

타이어 가류브레더 팽창거동에 관한 유한요소해석 A Study on the Curing Bladder Shaping of Tire by FEM

김 항우* 황 갑운** 조 규종***
Kim, Hang-Woo Hwang, Gab-Woon and Cho, Kyu-Zong

ABSTRACT

In curing process of tire, contact and slip occurs between green tire and curing bladder. The curing process is a critical step in the manufacture of tires. In this investigation, curing bladder shaping is examined using a finite element method. Specifically, a finite element model between the inner part of green tire and the outer part of curing bladder is generated using contact element and curing bladder is generated using incompressible element. The experimental tensile tests are used to get the material properties of bladder rubber on practical conditions. Numerical analyses are performed on two different bladder types, different overall outer diameters of curing bladder and different heights of curing bladder.

1. 서 론

타이어는 노면과 직접 접촉을 유지하고 있는 유일한 부분으로써 차량의 하중을 받으면서 주행하므로, 노면의 상태를 현가장치를 통하여 차체에 직접 전달하고 접지면에서 구동·제동력을 발생시켜주는 중요한 기능을 가지고 있으므로 하중지지기능 및 완충기능과 진로유지기능을 기본적으로 갖추어야 하며, 승차감, 조종안정성, 내구성, 내마모성, 저회전저항 및 고속주행성능 등의 다양하고 엄격한 기능이 요구되고 있다.

타이어는 고무와 보강재료로된 복합재(Fiber Reinforced Rubber)⁽¹⁾의 부분을 조합시킨 복합구조물이므로 내부에는 이방성 재료의 계면이 존재하고, 이들 계면에 발생하는 응력집중으로 인하여 타이어 내부에 균열이 발생하며, 타이어의 내구성을 저하시키는 원인으로 되고 있다. 또한 타이어의 구조해석에서는 타이어의 구조, 재료, 사용조건 등에 의한 대변형, 압축성 또는 비선형 고무의 탄성, 점탄성 등 기하학적 비선형성, 재료의 비선형성, 경계조건의 비선형성등을 고려해야 하므로 유한요소 모델의 규모가 커지고, 많은 해석시간을 필요로 하게 된다.

타이어 제조시 제품의 품질은 그린타이어의 가류조건에 따라 크게 좌우⁽²⁾되기 때문에 타이어 가류공정은 공기압 타이어의 제조시 상당히 정교한 단계를 거쳐서 이루어지며, 이는 타이어 설계에 영향을 줄 뿐만아니라 타이어의 성능에도 관련이 있으며, 타이어 완제품의 품질관리를 위해서는 경화조건을 선정할 필요가 있고, 경화과정의 온도와 압력을 정확히 제어하면 짧은 시간에 신뢰성 있는 제품의 생산이 가능하다.

이러한 문제의 해결을 위해서는 여러가지 방법이 있을 수 있으나, 그 중의 하나로서 타이어 제

* 금호기술연구소 선임연구원

** 전남대학교 공업기술연구소 특별연구원

*** 전남대학교 기계공학과 교수

조의 최종 단계인 가류공정에 있어서 타이어의 형상을 결정지어 주는 가류브레더의 중요성을 인식하지 않을 수 없으며, 타이어의 금형을 만들때 확인이 어려운 모울드 내의 가류브레더 팽창거동을 유한요소해석을 이용하여 고찰해 보고자 하였다.

2. 타이어 가류 시스템

타이어 제조 과정은 정련, 압연, 재단 및 성형 공정을 거쳐 그린타이어가 만들어지고, 이를 가류공정에서 열을 가하여 모울딩 함으로써 완성된 타이어 제품을 얻을 수 있다. 타이어 가류공정은 Fig. 1에 보인바와 같다.

