



Physical Properties of Contact Lens according to Room Temperature Polymerization Conditions

Ju-Hyun Bae¹, Na Young Ko¹, and Hyun Mee Lee^{2,*}

¹Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University,
Student, Gyeongsan 38430, Korea

²Dept. of Optometry & Vision Science, Daegu Catholic University,
professor, Gyeongsan 38430, Korea

(Received March 21, 2019; Revised June 13, 2019; Accepted June 24, 2019)

Purpose: The purpose of this study is to investigate the possibilities of producing contact lenses with better properties than those made produced by using conventional methods, by using a new room-temperature (20~30°C) polymerization method and without conventional thermal polymerization. **Methods:** The contact lens was prepared by controlling the amounts of catalyst *N,N,N',N'*-tetramethyl-ethylenediamine (TMEDA) volume (3 ~ 9 μ l) and temperature (20~30°C), respectively. The same reactants were used for both the thermal polymerization and room-temperature polymerization; the contact lens properties such as transmittance, water content, refractive index, wettability, and oxygen permeability were measured and compared. **Results:** The transmittance of the contact lens was the highest at 25°C. The contact lens showed good optical properties when 3 μ l and 5 μ l of catalyst were used. The physical properties of the polymerized lens at room temperature were improved regardless of the amount of catalyst under the same conditions, compared with the thermally polymerized lens. When the amount of TMEDA was 5 μ l, the polymerization time was reduced, and physical properties such as water content, oxygen permeability, and wettability were significantly improved. **Conclusions:** Polymerization conditions with optimum physical properties were obtained by room-temperature polymerization, and the possibility of manufacturing high functionality contact lenses was confirmed.

Key words: Contact lens, Room temperature polymerization, Thermal polymerization, Catalyst, Wettability, Oxygen permeability

서 론

하이드로겔은 친수성 고분자로서 수용액상에서 다량의 물을 내부에 함유할 수 있는 3차원 고분자 네트워크를 형성하고 있는 중합체이다. 고분자 네트워크에 다양한 작용기를 도입하면 하이드로 겔의 특성을 변화시킬 수 있으며, 온도, 이온강도, pH, 빛과 같은 외부 환경 자극에 따라 반응하는 하이브리드 하이드로겔의 제조도 가능하게 한다.^[1,2] 하이드로겔은 높은 흡수율을 가지며 높은 생체적합성을 가지므로 소프트콘택트렌즈, 상처드레싱, 약물전달을 위한 매트릭스를 비롯한 광범위한 생물의학응용분야에 많이 사용된다.^[3]

하이드로겔 콘택트렌즈는 HEMA를 기본 단량체로 해서 교차 결합제, 그리고 라디칼 개시제에 의한 라디칼 중합에 의해 합성되며 부가적인 단량체의 종류 및 재료의 특성에

따라 다양한 기능을 지니게 된다. 하이드로겔 콘택트렌즈의 특성으로는 산소 투과율, 흡수율, 광 투과율, 습윤성, 단백질 흡착 및 항균성 등이 향상된 물리적 특성이 요구된다.^[4]

일반적인 하이드로겔 콘택트렌즈의 제조방법은 고분자의 중합 개시제의 종류에 따라 열중합법, 광중합, 실온중합(산화·환원 중합)으로 분류할 수 있다.

열중합법은 교차결합제와 열에 의해 프리라디칼을 형성하는 열 개시제 등을 첨가하여 중합하는 방법으로 공정이 매우 단순하며, 순도가 높은 화합물을 얻을 수 있으나 반응온도에 따라 중합도가 달라지고 중합 시 기포발생으로 불량률이 높으며 높은 온도가 요구되기 때문에 에너지 소모가 많다.^[5,6]

광중합법은 광개시제 존재 하에 자외선을 이용하여 고분자를 중합하는 방법으로서 자외선의 파장에 따라 중합

*Corresponding author: Hyun Mee Lee, TEL: +82-53-850-2552, E-mail: hmlee@cu.ac.kr

시간이 단축되는 장점도 있으나 현재 광중합은 경화 속도와 품질(모양, 크기, 표면 처리 등)에 부족함이 있어서 제한적으로 적용이 되고 있다.^[7-11] 예를 들어, UV조사는 시료의 두께 또는 시료의 특성에 따라 균질한 경화가 진행되지 않는다는 단점이 있다. 또한 상대적으로 원재료비와 설비가 고가라는 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해 광중합의 공정에 대한 많은 연구가 진행되고 있지만 만족할 만한 수준에는 이르지 못하고 있는 실정이다.^[12,13]

지금까지의 콘택트렌즈의 연구 및 제작은 거의 대부분 열중합법으로 진행되고 있으며 광중합법에 의한 중합은 일부에서만 이루어지고 있다. 상온중합법에 의한 콘택트렌즈 중합에 대한 연구는 진행된 바가 없었다.

