



충격보강제의 함유량과 분산이 나일론 6 복합체의 충격강도에 미치는 영향의 컴퓨터 해석

우정우 · 류민영^{*,†}

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과, *서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
접수일(2014년 10월 14일), 수정일(2014년 10월 31일), 게재확정일(2014년 11월 13일)

Computer Simulation of the Effects of Content and Dispersion of Impact Modifier on the Impact Strength of Nylon 6 Composites

Jeong Woo Woo and Min-Young Lyu^{*,†}

Graduate School, Seoul National University of Science and Technology

^{*}Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology
172 Gongneung 2-Dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, S. Korea

(Received October 14, 2014, Revised October 31, 2014, Accepted November 13, 2014)

요약 : 고분자 소재는 금속 소재에 비해 기계적 강도, 특히 충격강도가 매우 취약하기 때문에 이의 증대를 위해 충격보강제를 이용하는 경우가 많다. 이러한 충격강도는 충격보강제의 함유량과 분포에 따라 변화한다. 본 연구에서는 충격보강제가 함유된 나일론 6 시편에 대해서 충격시험을 모사하였고 충격시편 단면에서의 응력분포를 통해 충격강도 증대 원리를 관찰하였다. 시편 단면에서 충격보강제의 개수와 분포에 따른 해석을 하여 비교하였다. 충격보강제의 개수가 증가할수록 부피가 감소하는 모델의 경우 노치 표면의 응력과 주응력의 크기가 점차 높게 나타났다. 충격보강제의 개수가 증가할수록 충격보강제 전체의 총 표면적이 증가하는 모델의 경우에는 응력과 주응력이 점차 높게 관찰되었다.

ABSTRACT : Polymer has low mechanical strength than metal. In particular, the impact strength is very weak. Impact modifier reinforced polymers are frequently used. Impact strength of reinforced polymer is changed according to content and distribution of impact modifier. In this study, izod impact test has been simulated to analyze the mechanism of impact modifier reinforced Nylon 6. Computational results were compared for numbers and distributions of impact modifier. As the total volume of rubber particles decreased, the stress at the notch increased for the simulation model that the volume decreases as particle number increases. As the surface area of particle sphere increased, the stress and difference of principle stress increased for the simulation model that the total surface increases as particle number increases.

Keywords : izod impact test, rubber particle, Nylon 6, impact modifier, principal stress, computer simulation

I. 서 론

최근 에너지 절감 및 제품의 경량화에 따라 금속 소재가 가벼운 고분자 소재로 대체되는 경우가 증가하고 있다. 하지만 고분자 소재는 금속소재에 비해 기계적 강도가 매우 낮다. 그 중에서도 재료의 파단에 중점적인 영향을 미치는 충격강도가 취약하기 때문에 엘로이(Alloy)나 충격보강제를 함유한 복합재료가 많이 사용되고 있다. 충격보강제는 고무성분이 포함된 첨가제로 보강하고자 하는 매트릭스에 맞게 표면을 처리하여 사용하고 있다. 첨가제와 모재와의 접착력이 좋지 않으면 낮은 충격강도를 갖게 된다. 또한, 충격강도는 충격보강제의 함유량과 크기에 따라 변화한다.^{1,3}

비결정성 고분자는 결정성 고분자에 비해 상대적으로 충격강도가 낮아 이의 증대를 위해 충격보강제를 사용하는 경우가 많다.^{4,6} 결정성 고분자인 Polyamide는 나일론이라고도 부르며 그 중에서 PA 6와 PA 66은 대표적인 Polyamide계 고분자이고 생산성이 가장 많으며 용도 또한 다양하다. PA 6와 PA 66은 단일 중합체 자체만으로도 높은 기계적 성질은 나타내고, 필요에 따라 제조방법을 변화시킴으로써 원하는 용도의 기계적 물성을 지닌 고분자로 생산할 수 있다. 그러나 나일론은 근본적으로 외부 충격에 약하기 때문에 충격강도 증대를 위해 충격보강제를 사용하고 있다.⁷⁻¹¹ 본 실험실에서는 충격보강제를 함유한 나일론에서 충격보강제의 메커니즘을 규명하기 위해 충격시험의 컴퓨터 모사를 하였다. 그러나 충격보강제가 충격을 받는 단면에 한개인 것으로 모델링하여 실제와는 매우 큰 차이가 있었다.¹²

[†]Corresponding Author. E-mail: mylyu@snut.ac.kr

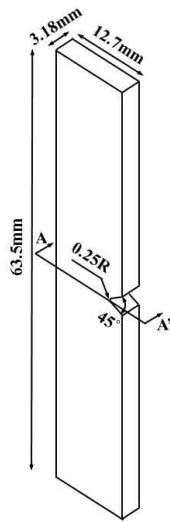


Figure 1. Specimen for Izod impact test.

