

γ -선 조사에 의한 LDPE, LLDPE의 가교특성에 관한 연구

김정일 · 박성현* · 강필현 · 노영창†

한국원자력연구소 동위원소 · 방사선 응용연구팀, *그린피아기술주식회사
(2001년 3월 8일 접수)

Study on the Crosslinking Characteristics of LDPE and LLDPE by γ -Ray Irradiation

Jung-il Kim, Sung-Hyun Park*, Phil Hyun Kang, and Young Chang Nho†

Radioisotopes/Radiation Application Team, Korea Atomic Energy Research Institute,

P.O. Box 105, Yuseong, Taejeon 305-600, Korea

*Greenpia Technology Inc., 329 Shinji-Ri, Neungseo-Myun, Yujoo-Kun, Kyungki-Do 409-810, Korea

†e-mail : ycnho@kaeri.re.kr

(Received March 8, 2001)

요약: 본 연구에서는 고분자 수지의 가교율 향상을 위하여 가교제를 첨가한 low density polyethylene (LDPE), linear low density polyethylene (LLDPE) 수지의 가교에 있어서 γ -선 조사의 효과를 조사하였다. LDPE와 LLDPE 시편들은 가교제와 혼합하여 130 °C의 hot-press mold에서 sheet 형태로 준비하였다. γ -선은 질소분위기에서 50부터 150 kGy로 변화시키며 조사하였다. 이렇게 준비된 시편을 이용하여 방사선 조사선량, 가교제의 종류에 따른 가교율의 변화를 조사하였으며 가교에 따른 기계적 특성, 열안정성과 결정화도의 변화도 평가하였다. 그 결과 방사선 조사선량이 크고, 가교제가 첨가되면 가교율은 상승하였다. 그것과 비례하여 물리적 성질과 열적인 성질도 개선되었다. 그리고 방사선 조사에 의해서 순수한 수지의 겔화율이 증가하면 결정화도는 감소하였다.

ABSTRACT: In this study, the effects of γ -irradiation on the crosslinking of low density polyethylene (LDPE) and linear low density polyethylene (LLDPE) containing crosslinking agents were investigated to find the degree of crosslinking in the polymer. The LDPE and LLDPE specimens were prepared by blending crosslinking agents with each polymers, and by hot-press-molding into a sheet at 130 °C. The γ -irradiation was conducted at 50 to 150 kGy in nitrogen. The crosslinking percentage in these specimens was measured in relation to the irradiation dose and the type of crosslinking agents. The mechanical properties, thermal properties and crystallinity of specimens were examined as a function of irradiation dose as well. It was found that the degree of crosslinking of the irradiated specimens was increased with increasing irradiation dose and by the addition of crosslinking agents. The mechanical properties and thermal properties of specimens were improved in proportion to an increase in the degree of crosslinking. The crystallinity of original resin was decreased with increasing crosslinking density.

Keywords: γ -ray irradiation, LDPE, LLDPE, crosslinking agent, gelation.

서 론

방사선은 각종 고분자의 가교에 의한 개질, 도막의 경화, 그래프트 중합에 의한 막의 합성, 목재-플라스틱 복합재료, 식품, 의약품의 살균 등 수많은 분야에 이용되고 있지만, 공업적으로 가장 광범위하게 이용되는 분야는 방사선 조사에 의한 고분자 가교의 분야이다.¹⁻⁵

열가소성 중합체에 탄성기억효과를 부여하는 방법은 폴리에틸렌이나 PVC 등의 열가소성 중합체에 방사선을 조사·가교한 후, 이들 중합체의 결정이 용융하는 온도이상으로 가열하고, 가열된 중합체를 연신하여 실온으로 냉각하는 것이다. 이렇듯 변형된 상태를 유지하게 하는 중합체는 다시 용접이상의 온도로 가열하면 연신전의 원형대로 변형이 회복되는 탄성기억효과를 나타낸다.⁶

탄성기억효과의 특징을 나타내는 열수축 제품은 전선의 터미네이션 및 조인트, 제진화를 위한 절연피복재, 배관 접합부의 부식방지, 식품포장 등에 이용되고 있으며, 최근에는 통신관의 연결조인트 등 두께가 두꺼운 열수축 튜브에 대한 수요가 급증하고 있다. 고분자의 방사선 가교에 이용되는 방사선 중에서 전자선은 조사선량이 크지만 투과력은 낮다. 반면 감마선은 조사선량은 낮지만 투과력이 크기 때문에 두꺼운 제품을 조사하기 적합하지만 산소의 영향으로 고분자의 가교율은 낮게 된다. 이와 같은 조사선량이 낮은 감마선으로 가교하는 경우는 조사시간이 길게 됨으로써 가교과정중 산소의 영향을 많이 받게됨으로 가교율을 높이는 기술이 중요한 문제이다.⁷

