

오버헤드 교반기에서 자동 점도 측정을 위한 교반 공정 조건의 영향 분석

Analysis of Effect of Stirring Process Conditions on Liquid Viscosity in an Overhead Stirrer

이호철¹, 김기대^{1,#}
Ho Cheol Lee¹ and Gi Dae Kim^{1,#}

¹ 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Catholic University)
Corresponding Author / E-mail: gidkim@cu.ac.kr, TEL: +82-53-850-2724
ORCID: 0000-0001-6454-542X

KEYWORDS: Viscosity-measurable overhead stirrer (점도 측정 가능 오버헤드 교반기), Liquid viscosity (액체 점도),
Stirring process condition (교반 공정 조건), Stirring torque (교반 토크), Stirring speed (교반 속도)

To monitor the stirring state by on-line estimation of liquid viscosity instead of stopping the stirring process and measuring the viscosity using viscometer, a basic study clarifying the effect of stirring conditions was carried out. For this purpose, the relationship between liquid viscosity and the stirring conditions, such as stirring torque, stirring speed, the duty ratio of PWM, impeller and beaker type, and the blade position in the beaker was analyzed. The second-order relationship between the stirring speed and torque, the linear relationship between viscosity and torque, and the linear relationship between duty ratio of PWM and stirring speed were observed, thereby indicating that the liquid viscosity could be estimated by an experimental formula based on the duty ratio and the stirring speed. In addition, the type of impeller and beaker was identified using the magnetic field inside impeller and RFID technology. For reducing the error in calculating the liquid viscosity, the employment of an impeller blade with a large rotational resistance and stirring with the blade at the center zone of the beaker were found to be necessary.

Manuscript received: March 13, 2020 / Revised: June 4, 2020 / Accepted: July 20, 2020

1. 서론

교반기(Stirrer)는 점도가 다른 두 가지 이상의 액상 혼합물을 신속하고 균일하게 혼합시켜주는 장비를 말한다. 초음파 발진자나 막대자석 교반자(stirring bar) 등 여러 가지 구조를 가진 기기가 있지만 특별히 고점도의 액체 물질을 혼합하기 위해서는 일반적으로 Fig. 1과 같이 다양한 형태의 블레이드를 가진 임펠러를 회전시켜 용액을 혼합하는 오버헤드형 교반기를 이용한다.^{1,2}

오버헤드형 교반기 작업 중에는 혼합 용액의 점도가 점차 변화하고, 궁극적으로 원하는 점도에 도달했는지 확인해야 하는 경우가 있다. 이를 위해 현재 장비로 사용자가 선택할 수 있는 유일한 방법은 교반 과정 중에 교반기를 잠시 멈추고 액체의

일부를 채취하여 전용 점도계를 이용하여 점도를 측정³한 후 원하는 점도에 도달하지 않은 경우 교반을 계속 진행하는 것이다. 그러나 이와 같은 작업은 매우 번거로울 뿐 아니라 점도를 측정하는 동안 소량으로 채취한 시험용 액체의 물리적, 화학적 상태가 혼합 중인 용액과 달라질 수도 있다.

이처럼 교반 공정에서 혼합 중인 액체의 점도를 효율적으로 측정할 필요성이 있었지만 최근까지 그 어떤 국외 선진 기업도 자동 점도 측정 기능을 갖춘 교반기를 구현하지는 못하였다. 그러다가 2018년에 이르러서야 독일의 실험장비 전문 제작 기업인 IKA가 고가의 토크 센서를 장착하고 혼합 용액의 점도를 측정할 수 있는 기능을 갖춘 교반기를 출시하였다.⁴ 하지만 장비의 가격이 국내 생산 교반기 가격의 최소 10배 이상으로 책정되어 있어

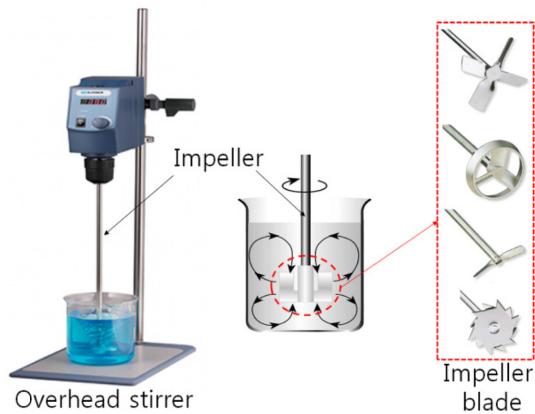


Fig. 1 Overhead stirrer, impeller and blade

일반 중소기업이나 연구소에서는 쉽게 도입할 수 없는 실정이다.

