

**특집 : 철강산업에서의 전력전자기술**

# 제철소 열간압연공장 주기 Mill MOTOR의 Cooling Fan의 성능 에너지 시스템구축

조길상\*, 김영남\*

(\* (주)포스코 기술개발실 차장, \*\* 포스코 광양제철소 전기제어설비 부장)

## 1. 서론

오늘날 省에너지의 의미는 단순히 에너지의 낭비를 막아보자는 측면만이 아닌 인류의 생존과도 연관된 지구환경 보호라는 의미도 포함하고 있다. 이에 따라 省에너지는 인류의 공동과제로 대두되었으며, 1997년 12월에 일본교토 지구온난화방지 기후협정을 통하여 각국은 1990년 기준으로 이산화탄소의 배출을 선진국 평균 5.2% 감소하자는 省에너지에 대한 구체적인 목표까지도 세우게 되었으며, 이로부터 각국은 청정에너지 개발과 적극적인 절약Program 추진을 구체적으로 실현하기 위하여 노력하고 있다.

포스코 광양제철소에서 세계 최고의 에너지 경쟁력을 갖춘 제철소 실현과 에너지절감을 통한 친환경 제철소를 구현하기 위해, 에너지 운용체제의 탄력적 운용을 통한 에너지 구입비용 최소화, 회수의 극대화, 에너지 정밀진단을 통한 손실 에너지의 최소화 등을 추진하고 있다.

이에 본고에서는 기업의 경쟁력 확보와 인류의 안녕이라는 의미를 가지고 省에너지의 구체적인 실천 사례의 하나인 열연공장의 주기모터의 省에너지 시스템을 소개하고자 한다.

## 2. 주기모터의 Cooling Fan의 발열과 냉각 Mechanism과 설계방식

그림 1은 열연공장의 주기모터의 Cooling Fan의 발열과 냉각 Mechanism에 대한 개념도로서, 발열은 모터의 손실로서 권선(전기자, 계자, 보극, 보상권선)의 저항손, 자심의 철손, 표유부하손 등이 있으며, 냉각은 이러한 발열을 제거하고, 모터의 분진을 최소화 하기위해, 열교환기에 의해 발열을 외부로 배출하는 강제순환 타력통풍방식으로 되어 있다. 또한 냉

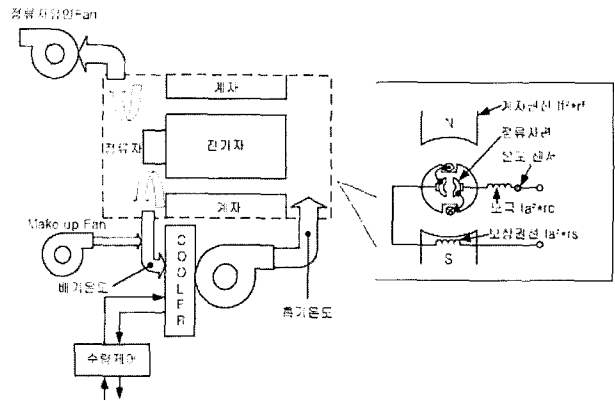


그림 1. DC 모터의 발열과 냉각 Mechanism

각 Fan은 흡기온도가 최고일 때, 정격부하에서도 냉각효과가 충분히 발휘하도록 용량을 설계하고 있고, 부하변동으로 발생손실이 감소되더라도 100%부하에 대응하도록 풍량은 일정하게 유지되고 있다.

## 3. 주기모터의 성능 에너지절감 요소 분석

그림 2는 흡기온도에 따른 권선온도의 경향을 월별로 나타내고 있으며, 여름철과 겨울철과는 무려 20℃이상의 온도차이를 보여주고 있으며, 여름철의 F1의 권선온도를 기준으로 온전 한다면 성능 에너지 절감량은 매우 클것으로 예측된다.

