2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

단독 및 혼합이온주입에 의한 PET 막의 표면경도, 광투과도 및 전기전도도 변화

(Comparison of Single and Mixed Ion Implantation Effects on the Changes of the Surface Hardness, Light Transmittance, and Electrical Conductivity of Polymeric Materials)

박재원, 이재형, 이재상, 길재근, 최병호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

한준희
한국 표준과학 연구원
대전광역시 유성구 도룡동 1번지

요 약

투명한 폴리에틸렌 테레프탈레이트(Polyethylene terephtalate: PET) 막에 100 keV 이하의 에너지 범위에서 질소, 헬륨, 탄소이온들을 단독으로 또는 혼합하여 주입한 후 Nano-indentation 방법을 사용하여 표면의 경도를 측정한 결과, 질소이온을 단독으로 이온주입 하였을 경우보다 질소+헬륨 또는 질소+탄소 등 혼합이온을 주입하였을 경우 경도는 더욱 향상되었고 특히 C 및 N를 주입하였을 경우 약 3배 이상 경도가 향상되었으며 본래의 PET에 비해 10배 이상 표면경도가 상승되었다. 경도의 향상과 함께 표면의 전기 전도도도 향상하였는데 이온 에너지가 클수록 또 이온량이 많을수록 상관관계는 컸으며, 비교적 저에너지인 50 keV 에서는 상관관계가 발견되지 않았다. 광투과도는 550 nm(가시광선 영역) 이상의 파장에서 85% 이상, 300nm 이하(자외선 영역)의 파장에서는 95% 이상의 빛을 차단하여 투명성 유지와 동시에 자외선 차단 효과가 있었다.

Abstract

Single or mixed ions of N, He, C were implanted onto the transparent PET(Polyethylen Terephtalate) with the ion energies of less than 100 keV and the surface hardness, light transmittance and electrical conductivity were examined. As measured with nanoindentation, mixed ion implantations such as N^++He^+ or N^+ + C^+ exhibited more increase in the surface hardness than the single ion implantation.

Especially, implantation of C+N ions increased the surface hardness by about three times as compared to the implantation of N ion alone, which means more than 10 times increase than the untreated PET. Surface electrical conductivity was increased along with the hardness increase. The conductivity increase was more proportional to the hardness when used the higher ion energy and ion dose, while it did not show any relationship at as low as 50 keV of ion energy. The light at the 550 nm wavelength(visual range) transmitted more than 85%, which is close to that of as-received PET, and at the wavelength below 300 nm(UV range) the rays were absorbed more than 95% as traveling through the sheet. implying that there are processing parameters which the ion implanted PET maintains the transparency and absorbs the UV rays.

1. 서론

저 밀도, 전기절연성, 내 화학 반응 성, 성형가공이 용이한 점등으로 고 분자재료는 산업적으로 높은 수요가 있으나, 연해서 쉽게 표면이 긁히는 단점은 그 적용을 제한하는 주요 원인으로 작용한다. 또한 전자제품의 포장이나 이송시 대부분의 고분자재는 전기적으로 절연성이어서 정전기 발생이 용이 제품 불량의 원인이 되므로 표면에 전기전도성을 띠게 하는것도 최근 산업적수요가 크다. 따라서 고분자재 원래의 성질은 그대로 유지한 채 표면의 특성 즉 내마모성 향상 또는 전기 전도도 증가를 이룰 수 있으면 산업적 적용 잠재력은 매우 높다. 일반적으로 어떤 종류의 이온도 고분자 막에 주입하면 표면 경도가 증가하며 주입되는 이온의 에너지가 높을수록, 이온의 주입 량이 많을수록 이에 비례하여 향상된다 [1-4]. 이온빔을 이용하여 고 분자재료의 표면 경도 향상, 표면 전도도 향상 [5,6], 채색, 광 투과도 조절 [3] 등은 부분적으로 많은 연구가 되어왔으나 산업적 적용의 경우가 다양하여 각각의 특성 변화에 대해 더 심도 있는 연구가 요구되며 또한 여러 가지 특성을 동시에 조절할 필요가 있을 때는 이온종류의 선택뿐만 아니라 에너지, 전류밀도 등 이온 주입 공정 변수를 구체적으로 고려한 연구개발이 또 요구된다. 본 연구는 산업적으로 광범위하게 사용되고 있는 PET막 표면의 특성이 여러 가지 이온으로 주입하였을 경우 어떻게 변화하는 지와 이와 동시에 투명성을 유지하면서(가시광선의 투과 도를 약 85%이상 유지) 자외선을 차단할 수 있는 방법이 있는 지에 관해서 연구하였고, 산업적으로 늘리 쓰이는 N 및 C 이온 및 질량이 적어서 같은 에너지에서도 보다 깊이 침투할 수 있는 He이온 등을 사용하여, 단독 또는 두 이온 즉 He + N, N + C 이온들을 여러 가지 에너지와 이온주입 량으로 PET에 주입하였을 때의 표면경도변화 및 기구, 전기 전도도 변화 그리고 광 투과성에 미치는 제반 인자들에 관해 고찰하였다.

