

# 생산설비에서 에너지효율 산정

(Energy Efficiency Calculations of the Production Facilities)

박형준\* · 정찬수

(Hyung-Joon Park · Chan-Soo Chung)

## 요 약

원유가의 급등과 더불어 에너지자원에 대한 관심이 크게 증가 되었는데, 다양한 에너지관련 분야 중에서 먼저 선행되어야 하는 것은 기존의 설비에서 사용하고 있는 에너지가 효과적으로 사용되고 있는가를 판단하는 것이며, 이를 에너지 효율의 산정이라고 한다. 따라서 본 논문에서는 에너지의 주요 수요처중 하나인 제지 생산 플랜트의 한 공정에서 전력에너지와 열에너지에 대한 에너지효율을 계산하였다. 이때 전력에너지는 운전 중인 전동기의 부하에 따른 효율을 중심으로, 열에너지는 공정에서 입출력되는 열량을 중심으로 계산하였다. 즉 운전 중인 생산설비의 한 공정의 전력과 열에너지에 대해 각각 에너지효율을 산정하였으며 일부 에너지절감에 대한 방안도 제시하였다.

## Abstract

This paper is about the energy efficiency calculation of the production facilities. In the paper-manufacturing industry, for example, the production facility needs much energy including electric and heat energy. So, in this paper, we chose a process in the model plant to calculate energy efficiency. To the Electric facilities, We calculated the energy efficiency of electric facilities by means of load factor and voltage unbalance of the motors. And to the heat energy, we calculated the heat energy efficiency by comparing necessary calorie and supplied calorie for the process. We performed all these energy efficiency calculations by using the measured data of a process in an operating plant.

Key Words : Efficiency, Electric and Heat energy, Load factor, Voltage unbalance

## 1. 서 론

최근 들어 원유가의 폭등으로 에너지에 대한 관심이 그 어느 때 보다 증대되고 있다. 또한 에너지 부

족사태가 예견됨에 따라 신재생에너지원의 연구, 기존 에너지 사용에 대한 절감방안 등에 대한 관심이 크게 대두되고 있다. 에너지의 종류는 그 원천에 따라 가장 널리 사용되고 있는 에너지원인 석유를 중심으로 하는 화석연료와 최근에 관심이 크게 대두되고 있는 신재생에너지로 구분될 수 있으며, 사용분야에 따라서는 가정용, 산업용, 수송용 에너지로 구분할 수도 있다. 효율을 산정하기위해 대상을 선정

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 박사수료  
Tel : 02-817-0004, Fax : 02-817-7961

E-mail : hpark@ssu.ac.kr  
접수일자 : 2007년 4월 18일  
1차심사 : 2007년 4월 23일  
심사완료 : 2007년 5월 3일

하여야 하는데, 가정용의 경우에 사용주체의 수가 매우 많고, 개별관리가 어려운 단점이 있는 반면, 산업용으로 사용되는 에너지는 사용량이 각각의 생산설비에 집중되어 있어서 감시 및 사용량 등에 대한 통계 및 분석이 용이하다는 장점이 있다. 따라서 산업계의 각 분야에서는 다양한 방법을 통해 현재 사용하고 있는 에너지의 절감 및 효율운전 방안 등을 모색하고 있는 추세이다[4].

이를 위한 가장바람직한 사항은 각종 설비의 도입 시부터 면밀한 검토 후에 도입과 운전이 이루어져야 하지만, 생산설비의 건설시의 운전조건과 실 운전시의 조건이 바뀔 수 있고, 설비의 증설, 유지보수, 폐기 등의 상황이 발생하므로, 실제로는 생산설비 건설 시에 운전시의 변경상황을 고려한 건설을 하기 어려운 것이 업계의 현실이다. 따라서 이미 운전 중인 생산설비에서는 효율을 산정하기 위해서, 운전 중인 개별 설비의 현황을 파악한 후, 비효율적인 설비를 구분하여 효율운전을 실시하거나, 경우에 따라서는 해당 설비를 대체 하는 등의 방안이 검토되어야 한다. 그 과정은 생산설비에 따라서 매우 다양하고, 광범위하다. 따라서 본 논문에서는 적절한 모형으로 제지생산설비를 결정하고, 그 중에서 초지공정의 에너지 효율 산정에 대하여 논한다.

