

유한요소해석을 이용한 조향장치 토크센서의 설계에 관한 연구 A Study on the Torque Sensor in Power Steering System using Finite Element Analysis

양현익(한양대 기계공학과), 김용기(한양대 대학원), 노병옥(선문대 기계학부)
Hyun Ik Yang(Hanyang Univ.), Yong Ki Kim(Hanyang Univ. Graduate School)
Byung Ok Roh(SunMoon Univ.)

ABSTRACT

The oil-pressure type torque sensor has been adopted in steering system of major automobiles. However, it has been well known that this type of torque sensor needed many subcomponents and produced inaccurate responses. This paper intends to suggest new type of torque sensor based on the shape design by using finite element. A dedicated mesh generation, analysis and post result display program has been developed.

As for the shape design purpose, the half shape of torque sensor is considered. The result of this study has shown that the design automation for precise torque sensor for control of high velocity rotation shaft can be achieved without any expensive investment to the design software.

1. 서 론

오늘날 기계요소를 설계함에 있어 고려되어야 할 중요한 요소중의 하나는 제반 움직임이 정밀하면서도 고속의 응답특성이 적용되어야 한다는 것이다. 이는 대량생산기술의 발달 및 초정밀 기계 시스템의 다양한 응용 등을 통해 제품생산 주기가 짧아져가고 또한 경박단소를 통한 원가절감에 대한 시도등에서 쉽게 찾아볼 수 있다.

자동차의 조향장치 경우도 예외가 아니어서, 많은 회사들이 기존의 유압방식에 의한 토크센서를 대체할 수 있는 방식을 연구하고 있다. 현재 많은 방식의 토크센서가 존재하지만 가장 많이 쓰이고 있는 것은 유압식 토크센서라고 볼 수 있으며, 최근에는 스트루트 플랫홈기구를 이용한 토크센서등 다양한 토크센서가 연구되고 있다[13]. 그러나, 본 연구에서는 스트레인 게이지를 사용한 토크센서를 연구하고자한다. 스트레인 게이지를 사용한 토크센서로서는 가장 간단한 1축 토크센서로부터 세 방향의 힘과 세 방향의 토크를 측정할 수 있는 6축 토크센서까지 여러 종류가 있으나, 자동차용 조향장치의 특성에 맞게 본 연구에서는 한 방향의 힘만 측정할 수 있는 1축 토크센서를 선택하여 이에 대한 설계를 자동화하는데 초점을 맞추었다.

또한, 본 연구에서는 FORTRAN을 이용한 유한요소해석 및 이를 위한 전후처리공정 프로그램을 개발

하고, 이를 변수처리된 토크센서의 초기설계값을 조절해가며 설계자로 하여금 최적화된 설계치를 낼 수 있도록 의도하였다.

2. 본 론

2.1 토크센서 감지부의 형상

연구의 대상이 되는 토크센서 감지부의 모양은 같은 모양의 binocular형의 solid 4개로 구성된다(그림. 1).

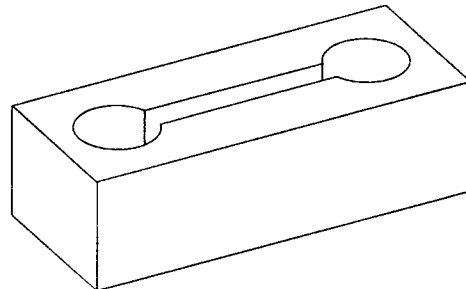


그림. 1 토크센서 감지부의 형상

아울러 각각의 감지부형상과 입력토크가 대칭을 이루고 있기 때문에 해석하고자하는 대상은 토크센서 감지부의 1/2모양이다.

(그림. 3)에서 보는 바와 같이 요소망생성을 하기위해서 먼저 토크센서 감지부의 치수를 대입한다. 그림에는 나타나지 않았지만 z축 방향으로의 형상수치도 입력한다. 감지부형상에 대한 치수대입 후에는 각각의 거대요소(superelement)에 대해서 x,y,z 각 방향으로의 분할수를 정하여 입력한다. 여기서는 설계자의 편의를 위하여 감지부에 대한 거대요소는 모두 5개로 나누었다(그림.4).

