

技術資料

전기로 유도용해기술의 향상

김 태 희

Development of Induction Melting Technology

T. H. Kim

지난 10여년 사이 전자부품기술의 발달로 용해 초기부터 완료시까지 연속적으로 최대전력(maximum power)을 투입/유지할 수 있는 인버터의 사용이 가능함으로써 동력공급장치의 효율, 신뢰성 및 내구성이 향상되었다. 1970년대에는 85% 수준의 변환효율 밖에 안되던 것이 현재는 97.5% 수준까지 향상되었다. 뿐만 아니라 동력공급장치의 용량도 대형화가 가능하여 현재 10000kW급까지 실용화하였고, 그 이상의 동력공급장치도 계획되고 있다.

고주파 유도용해로 동력공급장치의 기술개발로 완전출탕이 가능하게 됨으로써 적은 운전비 및 적은 고정비로 전반적인 용해효율 증가가 가능해 점차 완전출탕조업이 확산되고 있음이 오늘날의 추세이다.

1. 완전출탕조업(batch melting)

완전출탕조업의 개념은 냉재나 예열된 고상의 장입재를 노체에 장입하고 용해를 시작하여 이것을 용해하여 적당한 출탕온도까지 승온시킨 뒤 노체의 바닥까지 완전히 출탕하는 것을 말한다. 이와 같은 조업은 신뢰성 있는 부품의 부족 및 기술의 한계성 때문에 최근까지 중·소형의 유도로에서만 적용되었다. 따라서 대용량의 유도로는 50Hz 내지 60Hz의 저주파를 사용하여 잔탕을 일부 남기고 출탕하는 잔탕조업(heel melting)방법을 사용하였다. 잔탕조업이라 함은 노체 용량의 50~80%까지 용탕을 남기고 출탕하는 것을 말한다.

얼마전까지 최선의 선택이라고 생각했던 저

주파 유도 용해로의 몇가지 중요한 특성을 알아보면 다음과 같다.

1) 노체에 잔탕을 남겨 놓은 상태에서 장입을 하므로 장입재에 수분이나 습기가 있을 경우 용탕비산에 의한 안전사고의 위험이 있으므로 대부분의 경우 장입재의 예열이 필요하다.

2) 교반력이 너무 세기 때문에 이것을 적당히 줄이려면 필요한 용탕량보다 훨씬 큰 노체를 설치해야 한다.

3) 작업을 하지 않을 때 액상의 용탕온도를 유지하기 위해 전기에너지가 소모될 뿐 아니라 노체가 필요 이상으로 크기 때문에 생기는 에너지 손실이 커서 추가경비가 부담된다.

4) 노체가 크기 때문에 생기는 보수유지비의 상승을 예상할 수 있다.

5) 조업중단후 노체에 용탕이 없는 상태에서 조업개시시 용해시간을 줄이려면 스타팅 블록이 필요한데 이로 인한 추가경비가 발생된다.

전체 용해공정을 통해 최대전력을 투입/유지할 수 있는 컨버터가 내장된 반도체(solid state) 동력공급장치의 개발로 이제는 보다 높은 주파수에서 작동되는 시스템을 간단하게 설계함으로써, 소용량의 코아레스 유도로에 대용량의 동력공급장치를 조합하여 완전출탕조업이 가능하게 됨으로써 잔탕조업과 비교할 때 운전폭의 유연성 및 효율성을 크게 진작시켰다.

그림 1에 보여준 그래프는 노체내의 장입물 용해상태에 따른 효율변화 추이를 나타낸 것으로 용탕이 잡힐 때까지의 효율에서 큰 차이를 읽을 수 있다.

