

하나로 2차 냉각펌프의 고진동 해소방안

박용철*

The Solution of High Vibration of the Secondary Cooling Pump in HANARO

Yong-Chul, Park*

Key Words: High vibration (고진동), Secondary cooling pump (2차 냉각펌프), Alinement (축정렬)

ABSTRACT

The heat produced by the fission in the fuel of HANARO, 30 MW of research reactor, was transferred from the primary cooling water to the secondary cooling water through heat exchangers. The secondary cooling water absorbed the heat was circulated by secondary cooling pumps and cooled through 33 MW of cooling tower. Each capacity of the three secondary cooling pumps was fifty percent (50%) of full load. The two pumps were normally operated and the other pump was standby. One of the secondary cooling pumps has often get troubles by high vibration. To release these troubles the pump shaft has been re-aligned, the pump bearing has been replaced with new one, the shaft sleeve has been replaced with new one, the shaft and the impeller have been re-weight balanced representatively or the vibration of motor has been tested by disconnecting the shaft of pump. But the high vibration of pump cannot be cleared. We find out the weight balance trouble of the assembly that the impeller is installed in the shaft. After clearing the trouble, the high vibration is released and the pump is operated with smooth. In this paper the trouble solution of secondary cooling pump is described including the reason of high vibration

1. 서론

하나로의 핵반응으로 발생하는 열은 1차 냉각수에 의해 냉각되며 열을 흡수한 1차 냉각수는 열교환기를 통해 2차 냉각수에 의해 냉각된다. 1차 냉각수의 잔열을 흡수한 2차 냉각수는 냉각펌프에 의해 냉각탑을 지나면서 강제 통풍으로 냉각된다. 이 냉각펌프는 50%용량으로 3대가 설치되어 있으며 2대가 운전되고 한 대가 대기상태에 있다. 그 중 한 대의 펌프가 고진동으로 인하여 자주 고장이 났다. 이를 해결하기 위하여 펌프 축정렬, 펌프 베어링 교체 및 축 슬리브를 교체하였지만 고진동이 진정되지 않았다. 현장에서는 그 원인을 해소할 수 있는 방안을 찾지 못하였다. 결국 공장에서 정밀 진단하여 고진동의 원인이 회전체의 편

심과 무게 불균형에 의해 발생됨을 확인하였다.

본 논문에서는 이를 해결하기 위한 과정을 기술하였으며 고진동의 원인, 개선방안, 수리 및 수리결과를 고찰하여 해결방안을 제시하였다.

2. 본론

2.1 고진동의 발생

하나로의 2차 냉각펌프는 양흡입 펌프로서 하나로의 핵반응에 의해 발생된 열을 흡수할 수 있도록 열교환기에 냉각수를 공급한다. 이 냉각수가 1차 냉각수의 열을 흡수하여 핵반응 열을 제거해 원자로가 안전하게 핵반응이 이루어지도록 하기 위해 냉각펌프의 성능을 3개월 주기로 점검한다⁽¹⁾.

펌프의 성능은 정격 양정에서 유량을 만족하면 성

* 한국원자력연구소

능이 보장되지만 그 성능의 유지 능력을 예측할 수 있는 것은 펌프의 진동과 베어링의 온도이다. 펌프의 주요 부분은 케이싱, 회전차 (impeller), 축봉장치, 동력 전달장치 및 모터이다. 이 중에서 모터, 동력 전달장치 및 회전차가 구동부분이고 나머지는 고정장치이다. 동력 전달장치는 모터의 회전운동 에너지를 회전차에 전달하여 유체 에너지로 변환시킬 수 있도록 동력을 전달하는 축으로 구성되어 있다. 이 축은 베어링에 의해 지지되며 베어링의 외륜이 고정부에, 내륜이 축에 각각 고정되어 회전운동을 한다.

케이싱 내에 있는 회전차가 축에 고정되어 있어 회전력에 의해 정지된 물을 회전차 내부로 흡입하여 송출하는 데 유동 마찰, 유동방향 변경 및 유로 면의 축소 확대에 의하여 열과 진동이 발생한다. 그리고 제작상의 문제로 축이나 회전차의 무게 불균형, 편심 등에 의해 진동이 발생할 수 있고, 장시간 사용으로 마모에 의하여 진동이 발생할 수 있다.

