

DFSS 를 이용한 홀 효과 기반 회전형 위치 센서의 설계

김 재 은*†

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

DFSS-Based Design of a Hall-Effect Rotary Position Sensor

Jae Eun Kim*†

* Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

(Received August 8, 2011; Revised November 18, 2011; Accepted November 21, 2011)

Key Words : DFSS(6 시그마 기반 설계), Optimization(최적화), Hall Effect(홀 효과), Rotary Position Sensor(회전형 위치 센서), Permanent Magnet(영구 자석)

초록: 본 논문에서는 홀 효과(Hall effect) 기반 회전형 위치 센서의 출력 전압에 대한 선형성 및 민감도를 최적화하기 위해 DFSS(Design for Six Sigma) 방법을 적용하였다. 이를 위해 영구 자석의 치수 및 홀 센서에 대한 상대 위치 등을 설계 인자로 하여 완전 요인 배치법을 사용하였다. 설계 인자의 수준별 센서 출력 전압값은 자속 밀도에 대한 Biot-Savart 해석해 및 홀 센서 고유의 자속 밀도-출력 전압에 대한 관계식을 이용하여 구하였다. 최적화된 설계 인자들을 반영하여 제작된 회전형 위치 센서의 개선된 출력 전압 측정 결과를 통해 제안된 방법은 간편하면서도 실용적으로도 매우 유용한 방법임을 확인하였다.

Abstract: This work presents the application of the DFSS (Design for Six Sigma) methodology to optimizing both the linearity and the sensitivity of the output voltage of a Hall-effect rotary position sensor. To this end, the dimensions and relative positions of a permanent magnet with reference to a Hall sensor are selected as the design factors for a full factorial design. In order to evaluate the output voltage of the rotary position sensor at each run in the experimental design, analytical solutions to the magnetic flux density were obtained using the Biot-Savart law and the relations between the magnetic flux density and the output voltage intrinsic to a Hall sensor. Through measurements of the improved output voltage of the rotary position sensors manufactured using the optimized design factors, the proposed method is shown to be simple and practical.

- 기호설명 -

AP_{max} : 조리개의 최대 회전 각도량 (°)
 AP_0 : 조리개의 최소 회전 각도량 (°)
 AP_{mid} : 조리개의 최대 회전 각도량의 1/2 (°)
 V_{max} : 최대 출력 전압 (V)
 $V_{AP_{mid}}$: AP_{mid} 에서의 출력 전압 (V)
 V_0 : 조리개 회전량이 0° 일 때의 출력 전압 (V)
 V_{min} : 최소 출력 전압 (V)
 D : 영구 자석의 직경 (mm)
 L : 영구 자석의 길이 (mm)
 h : 영구 자석과 홀 센서와의 수평 거리 (mm)
 v : 영구 자석의 홀 센서와의 수직 거리 (mm)

B_r : 반경 방향의 자속 밀도 (T: Tesla)
 B_{res} : 영구 자석의 잔류 자속 밀도 (T: Tesla)
 V_{out} : 회전형 위치 센서의 출력 전압 (V)
 B_H : 홀 센서 면 수직 성분 자속 밀도 (T)

1. 서론

광 투과량 조절용 회전형 위치 센서는 주로 프로젝터, 프로젝션 TV 등의 광 정보 기구에 사용되어 왔으며, 액추에이터에 의한 조리개(aperture)의 회전량을 조절할 수 있게 하여 광량 조절을 통한 화면의 명암비(contrast ratio) 향상을 위해 필요하다.⁽¹⁾ 이러한 회전형 위치 센서를 구현하기 위해 고려할 수 있는 수단으로서 홀(Hall) 소자^(2,3) 및 광(optical) 센서⁽⁴⁾ 등을 고려할 수 있으나, 광 센서는 센서 출력의 좁은 선형 구간(반사형) 및 이물질에 의한 위치 정보의 왜곡 가능성으로 인해

† Corresponding Author, jekim@cu.ac.kr
 © 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