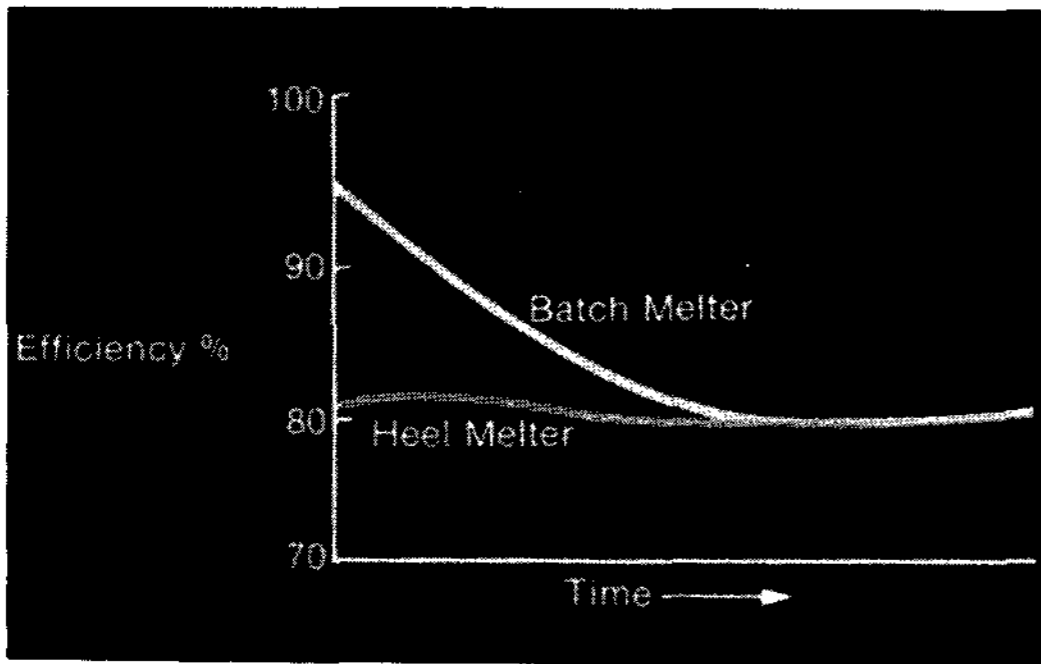


그림 1. 잔탕조업 용해로와 완전출탕 용해로의 효율비교.

2. 유도로의 효율(furance efficiency)

여러가지 인자들을 무시하고, 가장 단순화된 코아레스 유도로의 전기효율(electric efficiency) 공식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{효율} = \frac{\text{장입물의 저항}}{\text{장입물의 저항} + \text{유도코일의 저항}}$$

우리가 잔탕(molten heel)을 가진 노체의 저항을 $80\mu\Omega$, 유도코일의 유효저항을 $20\mu\Omega$ 으로 추정할 때

$$\text{효율} = \frac{80}{80+20} = \frac{80}{100} = 80\%$$

그러나 완전출탕 조업시는 장입재의 형상에 따라 장입물 사이의 접촉저항을 약 $200\mu\Omega$ 까지 쉽게 증가시킬 수 있으므로 위의 식에 대입하면

$$\text{효율} = \frac{200}{200+20} = \frac{200}{220} = 90\% \text{ (10\% 증가)}$$

만약 장입물이 자성물질(magnetic material) 일 경우 전류침투(current penetration) 깊이가 커지고 장입물에 생기는 히스테리시스 손이 커질 뿐만 아니라, 자기 커플링(magnetic coupling)도 양호하기 때문에 용해초기의 코일효율이 95%까지 상승될 수 있다. 용해재료의 온도가 자기 변태점(curie point)이상으로 올라가면서 자성 효과는 사라지나, 접촉저항에 의해 용탕이 잡힐 때까지 90% 정도의 코일효율이 유지된다.

