

두께와 노치생성방법에 따른 플라스틱 수지의 충격강도 변화에 관한 연구

김 현* · 이대섭 · 임재수 · 류민영†

서울과학기술대학교 제품설계금형공학과, *서울과학기술대학교 산업대학원

(2011년 6월 17일 접수, 2011년 8월 5일 수정, 2011년 8월 20일 채택)

A Study on the Variations of Impact Strength of Plastics for Various Thicknesses and Notch Formation

Hyun Kim*, Dae Seop Lee, Jae Soo Lim, and Min-Young Lyu†

Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Seoul National Univ. of Technology,

172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*Graduate School of Industry, Seoul National Univ. of Technology, 172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received June 17, 2011; Revised August 5, 2011; Accepted August 20, 2011)

초록: 제품의 소형화와 경량화 추세에 따라 부품의 두께가 얇아지는 경향이 있다. 이러한 소형 및 경량 제품의 중요한 설계요소는 소재의 충격강도이다. 충격강도는 재료 고유의 물성값으로 기하학적 형상에 의존하지 않고 일정한 값을 가져야 한다. 그러나 충격강도 시험 시 시편의 두께에 따라 강도의 차이를 보이고 노치(notch)의 생성 방법과 노치형상에 따라서는 민감도를 보인다. 본 연구에서는 시편의 두께와 노치형상 및 노치의 생성방법에 따른 충격강도를 알아보았다. 또한 노치의 각도와 노치에 대한 충격 방향에 따른 충격강도도 관찰하였다. 이를 위해 엔지니어링 플라스틱인 PC, ABS, 그리고 POM에 대하여 Izod 충격시험을 수행하였다. 그 결과 실험한 모든 수지에서 두께가 얇아질수록 충격강도가 높아지는 경향을 보였는데 PC수지가 가장 크게 증가하였다. PC수지는 두께가 두꺼울 때는 취성파괴를 보였는데 두께가 얇을 때는 연성파괴 양상을 보였다. 몰드노치 시편이 밀링노치 시편에 비해 충격강도가 높았고, 역방향 노치가 정방향 노치보다 충격강도가 높았다. 본 연구에서 실험한 수지 중에서 노치의 민감성은 PC가 가장 컸으며 다음이 POM, ABS순으로 나타났다.

Abstract: The impact strength of material is considered the most important design factor for small and light products. Impact strength is a unique material property, thus the impact strength should not depend upon the geometry of specimen. However it varies according to specimen thickness, notching method, and notch shape. In this study, the variations of impact strength have been investigated according to thickness, notch shape, and notching method of specimen. Engineering plastics such as PC, ABS and POM have been used in this study. Experimental results showed impact strength increased as thickness decreased. PC showed the highest increment of impact strength when the thickness was thin. Fractured section of PC showed brittle fracture behavior when the specimen was thick. However it showed ductile fracture behavior when it was thin. The impact strength of in-mold notched specimen showed higher than that of milling notched specimen. PC showed the highest notch sensitivity among the materials used in this experiment.

Keywords: Izod impact strength, notch sensitivity, specimen thickness, notch angle.

서 론

최근 제품설계에서 에너지 절감이나 제품의 경량화에 따라 종래부터 사용되어 온 금속소재가 가벼운 고분자 소재로 대체되는 경우가 많다.^{1,2} 그 중에서도 엔지니어링 플라스

틱으로의 대체가 활발히 일어나고 있으며, 일반적으로 고분자 소재는 금속소재에 비하여 기계적 강도, 그 중에서도 충격강도가 취약하다. 또한 고분자 소재는 재료에 따라 노치(notch)의 민감성이 다르고 형상에 따른 충격강도의 변화를 보이고 있다. 이를 위해 고분자 소재의 충격강도를 증가시키기 위한 연구가 많이 진행이 되어왔다.³⁻⁵

충격강도는 재료의 고유한 물성치로 시편의 형상이나 시험 요인에 관계없이 일정한 값을 보여야 한다. 그러나

†To whom correspondence should be accessed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

실제로는 시편의 두께에 따라 충격강도가 변함은 물론 재료에 따라서는 노치 민감도가 나타나기 때문에 상황에 따라 충격강도는 다르게 나타나고 있다. 따라서 고분자 소재의 응용을 위해서는 고분자 소재에 대한 충격강도 특성의 명확한 이해가 필요하다. 고분자 소재의 충격강도에 대한 연구는 많이 있다.^{6,7} 대부분의 연구가 충격강도 증가를 위한 엘로이(alloy)나 충격보강재를 함유한 복합재료(composite)에 대한 연구이다. 시편의 두께와 시험온도에 따른 충격강도의 연구도 있다.^{8,9} 그러나 시편의 두께와 노치 생성방법, 그리고 충격방향에 따른 충격강도의 변화 등 종합적인 연구는 아직 미진한 실정이다.