이에 본 연구진은 별도의 점도 측정 장치나 고가의 토크 센서를 사용하지 않고도 교반 작업 중의 공정 조건(변수)만으로 혼합 용액의 점도를 실시간으로 추정할 수 있는 장치를 개발하는 것을 최종 목표로 두고 연구를 진행하고 있다.^{5,6} 본 논문에서는 오버헤드형 교반기에서 회전속도, 모터 토크, PWM (Pulse Width Modulation) 듀티비 등 교반 작업 중의 공정 변수와 액체의 점도와의 관계를 실험적으로 파악하고 기타 액체 용기와 임펠러 및 블레이드의 형상, 블레이드의 위치 등의 공정 변수가 점도 측정에 어떤 영향을 미치는지에 관한 연구를 수행하였다.

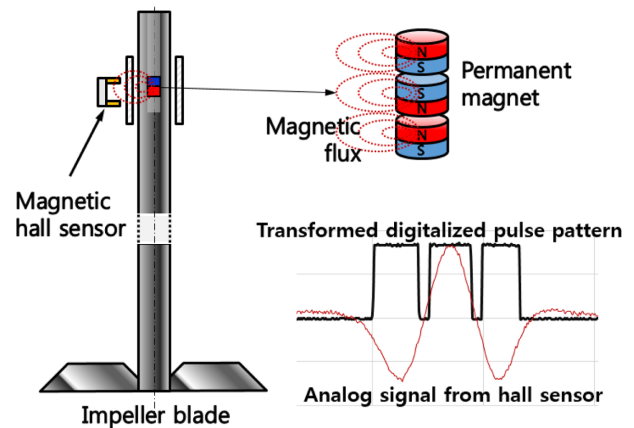
2. 연구의 내용 및 선행연구 결과

2.1 혼합용액 점도와 교반 공정변수 간의 관계 도출

교반기에서 액체를 혼합할 때 혼합물의 점도가 높아지면 항력(Drag Force)이 증가하여 임펠러를 회전시키기 위한 모터 토크가 증가하게 된다.^{7,8} 또한 점도가 같은 용액이라 할지라도 임펠러 회전속도가 높을수록 그리고 임펠러 블레이드 형상의 회전 저항이 클수록 모터에 가해지는 부하 토크의 크기도 증가하며, 이밖에 혼합 액체를 담아내는 용기(비커)의 형상 등에 따라 모터 토크의 크기는 변한다.

따라서 임펠러 회전에 필요한 모터 토크는 혼합물의 점도, 임펠러의 회전속도, 그리고 임펠러의 종류(형상) 및 용기 형상의 함수라고 할 수 있으며, 액체를 혼합할 때 용기 내에서의 임펠러 블레이드의 위치에 따라서도 모터 토크는 변화한다. 그러므로 교반 공정 중 공정 조건만으로 액체 혼합물의 점도를 자동적으로 계산하기 위해서는 임펠러에 걸리는 모터 토크 크기와 회전속도를 측정해야 하고 임펠러의 종류 및 비커의 종류를 알아야 하고 용기 내 임펠러의 위치 등의 변수를 모두 고려해야 한다는 것을 알 수 있다.

그러나 교반 공정은 매우 심한 난류 유동을 일으키기 때문에 이렇게 많은 변수들을 모두 고려하여 이론적으로 모델링하고

Fig. 2 Schematic process of previous study for discriminating impeller through transforming analog magnetic field signal to digitalized pulse pattern⁶

이들 간의 관계식을 도출한다는 것은 사실상 불가능하기 때문에 오직 실험식을 통해서 구할 수밖에 없다. 이것은 결국 점도가 다른 용액 별로 임펠러와 용기의 종류 등을 모두 달리하면서 회전속도와 모터 토크를 측정하고 이 모든 변수의 변화로부터 액체의 점도를 구해야 하는 방대한 실험이 요구된다는 것을 의미하는데 이 또한 쉬운 일이 아니다.

본 연구에서는 교반기 작업 중 혼합 용액의 점도를 모터 토크의 크기(듀티비)와 교반기 회전속도로 예측할 수 있도록 용액의 점도와 모터 토크, 회전속도, PWM 듀티비 간의 관계를 파악하였다. 또한 나머지 공정 조건(변수)들의 영향을 최소로 줄이기 위해 교반 작업이 시작되기 전 임펠러와 용기의 종류를 식별할 수 있는 기술을 개발하였고, 교반 시간에 따른 혼합 용액의 온도 변화 및 토크 변화를 확인하고 용기 내 임펠러의 위치가 토크 및 혼합 용액의 점도에 어떤 영향을 미치는지에 대해서 살펴해보았다. 이러한 과정을 통해 모터 듀티비와 회전속도만으로 혼합 용액의 점도를 계산(추정)할 수 있는 실험식을 구할 수 있는 토대를 마련하였다.