2. 실험방법

산업용 투명한 PET (150X150X0.3 mm^2 크기) 막에 N, C 이온 단독 및 He +N, 및 N + C 혼합 이온을 에너지 범위 50 - 100 keV, 이온 dose $1x10^{14}$ - $1x10^{16}/cm^2$ 로 주입하였다. 사용한 이온은 N, He, C 이온들로서 이온원에서 전자빔 조사에 의해 발생한 플라즈마내의 여

러종류의 이온들을 mass analyser를 통과시켜 1 가 이온들만 선택한 후 주입 이온 량은 Faraday cage로 측정하여 결정하였으며, 면적 약 200mm X 200mm로 빔을 scanning 하여 조사하였으며 작업 진공도 약 $2x10^{-6}$ torr에서 이온들을 주입하였다. nano-indentator를 사용 표면에서 깊이 매 4 nm 마다 경도(Gpa)의 깊이 방향 변화를 측정한 후 산업적으로 고분자 재료의 표면경도 측정에 자주 사용되는 연필 긁힘 시험을 하여 측정된 연필경도결과와 비교하였다. 사용한 연필은 B, HB, 1H, 2H, 3H, 4H등으로 ASTM D 3363에 따라 PET막의 표면을 약 720N의 힘을 가하여 긁은 후 육안으로 흠집이 있는 지를 판단하여 연필 경도치를 결정하였다. 각 시험 편에 대해 two point probe 전기전도도측정 및 자외선-가시광선 투과 시험기로 가시광선-자외선 범위 내에서의 광 투과율(흡수율)을 측정하여 경도향상과 전기전도도 그리고 광 투과성과의 상관 관계를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 질소 이온 50 keV에서 90 keV 범위에서 $1x10^{14}$-$1x10^{16}/cm^2$의 이온 량으로 PET에 주입하였을 때 표면경도의 깊이 방향 변화를 nano-indentor로 측정한 결과이다. 경도는 50 keV 와 90 keV의 에너지를 비교할 때 90 keV의 에너지를 사용하였을 때 더 깊은 곳까지 변화하였음을 알 수 있다. 사용한 에너지 범위 내에서의 최고 경도는 약 50 nm 정도의 깊이에서 형성되었다. 경도상승을 최고의 경도 치를 기준으로 비교할 때 50keV, $10^{14}/cm^2$의 이온 주입조건에서는 주입전과 비교하여 거의 변화가 없다가 90 keV, $1x10^{16}/cm^2$의 이온 주입조건에서 약 3 배 가량 더 상승하였다. 그림 1은 이미 알려진 바대로 [1-6] 이온 주입에 의한 표면경도상승은 같은 에너지에서 주입 이온 량에 비례하며 같은 이온 량에는 이온 에너지가 높을수록 비례함을 보여 준다. 이온주입량 $10^{15}/cm^2$에서 50keV에서 90keV로 에너지를 상승 시켰을 때, 최고 경도의 증가는 약 0.5 Gpa에서 0.8 Gpa로 상승된 반면 50 keV의 에너지에서 이온량을 10배가량 증가 시킨 경우 경도는 약 1 Gpa로 상승하였다.