하나로 2차 냉각펌프 중 한 대만 표 1과 같이 1995. 2월부터 정상 가동한 이후 5회에 걸쳐 고진동으로 인한 보수를 하였으며 보수주기는 평균 14개월이었다.

2.2 고진동의 원인

고진동의 점검방법은 3개월 주기 점검시 마다 모터 및 펌프의 전 후단 4곳에 대하여 각 지점별로 수평, 수직 및 축 방향으로 모두 12개 지점에 대해 진동 측정기로 측정하여 진폭이 91.4 마이크로 (3.6 mils)을 초과하는 경우 고진동으로 분류하였다⁽²⁾.

Table 1 Maintenance record of pump due to high vibration

Date	Repair Work	Operating Period (month)
1997. 7	replacing motor bearing	29
1998. 8	replacing pump bearing	11
1998. 11	replacing pump bearing	3
1999. 12	replacing motor bearing, wearing ring & sleeve	9
2001. 2	overhaul	14

고진동의 주요 원인은 캐비테이션, 부적절한 흡입양정, 기계적 결함, 전동기에 의해 전달된 진동, 회전차의 결함, 부적절한 펌프의 기초, 송출관에 설치된 제어밸브 위치의 부적절함 등이다⁽³⁾. 하나로의 경우 냉각탑 수조가 펌프 보다 더 높은 위치에 있어 32°C의 냉각수가 하향 구배로 공급되므로 캐비테이션이 발생하지 않고, 흡입양정도 부적절하지 않다. 송출관에 유량을 조절하는 밸브가 없고 완전 개폐형 밸브가 설치되어 있어 유량 제어에 의한 결함이 발생하지 않는다. 그리고 펌프 기초도 펌프 및 모터 지지대가 콘크리트 패드에 묻혀 있고 지지대 상부는 경고한 구조물로 되어 있어 큰 영향을 받지 않을 것으로 판단하였다.

기계적 결함은 축이 휘거나, 베어링이 마모되거나, 커플링의 축정렬이 부적절한 경우이며 구조적 결함보다는 장시간 사용으로 오는 결함이다. 그래서 고진동이 발생하면 베어링을 교체하고, 커플링의 축정렬을 다시 하였다. 수리 후의 펌프 진동상태를 그림 1에 나타내었으며 측정위치는 모터 후단에서부터 펌프 후단까지 각 베어링에 대해 일련번호를 부쳐 수직, 수평 및 축방향으로 분류하여 각각의 측정위치를 정하였다.

그림에서와 같이 수리 후에는 허용기준을 만족하였으나 3개월 주기로 점검하였을 때 진동값은 점점 상승하는 경향을 보였으며 고진동으로 발전되었다.

그리고 그림 2와 같이 베어링, 슬리브 및 웨어링 링을 교체하여도 모터 전 후단의 수평방향 진동이 해소되지 않고 여전히 고진동 상태를 유지하는 경우도 있었다.

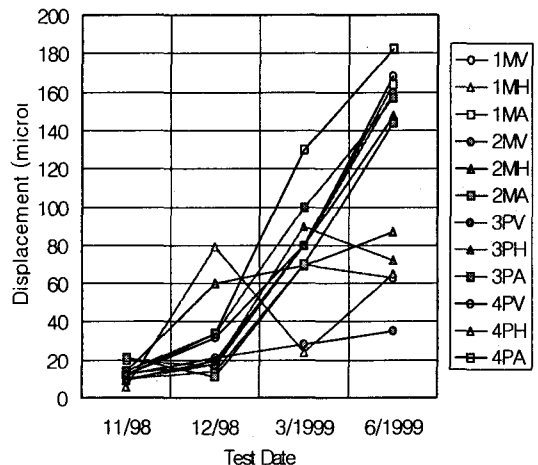


Fig. 1 Development of high vibration after replacing pump bearing

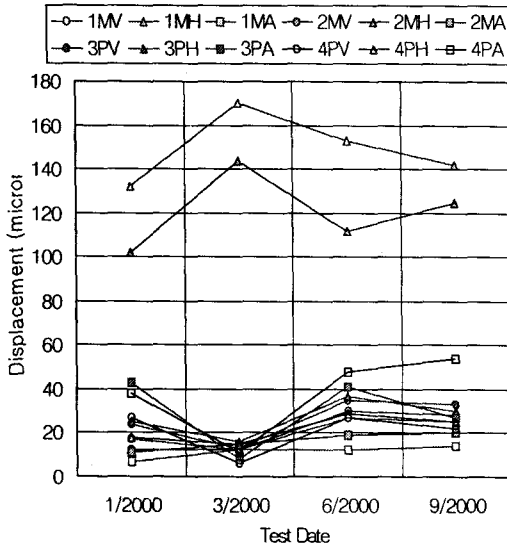


Fig. 2 Development of high vibration after replacing pump bearing, sleeve & wearing ring

