

펌프의 운전과 에너지 절감

김 성 원*

□ '98 한국의 에너지 소비

- | | |
|-------------------|-------------|
| 1. 인 구 | 25위 |
| 2. 경제규모 | 11위 |
| 3. 에너지 소비증가율 5.9% | 8위 |
| | (세계평균 1.0%) |
| 4. 에너지 소비량 | 10위 |
| 5. 석유소비 | 6위 |
| | (수입 4위) |
| 6. 에너지 해외의존도 | 97% |

♣ '98 에너지 수입 : 186억불 (전체수입의 20%)

□ 국제유가(油價)와 국가경제

1. 국제 유가 상승

- ➔ 제조업원가 / 제품가격 상승 / 물가상승
- ➔ 산업경쟁력 / 수출경쟁력 약화
- ➔ 기업경영 / 무역수지 (외환보유고) 악화

2 국제 유가 배럴당 1불 상승

- ▶ 연간 원유 수입액 : 8억 7000만불 증가
- ▷ 연간 수 출 액 : 1억 4000만불 감소
- ▶ 연간 무역 적 자 : 10억 1000만불 증가

□ 에너지 10% 절감 효과

- 에너지수입 10% 감소 : 연간 19억불 (2조 3000억원)

* 중소기업진흥공단

2. 무역 수지 개선 : 연간 20억불 (2조 5000억원)

- ≡ 원자력 발전소 1기 건설비용
- ≡ 연간 칼라TV 전체 수출액
- ≡ 초등학생 390만명 2년간 무료급식비
- ≡ 중형차 2500만대 수출 마진

□ 펌프와 에너지 절감

- 펌프 에너지 소비 ≥ 전체 에너지 소비 30%
- 펌프 에너지 소비 10% 절감의 효과
 - ➔ 전체 에너지 소비 3% 절감
 - ➔ 에너지 수입 감소 6900억원
 - ➔ 무역 수지 개선 7500억원 (6억불)

♣ 가정용 에너지 10% 절약 : 연간 8000억원 절감

♣ 사무용기기 절전형 대체 : 연간 3500억원 절감

□ 펌프의 에너지 절감

- 고효율 펌프 선정
 - : 회전수, 단수 및 회전차
- 적정 용량의 펌프 선정
 - : 성능안정 / 고효율 (BEP) 범위내 운전
- 적절한 운전제어
 - : 가변속 운전 및 병렬/직렬운전
- 섭동부의 적정 간극 유지
 - : 밀폐형/개방형 회전차
- 배관계 최적화 / 배관내 스케일 제거

♣ 펌프의 에너지 절감 ➔ MTBF 연장
 ➔ 시스템 유지보수 비용 절감

♣ BEP : Best Efficient Point

♣ MTBF : Mean Time Between Failure

❑ 펌프의 선정기준

1. 운전비용 : 펌프효율 (비속도, 단수, 회전수)
2. 유지보수비용
: 운전방법, 소음/진동 (벨런싱, 축정렬 등)
3. 설치 / 공간
4. 토출량 조정성
5. 초기 투자(구입)비

❑ 토출량 조절

1. 밸브교축 : 단기간의 조절시 적용
(사류/축류형 과부하 유의, 그림1 참조)
2. 연합운전 : 정수두(static)/마찰수두(friction)
의 검토를 통한 운전형태 결정

- ♣ 정수두 ≥ 마찰수두 → 병렬운전
- ♣ 정수두 ≤ 마찰수두 → 직렬운전

3. Bypass : 주로 축류형 적용 → 동력절감 효과

- ♣ 원심형 적용 → 반경방향 하중 감소, 효율저하

4. 회전차 외경가공
5. 회전수 조정 : 마찰수두 ≫ 정수두 경우
→ 최선의 토출량 조절방법

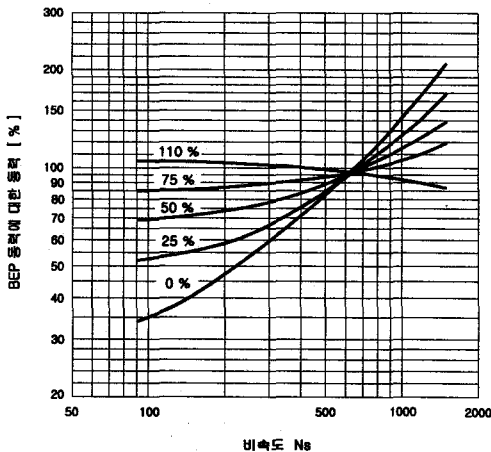


그림 1. 원심펌프 토출량 조절방법에 따른 효율변화 [1]

