

기술 특 집

PDP용 패널유리의 정적 강성 평가 및 유한요소 모델링

탁태오*, 김현영*, 국민구** (*강원대학교 기계/메카트로닉스 공학부, **강원대학교 기계/메카트로닉스 공학과 대학원)

I. 서 론

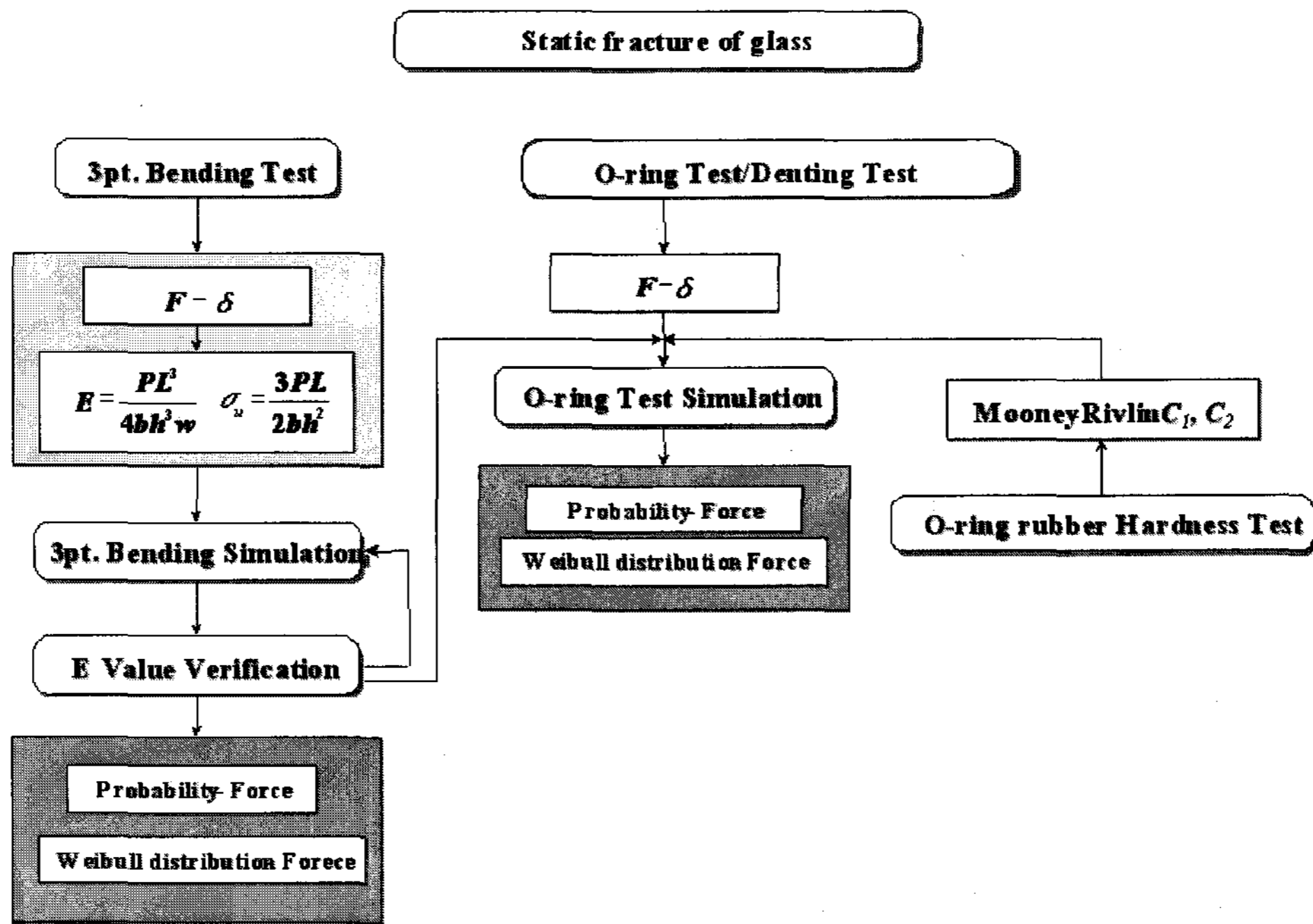
평판 디스플레이에 사용되는 PDP용 유리의 기계적 특성은 물성치가 표준화된 철과 같은 금속재료와 달리 유리의 제조공정에 따라서 물성치에 많은 편차가 발생하고, 또한 강한 취성을 가지므로 탄성변형 이론^[1]에 근거한 수학 모델로 유리의 정밀한 동적 거동을 예측하기가 용이하지 않다.

이러한 유리의 기계적 특성을 고찰하고 실험적 방법에 의해서 유리의 물성치를 결정하여 이를 바탕으로 유리에 대한 유한요소모델을 구하는 과정에 대해서 살펴보고자 한다. 이러한 과정은 [그림 1]에 나타난 바와 같이 정적 강성 평가 과정을 통해 표준화된 절차의 시험을 수행하고 이 시험 결

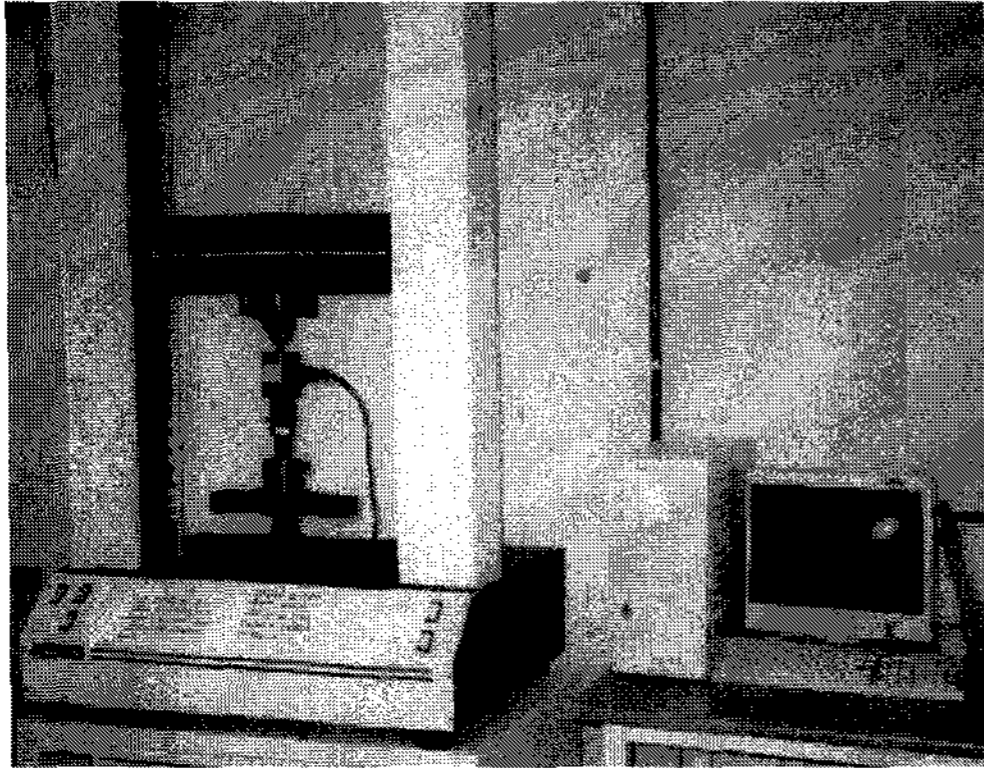
과에 대한 역학적 분석을 통해서 유리의 물성치를 추출하고, 이 물성치에 근거하여 유리의 유한요소모델을 구성하고자 한다.

II. 본 론

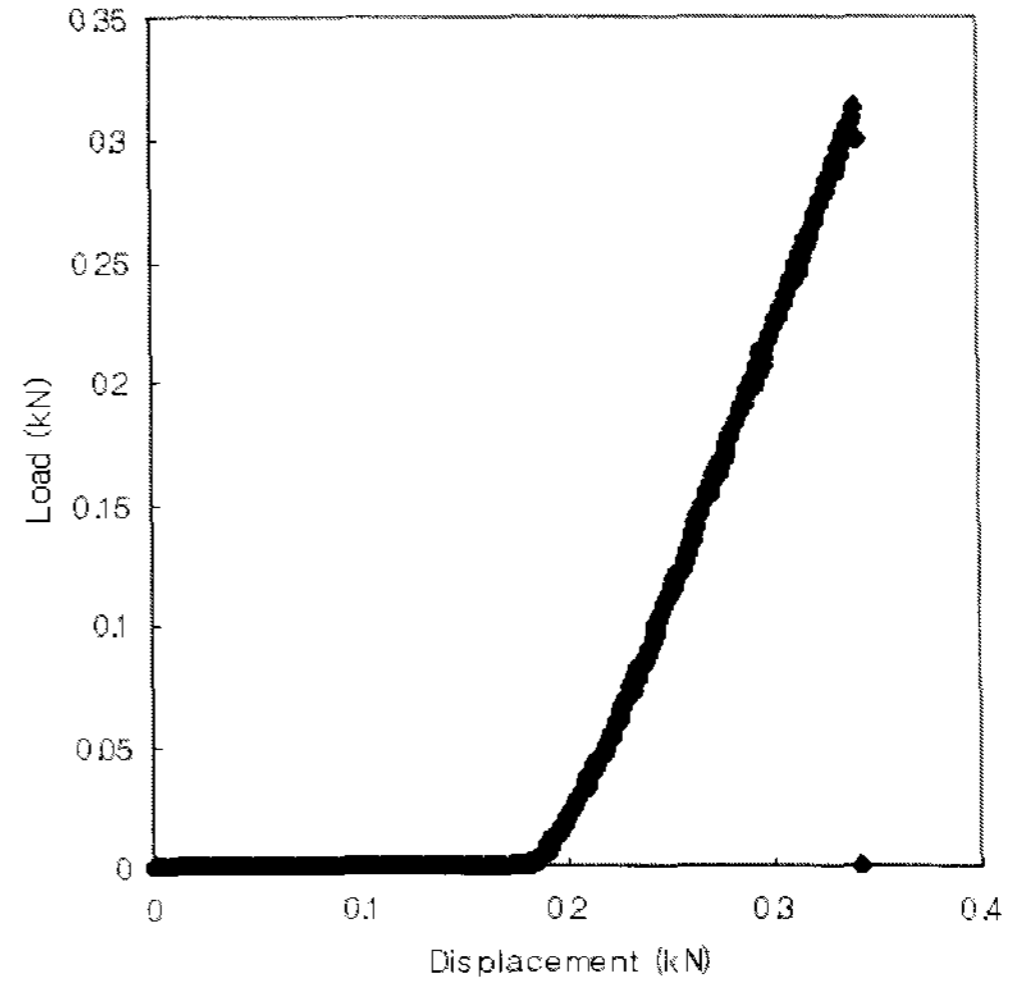
유리와 같은 취성 재료의 물성치를 확보하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 시험은 3점 굽힘 시험(3 Point Bending Test)과 오링 시험(O-ring Test)이다. 이러한 시험을 수행하기 위해서 [그림 2]와 같은 인장과 압축이 가능한 만능시험기를 사용하였다.