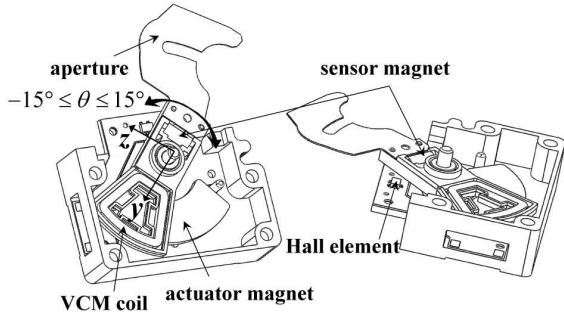


Fig. 1 Schematic illustration of a rotary position sensor based on the Hall effect

본 연구에서는 고려하지 않았다. 그러나, 홀 소자는 광 센서에 비해 단가가 높고 영구 자석을 위한 별도의 공간이 필요하다는 단점이 있는 반면, 광 센서에 못지 않은 우수한 온도 특성을 바탕으로 센서에서 가장 요구되는 특징의 하나인 선형성, 민감도 및 위치 정보에 대한 신뢰성이 우수하다.

Fig. 1 은 본 연구에서 고려한 광 투과량 조절용 구동기를 위한 회전형 위치 센서이며, 홀 소자, 위치 검출용 영구 자석, VCM 코일, 구동용 영구 자석 및 조리개 등을 포함하고 있다. 이 구동기는 조리개의 회전 운동에 의해 광 투과량을 조절하므로 조리개의 위치에 따른 홀 소자 출력 전압의 선형성이 확보되어야 한다. 또한, 보다 정확한 회전 위치에 대한 정보를 얻기 위해서는 구동각 분해능 요구 조건에 부합한 일정 수준 이상의 출력 전압 민감도 또한 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 위치 검출용 영구 자석의 치수 및 홀 소자와의 상대 위치 등을 설계 인자로 하여 DFSS 방법론을 적용하였으며, 최적화된 설계 인자를 반영하여 실제 제작된 제품의 선형성 및 민감도 측정을 통해 제안된 방법이 간편하면서도 매우 실용적인 방법임을 보였다.

2. 회전형 위치 센서의 영구 자석 설계를 위한 DFSS

제품의 연구·개발 단계에서 적용 가능한 DFSS 방법에 대해 몇 가지 모델이 제안된 바 있다^(5,6). 본 논문에서는 회전형 위치 센서의 출력 전압에 대한 선형성 및 민감도를 요구 수준으로 확보하기 위해 DIDOV(Define(정의)/Identify(확인)/Design(설계)/Optimize(최적화)/Validate(검증)) 모델을 적용하였다.

2.1 문제 정의 단계(Define)

본 연구의 회전형 위치 센서는 광 투과량 조절

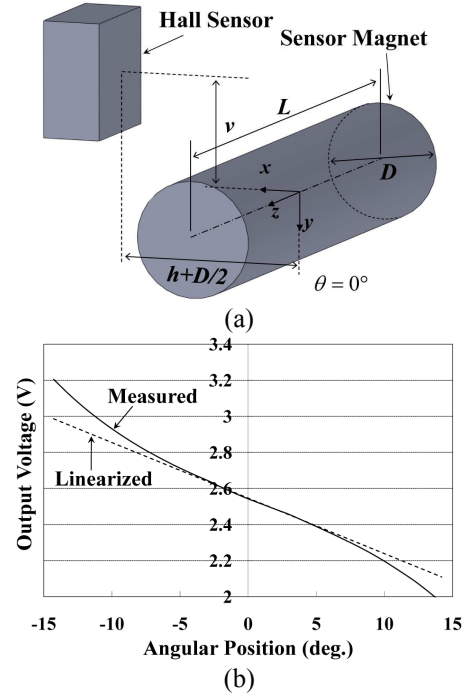


Fig. 2 (a) Configuration of the Hall sensor and sensor magnet in Fig. 1 and (b) measured output voltage from the Hall sensor of an original design

