

정수장 효율 향상을 위한 혼화기별 최적 운전조건 산정에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Optimum Operation Conditions of Rapid Mixing Impellers for an Effective W.T.P. Design

손 광 익* / 김 종 현**

Son, Kwang Ik / Kim, Jong Hyun

Abstract

Optimum design conditions of rapid mixing impellers for an effective Water Treatment Plant operation were experimentally studied by thorough examination of parameters, such as impeller type and detention time, which govern the removal efficiency of turbidity. It was found that the impeller type is one of the major parameters governing the economic power consumption and the efficiency of turbidity removal. The experimental results showed that not only the velocity gradient G but also a new design guide, so called mixing energy per unit volume of raw water, could be used as a design and operation guides for rapid mixing in W.T.P.

Keywords: water treatment plant, rapid mixing, impeller, detention time, mixing intensity

요 지

동일한 원수에 대하여 탁도제거 지배인자를 변화시켜가며 임펠러 형태별 탁도제거효율을 비교함으로써 관습적으로 설계 운영해오던 혼화과정의 문제점과 정수장의 최적 혼화조건을 만족시킬 수 있는 혼화기의 임펠러 타입 및 체류시간에 대한 운전기준을 제시하고자 하였다. 실험결과 혼화기의 종류는 탁도제거 효율은 물론 정수장의 경제적 운영을 위한 전력비 절감에도 효과가 있는 것으로 판명되었다. 또한 혼화지와 혼화기 설계기준에 일반적으로 활용되어 오던 속도구배 G 이외에도 원수의 단위체적당 필요한 혼화에너지를 제시하여 정수효율은 물론 정수장의 경제적 운영효과를 극대화시킬 수 있는 참고자료로 제시하였다.

핵심용어: 수처리, 급속혼화, 임펠러, 체류시간, 교반강도

* 영남대학교 토목공학과 조교수

** 대구광역시 상수도사업본부 계장

1. 서 론

정수처리과정의 급속혼화공정은 원수의 콜로이드성 부유물질을 제거하는 가장 기본적인 약품처리공정으로 응집제, 응집보조제, 알칼리제 등의 수리적 혼화강도를 나타내는 교반강도, 온도, pH, 체류시간, 탁도, TOC/DOC 등에 따라 응집효과는 현저히 달라진다. 이 중에서도 혼화기의 운전기준을 나타내는 교반강도는 정수처리 효율을 결정짓는 중요한 인자이나 국내 대다수의 주요 정수장에 대한 운전 현황을 평가해 본 결과(전항배 등, 1995; 김종현, 1995) 운전조건 최적화를 위한 기준 및 비용절감을 위한 경제적 운영이 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 또한 모든 정수처리 공정중 사용되는 각종 기기는 전기에너지에 의하여 가동되고 있으며 상수도 정수처리 비용중 9%가 전력비이다.(대구직할시, 1991)

그중에서도 혼화기, 응집기, 펌프 가동에 대부분의 전력이 소모되고 있어 이에 대한 세밀한 설계기준은 정수장의 경제적 운영을 위해서 필수적이나 혼화기, 혼화응집지의 용량선정 및 혼화방식에 대한 국내 설계지침서인 "상수도 시설기준"에서는 GT 값 또는 체류시간과 임펠러 선단속도만을 제시할 뿐이며 특히 혼화기 임펠러의 경우 외국의 설계예나 제작회사 기준에 의존하고 있어 우리나라 특성에 맞는 혼화응집에 대한 설계기준이 절실히 요구되고 있다.

우리나라 대부분 정수장이 Flash Mixer를 사용하여 전력소모가 대단히 높을 뿐만 아니라 혼화효율도 소비전력에 비하여 우수하지 못한 것으로 알려져 있다. 이와 같은 문제점을 해결하는 일환으로 국내에서도 In-Line Jet Injection 기법을 도입하여 우수한 혼화효과를 얻은 바 있다.(전항배 등, 1995) 그러나 국내의 기존 정수장 대부분이 Flash Mixer를 사용하는 혼화지 시스템을 채택하고 있고 정수장 여건상 In-Line Jet Injection 기법을 도입하기 어려운 현상이 대부분인 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대상 정수장의 혼화지를 그대로 활용하면서도 혼화효율의 극대화 및 혼화기 운전동력을 최소화하여 정수장내 소음감소 및 에너지를 절감할 수 있도록 혼화지 규모 및 임펠러 형태, 교반강도 및 탁도제거효율 등을 측정하여 최적 혼화조건을 산정하므로써 에너지 절감효과를 극대화 시키고 혼화지 형태에 대한 임펠러별 설계기준 산정에 필요한 기본자료를 제시하고자 한다.

2. 연구동향

수처리공정중 최대혼화효율을 얻기위한 최적운전조건 산정에 대한 연구는 수화학 및 수리학 분야에서 오랫동안 지속되어 왔다. Bates 등(1963)은 임펠러 형태에 따라 동일한 혼화지 조건에서 동일한 회전수를 얻을 수 있는데 필요한 동력은 임펠러 유형별로 다르며 소요동력이 동일한 경우에도 혼화지내의 흐름양상은 임펠러의 모양에 따라 다른 양상을 보인다고 발표하였다.

혼화와 응집을 위한 임펠러의 최적운전조건은 일반적으로 Camp(1953)가 제안한 식 (1)의 속도경사 G 값을 많이 활용하고 있으나 이에 대한 반론도 만만치 않다.

$$G = \sqrt{\frac{1000P}{\mu \cdot V}} \quad (1)$$

여기서 P 는 동력 (Watt), μ 는 점성계수 (centipoise), V 는 체적(m^3)이다.

이 G 값은 단위체적당 물에 가해진 동력의 평균치를 나타내는 식으로 체류시간(t)에 의한 영향이 고려되어 있지 않아 Cornwell과 Bishop(1983)은 전단에 의한 일 (Shear Work)로 알려져 있는 $G \cdot t$ 값의 의미를 입자 충돌의 원리를 이용한 이론식으로 전개하여 $G \cdot t$ 가 커질수록 고밀도의 플러크이 형성되며 G 값이 커질수록 플러크의 체적은 줄어든다고 하였다. 이들의 $G \cdot t$ 값에 대한 이론은 최적의 응집효과를 얻기 위한 운전기준으로 혼화강도를 나타내는 기준치로 활용되기도 한다.