잔탕조업의 경우 용해 초기부터 출탕시까지의 평균 코일효율이 80%인데 반해 voltage fed inverter로 설계된 파워 트렉형 반도체 동력

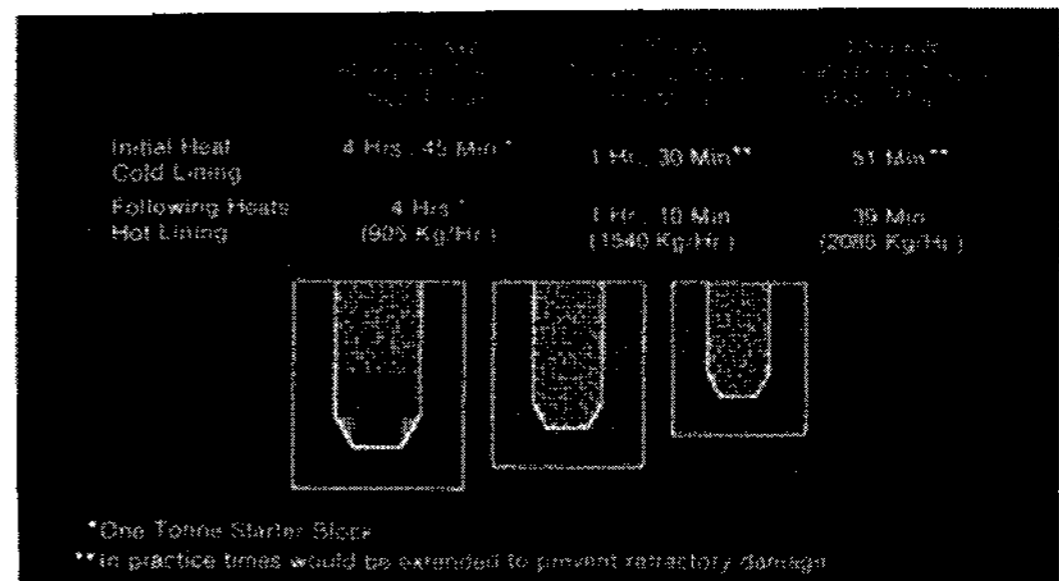
공급장치를 사용할 때 용해 초기부터 완전출탕 시까지의 평균 코일효율은 86%이다.

이상적인 용해 시스템은 균일한 용탕(homogeneous melt)을 얻기에 적당한 교반력을 가지고 있으면서 실제 요구되는 주물중량에 맞추어 될수록 작은 노체로 구성된 것이다.

노체의 크기와 더불어 용탕의 교반력에 영향을 미치는 것은 투입전력(power)과 적용 주파수(frequency)이다. 일반적으로 동력공급장치 및 노체의 용량은 주조 생산라인의 요구 생산량에 따라 거의 고정되기 때문에 적당한 교반력을 얻으려면 거기에 맞는 올바른 주파수를 선정하여야 한다. 보편적으로 주강, 황동(yellow brass), 알루미늄 브론즈 및 순동은 경우 낮은 교반력이 요구되고, 적동(red brass), 스테인레스강, 탄소강, 합금주철, 니켈 및 귀금속 등은 중간 정도의 교반력이 요구되며, 회주철, 구상화흑연주철 및 가단주철을 용해할 때는 아주 센 교반력이 요구된다.

수학적으로 교반력은 투입전력에 정비례하고 주파수의 제곱근에 반비례하며 노체용량에 반비례한다. 그림 2에 작은 노체, 보다 큰 주파수 사용시의 이점을 나타냈다. 여기서 노체내화물이 차가운 상태거나, 뜨거운 상태거나 항상 완전출탕형 용해로이 용해속도가 훨씬 빠른 것을 알 수 있다.

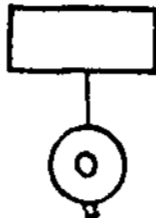
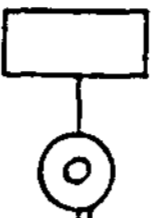
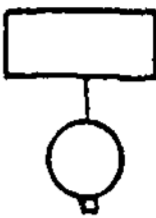
잔탕조업(heel melting)을 하는 1000kW, 60Hz, 3.6ton과 1000kW, 200Hz, 1.8ton을 완전출탕조업(batch melting)을 하는 1000kW,



(냉·온로 어느것에서나 완전출탕조업의 용해속도가 빠르다).