본 연구에서는 이전의 연구를 확대하여 충격보강제의 함유량과 분포에 따른 해석을 진행하였다. 그리고 크레이즈(craze)에 의해 전파되는 크랙(crack)의 관찰을 위해 충격시편 단면에서의 주응력 분포와 주응력 방향을 관찰하였다. 이러한 연구를 통해서 충격이 보강되는 메커니즘을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 그리고 물리적 기능을 향상시키는 복합재료를 이해하고 새로운 복합재료를 개발하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 컴퓨터 모사

1. 해석모델

해석모델링은 Figure 1과 같이 ASTM D256 시험 규격에 따라 V--notch 시편을 모델링 하였다.¹³ 시편의 두께는 3.18 mm(1/8")이고, notch의 각도는 45°이다. Figure 2는 충격보강제를 함유한 시편의 모델링이다. 충격보강제의 형상은 구 형태이고, 충격보강제가 함유된 시편의 경우 시편 내부의 notch 부 근처에 구 형태의 충격보강제를 모델링 하였다. notch 끝과 충격보강제 간의 거리는 약 0.8 mm 모델링 하였다. 실제 충격보강제를 함유한 소재에는 지름이 0.3~3 μm 로 수많은 충격보강제가 함유되어 있으나 본 연구에서는 컴퓨터 모사의 현실적 제약으로 고무 입자의 지름은 case별로 0.2~1 mm로 모델링하였고, 고무 입자의 개수는 충격시편의 notch 근처에 1개 ~ 4개로 변화를 주어 모델링 하였다.

Table 1은 본 연구에서 시도한 해석모델을 나타내고 있다. case I 은 충격보강제가 없는 모델이고, case II 는 충격보강제가 포함된 시편에서 충격보강제의 전체 표면적은 같으나 보강제 개수와 분포를 다르게 한 모델이다. case III 는 충격보강제

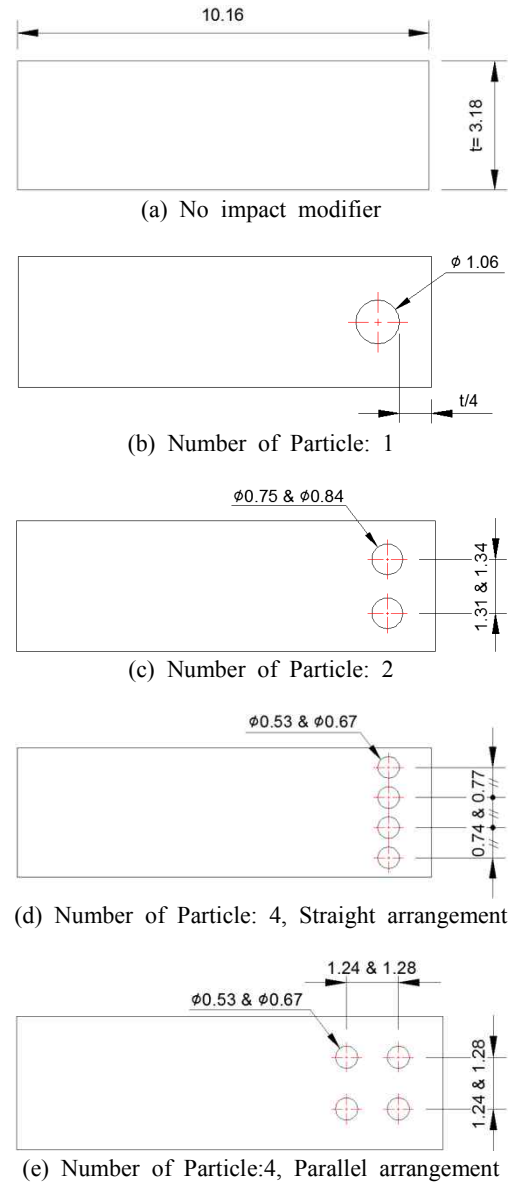


Figure 2. Arrangement of impact modifiers at notched section, as show in cross section at A-A' in Figure 1.

Table 1. Specimen modeling for computer simulation of Izod impact test.

Case I	Without impact modifier (only Nylon 6)
Case II	With impact modifier (volume and particle distribution changes)
Case III	With impact modifier (surface area and particle distribution changes)

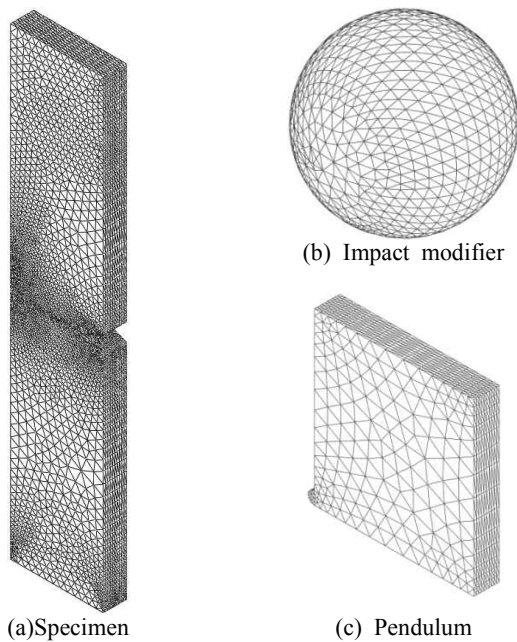


Figure 2. Mesh for computer simulation.

