

광섬유 센서를 이용한 오일 오염도 검사시스템 연구

송두상⁺, 홍준희^{*}, 류상현⁺

(Manuscript received: Aug, 22, 2011 / Revised: Mar, 1, 2012 / Accepted: Apr, 21, 2012)

A Study on Oil's Contamination Detection System using Optical Fiber Sensor

Doo-Sang Song⁺, Jun-Hee Hong^{*}, Sang-Hyun Ryu⁺

Abstract

This study investigates the detection system of oil pollution level using single optical fiber sensor. This study focus on sensing of oil pollution by moisture and iron powder which are representatives of oil pollution factor. In addition, It is placed that the water and iron powder as an oil pollution factor in the oil tank which is the oil circulation in. The oil pollution detection system was measured by the changing of intensity of light and sensing gap. The result of this experimentation not only confirmed the contamination by moisture volume in the oil tank from the section 190ppm to 540ppm, but also monitored the contamination by iron volume from the section 1200ppm to 3500ppm. This study confirmed effectiveness of this detection system using optical fiber sensor. There is expectations of measuring another section by various optical fiber sensor.

Key Words : Oil's contamination factors(오일 오염인자), Optical fiber sensor(광섬유 센서), Oil pollution index(오일 오염도)

1. 서론

기계류 유회에 사용되는 오일은 유압장치, 공작기계 등의 대부분 기계장치 구동에 필연적으로 사용되며, 그 오염도에 따라서 교체 주기가 달라진다. 오일의 수명 증가는 교체 주기를 늘려 불필요한 오일의 소모량을 감소시키는 역할을 하기 때문에 에너지 절약과 환경의 보호, 경제적인 측면에서 매우 큰 이득을 기대 할 수 있다. 오일이 폐기물이 되는 일반적인 경로는 크게 두 가지로 구분 할 수 있다. 첫 번째는 열화 등의 원인으로 오일의 화학적인 조성이 변하여 가치가 없어진 경우이고, 두 번째는 오일 속에 수분, 입자상 물질 등의 오염물질이 기계에 물리적인 손상을 줄 정도로 증가하여 가치를 상실하는 경우이다⁽¹⁾.

오일의 오염을 분석하여 기계 상태를 진단하는 여러 가지 기술이 연구되어 산업현장에서 사용되고 있다. 오염의 정밀한 분석을 위하여 대부분의 기술은 대상 기계 시스템으로부터 일정량의 시료를 채취하는 방법을 사용하며 오일의 샘플을 채취하여 오일내의 마모입자를 측정하고 정성적으로 분석하는 방법들로 Rotary Particle Depositor(R.P.D), Particle Quantifier(P.Q) 등이 국내외적으로 많이 알려져 있다.

그러나 소량의 샘플을 분석하여 오일 전체의 오염을 대변하는 문제, 샘플링 과정에서의 문제, 샘플링 주기를 결정하는 등의 공통적인 문제가 있다⁽²⁾.

최근에는 점차 실시간 및 삽입형 측정기기를 선호하는 경향을 볼 수 있다. 이에 의한 측정은 고가의 시료를 오프라인으로

⁺ 충남대학교 기계공학과

^{*} 교신저자, 충남대학교 기계공학과 (hongjh@cnu.ac.kr)

주소: 305-764 대전광역시 유성구 대학로 99

측정하는 기기에 비해 상대적으로 제한적인 정보를 나타내지만 오일 오염을 통한 기계 상태 진단의 목적을 위해서 더 유용한 방법으로 받아들여지며 오일 오염도를 측정하는 측정기기의 발전이 추진되고 있는 모습을 보이고 있다⁽²⁾. 따라서 본 연구는 오일의 오염도의 실시간 모니터링을 위한 기초연구로 집광렌즈가 없는 간단한 구조의 경제적인 단일 광섬유 센서를 제작하여 그 가능성을 고찰하였다.

즉, 오일 오염의 대표적인 오염 물질인 수분과 입자상 오염 물질에 대해 센싱을 하고 분석하여 오염 정도를 데이터베이스화하고 오일 오염도 모니터링이 가능한 지를 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 광 계측 기술

광의 경로 중에 있는 물체나 물리량은 반사(reflection), 흡수(absorption), 굴절(refraction), 산란(scattering), 분산(dispersion), 간섭(interference)과 같은 현상들을 일으킨다.

