

## 스태틱 믹서 개발 및 응용

양 희 천 †

(원고접수일 : 2007년 1월 15일, 심사완료일 : 2007년 7월 18일)

### Development and Application of Static Mixer

Hei-Cheon Yang†

**Abstract** : One of the most widely used static mixers is Sulzer type mixer. However the structure of the element is so complicated that the mixing efficiency is better than others, whereas the pressure drop is larger than the others. Therefore new elements are necessary to reduce the pressure drop and to minimize the decrease of the mixing efficiency compared with the Sulzer ones. The objectives of this study are to develop new static mixer and to perform the experimental investigation in order to evaluate the performance of the new one, and to investigate the applicability of the one in an inline coagulant mixing system for water treatment. The pressure drops of the new static mixer elements were about 4-12% lower than that of the Sulzer SMX one, and the mixing efficiency of the Sulzer SMX one was about 2-5% higher than that of the new ones. The inline coagulant mixing system with a new static mixer element performed significantly better than the traditional mechanical mixing system for turbidity removal.

**Key words** : Static mixer(스태틱 믹서), Mixing element(믹싱 엘리먼트), Pressure drop(압력 손실), Mixing element(믹싱 효율), Water treatment(수처리), Turbidity removal(탁도제거)

#### 1. 서 론

스태틱 믹서는 석유화학산업의 폴리머 생산라인에서 반응물에 촉매 및 성분 강화제를 혼합하는 공정이나, 제품화되는 마지막 공정에서의 폴리머의 열적 균질화 과정 등에 필수적으로 이용되고 있다. 현재 국내의 관련 업계에서는 선진 업체에서 개발된 모델을 단순 모방하여 제작하는 실정으로, 전

세계적으로 강화되고 있는 지적 재산권 문제에 직면하여 국내의 독자적인 모델 개발에 대한 요구에 부응하고, 독창적인 기술력 확보 측면에서 스태틱 믹서에 대한 연구의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다.

스태틱 믹서는 기계적 교반기와 비교하여 운동부가 없기 때문에 샤프트나 베어링과 같은 회전요소나 밀봉장치 없이 파이프라인에 설치가 가능하

† 교신저자(전남대학교 기계·자동차공학부), E-mail : hcyang@chonnam.ac.kr, Tel : 061)659-3223

며, 연속 프로세스 및 고 점도액의 혼합에 적합하다. 또한 혼합될 유체의 믹서내 체류시간 분포를 균일화 할 수 있으며, 공정관리의 용이, 생산원가의 절감, 에너지 절약 등의 장점을 갖고 있다. 이러한 스태틱 믹서는 50년대부터 개발되기 시작하여 60년대 말 Chemineer사에서 개발된 믹서가 상업적으로 이용되기 시작한 후, 30여종 이상이 개발되었으나 산업현장에서 실제로 이용되고 있는 종류는 그다지 많지 않다<sup>(1)</sup>.

최근에 들어서 관심이 집중되고 있는 에너지원의 고갈 및 효율증대와 관련하여 스태틱 믹서의 개발 및 응용분야는 대부분 관련 공정에서 에너지의 효율적인 이용과 직결되는 것임을 알 수 있다. 특히 현재 국내외적으로 심각하게 대두되고 있는 수자원의 고갈 및 오염 문제와 관련하여 혼합 및 응집 등의 수처리 공정에서 스태틱 믹서의 이용은 정화 효율을 높일 수 있고, 투여되는 약품의 양을 줄일 수 있어서 처리 설비의 용량을 크게 줄일 수 있기 때문에 관련 시설의 건설 및 운영 측면에서 경제적인 효과가 큰 것으로 알려지고 있다<sup>(2)</sup>. 그러나 스태틱 믹서를 이용한 수처리 공정에서의 혼합 및 응집 등과 관련된 연구는 아직까지 미흡한 실정이다<sup>(3)-(5)</sup>.

