

보일러 튜브파열과 복수기 누설사고의 경우 80년도의 1/4이하로 격감시키는 성과를 거두어 경제적 효과 외에도 안정적이고 양질의 전력을 공급해야하는 전력회사의 본연의 임무를 다하는데 일조를 하고 있다. 또한 현재의 목표는 설비사고 제로화를 위해 기술진단의 철저 등 최선을 다하고 있다.

설비진단방법은 크게 사후관리, 예방, 예측점검의 3가지로 분류 할수 있으며 현재의 추세는 예방보수(Preventive Maintenance)의 단계를 넘어 예측진단(Predictive Maintenance)에 그 비중을 두고 있으며 이를 위해서는 수명평가 기술이 선행되어야 한다.

3. 수명평가 기술

설비진단 기술의 핵심이랄 수 있는 수명평가 기술은 크게 기계구조물분야와 전기설비분야로 대별될 수 있다.

기계구조물은 그 수명이 미세조직의 변화에 따라 강도나 연성이 저하되고, 특히 고온에서 하중을 받을 경우 그 변화가 가속화되어 그 수명을 소모하게 된다.

따라서 이러한 구조물의 미세조직, 물성변화를 감지하여 잔존수명을 계량적으로 산출함으로써 설비의 유지보수, 교체계획을 세우는 것이 수명평가의 주된 목적이다. 이러한 수명평가 기술은 기기의 종류, 사용조건, 환경 등에 따라 적용하는 방법이 달라지게 된다.

즉 터빈이나 보일러 드럼 등의 대형부품의 경우는 시료 Sampling을 위한 파괴가 곤란하므로 금속조직 검사, 비파괴 검사, 경도측정 등의 비파괴적방법이 사용되고 보일러 튜브와 같이 단관교체가 가능하거나, 소형부품의 경우 파괴시험인 Creep Rupture 시험을 실시하여 잔존수명을 결정한다.

수명평가의 또다른 적용은 설비의 수명연장(Life Extention)이다.

즉, 발전설비는 고온고압이므로 예측치 못한 요인으로 손상이 발생할 경우 재산상의 피해는 물론 인적피해를 가져올 수 있으므로 설계여유(Design Margin)가 크다.

따라서 설계수명이 다한 설비라 할지라도 실제로 남아 있는 잔존수명과 그 격차가 크므로 이러한 설계수명과 실제수명과의 차이를 줄여 설비의 안전이 보장되는 한 최대로 사용, 설비 투자를 줄이는데 유용하게 사용될 수 있으며 실제 설계수명이 다한 많은 설비가 이러한 수명평가 기술에 의해 현재 안전하게 운전되고 있다.

4. 향후 설비진단의 방향

앞에서 언급한 바와 같이 설비진단방법은 크게 3 가지로 사후관리, 예방, 예측점검 등이 있다.

병의 치료보다는 예방이 중요한 것처럼 향후 설비진단의 방향은 예측보수(Predictive Maintenance)을 더욱 강화시키고 이에 필요한 보다 정확하고 간편하게 현장에 적용될 수 있는 설비진단 방법의 개발에 힘을 기울여야 할 것이며 설비진단사례의 Data Base 구축등이 이루어져야 할 것이다.

5. 맺음말

지금까지 전력설비의 관리운용과 상태진단법, 향후과제에 대하여 개괄적으로 기술해 보았다.

설비진단분야에서 지금까지 쌓아온 우리의 기술과 능력이 국내산업계에 조그마한 도움이라도 되었으면 하는 마음 간절하며, 향후 이러한 설비진단의 기법, 설비운용 관리에 대한 의견과 기술이 앞으로 있을 기술세미나 등을 통하여 상호교환 될 수 있는 장이 마련되면 설비진단의 활성화에 따른 설비운영 능력제고에 큰 도움이 되리라 확신한다.

열병합발전설비성능시험 (시운전중심으로)

에너지 관리공단 집단에너지 사업본부
기술부장 김동욱

설계제작이 완료된 기기는 현장설치후 성능시험을 위해 시운전과정을 거친다. 시운전 단계에서는 사전에 작성된 기기사양서나 계약조건에 따라 시공사 또는 제작사가 보증하는 각종 운전 성능이 객관적으로 입증되어야 하므로 운전절차

와 계측방법이 발주사와 시공사 간에 충분히 협의되어야 한다. 또한 열병합발전소의 모든기기가 종합적으로 운전될 때와 시운전 대상 기기가 단독으로 운전될때의 조건은 상이 할수 있으므로 적절한 환산방법을 사전에 마련하여야 한다.

