

감마선 조사 방법에 따른 정형외과용 초고분자량 폴리에틸렌의 미세구조 변화

이권용[†]

세종대학교 공과대학 기계공학과

(2010년 5월 3일 접수, 2010년 5월 20일 수정, 2010년 5월 20일 채택)

Microstructural Changes in Orthopaedic-Grade Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) according to Gamma-Irradiation Method

Kwon-Yong Lee[†]

Department of Mechanical Engineering, Sejong University,

Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

(Received May 3, 2010; Revised May 20, 2010; Accepted May 20, 2010)

초록: 본 연구에서는 인공관절 베어링 부품으로 가장 널리 사용되는 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE)을 대상으로 6가지 감마선 조사 방법에 따른 UHMWPE의 미세구조 변화를 비교 분석하였다. 감마선을 조사하지 않은 폴리에틸렌(UGI)과 비교하여, 기존의 멸균처리에 해당하는 공기 중 상온에서 감마선 조사한 폴리에틸렌(AR)의 결정화도와 가교 정도는 유의한 차이를 보이며 증가하였다. 감마선 조사 환경 중, 상온에서의 산소(AR)와 진공상태(VR) 영향을 비교하면, AR과 VR의 결정화도는 유의한 차이가 없었으며, VR의 가교 정도는 유의한 차이를 보이며 증가하였다. 감마선 조사 환경 중, 진공상태에서의 상온(VR)과 극저온(V77) 영향을 비교하면, 결정화도와 가교 정도 모두 유의한 차이가 없었다. 그러나, VR과 V77에서의 가교 정도는 AR에서의 가교 정도보다 유의한 차이를 보이며 증가하였다. 3가지 감마선 조사 환경에 대하여 감마선 조사 이후 열처리(S) 영향을 비교하면, 결정화도는 AR/S와 VR/S에서 유의한 차이가 없었으나, V77/S에서는 유의한 차이를 보이며 감소하였다. 또한, 가교 정도는 AR/S와 V77/S에서 유의한 차이를 보이며 증가하였으며, VR/S에서는 유의한 차이가 없었다.

Abstract: In this study, the microstructural changes in orthopaedic-grade ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) were comparatively investigated for six different gamma-irradiation methods. Compared with un-irradiation (UGI), conventional gamma-irradiation in air room temperature (AR) induced statistically significant increases of relative crystallinity and percent crosslinking in UHMWPE. Vacuum environment (VR) during gamma-irradiation significantly increased the percent crosslinking in UHMWPE. Vacuum extreme low temperature (V77) during gamma-irradiation induced no significant changes in both relative crystallinity and percent crosslinking of UHMWPE but the percent crosslinking of UHMWPE in VR and V77 was significantly larger than that in AR. Post-irradiation stabilization process significantly increased the relative crystallinity of UHMWPE in V77, and it also significantly increased the percent crosslinking of UHMWPE in AR and V77.

Keywords: ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE), gamma-irradiation, crystallinity, crosslinking, extreme low temperature(77 °K).

서론

초고분자량 폴리에틸렌(Ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)은 엉덩이, 무릎, 발목, 어깨, 허리, 등에 시술되는 인공관절 및 인공디스크의 베어링 역할을 하는 부품(liner 혹은 inlay component)의 재료로 과거 30~40년간 가장 널리 사용되고 있는 고분자 생체재료이다. UHMWPE이 임상에서 오래도록 활용된

이유는 우수한 생체적합성 뿐만 아니라 현존하는 고분자 재료 중에서 우수한 기계적 물성과 가장 우수한 마모저항성을 지녔기 때문이다. 그러나, 초기에는 인공고관절 및 인공슬관절의 UHMWPE 베어링 부품에서 발생하는 submicron~micron 크기의 마모입자에 대한 주위 골조직 세포의 면역반응에 의하여 무균성 골용해(osteolysis)가 발생하여 인공관절 부품에 무균성 해리(aseptic loosening)가 발생하고 재수술을 시행해야 하는 문제점이 발생하였다.¹⁻³

