

디지털 홀 센서를 이용한 비접촉 임펠러 식별에 대한 연구

이호철*[#]

*대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

A Study on Contactless Identification of Impellers Using a Digital Hall Sensor

Ho-Cheol Lee*[#]

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Catholic UNIV.

(Received 06 October 2021; received in revised form 15 October 2021; accepted 18 October 2021)

ABSTRACT

An impeller identification technique that is essential for adding viscosity measurement functions to overhead stirrers is presented in this study. Previous studies have revealed that using magnets facing the same poles arranged in a row can aid in distinguishing the types of impellers by detecting the number of magnets in a non-contact manner. However, as these previous studies measured the magnetic fields using analog Hall sensors, a converting circuit for the digital signals is required that can interface with the MCU. In this study, it was demonstrated that the number of magnets can be distinguished without using a separate conversion circuit by using a Hall sensor with a digital output. Owing to the unique hysteresis characteristics of digital Hall sensors, it was confirmed through experiments that the complex and diverse outputs appear depending on the direction of the magnetic field, the arrangement of magnetic poles, and the moving direction of the magnet. The measurement of the magnetic field showed that an edge signal equal to the number of magnets inserted into the impeller was detected when the radial direction was used, and the south pole was first approached.

Keywords: Overhead Stirrer(오버헤드 교반기), Hall Sensor(홀 센서), Hysteresis(히스테리시스)

1. 서 론

Fig. 1(a)에 보인 오버헤드 교반기는 가장 대표적인 이화학기기로 2가지 이상의 액상 물질을 골고루 섞어주기 위해서 사용한다^[1-2]. 오버헤드 교반기의 사용자들은 장비 사용 중에 교반 대상 용액의 점도를 측정해야 하는 상황이 종종 생기는데 별도의 점도계를 사용하는 번거로움을 주지 않기 위해서 교반기에서 점도 측정기능을 구현하려는

연구들이 진행되었으나 상업화에는 실패했다^[3-4]. 저자는 선행연구를 통해 오버헤드 교반기에 점도 측정 기능을 구현하는 것이 가능함을 보였으며^[5], 임펠러의 종류에 따라 달라지는 점도와 토크의 관계를 반영하기 위해서 사용자가 임펠러를 삽입할 때 임펠러의 종류를 비접촉으로 식별하는 기술이 필요하다는 것을 보였다. 선행연구들은 Fig. 1(a)와 같이 동일한 자극을 마주 보는 자석들을 임펠러 내부에 일렬로 삽입하고 이들로부터 생성된 자기장의 세기를 측정하면 임펠러의 종류를 식별할 수 있음을 확인하였다.^[6-8]

Corresponding Author : hlee21@cu.ac.kr

Tel: +82-53-850-2712, Fax: +82-53-580-2295

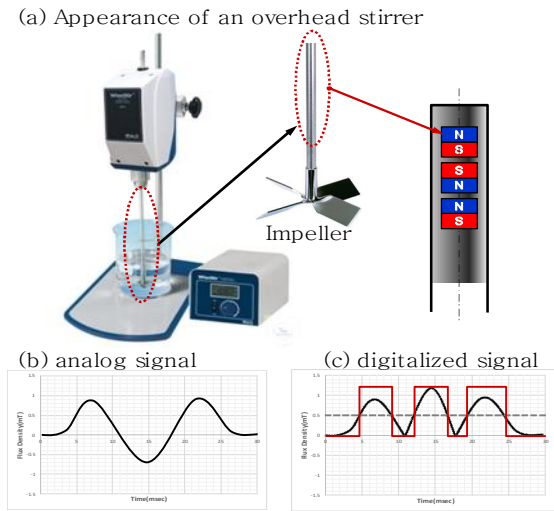


Fig. 1 (a) Appearance of an overhead stirrer, (b) analog signal for 3 magnets and (c) digitalized signal of (b)

예를 들어 Fig. 1(b)에 보인 신호는 자석 3개를 포함하고 있는 임펠러가 삽입될 때 아날로그 타입의 홀 센서로 측정된 신호를 보여주고 있으며 (c)는 (b) 신호에 증폭회로, 절대값회로, 문턱값 회로를 적용하여 제어기에 입력할 수 있는 디지털 형태로 변환한 것을 보여준다^[8].