2.2 선행연구의 결과(임펠러 종류 자동 인식)

임펠러(블레이드 포함)의 종류가 바뀌면 혼합 액체의 회전 저항이 변하여 토크가 달라지고 따라서 점도 측정에 큰 영향을 끼친다. 이에 본 연구진은 선행연구를 통해 교반 공정 전에 교반기에 장착되는 임펠러의 종류를 자동으로 식별하는 연구를 수행하였다.^{5,6} Fig. 2에 개략적으로 선행연구 개발 내용을 보여주고 있으며, 임펠러 축 내부에 축 방향으로 구멍을 가공하고 그 속에 임펠러 종류에 따라 원통형 영구자석의 개수를 바꾸어가며 NS-SN 배열로 삽입한 후 임펠러가 교반기에 장착(삽입)될 때 발생하는 자기장의 변화를 홀 센서로 측정하였다.⁵ 또 이렇게 측정된 아날로그 자기장 신호를 디지털 펄스 패턴으로 바꾼 후 발생된 펄스 개수를 헤아려서 장착된 임펠러 종류를 자동적으로 식별할 수 있었다.⁶

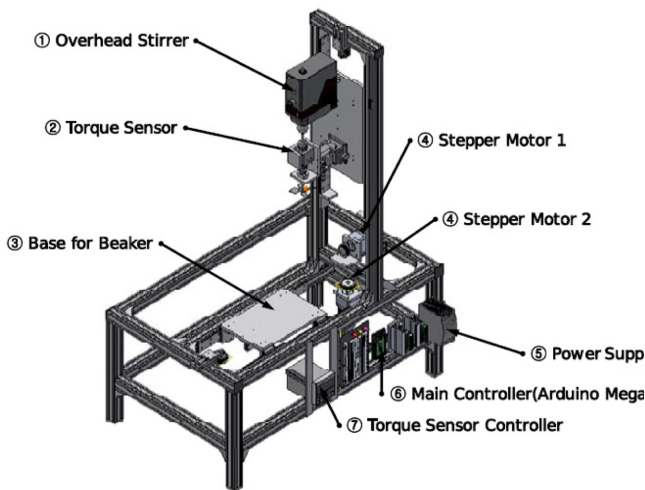


Fig. 3 Experimental setup

3. 실험 장치의 구성 및 실험 방법

3.1 실험 장치의 구성

교반 공정 중에 혼합 용액의 점도를 실시간으로 추정할 수 있는 실험식을 도출하기 위하여 여러 공정 조건(변수)들을 변화시켜가면서 각 변수들 간의 관계를 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 임펠러와 용기(비커)의 종류를 변경시켜가면서 각각 점도-토크-회전속도-PWM 간의 관계를 구하기 위해서 Fig. 3에 보이는 장치를 제작하였으며 이에 대한 구체적인 설명은 다음과 같다.

(1) Overhead Stirrer: 교반기의 장착과 탈착이 이루어진다.

(2) Torque Sensor: 최종 개발 제품인 교반기에는 포함되지 않지만, 다른 공정변수들이 토크에 미치는 영향을 구하고 또한 궁극적으로 실험식으로 계산한 모터 토크의 정확도를 검증하기 위하여 기존의 토크 센서(UTMII-10 Nm, Unipulse사)를 사용하였다.

(3) Base for Beaker: 용기가 올라가는 바닥면으로 스텝모터로 임펠러의 상하 위치를 제어하며, 용기를 식별하기 위한 RFID용 수신기 모듈이 장착된다.

(4) Stepper Motor 1, 2: 용기의 좌우 및 상하 위치를 제어한다.

(5) Power Supply: 스텝 모터 드라이버, 토크 센서 및 제어기에 전력을 공급한다.

(6) Main Controller: 주 제어기로 전체 실험 시스템을 제어하며, 아두이노 메가(Arduino Mega) 보드를 이용하였다.

(7) Torque Sensor Controller: 토크 센서값을 읽어오고 직렬 통신을 통해서 주 제어기에 토크 및 회전속도 값을 전달하는 역할을 수행한다.