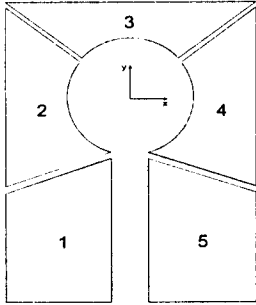


그림. 4 토크센서 감지부의 거대요소(superelements)

2.3. 해석 방법

최종적으로 생성된 요소는 8개의 격자를 가진 3차원 육면체로서 각 모서리는 하나의 격자로 구성되어 있으며, 각 격자는 3개의 자유도를 갖고 있다. 이들은 x,y,z 방향으로의 변위로 표현된다. 이 요소의 형상함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i) \quad i=1,2,\dots,8 \quad (2)$$

여기서 ξ, η, ζ 는 자연좌표축을 의미하며 ξ_i, η_i, ζ_i 는 노드 i 에 대한 자연좌표 값이다.

2.3.1. 해석 이론

각각의 요소내에서 변위는 식(3)의 함수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{a\} = \sum_{i=1}^8 N_i \{u\} \quad (3)$$

토크센서 감지부의 변형률-변위 관계는 다음과 같다.

$$\{\epsilon\} = [B]\{a\} \quad (4)$$

element stiffness matrix는 다음 식(9)에서 구할 수 있으며,

$$[K] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [C][B] |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (5)$$

적분법은 Gauss quadrature를 사용해서 $2 \times 2 \times 2$ rule을 사용했다. 최종적으로 다음 식(10)을 이용하여

$$\{o\} = [CB]\{a\} \quad (6)$$

요소의 중심에서의 평균값을 구하여 각 격자점에서의 응력을 계산했다. 그림. 5는 상기한 이론에 의거하여 작성된 해석 프로그램의 흐름도이다.

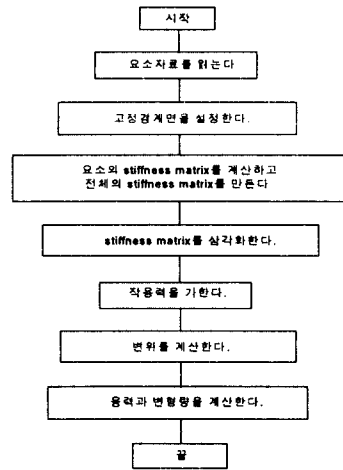
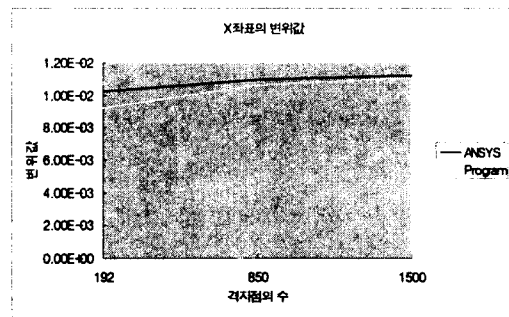


그림. 5 해석 프로그램 흐름도

2.4. 해석 실행 예

본 연구를 통해 개발된 프로그램을 여러 가지 형태의 형상에 대해서 적용시켜 보고, 그 결과를 현재 기업체에서 가장 많이 채택되고 있는 범용 해석 프로그램인 ANSYS와 비교하여 보았다. 초기 요소망에 대해서는 많은 오차가 발생하였으나 요소를 재분할할수록 오차는 줄어들어 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 실행 예에서 보듯이 변위오차가 가장 적었고, 상대적으로 변형율과 응력의 오차는 변위보다 더 크게 나타났다. 이는 matrix의 밴드를 줄이는 방법의 차이나 플로팅 포인트 계산 등의 오차에 의해 충분히 발생할 수 있다고 본다.

(표. 1)은 임의의 점 (4.616,13.94,6.6667)에서 격자점이 증가할 때 ANSYS와 Program의 변위와 응력값이 변화되는 추이를 나타낸 것이다. 격자점이 증가할수록 결과값이 근접하는 것을 알 수 있다.



