

技術資料

유도로의 주철용해에 있어서 에너지 절감 (유도로의 설계 및 용해작업)

김 봉 완* 이 계 완*

Energy Savings in Cast Iron Melting by Induction Furnace

B. W. Kim* K. W. Lee,**

1. 서 언

주철의 용해에 있어서 용해원가를 가장 크게 차지하는 부분은 금속장입재료로서, 약 50~70%가 된다. 합금주철의 경우는 이 비율이 더 높아질 수 있다. 두번째 부분은 에너지비용이라 할 수 있는데, 약 12~15%를 차지한다. 따라서, 이것을 어떻게 줄이는가 하는 것은 자세히 고려해 볼 필요가 있다.

이에 더하여, 세계적으로 에너지보존에 대한 관심이 높아지고, 에너지 소비수준을 낮추기 위한 모든 가능한 방법을 강구할 필요성이 주물공장을 포함한 전산업체의 절실한 문제점이 되었다.

따라서, 주철공장은 용해공정에서 더욱 절실하게 에너지의 사용을 고려해야 할 필요가 생기리라 예상할 수 있다. 왜냐하면, 주물공장에 들어가는 총 에너지의 50~80%가 통상 용해작업에 들어가므로, 에너지 과소비에 의한 경제적, 국가적 압력이 가해질 것이기 때문이다.

이러한 여건들에 의하여 근자에, 폐열의 활용, 전기로에서 산소보조연료 등과 같은 용해공정에서의 에너지절약에 관한 기술에 놀랄만한 발전이 이루어 졌다.

이러한 점을 고려하여, 본문에서는 무철심전기 유도로에서 에너지소비 정도에 영향을 주는 유도로의 설계 및 조업에 대하여 검토하고자 한다. 무철심유도로는 주물공장에서 널리 사용되고 있으며, 크기, 전력률 및 정격주파수가 광범위하다. 주철의 수 톤급 용해에 있어서는 전통적으로 저주파의 출탕-장입 방식으로 무철심유도로가 사용

되어 왔다. 그러나, 이 종래의 방법은 인버터 전력공급시스템의 발전에 따라서, 고전력, 저용량, 중주파 유도로로 대체되는 경향이 점차 높아지고 있다.

무철심유도로의 성능은, 출탕량과 에너지소비 면에서 볼때, 각각의 주물공장에서 채용하는 용해작업에 좌우되지만, 유도로의 설계에 주의를 기울이면 상당한 이익을 얻을 수 있다.

2. 유도로 설계

2.1 유도로의 용량

비록 용해작업에서는 다른 변수들에 의하여 그 영향이 가리워지기도 하지만, 용해작업에서는, 일반적으로 유도로의 용량은 에너지소비율(kwh/ton)에 영향을 준다. 각종 주파수의 무철심유도로의 용해에 있어서, 유도로 용량이 커짐에 따라 에너지소비율이 내려가는 경향을 그림 1에서 보여 준다. 그림에서 점이 넓게 산포되어 있음은 주물

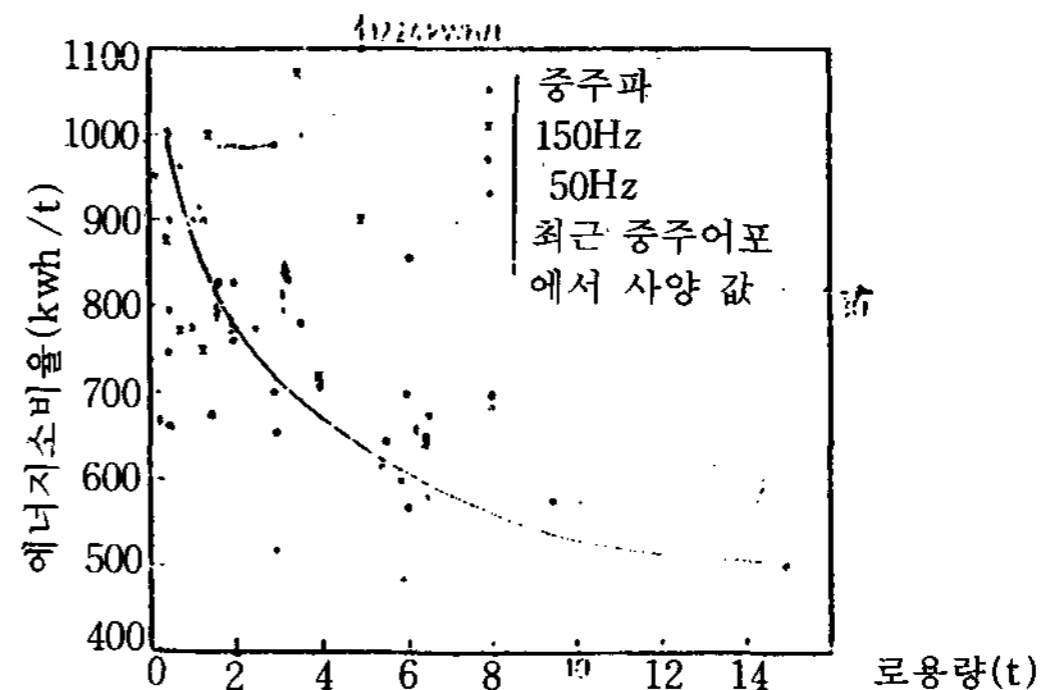


그림 1. 무철심유도로-전력소비율/노용량 관계

** 중소기업진흥공단

* 한양대학교 교수

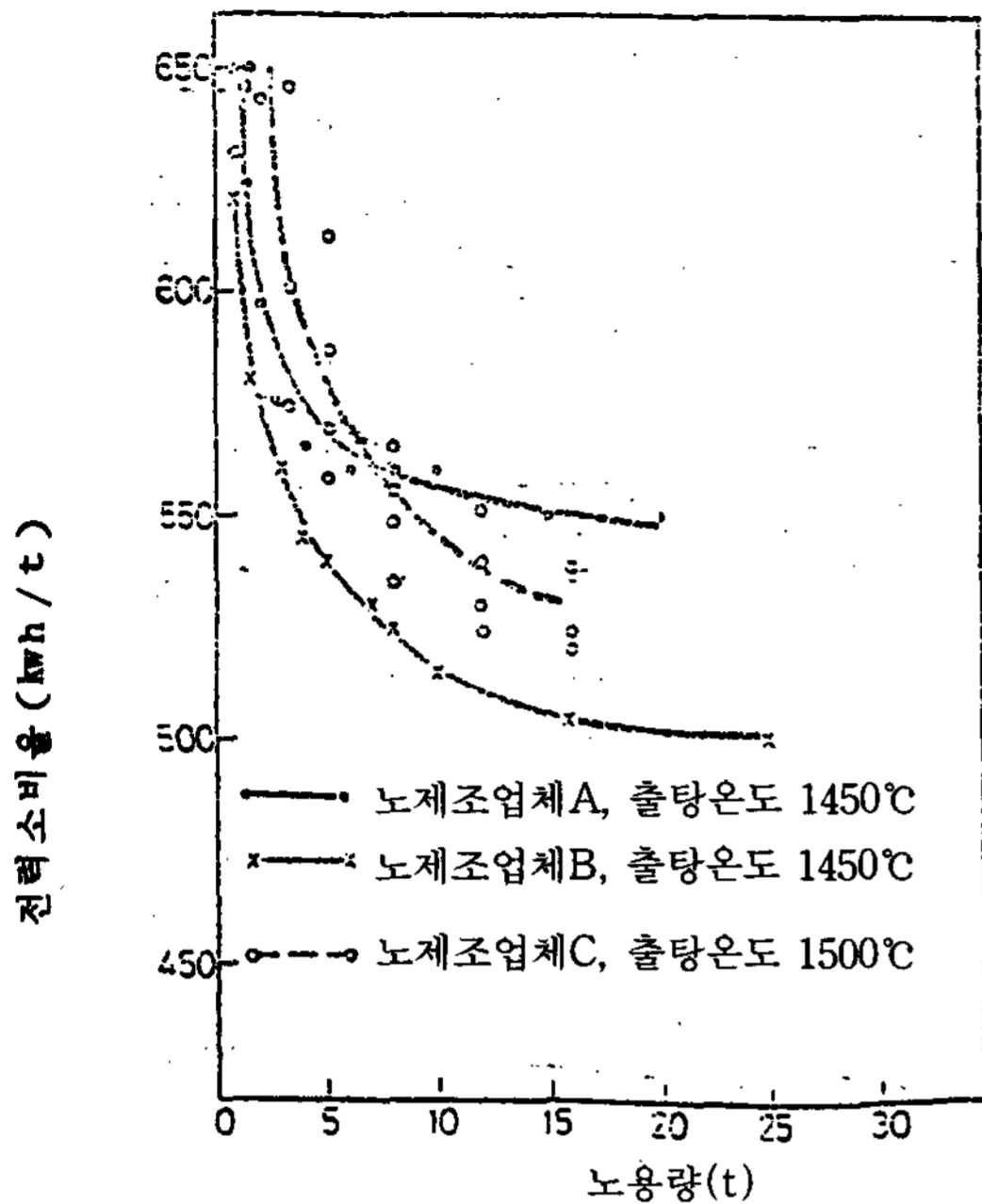


그림 2. 서로 다른 용량의 저주파유도로에서 주철용해에 에너지 소비-제조업체에서 제시한 데이터

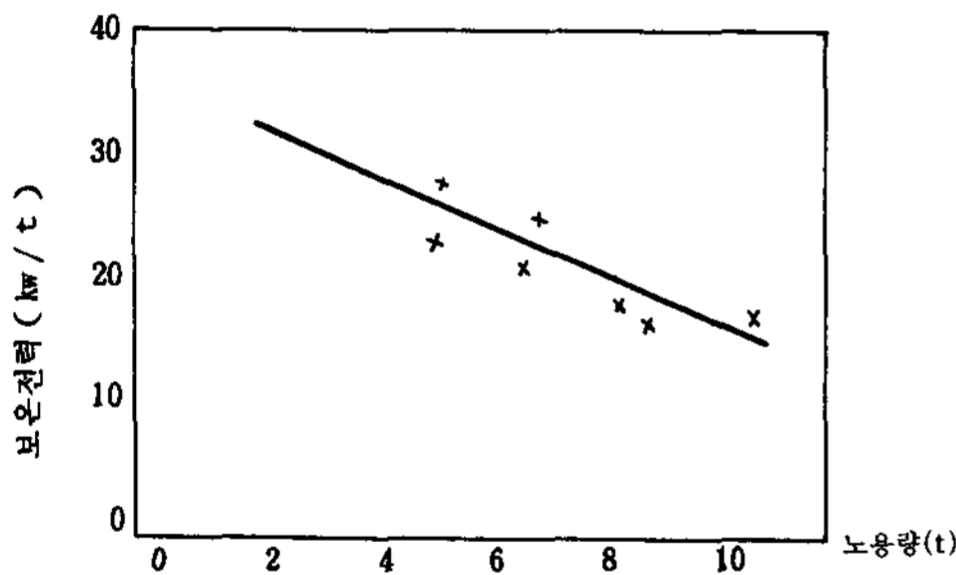


그림 3. 여러 용량의 무철심유도로에서 보온에 소요되는 톤당전력

공장등에서 채용되는 다양한 용해작업을 나타내고 있다.