따라서, UHMWPE의 마모를 최소화하기 위한 많은 연구가 진행되어서 형상과 고정 방법, 기구학적 운동 특성, 접촉하는 재료의 종류 및

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kwonlee@sejong.ac.kr

표면 상태, 제조 공정 변수, 멸균처리 방법 등이 UHMWPE의 마모에 영향을 주는 요인들로 확인되었다. 이를 바탕으로 재료적 관점에서는 두 가지 개선 방향으로 많은 노력이 진행되고 있다. 그 중의 하나는 근본적인 재료의 마모문제를 해결하기 위하여 고분자인 UHMWPE 재료를 대체하는 금속 및 세라믹 생체재료가 베어링 부품으로 개발되어 임상에 활용되는 사례가 점차 늘어나고 있는 추세이다. 다른 하나는 기존의 UHMWPE 마모 저항성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다.

모든 의료기기는 시술에 앞서 체내에 삽입되기 전에 멸균처리 과정을 거치게 된다. 생산과정에서 가장 보편적으로 활용되는 멸균방법은 손쉽게 대량으로 멸균할 수 있는 감마선 조사 방법이다. 완제품을 포장한 후, 감마선을 2.5~4.0 Mrad로 조사하는 과정에서 높은 에너지의 광자(photon)가 투과되면서 UHMWPE의 긴사슬(C-C band) 및 짧은 사슬(C-H band)을 끊고 자유기(free radical)들을 발생시킨다. 이들 자유기들이 주위의 산소 원소들과 반응하여 여러 기(C-H-O, C-O-O-H, C=O)들을 형성하면서 산화작용이 발생한다. 특히, UHMWPE의 제조공정에서 유동을 좋게 하기 위하여 첨가한 칼슘 스테아린산염(calcium stearate)이 몰려있는 표면으로부터 수 micron 내에 존재하는 하얀 띠(white band)들은 이 산화작용이 매우 심하게 발생된 영역으로 보고되고 있다.⁴⁻⁶ 이러한 산화정도는 시간이 지남에 따라 더 심해진다. 감마선 조사 이후 장기간 6~10년 경과된 UHMWPE 베어링 부품의 산화정도 분석에 의하면 초기 1~4년 경과된 경우보다 훨씬 산화정도가 심한 것으로 관찰되었으며, 산화가 심할수록 마모 저항성도 떨어지는 것으로 보고되었다.⁷⁻¹⁰

한편, 감마선 조사가 UHMWPE의 산화를 일으키지만 동시에 가교정도(relative crosslinking)를 증가시킨다. 감마선에 의해서 끊어진 사슬들은 이동성이 높아지고 짧은 사슬들끼리 재결합되는 과정에서 화학적 가교정도가 높아지고 비결정질과 결정질이 약 50% 정도 되던 UHMWPE의 결정화도(crystallinity)가 증가하게 된다. 이렇게 증가한 가교정도는 모든 고분자 재료에서와 마찬가지로 마모 저항성을 향상시킨다. 그러나 문제는 감마선 조사로 증가한 가교정도가 장시간(약 5년 이상) 경과함에 따라서 산화정도가 심해지면서 초기 가교정도를 유지하지 못하고 급격하게 감소하며, 이와 동시에 마모 저항성이 현격하게 감소한다는 것이다.¹¹⁻¹³

기존(conventional) UHMWPE의 산화를 억제하고 가교정도를 높이기 위한 방법으로 15여년 전에 개발된 제1세대 고가교(highly crosslinked) UHMWPE는 전자 빔 조사를 통하여 긴사슬을 짧은 사슬로 끊고 재용융(remelting) 상태에서 가교정도를 향상시킨 것으로 이미 8~9년 전에 상용화되었다. 그러나 기존의 UHMWPE에 비하여 기계적 물성과 특히, 피로(fatigue) 저항성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 이외에도 감마선 조사를 한 후, 후처리로 다시 열처리공정(stabilization process)을 거쳐 자유기들을 제거하여 산화를 억제하고 가교정도를 유지시키는 방법도 개발되었다.¹⁴⁻¹⁶ 최근에는 2세대 고가교 UHMWPE으로 비타민 E(vitamin E 또는 alpha-tocopherol)를 포함한 고가교 UHMWPE가 연구되고 있다. 이는 vitamin E와 tocopherol이 항산화제로 작용하여 산화를 억제하는 것으로 알려졌으며 마모 저항성이 향상된 것으로 보고되고 있다.¹⁷⁻¹⁹ 이러한 고가교 UHMWPE는 제품 생산 후 멸균처리로 다시 감마선 조사하면 다시 자유기들이 생성되고 이로 인한 산화가 발생하게 되므로 주로 ethylene oxide(EO) gas를 이용한 멸균처리를 하고 있

다. 그러나 잔류 EO gas의 독성이 문제가 될 수 있다.