본 연구에서는 엔지니어링 플라스틱인 PC, ABS 그리고 POM수지에 대해서 충격강도의 변화를 관찰하였다. 충격 시편의 두께를 다양하게 하였으며 시편의 V-노치도 시편 성형 후 밀링노치와 시편의 사출성형 시 노치를 생성한 몰드노치 두 방법으로 제작하여 실험하였다. 또한 V-노치의 각도도 변화하여 실험하였다. 이러한 연구는 충격강도에 영향을 주는 인자들을 파악할 수 있고 재료에 따라서 다르게 나타나는 노치와 두께의 민감도를 판단할 수 있다.

실 험

재료와 시편, 시험기. 실험에 사용한 재료는 다양한 수지 종류에 따른 영향을 보기 위해 비결정성 수지로 PC (LG DOW, CALIBRE 300-30), 결정성 수지로 POM (LG Chemical, LUCCEL N109-LDS), 그리고 공중합체인 ABS (LG Chemical, HF380)를 사용하였다. 시편은 ASTM D256규격에 따라 Figure 1과 같은 형상을 사용하였다. 시편의 두께는 1/2", 1/4", 1/8" 그리고 1/16"를 사용하였다. 시편은 사출성형으로 제작하였는데 V-노치는 사출성형 후 밀링 가공에 의한 밀링노치와 금형에 V-노치를 만들고 사출성형 시 V-노치를 형성한 몰드노치로 제작하였다. 이때 밀링에 의한 노치생성시 노치형상의 민감도를 조사하기 위해 V-노치의 각도를 30°, 45°, 60° 등 세 가지로 노치시편을 제작하였다.

충격 시험기는 선우산업기계의 SIP-150모델을 사용하여 상온에서 ASTM D256 방법에 따라서 충격시험을 수행하였다.

파단면 관찰 및 변형량 측정. 충격시험 후 시편의 파단면을 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM,

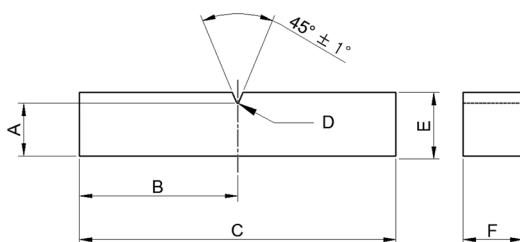


Figure 1. Specimen for Izod impact test (ASTM D256).

JEOL Co., JSM-6400)을 이용해 관찰하였다. SEM 촬영 부위는 Figure 2와 같이 파괴가 시작되는 시험편의 V-노치 선단 부분(Region ①)과 균열이 전파되는 시험편 중간부분(Region ②), 그리고 파괴가 끝나는 부분(Region ③)에서 관찰하였다.

또한 시편의 충격강도와 시편의 변형과의 연관성을 찾고자 디지털 버니어 캘리퍼스를 이용하여 충격강도 시험 전 두께와 파단 후 파단면의 두께 변화량 ($\Delta F = |F_2 - F_1|$)을 측정하였다.

결과 및 토론

시편의 두께와 노치생성방법에 따른 충격강도. Method A에 따라 실험을 진행함.

PC: Figure 3에 PC의 충격강도가 나타나 있다. 두께가 두꺼울 때는 충격강도가 낮고 균일하나 두께가 얇아지면 충격강도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 몰드노치가 밀링노치보다 충격강도가 높게 나타났으며 몰드노치의 경우 두께

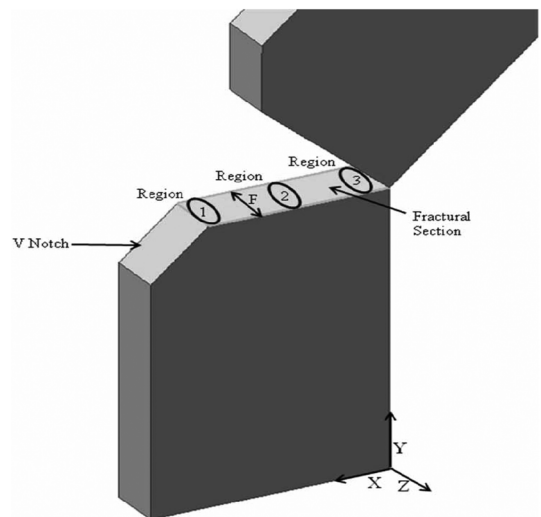


Figure 2. SEM observation regions and measurement of thickness (F) in the fractured surface of specimen.

