

## 접촉해석을 이용한 시트 쿠션, 백의 설계 제작 기술 개발

주석재

울산대학교 기계자동차공학부

### <요 약>

중장비 운전자용 시트에 운전자가 앉을 때 운전자의 정적 평형위치와 접촉압력의 분포를 예측하는 방법을 개발하였다. 인체는 강체로 취급하여 표준 인체 더미의 표면으로 표현하였고, 발포 재료인 시트 쿠션의 변형 거동은 Ogden model을 선택하였다. 비선형 유한요소프로그램 MARC를 사용하여 인체 더미의 압입에 대한 시트 쿠션의 접촉 변형 과정을 해석하였다. 각각의 단면에서 인체 더미와 쿠션의 간섭인 수직 방향 변위가 최대인 점에서 접촉압력은, 압축시험에서 얻은  $\sigma-\epsilon$ 곡선, 인체 더미와 쿠션의 간섭, 쿠션의 두께로 예측한 것과 일치하였다.

## Development of Design and Manufacturing Technology for Seat Cushion and Back Using Contact Analysis

Seok-Jae Chu

School of Mechanical and Automotive Engineering

### <Abstract>

A method is developed to predict the vertical equilibrium position of a driver and contact pressure against a seat cushion. The human body is represented as a rigid surface and the deformation behavior of a seat cushion is characterized by the Ogden foam model. The deformation process of a seat cushion in contact with a human body is analyzed using the non-linear finite element program MARC. It is found that the contact pressure(the minimum Cauchy stress) at the maximum deflection point in each section can be predicted from the stress-strain curve obtained in compression test, the vertical displacement and the thickness of a seat cushion at the point of interest.

## 1. 서론

사람이 시트 쿠션에 앉았을 때 인체의 정적 평형위치와 접촉압력의 분포를 예측하는 것은 중요하다. 인체의 정적 평형 위치를 기준으로 시트의 주요 치수와 시트 프레임의 내구 시험과 관련된 하중의 작용 부위가 결정되기 때문이다. 그리고, 접촉압력의 분포는 시트 쿠션에 앉은 사람의 쾌적감을 결정한다.

외국에서는 시트 쿠션을 설계할 때 시트 쿠션의 변형 형상을 미리 파악하여 인체의 정적 평형위치를 결정하여 시트 설계에 사용한다<sup>(1-2)</sup>. 그러나, 국내에서는 시트 쿠션의 초기 형상을 접촉 부위 인체 형상에 맞추거나 정적 평형위치도 경험적으로 대략 결정하는 형편이다. 시트 쿠션에 대한 앉은 사람의 쾌적감도 일일이 사람이 직접 앉아보고 평가하는 수준이다.

시트 쿠션의 압입 변형과 관련된 해석 결과는 거의 공개된 것이 없다. 본 연구에서는 유한요소 프로그램을 사용하여 시트 쿠션의 압입 변형을 해석하여 보고 인체의 정적 평형위치와 접촉압력의 분포를 예측하는 방법을 개발하고자 한다. 그리고, 일일이 유한요소해석에 의존하지 않고 접촉압력의 분포를 예측하는 방법도 개발하고자 한다.

## 2. 재료시험

### 2.1 발포재료의 압축, 인장시험

발포고무의 모형에 대한 스트레인 에너지 함수(strain energy function)  $W$ 는 Ogden 공식에 근거하여<sup>(3-4)</sup>

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\beta_n} (1 - J^{\beta_n}) \quad (1)$$

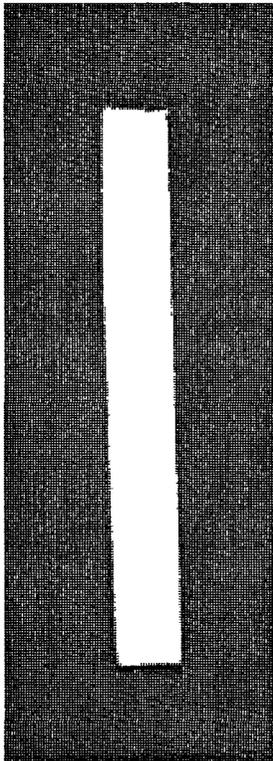
와 같다. 여기서  $\alpha_n, \beta_n$ 와  $\mu_n$ 은 재료 상수이고  $\lambda_i (i=1,2,3)$ 는 연신률(stretch)로서  $\lambda_i = l_i/l_i^0$  ( $l_i^0$ 는  $i$  방향 변형전 길이,  $l_i$ 는  $i$  방향 변형후 길이)이고,  $J$ 는 deformation gradient  $\partial x_i/\partial x_j^0$ 의 determinant로서 체적변화를 가리킨다. 응력은  $\sigma_{ij} = \partial W/\partial \epsilon_{ij}$ 와 같이 주어진다

$l_i = l^0$ 인 정육면체를 압축하여  $\lambda_1 l^0, \lambda^0, \lambda^0$ 인 직육면체가 되었다면 deformation gradient는

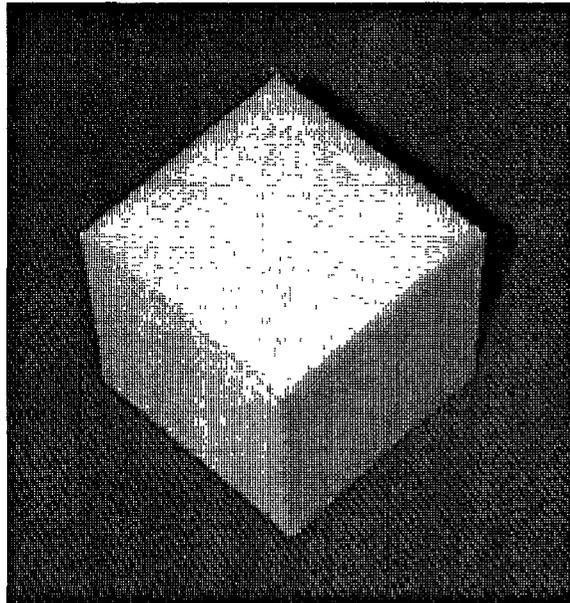
$$\left[ \frac{\partial x_i}{\partial x_j^0} \right] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (2)$$

이고 determinant는  $J = \lambda_1 \lambda^2$ . 즉,  $\lambda = (J/\lambda_1)^{1/2}$ 이다. 변형 전 체적은  $(\lambda_1 l^0)(\lambda l^0)(\lambda l^0)$ , 변형 후 체적은  $l^0 l^0 l^0$ 이므로 초기 단위체적당 체적증가는  $\lambda_1 \lambda^2 - 1 (\equiv J - 1)$ 이다. 비압축성 재료에 대하여  $J = 1$ 이다.

재료시험법은 단축인장시험(uniaxial tension test), 단축압축시험(uniaxial compression test), 양축인장시험(biaxial tension test), 평면전단시험(planar shear test), 체적시험(volumetric test) 등이 있다. 이 중 평면전단시험은 발포재료에 대하여 적합하지 않고 체적시험은 생략하였다.



(a) 인장시편



(b) 압축시편

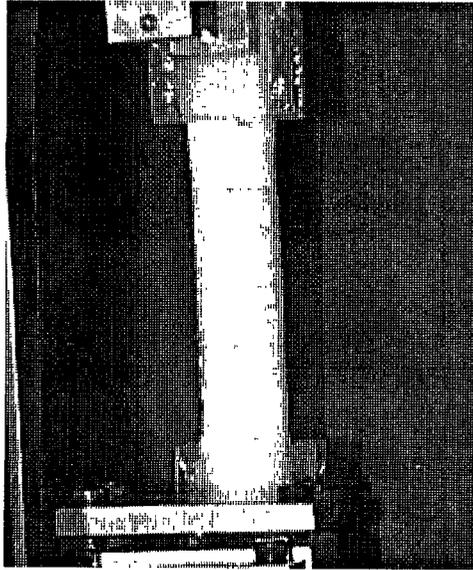
Fig. 1 인장시편과 압축시편

Fig. 1과 같이 절단하여 제작한 인장시편의 단면은 20 mm(W)×8 mm(T)인 직사각형이고, 압축시편의 단면은 80 mm(W)×80 mm(D)인 정사각형이다. 압축시편의 단면은 보통 원형으로 만들지만 가공이 어려워 정사각형을 택하였다.

Fig. 2는 인장시험과 압축시험 중 재료의 변형 형상을 촬영한 것이다. 인장시험에서는 단면이 수축하였지만 압축시험에서는 단면의 변화가 거의 없었다. 이것은 다른 문헌에서도 확인된 현상이다. 따라서 인장시험에서는 단면변화를 측정하였지만 압축시험에서는 측정하지 않았다.

Fig. 3(a)를 보면 인장과 압축에 대한 발포재료의 거동은 차이가 심하다.  $\sigma=0.0005$   $\text{kgf/mm}^2$ 일 때 압축에 대한 스트레인은 인장에 대한 스트레인의 10 배 가까이 된다. 인장에 대한  $\sigma-\epsilon$  선도는 선형적이었지만 압축에 대한  $\sigma-\epsilon$  선도는 비선형적이었다.

Fig. 3(b)를 보면  $J$ 는 압축에 대하여 단면변화가 없어  $J=1-\lambda_1$ 과 같이 선형적이었지만 인장에 대하여 복잡하여 변화하였다. 인장시험 중에는 인장시편 측면에서 국부적으로 터지는 부위가 발생하였다.