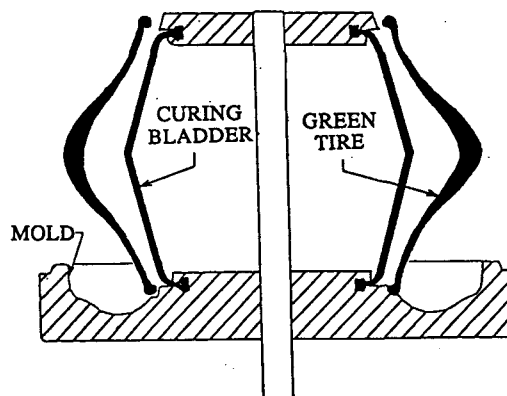


Fig. 1 Assemblage of green tire and mold before curing bladder inflation

3. 유한요소 모델링

3.1 유한요소 해석

타이어 가류브레더 해석은 브레더 외부와 완제품 타이어 내부와의 접촉과 동시에 가류브레더의 대변형이 발생하기 때문에 접촉에 대한 해석을 필요로 하며, 접촉에 대한 유한요소해석을 하기 위하여 일정한 거리를 가진 임의의 인접한 두 요소 사이의 절점 A와 절점 B의 변위가 연속이라는 조건을 포함한 가상일의 원리는, 접촉의 조건을 고려하기 위해서 Lagrange의 미정승수를 도입하여 가상일의 원리(virtual work principle)와 함께 정식화하면^{(3),(4),(5)} 다음식과 같이 된다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \delta [\lambda_i (u_i^A - u_i^B)] = f_i \delta u_i \quad (1)$$

여기서 λ_i 는 Lagrange의 미정승수이고 u_i^A , u_i^B 는 A점과 B점의 변위성분이다.

접촉의 방향을 n 으로 초기에 \bar{u} 의 거리만큼 떨어져있는 A점과 B점이 접촉했다고 하면, 접촉후의 A점, B점의 접촉방향 변위는 같아야 하며, 구속조건으로 다음식이 얻어진다.

$$\delta [\lambda_n \{ (\underline{u}_i^A - \underline{u}_i^B) \cdot \underline{n} - \bar{u} \}] = 0 \quad (2)$$

여기서 n 는 접촉의 방향을 나타낸 벡터이며, A점에서 B점으로 향하며, λ_n 은 접촉력이다.

위식과 계(system)의 방정식 $K u = f$ 와 구속조건에 의한 식 $C u = 0$ 를 이용하여 범함수(functional)의 형태로 표현하면

$$\Psi = \frac{1}{2} u^T K u - u^T f + \lambda^T C u \quad (3)$$

여기서 Ψ : 범함수, u : 변위, K : 강성행렬, f : 하중, λ : Lagrange 의 미정승수, C : 접촉요소의 행렬식이다.

식(3)을 행렬식의 형태로 유한요소 수식화하면

$$\begin{bmatrix} K & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 변위 u 와 Lagrange 의 미정승수 λ 에 대해 동시에 해를 구하면 주어진 방정식의 해를 구할 수 있다.

3.2 유한요소 모델

가류 브레더와 주형(mold)은 좌표축을 (x, y, z)로 하여 Fig. 2에서와 같이 8개의 절점을 가진 비압축성 축대칭 요소^{(6),(7)}로 하였으며, 모델이 기하학적으로 대칭이고 압력하중(pressure loading)으로 작용하므로 단면의 1/2 만을 모델링하였다. 이때 완제품 타이어나 브레더 사이의 접촉 또는 마찰요소는 4절점 링(ring) 요소로 하여 링 양단의 절점 1과 4는 구조물상에 있는 절점으로 하였으며, 절점 2와 3은 접촉 또는 마찰이 일어나는 부분으로 하였다.

유한요소 모델은 가류 브레더의 형상을 각각 변화시켰으며, Fig. 3은 브레더의 형상이 원통형(cylindrical)인 경우와 둥근고리형(toroidal)인 경우를 나타내며, Fig. 4는 타이어나 브레더 외경을 $\pm 20\%$ 씩 증감시킨 경우이고, Fig. 5는 브레더 높이를 $\pm 20\%$ 씩 증감시킨 경우에 대한 해석 모델이며, Fig. 6은 브레더 팽창시 완제품 타이어나의 각 부위별 접촉압력 증가량을 고찰하기 위하여 완제품 타이어나의 중앙(center), 쇼울더(shoulder) 및 비드(bead)부의 게이지를 $\pm 20\%$ 씩 증감시킨 경우에 대한 해석 모델이다. 이때 하중은 bladder 형태에 따라 1.5 psi ~ 2.0 psi 의 압력이 가해지며, 이 압력에 의해 가류 브레더와 타이어나 상하 모울드의 밀착이 동시에 이루어지게 하였다. 가류 브레더와 모울드의 밀착이 완료된 후에 가류 브레더 내부에 25 psi의 압력을 받는 것으로 하였으며, 가류브레더 외측과 완제품 타이어나내측의 접촉면 사이의 마찰계수는 0.1 로 하였다.

