

論文

재료 비선형해석을 이용한 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 기계적 특성 평가

윤 성 호*

Evaluation of Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Nylon 66 Using Material Nonlinear Analysis

Sung-Ho Yoon*

ABSTRACT

Stress-strain relationships containing the effect of material nonlinearity were experimentally obtained to evaluate tensile and flexural properties of glass fiber reinforced Nylon 66. The accounts for the difference in tensile strength and flexural strength were identified through linear analysis and material nonlinear analysis. Suitable criterion on fracture theory was determined and fracture behavior was predicted by comparing the result of linear analysis with that of material nonlinear analysis.

According to the results, glass fiber reinforced Nylon 66, to a great extent, exhibited material nonlinear behavior. Therefore, material nonlinear analysis is necessary to estimate mechanical behaviors. Also, maximum strain energy fracture criterion was successfully applied to predict the structural performance of glass fiber reinforced Nylon 66 and tensile strength should be regarded as fracture strength rather than flexural strength.

초 록

유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 인장특성과 굽힘특성을 조사하기 위해 재료 비선형성이 고려된 응력-변형률 관계를 실험적으로 평가하였으며, 선형해석과 재료 비선형해석을 통해 사용재료에 형성되는 응력분포를 조사하여 인장강도와 굽힘강도의 차이를 규명하였다. 그리고 굽힘시험의 파단 하중을 재료 비선형해석에 적용하여 얻은 결과와 선형해석의 결과를 비교함으로써 적절한 파단판정의 척도를 결정하였고, 이를 이용하여 사용재료의 파단거동을 예측하였다.

연구결과에 따르면 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66은 재료 비선형성이 크게 나타나기 때문에 정확한 기계적 거동을 예측하기 위해서는 재료 비선형해석이 수행되어야 한다. 또한 최대 변형률에너지 파단이론을 이용하면 재료 비선형성이 큰 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 구조성능을 잘 예측할 수 있으며 파단판정의 척도로는 굽힘강도보다 인장강도가 적용되어야 한다.

* 국방과학연구소 선임연구원

1. 서 론

일반적으로 설계와 해석을 통한 구조물의 특성 및 성능을 예측하기 위해서는 사용재료에 대한 기계적 특성이 우선 정량적으로 정확하게 평가되어야 한다. 사용재료의 기계적 특성은 인장강성과 인장강도, 압축강성과 압축강도, 전단강성과 전단강도, 굽힘강성과 굽힘강도, 충격강도 등으로 구성되어지며, 이들은 작용하중에 대한 변형률 또는 파단시의 최대하중과 최대변형률 등을 이용하면 쉽게 얻을 수 있다.

사용재료의 기계적 특성 평가에 관해서는 많은 연구들이 제시되어 있으며, 시험방법 및 절차들은 ASTM(American Society for Testing and Materials) 등의 공인기관에 의해 표준화되어 있다. 따라서 사용자는 정해진 규정에 준하여 준비된 시편에 대해 시험을 수행함으로써 사용재료의 기계적 특성을 정량적 또는 정성적으로 평가할 수 있다. 이때 정량적인 기계적 특성이란 시편의 게이지부에 순수한 균일응력 또는 순수한 균일변형률이 형성되고 파단의 발생이 시편의 게이지부에서 생기는 경우에 정의되며, 이는 구조물의 설계와 해석을 위한 기초자료로 사용된다. 반면에 정성적인 기계적 특성이란 시편의 게이지부에는 순수한 균일응력 또는 순수한 균일변형률이 형성되지는 않지만 파단의 발생이 시편의 게이지부에서 생기는 경우에 정의되며, 이는 사용재료간의 상대적인 성능을 비교하기 위한 자료로 사용된다.

사용재료의 기계적 특성을 평가하기 위한 시험방법 중에서 굽힘시험은 시험절차가 비교적 간단하고 온도와 습도 등의 분위기 조건을 고려한 환경시험이 용이하기 때문에 인장시험과 함께 널리 사용되며, 이러한 굽힘시험을 통해 얻을 수 있는 굽힘강도는 선형탄성 보이론을 적용한 단함해에 의해 쉽게 평가될 수 있다. 일반적으로 인장시험과 굽힘시험에서의 파단 메카니즘은 시편에 형성된 최대인장응력에 의해 지배되기 때문에 굽힘시험에 의해 평가된 굽힘강도는 이론적인 관점에서는 인장시험에 의해 평가된 인장강도와 같아야 한다. 그러나 굽힘시편의 두께방향을 따른 길이방향 응력은 인장시편에서와는 달리 불균일한 분포를 갖기 때문에 굽힘시험에 의해 평가된 굽힘강도는 인장시험을 통해 평가된 인장강도와는

다르며, 통상 인장강도보다는 높아진다. 이와 같은 이유로 인해 굽힘강도는 구조물의 설계를 위한 정량적인 기계적 특성으로 간주되기 어렵다.

인장강도와 굽힘강도와와의 차이에 대한 원인에 대해서는 몇가지 연구가 제시되어 있으며, 세라믹과 같은 취성이 매우 강한 재료에 대해서는 Weibull Strength Theory에 근거하여 인장강도와 굽힘강도와와의 상호관계를 규명함으로써 굽힘강도에서 인장강도를 유추하려는 시도들이 행해졌다[1-3]. 그러나 이들 연구는 취성이 매우 강한 재료에 국한되어 있으며, 이러한 이론을 모든 재료에 적용할 수 있는지의 여부는 입증되어 있지 않다.

본 연구에서는 재료 비선형성을 나타내는 구조물에 대해 재료 비선형해석을 수행함으로써 비선형해석의 필요성 및 구조성능의 예측방법을 제시하였다. 이때 사용재료는 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66이며, 사용재료의 재료 비선형성은 인장시험을 통해 실험적으로 구한 응력-변형률 선도로 판단하였다. 또한 굽힘하중을 받는 보형태의 시편에 대해 선형해석과 재료 비선형해석을 수행함으로써 시편에 형성된 변형과 응력분포를 조사하여 선형해석과 재료 비선형해석의 결과를 비교하였으며 아울러 재료 비선형해석의 필요성을 규명하였다. 마지막으로 사용재료의 파단하중을 재료 비선형해석에 적용하여 얻은 응력분포를 사용재료의 인장강도 및 굽힘강도와 서로 비교함으로써 구조성능 예측을 위한 적절한 파단판정의 척도를 결정하였으며, 최대 변형률에너지 파단이론을 이용하여 사용재료의 파괴거동을 조사하였다.