[그림 1] 유리의 정적 강성평가 과정



[그림 2] 인장/압축 만능 시험기



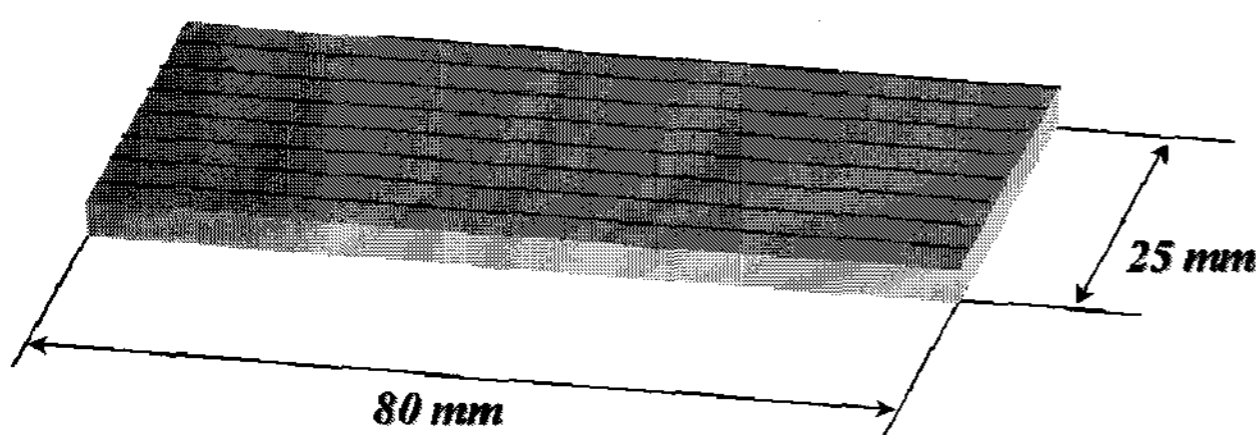
[그림 5] 3점 굽힘 시험의 결과그래프

1. 3점 굽힘 시험 평가(3 Point Bending Test)

3점 굽힘 시험의 시편의 종류와 규격은 [그림 3]의 (a), (b)와 같다. 시험 방법은 ASTM 규정에 의하여 [그림 4]와 같은 3점 굽힘 지그를 구성하였다. 그리고 3점 굽힘 시험의 하중속도는 인장면의 변형률 속도가 0.01mm/mm-min

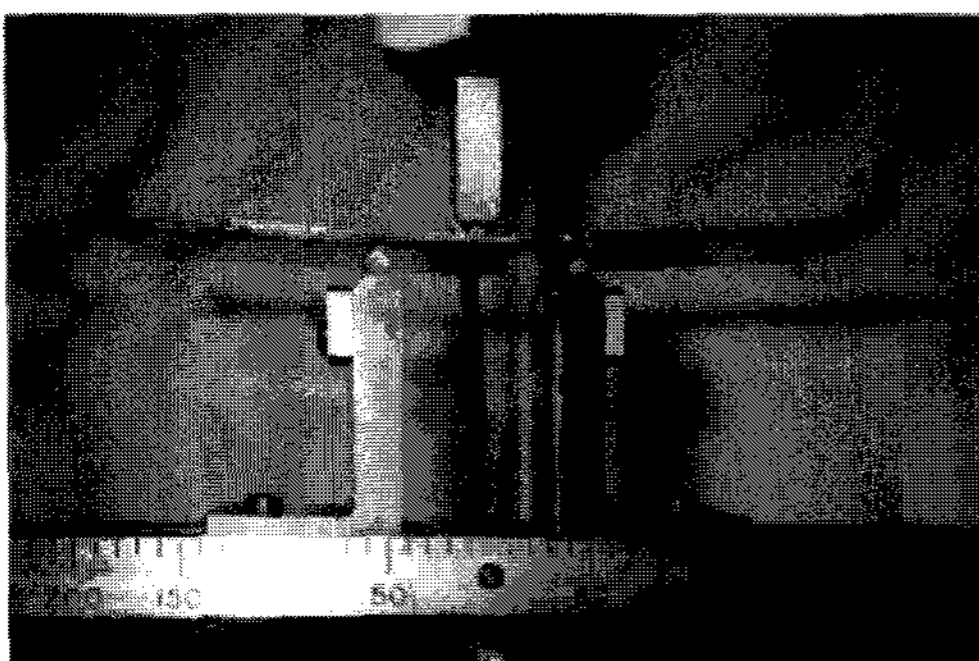
Type	연마 가공	다이아 가공	레이저 가공
상 판 (개수)	수평 (50EA)	수직 (50EA)	수직 (50EA)
하 판 (개수)	수평 (50EA)	수직 (50EA)	수평 (50EA)

(a) 시편의 종류



(b) 시편의 규격

[그림 3] 3점 굽힘 시험의 시편



[그림 4] 3점 굽힘 시험

을 넘지 않도록 하고 인장강도를 측정하기 위해 유리시편의 파괴가 일어날 때까지 시험을 수행하였다.

3점 굽힘 시험의 시험결과는 [그림 5]와 같은 형태의 그래프로 출력된다. 이 그래프의 앞부분에는 0에 가까운 하중이 작용하는 구간이 넓은 범위에 걸쳐서 나타나는데 이것은 일정 속도로 이동하는 Data Accumulator의 Loading device가 유리판과 직접 접촉하기 전까지 하중을 받지 않기 때문이다. 따라서 최대 파단 응력을 계산하기 위해서 시험 결과 변위를 Loading device와 유리판 사이의 거리만큼 보정해 주었고 변위 보정 기준은 최대 파단 하중의 0.5%가 작용할 때까지 변위를 Loading device와 유리판 사이의 거리로 하였다.

[그림 6]은 Loading device와 유리판 사이의 거리를 고려하여 보정된 각 시편별 3점 굽힘 시험 결과의 하중-변위 분포도로 출력된 결과는 작용하중(Ib)과 Strain(%)로 구성된다.

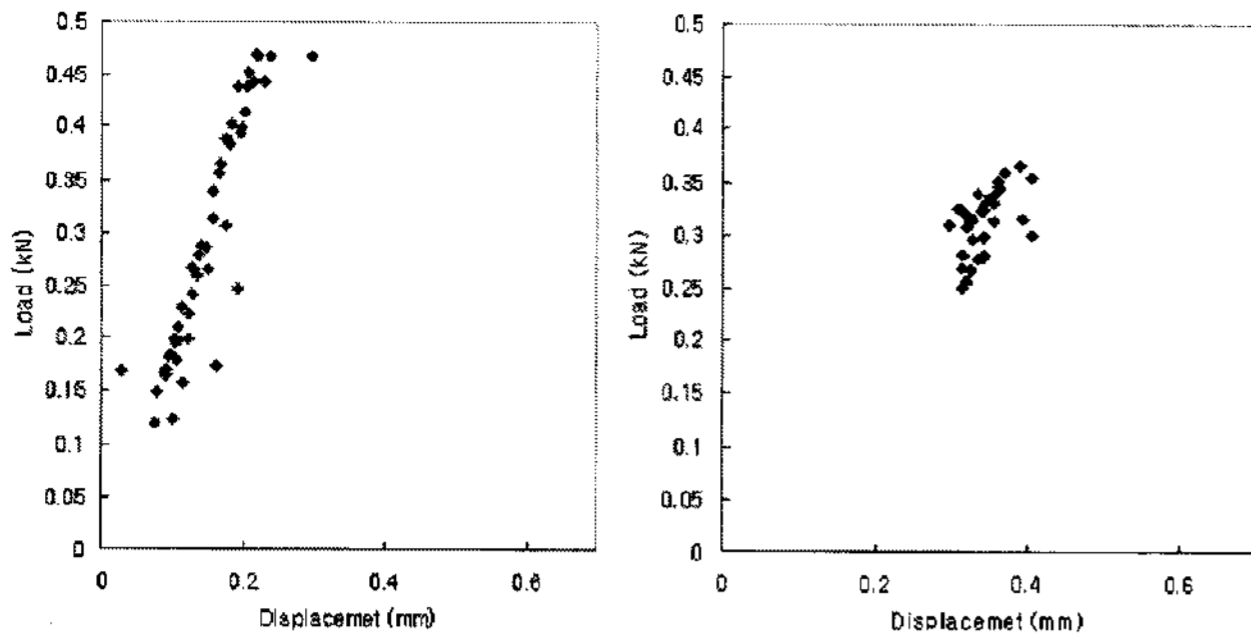
인장/압축 만능 시험기에서 Ascii data로 저장된 결과인 유리 시편의 파단 하중과 최대 변위 데이터 중 레이저 가공 상판(수직) 시편의 데이터를 식 (1)을 이용하여 mm, kN으로 환산한 것으로 여러 개의 결과 데이터 중 10개를 선택하여 [표 1]과 같이 나타내었다. 여기서 Strain(%)은 시편의 처짐량을 500mm에 대한 변형률(%)로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \text{Displacement (mm)} &= [\text{Strain}(\%) / 100] \times 500 (\text{mm}) \\ \text{Load (kN)} &= [\text{Load (Ib)} \times 4.45] / 1000 \end{aligned} \quad (1)$$

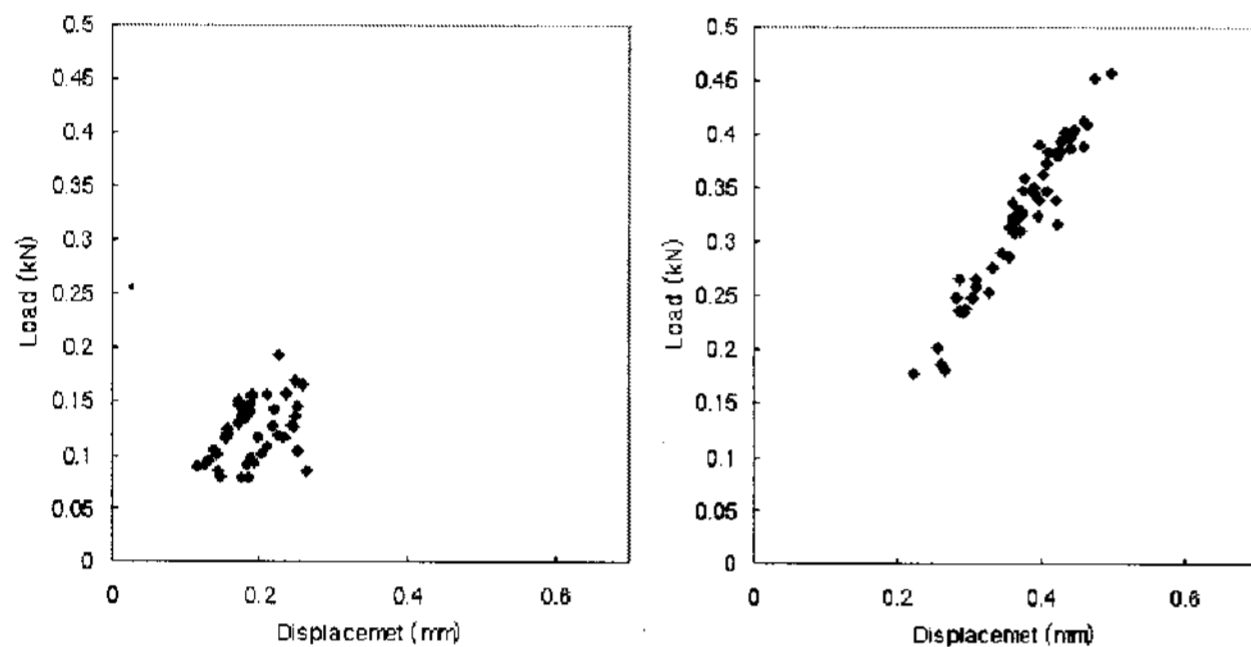
[표 1]에서 변위가 Strain에 정확하게 5배가 되지 않는 것은 시험 초기 오차인 Loading device와 유리판 사이의 거리를 제외시켰기 때문이다.