Letterman(1973)은 $G \cdot toptimum C^{1.46}$ 의 값은 일정하다 하였고 Andreu와 Letterman(1976)은 응집제의 농도는 $G^{2.8} \cdot t$ 와 연관이 있다는 연구결과를 발표하기도 하였다. Clark(1985)은 실제혼화는 3차원 흐름에서 발생되므로 2차원 흐름을 가정하여 유도된 G 값은 혼화지내의 교반강도를 제대로 표현하고 있지 못하다고 기술하고 있다. 또한 Cleasby(1984)나 Lai 등(1975)은 G 값을 최적효율을 얻기 위한 기준치로 활용한다는 기존의 연구결과에 부정적인 시각을 보이며 모형과 원형간의 축척에 의한 영향(Scale effect)을 무시할 수 있기 위해서는 난류가 발생하는 40~80 rpm 이상의 임펠러 회전속도를 유지해야 한다고 하였고 임펠러의 형상에 관계없이 임펠러 날개의 수평투영 단면적이 같을 경우 동일한 G 값을 발생시킨다고 하였다. Han과 Lawler(1992)는 입자간 충돌을 모의하는 직선형 모델을 곡선형으로 수정 제시하면서 응집의 주요 설계인자인 G 에 대한 중요성에 이의를 제기하였다.

혼화·응집과 흐름과의 관계규명을 위하여 Oldshue (1966)는 Flat Blade 임펠러 끝단의 전단응력과 혼화 지내의 평균전단응력에 대한 연구를 수행하였고 McConnachie(1991)는 임펠러 종류에 따른 난류강도의 영향을 검토하기 위한 실험을 수행하여 난류강도는 속도구배 또는 소요동력을 대신해서 혼화효율을 예측할 수 있는 기법이 될 수 있다는 결론을 얻었다. 또한 각 임펠러 유형별로 최소 잔류탁도를 얻기 위한 소요동력은 동일하다는 결론을 내리고 있으나 이 연구는 실제로 샘플링 조건이나 침전시간 등 모든 조건을 동일하게 한 상태의 실험이 아니라는 것이 이러한 결론에 다소의 의문을 남기고 있다.

3. 연구방법 및 범위

혼화지내의 약품혼화에 필요한 시간은 크게 粗規模 (coarse-scale) 혼화와 細規模 (fine-scale) 혼화로 대별되며 粗規模 혼화시간이란 난류에 의하여 약품이 혼화될 수 있는 최소 渦(eddy) 크기인 Kolmogoroff Microscale 渦까지 도달되는데 소요되는 시간이며 細規模 혼화시간이란 약품이 화학적 반응을 일으키며 최종적으로 확산되는데 소요되는 시간이다. 細規模 혼화 시간은 약품의 종류와 원수수질에 따라 현격한 차이를 보이며 粗規模 혼화시간에 비하여 적은 것으로 알려져 있으며 粗規模 혼화시간은 혼화방법에 따라 난류를 얼마나 효과적으로 형성시키는가에 따라 좌우된다. 또한 細規模에 의한 화학적 반응과 관련한 연구결과로는 최단시간내에 약품을 혼합시켜주는 것이 가장 이상적인 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 약품의 혼화를 위한 응집제 주입방법은 전 실험을 통해 임펠러에서 일정하게 떨어진 위치에 디스펜서(dispenser)를 이용하여 원수에 주입하는 방법을 선택하여 細規模에 의한 화학적 반응의 영향을 최소화시키면서 粗規模에 의한 효과를 집중적으로 검토하였다.

3.1 혼화효율 지배인자 결정

동일한 혼화지내에 설치된 혼화기의 원수 교반효율은 임펠러의 종류, 크기 및 운전특성에 따라 큰 차이를 나타내는데 이중 임펠러 형태에 따라 그림 1과 같이 방사상 또는 축방향의 흐름이 유발되며 난류강도 및 임펠러 회전을 위한 소요동력도 달라지게 된다. (ASCE, 1990) 그림 2와 같이 임펠러의 종류에 따라 혼화지내의 속도분포, 전단속도 또는 G 값도 달라져 동일한 동력을 소모하더라도 임펠러 형태에 따라 혼화 효율은 많은 차이를 나

타낼 것으로 판단된다. 따라서 각종 임펠러간의 효율 비교를 위해서는 동일한 원수에 대하여 동일한 응집효과를 얻는데 필요한 임펠러별 G 값 및 혼화시간(또는 체류시간), 소요동력 등을 산출, 비교하여야 한다. 이상의 연구목적을 달성하기 위해서 혼화에 영향을 미치는 임펠러 및 혼화지에 대한 수리학적 지배인자를 선정하였다.

혼화에 영향을 미치는 임펠러 및 혼화지에 대한 수리학적 지배인자로는 모터동력 (P), 임펠러 회전속도 (N), 원수의 밀도 (ρ), 원수의 점성계수 (μ), 임펠러 직경 (D), 혼화지 직경 (T), 혼화지 수심 (H), 혼화지 바닥부터 임펠러까지 높이 (Z), 가로벽 수 (n_{bf}), 가로벽 폭 (W_{bf}), 임펠러 피치 (impeller pitch: S), 임펠러 날개수 (n_{bl}), 임펠러 날개길이 (L), 임펠러 날개폭 (W_{bl})으로 설정하고 이상의 독립변수를 이용한 기본 상사공식을 식 (2)와 같이 구하였다.

$$\phi(D, T, H, Z, S, L, W_{bl}, W_{bf}, \rho, \mu, g, N, P) = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 D, N, ρ 를 반복변수로 하는 차원해석을 실시하면 식 (3)이 된다.

$$\phi\left(\frac{D}{T}, \frac{D}{H}, \frac{D}{C}, \frac{D}{S}, \frac{D}{L}, \frac{W_{bl}}{D}, \frac{W_{bf}}{D}, \frac{D^2 N}{\nu}, \frac{DN^2}{g}, \frac{n_{bl}}{n_0}, \frac{n_{bf}}{n_0}\right) = \frac{P_g}{\rho D^5 N^3} \quad (3)$$