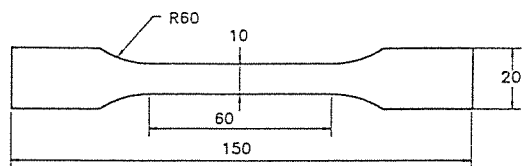
2. 시편제작 및 인장특성 평가

2-1. 시편제작

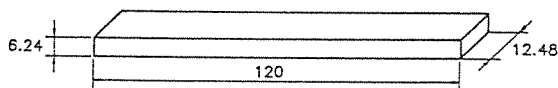
사용재료는 나일론 66에 유리섬유 충전재가 33% 보강되어 있는 Dupont사의 Zytel 80G-33L이다. 이 재료는 길이가 250 μ m로 균일하게 절단된 유리섬유들을 나일론 66에 잘 섞은 다음 노즐을 통과토록 해 만든 직경 2.5mm 정도의 다발들을 길이가 3.5mm 정도로 균일하게 절단한 펠렛(Pellet) 형태로 되어 있다. 이와 같이 유리섬유 충전재가 보강된 나일론

66은 순수한 나일론 66에 비해 인장강성과 인장강도가 높고 내충격성, 내피로성, 크리이프 특성이 우수하며 고온에서도 상온에서의 인장강성과 인장강도를 유지할 뿐 아니라 열팽창계수가 비교적 작아 치수안정성이 우수하여 널리 사용되는 엔지니어링 플라스틱 중의 하나이다.

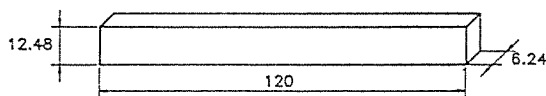
그림 1에는 본 연구에 사용한 시편의 형상들이 나타나 있다. 그림 1(a)는 사용재료의 재료 비선형성 및 인장특성을 평가하기 위한 인장시편이며, 그림 1(b)는 굽힘특성을 평가하기 위한 굽힘시편이다. 이와 같은 시편들을 제작하기 위해서는 일차 건조시킨 펠렛 형태의 원료를 후퍼에 투입하고 이를 고온에서 용융시킨 다음 규정된 형상으로 가공되어 있는 금형에 고압으로 주입하는 사출성형공법을 적용하였다. 그림



(a) Configuration of tensile test specimen



Type I specimen



Type II specimen

(b) Configuration of flexural test specimens

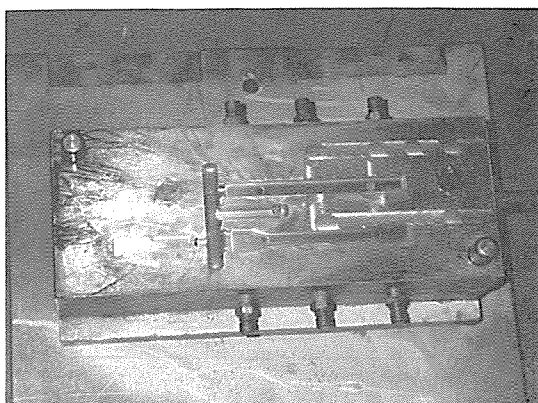
Fig. 1. Configuration of tensile and flexural specimens.

2에는 본 연구에 적용된 시편을 제작하기 위해 사용한 금형형상이 나타나 있다. 이때 금형에는 인장시편, 굽힘시편, 충격시편의 형상이 가공되어 있어 매 싸이클당 각 1개씩의 인장시편, 굽힘시편, 충격시편들이 얻어진다.

그림 3은 사용재료에 함유되어 있는 유리섬유 충전제의 형상을 관찰하기 위해 펠렛 형태의 원료를 고온으로 가열하여 나일론 66만을 소각한 후 광학현미경으로 관찰한 유리섬유 충전제들이 나타나 있다.



(a) Top plate



(b) Bottom plate

Fig. 2. Configuration of two-part mold for this study.

여기에서 보면 사용된 유리섬유 충전제는 최대 250 μm 의 길이로 비교적 균일함을 알 수 있다.

시편의 제작에 사용된 성형장치는 10온스 용량의 사출성형기로서 펠렛 형태의 원료를 80°C에서 5시간 건조시킨 다음 후퍼에 투입하였으며, 적용된 사출성형조건은 다음과 같다.

- 실린더 온도 : 260~270°C
- 금형온도 : 80°C
- 사출압력(1차/2차) : 90/120kgf/mm²
- 형체압력 : 150kgf/mm²
- 사출시간 : 20초

일반적으로 사출성형공법은 수지공급→용융→사

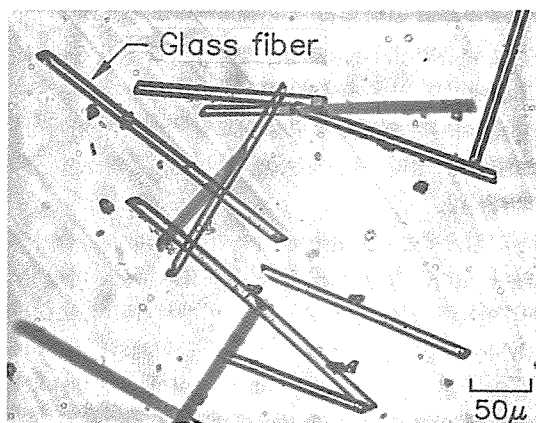
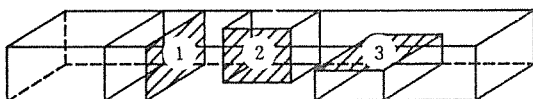


Fig. 3. Microphotographs of glass fibers in Zytel 80G-33L.