해석을 수행하기 위한 하중증분단계(load increment step)를 250~300 으로 나누어 가하였으며, 가류 브레더 고무는 Mooney-Rivlin 모델로서 재료 상수는 가류 브레더의 실제온도인 104℃ 에서 실험적인 방법에 의해 인장시험을 수행하여 결정하였다. 또한 타이어나 모울드와 완제품 타이어나는 변형이 거의 없는 강체 표면(rigid surface) 효과를 얻기 위해 재질을 강(steel)으로 하였다. 해석 대상 재질의 기계적 성질 및 물리적 성질은 Table 1과 같고, 각 모델의 크기는 Table 2와 같다.

Table 1 Material properties and material model of tire and curing bladder

	Curing bladder	Cured tire	Tire mold
Material model	Mooney-Rivlin	Linear elastic	Linear elastic
Elastic modulus (psi)	186	26.0 E06	26.0 E06
Poisson's ratio	0.5	0.3	0.3
Constant (psi)	$C_{10} = 31.0$ $C_{01} = 8.0$	-	-

Table 2 Finite element model size

Model	Cylindrical model	Toroidal model	Reduced overall dia.	Added overall dia.	Reduced height	Added height
Nodes	384	369	349	399	344	394
Elements	86	83	79	89	78	88
D.O.F.	1030	985	925	1075	910	1060

본 연구에서 주안점을 두고 해석한 접촉부분은 cured 타이어 내부와 curing bladder 외부에서 발생되고, CONVEX-C3210 (50 MFlops)에서 해석을 수행하였으며, 수행에 소요된 CPU 시간은 약 2시간 정도였다.

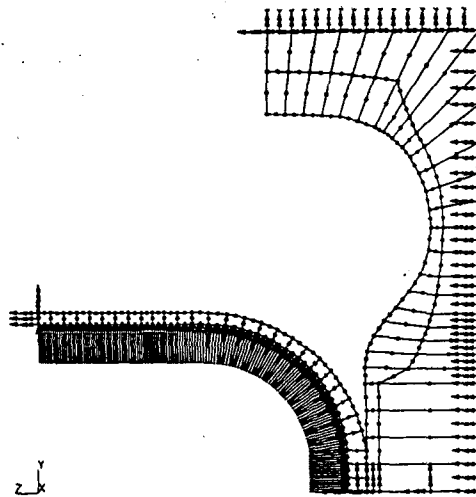


Fig. 2 Finite element model of assemblage of curing bladder and cured tire and mold

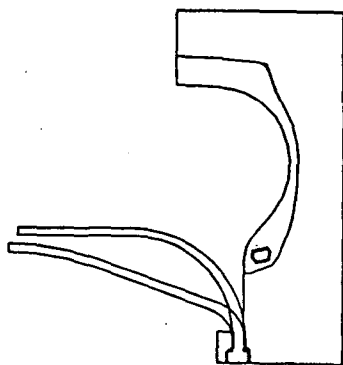


Fig. 3 Finite element model for cylindrical bladder type and toroidal bladder type