상온중합은 열이나 빛과 같은 에너지가 없어도 실온에서 반응이 가능한 방법으로써 산화-환원 개시제를 사용하여 산화반응에 의해 라디칼을 생성시켜서 이루어지는 중합방법이다. 산화-환원 개시의 장점은 라디칼 생성이 낮은 온도에서도 가능하기 때문에 상온에서 중합이 가능하다는 것이다. 이러한 이유로 상온중합은 열이나 자외선에 의한 개시제 분해로 중합 시키는 방법에 비해 산화환원 개시 중합은 온도를 비교적 자유롭게 선택할 수 있다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 소프트 콘택트렌즈 제조 방법인 열과 자외선 등 에너지를 사용하지 않고 상온에서 중합하여 콘택트렌즈를 제작하고자 한다. 또한 최적의 상온중합 조건을 찾기 위해 중합온도, 중합시간, 촉매제의 양에 따른 물리적 특성을 측정하여 비교 분석하고 상온중합의 중합시간에 따른 물리적 특성 변화를 살펴보고자 한다.

대상 및 방법

본 연구의 하이드로겔 콘택트렌즈 제작에 사용된 시약은 친수성 단량체인 2-hydroxyethyl methacrylate(HEMA), 교차결합제인 ethylene glycol dimethacrylate(EGDMA), 개시제인 ammonium persulfate(APS), 개시반응을 촉진제인 *N,N,N',N'*-tetramethylethylene diamine(TMEDA)를 사용하였다. 계면활성제는 인체에 독성이 없는 비이온성 계면활성제인 poloxamer 188를 사용하였다. 본 실험에 사용된 모든 시약은 Sigma-Aldrich사(USA)의 제품을 구입하여 사용하였다. 연구에 사용된 단량체의 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 콘택트렌즈 제조는 굴절력 -3.00 D, 베이스커브

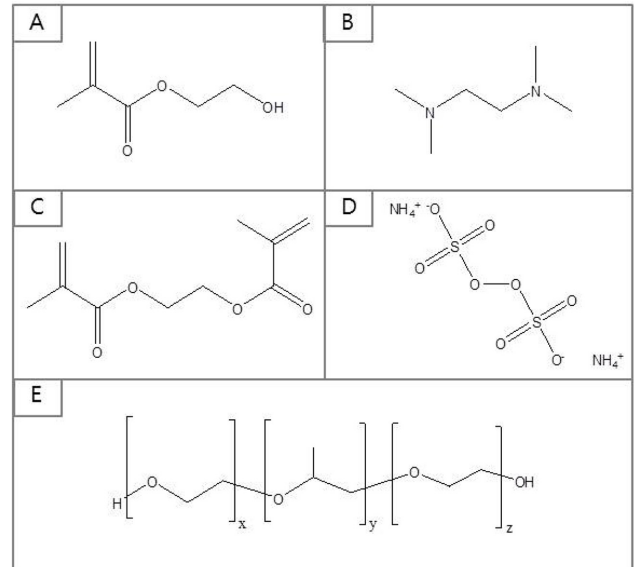


Fig. 1. Chemical structure of the used monomers.

- A) 2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA);
 B) *N,N,N',N'*-Tetramethyl-ethylenediamine (TMEDA);
 C) Ethyleneglycol dimethacrylate (EGDMA);
 D) Ammonium persulfate (APS);
 E) Poloxamer 188

8.6인 몰드를 사용한 주형주조법(cast mould)으로 제작하였다.

상온중합법에 의한 콘택트렌즈의 시료 제작을 위하여 HEMA를 기본으로 초순수와 계면활성제인 poloxamer 188을 넣고 교차결합제 EGDMA와 라디칼 개시제 APS를 첨가하였다. 콘택트렌즈 제작에 사용된 단량체의 구성비는 Table 1에 나타내었다. 제시한 구성비로 시료를 충분히 혼합한 다음 기포 제거를 위해 10분 동안 안정화 시켰다. 개시반응을 촉진시키기 위한 적정 TMEDA의 양을 확인하기 위하여 혼합시료 1 ml당 3 μ l, 5 μ l, 7 μ l, 9 μ l 씩의 TMEDA 양을 사용하였다. 또한 가장 최적의 중합 온도를 확인하기 위하여 20°C, 25°C, 30°C에서 각각 1시간씩 중합하여 콘택트렌즈를 제작하였다.

콘택트렌즈는 광투과율이 가장 우선적으로 고려할 항목이기 때문에 예비실험을 통하여 온도 변화와 개시촉진제인 TMEDA 양 조절하여 투광도가 높은 조건을 찾은 다음 중합시간과 촉매제 양을 변화시켜 연구하고자 하였다. 투명성이 우수한 조건은 중합온도 25°C, TMEDA 양 3 μ l, 5 μ l일 때로 나타났기 때문에 시료의 조건을 25°C, TMEDA

Table 1. Compositions of samples (%)^{*}

	HEMA	Poloxamer 188	WATER	EGDMA	APS	AIBN
Room temperature polymerization	59.4	10	30	0.3	0.3	0
Thermal polymerization	59.4	10	30	0.3	0	0.3

^{*}The values of composition exclude 0.3 and 0.5% TMEDA

양을 3 μ l와 5 μ l 사용하여 중합하였다. 중합시간에 따른 물리적 특성 변화를 살펴보기 위하여 중합시간을 1 h, 4 h, 8 h, 16 h, 24 h 동안 진행하였다.

