

전동식 파워스티어링(EPS)용 토크센서의 설계원리와 성능테스트

이 응 신*

서울대학교 기계항공공학부 기계역학실험실

Principle of Design and Performance of the Torque Sensor for a Electrical Power Steering

Eung-Shin Lee*

Machine Dynamics Lab., School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received 1 April 2005 / Accepted 12 June 2005)

Abstract : This paper describes the attributes, performance and development status of a high performance capacitive torque sensor intended for use in a electric power steering (EPS) system. The EPS system is composed of torque sensor, ECU, motor, gears and etc. Among the elements, torque sensor in the steering column is one of the core technologies. The new capacitive torque sensor in this paper is developed differently from working principle and mechanical structure compare to extant torque sensors in market and patent. Based on the result of numerical analysis, a experimental equipment is made which is composed of a test jig and a capacitive sensor and validity of numerical analysis and feasibility of the torque sensor are verified.

Key words : Electric power steering(전동식파워스티어링), Torque sensor(토크센서), Capacitance(정전용량), FEMLAB (팸랩; 유한요소해석), Car(자동차), Steering-by-wire(컬럼없는 조향장치)

Nomenclature

- A : area, m^2
- C : capacitance, F
- T : torque, Nm
- G : torsional rigidity, Nm/rad

Subscripts

- EPS : electric power steering
- MRS : magnetoresistance sensor
- ECU : electric control unit

1. 서론

전동식 파워스티어링에 대한 국내 연구는 1997년 장봉춘¹⁾이 모델을 세워 조향에 대하여 수학적으로 해석했고, 김지훈³⁾은 토크맵을 이용하여 컬럼형 EPS의 제어로직을 연구하였다. 그러나 EPS의 핵심 부품인 토크센서에 대한 연구는 거의 없다. 아마 토크센서의 개발은 전기 분야에서 다루어야 한다는 생각 때문일 지도 모르나 실제로 역학적인 구조가 토크 발생에 대한 정확한 전기 신호를 낼 수 있는가에 대해서는 기계적인 분야의 선행연구가 부족한 측면이 많다고 볼 수 있다.

세계의 특허를 조사하면 EPS용 토크센서의 출원 건수는 일만건을 훌쩍 뛰어넘는다. 국내는 전동식

*To whom correspondence should be addressed.
eisenbahn@mailvib.snu.ac.kr

파워스티어링의 전체 배치나 조향원리, 제어 시스템 개발에 치중하고 있고 토크 센서 개발은 거의 없다[2]. 국외에서도 토크센서에 대한 연구가 있다고 해도 상업적인 이유에서 구조나 작동 원리는 거의 알려지지 않고 성능에 대한 분석 정도가 있을 뿐이다.⁹⁾

본 논문에서 다루고 있는 토크센서는 독자적인 원천기술의 확보와 고부가가치화를 달성하기 위해 수행된 산학프로젝트에서 결과물이다. 본고에서는 토크센서의 설계 개념과 과정, 세계에서 처음으로 개발한 EPS용 정전용량식 토크센서에 대한 설계 개념과 성능평가, 그리고 상용화로 가는 과정에 대하여 언급하려고 한다.

2. 토크센서 설계

2.1 설계 원리

2.1.1 설계상 제약 조건

차량에 사용하는 EPS용 토크센서는 일반적으로 사용하는 스트레인 게이지 방식과 같은 토크센서에 비해 구조나 환경에 의해 크게 제약을 받는다.

첫째로, 스티어링 휠은 세바퀴 정도 회전하기 때문에 회전축에다가 검출장치를 설치해서는 전선이 꼬여서 곤란하다. 따라서 검출부의 회로는 회전축이 아닌 하우징 부근에 있어야 한다. 이런 구조는 토크센서를 설계하는데 가장 큰 제약으로 작용한다.

둘째, EPS의 토크센서는 자동차의 환경 변화에도 무난히 작동해야 한다. 특히 온도는 영하 40도에서 영상 120도까지 변할 수 있다. 차량이기 때문에 핸들의 킬럼으로 전해오는 진동 영향을 최소로 해서 운전자의 조향의지에 의한 토크 발생인지 진동에 의한 흔들림인지 구분 가능해야 한다. 또 습기뿐만 아니라 물이 될 때나 기름이나 먼지와 같은 오염물질이 있어도 작동해야 한다.