출→냉각→금형열림→제품이형→금형단협의 순환과
정으로 이루어지며 사출성형시 유리섬유 충전재의
배향과 분포는 수지의 흐름방향과 사출성형조건에

따라 달라지고 이는 성형후의 시편특성에 영향을 미
친다[4]. 그림 4는 본 연구에 사용한 시편의 유리섬유
충진재 배향과 분포상태를 전자현미경을 이용하여



- 1 : Longitudinal direction
- 2 : Transverse direction
- 3 : Through-the-thickness direction

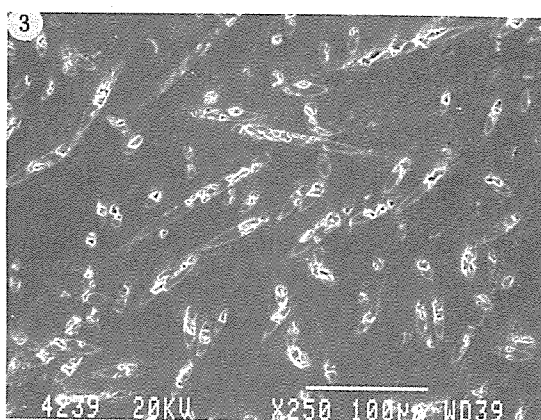
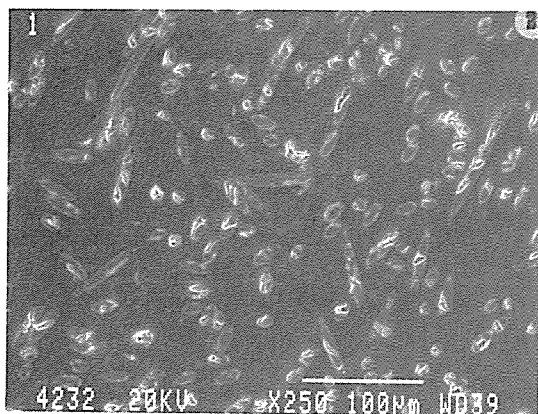
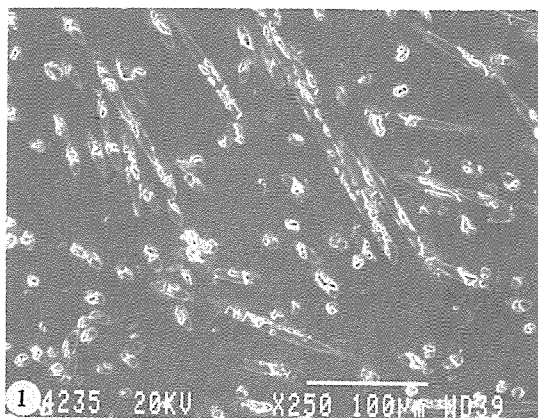


Fig. 4. Distribution and orientation of glass fibers with various directions.

관찰한 것이다. 이때 사용한 전자현미경은 JEOL JXA-840A Electron Probe Microanalyzer이며, 관찰면은 시편의 길이방향, 횡방향, 그리고 두께방향이다. 여기에서 보면 시편의 길이방향, 횡방향, 그리고 두께방향 등에서 관찰된 유리섬유 충전재 분포는 비교적 균일하며 유리섬유 충전재 배향도 임의 분산되어 있는 것으로 판단되어 본 연구에서 사용된 시편의 방향성은 크지 않을 것으로 추측된다.

2-2. 인장특성 평가

유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 인장특성은 ASTM D638M-91a에 근거한 인장시험 규정에 의해 평가하였다[5]. 인장시험을 통해서는 인장강성, 프와송비, 인장강도, 파단변형률 등이 평가되며, 특히 인장강성과 프와송비는 시편의 중앙부에 양측 스트레인게이지를 부착하여 작용하중에 대한 길이방향의 변형률 및 길이방향에 수직인 변형률을 측정함으로써 구할 수 있다. 이때 사용재료의 비교적 큰 변형률을 고려하여 스트레인게이지와 집착체는 각각 Micro Measurement의 EP-08-062TT-120(측정가능 최대변형률: 10% 이상)과 AE-10을 사용하였으며, 스트레인게이지 부착방법은 Micro Measurement에서 제시하고 있는 규정을 적용하였다. 하중장치로는 Instron 1335(로드셀 용량: 2.5ton)의 유압하중시험기를 사용하고 시편의 게이지부에 정하중을 작용시키기 위해 변위제어상태에서 2mm/min로 하중을 작용하였다. 또한 작용하중에 대한 변형률은 Vishay 2300 변형률 증폭기를 사용하여 전기적 신호로 변환시켰으며, 이는 x-y 기록계에 의해 기록하였다. 인장시험을 통해 수집된 자료는 작용하중, 길이방향의 변형률, 길이방향에 수직인 변형률, 변위 등으로 구성되어 있으며, 시편의 치수를 고려하면 응력-변형률 선도를 쉽게 얻을 수 있다.

그림 5에는 인장시험을 통해 구한 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 전형적인 응력-변형률 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 사용재료는 초기의 선형부분을 제외하면 넓은 영역에 걸쳐 비교적 큰 재료 비선형성을 나타냄을 알 수 있으며, 응력-변형률 선도의 초기 선형부 기울기에서 구한 인장강성과

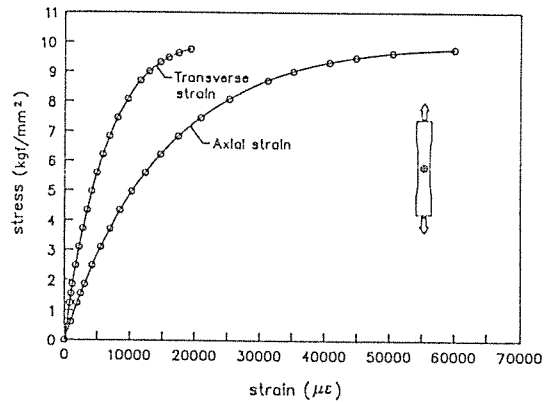


Fig. 5. Typical stress-strain curves for glass fiber reinforced Nylon 66.

프와송비는 각각 621.6kgf/mm²과 0.41이고 인장강도는 9.76kgf/mm², 파단변형률은 6.2%이다.

표 1에는 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 재료상수들이 나타나 있다.

그림 6에는 시험을 통해 관찰된 인장시편의 파단 양상이 나타나 있다. 여기에서 보면 시편의 파단은

Table 1. Material properties of glass fiber reinforced Nylon 66.

