



충격보강제가 포함된 나일론 6에서 Izod 충격시험의 컴퓨터 모사

박요한 · 류민영*[†] · D.R. Paul**

서울과학기술대학교 산업대학원, *서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

**Department of Chemical Engineering and Texas Materials Institute, The University of Texas at Austin
접수일(2013년 4월 30일), 수정일(2013년 5월 2일), 게재확정일(2013년 5월 7일)

Computer Simulation of Izod Impact Test for Impact Modifier Reinforced Nylon6

Yohan Park, Min-Young Lyu*[†], and D.R. Paul**

Graduate School of Industry, Seoul National University of Science and Technology,
172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-743, S. Korea

*Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology

**Department of Chemical Engineering and Texas Materials Institute, The University of Texas at Austin, USA
(Received April 30, 2013, Revised May 2, 2013, Accepted May 7, 2013)

요약 : 고분자 소재의 충격강도 증대를 위해 충격보강제를 이용하는 경우가 많다. 본 연구에서는 충격보강제가 함유된 나일론6에 대해서 충격보강 원리를 분석하고자 충격시험을 모사하였다. 이를 위해 나일론6에 포함된 충격보강제인 고무 첨가제의 모델링을 시도하였다. 모델링을 토대로 충격시험을 모사하고 충격시편 단면에서의 응력 분포 및 방향을 통해 충격강도 증대 원리를 관찰하였다. 시편 단면에서 충격보강제 유무에 따른 해석을 하여 비교하였고, 충격보강을 위해 사용되는 고무첨가제의 표면처리 여부에 따른 해석도 수행하여 응력을 비교하였다. 해석결과 노치에서 발생한 응력이 내부로 전파되면서 충격보강제 주변으로 경로가 바뀌면서 응력이 감소되는 현상이 나타났다. 특히 충격보강제를 함유한 시편에서 노치부 표면의 응력이 낮았다. 또한, 크랙이 발생하는 방향과 직각인 방향의 주 응력 크기도 충격보강제를 포함한 시편에서 낮게 나타났다. 이로 인해 크랙의 전파가 감소되고 충격강도가 증대되었다고 분석된다. 이러한 컴퓨터모사 방법은 복합재료의 물성 증대 원인을 파악하는데 활용할 수 있다고 판단된다.

ABSTRACT : Impact modifier reinforced polymers are frequently used. In this study, Izod impact test has been simulated to analyze the mechanism of impact reinforcement of Nylon6 which contains impact modifier. The modeling of rubber particles added to Nylon6 as an impact modifier has been attempted. Based on the modeling, simulation of Izod impact test has been performed to observe the distribution and direction of stress at the cross-section of impact specimen. Three computer simulation models for Nylon6 were investigated. Those were without impact modifier, containing impact modifier without surface treatment, and containing impact modifier with surface treatment in the Nylon6. Simulation results showed that the stress which originated at the notch surface propagated to the inside of specimen round a impact modifier. In addition to that, impact modifier reinforced Nylon6 specimen showed low stress ditribution in the cross-section specially at notch surface. Principal stress in perpendicular direction to crack was also lowered in impact modifier reinforced Nylon6. These enhanced impact resistance reduced and crack propegations. Through this study it was realized that the computer simulation can be utilized to investigate the property enhacement of composite materials.

Keywords : Izod impact test, Nylon6, Rubber particle, Impact modifier, principal stress

I. 서론

최근 에너지 절감 및 제품의 경량화에 따라 금속 소재가 가벼운 고분자 소재로 대체되는 경우가 증가하고 있다. 고분

자 소재는 금속소재에 비해 기계적 강도, 그 중에서도 충격강도가 취약하기 때문에 얼로이나 충격보강제를 함유한 복합재료가 많이 사용되고 있다. 충격보강제는 고무성분이 포함된 첨가제로 보강하고자 하는 매트릭스에 맞게 표면을 처리하여 사용되고 있으며, 충격강도는 충격보강제의 함량과 크기에 따라 변화한다.¹ 비결정성 고분자는 결정성 고분자에 비해 상대

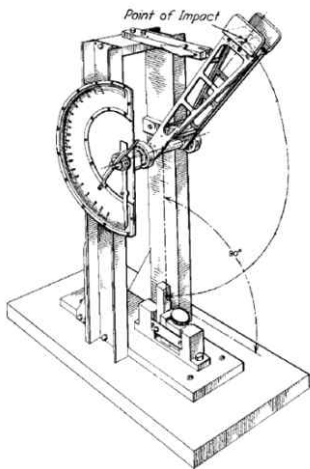
[†] Corresponding Author. E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