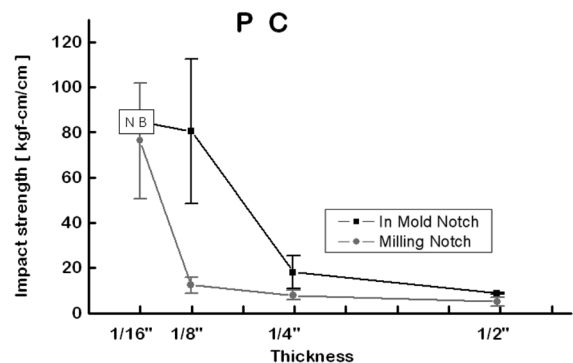


Figure 3. Variations of Impact strength of PC (NB=No Break)

1/4"~ 1/8" 영역에서, 밀링노치의 경우 두께 1/8"~1/16" 영역에서 충격강도가 급격히 증가하였다.

위의 두께영역에서 PC 시편은 취성파괴현상에서 연성파괴현상으로의 전이가 이루어졌다고 판단된다.^{10,11} 즉, 전이영역보다 얇은 두께의 시편에서는 연성파괴가 일어나고 전이영역보다 두꺼운 시편에서는 취성파괴가 일어난다. 취성파괴일 때는 균열의 전파가 빠르지만 연성파괴일 때는 균열이 진행되면서 소성변형을 한다. 따라서 소성변형에 필요한 에너지를 흡수하기 때문에 파단에 필요한 에너지가 크게 되어 충격강도가 증가한 것이다.¹²

고분자는 점탄성의 성질이 있어서 파괴역학을 적용하기 힘들다. PC의 경우 두께, 온도, 노치의 형상에 따라 취성파괴와 연성파괴를 동시에 가지고 있다. Figure 4에 PC 충격시편의 파괴 전후의 두께변형량 (ΔF)이 나타나 있는데 두께에 따라 변형을 알 수 있다. 즉 두께가 1/2"와 1/4" 일때는 0.01 mm 정도의 값을 보이는데 두께가 1/8"와 1/16" 일때는 0.4 mm 정도의 값을 보이고 있다. 이는 탄성파괴를 나타내는 평면변형률($\epsilon_x = 0$) 상태에서 소성변형을 동반한 연성파괴를 나타내는 평면응력($\epsilon_x \neq 0$) 상태로 변하고 있음을 보여준다고 사료된다.¹³

PC 시편의 파단 시 나타난 소성변형은 광학현미경으로 관찰할 수 있다. Figure 5에 광학현미경으로 관찰한 파단면이 나타나 있는데 밀링노치의 1/16" 시편과 몰드노치의 1/8" 시편에서 소성변형의 흔적이 관찰되었다.

파단면은 전단 파괴가 일어나는 Mist 영역, 빠른 균열 전파로 거울 같이 매끈한 Mirror 영역, 그리고 굽힘이 일어나는 끝 부분으로 나누어 볼 수 있다. 파괴면이 깨끗한 Mirror면을 많이 보일수록 취성파괴를 띠며 Mist 영역이 많을수록 소성변형을 동반하는 연성파괴를 보인다.¹⁴

SEM을 이용한 파단면 관찰에서는 Figure 6(a)와 같이 밀링노치에 대해서 두께가 1/4" 이상에서는 소성변형이 거의 없고 깨끗한 Mirror면을 보이는 취성파괴로 판단된다. 또한 1/16" 시편에서는 소성변형이 동반되는 연성파괴가 이루어져서 대부분의 파단면이 Mist 영역으로 형성되어 있다.