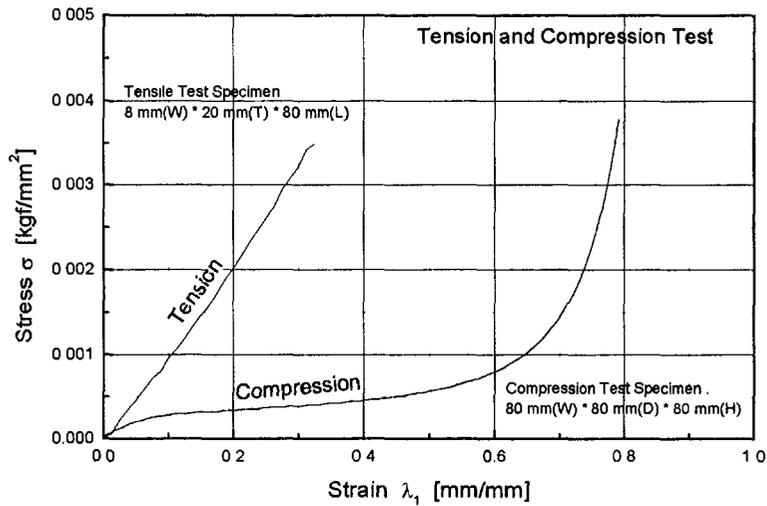
(a) 인장시험



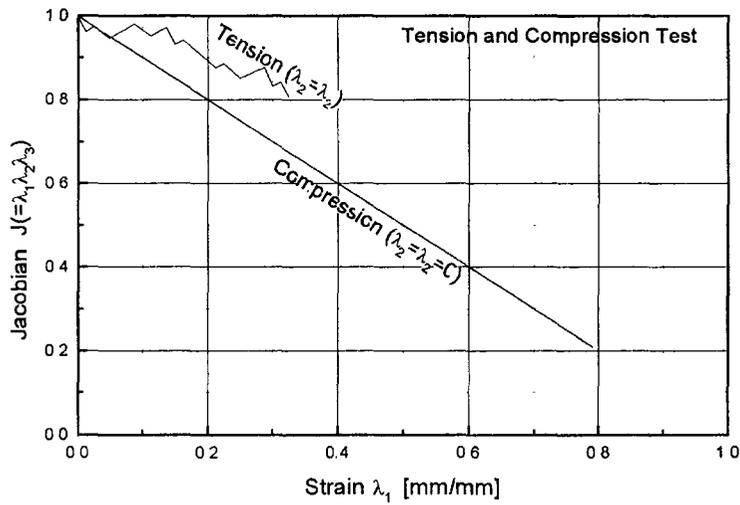
(b) 압축시험

Fig. 2 인장시험과 압축시험 중 시편의 변형

Fig. 3은 인장시험과 압축시험에 대한  $\sigma$ - $\epsilon$  선도와  $J$ - $\epsilon$  선도이다. 발포재료는 압축성 재료이므로 ( $\sigma, \epsilon, J$ )를 입력하여야 한다.



(a) 인장시험과 압축시험에 대한  $\sigma$ - $\lambda_1$  선도

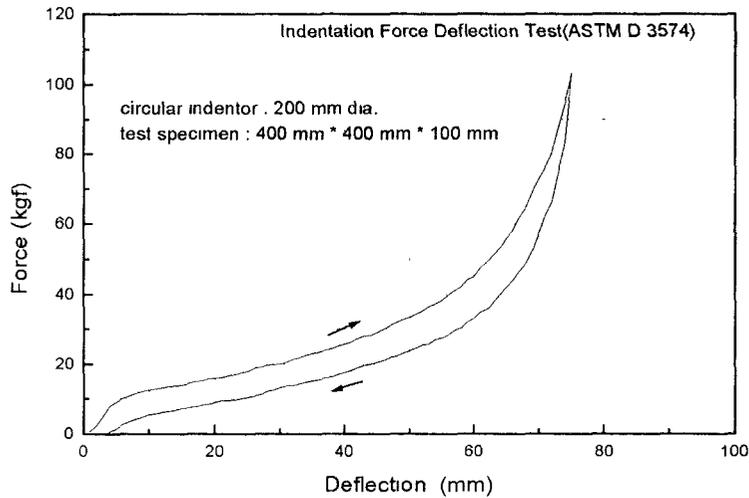


(b) 인장시험과 압축시험에 대한  $J$ - $\lambda_1$  선도

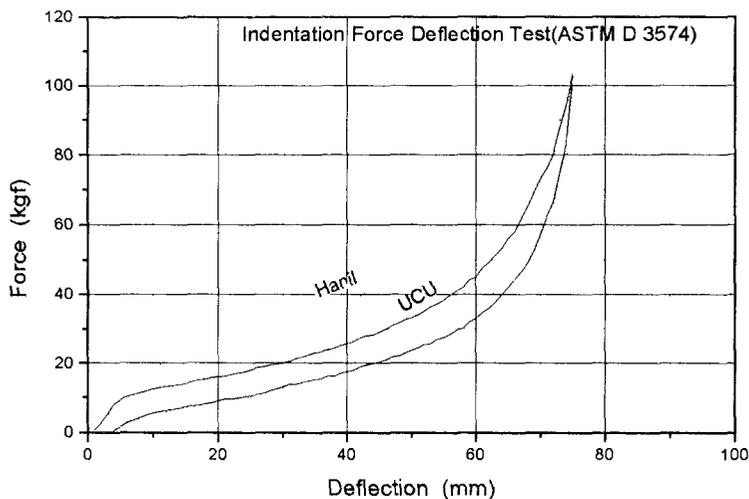
Fig. 3 인장시험과 압축시험의 결과

압입시험은 발포재료 400 mm(W)×400 mm(D)×100 mm(H)인 슬랩을 지름 200 mm인 원판으로 누르는 시험이다.<sup>(5-6)</sup> 재료시험기 MTS에서 압입속도 10 mm/min의 느린 속도로 시험하였다. ASTM D3574규정을 참고하여 시험 전 2-3번 미리 눌러본 후 시험하였다. 시험 결과는 Fig. 4(a)와 같다. 높이의 25%인 25 mm 압입하였을 때 하중은 17.0 kgf이었다. 압입할 때와 복귀할 때의 경로가 다른 히스테리시스 현상이 나타났다.<sup>(7)</sup>

압입시험 결과를 한일이화에서 작년과 같은 재료(Polyurethane foam) Index 100에 대한 압입시험 결과와 비교하여 보았다. Fig. 4(b)를 보면 복귀할 때는 비슷하였지만 압입할 때는 서로 차이가 많이 났다. 한일이화의 결과가 최대 10 kgf 정도 컸다. 시험전 미리 2-3번 누르는 것과 충분히 느린 압입속도에 대한 확인이 필요하다.



(a) 압입시험에 대한 하중-처짐 곡선



(b) 압입시험 결과의 비교

Fig. 4 압입시험에 대한 하중-처짐 곡선

## 2.2 커버의 인장시험

커버는 발포재료에 대하여 충분히 탄성계수가 높다고 보지만 확인하기 위하여 시험하였다. Fig. 5는 결의 방향을 보고 3 가지 방향으로 채취한 시편이다. 하중방향과 시편 결의 방향이 이룬 각도를 표시하였고 시편의 너비는 20 mm이다.

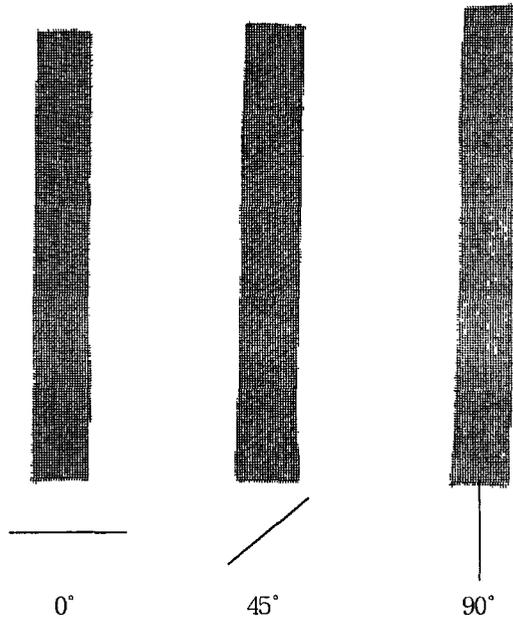


Fig. 5 커버의 인장시편(괄호 안의 각도는 결의 방향을 가리킴)

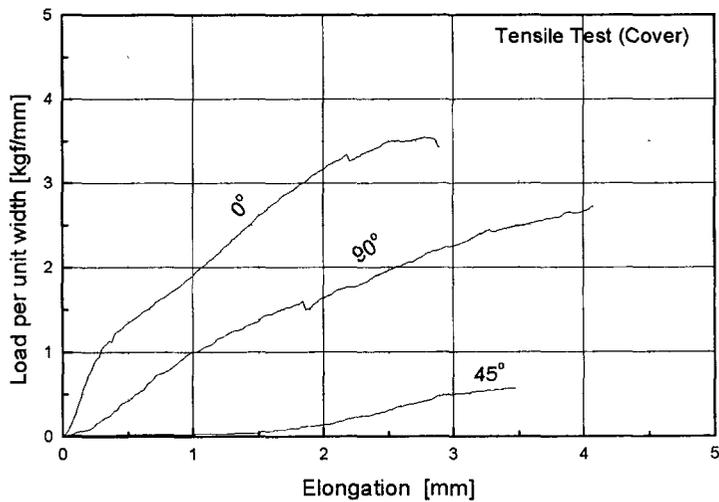


Fig. 6 커버에 대한 인장시험 결과

Fig. 6은 인장시험 결과이다. 하중은 단위 너비 당 하중으로 표시하였다. 인장하중은 0°, 45°, 90°의 순으로 낮아졌다. 0°에서 하중이 높은 것은 결(심)의 방향이 하중 방향과 일치하여 심이 하중을 많이 견디기 때문이다. 상대적으로 45° 방향은 취약하였다. 이 경우는 시편의 좁게 절단하여 하중을 지지하는 심이 짧게 끊어진 상태이기 때문인 것 같다.