표 1은 열연 공장의 조업현황표로서 실제 가동율은 7,560시간으로 86.5% 이며, 그중에서도 실제압연시간은 56%에 불과 하며, Idling 시간은 44%나되며, 계획휴지 등 기타의 시간도 전체의 13.6%나 되므로 권선의 발열은 충분히 작음을

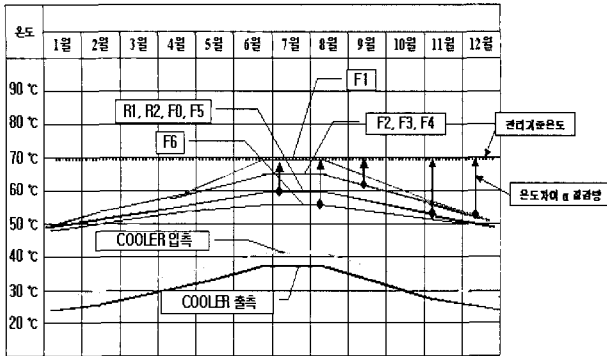


그림 2. 주기모터의 온도경향

예측할 수 있다.

또한 표 2는 주기모터의 정격 출력 및 가동출력 현황으로 FO모터는 정격출력이 7,800KW이나 RMS는 불과 6.2% 로 484KW 밖에 안되고, 가장 큰 F4모터도 정격의 59% 밖에 되지않고 있어 권선의 발열량은 정격발열량 보다는 충분히 작음을 알 수 있다.

표 1. 조업현황

항목	단위	년환산	비고
생산량	Ton	5,184,388	
운전시간	압연시간	Hr	4,264 (56%)
	Idle시간	Hr	3,296 (44%)
소 계		7,560	86.5%
비가동	계획휴지	Hr	12
	Roll교체	Hr	356
	정기수리	Hr	152
	기타	Hr	680
소 계	Hr	1,200	13.6%
전력량	Mwh	528,092	
전력원 단위	Kwh/t	101.9	
평균Coil두께	mm	3.9	
평균Slab	mm	230	
전력요금	원/Kwh	52.69원	2000년6월 단가
냉각수요금	원/ton	203.2	

표 2. 주기모터의 가동 출력 및 전류 현황

냉각시스템 명칭	주기				Fan							
	정격출력		가동출력		정격출력		정격풍량(m³/min)				현상풍량	
	수량	KW	RMS	KW	수량	KW	수량	Fan정격	수량	모터정격	수량	m³/min
VSB주기모터	1	3,000	28.1%	843	1	37	1	700	1	700	1	601
R1(TOP)주기모터	1	3,000	35.0%	1,050	1	150	1	2,100	1	2,100	1	1,545
R1(BOT)주기모터	1	3,000	37.9%	1,137	1	150	1	2,100	1	2,100	1	1,501
R2(TOP)주기모터	1	6,000	51.3%	3,078	1	150	1	2,100	1	2,100	1	1,480
R2(BOT)주기모터	1	6,000	55.1%	3,306	1	150	1	2,100	1	2,100	1	1,388
R3주기모터	1	10,000	17.5%	1,750	1	37	1	1,200	1	1,200	1	865
F0주기모터	1	7,800	6.2%	484	1	220	1	2,200	1	2,200	1	1,244
F1주기모터	2	4,250	44.4%	3,774	3	150	1	2,200	1	2,000	1	773
F2주기모터	2	4,250	57.1%	4,854			2	2,400	1	2,000	1	1,565
F3주기모터	2	4,250	55.1%	4,854					1	2,200	1	1,892
F4주기모터	2	4,250	59.0%	5,015	3	110	3	2,070	1	2,000	1	1,030
F5주기모터	2	4,250	48.5%	4,123					1	2,000	1	1,017
F6주기모터	3	2,667	39.2%	3,136					1	1,200	1	1,362
합계		89,301		37,232		1,674		25,710		23,900		16,263

### 3. 절감의 원리

권선의 발열량과 냉각 풍량은 비례관계에 있으며, 풍량과 회전수도 비례관계에 있음. 그러나 소비전력은 회전수의 3승에 비례하므로, 소비전력은 풍량이 줄어들어 따라 3승에 비례하여 대폭 절감된다.