유도로 제조업체가 제시하는 성능 데이터도 역시 이러한 경향을 나타내 주고 있으며, 그림 2는 다른 제조업체에서 만든 서로 다른 용량의 저주파 무철심 유도로들에서의 예상되는 전력소비율을 보여준다. 유사한 곡선을 삼배주파나 중주파 유도로에서도 얻을 수 있다. 유도로의 용량이 커짐에 따라 에너지소비율이 낮아짐을 예측할 수 있다. 왜냐하면 표면적/부피 비율이 낮아짐으로 톤당 열손실이 내려가기 때문이다(물론 전체 열손실량은 소형보다 대형유도로가 크다). 이것은 로용량

과 보온 소요전력률과의 관계를 그린 그림 3에서도 확인된다.

무철심유도로에서 열손실은 어떤 온도에서 유지되는 용탕의 시간과 비례되는 에너지 소비를 나타낸다. 따라서, 에너지소비는 유도로 사용에 의해, 직접적으로 영향을 받는다. 열손실은 유도로의 크기에 의존하므로, 중소형 유도로는 높은 활용도를 가지고 사용하여야 한다.

2.2 주파수와 전력밀도

무철심유도로는 일반적으로 저주파, 삼배주파, 중주파 유도로로 분류되며, 이들의 일반적 성질은 여러 곳에서 언급되고 있다. 저주파 유도로에서는 탕욕에서 심한 교반작용이 일어나서 전력밀도에 제약이 있으므로 전력/중량 비율이 300 kw/ton을 크게 초과하는 경우는 그다지 많지 않다. 그러나, 현대의 중주파로(> 450 Hz)에서 600~800kw/ton 정도의 전력밀도는 과잉이라고 생각되어 지지는 않는다. 이러한 여건에서는 중주파로의 전력밀도능력이 높을 수록, 동일한 용해속도의 저주파 로보다 매우 작은 용량의 노체(爐體)로부터 유사한 용해속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 더 작은 유도로에서 동일한 용해속도를 얻을 수 있으므로, 에너지소비율과 비용의 절감을 기대할 수 있다.

한 제조업자는 저주파 조업보다 인버터-파우어 중주파 유도로로 10~20% 에너지소비를 절감한 두가지 사례를 보고 하였다.

① 1×3톤, 1200kw, 600 Hz의 설비로서 평균 출탕온도를 1580°C로 하고 축로가열, 보온을 행하여 1년 이상 측정된 결과, 에너지소비가 525kw h/ton이라 보고되었다.

② 2×6톤, 3600kw, 600 Hz의 설비로서 축로가열, 1500°C로 보온을 행하여 1개월 이상 측정된 결과, 에너지소비가 490kw h/ton이라 보고되었다.

위에 인용된 데이터는 그림 1에 설명되어 있으며, 이는 제조업체가 주장하는 중주파 유도로의 에너지 절감효과가 지나친 과장이 아님을 말하여 준다.

중주파로의 장점을 언급하였지만, 주파수를 높이면 교반효과가 떨어지며, 그 결과로 용탕내 첨가물의 용해가 더욱 어려워진다는 것을 또한 염두에 두는 것이 좋겠다. 이런 여건에서는, 중간

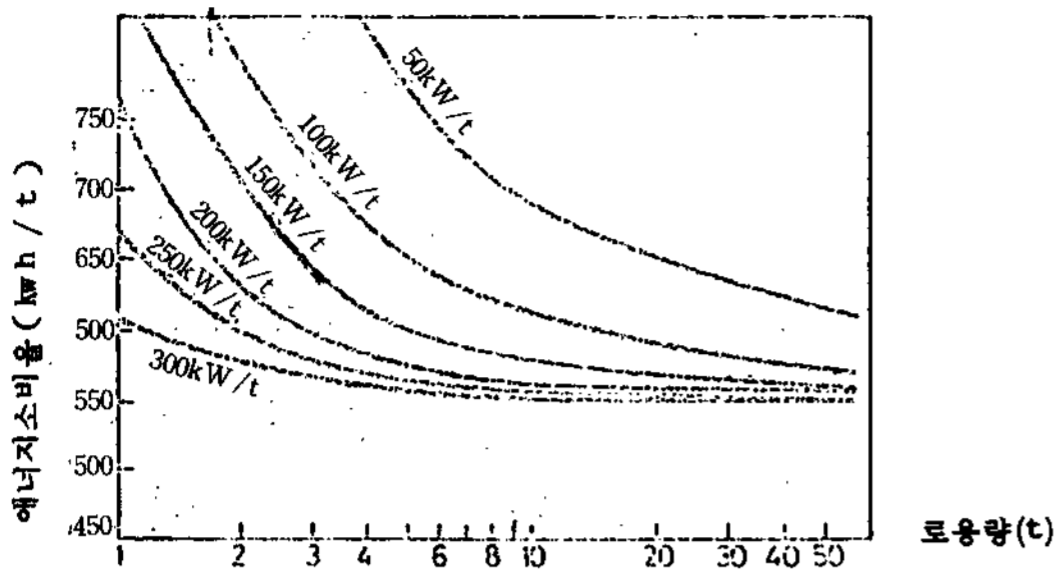


그림 4. 전력밀도가 에너지소비에 미치는 영향

정도의는 주파수, 예로서, 250 Hz가 유익할 수도 있다.

주어진 주파수의 유도로에서 전력밀도가 증가하면, 만일 다른 변수들이 일정하다면, 에너지소비의 감소가 기대된다. 이 인자는 그림 4에 나타나는데, 그림 4로부터 대용량의 고전력 유도로가 가장 에너지소비가 낮음을 확인시켜 준다. 고전력 밀도의 장점은 소형로에서 현저하다.

따라서, 노체크기, 주파수, 전력밀도의 선택이 전력소비에 큰 영향을 미치는 것은 확실하며, 용해설비를 평가검토할 때 신중히 고려할 필요가 있다.

2.3 코일의 설계

무철심유도로에서 공급되는 전기에너지의 약 25%가 냉각수시스템에 흡수되기 때문에, 코일 설계의 효율과 내화물 축로를 개선하기 위한 많은 노력을 기울여 왔다. 와류손실을 줄이고 전기효율을 개선하기 위하여 D형이나 다른 코일단면형상의 사용은 잘 정립되어 있으며, 대부분의 코일설계는 77% 이상의 전기효율을 갖고 있다고 말하고 있다. 이 값은 단층코일이 얻게 될 최대효율로써 주철에서는 82%에 이르고 있다. 따라서, 이런 형의 유도로코일에서 전기 효율을 크게 개선할 여지는 별로 없게 되었다.

변압기 적층원리로 다층코일을 활용하여 유효동(銅)면적을 크게하면, 저주파로에서 코일의 전기손실을 크게 줄일 수 있다고 주장하는 사람도 있다. 이러한 코일의 설계는 재래의 단층코일보다 확실히 더욱 복잡하며, 주물공장의 조업여건에서 적합한 신뢰성을 확실히 하기 위하여 적지않은 발전이 요구된다. 그럼에도 불구하고, 10층으로된 다층 코일을 1톤 무철심유도로에서 사용하여 조업한 결과 종래의 코일에서 얻은 값의 50%의, 코일

손실이 발생함을 알 수 있었다. 이는 대단한 개선이라 할 수 있다.

비록, 종래의 코일에서 그 전기효율을 증가함으로써 얻을 수 있는 이익은 별로 없지만, 코일의 길이:직경 비율과 같은 다른 유도로의 코일설계 변수들은 에너지소비에 대단히 영향을 줄 수 있다는 점은 명심하여야 한다. 코일 설계와 슬라그 라인 문제도 역시 중요하며 뒤에 검토할 것이다.

코일과 도가니의 직경이 증가할 수록 노출되는 용탕표면적이 증가하고, 따라서 뚜껑을 통한 열손실이 추가된다. 직경이 큰 유도로는 슬라그 제거에 시간이 길어지며, 추가로 열에 노출되므로 작업여건이 악화된다. 그러나, 반면에 장입시 충격에 의한 상부 내화물의 물리적 손상을 줄이며, 장입하기가 용이하다.

직경을 줄이면 코일의 길이가 길어지는데, 이 길이를 따라서 주된 열손실이 일어난다. 따라서, 최대의 전체효율을 얻기 위하여 치수에 균형을 요하게 된다.

소형의 중주파 유도로에서는, 직경이 작아서 걸림(Bridging) 문제의 위험이 증가되어 땅딸막한 형상의 유도로를 만드는 경향이 있는데, 이는 걸림의 위험을 줄이며 동시에 냉제조업을 도와준다.

냉각시스템은 출구쪽 온도가 약 60~70℃가 되도록 유속을 설정해야 한다. 유속을 변경시키지 않은 상태에서 온도가 올라가는 것은, 내화물의 마모나 침투를 지시하는 것이다.

2.4 전압조절(Tapping)

유도로를 가동하여 내화물 라이닝이 마모됨에 따라 코일은 금속장입물과 더욱 가까워지고, 그 결과 유도로의 전력 수준을 유도하기 위하여 낮은 전압탭(Tap)을 선택하여야 한다. 따라서 6톤, 50Hz 유도로에서는 아래와 같은 전압수준의 범위로 설치되어 있다.

Voltage tapping (Volt)	tapping의 사용
880	
840	용해
800	
760	
520	보온

설치된 용해 탭들은 가급적 서로 가까워서, 축로작업시 용해전력의 과도한 손실을 피해야 한다.

많은 설비들이 탭 전환사이에서 8~10% 전력손실을 겪고 있으며, 축로작업 중에 3~4번이나 자주 일어나므로, 유도로 성능을 초기에 계산할 때 이를 염두해 두어야 한다.