3점 굽힘 시험 결과를 이용하여 유리 시편의 응력^[2]과 Young's modulus 1을 계산하였으며 관련된 식은 다음과 같다.

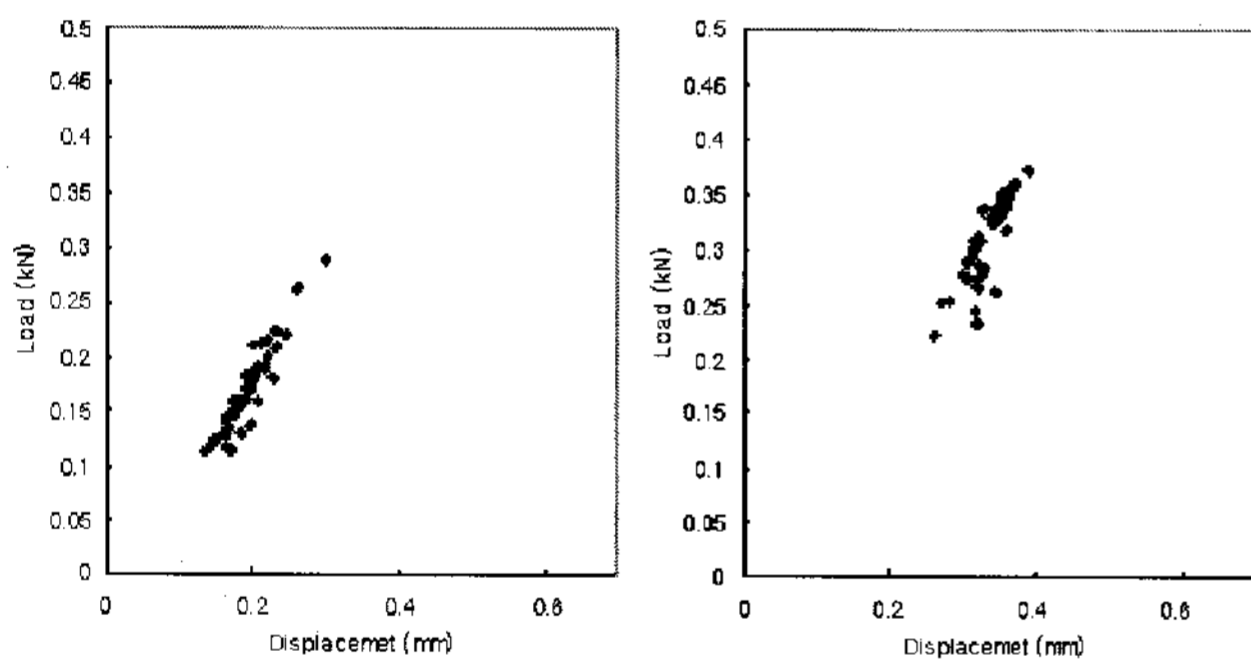
$$\sigma_u = \frac{3PL}{2bh^2}, \quad E_1 = \frac{PL^3}{4bh^3 \delta_{\max}} \quad (2)$$



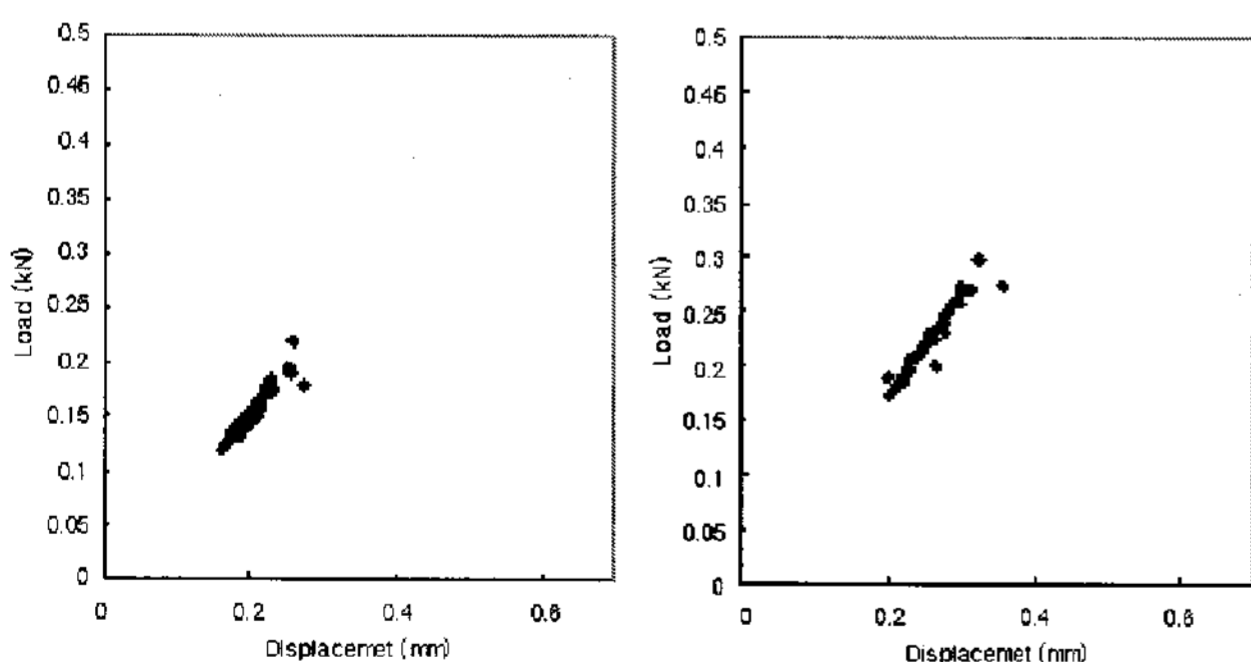
(a) 다이아몬드 가공 상·하판(수평)



(b) 다이아몬드 가공 상·하판(수직)



(c) 레이저 가공 상판(수직)과 하판(수평)



(d) 연마 가공 상·하판(수평)

[그림 6] 각 시편의 시험 결과 하중-변위 분포도

여기서 δ_u 는 유리 시편의 응력, E_1 는 Young's modulus 1, P 는 최대 작용 하중, L 은 표점 거리, b 는 시편의 폭, h 는 시편의 두께, δ_{max} 는 시편의 최대 처짐량이다.

특히 Young's modulus 2는 인장/압축 만능 시험기에서

[표 1] 레이저 가공 상판(수직)의 3점 굽힘 시험

No.	Strain (%)	Load (lb)	Displacement (mm)	Load (kN)
1	0.04	25.26	0.22	0.11
2	0.04	28.48	0.21	0.13
3	0.05	31.95	0.23	0.14
4	0.06	33.83	0.26	0.15
5	0.06	35.38	0.29	0.16
6	0.06	38.39	0.30	0.17
7	0.07	41.99	0.34	0.19
8	0.07	47.05	0.36	0.21
9	0.06	49.85	0.30	0.22
10	0.07	64.93	0.37	0.29

[표 2] Young's modulus 1 & 2

No.	Stress (GPa)	Young's modulus 1 (GPa)	Young's modulus 2 (GPa)
1	0.04	29.64	77.12
2	0.05	34.55	82.56
3	0.05	35.22	79.85
4	0.06	32.69	81.99
5	0.06	30.62	80.51
6	0.07	32.46	90.56
7	0.07	31.49	82.09
8	0.08	33.29	79.32
9	0.09	42.68	61.84
10	0.11	44.06	82.77

Ascii data로 저장된 결과의 선형적인 부분의 기울기를 이용하여 E값을 구한 것이다. 하중-변위 곡선의 비례한도 내에서 기울기는 선형적이어서 시편의 초기 비선형적인 변화를 오차로 보았고 단지 선형적인 부분만을 고려하였다.

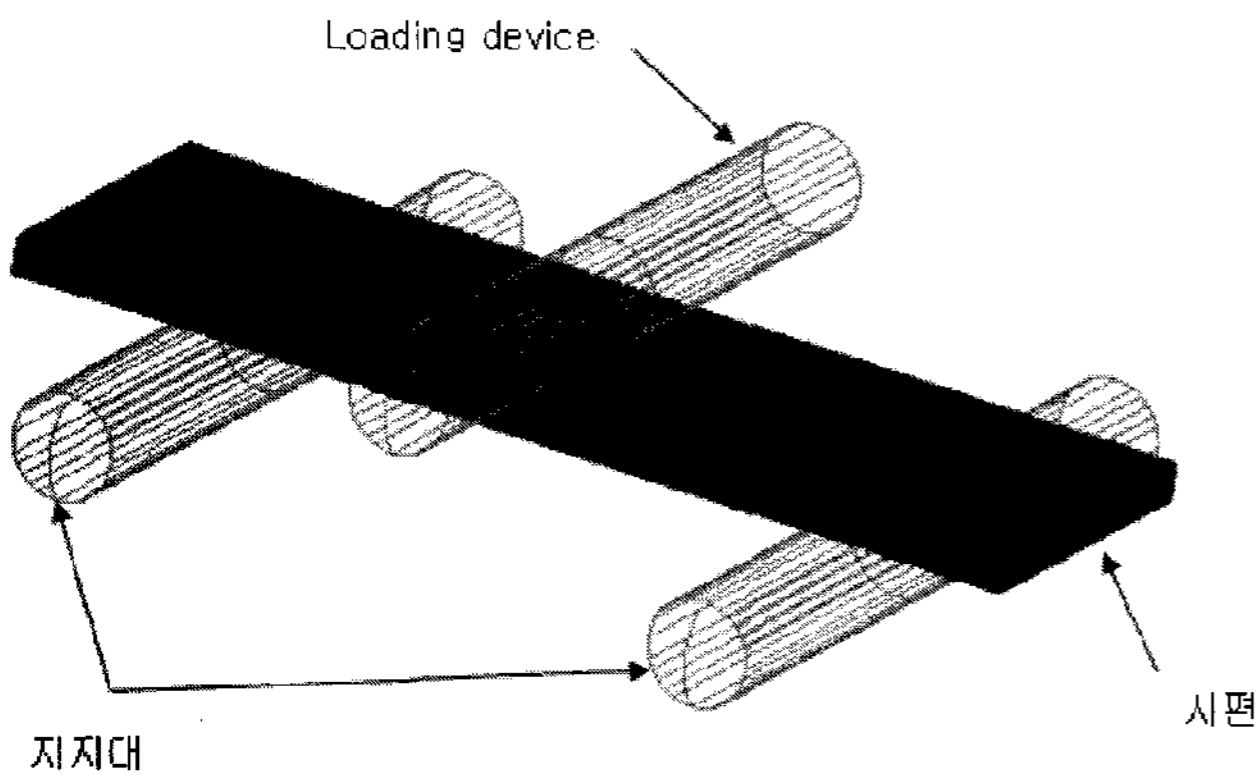
레이저 가공 상판(수직) 시편의 응력과 Young's modulus 1, Young's modulus 2를 나타낸 [표 2]는 Young's modulus 1과 Young's modulus 2 사이에 매우 큰 차이가 있음을 보여주고 있다.

