

# 산업설비에서의 펌프 응용



글/이정우

〈영풍정밀공업(주) 기술이사·기술연구소장〉

### 3. 펌프의 응용 기술(계속)

#### 2) 캐비테이션

##### (1) 펌프의 캐비테이션

양액이 물인 경우 100°C가 되면 끓지만 이것은 1기압의 압력하에서의 현상이며 압력이 저하하면 비등점은 100°C이하로 되며, 압력이 더욱 저하하면 나중에는 상온에서도 끓는 현상이 일어나게 된다. 이것은 액체에는 그 온도에 대응하는 포화증기압이 존재하며 액체의 압력이 그 온도에서의 포화증기압 이하로 내려가 액체의 내부에서 증발하여 기포가 생기는 것이다.

펌프 내부에서도 흡상양정이 높거나, 유속의 급변 또는 와류의 발생, 유로에서의 장애 등에 의해 압력이 국부적으로 포화증기압 이하로 내려가 기포가 생성되는 현상이 일어날 수 있는데, 이 현상을 캐비테이션이라 한다. 펌프에서는 회전차 입구부분에서 발생하는 경향이 크고, 생성된 기포가 액체의 흐름에 따라 이동하여 고압부에 이르러 급격히 붕괴하는 현상이 되풀이됨에 따라 펌프의 성능은 저하되고, 진동, 소음을 수반하고, 불안정한 상태를 나타내며 나중에는 양수 감소 또는 양수불능이 된다.

또한 캐비테이션이 오랜 시간동안 계속되면 기포가 터질때 생기는 충격의 되풀이에 의해 재료의 손상이 발생된다. 이와 같이 캐비테이션의 발생은 펌프의 성

능저하, 재료의 손상 등 해로운 영향이 있기 때문에 캐비테이션 발생이 방지되도록 흡입조건에 결정에 각별한 주의가 필요하다.

##### (2) 흡입수두(NPSH)

캐비테이션은 액체의 압력이 포화증기압 이하로 되면 생기는 것이므로 캐비테이션의 발생을 막는 데는 펌프내에서 포화증기압 이하의 부분이 생기지 않도록 하면 된다. 이를 위해서는 펌프의 흡입조건에 따라 정해지는 유효 흡입수두(NPSH<sub>av</sub>) 및 흡입능력을 나타내는 필요 흡입수두(NPSH<sub>rv</sub>)에 대하여 생각해 볼 필요가 있다. 여기서 NPSH는 Net Positive Suction Head의 약어이다.

##### ① 유효 흡입수두(NPSH<sub>av</sub>)

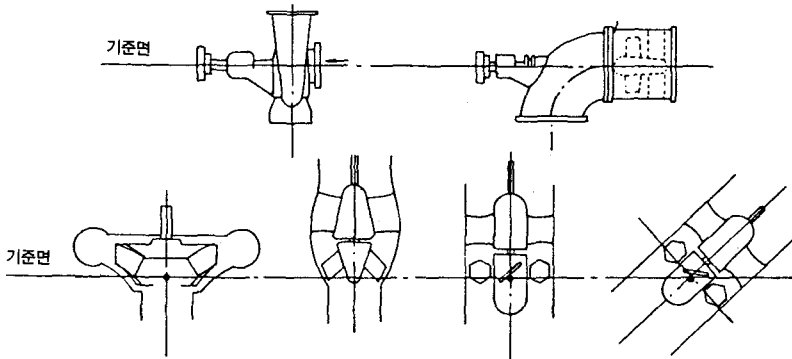
펌프가 설치되어 사용될 때 펌프 그 자체와는 무관하게 흡입측의 배관 또는 System에 따라서 정하여지는 값으로 펌프 흡입구 중심까지 유입되어 들어오는 액체에 외부로부터 주어지는 압력을 절대압력으로 나타낸 값에서 그 온도에서의 액체의 포화 증기압을 뺀 것을 유효 NPSH라 한다.

##### a) NPSH<sub>rv</sub>의 계산식

$$NPSH_{rv} = h_{rv} = P_s / \gamma - P_v / \gamma \pm h_s - fV_s^2 / 2g \dots \dots (1)$$

여기서, h<sub>rv</sub> : 유효흡입 헤드(m)

P<sub>s</sub> : 흡수면에 작용하는 압력(kgf/m<sup>2</sup> abs)



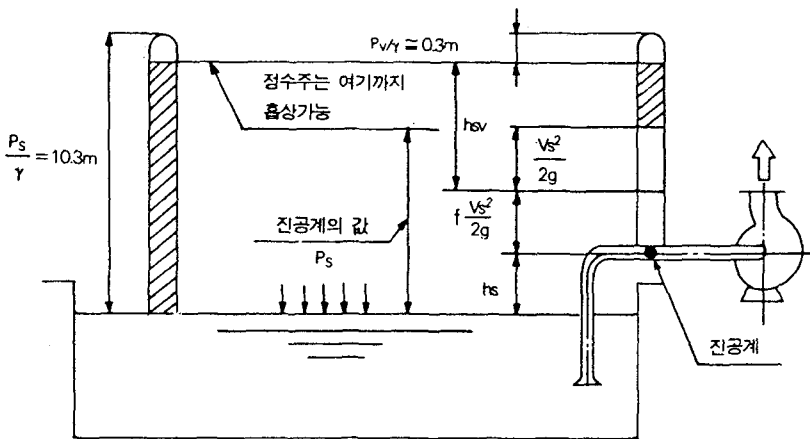
〈그림 1〉 펌프의 형식 및 설치방법에 따른 기준면

$P_v$  : 사용온도에서의 액체의 포화 증기압 ( $kgf/m^2$  abs)