이 상황은 슬라그 축적문제에 의해 복잡해 질 수 있는데, 그 결과 라이닝 두께의 증가효과가 나타난다. 그리고, 그 결과 코일과 장입물 사이가 멀어진다. 슬라그 축적의 영향은 다른 항에서 검토할 것이다.

2.5 내화물 축로

무철심유도로의 내화물라이닝을 통한 열의 전도는 냉각수 시템에로의 주된 열손실이 된다. 이 열손실의 크기는 탭욕의 표면적과, 내화물 라이닝의 열적 성질과 물리적 크기에 의해 결정된다.

내화물 두께는 열손실을 조절하는데 사용할 수 있다. 그러나, 이것은 또한 장입물과 코일의 간격, 전력인자의 값, 전기효율에도 영향을 준다. 그럼에도 불구하고, 내화물/단열재 시스템으로 무철심유도로에서 채용된 시스템은 단지 경험적으로 정립되어 있는 뿐이며, 단열재에서 개선이 가능하다는 것을 가르키는 증거이다. 대부분 주물공장에서, 무철심유도로는 아스베스토스, 세라믹·화이버, 마이카 또는 복합 단열재를 코일내부에 둘러 붙이고 봉산/붕화산화물 점결제가 첨가된 고순도의 실리카 내화물로 축로된다. 라이닝두께가 90~130mm인 경우 단열재의 두께는 정상적으로는 2~5mm이며, 이것은 전체 열전도값이 1.2~1.4W/mk이다. 단열재를 16mm두께까지 높혀 본 결과 이 전도값은 대략 반으로 줄일 수 있었다. 이러한 조건에서 열손실의 감소가 매우 크게 기대될 수 있다. 그러나, 두꺼운 단열재층을 사용하면 매우 깊은 소결층이 발생한다. 이것은 라이닝의 파괴의 위험을 증대시킬 수 있다. 따라서, 에너지 소비의 절감에 유리하더라도 조심스럽게 접근하여야 한다.

라이닝이 마모됨에 따라 코일과 장입물 사이가 가까와지므로 유도로는 더 높은 전력을 끌 수 있으며 따라서 에너지소비를 개선할 수 있다. 다음과 같은 3톤 무철심유도로에서 700kw로 정격된 경우의 데이터가 이를 나타낸다.

	입력전력	에너지소비
새로 축로함 :	615kw	656kwh /t
1주조업 :	650kw	622kwh /t
3주조업 :	750kw	598kwh /t

용해로 밑바닥을 축로하여 강철외곽 온도를 조절하며, 따라서 조업시 이부분의 계속적인 방출 열손실을 조절한다. 측벽(側壁)두께의 두배가 되는 내화물은 견고한 내화벽돌구조에 지지받아야 하며, 내화벽돌 뒤에는 강철외곽의 온도를 상대적으로 낮은 레벨로 유지하기에 충분하도록 세라믹·화이버가 지지된다. 높은 온도는 계속적으로 불필요하게 과다한 열손실을 가져온다.

불필요하게 높은 손실은 라이닝재료에 점결제를 과잉으로 첨가함으로써도 발생된다. 이 과잉의 첨가는 소결층을 깊게 하고, 코일에 인접한 미소결 분말층의 두께를 줄인다. 이것은 실리카로 라이닝된 출구 냉각수 온도가 65℃인 정상적으로 조업된 6톤 유도로에서 관측될 수 있다. 5% 실리카로 점결된 알루미늄재료로 바꾸면, 냉각수온도가 72℃로 올라간다. 그러나, 점결제를 3%로 떨어뜨리면 온도가 전의 수준으로 돌아간다. 다시 한번 강조할 사항은, 소결층의 깊이의 증가는 라이닝의 파괴에 나쁜 영향을 줄 것이며, 또한 전력 소비를 높인다는 것이다.

2.6 자동전력조절

현대의 유도로는 작업자가 용해작업이나 보온작업에 까지도, 유도로 조건이나 탭전환설정에 관계없이, 요구되는 에너지의 양을 미리 선택할 수 있도록 조절설비가 달려있다. 스위치를 거쳐 노의 전력을 완전히 끊거나 또는 낮은 전력수준으로 낮추든지 간에, 이와 같은 설비를 사용함으로써 과잉의 에너지소비 수준과 용탕온도의 과열 위험을 감소시키며, 결과적으로 로작업자가 미처 확인하지 못하고 실수로 발생하는 라이닝의 침식을 줄일 수 있다.

3. 유도로 용해조업

3.1 유도로의 활용도(가동율)

무철심유도로의 에너지 소비는 그 설비의 활용에 매우 큰 영향을 받으며, 효율적인 조업을 위하여는 설비를 최대한 활용하여야 한다. 가동율은 다양하며, 용해작업에 좌우된다. 유도로 제조업자가 통상 용해성능이라고 말하는 것은, 어떤 온도로 1톤의 금속을 용해하는데 소요되는 kwh단위로 표현되며, 시방서의 용해속도는 최적 조건인 경우에 얻어진 데이터라는 점을 유념해야 한다. 실제 조업에서는 이런 최적조건하에 있는 경우는

드물다. 따라서, 어떤 특정한 주물공장에서 실제 존재하는 조건하에서 이루어지는 실제의 활용을 적당히 참작하여 주물용해설비의 구입을 고려해야 하며, 시방서의 75% 정도라면 충분한 여유로 받아들여진다.

그러나, 역시 기억하여야 할 사항은 용량이나 전력을 추가하면 시설투자비와 운영비 모두 올라가므로, 지나친 여유를 확보하려는 것은 피하여야만 한다.

최근 영국에서 무철심유도로에 대한 조사에 의하면, 실제 용해속도는 시방서에서 언급된 성능의 82%이며, 그값은 이값의 60~110%라고 나타났다.

이들 데이터에서부터 실제의 용해효율의 값을 구하려는 노력으로, 세가지 주파수의 유도로에 대하여 제조업자의 설비시방의 용해속도와 실제 작업에서 얻어진 속도를 입력전력에 대하여 그래프 그림 5~7에 나타내었다. 그리고, 데이터는 아래와 같이 요약된다.