적으로 충격강도가 낮아 이의 증대를 위해 충격보강제를 사용하는 경우가 많다.² 결정성 고분자인 나일론 또한 이의 충격강도 증대를 위해 충격보강제를 사용하고 있다. 충격보강제가 함유된 매트릭스의 강도보강 메커니즘에 대한 연구가 보고되고 있는데 주로 파단면을 관찰하고 분석하는 정도이다.³ 파단면의 항복 영역의 크기와 복굴절 패턴을 관찰하고 에너지 흡수량 고려를 통해 소재 강도 증대를 관찰하는 연구가 있으며,⁴ 소재 파단면의 노치부에서부터 크레이지가 어느 방향으로 전파되어 크랙으로 성장하는지에 관한 연구도 있다.^{5,6} 이러한 연구들은 충격보강제로 보강된 소재에서 외부의 충격에 대해서 충격보강제가 어떻게 반응하고 있는지 관찰하는 것은 강도보강 메커니즘을 이해하는데 크게 도움이 된다. 또한 첨가제를 첨가하여 새로운 물성의 고분자 소재를 개발하기 위한 연구에서도 유용하게 활용된다.

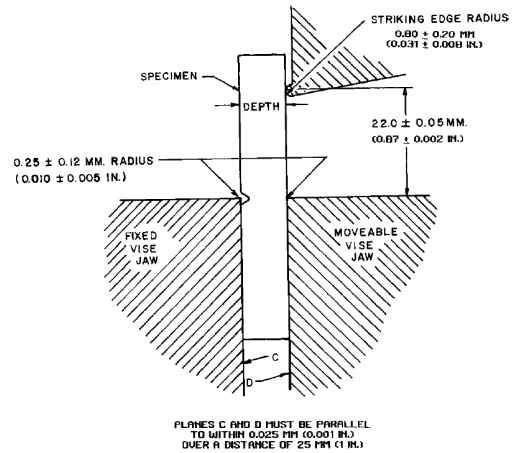
본 연구에서는 충격보강제가 포함된 나일론 시편의 충격 해석을 위해 시편 내에 고무 파티클의 모델링을 시도하였으며, 모델링을 토대로 충격시험을 모사하고 충격시편 단면에서의 응력분포를 관찰하였다. 또한, 고무 파티클의 코팅 여부에 따른 해석을 진행하였다. 그리고 크레이지에 의해 전파되는 크랙의 관찰을 위해 충격시편 단면에서의 주응력 분포와 주응력 방향을 관찰하였다. 이러한 연구를 통해서 충격이 보강되는 메커니즘의 이해를 증가시킬 수 있다. 그리고 물리적 기능을 향상시키는 복합재료를 이해하고 새로운 복합재료를 개발하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 컴퓨터 모사

1. Izod 충격 시험의 규정



(a) Izod impact test machine



(b) Specimen set up and location of pendulum

Figure 1. Standard method of Izod impact test.⁷

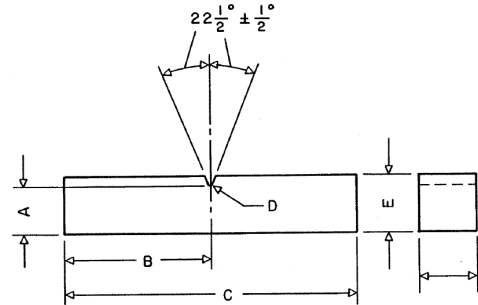


Figure 2. Specimen dimensions for Izod impact test.⁷

ASTM D256 실험 규격의 Izod 충격시험은 Figure 1에 도식화하여 나타내었다.⁷ Figure 1(a)와 같이 일정한 높이에서 추가 일정한 속도로 위치에너지를 운동에너지로 전환시키면서 시편에 충격을 가한다. 노치가 형성된 시편은 Figure 1(b)와 같이 Vise (C, D)에 의해 고정된다.⁷ 시편은 규격에 따라 Figure 2와 같은 V-노치 형상의 시편을 사용한다. 이러한 Izod 충격시험을 정확히 모사하기 위해 모델링을 하고 경계조건을 설정하였다.

2. 해석 모델링 및 경계 조건

해석 모델링은 Figure 3과 같이 Izod 충격 시험 규격에 따라 시편과 추의 모델링을 진행하였다. 시편의 두께는 3.18mm(1/8")이고, V-노치의 각도는 45°로 적용하였다. Figure 3(a)는 충격보강제가 없는 시편이고 Figure 3(b)는 충격보강제를 함유한 시편이다. 충격보강제가 포함된 시편의 경우 시편 내부에 충격보강제가 들어갈 수 있도록 구형상의 빈 공간을 모델링 하였다. Figure 3(b)의 Section B-B'와 같이 충격보강제의 형상은 구이며 지름은 1mm 이고 노치 끝과의 거리는 약 0.8mm 위치에 존재한다고 가정하고 모델링