$r$  : 사용온도에서의 단위체적당의 중량 ( $kgf/m^3$ )

$h_s$  : 흡수면에서의 펌프 기준면(〈그림 1〉 참조)까지 높이( $m$ ) (흡상되면 음(-), 가압되면(+))

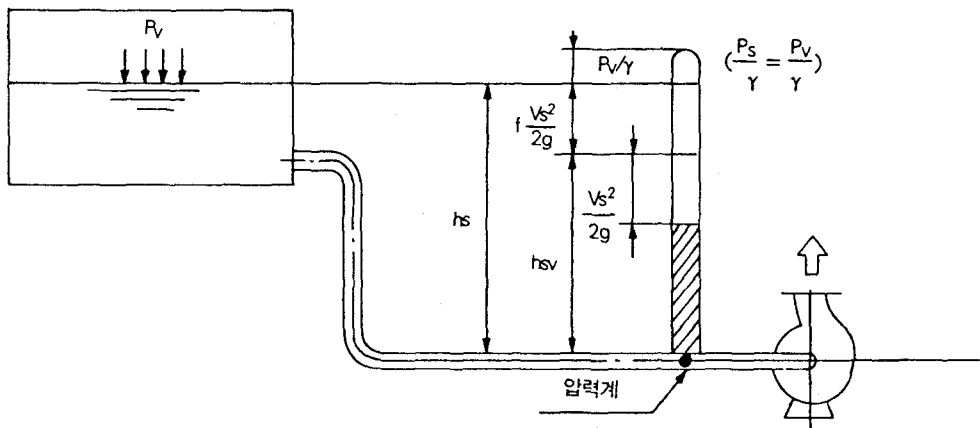
$fV_s^2/2g$  : 흡입측 배관에서의 총손실 수두( $m$ )



〈그림 2〉 흡수면에 대기압이 작용하는 흡상의 경우

식(1)에 의하면  $NPSH_{a,v}$ 은  $h_s$ 가 일정하다고 가정하면 토출량이 증가하거나, 흡입측의 배관 길이가 길어지는 만큼 작아져서 캐비테이션에 대한 위험도가 높아진다. 펌프의 기준면은 〈그림 1〉에 표시되어 있다.

b) 흡수면에 대기압이 작용하는 경우의  $NPSH_{a,v}$   
표고 0부근의 상온의 물에서는 (1)식은 다음과 같은 식으로 표시된다.



〈그림 3〉 흡입측 밀폐수조에서 포화증기압  $P_v$ 가 작용하는 경우

$$NPSH_{av} \approx 10 - h_s - fV_s^2/2g \dots (2)$$

c) 흡입측이 밀폐수조인 경우의  $NPSH_{av}$

① 액면의 포화증기압  $P_v$ 가 작용하고 있을 때 (1) 식은 다음과 같이 된다.

$$NPSH_{av} = h_s - fV_s^2/2g \dots (3)$$

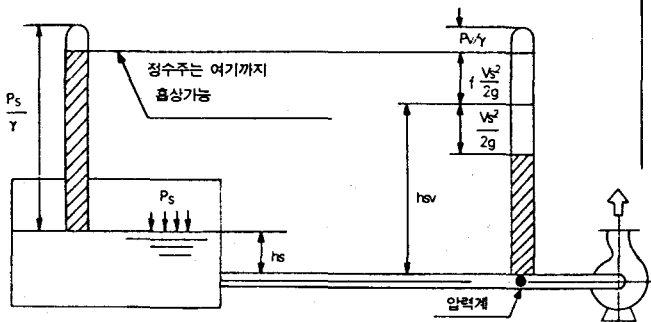
단,  $h_s$ 는 반드시 압입되지 않으면 안된다.