그림 2 및 그림3은 는 N와 He 그리고 N와 C 이온을 50- 90 keV 에너지 범위로 연속으로 주입하였을 때의 표면에서 깊이 방향 경도 변화를 나타낸 것이다. 그림 3은 그림2에서 보이지 못한 결과를 보완하기 위해 실시한 실험 결과이다. He은 N 및 C 보다 질량이 적어 더 깊은 곳에 침투할 수 있다. 그러나 He 이온의 주입은 자체로 PET에 큰 변화를 주어 표면 경도를 상승시킨 다기보다는 다음에 주입된 질소에 의한 더 큰 변화를 위해 분위기 조성용으로 조사한 것이다. 그림 2에서 N 과 C 이온을 각각 70 keV, $5x10^{15}/cm^2$로 주입하였을 경우 최고 경도가 주입전과 비교 약 18 배 가량 더 상승하였다. 그림 3에 보이는 70 keV 질소 이온 단독 주입시 이온량 $1x10^{16}/cm^2$에서 최고경도가 약 3 Gpa 인데 비해 2 Gpa 이상 경도가 더 상승하여 혼랍이온주입이 단독이온 주입보다 경도 향상 효과가 더 큼을 알게 한다. He 이온을 70 keV, $2x10^{15}/cm^2$으로 주입한 후 N 이온을 같은 조건으로 연속하여 주입하였을 경우 질소 이온만을 50 keV, $1x10^{16}/cm^2$로 주입하였을 때와 비슷한 경도 상승을 보인다. He 과 N 이온을 각각 95 keV, $3x10^{15}/cm^2$로 연속하여 주입하였을 경우 주입전 보다 약 10 배 가량의 경도 상승이 있었으며 같은 조건에 이온 량을 각각 $4x10^{15}/cm^2$로 증가하였을 경우(전체 이온 량 $8x10^{15}/cm^2$) 약 15배 가량의 경도 상승이 있다. 그림 2와 3에서 보는 바와 같이 같은 이온량에서 에너지가 높을수록 같은 에너지에서 주입 이온량이 많을수록 경도는 더 상승하며 같은 에너지 및 이온량일 경우 혼합이온일 경우 경도가 더 상승

함을 알 수 있다. 그림 2 에서도 그림 1 과 마찬가지로 95 keV 와 70 keV의 이온 에너지로 주입하였을 경우를 비교하면 최고 경도와 상관없이 경화 깊이가 95 keV 이온을 주입하였을 경우 더 증가한다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 N 이온을 투명한 PET막에 주입하였을 때 자외선-가시광선 영역에서의 빛의 투과도를 측정한 결과이다. 저 이온량($1x10^{15}/cm^2$ 이하)으로 주입하였을 경우 파장 550 nm(가시광선 영역)에서의 광 투과 도는 약 85% 정도로 주입 전에 비해 별 차이가 없으나 이온량이 $1x10^{16}/cm^2$에서 투과율은 크게 저하하여 투명성을 상실하게 된다. 300 nm 이하의 자외선 영역을 관찰하면 흡수율이 가시광선의 경우보다 훨씬 커진다는 것을 알 수 있다. 주입 이온량이 $1x10^{14}/cm^2$ 일 때 90 keV 에너지로 주입하였을 경우 50 keV 에너지에 비해 흡수율은 증가하였으나 $1x10^{15}/cm^2$ 에서는 50 keV 가 90 keV로 주입하였을 때 자외선 흡수율은 더 크게 나타난다. 이는 실험에 사용한 Faraday cage의 이온 flux 측정에 있어서의 불안정한 이유로도 생각할 수 있으나 주입이온의 깊이 차이 때문일 수도 있다. 즉, 90 keV를 사용하였을 때 근접표면에서 단위 부피 당 이온농도는 더 묽어 질 수 있기 때문에 이러한 현상이 날 수 있다. 저 이온 량의 경우 주입 이온에 의한 투과도 변화 뿐 아니라 고분자 재료의 미세 조직의 변화 즉, chain scission 이나 cross linking등이 광 투과도 변화에 기여하는 영향이 상대적으로 더 커질 수 있기 때문에 이러한 반대 현상이 생길 수도 있을 것이다. 그림 4는 사용한 PET 막의 경우 이온 량 $1x10^{15}/cm^2$에서 가시광선의 투과 도는 별 변화가 없으나 자외선 흡수율은 300 nm에서 약 95%이상이 되어 투명한 고분자 재료의 투명성은 그리 변화시키지 않으면서 자외선의 흡수 효과 가 있다는 것을 보여 준다.