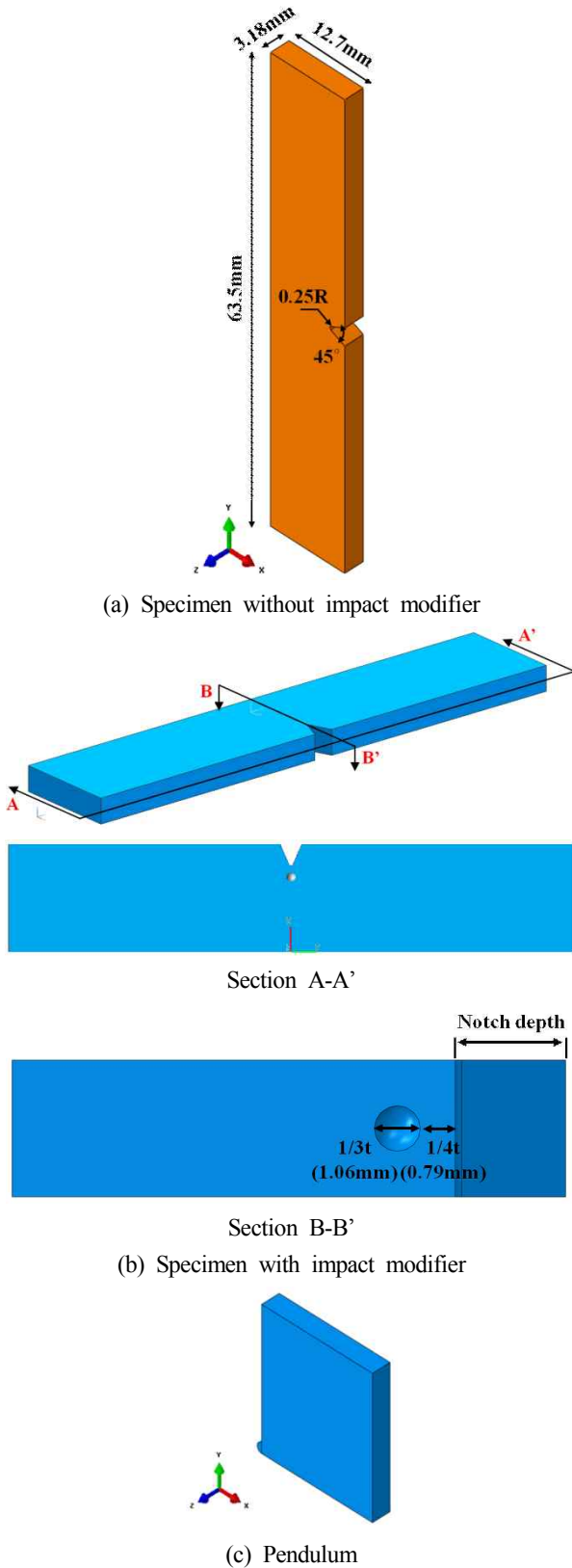


Figure 3. IZOD impact test specimen and pendulum for computer simulation.

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

Case I	Without impact modifier (only Nylon6)
Case II	Impact modifier separated with matrix, Nylon6 (Nylon6 + Rubber without coating)
Case III	Impact modifier bonded with matrix (Nylon6 + Rubber coated with silane)

하였다. 충격보강제를 함유한 소재는 지름 0.3 ~ 3 μm 정도의 수많은 충격보강제가 들어가 있으나 본 연구에서는 충격시험의 초기 컴퓨터 모사로 단지 1 개의 고무 파티클이 있다고 가정하고 간단히 모델링하였다. 충격보강제 유·무와 충격보강제 코팅 여부에 따른 시편의 모델링을 위해 표 1 과 같이 3 가지 Case 로 나누어 진행하였다. Case I 은 고무첨가제를 포함하지 않은 시편이고, Case II 는 코팅 처리되지 않은 고무첨가제를 함유된 시편이다. Case III 는 Silane 으로 코팅 처리된 고무첨가제가 함유된 시편이다.

해석에 사용된 시편과 추 그리고 충격보강제의 메쉬는 Figure 4 에 나타나 있으며, 모두 3 차원 사면체(Tetra) 메쉬를 적용하였다. 시편 노치부는 추가 충격을 가했을 때 변형이 가장 크게 일어나고 응력이 집중될 것으로 예측되는 부분이기 때문에 메쉬를 다른 위치에 비해 조밀하게 생성하였다. 또한 시편 두께방향으로는 10 개의 층으로 메쉬를 나누었다. 충격보강제가 포함되지 않은 시편의 요소 수는 132,233 개이고, 충격 보강제가 포함된 시편의 요소 수는 157,545 개이다. 추와 충격보강제의 요소 수는 각각 4,934 개

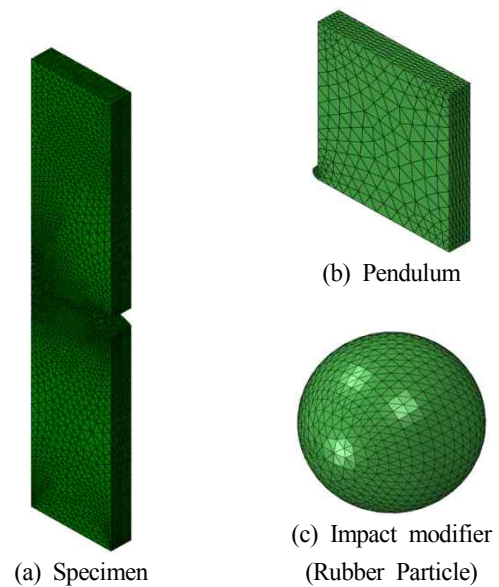


Figure 4. Mesh generation for computer simulation.