다음은 성능시험이 필요한 열병합발전소의 대표적인 기기인 증기터빈과 원심펌프의 성능시험에 관한 내용으로 공기압축기, 송풍기 등의 회전기기도 이러한 방식으로 적절하게 시운전 결과를 환산하여 보증점과의 차이를 판단할 수 있다.

1. 증기터빈의 성능시험

가. 보증사항

발주자가 터빈제작사에 요구하는 보증사항은 일반적으로 다음과 같으며 이중 일부나 전체를 규정하여 계약하게 된다.

- 1) 설계된 배압조건에서의 증기소비율
- 2) 배압변동에 따른 증기소비율의 변화
- 3) 최대운전압력(증기압력)
- 4) 최대운전온도(증기온도)
- 5) 최대운전온도로 연속운전 가능시간
- 6) 급수가열용 추기없이(일부 또는 전부) 운전시 최대출력
- 7) 정상운전(급수가열운전)시 최대출력
- 8) 공정용증기의 최대공급가능량
- 9) 공정용증기의 압력변동율
- 10) 각 추기단의 압력
- 11) 설계조건에서의 열소비율
- 12) 배압변동에 따른 열소비율의 변화
- 13) 운전가능한 최저출력
- 14) 보정계수(Correction factors)

상기 사항중 가장 중요하게 취급되는 항목은 열소비율(heat rate)에 대한 보증으로, 증기소비율보다는 열소비율이 사실상의 연료소비율을 의미하기 때문에 터빈의 성능을 좌우하는 중요한 척도가 된다. 그러나 열소비율의 측정은 운전조건이 설계조건과 일치하지 않기 때문에 적절한 환산이나 보정이 필요하게 된다. 발주자는 제작자에게 추기량과 온도, 압력이 표시된 열평형도(heat balance diagram)를 부하별 또는 운전조건별로 구분하여 제출하도록 요구하여 이를 기준으로 변화된 조건에 따라 환산 할 수도 있다.

그러나 제작자가 작성한 열평형도는 발전소의 전반적인 운전조건이 구체적으로 반영되지 않을 수가 있으므로 발주자 측에서는 보일러, 펌프, 열교환기 등의 특성을 충분히 감안하여 변화된 운전조건에서의 열소비율을 조정해야 하며, 이를 위해서는 보정계수를 활용하는 방법이 가장 바람직 하다.

나. 보정계수(Correction Factor)

증기터빈의 성능을 예상하기 위해서는 설계조건과 상이한 실제 운전조건에서의 성능을 환산하는 보정계수가 필요하며 이중 무추기운전

(Non Extraction Performance)조건에 대한 계수가 기준이 된다.

과거에는 “증기온도가 몇도 변화 하면 증기소비율은 1% 변화 합니다.” 하는 등의 아주 간단한 보정방법을 사용하였으며 이렇게 간단한 관계를 모든 부하조건에 획일적으로 적용하였다. 근래에는 사실과 맞지않는 이러한 방식의 보정방법은 사용하지 않고 보다 정밀한 수준의 보정계수를 부하조건에 따라 계산하여 사용한다.

Non Extraction Steam Rate(NESR)은 이론 증기소비율(Theoretical Steam Rate)과 터빈의 효율에 의해서만 결정된다. 이론증기소비율은 증기표로 부터 손쉽게 계산할수 있다. 반면 터빈효율은 전적으로 터빈 작자에 의해 결정되지만 터빈제작자도 변화된 어떤 조건에 대한 절대적인 효율을 계산한 대기보다는 효율의 변화율을 알고 있다고 생각하는 것이 적절하다.

터빈의 효율은 터빈 입출구 조건에 대한 증기 체적유량에 의해 변화한다. 그러나 근래에는 터빈입구에 설치된 유량조절밸브에 의해 입구증기 조건 변화에 따라 증기량의 체적변화는 없는 조건을 기준으로 하므로 체적유량 변화에 대한 보정은 적용하지 않는다. 즉 이러한 가정은 초증기 조건이 변화한다 하더라도 조절밸브에 의해 체적유량은 변화하지 않는다는 의미가 된다.