표1은 그림 3의 결과를 낸 시험편에 대해 전기저항을 측정한 결과이다. 처리전의 전기저항은 측정한계인 $1x10^{15}\Omega$을 상회하여 완전 부도체 였으나 이온주입 처리후 전기전도도는 상당히 향상되었다. N 과 C 이온을 각각 70 keV, $5x10^{15}/cm^2$로 주입하였을 경우 전기전도도는 가장 좋아 경도의 변화와 전기전도도의 변화는 상관관계있음을 알 수 있다 단 50 keV 이하의 이온에너지에서는 상관관계가 발견되지 않는다. 이의 기구규명에 관해서는 더 많은 연구와 고찰이 필요하다.

표 2는 미소경도변화, 광 투과성, 그리고 연필 경도측정 결과를 상호간에 비교할 수 있게 요약한 것이다. 미소경도의 변화만큼, 연필 경도의 변화가 비례하지 않는 것은 nano-indentation 방법은 극 표면의 경도변화를 나타내나 연필경도는 표면에 민감한 측정방법이 아니기 때문일 것이다. 즉, 각각의 측정 부피가 다르기 때문이며 또한 미소경도 측정은 기저막의 효과가 거의 없는 데 반해 연필 경도 측정은 기저 막의 효과를 동반하기 때문에 측정결과의 불일치가 있다고 볼 수 있다. 초 미소 경도 측정결과 최고 경도가 주입 전에 비해 15배 이상 높은 경우도 연필 경도는 HB에서 4H로 증가하며 4H가 증가 한계로 된 것은 측정부피 및 기저 막의 영향 때문인 걸로 사료된다.

고분자막에 이온을 주입하였을 경우 경도가 상승하는 것은 크게 두 가지의 기구가 고려되어왔다. 금속재료의 경우처럼 제 3 원소의 첨가에 의한 강화 기구와 결합이 단절되면서 새로운 결합이 형성되는 교차 결합 등이 있으나 후자의 경우가 유력한 것으로 밝혀져 오고 있다. 즉, 결합이 단절된 상태의 고분자재료는 그 전보다 훨씬 약화되나 이어 교차결합이 발생하면 상당한 범위까지 결합의 연속성이 없어져 하나의 거대 분자로 형성되어 외력에 대한 저항성이 증가한다는 것이 주된 기구로 인정되고 있다. 그러나 제 3 원소의 첨가로 일어나는 재료 내부의 변화도 전혀 무시할 수 는 없다. 즉 질소 이온을 주입하였을 경우 질소는 고분자를 형성하는 가장 주된 원소인 탄소와 결합하면 자체로 경도가 매우 높은 C-N 화합

물을 형성한다. 이것이 증가하게 되면 경도 분율은 상승하게 되고 결국 표면이 경하게 되는 원인으로 작용할 수 있게 된다. 그림 2에서 질소와 탄소를 연속으로 PET에 주입하였을 경우 경도의 상승이 최대치를 보인 것은 바로 이 교차결합이외에도 주입원소들끼리 그리고 주입 원소와 matrix 원소간의 반응으로 매우 경한 게재물이 형성되었다고도 고찰할 수 있다. 특히 C-N 화합물 중 화학양론 비 적인 C_3N_4를 형성하게 되면 다이아몬드와 비슷한 경도 약 8000 Hv를 지니게 된다. 따라서 고분자재료의 원래의 경도와 비교도 않 되게 높은 이 화합물의 형성이 증가하게 되면 그 만큼 표면의 경도는 증가하게 될 것이다.