용 구동기의 구동각 판단을 위해 사용되며, 홀 소자에 입사되는 위치 검출용 영구 자석의 자속 밀도 세기에 의해 전압을 출력값으로 제공한다. 그러나, 위치 검출용 영구 자석의 치수 및 홀 소자와의 거리에 따라 출력 전압의 선형성이 심각하게 저하되고 그 값이 낮을 경우 구동각에 대한 신뢰성 문제를 야기한다. 따라서, 조리개의 위치에 대한 정확한 제어를 위해서는 홀 소자의 성능, 위치 검출용 영구 자석의 치수 및 배치를 모두 고려할 수 있는 효율적인 설계 방법이 필요하다. 그러므로, 본 연구에서는 Y 를 센서 출력 전압에 대한 선형성 및 민감도로 선정하고 다음과 같은 개선 목표를 이루고자 한다.

- 개선 목표
 - 출력 전압의 선형성 90% 이상 확보
 - 출력 전압의 민감도 0.08V/deg. 이상 확보

2.2 확인 단계(Identify)

Fig. 1 의 회전형 위치 센서를 구성하고 있는 홀 소자 및 검출용 영구 자석의 특징은 다음과 같다.

- 홀 소자(Allegro MicroSystems, A1321 3-pin)
 - 민감도: 50V/Tesla
 - 무부하 전압(Quiescent Voltage): 2.5 V
 - 출력 전압 범위: 최소 0.2 V, 최대 4.7 V(5 V 공

급 전압의 경우)

- 위치 검출용 영구 자석(N33H(NdFeB))
- $D=2\text{ mm}, L=9\text{ mm}$ (개선 전 모델)
- 잔류 자속 밀도(B_{res}): 1.17 T

또한, Fig. 2 에 회전 각도가 0° 일 때 홀 소자 및 위치 검출용 영구 자석 두 요소간의 상대적 배치 및 개선 전 모델의 센서 출력 전압에 대한 측정 결과를 나타내었다. 회전형 위치 센서의 선형성이 보장되어야 하는 구간은 홀 소자 중앙부를 중심으로 하여 좌우 15° 이내이며, $h=1\text{ mm}, v=2\text{ mm}$ 인 경우 이 구간 내에서의 센서 출력 전압에 대한 측정 값을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 그림의 출력 전압은 선형성 및 민감도가 아래와 같은 식에 의해 각각 79%, 0.04 V/deg.로 계산되었다.

(선형성)

$$\left(\frac{AP_{\max} - AP_0}{V_{\max} - V_0} \cdot \frac{V_{AP_{\text{mid}}} - V_0}{AP_{\text{mid}} - AP_0} \right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

(민감도)

$$\frac{V_{\max} - V_{\min}}{30} \quad (\text{V/deg.}) \quad (2)$$

이러한 측정 결과에 대한 개선 요구 사항으로서 구동 각도의 되먹임 신뢰성을 위해 선형성은 90% 이상, 구동 각도의 분해능 및 외란에 의한 신뢰성을 위해서 전압 민감도는 0.08V/deg. 이상이 되어야 한다. 이를 위해 Fig. 3 과 같은 Fast 도를 전개하여 Y 에 대한 구체적인 기술적 항목을 도출하고 최종 CTQ(Critical To Quality)로서 영구 자석의 치

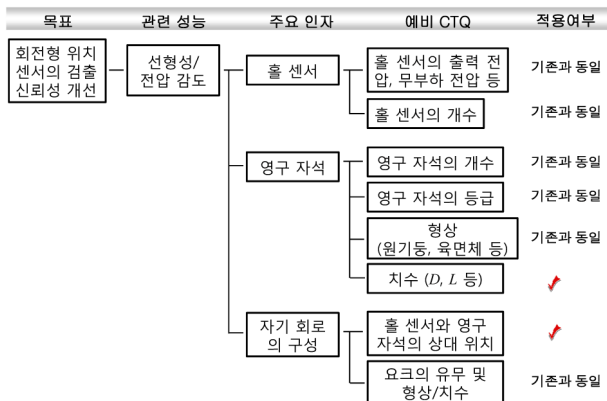


Fig. 3 Fast diagram for extracting the CTQ affecting the performance of the rotary position sensor