방사선 조사에 의한 고분자 가교는 전통적인 화학적 가교반응보다 많은 장점들을 가지고 있다. 우선 개시반응에서 개시제가 필요없으므로 불순물의 존재를 최소화할 수 있고, 거의 온도의 영향을 받지 않으며 국소 가열이나 잘못된 혼합에 의한 국부적인 반응의 가능성이 거의 없다. Sakurada는 화학적 가교와 방사선 가교에서 개시효과를 비교하였는데, 0.1 M 벤조일퍼옥사이드 등과 같은 개시제가 발생시키는 단위시간당 자유라디칼의 수량이 1rad/s의 방사선 조사에 의해서 발생된 수량과 같다고 보고하였다.⁸

Waldron 등과 Handlos는 고분자 재료의 방사선 가교시 가교제나 단량체와 같은 저분자 물질을 혼합

하면 고분자의 가교반응을 활성화시킨다고 보고되었다.^{9,10}

올레핀계 고분자 중에서 폴리에틸렌은 전자선, 감마선이나 다른 높은 에너지의 방사선이 조사되면 가교반응을 일으킨다. 그 외에도 방사선 조사에 의해서 가교 구조를 형성하는 고분자 재료들은 전기, 전자, 자동차 산업 등의 공업제품에 광범위하게 사용되고 있다. 두께가 얇은 코팅 조성물을 경화시키거나 또는 전선, 케이블, 필름 등의 내열성을 향상시키기 위해서는 전자선이 사용되고 있는데, 일반적으로 전선과 케이블의 경우 가교도는 70% 정도이고, 반면에 필름과 얇은 코팅에서는 30% 정도가 보통이다.¹¹⁻¹⁷

전자선에 의한 고분자 재료의 가교기술은 지금까지 많은 연구 결과가 발표되었고, 상업적으로 다양하게 이용되고 있지만, 감마선에 의한 고분자의 가교기술은 발표된 연구 결과가 거의 없다. 감마선은 전자선에 비하여 조사선량율이 낮기 때문에 조사시간이 길고, 조사중에 공기중의 산소 영향으로 가교율이 낮지만, 투과력이 크기 때문에 두꺼운 고분자 제품에 응용할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 조사선량이 전자선에 비하여 낮지만 투과율이 높은 감마선을 이용하여 폴리에틸렌을 가교시킬 때, 가교율을 향상시키기 위한 실험을 수행하였다. 올레핀계 고분자 수지로서 low density polyethylene (LDPE)와 linear low density polyethylene (LLDPE)을 사용하였고, 이것에 각각 가교제를 첨가하여 이들의 첨가 효과를 검토하였다. 방사선 조사선량, 가교제의 종류에 따른 가교율의 영향을 조사하였으며, 가교에 따른 기계적 성질의 변화도 평가하였다. X-선 회절기를 통하여 방사선 조사에 의한 가교 후의 결정화도 변화 등을 평가하였다.^{18,19}

실 험

시약 및 시편의 제조. 본 올레핀계 고분자의 가교율 향상을 위해서 한화(주)에서 생산되는 LDPE, LLDPE를 기본 수지로 사용하였으며, 가교제로 사용된 3-관능성 작용기를 포함하고 있는 triallyl isocyanurate (TAIC), trimethylol propane trimethacrylate (TMPTMA)는 일본의 동경화성공업(주)의 제품을 사용하였다. 사용된 수지의 물리적 성

Table 1. The General Properties of LDPE and LLDPE Resins

polymer	grade	M.I. (g/10 min)	density (g/cm ³)	softening point (°C)	melting point (°C)
LDPE	820	0.25	0.920	95	110
LLDPE	3224	2.0	0.921	95	118

질을 Table 1에 나타내었다.