[표 3]은 앞에서 구한 Young's modulus 1, Young's modulus 2, 파단 응력^[3]의 평균값과 범위를 나타내었다. 특히 식 (3)의 Weibull Function을 이용하여 최대 파괴 응력과 누적 파손 확률의 관계식에서 누적 파손 확률이 1%일 때의 응력인 1% Stress를 포함시켰다. 레이저 가공 상판(수직) 시편의 Weibull 1% Stress는 0.03(GPa)이다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{0.069798}\right)^m\right] \quad (3)$$

[표 3] Young's modulus 1 & 2, Fracture Stress

	범 위	평균값
Young's modulus 1 (GPa)	38.71-60.11	49.83
Young's modulus 2 (GPa)	61.84-90.56	79.86
Fracture Stress (GPa)	0.04-0.08	0.06



[그림 7] 3점 굽힘 시험의 유한 요소 해석 모델

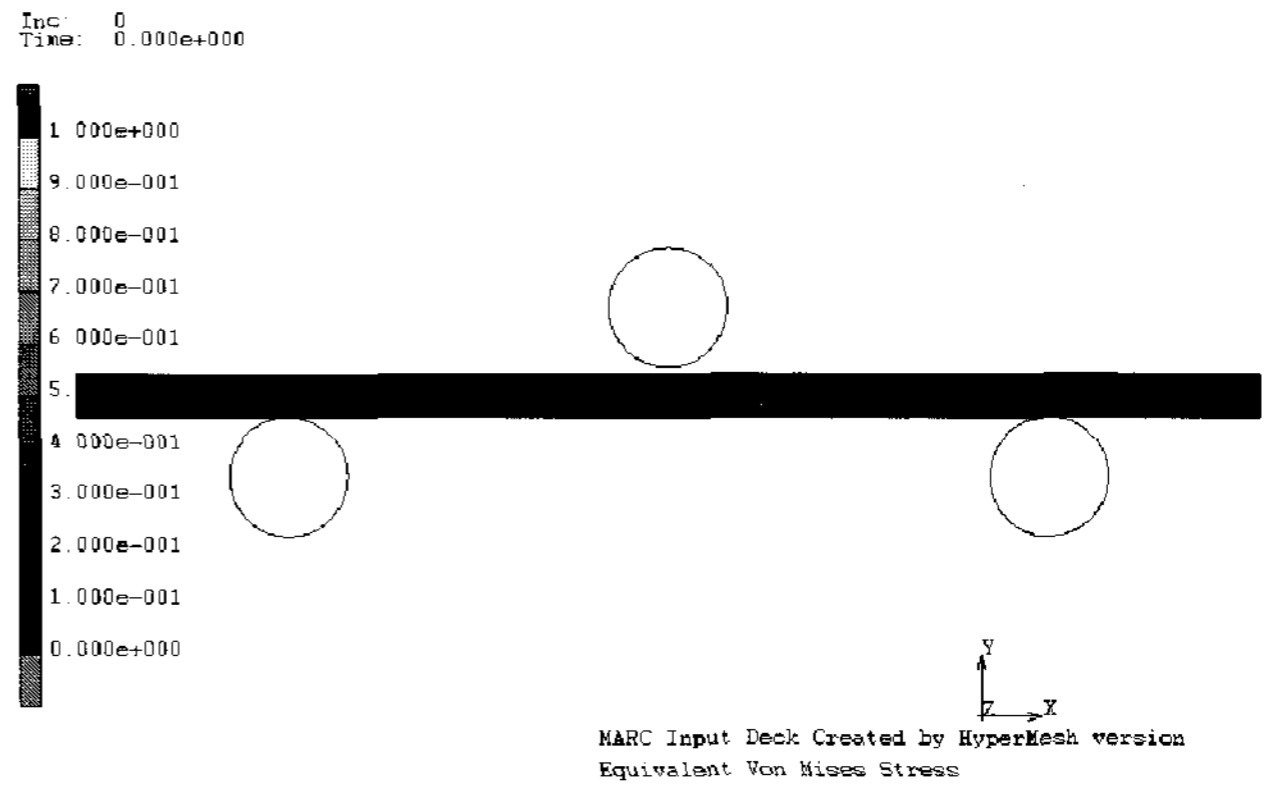
여기서 m 은 형상인자로 최대 파괴 응력과 누적 파손 확률의 관계식을 직선으로 커브피팅하고 이때 직선의 기울기가 형상인자 값으로 레이저 가공 상판(수직)의 형상함수는 5.23이다.

[그림 7]은 인장/압축 만능 시험기에서 수행된 3점 굽힘 시험과 동일한 경계조건으로 구성된 유한 요소 해석을 위한 모델로서 유한 요소 해석의 결과와 유리 시험의 결과를 비교하여 유리 시험의 신뢰성 및 유한 요소 모델의 타당성을 알아보는 것이 목적이다.

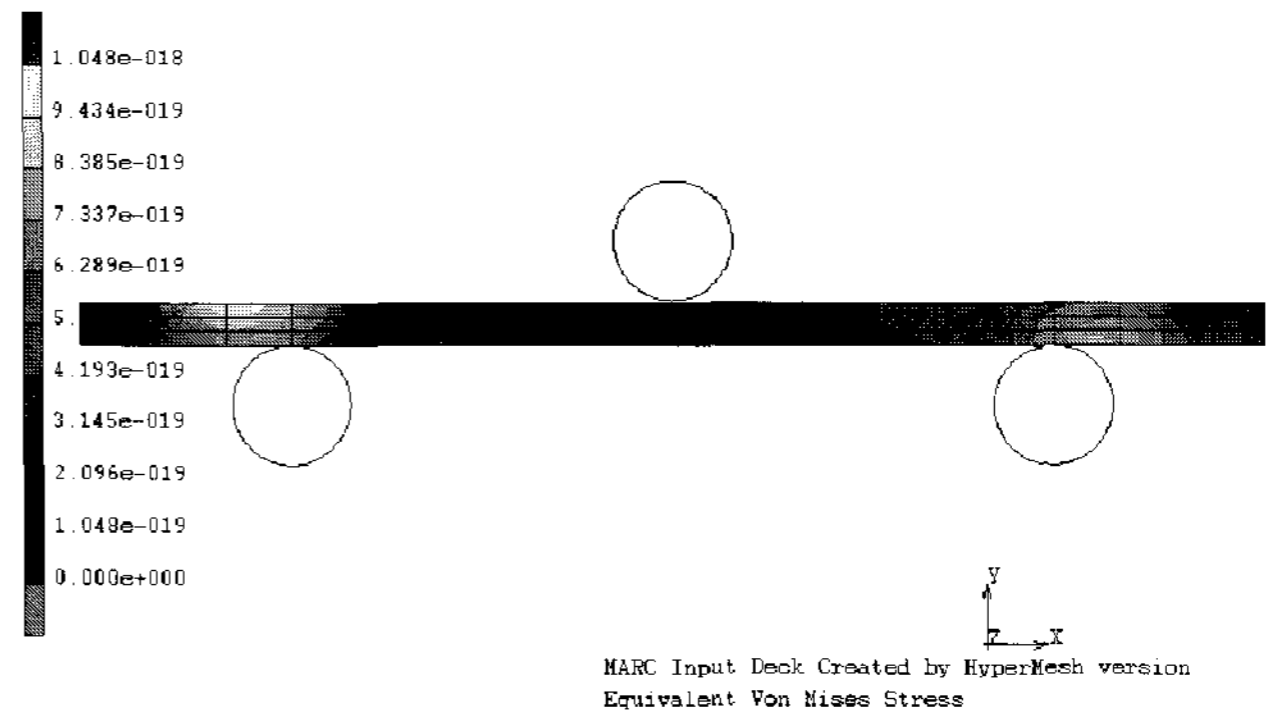
3점 굽힘 시험을 수행한 8가지 시편의 해석과정은 모두 동일하므로 레이저 가공 상판 수직에 대한 유한 요소 해석을 대표로 수행하였다. [그림 7]에서 보이는 지지대는 강체를 사용하였고, Loading device의 경우도 강체를 사용하였다. 그리고 시편은 변형체를 사용하였다. 시험에서 얻은 평균 E값과 최대 변위를 이용하여 유한 요소 해석 모델을 구성하였다. 유한 요소 해석은 Marc를 이용해서 수행하였으며 사용된 단위는 kN, mm, GPa를 사용하였다.

Loading device의 속도는 해석의 편의를 위하여 고려하지 않았고 단지 Automatic time step cut back을 선택하고 변위에 대해서 20step을 적용하였다. 취성 재료인 유리의 특성상 아주 작은 변위만으로 파단하게 되므로 20step이면 하중의 변화를 충분히 알 수 있기 때문이다.

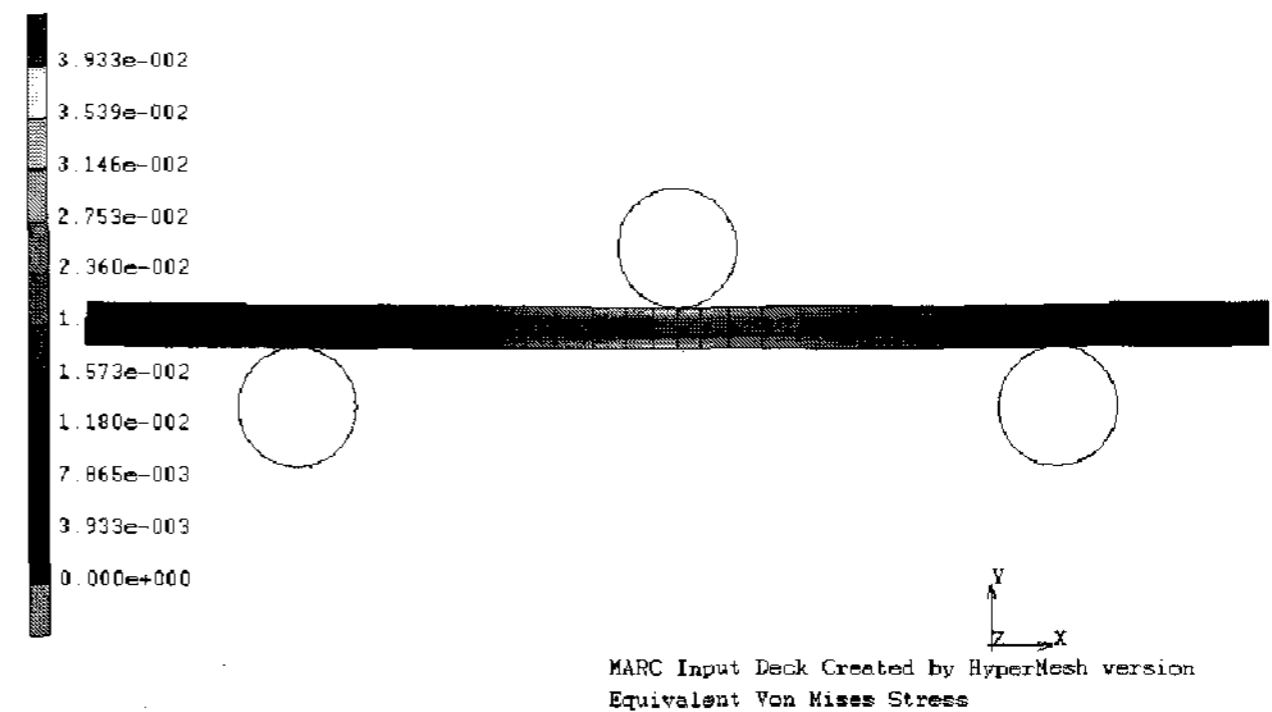
[그림 8]은 레이저 가공 상판 수직의 3점 굽힘 해석에서 시편이 변형하는 양상을 단면으로 본 것이다. 또한 Contour는 변형에 따른 Equivalent Von Mises Stress의 양상을