상온중합에 의한 콘택트렌즈는 시료의 혼합액을 몰드에 주입 후 상온에 두었다가 일정시간 경과 후에 몰드에서 렌즈를 분리하였으며 60°C의 초순수에서 40분간 중탕을 하여 미반응 물질을 제거하여 제작하였다.

상온중합에 의한 콘택트렌즈와 열중합에 의한 콘택트렌즈의 물리적 특성 비교를 위하여 열중합을 이용한 콘택트렌즈도 제작하였다. 열중합 콘택트렌즈는 상온중합 콘택트렌즈와 구성비는 모두 동일하게 하였으며, 차이점은 상온중합 개시제인 APS 대신에 열 개시제인 2,2'-azobis(2-methylpro-pionitrile)(AIBN)을 사용하여 100°C에서 1시간 중합하였다. 중합완료된 콘택트렌즈는 몰드에서 분리한 후 60°C의 초순수에서 40분간 중탕을 하여 미반응 물질을 제거한 후 시료로 사용하였다.

열중합 콘택트렌즈와 상온중합 콘택트렌즈의 굴절률, 흡수율, 광투과율, 접촉각, 산소투과율 등을 측정하여 물리적 특성을 비교하였다.

굴절률의 측정은 ISO 18369-4:2006을 기준으로 하였으며, 시료를 초순수에 24시간 수화를 시킨 후 시료 표면의 물기를 제거하고 Abbe refractometer(ATAGO DR-A1, USA)를 이용하여 굴절률을 측정하였다. 굴절률 측정은 한 개의 시료당 5개씩 측정하여 그 평균 값으로 나타내었다.

흡수율 측정은 ISO 18369-4:2006의 중량측정법을 사용하였으며 시료를 초순수에 24시간 수화를 시킨 다음 콘택트렌즈 표면의 수분을 제거한 무게(W_{swell})를 측정하고 건조시킨 무게(W_{dry})를 측정하여 아래의 공식에 대입하여 흡수율 값을 계산하였다. 각 시료당 5개씩 측정하여 평균한 값으로 나타내었다.

$$Water\ content(\%) = \frac{W_{swell} - W_{dry}}{W_{swell}} \times 100$$

광투과율 측정을 위해 Thermo SCIENTIFIC사의 UV-visible spectrophotometer(EVOLUTION 201)를 사용하였다. 광투과율 측정에 사용된 콘택트렌즈는 초순수에 24시간 수화 후 사용하였다. 측정된 결과는 가시광선 영역 380 nm에서 780 nm까지 광투과도의 평균값으로 나타내었다.

접촉각 측정은 Kruss GMBH사의 DSA 30을 사용하여 Sessile drop방법을 이용하여 측정하였다. 시료 표면에 초순수 증류수를 떨어뜨려 만들어지는 각도를 5초간 5회 기록하였다. 접촉각 측정은 한 시료당 5회 측정하였다.

산소투과율은 ISO 18369-4:2006을 기준으로 측정하였으며, 초순수에서 24시간 수화된 시료를 사용하여 Mitutoyo사의 VL-50으로 중심 두께를 측정하였고 온도 35°C, 습도

98%인 항온항습기 내부에서 전류 값을 측정하였다. 한 시료당 5개씩 두께와 전류 값을 측정하고 계산하여 평균값으로 나타내었다.

통계분석은 SPSS 20.0 프로그램을 이용하여 상온중합 시간에 따른 물리적 특성 변화에 대한 유의성 여부를 ANOVA에서 Turkey 방법으로 처리하였으며, 95% 신뢰구간에 대한 $p < 0.05$ 에서 유의성을 검증하였다.

결과 및 고찰

1. 중합온도와 촉매제 양에 따른 광투과율

광투과율은 콘택트렌즈의 물리적 특성에 있어서 가장 기본적이며, 중요한 요소 중의 하나이다.^[19] 따라서 상온중합의 온도와 촉매제인 TMEDA의 양을 먼저 조절하여 투과도가 적합한 조건을 찾았다. 상온중합의 온도를 20°C, 25°C, 30°C로 각각 조절된 상태에서 촉매제 TMEDA의 양을 3 μ l, 5 μ l, 7 μ l, 9 μ l씩 각각 첨가하여 1시간 동안 중합한 콘택트렌즈의 광투과율을 측정하였다.

다양한 중합온도와 촉매제 양의 변화에 따라 제작한 콘택트렌즈의 광투과율 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그 결과, 중합온도 25°C에서 촉매제인 TMEDA의 양을 3 μ l, 5 μ l를 사용하였을 때의 광투과율이 90% 이상으로 나타났다. TMEDA를 7 μ l, 9 μ l 사용하여 중합하였을 때 보다 광투과율이 최대 38.86% 높게 나타나는 것을 확인하였다. 일반적으로 콘택트렌즈로 활용되기 위해서는 광투과율이 88% 이상으로 높아야한다.^[14] 따라서 광투과율을 만족하는 상온중합 조건은 중합온도가 25°C이었으며, TMEDA의 양은 3 μ l와 5 μ l임을 확인하였다.