수 (D, L) 및 영구 자석과 홀 소자와의 상대적 위치 (h, v) 등을 선정하였다. 특히, 설계 인자 h 는 v 와는 달리 D 의 값에 따른 Hall 소자와의 간섭을 피하기 위해 원통형 영구 자석 표면으로부터의 거리를 나타낸다.

본 연구에서는 도출된 CTQ 에 대한 회전형 위치 센서의 출력 전압을 구하기 위해 우선 다음과 같이 자속 밀도에 대한 Biot-Savart 해석해를 이용하였다⁽⁷⁾(Fig. 4).

$$B_r = \frac{B_{res} D}{4\pi} \int_0^\pi \{B_{sub1}(r, z, \varphi) - B_{sub2}(r, z, \varphi)\} \cos \varphi d\varphi \quad (3)$$

위 식에서 $B_{sub1}(r, z, \varphi)$ 과 $B_{sub2}(r, z, \varphi)$ 는 각각 다음과 같다.

$$B_{sub1}(r, z, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{(z - L^2/4)^2 + (r^2 + D^2/4 - Dr \cos \varphi)}}$$

$$B_{sub2}(r, z, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{(z + L^2/4)^2 + (r^2 + D^2/4 - Dr \cos \varphi)}}$$

식 (3)을 이용하여 검출용 영구 자석으로 인한 홀 소자 중앙부에서의 자속 밀도를 구할 수 있다. 그런데, Fig. 5(a)에 나타낸 바와 같이 검출용 영구 자석은 고정된 홀 소자에 대해 회전 궤적을 갖는다. 따라서, 구동 각도 내의 임의의 위치에 있는 영구 자석과 홀 소자 중앙부 사이의 거리 (r, z)를 알 수 있고, Fig. 5(b)를 고려하면 홀 소자 면에 수직으로 입사하는 자속 밀도값을 구할 수 있다. 마지막으로 홀 소자 고유의 특성인 자속 밀도와 출력 전압 간의 관계를 이용하여 회전형 위치 센서에서 출력되는 전압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{out} = 50 \cdot B_H + 2.5 \quad (\text{unit: V}) \quad (4)$$

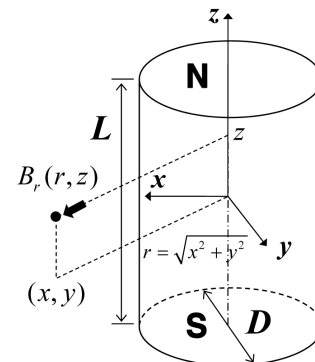


Fig. 4 Arrangements of a Hall element and a cylindrical permanent magnet for the evaluation of magnetic flux density

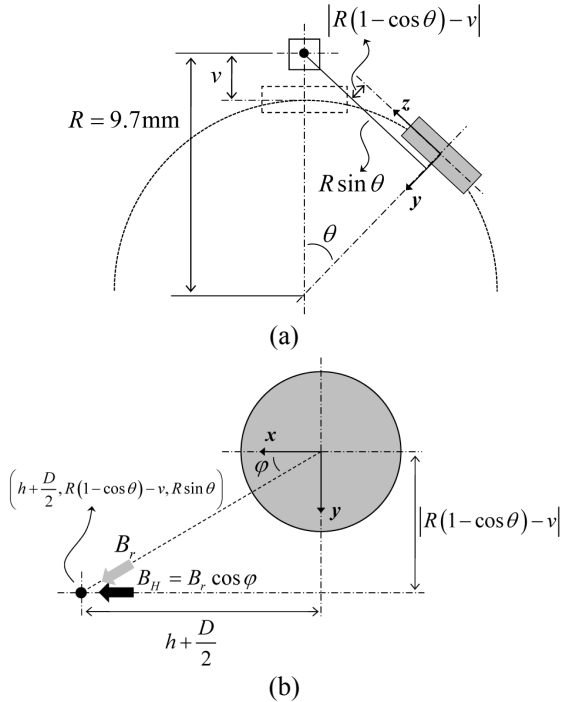


Fig. 5 Relative position of a cylindrical permanent to a Hall sensor; (a) top view and (b) side view