## 2. 제지 생산공정의 개요

에너지효율을 계산하기 위하여 실제적인 계측이 필요하다. 실 생산설비가 없을 경우, 즉 특정 생산설비를 설계해야 하는 경우에는 모의실험을 해야 하는데, 이를 위해서는 상용화된 전용 프로그램을 사용하는 것이 일반적이라고 할 수 있다. 경우에 따라서는 소규모의 모의 생산설비를 제작하는 경우도 있지만 경제적인 측면에서 볼 때 모의실험이 유리하다고 볼 수 있다. 하지만 에너지적인 관점에서 볼 때는 실제 상황에서 효율을 고려하는 것이 바람직하다. 따라서 본 논문에서는 실제 생산설비에서 측정한 계측값을 결과로 하여 효율을 계산하는 과정에 대하여 논한다. 본 논문에서는 어떤 제지생산설비를 예로 삼아서 실제 운전 중인 생산설비의 주요 공정 중 하나를 선택하여 이를 적용하여 보았다.

제지산업은 내수를 위주로 하는 장치산업으로서 에너지 다소비의 대표적인 업종중의 하나이다. 제지 생산설비는 크게 보았을 때 3, 4개의 공정으로 구성되어 있다. 첫 공정은 주원료인 펄프나 폐지 등의 원료를 적절하게 부수어서 혼합하는 공정이다. 두 번째는 초지공정인데 실제 종이 만들어지는 과정으로서 젖은 펄프를 뿌려서 넓게 펼친 후 압착하여 수분을 제거하여 종이의 형태를 만드는 공정이다. 이 공정과 건조공정이 바로 연결되어 있으므로 경우에 따라서는 건조공정을 초지공정에 포함시켜서 이해할 수도 있다. 위와 같은 다수의 공정은 따로 존재하는 것이 아니라 자동화시스템에 의하여 일괄되어 제품을 생산하게 되어 있다. 일반적으로 제지생산설비에서는 다양한 제품을 생산하기 위하여 또, 생산과 관리의 효율 등을 높이기 위해서 하나의 생산설비 내에 다수의 일괄 제조시스템이 존재하는 경우가 많다.

본 논문에서는 위에서 설명한 제지생산설비내의 여러 개의 공정 중에서 건조를 포함한 초지공정에서의 전력에너지와 열에너지의 효율을 각각 산정하는 것으로 사례연구를 한다.

## 3. 생산공정의 에너지 효율산정

### 3.1 전력에너지

입력에너지는 대표적으로 두 가지를 고려해 볼 수 있는데, 하나는 전력에너지이고 다른 하나는 열에너지이다. 우선 전력에너지를 먼저 고려해 본다. 전력에너지는 주로 공정내의 전력설비들은 운전시키기 위하여 사용하는 에너지이다. 다양한 생산설비마다 다양한 전력설비들이 존재할 수 있겠지만, 생산설비 중 대표적인 전기부하는 3상 유도전동기이다.

전동기는 회전력을 직접 얻기 위하여 단독 운전되는 경우도 있으나, 주로 기타 다른 설비를 운전시키기 위하여 구동원으로 사용된다. 즉 전동기-펌프, 전동기-팬, 전동기-송풍기 등 전동기의 회전력을 이용하여 다른 설비를 구동시키는 형태로 사용된다. 전동기의 효율분석방법은 우선, 관리자가 중요한 몇 개의 자료를 측정하여 운전일지에 기입하고 간단히

생산설비에서 에너지요율 산정

계산하면 되는데, 계산식은 항시 동일하므로, 간단한 프로그램을 작성하여서 결과를 만들 수도 있다[4].