베어링이 마모되면 소음이 발생하고 진동값이 높게 나타나 교체를 하였으나 냉각펌프에 사용되는 베어링은 엔트 프릭션용이며 수명시간이 100000 시간이다⁽⁴⁾. 이 경우 하나로의 운전 주기를 감안할 때 월 평균 약 310시간을 운전하면 약 27년 이상 사용하여야 하나 평균 14개월 주기로 교체하는 것은 유효수명의 5%에 불과하다. 베어링 마모에 의한 고진동 외에 다른 위인이 있는 것으로 판단하였다.

그 외의 진동 요소로서 모터의 진동이 펌프에 전달되는 경우이다. 모터의 축이 커플링에 의해 펌프 축에 전달되므로 커플링을 해체한 상태에서 모터만 회전하였을 때의 진동을 그림 3에 나타내었다. 진동값은 대체로 낮게 유지되었으며 공급시의 모터 진동과 비교하였을 때 큰 변화를 발견할 수 없었다. 그래서 모터에 의한 진동이 있지만 고진동에 영향을 미칠 수준이 아닌 것으로 판단하였다.

다음으로 회전차의 결함이며 무게 균형이 맞지 않거나 일부가 회전차의 유로가 막히는 경우이다. 전자의 경우 입수 검사시 회전차의 무게 균형을 확인하고, 후자의 경우는 펌프 전단에 냉각탑 수조의 흡입구에 스크린이 설치되어 있어 이물질의 유입이 차단되므로

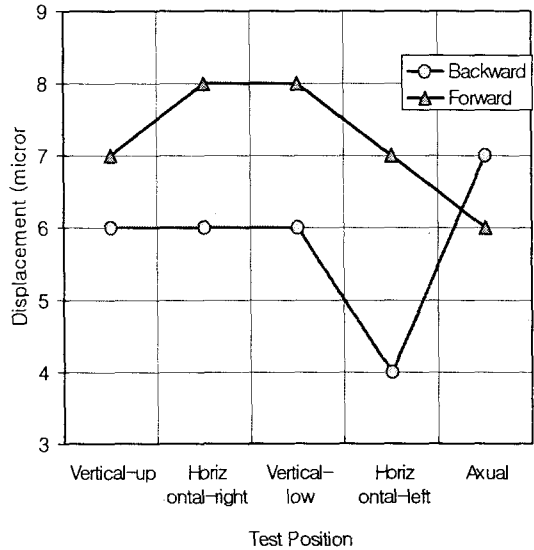


Fig. 3 Vibration of motor under unloading condition

회전차의 유로가 막히는 일은 불가능하다.

3. 고진동 원인 제거 및 수리

3.1 동심측정

베어링 다음으로 고진동에 민감한 영향을 미치는 것이 회전체 (driving parts)의 무게 균형이다. 이러한 검사는 측정장치와 주변시설이 필요하므로 공장에 입고하여 정밀검사를 하였다.

축에 슬리브와 회전차가 조립된 상태로 정반 위에 놓고 양단을 V 블록으로 지지하여 다이얼 게이지로 동심을 측정하였다. 측정부위는 그림 4와 같이 축은 양단, 회전차는 양 흡입부와 토출부에 단이 지어있어 각 단에 대해 각각 측정하였다.

축의 경우 양단을 측정하였을 때 6시 방향에서 0.01 mm의 편차를 보였으나 제작자 공차기준 0.02 mm를 만족하여 축의 동심은 건전한 것으로 판단하였다.