이외에도 감마선 조사 방법을 활용한 흥미있는 연구결과가 있다. 감마선 조사 시의 환경을 진공으로 하고 생성된 자유기의 활동을 억제하는 극저온(77 °K) 환경에서 UHMWPE의 산화를 최소화할 수 있는 보고가 있다.^{20,21} 그러나 이들 환경에서 감마선 조사에 따른 UHMWPE의 미세구조(결정화도 및 가교정도) 변화에 대한 결과가 보고되지 않았다.

본 연구에서는 감마선 조사 환경으로 공기와 진공 상태, 상온과 극저온, 감마선 조사 이후 열처리 유무에 따른 결정화도 및 가교정도 변화를 정량적으로 비교 분석하여 산화를 최소화하고 가교정도를 증가시키는 최적의 감마선 멸균 방법을 제시하고자 한다.

실 험

시편. UHMWPE 시편은 GUR 4150HP 입자로 압출성형된 정형외과용 UHMWPE 봉재(Orthopaedic-grade Ram-extruded rod)로부터 실린더 형상의 핀(지름 10 mm, 길이 10 mm pin)을 제작하여 사용하였다. UHMWPE 핀 시편을 유리 대롱에 넣고 온도 조절을 위한 유리 chamber에 넣어 감마선을 조사하였다. 조사량은 시간당 26 KGy/hr로 총 2.5 Mrad가 되도록 조사하였다.

감마선 조사 환경. 감마선 조사 환경은 유리 대롱 내부를 공기와 진공(10^{-6} torr)으로 조성하고, 온도는 25 °C 상온과 액체질소 내에서의 극저온 77 °K로 설정하였다. 공기 중 25 °C의 환경은 기존의 감마선 멸균처리에 해당하며, 진공 중 25 °C의 환경은 감마선 조사 과정의 산화를 방지하기 위한 설정이며, 진공 중 77 °K의 환경은 감마선 조사로 생성된 자유기의 활동을 억제하기 위한 조건에^{20,21} 해당한다.

감마선 조사 후 열처리. 감마선 조사 후 자유기들을 제거시키기 위하여 유리 대롱을 oil bath에 넣고 1 °C/min으로 120 °C까지 가열한 후 냉각시켜서 열처리를 실시하였다. 3가지 감마선 조사 환경에서 얻은 시편과 이들을 열처리한 시편과 대조군(control)으로 감마선 조사하지 않은 시편 등 7가지 종류의 실험 대상 시편들은 다음과 같다.

- (1) 공기 중 상온에서 조사(AR)
- (2) 진공 중 상온에서 조사(VR)

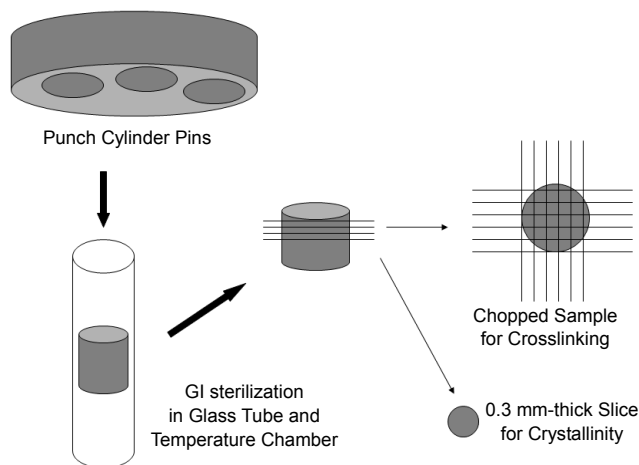


Figure 1. Diagram showing sample preparations for irradiation, crystallinity, and crosslinking analyses.