전동기-펌프 조합설비의 경우, 측정항목은 전동기 측(유도전동기)에서 전압, 전류, 역률 등이고 펌프 측에서 유량, 압력, 양정 등이다. 송풍기에서는 공기량, 압력 등이 필요하다. 필요에 따라서 전동기의 고조파왜곡 등을 측정할 수도 있다. 다음 그림 1은 전동기-펌프 조합의 개략적인 구성을 나타낸다. 펌프 대신에 전동기의 회전에너지를 사용하는 다른 설비가 위치해도 동일한 원리에 의해서 계산할 수 있다 [1-2].

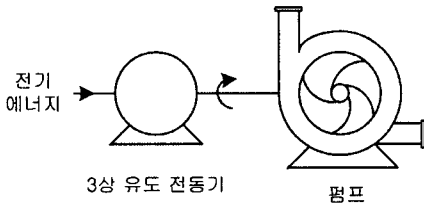


그림 1. 전동기-펌프 구성설비  
Fig. 1. Motor-Pump connected facility

다음의 식 (1)은 전동기의 일반적인 출력식이다. 출력식에 적절한 값들을 대입하여 출력, 효율 등을 계산할 수 있다[2, 10].

$$P_{out} = \frac{\sqrt{3} VI \cos\theta}{1000 \eta} [kW] \quad (1)$$

- V : 전압[V]
- I : 전류[A]
- cos θ : 역률
- η : 효율

펌프의 경우에 연결된 설비에도 출력을 다음 식 (2)와 같이 간단히 계산할 수 있다[2].

$$P_{out} = \frac{rQH}{6.12 \eta} [kW] \quad (2)$$

- r : 비중량
- Q : 유량[m<sup>3</sup>/min]
- H : 양정[m]
- η : 펌프효율

위 식 (1)에서처럼 전동기를 예로 들면, 전동기의 효율은 정격 전압, 전류, 용량으로 계산이 가능한데, 이는 전동기의 효율운전여부와 관계없이 전동기의 정격을 파악함으로써 가능하다. 그러나 실제 운전시의 효율은 다르다. 즉 운전시에는 각 조건에 따라서 정격과는 다른 전압, 전류, 용량으로 운전하게 되므로 반드시 전동기의 운전 중에 전압, 전류, 역률 등을 측정하여 해당 전동기의 운전시의 용량과 부하율 등을 계산해야 한다. 일반적인 생산설비(본 논문에서는 제지생산설비)에서는 생산품이 변경되지 않는 한 전동기는 비교적 장시간 연속 운전을 하는데, 따라서 정상 운전 상태에서 해당 전동기에는 일정한 전압, 전류가 유지된다고 볼 수 있는 것이다. 따라서 본 논문에서는 계산상의 간략화와 측정상 곤란함 때문에 전동기와 연결된 펌프 등의 설비의 효율은 고려치 않고, 전동기만을 고려한 효율을 계산한다[4].

운전시의 전동기 운전용량을 계산하면, 이미 알고 있는 제작시의 용량과 비교하여 전동기의 정격 용량 대비 운전율을 계산할 수 있다. 이를 부하율이라하며 다음의 식 (3)으로 표현한다. 부하율은 경우에 따라서 여러 이름으로 불리기도 하는데 때때로 현장에서는 용량부하율 또는 설비이용률이라고도 불린다 [3-6].

$$\text{부하율} = \frac{\text{실제사용용량}}{\text{정격용량}} \times 100 \quad (3)$$

그러나 생산설비 또는 특정 공정에 설치되어 있는 모든 전동기를 운전여부와 관계없이 고려하는 것은 그 범위가 매우 방대하므로, 본 논문에서 측정시간 현재, 해당 공정에서 운전 중인 전동기중 편의상 소용량의 전동기를 제외한 특정 용량이상 대표적인 전동기 9기에 대하여 부하율과 운전효율을 계산하였다.