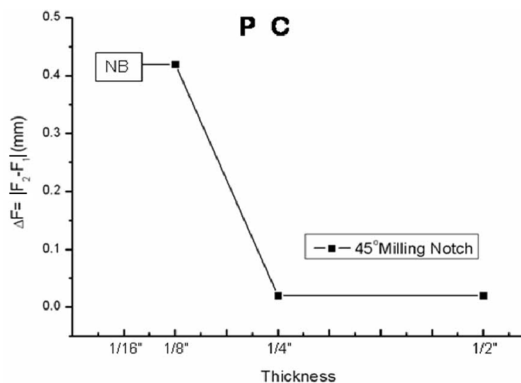


Figure 4. Thickness variations of specimens before and after fracture of PC(NB=No Break).

몰드노치의 경우는 Figure 6(b)에 나타난 바와 같이 1/8" 시편에서 대부분의 파단면이 Mist 현상을 나타내어 소성변형이 동반되었음을 보여주고 있다.

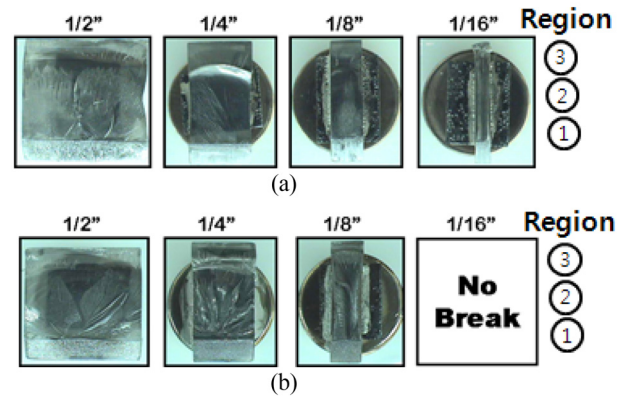


Figure 5. Optical microscope observation of fractured section of PC specimen (x1). (a) Milling notched specimen; (b) In mold notched specimen.

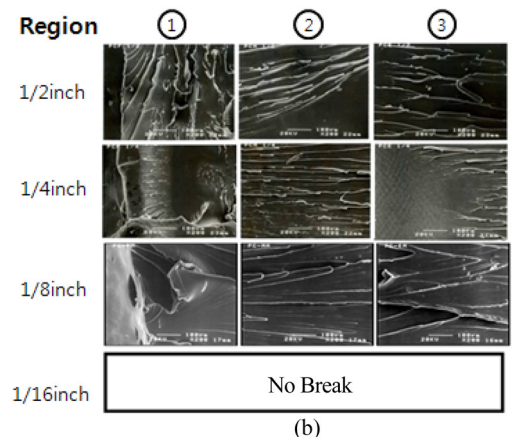
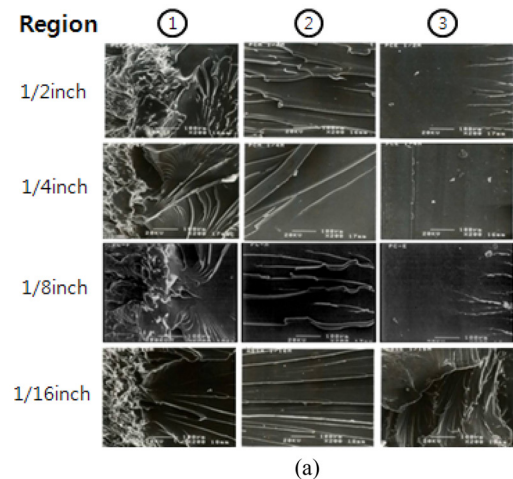


Figure 6. SEM observation of fractured section of PC specimen (x200). (a) Milling notched specimen; (b) In mold notched specimen.

이와 같이 노치 생성방법에 따라 충격강도와 파괴양상이 바뀌는 전이영역이 다른 것을 알 수 있는데, 광탄성 측정기를 통하여 밀링노치와 몰드노치의 내부 복굴절 패턴을 관찰해 보았다. PC시편의 복굴절 패턴이 Figure 7에 나타나 있는데 각 시편의 V-노치 부분에서 복굴절 패턴이 다름을 알 수 있다. 몰드노치 시편의 경우 V-노치영역에서 수직 흐름이 연속적으로 이루어져 있으나 밀링노치의 시편에서는 흐름의 연속성이 깨어져 있음을 보여주고 있는데 이는 사출성형에 의한 시편노치 부분의 미세구조는 충격강도에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

분자배향의 연속성이 깨어져 있을 경우 균열개시 에너지가 작게 소요되어 충격강도가 작게 나타났고 또한 파괴양상이 바뀌는 전이영역의 차이도 나타났다고 판단된다.

