

교반기 선정방법

노형운*

교반기 선정방법은 일반적으로 “정형화된 방법이 없다.”고 흔히 말하여지고 있다. 이는 다른 분야에서 볼 때는 매우 비합리적이다. 이에 따라 해설에서 교반기의 적절한 선택이 공학적으로 어려운 점을 설명하고, 교반기에 대한 선정 조건을 설명하고자 한다. 본 내용은 山本一夫의 “교반기술”의 일부분을 발췌하여 해석을 한 것이므로 해당 산업현장에 계신 분들에게 교반기 선정에 있어 도움을 주고자 한다.

1. 서 론

일반적으로 교반기의 선정을 정량화하기 어려운 이유는 다음과 같다.

1.1. 성능평가관점

- (a) 토출유량계수 (N_{qd}) 또는 순환유량계수 (N_q) 등에 대한 내용이 대표적 날개형상 (익형)에 대한 선정법이 편람 등에서 제시되고 있지만, 표준화가 되어 있지 않기 때문이다. 예를 들면, 날개의 부착각도가 변화하면 성능도 크게 변화하지만, 이에 대한 인자는 포함되어 있지 않다.
- (b) 성능 측정법이 명확히 표준화 되어 있지 않다.
- (c) 교반 레이놀즈수에 의존하여 교반기의 성능이 표현되지만, 극단적으로 저속이며 대구경인 날개와, 반대로 고속이며 소구경인 날개에서 그 값이 같은 경우에도 그 효과가 크게 다른 경우도 있다.
- (d) 단위 체적당의 동력 P_v [kW/m^3]을 비교하는 경우도 마찬가지로 고속·소구경 날개와 저속·대구경 날개의 경우에 그 성능은 큰 차이가 난다.
- (e) 프로세스의 처리공정에 따라 교반기가 분류되기 때문에, 적절한 성능평가가 필요한 분야에서, 확

일적으로 성능을 평가하는 것은 부적절하다.

1.2. 프로세스 요구에 따른 교반특성 정량화 관점

1.2.1. 분산의 경우

액체-액체, 고체-액체, 기체-액체의 차이에 따라 관계 파라미터도 당연히 달라진다. 예를 들면 고체-액체를 혼합하는 경우에도, 그 프로세스의 목적에 따라 농도범위, 입도영역, 부착성, 그리고 입자 형상의 차에 따른 “상호작용능력”의 정도 등에 따라 교반성능에 대한 요구 정도가 크게 다르므로, 단순히 샘플의 표준편차만으로는 표현할 수 없는 문제를 폭 넓게 내포하고 있어, 프로세스 요구에 적합한 교반 특성의 정량적 요구에 대한 표현조차도 정착되어 있지 않다.

1.2.2. 무차원 혼합시간 N_{TM} 의 경우

일단, 무차원화 된 값으로서의 교반 레이놀즈수에 대하여 표현한 날개의 성능비교에 이용되고 있는 것도 있지만 유체 중량 등이 달라지면 반드시 절대 값이 달라지므로, 상세하게 조건을 규정하고 있지 않은 경우에는 비교지표로 사용할 수 없다.

1.2.3. 그 외 프로세스 요구의 경우

- ① 전열교반의 경우
전열교반은 가장 복잡한 경우의 프로세스이지만, 관계식에 필요한 파라미터 물성값들이 전부 주어 진다면 보다 재현성도 좋게 선정될 수 있다.
- ② 고체 용해의 경우에 일부의 순수물질과 물 이외는, 실제의 확산계수치를 얻기 어려운 사실 등이 문제이다. 그러나 시간적 특성인자를 특별히 급하게 필요가 없는 경우에, 그 상황을 명확히 표시하는

* 아이베이
E-mail : rohlee@ivai.co.kr

것은 경제적 선정에 기여하는 경우가 많다.

이와 같은 상황 때문에 교반기 선정의 정량화 및 극격화를 하기 어렵다. 따라서 최근에 3차원 유동해석과 이론의 해법에 의존해서 유동특성을 파악하고 이에 대한 설계자료로 제시되고 있으나, 교반유동장의 정확한 메커니즘을 이해하지 않고서는 난류장에 걸친 각 형식의 교반상황을 재현성 있게 수치해가 얻어지기 어렵다.

즉 교반기는 기계구조적으로는 오히려 단순한 분류에 속하지만, 교반기의 적절한 선정을 포함하여 보면 어떤 종류의 지식 집약적 장치라는 측면을 갖고 있다고도 할 수 있다.

이런 문제에 대처하는 방법은, 실제로 현장에서 구체적 선정요구에 대응하는데 있어서 다층 분류된 DB에 의하여 각개의 요인 분석과 경험에 따라 수정이 된 계산에 의해 수행되고 있지만, 지금까지 공인된 수치가 아닌 회사들의 비통계적인 값에 의하여 설계되곤 하였다.

따라서 이를 좀 더 정량하기 위하여 식 (1)과 같은 무차원 혼합시간 N_{TM} 을 계산하고, 이에 따른 시방에 따라 사용되고 있는 방법을 제안하고자 한다. 식 (1)은 모델교반시험으로부터 스케일 업을 적절히 하면 소기의 목적을 달성하는 데 있어 유용한 방법의 하나이다.

$$\frac{1}{N_{tm}} = 0.092 \left\{ \left(\frac{d}{D} \right)^3 N_{qd} + 0.21 \left(\frac{d}{D} \right) \left(\frac{N_p}{N_{qd}} \right)^{1/2} \right\} \left\{ 1 - e^{-13(d/D)^2} \right\} \quad (1)$$

- 여기서, d : 날개직경 [m]
- D : 조내경[m],
- N_{qd} : 유량계수[-]
- N_p : 동력계수

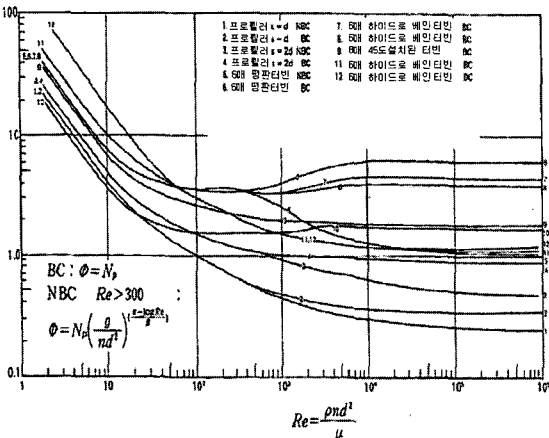


Fig. 1 각종 날개의 동력특성 ($d/D = 1/3$, $C/D = 1/3$, $Z=D$ 의 경우) (山本一夫의 “교반기술” 6장)