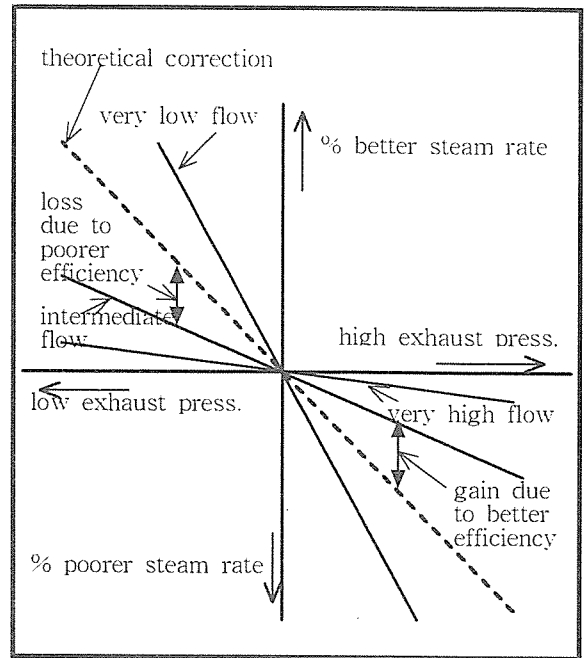
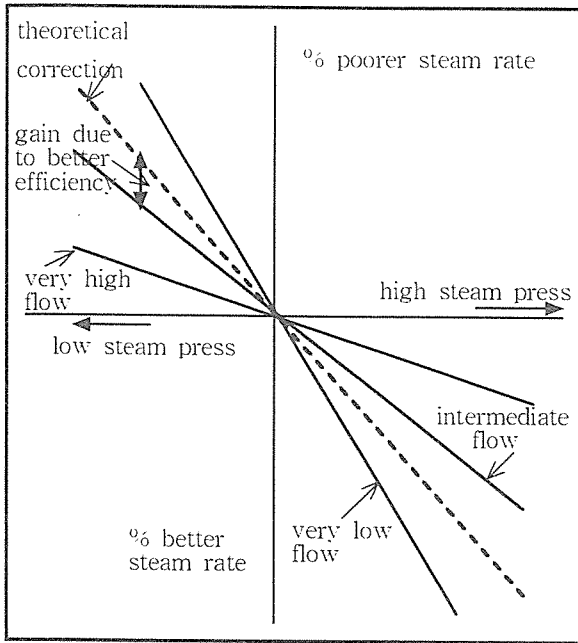
그러나 조절밸브의 개도가 일정할 경우 터빈으로 유입되는 증기의 중량유량은 다음과 같이 계산한다.

$$\text{Weight Flow} = K_1 \sqrt{(p_1/v_1)} = K_2(p_1/\sqrt{T_1})$$

다. 압력변화에 따른 보정

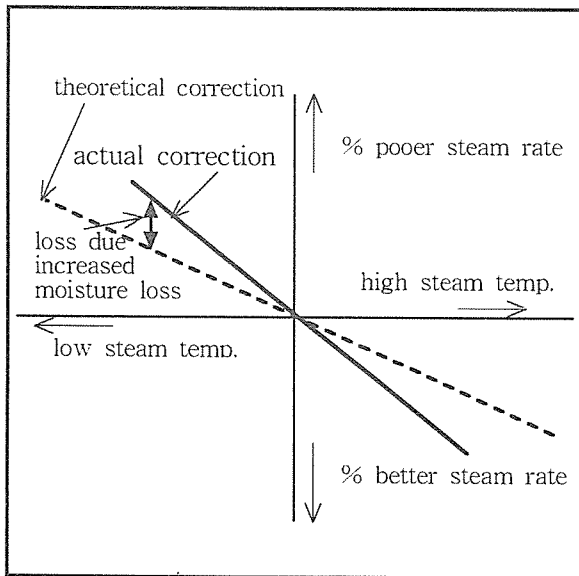
압력변화에 대한 보정계수를 작성하기 위해서는 온도변화가 없는 조건에서 압력변화에 따른 유량변화율을 산정하여 새로운 유량을 구한 다음 이 유량에 따라 배기유량을 정하고 변동된 배기효율을 계산하여 터빈전체의 효율을 구한다. 따라서 보정계수는 이론증기 소비율 변화 뿐만아니라 터빈효율 감소에 따른 손실까지도 포함하게 된다.