2. 상온중합과 열중합 콘택트렌즈의 물리적 특성 비교

상온중합과 열중합 콘택트렌즈의 물리적 특성을 동일한 조건하에서 비교하기 위하여 앞에서 확인한 25°C에서 TMEDA양을 3 μ l와 5 μ l씩을 각각 사용하여 1시간씩 중합

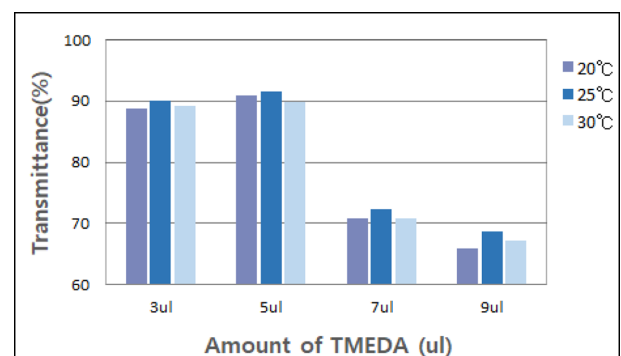


Fig. 2. Transmittance of the contact lens according to the polymerization temperature and amount of TMEDA.

Table 2. Physical characteristics of the contact lens produced by thermal polymerization and room-temperature polymerization for 1 h

		Refractive index	Water content (%)	Transmittance (%)	Wetting angle (°)	Oxygen permeability (DK/t)
Thermal polymerization	TMEDA 3 μ l	1.440	36.05	88.52	68.8	6.38
	TMEDA 5 μ l	1.439	36.42	91.05	65.4	6.70
Room temperature polymerization	TMEDA 3 μ l	1.438	36.16	90.85	59.4	10.92
	TMEDA 5 μ l	1.437	36.81	91.58	57.5	10.10

하였으며 물리적 특성을 Table 2에 제시하였다.

열중합과 상온중합으로 제작한 콘택트렌즈의 함수율을 비교해 보면, TMEDA 3 μ l, 5 μ l를 첨가하여 열중합법으로 제작한 렌즈의 함수율은 36.05%, 36.42%로 각각 나타났고 상온중합법으로 중합한 콘택트렌즈는 36.16%, 36.81%로 각각 나타났다. 이로써 중합반응 종류에 따른 함수율의 차이는 없는 것을 나타냈다. 또한 촉매제인 TMEDA의 양은 콘택트렌즈의 함수율에 미치는 영향은 없었다.

투광도는 촉매제인 TMEDA의 양을 3 μ l 사용할 때 보다는 5 μ l를 사용하였을 때에 약 1.7% 상승되어 중합방법의 차이에 따른 투광도 차이는 없는 것으로 나타났다.

열중합과 상온중합의 중합방법 차이에 따른 함수율, 굴절률, 그리고 투광도는 비슷하게 나타났으며, 촉매제 양에도 별 영향이 없었다는 것을 알 수 있었다. 상온중합법에 에너지를 사용하지 않고도 열중합법과 동일한 성능을 보인다는 것은 콘택트렌즈의 생산단가를 낮추는데 매우 중요한 의미가 있다.

콘택트렌즈의 특성 중 습윤성을 나타내는 지표는 접촉각으로서 친수성일수록 각도가 작으며, 소수성일수록 크게 나타난다. 열중합법으로 제작한 Polymacon의 접촉각은 TMEDA의 양에 따라 각각 68.8°, 65.4°로 측정되었으나 상온중합으로 제작한 시료의 접촉각은 59.4°, 57.8°로 각각 나타났다. 이 결과로서 상온중합법으로 제작한 콘택트렌즈의 접촉각은 열중합법에 의한 콘택트렌즈 보다 평균 15% 정도 작게 나타남으로써 습윤성이 더 우수함을 알 수 있었다.

각막 대사에 중요한 산소투과율은 상온중합 콘택트렌즈의 경우, TMEDA양이 3 μ l일 때에 약 51%, 5 μ l일 때에 71%로 나타나서 TMEDA양이 많을수록 산소투과율이 훨씬 좋은 것으로 나타났다.

열중합법과 상온중합법으로 제작한 콘택트렌즈의 물리적 특성을 비교하면, TMEDA의 양이 많을수록 모든 물리적 특성이 향상되었으며, 열중합법보다는 상온중합법으로 제작하였을 때에 습윤성과 산소투과율이 더 우수함을 확인하였다.

3. 중합시간에 따른 함수율과 굴절률

중합시간의 변화에 따른 함수율과 굴절률의 측정 결과

를 Fig. 3에 나타냈다.