Table 1 N_{qd} , N_q 계산식 (山本一夫의 “교반기술” 의 6장)

$N_{qd} = N_{q\infty} \frac{Re}{50 + Re}, N_q = N_{q\infty} \frac{Re}{80 + Re}$							
$N_{q\infty} = kn_p^{0.7} \left(\frac{b}{d} \right)^{0.7} \left(\frac{b}{D} \right)^{0.5} \left(\frac{Z}{d} \right)^{0.1}$ $N_{q\infty} = kn_p^{0.7} \left(\frac{b}{d} \right)^{0.6} \left(\frac{b}{D} \right)^{0.1} \left(\frac{Z}{d} \right)^{0.3}$						0.25 < d/D < 0.45 소형 0.1 < b/d < 0.4 C/D = 1/2	
평익근 disk터빈 후향익							
k	1.2 1.1 0.82						
$N_{q\infty} = k'n_p^m \left(\frac{b}{d} \right)^m \left(\frac{b}{D} \right)^n$ $N_{q\infty} = k''n_p^{0.35} \left(\frac{b}{d} \right)^p \left(\frac{D}{d} \right)^{1.1}$						0.4 < d/D < 0.75 (대형) 0.12 < b/d < 0.5 C/D = 1/2 Z = D	
	k'	l	m	n	k''		p
평익근	2.02	0.42	0.85	0.15	1.15		0.5
disk터빈	2.35	0.6	1.22	0.21	1.72	0.81	
$N_{qd} = 0.654 \left(\frac{b}{D} \right)^{0.16}, s=d, c=d, 0.2 < d/D < 0.33$							

2. 교반기 선정의 조건

교반기의 선정은, 우선 교반기를 사용하는 측으로 부터 시방 등을 충분히 검토하여, 그에 적합한 교반기를 선정하지 않으면 안 된다. 또한 교반기 구조, 유지관리 등의 조건을 모두 충분히 고려하여 검토할 필요가 있다. 이와 같이 적절한 교반기를 선정함에 있어서는, 필요한 제 조건과 프로세스 측의 요구 사항을 충분히 파악하는 것이 중요하다.

이러한 관점에서 다음과 같은 파라미터들을 기술하였다.

2.1. 조작 조건

2.1.1. 교반의 목적

- 1) 균일상태의 액체의 교반
농도, 온도의 균일화 → 혼합균일화 촉진
- 2) 고체-액체계의 교반
조내에서의 입자의 유동화 (침강회적방지) → 분리방지
액체 표면에서 입자흡입 (부상분리방법)
입자의 부유 현탁, 슬러지화 → 혼합분산

교반기 선정방법

응집입자의 해교(解膠), 파쇄, 분산 → 세분화, 분산
입자의 응집침전(부상) 분리 → 응집, 분리
입자의 용해 정석 그 외

- 3) 기체-액체 및 액체-액체의 교반
분산(기포, 액적의 세분화, 분산) → 세분화, 분산
가스흡수 및 추출
- 4) 전열
- 5) 반응
물질이동이 가열, 냉각 및 온도제어 밀접하게 관련
예로서 고분자를 직접절단, 접촉반응 시키는
등의 경우도 있다.

2.1.2. 유체의 물성치

- 1) 액체만의 경우 : 비중, 점도, 상호가용성, 부식성,
혼합비(중량 비 또는 용량 비) 등
- 2) 고체-액체 혼합물의 경우 : 액체와 고체입자의 진
비중 및 외관 비중, 점도 입자 등
- 3) 기체-액체 혼합물의 경우 : 액체와 기체의 물리적
성질 및 가스흡입량, 가스압력, 용해속도계수 등.

2.1.3. 액체량

최대, 최소의 액체량 및 교반 중의 액체의 증감, 또는
액체의 주입, 배출상황에 따른 공회전의 유무

2.1.4. 온도(설계/상용)

교반중의 가열 냉각상태, 전열교반의 경우는 더불어
상세하게 각 전열조건인자를 파악

2.1.5. 압력(설계/상용)

조내 가압, 감압상태 및 발생가스의 성질

2.1.6. 교반시간

교반완료까지 걸리는 시간 및 1일당의 교반시간

2.1.7. 간헐운전 및 연속운전의 구별

연속조작의 경우는 평균 체류시간(유량) 등

2.2. 장치조건

2.2.1. 형상 및 각 부품 치수

2.2.2. 조(槽) 설비

배플 치수, 코일 치수, 자켓 치수, 그 외 조내의 설치물

2.2.3. 교반기 설치위치

조 형상, 날개 형상 등을 고려하여 각 목적 및 조건에
최적의 효과를 얻을 수 있도록 검토.

2.2.4. 부속장치

기계요소의 서비스장치(윤활, 냉각 가열 등)

2.2.5. 계장

기기장비의 능력 및 자동제어의 시방 성능

2.2.6. 사용 재질

액체의 부식성을 고려하여 적절한 재료를 선정(사용
자 측에 실적을 확인하여, 결정하는 것이 확실하다.)

2.3. 기계 조건

2.3.1. 교반 날개

교반 목적에 맞는 형상, 익 단수 등 경험에 의한 요구

2.3.2. 교반 축

단수, 중실/중공, 복합소재, 키(미끄럼 여부), 흔들림
방지, 축수여부

2.3.3. 축봉부

시방에 맞추어 그랜드 패킹, 미캐니컬 씰, 실런트 순

환장치, 플러싱, 세정, 냉각조건

2.3.4. 날개 회전수, 구동방법

감속기, 모터에 관한 항목

2.3.5. 재질

성분, 규격번호, 코팅/라이닝, 표면경화 등

2.4. 교반 날개의 설계에 있어서 고려할 점

2.4.1. 교반목적, 대상물 (원료액 등), 조작환경

2.4.2. 조 치수 형상 또는 용량, 조업 중 특별히 고려할 사항 (수심 변동 등)

2.4.3. 대상 원료 액의 성질. 특히 비중, 점도범위

저 점도액, 중 (고) 점도액에 따라 강한 교반이 필요 여부 등 점도 변화가 넓게 변화하는 경우는 점도의 범위에 따라 바람직한 교반 상태가 다른 경우도 있다.