다음 좌표는 초증기 압력변화에 따라 증기소비율이 변동하는 경향을 나타내는 대표적인 예로서 체적유량이 많을 경우 점선으로 표시된 이론보정치 보다 증기소비율이 개선되는 효과가 나타나게된다. 이는 배기손실이 감소되어 터빈 전체효율이 증가되기 때문이다. 따라서 초증기 압력에 대한 보정계수는 배기의 체적유량과 관계가 되므로 각 유량별로 구분되어 표시되어야 한다.



라. 온도변화에 따른 보정

초증기 온도변화에 대한 보정계수는 압력변화의 보정방법과 유사하지만 온도변화에 따른 유효에너지 차이 뿐만 아니라 증기의 습분(moisture)변화가 터빈효율에 영향을 미치는 것을 반영하여야 한다. 온도변화에 따른 배기체적유량 변동량은 미미하므로 온도보정계수는 다음 좌표와 같이 간단하게 표시된다.



마. 배압변화에 따른 보정

배기압력 변화에 따른 보정은 배기체적유량 변동으로 인한 터빈효율 변화로 산정된다. 이 터빈효율 변화에 따라 배기증기조건이 변하여 유효에너지가 변하게 되므로 증기소비율이 변화한다. 배압변화에 따른 증기소비율의 변화는 다음과 같이 표시된다.

바. 보정계수의 활용

보정계수를 적절히 활용하기 위해서는 보정계수의 작성과정을 이해하는 것이 도움이 된다. 시운전 과정에서 측정된 각종 수치는 발주자와 제작사간에 계약된 조건으로 환산해야만 터빈의 성능을 평가 할수 있으므로, 증기 소비율은 1.나.항의 식으로 유량을 조정하여 적용하여야 한다. 즉, 시운전시 증기압력이 보증조건 압력보다 높다면 시운전시 측정된 유량은 감소된 유량으로 환산하여 증기소비율을 계산하여야 한다.

시운전시 측정된 유량은 보증조건 온도와 압력으로 환산 되어야 하며, 보증출력은 보정된 증기소비율에 의해 환산된 증기량으로 나누어 계산하여야 한다.

이러한 과정을 각 부하별, 증기조건별로 시운전된 수치에 적용하면 터빈의 실제운전 성능을 정확하게 표시할수 있으며 이렇게 환산된 수치로 각 보증조건 미달여부를 판단할수 있다.

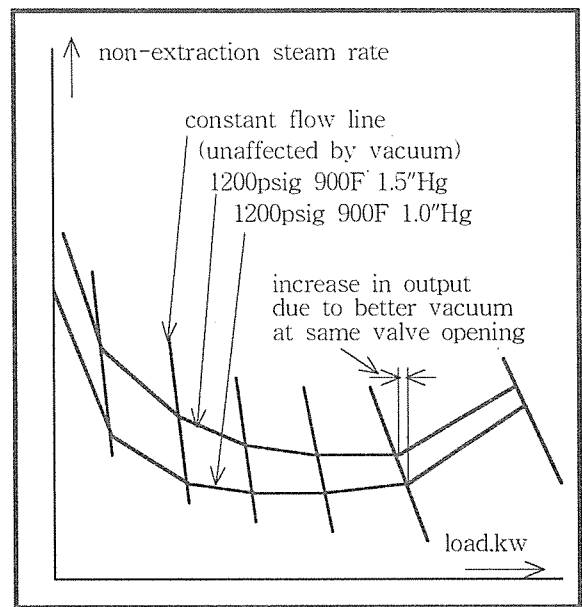
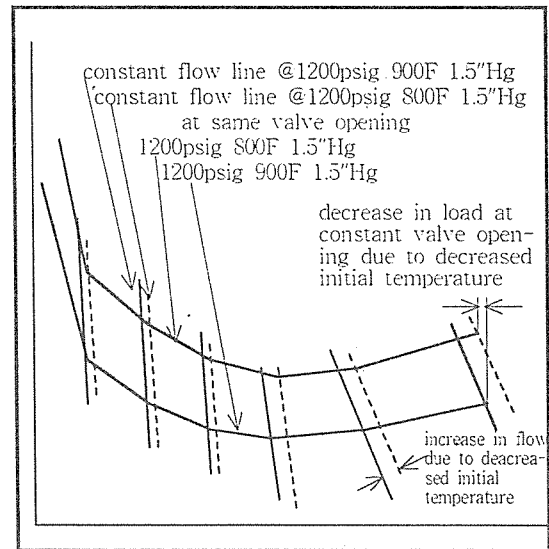
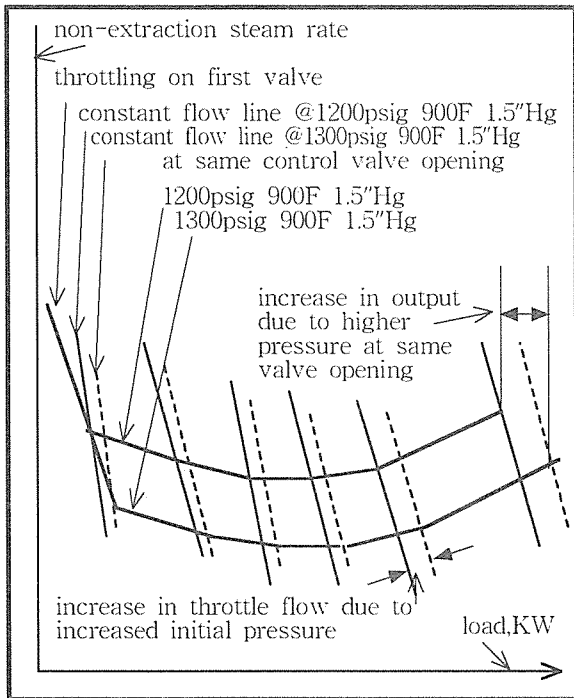
사. 열소비율 변화