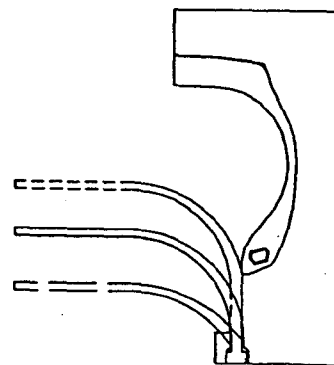


Fig. 4 Finite element model for overall diameter variation of curing bladder

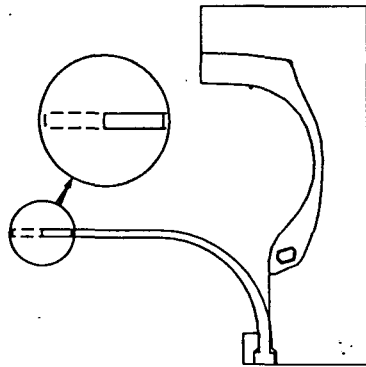


Fig. 5 Finite element model for reduced and added height of curing bladder

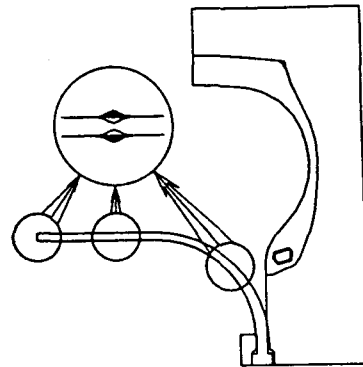


Fig. 6 Finite element model for bladder gage variation

4. 결과 및 고찰

4.1 Bladder 팽창거동 비교 및 고찰

Fig. 7은 bladder 의 형상이 원통형(cylindrical)인 경우와 등근고리형(toroidal)인 경우에 대한 압력에 따른 가류 브레더의 접촉 양상을 보이고 있다. 가류 브레더의 접촉순서는 완제품 타이어의 비드(bead)부가 가장 먼저 접촉이 이루어지고, 센터(center), 사이드(side), 숄더(shoulder) 순으로 접촉이 이루어지며, 등근고리형인 경우에는 6 psi 에서 접촉이 완료되는 반면 원통형에서는 10 psi 가 되어야 비로소 접촉이 완료됨을 알 수 있다.

또한 가류 브레더의 외경을 $\pm 20\%$ 증감시켰을 경우, Fig. 8의 결과에 보인바와 같이 가류 브레더의 팽창거동은 외경을 증가시켰을 때 3 psi에서 거의 모든 부위의 접촉이 완료된 반면에 외경을 감소시켰을 경우 7 psi가 되어야 접촉이 완료됨을 알 수 있다.

가류 브레더의 높이를 $\pm 20\%$ 증감시켰을 경우, Fig. 9의 결과에서 알 수 있듯이 브레더의 높이를 감소시킨 경우에 8 psi에서 접촉이 완료되고, 브레더의 높이를 증가시킨 경우 4 psi에서 거의 모든 부위의 접촉이 완료됨을 알 수 있다.

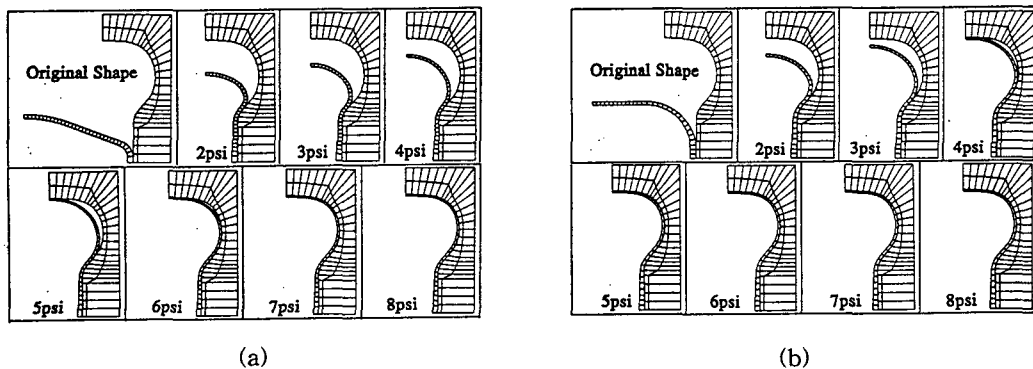


Fig. 7 Results of curing bladder shaping. (a) cylindrical type of curing bladder, (b) toroidal type of curing bladder

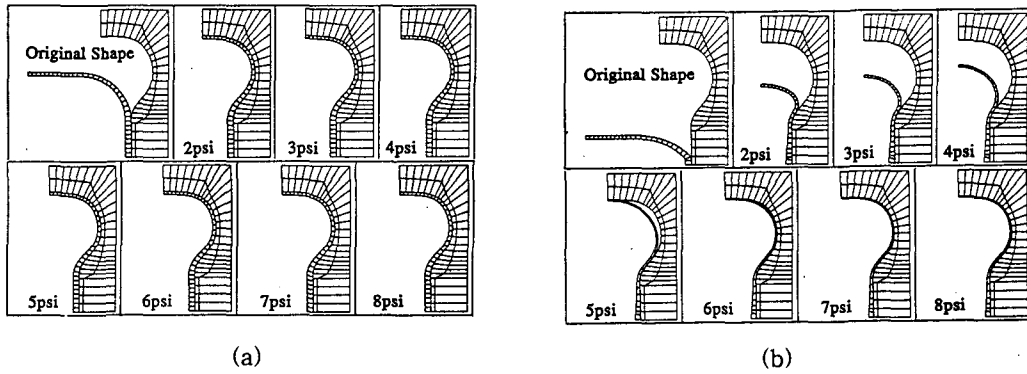


Fig. 8 Results of curing bladder shaping. (a) added overall outer diameter of curing bladder, (b) reduced overall outer diameter of curing bladder