2.4.4. 전단작용 등의 파괴 세분화 (분산) 성능을 특히 요구하는가? 아니면 역으로 약한 쪽이 바람직한가의 여부 → (2.4.9)와 관련

2.4.5. 혼합성능 (을 특히 중시하는가?)

2.4.6. 전열성능 (을 특히 중시하는가?)

2.4.7. 조저부의 교반에 대하여

- 1) 비중차가 있는 액체, 고체입자 등의 침전방지 및 유동화 → 침전시의 더욱이 분산, 현탁 등 균질화의 필요성 고려
- 2) 슬러지의 경우는 농도, 유동특성, 침적시의 경도 (굳은 정도) 등 점도차가 있는 액체의 경우

2.4.8. 액체표면 부분의 교반

- 1) 가벼운 액체, 분말 등의 부상분리방지

→ 용적비 또는 분리상의 농도

- 2) 표면에서의 증발, 흡수 등의 요구하는가 여부
- 3) 표면에서의 기포 흡입을 특히 싫어하는가의 여부
- 4) 점도차가 있는 액체의 혼합

2.4.9. 전단작용 등의 파괴세분화 (분산) 성능에 대하여

- 대상물 - 액체 - 액체계
 - 기체 - 액체계
 - 응집입자 등 고체액체계 (해고 또는 응집을 포함하여)

2.4.10. 특이사항 등

2.4.11. 이전의 실적, 실정, 불합치 등에서 오는 개선요구사항 등

3. 혼합 유체에 따른 교반기 선정

3.1. 액체-액체계

3.1.1. 가용성액체 (단일 액체도 포함)

- 1) 교반동력

일반적으로 P_v 값은 0.01~0.2 [kW/m³]으로 교반 목적에 따라 교반시간이 제한되는 경우 (Rate-limiting velocity) $Q_v = Q_d / V$ 값 (액체순환회수 [1/min])을 고려하지 않으면 안 된다. 이때의 필요 순환회수 N_r 은

$$N_r = k \cdot \rho \cdot \mu^\alpha \tag{2}$$

k : 교반강도계수 (배치교반의 경우 : k =3~5)

(연속교반의 경우 : k =10~20)

ρ : 비중 [-], μ : 점도 [cP]

α : 점도의 지수

(α=0.1~0.4 균열저조 : α=0.1)

(균일혼합 : α=0.4)

단, μ의 적용범위를 넓게 확장시킬 데에는 주의를 요한다.

교반날개에 따른 액체 순환회수 Q_v [회/min]는

$$Q_v = Q_d / V$$

$$Q_d = N_{qd} \times N \times d^3 \quad (3)$$

소요교반시간 θ_M 은

$$\theta_M = \frac{N_r \cdot V}{Q_d} \quad (4)$$

이다. 여기서 Q_d : 토출유량[m³/min], V : 용적[m³], N_{qd} : 유량계수[-], N : 회전수[1/min], d : 날개지름[m], θ_M : 소요교반시간[min]이다.

3.1.2. 교반날개 및 회전수

교반날개는 토출순환성능이 좋은 프로펠러 날개 (여러 가지)와 피치 패들날개 (pitched paddle)를 사용할 때, 회전수는 프로펠러 날개의 경우는 360 rpm 또는 240 rpm, 비교적 대용량의 교반 (약 10 m³이상)에는 피치 패들 날개를 사용시 100 rpm 이하로 한다.

3.1.3. 비가용성액체

1) 교반동력

상호 불용해 되는 2가지의 액체를 혼합하는 작업은 석유의 세정, 액체-액체의 추출, 분리를 시작으로 많은 유기합성반응 등에 있어서 행해지고 있다.

비중차가 1.25 까지는

$$P_v = 0.5 \sim 1 \text{ [kW/m}^3\text{]}$$

$$Q_v = 5 \sim 15 \text{ [회/min]}$$

날개 주속 = 3 [m/sec]를 추천한다.

2) 교반날개

전단성능과 토출순환성능을 겸비한 다익터빈 (DS입펠러), 웬 터빈 날개, 피치터빈 날개, 피치패들 날개 등을 이용한다. 날개 지름 대 조에 대한 비율은 d/D=0.15~0.4 정도로 하고 있다. 또한 교반날개의 취부위치는 경계에 설치하는 것이 바람직하지만, 액체의 혼합비가 1 대 2 이상인 경우, 또는 Z/D가 1.2 이상인 경우는 다단날개로 한다.

3) 유동조절판 (배플)

저점도역에서 편심 설치는 분산 혼합력이 약해, 가벼운 액체인 경우에는 정체영역이 생기기 쉽고, 이는 교반

속도의 상승과 함께 감소되지만, 이것을 쉽게 없애는 것은 불가능하다. 따라서 조내에는 B/D=0.1 (B : 배플의 돌출폭) 정도의 배플을 3~4개소 설치한다. (조벽과 배플의 사이에는 틈새를 만든다. : 클리어런스 배플)

이상의 비가용성 액체의 경우는 비중차, 혼합비, 조의 형상 및 배플의 조건 등을 충분히 검토하지 않으면 안 되므로, 경험이 있는 경우는 그것을 충분히 활용해야만 한다. 또한 스케일 다운한 시험장치에서 시험이 가능한 경우 실험을 행하고 교반날개의 위치 배플의 매수 및 폭 등도 충분히 검토해야한다.

3.2. 고체-액체계

고체-액체계의 경우 교반의 목적은 고체입자의 용해, 유동화, 현탁, 분산, 해교 (解膠), 정석 (晶析) 등이다.

3.2.1. 고체입자의 용해

1) 교반동력

고체입자의 용해에 있어서 점성이 거의 없는 경우, P_v 값은 0.1~0.4 [kW/m³] 정도이고, 점성이 높은 경우에는 0.4kW 이상이 되며, 이것은 고체농도에 따라 용해의 난이도가 변하므로 충분히 검토하지 않으면 안 된다. 또한 경험을 고려하여 변동의 폭을 준다.

예를 들면

• 고분자용집체	농도 0.1 wt%시	$P_v=0.4$
	농도 0.2 wt%시	$P_v=0.75$
• 폴리악릴산	농도 2 wt%시	$P_v=7.5$
• PVA	농도 12 wt%시	$P_v=1.5$
• 고무 및 수지	농도 5~12 wt%시	$P_v=3\sim20$

2) 교반날개 및 회전수

고체입자로 녹기 쉬운 것은 프로펠러 날개로, 회전수는 240~360 rpm로 한다.