가 포함된 시편에서 충격보강제의 전체 체적은 같으나 보강제의 개수와 분포를 다르게 한 모델이다.

해석에 사용된 시편과 충격보강제, 그리고 추의 메쉬는 Figure 2에 나타나 있다. 모두 3차원 사면체메쉬를 사용하였다. Figure 2(a)와 같이 충격에 의해 변형이 많이 일어날 것으로 예측되는 시편 notch부와 notch 반대부 주변의 메쉬를 조밀하게 생성하였다.

2. 재료 및 경계조건

해석에 사용된 물성조건은 Table 2에 나타나 있다.¹⁴ 매트릭스는 나일론 6이고 충격보강제의 소재는 고무이다. 그리고 추의 소재는 합금공구강이다. 추의 질량은 0.6 kg으로 7,670 kg/m³인 합금공구강의 밀도를 해석에 사용된 추의 부피

Table 2. Material properties used in the computer simulation of Izod impact test.

	Specimen	Impact modifier	Pendulum
Material	Nylon 6	Rubber	Alloy for tool (AISI D2,STD 11)
Elastic modulus [GPa]	2.7	0.04712	209.9
Poisson's ratio	0.35	0.42	0.30
Density [kg/m ³]	1,120	900	7,670

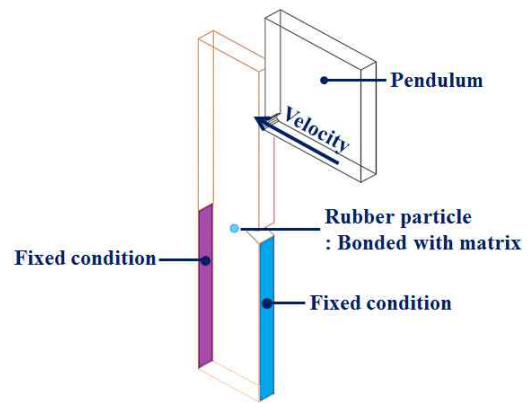


Figure 3. Boundary conditions for computer simulation of Izod impact test.

1.37×10⁻⁶ m³에 맞게 환산하여 437,256 kg/m³으로 밀도를 적용하였다.¹²

해석에 적용된 경계조건은 Figure 3에 나타나 있다. 해석에는 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 추는 시편 방향으로 3.459 m/s의 속력으로 시편에 충돌한다. 추의 속력(v)은 높이(h)를 고려하여 식 (1)과 같이 계산된 값이다.¹²

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

g 는 중력가속도이다.

시편의 A와 B부분은 바이스에 의해 고정되기 때문에 고정조건을 부여하였다. Nylon 6시편과 고무간의 접촉조건은 충격보강제인 고무가 매트릭스와 Nylon 6에 잘 접합된 상태라고 가정하고 bonded 조건을 적용하였다. 추와 시편간의 접촉조건은 마찰계수 0.2로 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 충격보강제 함유량과 분포에 따른 충격강도 변화

Table 3에 충격보강제 함유량과 분포에 따른 모델링이 요약되어 있다. 충격보강제 1개를 포함한 모델의 충격보강제 표면적(3.52 mm²)을 기준으로 일정하게 유지하면서 충격보강제의 수를 증가시키고 분포를 변화시킨 해석모델이다. 충격보강제의 수가 증가하면서 충격보강제 전체의 표면적이 일정한 상태에서 총 부피가 감소되고, 총 원주 길이도 감소되는 모델이다.

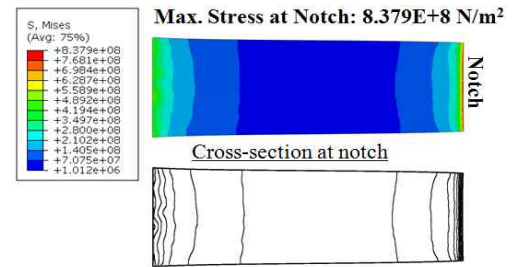
Figure 4과 Table 4에 충격이 어느정도 진행된 시점에서의 von Mises 응력분포가 나타나 있다. 충격보강제 경계면에 높은 응력이 집중됨을 알 수 있다. 충격보강제는 고무이므로 높은 응력이 집중되어도 파괴가 일어나지 않기 때문에 고무주변

Table 3. Variations for specimens according to number of rubber particle (Case II in Table 1).