Table 2. Material Properties used in the computer simulation of Izod impact test⁸

	Specimen	Impact modifier	Pendulum
Material	Nylon6	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

와 15,725 개 이다.

해석에 사용된 재료의 물성조건은 Table 2 에 나타나 있다.⁸ 매트릭스는 나일론 6 이고 충격보강제는 고무이다. 그리고 추의 소재는 합금공구강으로 하였다.

추의 질량 0.6kg 을 고려하기 위해 7,760 kg/m³ 인 합금공구강의 밀도를 해석에 사용된 추의 부피 1.37×10⁻⁶m³ 에 맞게 환산하여 437,256 kg/m³ 으로 적용하였다.

충격 해석을 위해 적용한 경계조건은 Figure 5 에 나타나 있다. 해석에는 상용 프로그램인 ABAQUS 를 사용하였다. 0.6kg 의 추가 610mm 높이에서 회전 운동하여 시편에 충돌되는데 이때의 속도는 식 1 과 2 와 같이 계산된다. g 는 중력 가속도로 9.81m/s² 이고 h 는 추의 높이인 610mm 이다. 따라서 해석에서는 추가 x 방향으로 일정한 속도로 이동하여 시편에 충돌되도록 x 방향으로 3.459m/s 의 일정한 속도를 적용하고, y, z 축으로 고정 조건을 부여하였다. 시편의 경계 조건은 Figure 5 에서 A 와 B 면이 바이스에 의해 고정이 되므로 x 축에 대한 고정조건을 적용하였다. Table 1 에 정리된 것처럼 Case I 은 충격보강제가 포함되지 않은 시편이고, Case II 와 III 는 충격보강제가 포함된 시편으로 충격보강제를 구 형상으로 모델링하여 시편 내부에 적용하여 해석을 진행하였다. Case II 는 충격보강제에 표면처리를 하지 않은 경우로 충격보강제와 시편과는 분리(Separated)로 접촉조건을 주었다. Case III 의 경우는 충격보강제에 코팅처리를 한 경우의 해석모델링이다. 충격보강제에 Silane 으로 코팅처리를 하게 되면, 소재와의 접착이 되기 때문에 해석에서 시편과 고무의 접촉조건을 접착(Bonded)으로 부여 하였다.

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

$$v = \sqrt{2gh} \tag{2}$$

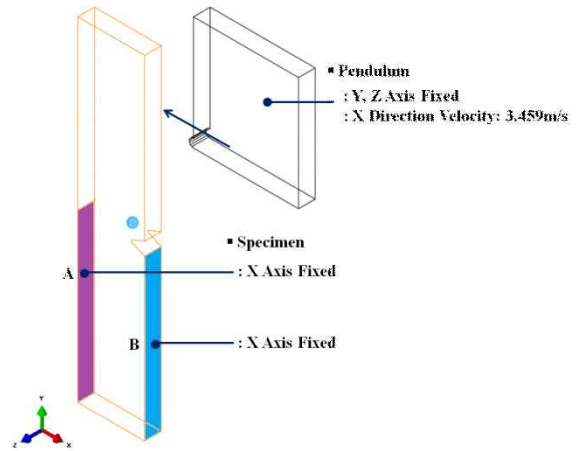
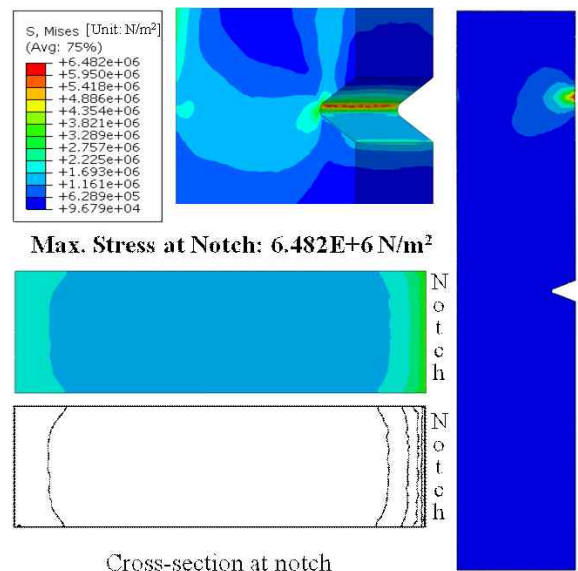


Figure 5. Boundary conditions for computer simulation.