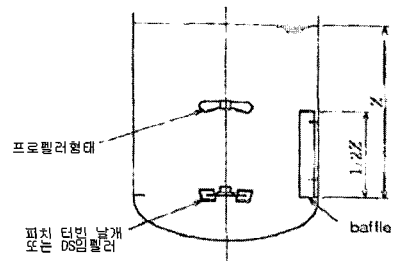


Fig. 2 중심 설치한 경우 (山本一夫의 “교반기술”의 6장)

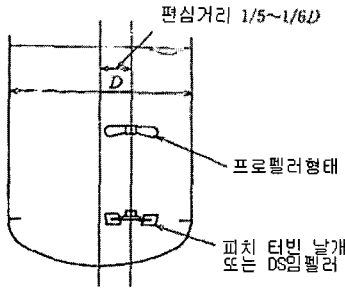


Fig. 3 편심으로 설치한 경우 (山本—夫의 “교반기술” 의 6장)

또한 조의 용량이 큰 (약 10 m³ 이상) 경우는 피치 패들날개를 사용하고, 100 rpm 이하로 한다. 또한, 녹기 어려운 입자에는 전단작용이 강한 교반날개와 토출순환성이 좋은 교반기를 조합하여 사용한다.

3) 유동조절판 (배플)

고체입자로 녹기 쉬운 것에 대해서는 일반적인 고려만으로 문제가 없지만, 고체입자가 뜨기 쉬운 경우는 배플을 액면의 반 정도로 하여, 약간의 보텍스를 만들어 입자를 강제적으로 흡입하는 편이 좋다 (Fig. 2). 또한, 용해가 되면서 점성이 높아지는 것은 Fig. 3처럼 편심설치로 하는 것이 바람직하다.

3.2.2. 입자의 유동화 및 현탁

고체입자를 액체 중에서 교반하여 부유시키는 경우, 날개가 지나치게 작으면 중심부 아래의 입자는 부유하였어도 조의 주변부에는 침강퇴적부가 남고, 날개가 너무 크면 그 반대로 된다. 따라서 중심부 및 주변부의 입자가 동일한 속도로 부유하는 경우의 날개 사이즈는 조사이즈의 약 0.35로 하고, 입자의 크기, 비중, 날개 폭, 날개 각도, 날개 매수에 따라서 조사이즈의 0.3~0.6 정도로 한다.

또한, 입자의 침강속도 U_s 와 교반날개에 따른 조단면 기준토출유속 U 의 관계가 중요하고, 그 관계는 다음과 같다.

$$U > U_s \cdot \beta$$

여기서, U_s : 입자 침강속도 [m/sec]

β : 교반강도 계수 [-]

침강방지의 경우 $\beta = 1\sim6$

균일혼합의 경우 $\beta = 6\sim20$

U : 조단면 기준토출유속 [m/sec]

$$U = q_d / A$$

q_d : 토출유량 [m³/sec], A : 조단면적 [m²]

입자의 레이놀즈수 범위에서 입자의 침강속도 U_s 는 다음의 3가지 수식이 적용된다.

- $Re \leq 2$: 스톡스의 식

$$U_s = \frac{g(\rho_s - \rho_l)D_p^2}{18 \cdot \mu} \tag{6}$$

- $2 < Re \leq 500$

$$U_s = \left\{ \frac{4g^2(\rho_s - \rho_l)^2 D_p^3}{222 \cdot \mu \cdot \rho_l} \right\}^{1/3} \tag{7}$$

- $500 < Re \leq 10^5$

$$U_s = \left\{ \frac{3.33g(\rho_s - \rho_l)D_p}{\rho_l} \right\}^{1/2} \tag{8}$$

단, $Re = \frac{\rho_l U_s D_p}{\mu}$

ρ_l : 액체밀도 [kg/m³],

ρ_s : 입자밀도 [kg/m³],

D_p : 입자경 [m],

μ : 점도 [kg/m · sec],

g : 중력가속도 [m/sec²]

1) 교반동력

앞에서 설명한 것과 같이 침강속도와 토출유속과의 관계는 중요하지만, 일반적으로 동력을 결정할 때에는 조 전체를 유동하고 있는가의 여부도 중요하여 P_v 값으로 결정하는 것이 많고, 이것에는 경험적 실적을 많이 갖고, 이들 데이터를 정량화하여 사용하여야 한다.

2) 교반날개 및 회전수

교반날개는 소용량 (10 m³ 이하)의 교반 및 입자농도가 작은 것 (대상물에 따라 난이도는 크게 다르다)은 프로펠러 날개로 하고, 회전수도 중속 (240 rpm, 360 rpm)으로 하지만, 대용량 (10 m³ 이상) 및 입자농도가 큰 경우는 피치패들 날개 등으로 하고, 회전수도 저속 (100 rpm 이하)으로 한다.

3) 유동조절판

고체입자의 부유 및 현탁에는 유동조절판이 중요하다

며, 간격조절기(클리어런스 베플)가 추천된다. 또한, 조 사이즈에 대한 액심(액체의 깊이)의 비율이 큰 ($Z/D=1.5$ 이상) 경우는 완전조절판 조건보다도 불완전조절판 조건 쪽이 좋은 경우가 많으므로, 주의가 필요하다.

3.2.3. 입자의 분산, 해고, 정석(晶析)

고체입자의 분산, 해고, 정석에 대해서는 일반적으로 고속 강력교반을 적용하지만, 여러가지 조건이 있으므로, 적용시는 경험을 토대로 실험을 하여, 상사법칙에 따라 교반기를 선정한다.

3.3. 기체-액체계

기체를 교반조에 분산시켜 용해·반응을 행하는 장치는 그 목적에 따라 여러 가지 방식을 채용하고 있다. 기체의 공급방법에 따라 침지(沈漬) 교반식, 표면교반식, 자기흡인 교반식의 3종류로 대별하고 있다. 본 논고에서는 슈퍼차징 등에 따라 기체의 강제공급을 수행하고, 액체 중에 설치한 교반날개로 하여금 분산하는 침지 교반장치와 자유표면근처에 설치한 교반날개로 표면상의 기체를 흡입하거나, 반대로 액적을 비산시키는 표면 교반장치에 있어서 설계상의 유의점에 대해 기술한다.