전동기의 효율을 계산할 때 전압불평형률이 고려되기도 하는데, 이는 전압불평형률이 설비의 온도상승과 손실증가를 야기하기 때문이다. 또한 전압불평형에 의한 전동기의 손실증가율은 전압불평형률의 크기 따라서 전압불평형률의 자승에 비례하는 정도로 알려져 있다[9]. 따라서 전압불평형률이 클수록 그에 따른 손실은 무시할 수 없으며, 운전효율의 계산에 포함시켜야한다. 전압불평형률은 여러 가지로

정의되는데 대표적으로는 정상전압에 대한 역상전압의 비율로 정의된다. 또한 평균 상전압(또는 선간전압)에 대한 최대 전압편차로 정의되기도 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다[7-9].

$$\text{전압불평형률} = \frac{\text{평균 상(선간)전압으로부터 최대 전압편차}}{\text{평균 상(선간)전압}} \times 100 \quad (4)$$

전동기에서는 전압불평형률이 1[%]를 넘지 않는 것이 권고 되고 있다[8]. 본 논문에서는 각 전동기마다 전압과 전류를 측정하여 불평형률을 계산하였으며 아래의 표 1에는 편의상 3상 평균전압, 평균전류와 각 전동기의 전압불평형률만을 표기하였다. 전동기 설비들의 운전효율을 구하기 위한 전동기들의 정격, 계측값과 계산값들의 전체 결과는 다음 표 1과 같다.

표 1. 전동기에서 계산값  
Table 1. The Calculation of Motors in the process

번호	정격				계측값(평균)		계산값			
	용량 [kW]	전압 [V]	전류 [A]	전부하 효율 [%]	전압 [V]	전류 [A]	전압 불평형률	부하 용량 [kW]	실비 이용률 [%]	운전 효율 [%]
1	110	440	175	93.0	396.6	125.3	0.08	64.6	58.7	91.7
2	55	440	93	91.7	444.8	35.5	0.22	19.7	35.8	90.0
3	55	440	93	91.7	445.9	35.2	0.22	19.3	35.1	89.8
4	45	440	80	91.7	445.5	38.7	0.24	18.8	41.8	90.8
5	30	440	53	90.2	447.5	23.6	0.22	11.2	37.2	87.1
6	37	440	61.9	91.7	361.4	29.9	0.30	13.1	35.4	88.6
7	37	440	61.9	91.7	356.1	26.0	0.02	10.1	27.3	86.4
8	30	440	54.6	90.2	387.6	26.2	0.03	12.6	42.2	88.0
9	11	440	19.1	87.5	407.0	13.6	0.09	7.4	67.0	87.3

표 1에서 전동기 효율 특성으로부터 운전 중인 개별 전동기의 부하율에 따른 운전효율을 계산하였다. 또한 표 1의 전체적인 결과로서 전체 전동기들의 정격용량은 410[kW]이고 전체 사용 중인 부하용량은 약 177[kW]이므로 전체 전동기들의 부하율은 43.2[%], 이에 따른 각 전동기들의 해당 부하율에서 손실전력의 합은 17.8[kW]로 산정되었다. 본 공정의 경우 표 1에서 알 수 있는 것처럼 전압불평형률은 규격(NEMA)의 권고값 1[%]이내를 충분히 만족하며

전압불평형에 의한 손실전력은 수십와트 미만으로서 운전효율계산에 영향을 미치지 못하였다. 따라서 전체 전동기들의 효율은 전체 부하용량과 전체 손실전력에 의하여 약 89[%]로 산정되었다. 전력 단가를 60.25[원/kWh]라 하고 본 설비가 연간 330[일] 가동되는 설비라고 할 때, 이 전체 전동기들에서 발생하는 연간 손실 금액은 9,257[천원]에 이른다[5].

즉 표 1에서처럼 전동기 제작시의 용량(전동기 명판 기재)과 전동기의 사용 용량을 측정하여 비교함으로써 현재 사용 중인 전동기의 적정운전 여부를 판단할 수 있다. 이에 따라서 현재 사용 중인 전동기의 유지보수계획, 나아가서 향후 전동기 교체시의 새로운 전동기의 용량을 결정하는 기준을 제시할 수 있다. 또한 본 공정 전체관점에서 볼 때 부하율은 다수의 전동기들의 합이므로, 위 표에서 전체전동기들의 정격용량의 합과 계산한 용량의 합과의 비율로써 해당 공정에서의 부하율을 평가할 수 있다. 플랜트에서 일반적인 경우에도 표 1에서 볼 수 있는 것처럼 본 공정의 경우 전동기의 정격용량과 운전용량의 차이가 큰 경우가 많으므로 본 공정에 사용 중인 전동기들은 유지, 보수, 교체 계획이 반드시 필요하다고 볼 수 있다. 하지만 거의 대다수의 경우, 위에서 계산한 연간 손실금액을 없애는 것은 어렵기 때문에, 일반적으로 부하율이 약 60[%]이상이라면 무난한 운전 상태로 판단하기도 한다.