이러한 현상은 광의 특성인 진폭, 파장, 위상, 분극의 값 또는 공간 분포의 변화를 일으켜 이를 측정하여 물체의 특성과 물리량의 크기, 그 변위에 대한 정보를 제공한다.

광 계측 기술은 상기와 같은 원리를 이용한 계측 기술로서 레이저의 개발에 힘입어 지진과 같은 진동계측, 지폐계수, 표면조도, 등 여러 과학 기술 분야의 다양하게 응용되고 있다⁽³⁾.

또한 물체나 물리량의 광과의 상호작용에서 나타나는 현상들과 광 특성과의 조합에 의해 많은 계측 원리로 이용되고 있으며 광 감쇠 현상은 일반적으로 다음과 같은 Beer-Lambert 또는 Bouguer's Law에 따르는 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma L) \quad (1)$$

식 (1)에서 I 는 광 감쇠 후 투사된 빛의 세기, I_0 는 입사광의 세기, σ 는 광 감쇠 정수, L 은 광 감쇠 경로의 거리를 의미한다. 광 감쇠 정수에 영향을 주는 인자로는 오염 입자의 농도, 오염 입자의 반경, 입자 단위 표면적당 광 감쇠 효율 등이 있다. 오염 입자의 크기가 클수록 이에 의하여 투과되는 광세기는 입자 크기의 곱에 비례하여 감소한다⁽⁴⁾.

2.2 광섬유 센서

광섬유(Optical Fiber)는 가시광선이나 근적외선의 비가시광선을 전달하는 투명 플라스틱이나 유리 재질로 된 가늘고 유연한 섬유를 말한다. 광섬유는 대표적으로 멀티모드(Multi mode) 광섬유와 싱글 모드(single mode) 광섬유로 분류되며 싱글 모드 광섬유는 분산 특성이 좋아 광 강도 노이즈가 발생하지 않는

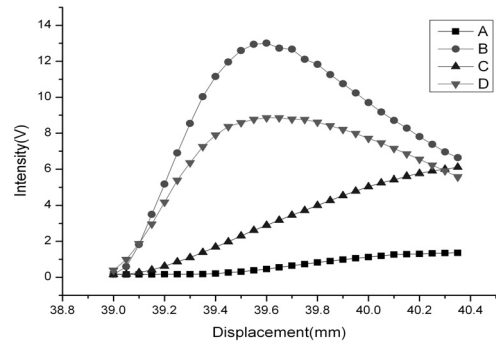


Fig. 1 Comparison of output signal according to fiber type

특성이 있으나 5~10 μ m의 매우 작은 코어에 의해서 단일의 광파만 전송하기 때문에 광소자와의 연결이 복잡한 만큼 제작이 어려우며 고가이다.

이에 반하여 멀티 모드 광섬유를 이용하여 센서를 제작할 경우 제작비용이 절감되고 센서의 설계변수가 되는 코어의 직경과 최대 한계 방사각 크기를 고려할 때 멀티모드 광섬유가 보다 적합할 수 있다⁽⁵⁾.

이에 멀티모드 광섬유의 투광 조도분포에 관한 연구는 광통신 분야에서는 거의 찾아보기 힘들고 주로 센서 분야에서 수행되고 있다. Fig. 1은 4개의 멀티모드 파이버 타입에 대하여 거리에 따른 출력을 비교한 그래프이며 본 실험에서는 감도별 선형성이 우수한 타입 C를 선정하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 장치 구성

3.1.1 광섬유 센서 제작

광섬유 센서 프로브는 코어직경 0.5mm, Step Index 멀티모드 플라스틱 광섬유로 Autronics 사의 FT-320-05를 사용하였다. 이는 광소자와의 연결 효율이 좋고, 센서 제작이 용이하여 센서의 제작비용을 줄일 수 있는 장점 때문이다.

광섬유를 집광 렌즈가 없이 마주보게 배치하여 조사한 광이 매질인 오일 내에서 오염 입자를 통과하여 줄어드는 광의 세기를 측정하는 광 강도 방식으로 제작하였다.

광섬유 센서 제작에 앞서서 두 광섬유의 감도가 가장 좋은 간극을 구하기 위하여 오일에 수분을 100ppm 간격으로 0~2000ppm까지 설정 하였으며 각각의 수분량에 대한 대향 간극을 Fig. 2와 같이 20, 30, 40, 50mm로 조절하였다.