한편 스태틱 믹서의 엘리먼트를 열교환기의 튜브 내에 장착시킨 리액터용 셀-튜브 열교환기에서는 튜브 내 벽면 부근의 열전달율이 큰 유체와 튜브 중심부의 열전달율이 작은 유체가 엘리먼트로 인하여 신속히 교반 혼합됨으로써 튜브의 벽면에서 열교환이 보다 더 효율적으로 이루어지게 된다. 또한 유체의 튜브 횡단면 방향으로의 온도 구배를 줄일 수 있기 때문에 폴리머 생산라인의 최종 제품화 공정에 필수적인 설비로 인식되고 있다. 그러나 폴리머 생산 공정의 열교환기 튜브 내에 삽입되는 엘리먼트의 설계 형상과 반응물과 촉매 및 첨가제의 혼합공정에 이용되는 교반설비의 엘리먼트 설계 형상은 동일하지 않다.

이와 같이 스태틱 믹서를 이용하는 모든 응용분야의 엘리먼트의 설계조건은 매우 다양하다. 특히 스태틱 믹서의 혼합 매커니즘은 엘리먼트의 설계조건에 따른 분할 면의 수와 분할된 유로의 형상에 의해 지배되기 때문에 적용분야 및 혼합될 유체의 성질에 따라 최적의 설계조건을 갖는 엘리먼트의

개발이 필요하다.

본 논문에서는 새로운 설계조건인 스태틱 믹서 엘리먼트를 개발하고 성능특성에 대한 실험적 연구, 수처리 공정에 대한 적용 타당성 검증을 위한 연구를 수행하였다. 따라서 본 연구의 결과는 수처리 공정의 인라인 응집제 혼화시스템의 최적 설계에 필요한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 스태틱 믹서 엘리먼트

Fig. 1은 단일 엘리먼트 4개로 구성된 Sulzer SMX 믹서를 나타낸다. Sulzer SMX형 엘리먼트의 구성요소는 유체의 유동방향에 대하여 각을 이루며 서로 교차하는 장방형의 바로 구성된다. Sulzer SMX형의 단일 엘리먼트는 소정의 폭과 두께를 갖는 소재를 길이가 다른 다수의 바로 절단하고 일정한 각도로 교차시켜 접촉하는 지점을 모두 용접하여야만 한다. 따라서 일반적인 용접작업이 가능하기 위해서는 소재의 폭과 두께가 일정 크기 이상이어야 한다. 한편 Sulzer SMX형은 분할면의 수가  $2^n$ (n은 단일 엘리먼트 수)개인 Kenics형<sup>(1)</sup>과는 달리 분할면의 수가  $32^n$ 개로 분할면의 수가 상대적으로 많아서 믹싱 효율은 좋지만 믹서 출구에서의 압력손실이 커지게 된다. 또한 상대적으로 복잡한 엘리먼트 형상의 Sulzer SMX형 믹서가 장착된 폴리머 생산라인의 돌발적인 상황에 따른 운전정지 시에 생산 공정의 반응에 필요한 열공급의 중단으로 폴리머가 응고될 때, 또는 수처리 설비에서 고형 물질과 같은 불순물로 인한 폐색 시에 클리닝 문제가 단점으로 지적되고 있다.

Fig. 2는 본 연구를 통해서 Sulzer SMX형을 변형하여 고안한 YHC-04형과 YHC-05형 엘리먼트의 실물사진을 나타낸다. YHC-04형과 YHC-05형은 Sulzer SMX형에 비해서 혼합율의 감소는 최소화하고 압력손실을 줄이기 위해 고안한 모델들이다. YHC-04형은 서로 교차하는 장방형의 바에 홀을 갖는 것을 제외하고는 구조 및 제작과정이 Sulzer SMX형과 동일하며, 장방형의 바에 가공

된 홀의 면적만큼 혼합되는 유체의 유로를 확장시킬 수 있는 구조이다.