필요에 따라서 좀 더 자세한 계산을 위해서는 전동기 각상의 직류성분, 고조파왜곡 등을 측정 또는 계산하여 운전 중인 전력설비의 효율운전, 유지보전 등의 여부를 평가하고 국제규격을 만족하는가를 비교 판단하기도 한다.

### 3.2 열에너지

다음으로 고려할 사항은 공정에서 사용하는 열에너지이다. 제지업종과 공정의 특성상 건조공정이 반드시 필요한데 이를 위해서 다량의 증기를 사용하게 된다. 이를 위해서 대략적인 시스템의 파악이 필요하다. 즉 제작공정에서 생산된 종이는 계속 생산라인을 따라 건조되면서 감겨져 다음 공정에 보내지는데, 이때 건조공정이 반드시 필요하다. 건조공정에는

## 생산설비에서 에너지요율 산정

다양한 설비가 있을 수 있는데 일반적으로 실린더건조기, 스크린건조기 등이 열을 공급하여 제품을 건조시키며 이와 동시에 공기 급배기시스템에 의해서도 수분을 증발시키는 건조과정이 함께 사용된다.

실린더 건조기는 종이를 다수의 원통형 구조물과 함께 접촉시켜 회전시킴으로 제품에 포함된 다량의 수분을 건조시키는 기기인데, 이 원통형 실린더 내부에 고온의 증기를 공급하여 순환시킴으로 실린더의 표면과 접촉하여 회전하는 종이의 수분을 증발시키는 설비이다. 따라서 공정의 효율은 실린더에 공급하는 증기와 배출되는 증기간의 열량차이를 계산함으로 가능하다. 본 논문에서 이 건조공정은 2단계로 구성되어 있는데, 각 단계에 다수의 실린더 건조기와 급기용 송풍기가 모두 존재한다. 실린더 건조기에 공급되는 입열량은 증기의 공급열량과 실린더에서 빠져나오는 응축수의 열량의 차이로 볼 수 있다. 즉 각 실린더의 공급열량은 다음 식 (5)로 계산할 수 있으며 다음 표 2에 일부 실린더 건조기의 공급열량을 계산하여 표현하였다.

$$\text{공급열량[kcal/h]} = \text{공급유량[kg/h]} \times (\text{증기엔탈피} - \text{응축수엔탈피}) [\text{kcal/kg}] \quad (5)$$

**표 2. 실린더 건조기의 공급열량**  
Table 2. The supplied calorie of cylinder dryer

실린더 번호	증기 입력				응축수		온도차 [°C]	계산 공급 열량 [kcal/h]
	공급 유량 [kg/h]	공급 온도 [°C]	벨브 개도를 [%]	엔탈피	온도	엔탈피		
1	166.2	106.0	25	641.0	100.3	100.3	5.7	89,870
2	166.2	110.9	25	643.1	108	108	2.9	88,936
3	166.2	108.9	25	642.4	104.8	104.8	4.1	89,345
4	219.4	132.0	33	650.2	112	112	20	118,078
5	219.4	131.3	33	650.2	117.2	117.2	14.1	116,937

단 공급 스틱압력은 5.2 (kg/cm<sup>2</sup>)

위 표 2에는 포함하지 아니하였지만 모든 실린더에 이와 동일한 과정을 적용하여 전체 2단계 건조공정의 전체 실린더 건조기에서 공급하는 열량을 계산하면 5,014,673[kcal/h]가 된다.