그림 2. 저·중주파 유도로의 잔탕조업과 완전출탕 조업의 용해시간 비교.

표 1. 2500kW급 저·중·고주파 유도 용해로의 비교표(회주철 용해, 출탕온도 1500도 기준).

	2500kW, 60Hz/9ton 잔탕조업용해로	2500kW, 200Hz/5ton 잔탕조업형용해로	2500kW, 500Hz/3.4ton 완전출탕형용해로
			
출 탕 량	3400kg	3400kg	3400kg
장 입	2×1700kg	4×850kg	3400kg
장 입 방 법	Bucket	Bucket	Feeder
용 해 시 간	47분	43분	39분
Idle Time	8분	10분	7분
사 이 클	55분	53분	46분
가 동 률	85%	81%	85%
생 산 성	3700kg/hr	3850kg/hr	4430kg/hr
kWh/ton	585	540	500

*3교대작업 기준, 유압 및 냉각시스템 등의 보조전기는 3가지 모두 동일하다고 보고 계산에서 제외함.

500Hz, 1.4ton과 비교할 때 500Hz batch melting의 주된 장점은 용해속도가 빠른 만큼 생산성이 향상된다는 것이다.

고전력 밀도의 유도로에 잠재된 단점은 조업을 제대로 하지 않을 경우 냉로에서 짧아 내화물의 수명이 짧아질 수 있다는 것이다. 그러나 내화물 수명은 뒤에서 언급될 용해조업제어 컴퓨터를 사용하여 향상시킬 수 있다.

3. 생산성 향상(production increase)

완전출탕조업을 함으로써 얻어질 수 있는 생산성 증진효과를 표 1에서 볼 수 있다. (2500kW급, 저주파, 중주파 및 고주파 유도로 비교). 2500kW, 50/60Hz, 9ton은 잔탕조업형으로 3.4ton 출탕후 1.7ton 바켈(bucket)으로 2회 장입이 필요하며, 회주철 용해시 출탕온도 1500℃ 기준시간당 용해속도는 3700kg/hr이다. 2500kW, 200Hz, 5ton 중주파 유도로도 잔탕조업형으로 역시 바켈으로 장입하나 노체가 작으므로 작은 바켈으로 여러번 장입해야 하며 시간당 용해속도는 3850kg/hr이다.

Batch melter의 경우, 장입 시스템으로 연속적으로 장입하며 시간당 용해속도는 4430kg/hr까지 증진된다. 따라서 이 방법으로 조업시 열손실이 줄고 효율이 증가하기 때문에 간단히

약 15% 정도의 에너지 사용량 절감을 기대할 수 있다.

앞에 기술된 세 시스템 모두 이용률을 좋게 하려면 ladle에 출탕시 시간손실이 없도록 대형 ladle을 사용하여야 하며, 더욱이 잔탕조업의 경우 batch melting 처럼 작업대에 장입재저장소가 없는 한, 항상 대형 장입바켈을 준비상태로 대기시켜야 한다.

생산성을 더 높이려면 노체를 2개로 하고 한쪽 노체에서 용해완료후 출탕하는 사이에 다른 한쪽로에서 용해를 하고, 출탕이 끝난 노체에는 장입재를 충전하여 가열되어 있는 노체의 열기로 장입물을 예열하는 방법을 채택할 수도 있다(dual trak 혹은 dual melt system).

잔탕조업에서는 용탕위에 작업 장입물을 떨어뜨리므로 보통 바켈의 아래쪽을 열어서 장입하며 용탕의 비산으로부터 작업자를 보호하기 위한 보호덮개가 있는 바켈을 주로 사용한다. 장입재의 크기 및 장입방법에 따라 장입물이 서로 붙어 용탕 위쪽의 노체벽에 걸리는 「bridge 현상」이 생길 수가 있는데 이럴 경우, 용탕이 과열되어 내화물이 견딜 수 없는 온도까지 상승하여 내화물 붕괴나 심한 침식현상이 생길수 있다. 특히 노체가 작고 전력 투입량이 큰 batch melting의 경우 생길 가능성이 있다.