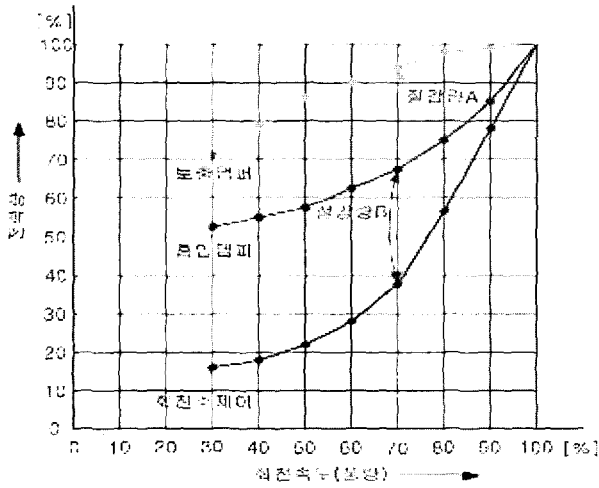


그림 3. 회전속도와 전력량과의 관계

- 권선의 발열량(W) ∝ 풍량[m³/min] ..... (1)
- 풍량[m³/min] ∝ 회전수[RPM] ..... (2)
- 풍압[mmAq] ∝ 회전수[RPM]² ..... (3)
- 소비동력 P는 QH/61207(KW)로서  
P ∝ 회전수[RPM]³ ..... (4)

그러나 실제 Cooling Fan의 효율과 모터의 효율, 인버터의 효율을 감안하면, 그림에서와 같이 70%풍량의 경우 회전수 제어와 토출댐퍼와는 약 50%, 흡입댐퍼와는 약 30%의 절감 차를 나타내고 있다.

### 4. 권선 온도상승과 필요 풍량의 결정 시뮬레이션

주기모터의 성에너지의 가장 핵심 기술의 하나는 등가 RMS 부하로부터 권선의 온도를 추정하고, 적절한 풍량을 계산하는데 있다. 그림 4는 부하 RMS로부터 측정치의 통계처리 및 열시정수보정과 검증을 통하여 권선의 온도상승을 구하고, 계사권선 온도에 대한 풍량 보정과 풍량저감에 대한 냉각효과율 보정, 최고온도부의 점검과 실측온도의 Feed Back을 통하여 필요풍량을 결정하기 위한 Flow를 보이고 있다.

#### 4.1 등가 RMS 전류와 코일 온도상승

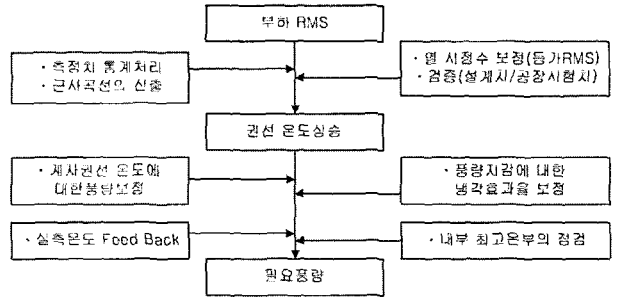


그림 4. 코일의 온도상승과 필요풍량의 결정 Flow

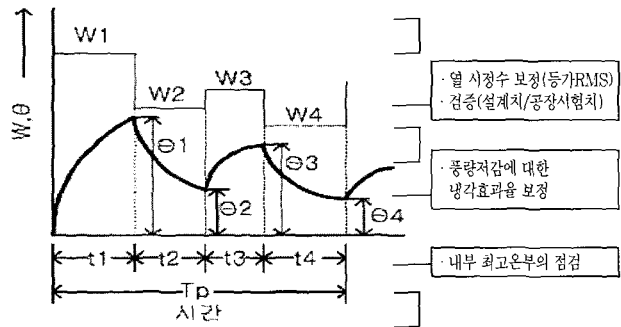


그림 5. 불규칙 변동 부하의 온도 상승

그림 7은 모터의 손실에 대한 온도상승과의 관계곡선으로서 온주기 중의 기동, 정지, 속도변화가 있는 것은 가감속중의 손실이나 열방산 계수의 변화를 고려해야 한다.