또 다른 건조시스템은 실린더건조기에 의한 건조와 동시에 수분을 원활히 건조시키기 위하여 송풍기를 가동하여 공기를 급배기시키면서 제품을 건조시키게 되는데, 이때 급기송풍시스템에 의해 공급되는 공기의 열량도 입력열량이므로 함께 고려하여야 한다. 이 공정에는 2단계의 건조공정에 각 1기씩 총 2기의 급기송풍기가 있으며, 공기가 공급하는 열량은 다음의 식(6)에 의하여 계산할 수 있으며, 측정값과 계산 값은 다음 표 3과 같다.

$$\begin{aligned} \text{공기공급열량[kcal/h]} &= \text{비열[kcal/kg} \cdot \text{°C]} \times \text{건구온도[°C]} \times \\ &\quad \text{공기중량[kg/min]} \times 60[\text{min}] \\ \text{공기중량[kg/min]} &= \\ &\quad \text{풍량[m}^3/\text{min]} \times \text{비중[kg/m}^3] \end{aligned} \quad (6)$$

**표 3. 건조공정 급기**  
Table 3. The air supply of the dryer system

급기 시스템	측정 및 현장값					계산값	
	풍량 [m <sup>3</sup> /min]	비열 [kcal/kg·°C]	온도 [°C]	상대 습도 [%]	비중 [kg/m <sup>3</sup> ]	공기 중량 [kg/min]	계산 공기 공급열량 [kcal/h]
1	318.8	0.24	72.4	3.1	1.020	325.2	339,060
2	165.3	0.24	85.8	1.2	0.983	162.5	200,760

따라서 송풍 시스템이 건조공정에 공급하는 전체 열량은 2대의 급기시스템이 공급하는 열량을 합하여 539,820[kcal/h]가 된다. 여기에 이미 고려한 표 2의 방법으로 계산한 실린더건조기가 공급하는 총 열량 5,014,673[kcal/h]를 합하여 본 건조공정에서 제품에 공급하는 전체열량은 5,554,583[kcal/h]가 된다.

이제 건조공정에서 실제 제품에 필요한 열량을 계산해야 한다. 필요한 열량은 전체적으로 세 가지 항목으로 고려할 수 있다. 즉 제품에 포함되어있는 수분을 가열시키고, 증발시킬 때 필요한 열량과 제품 자체를 가열하는데 필요한 열량이며 표 4로 내용을 정리하였다.

**표 4. 건조공정에서 필요한 열량**  
Table 4. The necessary calorie in the process

항 목		건조공정 1	건조공정 2
계 측 및	입구온도[°C]	32.7	70.7
	출구온도[°C]	119	93.2
현 장 값	건조 전 수분증량[kg/h]	2,742	1,523
	증발시켜야 하는 수분증량[kg/h]	2,645.5	1,341
	건조 후 수분증량[kg/h]	96.5	182
계 산 값	순수 제품증량[kg/h]	2,742	2,956
	수분 가열에 필요한 열량[kcal/h]	184,538	44,619
	수분 증발에 필요한 열량[kcal/h]	1,425,932	722,693
	제품 가열에 필요한 열량[kcal/h]	75,724	21,284
	필요열량[kcal/h]	1,686,194	788,596
총 필요열량[kcal/h]		2,474,790	

단 물의 증발열 539(kcal/kg)로 계산

실제 제품에 포함되어 있는 수분을 증발시키고 원하는 함수율을 갖는 제품을 생산하는데 필요한 열량을 계산하였다. 즉 이 공정에 실제 필요한 열량은 2,474,790[kcal/h]이고, 이미 계산한 바와 같이 공정 전체에 공급되는 열량은 실린더건조기와 송풍기 공급 열량을 합하여 5,564,583[kcal/h]이므로 본 공정의 에너지 효율은 약 44.6[%]로 판단할 수 있다. 이상과 같은 공정의 개별적인 설비에서 사용되는 에너지, 원가 등의 총량과 흐름들에 대한 현황과 효율 등을 나타내는 표가 필요한데, 이를 프로세스 발란스맵(Process Balance Map)이라고 한다. 이 중에서 특히, 에너지와 관련된 부분만을 에너지 발란스맵(Energy Balance Map)이라한다[1, 4].