III. 결과 및 고찰

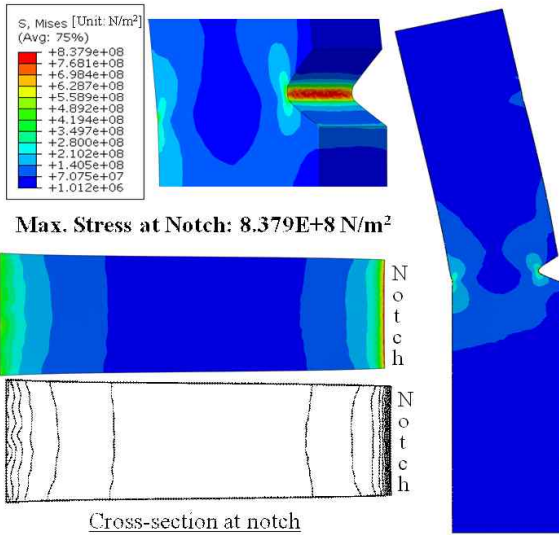
충격보강제를 포함하지 않은 시편의 von Mises 응력 분포가 Figure 6 에 나타나 있다. 충격 직후의 von Mises 응력 분포는 Figure 6(a) 에 나타나 있는데, 추가 접촉되는 부분에 가장 큰 응력이 집중되는 것을 관찰할 수 있었다. 변형이 어느 정도 진행된 후 응력 분포를 관찰해 보면 Figure 6(b)와 같이 노치부에 가장 큰 응력이 집중되는 것을 관찰할 수 있었고 노치 반대부에도 큰 응력이 집중되는 것을 관찰할 수 있었다. 노치부는 인장응력에 의해 노치부 반대편은 압축응력에 의해 von Mises 응력이 크게 나타났다. 응력은 노치 끝에서 시작되어 시간이 지날수록 증가하여 노치 내부로 확산되는 것으



(a) At 0.19E-03sec after impact

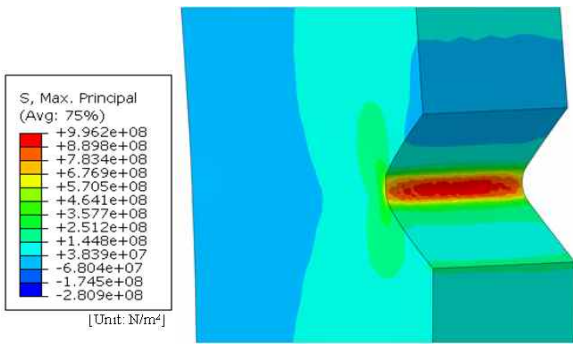
로 나타났다. 노치 반대편에서도 압축에 의해 발생된 응력이 시간이 지남에 따라 내부로 전파되는 것으로 나타났다.

충격보강제가 포함되지 않은 시편에서의 시편표면과 내부의 제 1 주응력의 분포 및 방향이 Figure 7에 나타나 있다.

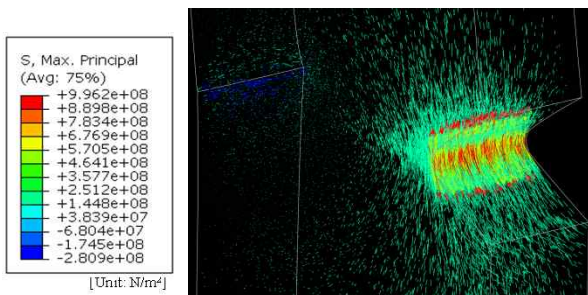


(b) At 1.59E-03sec after impact

Figure 6. Distribution of von Mises stress in the specimen without impact modifier.