Fig. 3은 YHC-05형의 기본적인 설계형상을 나타낸다. YHC-05형은 제작과정에서 용접부를 최소화한 모델이다. Fig. 3(a)는 소정의 두께를 갖는 소재를 타원형 판으로 절단한 후 각각 장축 방향으로 일정한 폭을 갖는 홈을 엇갈리게 가공한 설계도를 나타낸다. 엇갈린 위치에 홈을 갖는 각각의 타원형판을 단축의 중심부를 기준으로 90도 절곡한 후 각각을 끼워 맞추어 단일 엘리먼트의 1/2을 제작하고, 이와 같이 제작된 것 두 개를 조합한 단일 엘리먼트의 정면도를 Fig. 3(b)에 도시하였다. 개발된 YHC-05형 엘리먼트는 각각의 바들을 용접하는 Sulzer SMX형과는 달리 끼워 맞춤 구조로 제작되기 때문에 용접부를 최소화 할 수 있다. 따라서 용접작업과 관련된 시간 및 비용측면의 비경제성을 개선할 수 있으며, 수 처리공정에서 장시간 이용될 때 용접부의 부식으로 인한 설비의 내구성 감소를 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.



Fig. 1 4-element Sulzer SMX mixer

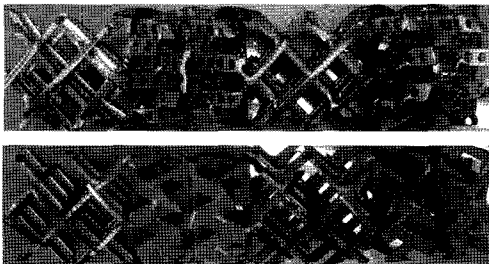


Fig. 2 4-element YHC-04 and YHC-05 mixer

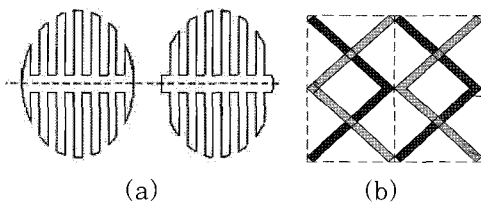


Fig. 3 Two elliptic plates with grooves and design structure of single YHC-05 element

스테인레스 스틸로 제작된 3 종류의 단일 엘리먼트 직경은 40mm이고 직경/길이의 중형비는 1:1이며, 장방형 바의 두께는 2mm이다.

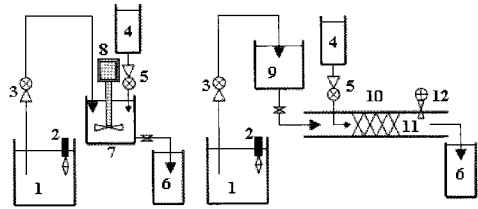
2.2 실험장치 및 방법

Fig. 4와 Fig. 5는 선행연구<sup>(6)-(8)</sup>에서 제작한 압력손실을 측정하기 위한 스테틱 믹서시스템과 혼합특성 실험장치의 개략도를 나타낸다. Fig. 4의 압력손실 측정시스템은 믹싱부, 동력 공급부, 믹싱 유체 저장부 그리고 측정부로 구성된다. 믹싱부의 튜브는 내경40mm, 길이700mm의 투명 아크릴관으로 제작하여 믹싱 과정을 가시화 할 수 있다. 동력 공급부는 기어펌프, 3상 유도전동기 그리고 인버터 시스템으로 구성하였다. 압력 손실량은 믹싱 튜브에 일정한 간격으로 가공된 압력 탭에 압력 트랜듀서를 장착하여 측정하게 된다. 유량은 전동기에 연결된 인버터로 전동기의 회전수를 변화시켜 조절한다.

Fig. 5의 혼합특성 실험장치는 엘리먼트를 장착한 가시화용 믹싱 튜브, 추적색소 주입기 그리고 일정한 압력으로 가압할 수 있도록 설계된 피스톤부로 구성된다. 추적색소 주입기의 길이는 약 500mm이다. 개념도에서 보는 바와 같이 추적색소는 주입기의 중심부에 있는 직경 10mm의 동심원 튜브를 통해서 엘리먼트 내로 유입되도록 설계하였다. 혼합특성 실험은 추적색소 주입기의 내부 튜브에 녹색의 헤어 스타일링 젤과 붉은색 물감을 체적비 10:1로 혼합한 추적색소를 주입한 후, 주입기의 나머지 부분에 녹색의 헤어 스타일링 젤을 주입하고 피스톤으로 가압하여 혼합 튜브의 출구 단면에서의 혼합 상태를 디지털 카메라를 이용하여 촬영하는 과정으로 이루어진다. 디지털 카메라로 획득한 출구단면의 혼합 상태의 정량화는 이미지 분석 시스템<sup>(9)</sup>을 이용하였다.