LDPE와 LLDPE에 가교제를 10 phr의 비율로 정확히 칭량을 한 후 첨가하고, 130 °C의 brabender에서 6분간 혼합하였다. 혼합된 수지를 금형에 넣은 후 130 °C의 실험실용 프레스기 (Carver Co.)로 10 MPa의 압력을 가하여 0.4×150×150 mm 크기의 시편으로 제조하였다. 이렇게 제조된 시편을 질소 분위기, 상온에서 16시간 동안 감마선을 조사하여 가교시켰다. 감마선의 선원은 ⁶⁰Co이었고, 조사선량은 50~150 kGy이었다.

시험 및 분석. 방사선 조사에 의한 시편의 가교도를 조사하기 위해서 용매추출 방법을 이용하여 겔화율을 측정하였다. 겔화율은 추출전의 무게와 추출후의 무게비를 백분율로 나타낸 것으로, 일반적으로 고분자의 가교정도를 나타내는 척도로 활용하고 있다. 조사된 시편을 150-200 mg의 크기로 절단하여 정확히 칭량하고, 200메쉬 스펀텐스망에 삽입하였다. 이것을 끓는 크실렌 용액에 넣어 24시간 경화되지 않은 수지를 추출한 후, 상온에서 12시간 그리고 80 °C의 진공오븐에서 10시간 건조한 후, 칭량하였다.

방사선 조사에 따른 물리적 성질의 변화를 알아보기 위해 물리적 성질을 대표하는 인장강도를 측정하였다. 시험용 시편은 6×70×0.4 mm의 직육면체형이었으며, 인장강도는 Instron model-4443의 인장강도 시험기를 상온에서 사용하여 측정하였다. 이때 cross head speed는 100 mm/min이었고, span의 길이는 50 mm로 하였다. 인장강도와 더불어 연신율, Young's 모듈러스를 측정하여 방사선 조사에 따른 물리적 성질의 변화를 평가하였다.

가교에 의한 열적 성질의 변화를 측정하기 위해서 열변형율 시험을 하였다. 100×70×0.4 mm의 시험용 필름 양끝에 간격이 50 mm가 되도록 grip을 채우고 6.5±0.2 g의 추를 매달고 120 °C로 미리 예열된 오븐의 상단에 매달아 5분간 유지시켰다. 초기 길

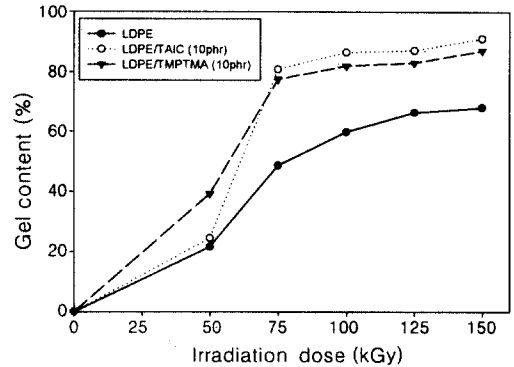


Figure 1. The effect of irradiation dose on the gel content of LDPE and on those with crosslinking agents.

이에 대한 변형된 길이의 비를 백분율로 나타내었다.

또한 결정화도가 방사선 가교에 미치는 영향과 가교에 따른 결정화도의 변화를 평가하기 위해서 감마선이 조사된 시편과 조사되지 않은 시편을 Siemens D500 X선 회절기를 이용하여 결정화도를 측정하였다. 선원은 Cu·K 음극선이고, Ni 필터, 흑연 2차 단색기를 사용하였다.

결과 및 고찰

겔화율의 측정. LDPE, LLDPE와 가교제를 첨가한 시편의 방사선 조사에 의한 겔화율을 측정한 결과를 Figure 1과 Figure 2에 나타내었다. Figure 1에서 확인할 수 있듯이 순수한 LDPE의 겔화율은 50 kGy에서는 20%, 150 kGy에서 68% 정도였다. 반면에 가교제를 첨가하였을 경우는 75 kGy에서 이미 80% 정도를 나타내었으며, 150 kGy에서는 겔화율이 87~91% 정도로 크게 증가하였다. 또한 순수한 LLDPE의 겔화율은 50 kGy에서 10% 정도이었으며, 150 kGy에서 63% 정도로 LDPE에 비해서 낮은 값을 나타내었다. 이러한 현상은 LDPE와 LLDPE의 분자량의 차이와 반응 활성종의 형성의 차이에서 오는 것으로 사료된다. 일반적으로 생산되는 PE의 용융지수(MI; melt index)는 평균 분자량을 나타내는 상대적인 척도이다. 그러므로 LLDPE에 비해서 MI의 수치가 낮은 LDPE가 분자량이 높다고 말할 수 있다. 즉 고분자의 방사선 가교에서 분자량이 높