이 식중 몇 개의 항을 식 (4)~(6)과 같이 정의하고 변수간의 관계가 지수형태로 표현할 수 있다고 하면 식 (3)은 다시 식 (7)과 같이 정의된다.

$$N_{Fr} = \frac{DN^2}{g} \quad (4)$$

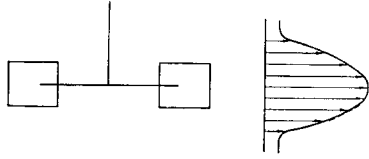
$$N_{Re} = \frac{D^2 N}{\nu} \quad (5)$$

$$N_P = \frac{P_g}{\rho D^5 N^3} \quad (6)$$

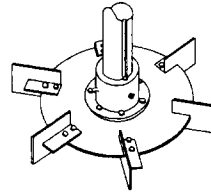
$$N_P = K(N_{Re})^m (N_{Fr})^n \left(\frac{T}{D}\right)^i \left(\frac{H}{D}\right)^h \left(\frac{C}{D}\right)^c \left(\frac{S}{D}\right)^s \quad (7)$$

$$\left(\frac{L}{D}\right)^l \left(\frac{W_{bl}}{D}\right)^w \left(\frac{W_{bf}}{D}\right)^f \left(\frac{n_{bl}}{n_0}\right)^b \left(\frac{n_{bf}}{n_0}\right)^r$$

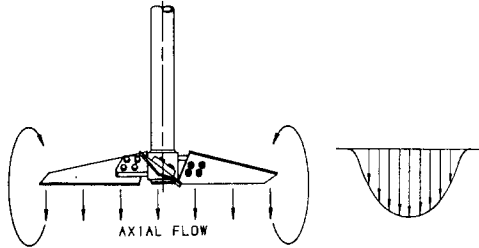
윗식 우변항의 우측 끝부터 아홉 개 항은 기하학적 상사와 관련된 항으로서 Rushton 등(1950a, 1950b)은 기초적 실험을 통하여 이 항들의 영향을 검토하였으며 최근에는 각 임펠러 제작사별로 임펠러 유형에 따라 임펠러와 혼화지 사이의 기하학적인 최적관계를 제시하고 있어 이러한 자료를 이용하여 임펠러사가 제시하는



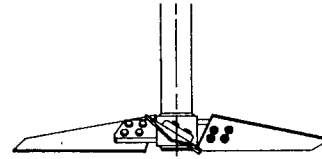
Disk Mounted Impeller (DMI)



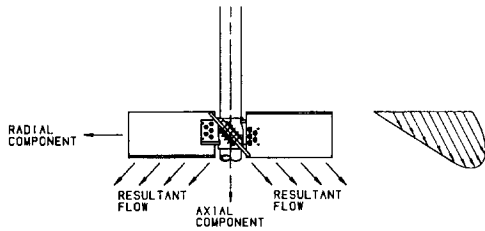
Disk Mounted Impeller



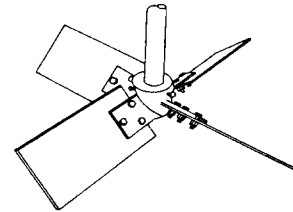
Constant Pitch-Variable Angle of Attack Turbine (CPT)



Constant Pitch - Variable Angle of Attack Turbine



Pitched Blade Turbine (PBT)



Pitched Blade Turbine

그림 1. 임펠러 형태별 흐름방향

최적조건을 만족하도록 각종 기하학적인 조건을 고정시킴으로써 지배인자에서 제외시킬 수 있어 식 (7)은 다시 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_P = K(N_{Re})^m (N_{Fr})^n \quad \text{또는} \quad (8)$$

$$N_P / (N_{Fr})^n = K(N_{Re})^m$$

$\Phi = N_P / (N_{Fr})^n$ 라 하면 식 (8)은 식 (9)와 같이 기술할 수 있다.

$$\Phi = K(N_{Re})^m \quad (9)$$

이상은 수리학적 특성을 나타내는 인자이며 서론에서도 언급한 바와 같이 이러한 인자 이외에도 응집제 농도, 온도, pH, 체류시간, 탁도 등이 혼화효율을 지배하는 인자로 볼 수 있으나 본 연구에 사용된 원수의 pH 범위는 6.6~8.2로 평균 pH는 6.9였으며 수온범위는 21

그림 2. 모형 혼화기로 사용된 임펠러의 모양

℃~ 25℃로 평균수온은 23.7℃로 일반 정수처리 조건에서 벗어나는 특별한 범위나 심한 변화는 없었으므로 무시하였다. 따라서 수리특성을 나타내는 인자외에도 응집제 농도, 체류시간 그리고 탁도를 지배인자로 추가 설정하였다.

3.2 실험범위

탁도는 혼화에 의한 탁도 제거효율을 분석하기 위하여 원수가 유입되는 저수지의 저니를 이용, 초기탁도를 30NTU로 일정하게 유지시켜 원수로 사용하였다.

응집제 농도는 실험을 수행한 정수장 운영기록 및 예비실험 결과 10~30 ppm 이 이상적인 농도로 판단되어 이 범위 안에서 농도를 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

체류시간을 포함한 일반적인 혼화기 운전기준은 표 1에 나타나는 바와 같이 운영기준이 광범위하여 체류시간 및 혼화강도 기준을 정하기가 쉽지 않다. 뿐만 아니

표 1. 급속혼화공정의 속도경사와 체류시간에 대한 기준(백흥기, 1994)

연구자	체류시간(초)	G (sec ⁻¹)	혼화기 종류
AWWA, ASCE	20	1,000	Back mixer-reactor
	30	900	
	40	790	
	> 40	700	
Letterman 등	150	1,000	Back mixer-reactor
Camp 와 Letterman	60~120	700~1,000	Back mixer-reactor
Gemmell	10~30	700~1,000	Back mixer-reactor
IS7090	20~60	300~900	Back mixer-reactor
Bratby	0.5~8	650	Back mixer-reactor
Janssens	0.1~1	1,000~5,000	Back mixer-reactor
	15~30	200~500	
Amirtharaja와	1	700~1,000	Back mixer-reactor
Trusler	0.5~1	3,000~5,000	In-line blender
Hudson	< 1	3,000~5,000	In-line blender
Kawamura	0.5~1	700~1,000	Injection nozzle
Park	1	1,000	Back mixer-reactor
	1~5	350~1700	In-line static mixer