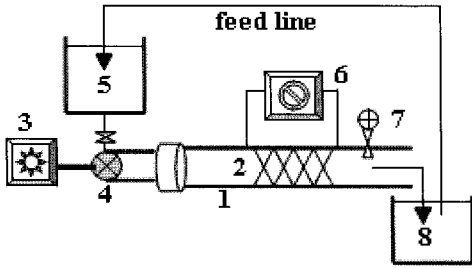
Fig. 6은 기계식 및 인라인 응집제 혼화시스템의 개략도를 나타낸다. 두 시스템 동일하게 1000리터 용량의 처리원수 저장용기에는 pH 센서를 설치하였으며, 5리터 용량의 응집제 저장용기에는 정량펌프 시스템이 연결되어 응집제 주입량을 일정하

게 조절할 수 있도록 구성하였다. 기계식의 완전 혼합용기에는 모터로 구동되는 120rpm×0.4kw 사양의 3엽 프로펠러 임펠러를 장착하여 혼합에너지를 제공하게 된다. 3엽 프로펠러 임펠러의 직경은 0.3m이다. 인라인 혼합시스템에서는 수위 조절 센서가 부착된 200리터 용량의 일정 수위 저장용기의 밸브에 의해 혼합부로 유입되는 유량을 조절한다. 인라인 혼합시스템의 혼합튜브는 내경 100mm, 길이 1200mm의 투명 아크릴 관으로 제작하여 혼합 과정을 가시화 할 수 있도록 하였으며, 아크릴 관 입구로부터 210mm 하류 지점에 4개의 YHC-05형 엘리먼트의 선단이 위치하고, 엘리먼트 선단 위쪽 30mm 지점에 응집제 주입노즐이 위치하는 구조이다.



- 1. Source water tank    2. pH meter
- 3. Centrifugal pump    4. Coagulant tank
- 5. Constant delivery pump
- 6. Sedimentation tank
- 7. Completely mixed tank
- 8. Impeller system
- 9. Constant level tank    10. Mixing tube
- 11. Mixing element    12. Flowmeter

Fig. 6 Schematic diagram of mechanical and inline coagulant mixing system



- 1. Mixing tube    2. Mixing element
- 3. Electric motor    4. Gear pump
- 5. Fluid tank    6. Pressure transducer
- 7. Flowmeter    8. Reservoir tank

Fig. 4 Schematic diagram of pressure drop measuring system

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압력손실 및 혼합율

스태틱 믹서의 압력손실은 엘리먼트의 기하학적 형상에 따라 크게 변하게 된다. 그러나 참고문헌 [10]-[12]의 결과들에는 동일한 종류의 엘리먼트인 경우에도 상당한 편차가 존재한다. 이는 제작방법에 따른 엘리먼트의 미세한 기하학적 형상의 차이, 측정위치의 차이 그리고 상관관계식을 유도하는 방법의 차이 등에 기인 하는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 측정된 손실 수두를 이용하여 압력 손실량을 정량화하여 나타내었다. 압력손실 측정실험에 이용된 측정용 유체는 글리세린(95% 순도)이며, 글리세린의 밀도와 점도는  $1250 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.62 \text{ p a} \cdot \text{s}$ 이다. 측정된 변수는 손실 수두, 체적유량, 밀도 그리고 점도 등이다.