압력계의 읽음 =  $(P_v + rh_s) - P_a - r(1+f) \times V_s^2/2g$

$h_{s,v} = 1/r \times$  압력계의 읽음  $+ 1/r \times (P_a - P_v) + V_s^2/2g$

② 액면에 압력  $P_s$  ( $kgf/m^2$  abs)가 작용하고 있을 때 (1) 식은 다음과 같이 된다.

$$NPSH_{av} = 1/r (P_s - P_v) + h_s - fV_s^2/2g \dots (4)$$



〈그림 4〉 흡입측 밀폐수조에서  $P_s$  ( $kgf/m^2$ )가 작용하는 경우

압력계의 읽음 =  $(P_s + rh_s) - P_a - r(1+f) \times V_s^2/2g$

$h_{s,v} = 1/r \times$  압력계의 읽음  $+ 1/r (P_a - P_v) + V_s^2/2g$

주)  $P_a$  = 펌프설치점의 대기압 ( $kgf/m^2$  abs)

d) NPSH의 계산 예

① 흡수면에 대기압이 작용하는 경우

항 목	흡상의 경우		가압의 경우
	평지대	고지대	
설 치			
액 체	물	물	물
수 온(C)	20	20	20

조 해 발 고 도(m)	0	1000	0	
P. 대기압 ( $kgf/m^2$ abs)	$1.0330 \times 10^4$	$0.9180 \times 10^4$	$1.0330 \times 10^4$	
P. 포화증기압 ( $kgf/m^2$ abs)	$0.0238 \times 10^4$	$0.0238 \times 10^4$	$0.0238 \times 10^4$	
$r$ 단위체적당중량 ( $kgf/m^3$ )	998.2	998.2	998.2	
건 ± h. 흡입헤드(m)	-4	-4	+3	
$fV_s^2/2g$ 흡입관 총손실(m)	0.7	0.7	0.5	
계 산 값	(1) 식에 의해	$h_{s,v} = 10.35$	$h_{s,v} = 9.2 - 0.24$	$h_{s,v} = 10.35$
		-0.24 - 4	-4 - 0.7	-0.24 + 3
	$h_{s,v} = \frac{P_s - P_v}{r} + h_s - \frac{V_s^2}{2g}$	-0.7	= 4.26m	-0.5
		= 5.41m		= 12.61m

② 흡입측에 밀폐수조가 있는 경우

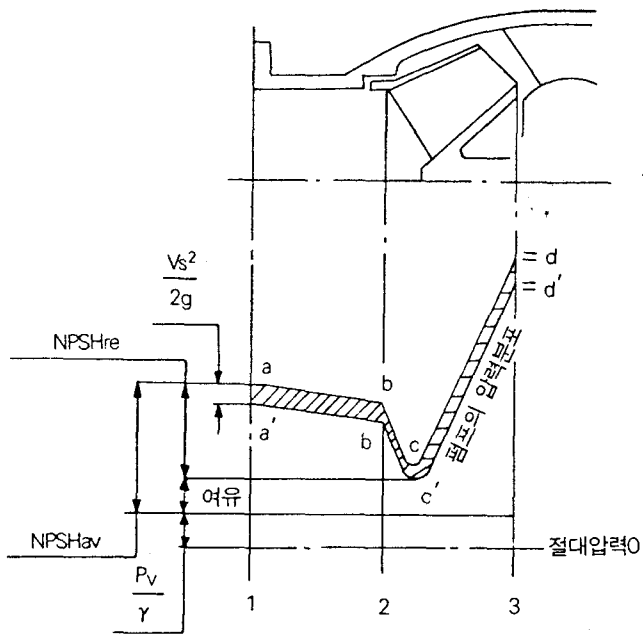
항 목	내압작용의 경우	포화증기압 작용의 경우	
설 치			
액 체	물	뜨거운 물	
수 온(C)	20	120 (포화상태)	
조 해 발 고 도(m)	0	0	
P. 대기압 ( $kgf/m^2$ abs)	$2.0000 \times 10^4$	$2.0245 \times 10^4$	
P. 포화증기압 ( $kgf/m^2$ abs)	$0.0238 \times 10^4$	$2.0245 \times 10^4$ *	
$r$ 단위체적당중량 ( $kgf/m^3$ )	998.2	943.1	
건 ± h. 흡입헤드(m)	+5	+5	
$fV_s^2/2g$ 흡입관 총손실(m)	0.7	0.7	
계 산 값	(1) 식에 의해	$h_{s,v} = 20.04 - 0.24$	$h_{s,v} = 21.47 - 21.47$
		+5 - 0.7	+5 - 0.7
	$h_{s,v} = \frac{P_s - P_v}{r} + h_s - \frac{V_s^2}{2g}$	= 24.46m	= 4.3m

② 필요 흡입수두 ( $NPSH_{r,c}$ )

회전차 입구 부근까지 유입되어지는 액체는 회전차에서 가압되기 전에 일시적인 압력 강하가 발생하는데 이에 해당하는 수두를 필요 흡입수두 ( $NPSH_{r,c}$ )라 한다. 이때의 펌프 흡입측의 압력분포를 알아보면 〈그림 5〉와 같으며,  $NPSH_{r,c}$ 는 그림에서의 a-c'의 높이에 해당되며 이 값은 흡입비속도, Thoma의 캐비테이션 계수 또는 실험에서 구할 수 있다.

