봇
· E-mail : rainman@changwon.ac.kr