진동기, 컨베이어 벨트를 사용한 장입 시스

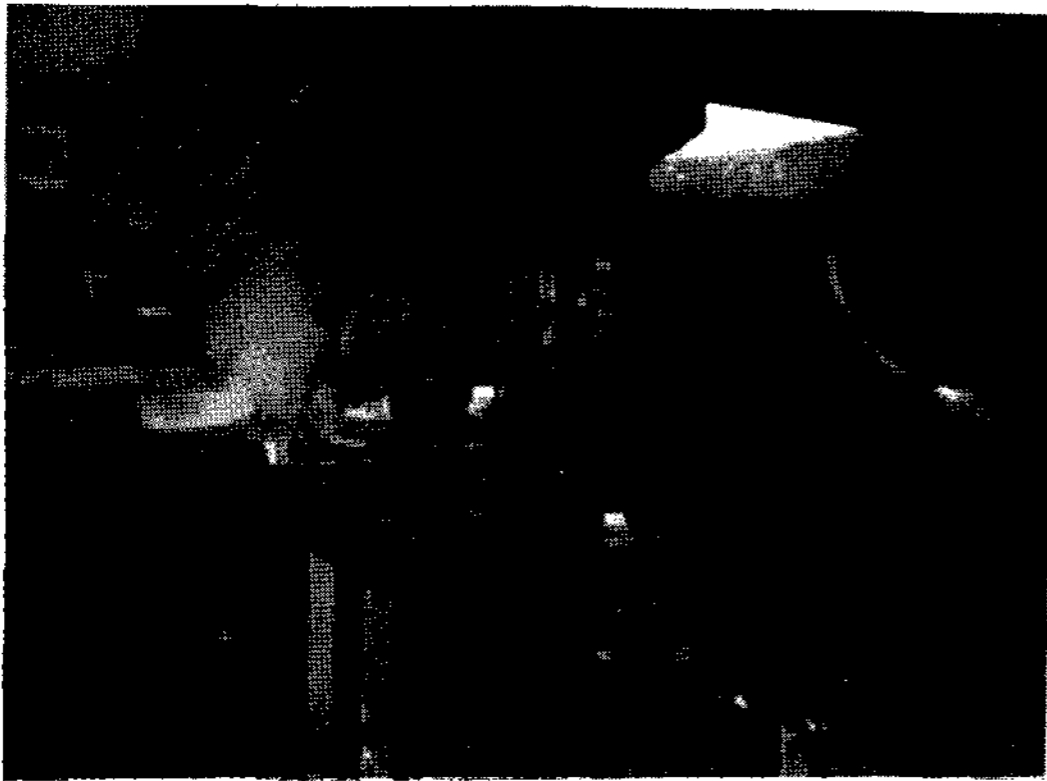


그림 3. 2500kW, 500Hz-2,700kg 유도로의 벨트 컨베이어 장입장치.

템의 경우 완전출탕 용해로의 장입시에 이와같

은 문제를 최소화하는데 최적의 설비로 입증되었다. 이렇게 장입할 경우 먼저 장입된 장입물의 하부는 용해되고 상부는 미처 녹지 않은 상태에서 새로운 장입재가 투입되므로 「bridge 현상」을 피할 수 있을 뿐만 아니라 뜨거운 용탕과 차가운 장입재의 직접 접촉은 막아주므로 용탕의 비산을 줄일 수 있다.

그림 3은 이러한 장입설비의 일례를 보여주고 있다.

또한 컨베이어 시스템은 유도로 동력공급장치의 용해속도와 장입재의 공급속도를 맞추어 놓을 수 있기 때문에 가공 절삭설이나 경금속 등의 장입에 적합하다. 한편 노체가 여러개 설치되어 있는 경우 진동기구를 이용한 장입장치를 노체 앞에서 전·후·좌·우로 움직이도록 설

표 2. 잔탕조업과 완전출탕조업의 비교(월간 생산목표량 3200ton, 1일 16시간 조업, 1달 20일 작업기준).