일반적으로 공정상에 공기가 필요한 경우 급기와 배기시스템이 존재하며 배기 풍량이 상대적으로 크게 되는데 밀폐되어 있는 공정이 아니라면 배기 풍량은 급기 풍량과 미지의 침입 풍량의 합으로 고려할 수 있다. 본 공정에서도 마찬가지이다. 그러나 우리는 배기에 대해서는 언급하지 아니하였는데 바로 이 배기에 의한 손실이 에너지 손실의 주요 요인 중 하나라고 볼 수 있다. 따라서 본 공정에 존재하는 각 2기의 급배기용 송풍시스템에 대하여 에너지 입출력을 고려할 필요가 있다. 다음 표 5에 배기시스템에 의한 출력에너지를 정리하였다.

**표 5. 배기시스템**  
Table 5. The air exhaust system of the process

배기 시스템	계측 및 현장값					계산값		
	풍량 [m <sup>3</sup> /min]	비열 [kcal/kg·°C]	온도 [°C]	절대 습도 [g/kg]	비중 [kg/m <sup>3</sup> ]	공기 증량 [kg/min]	공기 손실열량 [kcal/min]	공기 손실열량 [kcal/h]
1	648.6	0.24	67.0	71.9	1.038	673.2	10,826	649,560
2	459.8	0.24	68.1	68.3	1.035	475.9	7,779	466,740

위 표 5에서처럼 배기시스템을 살펴보면, 배기공기의 온도가 너무 높고 이를 계산하면 총 2기의 배기시스템 전체에서 약 1,116,300[kcal/h]의 열량이 손실되고 있다. 이 배기공기는 결국 대기 중으로 버려지는 고온 다습한 공기인데 그 온도가 너무 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 이미 배기 시스템에 존재하는 열교환기를 대용량으로 변경 또는 추가하여 충분한 용량의 열교환을 함으로서 배기공기의 온도를 55[°C] 정도로 낮출 수 있다면 배기 시스템 1에서만 다음 식 (7)과 같은 양의 폐열을 절약할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \text{폐열 회수 열량} &= \quad (7) \\ &0.24[\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \times (67-55)[^\circ\text{C}] \times \\ &673.2[\text{kg/min}] \times 60[\text{min}] = 116,329[\text{kcal/h}] \end{aligned}$$

마찬가지로 동일한 식을 적용하면 배기 시스템 2에서는 89,774[kcal/h]의 열량이 절약가능하며 본 공정의 2기의 배기시스템에서 총 206,103[kcal/h]의 열량절약이 가능하다고 판단된다. 이를 금액으로 환산하면 증기 1[ton]당 30,000[원]이라 할 때 연간 약 90,685[천원]의 절약가능하다고 판단된다.

### 3.3 손실에너지

이상에서 살펴 본 전력에너지와 열에너지에 대하여 정리해 본다. 우선 제품생산과 직접적으로 관련된 전력에너지는 주요 전력설비인 3상 유도전동기가 주로 사용하므로 운전 중인 전동기에서 계측한 값을 바탕으로 효율을 계산하였다. 유도 전동기는 일반적으로 전부하의 70~80[%]에서 최대 효율은 갖는 것

## 생산설비에서 에너지효율 산정

으로 알려져 있는데 부하율이 70[%]이하이면 부하율이 작으면 작을수록 효율은 저하된다[6, 9]. 따라서 본 논문에서는 전동기의 전부하일 때의 효율을 파악하고 이를 바탕으로 다시 각 전동기의 실제 운전 부하에서의 효율과 손실전력을 계산하였다. 또한 각각의 전동기들에 대하여 이 과정을 반복함으로써 다수의 전동기 전체의 손실 전력을 구하였다. 또한 각 전동기의 3상 전압 계측값에 의해 구한 전압불평형률에 따른 전력손실을 함께 고려하였다. 이미 3.1절에서 살펴본 것과 같이, 이 공정의 경우 운전 중인 전체 유도전동기들의 부하율을 기반으로 하여 전압불평형률을 포함하여 계산한 전력에너지 효율은 약 89[%], 전체 손실전력은 약 17.8[kWh/h]로 산정되었다.