2.2 자동요소생성법

유한요소해석을 위한 자료를 준비하는 과정은 많은 양의 시간과 노력을 필요로 할 뿐만 아니라 전문적 지식을 갖추기 전에는 쉽게 접근하기가 어렵다. 따라서 이를 자동화함으로써 설계해석에 소요되는 시간과 데이터입력시 발생할 수 있는 오류를 줄여줄 수 있다는 점에서 많은 연구가 있어왔다[1,2,3].

3차원의 경우에는 Carvendish [7]와 Van-Phai [8]가 tetrahedron 요소로 이루어진 요소망을 생성해내는 방법을 시도하였으나, 사용자가 3차원 형상의 표면과 내부의 격자(node)의 좌표를 입력해야만 하기 때문에 자동화된 요소망생성이라고 보기 어렵다. tetrahedron 요소망은 또한 동일한 체적내에서 많은 양의 요소가 생성되므로 자료구조가 복잡해지고 해석값의 정밀도에 대한 문제가 종종 발생하는 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 적용하고자 하는 토크 센서가 정밀한 해를 필요로 하고, 또한 형상설계에서 보다 용이한 hexahedral요소를 생성하도록 하는 프로그램을 작성하였다.

2.2.1. Hexahedral요소 이론

3차원 거대요소(superelement) 요소망 생성에서 해석대상물은 몇 개의 단위형상으로 분할되고, 분할된 단위형상들은 최종적으로 곡면표현의 편이성 및 정확성을 위해 isoparametric 20 node hexahedral요소로 구성된다. 거대요소(superelement) 내에서의 초기 노드점들의 좌표들은 isoparametric 사상에 의거하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^{20} N_i x_i \\ y &= \sum_{i=1}^{20} N_i y_i \\ z &= \sum_{i=1}^{20} N_i z_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $N_i(\xi, \eta, \zeta)$ 는 -1에서 1까지의 값을 갖는 자연좌표계(natural coordinate system)에 의해서 변환된 형상함수(shape function)이다. 개발된 프로그램에서 쓰인 20-node 육면체 요소의 경우에 형상함수는 다음과 같다.

모서리에 있는 노드;

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i)(\xi\xi_i + \eta\eta_i + \zeta\zeta_i), \quad i = 1, \dots, 8$$

중간에 있는 노드;

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i), \quad i = 9, 11, 17, 19$$

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 - \eta^2)(1 + \xi\xi_i)(1 + \zeta\zeta_i), \quad i = 10, 12, 18, 20$$

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 - \zeta^2)(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i), \quad i = 13, 14, 15, 16$$

따라서, 노드점들의 좌표들을 알고 있다면 위의 식들로부터 ξ, η, ζ 상의 모든 점들의 직교좌표를 구할 수 있다.

2.2.2. 프로그램 구조

본 연구를 통해 개발된 자동요소생성 프로그램의 흐름도는 그림과 같다(그림. 2)

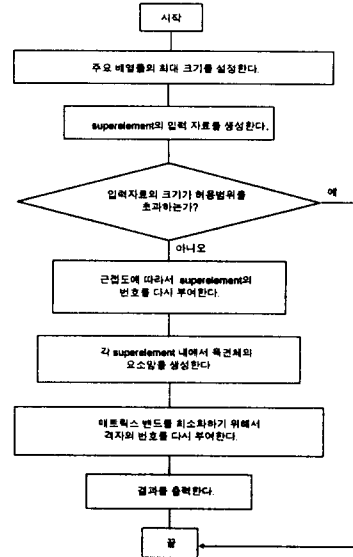


그림. 2 요소생성 흐름도

일단 생성된 요소들은 해석과정에서 매트릭스밴드(band)를 최소화하는게 좋으므로 이에 의거하여 각 요소의 격자번호를 최적화하는 과정을 통하여 최종적으로 재배치된다.