너비 20 mm인 시편에 대하여 인장하중은 0°인 경우 70 kgf까지, 90°인 경우 54 kgf까지 올라 갔다. 단위 너비 당 인장강도는 0°인 경우 3.5 kgf/mm(한일이화 2.5 kgf/mm), 90°인 경우 2.7 kgf/mm(한일이화 1.2 kgf/mm)이었다. 단 한일이화에서는 인장시편의 너비는 50 mm이다. 울산대에서 시험한 것은 너비가 20 mm로 좁아서 인장강도가 높게 나온 것 같다.

커버 안감과 발포재료(저밀도 PU system, index 100)의 마찰계수를 측정하였다. 강판(340 mm×340 mm, 두께 0.75 mm)을 커버로 둘러싸 발포 재료 블록에 얹고 기울여 서서히 미끄러질 때 기운 각  $\theta$ 를 측정하여 마찰계수  $\mu = \tan \theta$ 를 구하였다. 커버 안감의 결 방향과 미끄러지는 방향과 이룬 각을 0°, 45°, 90°로 바꿔 보았고 강판을 5장까지 늘려 보았다.

마찰계수에 대한 커버 안감의 결 방향의 영향은 뚜렷하였고 결 방향 0°, 45°, 90°에 대한 평균마찰계수는 각각 0.64, 0.73, 0.81이었고 강판의 개수에 대한 마찰계수의 변동은 0.04이내이었다.

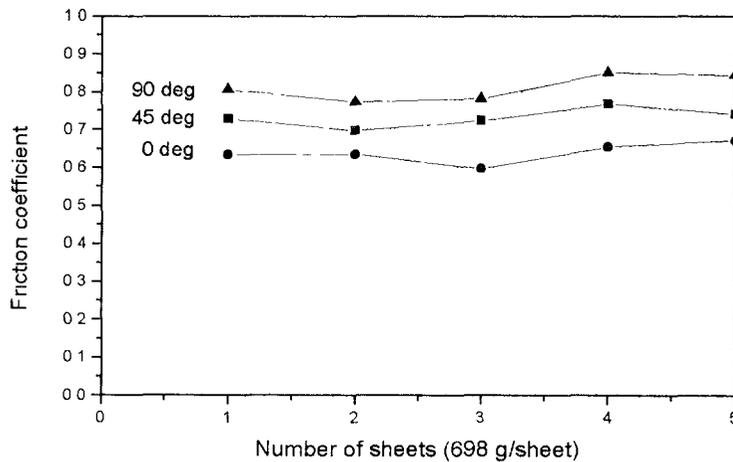


Fig. 7 커버와 쿠션의 마찰계수

Fig. 8은 커버링 전후의 형상을 촬영한 것이다. 운전자 기준 앞쪽 좌우 코너부의 압축 변형이 심하였다.

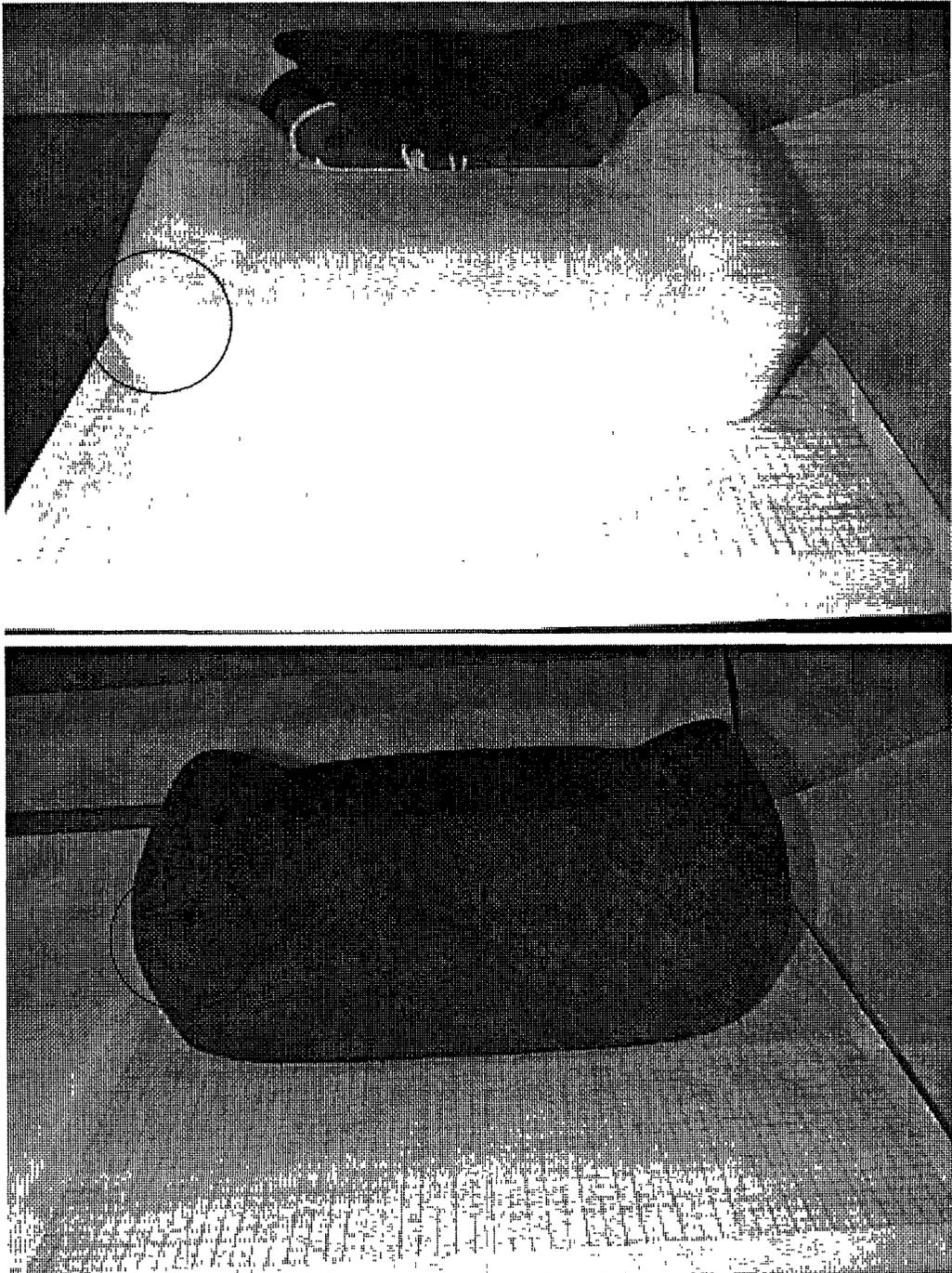
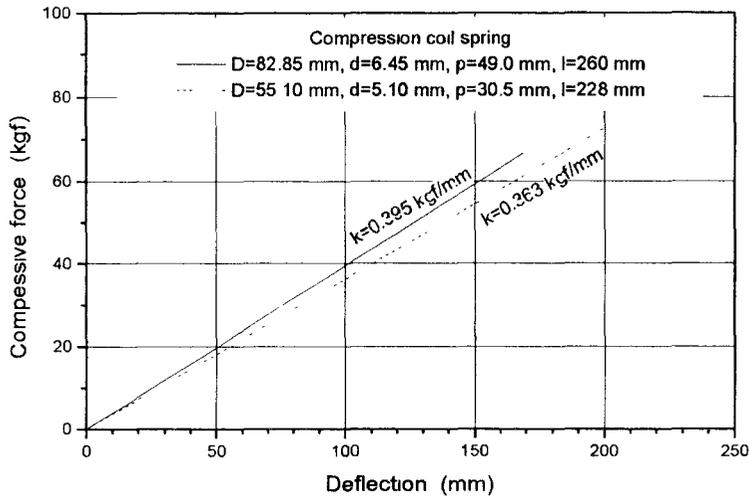


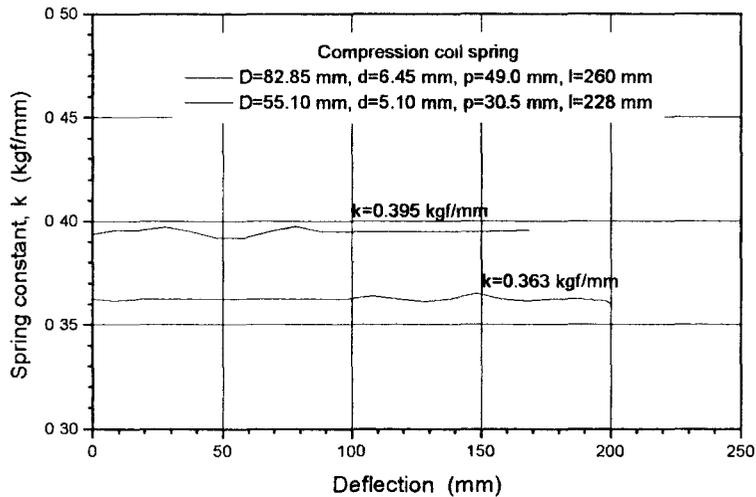
Fig. 8 커버링 전후의 형상 변화

### 2.3 코일스프링의 스프링상수 측정

시트 프레임에는 상하 방향으로 끼운 2 개의 압축 코일스프링을 풀어 코일지름, 소선지름, 피치, 길이를 측정하였다. 각각의 스프링을 압축하였을 때 Fig. 9(a)와 같이 압축력과 처짐의 선형적인 관계가 60 % 넘어서도 잘 유지되었다. Fig. 9(b)는 압축력-처짐 선도의 기울기로서 스프링 상수가 거의 일정하게 유지되는 것이 확인되었다.