6. 깃설치각 조정 : 사류/축류형 적용
→ 성능안정 영역 운전
7. 예선회 조정 : 사류/축류형 적용, 입구안내깃
→ NPSH 증가, 효율저하

❑ 토출량 여유율 및 과대 선정

1. 마모로 인한 누설량 증가 대비
→ 펌프 토출량의 여유 필요
2. 적정 여유 산정
→ 펌프 형식, 이송유체 종류, 운전조건 등
3. 과도한 여유
→ 토출밸브 교축 과도
→ 막대한 동력 손실 / MTBF 단축

❑ 토출밸브 교축과도로 인한 소유량운전의 폐해

1. 회전차 입 / 출구부의 재순환유동(recirculation) 발생
2. 회전차 침식 / 파괴
3. 수력학적 압력 변동
- 반경방향 / 축방향 하중 증대
4. 소음 / 진동 증가
5. 시일 / 베어링의 파손률 증가
6. 유체 온도 상승

❑ 토출량과 펌프수명

BEP 토출량에 대한 토출량 [%]	수명계수	운전시간 [%]	토출량별 수명계수 계산
100	1.00	10	1.0 X 0.1 = 0.10
75	0.80	30	0.8 X 0.3 = 0.24
50	0.60	50	0.6 X 0.5 = 0.30
25	0.25	10	0.25 X 0.1 = 0.025
총 수명계수			.665

♣ 수명계수 [1]

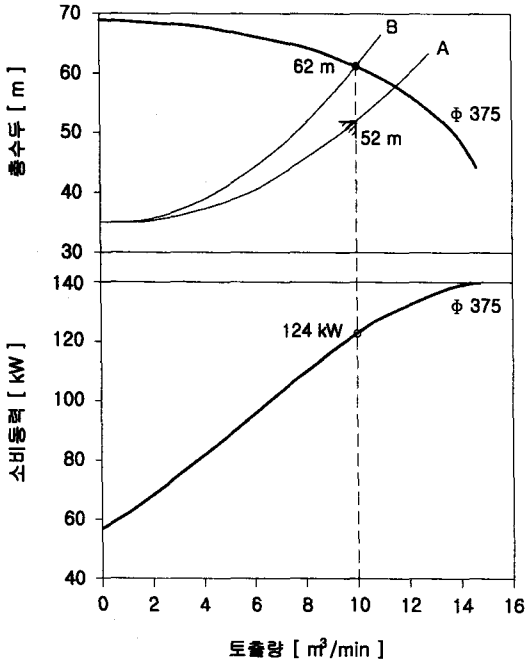


그림 2. φ375 회전차 (10% 여유 선정)의 운전점

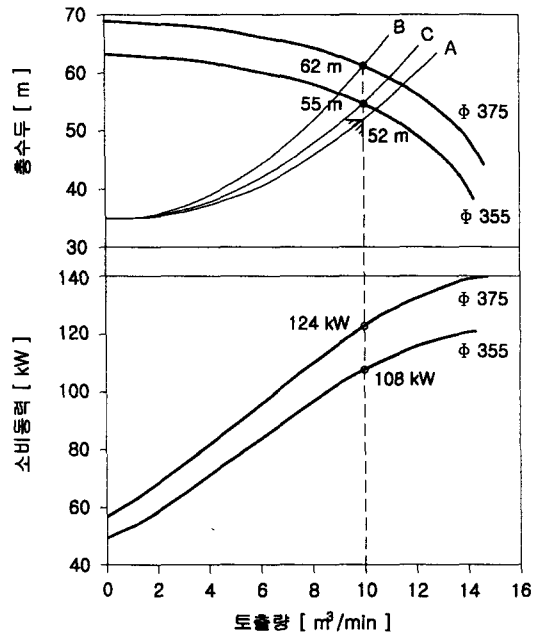


그림 3. φ375 - φ355 회전차의 운전점

▣ 사례 1 과대 여유 선정에 따른 동력손실

1. 시방점 및 선정

- ▶ 시방점 : 10 m³/min - 52 m - 1750 rpm
- ▶ 펌프선정 (10% 여유)
: 11 m³/min - 59 m - 1750 rpm → φ 375