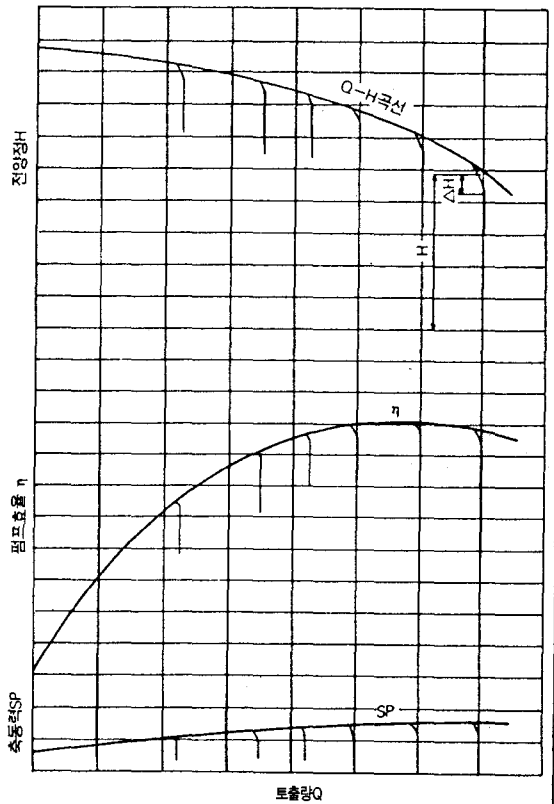
a) 실험에 의한 방법

〈그림 6〉에 나타낸 바와 같이 펌프 운전시의 흡입압력을 점차 내려가면서 각각의 토출량에 대한 펌프 전압정의 저하가 3% ( $\Delta H/H = 0.03$ )가 되는 경우의 흡입조건에서 계산한다.

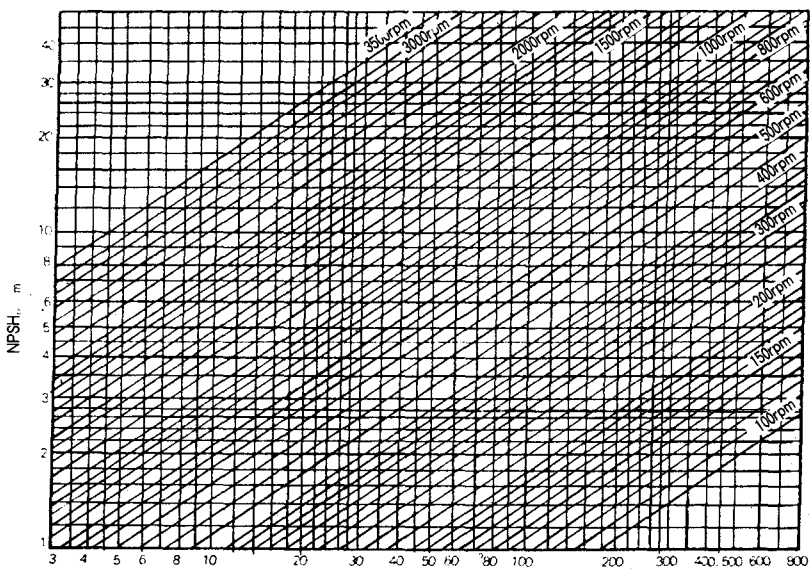


- 여기서
- 1 : 펌프입구
  - 2 : 회전차입구
  - 3 : 회전차출구

〈그림 5〉 펌프 흡입측의 압력분포



〈그림 6〉 볼류트 펌프의 캐비테이션에 의한 펌프 성능변화



〈그림 7〉 Q, n에 따른 NPSH<sub>r</sub>

b) 계산에 의한 방법

① 흡입비속도

$NPSH_{r_0}$  ( $H_{s,v}$ )는 회전차 입구에서의 감압량을 의미하며, 일종의 부의 양정으로 고려되는 값으로  $H_{s,v}$ 와  $Q$ ,  $n$ 과의 사이에는 다음식의 관계가 성립한다.

$$\text{흡입비속도 } S = Q^{1/2} / H_{s,v}^{3/4} \times n \dots\dots\dots (5)$$

단,  $Q$ 는 최고 효율점의 토출량이며 양흡입 펌프인 경우에는 1/2을 잡는다.  $Q$ 를  $m^3/min$ ,  $H_{s,v}$ 를  $m$ ,  $n$ 을 rpm으로 나타냈을 때 일반설계를 한 펌프에서는  $S$ 의 값은  $N_s$ 에 무관하게 대략 1200~1300으로 채용함이 바람직하다.  $S=1300$ 인 경우의  $n$ 과  $Q$ 에서  $NPSH_{r_0}$ 를 구하는 선도를 <그림 7>에 나타내었다.