(a) 스프링 처짐 선도

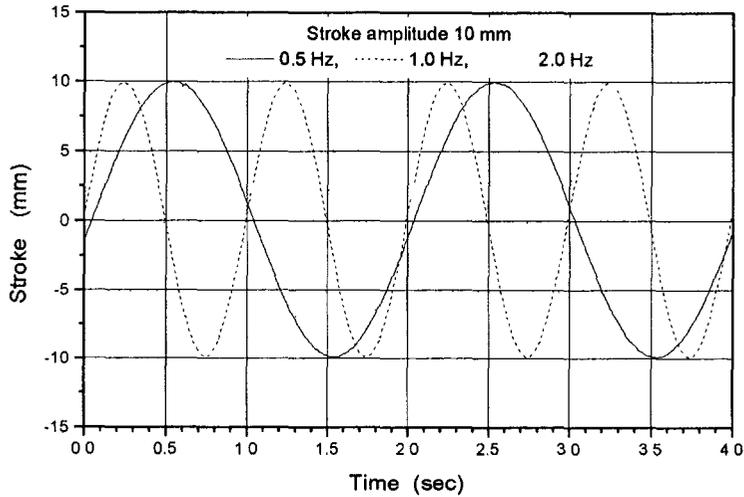


(b) 스프링 상수

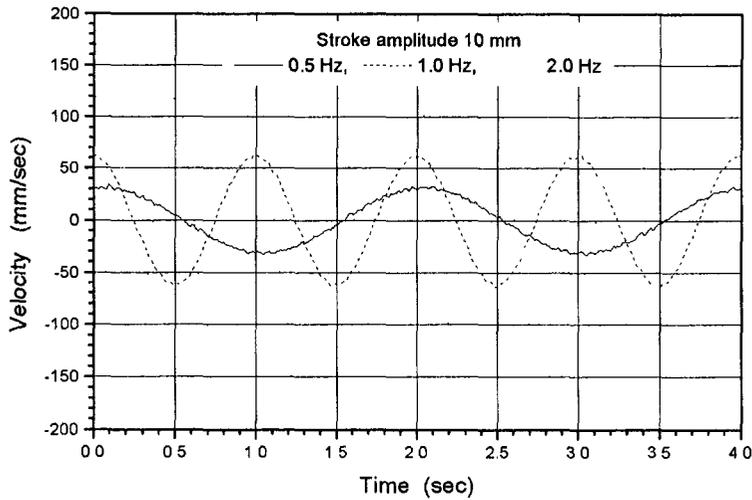
Fig. 9 스프링 상수

### 2. 4 댐퍼의 감쇠계수 측정

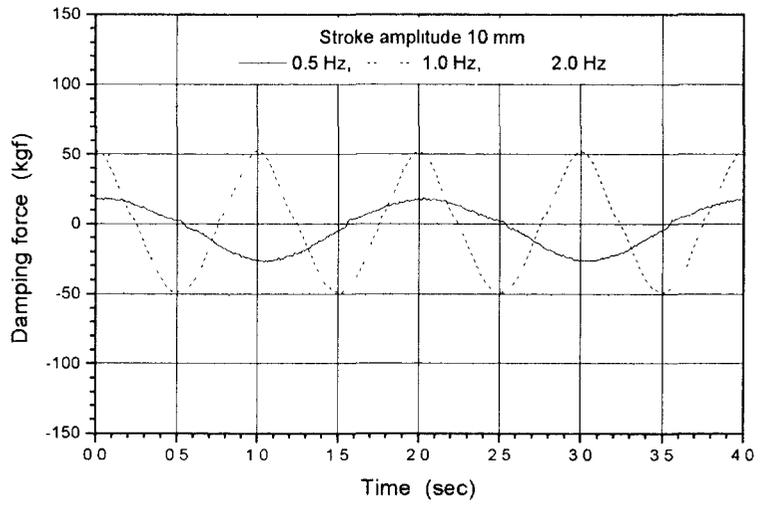
시트 프레임에는 비스듬히 끼운 댐퍼를 풀어 Fig. 10(a)와 같이 Sine 곡선 변위를 주었다. Sine 곡선의 주파수는 0.5 Hz, 1.0 Hz와 2.0 Hz이고 변위진폭은 5 mm, 10 mm, 15 mm을 선택하였다. 변위 곡선을 시간에 관하여 미분하여 Fig. 10(b) 속도 곡선을 얻고 Fig. 10(c) 하중 곡선의 진폭을 속도 곡선의 진폭으로 나누어 감쇠계수를 구하였다. Fig. 10(d)를 보면 속도 120 mm/s까지 감쇠계수는 속도에 거의 무관한 것으로 나타났다. 평균감쇠계수는  $c=0.701 \text{ kgf s/mm}$ 이었다.



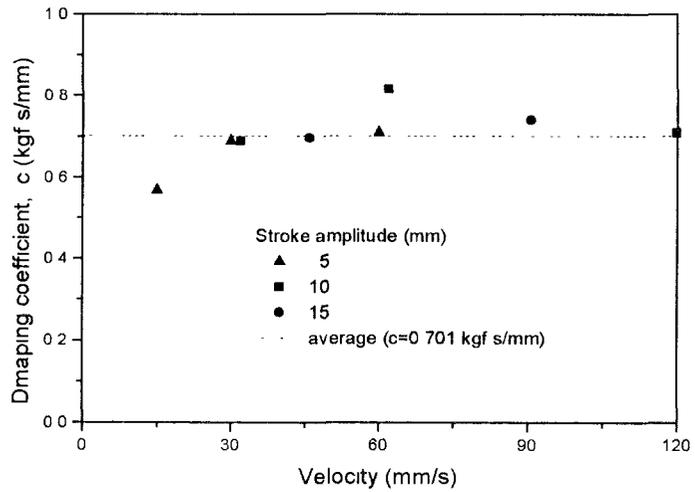
(a) 변위의 변화



(b) 속도의 변화



(c) 감쇠력의 변화



(d) 감쇠계수

Fig. 10 댐퍼의 감쇠계수

### 3. 인체 더미와 시트 쿠션의 접촉 해석

발포재료에 대한 압축시험과 인장시험에서 측정된  $(\sigma, \epsilon, J)$ 를 MARC/MENTAT Experimental Curve Fitting 프로그램에 입력하여 Ogden Model의 상수  $\mu_i, \alpha_i$ 와  $\beta_i$ 를 구하였다. 항의 개수  $N$ 은 3을 지정하였고 압축시험에서 횡방향 단면의 변화가 없었기 때문에 Poisson 비의 추정치로 0을 지정하였다. Table 1이 Ogden Model의 상수이다.

Table 1 Computed Coefficients in Ogden Model

$i$	$\mu_i$	$\alpha_i$	$\beta_i$
1	0.0298292	0.0152657	$-6.43339 \times 10^{-6}$
2	0.0125534	5.9388700	$-2.70744 \times 10^{-6}$
3	-0.0126628	5.5685500	$2.73103 \times 10^{-6}$

Table 1의 Ogden Model 상수를 넣어 압축시험을 시뮬레이션하여 보았다. 대칭성을 이용하여 정육면체 압축시험편의 1/4을 1 개의 육면체 요소로 표현하였다. Fig. 11은 높이 40 mm인 요소를 30 mm(높이의 75 %) 압축한 상태이다. 압축시험과 같이 횡방향 단면의 변화가 거의 없었다.

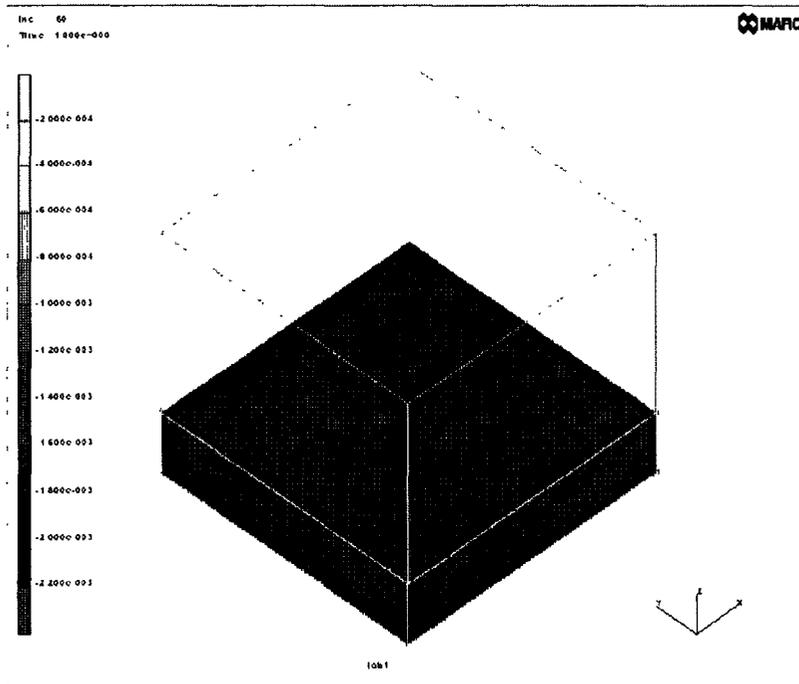


Fig. 11 Simulation of Uni-Axial Compression Test

실제 압축시험과 인장시험에서 얻어 Ogden Model의 계수를 구할 때 넣은  $\sigma$ - $\epsilon$  선도가 Ogden Model의 계수를 넣어 시뮬레이션한 압축시험과 인장시험에 제대로 반영되었는지 확인하여 보았다.  $\sigma$ 는 실제 압축시험에서는 작용한 압축력을 초기단면적으로 나눈 것이고 시뮬레이션에서는 Cauchy Stress Minimum(압축시험), Cauchy Stress Maximum(인장시험)이다. 실제 압축시험과 인장시험의 결과는 경계인 원점에서 부드럽게 이어지지 않았지만 시뮬레이션에서는 부드럽게 잇고 말았다. 인장영역 일부를 제외하고는 시뮬레이션의 결과가 Ogden Model의 계수를 구할 때 넣은  $\sigma$ - $\epsilon$  선도와 잘 일치하였다.