앞서 살펴보았듯이 중합시간을 1시간 진행시켰을 때에는 열중합과 상온중합의 함수율 차이가 거의 없었지만, 상온중합의 시간을 24시간 동안 진행하였을 경우 중합시간이 경과함에 따라 함수율이 점차 증가하는 경향을 보였다. 중합시간에 따른 함수율에 대한 분석결과, TMEDA의 양을 5 μ l 사용하였을 때에 1시간 중합에 의한 함수율은 36.81%에서 24시간으로 경과됨에 따라 38.11%로 증가하였으며 이러한 차이는 통계적으로 매우 유의한 것으로 분석되었다($F=105.090$, $p<0.001$).

굴절률의 측정 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 굴절률은 TMEDA의 함량과 중합시간에 따른 큰 차이를 보이지 않았지만 중합시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. TMEDA 사용량을 5 μ l 사용 시, 4시간 중합이후에는 굴절률의 변화가 없으나 3 μ l를 사용하면 굴절률이 꾸준히 감소하였다. 이는 TMEDA를 5 μ l 사용하면 중합이 빨리 진행되어 4시간만에 완결되나 3 μ l를 사용하면 24시간 동안 반응이 조금씩 진행된다는 것을 암시한다. TMEDA 3 μ l 사용 시, 중합시간에 따른 굴절률을 분석해 보면, 1시간 중합 시 1.438에서 24시간 중합 시 1.435로 변화하였으며 중합시간 경과에 따른 굴절률 감소는 유의한 것으로 나타났다($F=11.124$, $p<0.005$).

TMEDA 3 μ l, 5 μ l를 첨가하여 상온중합하였을 때 모두

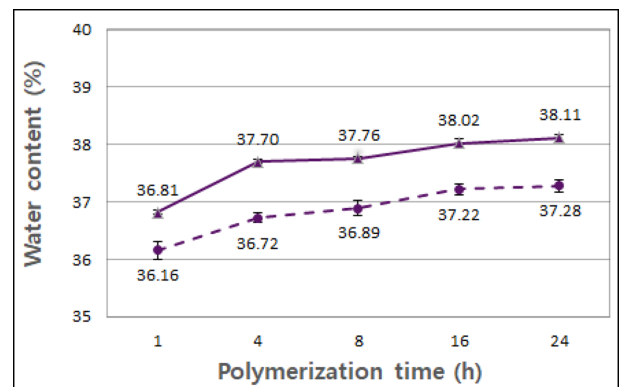


Fig. 3. Water content of the contact lens according to the amount of TMEDA (μ l) and polymerization time (h): the dotted line is TMEDA 3 μ l and the solid line is TMEDA 5 μ l.

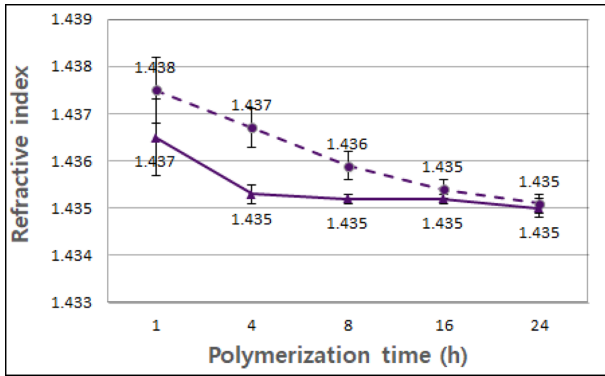


Fig. 4. Refractive index of the contact lens according to the amount of TMEDA (μl) and polymerization time (h); the dotted line is TMEDA 3 μl and the solid line is TMEDA 5 μl .

중합시간이 길어지면서 흡수율은 증가하고 굴절률은 감소하는 것을 확인하였다. 일반적으로 흡수율과 굴절률은 반비례 관계를 나타낸다. 이는 흡수율이 증가함에 따라 하이드로겔을 구성하는 고분자 네트워크 사이의 간격이 넓어지면서 밀도가 감소하기 때문이다.^[15-17]

4. 중합시간에 따른 광투과율

상온중합법으로 제작한 콘택트렌즈의 중합시간에 따른 가시광선 투과율 변화 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

중합시간을 1시간에서 24시간까지 변화를 주어도 광투과율은 모두 90% 이상으로 높게 측정되었으며 콘택트렌즈로서의 기본 특성을 만족하였다.

촉매제의 양을 5 μl 를 첨가한 시료가 3 μl 사용하였을 때보다 광투과율이 높게 나타났다. 중합시간에 따른 투광도 차이는 유의하였으며(F=86.844, p<0.001) 사후검정결과 (Turkey HSD), TMEDA 5 μl 사용으로 24시간 중합 시 투광도 93.40% 는 1시간 중합 시 91.58% 보다 투광도가 유의하게 높은 것으로 분석되었다.