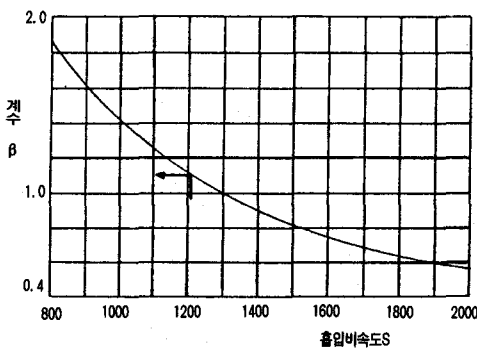
특수설계시, 즉  $S=1300$ 이외의 경우의  $NPSH_{r_0}$ 는 <그림 8>상의 계수를 곱하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$NPSH_{r_0}' = \beta \times NPSH_{r_0} \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $NPSH_{r_0}'$  : 구하고자 하는 필요 유효흡입 수두

$NPSH_{r_0}$  : 흡입비속도  $S=1300$ 의 경우의 유효흡입 수두

$\beta$  : 필요 유효흡입 수두환산계수



<그림 8>  $NPSH_{r_0}$ 의 환산계수

② 캐비테이션 계수

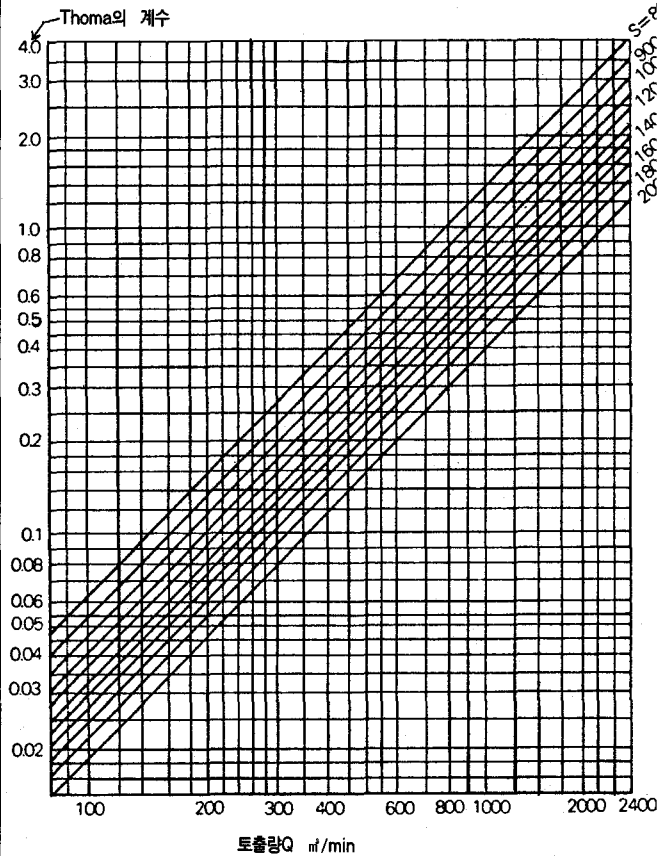
$NPSH_{r_0}$ 를 대략 검토하기 위한 또 하나의 방법은 다음에 표시하는 캐비테이션 계수(또는 Thoma 계수)가 있다. 펌프 전양정을  $H$ , 그 점의 필요 흡입수두를  $H_{s,v}$ 로 표시하면 Thoma 계수( $\sigma$ )는 다음과 같이 된다.

다.

$$\sigma = H_{s,v} / H = NPSH_{r_0} / H \dots\dots\dots (7)$$

여기서 캐비테이션 계수  $\sigma$ 의 값은 실험에 의해 구해지는 값이다.

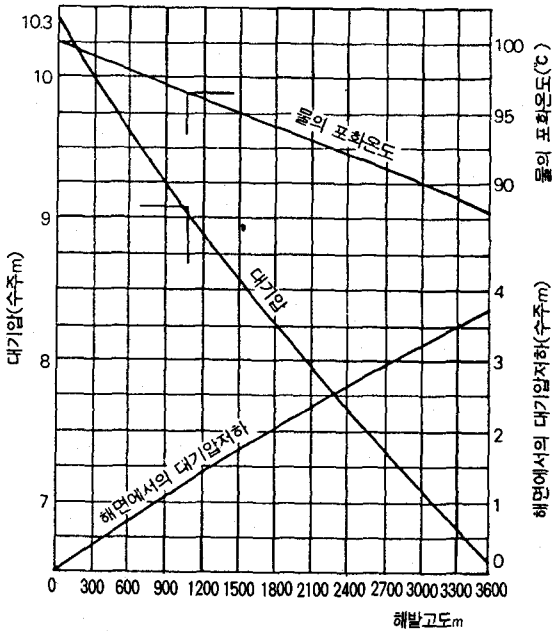
단, 다단 펌프의 경우에는 첫째단 회전차의 전양정으로 한다. 그러나  $\sigma$ 의 값은 일반적인 설계인 경우에 대하여는  $S$ 에 의해 대략 정해지는데 <그림 9>와 같이 된다.