2.2.3. 기본입력 치수

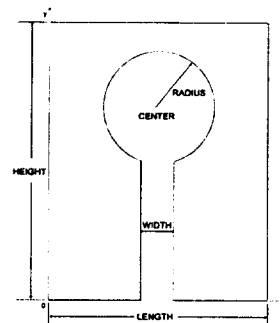
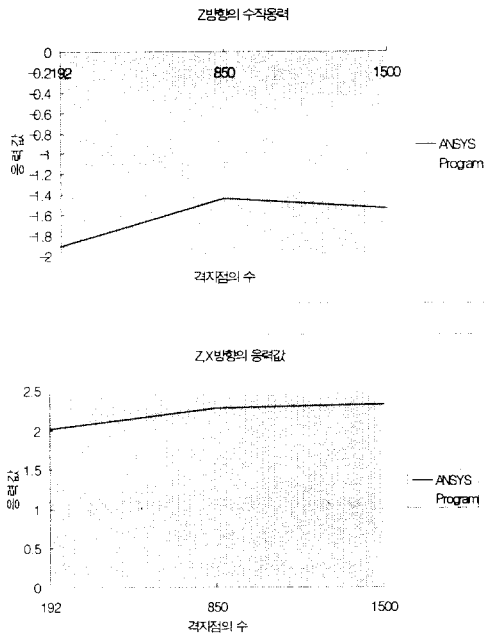


그림. 3 초기 형상 입력 자료



(표. 1)

3. 결 론

본 연구에서는 자동차 조향장치용 토크센서 감지부에 대한 초기 설계자료를 변수처리하여 설계해석을 수행하고, 이를 이용해 재설계를 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

기존의 상용범용해석 프로그램인 ANSYS와 예제를 이용하여 해석결과를 비교하여 본 프로그램의 성능을 평가하였고, 나아가 설계된 요소망을 가시화하는 프로그램을 포함시켜 현재 자동차용 토크센서를 개발, 생산코저하는 중소기업체들에게 별도의 큰 투자가 없이 자체에서 이를 충분히 해결할 수 있도록 하였다.

참고문헌

1. W. R. Buell, and R.A. Bush, 1973, "Mesh Generation - a survey", Journal of Engng Industry, pp. 332-338
2. J.C. Carvendish, 1974, "Automatic Triangulation of Arbitrary Planar Domains For The Finite Element Method", Int. J. Numer. Engng 8, pp. 679-696
3. L. L. Durocher, and A. Gasper, 1979, "A Versatile Two-Dimensional Mesh Generator With

Automatic Bandwidth Reduction", Computers & Structures Vol. 10, pp.561-575

4. O.C.Zienkiewicz and D.V.Phillips, 1971, "An Automatic Mesh Generator Scheme For Plane And Curved Surfaces By Isoparametric Coordinates", Int. J. Numer. Mech. Engng 3. pp. 519-528
5. Erh-Rong Wu, 1982, "Techniques To Avoid Duplicate Nodes And Relax Restrictions On The Superelement Numbering In A Mesh Generator", Computers & Structures Vol. 15, No. 4, pp. 419-422
6. Y.Liu, and K. Chan, 1988, "A Two Dimensional Mesh Generator For Variable Order Triangular And Rectangular Elements", Computers & Structures Vol. 29, pp. 1033-1053
7. J.C.Cavendish, D.A. Field, and W.H.Frey, 1985, "An Approach To Automatic Three Dimensional Finite Element Mesh Generation", Int.J.Numer. Meth.Engng 21, pp. 329-347
8. N.Van-Phai, 1982, "Automatic Mesh Generation With Tetrahedron Elements",Int.J.Numer.Meth.Engng 18, pp. 273-289
9. P.A.F. Martins, and M.J.M. Barata Marques, 1992, "Model3 - A Three-Dimensional Mesh Genertor", Computers & Structures Vol. 42, No. 4, pp. 511-529
10. Zienkiewicz, and Taylor, 1989, "The Finite Element Method", McGraw Hill
11. Klaus-Jurgen Bathe, 1996, "Finite Element Procedures", Prectice Hall
12. Thomas J.R. Hughes, 1987, "The Finite Element Method", Prentice Hall
13. 강철구, 한정훈, 1997, "선형화기법을 이용한 스티어트 플랫폼 형태의 6축 힘-토크센서에 대한 해석", 대한기계학회 논문집(A), 제 21권, 제 4호, pp, 619-624.