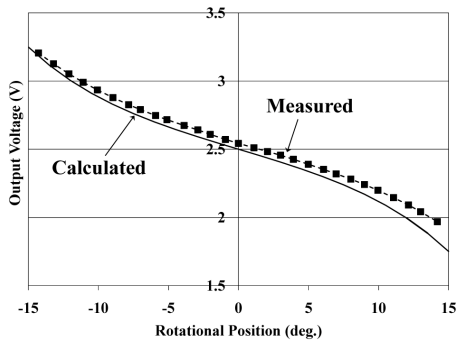


Fig. 6 Measured and calculated sensor output voltage for the model to be improved

회전형 위치 센서에 대한 해석 모델의 타당성을 확인하기 위해 Fig. 2(b)에 나타난 개선 전 모델의 출력 전압 측정 결과와 식 (3) 및 (4)를 이용한 해석 결과를 Fig. 6에서 비교하였다. 이를 통해 회전 각도가 0° 일 때의 출력 전압에 대한 보정을 고려한다면 해석 모델은 측정 결과를 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

2.3 설계 단계(Design)

설계 단계에서는 확인 단계에서 선정된 예비 CTQ 에 대해 수준별로 인자의 영향 분석을 실시하였다. 설계 제한 조건을 고려하여 Table 1 과 같이 D 및 h 에 대해서는 2 수준으로, 나머지 인자들에 대해서는 3 수준으로 설정하였다. 우선, Fig. 7

Table 1 Design factors and levels for the general full factorial design

인자 수준	L	D	h	v
1	7.0	2.0	1.0	1.0
2	8.0	3.0	2.0	2.0
3	9.0	-	-	3.0

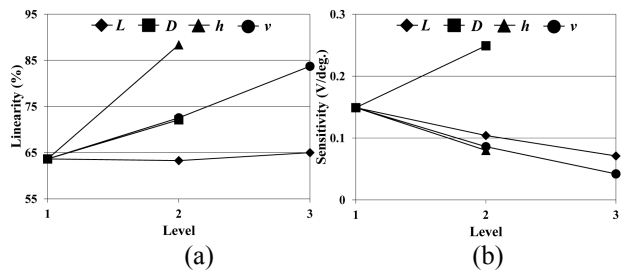


Fig. 7 Scatter plots of the linearity and sensitivity for each factor with the other remaining factors fixed (one-factor-at-a-time approach)

은 정성적으로 각 인자의 영향도를 분석하기 위한 것으로서 대상 인자를 제외한 모든 인자의 수준을 1 수준으로 고정하고 그 인자의 수준 변화에 대해서만 선형성 및 민감도를 나타낸 것이다. 그림에 보인 바와 같이 선형성은 각 인자의 수준이 증가할수록 증가하였으며, 민감도는 영구 자석의 L 인자를 제외한 나머지 3 개 인자의 수준이 증가할수록 감소하였다. 그런데, L 인자의 수준 변화에 대한 선형성의 증가가 매우 적어 선형성 개선을 위한 L 인자의 유의성에 대해 정량적인 확인이 필요하다. Fig. 8 에 분산 분석(ANOVA) 결과를 나타내었으며, 4 개 인자에 대한 주 효과의 유의 확률 P 값이 0.05 이하로 매우 작으므로, 이들 모두 선형성과 민감도를 최적화하기 위해 유의한 인자임을 알 수 있다.