(a) Distribution of 1st principal stress

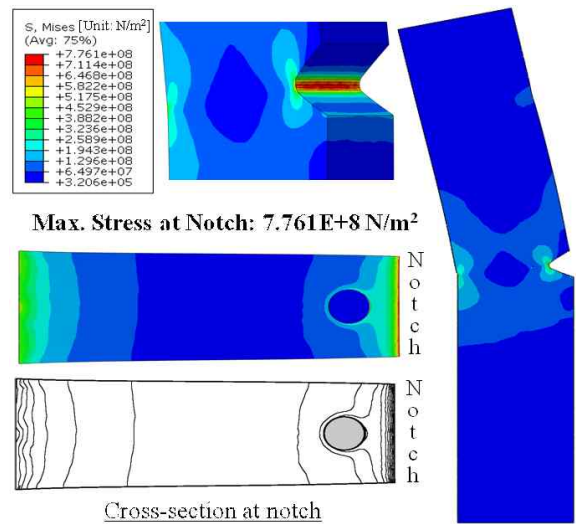


(b) Direction of 1st principal stress

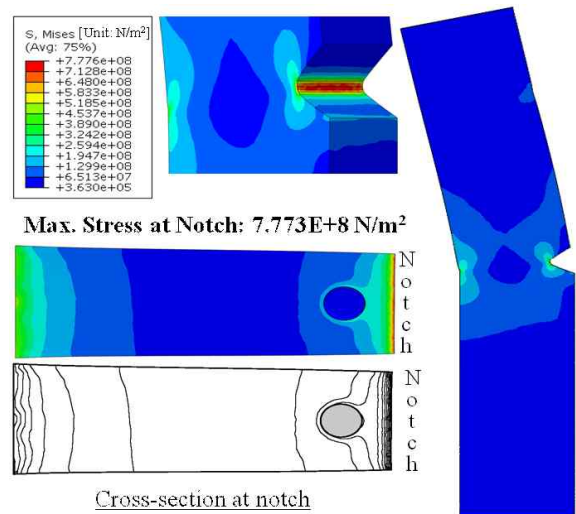
Figure 7. 1st principal stress in the specimen without impact modifier at 1.59E-03sec after impact.

Figure 7(b)와 같이 제 1 주응력의 방향은 시편 길이 방향으로 크게 작용되는 것을 관찰할 수 있는데 이러한 주응력에 의해 노치표면에서부터 크랙이 생성될 것으로 판단된다.

충격보강제를 포함한 시편에서 표면 처리된 경우와 표면 처리가 안된 경우의 von Mises 응력 분포가 Figure 8에 나타나 있다. 충격보강제를 포함한 시편들의 경우 또한 시편이 추에 충격이 가해지고 시간이 지남에 따라 von Mises 응력이 증가하는 것을 관찰할 수 있었고, 노치부와 노치 반대부에 응력이 크게 집중되는 것을 관찰할 수 있었다. 충격보강제를 포함한 시편들의 응력 분포가 충격보강제를 포함하지 않은 시편에 비해 낮은 응력 분포를 보이고 있다. 충격보강



(a) Without coating at 1.59E-03sec after impact



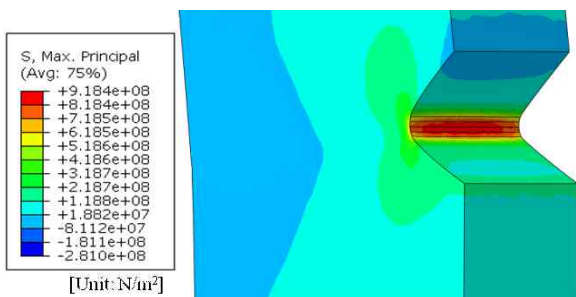
(b) Coated impact modifier at 1.59E-03sec after impact

Figure 8. Comparison of von Mises stress for coated and without coated impact modifier in impact modifier reinforced PA6.

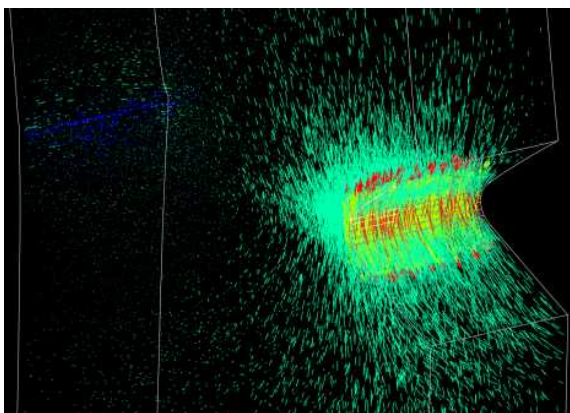
제를 포함한 시편에서 응력전파가 충격보강제 주변으로 긴 경로를 보임으로써 내부로 전파되는 응력이 완화 됨을 알 수 있다. 이러한 현상이 소재의 충격강도를 향상시키는 것으로 판단된다. 충격보강제에 코팅 처리를 한 경우와 하지 않은 경우의 von Mises 응력의 차이는 매우 작았다.

충격보강제에 코팅 처리를 한 경우와 하지 않은 경우의 제 1 주응력 분포 및 방향이 Figure 9 와 Figure 10 에 나타나 있다. 시편 길이 방향으로 주응력이 크게 작용하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 시편의 충격에 의해 시편 노치 표면에서부터 크랙이 시편의 길이 방향과 직각방향으로 퍼져 나가는 것을 암시해준다. 주응력의 분포와 방향에서 충격보강제의 코팅여부에 따른 영향은 크지 않았다.