Liu 와 Cohen [7] 은 beta-Si_3N_4(ionic bonding) 에 Si 대신 C을 대체하여 격자상수, 체적탄성계수(B), 그리고 전자구조를 고려하여 pseudopotential total energy approach 방식으로 계산한 결과 다이아몬드와 비슷한 ~ 8000Hv 정도 (B: beta-C_3N_4=4.27, diamond=4.43)의 경도를 지닌 C_3N_4를 발표 한 후 C_3N_4의 박막을 제조하기 위해 지금까지 많은 시도가 있어 왔으나 지금까지 박막 증착에는 큰 성과는 없었다 [8-12]. C_3N_4를 얻기 위한 일반적인 요구조건은 세 가지 즉, C는 sp3, N은 sp2 상태여야 하고, 탄소가 분자나 덩어리가 아닌 원자상태로 질소원자와 만나야 하고, 그리고 확학양론 비 적인 C_3N_4를 형성하기 위한 적당한 압축 응력 등이다. C와 N이온을 연속하여 주입하는 기술은 고 에너지 이온은 sp3 C 또는 sp2 N를 형성하기 용이하게 하며, 탄소나 질소의 미세 덩어리를 만들지 않고, 그리고 이온주입에 의해 모재 표면의 부피증가로 형성되는 압축잔류응력은 충분한 수의 sp2 N 및 sp3 C 원자들이 만났을 때 C_3N_4 형성을 용이하게 한다. 이에 대한 효과는 금속재료에 주입하였을 경우 보다 더 명확하게 알 수 있다 [13, 14]. 일반적으로 가공경화가 잘 되지 않는 pure copper에 이와 유사한 실험을 한 결과 N 및 C 이온을 단독으로 주입하였을 경우는 경도 변화가 거의 없은 반면 C 및 N 이온을 혼합하여 주입하였을 때 표면경도는 약 2 배 가량 증가 하였음이 밝혀졌다 [14]. XPS 분석 결과 C 및 N 의 화학 결합 상태가 단독으로 주입하였을 때와 혼합으로 주입하였을 때 차이를 보였고 혼합이온 주입의 경우 C 및 N 은 C_3N_4의 화학결합 구조를 보였음이 밝혀졌다 [14].

투명한 고분자 막에 이온을 주입하였을 경우 색깔이 변화하게 되는 PET의 경우 질소를 주입하였을 때 갈색으로 변하였으며, Xe 이온을 주입하였을 때는 은회색으로 변하였다. 이 결과는 이온종류에 따라 채색 조절이 가능하다는 것을 나타낸다. 이러한 육안적 색깔의 변화는 곧 바로 광투과성과 연계될 수 있으므로 이온의 종류에 따른 고분자 재료의 광투과성 변화에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

투명한 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 막에 100 keV 이하의 에너지 범위에서 질소 이온 단독, 및 혼합이온(He + N, 및 N + C)을 에너지 범위 50 - 100keV, 이온 dose 1x14 - 1x16/cm^2 로 주입한 후 nano-indentation 방법을 사용하여 표면의 경도를 측정한 결과, 모든 주입 조건에서 표면경도는 증가하였고, 최고경도는 표면에서 약 50-100 nm 깊이에서 형성되었다. 최고 경도를 기준으로 비교할 때, 혼합이온을 사용하였을 때 질소이온 단독주입보다 표면의 경도는 수배 이상 더 상승하였으며 특히 N+C 혼합이온을 사용하였을 경우 경도가 가장 높았다. N + C 혼합이온을 사용하였을 경우의 경도 상승은 다른 이온과는 달리 교차결합 뿐만 아니라 경도가 대단히 높은 C-N화합물의 형성으로 사료된다. 각기 다른 경도를 가진 연필로 긁힘 경도를 측정한 결과 nano-indentation방법과는 다른 경도변

화 경향을 보였는데, 이는 nano-indentation 방법은 극 표면의 경도변화를 측정하나 연필경도는 표면에 민감한 측정 방법이 아니기 때문에 두 방법간의 측정부피가 다른 이유 때문으로 고려된다. 경도의 향상과 전기전도도의 향상은 상관관계를 나타내었으나 50keV 이하의 저 에너지에서는 상관관계를 보이지 않았다.

질소이온을 여러 가지 주입조건으로 주입한 후 광 투과 도를 측정한 결과 550 nm 이상(가시광선 영역)의 파장에서 85% 이상, 300 nm 이하(자외선 영역)의 파장에서는 95% 이상의 빛을 차단하여 투명성 유지와 동시에 자외선차단 효과가 있었다. 광 투과성 변화는 주입 에너지보다는 이온 량에 의해 주로 영향을 받았으며 채색의 효과를 보였고, 채색경향은 이온 종류 및 주입 량에 따라 달랐다.