- (3) 진공 중 극저온에서 조사(V77)
- (4) 공기 중 상온에서 조사 후 열처리(AR/S)
- (5) 진공 중 상온에서 조사 후 열처리(VR/S)
- (6) 진공 중 극저온에서 조사 후 열처리(V77/S)
- (7) 조사하지 않음(UGI)

결정화도. UHMWPE 핀 시편을 실린더 길이방향으로 300 μm 두께로 5개의 얇은 조각을 만들고 각각의 조각을 약 10 mg 정도의 원형 시료로 만들어 열량분석기(differential scanning calorimeter, DSC, Perkin-Elmer 7 Series Thermal Analysis System) 챔버에 넣었다. 이 UHMWPE 시료를 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 30~180 $^{\circ}\text{C}$ 영역에서 가열하고 10분간 유지시킨 후 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 30 $^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각시켜 heat of fusion 결과를 얻었다. 측정된 결과를 완전한 결정성 폴리에틸렌(crystallized polyethylene)의 heat of fusion 값인 289.74 J/g으로 나누어 UHMWPE 시료의 결정화도(relative crystallinity)를 얻었다. DSC 측정으로부터 부가적으로 용점(melting temperature, T_m) 결과를 얻었다. 결정화도 측정 실험은 5회 반복하였다($n=5$).

가교정도. UHMWPE 시편을 실린더 길이방향으로 100 μm 두께로 10개의 얇은 조각을 만들고 각각의 조각을 0.8 mm의 사각형상으로 작고 균일하게 자른(chopped) 시료들을 만들었다. 이들 UHMWPE 시료의 0.1 g을 2겹의 유리 섬유 스펀지(glass wool sponge) 사이에 넣고 이 유리 섬유 스펀지를 유리 골무통(glass thimble)에 넣었다. UHMWPE 시료를 포함한 유리 골무통의 초기 무게를 전자저울로 측정한 후, 이를 속슬렛 분리기(soxhlet extractor)에 넣은 후 140 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정된 자일렌(reagent-grade xylene)을 사용하여 약 15분의 환류 시간(reflux time)으로 6시간 동안 UHMWPE 시료를 녹여 냈다. 이 후 유리 골무통을 100 $^{\circ}\text{C}$ 진공 오븐(vacuum oven)에 넣고 12시간 이상 건조시킨 후 건조기(desiccator) 내에서 상온으로 냉각시킨 후 전자저울로 무게를 측정하여 남아있는 UHMWPE 시료의 녹지 않은 양을 측정하였다. 이와 같이 hot xylene extraction 과정을 통하여 UHMWPE 시료 내의 녹지 않은 젤 성분(insoluble gel content)을 무게 변화로 측정하여 가교정도(percent crosslinking)를 결정하였다. 이 방법은 ASTM D2765-90과 유사한 방법으로 타 연구에도 활용되었다.⁸ 가교정도 측정 실험은 4회 반복하였다($n=4$).

비교 분석. 3가지 환경에서 감마선 조사된 시편들과 이들을 열처리한 시편들과 감마선 조사하지 않은 시편들을 대상으로 결정화도, 가교정도를 측정하여 감마선 조사 방법에 따른 UHMWPE 미세구조의 변화를 비교 분석하였다. 통계분석은 t -검정(student t -test)을 이용하여 실시하였으며, $p<0.05$ 의 경우 유의한 차이가 있는 것으로 판정하였다.

결과 및 토론

3가지 감마선 조사 환경에서 얻은 시편과 이들을 열처리한 시편과 대조군(control)으로 감마선 조사하지 않은 시편 등 7가지 종류의 실험 대상 시편으로부터 측정된 용점, 결정화도, 가교정도의 결과를 Table 1에 나타내었다.