	60Hz 잔탕조업 3500kW 3500kW	200Hz 잔탕조업 3500kW 3500kW	500Hz 잔탕조업 5000kW
			
	13ton	7ton	5.5ton
노 형 식	코아레스형	코아레스형	코아레스형
주 파 수	60Hz, fixed	200Hz, 가변	500Hz, 가변
출 력	3500kW × 2	3500kW × 2	5000kW × 2
출 력 제 어	off-load, 10taps	무단변화(무한가변)	무단변화(무한가변)
노 체 용 량	13000kg × 2	7000kg × 2	5500kg × 2
출 탕 용 량	1800kg	1800kg	5500kg까지
장 입 방 법	bucket	bucket	conveyor/feeder
장 입 량	1800kg	2 × 900kg	5500kg
용 해 속 도	6350kg/hr × 2	6580kg/hr × 2	10500kg/hr × 2
용 해 시 간	17min	16.2min	31min
사 이 클 시 간	22.0min	22.0min	32.0min
utilization	77%	74%	97%
생 산 속 도	9.5ton/hr	9.8ton/hr	10.3ton/hr
야 간 보 온	필요	필요없음	필요없음
냉 로 용 해 시 간	4.45hrs	1.45hrs	1.00hrs
스 타 텅 블 록	필요	필요없음	필요없음
소 요 전 력 량	7400kW	7500kW	5200kW
에 너 지 원 단 위 (2교대기준)	610kWh/ton	550kWh/ton	510kWh/ton
LNG 가 스 량	975000CF	975000CF	
설 치 공 간 (UNIPAC)	40' × 24'	34' × 23'	32' × 21'
선 직 무 게	106ton	87ton	73ton
추 정 예 산	\$1,000,000	\$965,000	\$895,000

치하면 이상적이다.

계속적인 개발노력에 힘입어 노체도 고전력 밀도용해에 적합하도록 개발되어 왔다. box형 노체의 경우 특수보강 내화블록 제조기술을 적용하여 석면재를 사용하지 않고 보다 견고하고 보다 고효율을 낼 수 있도록 제작되어 1500kW, 3ton까지 적용하고 있으며, 좀더 큰 설비의 경우 스틸 셀형을 사용하여 급속 내화물 추출장치(quick lining removal system)를 부착하여 내화물 교체시 이의 제거를 쉽게 하였으며, 노효율을 높이기 위해 유도코일과 선트 등을 새롭게 설계하였다.

4. 향후에 지향해야 할 용해시스템

표 2는 월생산 회주철 3200ton 목표로 시간당 10ton의 용해능력을 가진 설비를 설치한 캐나다의 예이다. 만약 과거에 이런 설비가 검토되었다면 예외없이 저주파 유도로 용해로로 고려되었을 것이지만 이 표에서 보듯이 완전출탕형 용해설비를 설치하는 것이 많은 이점을 가지고 있음을 알 수 있다.

컨베이어로 공급되는 장입재를 2개의 노체 중앙에 설치된 회전형 진동장입장치(swivel vibrating chute)에 일정하게 공급해 주기 위해 계중장치를 부착했으며 장입장치에서 노체로의 장입물 공급은 용해조업 제어 컴퓨터(melt control computer)로 제어하고, 노체는 슬래그 제거를 용이하게 하기 위해 후방경동(back tilting)장치는 장착하였고(그림 4), 라이닝 제거의 신속 및 안전작업을 위해 라이닝 추출장치(quick lining removal system)가 사용되었다.

선진 용해시스템의 또다른 특징은 컴퓨터에 의한 용해작업 제어로서 그림 5는 작업대 위에 설치되어 운전자에게 정보를 제공하는 플라즈마 스크린(plasma screen)을 보여주며 스크린에 나타나는 일련의 메뉴를 용해설비운전에 이용할 수 있다. 정상조업을 하고 있는 동안 용해제어 스크린(melt control screen)에 용해공정 제어상태가 나타난다. 노체의 장입상태를 결정하기 위해 컴퓨터가 각각의 노체에 설치된 로드셀(load cell)의 정보를 읽는다.