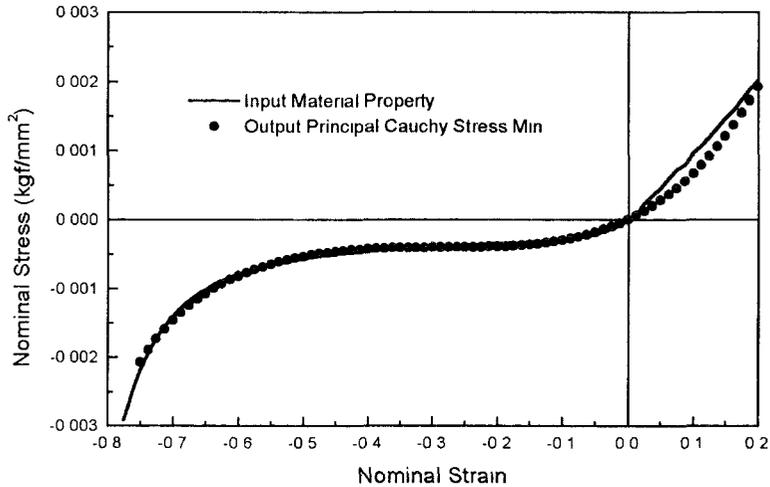


Fig. 11 Ogden Model의 계수를 구할 때 입력한  $\sigma$ - $\epsilon$  선도와 압축시험 시뮬레이션의 결과 비교

사람이 시트 쿠션에 앉을 때 쿠션의 압입변형과 접촉압력의 분포를 예측하기 위한 유한 요소모델이다. 인체와 쿠션은 좌우 대칭을 가정하여 좌측 반만 모델링하였다. 인체는 강체 더미로 취급하여 표면으로 나타냈고 쿠션은 육면체 요소로 표현하였다.

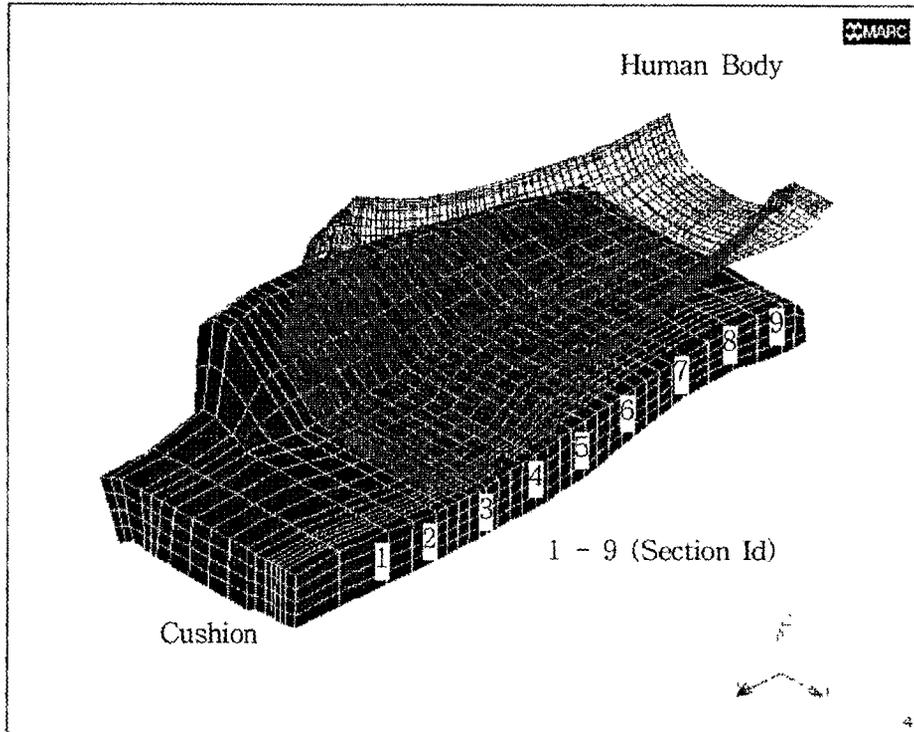


Fig. 12 쿠션과 인체의 형상 모델링

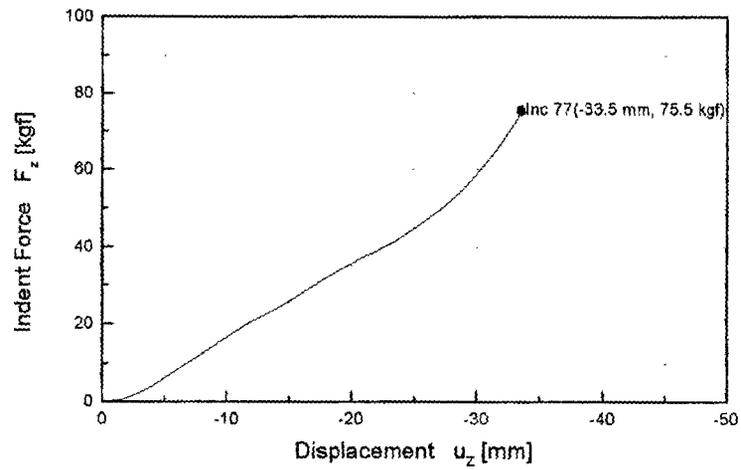
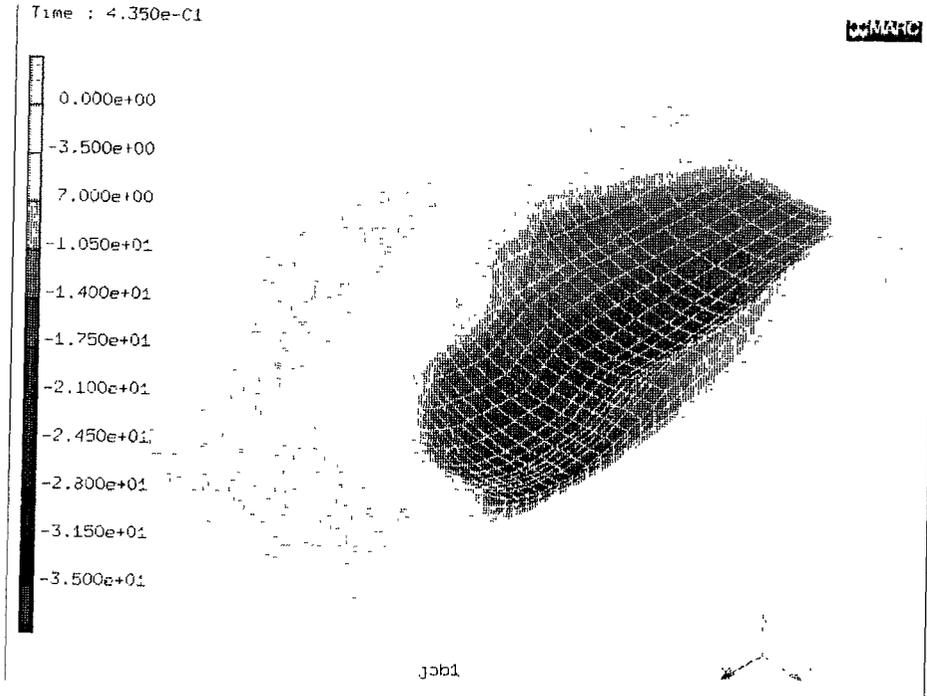
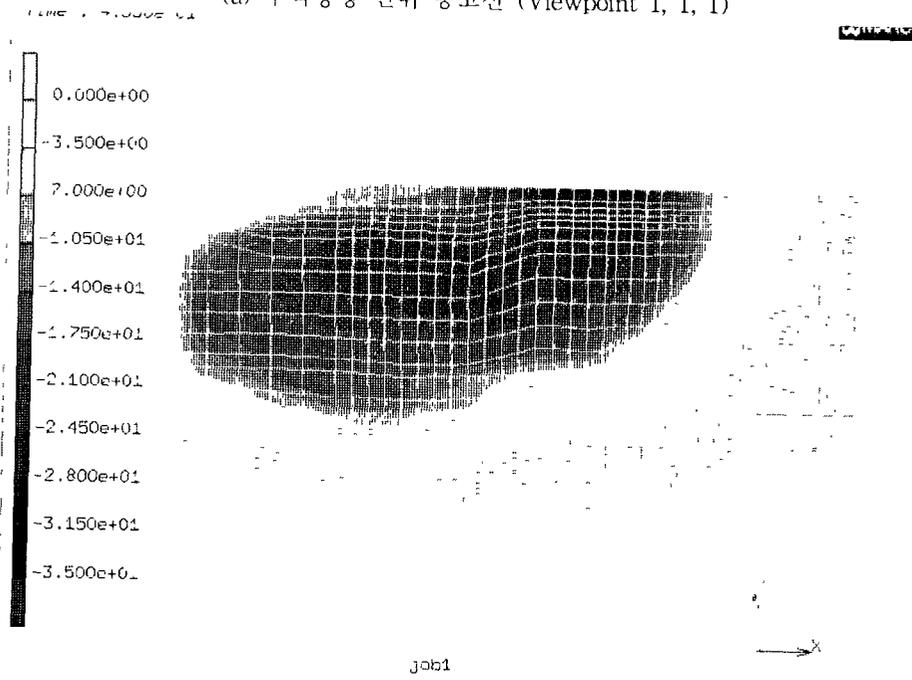


Fig. 13 압입력-처짐 선도

Fig. 13은 압입력과 처짐 선도이다. Fig. 11을 보면 스트레인 범위 -0.5까지 대체로 수평이 유지되지만 처짐이 증가하며 접촉면적도 증가하기 때문에 압입력은 Fig. 13과 같이 증가반까지도 선형적으로 증가한다. 시트 시험에서 사용하는 표준인체의 무게 75 kg에 이르렀을 때 처짐은 33 mm이었다.