3.2 실험 방법

교반기에 특정한 임펠러를 장착하고 점도값을 알고 있는 표준 점도액(Brookfield)을 용기에 담은 후 교반기의 회전속도를

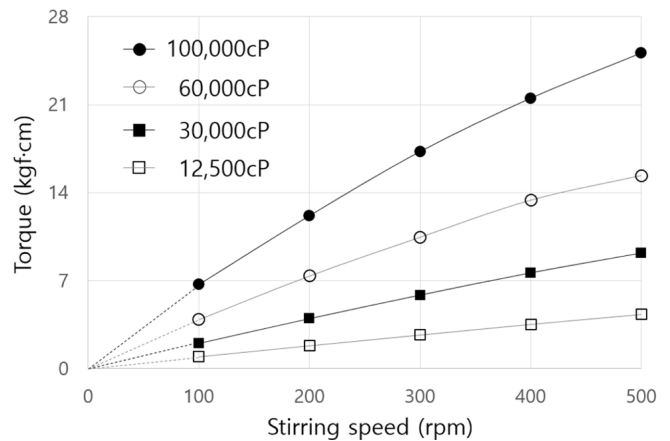


Fig. 4 Relationship among stirring speed, torque, and liquid viscosity

점차 증가시켜가면서 회전속도에 따른 모터 토크 크기의 변화를 관찰하였다. 이러한 과정을 점도값이 다른 몇 개의 표준 점도액에 대해서 반복하여 실시하고 모터 토크와 회전속도 및 용액의 점도와의 관계를 파악하였다. 이 실험을 각각 다른 용기 및 다른 임펠러에 대해서도 반복하여 수행하였다.

같은 점도를 가진 용액을 같은 임펠러를 사용하여 같은 속도로 교반을 한다고 하더라도 혼합 액체를 담는 용기가 달라지면 측정되는 모터 토크가 달라지므로 RFID 기술을 이용하여 용기를 자동적으로 오차 없이 식별하였다.

다른 모든 공정 변수가 고정되어 있을 때 교반 공정 시간, 즉 용액 내 임펠러 축이 회전하는 시간이 지나감에 따라 용액의 온도가 어떻게 변화하고 이에 따라 모터 토크의 크기가 어떻게 변화하는지 관찰하였다.

다른 교반 공정 변수가 동일한 조건에서 용기 내 임펠러의 상하 위치에 따른 용액의 혼합 효율과 모터 토크의 크기 변화를 관찰하고 혼합 용액의 점도를 추정할 때 오차를 최소화 할 수 있는 임펠러 위치를 확인하였다.

4. 실험 결과 및 해석

4.1 회전속도, 토크 및 점도의 변화

회전속도와 용액의 점도, 그리고 모터 토크, 세 가지 주요 공정 조건을 변수로 두고 이들을 변화시켜가면서 서로 간의 관계를 살펴보았다. 이들 사이의 관계를 알면 궁극적으로 회전속도와 모터 토크값으로부터 점도를 추정(계산)할 수 있는 실험식을 얻을 수 있게 된다. Fig. 4는 점도가 다른 네 가지 표준 용액에 대해서 회전속도를 100에서 500 rpm까지 증가시켜가면서 토크 센서로 측정한 모터 토크의 크기 변화를 보여주고 있다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 용액의 점도가 낮을 경우에는 토크의 크기는 회전속도에 거의 비례하여 증가하였으나, 용액의

점도가 점차 증가할수록 회전속도 증가에 따른 토크 증가량이 감소하여 회전속도와 토크와의 관계는 뚜렷한 2차함수의 형태로 나타났다. 또한 회전속도가 같을 경우 점도의 증가에 따라 토크는 선형적으로 증가한다는 것을 확인하였다. 위의 결과로부터 교반 공정에서 모터 토크(T)의 크기는 식(1)과 같이 용액의 점도(γ)와 회전속도(N)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$T = f(\gamma)N^2 + g(\gamma)N + h(\gamma) \quad (1)$$

여기서 점도에 따라 변화하는 계수들은 $f(\gamma) = a_f\gamma + b_f$, $g(\gamma) = a_g\gamma + b_g$, $h(\gamma) = a_h\gamma + b_h$ 로 놓을 수 있고, a_f , a_g , a_h , b_f , b_g , b_h 는 임펠러 및 용기의 종류, 용기 내 임펠러의 위치 등에 따라서 실험적으로 결정되는 상수다.

식(1)을 점도 γ 에 대해서 정리하면 식(2)와 같이 되며, 여기서 혼합 용액의 점도는 교반기 회전속도와 모터 토크의 함수임을 알 수 있다.

$$\gamma = \frac{T - (b_f N^2 + b_g N + b_h)}{a_f N^2 + a_g N + a_h} \quad (2)$$

4.2 모터 듀티비에 따른 회전속도의 변화

교반기의 회전속도(N)는 PWM 듀티비(D)에 비례하며, 부하 토크 T 와의 관계까지 고려하면 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$N = lD + mT + n \quad (3)$$

여기서, l , m , n 은 사용된 DC 모터의 특성, 감속장치, 그리고 각종 회전부의 마찰력에 의해서 실험적으로 결정되는 상수이며, 특히 부하 토크 및 마찰력과 관련된 항 $mT + n$ 은 그래프의 Y절편을 결정하며 이는 무부하 상태에서의 실험 데이터와 임의의 또 다른 토크 크기에서의 실험 데이터를 통해서 구할 수 있다.