다음 세가지 좌표는 대표적인 열소비율 변화를 나타내는 것으로 첫째 좌표는 초증기 압력이 증가하면 그상태에서의 조절밸브 개도가 변하지 않았다면 증기소비율이 감소하고 밸브포인트가 좌에서 우로 이동하면서 유량이 증가하기 때문에 출력이 증가하게 되는 경향을 나타내고 있다.

두번째 좌표는 초증기 온도변화에 따른 열소비율 변화로, 온도가 상승함에 따라 증기소비율이 개선되며, 그 개선되는 양은 온도상승에 따

큰 유량감소분 보다 많아 온도가 상승되면 출력이 증가됨을 보여주고 있다.

마지막 좌표는 배기압력 변화에 대한 열소비를 변화로 초중기 온도, 압력이 변화가 없으므로 조절밸브의 개도가 일정하면 밸브포인트는 constant flow 선상에 놓여지게 되지만 배기압력 보정계수 만큼 열소비율은 개선된다.



아. 요약

다음 도표는 터빈보정계수에 관련된 각종요소를 종합한 것으로 몇가지 항목은 부하상태(고부하 H, 저부하 L)에 따라 변화가 상반되게 나타난다. 이러한 현상은 고부하에서는 체적유량

이 증가하여 배기손실이 증가하기 때문이다. 아주 낮은 부하에서는 배기는 유효에너지가 부족

보정계수 변화 요약

| Effect | Change | Increased Pressure | Increased Temperature | Better Vacuum |
|-------------------------------|--------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Throttle Weight Flow | | Increase | Decrease | No Change |
| High-Pressure-End Volume Flow | | No Change | No Change | No Change |
| Exhaust Volume Flow | | Increase | Decrease | Increase |
| High-Pressure-End Efficiency | | No Change | No Change | No Change |
| Exhaust Efficiency | | (H) Decrease (L) Increase | Increase | (H) Decrease (L) Increase |
| Mechanical Efficiency | | Increase | Increase | Increase |
| Net Turbine Efficiency | | (H) Decrease (L) Increase | Increase | (H) Decrease (L) Increase |
| Available Energy | | Increase | Increase | Increase |
| Steam Rate | | Lower | Lower | Lower |
| Output | | Increase | Increase | Increase |

하게 되므로 체적유량이 증가하여 터빈효율이 개선되는 현상이 발생된다. 이러한 모든 특성이 정확하게 계산되어 적용된 보정계수를 사용하면 실제운전과 거의 동일한 운전상태를 예상할수 있으며 이러한 방법으로 시운전에서 기록된 수치를 설계운전조건으로 환산하여 보증점의 만족 여부를 판단할수 있게 된다.