라 최근의 연구에서는 혼화시간을 최소화시키는 것이 바람직하다는 연구결과가 계속 발표되고 있어 기준설정에 더욱 많은 애로가 따른다. 경제적인 정수장 운영이란 최소의 경비로 최대의 효과를 얻는 것이다. 따라서 일반적으로 최적 혼화조건으로 알려진 체류시간과 교반강도의 상관관계로부터 급속혼화과정을 거치는데 필요한 단위체적당 소요에너지를 산정해 보면 가능한 한 체류시간을 짧게 하는 것이 총 소요에너지를 줄일 수 있다는 것을 쉽게 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1초부터 10초까지의 체류시간에 대한 최적 체류시간 및 최적 혼화강도를 검토하였다.

3.3 실험방법 및 장치

가장 보편적인 국내정수장의 정사각형 혼화지 형태의 모형 혼화지를 제작하였으며 (표 2 참조) 연속적인 원수공급이 가능하고 현장 검증이 가능한 대구시내의 모정수장에서 실험을 수행하였다. 모형 혼화지의 규모는 임펠러 제작사(Philadelphia Mixers: 1988)의 권장치에 적합하도록 정사각형 수조를 제작, 사용하였다. 혼화지 규격 및 임펠러의 설치위치 권장치는 $D/T_e=0.35\sim 0.4D$, $Z=0.75\sim 1.0D$, $H=1.75\sim 2.25D$, $T_e=1.13\sqrt{B\times B}$ 이며 여기서 D 는 임펠러 직경, T_e 는 혼화조 유효직경, H 는 혼화조 수심, Z 는 혼화조 바닥부터 임펠러까지의 높이를 나타낸다. 또한 실제 사용된 혼화지의 크기 및 임펠러의 설치위치는

표 2. 비이커, 임펠러 분류 및 특성(단위 : mm)

분 류	임펠러			혼화지
	Model	Dia.	위. 치	
Axial	CPT	64.6	$Z=50$ $H=110$	$B=167$
	PBT	63.7	$Z=50$ $H=110$	$B=167$
Radial	DMI	76.5	$Z=60$ $H=135$	$B=195$
Beaker & Baffle	$\phi 211\times H 253$, $W_{bfl}=6.5$, $n_{bfl}=4$ 개			

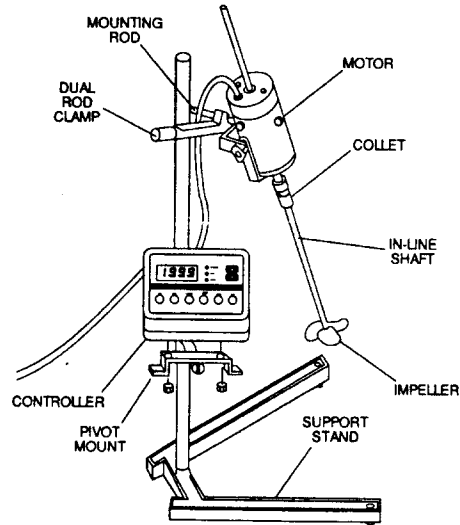


그림 3. 혼화기 모형 및 동력 측정장치

표 2에 나타나 있다.

그림 3과 같이 각종 모형 임펠러의 회전속도, 운전시간의 조절은 물론 토크를 동시에 측정할 수 있는 장치와 실제의 혼화지를 시뮬레이션할 수 있도록 임펠러와 혼화조 크기의 비가 0.35가 되도록 혼화지를 투명 프라스틱으로 제작하여 응집제 농도, 체류시간, 혼화강도 등을 변화시켜가며 급속혼화를 시킨 후 동일한 강도에 의한 완속교반을 실시한 후 잔류탁도를 측정하여 최적혼화조건을 산정하였다.

임펠러 유형은 Constant Pitch-Variable Angle of Attack Turbine (CPT), Pitched Blade Turbine (PBT), Disk Mounted Impeller (DMI)를 선정하였다. 이유는 PBT, DMI는 각각 축류흐름(Axial Flow) 및 방사상 흐름(Radial Flow)를 나타내는 임펠러로 이들의 특징은 피치(Pitch)는 변하나 입사각(Angle of

Attack)은 일정하다는 것이며 CPT는 축류흐름이며 피치는 일정하나 입사각은 변한다는 특징을 나타내고 있으며 현재 사용되고 있는 임펠러는 제작사마다 그 이름은 달리하지만 대부분 이 범주안에 들기 때문이다. 임펠러 회전속도는 60 부터 2000 rpm까지, 유체는 물과 에틸렌 글리콜($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$)을 사용하였다. 응집제로는 액체 Alum($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)을 사용하였으며 탁도제거 효율은 아래와 같은 과정을 거쳐 측정하였다.

- ① 혼화시간 1, 3, 5, 10 초에 대하여 Alum 투입량을 10, 20, 30 mg/l, 속도구배 G 값을 300, 600, 900, 1200, 1500~3000 으로 변화시켜가며 급속혼화 시킨다. 이 때 소요동력은 토크를 측정하여 산정하였다. 혼화시작전 샘플의 온도 및 초기탁도, pH를 측정한다.
- ② 급속혼화시킨 물을 여러 위치에서 3개의 샘플을 채취하여 속도구배 40 sec^{-1} 로 20분간 완속교반 후 30 분간 침전시킨다.
- ③ 수면하 2~3 cm에서 3개의 상정수 샘플을 취하여 잔류탁도, 온도 및 pH를 측정한다. 실험결과 분석에 사용된 잔류탁도, 온도 및 pH는 3개 sample의 평균치를 사용하였다.
- ④ 임펠러 타입별로 이상의 실험을 반복한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 임펠러 형태별 수리적 특성 및 혼화효율

임펠러 형태별 Φ 와 N_{Re} 에 대한 실험을 위해서 혼화

조는 가로벽이 있는 원통형 수조를 사용하였으며 세부 규격은 표 2에 나타나 있다. 또한 실험결과 Φ 와 N_{Re} 관계를 log-log 그래프를 이용 그림 4에 도시하였다.