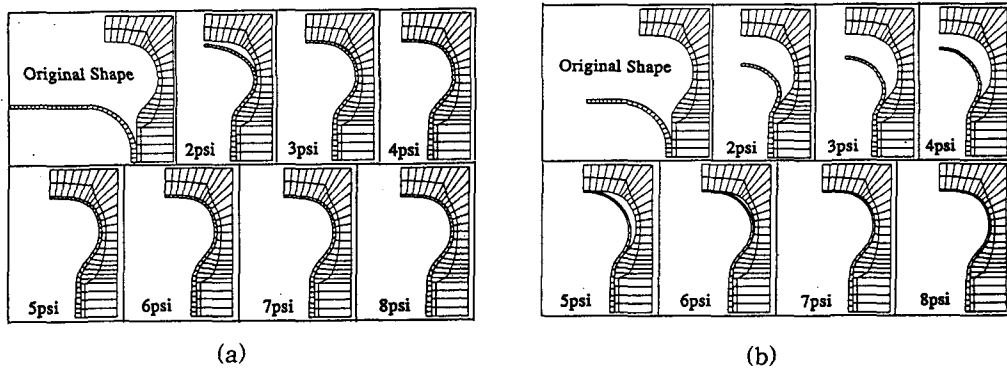


Fig. 9 Results of curing bladder shaping. (a) added height of curing bladder, (b) reduced height of curing bladder

이상의 결과로부터 가류 브레더의 완제품 타이어 내부와의 접촉은 원통형보다 등근고리형에서 접촉이 빠르게 발생함을 알 수 있으며, 브레더의 외경을 증가시킨 모델 및 브레더의 높이를 증가시킨 모델에서 접촉이 빠르게 발생함을 알 수 있었다.

4.2 접촉압력의 비교 및 고찰

유한요소 해석에 의한 완제품 타이어 내부와 가류 브레더 외부와의 접촉에 의해 발생하는 접촉력으로 접촉압력을 계산하였으며, 브레더 형상변화에 따른 결과는 다음과 같다. Fig. 10의 결과로부터 접촉순서는 완제품 타이어의 비드부, 센터부, 사이드부 및 솔더부 순으로 발생하며, 원통형의 경우 10 psi에서 완전 접촉이 발생하고 있으나 등근고리형의 경우 6 psi에서 접촉이 완료된다. 또한 완제품 타이어 센터부에서 약간 이격된 지점에서 최대압력이 발생하게 되고, 사이드-비드부 구간에서 최저압력이 나타난다. 전체적으로 등근고리형이 원통형보다 접촉압이 높고 균일한 분포를 나타내어 가류중 고무의 이동이 적게 된다.

Fig. 11의 결과로부터 외경증가형이 외경감소형 보다 접촉압력이 전반적으로 증가함을 나타내며, 솔더부의 접촉압을 센터부의 수준까지 증가시킬 수 있다. 또한 외경감소형의 경우 전체적인 접촉압력 분포의 변곡이 심하게 나타나고 있다.

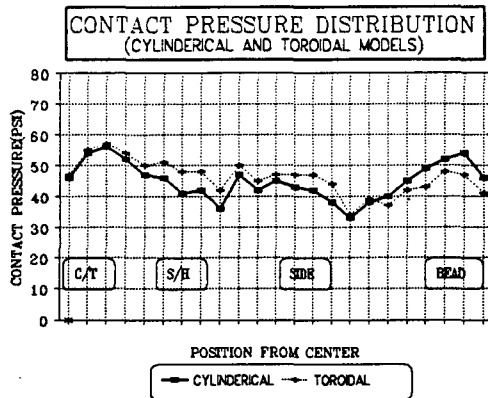


Fig. 10 Results of contact pressure distribution for cylindrical model and toroidal model