각 모델별 충격 직후 노치부 표면에서의 von Mises 응력 분포를 Figure 11 과 같이 1 에서부터 36 포인트까지 측정하였고 그 결과가 Figure 12 에 나타나 있다. 충격보강제를 포함하지 않은 시편(Nylon6)에서 가장 높은 응력이 관찰되었다. 노치표면에서의 제 1 주응력이 Figure 13 에 나타나 있다. 제 1 주응력 또한 충격보강제를 포함한 시편 (Nylon6 + rubber + silane, Nylon6 + rubber)에서 낮게 관찰되었다. 이는 상대적으로 물성이 낮은 고무가 충격에너지를 흡수하여

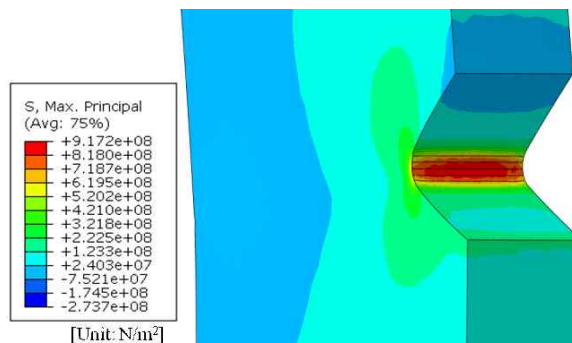


(a) Distribution of 1st principal stress

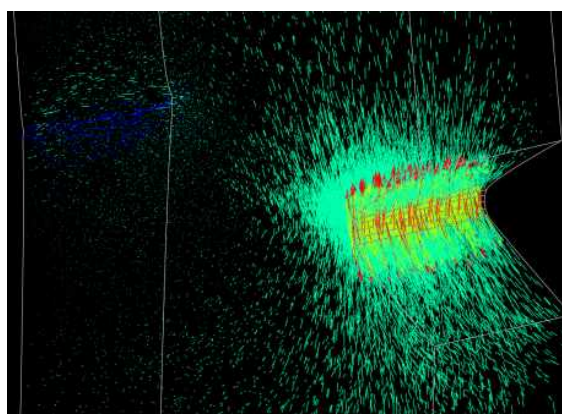


(b) Direction of 1st principal stress

Figure 9. 1st principal stress in the specimen with uncoated impact modifier at 1.59E-03sec after impact.



(a) Distribution of 1st principal stress



(b) Direction of 1st principal stress

Figure 10. 1st principal stress in the specimen with coated impact modifier at 1.59E-03sec after impact.

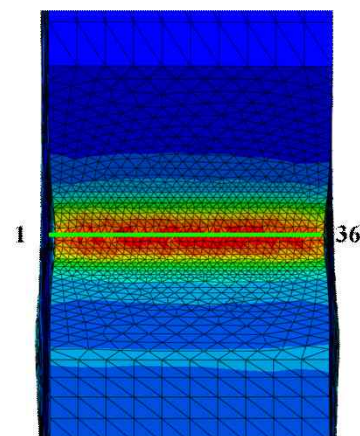


Figure 11. Measurement location of von Mises stress on notch surface.

최대응력이 낮게 나타나는 것으로 판단되고 이에 따라 충격강도가 증가되었을 것으로 사료된다. Figure 14 에 시편의 두께 변화가 나타나 있다. 충격보강제가 없는 경우 초기 3.175mm 두께의 시편이 충격 후 0.19E-4 초가 된 후 노치부는 2.996mm 로 감소되었고, 노치부의 반대부는 3.385mm 로

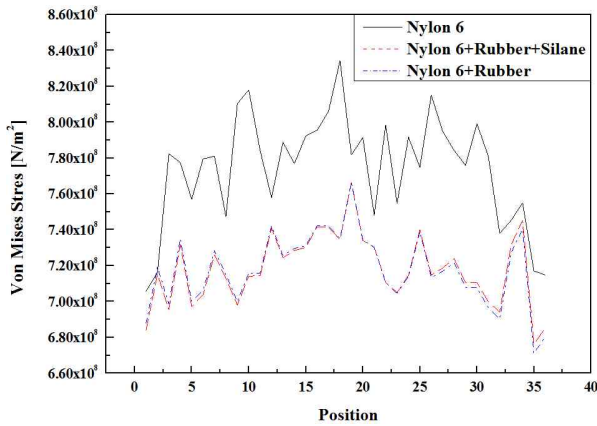


Figure 12. von Mises stress on the surface of notch at 1.59E-03sec after impact.

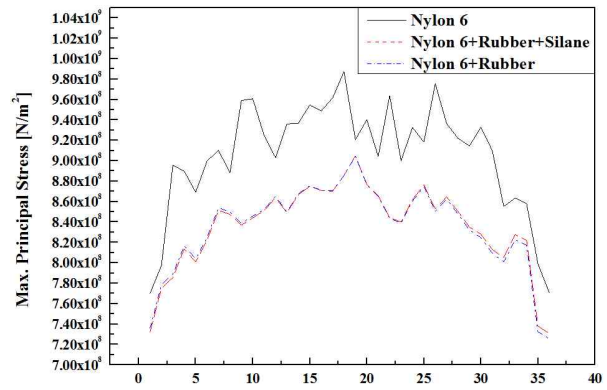


Figure 13. 1st principal stress on the surface of notch at 1.59E-03sec after impact.