온도를  $\theta_0=0$ , 열시정수는 일정하고  $\tau$ 라 하면 각기간의 온도상승은

$$\theta_1 = \theta_{n1}(1 - e^{-t1/\tau}), \theta_{n1} = W_1/kS \quad (5)$$

$$\theta_2 = \theta_{n2}(1 - e^{-t2/\tau}) + \theta_1 e^{-t2/\tau}, \theta_{n2} = W_2/kS \quad (6)$$

$$\theta_3 = \theta_{n3}(1 - e^{-t3/\tau}) + \theta_2 e^{-t3/\tau}, \theta_{n3} = W_3/kS \quad (7)$$

다음에 손실, 방열계수는 시간 t의 함수인 경우에는

$$MC \frac{d\theta}{dt} + Sk(t)\theta = W(t) \quad (8)$$

가 되고, 온도 상승  $\theta$ 는

$$\theta = e^{-\int_0^t \frac{Sk(t)}{MC} dt} \frac{1}{MC} \int_0^t W(t) e^{\int_0^t \frac{Sk(t)}{MC} dt} dt \quad (9)$$

또한 손실중 철손과 기계손을 무시하면 손실은 전류의 자승

에 비례하므로, 다음 식과 같이 된다.

등가 RMS 전류는

$$\text{등가 } I_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^{tp} I^2(t) dt}{tp}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

4.2 등가 RMS 대한 권선 온도상승 근사곡선의 산출

등가 RMS에 대한 권선 온도상승 근사곡선을 그림 5에서와 같이 공장시험치와 설계이론곡선과 비교 검증과 보정을 통하여 구한다. 이 근사곡선에서 변화하는 부하의 반복주기에 대한 온도 변화의 상관관계를 알 수 있으며, 실제 제어에서도 모터의 권선온도를 Feed Back하여 풍량을 보정하는데 이용된다.

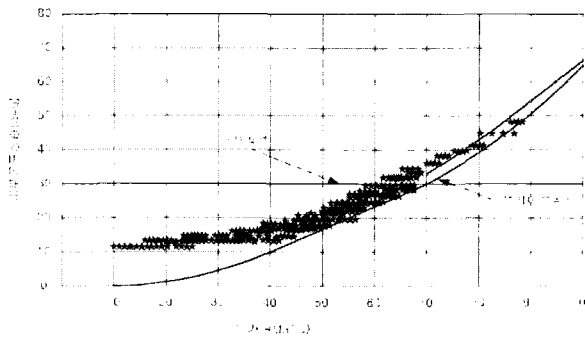


그림 6. 등가 RMS와 온도상승

4.3 발열량과 풍량의 관계

식(11)은 발열량과 풍량의 관계식으로 권선의 온도상승 (T -Ti)을 일정하게 유지한다면 풍량 Q와 발열에너지 E는 비례한다.

$$Q(\text{풍량}) = E / (Cp * \rho * \eta * (T - Ti)) \propto N(\text{Fan 속도}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

- E(발열에너지[KJ/min])
- Cp(온도에 따른 비열[KJ/kg\*K])
- ρ(온도에 따른 비중량[kg\*m])
- η(열전달 효율)
- T (모터의 목표온도(° K))
- Ti(Inlet Air의 온도(° K))

4.4 풍량 저감에 대한 냉각 효과율의 보정

풍량이 저감하면 Fan의 효율 등 냉각 효과가 변화 되므로 실험을 통하여 효과율을 보정한다.

4.5 계자코일의 온도상승

계자코일의 온도는 식(12)와 (13)식에 의하여 저항온도법에 의하여 구한다.

$$\text{즉 식(12)는 온도 변화에 따른 저항 R을} \\ R = R(t1) \times [1 + \alpha \times (t1 - t2)] \quad \dots\dots\dots (12)$$

- R : t2[°C]의 저항      - R(t1) : t1[°C]의 저항

- α : 저항온도계수(1/(235+t))

식(13)은 저항 변화에 따른 온도 상승 θ를 보인다.

$$\theta = \theta_2 - \theta a = (R2/R1 - 1) \times (T + \theta_1) + (\theta_1 - \theta a) \quad \dots\dots\dots (13)$$