용점 변화. DSC를 이용한 분석결과, UHMWPE의 용점은 감마선 조사하지 않은 시편에 비하여 6가지 환경에서의 감마선 조사 이

Table 1. Melting Temperature (T_m), Relative Crystallinity (R.C.), and Percent Crosslinking (P.C.) of UHMWPE Gamma-irradiated under 6 Different Environments and Ungamma-irradiated Control

Sample	$T_m(^{\circ}\text{C})$	R.C.(%)	P.C.(%)
AR	138.72 ± 0.63	51.79 ± 1.49	91.62 ± 1.19
VR	137.93 ± 0.27	51.86 ± 1.34	94.18 ± 1.03
V77	137.73 ± 0.27	51.05 ± 0.60	94.72 ± 0.52
AR/S	138.62 ± 0.26	50.95 ± 0.57	93.35 ± 0.68
VR/S	138.99 ± 0.40	52.34 ± 0.40	94.53 ± 1.20
V77/S	137.69 ± 0.16	50.39 ± 0.38	95.25 ± 0.16
UGI	136.01 ± 0.18	47.43 ± 1.11	65.52 ± 5.77

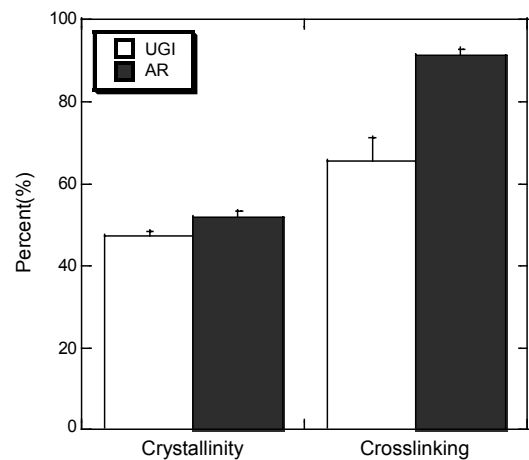


Figure 2. Percent of crystallinity and crosslinking of UHMWPE before and after gamma-irradiation.

후에 약간 증가하였다. 그러나 그 증가 폭은 2~3 $^{\circ}\text{C}$ 이내로 비교적 적은 것으로 관찰되었다.

감마선 조사 영향. 감마선 조사하지 않은 시편(UGI)과 기존의 멸균처리에 해당하는 공기 중 상온에서 감마선 조사한 시편(AR)을 대상으로 감마선 조사가 UHMWPE의 미세구조에 미치는 영향을 Figure 2에 나타내었다. 감마선 조사 후 결정화도는 9.2% 증가하였고($p<0.001$), 가교정도는 39.8% 증가하여($p<0.0001$) 유의한 차이를 보였다. 이러한 증가는 6가지 감마선 조사 환경에 상관없이 동일한 경향으로 발생하였으며, 이는 감마선에 의해서 쪼아진 사슬들이 이동성이 높아지고 짧은 사슬들끼리 재결합되는 과정에서 결정질 영역이 증가하고, 화학적 가교정도가 높아지는 타 연구^{8,11} 결과들과 같은 경향이다.

감마선 조사 환경 영향. 감마선 조사 환경 중, 상온의 산소 유무 영향을 관찰하기 위해서 AR과 VR을 비교하면 결정화도는 유의한 차이가 없었으며 가교정도는 유의한 차이를 보이며 3% 증가($p=0.0087$)하였다(Figure 3). Gsell의 산화 연구 결과에 의하면,²⁰ 진공 상태에서의 UHMWPE 산화정도(oxidation index)는 감마선 조사하지 않은 경우와 동일 수준을 유지하는 반면에, 산소 환경에서는 2~3배의 산화정도가 관찰되었다. 따라서 감마선 조사 시의 진공상태가 산화를 억제함과 동시에 마모 저항성을 향상시키는 가교정도를 높이는 것으로 사료된다. 이는 공기 중에서 감마선 멸균된 UHMWPE의 산화과정을 이해한 이후로, UHMWPE의 산화를 억제하기 위한 첫 번째 노력

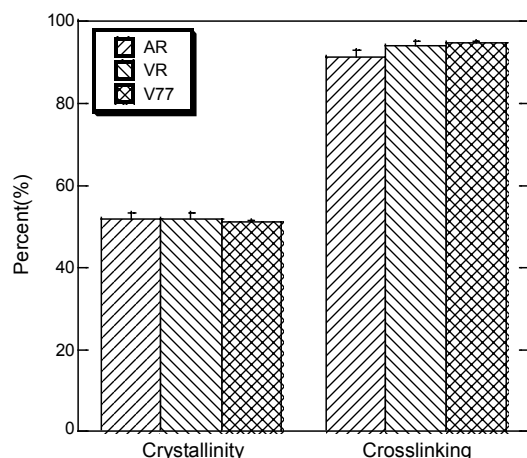


Figure 3. Percent of crystallinity and crosslinking of UHMWPE gamma-irradiated in AR, VR, and V77 environments.