본 연구과정에서 사용한 임펠러의 특성을 표현하기 위하여 임펠러 형태별 N_{Re} 와 Φ 에 대한 상관관계를 도시하였다. 이상의 실험을 통한 각 임펠러 유형별 혼화 효율을 파악하기 위하여 각 임펠러 타입별로 응집제 주입농도를 10 ppm, 20 pm, 30 ppm으로 변화시켜가며 잔류탁도를 측정된 75회씩의 실험 결과를 잔류탁도가 가장 작은 실험부터 큰 실험까지 순서대로 나열한 후 총 실험횟수에 대한 각 임펠러별 누가발생횟수를 그림 5에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 실험범위에 관계없이 CPT가 PBT와 DMI보다 탁월한 탁도제거 효율을 나타내고 있었으며 PBT가 DMI보다 전체적인 효율면에서는 우수한 것으로 나타났다. 최적주입농도에 대한 탁도제거효율 역시 CPT가 PBT와 DMI보다 탁월한 탁도제거효율을 나타내고 있었으며 PBT와 DMI는 그 효율이 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한 각 임펠러 타입별, 각 주입농도별 발생횟수를 누가하여 그래프로 그림 6에 나타내었다. 각 곡선에서 보는 바와 같이 응집제 주입농도가 20ppm일 때 가장 우수한 혼화효율을 나타내고 있음을 알 수 있었으며 이는 실험이 수행된 정수처리장에서의 운영조건과 부합되는 결과를 보이고 있다. 이들 그림을 보면 DMI의 경우 농도에 가장 민감한 반응을 보이고 있음을 알 수 있으며 탁도 제거효율