(a) Step=0, Displacement=0mm, $\delta=0$ mm



(b) Step=10, Displacement=0.35mm, $\delta=0$ mm



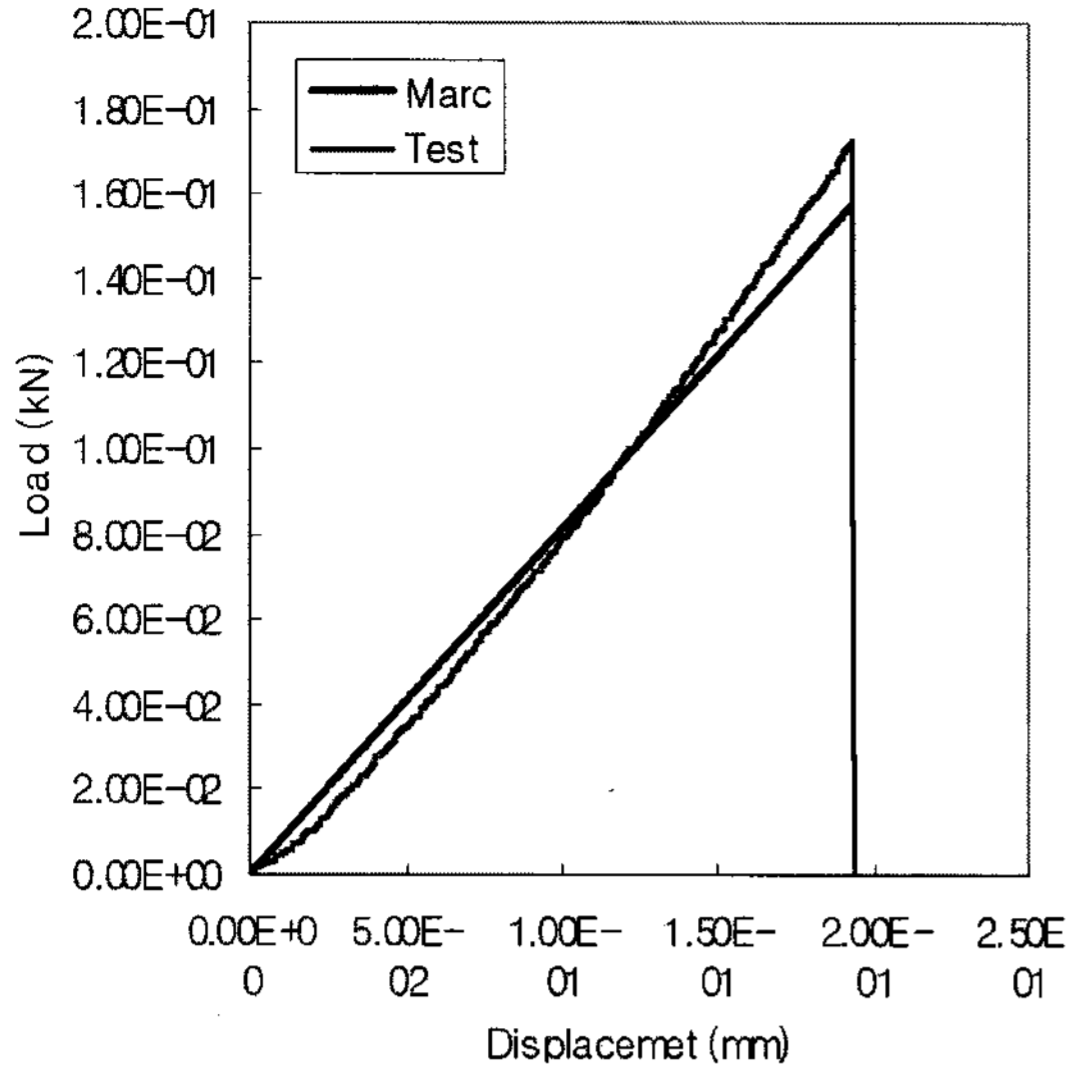
(c) Step=20, Displacement=0.7mm, $\delta=0.2$ mm

[그림 8] Marc를 이용한 3점 굽힘 시험 결과

보여준다. 모델의 Loading device는 시험 전 상태에서 유리 시편과 0.5mm만큼의 Gap을 가지고 있기 때문에 해석에서 입력한 변위는 0.7mm이다.

이 해석에서 얻은 결과를 Ascii data로 저장한 후 시험 data와 비교한 결과를 [그림 9]에서 보여주고 있다. 비교한 시험 data는 평균값에 가장 근접하는 Strain 0.05%, Load 38.70lb를 선택하였다.

[그림 9]는 3점 굽힘 시험을 Marc로 유한 요소 해석한 결과와 시험 결과가 거의 일치하고 있음을 보여준다. 이 비교를 통해서 유리 시험의 신뢰성 및 유한 요소 모델의 타당성을 확인하였다.


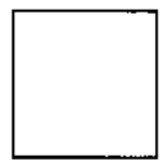


[그림 9] 해석 결과와 시험 결과의 비교

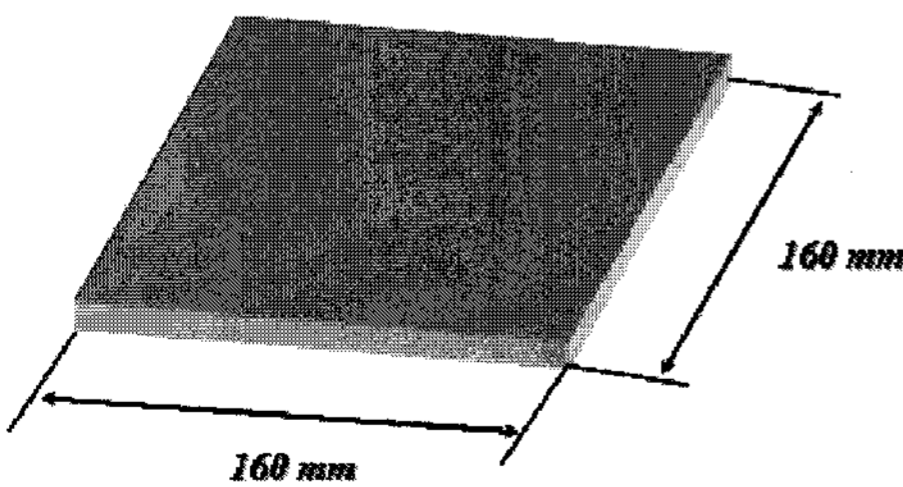
2. 오링 시험(O-Ring Test)

오링 시험에 대한 시편의 종류와 규격은 [그림 10]의 (a), (b)와 같다.

이 시험 방법은 집중 하중에 의해 발생하는 유리부의 파괴 특성을 관찰하기 위한 것이다. 시험은 3점 굽힘 시험 때 사용하였던 인장/압축 만능 시험기를 이용하여 수행하였고, 오링 시험을 위하여 별도의 지그를 구성하였다. [그림 11]에서 처럼 정사각형의 유리판의 중앙 아랫부분에 안쪽 지름이 79mm이고 바깥쪽 지름이 85mm인 고무 오링을 위치시키고 중앙 윗부분에서 38.1mm의 철제 볼로 유리판에 2.5

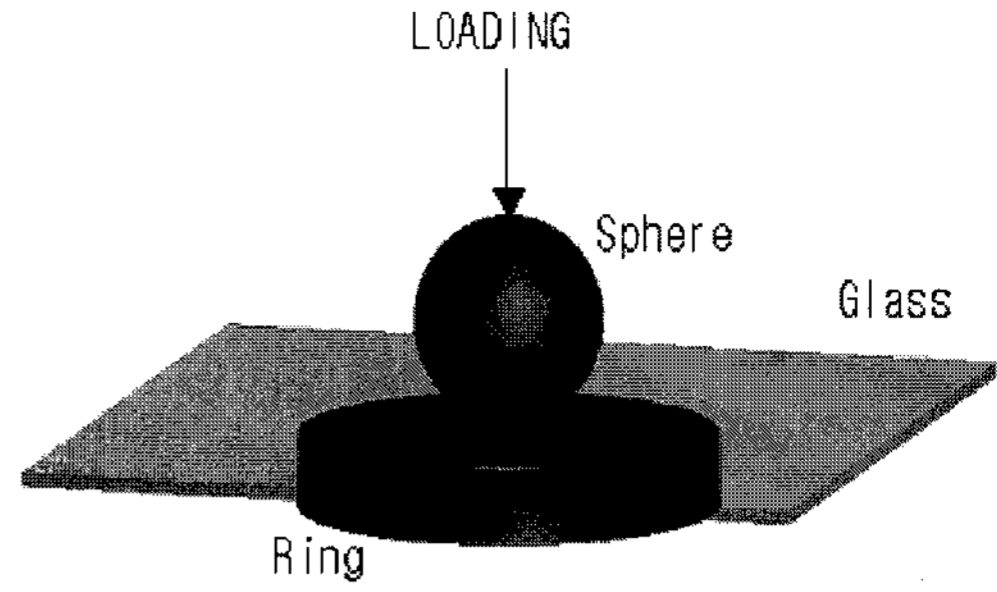
Type	레이저 가공
상 판 (개수)	 50EA
하 판 (개수)	 50EA

(a) 시편의 종류



(b) 시편의 종류

[그림 10] 오링 시험의 시편



[그림 11] 오링 시험

um/s의 하중 속도로 집중 하중을 가해준다. 시험 결과인 작용하중과 Strain은 Ascii data로 출력되고 시험 결과 데이터와 일치하는 등가 유한요소 모델 해석을 이용하여 최대 파단 응력과 Young's modulus를 구한 후 파손을 선도와 응력의 Weibull Function을 구성할 수 있다

3점 시험과 마찬가지로 오링 시험을 통해서 하중-변위 곡선을 얻을 수 있지만 정형화된 이론과 공식이 없으므로 본 시험에서는 유한 요소 해석을 이용하여 응력을 구하였다. 오링 시험의 응력은 유한 요소 해석 결과에 의존하게 되므로 모델의 정확한 검증과 재료 물성치의 신뢰성이 매우 중요하다.