2.4 최적화 단계(Optimize)

설계 단계에서 유의한 것으로 확인된 CTQ 4 개 인자 (L, D, h, v)에 대해서 일반 완전 요인 실험 계획법을 실시하였다.⁽⁸⁾ Fig. 9 및 Fig. 10 에 선형성과 민감도에 대한 요인 분석을 나타내었다. Fig. 9 의 선형성 요인 분석에서 L 을 제외한 인자의 수준이 증가할수록 선형성이 증가함을 알 수 있다. 선형성만을 고려한다면 (L, D, h, v)의 값이 (7, 3, 2, 3) 일 때 최적값을 가지며 이 경우 95.9%의 선형성을 가진다(민감도는 0.07V/deg.). 그러나, Fig. 10 의 민감도 요인 분석에 있어서는 D 를 제외한 인자의 수준이 증가할수록 민감도가 감소한다. 이는 홀

Analysis of Variance for Linearity, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
L	2	181.099	181.099	90.549	2670.42	0.000
D	1	183.061	183.061	183.061	5398.70	0.000
h	1	1736.667	1736.667	1736.667	51216.52	0.000
v	2	502.417	502.417	251.208	7408.46	0.000
L*D	2	0.106	0.106	0.053	1.56	0.316
L*h	2	37.254	37.254	18.627	549.33	0.000
L*v	4	9.505	9.505	2.376	70.08	0.001
D*h	1	4.840	4.840	4.840	142.74	0.000
D*v	2	20.449	20.449	10.225	301.54	0.000
h*v	2	134.787	134.787	67.394	1987.53	0.000
L*D*h	2	0.160	0.160	0.080	2.36	0.210
L*D*v	4	0.308	0.308	0.077	2.27	0.223
L*h*v	4	13.139	13.139	3.285	96.87	0.000
D*h*v	2	2.414	2.414	1.207	35.60	0.003
Error	4	0.136	0.136	0.034		
Total	35	2826.341				

S = 0.184142 R-Sq = 100.00% R-Sq(adj) = 99.96%

(a)

Analysis of Variance for Sensitivity, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
L	2	0.008029	0.008029	0.004014	1050.83	0.000
D	1	0.0244923	0.0244923	0.0244923	5781.78	0.000
h	1	0.0090567	0.0090567	0.0090567	2137.97	0.000
v	2	0.0280194	0.0280194	0.0140097	3307.21	0.000
L*D	2	0.0004687	0.0004687	0.0002343	55.32	0.001
L*h	2	0.0016889	0.0016889	0.0008444	199.34	0.000
L*v	4	0.0025949	0.0025949	0.0006487	153.14	0.000
D*h	1	0.0010134	0.0010134	0.0010134	239.22	0.000
D*v	2	0.0013032	0.0013032	0.0006516	153.82	0.000
h*v	2	0.0032961	0.0032961	0.0016480	389.04	0.000
L*D*h	2	0.0000989	0.0000989	0.0000494	11.44	0.222
L*D*v	4	0.0000642	0.0000642	0.0000160	3.79	0.113
L*h*v	4	0.0007406	0.0007406	0.0001852	43.71	0.001
D*h*v	2	0.0001321	0.0001321	0.0000660	15.59	0.013
Error	4	0.0000169	0.0000169	0.0000042		
Total	35	0.0818870				

S = 0.00205818 R-Sq = 99.98% R-Sq(adj) = 99.82%

(b)

Fig. 8 Analysis of factorial design for (a) the linearity and (b) sensitivity with the 4th order interaction effects neglected