Fig. 1(c)에서 볼 수 있듯이 선행연구들은 삽입된 자석의 개수에 따라서 임펠러의 종류를 비접촉 방식으로 정확하게 식별할 수 있음을 보여주었으나 양산을 통한 제품화를 고려하면 지나치게 많은 전자부품이 요구된다는 한계가 있었다. 본 연구에서는 선행연구에서 사용된 아날로그 타입의 홀 센서를 대신하여 디지털 출력을 가지는 홀 센서를 적용하여 이 문제를 해결하였다.

디지털 출력을 가지는 홀 센서는 아날로그 방식과 비교했을 때 가격 차이가 크지 않으면서 출력이 디지털로 나오기 때문에 선행연구에서 사용했던 디지털화를 위한 복잡한 신호 변환 회로가 필요하지 않다. 한편 디지털 방식의 홀 센서는 히스테리시스(hysteresis)라는 고유의 특성이 있기 때문에 출력값이 자속밀도에 비례하는 아날로그 방식에 비해서 동작을 이해하는 것이 복잡하다.

본 연구에서는 디지털 방식의 홀 센서가 보이는

히스테리시스 특성과 관련하여 자기장의 측정 방향, 자극 종류 그리고 임펠러 삽입 및 제거 동작이 출력 패턴에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 수행하였으며 그 실험 결과를 기반으로 최적의 조건(자기장의 방향은 반경 방향, 극성은 N극 우선 접근)을 도출하였다.

2. 센서 동작 원리 및 실험 구성

2.1 디지털 홀 센서의 출력 특성

디지털 출력을 가지는 홀 센서는 흔히 홀 스위치(Hall switch)라고 불린다. Fig. 2에 대표적인 아날로그 출력 타입의 홀 센서(SS49, Honeywell)와 본 연구에서 사용한 디지털 출력 타입의 홀 센서(WSH130, Winson)의 출력 특성을 그래프로 보였다^[9-10]. 이를 통해 디지털 출력 방식의 홀 센서는 다음과 같은 특징이 있음을 알 수 있다.

- (1) 외부에서 가해지는 자기장의 세기에 따라서 연속적으로 변화하는 값을 가지는 아날로그 방식의 홀 센서와 달리 High(V_{cc})과 Low(0V)의 2가지 값만을 가진다.
- (2) 아날로그 출력 타입과 달리 히스테리시스 현상을 보인다. 외부 자기장이 걸려있지 않은 상태에서 전원을 투입하면 센서는 High를 출력으로 내보내고 S극 자기장이 걸려도 자속밀도의 크기가 문턱값(B_{th})에 도달하지 않으면 출력을 유지하다가 이 값을 넘어서는 순간 출력을 Low로 바꾼다(Fig. 2(b)에 ①로 표시). 그 후에 S극이 사라지고 N극 자기장이 걸리는 경우도 센서는 자속밀도의 크기가 B_{th} 에 도달해야 비로소 High를 출력으로 내보낸다(②로 표시).
- (3) 반면 출력이 High인 상태에서 N극 자기장이 걸리면 출력에는 아무런 변화가 없다(③으로 표시). 이는 S극의 자기장도 마찬가지로 한 번 출력이 Low로 떨어지고 난 뒤에는 S극 자기장이 걸려도 출력은 Low를 유지하게 된다.

히스테리시스는 이처럼 센서의 출력 양상을 매우 복잡하게 만들기 때문에 디지털 홀 센서를 제품에 적용할 때는 그 동작에 대한 정확한 이해가 선행되어야 한다.