회전차에 대해 각 측정 위치별 동심 상태를 그림 5에 나타내었다. 양흡입구의 가공상태가 불일치하고, 최대 0.09 mm의 공차를 보여 기준치를 상회하였다. 특히 공통 토출구 표면이 2시 방향으로 편심되어 있어 고진동의 주요 원인으로 판단하였다. 그래서 각 원주

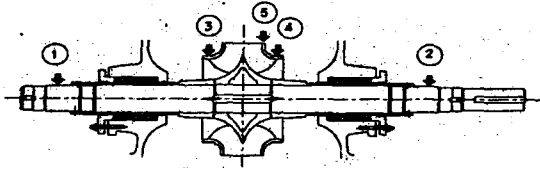
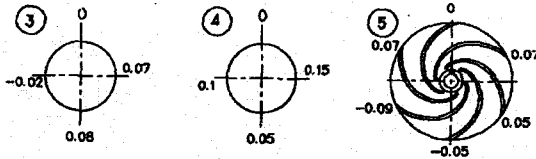
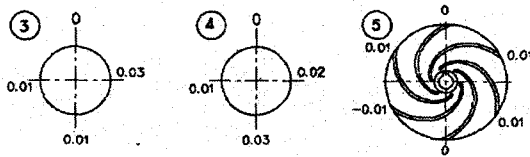


Fig. 4 Measuring point for the concentrations of pump driving part



a) before modification



b) after modification

Fig. 5 Concentration of Impeller

면을 0.1 mm 씩 가공하여 허용기준 이내로 유지하였다.

3.2 무게 균형시험

축은 동심을 유지하고 있어 무게 균형 시험에서 제외하고 회전차에 대해 무게 불균형 상태를 측정하여 표 2에 나타내었다. 양흡입 회전차를 편의상 왼쪽과 오른쪽으로 구분하였다. 왼쪽의 경우 시계방향으로 22°의 위치에 227.27 g, 오른쪽의 경우 시계방향으로 199°의 위치에 181.82g의 불균형량이 각각 발견되었다.

펌프 회전차의 경우 평형도 등급은 G6.3이 적용된다⁽⁵⁾. 이 경우 허용 불균형량은 11.6g이며 이를 상회하였다. 해당 부위를 가공하여 좌 우축의 불균형량은 2g 이내로 유지하였으며 이 불균형량은 기준치 보다 한 단계 낮은 G2.5의 허용량을 만족하는 수준이므로 불균형량이 최소화되었다.

3.3 슬리브

Table 2 Unbalance weight of impeller

Description		Before Modification	After Modification
Left Side	Position (clockwise, °)	22	282
	Unbalance weight (g)	227.22	1.98
Right Side	Position (clockwise, °)	199	87
	Unbalance weight (g)	181.82	1.85

Table 3 Characteristics of packing

Description	Design condition	Lubricated PTFE impregnated asbestos braided packing	Grease impregnated cotton braided packing
Working press. (kg/cm ²)	5	25	10
Working temp. (°C)	40 ~ 50	-100 ~ 280	-50 ~ 80
PH	7 ~ 9	4 ~ 12	6 ~ 8
Pump velocity (m/s)	7	14	8

슬리브는 축의 마모를 최소화하기 위해 축보다 약간 황동으로 제작된다. 슬리브 한쪽은 축과 임펠러 고정을 위한 키에 의해 고정되고 다른 한쪽은 씰 너트에 의해 고정되어 축회전시 일체가 되어 회전한다. 누수를 막기 위해 설치된 패키징을 제거하였을 때 슬리브가 폭 22 mm, 길이 5 mm로 심하게 마모되었다.

이것은 누수량을 줄이기 위해 그랜드를 조여 패키징을 가압하였을 때 압착된 패키징에 의해 슬리브가 마모된 것이다. 현재 사용한 패키징은 윤활유 임형 석면편조 패키징이며 윤활성이 뛰어나고 기계적 강도가 높아 재래식 그리스 패키징의 대체품이다. 그러나 저속 펌프에서 황동으로 만들어진 슬리브의 마모를 최소화하기 위해 그리스가 주입된 면 패키징으로 교체하였다. 이 두 패키징

의 특성을 표 3에 정리하였으며 그리스가 주입된 먼 패키지가 냉각펌프의 운전조건에 더 적합하기 때문이다.