컴퓨터로 제어되는 피더(feeder)로 먼저

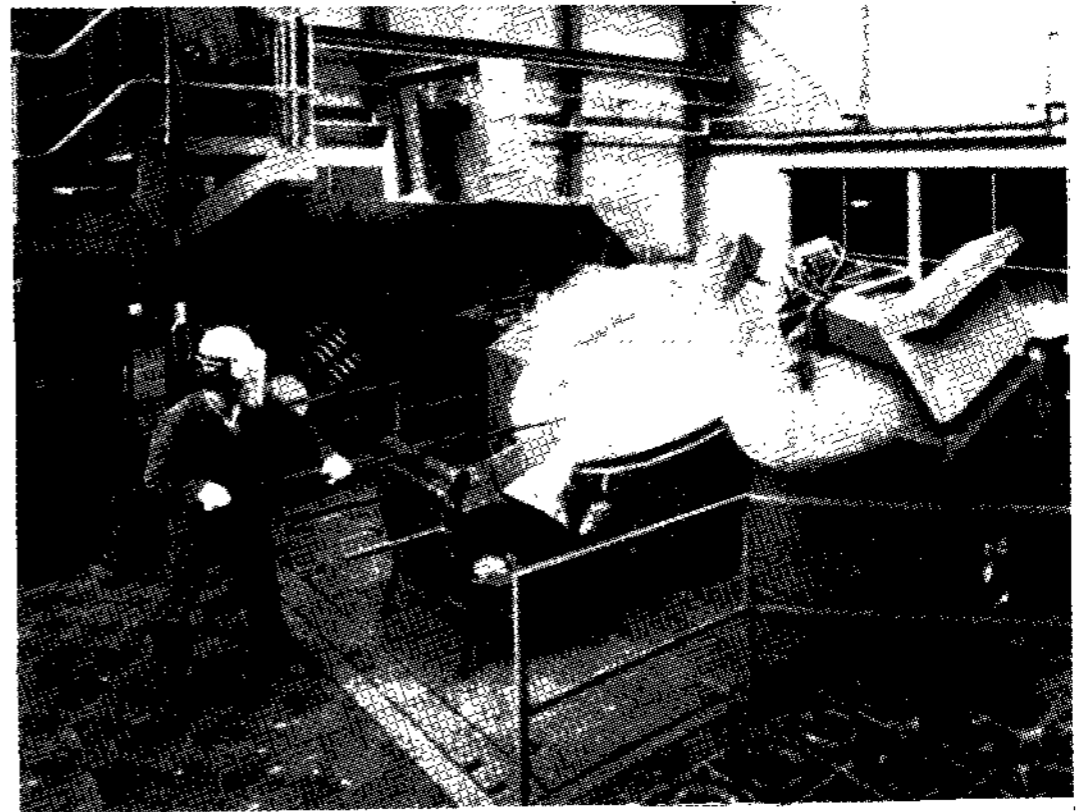


그림 4. 네덜란드에 설치된 완전출탕형 용해설비 (7000kW-7.5ton, 후방 경동장치가 부착됨).