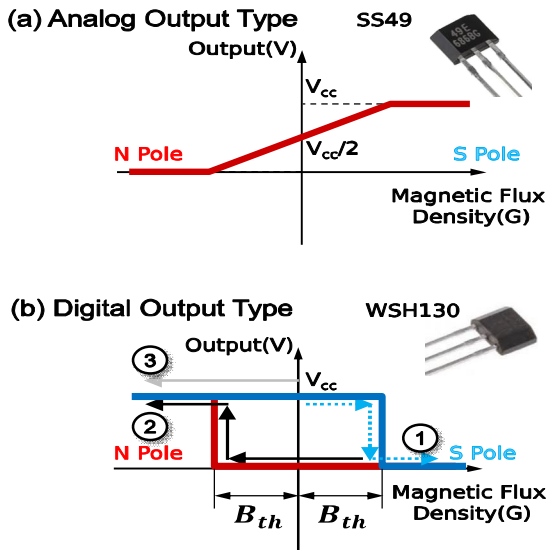


Fig. 2 Output characteristic (a) analog vs. (b) digital Hall sensor

2.2 실험 구성

Fig. 3은 임펠러에 삽입된 자석의 개수에 따른 디지털 출력 타입 홀 센서의 출력 특성을 관찰하기 위해서 제작된 실험 장치를 보여주고 있다. Fig. 3(a)에 ①로 표시된 임펠러는 스텝모터와 직선운동기구에 의해서 0.5mm 간격만큼 축 방향(Z Axis)으로 이동한 뒤에 정지하는데 ②로 표시된 홀 센서는 이때 임펠러 내부에 삽입된 자석에 의해서 만들어진 자기장의 세기를 측정한다(10회 평균값). 이런 방식의 측정을 60mm 거리에 대해서 반복해서 수행한다. 디지털 방식 홀 센서의 특성을 이해하기 위하여 선행연구에서 사용했던 아날로그 타입의 홀 센서를 이용한 측정도 병행하였다. 사용된 홀 센서는 Fig. 2에 표시된 것처럼 아날로그 타입은 Honeywell사의 SS49이며, 디지털 타입은 Wison사의 WSH130 제품군 중 문턱 자속밀도(B_{th}) 값이 30G로 제일 작은 XPANA를 선정하였다. 임펠러에 삽입된 자석의 개수에 상응하여 디지털 출력 타입 홀 센서의 출력이 변화하는지 확인하기 위하여 임펠러 시편은 자석이 1, 2, 3개가 삽입된 것을 제작하였으며 Fig. 1(a)에 보인 것처럼 N극과 S극이 번갈아 가면서 같은 자극을 마주 보도록 배치하여 같은 조건

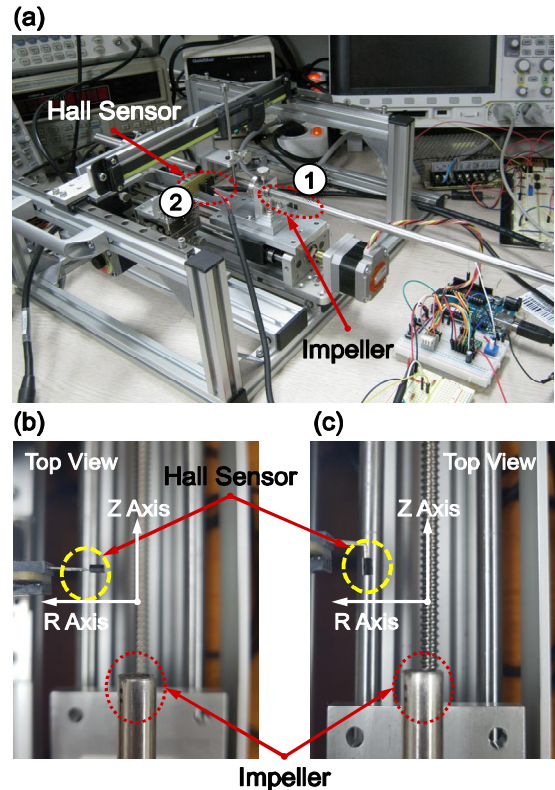


Fig. 3 Experimental setup for verification(a) and two types of arrangements of a Hall sensor (b): axial direction, (c): radial direction)

에서 실험을 진행하였다. 임펠러는 축 지름 6mm의 스테인리스 스틸 재질이고 삽입된 자석은 실린더형상의 네오디뮴(Nd) 자석으로 지름은 4mm, 높이는 3mm, 등급은 35였다.