- R2 : 열 상태(온도 θ₂)에서의 권선저항
- R1 : 열 상태(온도 θ₁)에서의 권선저항
- θ₂ : 시험직후에서의 권선온도[°C]
- θ₁ : 냉 상태에서 R1을 측정 했을때의 온도[°C]
- θ a : 시험의 최후에 있어서의 냉매온도[°C]
- θ : 권선의 온도상승[°C]
- T : 정수 등에 대해서는 T=235

4.6 온도상승과 풍량에 대한 Simulation 결과

그림 7과 그림 8은 보극과 주극권선의 온도상승과 풍량에 대한 Simulation 결과 그래프로서, 그림 7은 성에너지 전,후의 보극과 계자의 온도상승을 나타내고 있으며, 성에너지 전에 보극권선은 최고 38°C로 낮게 운전 되고있으나, 성에너지 후는 50°C 이하로 제한되어 유지되고있으며, 계자온도는 성

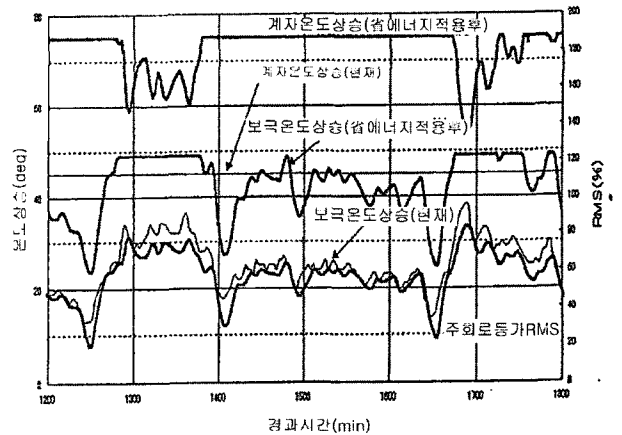


그림 7. 온도상승 Simulation

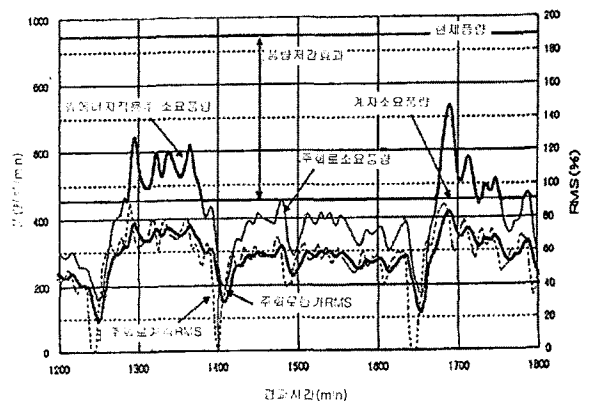


그림 8. 풍량저감효과 Simulation

에너지전 45℃에서 성에너지 후 75도 이하로 제한되어 유지되고 있다.

또한, 그림 8은 풍량 저감에 대한 냉각효과를 나타내고있으며 성에너지 전 950[m<sup>3</sup>/min]에서 450[m<sup>3</sup>/min]을 최저 풍량으로 하고, 주회로의 온도를 그림 7의 50℃ 이하로 유지하기 위한 주회로 소요풍량을 보인다.

### 5. 성에너지시스템구성

그림 9는 성에너지시스템의 전체구성도를 나타내고 있다.