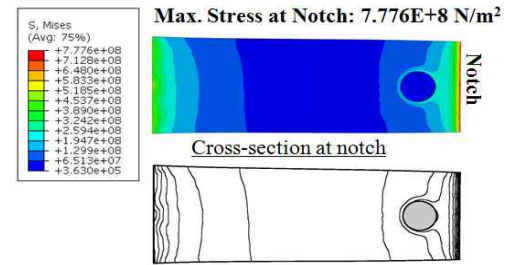
Number of rubbers	1	2	4 (Distribution-1)	4 (Distribution-2)
Radius of rubber particle [mm] (%)	0.53 (100)	0.37 (71)	0.26 (50)	0.26 (50)
Total cross-section circumference of rubber particle [mm] (%)	3.33 (100)	4.70 (141)	6.65 (200)	6.65 (200)
Space between rubbers [mm] (%)	1.06 (100)	0.56 (53)	0.21 (20)	0.71 (67)
Total surface area of rubber particle [mm ²]	3.52	3.52	3.52	3.52
Total volume of rubber particle [mm ³] (%)	0.62 (100)	0.44 (71)	0.31 (50)	0.31 (50)

에 높은 응력은 충격강도를 낮추지는 않는다. 또한 높은 응력이 매트릭스 보다는 충격보강제에 집중된다면 충격보강에 유리한 현상이라 판단된다. Figure 4(a)는 충격보강제를 포함하지 않은 시편이고 Figure 4(b)에서 (d)로 갈수록 충격보강제의 개수가 증가하는 모델이고, Table 3에서 보는 바와 같이 총 충격보강제 체적(total volume)이 감소하는 시편이다. Figure 4(d)와 (e)는 충격보강제 분포를 변경한 시편이다. 모든 시편에서 notch 부분에 인장응력으로 인한 가장 큰 응력이 집중되고, notch 반대부분에도 압축응력으로 인한 von Mises 응력이 크게 나타났다. 충격보강제 수가 증가하면서 전체 충격보강제의 체적이 감소할수록 최대 von Mises 응력이 점차 증가하는 경향을 보였다. 이는 실제 현상과 유사한 것으로 판단된다.¹⁵⁻¹⁶ 충격보강제 분포 변경에 따른 최대 응력의 차이는 크게 나타나지 않았다.

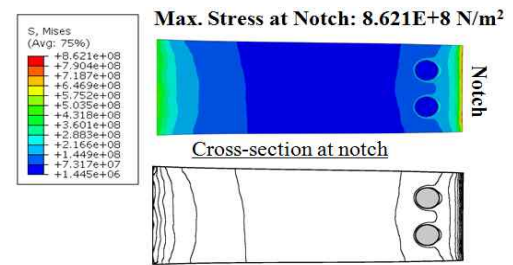
notch tip에서 크랙은 인장응력에 의해 발생되고 전파된다.¹⁷⁻¹⁸ Figure 5와 Table 4에 제 1 주응력이 나타나있다. 제 1 주응력 또한 충격보강제의 개수가 늘어남에 따라 점차 증가하였다. 이는 충격보강제의 수가 증가하면서 충격보강제의 총 부피 감소에 따라 충격에너지 흡수가 줄어들었기 때문으로 판단되고 충격보강제의 효과는 함유량에 영향을 받는 것으로 나타났다.



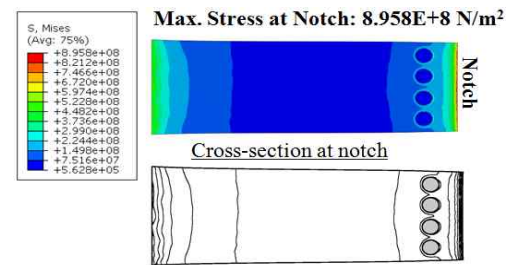
(a) Number of Particle: 0



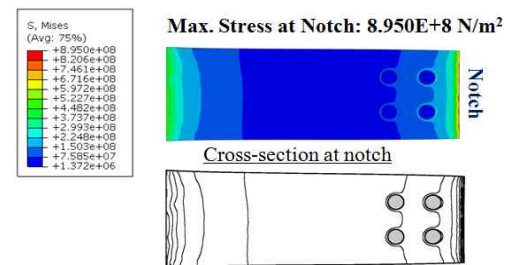
(b) Number of Particle: 1



(c) Number of Particle: 2



(d) Number of Particle: 4 (Distribution-1)



(e) Number of Particle: 4 (Distribution-2)

Figure 4. Comparison of von Mises stress according to number of rubber particle and particle distribution while the surface area of rubber particle is fixed.