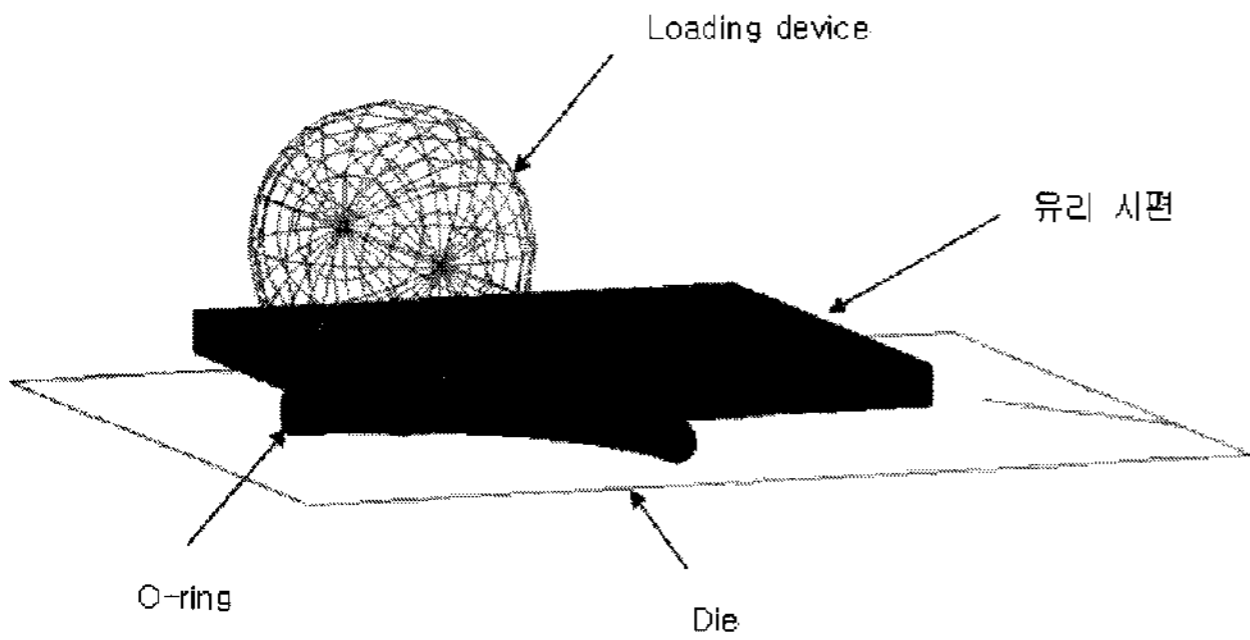
오링 시험에서 사용된 상/하판 시편은 레이저 가공 시편이기 때문에 3점 굽힘 시험에서 얻은 레이저 상/하판의 Young's modulus를 이용하였다. 고무 오링의 물성치는 고무 경도계 실험, 고무 가황 물리 실험 등을 통하여 구해야 하지만 오링은 시험에 사용하는 단 한 개였기 때문에 실험을 수행할 수 없다. 그래서 오링 시험의 등가 유한 요소 모델 해석으로 고무의 물성치를 결정하였다.

Marc를 이용한 해석에 고무를 사용하기 위해서는 Material type을 Mooney-Rivlin form으로 선택해 주어야 한다. Mooney-Rivlin form에서 고무의 물성치는 C10, C01의 값으로 결정이 된다. 해석 모델에서 C10, C01을 변화시키면서 해석결과와 시험결과를 비교하였고 이 같은 방법으로 모든 오링 시험 결과를 테스트하였다. [표 4]는 해석결과와 시험결과와의 하중-변위 곡선이 일치할 때 C10, C01 값을 나타낸 것이다.

[표 4] 오링 고무의 물성치

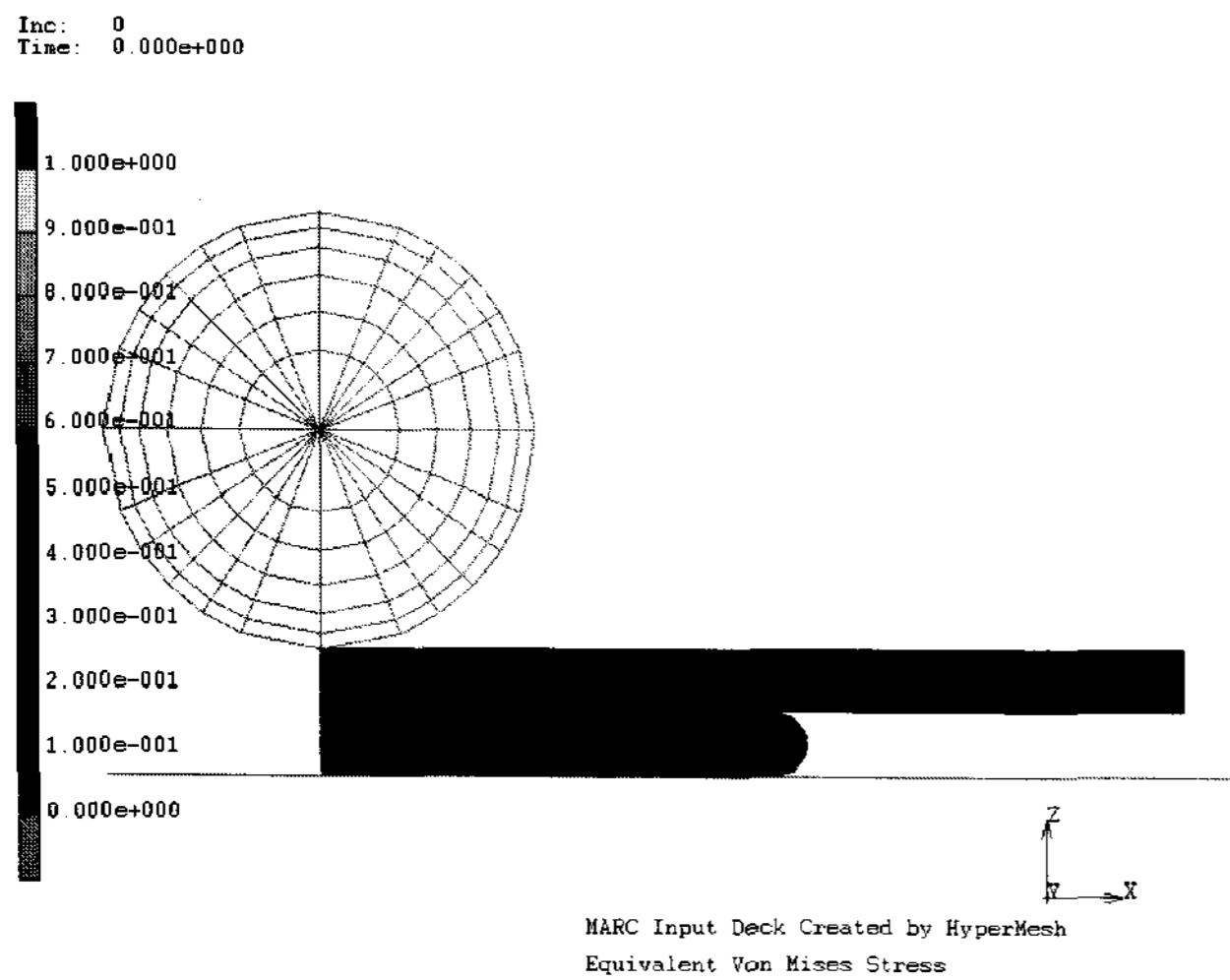
Mooney-Rivlin C10, C01	
C10	0.0012
C01	-0.0001

[그림 12]는 인장/압축 만능 시험기에서 수행된 오링시험과 동일한 경계조건으로 구성된 유한 요소 해석을 위한 모델로서 유한 요소 해석 결과와 유리 시험의 결과를 비교하여 유리 시험의 신뢰성 및 유한 요소 모델의 타당성을 알아보는 것이 목적이다. 또한 이 과정을 통하여 오링 시험에서 사용한 고무의 물성치를 결정할 수 있다.

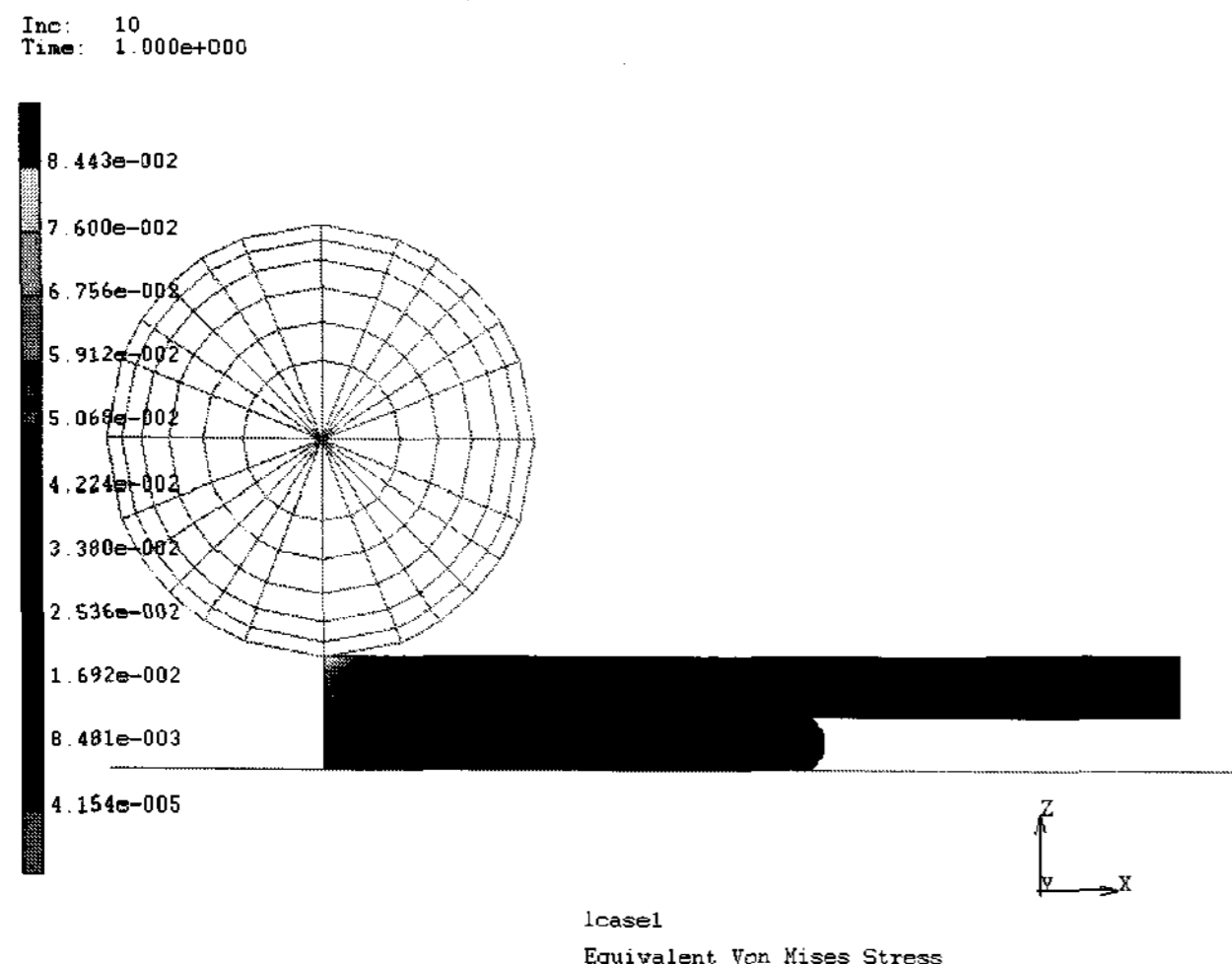


[그림 12] 오링 테스트의 유한 요소 해석 모델

오링 시험을 수행한 두 가지의 시편의 해석 과정은 모두 동일하다. 그래서 여기서는 레이저 상판에 대한 유한 요소 해석을 대표로 수행하였다. [그림 12]에서 보이는 Die는 강체를 사용하였고, Loading device의 경우도 강체를 사용하였다. 그리고 유리 시편은 변형체를 사용하였고 오링은