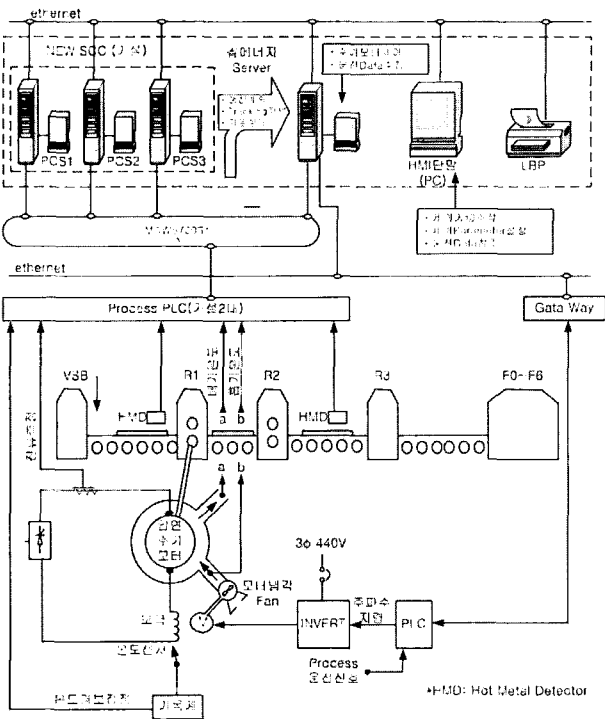


그림 9. 성에너지 시스템구성도

#### 5.1 Hardware

##### 5.1.1 성에너지 Server

- Industrial PC : 332MHz, Cache 32KB(Inst), 32KB(Data),128MB MM, 9.1GB HDD, MAX20배속 CD ROM
- Color Monitor : 17" 1280X1024
- Keyboard, Mouse
- Ethernet Adapter : 10/100Mbps

##### 5.1.2 HMI 단말

- PC : Celeron333MHz, 64MB MM, 4.3GB,
- Color Monitor : 17" 1280 x 1024
- LBP : A3 Ethernet I/F

##### 5.1.3 PLC(Remote Process I/O장치)

- CPU Unit
- 기본 Base Unit
- Base 전원
- Analogue 입력 Card
- Analogue 출력 Card
- Digital 입력 Card
- Digital 출력 Card
- Ethernet Adapter

##### 5.1.4 Network 기기

- MELPLAC PLC I/F
- SCC I/F
- Ethernet

#### 5.2 Data의 처리 Flow

그림 10은 성 에너지시스템의 처리 Flow에서 보는 바와 같이 보극권선의 온도나 흡기온도, 배기온도, 전기자전류, 계자 전압, 전류, Metal Detect 신호 등은 기존의 조업 PLC와 Computer에서 Network를 통하여 받고 기존의 제어시스템의 변경은 가능한 최소화하여 신뢰성과 비용을 최소화 하였다.

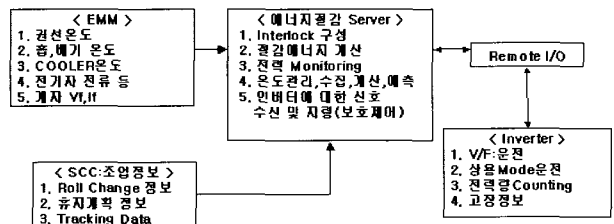


그림 10. 시스템 Data Flow

#### 5.3 주기 Motor와 Cooling Fan 사양

Cooling Fan은 총 12대.  
주기 Motor와 Cooling Fan 사양 참조(표 3).

#### 5.4 Cooling Fan Motor의 적용인버터 사양

Fan과 동일 수량으로서 총12대.  
Cooling Motor의 적용인버터 사양 참조(표 4).

### 6. 성에너지 시스템 효과분석

표 5는 열연공장의 성에너지의 결과 표로서 1kwh당 70원으로 계산시에 연간 1억1천9백만원으로 약76.9%의 전력절감을 나타내고 있다.

표 3. 주기 Motor와 Cooling Fan 사양

Main motor specification				Main recirculation fan		Make up fan		Commutator induce fan	
Motor	Q' ty	Specification		Q' ty	Specification	Q' ty	Specification	Q' ty	Specification
VSB	1	3000KW 180/360rpm 750V 4880A DCM	VSB	1	700m³/min 37kw	1	170m³/min 3.7kw	1	100m³/min 5.5kw
R1	2	3000KW 180/360rpm 750V 4880A DCM	R1	2	2100m³/min 150kw	2	310m³/min 5.5kw	1	100m³/min 5.5kw
R2	2	6000KW 35/70rpm 1200V 5580A DCM	R2	2	2100m³/min 150kw	2	310m³/min 5.5kw	1	100m³/min 5.5kw
R3	1	10000KW 450rpm 6600V 1130A SM	R3	1	1200m³/min 37kw				
F0	1	7800KW 120/240rpm 1200V 6970A DCM	F0	1	2200m³/min 220kw	1	320m³/min	1	100m³/min
F1	1	2*4250KW 184/423rpm 1200V 2*3850A DCM	F1-F3	2	2400m³/min 150kw	1	1320m³/min 30kw	1	600m³/min 30kw
F2	1	2*4250KW 184/423rpm 1200V 2*3850A DCM							
F3	1	2*4250KW 184/423rpm 1200V 2*3850A DCM							
F4	1	2*4250KW 184/423rpm 1200V 2*3850A DCM	F4-F6	3	2070m³/min 110kw	1	1330m³/min 37kw	1	700m³/min 45kw
F5	1	2*4250KW 184/423rpm 1200V 2*3850A DCM							
F6	1	3*2667KW 267/637rpm 750V 3*3880A DCM							