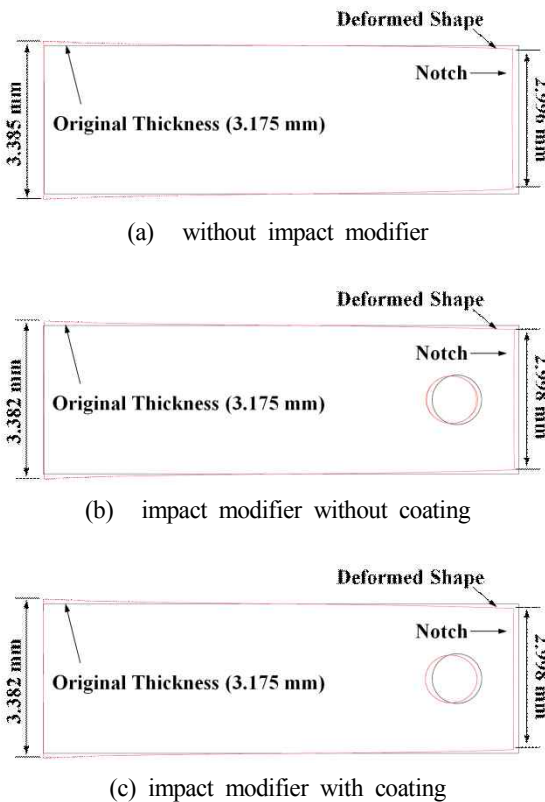


Figure 14. Variations of cross-section profiles at 1.59E-3sec after impact.

증가하였다. 노치부는 인장이 작용되고, 노치 반대부는 압축이 작용되어 나타난 현상이다. 충격보강제가 함유된 경우는 충격보강제가 없는 경우에 비해 노치부는 덜 수축이 되었고, 노치부 반대부는 덜 증가가 되었다. 즉 초기의 두께가 충격 후에 크게 변화되지 않았다. 이는 충격보강제에서 국부적으로 변형이 일어나면서 시편의 두께 변화가 감소되었다고 판단된다. 충격보강제의 코팅 여부에 따른 두께 변화의 차이는 미미하였다.

III. 결론

본 논문에서는 충격 강도의 컴퓨터 모사에 대해 연구하였다. 충격보강제인 고무첨가제 함유에 따른 해석과 고무첨가제 표면 코팅 유무에 따른 해석을 비교하였다. 해석결과 노치에서 내부로 전파되는 응력경로가 충격보강제 주변으로 돌아가면서 응력이 낮아지고 내부로의 전파가 감소되었다. 또한 노치 부에 크랙을 유발하는 최대 주 응력의 크기도 충격보강제가 함유되면서 감소되었다. 그리고 매트릭스 내부의 충격보강제가 변형이 일어나면서 시편의 외곽 두께 변화는 적게 관찰되었다. 이러한 해석 결과로 Nylon6 소재에 충격 보강제를 함유함으로써 크랙의 저항성이 증가되어 충격강도가 증가되었다고 판단된다. 표면 처리된 충격보강제가 표면 처리되지 않은 충격보강제에 비해 충격강도가 높다고 알려져 있으나 본 해석에서 응력 집중의 차이는 관찰되지 않았다. 본 연구에서 수행한 해석방법은 충격보강제를 함유한 나일론 6의 충격거동의 이해에 기여하였으며 이러한 컴퓨터 모사 방법은 향후 기능성 복합체 재료의 거동분석에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부) 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. C. B. Bucknall, D. R. Paul, "Notched impact behavior of polymer blends: Part 1: New model for particle size dependence", **50**, 5539 (2009).
2. J. J. Huang, H. Keskkula, D. R. Paul, "Comparison of the toughening behavior of nylon 6 versus an amorphous poly-

- amide using various maleated elastomers”, *47*, 639 (2006).
3. 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).
 4. Meredith N. Silberstein, “Mechanics of Notched Izod Impact Testing of Polycarbonate”, Massachusetts Institute of Technology (2005).
 5. N. J. Mills, “The mechanism of brittle fracture in notched impact tests on polycarbonate”, *J. Mater. Sci.*, **11**, 363 (1976).
 6. Rudy A. C. Deblieck, D. J. M van Beek, Klaas Remerie and Ian M. Ward,” Failure mechanisms in polyolefines: The role of crazing, shear yielding and the entanglement network”, *Polymer*, **52**, 2979 (2011).
 7. “Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”. ASTM International.
 8. 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).
 9. Marc Andre Meyers and Krishan Kumar Chawla, “Mechanical Behavior of Materials”, Cambridge University Press, New York (2008).