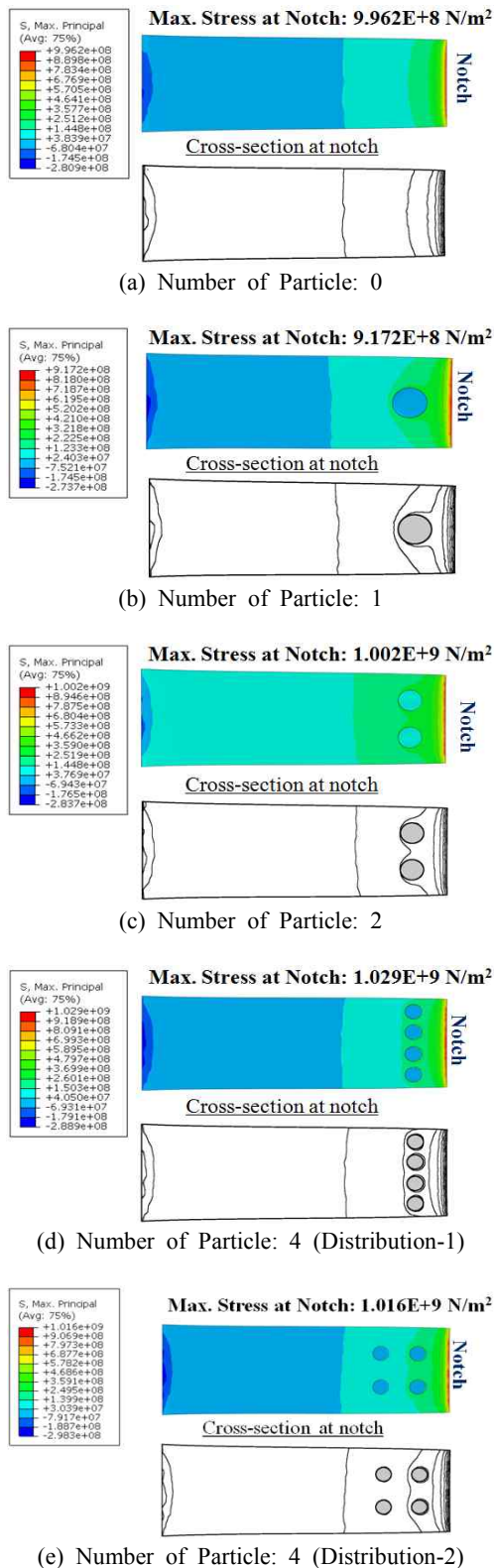


Figure 5. Comparison of maximum principal stress according to number of rubber particle and particle distribution while the surface area of rubber particle is fixed.

Table 4. Comparison of maximum von Mises stress and principal stress according to rubber particle number and particle distribution.

No. of particles	Volume	Max. von Mises stress	Max. max. principal stress
1	0.62 mm ³	7.776E+8 N/m ²	9.172E+8 N/m ²
2	29% decreased	11% increased	9% increased
4 (Distribution-1)	50% decreased	15% increased	12% increased
4 (Distribution-2)	50% decreased	15% increased	11% increased

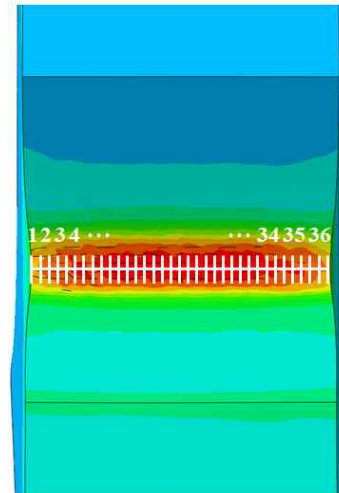


Figure 6. Measurement points at notch surface.

다. 본 연구에서 수행한 해석 결과에서는 충격보강제의 분포 변경에 따른 영향은 크지 않았다.

Figure 6와 같이 notch 표면 중앙부의 제 1 주응력을 point 1에서 point 36까지 구한 뒤 이의 평균을 Figure 7에 비교하였다. 충격보강제의 함유량이 감소할수록 notch 표면 중앙부의 제 1주응력 평균이 크게 관찰되었고, distribution-2가 distribution-1에 비해 주응력이 다소 감소하였다. 이는 뒷편에 위치한 충격보강제가 충격에너지를 흡수하면서 충격강도가 증대되었다고 판단된다.

2. 충격보강제 표면적과 분포에 따른 충격강도 변화

Table 5에 충격보강제 표면적과 분포 변화에 따른 모델링이 요약되어 있다. 충격보강제 1개를 포함시킨 모델을 기준으로 충격보강제 전체의 부피를 일정하게 유지하고 수를 증가시킨

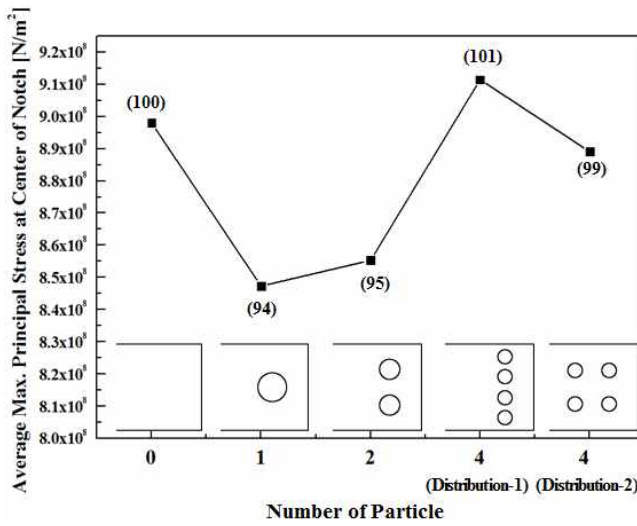


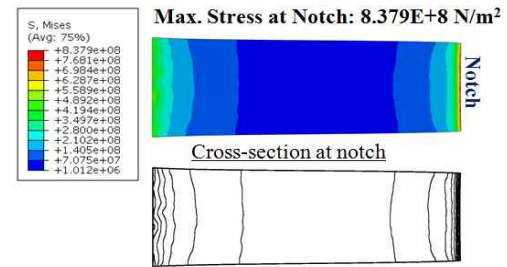
Figure 7. Comparison of average maximum principal stress at the center of notch surface according to number of rubber particle and particle distribution while the surface area of rubber particle is fixed.