여기서 주목해야 하는 중요한 사실은 홀 센서에 의해서 측정되는 자기장의 종류가 하나가 아니라 방향에 따라서 서로 수직인 2가지가 존재한다는 것이다. Fig. 3의 (b)와 (c)에 보인 것과 같이 홀 센서는 축 방향(axial direction: Z axis)과 반경 방향(radial direction: R axis)의 2가지 방향의 배치가 가능하며 이 차이는 출력 특성에 근본적인 영향을 미치는 중요한 요인이므로 이들의 영향에 대하여 평가하였다.

히스테리시스가 출력에 미치는 영향을 살피기 위해서 임펠러는 +Z축으로 움직였다(실험 결과에서

In Motion으로 표현)가 같은 방식으로 -Z축으로 복귀하는 운동(Out Motion으로 표현)을 하도록 하고 그 과정에서 홀 센서의 출력을 기록하였다.

히스테리시스는 임펠러가 움직이는 방향에도 영향을 주지만 N극이 먼저 접근하는가 S극이 먼저 접근하는가에 따라서 서로 다른 출력을 만들어내므로 N극이 +Z와 -Z 방향으로 배치된 2종류의 임펠러 시편을 제작하여 각각 실험을 진행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 자석 개수에 따른 출력 패턴

Fig. 4는 임펠러에 삽입된 자석의 개수를 1개에서 3개로 바꿔가면서 임펠러로부터 5mm 떨어진 곳에 반경 방향의 자기장을 측정하도록 아날로그 센서 및 디지털 센서 홀 센서를 장착하고 그 출력을 측정한 결과를 보여준다. 왼쪽 Y축은 아날로그 방식의 센서로 측정된 자속밀도의 크기를 가우스(Gauss) 단위로 보여주고 있으며 오른쪽 Y축은 디지털 방식의 센서 출력을 전압으로 보여주고 있다. 아날로그 센서의 출력 패턴은 N극과 S극이 접근했다 멀어지는 과정을 잘 반영하고 있으며 디지털 센서의 출력 패턴도 Fig. 2(b)에 보인 특성을 잘 보여주고 있다. 전원을 투입한 상태에서 5V의 전압을 유지하다가 N극에서 S극으로 넘어가는 원점 근처(약 30G)에서 출력이 0V로 변화하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3과 4에 ①로 표시). 자석이 2개인 경우 S극에서 N극으로 넘어가는 부근에서 출력이 다시 5V로 반전됨을 확인할 수 있다. (Fig. 3과 4에 ②로 표시)

Fig. 4는 디지털 출력 방식의 홀 센서를 사용하는 경우 임펠러에 삽입된 자석의 개수와 같은 에지(edge)가 출력 신호에서 관찰됨을 보여준다. 선행연구에서 필수적이었던 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어주는 회로가 불필요할 뿐 아니라 마이크로컨트롤러(MCU)에 필수적으로 장착되어 나오는 핀 변화 인터럽트(Pin change interrupt)를 이용하면 상승 및 하강 에지를 아주 수월하게 포착할 수 있다^[11]. 이는 교반기의 전자회로에 추가부품을 요구하지 않으므로 제품의 가격 경쟁력 측면에서도 유리하다.

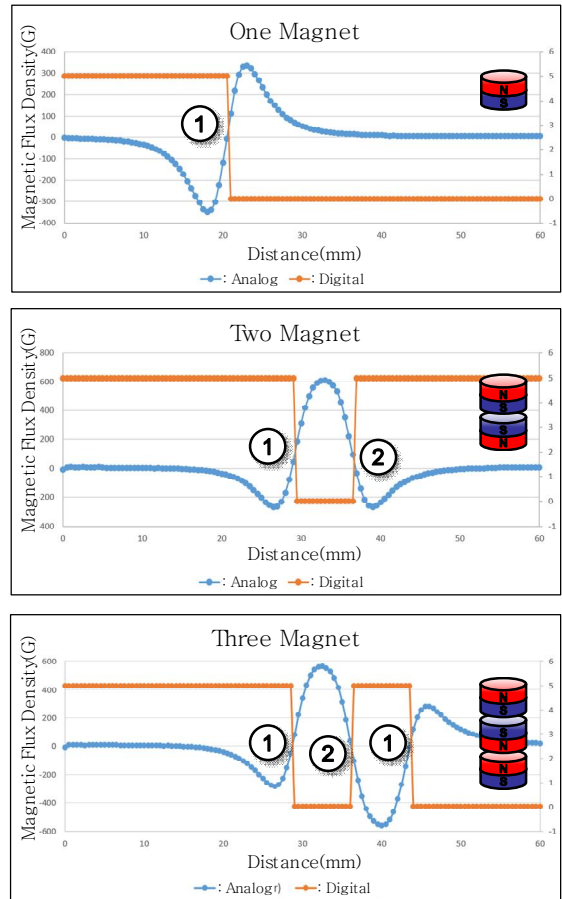


Fig. 4 Analog vs. digital output patterns according to number of magnets in an impeller