셋째, 차량이 움직이기 시작하면 조향장치는 정지하여 시동을 끌 때까지 계속 작동을 해야 하므로 보증기간은 물론 차량의 수명까지 아무런 부품 교체 없이 작동해야 한다. 따라서 토크센서는 비접촉식인 구조를 가져야 한다.

넷째, 최악의 경우 토크센서가 작동을 하지 않더라도 기존의 기계적인 조향장치에 의해 차량의 방

향을 조정할 수 있어야 한다. 따라서 Steering - by - wire와 같은 방식은 당분간 피해야 한다.

다섯째, 국내는 물론 국제적인 특허출원이 가능하도록 기존의 특허와 달라야 한다.

2.1.2 EPS와 토크센서 구조

토크센서는 운전자가 스티어링 휠을 돌릴 때 토션바가 비틀리는 정도와 속도를 감지하여 ECU에 제공한다(Fig. 1).

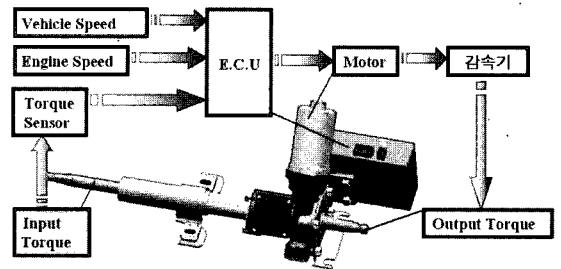


Fig. 1 Control block diagram for EPS

ABS나 엔진의 토크를 구할 때처럼 회전 각도나 회전수만 알아내면 충분하다고 생각할지 모르나 본격적으로 회전을 시작하기 전에 회전 방향으로 전기 모터가 보조동력을 발생시켜 운전자를 도와야 하므로 초기에 운전자의 조향의지를 토크변화로 읽어내야 한다.

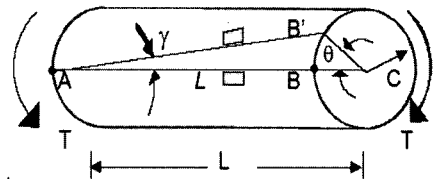


Fig. 2 Torsional deflection due to torque

Fig. 2는 스티어링 휠과 바퀴를 연결하는 킬럼에 장착한 토션바의 단면을 확대하여 그린 모식도다. 휠을 돌려 초기에 토크가 발생했다고 하면 원래의 위치 B에서 나중 위치 B'까지 회전하므로 회전각도 θ 는 토크에 비례한다. 회전각도 θ 를 측정하는 방법을 고안하면 토크를 계산할 수 있다.

$$T = G \frac{\theta}{L} I_p \quad (I_p = \int r^2 dA) \quad (1)$$

토션바의 표면에 비틀림 정도인 γ 를 직접 측정하는 것이 스트레인 게이지를 장착하는 방법이다. 그러나 EPS에서는 스트레인 게이지를 사용할 수 없으므로 축 바깥쪽에서 비틀림 γ 를 측정하는 여러 가지 방법을 고안해야 한다. MRS식 토크센서는 비틀림이 일어나는 표면에 자성을 띤 물체를 입혀놓고 비틀림이 일어날 때 축 바깥에서 자성체의 정렬을 감지하는 방식이다.

비틀림 때 발생하는 전단응력을 45도 방향으로 돌렸을 때 주응력이라고 하면 관계식 (2)에 의해 주응력과 토크관계를 계산할 수 있다.

$$e = \frac{\sigma}{2G} = \frac{T}{\pi Gr^3} \rightarrow T = \frac{\pi r^3 \sigma}{2} \quad (2)$$

이렇게 전단응력을 축방향으로 45도 기울여 측정하면 국소적인 변화만으로도 토크를 계산할 수 있다. 각 업체에서는 스트레인 게이지가 아니라 자성 검출이나 광방식으로 전단응력을 알아낼 수 있는 센서를 만드는 방법을 고안하고 있다.

Fig. 3처럼 토션바에서 멀리 떨어진 곳에 회전각도를 지름방향으로 증폭시킬 수 있는 링을 두 개 달고 토션바의 비틀림을 최대로 하여 링의 회전 정도를 회전축 바깥에서 감지하는 형태로 하면 토크센서를 만들 수 있다. 링표면에 바코드를 새겨 회전 여부를 판단하는 형태가 독일의 B사에서 만든 광방식 토크센서다.