Table 5. Variations for specimens according to number of rubber particles (Case III in Table 1).

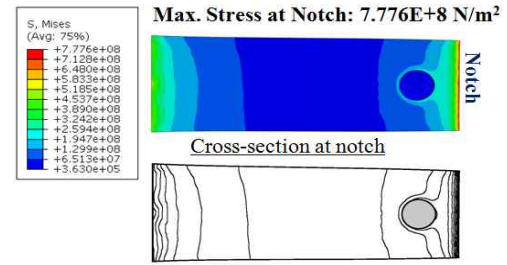
Number of rubbers	1	2	4 (Distribution-1)	4 (Distribution-2)
Radius of rubber particle [mm] (%)	0.53 (100)	0.42 (79)	0.33 (63)	0.33 (63)
Space between rubber particle [mm] (%)	1.06 (100)	0.50 (47)	0.10 (10)	0.61 (58)
Total cross-section area of rubber particle [mm] (%)	0.88 (100)	1.11 (126)	1.40 (159)	1.40 (159)
Total surface area of rubber particle [mm²] (%)	3.52 (100)	4.43 (126)	5.59 (159)	5.59 (159)
Total volume of rubber particle [mm³]	0.62	0.62	0.62	0.62

모델이다. 전체 충격보강제의 부피를 일정하게 유지하는 상태에서 충격보강제의 수가 증가할수록 충격보강제 총 표면적과 충격보강제 단면의 총 넓이가 증가하는 모델이다.

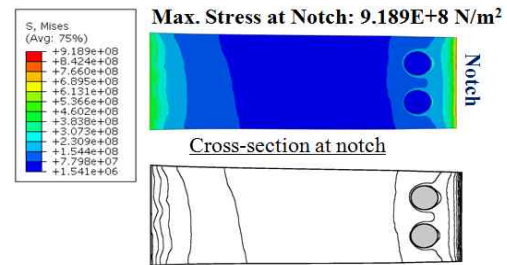
Figure 8과 Table 6에 모델별 von Mises 응력 분포 결과가 나타나 있다. 충격보강제 1개를 포함한 시편에서 가장 낮은 최대응력이 관찰되었고, Figure(b)에서 (d)로 갈수록 충격보강제 개수가 증가하는데 같은 충격보강제 함유량을 가짐에도 불구하고 충격보강제 개수가 증가할수록 최대 von Mises 응력



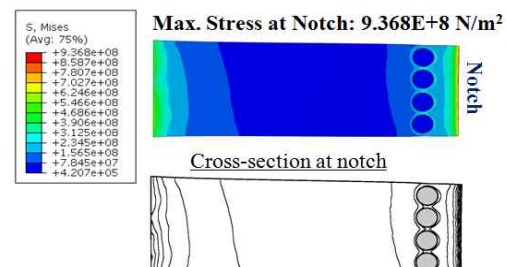
(a) Number of Particle: 0



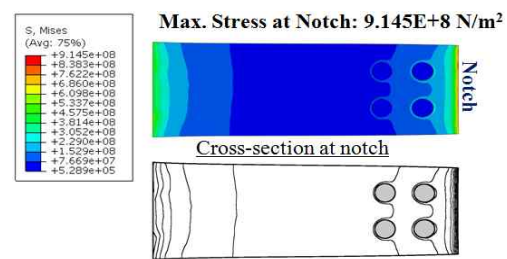
(b) Number of Particle: 1



(c) Number of Particle: 2



(d) Number of Particle: 4 (Distribution-1)



(e) Number of Particle: 4 (Distribution-2)

Figure 8. Comparison of von Mises stress according to number of rubber particle and particle distribution with the total volume of rubber particle is fixed.