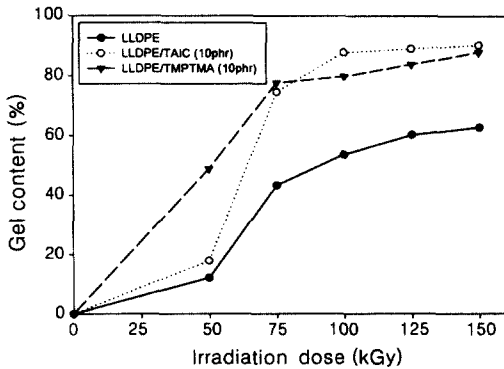


Figure 2. The effect of irradiation dose on the gel content of LLDPE and on those with crosslinking agents.

을수록 겔화율이 높아지기 때문에 LDPE가 LLDPE에 비해서 높은 겔화율을 나타낸 것으로 사료된다. 이러한 현상은 일반적으로 평균분자량이 훨씬 큰 HDPE가 방사선 조사에 의해서 겔화율이 LDPE나 LLDPE에 비해서 높게 나타난다는 것으로도 확인할 수 있다.²⁰

또한 LDPE가 LLDPE에 비해서 겔화율이 높게 나타난 다른 이유는 LDPE가 LLDPE보다 분자쇄의 상호 얽힘이 많아져서 분자간에 보다 많은 가교점을 형성하기 때문으로 생각해 볼 수 있다.

LDPE와 LLDPE에 가교제를 첨가한 경우는 모두 유사한 경향의 겔화율을 나타내고 있다. 가교제의 종류인 TAIC와 TMPTMA를 비교할 때, TAIC를 첨가한 경우는 75 kGy이하의 조사선량에선 TMPTMA를 첨가한 경우보다 겔화율이 낮았지만 조사선량이 증가하면서 TMPTMA를 첨가한 경우보다 겔화율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상은 TMPTMA에 비해서 TAIC가 낮은 조사선량에서는 반응종을 생성하는 것이 어렵지만 높은 선량에서는 반응종 형성이 용이하였으며, TMPTMA에 비해서 탄화수소의 이탈, 자체 고리화 반응 등과 같은 부반응이 적게 발생되었기 때문으로 사료된다. 또한 가교제를 첨가하면 75 kGy까지는 겔화율이 조사선량에 따라서 급격히 증가하였지만 75 kGy 이상의 조사선량에서는 증가량이 크게 줄어들었다. 이것은 실험의 조사선량 범위에서 가교제 첨가에 의한 겔화율의 최대 증가율, 즉 최고 효율은 방사선의 조사선량이 75 kGy

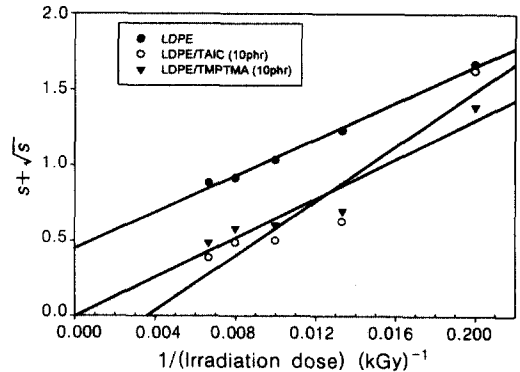


Figure 3. Charlesby-Pinner plots for γ -irradiated LDPE and for those with crosslinking agents.

정도라는 것을 나타내는 것이다. LDPE와 LLDPE에 TAIC와 TMPTMA 가교제를 첨가한 모든 경우에, 75 kGy의 조사선량에서는 겔화율이 80% 정도이었으며 150 kGy에서는 90% 정도이었다. 이러한 결과를 볼 때 수지에 가교제를 첨가하면 방사선량에 따른 수지의 겔화율은 가교제에 의해서 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