ABS: ABS의 경우 Figure 8에 나타난 것과 같이 시험편이 1/4"보다 두꺼운 영역에서는 충격강도가 일정하나 이보다 얇은 경우에는 두께가 얇아질수록 충격강도가 다소 증가하는 경향을 보였다. 몰드노치와 밀링노치 시편의 충격강도가 유사한데 이는 ABS의 성분 중에 고무성분인 butadiene이 시편 파괴 시 균열성장을 억제하는 요인으로 작용하여 노치의 생성 방법에 관계없이 균열 개시의 에너지가 유사하여 충격강도의 차이가 적게 나온 것으로 판단된다.¹³

SEM을 통해 파단면을 관찰한 결과 Figure 9와 같이 시험편 끝부분(Region ③)에 균열이 정지한 모양을 확인할 수 있다. 이는 경첩(hinge) 현상으로 나타나는 형상으로 두께가 얇아질수록 그 양이 점차 많아지는 것을 볼 수 있다. 밀링노치 시편보다는 몰드노치 시편에서 경첩현상을 보이는 양이 큼을 볼 수 있는데 이러한 현상 때문에 충격강도가 다소 높게 나타난 것으로 판단된다. 모든 두께에서 파단면을

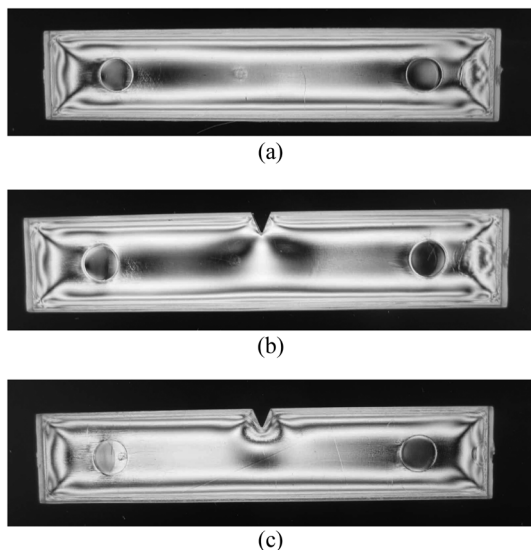


Figure 7. Comparison of birefringence patterns in milling notched and mold notched specimens. (a) Un-notched specimen; (b) Milling notched specimen; (c) In mold notched specimen.

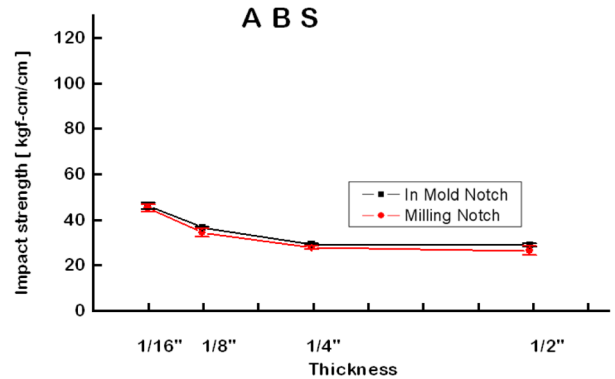


Figure 8. Variations of impact strength of ABS.

보면 영역 ①, ②, 그리고 ③에서 큰 차이를 보이지 않는데 이는 파괴 시 균열 진전속도가 일정함을 시사하는 것이고 이로 인해 충격강도의 변화가 크지 않았다고 판단된다.

POM: POM에 대한 충격강도가 Figure 10에 나타나 있다. ABS수지와 유사한 양상으로 두께가 감소할수록 충격강도가 증가하였으며, 노치 생성방법에 따라 값의 차이가 다소 크게 나타났다. 시편의 두께가 얇아질수록 몰드노치와 밀링노치 시편의 충격강도 차이가 크게 나타났다.

파단면의 SEM 관찰 결과 Figure 11과 같이 전 구간 파괴양상이 유사함을 확인할 수 있었다. 균열의 전파가 모든 시편에서 일정하게 일어났을 것으로 판단된다. 그리고 균열개시부터 파단이 끝날 때까지 파단면의 특별한 변형이 없이 파괴되었음을 알 수 있다.