Fig. 7은 각각 엘리먼트 수에 따른 Sulzer SMX, YHC-04 그리고 YHC-05형 믹서의 압력손실을 나타내며, Fig. 8은 엘리먼트 형상에 따른 평균 압력손실을 비교한 그래프이다. Re수가 증가하거나 엘리먼트 수가 많아지면 압력손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 엘리먼트수가 증가하여 유로 내의 구조물이 많아질수록 동일한 유량을 유지하기 위해서는 압력손실이 커지기 때문이다. 즉,

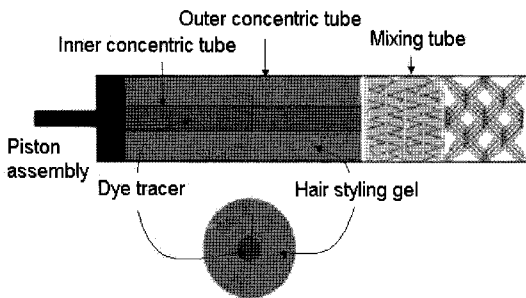


Fig. 5 Schematic diagram of mixing efficiency measuring system

유로가 좁아지거나 엘리먼트가 점유하는 유로 단면적의 비가 커지게 되면 압력손실은 증가하게 된다. 3가지 믹서 모두 엘리먼트 수가 2개일 때에 비해서 엘리먼트 수가 8개로 증가하면 압력손실은 약 3배 정도 증가하였다. 또한 평균적으로 Sulzer SMX형에 비해서 YHC-04형은 약 12%, YHC-05형은 약 4% 정도 압력손실이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 YHC-04형의 경우, 엘리먼트를 구성하는 장방형의 바에 가공된 홀 면적에 상응하는 유로 단면적의 증가에 기인하며, YHC-05형에서는 용접을 최소화 한 구조로 Sulzer SMX형에 비해서 용접부의 마찰로 인한 부차적 손실이 작아지기 때문인 것으로 사료된다.

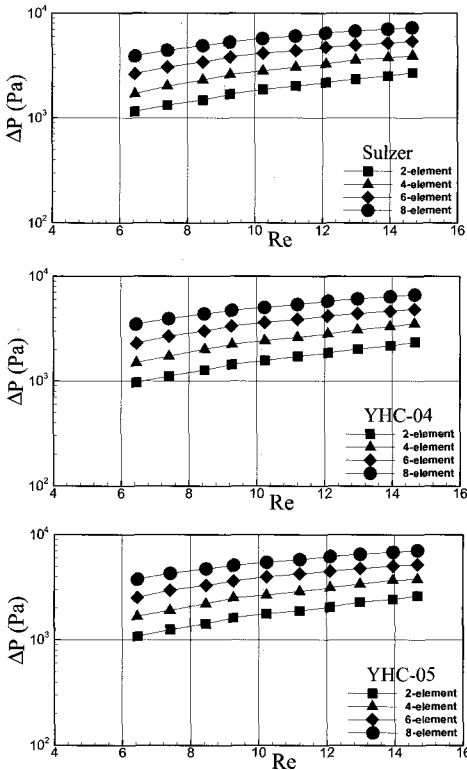


Fig. 7 Pressure drop of Sulzer SMX, YHC-04 and YHC-05 mixer for element number with Re.

스태틱 믹서의 혼합율은 다양한 방법으로 평가되는데, 본 연구에서는 디지털 이미지 분석기술을 이용하여 추적 색소의 색상농도를 정량화하는 방법을 이용하였다<sup>(9)</sup>. Fig. 9는 이미지 분석시스템을 이

용하여 정량화한 붉은 추적색소의 면적농도를 엘리먼트 수의 함수로 나타낸 그래프이다. 본 연구의 조건에서는 3가지 엘리먼트 모두 단일 엘리먼트를 통과 한 후의 붉은색 추적색소의 면적농도가 60% 정도 인 것을 알 수 있다. 평균적으로 Sulzer SMX형의 혼합율이 YHC-04형에 비해서는 약 5%, YHC-05형에 비해서는 약 2% 정도 높게 나타났다. SMX형 엘리먼트의 혼합 메커니즘은 유동의 분할(splitting) 및 연신(stretching), 결합(combining), 재분할(re-splitting)의 복합적인 작용으로 구성된다. 그러나 YHC-04형의 경우에는 연신 없이 장방형의 바에 가공된 홀을 통과하는 유체로 인하여 유동의 난류효과가 약하고, YHC-05형의 경우에는 Sulzer SMX형에 비해 용접부가 최소화되었기 때문에 용접부로 인한 유동의 난류효과가 약해서 Sulzer SMX형에 비해서 혼합율이 감소하는 것으로 사료된다.