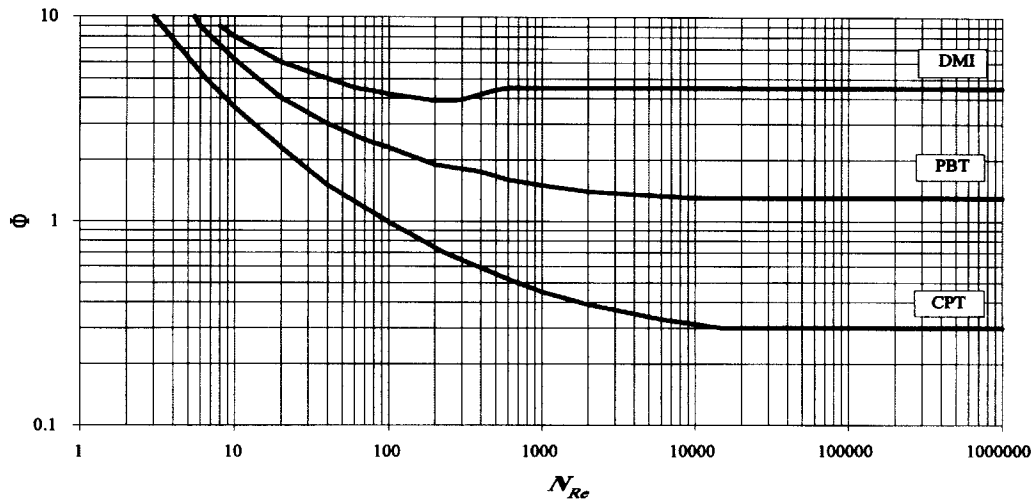


그림 4. 임펠러별 Φ 와 N_{Re} 의 상관관계

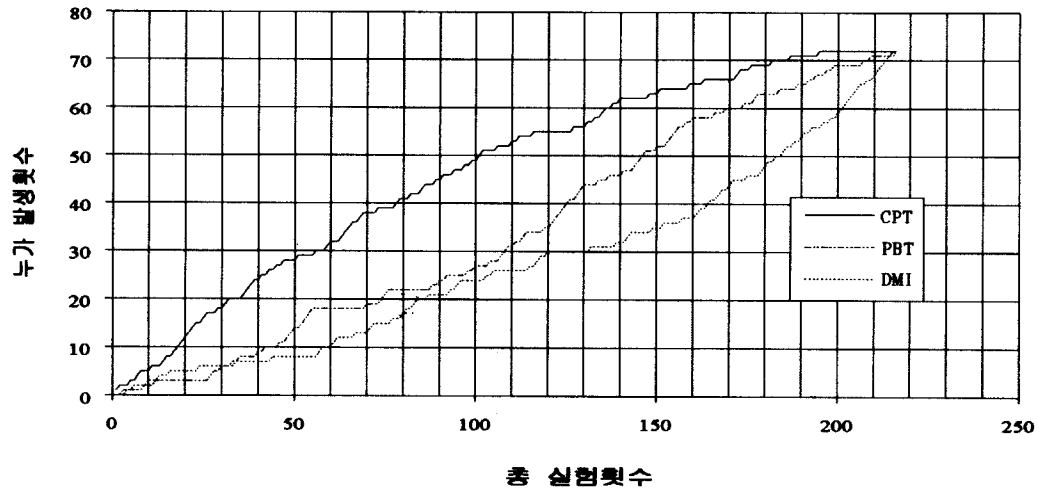


그림 5. 총실험횟수와 임펠러 타입별 저잔류탁도 발생실험 누가횟수

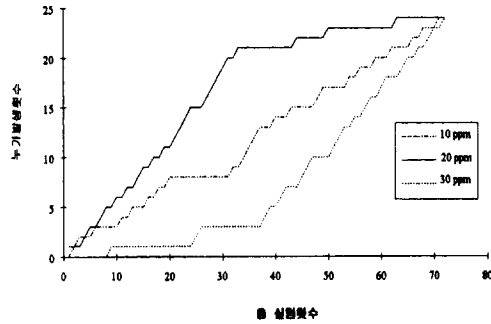


그림 6(a). CPT 임펠러의 총 실험횟수와 응집제 농도별 저잔류탁도 발생실험 누가횟수

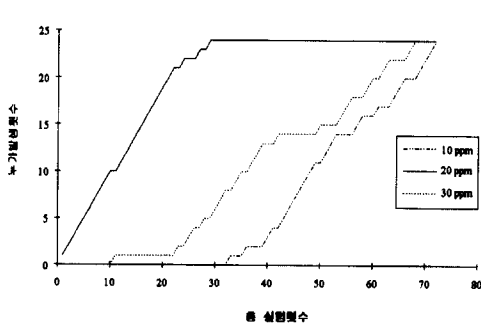


그림 6(b). DMI 임펠러의 총 실험횟수와 응집제 농도별 저잔류탁도 발생실험 누가횟수

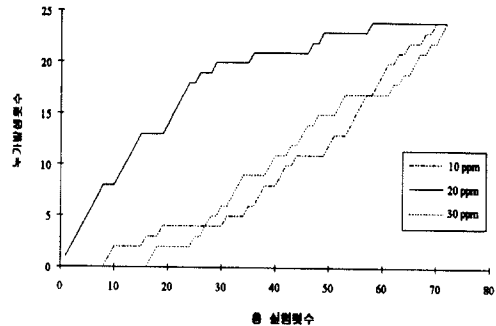


그림 6(c). PBT 임펠러의 총 실험횟수와 응집제 농도별 저잔류탁도 발생실험 누가횟수

이 10 ppm 인 경우가 30 ppm 인 경우보다 낮다. CPT의 경우 탁도 제거효율이 10 ppm 인 경우가 30 ppm 인 경우보다 높아 임펠러를 통한 혼화지내 원수로의 동력전달이 가장 우수하며 PBT는 DMI와 CPT의 중간 효율을 나타내는 것으로 판단된다. 이는 DMI에 의한 동력전달이 타 임펠러보다 낮은 것을 의미한다고 할 수 있다.

4.2 임펠러 형태 및 체류시간별 최적 G값

실험을 통하여 탁도 제거효율이 가장 우수한 임펠러 타입과 최적 혼화시간 및 G값을 찾기 위한 기초자료를 제공하고자 하는 연구의 목적에 따라 실험 결과를 G값과 잔류탁도의 관계를 혼화지내 체류시간별로 검토하였다.

검토결과 각 임펠러의 응집제 주입농도 20 ppm에 대한 탁도제거 효율이 가장 좋았으며 따라서 응집제 농도 20 ppm에 대한 체류시간별 최적 G값 (G_{opt}) 을 표 3과 같이 도표화하였다. 실험분석 결과 CPT의 경우는 5초와 10초일 때, DMI의 경우는 1초와 10초일 때, 그리고 PBT의 경우 1초와 3초의 경우 가장 우수한 탁도제거효율을 나타내고 있었으나 1초부터 3초까지 체류시간에 대한 잔류탁도의 제거효율은 G값에 대한 민감도가 높아 대단히 불안정한 제거효율을 보이고 있음을 알 수 있었다.

PBT의 경우 G_{opt} 와 체류시간간의 일정한 상관관계를 나타내고 있지는 않으나 전체적으로 볼 때 임펠러 타입에 관계없이 최저 G_{opt} 은 1초일 때 최저 G_{opt} 을 나타내고 3초 또는 5초의 체류시간일 때 가장 큰 G_{opt} 을 나타내며 그 이후 체류시간이 길어질수록 다시 G_{opt} 은 다시 감소하는 추세를 나타내 일반적인 혼화강도 기준에서 나타나는 시간이 길어질수록 G_{opt} 이 줄어드는 현상과는 다소 다른 현상을 보이고 있다. 그러나 PBT를 제외하면 비록 G_{opt} 이 커지더라도 체류시간 10초일 때의 잔류탁도 값이 가장 낮아 가장 우수한 혼화효율을

표 3. 임펠러별 체류시간에 따른 최적 G값 및 잔류탁도

임펠러 종류		체류시간 (sec)			
		1	3	5	10
CPT	잔류탁도	3.0	3.1	2.8	2.0
	최적G값	600	1600	1600	1200
PBT	잔류탁도	2.6	2.8	2.9	3.2
	최적G값	900	1200	900	1200
DMI	잔류탁도	2.8	2.9	3.4	2.4
	최적G값	900	2000	900	900

보이고 있으며 5초 이후 G_{opt} 이 줄어드는 양상은 일반적인 현상과 비슷하며 체류시간 5초의 경우 G_{opt} 은 약 $900 \sim 1,600 \text{ sec}^{-1}$ 정도, 체류시간 10초의 경우 CPT와 PBT의 경우 G_{opt} 은 약 $1,200 \text{ sec}^{-1}$ 정도로 일반적으로 알려진 혼화기준 체류시간 20초의 경우 G_{opt} 을 약 $1,000 \text{ sec}^{-1}$ 로 하는 기준에 비교적 잘 부합하고 있다고 판단된다. 따라서 1초-3초일 때 G_{opt} 이 최소치를 보이거나 탁도제거 효율이 불안정한 이유는 실험에 의한 오차라기보다는 응집제를 디스펜서를 이용하여 혼화지에 넣은 후 임펠러에 의한 혼화가 완전히 이루어지지 못한 상태에서 완속교반을 수행한 결과로 판단되어 이상의 연구결과와 각종 수질관련 인자들이 수시로 변하는 현장의 조건을 고려할 경우 in-line mixing 또는 젯분사와 같은 응집제 주입방법이 아닐 경우 약 5초 이내의 체류시간을 통한 혼화는 곤란할 것으로 판단된다.