이는 Fig. 1에서 나타낸 비교 데이터에 의거하여 현재 설정한 광섬유 센서의 선형성이 30mm 에서 40mm 구간에서 우수하였기에 간극을 임의로 20mm 에서 50mm로 설정하여 실험하였다. 오일에 수분이 함유된 시점에서 1분 후에 각 간극에 대한 광 강도 값을 측정 하였고 그 결과 값은 Table 1과 같다.

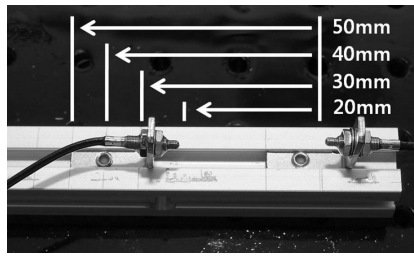


Fig. 2 Optical fiber sensor mechanism or preliminary experiment

Table 1 Comparison of measured sensitivity data with gap of optical fiber sensor

ppm	Electric Intensity (V)			
	20mm	30mm	40mm	50mm
0	12.359	12.327	12.270	9.166
100	12.346	12.296	9.622	5.541
500	12.303	6.614	2.831	1.423
1000	8.130	2.064	0.741	0.335
1500	4.034	0.947	0.336	0.175
2000	2.685	0.604	0.214	0.121

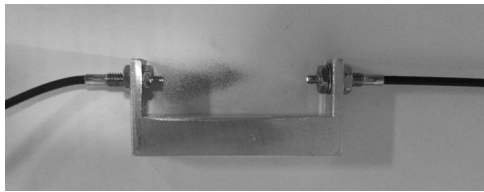


Fig. 3 Optical fiber sensor

두 광섬유 센서의 대향 간극이 20mm인 경우엔 500ppm까지, 30mm인 경우엔 100ppm까지 광의 세기가 변화 없음을 알 수 있으며 간극 50mm에서는 40mm에서 보다 감도가 떨어지므로 센서의 간극은 40mm가 가장 적합하다고 판단하였다.

Fig. 3은 실험 결과값에 의한 최적 거리를 이용하여 제작된 센서의 모습이며, 이 때 사용된 광원은 LANICS의 반도체 레이저(파장; 655nm) LM-6506NG를 사용하였다.

3.1.2 수분에 의한 오염도 측정 장치 구성

Fig. 4는 오일의 수분에 의한 오염을 측정하기 위한 모식도로 오일 탱크에서 오일이 순환하여 다시 오일 탱크로 저장되는 기계 장치를 간단한 모습으로 재현하였다.

수조(W; 250mm, L; 250mm, H; 250mm)는 모든 면이 유리로 되어 실험이 진행되는 동안 내부의 모습을 관찰하기 용이하도록 하였고, 실험이 진행되는 동안 오일의 온도를 히터(3KW)와 디지털 온도계를 이용하여 40°C(±0.5°C)로 제어하였으며, 오일의 양은 10L를 사용하였다. Fig. 5는 실험 시스템의 사진이다.