(a) Step=0, Displacement=0mm, $\delta=0$ mm



(b) Step=10, Displacement=0.76mm, $\delta=0.56$ mm

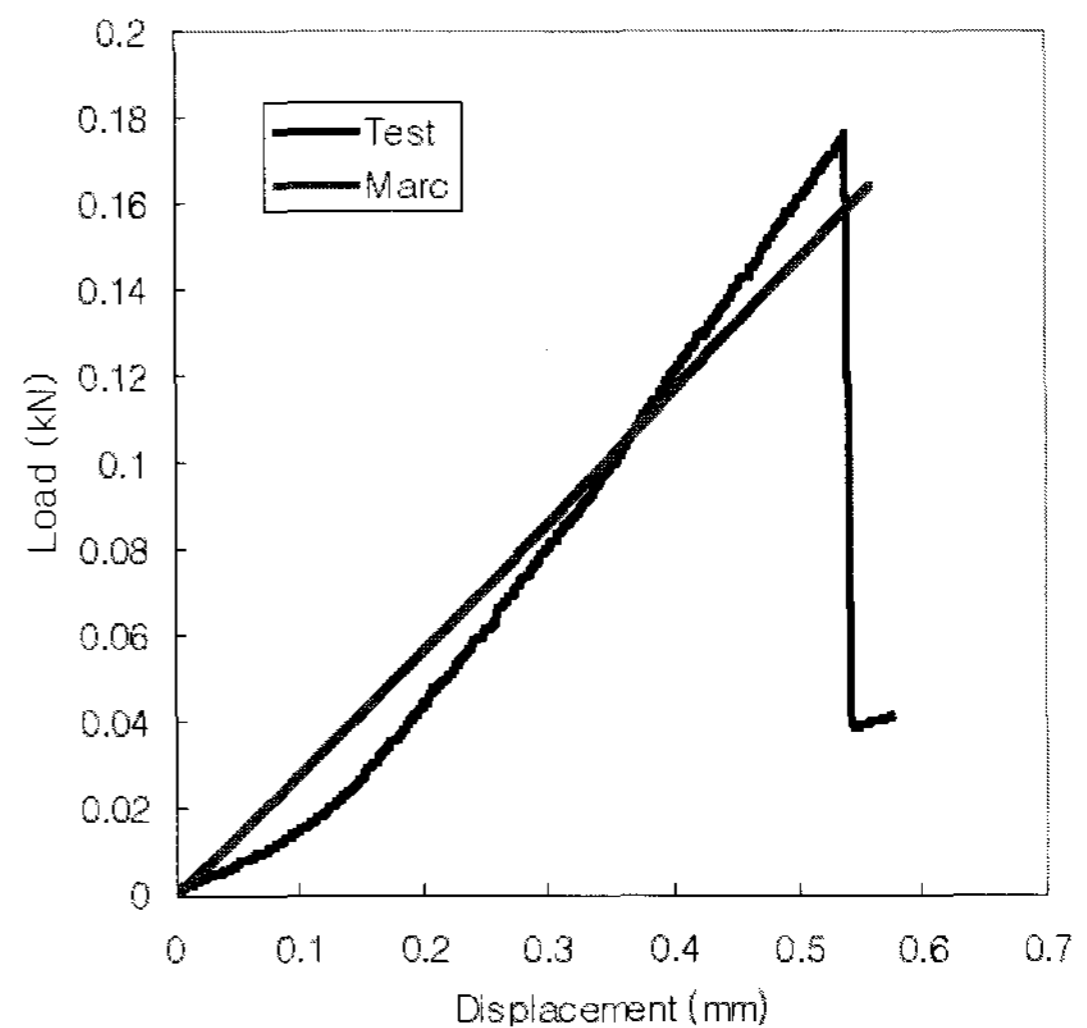
[그림 13] Marc를 이용한 오링 테스트 결과

Mooney-Rivlin form^[4]을 사용하였다. 3점 굽힘 시험에서 얻은 레이저 시편의 평균 E값과 최대 변위를 이용하여 유한 요소 해석 모델을 구성하였다. 유한 요소 해석은 Marc를 이용해서 수행되었으며 사용된 단위는 kN, mm, GPa을 사용하였다.

Loading device의 속도는 해석의 편의를 위하여 고려하지 않았고 단지 Automatic time step cut back을 선택하고 변위에 대해서 10 step을 적용하였다. 취성 재료인 유리의 특성상 아주 작은 변위만으로 파단하게 되므로 10 step이면 하중의 변화를 충분히 알 수 있기 때문이다.

[그림 13]은 레이저 가공 상판 수직의 오링 해석에서 시편이 변형하는 양상을 단면으로 본 것이다. 또한 Contour는 변형에 따른 Equivalent Von Mises Stress의 양상을 보여준다.

이 해석에서 얻은 결과를 Ascii data로 저장한 후 시험 data와 비교한 결과는 [그림 14]와 같다. 비교한 시험 data는 평균값에 가장 근접하는 Strain 0.11%, Load 39.46lb를 선택하였다.



[그림 14] 해석 결과와 시험 결과 비교

[표 5] Marc 해석 데이터

No.	Displacement (mm)	Load (kN)
1	0.00E+00	0.00E+00
2	9.85E-17	0.00E+00
3	5.85E-16	0.00E+00
4	2.12E-01	7.89E-03
5	2.87E-01	1.51E-02
6	3.65E-01	1.98E-02
7	4.51E-01	2.96E-02
8	5.32E-01	3.21E-02
9	5.89E-01	3.82E-02
10	6.67E-01	4.45E-02

[그림 14]는 오링 테스트를 Marc로 유한 요소 해석한 결과인 [표 5]와 시험 결과가 거의 일치하고 있음을 보여준다. 이 비교를 통해서 유리 시험의 신뢰성 및 유한 요소 모델의 타당성을 확인하였다.

[그림 15]는 오링 시험 결과의 하중-변위 분포도로서 인장/압축 만능 시험기에서 Ascii data로 저장된 결과인 유리 시편의 파단 하중과 최대 변위 데이터 중 레이저 가공 상판 시편을 3점 굽힘 시험에서와 같이 식(1)을 이용하여 mm, kN으로 환산하고 여러 개의 결과 데이터 중 10개를 선택하여 [표 6]과 같이 나타내었다. 여기서 Strain(%)은 시편의 처짐량을 500mm에 대한 변형률(%)로 나타낸 것이다. [표 6]에서 변위가 Strain의 정확하게 5배가 되지 않는 것은 시험 초기 오차를 제외시켰기 때문이다.

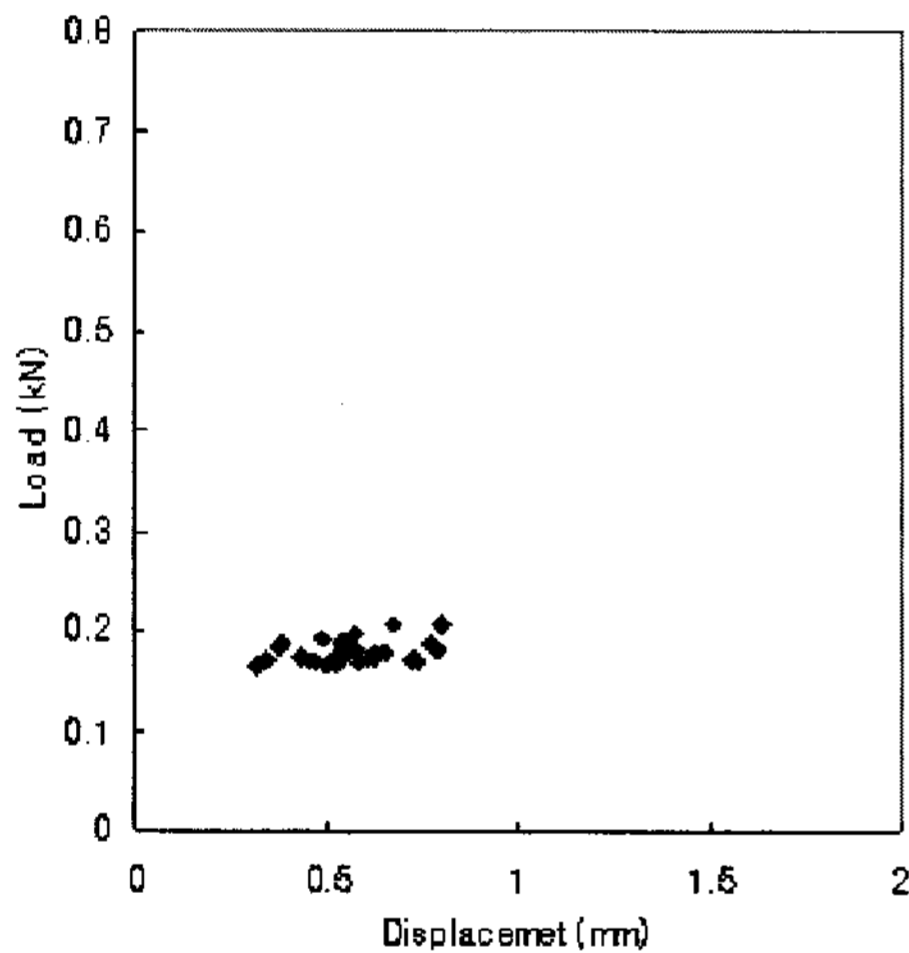
3점 굽힘 시험에서 레이저 가공 시편의 결과와 오링 시험 결과를 이용하여 오링 시험 해석 모델을 구성하였으며 구성한 모델의 해석 결과에서 응력을 구하였다. [표 7]의 Displacement는 시험 초기 오차를 뺀 변위를 나타내고 Stress는 오링 상판의 파단 하중을 의미한다.