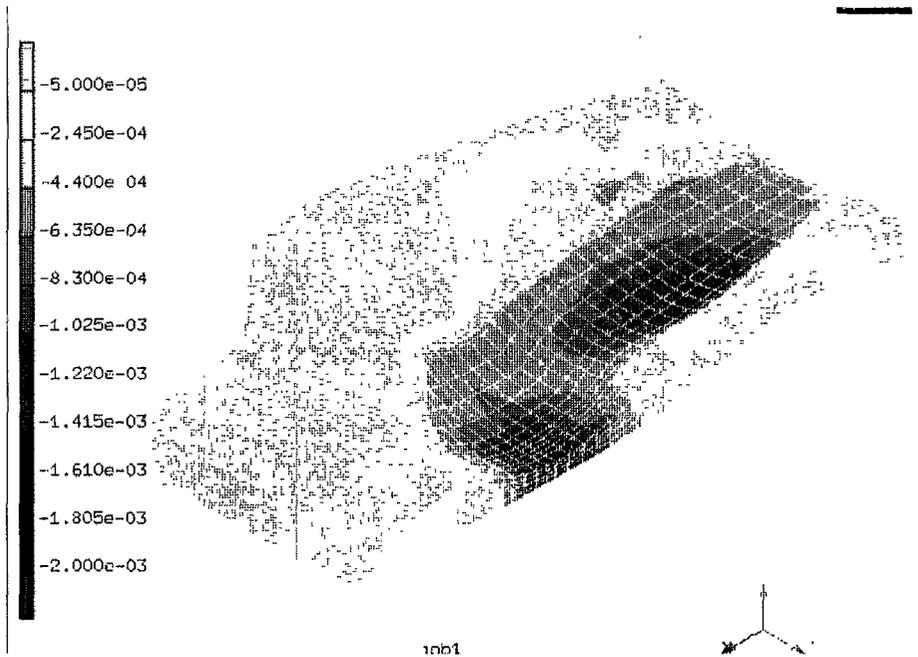


(a) 수직방향 변위 등고선 (Viewpoint 1, 1, 1)

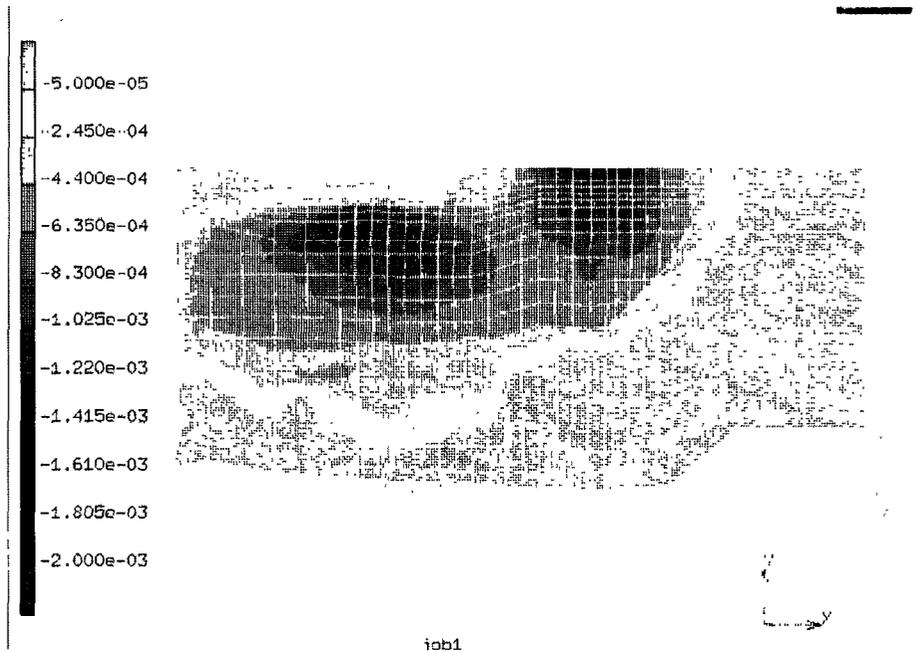


(b) 수직방향 변위 등고선 (Viewpoint 0, 0, 1)

Fig. 14 수직방향 변위 분포



(a) 접촉압력 등고선 (Viewpoint 1, 1, 1)



(b) 접촉압력 등고선 (Viewpoint 0, 0, 1)

Fig. 15 접촉압력의 분포

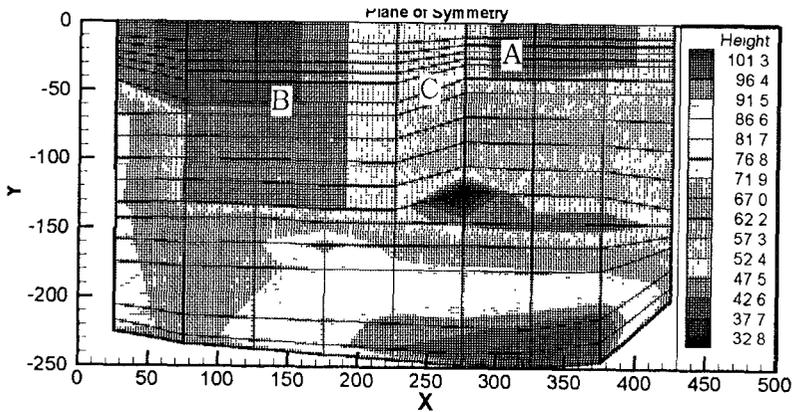
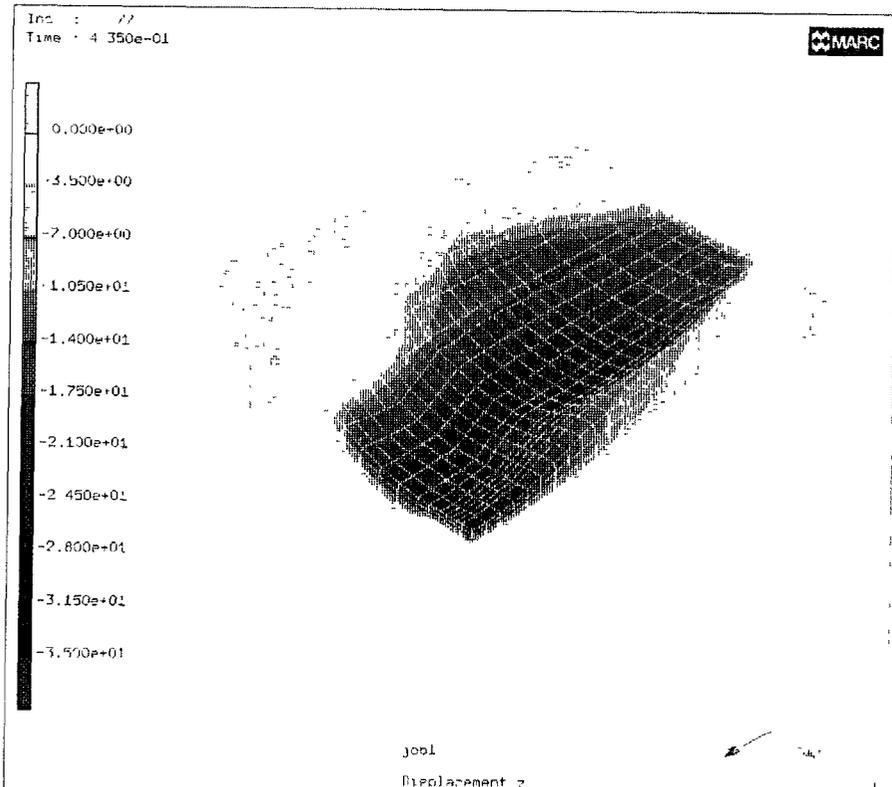


Fig. 16 쿠션 두께의 분포

Fig. 16은 쿠션의 두께 분포이다. A, B, C점은 Fig. 14를 보면 처짐이 비슷하지만 Fig. 15를 보면 접촉압력은 B가 높고 A는 약간 낮으며 C는 많이 낮다. Fig. 16을 보면 두께는 거꾸로 C가 두껍고 A가 약간 얇고 B는 더 얇다. 따라서 압축 스트레인은 B가 높고 A는 약간 낮으며 C는 많이 낮다. 이것은 A, B, C점 접촉압력의 순서와 일치한다.

Fig. 17은 A점(엉덩이 부위)이 포함된 단면, Fig. 17은 B점(허벅지 부위)이 포함된 단면에서 처짐과 압축응력(Cauchy stress minimum)의 분포를 그린 것이다.