2. 펌프 성능시험

가. TEST의 분류

- 1) SHOP TEST : 펌프성능을 가장 정확하게 시험하는 방법으로 주로 제작공장에서 실제의 운전조건과 유사하거나 동일한 환경을 설정해 놓고 정도가 높은 계측장치를 이용하여 시행한다. 보통 ACCEPTANCE TEST로 간주한다.
- 2) FIELD TEST : 실제로 운전될 장소에 펌프를 설치한후 정상운전조건 또는 극한 상황을 기준으로 시운전을 시행한다. 시험결과의 오차와 신뢰도는 사용하는 계측기의 정도, 설치상태에 따라 차이가 있으므로 충분한 사전계획이 필요하다. 발주자와 제작자의 합의에 따라 ACCEPTANCE TEST로 대신할 수도 있다.
- 3) INDEX TEST : FIELD TEST의 일종으로 펌프의 마모상태나 성능변화(차이) 등을 종합적으로 평가하기 위한 시험을 말한다. 따라서 대상 펌프는 동일한 절차와 계측기는 물론 동일인이 시험하는 것이 바람직하다.
- 4) MODEL TEST : 설계단계에서 특정펌프의 성능을 확인하거나 설계를 변경하여 운전조건을 개선할때 등 주로 대형펌프의 계약이전 단계에서 시행하는 시험을 말한다.

나. 용어의 정의

펌프의 시험 및 시운전에 관한 구체적인 규격은 HYDRAULIC INSTITUTE STANDARDS를 참조할수 있으며 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) VOLUME : 사용단위는 U.S.Gallon 또는 Cubic feet이며 $1\text{USG}=231.0\text{in}^3$, $1\text{ft}^3=7.4805\text{gal}$ 이다. 유량은 gpm, fps, mgd(million gallon per 24-hour day)을 사용한다. 물의 비중량(Specific Weight) w 는 70F° , 해발 0, 위도 40° 에서 측정된 순수로 62.1932 lb/ft^3 를 사용한다. 온도와 고도별 비중량은 ASME Power Test Code에 구체적으로 명시되어 있다.
- 2) HEAD : 기본단위는 Feet 로 압력단위인 psi는 다음과 같이 환산된다.

$$\text{Head, ft} = \text{lb/in}^2 \times 144/w$$

기준으로 하는 수위는 펌프형식에 따라 수평형

펌프는 축의 중심선, 수직형은 첫째단의 흡입 EYE, 수직형 양흡입 펌프는 흡입-토출 VANE의 중심선을 기준으로 한다.

3) VELOCITY HEAD : 측정계가 부착된 위치에서의 유량 fps를 단면적 square feet로 나누어 구한 평균유속 V , fps가 갖는 속도에너지로서 Velocity head, h_v , ft 는 다음과 같이 계산한다.

$$h_v = V^2/2g$$

여기서 g 는 중력가속도로 해발 0, 위도 45° 에서 32.17 ft/sec^2 을 사용한다.

4) FLOODED SUCTION : 펌프의 기준선(DATUM)이 수면보다 낮게 유지되는 상태로 수면은 대기중에 노출되어야 한다. 흡입수두는 대기압보다 높게 유지된다.

5) TOTAL SUCTION LIFT(h_s) : 흡입압력이 대기압보다 낮은 조건으로 펌프흡입측에 설치된 계측기로 측정된 압력을 수두로 환산하여 h_v 와 기준선과 계측기의 수두차를 감안 하여야 한다.

6) TOTAL SUCTION HEAD(h_s) : 흡입압력이 대기압 이상인 경우로 측정된 흡입압력을 수두로 환산하고 h_v 와 기준선과 계측기의 수두차를 더한 값을 의미한다.

7) TOTAL DISCHARGE HEAD(h_d) : 토출측 계측기 압력에 h_v 와 계측기의 수두차를 합한 값을 의미한다.

8) TOTAL HEAD(H) : 펌프에 의해 유체에 가해진 일량을 의미하며 h_d 와 h_s 의 산술적 차이를 의미한다. Suction lift가 존재하면 h_d 에 Suction lift를 합한 값이 되며, Suction head가 +인 경우 h_d-h_s 로 된다.

9) NET POSITIVE SUCTION HEAD, NPSH (h_{s_0}) : h_s 를 절대압력으로 표시하고 여기에 유체의 포화증기압을 제한 값을 뜻한다.

10) DRIVER INPUT(ehp) : 구동장치에 투입된 일량.

11) PUMP INPUT(bhp) : 펌프 축으로 전달된 일량.