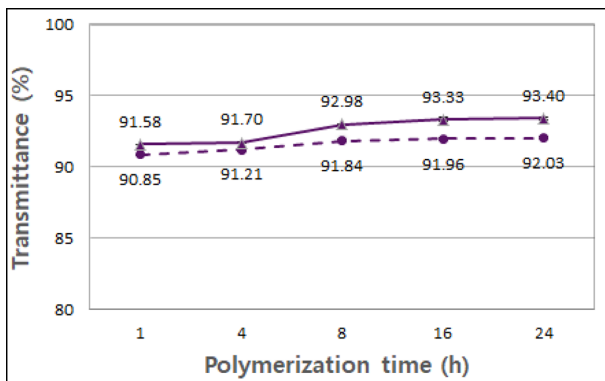


Fig. 5. Transmittance of the contact lens according to the amount of TMEDA (μl) and polymerization time (h); the dotted line is TMEDA 3 μl and the solid line is TMEDA 5 μl .

TMEDA 5 μl 를 첨가하여 24시간 동안 중합한 시료의 광투과율은 93.40%로 TMEDA 3 μl 를 사용하였을 때보다 높게 나타났다. 본 연구에서 만들어진 모든 시료는 중합시간에 관계없이 모두 90% 이상의 가시광선 투과율을 가지므로 콘택트렌즈로 활용 가능하다고 판단된다.^[14]

5. 중합시간에 따른 접촉각

습윤성은 접촉각의 정도로 판단하며 접촉각이 낮을수록 친수성 성질을 가지고 습윤성이 높다. 습윤성은 콘택트렌즈 착용 시 눈의 촉촉함과 편안함을 결정하는 중요한 요인^[18]이기 때문에 상온중합에 의한 하이드로겔 콘택트렌즈의 접촉각을 측정하여 습윤성을 평가하였다.

본 연구는 sessile drop method^[19]를 사용하여 접촉각을 알아보았으며, 접촉각의 측정 결과를 Fig. 6에 제시하였다.

중합시간의 경과에 따라 접촉각의 크기가 점차 감소하였다. TMEDA의 양에 따라 중합시간이 1시간일 때보다 24시간 일 때의 접촉각이 13%와 15%씩 각각 감소하였다. TMEDA 5 μl 를 첨가하여 24시간 동안 중합한 시료의 접촉각은 50.1°로 TMEDA 3 μl 를 첨가하였을 때의 접촉각 52.6°보다 4.79% 낮았다. 이를 열중합한 콘택트렌즈의 접촉각과 비교하면 각각 23.54%, 23.39% 감소한 것으로 나타났다. 상온중합 시 열중합보다 습윤성이 향상되었음을 알 수 있었다. TMEDA 3 μl 를 첨가하였을 때는 중합시간이 증가함에 따라 접촉각이 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. TMEDA 양에 따른 접촉각 변화 추세를 살펴보면, 5 μl 를 첨가하였을 때의 8시간 이후 접촉각 감소 추세는 3 μl 사용 시 보다 감소비율이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 촉매제의 사용량이 많으면 콘택트렌즈의 중합반응이 빨리 진행되고 습윤성도 더 좋아진다는 것을 알 수 있다.

중합시간에 따른 접촉각 변화를 살펴보면, 중합시간이 길어지면 접촉각이 낮아져서 습윤성이 향상되는 경향성을

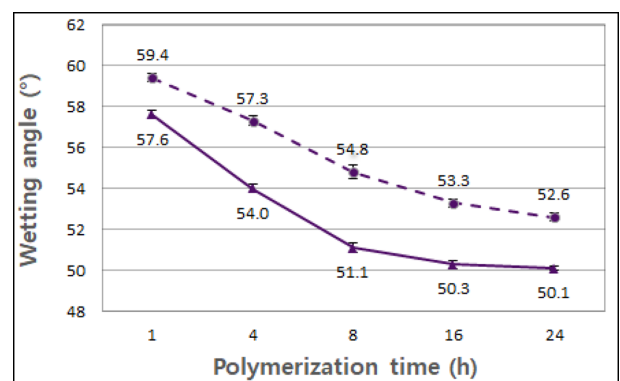


Fig. 6. Wetting angle of the contact lens according to the amount of TMEDA (μl) and polymerization time (h); the dotted line is TMEDA 3 μl and the solid line is TMEDA 5 μl .

보였으며 이는 통계적으로 매우 유의하였다($F=46.704$, $p<0.001$). TMEDA 5 μl 사용 시 접촉각에 대한 Tukey 사후 검정결과는 1시간 중합 시 57.6°보다 24시간 중합 시 50.1°로 매우 유의하게 낮아진 것으로 분석되었다.

6. 중합시간에 따른 산소투과도

각막은 무혈관으로 대기 중의 산소를 공급받아 대사작용을 하기 때문에 콘택트렌즈의 산소투과도(DK/t)는 각막에 건강에 직접적인 영향을 미친다. 콘택트렌즈 사용으로 유발된 각막 저산소증은 내피세포 수포, 부종, 윤부충혈, 근시로의 변화, 상피미세낭종 및 상피의 두께감소와 같은 일시적 변화^[20,21]와 각막 신생혈관 등^[22] 장·단기적으로 각막의 생리학적 변화를 유발하므로 콘택트렌즈의 물리적 특성 중에서 산소투과도는 매우 중요하다.

중합시간에 따른 산소투과도 측정 결과는 Fig. 7에 제시하였다.