Fig. 5는 무부하 상태 및 7 kgf·cm의 부하가 가해진 경우에 대해서 교반기의 듀티비와 회전속도 사이의 관계를 실험적으로 구한 것이다. DC 모터의 특성에 따라 듀티비와 모터 회전속도의 선형적인 관계를 잘 보여주고, 또한 모터에 부하가 가해질 때 속도 변화의 감도(기울기)는 변하지 않고 회전속도의 감소가 발생함을 보여준다.

Fig. 5를 통해서 l , m , n 을 구하고 식(3)을 식(2)에 대입하면 교반기, 임펠러 및 용기가 결정된 경우에 교반 공정 중의 회전속도와 듀티비만으로 혼합 용액의 점도를 계산할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.3 임펠러 종류에 따른 회전속도와 토크의 변화

오버헤드 교반기에서는 혼합하고자 하는 용액의 성질 및 교반 목적에 따라 다양한 형상의 임펠러를 사용하는데, 이때 임펠러 종류에 따라 점도-토크-회전속도의 관계, 즉, 식(1)에서 계수 값들이 달라진다. 본 연구진은 선행연구를 통해 임펠러 종류별로

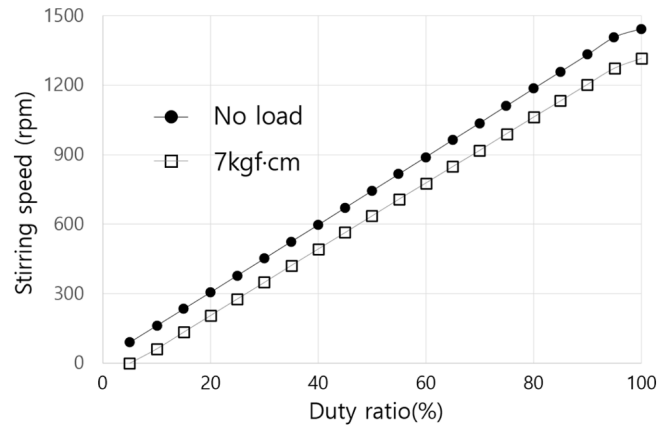


Fig. 5 Relationship among duty ratio, stirring speed, and stirring torque (load)

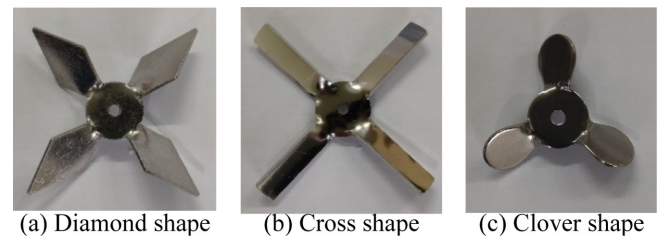


Fig. 6 Various shapes of impeller blade

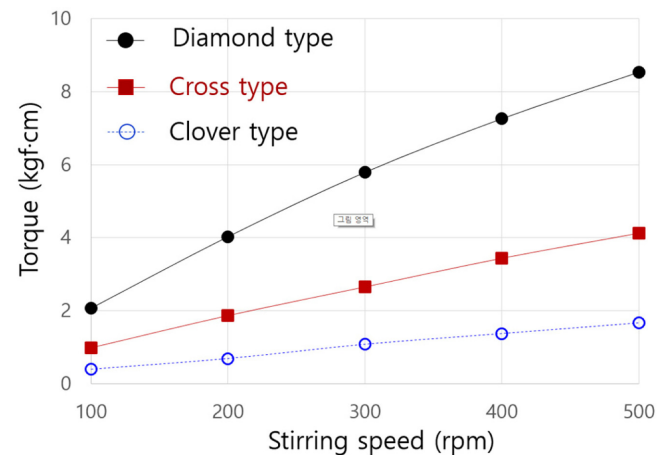


Fig. 7 Relationship between stirring speed and motor torque according to the blade shape (Viscosity = 30,000 cP)

점도 추정이 가능하도록 장착되는 임펠러를 자동적으로 식별할 수 있음을 확인하였다.^{5,6}

본 연구에서는 Fig. 6과 같이 세 가지 형상의 블레이드를 가진 임펠러에 대해 실험하였다. 블레이드의 면적이 넓을수록, 그리고 블레이드 면이 회전 방향에 수직인 방향으로 기울어진 각도가 클수록 회전 저항이 커지므로 다이아몬드 형상의 회전 저항이 가장 크고 클로버 형상의 회전 저항이 가장 작다.