(a) 수직방향 변위의 분포

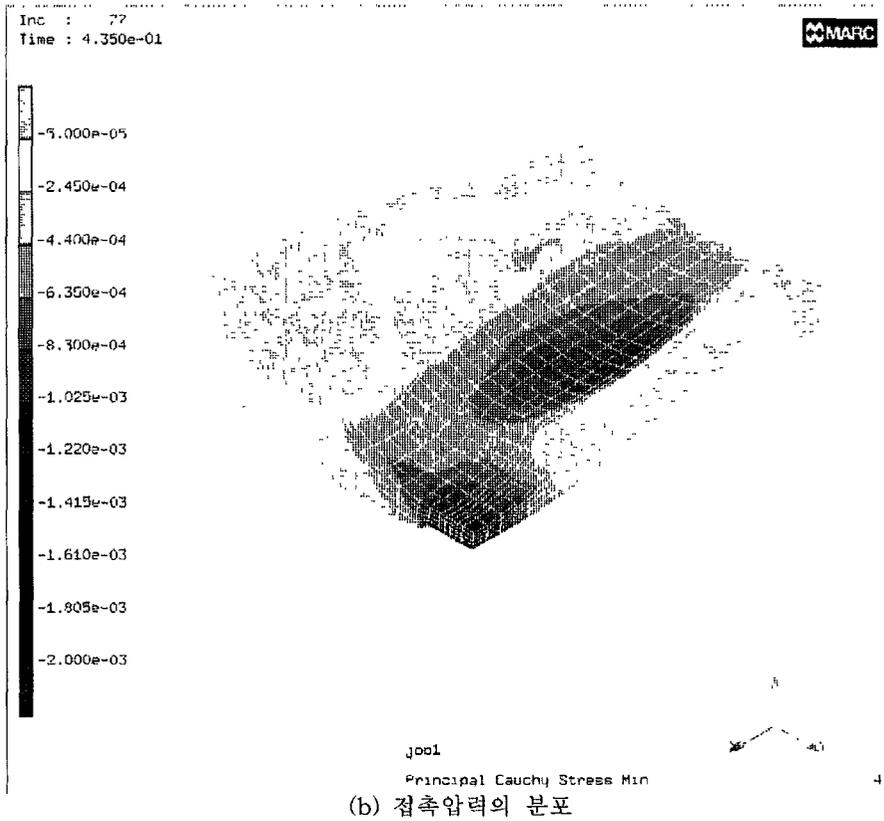


Fig. 17 엉덩이 접촉부위 단면

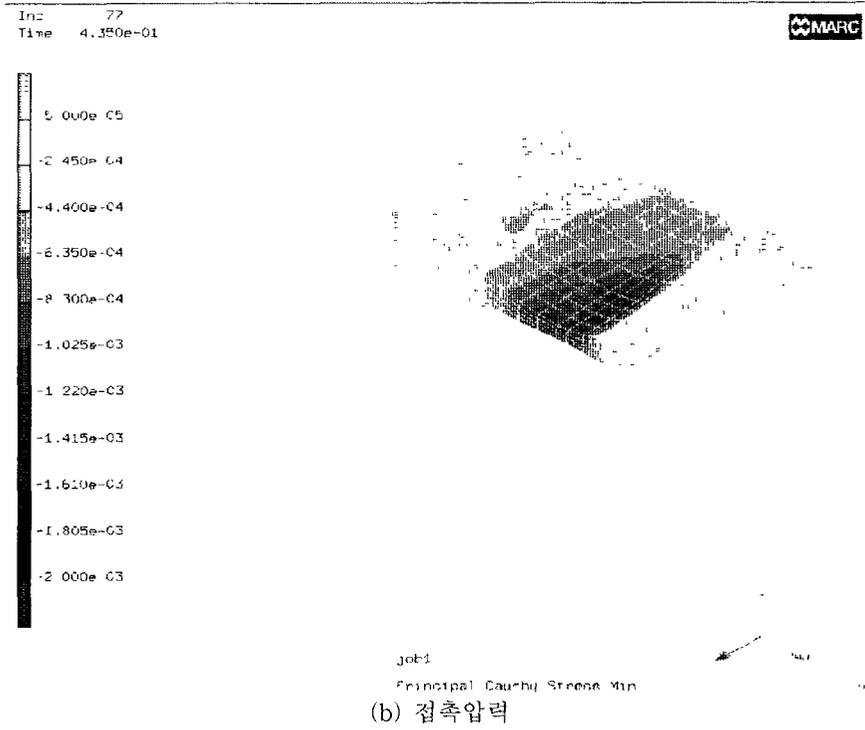
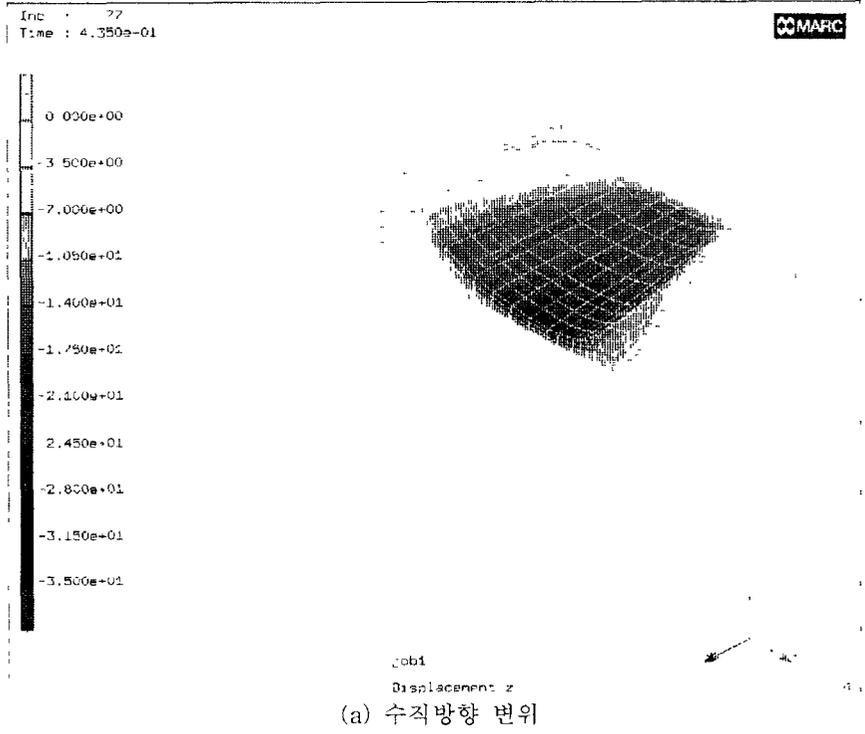
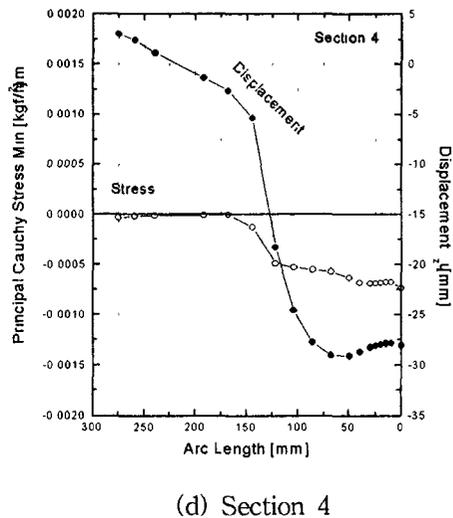
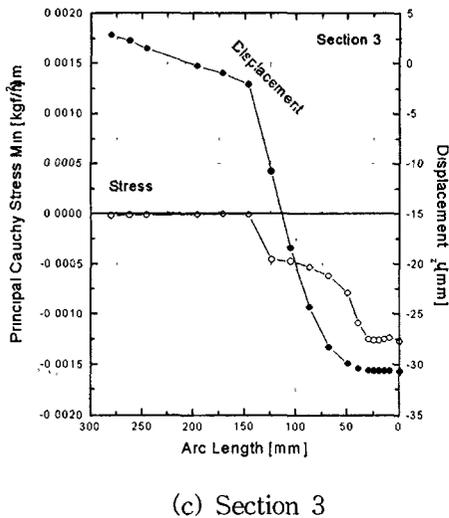
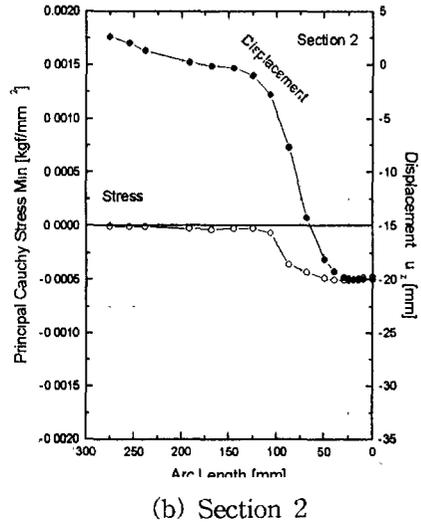
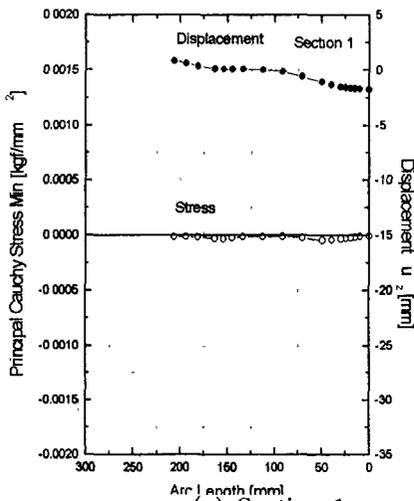
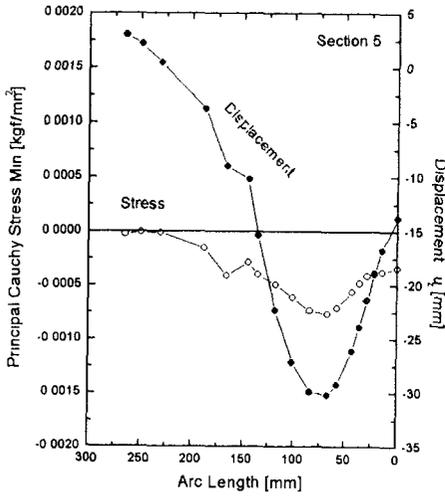


Fig. 18 허벅지 접촉부위 단면

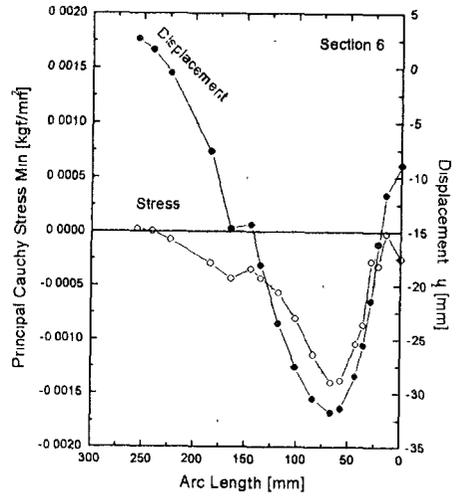
Fig. 19는 단면 1-8에서 인체 더미와 접촉한 쿠션 표면의 처짐과 접촉압력을 그린 것이다. 각 그래프의 우측이 쿠션 중앙 대칭면이다. 각 단면에서 처짐이 최대인 부위와 접촉압력이 최대인 부위가 대체로 일치한다.