Acknowledgments

본 연구는 과학기술부 (과제번호 54520-99)에 의해 지원되었음.

참고문헌

1) G. R. Rao, E. H. Lee, R. Bhattacharya, and A. W. McCormick, J. Mater. Res., Vol. **10**, No. **1**, 190 (Jan 1995)
2) E. H. Lee, M. B. Lewis, P. J. Blau, and L. K. Mansur, J. Mater. Res. **6**, 610 (1991)
3) W. Zhou, D. K. Sood, X. Yao, I. G. Brown, Proceedings of the 8. Australian conference on nulcear technique of analysis, 146 (Nov 1993)
4) K. Sakamoto, IONICS(Japan), Vol. **20:3,** 19(1994)
5) V. Svorcik, R. Endrst, V. Rybca, V. Hnatowicz, and F. Cerny, J. Elecrtochemical Society, Vol. **141:2**, 582 (1994)
6) V. Svorcik, V. Rybca, and V. Hnatowicz, Materials Letters, Vol. **19:5-6**, 329 (1994)
7) A. Y. Liu and M. L. Cohen, Science 245, 841 (1989)
8) C. Niu, Y. Z. Lu and C. M. Lieber, Science 261, 334 (1993)
9) T. Hughbanks and Y. Tian, Solid State Com. 96(5) (1995)
10) A. Hofman, H. Geller, I. Gouzman, C. cyterman, R. Brener, and M. Kenny, Surface Coatings Technol. **68/69**, 616 (1994)
11) S. Veprek, J. Weidmann, and F. Glatz, J. Vac. Sci. Technol. A 13(6). 2914 (1995)
12) M. Okoshi, H. Kumagai, and K. Toyoda, J. mater. Res., Vol. 12, No. 12, 3376 (1997)
13) J. Jagielski, N. Moncoffre, P. Delichere, and G. Marest, Journal of Materials Science,34, 2949 (1999)
14) J. W. Park, J. H. Lee, J. S. Lee, B. H. Choi, in preparation

표1 이온주입된 PET의 전기전도도 변화 (5회 측정 후 평균)

이온에너지(keV)	이온 및 이온량(ions/cm^2)	전기저항(Ω)
70	N, $2x10^{15}$ + C, $2x10^{15}$	$1.1X10^{10}$
50	N, $2x10^{15}$ + C, $2x10^{15}$	$6.6X10^{11}$
70	N, $1x10^{16}$	$1.0X10^{11}$
50	N, $1x10^{16}$	$1.9X10^{11}$

표 2. 이온 주입된 PET의 미소경도, 광 투과성 및 연필경도의 측정결과 요약

주입조건			연필경도	초미소경도측정결과 Peak Hardness (Gpa at 30-50 nm)
이온종류	에너지 (keV)	이온량 (이온수/cm^2)		
질소	50	1×10^{14}	2H	0.3
질소	50	1×10^{15}	3H	0.6
질소	50	1×10^{16}	3H	1.0
질소	90	1×10^{14}	2H	0.4
질소	90	1×10^{15}	2H	0.8
헬륨 + 질소	70	1×10^{15}	3H-4H	1.2
헬륨 + 질소	90	$6x10^{15}$	3H-4H	3.4
헬륨 + 질소	90	$8x10^{15}$	4H	4.5
질소 + 탄소	70	4×10^{15}	4H	5.2
주입전			B-HB	0.3