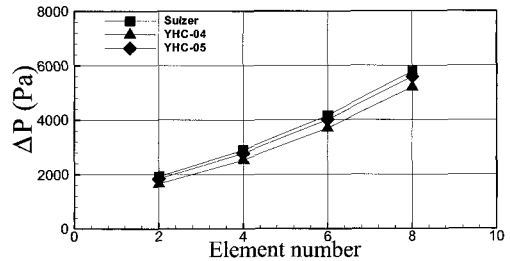


Fig. 8 Comparison of average pressure drop for static mixer type with element No.

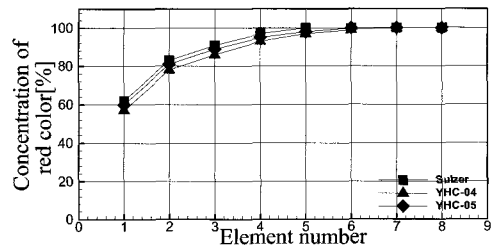


Fig. 9 Concentration of red color of Sulzer SMX, YHC-04 and YHC-05 mixer with element No.

3.2 탁도 및 응집특성

수처리 적용 실험에서는 터널공사 현장의 폐수 슬러지를 수거하여 평균적으로 pH 8.5, 탁도

1000NTU 정도의 폐수 원수를 만들어서 실험을 수행하였다. 10℃의 조건에서 처리원수의 밀도와 점도는 각각 1005.9 kg/m<sup>3</sup>, 0.894×10<sup>-3</sup> pa·s이다. 실험 변수는 응집제인 PAC(poly aluminum chloride)의 주입량과 처리원수의 유량변화로 설정하였다.

응집제가 처리수중에 효과적으로 혼화되는지의 여부는 처리수내에 발생하는 혼화강도에 따라 달라진다. 기계식 응집제 혼화시스템의 혼화강도는 다음과 같은 속도경사(velocity gradient) G(s<sup>-1</sup>)에 의해 나타낸다<sup>[3]</sup>.

$$G = \sqrt{\frac{p}{\mu V}} \quad (1)$$

$$p = k_T N^3 D^5 \rho \quad (2)$$

여기서 p는 처리수에 주어지는 혼화에너지(N·m/s), V는 혼화용기의 처리수 체적(m<sup>3</sup>), k<sub>T</sub>는 임펠러 상수(0.32~1.0), N는 임펠러 회전수(rps), D는 임펠러 직경(m)을 나타낸다. 기계식 응집제 혼화시스템에 대한 설계기준은 혼화강도 G=300~1000s<sup>-1</sup>, 교반시간 10~60초로 제시되는데, 일반적으로 G=300~400s<sup>-1</sup>과 교반시간 30초 이상의 값을 설계 혼화강도로 설정하고 있다. 본 연구에서 인라인 혼화시스템의 실험결과와의 비교를 위한 기계식 혼화시스템의 임펠러 회전속도는 120rpm으로 설정하였으며, 3엽 프로펠러 임펠러의 직경은 0.3m이다. 따라서 10℃인 처리원수의 물 성치와 유량 0.18m<sup>3</sup> 조건에서 식 (1)과 (2)를 이용하여 속도경사를 계산하면 347s<sup>-1</sup>이므로 본 연구의 실험조건이 일반적인 설계 혼화강도의 범위에 포함되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 기계식 교반기의 속도경사 G=347s<sup>-1</sup>의 조건에서 응집제인 PAC를 각각 65mL/L, 83mL/L 주입하여 3초 동안 교반하고, 샘플링 한 후의 경과시간에 따른 탁도 변화를 인라인의 경우와 비교한 것이다. 인라인 방식의 실험조건은 Re=25,560으로 1200mm의 혼화튜브를 통과하는 시간이 약 3초 정도이므로 기계식의 교반시간을 3초로 설정하였으며, 응집제 주입량65mL/L와