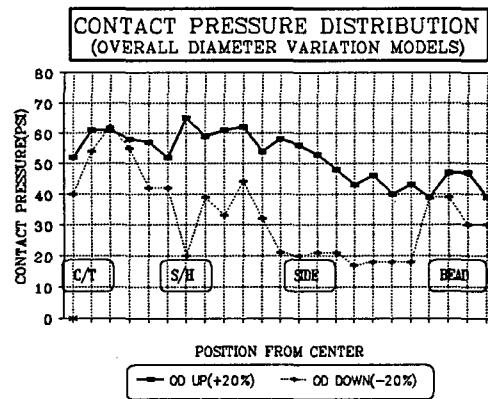


Fig. 11 Results of contact pressure distribution for overall diameter variation model

Fig. 12의 결과는 브레더 높이를 증가시킨 모델이 사이드-비드 구간에서 균일한 접촉압력 분포를 보이고 있으며, 브레더 높이 증가 모델이 비드부를 제외하고는 브레더 높이를 감소시킨 모델보다 접촉압이 증가하고 있다.

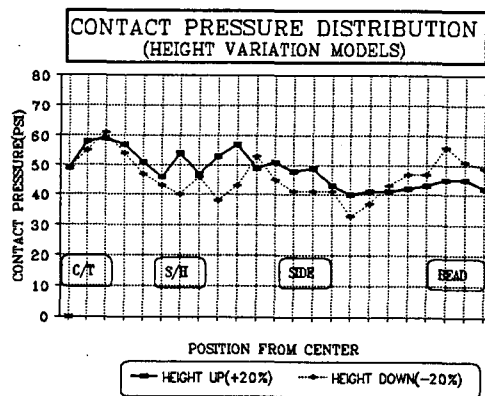


Fig. 12 Results of contact pressure distribution for height variation model

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 타이어의 가류공정을 분석하였으며, 브레더의 형상 변화에 따른 팽창거동 해석과 타이어와 브레더 접촉부위에서의 접촉압력을 비교 검토하여 금형이 완제품에 미치는 영향중 인너굴곡과 접촉압력 불균일에 의한 고무의 움직임 발생을 고찰하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 타이어 조형시 완제품 타이어와 브레더의 접촉은 완제품 타이어의 비드부, 센터부, 사이드부 및 솔더부의 순서로 이루어지며, 접촉압력의 균일성 및 크기는 원통형 보다 등근고리형이 우수함을 알 수 있다.

2. 모든 경우에서 완제품 타이어의 중앙부로부터 약간 이격된 부위에서 최대접촉압력이 발생하며, 중앙선 부위에서는 최대접촉압력이 15% 정도 감소됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 완제품 불량률의 많은 부분을 차지하고 있는 인너굴곡현상과 관련이 있을 것으로 판단된다.

3. 타이어 비드부위의 카카스층의 자연 평형현상 유지는 사이드-비드 구간의 접촉압력 증가 및 접촉압력의 균일성이 이루어져야 할 것으로 보이며, 이를 위해서는 모델을 등근고리형으로 하고, 가류 브레더 외경을 증가시킴과 동시에 브레더 높이를 증가시켜야 할 것으로 판단된다.

4. 본 연구결과를 이용하면 타이어 가류공정상에서 발생하는 제품의 불량원인 파악 및 타이어 설계자가 원하는 제품 제조의 불가능 원인 파악을 하는데 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 酒井秀男, 昭和61年 10月, "タイヤ工学," クラウンフ^oリ出版.
- (2) T. C. Warholic and R. G. Pelle, 1988, "A Finite Element Analysis of Curing Bladder Shaping," General Tire, Inc., Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 16, No. 3, pp. 128~145.
- (3) O. C. Zienkiewicz and R. C. Taylor, 1989, "The Finite Element Method," 4th Ed., McGraw-Hill International Editions.
- (4) O. C. Zienkiewicz and K. Morgan, 1982, "Finite Elements and approximation," John Wiley & Sons.
- (5) Thomas J. R. Hughes, 1987, "The Finite Element Method," Prentice-Hall International Editions.
- (6) Daryl L. Logan, 1985, "A First Course in the Finite Element Method," Rose-Hulman Institute of Technology, PWS Engineering, Boston.
- (7) Klaus-Jürgen Bathe, 1982, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.