<그림 9> Thoma의 계수

이상은 모두가 펌프의 최고효율점에 대해서 성립되는 관계이다. 사용점이 펌프의 최고 효율점에서 벗어나게 되면 유입각과 깃 각도가 달라지는 한편 유량이 큰쪽에서의 흐름 속도로 빨라져 깃 입구에서의 압력강하는 심해진다. 이 때문에 효율최고점에서 대유량 범



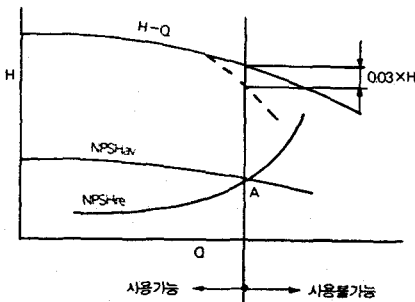


〈그림 12〉 해발높이와 대기압 및 포화온도

(3) 캐비테이션이 발생하지 않는 조건

① 캐비테이션의 발생없이 펌프를 안전하게 운전하기 위하여는 펌프 입구 직전에서의 전압력을 액체의 포화증기압 보다도  $[NPSH_{r0} \times (1 + \alpha)]$ 에 상당하는 압력 이상으로 높일 필요가 있으므로, 운전범위내에서 항상  $[NPSH_{av}]NPSH_{r0} (1 + \alpha)$ 의 관계를 유지하여야만 한다. 일반적으로  $\alpha$ 의 값으로  $\alpha \geq 0.3$  (단,  $NPSH_{r0} \times 0.3 \geq 0.5m$ )를 채용하는 것이 바람직하다.

② 예를 들면 볼류트 펌프 성능곡선에서 일반적으로 토출량의 증가와 함께 펌프의  $NPSH_{r0}$ 도 증가하나



〈그림 13〉  $NPSH_{av}$ 과  $NPSH_{r0}$ 의 관계

역으로 System에서 결정되는  $NPSH_{av}$ 은 감소한다. 그러므로 〈그림 13〉에 나타낸 바와 같이 두개의  $NPSH$  곡선이 A점에서 교차하게 되고, 교점 A에서 좌측이 사용 가능한 범위이고, 우측이 캐비테이션 발생 때문에 성능은 점선과 같이 저하하여 사용 불가능하게 되는 범위이다.

주) 펌프에 따라서는 부분유량 범위에서  $NPSH_{r0}$ 가 증가하는 경우도 있다.

(4) 탄화수소 화합물의 흡입수두 보정

탄화수소 화합물을 취급하는 경우, 펌프의  $NPSH_{r0}$ 의 값은 청수(냉수)를 대상으로 한 경우의 값보다 작게 되므로 이를 보정하여야 한다. 참고로 HIS (Hydraulic Institute Standards 1975년판)의  $NPSH_{r0}$ 의 보정량은 〈그림 14〉에 나타내었다. 단, 운용상이  $NPSH_{r0}$ 의 보정량은 청수(냉수)인 경우의  $NPSH_{r0}$ 의 1/2 이내로 한정하는 것으로 HIS에 기록되어 있음에 유의해야 한다. 이해를 돕기 위하여 다음의 두가지 예를 들어 보정을 실시해 보기로 하자.

① 적용 (예 1)

a) 청수를 대상으로 한 경우 펌프의  $NPSH_{r0}$  값을 임의로 5m로 잡는다.

b) 펌프가 온도  $-10^{\circ}C$ 의 프로판을 양액으로 운전되고 있다면 이 경우의 양액의 증기압은  $3.5 kgf/cm^2$  abs (점 A)가 된다.

c) 온도  $-10^{\circ}C$ 와 프로판의 파선과의 교점 A에서  $NPSH_{r0}$ 의 보정량 B는 1.7m가 된다.

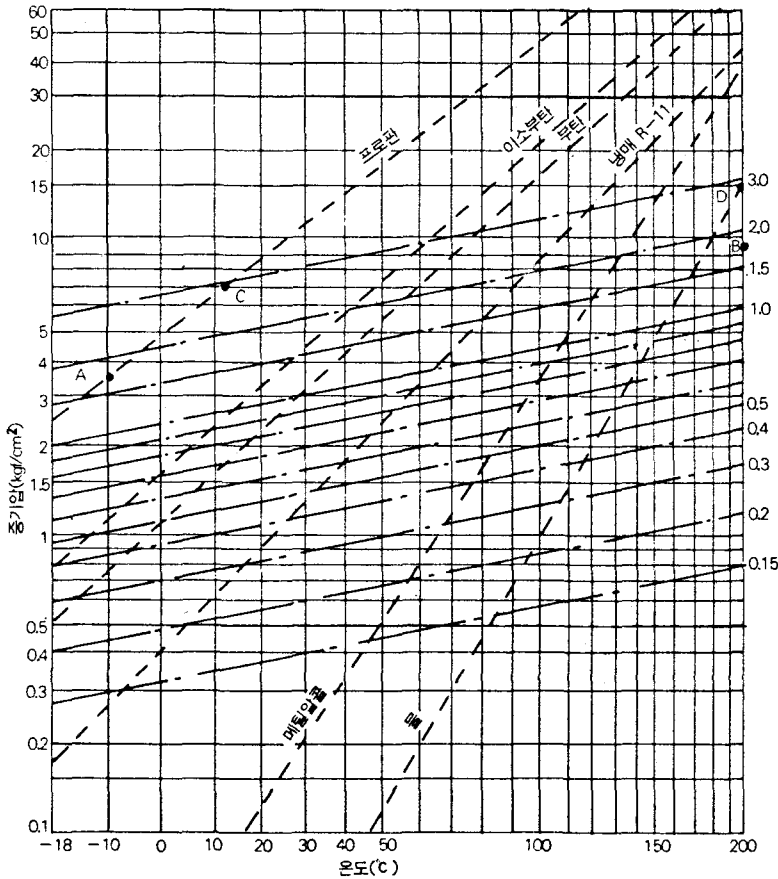
d) 그러므로 수정후의  $NPSH_{r0}$ 는 청수인 경우의  $NPSH_{r0}$ 에서  $-10^{\circ}C$ 의 프로판의  $NPSH_{r0}$  보정량을 공제하여 수정한  $NPSH_{r0}$ 는  $5 - 1.7 = 3.3m$ 로 한다.