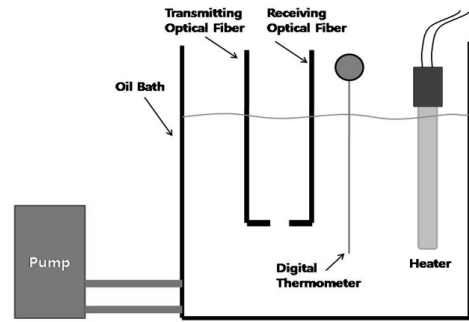


Fig. 4 Overall view of experimental setup of water concentration

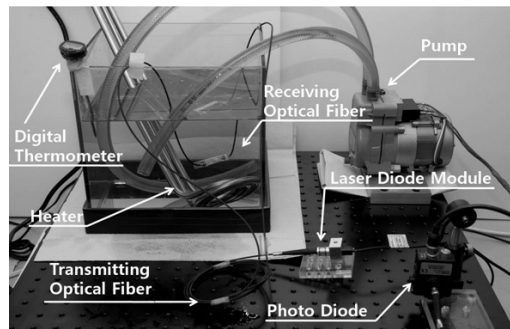


Fig. 5 Experimental setup of water concentration

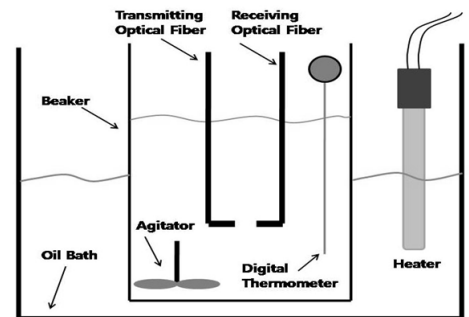


Fig. 6 Overall view of experimental setup of iron powder concentration

3.1.3 아이언 파우더에 의한 오염도 측정 장치 구성

Fig. 6은 아이언 파우더로 인한 오일의 오염을 측정하기 위한 실험 장치의 구성을 나타낸 모식도이다.

수분에 의한 오염도 측정과 센서, 실험 시 오일 온도는 같도록 구성하였다. 다만 오일의 양이 중량은 2Kg으로 줄여서 실험을 하였다.

실험이 진행되는 동안 아이언 파우더의 침전이 이루어지지 않도록 하기 위하여 비커 내부에 교반 장치를 이용하여 실험을 진행하였다⁽⁶⁻⁸⁾.

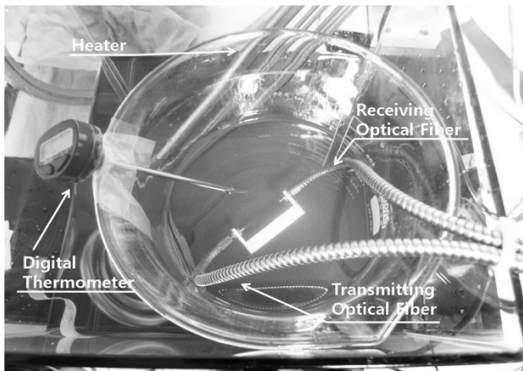


Fig. 7 Experimental setup of iron powder concentration

3.2 실험 요소

3.2.1 오일

본 실험에서 사용한 오일은 한국 하우톤 사의 일반 유압 작동유 Hydro Drive MIH 32로 일반유압장치, 경하중의 기어박스, 터빈, 동작기계 등에 적용 가능한 오일이다. 비중(15/4℃) 0.86, 점도등급 32, 투명한 담황색으로 ASTM(American society for Testing materials) 색상등급 1.5이다. 신유 상태의 오일 수분량은 Solge사의 휴대용 수분측정기를 사용하였고, 신유 상태의 수분량은 140ppm이었다.

3.2.2 아이언 파우더

입자상 오염은 Fe성분의 파우더를 사용하였으며 파우더의 정확한 입도 분석을 충남대학교 공동 실습관에 의뢰하였다. 시료를 총 세 번에 걸쳐 실험을 하였으며, 각각 입자의 평균 크기가 143.71 μ m, 142.23 μ m, 143.34 μ m의 결과를 얻었다.

3.3 실험 결과 및 고찰

3.3.1 수분에 의한 오염도 측정 결과 및 고찰

오일 내의 수분 함유량이 높아질수록 오일은 점점 뿌옇게 탁도가 증가하는 것으로 알려져 있기 때문에 오일 10L에 대한 수분 함유량을 140ppm부터 790ppm까지 50ppm 단위로 0.5ml 씩 첨가하여 함유되는 시점으로부터 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30분 간격으로 광 감도를 측정하였다.

이를 시간에 따른 측정값의 평균을 이용하여 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 센싱 결과의 특성으로 살펴보면 3구간으로 크게 나누어 볼 수 있다. 즉, 구간 L_1 (140ppm~190ppm), 구간 L_2 (190ppm~540ppm), 구간 L_3 (540ppm~790ppm)로 구분할 수 있다.

구간 L_1 은 오일 내의 수분 함유량이 작아 광량에 영향을 미치지 못하였으며, 구간 L_2 는 오일 내의 수분 함유량이 증가하는 것을 광량의 변화를 확인할 수 있었으며 기울기가 급격하여 선형 보간에 의해 수분 함유량을 추측할 수 있는 구간이다. 한