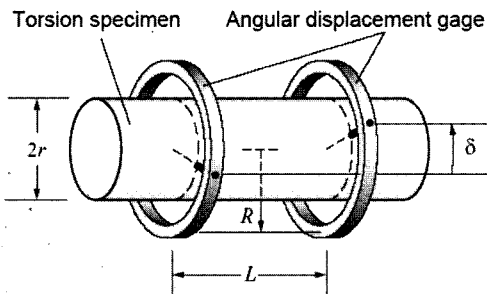


Fig. 3 structure of a torque detection

본 연구에서는 토션바의 회전을 증폭하는 바깥쪽에 치차를 만들어 치차가 회전하는 정도를 감지하여 토션바의 비틀림을 알아내는 구조를 택했다. 아래 Photo. 1은 제작을 한 토크센서의 치차부분이다.

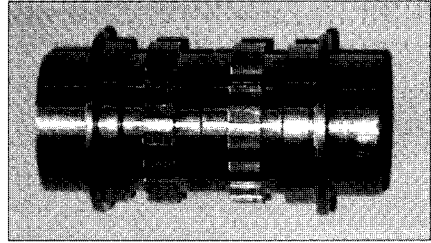
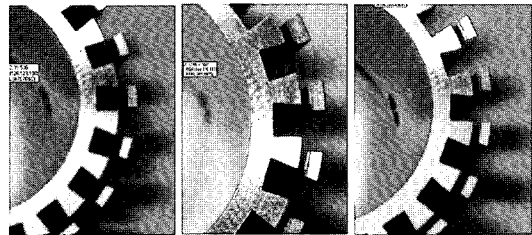


Photo. 1 Teeth assembly of a capacitive sensor

일회전이 360도기 때문에 40 개로 세분하면 치차 하나 당 9도 각도를 이룬다. 치차 하나에 시계방향 4.5도, 반시계방향 4.5도를 할당할 수 있으므로 토션바의 비틀림 강도에 의해 이 각도가 완전히 나오기 전에 전동모터를 돌려 보조동력을 주어야만 한다.

Photo. 2는 치차부분의 단면도다. 가운데 (b)는 안쪽 치차와 절반이 어긋나도록 바깥쪽 치차(센서의 감지면)를 위치시킨 상태로 휠을 돌리지 않은 중립 상태, 4.5도 반시계방향으로 최대로 회전한 상태가 (a), 시계방향으로 최대로 회전한 상태가 (c)다.



(a) CCW (b) neutral (c) CW

Photo. 2 Cross section of the teeth assembly

바깥쪽 얇은 치차는 센서의 감지면으로 안쪽 치차와 상대적인 회전 상태를 검출하면 된다. 치차모양으로 만든 이유는 어긋남 정도를 치차폭에 해당하는 각도만큼 미세하게 알아내고 보조동력이 주어졌을 때 스티어링 휠이 돌아가는 정도에 알맞게 회전 상태까지 체크하기 위해서다.

2.2 정전용량형 토크센서

정전용량형 센서는 감지물체와 감지면 사이의 정전용량변화를 알아내는 센서로 아래 식 (3)과 같이 유전체의 정전용량, 거리변화 및 면적변화가 정전용량에 영향을 준다.

$$C = e \frac{A}{d} \quad (e : \text{유전율}) \quad (3)$$

바깥쪽 전극판과 안쪽 치차 사이의 정전용량값은 안쪽 치차의 회전 정도에 따라 대향 면적 A가 달라 지므로 대향면적의 변화를 감지하면 된다. 따라서 대향면적의 변화에 상당하는 정전용량값의 변화를 검출할 수 있는 센서를 제작한다면 토크에 의해 비 틀리는 정도를 안쪽 치차의 회전만으로도 알아낼 수 있다(Fig. 4).

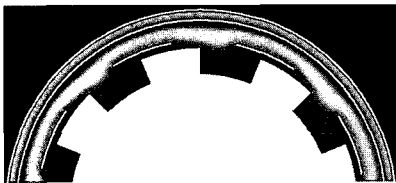


Fig. 4 FEM-interpretation of capacitive sensor

입력단 치차의 회전이 정전용량값의 변화로 나타나고 실제로 센서를 제작한다면 전압값의 변화를 측정할 수 있다. 결국 입력단과 출력단의 전압변화를 측정하면 전압값의 차이로 토크를 계산할 수 있다.