2. φ 375 회전차의 운전특성

- ▶ 시스템-수두곡선 ㉠ } 교점 11.5 m³/min 토출
- ▶ φ 375 성능곡선
- ▶ 밸브 교축
 - ➔ 시스템 - 수두곡선 ㉢
 - ➔ 토출량 10 m³/min
 - ➔ 수두 62 m (시방점 52m 대비 10m 초과)
 - ➔ 소비동력 124 kW
 - ➔ 전동기 150 kW (200 HP) 필요

3. φ 375 ⇨ φ 355 가공에 따른 특성 변화

- ▶ 시스템-수두곡선 ㉠ } 교점 10.5 m³/min 토출 (5% 여유)
- ▶ φ 355 성능곡선
- ▷ 밸브 교축
 - ➔ 시스템 - 수두곡선 ㉢
 - ➔ 토출량 10 m³/min 조절
 - ➔ 수두 55 m (시방점 대비 3 m 초과)
 - ➔ 소비동력 108 kW (⇐ 124 kW : φ 375)
 - ➔ φ 375 대비 16 kW (13%) 절감
 - ➔ 전동기 113 kW (150 HP) 선정

4. 펌프의 선정 여유율과 소비동력 절감

여유율 [%]	회전차 [mm]	토출량 [m ³ /min]	수두 [m]	효율 [%]	소비동력 [kW]	절감동력 [kW]
10	φ 375	10	62	82	124	기준
5	φ 355		55	83	108	16 (13%)

5. ϕ 375 \Rightarrow ϕ 355 가공
 (여유율 10 % \Rightarrow 5 %) 적용에 따른 효과

- ▶ 전력량 요금 절감
 - ➔ 소비동력 16 kW (13%) 절감
 - ➔ 연간 140 MWh, 980 만원
 (=140 X 1000 X 70) 절감

❖ 펌프단가 200만원

- ▷ 초기 구입비용 절감
 - ➔ 전동기 (200 HP / 800만원
 ➔ 150 HP / 600만원)

- ▶ 밸브 교축 감소 (재순환유동, 반경방향 / 축방향 하중 감소)
 - ➔ 회전차, 웨어링링, 시일 및 베어링 수명 연장

❑ 전동기 / 회전차 외경 크기 선정

- ▶ 전동기는 한단계 대형 선정 (저부하 운전시 전동기효율 저하 미미)
 - ➔ 토출량 / 수두 요구량 증대
 - ➔ 대형 전동기 교체시 펌프베드 및 전력 설비의 변경비용 추가
- ▶ 회전차 적정 외경
 - ➔ 최대치수의 90-95% 적절 (회전차 출구 - 볼류트 입구 간격 고려)
 - ➔ 차후 회전차 외경 증대 요구 (관로저항 / 누설 증가 등) 대비

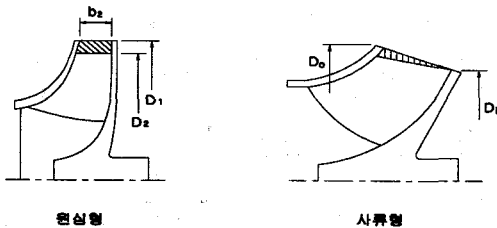


그림 4. 원심형 및 사류형 회전차의 외경가공

❑ 상사법칙

: 회전차 외경가공에 따른 성능변화

▶ 상사법칙 I

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right), \quad H_2 = H_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2, \quad P_2 = P_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

▶ 상사법칙 II

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2, \quad H_2 = H_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2, \quad P_2 = P_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4$$

❖ 적용한계 ➔

$$\frac{D_2}{D_1} \geq 0.7 \quad ; \quad N_s \leq 300$$

$$\frac{D_2}{D_1} \geq 0.9 \quad ; \quad N_s \geq 300$$

❖ 사류형 회전차 적용시 유의 (그림 4, 표 2 참조)

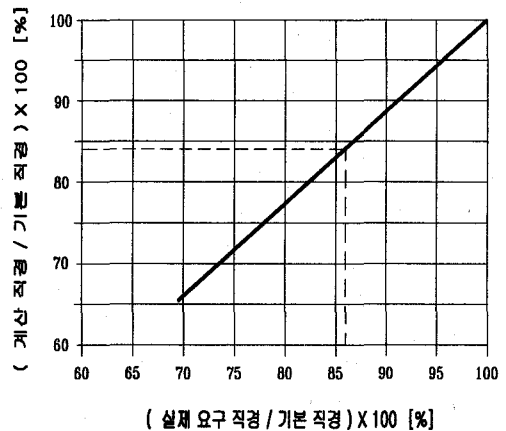


그림 5. 원심회전차 외경 상사법칙의 보정치 [2]