12) LIQUID(or WATER)HORSE POWER (whp) : 펌프에서 유체에 가해진 유효일량으로 다음과 같이 계산된다.

$$\text{whp} = \text{sp.gr} \times \text{gpm} \times H/3,960(\text{hp})$$

13) EFFICIENCY : 펌프효율 (E_p)는 펌프축에 전달된 일량에 대한 whp의 비율이며 Overall Efficiency(E_o)는 구동장치에 투입된 일량에 대한 whp의 비율을 말한다.

$$\text{즉, } E_p = \text{whp/bhp} \times 100(\%)$$

$$E_o = \text{whp/ehp} \times 100(\%)$$

다. 측정오차

SHOP TEST 시 사용되는 계기의 허용오차는 ASME Power Test Code에 규정되어 있으며, Field Test 시 사용되는 계기의 허용오차는 ANSI B-58.1에 명시되어 있다.

그 내용은 끝단의 표와 같다.

이와 같은 오차범위의 계기를 사용했을 때 발생하는 최대오차 범위(%)는 다음으로 계산된다.

$$Ae = \{(\pm H)^2 + (\pm Q)^2 + (ehp)^2\}^{1/2}(\%)$$

라. 사전점검 사항

시험운전 이전에 확인 및 점검 해야할 사항은 다음과 같다.

- 1) Impeller, Casing passage
- 2) Pump & Motor alignment
- 3) 계측장치
- 4) 동력계통
- 5) 윤활장치
- 6) Wearing ring 과 각종 간격 (clearance)
- 7) Stuffing box, Mechanical seal

〈현장시험시 각종계기 허용오차〉

| 측정 항목 | 계측기 | 허용오차 (±%) |
|--------------------|----------------------------|-----------|
| 유량 | Venturi meter | 3/4 |
| | Nozzle | 1 |
| | Pitot tube | 1 1/2 |
| | Orifice | 1 1/2 |
| | Disk | 2 |
| | Piston | 1/4 |
| | Tank(vol. or wt.) | 1 |
| | Propeller meter | 4 |
| 압력 | Electric sounding line | 1/4 |
| | Air line | 1/2 |
| | Liquid manometer | |
| | 3-5 in deflection | 3/4 |
| | over 5 in deflection | 1/2 |
| | Bourdon gage(5in min dial) | |
| | 1/4-1/2 full scale | 1 |
| 1/2-3/4 full scale | 3/4 | |
| over 3/4 scale | 1/2 | |

| 측정 항목 | 계측기 | 허용오차 (±%) |
|-------|-------------------------------|-----------|
| 동력 | Watthour meter/stopwatch | 1 1/2 |
| | Portable recording wattmeter | 1 1/2 |
| | Test type precision wattmeter | |
| | 1/4-1/2 scale | 3/4 |
| | 1/2-3/4 scale | 1/2 |
| | over 3/4 scale | 1/4 |
| 속도 | clamp on ammeter | 4 |
| | Revolution counter/stopwatch | 1 1/4 |
| | Handheld tachometer | 1 1/4 |
| | Stroboscope | 1 1/2 |
| 전압 | Automatic counter/stopwatch | 1/2 |
| | Test meter : 1/4-1/2 | 1 |
| | Test meter : 1/2-3/4 | 3/4 |
| | Test meter : 3/4-full | 1/2 |
| | Rectifier voltmeter | 5 |

에너지소비효율 등급표시제도란?

에너지소비효율 또는 사용량에 따라 1등급(고효율)~5등급(저효율)으로 표시하도록 함으로써

- 소비자들이 에너지절약형의 효율 높은 제품을 손쉽게 판단하여 구입할 수 있도록 하고
- 제조업체에서는 생산단계에서부터 원천적인 에너지 절약형 제품을 생산하도록 유도하기 위한 제도입니다.

등급표시 대상품목 및 표시방법

| 대 상 품 목 | | 표시방법 | |
|---------|-------------------------------------|-------------------------------|--------|
| 품 명 | 범 위 | | |
| 전기 냉장고 | 정격소비전력 500W 이하이고 유효내용적 1,000L 이하 | 제품의 전면 | |
| 조 명 기 | 백열 전구 | 소비전력 300W형, 60W형, 100W형 | 포장물 및 |
| | 형광 램프 | 직관형 : 20W형, 40W형 환형 : 30W형 | 개별포장물 |
| | 형광 램프용 안정기 | 직관형 : 20W형, 40W형 환형 : 32W형 | 제품의 전면 |
| 전기 냉방기 | 정격냉방능력 9,000Kcal/h이하 | 제품의 전면 | |