83mL/L는 인라인 방식의 Re=25,560의 조건에서 두 가지 경우의 응집제 주입량을 기계식의 처리원수 체적 0.18m<sup>3</sup>을 고려하여 환산한 주입량이다. 경과시간 1분 후의 탁도를 비교하면 주입량 65mL/L인 경우의 기계식은 약 54% 정도, 인라인 방식은 약 90.5% 정도 탁도가 감소하며, 주입량 83mL/L인 경우의 기계식은 약 58% 정도, 인라인 방식은 약 90.7% 정도 탁도가 감소하는 것을 알 수 있다. 경과시간 5분 동안의 평균 탁도 제거율을 비교하면 주입량 65mL/L인 경우 약 5.4배 정도, 주입량 83mL/L인 경우 약 4.6배 정도 인라인 방식의 탁도 제거율이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 모터로 구동되는 임펠러의 회전력에 의해 혼화에너지를 제공하는 기계식 혼화시스템에서는 순간혼화가 곤란하고, 응집제와 처리수가 전혀 접촉하지 못하는 영역이 존재하기 때문에 일반적으로 응집제를 30~40% 정도 과잉으로 주입하게 되어 응집제 비용증가 및 슬러지 발생량 증가라는 또 다른 문제를 야기하는 것으로 알려지고 있다<sup>[3]</sup>. 따라서 인라인 방식에 비해서 기계식의 탁도 제거율이 낮은 원인은 응집제 주입량 부족과 최소한 30초 이상이 요구되는 교반시간이 짧은 것이 기인하는 것으로 사료된다.

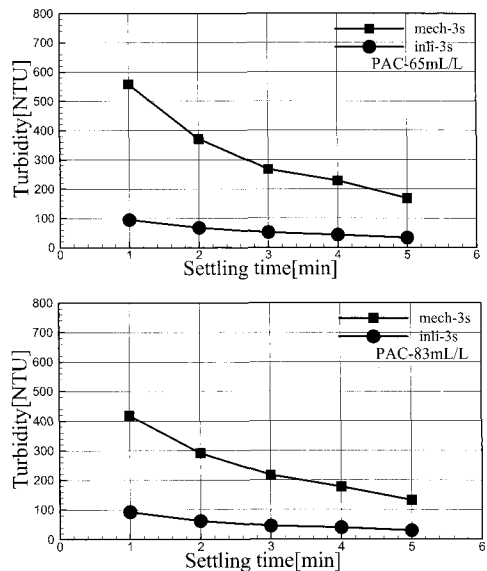


Fig. 10 Turbidity of mechanical and inline coagulant mixing system with settling time

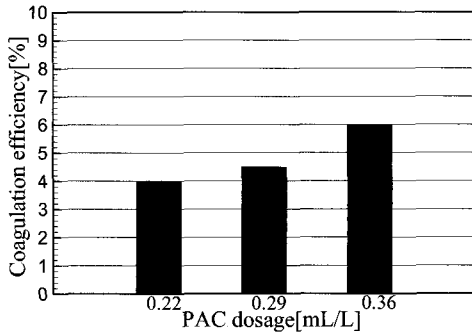


Fig. 11 Coagulation efficiency with three different PAC dosage

Fig. 11은 인라인 응집제 혼화시스템을 이용하여  $Re=32,650$ 의 조건에서 응집제인 PAC 원액의 주입량을  $0.22\text{mL/L}$ ,  $0.29\text{mL/L}$ ,  $0.36\text{mL/L}$ 로 변화시켰을 때의 응집율을 나타낸다. 시스템 출구의 처리수를  $1000\text{ml}$ 의 메스실린더에 샘플링하여 5분경과 후의 응집율을 비교한 결과 응집제를  $0.36\text{mL/L}$  주입한 경우에 약 6%의 응집율로 가장 높게 나타났으며, 응집제를  $0.29\text{mL/L}$  주입한 경우 약 4.5%, 응집제를  $0.22\text{mL/L}$  주입한 경우에는 약 4% 정도의 응집율을 나타내었다.