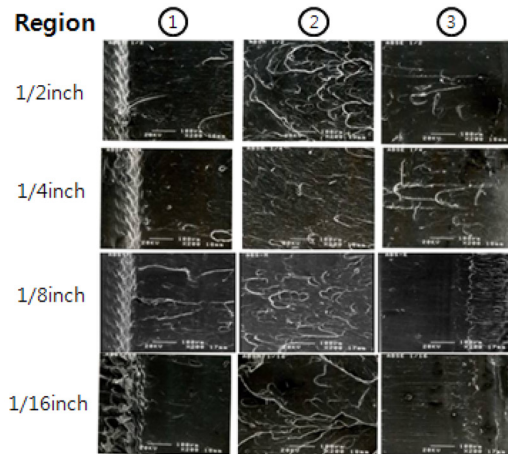
노치각도에 따른 충격강도. Figure 12에 PC, ABS, 그리고 POM의 노치각도에 따른 충격강도가 나타나 있다. 본 연구에서 실험한 재료에서 노치각도에 따른 충격강도의 변화량이 매우 작았다. 노치각도에 따른 충격강도의 변화는 동적 응력확대 계수로 설명할 수 있다.

3점 굽힘 시험 시 사용되는 CGS(coherent gradient sensing) 방법을¹⁵ 통해 각도에 대한 동적 응력확대계수의 영향을 파악할 수 있는데, 동적 응력확대 계수는 식 (1)과 같이 정의된다. 노치각도가 작아짐에 따라 λ 값이 작아지고 이에 따라 동적 응력확대계수가 증가하게 된다. 동적 응력확대계수가 커지게 되면 충격강도는 감소된다.

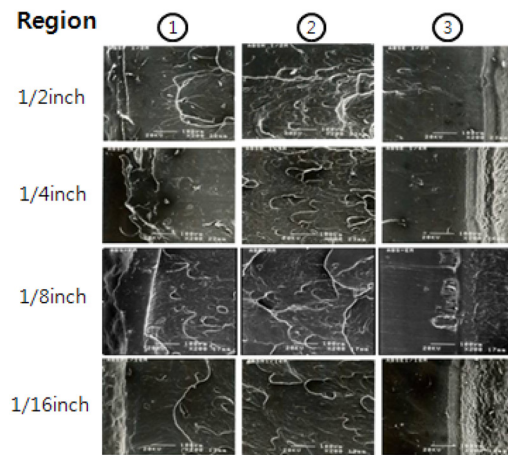
$$K_I = \frac{\sigma_0}{(2\pi r)^{\lambda-1}} \bigg|_{(\theta=0)} \quad (1)$$

본 연구에서는 노치의 각도가 30°~60° 범위인데 이 영역에서는 λ 값의 차이가 크게 나지 않으므로 응력확대계수의 차이 또한 작게 나타나 충격강도의 차이가 매우 작게 나타난 것으로 사료된다.

충격방향에 따른 충격강도. 정방향과 역방향의 노치에 관한 충격강도실험은 Izod test method E에 해당하는 항목으로 비노치(un-notched)와 노치(notched) 상태의 시편 간 충격강도 차이를 나타내는 실험이다. 정방향 노치는 노

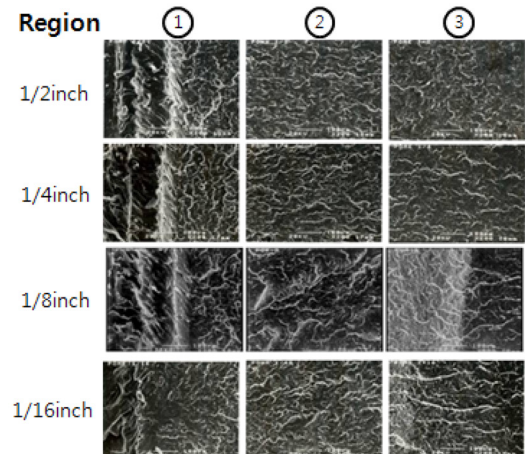


(a)

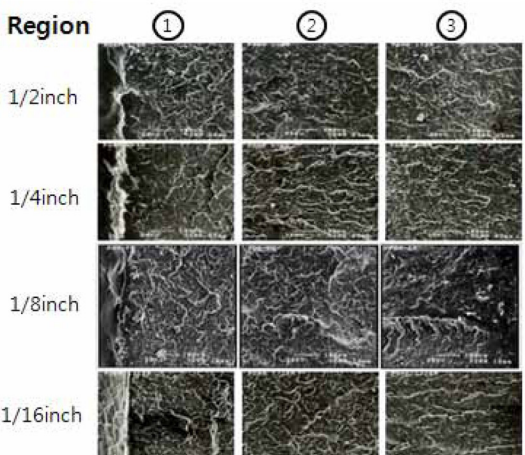


(b)

Figure 9. SEM observation of fractured section of ABS specimen (x200). (a) Milling notched specimen; (b) In mold notched specimen.