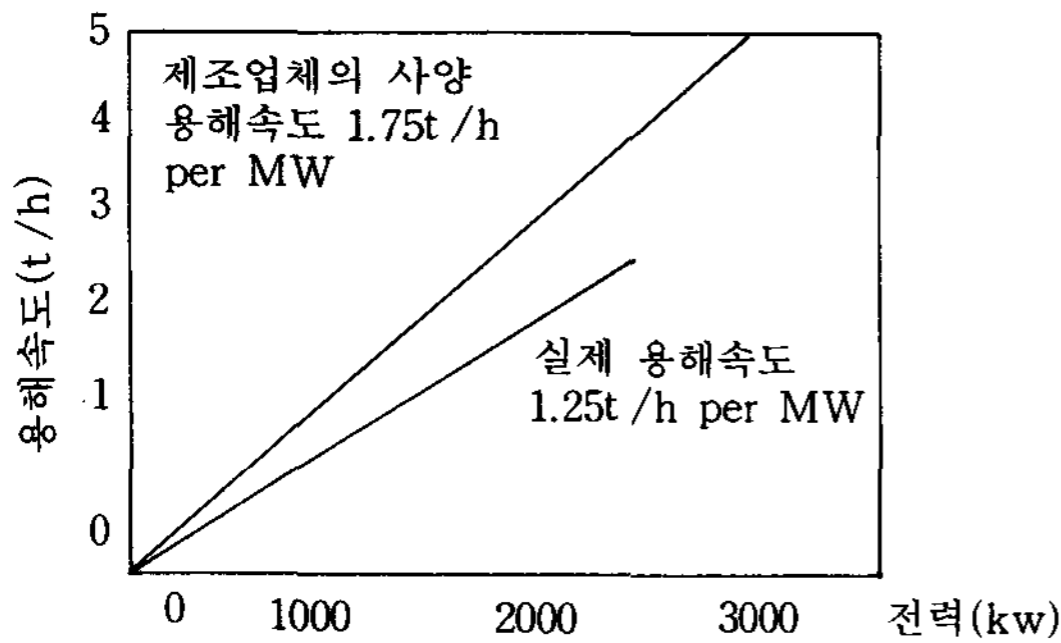


그림 5. 저주파로에서 용해속도

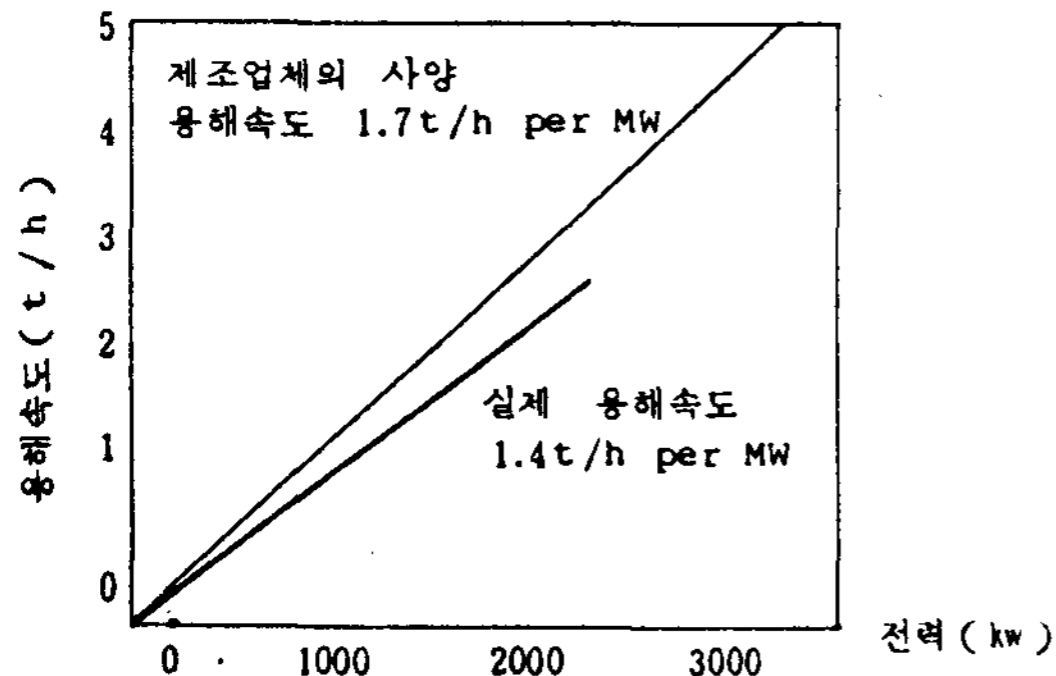


그림 6. 3배주파로에서 용해속도

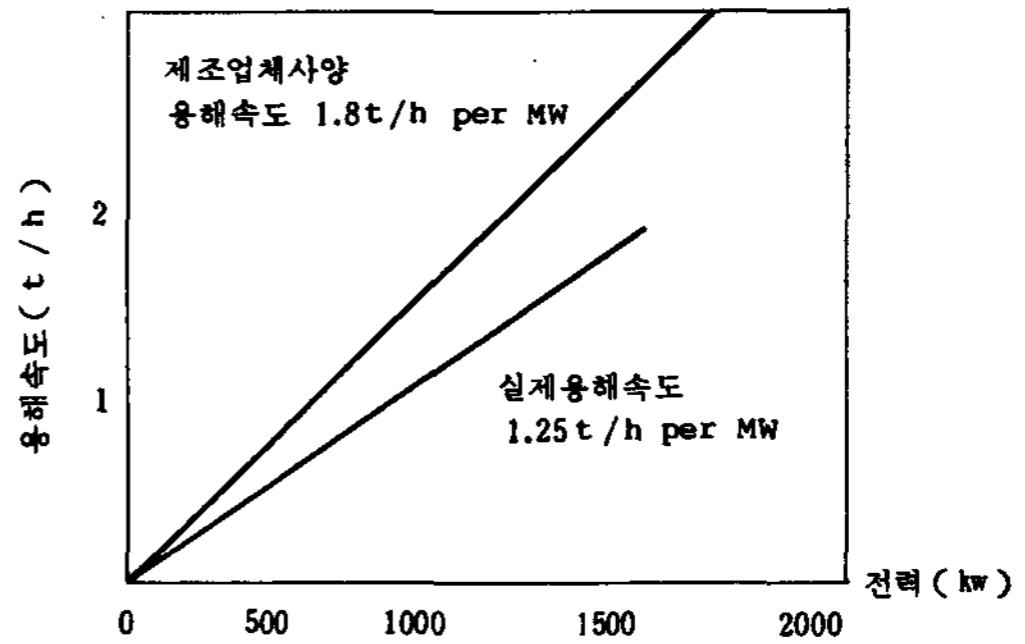


그림 7. 중주파로에서 용해속도

유도로주파수 (Hz)	용해속도 (t/mwh)		효율 (%)
	시 방	실 제	
450	1.85	1.25	69.4
• 150	1.70	1.40	82.4
50	1.75	1.25	71.4

이러한 여건에서는 대부분의 유도로가 그 설계 능력보다 기능이 낮으므로, 에너지소비의 수준은 나쁜 쪽으로 영향을 미치리라 예측된다. 에너지소비에 대한 이 영향은 표1에 데이터로 요약되어 있으며, 유도로의 실제 성능에 적용된다.

전력입력수준을 제약하거나 유도로의 전력입력을 차단하여 용해속도 또는 가동율을 낮추는 어떤 인자도 에너지 소비값이 나쁜 쪽으로 작용한다.

표 1. 무철심유도로 : 최적조건 및 실제조업조건에서의 에너지소비

유도로용량 (톤)	전력 (kw)	에너지소비 (kwh / t)	
		100%활용시	실제조업평균(%증가)
2	700	580	700(21)
3	700	618	760(23)
5	800	590	718(22)
5	1500	620	700(13)
6	1500	625	650(4)
10	1800	571	762(33)

3.2 유도로의 출탕시간과 빈도

물철심유도로에서 전(全)출탕-장입 조업을 하고, 이 조업을 수행하기 위하여 유도로의 전력을 줄이거나 끊어야 할 경우에는, 이 설비의 유효용해속도는 확실히 떨어지고, 따라서 에너지소비는 올라갈 것이다.

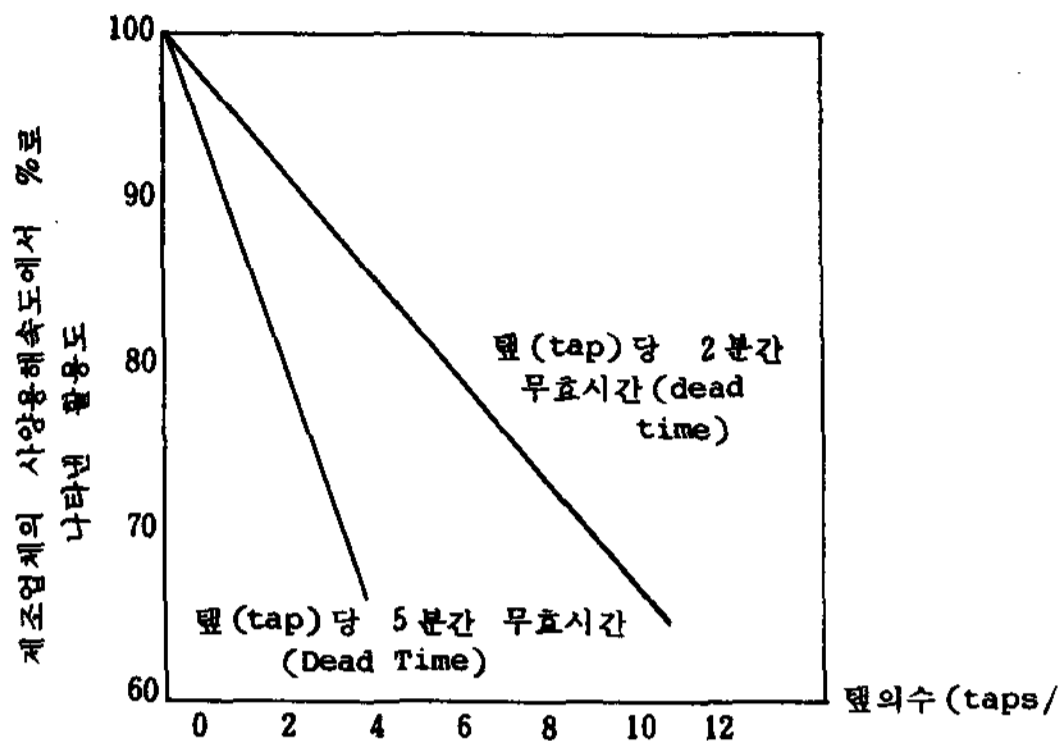


그림 8. 탭핑빈도(tapping frequency)와 유티시간이 용해성능에 미치는 영향

출탕빈도수와 출탕당 무효시간(dead time)이 노의 활용도에 미치는 영향을 그림 8에서 보여주는데, 둘중의 어느것이라도 증가하면 현저하게 노 성능을 떨어뜨리고, 결과적으로 에너지소비를 증가시키는 것을 그래프의 곡선이 보여준다.

종래의 탭전환기(off-load tap-changer) 대신 전자식 무단전력조절기(on-load solid-state stepless control)를 사용하면, 탭핑과 장입시 악영향을 줄이는데 도움이 될 것이다. 왜냐하면, 완전히 전기를 끊지 않고 최대 수준에서 약 50~60% 정도로만 유도로전력이 떨어지기 때문이다. 더욱이나, 여러개의 용해로와 보온로를 통한 이중 용해법(duplexing)을 채용하면, 용해작업에서 출탕이나 장입시 에너지소비의 악영향을 줄일 수 있을 것이며, 이것은 뒤에 설명하기로 한다.

3.3 잔탕조업

전(全)출탕-장입 조업은, 앞에서 검토한 바와 같이, 전력입력수준과 시간을 실제로 시키므로써 에너지소비에 영향을 미친다. 또한 잔탕조업도 용해성능에 영향을 미칠 것이다. 잔탕조업은 출탕 후 노내에 탕욕으로 용탕의 일부를 남겨놓는 작업 방법이다.

저주파유도로에서 코일은 공칭 도가니용량의 약 2/3을 통상 남긴다. 이는 스타팅플러그(starting-plug)의 용해를 돕고, 더욱 중요한 것은 탕욕안의 교반을 억제하기 위해서다. 장입물이 코일을 완전히 채워야 쏠전력(full power)를 끌 수 있으므로, 대부분의 저주파유도로는 최고 성능을 내기 위하여 노용량의 약 2/3정도 용량을 가지고