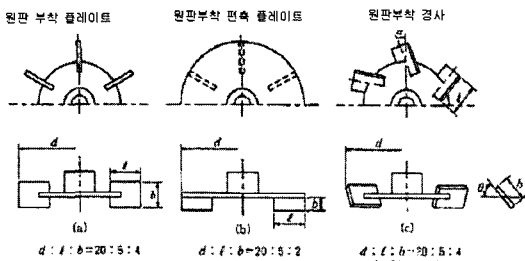


Fig. 4 원판형태의 날개형태 설치 형상 (山本一夫의 “교반기술”의 6장)

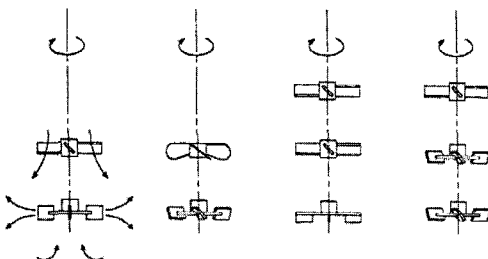


Fig. 5 원판형태 조합의 경우 (山本一夫의 “교반기술”의 6장)

3.3.1. 슈퍼차징방식

1) 교반의

기체분산용에는 전단성능이 우수한 원판 부착터빈날개(플랫 터빈날개)가 가장 많이 이용되고 있다. (Fig. 4(a) 참조). 그러나 흡수속도가 빠른 기체 또는 기체의 공급량이 적은 경우는, 프로펠러 날개와 패들 날개로 하여 목적을 달성하고 있는 경우도 있다. 날개 지름/조 사이즈에 대한 비율은 $d/D = 0.3\sim0.5$ 정도이다.

제조용 장치는 대부분 2단 이상의 조합 날개를 사용한다. 하단의 분산용에는 터빈날개를 이용하고, 순환 및 기체 체류촉진용으로서 피치 패들날개, 프로펠러 날개 등의 축류 날개가 중단 또는 상단에 설치되고 있다 (Fig. 5 참조).

원판부착 피치터빈 날개 (Fig. 4(c) 참조)는 동력수(N_p 치)가 플랫터빈 보다 작으므로, 동일조건이라면 날개사이즈를 20~25% 정도 크게 할 수 있고, 날개 선단속도를 증가시키는 것이 가능하다. 또한, 사류형의 흐름을 발생시키므로, 고품분을 포함한 기체-액체 접촉 장치에 효과를 발휘한다. 액체-액체 교반에서는 원판 상하의 액체의 대류를 유도하기 위하여 원판에 구멍을 뚫고, 기체분산에서는 구멍보다도 기체의 쇼트 패스를 방지하기 위해 설치하지 않는다.

2) 유동조절판

저점도역에서의 편심설치는 전단력, 기체체류시간이 유동조절판 부착의 경우보다 쉽게 열화되고, 또는 안정된 P_v 치 [kW/m^3]를 얻을 수 없고 분산효과가 저하된다. 따라서 조 내에는 $B/D=0.05\sim0.1$ 정도의 평탄한 유동조절판을 3~4개를 설치한다 (조벽과 유동조절판 사이에는 틈새를 둔다).

3) 기체 통기방법

기체의 통기방법은 단공 노즐, 다공 노즐 (벌집형상)

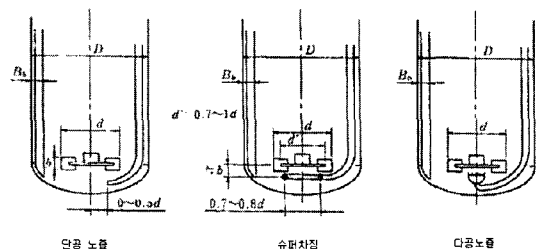


Fig. 6 기체혼입 방법 (山本一夫의 “교반기술”의 6장)

또는 슈퍼차징에 따라 행한다. 고품분을 포함한 경우에는 분출구의 막힘에 주의를 요한다 (Fig. 6 참조).

4) 조 형상

기체의 채류시간을 확보하기 위하여 액심 (수심) Z를 아래와 같은 범위로 한다. 그리고 액체 표면에서 미세액적이 비산하므로 조용량의 20%정도 공간을 둔다.

단단익의 경우 $Z/D = 1 \sim 1.5$

다단익의 경우 $Z/D = 1.5 \sim 2.5$

5) 교반동력

통기 시에 주어지는 동력 P_g 은 기체의 비산, 결국은 흡수효율에 큰 영향을 미친다. 기체-액체의 물성 등의 조건에 따라 다르지만, 단위 용적당 주어진 동력 P_g 는 정도 (경우에 따라서는 $1.5 [kW/m^3]$ 이상)를 기준으로 선정한다.

$$P_v = P_g / V = 0.75 \sim 1.5 [kW/m^3]$$

통기 시의 동력 p_g 는 회전수 일정의 조건에서 통기량 Q_g 의 증가에 따라서 감소하고, 일정하게 된다. 더욱 통기량을 증가시키면 날개의 분산능력을 넘어서 기포가 합체되어 액층을 빠져나가는 플러딩 (flooding)현상이 발생한다. 이 상황에서의 운전은 기체의 분산 효율이 나쁘고, 실용적이지는 않다. 교반날개의 형상에 따라 무통기시에 있어서 동력 P_0 에 대한 통기시의 동력 P_g 의 비 P_g/P_0 및 플러딩 현상의 발생조건은 다르다. 이 현상은 통기계수 $N_A = Q_g / M^2$ 으로 상관되어 있다 (Fig. 7 참조).

Figure 4(a) 날개에서의 소요동력에 대한 대표적인 상관식은 다음과 같다.

$Re \geq 10^4$, $U_g < 2 [cm/s]$ 이하에 대해서 다음 식이 사용될 수 있다.

$$N_A \leq 3.5 \times 10^{-2}, P_g/P_0 = 1 \sim 12.6 N_A \quad (9)$$

$$N_A > 3.5 \times 10^{-2}, P_g/P_0 = 0.62 \sim 1.85 N_A \quad (10)$$

일반적으로 P_g/P_0 를 0.6 이상으로 하면 좋다. 또한, $n \cdot d < 1.5 [cm/s]$, $Re > 560$ 의 범위에서는 액체 물성이 고려된 다음의 식이 적용될 수 있다.

$$\log\left(\frac{P_g}{P_0}\right) = -192\left(\frac{d}{D}\right)^{4.38} \left(\frac{\rho m d^2}{\mu}\right)^{0.115} \left(\frac{n^2 d}{g}\right)^{1.969(a/D)} N_A \quad (11)$$

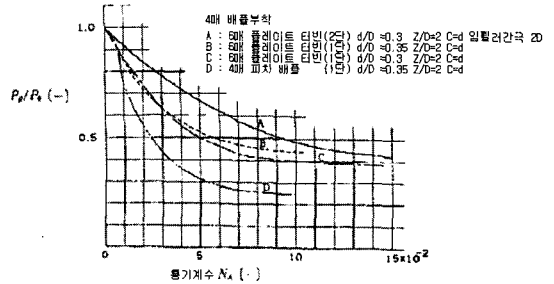


Fig. 7 통기계수와 변화조건에 따른 교반 동력의 저하 (山本一夫의 “교반기술”의 6장)

일반적으로는 N_A 가 적으면 적을수록 교반이 지배되는 상태로 되어, 기포는 잘 분산된다. 최대통기량에 대해서는 많은 검토가 되어있지만, 한계조건인 판정기준이 동일하지 않기 때문에, 각 발표자에 따라 다르게 되어 있다.