TMEDA의 양에 상관없이 중합시간이 증가함에 따라 산소투과도는 증가하나 많은 변화는 보이지 않는다.

1시간 열중합시킨 Polymacon의 산소투과도는 TMEDA가 3 μl , 5 μl 일 때 각각 6.38 DK/t, 6.70 DK/t로 나타난 반면 24시간 상온중합시킨 시료의 산소투과도는 11.25 DK/t와 11.54 DK/t로 각각 측정되었다. 따라서 24시간 상온중합법에 의한 콘택트렌즈의 산소투과도는 1시간의 열중합법 보다 평균 74.3% 증가되었음을 알 수 있다. 이 결과로써 상온 중합법으로 제작한 콘택트렌즈가 열중합법에 의한 렌즈보다 산소투과도가 높게 측정됨을 확인할 수 있었다.

TMEDA 5 μl 사용 시 산소투과도는 1시간 중합일 때 10.92 DK/t에서 24시간 중합에서 11.54 DK/t로 5.7% 향상되었으며 중합시간에 따른 산소투과도 차이는 통계적으로 유의하게 나타났다($F=16.408$, $p<0.001$).

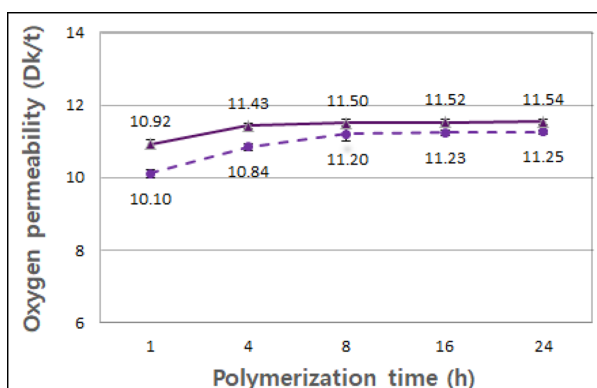


Fig. 7. Oxygen permeability of the contact lens according to the amount of TMEDA (5 μl) and polymerization time (h); the dotted line is TMEDA 3 μl and the solid line is TMEDA 5 μl .

TMEDA 사용량에 따른 산소투과도의 평형상태 도달시간은 TMEDA 5 μl 를 사용한 시료에서는 약 4시간이었으나 3 μl 를 사용한 시료에서는 8시간 이후에 평형상태에 도달하였다. 중합반응 1시간에서는 TMEDA 양에 따라 산소투과도 차이가 0.82 DK/t이었으나 24시간 경과되면서 0.29 DK/t만큼 거의 차이가 나지 않았다. 이는 중합반응 초반에는 촉매제 양이 많음으로써 반응이 촉진되어 산소투과도가 높아지나 시간이 경과되면서 TMEDA양이 산소투과도에 미치는 기여도는 감소하는 것으로 보인다.

결론

상온중합의 온도, 촉매제의 양, 중합시간 등의 중합환경에 따른 콘택트렌즈의 물성을 평가하여 최적의 물리적 특성을 가지는 중합조건을 살펴보았다. 중합온도는 25°C이었으며, 촉매제의 양은 5 μl 이었다. 상온중합 콘택트렌즈는 열중합 콘택트렌즈에 비해 습윤성과 산소투과도가 높게 나타남을 확인하였다. 상온중합 콘택트렌즈의 중합시간은 길수록 물리적 특성이 향상되었다. 따라서 본 연구를 통해 열이나 자외선 등의 에너지를 사용하지 않고서도 좋은 물성을 지닌 콘택트렌즈의 제작이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 대구가톨릭대학교 교내연구비의 지원에 의하여 진행된 연구입니다.

REFERENCES

- [1] Campoccia D, Doherty P, Radice M, Brun P, Abatangelo G, Williams DF. Semisynthetic resorbable materials from hyaluronan esterification. *Biomaterials*. 1998;19(23):2101-2027.
- [2] Hennink WE, van Nostrum CF. Novel crosslinking methods to design hydrogels. *Adv Drug Deliv Rev*. 2002;54(1):13-36.
- [3] Peppas NA, Khare AR. Preparation, structure and diffusional behavior of hydrogels in controlled release. *Adv Drug Deliv Rev*. 1993;11(1-2):1-35.
- [4] Caló E, Khutoryanskiy VV. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *Eur Polym J*. 2015;65:252-267.
- [5] Noh HR. Interfacial and rheological properties of selected hydrogel formulations for soft contact lens. *Polym Kor*. 2012;36(2):190-195.
- [6] Hwang KH, Shin JH, Sung YJ, Jeong KS, Jun J. Polymerization of HEMA by electron beam irradiation and fabrication of soft contact lens. *J Korean Ophthalmic Opt Soc*. 2012;17(2):135-141.