Type	Unit	Value
Density	kg/mm ³	1.33×10^{-6}
Tensile modulus	kgf/mm ²	621.6
Poisson's ratio	-	0.41
Failure strain	%	6.2
Tensile strength	kgf/mm ²	9.76
Flexural strength	kgf/mm ²	12.98

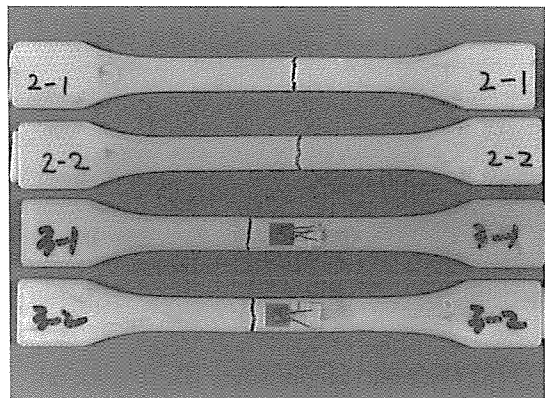


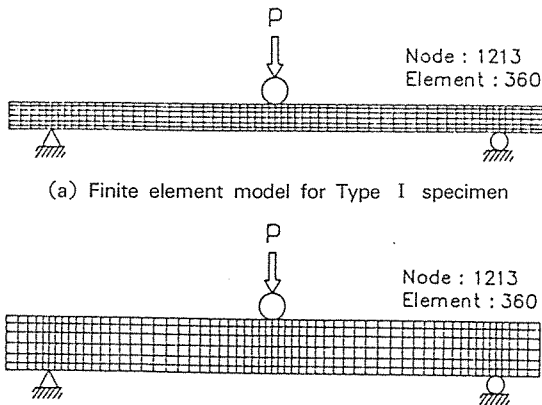
Fig. 6. Typical fracture specimens for tensile test.

게이지부에서 발생하고 있으며, 연성이 비교적 큰 플라스틱에서 나타나는 네킹(Necking) 현상은 관찰되지 않는다.

3. 선형해석과 재료 비선형해석

유한요소 구조해석에 사용된 프로그램은 선형해석 및 비선형해석이 가능한 ANSYS 4.4A이며 해석에 적용한 시편의 형태는 3점 굽힘시편으로 Type I 과 Type II 의 두 종류를 사용하였다. 이때 Type I 은 스펠이 102mm, 두께가 6.24mm, 폭이 12.48mm 이고, Type II는 스펠이 102mm, 두께가 12.48mm, 폭이 6.24mm이다.

그림 7에는 구조해석에 적용한 Type I 과 Type II 시편의 유한요소 모델링이 나타나 있다. 사용한 요소는 8절점 2-D Isoparametric Solid 요소이며, 절점수는 1213개이고 요소수는 360개이다. 시편의 두께방향을 따른 응력상태를 조사하기 위해 두께방향으로 6개의 요소를 배치하여 13개의 절점을 갖도록 하였으며, 하중작용점과 시편지지점 부위에는 응력 집중이 예상되므로 다른 부위에 비해 비교적 작은 요소로 모델링하였다. 하중은 시편의 상단중앙에 있는 한 절점에 작용시켰으며, 경계조건의 경우 왼쪽 시편지지점의 x방향과 y방향 절점변위는 모두 구속시키고 오른쪽 시편지지점의 절점변위는 y방향만 구속시켰다. 또한 응력은 시편의 길이방향과 두께방향으



(b) Finite element model for Type II specimen

Fig. 7. Finite element models for flexural specimens.

로는 변형 수 있지만 폭을 따라서는 일정하다는 평면응력상태를 가정하였다.

표 2에는 재료 비선형해석에 사용되는 응력-변형률 관계가 나타나 있다. 선형해석에 사용되는 인장강성은 응력-변형률 선도의 초기 선형부 기울기만으로 충분하지만 재료 비선형해석에서는 응력-변형률 선도의 전체를 고려한 재료 비선형성이 고려되어야 한다. 그러나 ANSYS 4.4A에서는 재료 비선형성을 고려하기 위해 응력-변형률 선도의 전체를 입력시킬 수 없으며, 응력-변형률 선도 중 다섯 점의 대표값에 의해 재료 비선형성을 나타내도록 되어 있다.

Table 2. Stress-strain relationships of glass fiber reinforced Nylon 66 used for material nonlinear analysis.

	Stress, σ (kgf/mm ²)	Strain, ϵ ($\mu\epsilon$)	Modulus, E (kgf/mm ²)
1	1.544	2500	621.6
2	4.352	8500	532.0
3	5.907	13500	437.6
4	8.394	28000	299.8
5	9.761	60000	162.7

그림 8에는 Type I 의 굽힘시편에 하중이 40kgf 작용된 경우 선형해석과 재료 비선형해석을 통해 구한 작용하중에 따른 하중작용점에서의 최대처짐이 나타나 있다. 여기에서 보면 선형해석의 경우 최대처짐은

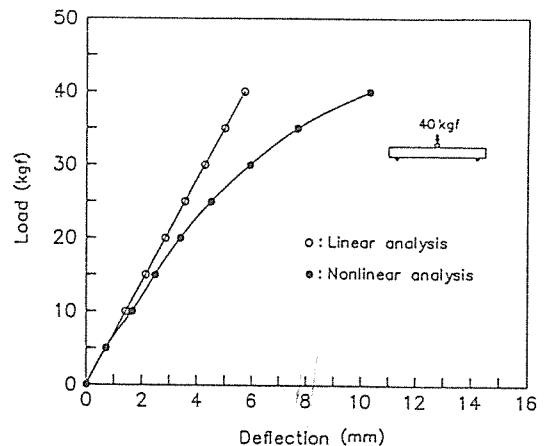


Fig. 8. Load-deflection curves for Type I specimen through linear and material nonlinear analysis.

작용하중에 비례하며 최대하중에서의 최대처짐은 5.68mm이지만 재료 비선형해석의 경우 최대처짐은 선형해석과는 달리 작용하중이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하여 최대하중에서의 최대처짐은 10.25 mm가 된다. 따라서 재료 비선형해석에서의 최대처짐은 선형해석의 결과에 비해 80% 정도 더 높다.

그림 9에는 Type I의 굽힘시험에 하중이 40kgf 작용된 경우 선형해석과 재료 비선형해석을 통해 구한 하중작용점에서의 시편 길이방향 및 두께방향의 수직응력이 나타나 있다. 여기에서 보면 시편상단 중앙부에는 작용하중의 영향으로 압축응력이 형성되며, 시편하단 중앙부에는 인장응력이 형성된다. 선형해석의 경우 시편하단 중앙부에서의 최대인장응력은 12.47kgf/mm^2 으로 선형탄성 보이론에 의해 예측된 값인 12.59kgf/mm^2 에 근접하지만 재료 비선형해석의 경우는 최대인장응력이 9.37kgf/mm^2 으로 선형탄성 보이론에 의해 예측된 값과는 다르다.