Fig. 7은 점도가 30,000 cP인 용액을 교반할 때 임펠러 블레

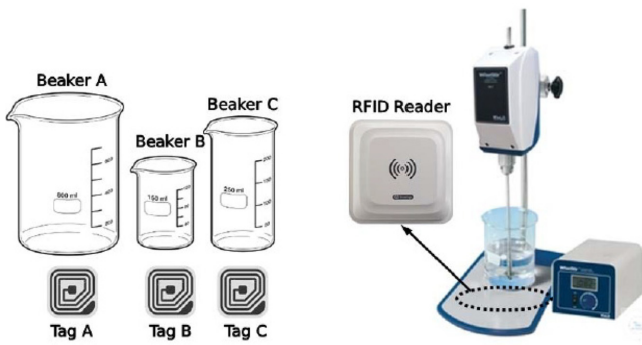


Fig. 8 Beaker identification using RFID technology

이드 형상이 달라짐에 따라 회전속도에 따른 토크의 변화를 보여주고 있다. 실험 결과 회전속도가 증가할 때 회전 저항이 큰 순서인 다이아몬드형, 십자형, 그리고 클로버형 순으로 토크 증가량이 커짐을 확인하였다. 이 결과를 통해 회전속도에 따른 토크값의 변화 민감도가 가장 큰 다이아몬드 형상의 블레이드를 사용하면 토크값의 변화로 추정된 용액의 점도 오차가 가장 적게 발생함을 알 수 있다.

4.4 RFID 기술을 이용한 용기 식별

다른 모든 교반 공정 조건이 동일할지라도 용액을 담은 용기의 크기와 모양이 달라지면 측정되는 토크가 달라지므로 점도 계산을 위해서는 용기를 자동적으로 구분할 수 있어야 하고 식 (1)에서 실험을 통해 용기별로 계수를 구해야 한다. 실제 공정에서 교반기의 용기를 교체할 때마다 수시로 접촉했다가 떨어지는 과정을 반복하므로 본 연구에서는 RFID 기술을 이용하여 사용자의 특별한 조작 없이 비접촉 방법으로 용기를 자동적으로 식별할 수 있도록 하였다.

Fig. 8과 같이 용기 외부 바닥면에 고유번호를 가지는 RFID 태그를 부착하고 교반기 받침대 위의 지정된 위치에 올려놓으면 받침대 아래에 설치된 RFID 수신기가 태그를 읽어서 용기의 종류를 인식하게 된다. RFID 태그의 얇은 두께만큼 받침대에 밀링 가공을 해서 교반 작업에 지장을 주지 않도록 하였으며 실험 결과 수신기를 통해 용기의 종류를 오차 없이 식별할 수 있었다.

4.5 교반 시간에 따른 용액의 온도 및 토크의 변화

액체의 점도는 물리적 특성상 온도에 민감한 영향을 받기 때문에 교반 공정 중 용액의 온도가 달라지면 측정되는 토크값이 변한다. Fig. 9는 점도가 60,000 cP인 표준 점도액을 500 rpm의 일정한 회전속도로 교반할 때 시간의 흐름에 따라 열적외선 온도계로 측정한 용액의 온도와 토크 센서로 측정한 토크값의 변화를 보여주고 있다.

임펠러 회전이 시작되면 정지해있는 용액을 회전시키기 위해 큰 토크가 필요하고 이후 용액의 회전이 정상 상태가 되면서 토크는 감소하게 된다. 그러나 그 이후에도 토크는 지속적으로

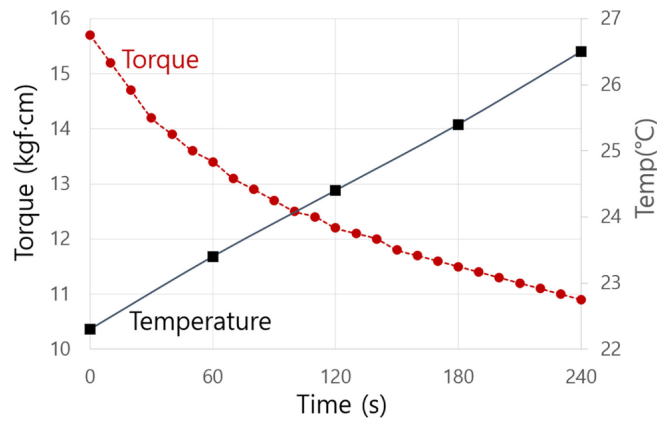


Fig. 9 Variation of stirring torque and liquid temperature according to the stirring time (60,000 cP, 500 rpm)



(a) h = 30 mm (b) h = 60 mm (c) h = 80 mm

Fig. 10 Photographs of stirring form according to the height of impeller blade in beaker (30,000 cP, 300 rpm)