② 적용 (예 2)

a) 상기와 같은 펌프로 온도  $12.8^{\circ}C$ 의 프로판을 취급한다면, 이 경우의 프로판의 증기압은  $7.0 kgf/cm^2$  abs (교점 C)가 된다.

b) 온도  $12.8^{\circ}C$ 와 프로판의 파선과의 교점 C에서  $NPSH_{r0}$  보정량 D는 2.9m가 되고, 이 보정량 (2.9m)은 앞에 기술한 청수인 경우의  $NPSH_{r0}$  (5m)의 1/2보다 크므로 보정량의 한계를 2.5m로 한정하여야 한다.

c) 그러므로 수정후의  $NPSH_{r0}$ 는 청수인 경우의  $NPSH_{r0}$ 에서 보정량의 한계인 2.5m를 공제하여  $NPSH_{r0}$ 는  $5 - 2.5 = 2.5m$ 가 된다.



〈그림 14〉 탄화수소의 NPSH 보정량

(5) 흡입조건 개선을 위한 대책

펌프의 설비계획 및 사용시 캐비테이션을 방지하기 위하여는 다음과 같은 것을 고려할 필요가 있다.

① 펌프의 설치위치를 가능한 한 낮게 하고, 흡입손실수두를 최소로 하기 위하여 흡입관을 가능한 한 짧게 하고, 관내 유속을 작게하여 가능한 한  $NPSH_{av}$ 를 충분히 크게 한다.

②  $NPSH_{av} \geq 1.3 \times NPSH_{re}$ 가 되도록 한다.

③ 횡축 또는 사축인 펌프에서 회전차 입구의 직경이 큰 경우에는 캐비테이션의 발생 위치와 NPSH 계산상의 기준면과의 차이를 보정하여야 하므로  $NPSH_{av}$ 에서 (근사적으로) 흡입배관 직경의 1/2을 공제한 값으로 계산한다.

④ 흡입수조의 형상과 치수는 흐름에 과도한 편류

또는 와류가 생기지 않도록 계획하여야 한다.

⑤ 편흡입 펌프로  $NPSH_{re}$ 가 만족되지 않는 경우에는 양흡입 펌프로 하는 경우도 있다.

⑥ 대용량펌프 또는 흡상이 불가능한 펌프는 흡수면보다 펌프를 낮게 설치하거나, 입축펌프로 선택하여 회전차의 위치를 낮게하고, 부스터 펌프를 이용하여 흡입조건을 개선한다.

⑦ 펌프의 흡입측 밸브에서는 절대로 유량조절을 해서는 안된다.

⑧ 펌프의 전양정에 과도한 여유를 주면 사용 상태에서는 시방양정보다 낮은 과대 토출량의 범위에서 운전되게 되어 캐비테이션 성능이 나쁜점에서 운전되게 되므로 전양정의 결정에 있어서는 실지에 적합하도록 계획한다.

⑨ 계획 토출량 보다 현저하게 벗어나는 범위에서의 운전은 피해야 한다. 양정 변화가 큰 경우에는 저양정 영역에서의  $NPSH_{re}$ 가 크게 되므로 캐비테이션에 주의하

여야 한다.

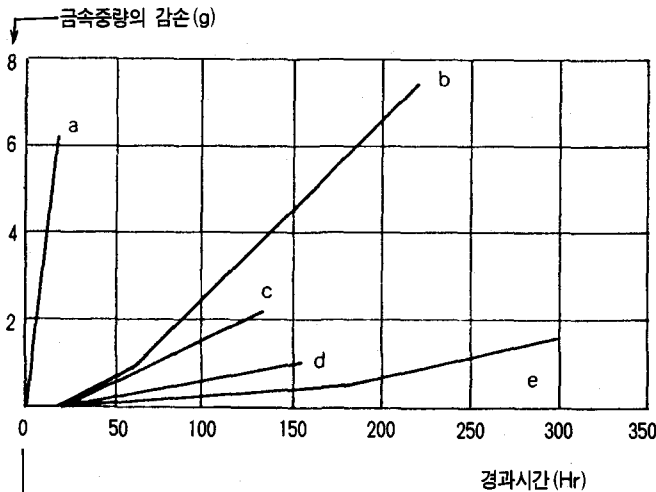
⑩ 외적 조건으로 보아 도저히 캐비테이션을 피할 수 없을 때에는 임펠러의 재질을 캐비테이션 괴식에 대하여 강한 재질을 택한다.