실용적으로는 최대 속도로 90 [m/hr] 이하, 최적으로 30~50 [m/hr] 정도이다.

6) 상사에 의한 확대방법

장치를 기하학적 상사조건으로 설정할 때 단위 용량당 주어진 동력 P_v 값은 상사법칙에 의한 확대 방법을 사용한다.

$$d_2 = (d_1/D_1) \times D_2$$

$$N_2 = N_1 \times (D_1/D_2)^{2/3}$$

$$P_2 = P_1 \times (N_2/N_1)^3 \times (d_2/d_1)^5$$

이 경우 액체순환회수 Q_0 가 작게 된다. 따라서 교반목적에 혼합시간이 큰 영향을 미치는 경우는 주의를 요한다.

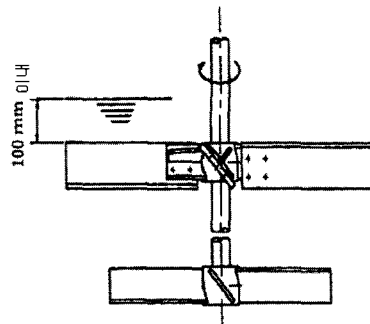


Fig. 8 폭기용 날개 및 설치 위치 (山本一夫의 “교반기술”의 6장)

교반기 선정방법

가스흡수 등의 물질이동을 동반하는 교반목적에는 여러 가지 조건을 합쳐서 진행한다. 그 중에서 최적조건을 탐구하는 데는 어려움이 많다. 여기서 장치조건을 고정하지 않고 회전수, 처리량, 통기량 등의 관련인자를 어느 정도 변경할 수 있도록 설계상의 배려가 필요하다.

3.3.2. 표면 포기방식

1) 교반날개

기체-액체 접촉의 방법은 수처리 관계의 표면 포기조에 사용된다. 각각의 회사에서 효율이 좋은 교반 날개 (프로펠러형, 터빈형, 콘형 등)를 개발하고 있지만, 보통 포기조의 교반효율도 고려하여 피치 패들날개 (4매 날개)를 기준으로 개발하여 실용화되고 있다 (날개의 각도 $\theta=45^\circ$).

통상 교반에 사용하는 경우의 날개폭 b 는 $b=0.15d$ 이지만, 포기용으로는 $b=\sqrt{2} \times d/6$ 로 크게 하고 있다.

2) 교반날개 설치위치

포기조의 정지 액체표면과 날개의 상부 끝 간의 치수가 100 mm 이내의 위치로 설치한다 (Fig. 8 참조). 100 mm 이상이 되면 부하율이 높게 되어 모터의 과부하를 일으킬 위험이 있다.

3) 회전수

모터의 용량에 따라 대략적으로 아래와 같이 분류를 하고 있다.

0.2 ~ 3.7 kW	90 ~ 120 rpm
3.7 ~ 15 kW	50 ~ 90 rpm
15 ~ 30 kW	40 ~ 50 rpm
30 kW 이상	30 ~ 40 rpm

4) 산소공급능력

산소공급능력을 측정하기 위하여 10m × 8m × 3m의 크기 조에서 실험을 하였다. 실험조건은 청수 6~11 ℃, DO = 0~0.3 ppm, 측정법은 아황산소다법과 전자계측기 응용에 따른 연속계측이다.

5) 표면포기기의 설계

필요 동력은 BOD의 제거량에 따라 결정하는 식 (12)로부터 구한다.

$$P_A = \frac{\alpha \times R_o \times f_o}{S_o \times \eta_m \times \eta_L} \quad (12)$$

P_A : 모터 동력 [kW]

α : BOD와 이동산소와의 환산계수 $\approx 0.8 \sim 1.2$

R_o : 필요산소량 [kgO₂/hr]

$$R_o = C_r \times Q_i \times 10^{-3} \text{ [kgO}_2\text{/hr]}$$

C_r : 배수중 BOD 제거량 [ppm]

Q_i : 배수량 [m³/hr]

f_o : 상대안전계수 ≈ 1.6

S_o : 산소공급능력 [kgO₂/kW · hr]

η_L : 모터의 부하율 [-]

η_m : 포기기의 기계효율 [-]

필요동력과 회전수로부터 교반기 날개의 지름을 산출한다.

동력수 $N_p = 0.9 \sim 1.0$ 이다.

6) 포기조의 용량, V [m³]

배수량 Q_i 와 체류시간 T_r 로부터 구한다.

급속, 쉬운처리 4~6 [hr]

중속, 통상처리 6~10 [hr]

완속, 난처리 10~24 [hr]

$$V = Q_i \times T_r \text{ [m}^3\text{]}$$

일반적으로는 $T_r=8 \sim 10$ hr로 하여 설계를 한다. 액적의 비산거리가 크기 때문에 액면에서 천정의 높이 (F) (Fig. 9 참조)가 낮으면 작은 액적이 되지 않고, 공급능력이 저하되므로 주의를 요한다.

4. 상사에 의한 확대 방법

교반조작에 있어서 상사적 확대의 기본은

- (1) 관성력과 점성력의 비인 Reynolds 수
- (2) 관성력과 중력의 비인 Froude 수

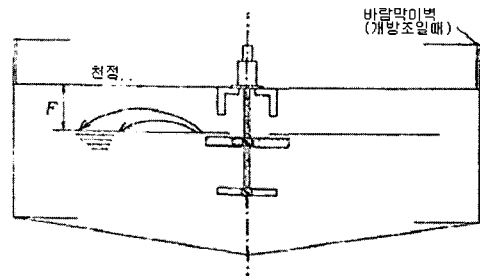


Fig. 9 폭기조 설치에 (山本一夫의 “교반기술”의 6장)

를 기준으로 설계하고, 기하학적 상사조건하에 일정한 값을 유지하는 것이다.

$$Re = \rho n d^2 / \mu = const$$

$$Fr = n^2 d / g = const$$

그러나 두 개의 무차원식이 동시에 성립할 경우에는

$$\mu_l = \left(\frac{d_l}{d_m}\right)^{1.5} \cdot \mu_m$$

의 관계가 성립하지 않으면 안 된다. 즉 모델의 액체 점도가 1cP 이상의 경우, 100배의 상사 확대에 있어서, 실제 장치의 액은 1,000 cP 이상에 제한되어, 1,000배의 경우에는 약 32,000 cp 이상의 경우만이 적합가능하기 때문이다. 각 프로세스에 공통으로 재현성이 매우 높은 하나의 만능의 방정식은 존재하지 않는다.