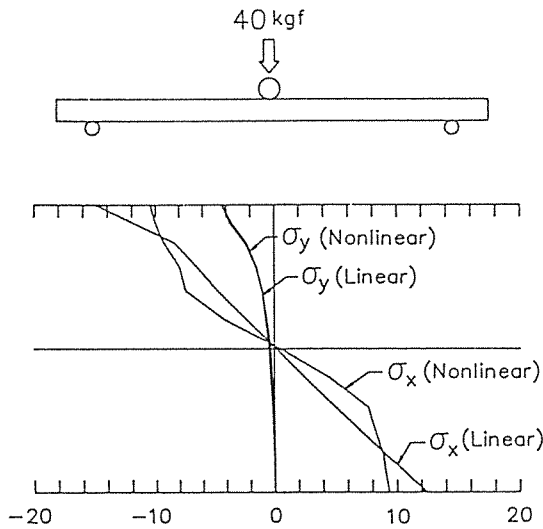


Fig. 9. Stress variations for Type I specimen through linear and material nonlinear analysis.

그림 10에는 Type II의 굽힘시험에 하중이 80kgf 작용된 경우 선형해석과 재료 비선형해석을 통해 구한 하중작용점에 따른 하중작용점에서의 최대처짐이 나타나 있다. 여기에서 보면 선형해석의 경우 최대처짐은 작용하중에 비례하여 최대하중에서의 최대처짐은 2.93mm이지만 재료 비선형해석의 경우 최대처짐은

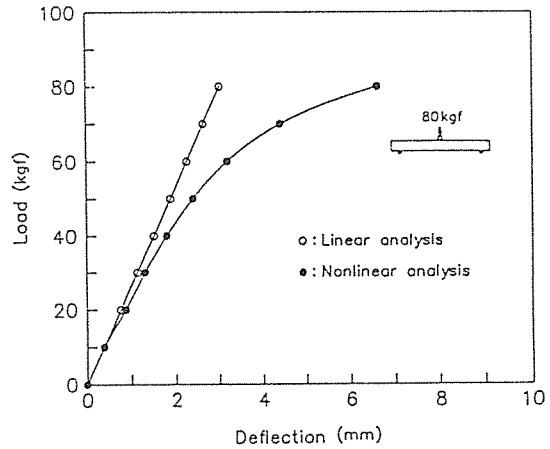


Fig. 10. Load-deflection curves for Type II specimen through linear and material nonlinear analysis.

선형해석과는 달리 작용하중이 증가함에 따라 비선형적으로 커져 최대하중에서의 최대처짐은 5.53 mm가 된다. 따라서 재료 비선형해석의 최대처짐은 선형해석의 결과에 비해 89% 정도 더 높다.

그림 11에는 Type II의 굽힘시험에 하중이 80kgf 작용된 경우 선형해석과 재료 비선형해석을 통해 구한 하중작용점에서의 시편 길이방향 및 두께방향의 수직응력이 나타나 있다. 여기에서 보면 Type I에서와 같이 시편상단 중앙부에는 작용하중의 영향으로 압

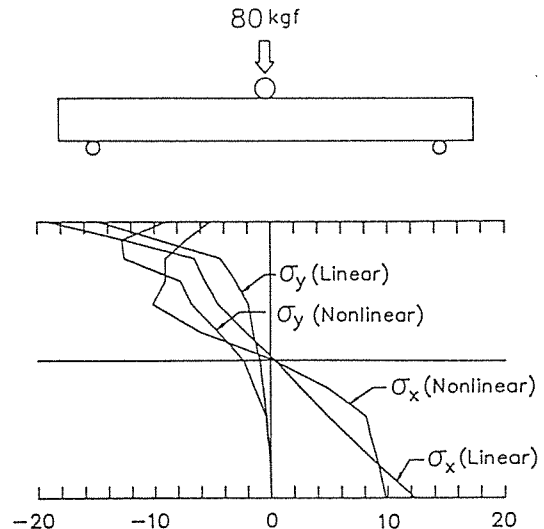


Fig. 11. Stress variations for Type II specimen through linear and material nonlinear analysis.

축응력이 형성되며 시편하단 중앙부에는 인장응력이 형성된다. 선형해석의 경우 시편하단 중앙부에서의 최대인장응력은 12.31kgf/mm^2 으로 선형탄성 보 이론에 의해 예측된 값 12.59kgf/mm^2 에 거의 근접하지만 재료 비선형해석의 경우 최대인장응력은 9.82kgf/mm^2 으로 Type I 과 마찬가지로 선형탄성 보 이론에 의해 예측된 값과는 다르다.

그림 12에는 Type II 의 굽힘시편에 하중이 80kgf 작용된 경우 선형해석과 재료 비선형해석에 의해 구한 하중작용점에서의 거리에 따른 응력성분을 두께방향을 따라 나타낸 것이다. 이때 하중작용점에서의 거리는 하중작용점을 기준으로 0mm , 1.43mm , 4.56mm , 9.97mm , 21.37mm , 29.63mm 인 지점을 고려하였다. 여기에서 보면 하중작용점에서의 길이방향 수직응력은 작용하중의 영향으로 하중작용점에서는 큰 압축응력이 형성되지만 시편하단 중앙부에서는 인장응력이 형성된다. 또한 시편의 길이방향 최대인장응력은 9.82kgf/mm^2 으로 선형해석을 통해 구한

최대인장응력 12.31kgf/mm^2 에 비해 20% 정도 낮게 평가된다. 그러나 하중작용점에서의 거리가 멀어질수록 길이방향의 수직응력은 굽힘모멘트의 감소로 인하여 크기가 점차 줄어들고 작용하중의 영향에서 벗어난 지점에서는 비교적 순수한 굽힘응력상태로 된다. 두께방향의 수직응력도 하중작용점에서는 큰 압축응력이 형성되지만 하중작용점에서 멀어지면 작용하중의 영향이 감소되어 그 크기는 작아진다. 두께방향을 따른 전단응력은 하중작용점 부근에서는 작용하중의 영향으로 인해 최대전단응력은 시편의 중립축에서 윗쪽으로 이동되어 발생하며 분포양상도 중립축에서 최대전단응력을 갖는 것으로 알려진 선형탄성 보이론에서의 결과와 다르다. 또한 하중작용점의 거리가 1.43mm 인 경우에는 작용하중의 영향으로 최대전단응력은 시편의 중립축에서 윗쪽으로 이동되어 발생하지만 전단응력의 분포양상은 하중작용점에서의 거리가 점점 멀어짐에 따라 선형탄성 보 이론과 유사해진다.