⑪ 이미 캐비테이션이 생긴 펌프에 대해서는 소량의 공기를 흡입측에 넣어서 소음과 진동을 적게 할 수도 있다.

(6) 캐비테이션 괴식에 강한 재료

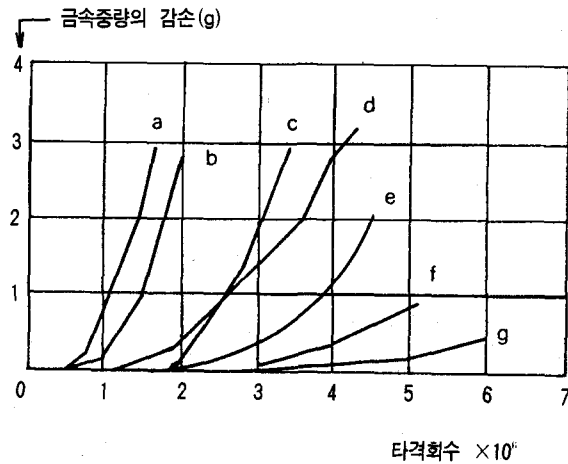
펌프의 내부에 캐비테이션이 생기면 기포가 터지는 근처의 표면에 무수한 구멍이 생겨 나중에는 재료를 훼손시킨다. 이것을 괴식이라 하며, 기포가 터질 때 생기는 충격압에 따른다고 풀이되고 있다. 괴식의 정도는 재질에 따라 다르며 심한 것과 비교적 작은 것이 있다. 따라서 캐비테이션을 피할 수 없는 경우에는 괴





a. 납 b. 주철 c. 청동 d. 알루미늄 e. 강

〈그림 15〉 캐비테이션에 따른 금속감손



a. 니켈청동 b. 주강 c. 알루미늄청동 d. 평로강  
e. 스테인레스 주강 f. 스테인레스강 g. 크롬바나듐강

〈그림 16〉 분류수적충격에 따른 금속감손

식에 강한 재료를 써서 손상을 줄이는 것이 바람직하다. 펌프용 재료로서 특히 내 캐비테이션성을 고려할 필요가 있을 때에는 18-8 스테인레스강, 13Cr 스테인레스강 등이 사용된다.

〈그림 15〉에 캐비테이션에 따른 각종 금속의 소모 감량을 표시한다. 또 〈그림 16〉은 물의 체트를 재질이 다른 각종의 시험편에 뿜어서 감손량을 조사한 것을 표시한다.

● 알고 계십니까? ●

◆ 전등 갖은 전등의 밝기를 2.5배까지 높여

전등갓의 모양과 깊이, 내부 반사 면적에 따라 전등알만 소켓에 꽂고 사용하는 것보다 갓의 내용에 따라 1.5배에서 2.5배까지 밝기를 증대시킬 수 있다. 그리고 전등갓 안쪽에 담뱃갑의 은박지나 요리할 때 쓰이는 은색의 쿠킹 호일 등을 발라 두면 역시 밝기를 2배 정도 올려준다.

갓 없이 쓰는 전구의 밝기를 1로 하면 갓의 반사 면적이 넓고 깊어 전등을 폭 가릴 수 있는 것은 2배~2.5배나 밝기를 더해 준다.

◆ 올바른 텔레비전 사용법

텔레비전의 시청 거리가 너무 가깝거나 멀면 눈이 상하고 피로해진다. 적당한 시청 거리는 화면 크기에 따라 달라지는데, 화면의 대각선 길이에 5를 곱하면 된다. 17인치 크기면 2.1m, 19인치라면 2.3m가 이상적이다.

텔레비전을 시청하지 않을 때는 전원을 완전히 차단한다. 일부 텔레비전은 스위치만 내리면 시간당 5W 정도의 아주 적은 전류가 계속 흐르기 때문에 텔레비전을 시청하지 않더라도 약 5% 정도의 전기가 낭비된다. 그러니까 텔레비전을 보지 않을 때는 반드시 전원 플러그를 빼놓도록 한다.

화면의 밝기는 주위에 비해서 약간 어둡게 하는 것이 좋다. 지나치게 밝거나 어두우면 시력을 해친다. 텔레비전 수상기는 열기·습기를 피해 통풍이 잘 되는 위치에 두되 벽으로부터 10cm 정도 떼어 놓는다.

눈의 높이보다 화면이 약간 낮도록 수상기를 설치하는 것이 좋으며, 너무 높으면 눈이 피로하며 누워서 보는 것도 시력을 해친다.

텔레비전은 1년에 한 번쯤 속에 낀 먼지를 털어 내야 한다. 먼지에 습기가 흡수되면 전기가 통하므로 누전이 될 가능성도 있지만 화면에도 영향을 미치기 때문이다. 그리고 채널은 또박또박 돌려야 한다.