Fig. 5의 위 그래프와 같이 입력단이나 출력단 치차가 시계방향이나 반시계방향으로 회전할 때 회전각도에 따른 토크센서의 출력전압과의 관계다. 아래 그래프는 실제로 ECU에서 토크센서로부터 받아들이는 시간 변화에 따른 토크센서의 출력전압이다. 출력단의 전압이 증가를 시작하는 시점은 순전히 제어로직에서 조절해야 한다. 실제 상업용 토크센서에서는 비틀림 각도가 1~2도 사이값을 가질 때 보조동력을 준다.

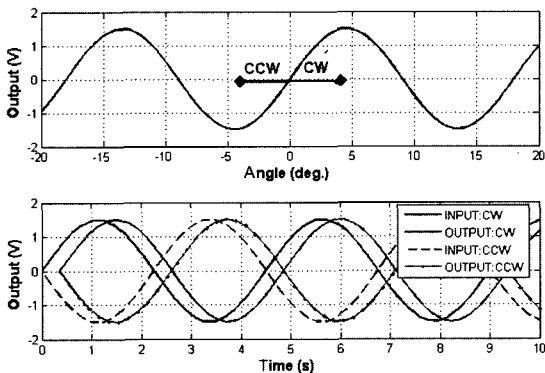


Fig. 5 Diagram of output signals

업체에서는 시간에 따른 출력전압을 보면서 휠의 회전속도와 회전각, 감쇠 정도, 토크 등을 종합적으로 계산하여 토크맵을 작성한다. 토크맵에서 해당 토크에 상응하는 모터 구동전류를 계산하여 보조동력으로 삼는 알고리즘은 업체의 기밀사항이다. 출력전압은 센서의 회로에서 조절 가능하기 때문에 역지로 회전각도에 따른 출력전압을 고정시킬 필요가 없다. 또한 출력전압이 너무 낮을 때는 S/N비를 충족하는 범위내에서 OP앰프에서 얼마든지 증가시킬 수 있고, 출력전압값의 영점 조절도 ECU에서 하므로 토크센서는 회전각도에 따른 출력전압 변화만 정확하게 내주면 된다.

3. 실험과 결과 분석

3.1 테스트용 정전용량형 토크센서

차량에 장착할 실제 토크센서가 아니라 센서의 기계적인 구조나 설계가 얼마나 충실히 출력전압에 반영되는가를 알아보기 위해 평판 형태로 제작하여 테스트를 하였다. 평판 형태로 만들면 높이 변화는 물론 평면 이동도 쉽기 때문에 출력차가 최대로 되는 높이와 치차폭을 찾아낼 수 있으므로 나중에 차량에 장착할 완제품의 치수를 결정하는데 도움을 받을 수 있다.

Photo. 3과 같이 치차와 전극, 수평이동과 수직이동을 원활하게 할 수 있는 지그를 제작하였다. 전극은 기판을 이용하여 얇게 만들었고 외부에 정전용량 변화를 검출할 센서 회로부분을 설치하였다. 치차의 이동은 마이크로미터를 사용하여 0.001 mm까지 측정하였다.

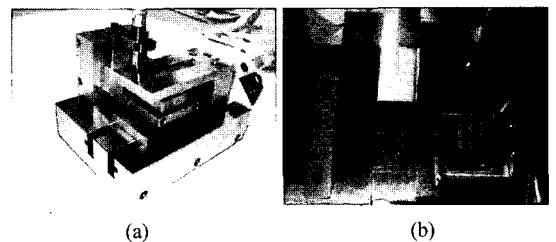


Photo. 3 Test jig(a) and sensing part of an electrode(b)

3.2 시뮬레이션

실제 실험 상황을 모델링하여 유한해석 프로그램

인 FEMLAB3으로 시뮬레이션하였다. Fig. 6은 FEMLAB으로 계산한 정전장의 모양이고, Fig. 7은 정전용량의 값을 계산한 결과다. 치차가 전극을 벗어나기 때문에 왼쪽으로 이동하면서 전체값이 줄어들 수 있다.