감소하는 것으로 나타났는데 이는 용액의 온도가 상승하기 때문이다. 교반 전 22.3°C이었던 용액은 교반이 진행됨에 따라 1분당 약 1°C만큼씩 증가하다가 4분 후 26.5°C까지 상승하였다. 용액의 온도가 증가하면 용액의 점도가 감소하게 되어 전체적으로 토크값은 처음 15.7에서 10.9 kgfcm로 약 30% 감소하였다. 이러한 교반 시간에 따른 용액의 온도 증가와 토크 감소 현상은 회전속도가 증가할수록 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

한편, 교반 공정을 진행할수록 혼합 용액의 온도가 증가하여 점도가 점차 감소하는 것은 필연적인 현상으로 점도계를 사용하지 않고 공정 변수만으로 점도를 추정하는 본 연구에서는 이와 같은 현상을 확인하는데 그치기로 한다.

4.6 임펠러 블레이드의 상하 위치에 따른 토크의 변화

임펠러 블레이드를 용액이 담긴 용기 내에 얼마나 깊숙이 담았는지 회전시키는지에 따라 Fig. 10과 같이 용액이 교반되는 형태가 달라지며 이에 따라 교반 효율 및 회전 저항이 변하여 토크 크기도 달라진다. 용액 속에 담겨있는 임펠러 블레이드 위치에 따른 토크의 변화를 살펴보기 위하여 블레이드 위치를 용기 바닥에서부터 수직 방향으로 10 mm 간격으로 상승시켜가면서 교반 공정 중의 토크 변화를 관찰하였다.

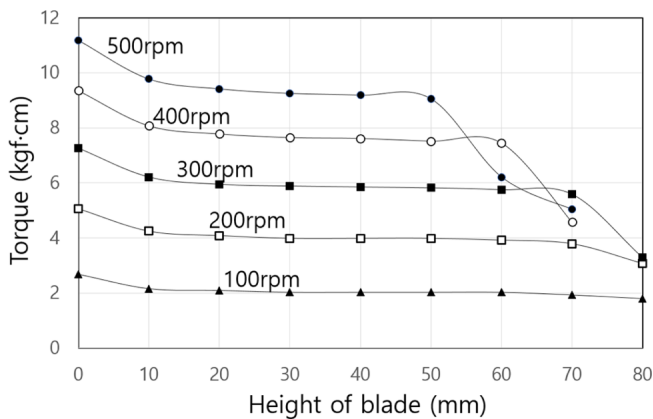


Fig. 11 Variation of stirring torque according to the height of impeller blade in beaker (Viscosity = 30,000 cP)

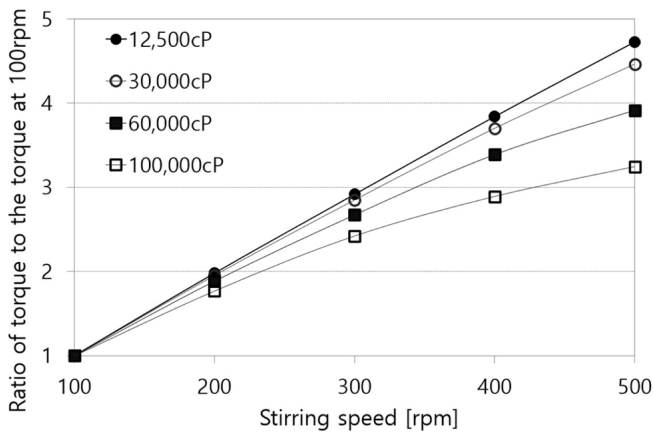


Fig. 12 Torque increase according to the stirring speed and the liquid viscosity

실험 결과 Fig. 11과 같이 블레이드가 용기 바닥면 위치(높이 = 0 mm)에서 회전할 때는 용기 바닥면이 용액의 회전을 방해하는 저항으로 작용하여 토크가 가장 컸으며, 블레이드가 바닥의 영향을 거의 벗어나서 20 mm 지점을 지나면서부터 블레이드 위치가 상승하더라도 토크의 크기는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 그러나 블레이드의 위치가 용액 표면에 가까워지면 표면의 형상이 깔대기 형태(Fig. 10(b))로 변하다가 급기야 블레이드가 용액 표면 밖으로 노출(Fig. 10(c))되어 토크가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 표면 근처에서의 급격한 토크 감소 현상은 회전속도가 증가할수록 그리고 용액의 점도가 감소할수록 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 11의 결과에서 블레이드 위치가 50 mm가 될 때까지는 회전속도 증가에 따른 토크값 증가 비율이 모든 위치에서 거의 일정한 것으로 나타났다.