이러한 현상들은 Figure 3과 4에 나타난 바와 같이 가교제를 첨가한 LDPE, LLDPE의 Charlesby-Pinner 그래프에서 보다 명확하게 확인할 수 있다. Charlesby-Pinner 식은 다음과 같이 정의된다.^{21,22}

$$s + \sqrt{s} = p/q + 2/quD$$

여기서 s 는 sol의 함량이고, D 는 조사선량, q 는 가교된 단위의 비율, p 는 사슬당 주결격사슬의 비율, μ 는 초기 중합도의 중량평균이다. 여기서 좌변을 $1/D$ 에 대해서 나타내면 기울기가 $2/qu\mu$ 이고, 절편이 $p/q\mu$ 인 직선의 그래프를 도식할 수 있다.^{21,23} 이 그래프에서 겔화가 시작되는 점, 즉 $s + \sqrt{s}$ 가 2가 되는 점에서의 $1/D$ 값은 0.035~0.023로서 조사선량이 28~43 kGy 이상이 되어야 가교가 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 순수한 LDPE, LLDPE와 이들에 TMPTMA를 첨가한 경우는 이론적으로 가교율이 100% 되는 값, 즉 $s + \sqrt{s}$ (y축)가 0이 되는 점에 대응하는 x값이 존재하지 않는다. 반면에 LDPE와 LLDPE에 TAIC를 첨가한 경우는 x축이 0.0004

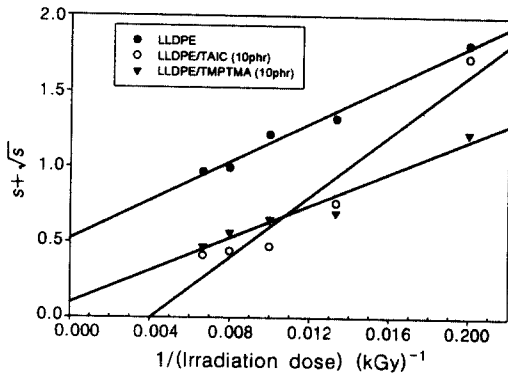


Figure 4. Charlesby-Pinner plots for γ -irradiated LLDPE and for those with crosslinking agents.

(조사선량 250 kGy)에서 이론적으로 100% 가교율을 나타낼 수 있다. 그러나 고분자에 방사선을 조사하면 가교와 분해가 동시에 발생하므로 실제로 100% 가교에 도달할 수 없다. 그러나 이러한 LDPE와 LLDPE에 TAIC를 첨가한 시편의 경우가 조사선량이 증가함에 따라 겔화율이 가장 크게 변화된다는 것을 직선의 기울기의 크기로 알 수 있었다.

물리적 성질 변화. 방사선 조사에 따른 물리적 성질의 변화를 평가하기 위해서 인장강도와 더불어서 연신율과 Young's 모듈러스를 측정하였다. 일반적으로 물리적 성질은 겔화율과 상관관계를 가지고 있기 때문에 조사선량과도 비례 관계를 나타낼 것이다. Figure 5에 나타낸 것과 같이 조사선량이 증가할수록 모든 시편의 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었다.^{16,17} 순수한 LDPE와 LLDPE의 인장강도는 각각 13 MPa, 11 MPa로서, LDPE가 높은 강도를 나타내었는데 이것은 평균분자량의 차이에서 발생한 결과로 사료된다. 그러나 조사후에는 LLDPE가 우수한 강도를 보여주고 있다. 가교제를 첨가하면 조사전이나 조사선량이 낮은 경우에는 순수한 LDPE와 LLDPE보다 낮은 강도를 내었지만, 조사선량이 75 kGy 이상에서는 순수한 수치보다 인장강도가 높아졌다. TAIC가 첨가된 LLDPE의 경우 150 kGy 조사하였을 때 24 MPa로 크게 증가된 인장강도를 나타내었다. 이러한 결과를 통해서 저분자량의 가교제를 첨가하면 수지의 물성이 저하되지만, 방사선을 조사하면 분자들이 가교되기 때문에 물성이 좋아진다고 볼 수 있다. 일반적으로 가교도와 PE의 인장강도

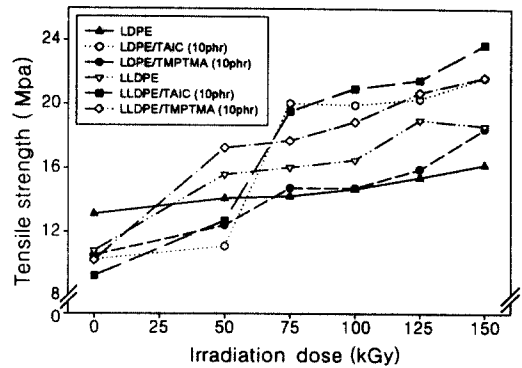


Figure 5. The effect of irradiation dose on the tensile strength of LDPE and LLDPE, and on those with crosslinking agents.