Fig. 6 Static electric field with FEMLAB3

3.3 실험결과와 시뮬레이션 결과 비교

FEMLAB은 정전장을 계산할 뿐만 아니라 전극 사이의 정전장을 이용하여 정전용량을 계산할 수 있다. Fig. 7은 치차가 왼쪽으로 이동할 때 계산한 정전용량이다. 치차가 왼쪽으로 이동하였으나 그래프 상에서는 실험결과와 비교하기 위해 오른쪽으로 수치가 증가하도록 배치하였다.

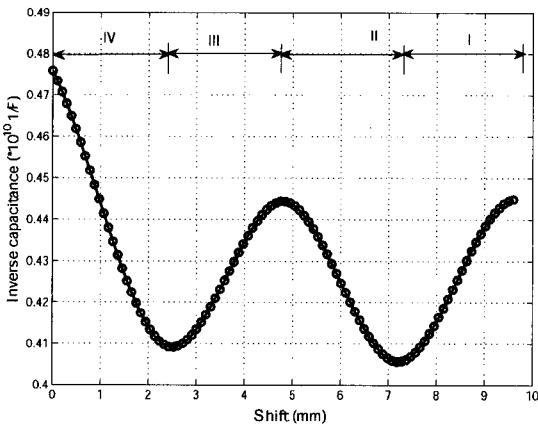


Fig. 7 Simulation: capacitance by teeth movement

실험결과는 Fig. 8과 같다. 치차를 왼쪽으로 이동시키면 출력전압이 계속 높아진다. 정전용량값과 출력전압은 반비례 관계에 있으므로 줄어드는 정전용량값에 따라 출력전압은 높아진다.

출력전압의 아래쪽 부분이 밀함을 볼 수 있는데 앞으로 회로에서 수정을 하면 원하는 정현곡선(sine curve)에 가까운 출력을 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

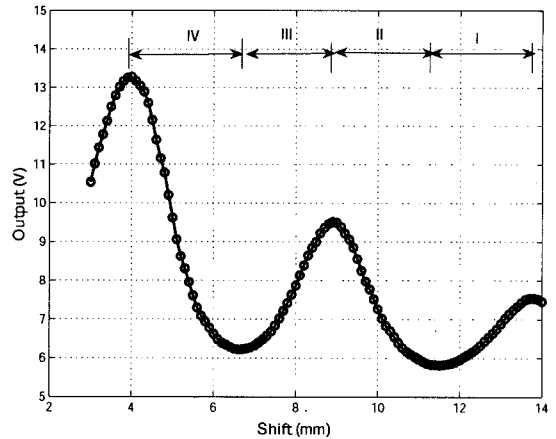


Fig. 8 Experiment: Output voltage

실제로 원통형으로 완제품을 만든다면 출력전압이 일정한 폭으로 회전각에 따라 변할 것으로 예상하고 있다. 본 연구에서 설계한 토크센서는 토션바를 좌우로 5도 비틀 때 최대 토크가 70 kgfcm가 걸리는 것을 감지할 수 있다.

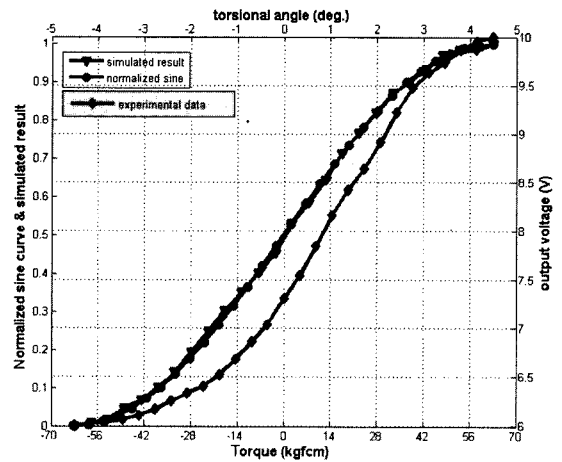


Fig. 9 Normalized output signals and experiment

차량에서는 발전기의 교류를 정류해서 사용하기 때문에 직류값의 요동(ripple) 성분에 의해 각도와 토크 해상도가 차이가 난다. 실험실에서 Tektronix의 직류변환기를 사용하였으나 요동값의 표준편차가 $\sigma_1=0.0209$ (V) 정도고 이 값은 센서의 출력에도 그대로 반영되었다. 따라서 본 토크센서의 각도 분해능은 대략 0.0225도 정도가 된다. 배터리를 이용

한 출력값의 요동은 정류한 직류값의 절반 정도니까 각도 분해능은 더욱 향상될 수 있다. 아날로그 출력에서 이론적인 각도 분해능은 측정하는 최소값에 의해 무한히 세분하여 향상시킬 수 있으나 실제로는 정류한 직류 성분의 요동에 의해 제한된다.