표 1. 원심형 펌프에 대한 상사법칙 (15m³/min, 68m, 1790rpm) 오차율

회전차 외경 D [mm]		φ 414	φ 384 (92.8%)	φ 356 (86.0%)
실측치	Q [m ³ /min]	15.1	13.6	12.1
	H [m]	68.4	59.6	49.9
	P [kW]	201.6	161.8	124.7
	Ns	292	308	332
상사계산 I	Q [m ³ /min]	-	14.0 (2.9%)	13.0 (7.4%)
	H [m]	-	58.9 (-1.2%)	50.6 (1.4%)
	P [kW]	-	161.1 (0.4%)	128.2 (2.8%)
상사계산 I 보정	Q [m ³ /min]	-	14.0 (2.9%)	12.7 (4.9%)
	H [m]	-	58.9 (-1.2%)	48.3 (-3.2%)
	P [kW]	-	161.1 (0.4%)	119.5 (-4.2%)
상사계산 II	Q [m ³ /min]	-	13.0 (-4.4%)	11.2 (-7.4%)
	H [m]	-	58.9 (-1.2%)	50.6 (1.4%)
	P [kW]	-	149.5 (-7.6%)	110.3 (-11.5%)

표 2. 사류형 펌프에 대한 상사법칙 (22m³/min, 5.7m, 870rpm) 오차율

Dm [mm] (= $\sqrt{(D_o^2 - D_i^2)/2}$)		φ 335	φ 327 (97.6%)	φ 321 (95.8%)
실측치	Q [m ³ /min]	22.0	19.3	17.4
	H [m]	5.7	5.2	5.1
	P [kW]	24.2	19.2	16.9
	Ns	1106	1110	1069
상사계산	Q [m ³ /min]	-	21.5 (11.4%)	21.1 (21.3%)
	H [m]	-	5.4 (3.8%)	5.2 (2.0%)
	P [kW]	-	22.5 (17.2%)	21.3 (26.0%)

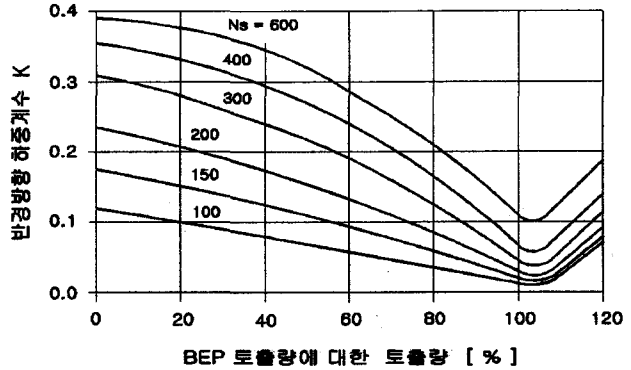
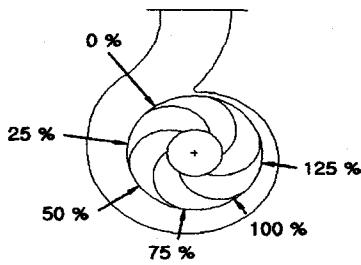


그림 6. 단일 볼류트(single volute)에서의 반경방향하중 및 하중계수 K [3]

□ 반경방향 하중 (Radial Thrust)

$$\text{RT} = K H \gamma D_2 B_2$$

- RT : 반경방향 하중 [Kgf]
- K : 하중계수
- H : 1단의 전양정 [m]
- γ : 비중량 [Kgf/m³]
- D₂ : 회전차외경 [m]
- B₂ : 회전차출구폭 [m]

□ 상사법칙 : 회전수 변경에 따른 성능변화

$$\text{▶ } Q_2 = Q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right), \quad H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2,$$

$$NPSHR_2 = NPSHR_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

□ 사례 II 토출량에 따른 반경방향 하중의 변화

- ▶ 펌프시방 : 7m³/min - 120m - 3550rpm
- ▶ 유체 및 회전차
: γ 998 Kgf/m³, D₂ 290mm, B₂ 40mm

1. 비속도 $N_s = 297 (= 3550 \times 7.0^{0.5} / 120^{0.75})$

2. 토출량별 반경방향 하중 (그림 6 참조)

◇ 설계 유량 : RT = 62.5 kgf
(= 0.045 X 120 X 998 X 0.29 X 0.04)

◇ 50% 유량 : RT = 337.9 kgf
(= 0.210 X 139 X 998 X 0.29 X 0.04)