따라서, 이런 수식보다는 실제로 이용하고 있는 상사 확대 방법에 대하여 용도별로 대별하여 기술한다.

4.1. 균일 액체-액체 균일화

난류영역 ($Re > 2 \times 10^3$)의 경우

$$N_{TM} = t_M \cdot n = const$$

N_{TM} 은 도입부에도 소개한 식 (1)으로도 계산되지만, 무차원 혼합시간일정, 즉 균일화된 시간 t_M 과 날개 회전수 n 과의 곱의 형태로 하여 상사확대를 하지만, 대형조의 경우 t_M 을 크게 허용하는 것이 실용적이다.

4.2. 이상계

이상계의 대부분은 P_v (단위용적당의 소비동력) = const의 관계가 성립하는 점으로부터 가장 많이 상사 확대에 사용되고 있다. 단, 이 경우는 적어도 기하학적상사가 확보되어 있어야 한다. 더욱이 레이놀즈수의 영역이 동일할 것이 원칙으로 필요하다. 이 조건하에서 동일 물성치의 경우

$$n^2 D^3 = const$$

가 성립하고, D는 스케일 대표치수와 같은 조경 (수조의 직경)이다.

더욱이, 액체-액체 이상계에 있어서 액적의 직경 D_p 와 같이, 기체-액체 이상계에 있어서 기포경 D_{pg} 에도

$$D_p \sim D_{pg} \propto \left(\frac{\sigma^{0.6}}{P_v^2 \cdot \rho^{0.2}}\right)$$

여기에, σ : 계면장력 [dyne/cm]

의 관계가 인정되고 있어, D_p, D_{pg} 의 수준 일정으로 하여 상사 확대를 하는 경우에는 $P_v = const$ 으로 상사 확대의 적용성을 고려해 볼 수 있다.

더욱이, 기액 물질이동계수 K_G^a [$\text{kmol/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{atm}$]에 대해서도

$$K_G^a = \alpha P_v^\beta \cdot U_g^\gamma$$

여기서 U_g 는 가스공급속도로, α, β, γ 는 각각 상수이다. β 는 거의 1에 가까운 값이 확실하여, $P_v = const$ 의 상사 확대가 성립한다.

4.3. 그 외의 프로세스 용도로 기하학적 상사가 성립하는 경우

여러 가지 분야로 나누어지므로 요약하여 설명하면

(1) 레이놀즈수 $Re = const$ 의 경우

교반동력은 적어지지만, 혼합시간은 길어진다.

(2) 날개회전수 $n = const$ 의 경우

혼합시간을 스케일에 관계없이 일정하게 하는 것이 가능하지만, Re 는 스케일 비의 2승, 동력 P 는 5승으로 증가하므로, 큰 스케일 비에는 적용하지 않는다.

(3) 날개주속 $nd = const$ 의 경우

상기 (1), (2)의 사이에 위치하는 정도로 스케일 비는 크지 않은 정석교반 등, 여러 종류의 용도에 이용되는 경우가 있는 듯하다.

(4) 단위용량당의 토출순환량 $Q_v = const$ 의 경우

nD 일정으로 하면 P_v 는 스케일 비의 2/3승으로 증가한다. 또한, P_v 도 일정하게 하면, 기하학적 상사는 유지할 수 없고, 날개 사이즈이 스케일비의 1/6승으로 증대하므로, 너무 큰 스케일 비에는 적용할 수 없다.

4.4. 기하학적 상사조건이 다른 우선요구에 따라 유지될 수 없는 경우

실제로 수백배, 수천배의 상사 확대를 행하는 경우에는 오히려 기하학적 상사에 구해 받지 않는 요구를 동반하는 것이 실정이다.

따라서 이와 같은 경우는 하나의 법칙에 엄격히 제한 받는 경우는 적용할 수 없으므로, Table 2에 실린 점검 항목을 모두 산정하고, 프로세스 목적에 대응하여, 어느 항목에 어느 정도의 가중치를 줄 것인가를 잘 고려하여, 시행착오법 (try and error)으로 어느 항목도 한계를 벗어나지 않도록 계속 점검하여, 요구된 기능을 매우 중시하는 방식 결정이다.

목적에 따라서는 모델의 날개 형식을 변경하던가, 하나의 조에 설치하는 대수를 분할 증가하는 상사 확대에서도 현실적인 에너지와 경제성을 포함하여 진행하는 것이 실정이다. 즉, 대수 증가에 따른 교반동력의 저감화와 비용의 점검을 진행하면, 난류범위에서 동력수와 토출유량계수 등이 거의 변화하지 않는다고 볼 수 있는 범위로 하여, 기하학적 상사를 유지하는 교반조의 경우

$$n=\text{const의 경우 } P \propto Q_d^{5/3}$$

의 관계가 성립한다. 단, n : 회전수, P : 교반소요동력, Q_d : 토출유량이다.

이 때문에 동일물성이라도 유량당의 토출유량 Q_v 을 일정 (액체 순환 횟수 일정)으로 하여 상사 확대를 하는 경우에, 기하학적 상사를 유지하는 경우는 상기 식의 관계로 보면 동력이 너무 과대하게 된다.

여기서, 석유, 석탄 (coal water mixture : CWM)의 에너지 관련 저장조에서 많이 볼 수 있는 것과 같이, 조 크기에 비례하여 비교적 작은 날개의 교반기를 설치하는 경우에는 대 수를 증가시켜도, 각 1대의 교반기는 일

단 근사적으로 독립하여 동작한다고 볼 수 있다.