Fig. 4에 보인 결과는 N극을 삽입할 때 반경 방향의 자기장을 측정된 신호라는 사실이 중요하다. 디지털 홀 센서가 가지는 히스테리시스 특성은 자기장의 N극과 S극 중 어떤 극이 먼저 삽입되는지에 따라서, 또 임펠러가 삽입되는 중인지 제거되는 중인지에 따라서 출력 특성이 바뀌기 때문이다.

3.2 측정 자기장의 방향의 영향

Fig. 5는 측정되는 자기장의 방향에 따라 달라지는 센서의 출력을 보여주고 있다. 자기장의 방향은 Fig. 3의 (b)와 (c)에 보인 것과 같이 축 방향과 반경 방향으로 각각 센서를 배치하였고 자석의 개수를 1~3개로 바꿔가면서 임펠러를 삽입하는

동작(In Motion) 중에 출력을 측정하였다. 자석의 크기가 1~3개인 시편에 대해서 측정하였으며 축 방향과 반경 방향의 디지털 홀 센서의 출력(V_D)과 아날로그 방식의 홀 센서의 출력(V_A)을 함께 표시하여 동작 원리를 Fig. 2(b)를 기반으로 이해할 수 있도록 하였다. 설명의 편의를 위하여 실제 결과를 도식화한 그래프를 사용하였으며 X축(거리)은 자석의 간격에 대해서, 아날로그 Y축(전압)은 최댓값에 대해서 정규화하였다.

결과를 살펴보면 축 방향으로 배치된 센서의 경우 자석이 1개일 때 출력에 아무런 변화가 발생하지 않지만, 반경 방향의 경우 Fig. 4에서 이미 확인한 바와 같이 자석의 개수와 일치하는 에지가 발생함을 알 수 있다. 축 방향의 자기장을 측정했을 때 출력에 변화가 없는 이유는 N극이 접근하기 때문에 Fig. 2(b)의 ③을 따라서 센서의 출력이 변하기 때문이다. 이 실험 결과는 축 방향의 자기장을 측정하는 방식은 N극이 먼저 삽입되는 구성으로는 임펠러에 삽입된 자석의 개수를 측정하는데 적합하지 않음을 보여준다.

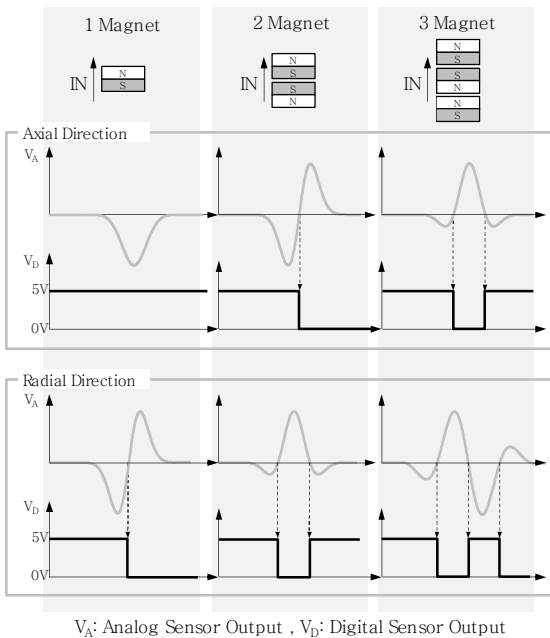


Fig. 5 Effect of measuring direction of magnetic flux density on sensor output (in motion)