이러한 회전속도 증가에 따른 토크값 증가 비율이 용액의 점도가 달라지면 어떻게 달라지는지 알아보기 위해 점도가 다른 네 가지 용액에 대해 동일한 실험을 반복하였다. Fig. 12는 점도를

변화시켜가면서 100 rpm일 때의 토크값을 기준(1, 100%)으로 하여 회전속도별로 모든 위치에서의 토크값 비율의 평균값을 보여주고 있다. 실험 결과 점도가 낮은 용액(12,500 cP)인 경우 토크와 회전속도는 거의 선형적인 관계를 보여주는 반면 용액의 점도가 증가할수록 회전속도 증가에 따른 토크 증가량은 점차 감소하여 2차함수 형태로 나타났으며, 이 결과로부터 Fig. 4의 점도 변화에 따른 회전속도-토크 관계를 더욱 뚜렷이 확인할 수 있었다.

이상에서 오버헤드형 교반기에서 공정 조건만으로 용액의 점도를 추정하기 위하여 모터 토크, 회전속도, 듀티비의 공정 조건과 용액의 점도와의 관계를 파악하였고 임펠러와 용기의 종류, 블레이드의 위치 등의 다른 공정 변수들이 이들의 관계에 미치는 영향을 살펴보았다. 이러한 연구 결과를 토대로 하여 교반 공정 조건들이 독립변수이고 용액의 점도가 종속변수인 실험식을 얻을 수 있고 이로부터 용액의 점도를 계산할 수 있으며, 이에 대한 더욱 구체적인 내용은 추후 연구과제에서 수행하기로 한다.

5. 결론

오버헤드형 교반기에서 교반 공정 상태를 감시하기 위해서 공정을 멈추고 점도계를 사용하여 용액의 점도를 측정해왔던 기존의 방법을 대신하여 교반 중인 상태에서 공정 변수들만으로 점도를 예측할 수 있기 위한 기반 연구를 수행하였다. 이를 위해 모터 토크, 회전속도, PWM 듀티비, 임펠러 및 용기 종류, 용기 내 블레이드 위치 등 다양한 교반 공정 조건들과 용액 점도와의 상관관계를 분석하였다.

용액 점도와 모터 토크의 선형적인 관계, 토크와 회전속도의 2차함수 관계를 실험적으로 얻었고, PWM 듀티비와 회전속도와 선형적인 관계를 고려하여 듀티비와 회전속도만으로 점도를 예측하는 실험식을 구할 수 있으며, 또한 임펠러와 용기의 종류를 자동으로 식별함으로써 점도 계산 변수를 줄일 수 있음을 확인하였다. 그리고 점도 예측 오차를 줄이기 위해서는 회전 저항이 큰 형상의 임펠러 블레이드를 사용하고 블레이드 상하 위치를 용기 중앙에 두어야함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 결과물은 2020년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

REFERENCES

1. Pop, M., "A Miniaturized Stirrer for Low Viscosity Fluids based

- on a Rotating Magnetic Field Generated by Solenoids,” Proc. of the AIP Conference Proceedings on American Institute of Physics, pp. 81-84, 2012.
2. Eble, E., “Stirring Device Comprising a Stirring Tool and a Drive Motor,” US Patent, 0112092A1, 2014.
 3. Kanaveli, I. P., Atzemi, M., and Lois, E., “Predicting the Viscosity of Diesel/Biodiesel Blends,” Fuel, Vol. 199, pp. 248-263, 2017.
 4. IKA, “STARVISC 200-2.5 Control,” <https://www.ika.com/ko/Products-Lab-Eq/Measuring-stirrers-csp-162/STARVISC-200-25-control-cpdt-25003604/> (Accessed 7 August 2020)
 5. Lee, H. C. and Kim, G. D., “A Study on the Discrimination of Overhead Stirrer Impeller,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 2, pp. 52-57, 2019.
 6. Lee, H. C., Kang, M. S., and Kim, G. D., “Digitalization of Analog Magnetic Field Signals for Automatic Discriminating Impeller Types of an Overhead Stirrer,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 36, No. 11, pp. 1033-1038, 2019.
 7. Rabani, A. and Challis, R., “A Low-Cost Viscometer based on a Permanent Magnet Dc Motor,” Measurement Science and Technology, Vol. 24, No. 3, Paper No. 035304, 2013.
 8. Sadat, A. and Khan, I. A., “A Novel Technique for the Measurement of Liquid Viscosity,” Journal of Food Engineering, Vol. 80, No. 4, pp. 1194-1198, 2007.

**Ho Cheol Lee**

Professor in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Catholic University. His research interest is sensors and actuator based on magnetics.

E-mail: hclee21@cu.ac.kr

**Gi Dae Kim**

Professor in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Catholic University. His research interest is Precision Machining.

E-mail: gidkim@cu.ac.kr