는 비례하기 때문에 LLDPE에 TAIC를 첨가한 경우에도 가교도의 향상이 인장강도의 향상에 크게 기여하는 것으로 사료된다. 그러나 조사선량이 낮은 경우 가교정도가 낮기 때문에 물성에 큰 영향을 끼치지 못한다는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6에서 볼 수 있듯이 연신율은 완전히 겔화율과 일치하는 경향을 나타내는 것은 아니지만 겔화율이 증가할수록 연신율은 감소하는 경향을 나타내고 있다. LDPE와 LLDPE의 비교에선 LDPE에 비해서 LLDPE가 큰 연신율을 나타내었다. 가교제를 첨가하면 수지가 팽윤되어서 연신율이 증가하지만, 방사선을 조사하면 조사선량에 따라서 연신율이 크게 감소를 하였다. LLDPE에 TMPTMA를 첨가한 시편의 조사전 연신율이 790%로 가장 컸으며, TAIC를 첨가한 경우는 755%이었다. 반면에 TMPTMA를 첨가한 LLDPE 시편에 150 kGy의 방사선을 조사한 경우 연신율이 180%이었으며, TAIC를 첨가한 경우가 70%정도로 가장 낮은 연신율을 나타냈다.

Figure 7에 나타낸 Young's 모듈러스는 겔화율이 증가할수록 높아지는 경향을 나타내었으며, 가교제를 첨가한 경우는 조사선량에 따라서 모듈러스가 크게 증가하였다. 이러한 경향은 연신율과 거의 반비례하였으며, 조사선량에 대해서는 순수한 LDPE의 변화가 가장 적었고, LLDPE에 TAIC를 첨가한 시편의 변화가 가장 크게 나타났다.

위에서 살펴본 물성들은 조사선량에 크게 영향을 받고 있었으며, 이러한 현상은 겔화율의 변화에 기인

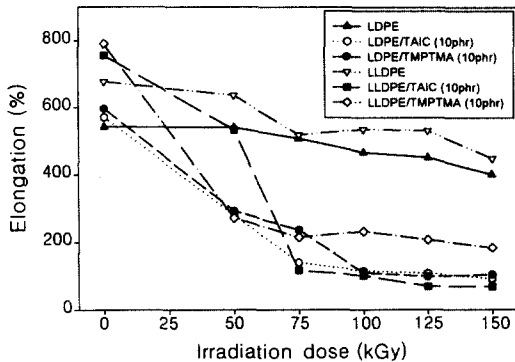


Figure 6. The effect of irradiation dose on the elongation of LDPE, LLDPE and on those with crosslinking agents.

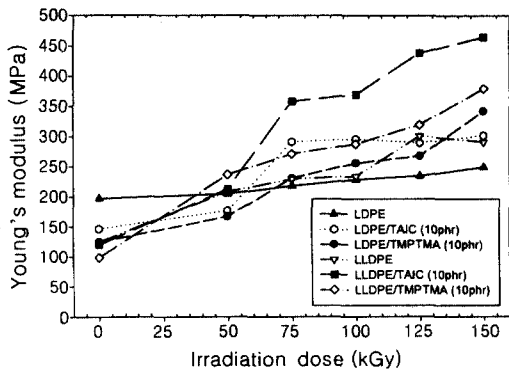


Figure 7. The effect of irradiation dose on the Young's modulus of LDPE, LLDPE and those containing crosslinking agents.

한다는 것을 확인할 수 있었다.

열변형을 시험. 방사선 조사에 의한 수지의 열적 안정성의 변화를 측정하기 위해서 열변형을 시험을 하여 Figure 8에 나타내었다. 방사선 조사 이전의 열변형율은 가교제의 첨가량이 증가할수록 크게 나타나서, 열변형 2분 이내에 대부분의 시편이 절단되었다. 그러나 방사선이 조사된 시편의 경우는 겔화율이 증가할수록 변형율이 적어지는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 방사선 조사에 의한 가교구조가 생성되어, 폴리에틸렌이 열적으로 크게 안정화되어졌기 때문이다. 그러므로 조사선량이 증가할수록, 그리고 가교제가 첨가된 것의 열변형율이 감소하였다. 특히 TAIC가 첨가된 경우가 가장 변형율이 적었으며,