그림1

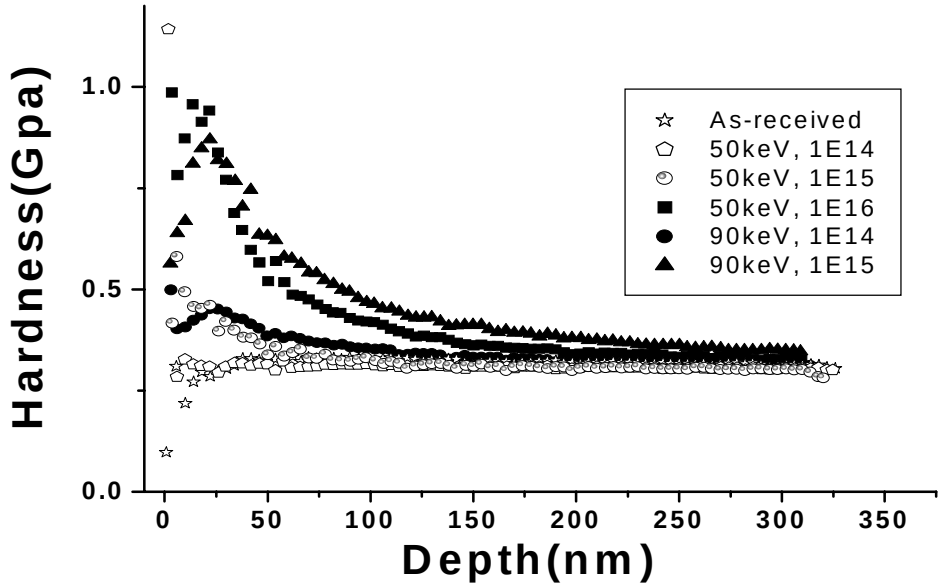
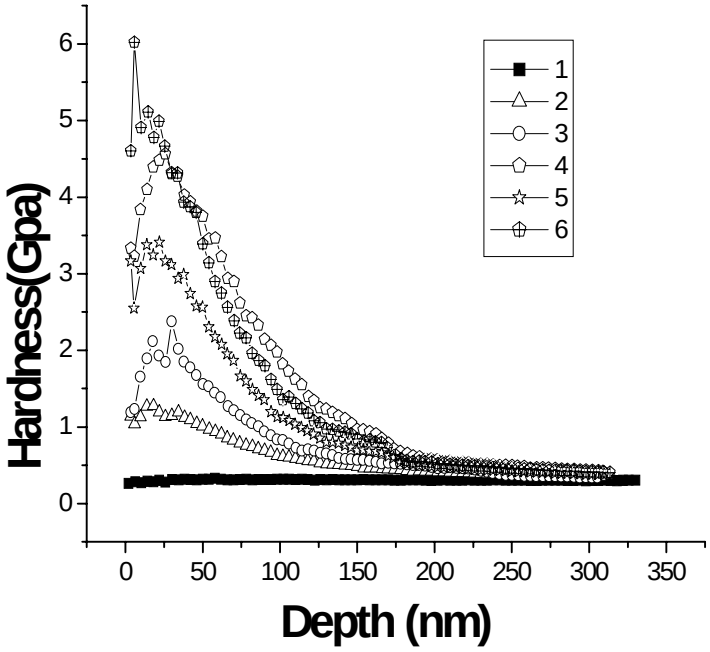

Hardness(Gpa)
1.0
0.5
0.0
0
50
100
150
200
250
300
350
Depth(nm)
As-received
50keV, 1E14
50keV, 1E15
50keV, 1E16
90keV, 1E14
90keV, 1E15

그림2



시편 번호	이온주입조건
1	As-received
2	He,70keV,2E15 + N, 70keV, 2E15
3	He,100 keV, 2E15 + N, 95 keV, 4E15
4	He, 95 keV, 4E15 + N, 95 keV, 4E15
5	He, 90 keV, 3E15 + N, 90keV, 3E15
6	N, 70 keV, 5E15 + C, 70keV, 5E15