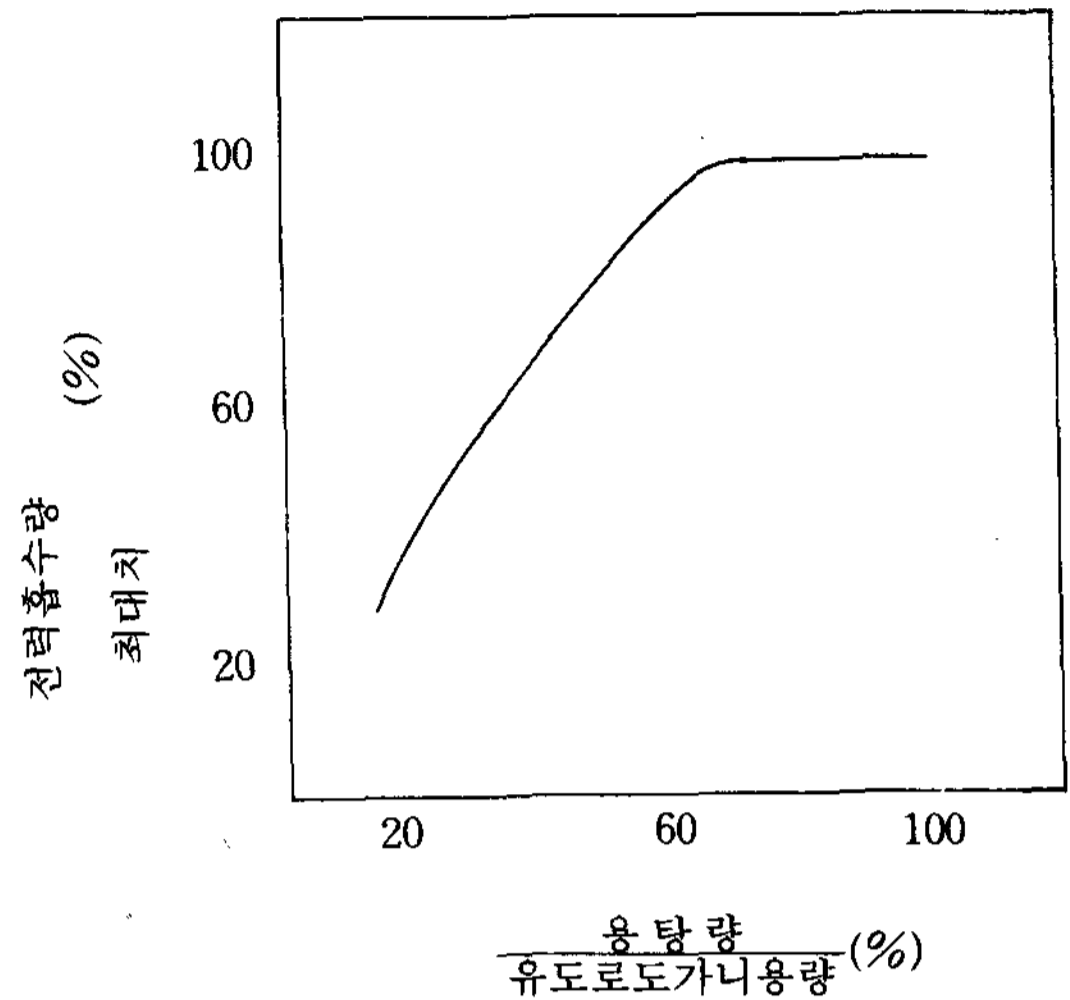


그림 9. 저주파 무철심유도로에서 흡수된 전력과 도가니 내의 용탕량과의 관계

조업을 할 필요가 있다(그림 9). 실제값은 코일/도가니의 기하학적 구조에 의해 크게 결정된다.

용해작업에서 이런 양상과 그의 전력소비의 영향은 6톤로로 시험조업하여 설명되었다. 적합조건인 노용량의 67%(4톤) 탕욕을 사용하면 에너지 소비수준이 615kwh/ton이며, 노용량의 단지 33%(2톤)의 탕욕크기로는 650kwh/ton을 얻었다. 이경우에, 에너지소비의 증가는 10%로 용해속도의 저하를 수반한다.

비록, 중주파유도로에서는 냉제조업이 만족할 만하다고 통상 인식되고 있지만, 10~20% 잔탕을 사용하면 성능을 개선해 준다. 특히 가변주파설비나 중간 정도의 주파수(예로서, 250 Hz)에서 특히 그러하다.

3.4 슬라그 작업과 문제점

유도로에서 슬라그 제거 및 도가니벽에 슬라그가 쌓이므로 야기되는 문제는, 활용도와 전력입력에 영향을 주어, 용해속도와 에너지소비 양쪽의 측면에서 노성능에 영향을 현저히 미친다. 슬라그를 제거하는 작업은 용해작업자가 직면하는 가장 불유쾌한 작업의 하나이다. 비록 슬라그를 걷어올리는 기계(slag-grab)의 도움을 받기도 하지만, 대부분의 로는 수동으로 슬라그를 제거한다.

표 2와 그림 10에서는 영국의 무철심유도로의 관련 데이터가 포함되어 있는데, 매 장입(Charge)당 대부분 1회 슬라그 제거 작업을하며, 그 시

표 2. 무철심유도로에서 슬라그제거 빈도수와 시간, 그리고 슬라그 축적문제

	저주파로	삼배주파로	중주파로	총
슬라그제거작업				
차이지당 횟수				
1	38	11	15	64
2	9	4	1	14
3	3	2	-	5
시간(분)				
< 2	2	2	3	7
2-4	26	4	5	35
4-6	15	8	1	24
6-8	4	2	1	7
8-10	7	-	3	10
> 10	4	2	-	6
슬라그축적문제				
전력입력이 영향을 받는 유도로				
슬라그축적을 제거하기 위해 고온에서 조업하는 유도로	34	6	5	45
총유도로 기수	32	6	5	43
		94		

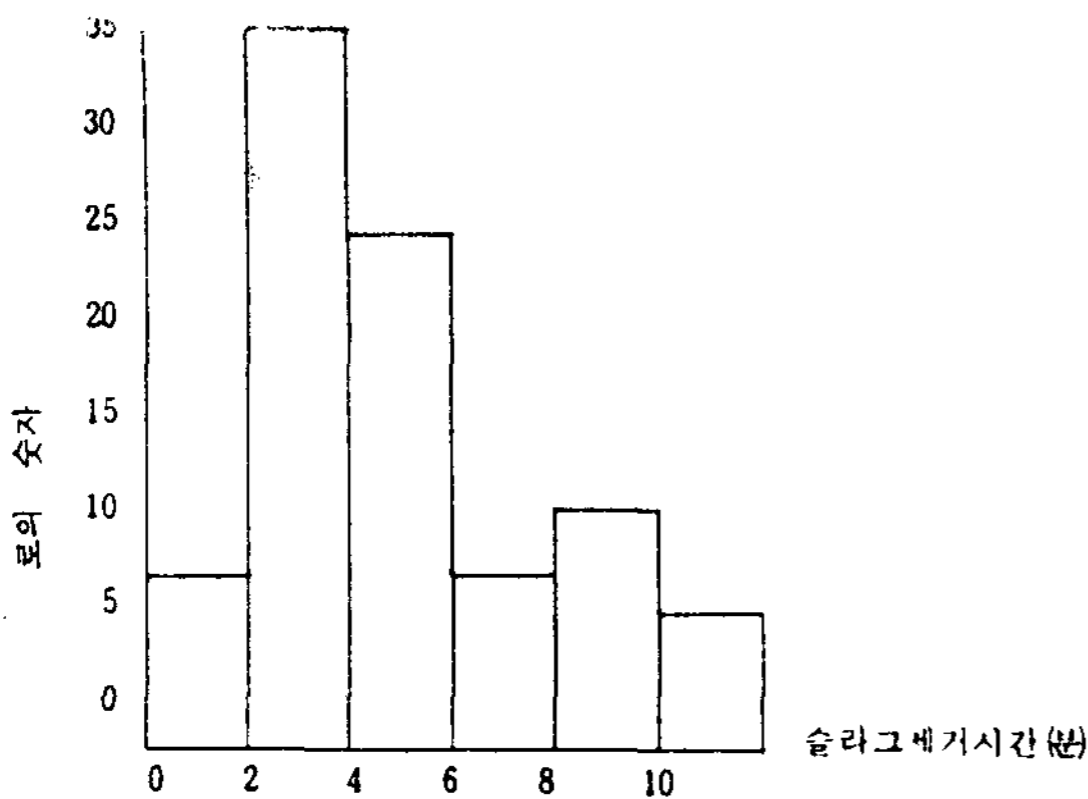


그림 10. 주물공장에서 슬라그제거시간의 분포

간은 2~6분 범위임을 보여준다. 그러나, 반면에 다른 많은 주물공장에서 슬라그 제거 작업에 장시간 소요되는데, 분명히 이들 공장은 이런 작업이 줄어들면 성능에 큰 개선이 있을 것이다. 슬라그 제거작업의 시간을 줄이려는 노력으로, 어떤 공장들은 노의 출탕구(Spout)를 넓게하고 용탕과 슬라그를 함께 이동래들에 출탕하기도 한다. 이런 방법은 유도로가 통상의 슬라그 제거방법의 경우보다 신속히 전력이 입력되는 상태로 돌아가게 한

다. 그리고, 래들에서 슬라그를 제거하는 것은 노 내에서 보다는 용이하다. 그러나, 이 방법의 결점은 슬라그가 함께 들어가고, 따라서 주물결함이 발생할 가능성이 있다는 점이다. 만일, 이 방법을 채용하려면, 래들의 청결을 적절히 관리함이 절대 필요하다.

슬라그 제거작업에서는 노의 내벽에 슬라그가 들어붙은 문제를 경험하게 될 것이다. 그 위치는 용탕표면의 선이나 이 수위보다 약간 아래이다. 이런 상황에서는 도가니의 직경이 실제적으로는 작아지기 때문에 장입을 곤란하게 만들며 용해로의 조업가동에 악영향을 준다. 더욱 중요한 것은, 이로 인하여 입력되는 전력량이 제약될 것이라는 점이다. 확실히, 이것은 노의 용해성능을 떨어뜨리고, 또한 에너지소비를 증가시킬 것이다. 이런 문제를 겪은 대부분의 주물공장은 슬라그의 축적을 막거나 최소화하기 위하여 필요 이상 고온으로 용해하거나, 부착된 슬라그를 제거하기 위하여 때때로 고온용해를 하는 조업을 한다. 그런데, 어떤 조업을 택하든 결과적으로 에너지소비를 증가시키게 된다.

표 2에 제시된 데이터를 보면 조사한 유도로들 중 약 48%가 슬라그축적에 의한 전력입력감소에

의하여 문제를 겪었으며, 이 설비들의 많은 숫자가 이 슬라그를 제거하기 위하여 정상보다 30~50℃ 고온으로 때때로 조업하였다. 한 주물공장에서는 2기의 10톤, 1800kw의 유도로에 축적된 슬라그를 제거하기 위하여 보통 1450~1500℃로 정상 조업하였으나 과열조업과 정상조업의 에너지소모량을 서로 비교하였다. 첫번째 예에서, 한 용탕은 1580℃로 과가열하고 또 하나는 1450~1470℃로 출탕하였는데, 평균 에너지소비율은 605kwh/t이었으며 슬라그제거하지 않는 용해작업은 평균 에너지소비율이 571kwh/t이었다.

과열용해인 경우에 있어서는 용탕온도는 정상 출탕온도보다 100℃정도 높았으며, 이것은 주물공장에서 정상적으로 채택하는 것보다 매우 높은 온도이다. 따라서, 평소보다 에너지소비가 증가하리라 예측되었다. 정상보다 30~50℃ 높은 용탕은 에너지소비가 약 10% 증가한다고 측정되었다.

슬라그의 부피와 축적문제는 장입재료의 품질에 크게 좌우된다. 모래, 산화물, 도금된 고철과 같은 많은 이물질들을 갖고 있는 "오염된"장입물을 사용하면, 심각한 슬라그 제거작업과 슬라그축적 문제를 야기한다. 따라서, 경제적으로 이런 재료를 사용하는 것은 이의 구입비용 뿐만 아니라 그로인해 야기되는 어려움, 생산량 감소와 비용, 그리고 에너지소비의 증가도 함께 고려하여야 한다. 앞에서 언급된 조사한 공장들 중에서 매우 많은 용해작업자(약 32%)가 슬라그 축적문제를 최소화 하려는 노력으로, 회수철을 쇼트·블라스팅하였다는 것은 흥미롭다.