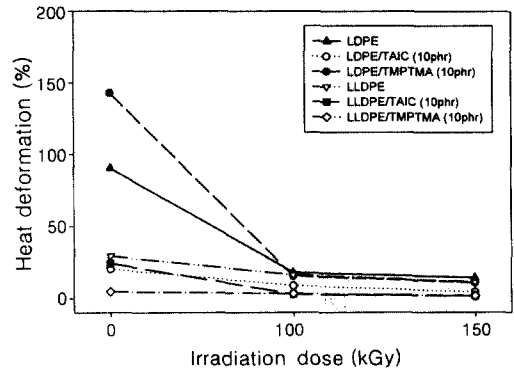


Figure 8. The effect of irradiation dose on the heat deformation of LDPE and LLDPE, and on those crosslinking agents.

150 kGy로 방사선을 조사하였을 때 2%미만의 변형율을 나타내었다.

결정화도 측정을 위한 X-선 회절 (X-ray Diffraction) 분석. 방사선 가교에 따른 결정화도의 변화를 알아보기 위해서 방사선이 조사된 시편과 조사되지 않은 시편의 X-선 회절 실험을 수행한 결과, 방사선 조사에 의해서 겔화율이 증가하면 결정화도는 약간씩 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.^{19,24} 이러한 사실은 Figure 9에서 볼 수 있듯이 결정화도가 55%인 LDPE, 47%인 LLDPE에 100 kGy를 조사하였을 경우에 결정화도가 각각 48%와 42%로 약간씩 감소한 것으로 확인할 수 있다. 반면에 가교제를 첨가하면 겔화율은 크게 증가하나 결정화도는 더욱 감소하였다. 이러한 사실은 TAIC를 10 phr 첨가하여 100 kGy를 조사한 시편의 겔화율이 87%로 높아졌으나, 결정화도는 35%로 낮아진 것으로 확인할 수 있었다. 그 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 3관능성 가교제에 의한 가교반응으로 수지의 가교밀도가 증가하여 겔화율이 증가하였지만, 수지에서 가교제가 첨가된 함량만큼 결정 백분율이 낮아졌으며, 또한 시편을 제작할 때 극성의 가교제들이 고분자 사슬을 땀을 시켜 결정성을 감소시켰기 때문으로 사료된다.^{25,26}

이러한 결과는 X-ray 회절 피크 ($2\theta=21^\circ$)를 나타낸 Figure 10에서 잘 확인할 수 있다. 즉 LDPE나 LLDPE에 100 kGy의 방사선을 조사한 경우에 수지의 결정성을 나타내는 피크 면적이 약간씩 감소된 것을 확인할 수 있다. 또한 TAIC를 첨가한 경우

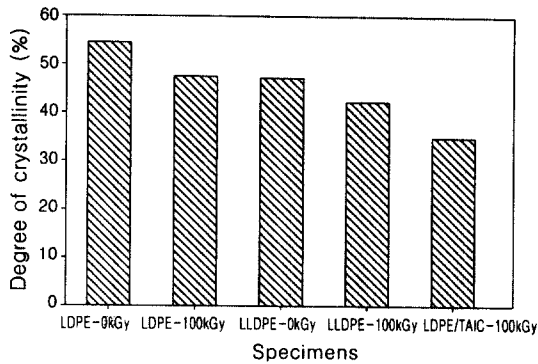


Figure 9. Degree of crystallinity in various specimens.

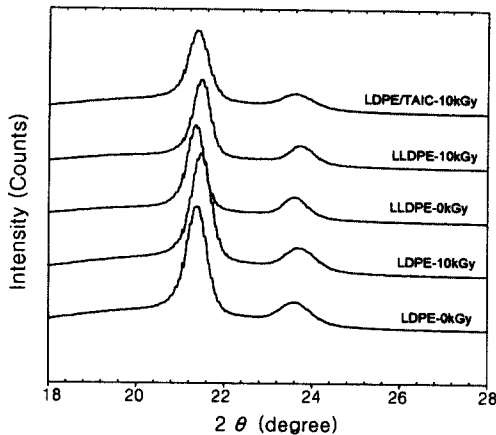


Figure 10. X-ray diffraction patterns of various specimens.

는 피크의 면적이 크게 줄었으며, 저분자 극성 물질의 첨가에 의해서 LDPE 결정화도를 나타내는 특성피크가 약간 낮은 각도로 옮겨가는 것을 확인할 수 있다.