4.3 임펠러 형태별 최적 혼화에너지

연구동향에서도 언급한 바와 같이 속도구배 G값을 이용한 최적 혼화효율 산정기준에 대한 논쟁은 아직 계속중이며 본 연구의 실험결과도 체류시간 5~10초 사이에 대한 G_{opt} 은 기존의 연구결과와 유사한 양상을 보이고 있으나 전체적으로는 G값과 탁도제거 효율간의 뚜렷한 상관관계를 규명하기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 속도구배 G이외에도 체류시간을 고려할 수 있도록 단위체적당 원수의 혼화에 공급된 혼화에너지를 이용한 분석을 실시하였다. 단위체적당 원수의 혼화에 공급된 혼화에너지란 혼화기에 의하여 공급된 단위시간당 에너지를 혼화지 체적으로 나눈 후 원수의 체류시간을 다시 곱해줌으로서 혼화지에서 혼화기를 통해 원수 단위체적당 공급된 총 에너지를 의미한다. 그림 7에 나타난 바와 같이 임펠러 모양에 관계없이 원수의 단위체적당 공급되는 혼화에너지가 작은 경우는 탁도제거효율이 낮을 뿐만 아니라 불안정적이었다. 그러나 CPT의 경우 혼화에너지가 약 $3,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 보다 커지게 되면 탁도제거효율은 점차 안정적인 추세를 보이며 약 $10,000 \sim 13,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 에서 최저 잔류탁도를 보이고 그 이상이 될 때는 오히려 잔류탁도가 점차 증가하는 현상을 보여 지나친 동력의 공급은 오히려 탁도 제거 효율을 떨어 뜨린다는 McConnachie(1991)의 연구결과와도 일치되는 현상을 보이고 있다. PBT의 경우 혼화에너지가 약 $6,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 보다 커지게 되면 탁도제거효율은 점차 안정적인 추세를 보이며 약 $10,000 \sim 15,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 에서 최저 잔류탁도를

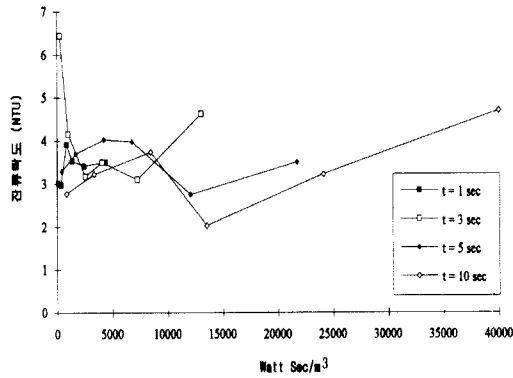


그림 7(a). 단위체적당 공급된 에너지와 잔류탁도의 관계 (CPT, 20 ppm)

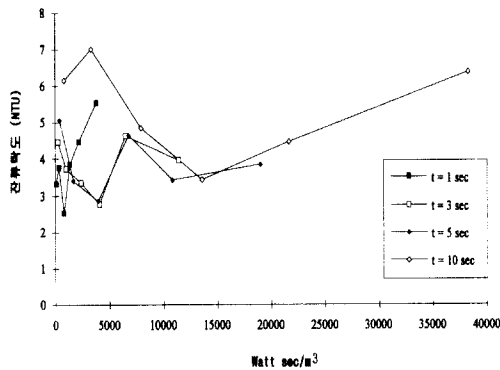


그림 7(b). 단위체적당 공급된 에너지와 잔류탁도의 관계 (PBT, 20 ppm)

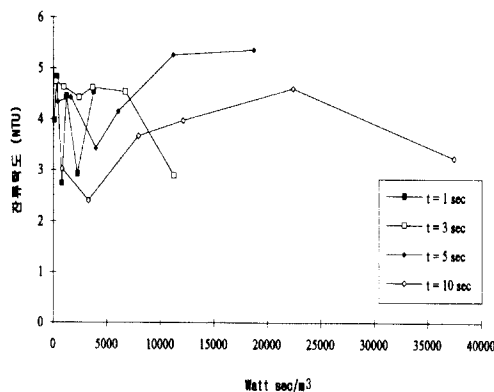


그림 7(c). 단위체적당 공급된 에너지와 잔류탁도의 관계 (DMI, 20 ppm)

보이고 이 이상이 될 때는 CPT의 경우와 마찬가지로 잔류탁도가 점차 증가하는 현상을 나타낸다. DMI의 경우 본 실험에서 사용된 임펠러 유형중 탁도제거효율은 가장 낮으나 혼화에너지나 G 값에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 체류시간이 1초에 대한 불안정한 탁도제거효율 현상이 사라지는 약 $6,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 보다 커지게 되면 탁도제거효율은 점차 안정적인 추세를 보이거나 동력변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

이상의 비교검토 결과 CPT와 PBT는 혼화에너지에 민감한 반응을 보이며 비슷한 제거효율을 보이고 있으나 DMI는 혼화에너지에 가장 낮은 민감도를 나타내어 앞에서 언급한 바와 같이 DMI에 의한 동력진달이 타 임펠러보다 낮다는 사실을 알 수 있다. 또한 타 임펠러에 비해 제거효율도 다소 낮은 것으로 나타났다. 동일한 탁도제거효율을 얻기 위해서는 CPT가 PBT에 비해 다소 낮은 혼화에너지를 요구하는 것으로 판단되나 더 많은 연구가 따라야 할 것으로 사료된다.

혼화에너지와 관련된 본 연구 결과를 국내 정수장 실태와 비교하기 위하여 27개 국내 정수장에서 운영되고 있는 구동모터의 동력, 체류시간 및 혼화지 용적 등을 조사한 결과 $10,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 이하의 정수장 4개소, $10,000 \sim 20,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 인 정수장 11개소, $20,000 \sim 30,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 인 정수장 4개소, $30,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 이상인 곳도 7개소나 되는 것으로 나타났으며 그 중 1개소는 $70,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 이상인 것으로 조사되었다. 따라서 최적 혼화에너지는 임펠러 유형에 차이가 있으나 약 $6,000 \sim 15,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 가 이상적으로 판단되는 본 연구결과 범위안에 해당하는 정수장은 27개소 중 10개소에 불과하였다. 이는 본 연구결과에 따른 경우 과도하게 설계 운영되고 있는 정수장이 약 60% 이상에 달한다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

(1) 임펠러 유형별 동일한 탁도제거효율을 얻기 위해 필요한 동력을 비교하기 위하여 3가지의 임펠러를 사용하였으며 임펠러의 수리적 특성을 나타내기 위하여 임펠러의 Φ 와 N_{Re} 관계를 log-log 그래프에 도시하여 추후 본 실험에서 사용된 임펠러 이외의 임펠러 형태에도 본 연구의 결과를 응용할 수 있도록 하였다.