쇼트·블라스팅 작업은 분명히 용해비용을 높일 것이다. 주물공장에서 장입재료의 선택여지가 없는 심각한 경우에는, 유도로 내화물로 비싼 알루미늄이나를 사용하거나 용탕에 소량의 용제를 사용하여 해결하려는 경우도 간혹 있다. 후자의 방법은 노내부슬라그 축적부분 이하의 양호한 상태로 남아있는 라이닝을 용제가 침식하므로 주의깊게 사용하여야 한다.

슬라그 축적문제나 불규칙적인 라이닝마모를 방지하는 더 좋은 해결법으로는, 도가니의 치수와 코일의 위치를 올바르게 선택하는 것이다. 특히 중요한 것은, 코일의 높이와 직경의 관계, 전력부위와 도가니저부의 위치, 그리고 전력부위 상부와 용탕표면 사이의 거리이다.

그림 11에서는 6톤, 1200kw 유도로를 8주 작업한 후 코일의 전력부위와 관련된 마모모양과 슬

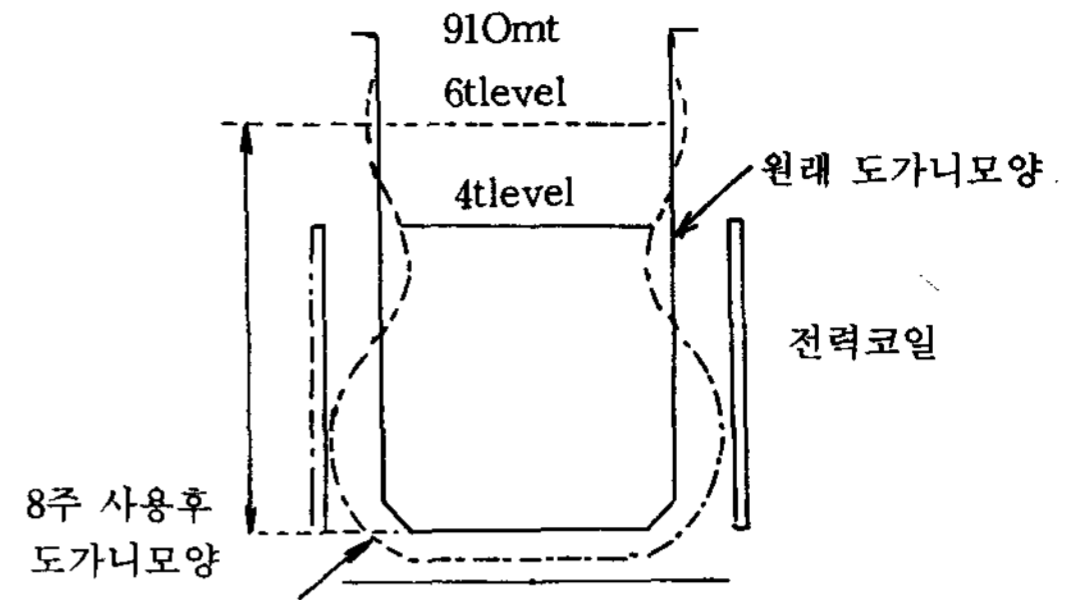


그림 11. 6톤 무철심유도로에서, 전력코일의 원래 위치와 관련된, 라이닝의 마모 및 슬라그 축적 모양

라그 축적을 볼 수 있다. 이 경우 가장 얇은 라이닝 단면은 슬라그 축적지역 아래의 도가니가 움푹 파인 곳으로서, 두께가 25mm정도 된다. 노체바닥 라이닝은 50mm이내의 두께이고, 슬라그 최대 축적부위는 3톤 용탕 수위의 출탕구 반대편 쪽으로서 대략 125mm정도 된다.

그림 12는 코일을 간격을 벌리어 유효높이를 115mm 더 높이고, 무효의 여유높이를 2톤에서 1톤으로 줄인 효과를 보여준다. 이 그림도 8주간 용해한 후의 것인데, 노저부와 슬라그라인 아래부위 모두 남아있는 내화물의 두께가 두꺼움을 보여준다. 또한, 슬라그 축적도 대략 최대 40mm 줄어준 것도 확실하다.

슬라그 축적이 감소되면 장입의 용이성, 도가니 용량, 전력능력의 증가라는 점에서, 분명히 용해 성능을 개선한다. 그러나, 이 특별한 경우에서 코일의 위치의 변동은 약간의 단점도 일으킨다.

(ㄱ) 코일을 높이면 용탕 표면에서 교란을 심하게 하므로 소량의 용탕이 로뚜껑이나 때로는 노체

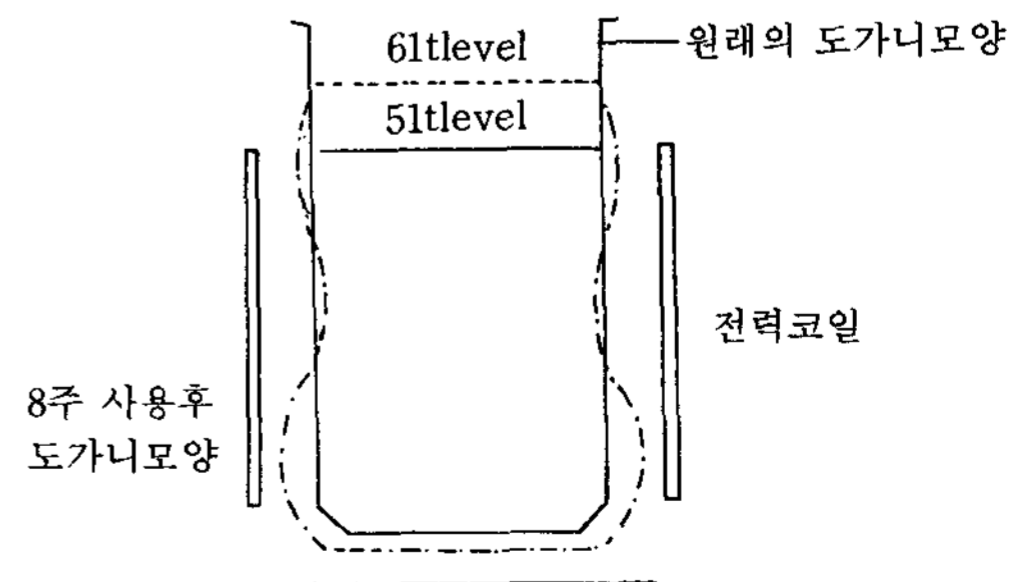


그림 12. 6톤 무철심유도로에서, 전력코일의 수정된 위치와 관련된, 라이닝의 마모 및 슬라그 축적 모양

주변으로 튀긴다. 노의 상부 가장자를 높임으로서 조절할 수 있으며, 부수적으로 용탕표면과 뚜껑 사이의 거리를 증가시키므로 열손실도 줄인다.

(L) 3톤의 용탕이 있고 1톤을 재장입하여 조업할 때 변경되기 전에는 1150kw이상을 끌 수 있으나, 변경후에는 1000kw로 줄어들고, 다음번 1톤이 장입될 때까지는 그대로 머무르게 된다. 코일회전수의 가감으로 이 상황을 개선할 수 있다.

3.5 장입재료

장입재료의 청결도는 중요하다. 또한 개개의 크기도 중요하며, 각종 주파수의 유도로의 냉제조업 특성에 영향을 준다. 냉제조업에서 너무 크기가 작은 고철을 장입하면 유도로에 공급되는 전력량이 감소하게 되며, 그 결과 용해속도가 저하하고 전력소비가 커지게 된다.

그리고 저밀도의 재료를 사용하면 잦은 추가장입으로 작업시간이 길어지고 입력될 수 있는 초기 전력의 감소에 의하여 에너지소비에 직접 영향을 미친다. 더구나, 가볍고 낮은 밀도의 고철, 특히 기계설과 같은 재료는 “걸림(Bridging)” 문제를 야기하게 되고, 따라서 장해물을 제거하는동안 전력이 감소하거나 중단되게 된다.

대부분의 전기로에서는 주물공장에서 발생하는 회수철과, 그밖의 강고철과 첨가물을 사용해야 한다. 강고철은 넓게 변동이 있는데, 한 주물공장에서는 가벼운 프레스물의 0.75t/m³에서 중량 편칭물의 2.0t/m³ 이상으로 밀도가 변동하였다. 가벼운 강고철만을 장입할 경우에는, 한번의 장입으로 필요한 부피를 모두 유도로가 수용할 수 없으므로 여러번 장입하여야 한다. 이러한 여건에서는 전력 중단시간을 줄이기 위하여 강고철을 섞어서 장입하는 것이 바람직하다. 이런 문제점이 있는 곳에서는 용탕표면 위의 여분의 라이닝은 유도로 설계에 중요하다.

젓었거나 기름이 묻은 고철을 사용할 경우는, 용탕이 튀기거나 기름이 연소하는 위험을 최소화하기 위하여 전력을 줄일 경우도 있다. 2교대 연속 용해조업에서 2기의 10톤유도로 조업에서 이와같은 작업의 영향은 아래와 같다.

	교대 1	교대 2
용해중량, 톤	15.0	15.4
전(全)조업시간, 시간	6.83	5.30
전력중단시간, 시간	1.64	0.61
*용해로 활용도, %	76.0	88.5

$$*용해로\ 활용도 = \frac{\text{용해전력이\ 걸려있는\ 시간}}{\text{전(全)조업시간}}$$

제일 작업조는 용탕튀김에 의한 지연과 젓은 고철의 장입에 따라 일어나는 작업중단 등과 관련되는 전체 중단시간이 1.1시간으로서 전체 전력중단시간에 포함된다.

장입물에 묻어 있는 수분을 제거하기 위하여서는 열이 공급되어야 하며, 이는 또한 에너지소모를 더하게 하여 준다.

과거에는 서로 다른 장입물을 용해하는데 필요한 에너지는, 그 화학성분에 따라서 다르다는 것은 자명한 것으로 여겨져 왔다. 그러나, 실제로 예비작업을 해보니 그 차이는 상대적으로 적음을 알 수 있었다. 1.3톤, 300kw 저주파 유도로에서 수행된 이 작업의 결과는 표3에 출탕-장입 조업에 대하여 요약되어 있다. 주철 보오링 기계설의 경우 낮은 값을 얻게된 것은, 이런 타입의 재료는 산화되기 쉽고 따라서 수율이 떨어진 때문인 것으로 여겨진다.