3.3 자석의 극성에 따른 출력 패턴

Fig. 6은 홀 센서로 어떤 극성을 가진 자석이 먼저 접근하는가에 따른 출력 신호의 변화를 보여준다. 측정된 자기장의 방향은 반경 방향이며 임펠러가 교반기에 삽입될 때(In Motion) 측정된 것이다. Fig. 6은 히스테리시스가 디지털 방식 홀 센서의 출력에 미치는 또 다른 부정적인 영향을 보여주고 있다. S극이 먼저 접근하는 상황에서 출력에 나타나는 에지의 개수는 N극이 먼저 접근하는 상황보다 1개씩 많음을 확인할 수 있다. 물론 제 여기에서 산술적으로 1을 삭감하는 방식으로 해결할 수 있지만 3.4절에서 언급할 자석의 운동 방향의 영향에 의해서 임펠러가 교반기에서 분리될 때는 삽입될 때와 비교했을 때 에지의 개수가 1개 작아지는 현상이 발생하여 일관성을 잃게 된다. 이 일관성은 사용자가 교반기의 전원을 끄는 행위가 임펠러를 삽입한 상태인지 혹은 제거한 상태인지에 따라 임펠러의 종류를 식별하는데 다르게 영향을 주는 것을 방지하기 위해서 중요하다.

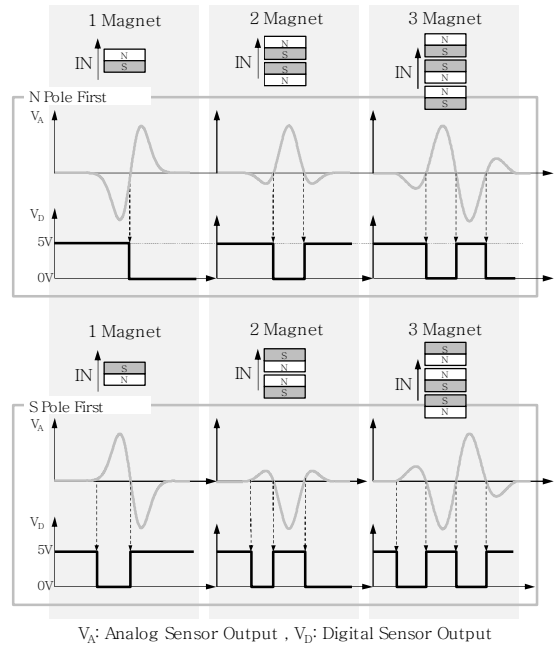


Fig. 6 Effect of magnetic poles approaching firstly to Hall sensor on sensor output (in motion, radial magnetic field)

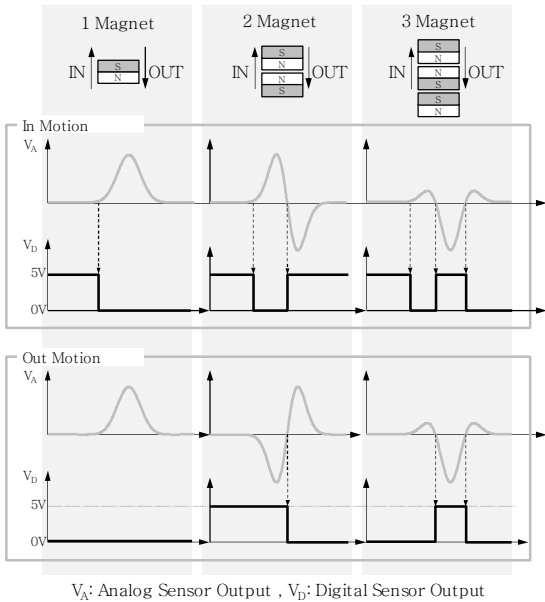


Fig. 7 Effect of measuring direction of magnetic flux density on sensor output (axial magnetic field)