(a)



(b)

Figure 11. SEM observation of fractured section of POM specimen (x200). (a) Milling notched specimen; (b) In mold notched specimen.

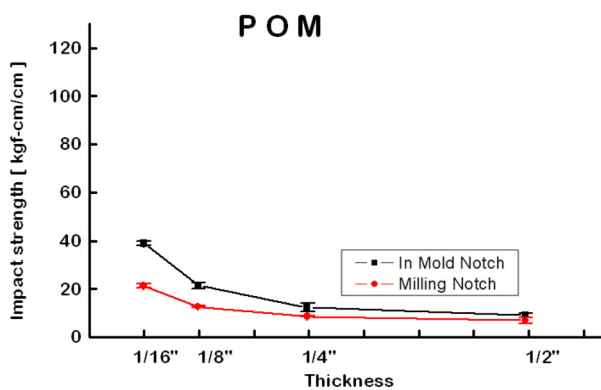


Figure 10. Variations of impact strength of POM.

치가 있는 면에 충격을 가하는 것이고 역방향 노치는 노치가 있는 면의 반대 면에서 충격을 가하는 것을 의미한다. 이때

이 값의 차이는 재료가 노치에 대해 얼마나 영향을 받는지, 즉 재료의 노치에 민감도가 얼마나 큰지를 평가하는 실험으로 1/4"의 시편에 대해 실험을 하였다. 결과가 Figure 13에 나타나 있는데 ABS의 경우 역방향 노치의 값이 정방향 노치값보다 약 1.5배 정도였으며, POM은 약 9배, PC의 경우 역방향 노치에서 충격강도 시험편이 파괴되지 않아 가장 큰 차이를 보였다. 따라서 실험한 소재 중 PC가 노치에 대한 영향을 가장 크게 받았고, 그 다음이 POM이었다. ABS는 노치에 대한 민감도가 매우 작게 나타났다.

결론

본 연구에서는 시편의 두께와 노치생성방법에 따른 PC, ABS, 그리고 POM 수지의 충격강도에 대하여 연구하였다.

연구결과 플라스틱의 충격강도는 시편의 두께에 영향을 받았다. 대체적으로 시편의 두께가 1/4"보다 두꺼운 경우는

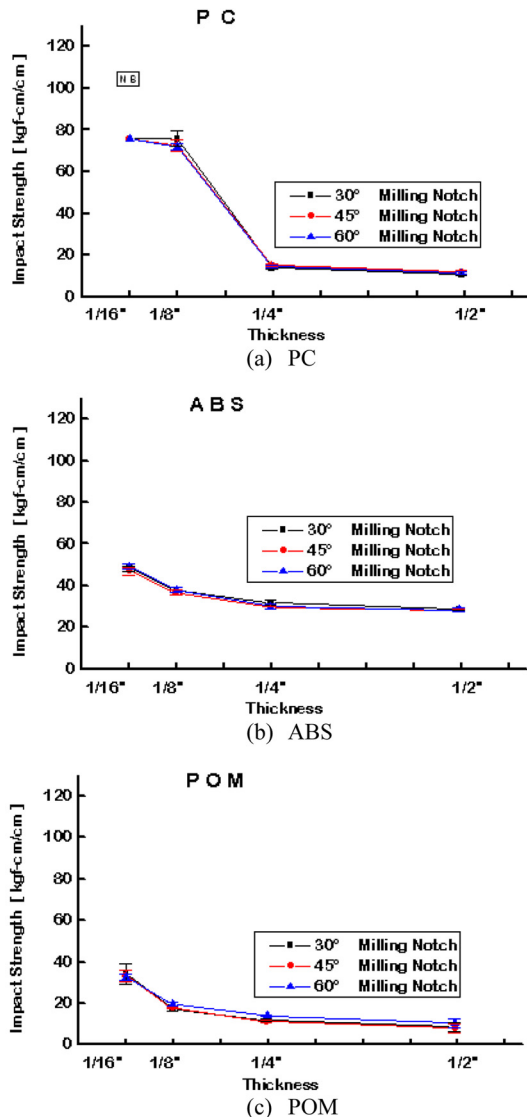


Figure 12. Impact strength for various notch angles and thicknesses.