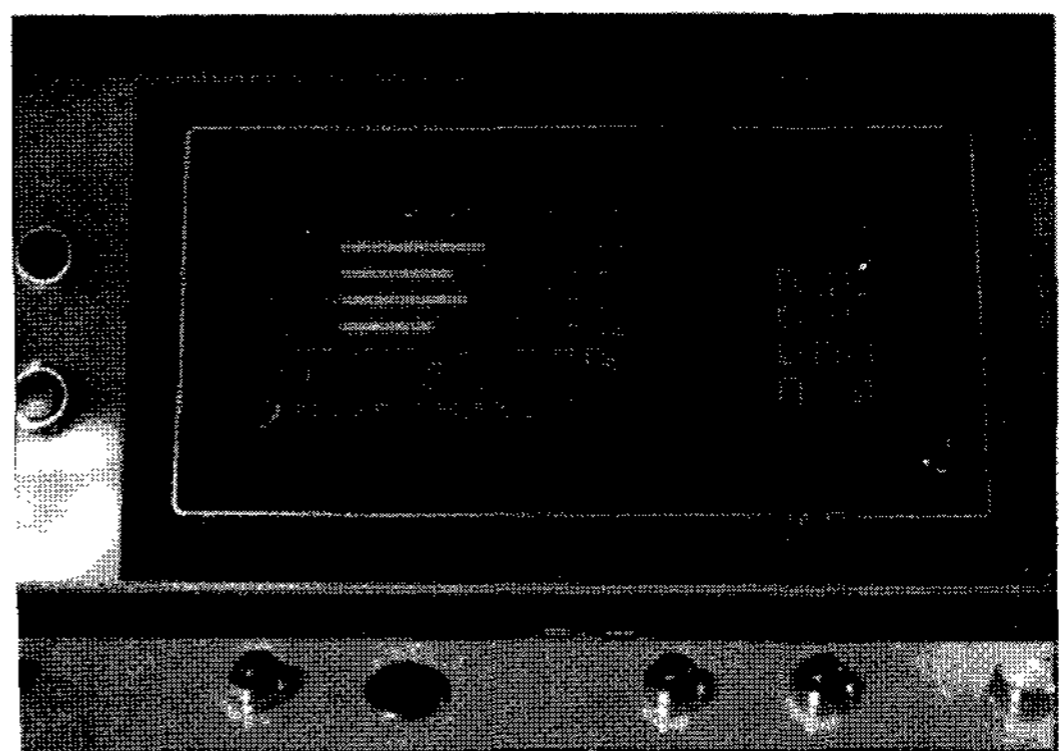


그림 5. 정상적인 조업을 하는 동안 전체 용해공정을 제어하는 컴퓨터 제어스크린.

2500kg을 장입하고 용해를 시작하면 최대전력(7000kW)가 투입될 수 있으므로 에너지(kWh) 투입량과 장입물의 무게로 용해조건을 계량할 수 있다. 고체상태의 장입물이 용해가 되기 시작하는 것을 컴퓨터가 인지하는 순간 노체내의 일정 용해조건을 유지하기 위해 컴퓨터는 자동적으로 계중 피더(weigh feeder)를 작동시켜 추가장입이 이루어지게 한다. 이렇게 하므로 냉재가 직접용탕에 장입되지 않고 반응해 상태의 장입물 위에 추가적으로 장입되므로 용탕의 비산이 없어 작업자의 안전성이 증진된다. 용탕의 온도가 일정한 설정온도(setting temperature)에 이르면 경보가 울리며 이때 침적식 온도계를 용탕에 담가 실제온도를 측정하

여 컴퓨터가 계산한 온도와 비교한다. 이것이 작업자 판단에 같다고 받아들여지면 컴퓨터의 계산온도가 실제온도로 사용되고 용탕의 온도는 자동적으로 요구하는 온도까지 상승하게 된다.

기계고장이나 각종 지시사항에 대한 진단기능도 있어 설정 스크린(setup screen)을 사용하여 시스템의 설정을 쉽게 할 수 있다. 다음 교대작업 개시시 노체가 식은 상태에서 작업을 시작할 때 cold start 기능을 첨가할 경우 작업

자가 출근하기 전에 노체에 장입된 장입물을 용해 직전의 상태까지 예열할 수 있다. 또한 노체 소결을 위해 sinter controler를 부착하면 가장 이상적인 소결곡선에 따라 소결이 가능하므로 작업의 편의성은 물론 라이닝 수명증가를 기할 수 있다.

이상에서 언급된 용해 자동화가 향후 우리가 지향해야 할 용해 시스템으로서 우리가 생각하는 것보다 훨씬 빠르게 실용화될 것이다.