3.4 자석의 운동 방향 따른 출력 패턴

3.3절에서 언급한 바와 같이 센서가 측정하는 자기장의 방향, 어떤 극성을 먼저 접근하게 하는가를 면밀하게 검토해서 선정하지 않으면 히스테리시스는 임펠러가 삽입될 때와 제거될 때 서로 다른 출력을 내보내는 결과를 나타낸다. Fig. 7은 그 예를 보여준다. 아날로그 신호의 중심을 기준으로 관찰하면 자석이 1개인 경우와 3개인 경우는 대칭인 형태이므로 임펠러가 삽입될 때와 제거될 때 같은 출력이 측정되나 자석이 2개인 경우는 서로 반대 극성이 측정되는 차이점이 있다. 디지털 방식 홀 센서의 히스테리시스는 자석의 개수와 무관하게 영향을 미쳐서 삽입될 때 에지의 개수가 제어할 때 개수에 비해 1개씩 작은 결과를 낳는다. 예를 들어 자석이 1개인 경우 S극이 먼저 접근하게 되면 자석이 삽입되는 과정에서 출력이 5V→0V로 변화하게 되는데 자석이 제거되는 과정에서도 S극 자기장만 걸리기 때문에 0V가 다시 5V로 바뀌지 못하게 되는 것이다.

Fig. 7은 축 방향의 자기장에 대한 것이지만 이

현상은 S극이 먼저 접근하는 조건에서 반경 방향의 자기장에 대해서도 똑같이 나타남을 실험을 통해서 확인하였다. 이는 어떤 극을 먼저 접근하게 만드는지가 일관된 출력(에지의 개수)을 얻는데 중요한 인자임을 보여준다.

4. 결론

오버헤드 교반기 사용자가 교반기에 임펠러를 삽입할 때 교반기가 자동으로 그 종류를 식별할 수 있도록 하는 방법으로 디지털 홀 센서를 적용하는 것을 제안하였고 실험과 센서의 특성 곡선을 기반으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 디지털 방식의 홀 센서는 아날로그 방식과 비교했을 때 제어기와의 연결을 위한 별도의 변환 회로가 필요하지 않다는 장점과 복잡한 히스테리시스 현상을 가진다는 단점을 모두 가지고 있다.
2. 디지털 방식의 홀 센서를 사용하면 자석의 개수와 일치하는 에지 신호를 생성하는 것이 가능하며 이를 통해 MCU와 같은 디지털 제어 장치와 아주 쉽게 연결할 수 있다.
3. 자석의 개수와 일치하는 에지 신호를 임펠러의 삽입/제거와 관계없이 생성하려면 측정되는 자기장의 방향(반경/축), 먼저 접근하는 자극의 종류(N극/S극)를 잘 선정해야 한다. 일련의 실험과 히스테리시스 곡선의 분석을 통하여 반경 방향의 자기장을 측정하고 N극이 먼저 접근하는 조건에서 이러한 목적이 정확하게 달성될 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

1. Erhard E., "Stirring Device Comprising a Stirring Tool and a Drive Motor," US Patent 2014/0112092
2. Pop, M. N., "A miniaturized stirrer for low viscosity fluids based on a rotating magnetic field generated by solenoids," AIP(American Institute of Physics) Conference Proceedings Series, Vol. 1425, No. 1, pp. 81-84, 2012.

3. Rabani, A. and Challis, R., "A low cost viscometer based on a permanent magnet dc motor," *Measurement Science and Technology*, Vol. 24, No. 3, pp. 035304, 2013.
4. Sadat, A., Iqbal A. and Khan, I. A., "A novel technique for the measurement of liquid viscosity," *Journal of Flood Engineering*, Vol. 80, No. 4, pp. 1194-1198, 2007.
5. Lee, H. C. and Kim, G. D., "Analysis of Effect of Stirring Process Conditions on Liquid Viscosity in an Overhead Stirrer," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 37, No. 9, pp. 659-665, 2020.
6. Lee, H. C., Kweon. S. B. and Lee, Y. G., "Feasibility Test for Impeller Type Identification using Magnetic Fields in Overhead Stirrers," *Proceedings of KSPE 2016 Spring Conference*, No. 5, pp. 27-28, 2016.
7. 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.
8. 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 Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 36, No. 11, pp. 1033-1038, 2019.
9. "Datasheet for SS49," <http://sensing.honeywell.com> (accessed 05, Oct., 2021)
10. "Datasheet for WSH130 ," <http://winson.com.tw> (accessed 05, Oct., 2021)
11. Magolis, M., *Arduino Cookbook*, J-Pub Press, pp. 745-748, 2012.