결론

본 연구에서는 가교제를 첨가한 LDPE와 LLDPE 수지를 방사선 조사한 후, 방사선 조사선량과 가교제의 종류에 따른 겔화율의 변화를 측정하였다. 또한 가교에 따른 기계적 물성의 변화, 결정화도의 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 순수한 LDPE와 LLDPE의 겔화율은 150 kGy의 조사선량에서 약 68%, 63%이었으나, 가교제를

첨가한 경우에는 겔화율이 90% 정도로 크게 향상되었다. 겔화율은 조사선량이 증가할수록 그리고 가교제의 함량이 높을수록 증가하였다.

2. 인장강도를 비롯한 물리적 특성은 겔화율에 따라서 변화하였다. 인장강도와 Young's 모듈러스는 겔화율이 높을수록 증가하는 경향을 보였고, 연신율은 겔화율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다.

3. 방사선 가교로 인한 겔화율이 증가할수록 열변형율이 감소된 것으로 수지의 열안정성이 크게 증가되었음을 확인할 수 있었다.

4. 방사선 조사선량이 증가하면 결정화도는 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 가교제의 첨가는 겔화율을 크게 증가시키고, 결정화도를 감소시켰다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. N. Studer, *Int. J. Electron Beam Gamma Radiat. Proc.*, **1**, 14 (1988).
2. M. E. Martinez and J. M. Langerica, "Irradiation de un Compuesto de PVC Utilizado como Aislamiento de Alambre HU", Seminario para America Latina sobre Aplicaciones Industriales de las Radiaciones, OIEA, Quito, Ecuador, 1988.
3. R. Vera, A. Garcia, J. M. Garcia, and R. Suarez, *Memoir of the XXXII National Meeting of Chemical Engineers (IMIQ)*, 537 (1992).
4. M. E. Martinez, "M. Sc. thesis", Univ. Nacio. Autonoma de Mexico, Mexico, 1990.
5. L. Spenadel, S. Smith, and J. Murphy, *Crosslink. EPDM. Rub. Age*, **107**, 41 (1975).
6. S. Ota, *Radiat. Phys. Chem.*, **18**, 81 (1981).
7. A. Charlesby, *Proc. Roy. Soc. London*, **215**, 187 (1952).
8. I. Sakurada, *Radiat. Phys. Chem.*, **14**, 23 (1979).
9. R. W. Waldron, H. F. McRae, and Madison, *Radiat. Phys. Chem.*, **25**, 843 (1985).
10. V. Handlos, *Radiat. Phys. Chem.*, **14**, 721 (1979).
11. O. Guiot, L. Tighzert, and X. Coqueret, *Euro. Polym. J.*, **35**, 565 (1999).
12. J. Silverman, *J. Chem.*, **58**, 168 (1981).
13. M. E. Martinez and R. Vera, *Radiat. Phys. Chem.*, **45**,

- 93 (1995).
14. L. Novakovic and O. Gal, *Polym. Degrad. Stabil.*, **50**, 53 (1995).
15. M. A. Lopez, G. Burillo, and A. Charlesby, *Radiat. Phys. Chem.*, **43**(3), 227 (1994).
16. S. Jamaliah, S. A. Sharif, and H. Kamaruddin, *Radiat. Phys. Chem.*, **58**, 191 (2000).
17. S. Chattopadhyay, T. Chaki, and A. Bhowmick, *J. Appl. Polym. Sci.*, **79**, 1877 (2001).
18. J. M. Suarez, E. Mano, and R. Pereira, *Polym. Degrad. Stabil.*, **69**, 217 (2000).
19. B. Hutzler, L. Machado, and A. B. Lugao, *Radiat. Phys. Chem.*, **57**, 431 (2000).
20. P. H. Kang and Y. C. Nho, *J. Korean Nucl. Soc.*, **32**, 2 (2001).
21. S. Kumar and M. V. Pandya, *J. Appl. Polym. Sci.*, **64**, 823 (1997).
22. A. Charlesby, "Atomic Radiation and Polymers", Pergamon Press, Oxford, 1960.
23. R. J. Woods and A. K. Pikaev, "Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing", p. 349, John Wiley & Sons, New York, 1994.
24. S. Datta, T. Chaki, V. Tikku, and N. Pradhan, *Radiat. Phys. Chem.*, **50**, 399 (1997).
25. J. A. Brydson, "Plastics Materials", p. 46, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1995.
26. D. Lopez and G. Burillo, "Radiation Effects on Polymers", p. 262, American Chemical Society, Washington DC, 1991.