또한 열에너지의 경우에는 본 공정에서 필요열량과 공급열량을 비교하였으며, 본 공정의 열에너지의 손실은 3,079,793[kcal/h]로서 열에너지 효율은 약 44.6[%]로 산정되었다. 열에너지의 경우 그 특성상 손실이 상대적으로 크다고 볼 수 있으며 그 손실의 원인으로는 공정에 사용되는 설비 자체가 발열하고, 건조기의 열이 모두 제품에 전달되지 않고 생산공정의 내기 온도를 상승시키는데 소비되며, 배기시스템에 의해서 외부로 빠져나가는 열량이 존재하기 때문이다. 본 공정의 경우 손실열량의 절감을 위한 방안의 예를 3.2절 후반부에 이미 언급하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 생산설비에서 에너지효율 산정법에 대하여 논하였다. 일반적으로 생산설비에 투입되는 직접적인 에너지는 전력에너지와 열에너지라고 볼 수 있는데, 본 논문에서는 생산설비내의 한 공정을 선정하여 이 공정에서 운전 중인 3상 유도전동기들의 용량 410[kW]을 파악하고 계측에 의하여 실사용 용량은 177[kW]과 부하율 43.1[%]를 계산하였다. 또한 전압불평형률에 따른 손실을 고려한 전력에너지 총 손실은 17.8[kWh/h]로 산정되었고 결과적으로 에너지 효율은 약 89[%]로 산정되었다. 또한 열에너지의 경우는 공정에 공급되는 총 공급열량 5,554,583[kcal/h]과 실제 필요열량 2,474,790[kcal/h]을 계산하여 공정의 에너지 효율을 44.6[%]로 산정

하였다. 또한 주요한 손실인 배기시스템에서의 손실 열량을 계산하여 이를 개선할 경우의 예상 효과를 금액으로 산출하였다. 이처럼 금번 논문에서는 한 공정에 대해서만 에너지효율을 산정하였으나, 향후에는 이를 확장하여 여러 공정을 포함하고 있는 단일 플랜트 전체의 에너지 효율을 산정하는 것도 가능하리라 판단된다.

## References

- (1) 박형준, 정찬수 외, "플랜트의 에너지 효율산정에 관한 연구", 한국 조명전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp. 329 - pp. 333, 2006.
- (2) 新 전기설비 기술계산 핸드북 제2판, 도서출판 의재, 1999.
- (3) 한국전기공사협회, "전기 용어 사전", 2007.
- (4) 이경국, "TPM 활동을 통한 에너지 효율 향상방안 연구", 석사학위논문, 아주대학교, 2006.
- (5) 한국전력공사 전력정보 "한국전력통계", p.134, 2006년판.
- (6) Turan Cönen "Electric Power Distribution System Engineering", McGraw-Hill Book Co., 1986.
- (7) SADC Industrial Energy Management Project, "Module 6 Electric Motors".
- (8) P. Pillay, M. Manyage, "Definitions of Voltage Unbalance", IEEE Power Engineering Review, May 2001.
- (9) U.S. Department of Energy, "Eliminate Voltage Unbalance", Motor system tip sheet #7, Sep. 2005.
- (10) U.S. Department of Energy, Fact sheet, "Determining Electric Motor Load and Efficiency".
- (11) U.S. Department of Energy, Energy Tips, "Estimating Motor Efficiency in Field" Sep. 2005.
- (12) M.J.Moran, "Introduction to Thermal Systems Engineering", John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- (13) Y.A.Cengel, "Thermo Dynamics an Engineering Approach", 4th ed. McGraw-Hill Book Co., 2003.

## ◇ 저자소개 ◇

### 박형준 (朴亨俊)

1969년 9월 26일생. 1992년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 박사수료. 1994~2000년 (주)효성중공업연구소 책임연구원보. 현재 컨설턴트로 활동 중. E-mail : hpark@ssu.ac.kr

### 정찬수 (鄭讚壽)

1949년 8월 10일생. 1972년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수. E-mail : chung@ssu.ac.kr