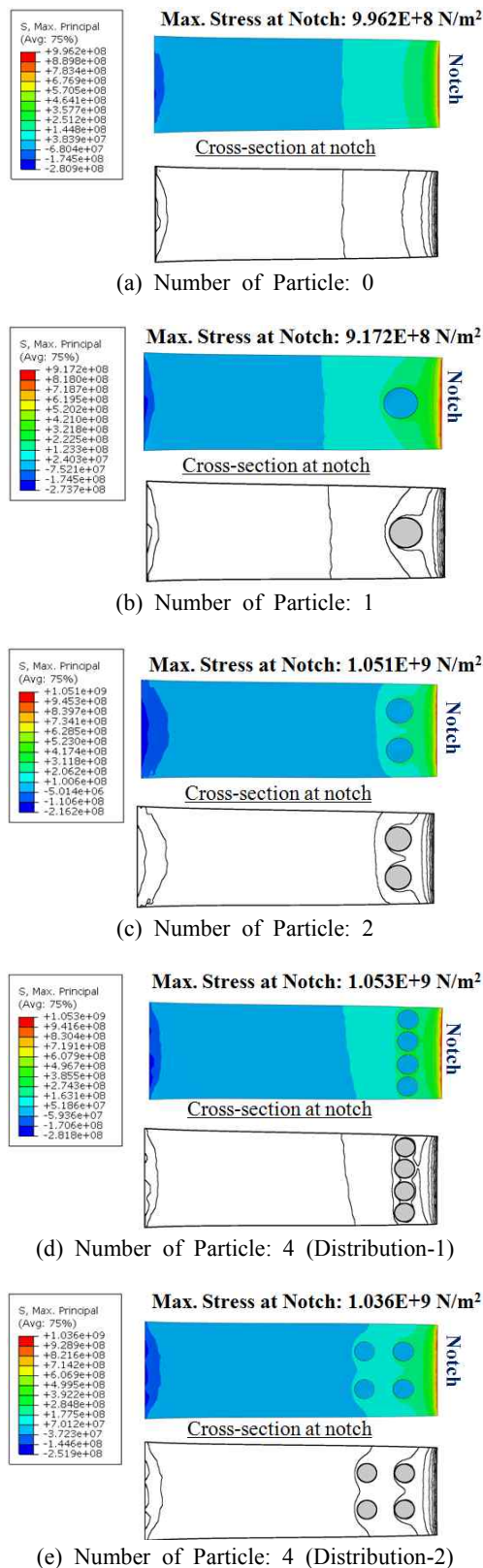


Figure 9. Comparison of maximum principal stress according to surface area of rubber particle and particle distribution while the total volume of rubber particle is fixed.

Table 6. Comparison of maximum von Mises stress and principal stress according to surface area and particle distribution of rubber particle.

No. of particles	Surface area	Max. von Mises stress	Max. max principal stress
1	3.52 mm ²	778 MPa	917 MPa
2	26% increased	18% increased	15% increased
4 (Distribution-1)	59% increased	20% increased	15% increased
4 (Distribution-2)	59% increased	18% increased	13% increased

이 증가하는 현상이 나타났다. 이는 실제 현상과 차이가 있는 것으로 판단된다.¹⁹⁻²⁰ 충격보강제 분포를 변경한 결과는 Figure 8(d)와 (e)에 나타나있다. 분포 변경에 대한 최대 응력분포 차이는 약 2%정도로 미미한 차이를 보였다.

제 1 주응력 분포 결과가 Figure 9에 나타나 있다. 충격보강제의 개수가 늘어날수록 최대 응력이 점차 증가하는 경향을 보였다. 이는 충격보강제 사이의 간격에 영향을 받고 있음을 의미한다. 분포 변경에 따른 주응력 차이 또한 약 2%정도로 크게 나타나지 않았다.

Figure 6에서와 같이 notch 표면 중앙부의 Point 1에서부터 Point 36까지의 제 1 주응력의 평균을 Figure 10에 나타내었다.

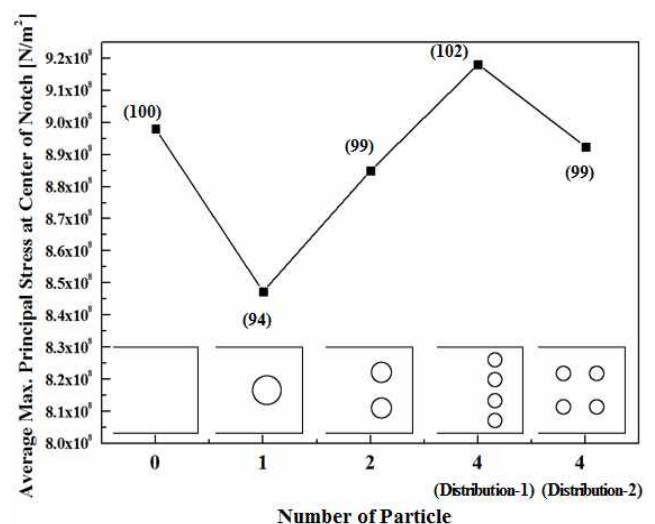


Figure 10. Comparison of average maximum principal stress at the center of notch surface according to total surface area of rubber particle and particle distribution while the total volume of rubber particle is fixed.