가탄제의 종류도 에너지소비에 영향을 줄 것이다. 코우크스가탄제를 사용할때 탄소수율을 높이기 위해서는, 흑연가탄제에 비하여 더 높은 온도로 용해작업을 하여야 한다. 또한, 이것은 전기로에서 서로 다른 가탄제를 사용할 경우 경제성을 평가할 때 고려를 요하는 인자이다.

어떤 경우에는, 고온에서 가탄제가 녹은 후 연이어 탕욕에 금속장입물의 일부(예로서, 회수철)를 장입함으로써 코우크스가탄제의 사용에 의한 전력소비를 최소화할 수 있다. 금속의 첨가량은 출탕되는 용탕의 온도가 목표출탕온도 또는 그에 가까운 온도가 될 수 있도록 확인하여 조절되어야 한다.

표 3. 여러가지 장입재료로부터 1450℃의 용탕을 만드는데 소요되는 평균에너지

재 료	수 율 (%)	평균에너지소비 (kwh/t)
주철제 보오링 기계설	97.5	598
평평한 주철고철+첨가물	98.8	619
강봉절단물+첨가물	98.6	625
선철	99.1	628
중량의 건축용강재+첨가물	98.6	668

3.6 로뚜껑과 흠(Fume)추출

로뚜껑으로부터의 열손실은 노설계와 용해조업에 의하여 영향을 받는다. 대부분의 경우, 유도로 상부에 잘 맞는 뚜껑을 사용할 경우에는 열손실이 상대적으로 적어서, 6톤로에서는 9.4kw, 10톤로에서는 13.1kw정도가 된다. 그러나, 뚜껑이 덮여 있지 않는 탕욕으로부터의 복사열손실이나 열려 있는 뚜껑의 아랫쪽으로부터 유도로의 작업대로 흐르는 열손실은 대단하며, 6톤과 10톤 용량시 각각 70kw와 130kw 정도에 달한다. 따라서 출탕, 장입, 슬라그제거, 용탕채취를 위해 로뚜껑을 여는 경우 가급적 신속히 닫으려는 많은 노력이 기울여 지어야 한다. 보고에 의하면, 로뚜껑의 밀폐가 잘 안되고 빠른 속도로 흠(Fume)을 빼내는 시스템에서는 에너지손실을 70kw까지 경험하였다고 한다. 그리고, 이것은 에너지소비를 최소화하기 위한 좋은 설계의 보조설비를 갖추어야 한다는 뜻이 되기도 한다.

3.7 장입 취급(Handling)

용해공장에서 재료의 이동은, 장입물을 고철장에서 유도도로 이동하고, 용탕을 유도도로에서 주형이나 보온도로 옮기고, 슬라그를 제거하는 작업 등을 포함한다. 출탕작업과 슬라그의 운반이 유도로의 활용도나 전력소비에 미치는 영향은 앞에서 언급하였으며, 여기서는 장입재의 취급만을 고려하고자 한다.

지난날에는 무철심유도로의 용량도 작았고 생산량도 적었기에, 자체에서 재료의 운반 문제를 비용을 적게 들이고 해결할 수 있었다. 그러나, 용량과 용해속도가 증가함에 따라 다수의 용해로를 사용하게 되며, 이로 인한 안전사고의 위험도 높아지게 되므로, 장입물의 취급과 준비에 더 많은 주의를 기울이게 되었다.

적용되는 장입작업은 개개의 주물공장의 여건에 따라서 매우 다양하다. 상대적으로 늦은 수동의 직접 자석식 방법은 노상부의 열림에 의해 열손실이 크고, 활용도가 감소된다. 스킵(Skip)식은 미리 무게를 달아 놓는다면 몇가지 잇점이 있다. 진동기는 모든 장입물의 형태에 대하여 동시에 적용할 수는 없지만, 효과적인 장입방식이다. 바켓(Drop-Bottom Bucket)식의 사용이 많아지고 있는데, 이와 같은 설비의 신속한 장입 능력은 활용도를 개선하고 에너지 손실을 감소시킬 수 있게 한다.

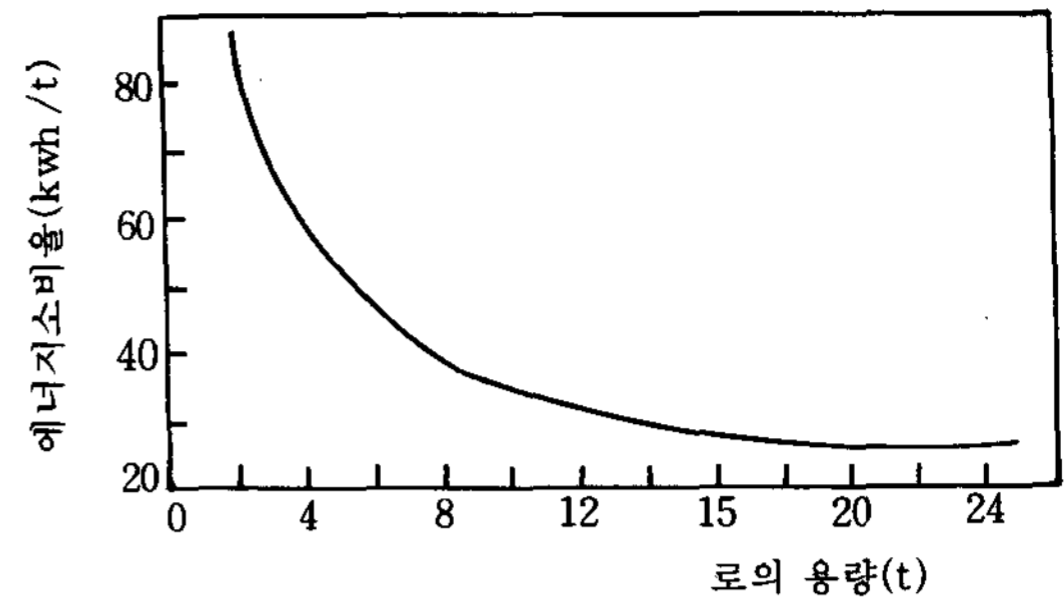


그림 13. 1450℃에서 최적 잔탕조업과 냉재조업의 경우 에너지소비의 증가량 비교

3.8 복수교대조업

무철심유도로는 1교대조업을 하며 주말에는 쉬는 경우가 많다. 토요일(또는 금요일)조업 후, 유도로는 그대로 냉각되는 채 방치되거나 가스토치로 가열하여 라이닝을 적색으로 유지하거나 한다. 일요일 밤에는 전력을 넣어 월요일 조업의 개시 준비가 되도록 탕욕을 만든다.

라이닝을 재가열하여 금속을 용해 및 주입 온도까지 승온하는 데는, 어떠한 경우라도 다량의 전력이 요구된다. 그러나, 연속교대작업에서 에너지소비율은 많이 감소된다.

저주파유도로에서 출탕온도가 1450℃일 때 냉재조업이 잔탕조업에 비하여 에너지소모가 어떻게 변하는가를 그림 13에서 알 수 있다. 곡선을 보면 6톤로에서 순수한 냉재조업을 하는 경우 최적의 잔탕조업을 한 경우보다 에너지소비율이 45kWh/t 추가되는 것을 알 수 있다. 이 수치는 오히려 낮은 감이 있다. 정상적인 잔탕조업보다 10~15% 증가하는 것이 아마도 더욱 실제적인 것으로 보여진다.

저주파로의 주 5일간 조업에서, 어떤 경우는 매일 냉재조업으로 시작하는 대신에 야간에(4일간) 용탕을 보온하기도 하는데, 분명히 이런 조업도 에너지소비에 영향을 주며, 그 영향의 크기도 역시 교대조업에 좌우된다.

표 4에서는 실제조업조건에서 전력손실%와 용해소요에너지를 제시하는데, 5톤용량과 6톤용량의 무철심유도로에서의 평균값이다. 표에서 두번째 행은 용탕이 노용량의 70~80%인 경우, 1425℃로 보온하였을 때의 에너지손실을 나타낸다. 이때의 보온용 전력은 135kw 요구된다.

1교대작업(8시간)에서 매주간 보온시간은 64시간이 될 것이다 (16시간/일×4일). 그리고 2교대

표 4. 5톤과 6톤 저주파 무철심유도로에서 용해 및 보온에의 평균전력손실과 유효한 가열전력

	1525℃로 용해	1425℃에서 보온
유효한열	63.2	0
변압기손실	1.2	6.0
상평형손실	0.7	0.7
질력-인자교정	0.9	1.0
코일저항손실	17.5	18.4
라이닝전도-열손실	10.1	52.7
유도로열손실	6.4	21.2
전력소비(kwh /t)	100.0	100.0
보온전력(kw)	-	135

작업으로는 30시간으로 줄이고, 3교대작업이 되면 제로가 된다. 보온시 요구전력을 135kw라고 보면 1교대작업에서 보온에 소비되는 전력은 주당 8640kwh(135kw×64h), 그리고 2교대작업에서는 4320kwh가 소비된다.

3.9 복수의 용해로 설치

활용도를 높이고자 하여 노의 배열이나 조합을 다양하게 시도한다. 가장 단순한 일전원·일로체인 경우 자본지출, 설치비용, 요구노동력의 측면에서 유리하다. 그러나, 불행하게도 이러한 설비는 다 품종 소량 주문생산 형태의 소규모 업체로서 간헐적인 주입을 행하는 경우에 적합하다. 용탕이 소량씩 자주 필요한 경우에는, 활용도는 나빠지며 전력소비는 과잉이 될 것이다.

전환스윗치로 연결된 일전원·이로체식에서는 하나의 노체가 용해하는 동안 다른 노체는 출탕을 행하면 전력의 활용도가 높아질 수 있다. 이 배열에서는 전력이 한개의 노체에만 공급될 수 있으므로, 용탕 온도가 매우 중요한 경우는 불편하다. 또한, 예를들어서 조형작업장의 작업중단이 원인이 되어 용해계획에 차질을 줄 때에도 불편하다. 이런 단점들은 추가 보온용 전력이 공급되면 해결될 수 있다.