현재 상용으로 나온 B사의 토크센서는 디지털 출력을 내며 각도 분해능은 카탈로그에 0.01도로 나오기 때문에 본 연구에서 제작한 정전용량형 토크센서도 상용으로 사용할 수 있는 각도 분해능을 지녔다고 할 수 있다.

구간 II에서 시뮬레이션한 값은 거의 정현곡선과 비슷하나 실제 측정값은 아래로 떨어지는 경향이 있다. 이런 특성은 센서가 감지대상이 없어졌을 때 출력신호를 내지 않고 작동을 멈추는 현상을 막기 위해 의도적으로 아랫부분을 밀하게 만든 이유라고 볼 수 있다.

제어로직에서 영점을 옮기고 곡선부분을 증폭하여 직선화시켜 가운데 부분을 사용하든 지 아니면 일대일 대응을 이용한 정현곡선의 출력을 이용할 수 있다. 본 연구에서 제작한 정전용량형 토크센서는 토션바의 비틀림을 정확하게 출력전압으로 내주기 때문에 실제로 토크센서의 역할을 충분히 할 수 있고 설계한대로 작동하였다.

4. 결 론

산업계에서 근접센서로 사용하는 정전용량형 센서는 주로 작동거리 내에서 감지물체와 감지전극사이의 거리 변화에 따른 On-Off 출력을 낸다. 면적변화에 따른 정밀한 아날로그 출력을 이용한 토크센서는 본 연구에서 처음 시도하였으며 출력, 전압값을 잘 이용하면 토크센서로 충분한 역할을 할 수 있다. 본고에서는 세계에서 처음으로 정전용량형 센서를 토크센서에 적용하여 제작까지 하였다. 다른 센서에 비해 근접센서로써 정전용량형 센서는 아주 좋은 출력을 내고 있으나 토크센서에 적용하기에는 아직도 해결해야 할 과제가 산더미처럼 쌓여있다.

원통형의 완전한 토크센서 제작을 앞두고 특성을

충분히 파악하기 위해 평판으로 근사하여 수치해석과 실험결과를 비교하였다. 출력을 점검해 본 결과 토크센서로 사용하기에 충분하다는 결론을 내릴 수 있었다. 현재 완전한 토크센서의 제작이 완료되었고 출력을 테스트하여 상용화 여부를 검토할 예정이다. 완전한 토크센서를 제작하였다고 해도 업계에서 만족할만한 상용 토크센서로 개발하려면 거쳐야 할 과정이 많이 남아있다.

후 기

본 연구를 지원해주신 (주)만도에 감사드립니다.

References

- 1) J. M. Lee and E.-S. Lee, "A Study on Development of the Torque Sensor: Technical Report II," Seoul National University, 2004.
- 2) B. C. Jang and S. C. Lee, "A Mathematical Model of a Power Steering System," Transactions of KSAE, Vol.5, No.4, pp.39-47, 1997.
- 3) J. H. Kim and J.-B. Song, "Control Logic Using Torque Map for a Column-Type Electric Power Steering System," Transactions of KSAE, Vol.8, No.14, pp.186-193, 2002.
- 4) G. Y. Kim and T. H. Kim, "A Study on Design and Development of the Electronically Controlled Power Steering Controller for a Passenger Car," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.166-174, 2002.
- 5) W. Ijiri and T. Tsutsui, "Technical Trends of Electric Power Steering Systems," Koyo Engineering Journal, No.162E, 2003.
- 6) J. Marek, H.-P. Trah, Y. Suzuki and I. Yokomori, "Sensors for Automotive Technology," Wiley-VCH GmbH, Vol.4, Weinheim, 2003.
- 7) E.-S. Lee, J. M. Lee and D. J. Jung, "A Study on Development of the Torque Sensor for a EPS," Fall Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.559-564, 2004.