그림3

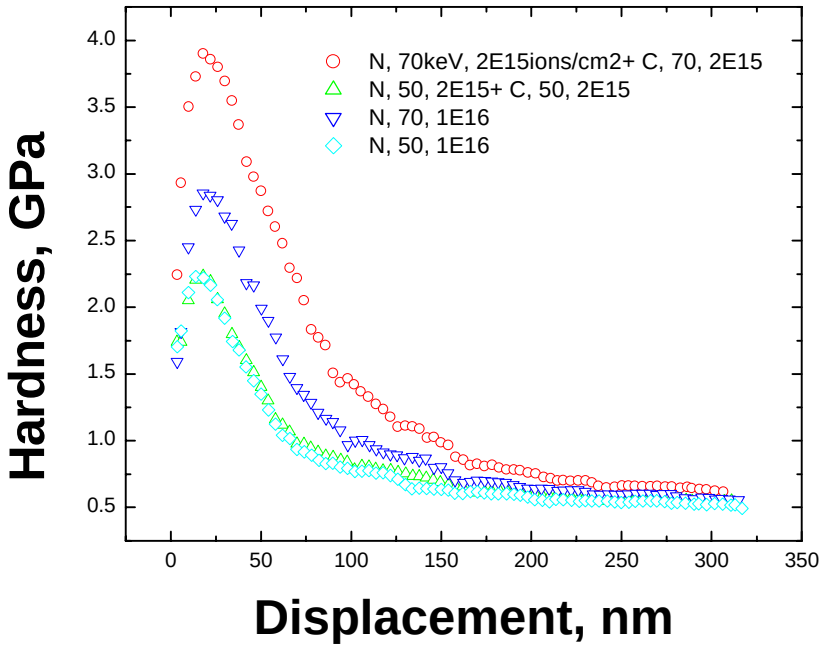
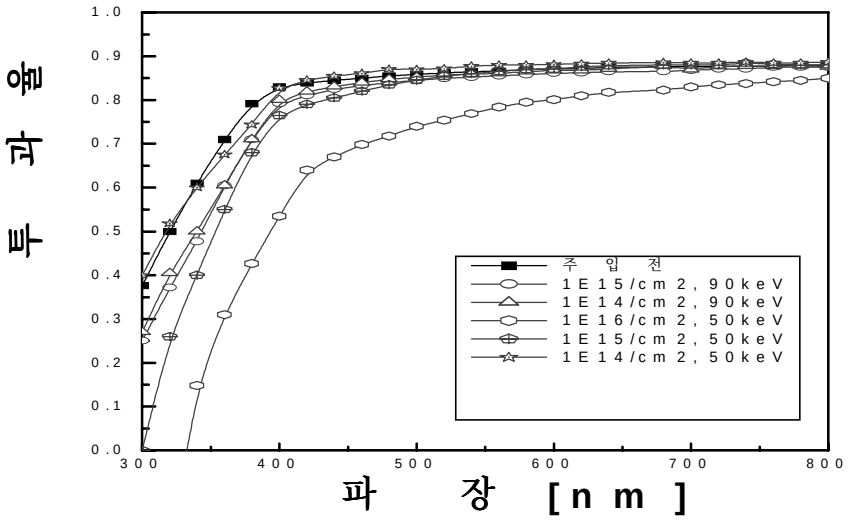

Hardness, GPa
Displacement, nm
N, 70keV, 2E15ions/cm2+ C, 70, 2E15
N, 50, 2E15+ C, 50, 2E15
N, 70, 1E16
N, 50, 1E16
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0
50
100
150
200
250
300
350

그림 4


투과율
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
300
400
500
600
700
800
파 장 [nm]
주 입 전
1E15/cm2, 90keV
1E14/cm2, 90keV
1E16/cm2, 50keV
1E15/cm2, 50keV
1E14/cm2, 50keV

그림설명

그림 1. PET 막에 질소이온을 에너지 50 - 90 keV, 이온 량 $1x10^{14}$ - $1x10^{15}/cm^2$ 범위에서 주입하였을 경우의 nano-indenter로 측정한 표면에서부터의 경도 변화. 에너지가 높을수록, 이온량이 많을수록 경도는 더 상승함을 보여준다.

그림 2. 두 이온을 연속으로 주입하였을 때 단독으로 주입한 경우 보다 경도가 더 상승하며, N + C 이온들을 PET에 주입하였을 때 가장 경도 향상이 크다.

그림 3. 질소 단독으로 주입하였을 경우에 비해 질소와 탄소 이온을 혼합하여 주입하였을 경우 같은 이온주입조건에서 경도 향상은 더 큼을 알 수 있다..

그림 4. 50 keV의 질소 이온 $1E15/cm^2$ 으로 주입했을 때 파장 300 nm의 자외선 영역에서 95% 이상의 차단효과와 600nm의 가시광선영역에서 약 85% 이상의 투과도를 보임. 또한 주입 조건에 따라 색채의 변화도 수반되며 채색은 이온 종류에 따라 다르게 나타났다. (다른 예, Xe 이온 주입시 은회색으로 채색되었음)