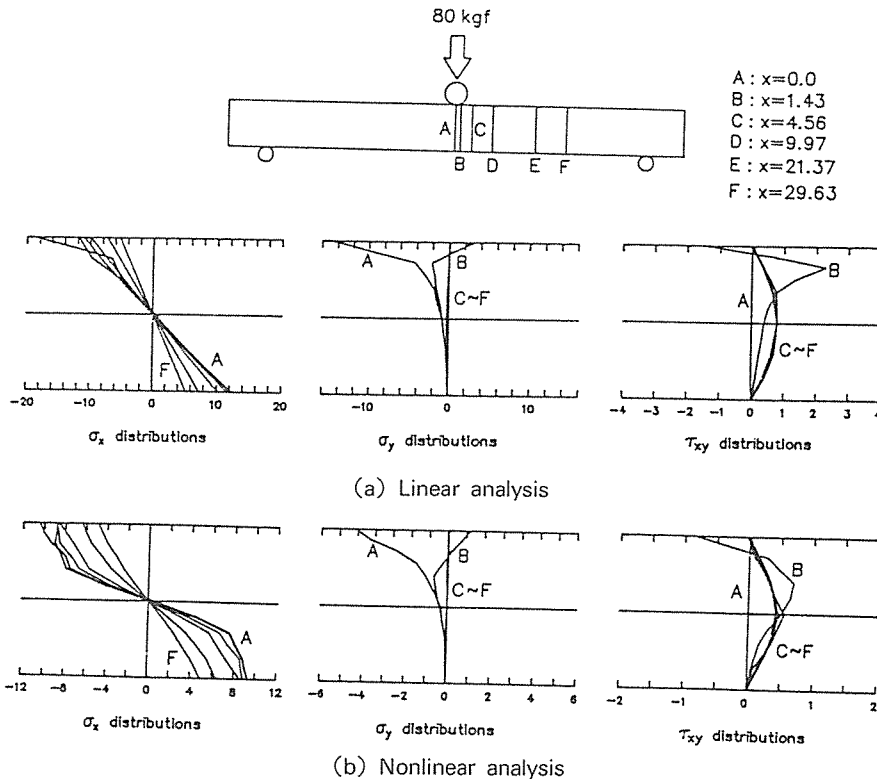


Fig. 12. Stress distributions for Type II specimen at A-F locations.

이상의 결과에서 판단하면 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66은 비교적 큰 재료 비선형성을 나타내기 때문에 기계적 거동의 평가시 재료 비선형성을 고려하지 못하는 선형해석 또는 선형탄성 보이론을 적용할 경우 응력-변형률 선도의 초기 직선부의 과도한 강성이 적용되어 최대처짐은 재료 비선형해석의 경우보다 과소평가되고 최대인장응력은 재료 비선형해석의 경우보다 과대평가된다.

4. 파단이론을 적용한 구조성능의 예측

재료 비선형성이 큰 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66으로 제작된 굽힘시험(스팬: 102mm, 두께: 6.23mm, 폭: 12.48mm)에 대해 실험에서 측정된 파단하중을 선형해석과 재료 비선형해석에 적용시켜 시험에 형성된 최대변위와 응력분포를 조사하고 최대 변형률에너지 파단이론을 적용하여 파단거동을 조사하였다[6].

일반적으로 구조물이 하중을 받는 경우 구조물내에는 변형률에너지가 형성되며 이때 단위체적당 변형률에너지 U_d 는 응력상태에 대해 다음과 같이 나타낸다.

$$U_d = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \\ = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

여기에서 하첨자 1, 2, 3은 주응력 방향을 나타내며, 작용된 하중에 의해 구조물내의 미소 요소에는 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 의 주응력 성분이 형성된다.

파단시의 변형률에너지 U_{od} 는 파단강도에 대해 다음과 같이 나타낸다.

$$U_{od} = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_u^2 \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

따라서 최대 변형률에너지 파단이론을 적용하면 파단은 $U_d = U_{od}$ 일때 발생하며 이를 응력에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) = 2 \sigma_u^2$$

또는

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \sigma_u^2 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

또한 상당응력은 주응력 성분에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{eq}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

식(4.3)과 식(4.4)를 이용하면 최대 변형률에너지 파단이론은 응력에 관해 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma_{eq}^2 = \sigma_u^2 \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

여기에서 보면 최대 변형률에너지 파단이론의 지배인자는 주응력 성분의 차이이며 같은 양만큼의 주응력 성분 증감은 파단에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 단위체적당 변형률에너지는 상당응력 달리 말하면 Von Mises 응력성분의 제곱에 비례하고 파단시의 변형률에너지는 파단강도의 제곱에 비례하기 때문에 파단판정을 위해서는 응력의 관점에서 Von Mises 응력과 파단강도를 비교하면 된다.

그림 13에는 선형해석, 재료 비선형해석, 실험에서 얻은 작용하중에 따른 하중작용점에서의 최대처짐들이 서로 비교되어 나타나 있다. 이때 선형해석과 재료 비선형해석에서의 작용하중은 굽힘시험에서 평가된 파단하중인 41.75kgf를 적용하였다. 여기에서 보면 선형해석에서의 최대처짐은 5.96mm, 재료 비선형

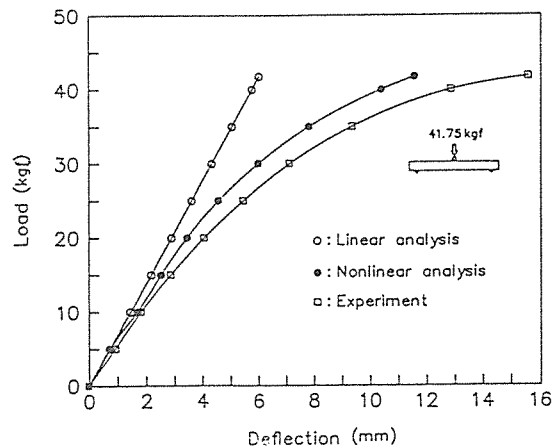


Fig. 13. Comparison of maximum deflections between experimental results and analysis results.

해석에서는 11.47mm, 실험에서는 15.55mm로서 재료 비선형해석이 선형해석에 비해 실험결과와 근접함을 알 수 있다. 또한 실험에서 측정된 최대처짐은 작용하중에 의한 시편자체의 변형과 하중작용점에서의 만입량이 함께 고려한 경우이지만, 재료 비선형해석의 결과는 시편자체의 변형만을 고려한 경우로서 실험시 하중작용점에서의 만입영향을 제외하면 재료 비선형해석의 결과는 실험결과와 더 근접할 것으로 판단된다.