하나의 조에 있어서도 동력일정으로 하고, 교반기 대수 Z_s 를 증가시키면 (기하학적 상사 불유지) 1대당의 토출량 Q_{d1} 는 아래와 같다.

$$Q_{d1} \propto d_1^3 \propto (1/Z_s)^{3/5} \quad \because n=\text{const}$$

$$d_1 \propto P_R^{1/5} \propto (1/Z_s)^{1/5}$$

따라서 전토출량 Q_d 는

$$Q_d \propto Z_s \cdot Q_{d1} = Z_s \cdot Z_s^{-0.6} = Z_s^{0.4}$$

이다. 따라서 동일 동력으로 교반기의 대수를 증가시키면, 대수의 0.4승에 비례하여 토출유량이 증대한다.

또한 Q_v 가 일정하다고 하면, 1대당의 동력 P_1 은

$$P_1 \propto d_1^5 \propto (1/Z_s)^{5/3} \quad \because n=\text{const}$$

$$d_1 \propto P_R^{1/3} \propto (1/Z_s)^{1/3}$$

따라서 전동력 P 는

$$P \propto Z_s \cdot P_1 \propto Z_s^{-2/3}$$

이 되어, 앞의 식에서 상사 확대를 한 후, 대수를 3대로 증가시키면, 동력은 반 이하로도 가능하게 된다. 단, d : 날개지름, P_R : 동력비, Q_v : 토출량비이다.

한편, 이를 비용측면에서 고찰하면, 교반기 초기비용이 동력에 대하여 0.6승 법칙이 성립한다고 하면, 전교반기 초기비용 C_1 은

$$C_1 \propto P^{0.6} \propto (Z_s^{-2/3})^{0.6} \propto Z_s^{-0.4}$$

이 되어, 교반기 대수의 0.4승에 반비례하므로 코스트 다운이 될 것임을 엿볼 수 있다.

또한, 코스트가 교반기의 토크 (T)에 대하여 0.6승 법칙이 성립한다고 할 경우도

$$n=\text{const } T \propto P, C_1 \propto T^{0.6} = P^{0.6} = Z_s^{-0.4}$$

로 상기와 같은 형태가 된다. 단, 제한된 탱크에 무턱대고, 대수를 증가시키면, 상기 가정의 각 1대가 독립적으로 동작한다고 하는 조건이 근사적으로도 성립하지 않

Table 2 프로세스에 따른 점검사항 (山本一夫의 “교반기술” 6장)

①액체순환회수[Hr-1]	$Q_v = N_{qd} \times 60N \times d^3 / V_T$
②용적에 따른 동력[kW/m ³]	$P_v = P / V_s$
③평균전류시간[min]	$T_d = V_s / f$
④평균전단속도구배[s-1]	$\gamma = (102P_v \times g_c / \mu)^{0.5}$
⑤원주속도[m/s]	$V_t = \pi \times d \times N / 60$
⑥동력율[kWh/T]	$\epsilon = P / F$

게 되므로, 적당한 한계를 유지해야 한다.

더욱이, 비교적 작은 조나 P_v 값이 큰 교반장치에 있어서는 대수의 증가는 날개 매수의 증가에 근접한다고 생각되어, 토출량계수 N_{qd} 에 대하여 $N_{qd} \propto n_p^{0.7 \sim 0.35}$ 의 관계가 명확하게 되어 있기 때문에, 상기 식은

$$P \propto Z_s \cdot (1/Z_s^{0.7})^{-0.17}, C_1 \propto Z_s^{-0.1}$$

로 근사되어 대수 증가의 영향은 미소하게 된다.

그러나 운전비용의 주요부를 점하는 전력비를 인자로 하여 계측하면, $7.5 \text{ kW} \times 360 \text{ 일}$, $100 \text{ 원/kW} \cdot \text{hr}$ (가정함)로서 27만 원/년이 되므로, 교반동력과 시간을 절감하면 다소의 초기 비용이 상승하여도 년 단위를 경과하면 지불 가능한 경우가 많다고 생각할 수 있다.

또한 한편으로 저속기중 지향의 유효성에 대해서 고려하면 $1/N_{TM}$ 식 식 (1)의 우변과 같이 균일화 혼합성능에는 동력수보다 유량계수의 효과가 보다 강력한 것으로 생각되어지므로, 난류영역에서, $N_p = \text{const}$ 의 범위로 기학적 상사를 유지할 때, 동일 토출량을 얻는 데 있어

$$Q_d = \text{const } P \propto n^{4/3}$$

의 관계가 성립한다.

여기서 Table 3과 같이 회전수 n 을 60% 정도로 떨어뜨리면 동력을 약 1/2로 하는 것이 가능하여, 중형 모터로 2등급 아래의 것으로 가능해진다.

한편 교반기의 초기비용 C_1 이 토크에 관해서는 0.6승 법칙이 성립한다 (저속기중)고 하면

$$C_1 \propto T^{0.6}, T \propto P/n = n^{4/3}/n = n^{0.33} \therefore C_1 \propto n^{0.2}$$

가 이 경우에 성립한다.

따라서 동일 유량을 얻는데 있어, 날개 회전수를 낮추는 것에 따라, 회전수 저하 비율에 관하여 동력은 0.33

Table 3 날개회전수저하에 따른 동력, 초기비용 저하율 (山本一夫의 “교반기술” 6장)

날개 회전수 변경		동력 저하율	초기비용 저하율
변경전	변경후		
35 rpm	20 rpm	1/2 (7.5 kW)	1/1.107
50	30		
60	35		
83	50		
125	75		
50	20	1/3.35 (18.5 kW)	1/1.2
75	30		
100	40		
125	50		
185	75		

승, 초기비용은 0.2승으로 비례하여 함께 저하하는 경향이 있음을 알 수 있다.

단, 비용에 대해서는 현실적으로 선형적이 아니라 단계적으로 변화하는 것이 통레이므로, 적절한 범위를 선정하는 것이 중요하다.

더욱이, Table 2에는 유통조작 (라인믹서)용의 점검 항목도 나타냈지만 (표 중 ③,⑥을 포함했다), 운전조작의 경우, ①~⑥ 항목의 점검을 요하는 것과 함께 그 프로세스 용도에 따른 고유의 요구를 점검하는 것도 같다.

또한, 운전조작에 있어서는 Q_v 대신에 $Q_v/T_d = \text{const}$ 로 하여 상사 확대를 행하지만

$$n = \text{const} \text{의 경우 } P \propto F^{5/3}$$

$$P = \text{const} \text{의 경우 } F \propto n^{-4/5}$$

(T_d : 액 대류시간 [hr], F : 액체유량 [m^3/hr])의 관계가 혼합목적에서 같은 형상의 익에 대하여 성립된다.