으로 감마선 조사 시 진공 또는 질소나 아르곤 불활성 기체(inert gas)를 사용하거나, 포장 안에 산소 포착제(oxygen scavenger)를 넣고 감마선 멸균을 실시한 초기 제품들의 개발 과정과 맥락을 같이 한다. 이들 제품은 공기 중 감마선 멸균한 UHMWPE 보다 마모 저항성이 향상된 것으로 보고되었다.^{14,15}

감마선 조사 시 온도 영향. 진공상태에서의 감마선 조사 시 온도의 영향을 관찰하기 위해서 VR과 V77을 비교하면, 극저온 77 °K에서 결정화도와 가교정도 모두 유의한 차이가 없었다(Figure 3). 그러나 VR과 V77에서의 가교정도는 AR에서의 가교정도보다 유의한 차이를 보이며 증가하였다($p < 0.01$). Lee의 electron spin resonance (ESR)을 이용한 자유기에 대한 연구 결과에 의하면,²¹ 감마선 조사 시 상온에서 실시한 VR에서는 7개의 뾰족한 스펙트럼(septet spectra)을 가진 아릴기(allyl radicals)가 관찰되었으며, V77에서는 6개의 뾰족한 스펙트럼(sextet spectra)을 가진 알킬기(alkyl radicals)가 관찰되었다. 일반적으로 알킬기는 주변의 산소와 반응하여 과산화기(peroxy radicals)를 형성하며 산화에 영향을 주지만, 진공상태에서 과산화 기를 형성하지 못하고 재결합하는 것으로 보고되었다. 이는 VR과 V77의 산화 정도(oxidation index)가 감마선 조사하지 않은 경우와 동일한 산화정도 수준으로 보고한 Gsell의 산화 연구 결과와²⁰ 연관성이 있다. 이들 결과로부터 감마선 조사 시 진공상태의 환경과 극저온 환경이 UHMWPE의 산화를 억제하면서 짧은 사슬의 재결합을 통한 가교정도를 향상시키는 것으로 볼 수 있다.

감마선 조사 후 열처리 영향. 3가지 감마선 조사 환경에 대하여 감마선 조사 이후 열처리 영향을 비교하면(Figure 4), 결정화도는 AR/S와 VR/S에서 유의한 차이가 없었으나, V77/S에서는 유의한 차이를 보이며 감소하였다($p = 0.037$). 또한, 가교 정도는 AR/S의 경우 유의한 차이를 보이며 증가하였으며($p = 0.026$), VR/S의 경우 유의한 차이가 없었으며, V77/S의 경우는 유의한 차이를 보이며 증가하였다($p = 0.048$).

이러한 감마선 조사 환경에 따른 UHMWPE의 미세구조 변화는 다음과 같이 설명할 수 있다. 감마선 조사에 의해서 UHMWPE의 C-C 결합 및 C-H 결합이 끊어진 후 짧은 사슬의 이동성이 높아지고, 결정질 영역과 비결정질 영역의 경계에서 이들의 재결합 과정에

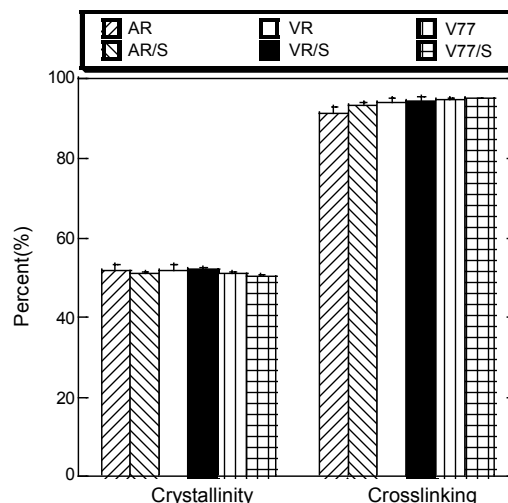


Figure 4. Percent of crystallinity and crosslinking of UHMWPE gamma-irradiated and stabilized in AR/S, VR/S, and V77/S.