◇ 체질 유량 : RT = 509.6 kgf
(= 0.310 X 142 X 998 X 0.29 X 0.04)

☼ 베어링 수명 $\propto 1 / (\text{베어링 하중})^3$

➔ 설계 유량
: 50% 유량 = 158 : 1 (= 5.4³ : 1)

☼ 10% 내에서의 회전수 변경시 펌프효율 일정

□ 회전수 제어에 의한 토출량 조절

▶ 적용 : 화학공정, 도시급수/하수처리, 냉동공조기 냉각수이송 등 토출량 변화가 심한 시스템

▷ 방법 : 유체커플링, 벨트, 감속기, 전압/전류, 주파수조정 등

- ▶ 장점 : 토출밸브 교축 감소
 - ➔ 고효율점 / 안정영역 운전
 - ➔ 회전차, 웨어링, 시일 및 베어링 수명 연장
 - ➔ 과대 수두 발생 감소
 - ➔ 운전비용 / 유지관리비용 절감

□ 주파수 조정(VFD) - 인버터 운전의 장점

- ▶ 소비동력 절감
 - ➔ 밸브교축 손실 및 효율 저하 감소
- ▷ 설치 간단
 - ➔ 기존 전동기 + 인버터 설치
- ▶ 감속효율 향상
 - ➔ 타제어방식(대략 60% 내외) 대비 20% 이상 향상
- ▷ 회전수 증속 용이
 - ➔ 펌프 선정시 여유를 최소화
- ▶ MTBF 연장
 - ➔ 회전차, 웨어링링, 시일 및 베어링 수명 연장
- ▷ Soft Start
 - ➔ 기동전력 / 전력량요금 감소
- ▶ 수전(변압기) 용량/기본요금 절감, 전동기 소손률 대폭 저하
- ▷ 수두 / 토출량 미세조정 용이

□ 사례 III 가변속 운전에 따른 소비동력 절감

- ▶ 펌프시방
 - : 7 m³/min - 120 m - 3500 rpm - 250 HP
- ▷ 운전조건
 - : 7 & 3.5 m³/min 운전시간 각각 50%

토출량 [m ³ /min]	수두 [m]		효율 [%]		소비동력 [kW]		소비전력량 [MWh]	
	정속	가변속	정속	가변속	정속	가변속	정속	가변속
7	120	←	83	←	165.4	←	724	←
3.5	138	37	63	81	124.1	26.1	544	114
합							1,268	838
연간 소비전력량 절감 [MWh]							기준	430 (34%)
연간 전력량요금 절감 [만원]							기준	3,010

⚡ 200 kW 인버터 : 2,500 ~ 3,000 만원 (펌프 + 전동기 : 2,200 만원)

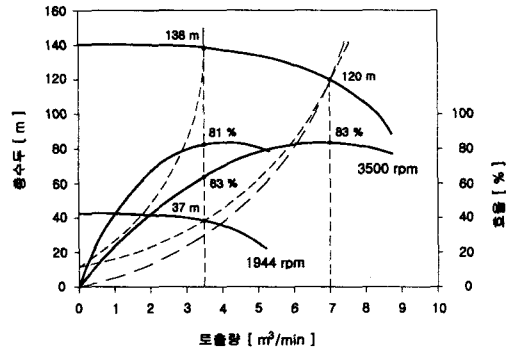


그림 7. 회전수변경 및 밸브교축에 의한 토출량 조절

□ 사례 IV 배관구경 선정에 따른 소비동력 절감

- ▶ 배관조건
 - : 정수두 45m, 유량 0.76m³/min
- ▷ 배관설비
 - : 체크밸브 1개, 게이트밸브 1개, 엘보우 10개, 관로길이 450m

1. 배관 자재비

배관구경 단가[원]	50 (2")	80 (3")	100 (4")	수 량
체크 밸브(주강)	100,000	140,000	200,000	1
게이트 밸브(주철)	45,000	60,000	85,000	1
엘보우(SPPS38 S40)	1,700	4,200	6,900	10
배관용 탄소강관/m	3,500	5,700	8,100	450m
용접비용/개소	4,000	6,000	8,000	100개소
플랜지(SS400)	2,800	3,700	4,300	20
배관자재 총가격	219 만원	348 만원	489 만원	