충격보강제의 수가 증가할수록 표면적이 증가하고 제 1 주응력이 점차 증가하였다. 이는 충격보강제가 함유량이 일정하지만 충격보강제 사이의 간격에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 해석상에서 충격보강제 간격이 좁아질수록 제 1 주응력이 커지는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 논문에서는 충격보강제를 함유한 나일론에서 충격보강제의 충격보강역할을 분석하기 위해 충격 시험의 컴퓨터 모사를 수행하였다. 충격보강제인 고무첨가제 함유에 따른 해석과 고무첨가제의 함유량과 분포, 총 표면적 변경에 따른 해석을 비교하였다. 해석결과 notch에서 내부로 전파되는 응력경로가 충격보강제 주변으로 돌아가면서 응력이 낮아지고 내부로의 전파가 감소되었다. 또한 notch부에 크랙을 유발하는 최대 주응력의 크기도 감소되었다. 고무첨가제 함량에 따라서는 고무첨가제의 총 부피가 감소할수록 응력이 크게 관찰되었으며 최대 주응력의 크기도 증가되었다. 이는 실제 상황과 유사하다고 판단된다. 고무첨가제의 총 표면적 변경에 따라서는 고무첨가제의 총 표면적이 증가할수록 von Mises 응력과 주응력의 크기가 증가하였는데 이는 실제와 상이한 결과이다. 이러한 차이는 해석상 고려된 고무첨가제의 크기가 실제 마이크로 단위보다 크기 때문에 입자거동이 일치하지 않아서 나타난 현상이라 판단된다. 또한 탄성물성만 고려하였는데 본 연구에서 관찰한 시간의 시점은 실제로는 소성변형이 일어났거나 파단이 되었을 가능성이 크다. 따라서 본 연구와 같은 해석 모델은 충격 초기의 현상을 파악하는데 유효할 것으로 판단되고 그 이후의 현상은 탄소성 물성의 사용이나 파단해석도 고려해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. C. B. Bucknall, D. R. Paul, "Notched impact behavior of polymer blends: Part 1: New model for particle size dependence", *Polymer*, **50**, 5539 (2009).
2. R. J. M. Borggreve, R. J. Gaymans, J. Schuijjer and J. F. Housz, "Brittle-tough transition in nylon-rubber blends: effect of rubber concentration and particle size", *Polymer*, **28**, 1489 (1987).
3. R. J. M. Borggreve, R. J. Gaymans, and H. M. Eichenwald, "Impact behaviour of nylon-rubber blends: 6. Influence of structure on voiding processes; toughening mechanism", *Polymer*, **30**, 78 (1989).
4. J.J. Huang, H. Keskkula, and D.R. Paul, "Comparison of the toughening behavior of nylon 6 versus an amorphous polyamide using various maleated elastomers", *Polymer*, **47**, 639 (2006).
5. R. A. Kudva, H. Keskkula and D. R. Paul, "Fracture behavior of nylon 6/ABS blends compatibilized with an imidized acrylic polymer", *Polymer*, **41**, 335 (2000).
6. Meredith N. Silberstein, "Mechanics of Notched Izod Impact Testing of Polycarbonate", Massachusetts Institute of Technology (2005).
7. Y. Kojima, A. Usuki, M. Kawasumi, A. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, and O. Kamigaito, "Mechanical properties of nylon 6-clay hybrid", *J. Mater. Res.*, **8**, 1185 (1993).
8. D. R. Holmes, C. W. Bunn, and D. J. Smith, "The crystal structure of polycapromide: Nylon 6", *J. Polym. Sci.*, **17**, 159 (1955).
9. G. X. Chen, H. S. Kim, B. H. Park, and J. S. Yoon, "Multi-walled carbon nanotubes reinforced nylon 6 composites" *Polymer*, **47**, 4760 (2006).
10. K. Dijkstra, J. Ter Laak, and R. J. Gaymans, "Nylon-6/rubber blends: 6. Notched tensile impact testing of nylon-6/(ethylene-propylene rubber)blends", *Polymer*, **35**, 315 (1994).
11. A. Gonzalez-Montiel, H. Keskkula, and D. R. Paul, "Impact-modified nylon 6/polypropylene blends: 2. Effect of reactive functionality on morphology and mechanical properties", *Polymer*, **36**, 4605 (1995).
12. Y. H. Park, M. Y. Lyu, D. R. Paul, "Computer simulation of Izod Impact test for impact modifier reinforced Nylon 6", *Elast. Compos.*, **48**, 172 (2013).
13. "Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics". ASTM International
14. A. J. Oshinski, H. Keskkula and D. R. Paul, "The role of matrix molecular weight in rubber toughened nylon 6 blends: 2. Room temperature Izod impact toughness", *Polymer*, **37**, 4909 (1996).
15. Y. Kayano, H. Keskkula, and D. R. Paul, "Fracture behaviour of some rubber-toughened nylon 6 blends", *Polymer*, **39**, 2835 (1998).
16. R. A. Pearson, A. F. Yee, "Influence of particle size and particle size distribution on toughening mechanisms in rubber-modified epoxies" *J. Mat. Sci.*, **26**, 3828 (1991).
17. N. J. Mills, "The mechanism of brittle fracture in notched impact tests on polycarbonate", *J. Mater. Sci.*, **11**, 363 (1976).
18. R. A. Deblieck, D. J. M. Van Beek, K. Remerie, and I. M. Ward, "Failure mechanisms in polyolefines: The role of crazing, shear yielding and the entanglement network", *Polymer*, **52**, 2979 (2011).
19. A. J. Oshinski, H. Keskkula, and D. R. Paul. "The role of matrix molecular weight in rubber toughened nylon 6 blends:

1. Morphology”, *Polymer*, **37**, 4891 (1996).
20. T. D. Fomes, P. J. Yoon, H. Keskkula, and D. R. Paul, “Nylon 6 nanocomposites: the effect of matrix molecular weight”, *Polymer*, **42**, 9929 (2001).