본 연구의 실험조건에서는 기계식에 비해 인라인 방식의 탁도 제거율이 평균적으로 약 5배 정도 높게 나타났다. 따라서 본 연구결과를 바탕으로 에너지 이용효율 향상 및 수처리 비용의 절감이 가능한 인라인 응집제 혼화시스템의 최적설계를 위해서는 수처리 공정에서 고려하고 있는 다양한 설계 및 운전변수에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

새로운 형상의 스테틱 믹서 엘리먼트를 개발하고 성능평가를 위한 실험적 연구와 수처리 공정에 대한 적용성 검증을 위한 연구결과는 다음과 같다.

1. Sulzer SMX형에 비해 압력손실을 줄이기 위해 장방형의 바에 홀이 가공된 구조의 YHC-04형과 용접부를 최소화한 끼워 맞춤 구조의 YHC-05형 엘리먼트를 개발하였다.

2. 평균적으로 Sulzer SMX형에 비해서 YHC-04형과 YHC-05형의 압력손실이 약 12%와 4% 정도 낮게 나타났으며, Sulzer SMX형의 혼합율은 YHC-04형과 YHC-05형에 비해서 약 5%와

2% 정도 높게 나타났다.

3. 응집제와 처리원수를 혼화하고 5분 경과후의 탁도 제거율은 기계식에 비해 인라인 방식이 평균적으로 약 5배 정도 높게 나타났으며, 인라인 방식의 응집율은 약 4~6% 정도임을 알 수 있다.

4. 수처리 공정에서 고려하고 있는 다양한 설계 및 운전변수에 대한 체계적인 연구를 통해 에너지 이용효율 향상 및 수처리 비용의 절감이 기대되는 인라인 응집제 혼화시스템의 최적설계가 가능할 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2003-000-11211-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] J. Sir and Z. Lecjaks, "Pressure Drop and Homogenization Efficiency of a Motionless Mixer," Chem. Eng. Commun., Vol. 16, pp. 325~334, 1982.
- [2] S. S. Jones, "Static Mixers for Water Treatment-A Computational Fluid Dynamics Model," Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology, 1999.
- [3] S. Kawamura, Integrated Design of Water Treatment Facilities, Wiley, New York, 1991.
- [4] R. J. Latimer and A. Amirtharajah, "Pilot Scale Comparison of Static Mixers and Backmixing Reactors for Water Treatment," Proc. of 1998 Annual Conference, American Water Works Association, pp. 705~740, 1998.
- [5] J. C. Burke, "Effectiveness of Static

- Mixers for Enhanced Coagulation," Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlant, 1996.
- [6] H. C. Yang and S. K. Park, "Pressure Drop in Motionless Mixers," *KSME Int. J.*, Vol. 18, No. 3, pp. 526~532, 2004.
- [7] H. C. Yang, S. K. Park and S. W. Oh, "Mixing Characteristics of Static Mixers," *Proc. of the KSME 2003 Spring Annual Meeting*, pp. 1955~1960, 2003.
- [8] H. C. Yang, S. K. Park, Y. S. Eom and B. Y. Ra, "A Study of Flow and Mixing in a Static Mixer," *Proc. of the KSME 2001 Fall Annual Meeting B*, pp. 557~562, 2001.
- [9] OPTIMAS User Guide, Media Cybernetics, 1999.
- [10] D. M. Hobbs, "Characterization of a Kenics Static Mixer Under Larminar Flow Condition," Ph. D Thesis, The State University of Newjersy, 1997.
- [11] A. Cybulski and K. Werner, "Static Mixers Criteria for Applications and Selection," *Int. Chem. Eng.*, Vol. 26, pp. 171~180, 1986.
- [12] D. Rauline, P. A. Tanguy, J. L. Belyec and J. Bousquet, "Numerical Investigation of the Performance of Several Static Mixers," *The Canadian J. of Chem. Eng.*, Vol. 76, pp. 527~535, 1998.

**저 자 소 개**

**양희천(楊熙千)**

1961년 2월 생, 1994년 중앙대학교 대학원, 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 전남대학교(여수), 기계자동차공학부 부교수