표 3에는 실험에서 측정된 파단하중을 작용시킨 경우 선형해석과 재료 비선형해석을 통해 얻은 시편 하단중앙부에 형성된 최대인장응력, 최대주응력, 그리고 Von Mises 응력이 나타나 있으며, 그림 14 에는 실험을 통해 관찰된 굽힘시편에서의 파단양상이 나타나 있다. 단위체적당 변형률에너지는 Von Mises 응력의 제곱에 비례하고 파단시의 변형률에너지는 파단강도의 제곱에 비례하기 때문에 파단판정을 위해서는 응력의 관점에서 Von Mises 응력과 파단강도를 비교하면 된다. 여기에서 보면 선형해석시에는 응력-변형률 선도의 초기 선형부의 과도한 강성이 적용되어 파단시의 Von Mises 응력은 인장강도와 차이가 나지만 재료 비선형해석에서의 Von Mises 응력은 인장강도에 근접한다. 따라서 재료 비선형성이 큰 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 파단하중을

Table 3. Comparison of stresses for fracture criterion.

	Linear analysis	Material nonlinear analysis
Max. tensile stress	13.06	9.75
Max. prin. stress	13.06	9.75
Von Mises stress	13.05	9.74
Tensile strength		9.76
Flexural strength		12.98

(Unit : kgf/mm²)

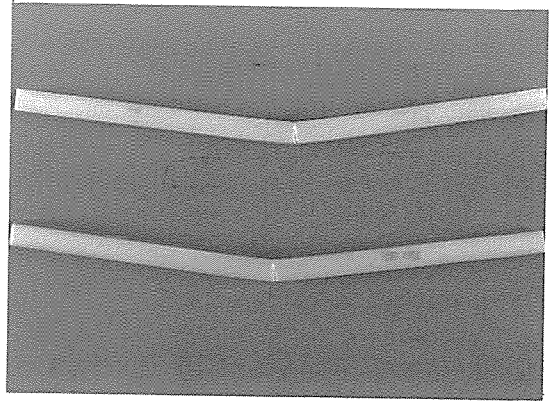
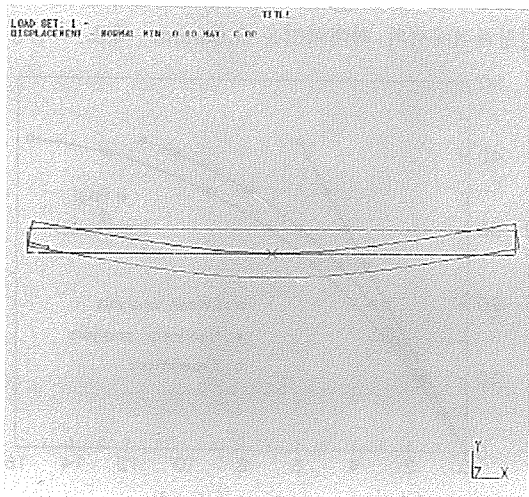
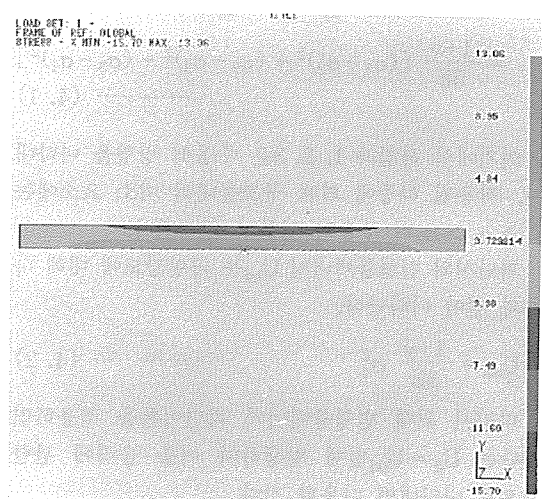


Fig. 14. Typical fracture specimens for flexural test.

예측하기 위해서는 재료 비선형해석이 수행되어야 하며 파단이론의 적용시에는 굽힘강도보다는 재료

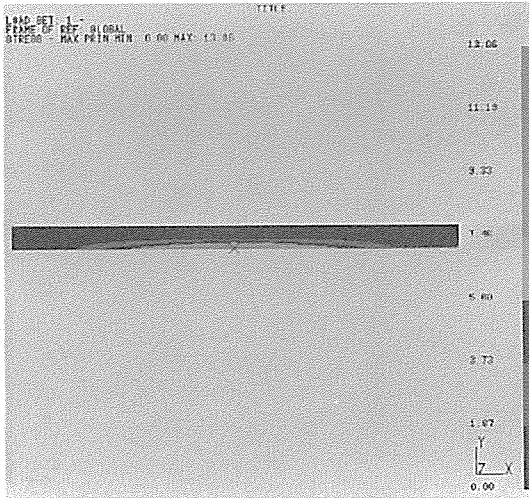


(a) Deformed shape

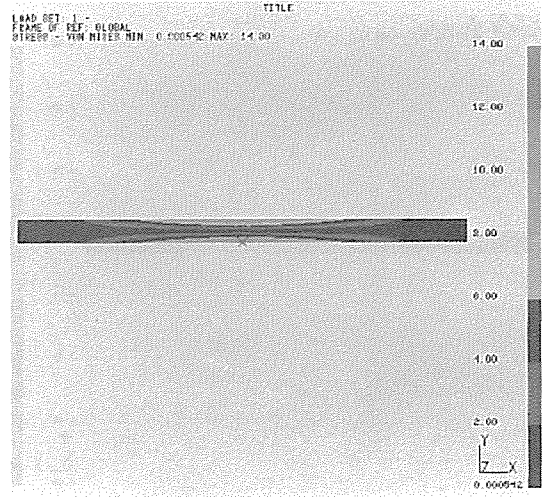


(b) X-axis normal stress

Fig. 15. Results for linear analysis.