4. 수리 결과 및 분석

4.1 수리 후 진동값의 변화

펌프의 측정렬을 하기 위해 커플링에 다이얼 게이지를 설치하고 90° 간격으로 회전하여 동심을 측정하였다. 그러나 커플링이 기어형이므로 다이얼 게이지의 설치 공간이 부족하여 게이지를 부착하는 힘이 그 무게를 견디지 못해 움직이므로 정확한 측정렬을 할 수 없었다. 그래서 측정렬 방식은 직선자로 커플링 외면을 90도 간격으로 등분하여 동심상태를 유지하였다⁽⁶⁾⁽⁷⁾. 정량적으로 그 오차범위를 표시할 수 없으나 측정렬 상태가 진동으로 나타나므로 펌프 기동시 진동상태가 만족하면 측정렬도 만족한 것으로 판단하였다.

그리고 모터의 고정 볼트 구멍이 원형으로 가공되어 있어 측정렬시 움직일 수 있는 여유 공간이 부족하여 제대로 측정렬을 할 수 없었다. 이러한 부적절한 측정렬이 고진동의 원인인 것으로 판단되어 볼트 구멍을 장방향으로 가공하여 측정렬 공간을 확보하였다.

펌프 측정렬 후 진동을 측정하였으며 모터 전 후단과 펌프 전 후단 베어링에 대하여 수평 수직 및 축방향으로 측정하였다. 진동상태가 완화되었기 때문에 일정간격의 측정보다는 시간을 늘리면서 변화추이를 관찰하기 위해 가동 후 10분, 30분, 60분 및 120분 간격으로 진동을 측정하여 그림 6에 나타내었다.

최대 진폭이 26미크론을 지시하여 기준치의 30%이하를 유지하였다. 대개 수리 후의 진동은 기준치를 만족하면 양호한 것으로 판정하나 몇 차례의 수리 경험에 따르면 평균 14개월 주기로 고진동이 발생하므로 사용 여유를 가지기 위해 기준치의 30%를 설정값으로 정하였다. 그림에서 적색으로 표시한 것이 2시간 후의 진동값인데 이는 설치 후 10분이 경과하였을 때의 값과 유사함을 보이고 있어 각 지점의 진동상태가 일정값에 근접하여 안정되어 있음을 알 수 있다.

고진동 재발을 조기 발견하기 위해 3개월 단위의 주기점진 자료를 기준하여 측정위치별 진동의 변화 추세를 그림 7에 표시하였으며 진동의 변화추세는 매우 안정적인 상태를 보였다. 수리 후 2개월이 지난 시점에 다소 진동값이 상향되었으나 최고값이 30 미크론을 상회하지 않고, 5개월이 경과한 시점에서도 진동값이 거의

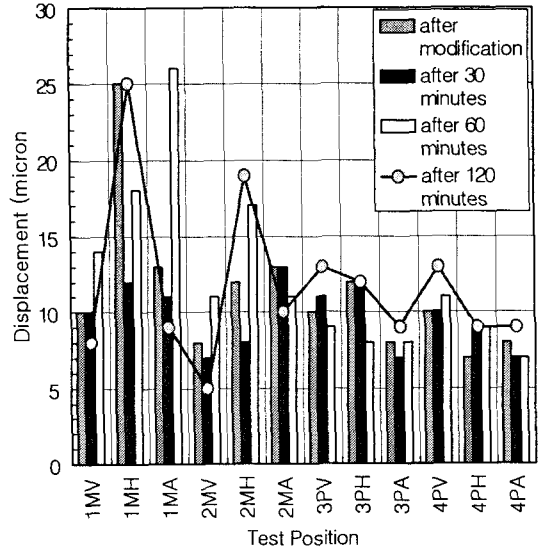


Fig. 6 Vibration after overhaul

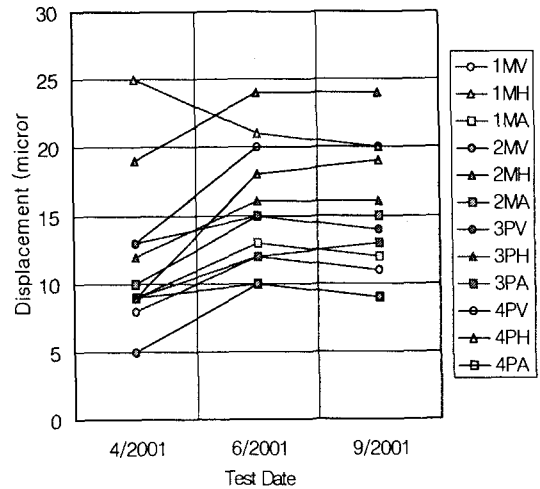


Fig. 7 Vibration of periodical test

변화 없이 일정값에 근접하여 매우 안정되었다.