(2) 임펠러 유형에 관계없이 체류시간이 1~3초 일 때 불안정한 탁도제거 효율을 나타내고 있으며 체류시간 5초의 경우 G_{opt} 은 약 $900 \sim 1,600 \text{ sec}^{-1}$ 정도이며

체류시간 10초의 경우 CPT 과 PBT의 경우 G_{opt} 은 약 $1,200 \text{ sec}^{-1}$ 정도로 일반적으로 알려진 체류시간과 G_{opt} 기준에 비교적 잘 부합하고 있다. 그러나 탁도제거효율과 G_{opt} 의 상관관계는 그리 높지 않은 것으로 사료된다. 따라서 혼화강도와 탁도제거효율간의 관계를 나타낼 수 있는 혼화에너지라는 새로운 인자를 찾아내었으며 임펠러에 따라 차이는 다소 있으나 약 $6,000 \sim 15,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 정도가 적당할 것으로 나타나 혼화지 설계에 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

(3) 임펠러 모양에 관계없이 단위체적당의 원수에 공급되는 혼화에너지가 작을 경우, 탁도제거 효율은 낮았으며 혼화에너지가 약 $15,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 보다 커지게 되면 탁도제거효율은 점차 떨어져 혼화기를 통한 지나친 에너지 공급은 오히려 탁도제거 효율을 떨어뜨린다는 사실을 알아냈다.

(4) 최적 응집제 주입농도에 대한 탁도제거효율을 조사한 결과 CPT와 PBT가 DMI보다 우수한 탁도제거효율을 나타내고 있었으며 DMI는 효율은 떨어지며 소요 혼화에너지나 G 값은 타 모형에 비해 낮은 것으로 나타나 혼화지 설계시 임펠러 형태에 대한 철저한 사전조사 및 검토가 따라야 할 것으로 판단된다. 동일한 동력을 공급할 경우 탁도제거효율은 CPT, PBT, DMI 순으로 나타났으며 DMI의 경우 혼화에너지에 둔감한 경향을 나타내고 있다. 그러나 CPT는 PBT에 비해 우수한 탁도제거효율을 나타내고 있어 동일한 동력이 소모된다 하더라도 임펠러의 형상에 따라 탁도제거 효율에는 차이가 있음을 알 수 있었다.

(5) 현재 운영중인 국내정수장을 조사해본 결과 본 연구에서 혼화지 설계기준 참고자료로 판단되는 혼화에너지의 적정 범위인 약 $6,000 \sim 15,000 \text{ Watt} \cdot \text{s/m}^3$ 에 해당하는 정수장은 27개소 중 10개소에 불과하여 국내정수장중 60 % 이상이 과다하게 설계 운영되고 있는 사실을 간접적으로 시사하고 있어 혼화지의 최적운영을 위한 연구 및 노력이 더욱 더 많이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 산학협동재단의 연구비 지원으로 이루어졌으며 관계기관에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김종현 (1995). "A"정수장의 정수처리시설 개선에 따른 전기에너지 절약에 대한 연구, 석사학위 논문, 영남

대학교 pp. 1-32.
 대구직할시 상수도사업본부 (1991). 지방상수도 광역화의 타당성 조사에 대한 연구, 대구광역시
 백흥기 (1994). 응집에 대한 속도구배 및 체류시간의 영향. 석사학위논문, 한국과학기술원, pp. 25-28.
 전향배, 한경진, 이태용, 손광익 (1995). "급속혼화공정 현황 및 개선사례 연구." 대한상하수도학회지, 대한상하수도학회, Vol. 9, No. 4, pp. 97-106.
 Andreu, R., and Letterman, R.D. (1976). "Optimizing flocculator power input." *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 102, No. EE2, pp. 251-263.
 ASCE (1990). *Water Treatment Plant Design*. McGraw-Hill, New York, pp. 77-104.
 Bates, R.T., Fondy, P.L., and Robert R. Corpstein (1963) "An Examination of some geometric parameters of impeller power." *I & EC Process Design and Development*, Vol. 2, No. 4, pp. 310-314.
 Camp, T.R (1953). "Flocculation and flocculation basins." *American Society of Civil Engineers Transactions*, ASCE, September, pp.1-16.
 Clark, M.M. (1985). "Critique of Camp and Stein's RMS velocity gradient." *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 741-754.
 Cleasby, J.L. (1984). "Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter?" *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 5, pp.875-897.
 Cornwell, D.A., and Mark M. Bishop, M.M. (1983) "Determining Velocity Gradients in Laboratory and Full-Scale Systems." *Journal of American Water Work Association*, AWWA, Vol. 75, No. 9, pp. 470-475.
 Han, M. and Lawler, D.F. (1992). "The (relative) insignificance of G in flocculation." *Journal of American Water Work Association*, AWWA, Vol. 84, No.10.
 Lai, R.J., Hudson, H.E., and Singley, J.E. (1975). "Velocity gradient calibration of jar-test equipment." *Journal of American*

- Water Work Association*, AWWA, Vol. 67, pp. 553-557.
- Letterman, R.D., J.E. Quon, and Gemmeli, R.S. (1973) "Influence of Rapid-Mix Parameters on Flocculation." *Journal of American Water Work Association*, AWWA, Vol. 65, pp. 716.
- McConnachie, G.L. (1991). "Turbulence intensity of mixing in relation to flocculation." *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.117, No. 6, pp. 731-750.
- Oldshue, J.Y. (1966). "Fermentation mixing scale-up techniques." *Biotechnology and bioengineering*, Vol. 8, No. 1, pp.3-24.
- Philadelphia Mixers Corporation (1988) *An engineering guide to mixing applications for water treatment plants*. Philadelphia Mixers Corporation, Palmyra, PA, U.S.A.
- Rushton, J.H., E.W. Costich, and H.J. Everett (1950a) "Power characteristics of mixing impellers Part 1." *Chemical Eng. progress*. Vol. 46, No. 8, pp. 395-404.
- Rushton, J.H., E.W. Costich, and H.J. Everett (1950b) "Power characteristics of mixing impellers Part 2." *Chemical Eng. progress*. Vol. 46, No. 9, pp. 467-476.
- 〈최종본 접수일 : 1997년 11월 19일〉