- [7] Slopek RP. In-Situ Monitoring of the mechanical properties during the photopolymerization of acrylate resins using particle tracking microrheology, Georgia Institute of Technology, 2008. https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/22657/slopek_ryan_p_200805_phd.pdf?sequence=1&isAllowed=y(3 Mar 2019).
- [8] Nathawat R, Kumar A, Acharya NK, Vijay YK. XPS and AFM surface study of PMMA irradiated by electron beam. *Surf Coat Tech.* 2009;203(17-18):2600-2604.
- [9] Burkert S, Schmidt T, Gohs U, Dorschner H, Arndt KF. Cross-linking of poly(N-vinyl pyrrolidone) films by electron beam irradiation. *Radiat Phys Chem.* 2007;76(8-9):1324-1328.
- [10] Nouh SA, Mohamed A, Hussieny HE, Sakr EM. Thermal and optical properties of electron beam irradiated cellulose triacetate. *Mater Chem Phys.* 2008;110(2-3):376-379.
- [11] Nathawat R, Kumar A, Kulshrestha V, Singh M, Ganesan V, Phase DM et al. Surface modification study of low energy electron beam irradiated polycarbonate film. *Appl Surf Sci.* 2007;253(14):5985-5991.
- [12] Decker C. Photoinitiated curing of multifunctional monomers. *Acta Polym.* 1994;45(5):333-347.
- [13] Kang YM, Kim ES, Lee SH, Son JS, Lee B, Kim JH et al. Synthetic and application of stimuli-sensitive polymer. *Polymer Science and Technology.* 2009;20(3):245-250.
- [14] Ophthalmics-Contact lenses-Standard terminology, tolerances, measurement sand physicochemical properties. ANSI Z80.20, 2004.
- [15] Holden BA, Sweeney DF, Vannas A, Nilsson KT, Efron N. Effects of long-term extended contact lens wear on the human cornea. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1985;26(11):1489-1501.
- [16] Elisseeff J, Puleo C, Yang F, Sharma B. Advances in skeletal tissue engineering with hydrogels. *Orthod Craniofac Res.* 2005;8(3):150-161.
- [17] Lin CC, Metters AT. Hydrogels in controlled release formulations: network design and mathematical modeling. *Adv Drug Deliv Rev.* 2006;58(12-13):1379-1408.
- [18] Santos L, Rodrigues D, Lira M, Real Oliveira ME, Oliveira R, Vilar EY et al. Bacterial adhesion to worn silicone hydrogel contact lenses. *Optom Vis Sci.* 2008;85(7):520-525.
- [19] Shang J, Flury M, Harsh JB, Zollars RL. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids. *J Colloid Interface Sci.* 2008;328(2):299-307.
- [20] McNamara NA, Polse KA, Fukunaga SA, Maebori JS, Suzuki RM. Soft lens extended wear affects epithelial barrier function. *Ophthalmology.* 1998;105(12):2330-2335.
- [21] Papas EB. The role of hypoxia in the limbal vascular response to soft contact lens wear. *Eye Contact Lens.* 2003;29(1):S72-S74.
- [22] Nicolson PC, Vogt J. Soft contact lens polymers: an evolution. *Biomaterials.* 2001;22(24):3273-3283.

상온중합환경에 따른 콘택트렌즈의 물성변화

배주현¹, 고나영¹, 이현미^{2,*}

¹대구가톨릭대학교 안경광학과, 학생, 경산 38430

²대구가톨릭대학교 안경광학과, 교수, 경산 38430

투고일(2019년 3월 21일), 수정일(2019년 6월 13일), 게재확정일(2019년 6월 24일)

목적: 현재 주로 사용하는 열중합법 또는 광중합법을 사용하지 않고 기존 제작방법과 다른 상온 중합법을 사용하여 가장 최적의 물성을 가지는 조건을 찾아 고기능성, 고생산성 콘택트렌즈의 제작가능성을 알아보고자 한다. **방법:** 콘택트렌즈는 촉매제 *N,N,N',N'*-tetramethyl-ethylenediamine(TMEDA)의 양(3 μ l, 5 μ l, 7 μ l, 9 μ l)과 온도(20°C, 25°C, 30°C)를 조절하여 제작하였다. 동일한 반응물을 이용하여 열중합과 상온중합을 각각 실시하였으며 투광도, 흡수율, 굴절률, 습윤성, 산소투과율 등의 콘택트렌즈 물성을 측정하여 비교 분석하였다. **결과:** 콘택트렌즈의 투광도는 25°C에서 가장 높았으며 촉매제는 3 μ l, 5 μ l를 사용하였을 때에 콘택트렌즈의 광학적 특성이 좋았다. 상온중합한 렌즈와 열중합한 렌즈의 물성을 비교하였을 때 촉매제의 양에 상관없이 상온중합 렌즈의 물성이 향상되었다. 또한 TMEDA 양을 5 μ l 사용했을 때 중합완료시간이 단축되었으며 흡수율, 산소투과도, 습윤성 등 물리적 특성이 가장 많이 향상되었다. **결론:** 상온중합법을 이용한 가장 최적의 물성을 가지는 중합조건을 찾았으며 고기능성 콘택트렌즈의 제조 가능성을 확인하였다.

주제어: 하이드로겔, 상온중합, 열중합, 촉매제, 습윤성, 산소투과성