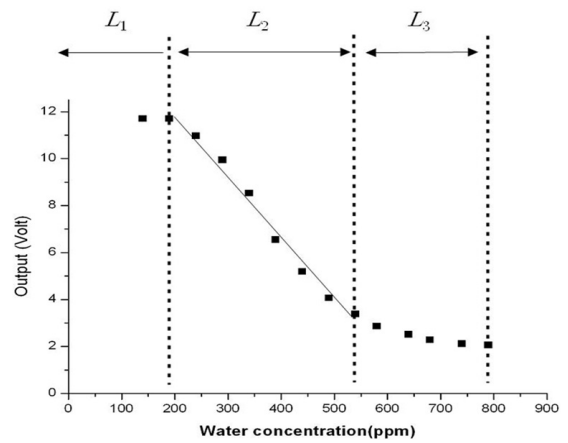


Fig. 8 Average of Experimental results of water concentration

편, 구간 L_3 은 오일 내의 수분량이 증가할 경우 광센서 출력의 특성 변화가 적은 것을 나타내고 있다.

이는 본 실험조건에서는 오일의 탁도가 어느 정도 이하이거나 이상일 경우 광 강도 변화에 영향을 미치지 못함을 알 수 있으며 기계메이커로부터 수분 함유량이 500ppm이상에서 일반적으로 오일을 교체하라는 권장사항과도 일치한다.

구간 L_2 에서는 최소자승법을 이용하여 선형 회귀 곡선의 식을 유도함으로써 수분의 함유량을 대략적으로 추측할 수 있다. 선형회귀 분석의 정규방정식(normal equation)에 의하면 식 (2)와 같다.

$$Y = a_0 + a_1 X - e \quad (2)$$

여기서 a_0 와 a_1 은 각각 절편의 기울기를 나타내는 계수이고 e 는 모델과 측정값 사이의 오차이다. a_0 에 대한 해와 a_1 에 대한 식 (3), (4)와 같이 구할 수 있다.

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (4)$$

이에 구간 L_2 (190ppm~540ppm)의 선형 회귀곡선은 식 (5)와 같다.

$$Y_2 = -0.02478 X_2 + 17.01386 \quad (5)$$

여기서, X 는 오일 내 수분함유량, Y 는 센서의 측정값을 의미하며 선형성은 5.515%로 나타났다.

따라서 이 회귀곡선을 이용하면 센싱 출력량에 따른 수분의 함유량을 모니터링 할 수 있다.

3.3.2 아이언 파우더에 의한 오염도 측정 결과 및 고찰

오일에 철가루와 같은 오염물질이 함유되었을 때 광량의 변화는 어떠한 지를 실험하기 위해 오일에 아이언 파우더가 중량비로 100ppm씩 첨가함으로써 광량의 변화를 살펴보았다. 오염의 정도에 따른 실험 결과를 전압으로 나타내면 100~900ppm까지는 측정이 거의 불가능하여 측정 초기 값을 그대로 나타내었고 1000~4300ppm까지는 측정치의 변화가 현저하게 나타났으며 4300ppm이상에서는 측정치의 변화가 거의 없었다. 질량법에 의한 오일 청정도 기준으로 NAS Class를 주로 이용하는데 실험에 사용한 오일의 비중 0.86으로 정확하게 농도를 환산하면 Table 2와 같다.

따라서 측정 결과를 바탕으로 Table 2의 NAS Class를 보면 102~104class에 해당하며 Fig. 9와 같이 실험 결과에 대해 오염의 정도에 따라 3구간으로 나누어 생각할 수 있다.

이 3구간이 그래프 상으로는 명확히 구별되지는 않지만 NAS103을 기준으로 일정량씩 센싱 출력량이 감소하는 경향을 보이므로 선형 보간에 의해 아이언 파우더의 함유량을 추측할 수 있다. 따라서 NAS 102 구간은 거의 변함이 없으며 NAS

Table 2 Oil pollution standard

NAS Class	mg/100ml	ppm
100	0.02	232.5581
101	0.05	581.3953
102	0.1	1162.791
103	0.3	3488.372
104	0.5	5813.953
105	0.7	8139.535
106	1.0	11627.91
107	2.0	23255.81
108	4.0	46511.63

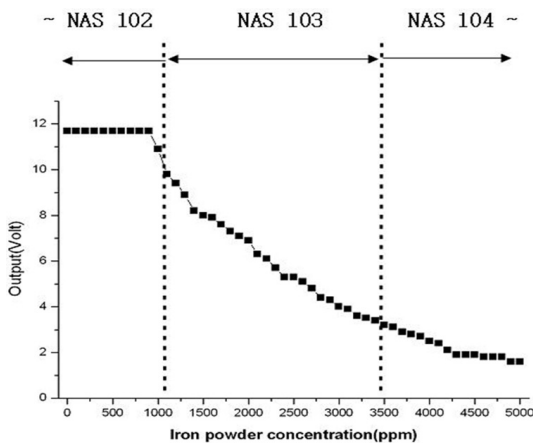


Fig. 9 Experiment result of iron powder concentration (1000ppm ~ 5000ppm) with NAS Class