앞서 언급되었던 5톤 및 6톤 무철심유도로에서, 표4에서 주어진 것과 같이 보온에 필요한 전력은 135kw이다. 만일 2기를 설치하였다면, 1기는 톤당 600kwh를 사용하여 시간당 2톤을 용해하고, 다른 것은 135kw를 사용하여 시간당 2톤을 보온하며 출탕할 경우, 용탕 톤당 총 에너지소비량은;

$$600 + \frac{135}{2} = 668 \text{ kwh / t}$$

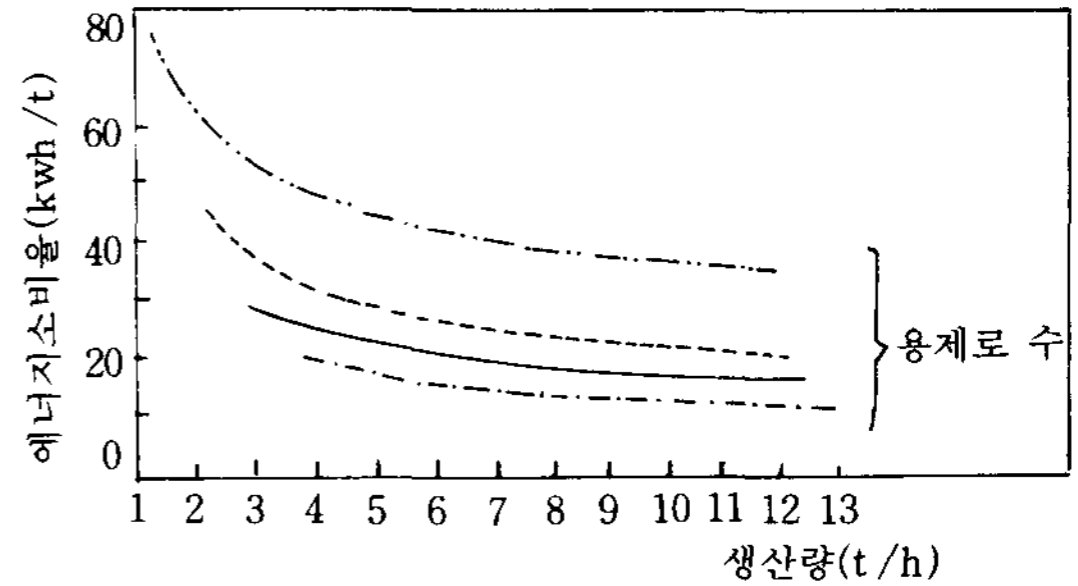


그림 14. 저주파로에서 여러 용해로에서 용탕을 보온하는데 사용할 경우의 추가 에너지소비량

이다. 시간당 2톤의 요구생산량은 단일 용해로에 보온로를 사용치 않을 경우에는 매우 감소될 것이다.

그림 14는 서로 다른 숫자의 무철심유도로들을 보온로로 사용하였을 경우의 에너지소비율을 나타낸다. 보온로는 용해로와 같은 용량과 정격(定格)을 가지고 있으며, 용해 및 주탕용으로 번갈아 사용된다. 이 곡선을 보면 2톤/시간의 생산량에서 1대의 용해로가 보온으로 소비하는 에너지소비의 증가는 62kwh/t임을 알 수 있으며, 이것은 전술한 동일 생산량에서 예시한 68kw/t과 잘 일치된다는 것을 보여준다.

용탕이 계속 필요하고 전조업을 통하여 용탕요구량이 변동하는 중대형 주물공장에서는, 용해와 조형작업 사이의 완충저장작용을 하는 채널형보온로를 사용함으로써, 유도로의 성능을 매우 개선할 수 있다. 이러한 설비에서는 매우 높은 활용도를 얻을 수 있다.

2.10 출탕온도 및 용탕이동방법

주철의 출탕온도는 에너지소비에 중요한 영향을 미친다. 주물을 생산하는 데 만족할만한 온도 이상으로 출탕하는 것은 불필요하다. 에너지소비를 증가시키고, 용해시간을 늘리며, 내화물을 침식시킨다. 그림 15에서는, 3개의 제조회사가 제시하는, 주철용탕 1톤을 100℃ 과열하는데 필요한 전력을 보여준다.

주물공장에서 선택하는 출탕온도는 생산하고자 하는 주철의 종류, 제품의 단면적크기, 유도로에서 주형까지 용탕을 이동할 때 발생하는 열손실에 의하여 결정된다. 첫번째 두 인자들은 특정 공장 조건에 따라 사실상 고정되지만, 채용하는 용탕의 이동 시스템은 크게 변한다. 그리고, 공장의 설계단계에서 수반되는 열손실을 고려에 놓는 것이 중요

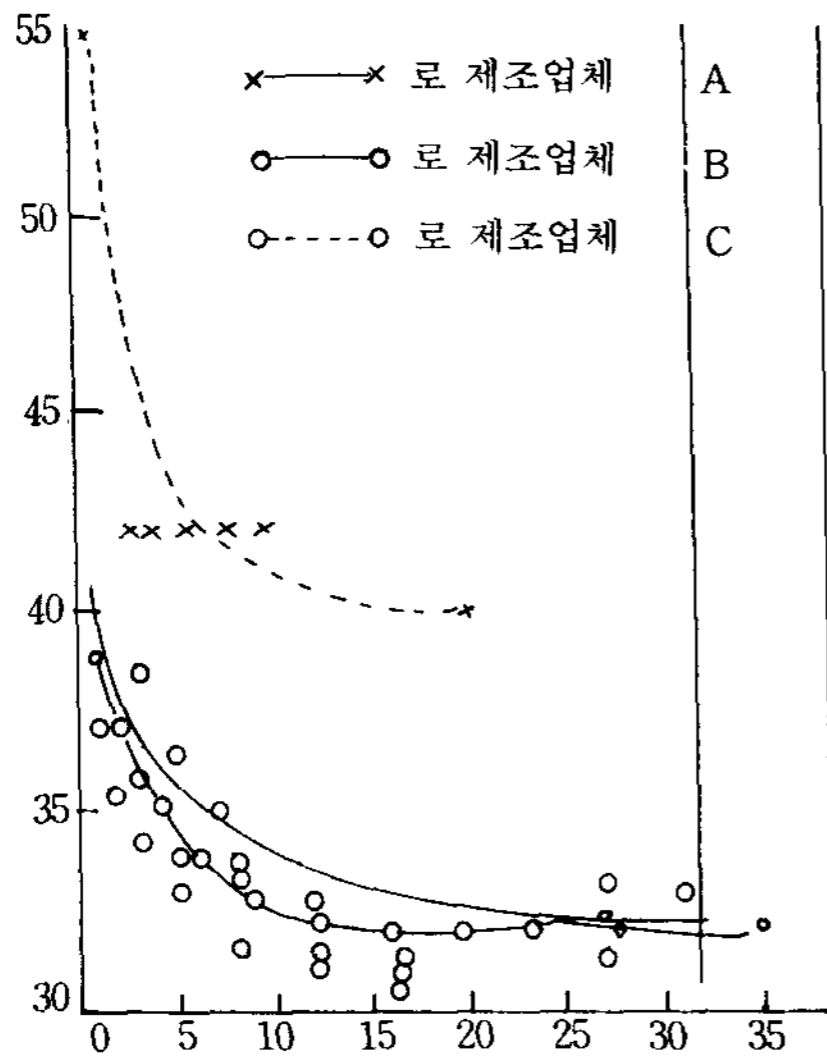


그림 15. 저주파로에서 100℃ 과열시키는데 소요되는 전력(로제조업체의 사양 값에서)

하다.

4. 결 언

유도로에서 용해 및 보온작업의 에너지소비는 공장과 유도로의 설계인자와 유도로조업인자에 관련된다. 그러나, 대부분의 경우에서 가장 중요한 인자는 유도로의 활용이며, 그것은 또한 개별 공장의 환경에 좌우되는 여러 많은 인자에 의하여 다시 영향을 받는다.

에너지소비에 영향을 미치는 설비배치, 유도의 설계 및 조업에서 중점적으로 고려해야할 점들은 다음과 같이 요약한다.

4.1 공장설계의 최적화

- (1) 소요 유도로의 수(보온로 포함)
- (2) 유도로의 용량 (2)항, (3)항의 증대는 에너지 소비를 낮춘다.
- (3) 정격전력

주: 요구보다 과잉용해용량을 갖추면 에너지 소비가 매우 증가한다.

4.2 유도로설계의 최적화

- (1) 주파수는 전력소비, 전력밀도, 교반작용 등에 영향을 준다.

- (2) 코일의 설계 및 기하학
- (3) 전압탭핑(Tappings)의 선택
- (4) 라이닝/단열재 축로
- (5) 잘 밀폐된 뚜껑의 설치 등

주: 유도로의 설계와 성능에 대한 로제조업체들의 데이터를 잘 비교하여 본다.

4.3 유도로조업의 관리

- (1) 무단전압조절기, kwh메타를 사용한다.
- (2) 용탕온도측정기를 사용한다.

주: 자동조절기를 갖추면 작업자 실수의 위험을 최소화한다.

4.4 유도로 활용도의 개선

보온(holding)시간을 늘리고 전력수준을 감소시키면 활용도를 떨어뜨리고 에너지소비를 증대시킨다.

- (1) 용해사이클-출탕시간 및 빈도수를 최소화한다.
- (2) 장입재료-적합한 크기, 밀도, 조건을 택한다.
- (3) 장입재료와 용탕의 운반기구-효과적이도록 설계하고 작업한다.
- (4) 슬라그제거작업-슬라그발생량, 슬라그제거 시간 및 제거 빈도수를 최소화 한다.
- (5) 보온시간-최소로 한다. 생산고를 높이고 복수교대 작업을 행함으로써 촉진된다.
- (6) 잔탕조업-최적조건서 작업한다.

주: 설비의 선택에 있어서, 최적조건에서 작업할 때의 제조업체의 데이터와 예상되는 실제 활용정도를 비교하여 합당하게 참작하여 정한다.

4.5 열손실의 최소화

- (1) 내화라이닝-적절한 보수와 교체를 행한다.
- (2) 유도로의 개방(뚜껑, 슬라그문, 등)-최소시간만 개방하고, 닫을 때는 잘 밀폐하되어 있는지 확인한다.
- (3) 용탕이동시스템-잘 설계되고 단열된 래들을 사용하고, 이동시간을 최소화 하게 설계된 것을 사용한다.
- (4) 용탕온도-건전한 주물을 제조할 수 있는 한도에서 최저온도로 유지한다.

주: 유도로의 열손실과 용탕의 운반열손실을 가급적 최소화 유지한다.