표 4. Colling Fan Motor의 적용 인버터 사양

Equip. No.	Application	Q' ty	Drive Power supply			Control
			Output (KVA)	Voltage (V)	Current (A)	
V130	VSB Main Fan	1	53.3	440	70	V/F
V133	R1 Top Main Fan	1	329	440	432	V/F
V134	R1 Bottom Main Fan	1	329	440	432	V/F
V139	R2 Top Main Fan	1	329	440	432	V/F
V140	R2 Bottom Main Fan	1	329	440	432	V/F
V145	R3 Unit Cooling Fan	1	53.3	440	70	V/F
V185	F0 Unit Cooling Fan	1	329	440	432	V/F
V146	F1 Unit Cooling Fan	1	329	440	432	V/F
V147	F2 Unit Cooling Fan	1	329	440	432	V/F
V148	F3 Unit Cooling Fan	1	329	440	432	V/F
V149	F4 Unit Cooling Fan	1	230	440	302	V/F
V150	F5 Unit Cooling Fan	1	230	440	302V/F	V/F
V151	F6 Unit Cooling Fan	1	230	440	302	V/F

표 5. 성에너지의 효과분석결과표

운전 Mode	연간전력량(Kwh)
省会너지 전(댐퍼운전)	9,760,920
省会너지 후(인버터운전)	2,258,646
전력절감량(Kwh)	7,502,274
전력절감율(%)	76.9

### 7. 결 론

본고에서는 절감시스템중 열연공장의 주기모터냉각시스템에 대해서만 언급하였으나, 금번에 같이 추진한 Descaling Pump, Roll Coolant Pump, Fume Exhaust Fan, 전기실냉각 System, 보기 모터 Cooling Fan을 포함하면, 전체 절감량은 대략 18,065,944(Kwh)로 1Kwh당 70원이라면 연간 약 12억 6천 4백만원이나 절약되어 총공장 전체사용량 540,000,000KWH의 3.3%나 된다.

그리고 성에너지는 인버터를 적용한 회전수변경만을 국한한 것이 아니고, 계통의 역율, 설비효율, 조업의 방법변경, 폐열의 회수등 종합적인 개선과 개혁을 필요로 한다. 또한, 성에너지는 기업경쟁력과 인류 안녕과도 밀접한 관련이 있으므로, 열연공장의 타 설비와 다른공장의 유사 설비에 적극적인 인버터의 적용 확대가 되기를 기대하며, 국내 각 산업의 유사 설비에도 적극 확대적용이 되기를 바란다. 2003. 4. 10

### 참 고 문 헌

- [1] 이승원, 이윤중, "전기기기(직류기, 동기기, 정류기)", 문운당, 1975.
- [2] 미쓰비씨(주), "인버터응용 Manual", 전기서원, 1992
- [3] 의제편집위원회, "신 전기설비 기술계산 핸드북 제2판", 의제도서출판, 1999.
- [4] 이승원, "전기계설계", 문운당, 1982.

### <저 자 소 개>



#### 조길상(趙吉相)

1962년 2월 8일생. 1984년 성균관대 전기공학과 졸업. 1986년 중앙대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년~현재 POSCON 기술개발실 차장.



#### 김영남(金榮男)

1952년생. 전남대 공과대학 전기공학과 졸업. 한국계측제어협회 이사 역임. 한국측정기기교정협회 양자전문위원 역임. 일본철강협회 Foreign Member. 현 포스코 광양제철소 전기제어설비 부장.