소자와 영구 자석과의 거리에 관계하는 h 및 v 가 작을수록 홀 소자로 입력되는 자속이 증가하며, L 이 증가할수록 자석의 양 끝단에서 나오는 자속이 홀 소자로 들어가는 경로가 길어지기 때문이다. 민감도 요인 분석만을 고려한다면 (L, D, h, v)의 값이 (7, 3, 1, 1)인 경우 최적임을 알 수 있고 이 경우 민감도 값은 0.25V/deg.로서 최대값을 갖는다. 그러나, 이 경우 구동 회전각 양 끝 부근에서 홀 소자 최소/최대 출력 전압 범위를 초과하여 위치 검출력이 없어지며, 센서의 일반적인 요구 특성으로서 선형성이 민감도보다 우선 고려되어야 하지만 선형성이 72.1%로서 상당한 비선형성을 갖는다. 따라서, 선형성 및 민감도 인자 분석의 h 와 v 의 교호 작용을 참고해서 선형성의 관점에서 h 는 2 mm 가 되어야 하며, 이 경우 민감도가 최대이기 위해서 v 는 1 mm 가 되어야 함을 알 수 있다. 이 경우 선형성은 93.7%, 민감도는 0.11V/deg. 로 계산되었으며, 이는 개선 목표 수준 이상의 선형성 및 민감도임을 알 수 있다.

2.5 검증 단계(Validate)

최적화된 CTQ 인자들을 반영하여 Fig. 11(a)에 보인 바와 같은 회전형 위치 센서를 제작하고 구동 회전 각도($-15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$)에 따른 홀 소자 출

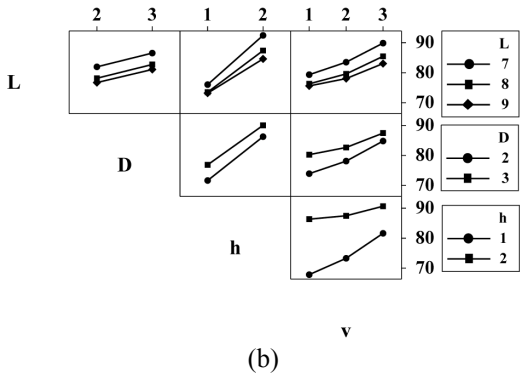
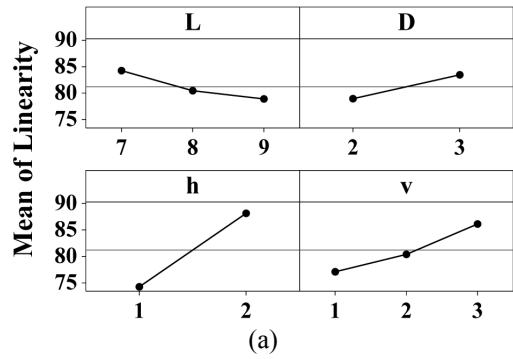


Fig. 9 (a) Main and (b) interaction effects plot for the linearity

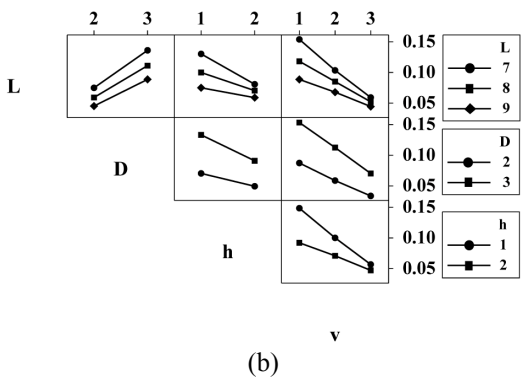
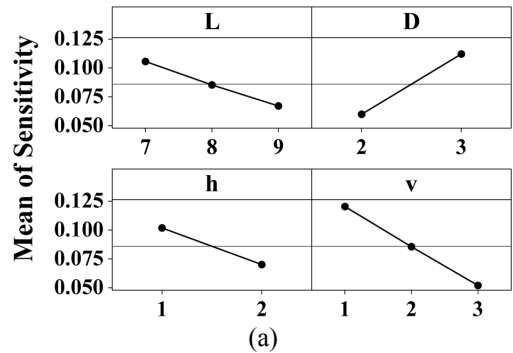