서 재결정화(recrystallization)가 일어나면서 결정화도가 높아진 것으로 사료된다. 또한 대부분의 비결정질 영역에서는 화학적 가교가 발생하여 가교정도가 증가한 것이라 사료된다. 반면에 감마선 조사 후 융점보다 조금 낮은 온도에서의 열처리 과정에서는 결정질 영역과 비결정질 영역의 경계에서 짧은 사슬들이 재결합하는 과정에서 재결정화가 일어나지 않고 추가적인 화학적 가교가 발생하여 결정화도는 오히려 약간 감소하고 가교 정도는 더 증가하는 것으로 사료된다.

감마선 조사 시의 진공과 극저온 환경이 사슬 절단으로 생성된 자유기들의 활동을 억제하여 UHMWPE의 산화를 최소화할 수 있다는 결과에도^{20,21} 아직 불확실한 점이 남아 있다. 진공과 극저온 환경이 자유기들의 생성을 막을 수는 없으며, 이들의 활동을 억제한다고 해도 이들을 완전 제거(neutralization)하는 것도 아니기 때문이다. 열처리 과정이 이들을 일부 제거한다고 해도 남아 있는 자유기들이 시간이 경과되어 UHMWPE 내부로 확산되어 들어오는 산소와 반응하여 산화를 일으키게 될 것이다. 이와 관련된 연구결과들도 보고되고 있다.^{22,23}

그러므로, 감마선 조사 시 생성되는 자유기들을 최대한 제거할 수 있는 기술의 개발이 필요하며 이와 같은 노력의 일환으로 진행되고 있는 항산화제로 vitamin E를 활용하는 제2세대 고가교 UHMWPE의 개발과 본 연구 결과의 접목이 필요하다.

본 연구 결과를 종합하면, 산화를 최소화하고 동시에 높은 가교정도를 유도할 수 있는 V77, VR/S, V77/S 환경이 적합한 것으로 판단된다. 이 가운데 현실적인 제품생산 과정을 고려하면 극저온 환경의 적용이 쉽지 않기 때문에, VR/S 환경이 산화를 최소화하면서 가교정도를 높여서 마모 저항성을 높일 수 있는 감마선 조사 환경으로 적합할 것으로 사료된다.

결론

본 연구에서는 인공관절 베어링 부품으로 가장 널리 사용되는 UHMWPE를 대상으로 6가지 감마선 조사 방법에 따른 UHMWPE의 미세구조 변화를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 감마선 조사 시의 환경으로 공기와 진공 상태, 상온과 극저온,

감마선 조사 이후 열처리 유무에 따라서 UHMWPE의 결정화도와 가교정도가 변하는 것이 관찰되었다.

(2) 감마선 조사하지 않은 UGI와 비교하여, 기존의 멸균처리에 해당하는 공기 중 상온에서 감마선 조사한 AR의 결정화도와 가교정도는 유의한 차이를 보이며 증가하였다.

(3) 감마선 조사 환경 중, 상온에서의 산소와 진공상태 영향을 비교하면 AR과 VR의 결정화도는 유의한 차이가 없었으며, VR의 가교정도는 유의한 차이를 보이며 증가하였다.

(4) 감마선 조사 환경 중, 진공상태에서의 온도 영향을 비교하면 결정화도와 가교정도 모두 유의한 차이가 없었다. 그러나 VR과 V77에서의 가교정도는 AR에서의 가교정도보다 유의한 차이를 보이며 증가하였다.

(5) 3가지 감마선 조사 환경에 대하여 감마선 조사 이후 열처리 영향을 비교하면 결정화도는 AR/S와 VR/S에서 유의한 차이가 없었으나, V77/S에서는 유의한 차이를 보이며 감소하였다. 또한 가교정도는 AR/S와 V77/S에서 유의한 차이를 보이며 증가하였으며, VR/S에서는 유의한 차이가 없었다.

(6) 이들 결과로부터 감마선 조사 시 진공상태와 극저온 환경이 UHMWPE의 산화를 억제하면서 짧은 시술의 재결합을 통해 가교정도를 향상시키는 것으로 사료되며, 감마선 조사환경 중에서 V77/S 환경이 가장 높은 가교정도를 나타냈다.