4.2 펌프의 성능 검정

고진동 해소를 위해 회전차를 1 mm 두께로 가공하여 실제로 회전차 외경이 감소되었다. 이로 인한 펌프 성능상의 변화를 검정하기 위해 펌프 성능시험을 실시하고 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

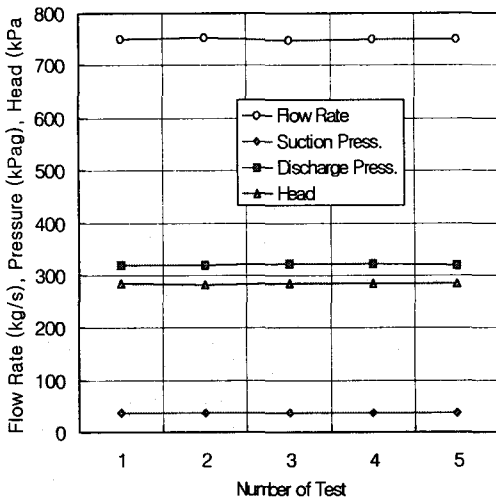


Fig. 8 Performance Test after overhaul

측정방법은 5분 간격으로 펌프의 흡입 및 토출 압력과 유량을 각각 측정하였으며 펌프의 양정은 압력계의 위치가 동일하므로 입출구 압력차로 표시하였다⁽⁷⁾.

측정결과 평균 유량은 양정이 약 29m (285 kPag)의 수두일 때 750 kg/s를 나타내어 설계 유량 (540 kg/s @27.5 m 수두, 270 kPag)을 만족하였으며 회전차 동심교정으로 인한 회전차의 외경 변화가 펌프성능에 영향이 없음을 확인하였다.

5. 결론

펌프 고진동에 대하여 원인을 분석하고 이를 제거하여 해소할 수 있었다. 이 과정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 펌프 회전차의 편심과 과다한 무게 불균형이 고진동의 주요원인으로 판단된다. 이를 해소하기 위해서는 펌프 회전차는 일정한 운전시간이 경과하면 마모 등으로 무게 불균형이 발생하므로 주기적인 정밀 점검이 필요하다.

2) 펌프 축과 모터의 측정렬이 부적당한 경우에도 고진동이 발생하므로 주기적으로 진동값을 측정하고 진동값 변화시 우선적으로 측정렬이 점검되어야 한다.

3) 펌프 베어링의 수명을 단축시키는 것은 고진동 이외에 윤활유가 적절하지 못하면 윤활유 유막을 형성하지 못하여 베어링이 손상되므로 운전온도에 적합한 윤활유가 선정되어야 한다.

4) 펌프의 패키징은 고진동과 직접적인 관련은 없지만 부드러운 면 패키징으로 교체한 것이 적은 마모로 밀봉상태가 우수하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 박용철, 1999. 10, "비안전성 펌프 및 체크 밸브 점검", KAERI HANTAP-05-OD-ROP-PI-04-1.
- (2) D. K. Kim, 1991. 10, "Performance Test Procedure for Secondary Cooling Pump", Chung Woo Ind. Co., Ltd, KM-711-PT-CW101.
- (3) D. K. Kim, 1991. 10, "Instruction Manual for Secondary Cooling Pump", Chung Woo Ind. Co., Ltd, KM-711-MM-CW001.
- (4) C. H. Kim, 1989. 12, "Technical Specification for Secondary Cooling Pumps", KOPEC. KM-711-DT-P001.
- (5) Korean Industrial Standard, 1982. 6, "Balance Quality of Rotating Machinery", KS B 0612.
- (6) Hwa Sung Korea Co., Ltd, "Couplings", CAT-61-NO. 9405, p31 thru. p41.
- (7) Hydraulic Institute, fourteenth edition, "Hydraulic Institute Standards for Centrifugal, Rotary & Reciprocating Pumps", p86 thru. p146.