[표 6] 레이저 가공 상판의 오링 시험 결과

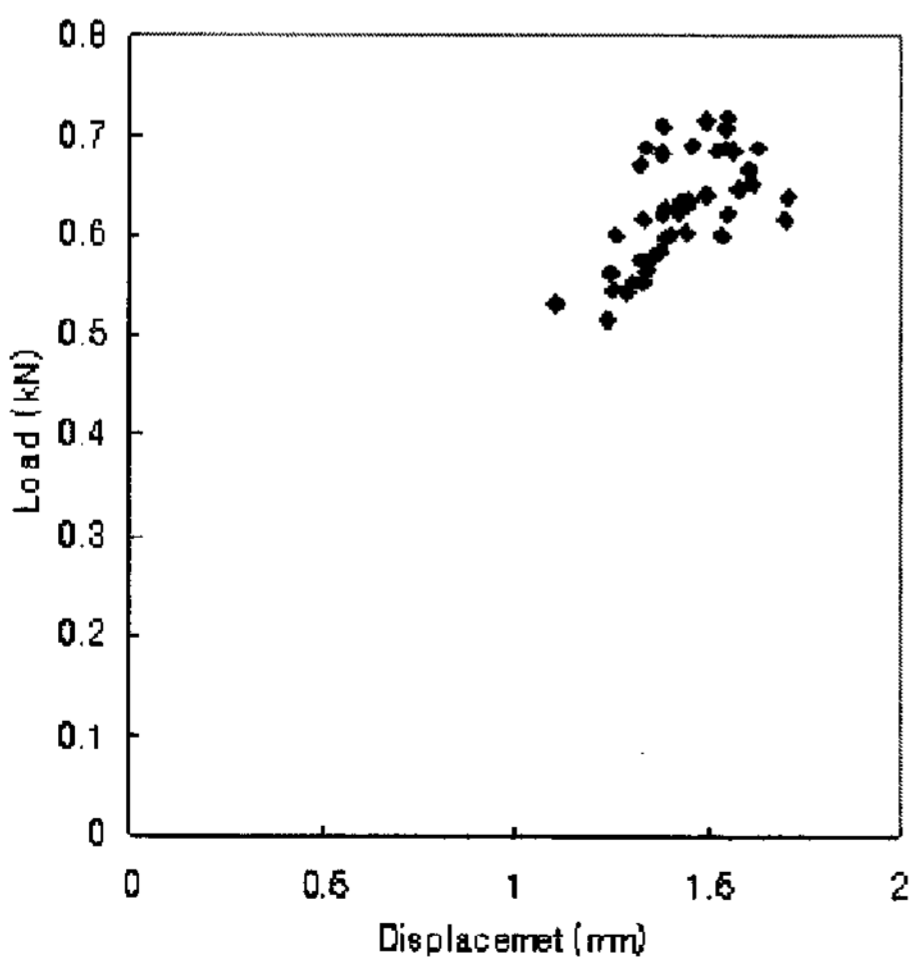
No.	Strain (%)	Load (lb)	Displacement (mm)	Load (kN)
1	0.11	38.43	0.53	0.17
2	0.11	39.14	0.54	0.17
3	0.14	39.65	0.71	0.18
4	0.15	40.05	0.77	0.18
5	0.16	40.38	0.79	0.18
6	0.11	41.37	0.57	0.18
7	0.12	42.51	0.58	0.19
8	0.16	43.34	0.79	0.19
9	0.16	45.93	0.81	0.20
10	0.17	47.87	0.85	0.21

[표 7] 오링 시험 해석 모델의 변위와 하중

No.	Displacement (mm)	Stress (Gpa)
1	0.49	0.07
2	0.32	0.08
3	0.52	0.09
4	0.58	0.09
5	0.51	0.09
6	0.51	0.09
7	0.46	0.09
8	0.34	0.09
9	0.47	0.09
10	0.52	0.09
11	0.74	0.09
12	0.53	0.10
13	0.72	0.10
14	0.73	0.10
15	0.43	0.10
16	0.54	0.10
17	0.62	0.11
18	0.61	0.11
19	0.54	0.11
20	0.54	0.11



(a) 오링 테스트 상판



(b) 오링 테스트 하판

[그림 15] 시편의 시험 결과 하중-변위 분포도

[표 8]은 3점 굽힘 시험 결과 데이터에서 언급한 Young's modulus 1, Young's modulus 2, 파단 응력의 평균값과 범위를 나타내었다. 특히 파단 응력은 등가 모델 해석을 통하여 구했으며 식(4)의 Weibull Function의 형성인자와 Weibull Function을 이용하여 1% Stress를 포함시켰다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{0.1203607}\right)^m\right] \quad (4)$$

여기서 레이저 가공 상판의 형상인자 m 은 4.80이고, Weibull 1% Stress는 0.05(GPa)이다.

[표 8] 레이저 가공 상판의 Young's modulus 1 & 2, Fracture Stress

	범 위	평균값
Young's modulus 1 (GPa)	34.70~60.11	49.83
Young's modulus 2 (GPa)	61.84~90.59	79.86
Fracture Stress (GPa)	0.07~0.18	0.11

III. 결 론

인장/압축 만능시험기를 이용하여 3점 굽힘 시험과 오링 시험을 수행하여 유리의 물성치를 측정하였고 그 결과를 유한 요소 해석 프로그램인 Marc와 비교하여 유리 시험의 신뢰성 및 유한 요소 모델의 타당성을 확인하였다.

3점 굽힘 시험을 위해 8가지 종류의 시편으로 50회를 수행하였고 그 결과를 이용하여 [표 9]와 같이 각 유리 시편의 Young's modulus 1과 Young's modulus 2를 계산하

[표 9] 3점 굽힘 시험 Young's modulus 1 & 2

시편의 종류	Young's modulus 1 (GPa)		Young's modulus 2 (GPa)	
	범 위	평균값	범 위	평균값
다이아 가공 상판 (수평)	38.65 - 53.78	48.50	62.34 - 86.74	78.24
다이아 가공 하판 (수평)	42.17 - 59.75	51.77	73.73 - 87.31	80.58
다이아 가공 상판 (수직)	18.58 - 49.24	37.07	44.66 - 78.05	64.74
다이아 가공 상판 (수직)	38.80 - 56.05	49.16	71.30 - 87.76	80.28
레이저 가공 상판 (수직)	38.70 - 60.11	49.83	61.84 - 90.56	79.86
레이저 가공 하판 (수평)	41.59 - 58.54	52.87	75.80 - 87.01	83.33
연마 가공 상판 (수평)	37.00 - 48.07	42.82	67.48 - 75.59	69.56
연마 가공 하판 (수평)	42.69 - 54.26	49.53	75.28 - 77.61	76.57

였다. Young's modulus 1은 인장/압축 만능시험기에서 Ascii data로 저장된 전체 결과의 평균 기울기를 이용하여 E값을 구한 것으로 하중-변위 곡선이 거의 선형적이므로 이를 완전한 직선으로 가정한 것이다. 특히 Young's modulus 2는 인장/압축 만능시험기에서 Ascii data로 저장된 결과의 선형적인 부분의 기울기를 이용하여 E값을 구한 것이다. 하중-변위 비례한도 내에서 기울기는 선형적이다. 따라서 유리 시편의 초기 비선형적인 변화를 오차로 보고 단지 선형적인 부분만을 고려하였으며 [표 10]의 Weibull Function의 형상인자와 Weibull Function을 이용하여 Weibull 1% Stress를 포함시켰다.

3점 굽힘 시험 결과와 오링 시험 결과를 이용하여 오링 시험 해석 모델을 구성하였으며 구성한 모델의 해석결과에서 응력을 구하였다. Max Displacement는 오차를 뺀 변위를 나타내고 Stress는 오링 상판의 파단 하중을 의미한다. [표 11]은 오링 시험 결과 데이터에서 언급한 Young's

[표 10] 3점 굽힘 시험의 Fracture Stress와 Weibull Function

시편의 종류	Fracture Stress (GPa)		Weibull Function	
	범 위	평균값	m	1% Stress (GPa)
다이아 가공 상판 (수평)	0.02 ~ 0.07	0.04	2.74	0.01
다이아 가공 하판 (수평)	0.10 ~ 0.14	0.12	10.88	0.08
다이아 가공 상판 (수직)	0.03 ~ 0.08	0.05	4.94	0.02
다이아 가공 상판 (수직)	0.07 ~ 0.17	0.12	4.97	0.05
레이저 가공 상판 (수직)	0.04 ~ 0.08	0.06	5.23	0.03
레이저 가공 하판 (수평)	0.09 ~ 0.14	0.12	8.61	0.07
연마 가공 상판 (수평)	0.05 ~ 0.08	0.06	7.94	0.04
연마 가공 하판 (수평)	0.07 ~ 0.11	0.09	8.58	0.05

[표 11] O링 시험의 Young's modulus 1 & 2

시편의 종류	Young's modulus 1 (GPa)		Young's modulus 2 (GPa)	
	범 위	평균값	범 위	평균값
레이저 가공 상판	38.70 - 60.11	49.83	61.84 - 90.56	79.86
레이저 가공 하판	41.56 - 58.54	52.87	75.80 - 87.01	83.33

[표 12] O링 시험의 Fracture Stress와 Weibull Function

시편의 종류	Fracture Stress (GPa)		Weibull Function	
	범 위	평균값	m	1% Stress (GPa)
레이저 가공 상판	0.07 - 0.18	0.05	4.80	0.05
레이저 가공 하판	0.24 - 0.63	0.47	5.70	0.23

[표 13] O링 시험의 고무 물성치

시편의 종류	고무의 물성치 (Mooney-Rivlin)	
	C10	C01
레이저 가공 상판	0.0012	-0.0001
레이저 가공 하판	0.0012	-0.0001

modulus 1, Young's modulus 2를 나타내고 [표 12]는 파단 응력의 평균값과 범위를 나타내었다. 특히 파단 응력은 등가 모델 해석을 통하여 구했으며 Weibull Function의 형상인자와 Weibull Function을 이용하여 Weibull 1% Stress를 포함시켰다. [표 13]은 O링 시험의 고무 물성치를 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 1982.

[2] J. R. Rice, "A path independent integral and approximation analysis of strain concentration by notches and cracks", ASME J. Appl. Mech., Vol. 35, pp. 379~386, 1968.
 [3] Keiichiro Tohgo and Hitoshi Ishii, "Impact Fracture Behavior of Laminated Safety Glass and Its Penetration Fracture", KSME/JSME Joint Conference Fracture and Strength, pp. 448-453.
 [4] 백영렬, "소프트웨어 정보: 고무의 성형해석 CAE 프로그램 (MARC)", 대한기계학회지 제37권 10호, 28-28쪽.

저 자 소 개



탁 태 오

1982 서울대학교 기계설계과 학사, 1984 서울대학교 기계설계과 석사, 1990 University of Iowa 기계공학과 박사, 2002~2003 : University of Arizona 방문교수, 1992~현재 : 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수.



김 현 영

1985 서울대학교 기계설계과 학사, 1987 서울대학교 소성가공과 석사, 1991 서울대학교 금형설계과 박사, 2002~현재 : 한국소성가공학회 사업이사, 1993~현재 : 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수.