일정한 충격강도를 보였고, 1/4"보다 얇을수록 충격강도가 증가하는 경향을 보였다. 이중 PC소재는 두께에 따른 충격강도의 증가가 최대 10배 이상으로 가장 컸다. 이러한 결과는 PC는 ABS와 POM보다 두께에 의한 충격강도의 영향이 크게 받는다는 것을 말해준다.

PC의 경우 두께가 두꺼울 때는 취성파괴를 보이나 두께가 얇을 때는 연성파괴의 양상을 보이기 때문에 두께에 따른 충격강도의 차이가 크다.

밀링노치와 몰드노치의 경우 몰드노치가 밀링노치보다 충격강도가 높았으며 ABS수지는 그 차이가 매우 작았다. 역노치와 정노치에 대한 충격강도의 차이는 재료마다 크게 다르게 나타났다. PC에서 가장 큰 차이를 보였고 ABS에서 차이가 가장 작았다. 이를 통해 볼 때 본 실험에서 사용한 재료 중 PC가 노치에 대한 민감도가 가장 크고 ABS가 가장

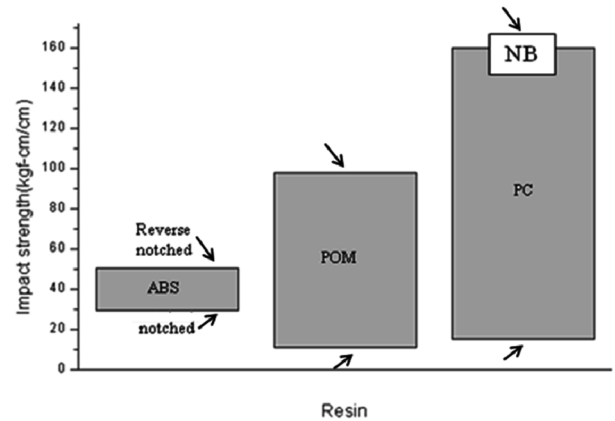


Figure 13. Comparison of impact strength for impact direction.

작았다. 시편에서 V-노치의 각도변화 즉, 30°~60°에서 충격강도는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 각 재료에서 충격강도에 영향을 주는 인자들에 대한 민감도는 PC가 가장 컸고, 다음이 POM 그리고 ABS순으로 나타났다.

감사의 글: 본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

1. N. J. Kim, *Polymer Science and Technology*, **1**, 163 (1990).
2. W. G. Kang, S. E. Yoo, and S. K. Jung, *J. Korean Soc. Automot. Eng.*, **31**, 26 (2009).
3. S. Jayabal and U. Natarajan, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **54**, 639 (2011).
4. J. W. Kim and D. K. Lee, *The Korea Society for Composite Materials*, **20**, 13 (2007).
5. J. H. Kim, I. Y. Yang, and J. K. Sim, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, **12**, 43 (2003).
6. R. P. Kambour, *Polym. Eng. Sci.*, **8**, 281 (1968).
7. M. L. Williams, *Intl. J. Fracture Mech.*, **1**, 292 (1965).
8. T. K. Wei, *J. Appl. Polym. Sci.*, **10**, 1647 (1966).
9. K. W. Nam, S. J. Kim, and B. H. An, *Korean Society of Ocean Engineers*, **10**, 51 (1996).
10. H. I. Lee and J. S. Lee, *Polymer Science and Technology*, **4**, 423 (1993).
11. T. L. Anderson, *Fracture Mechanics-Second Edition-Fundamentals and Applications*, CRC Press, Boca Raton, 1995.
12. O. S. Lee, J. W. Han, S. W. Hwang, and M. S. Han, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, **19**, 1630 (1995).
13. James M. Gere, *Mechanics of Materials*, Thomson, Seoul, 2004.
14. D. N. Lee, *Mechanical Metallurgy*, Munundang, Seoul, 1994.
15. X. F. Yao, H. Y. Yeh, and W. Xu, *Int. J. Solids Struct.*, **43**, 1189 (2006).