2. 배관계의 총손실수두와 펌프선정

항 목		50 (2")	80 (3")	100 (4")
관로내 평균유속 [m/s]		5.8	2.7	1.5
손실수두 [m]	관로 (pipe)	303.3	40.7	10.5
	체크밸브	3.48	0.73	0.24
	게이트밸브	0.79	0.08	0.02
	엘보우	6.41	1.19	0.37
총 손실수두 [m]		314.0	42.7	11.1
펌프 요구수두 [m] (= 총 손실수두 + 정수두)		359	88	56

❖ 관로 손실수두 [4]

$$H_f = hf \times L / 100$$

❖ 밸브 / 피팅(fitting) 손실수두 [4]

$$]H_f = K \times V^2 / 2g$$

3. 배관구경에 따른 소비동력 및 초기투자비

항 목	50 (2")	80 (3")	100 (4")
소비동력 [kW]	74	18	12
연간 전력량 요금	4,538 만원	1,104 만원	736 만원
초기투자비 (=펌프+전동기+배관계)	939 만원 (=270+450+219)	548 만원 (=120+80+348)	649 만원 (=110+50+489)
초기투자비 절감	기 준	391 만원	290 만원
소비동력 절감 [kW]	기 준	56 (76%)	62 (84%)
전력량 요금 절감	기 준	3,434 만원	3,802 만원

❖ 펌프효율 60% , 전력량 요금 70원/kWh 기준

❑ 밀폐형 회전차 및 개방형 회전차

	밀폐형 (closed)	개방형 (open)
적 용	청정, 비마모성, 고온유체 (대부분의 다단펌프)	마모/부식성/섬유류 함유유체 (펠프, 화학슬러리 등)
누 설 / 마 모	웨어링링부 집중	깃끝단 전부 (누설/마모면적 : 밀폐형 2배)
효 율	약간 우수	
축 추 력	작음 (그림 8 참조)	
설 동 부 수 명	짧 음	
효 율 저 하 시 (설 동 부 마 모 시) 대 책	시스템 분리 분해/교체/조립	조정볼트로 간단히 축방향간격 조정
축 방 향 조 립 정 밀 도 - 효 율	거 의 무 관	치명적 (틈새 0.3mm 적정) 1.5mm → 효율 10% 하락

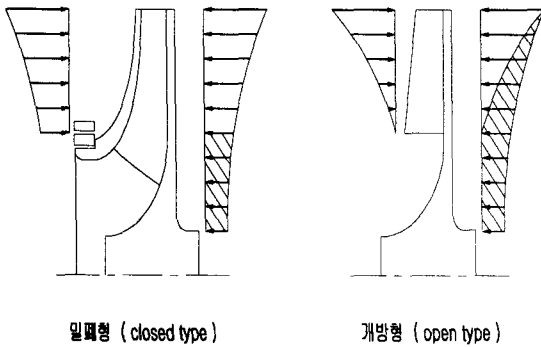


그림 8. 밀폐형/개방형 회전차 형상 및 축방향 허용

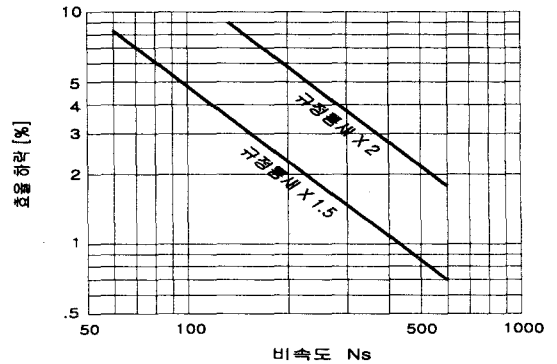


그림 9. 웨어링링(Wearing Ring) 마모와 펌프효율 저하 [3]

참고 문헌

1. Karassik, I. J., Krutzsch, W. G., Fraser, W. H., and Messina, J. P., "Pump Handbook", 2'nd Ed., McGraw-Hill, Newyork, 1986.
2. Lobanoff, V., and Ross, R., "Centrifugal Pumps Design and Application", 2'nd Ed., Gulf, Houston, Texas, 1992.
3. "Hydraulic Institute Standards", Hydraulic Institute, Cleveland, Ohio, 1994.
4. "Hydraulic Institute Engineering Data Book", 2'nd Ed., Hydraulic Institute, Cleveland, Ohio, 1990.
5. "Sulzer Centrifugal Pump Handbook", 2'nd Ed., Sulzer Pumps Ltd., Winterthur Switzerland, 1998.
6. Anderson, H. H., "Centrifugal Pumps and Allied Machinery 4'th Ed., Elsevier Science, Oxford, UK, 1994.