Fig. 10 (a) Main and (b) interaction effects plot for the sensitivity

력 전압을 측정하고 이를 Fig. 11(b)에 개선 전 모델의 결과와 비교하여 나타내었다. Table 2 에 보인

Table 2 Improvements of the linearity and sensitivity (values in parenthesis are calculated)

구 분	개선 전	목 표	개선 후
Linearity (%)	79	90	96 (94)
Sensitivity (V/deg.)	0.04	0.08	0.09 (0.11)

Biot-Savart 해석해를 이용하여 조리개의 회전 위치에 따른 자속 밀도를 구한 후 홀 소자 고유의 자속 밀도/출력 전압에 대한 관계식을 이용하였다. 최적화된 설계 인자를 반영하여 제작된 회전형 위치 센서의 선형성 및 민감도는 각각 79 %에서 96 %, 0.04 V/deg. 에서 0.09 V/deg.로 개선되었으며, 이를 통해 제안한 방법이 매우 효과적임을 보였다.

후 기

본 연구는 2011 학년도 대구가톨릭대학교 연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- (1) Kim, J. E., Yun, G.-T., Lee, J., Hong, S.-N., Ko, E.-S., Ju, C. M. and Yang, S. S., 2006, "Development of a Contrast Enhancer for MD Projection TV," *Proceedings of the KSNVE Spring Annual Conference*, pp. 656~659.
- (2) Popovic, R. S., Flanagan, J. A. and Besse, P. A., 1996, "The Future of Magnetic Sensors," *Sensors and Actuators A*, Vol. 56, pp. 39~55.
- (3) Schott, C., Racz, R. and Huber, S., 2006, "Novel Analog Magnetic Angle Sensor with Linear Output," *Sensors and Actuators A*, Vol. 132, pp. 165~170.
- (4) Solgaard, O., 2009, *Photonic Microsystems*, Springer US.
- (5) Douglas, P. M., 2002, "Column: Frontiers of Quality: Design for Six Sigma," *Quality Progress*, Vol. July, pp. 82~86.
- (6) Jiju, A., 2002, "Design for Six Sigma: a Breakthrough Business Improvement Strategy for Achieving Competitive Advantage," *Work Study*, Vol. 51, No. 1, pp. 6~8.
- (7) Grechishkin, R. M., Afanasieva, L. E., Pastushenkov, Y. G. and Maksimov, N. N., 1994, "Analysis of a Linear Position Sensor with a Hall Effect Element," *Measurement and Science Technology*, Vol. 5, pp. 853~860.
- (8) Montgomery, D. C., 2009, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.

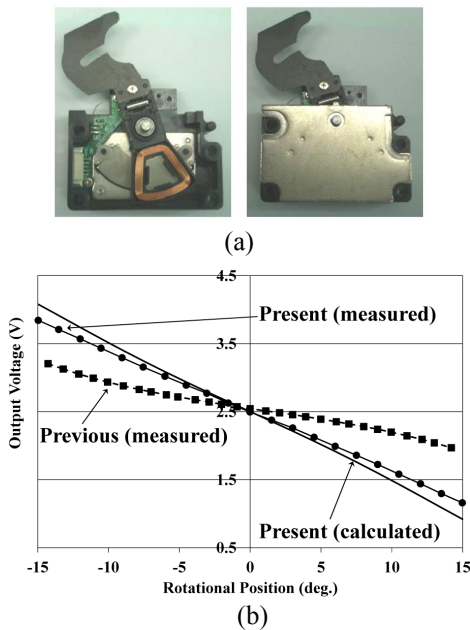


Fig. 11 (a) Improved sample model and (b) a plot of the sensor output voltage

바와 같이 DIDOV 모델의 DFSS 방법론을 적용하여 선형성 및 민감도에 대한 개선 목표 수준이 달성 되었음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 광 투과량 조절용 구동기에 사용되는 회전형 위치 센서의 출력 전압에 대한 선형성과 민감도를 개선하기 위해 DFSS 방법론의 DIDOV 모델을 적용하였다. 특성치 계산을 위해