(c) Max. principal stress



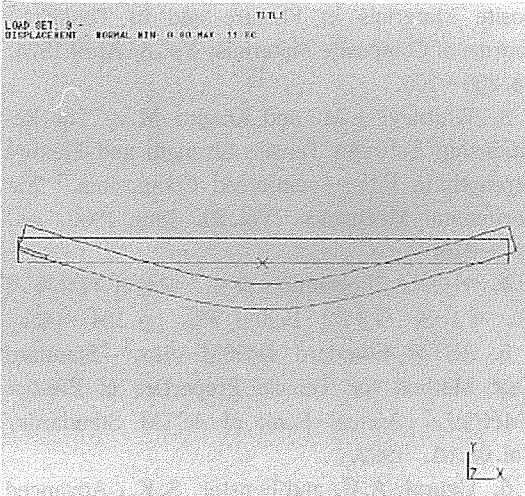
(d) Von Mises stress

Fig. 15. (Continued)

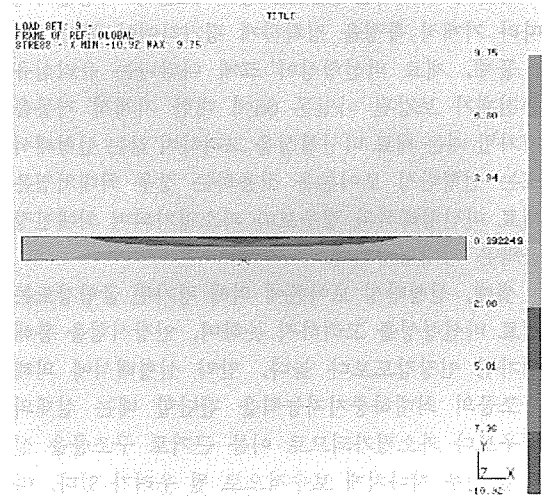
비선형성이 고려된 인장강도가 파단판정의 척도인 파단강도로 사용되어야 한다.

그림 15에는 선형해석에 의해 굽힘시험편에 형성된 변형, 시험편의 길이방향 수직응력, 최대주응력, 그리고 Von Mises 응력이 나타나 있으며, 그림 16에는 재료 비선형해석에 의해 굽힘시험편에 형성된 변형, 시험편의 길이방향 수직응력, 최대주응력, 그리고 Von Mises 응력이 나타나 있다.

이상에서 보면 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 파단강도는 재료 비선형성을 고려하지 못하는 선형탄성 보이론에서 평가된 굽힘강도보다는 인장시험을 통해 평가된 인장강도와 일치한다. 따라서 복잡한 형상의 구조물에 대한 구조성능을 예측하기 위해서는 재료 비선형해석이 수행되어야 하며, 파단이론의 적용시 파단판정의 척도로는 굽힘시험을 통해 평가된 굽힘강도보다 인장시험을 통해 평가된 인장

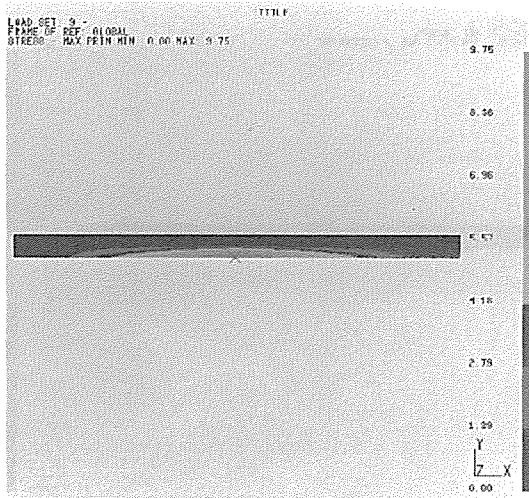


(a) Deformed shape

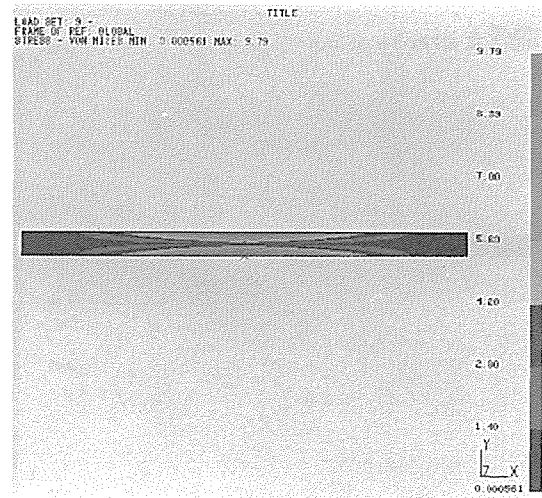


(b) X-axis normal stress

Fig. 16. Results for material nonlinear analysis.



(c) Max. principal stress



(d) Von Mises stress

Fig. 16. (Continued)

강도가 적용되어야 한다.

5. 결 론

유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66의 구조성능을 예측하기 위한 연구결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66은 큰 재료 비선형성을 나타내기 때문에 구조물의 거동을 조사하기 위해서는 ASTM 등의 표준화 시험절차에 따라 기계적 특성을 정확하게 평가하여야 한다.

둘째, 재료 비선형성이 크게 나타나는 유리섬유 충전재가 보강된 나일론 66에 대한 기계적 거동을 평가할 때는 재료 비선형성을 고려하지 않는 선형해석 또는 선형탄성 보이론을 적용하는 경우 최대처짐은 재료 비선형해석의 경우보다 과소평가되며 최대인장 응력은 과대평가된다.

셋째, 선형탄성 보이론에 의해 평가된 굽힘강도는 재료 비선형성을 고려하지 못하며, 인장시험을 통해 평가된 인장강도보다 높다. 만약 선형해석에 의해 구조물의 최대하중지지능력을 판단할 때는 실제의 경우보다 과소평가되므로 이를 근거로 구조물을 설계할 경우 지나치게 보수적으로 될 우려가 있다. 따라서 파단판정의 기준인 파단강도로는 굽힘강도보다 인장강도가 적용되어야 하며, 유리섬유 충전재가 보

강된 나일론 66로 제작된 구조물의 파단거동을 예측하기 위해서는 재료 비선형해석이 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Weil, N.A. and Daniel, I.M., "Analysis of Fracture Probabilities in Nonuniformly Stressed Brittle Materials," Journal of the American Ceramic Society, Vol.47, June 1964, pp.268-274.
2. Bullock, R.E., "Strength Ratios of Composite Materials in Flexure and in Tension," Journal of Composite Materials, Vol.8, April 1974, pp.200-206.
3. Whitney, J.M. and Knight, M., "The Relationship Between Tensile Strength and Flexure Strength in Fiber-reinforced Composites," Experimental Mechanics, Vol.20, June 1980, pp.211-216.
4. 이승조, "Polyamide 수지," 고분자 과학과 기술, 제 1 권, 제 3 호, 1990년 5월, pp.134-145.
5. ASTM Standard D638M-91a, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Metric)," Annual Book of ASTM Standards, Vol.08.01, 1992.
6. Ugural, A.C. and Fenster, S.K., Advanced Strength and Applied Elasticity, Elsevier, New York, 1981.