처짐이 최대인 부위의 처짐을 그 부위의 두께로 나눈 압축스트레인과 접촉압력의 관계를 Fig. 20(a)에 그려 보았다. 데이터 점에 붙인 번호는 각 단면의 번호이다. 이 중에서 1, 7, 9 번을 제외하고는 실선으로 표시한 입력 데이터  $\sigma-\varepsilon$  선도와 잘 일치하였다. 1, 9 번은 전후 접촉범위 가장자리이고 응력이 낮은 부위로서 중요하지 않은 부위이고 7 번은 Fig. 19(g)를 보면 부근에서 처짐의 변화가 심한 부위이다. 이 부위 쿠션의 형상은 인체 더미와 접촉하는 상단은 평평하지만 하단은 날카롭게 꺾어진다. 두께 방향에 걸쳐 압축응력의 분포가 고르지 않기 때문에 입력 데이터  $\sigma-\varepsilon$  선도와 잘 일치하지 않는 것으로 판단된다.

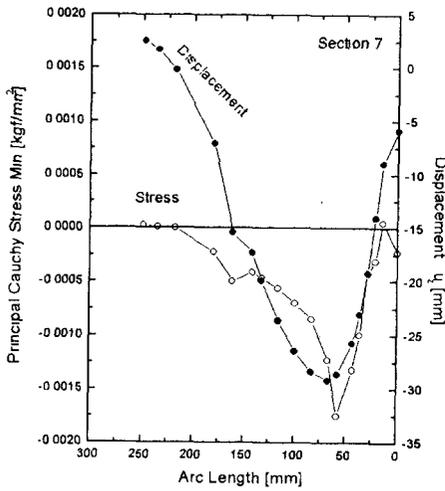




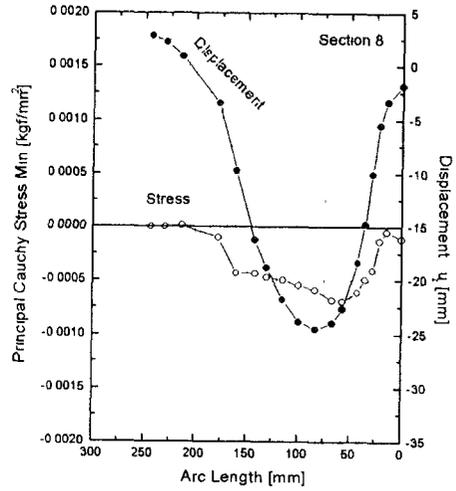
(e) Section 5



(f) Section 6



(g) Section 7

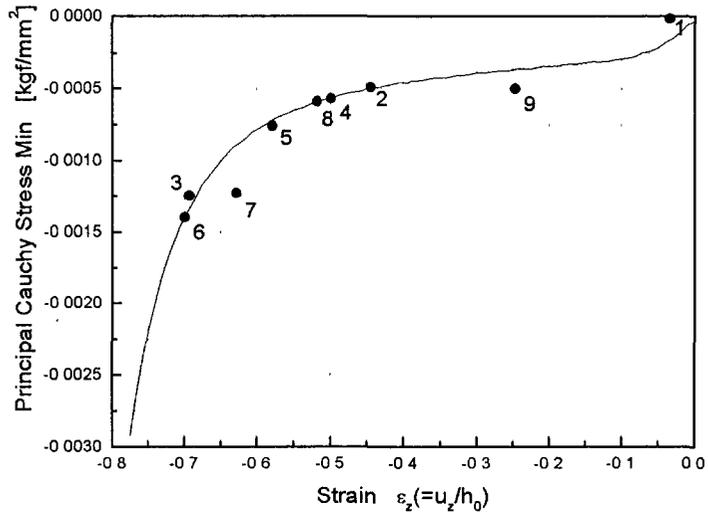


(h) Section 8

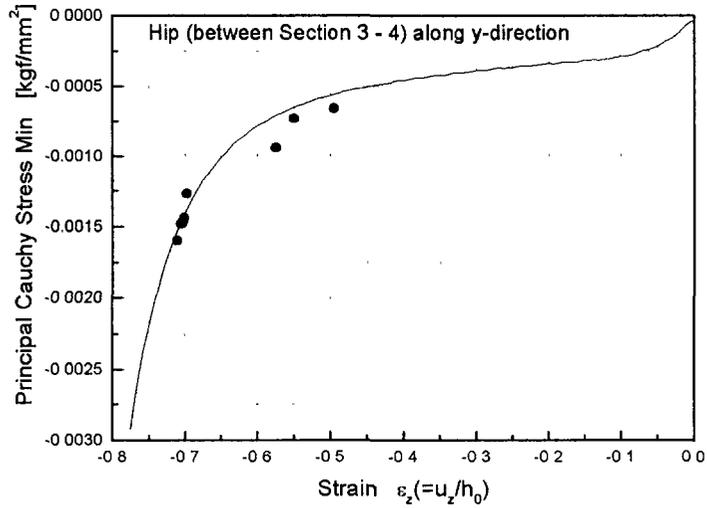
Fig. 19 각 단면 별 수직방향 변위와 접촉입력의 분포

Fig. 20에서  $\sigma-\epsilon$ 관계 곡선은 발포재료의 압축시험에서 결정되는 것이다. 횡축 스트레인은 압입 깊이인  $z$  방향 변위  $u_z$ 를 그 부위의 두께  $h_0$ 로 나눈 것으로 쿠션과 인체 더미의 형상이 주어지면 결정되는 것이다. 시뮬레이션 결과 얻은 주요 부위의 접촉압력(● 표시)이 단순히  $z$  방향 변위를 그 부위의 두께로 나눈 스트레인에 대하여 그러도  $\sigma-\epsilon$ 관계 곡선과 대체로 잘 일치한다. 이것은 다음과 같은 점에서 중요하다. 즉, 주요 부위의 접촉압력은 유한요소해석을 거치지 않고서도, 쿠션과 인체의 간섭 깊이를 두께로 나눈 스트레인

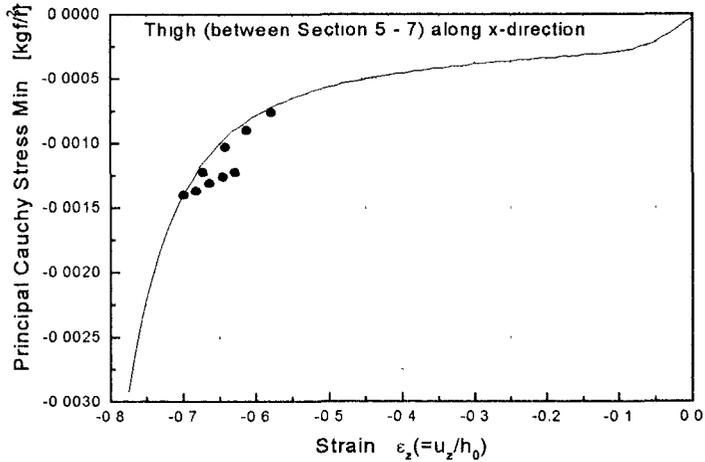
을 구하고  $\sigma - \epsilon$  관계 곡선에서 해당하는 응력을 찾는 것으로 접촉압력이 결정된다.



(a) 각 단면 최대처짐 부위



(b) 엉덩이 접촉부위



(c) 허벅지 접촉부위

Fig. 20 접촉압력과 스트레인의 관계

#### 4. 결론

시트 쿠션의 재료인 Polyurethane 발포재료에 대한 압축시험과 인장시험의 결과인  $(\sigma, \epsilon, J)$ 의 관계 데이터로 발포재료 Ogden model의 상수(차수  $N=3$ )를 결정하였다. 인장 영역은  $(\sigma, \epsilon, J)$ 의 관계곡선을 완만하게 표현하였지만 압축영역은 정확하게 표현하였다. 이 상수를 입력하여 압축시험과 인장시험을 시뮬레이션하여 보니 접촉압력은 압축시험에 대하여는 Cauchy Stress Min, 인장시험에 대하여는 Cauchy Stress Max에 해당하였다.

강체 표면으로 취급한 인체 더미와 육면체 요소로 표현한 시트 쿠션의 접촉변형을 시뮬레이션하여 보니 접촉압력은 허벅지와 엉덩이 접촉부위가 높았다. 그리고, 수직방향 압입 변위 분포와 접촉압력의 분포가 다소 다른 것을 발견하였다. 이것은 두께의 분포가 다르기 때문인 것을 밝혀졌다.

각 단면에서 접촉압력이 최대인 부위는 대체로 압입변위가 최대인 부위와 일치하였고 이 부위의 접촉압력은 비선형 유한요소 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 거치지 않고서도 압축시험에서 얻은  $\sigma-\epsilon$ 곡선과 인체더미와 시트 쿠션의 간섭(즉, 압입변위), 그 부위의 초기두께만으로 비교적 정확히 예측되었다. 이 방법은 아주 간단하므로 시트 쿠션 형상의 초기 설계나 접촉압력 분포의 개선 과정에 활용될 것이다.

#### 감 사

본 연구는 “과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구센터”의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. 유한요소법에 의한 시트 패드의 정하중 굽힘특성(출처 없는 일본 논문)
2. D. M. Brienza, et. al., A system for the analysis of Seat Support Surfaces Using Surface Shape Control and Simultaneous Measurement of Applied Pressures, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 4, No. 2, June, 1996.
3. MARC K7.2 User's Manual.
4. S. S. Bikhu, Material modeling of structural foams in finite element analysis using compressive uniaxial and triaxial data, pp.547-565, 930434.
5. Annual Books of ASTM Standards, Section 9, Rubber, Vol. 09.02, D3574-01, Standard Test Methods for Flexible Cellular Material Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams.
6. Joint Industry Foam Standards and Guidelines. <http://www.pfa.org/jifsg/contents.html>
7. V. D. Dimitrios and G. L. Wilkes, Structure-property relationships of flexible polyurethane foams, Polymer, Vol. 38, No. 11, pp.2819-2828, 1997.