104 구간도 상당히 경사가 완만하므로 본 실험에서는 NAS 103 구간에 대해 모니터링이 가능할 것으로 판단된다. 이 NAS 103 구간을 최소자승법을 이용하여 선형 회귀 곡선의 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$Y_2 = -0.00265X_2 + 12.07223 \quad (6)$$

이때의 선형성은 8.19%이다.

4. 결론

단일 광섬유 센서를 이용하여 오일의 대표적인 두 가지 오염인자인 수분과 입자상 오염 물질인 아이언 파우더에 의한 오염을 모니터링 하는 감지 시스템의 가능성을 확인하였다. 집광렌즈가 없는 대향형 광섬유 센서를 구성하였고, 오일이 순환하고 있는 오일 저장소에 직접 위치시켜 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 제작된 광섬유 센서를 이용하여 오일 내 수분에 따른 오염을 측정하여 수분량에 따라 3가지 구간으로 나눠 생각할 수 있으며 구간 L_2 (190ppm~540ppm)에 대해서는 오일내의 수분량을 모니터링 할 수 있음을 확인 하였다.
- (2) 제작된 광섬유 센서를 이용하여 입자상 오염 물질인 아이언 파우더에 의한 오일 오염 기준인 NAS 102, 103, 104 Class의 검출이 가능함을 확인하였으며 NAS103 즉, M_2 (1200ppm~3500ppm)구간에 대해서는 오일내의 아이언 파우더의 양을 모니터링 할 수 있음을 확인 하였다.
- (3) 다양한 광섬유의 사양을 적용할 경우, 수분 오염도의 L2 구간과 아이언 파우더 오염도의 NAS 103 구간의 모니터링도 예상된다.

References

- (1) Jeong, S. H., Park, S. J., Hong, W. S., Kim, Y. J., and Koo, K. H., 2003, "An Experimental Study on the Dewatering from the Waste Lubrication Oil by Vacuum Evaporation," *Journal of the Korea Society of Energy Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 216~222.
- (2) Cho, S. Y., Jang, C. J., Kong, H., Yoon, E. -S., and Han, H. G., 2001, "An Experimental Study on the Light Transmission Characteristics with Oil Contamination," *Journal of the Korea Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 482~489.
- (3) Shin, W. C., 2006, *A Design of Multi-mode Optical Fiber Displacement Sensor by Transmitting Light Irradiance*

- Distribution Modeling*, A Thesis for a Doctorate, Chugnam National University, Republic of Korea.
- (4) Hulst, H. C. van de, 1981 *Light Scattering by Small Particle*, Wiley, New York, pp. 470.
- (5) Kang, D. H., Hong, J. H., Shin, W. C., Song, D. S., and Jang, T. S., 2007, "A Study of the Non-counter using Optical Fiber Sensor," *Journal of the Korea Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 231~236.
- (6) Hwang J. H., Kim, J. H., and Kim, Y. J., 2007, "Transient Analysis of Flow Fields in an Agitator with a Draught Tube," *Journal of the Korea Fluid Machinery Association*, Vol. 10, No. 1, pp. 56~63.
- (7) Kim, D. K., Bae, S. T., Kim, J. H., Kim, O. K., and Lee, Y. H., 2006, "A Study about Choice of Industrial Mixer's Impeller Type Concentration Measurement Method and PIV," *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 413~419.
- (8) No, H. Y., 2007, "The Select Method of Agitator," *Journal of the Korea Fluid Machinery Association*, Vol. 10, No. 3, pp. 55~66.
- (9) Cho, S. Y., 2002, *A Study of Machine Condition Monitoring Technique by Oil Contamination Measurement*, A Thesis for a Master's Degree, The University of Seoul, Republic of Korea.
- (10) Joung, S. H., 2007, *A Study of Optical Absorption Spectroscopy for Determining Carbon Nanotube Concentration in Solution*, A Thesis for a Master's Degree, Sungkyunkwan University, Republic of Korea.