감사의 글: 이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(313-2007-2-D00966)이므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. J. Jasty, W. E. Floyd III, A. L. Schiller, S. R. Goldring, and W. H. Harris, *J. Bone Joint Surg.*, **68A**, 912 (1986).
2. H. C. Amstutz, P. Campbell, N. Kossovsky, and I. C. Clarke, *Clin. Orthop.*, **276**, 7 (1992).
3. W. H. Harris, *Clin. Orthop.*, **311**, 46 (1995).
4. V. Premnath, W. H. Harris, M. Jasty, and E. W. Merrill, *Biomaterials*, **17**, 1741 (1996).
5. L. C. Sutula, J. P. Collier, K. A. Saum, B. H. Currier, J. H. Currier, W. M. Sanford, M. B. Mayor, R. E. Wooding, D. K. Sperling, I. R. William, D. J. Kasprzak, and V. A. Surprenant, *Clin. Orthop.*, **319**, 28 (1995).
6. S. P. James, S. Blazka, E. W. Merrill, M. Jasty, K. R. Lee, C. R. Bragdon, and W. H. Harris, *Biomaterials*, **14**, 643 (1993).
7. C. M. Rimnac, R. W. Klein, F. Betts, and T. M. Wright, *J. Bone Joint Surg.*, **76A**, 1052 (1994).
8. K. Y. Lee and K. H. Lee, *Wear*, **225**, 728 (1999).
9. J. Fisher, K. L. Chan, J. L. Hailey, D. Shaw, and M. Stone, *J. Arthroplasty*, **10**, 689 (1995).
10. A. Weightman, S. A. V. Swanson, G. H. Issac, and B. M. Wroblewski, *J. Bone Joint Surg.*, **73B**, 806 (1991).
11. E. S. Grood, R. Shastri, and C. N. Hopson, *J. Biomed. Mater. Res.*, **16**, 399 (1982).
12. P. Eyerer and Y. C. Ke, *J. Biomed. Mater. Res.*, **18**, 1137 (1984).
13. J. P. Collier, D. K. Sperling, J. H. Currier, L. C. Sutula, K. A. Saum, and M. B. Mayor, *J. Arthroplasty*, **11**, 377 (1996).
14. S. M. Kurtz, O. K. Muratoglu, M. Evans, and A. A. Edidin, *Biomaterials*, **20**, 1659 (1999).
15. H. McKellop, F. Shen, B. Lu, P. Cambell, and R. Salovy, *J. Orthop. Res.*, **17**, 157 (1999).
16. H. Oonishi, Y. Takayama, and E. Tsuji, *Radiat. Phys. Chem.*, **39**, 495 (1992).
17. E. Oral, S. L. Rowell, and O. K. Muratoglu, *Biomaterials*, **32**, 5580 (2006).
18. E. Oral, S. D. Christensen, A. S. Malhi, K. K. Wannomae, and O. K. Muratoglu, *J. Arthroplasty*, **21**, 580 (2006).
19. N. Shibata, S. M. Kurtz, and N. Tomita, *J. Biomed. Sci. Eng.*, **1**, 107 (2006).
20. R. A. Gsell, K. H. Lee, C. Chu, and S. Lin, "Minimizing oxidative degradation on gamma sterilization", *Trans. Fifth World Biomaterials Congress*, 191 (1996).
21. K. H. Lee, C. C. Chu, R. A. Gsell, and S. Lin, "Electron spin resonance study of free radical properties of ultra-high molecular weight polyethylene upon γ -irradiation", *Trans. Fifth World Biomaterials Congress*, 296 (1996).
22. K. K. Wannomae, S. Bhattacharyya, A. Freiberg, D. Estok, W. H. Harris, and O. Muratoglu, *J. Arthroplasty*, **21**, 1005 (2006).
23. B. H. Currier, J. H. Currier, J. P. Collier, M. B. Mayor, and D. W. Van Citters, "In vivo oxidation of highly cross-linked UHMWPE bearings", *Trans. 56th Orthopaedic Research Society*, paper No. 170 (2010).