

## 계면활성제 종류와 물의 양이 상온중합 콘택트렌즈의 특성에 미치는 영향

허성인 · 이현미\*<sup>†</sup>

안경재, \*대구가톨릭대학교 안경광학과

(2025년 9월 1일 접수, 2025년 11월 25일 수정, 2025년 11월 28일 채택)

### Influence of Surfactant Type and Amount of Water on the Characteristics of Room-Temperature Polymerized Contact Lenses

Seong In Heo and Hyun Mee Lee\*<sup>†</sup>

Angyeonjae, Masan 51266, Korea

\*Department of Optometry and Vision Science, Daegu Catholic University, Gyeongbuk 38430, Korea

(Received September 1, 2025; Revised November 25, 2025; Accepted November 28, 2025)

**초록:** 상온중합 조건에서 계면활성제 종류와 물 함량 변화가 콘택트렌즈의 주요 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여, 콘택트렌즈 소재의 설계 기반을 마련하고, 상온중합 기반의 공정 최적화 가능성을 제시하고자 한다. 콘택트렌즈 제작은 친수성 단량체, 개시제, 개시반응 촉진제, 교차결합제를 포함하였으며, 비이온성 계면활성제 4종과 물 함량 변화에 따라 21종을 제작하였다. 열중합 콘택트렌즈에 비해 계면활성제와 물이 포함된 상온중합 콘택트렌즈는 함수율, 산소전달성, 그리고 습윤성이 우수하였다. 동일 계면활성제 사용 시에도 물 함량에 따라 특성이 많이 변하였으며, tween 계열을 사용한 렌즈는 빛 투과도가 낮아서 활용성이 저하되었다. 단백질흡착은 물 30%, P188을 사용하였을 때 가장 낮았다. 이로써 계면활성제와 물 함량이 상온중합 콘택트렌즈의 특성 변화에 많은 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

**Abstract:** This study systematically analyzed the effects of surfactant type and amount of water on the key properties of contact lenses under room-temperature polymerization conditions. This study aims to establish a design foundation for contact lens materials and suggest the possibility of room-temperature polymerization-based process optimization. Contact lenses were fabricated using hydrophilic monomers, initiators, initiation catalysts, and cross-linkers. Twenty-one contact lenses were fabricated using four nonionic surfactants and varying water content. Compared to thermally polymerized contact lenses, room-temperature polymerized contact lenses containing surfactants and water exhibited superior moisture content, oxygen transmissibility, and wettability. Even when the same surfactant was used, the properties varied significantly depending on the water content, and lenses prepared with Tween-based polymers exhibited lower light transmittance, limiting their practical usability. Protein adsorption was lowest when 30% water and P188 were used. This study confirmed that surfactant and water content significantly influence the properties of room-temperature polymerized contact lenses.

**Keywords:** contact lens, room temperature polymerization, surfactant, wettability, oxygen transmissibility.

## 서 론

콘택트렌즈는 시력 교정과 안구 보호뿐 아니라 약물 전달, 자외선 차단, 항균 등의 기능을 수행하는 고기능성 바이오소재로 지속적인 연구가 진행되고 있다.

특히 하이드로젤 콘택트렌즈는 높은 함수율과 우수한 생체 적합성으로 인해 상용화가 활발히 이루어지고 있으며, 그 제조 공정과 소재 설계는 렌즈의 성능에 결정적인 영향을 미친다.<sup>1,2</sup>

하이드로젤 기반 소프트 콘택트렌즈는 높은 함수율, 우수한 착용감, 뛰어난 생체적합성으로 인해 시장의 대부분을 차지하고 있다. 하이드로젤 콘택트렌즈는 주로 2-hydroxyethyl methacrylate(HEMA)나 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine(MPC), N-vinylpyrrolidone(NVP) 등의 친수성 단량체를 기반으로 하며, 이들의 조합과 중합 방식은 최종 렌즈의 투명도, 산소투과도(Dk), 기계적 강도, 단백질 흡착, 표면 습윤성 등에 결정적인 영향을 미친다.<sup>3,4</sup>

기존 콘택트렌즈 제조에는 주로 고온 열중합이나 자외선 중합법이 활용되었으나, 이들 공정은 에너지 소비가 크고, 중합 불균일성, 광개시제에 의한 잔류 독성 및 열에 민감한 생

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
hmlee@cu.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-6668-5864  
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

리활성물질 첨가의 어려움 등의 한계점을 가지고 있다.<sup>5,6</sup> 이러한 점에서 상온중합(room-temperature polymerization)은 저온에서도 안정적인 중합이 가능하며, 기능성 첨가제나 약물의 변성을 최소화할 수 있어 최근 주목받고 있는 공정 기술이다.

상온중합은 열이나 빛 등 다른 에너지를 사용하지 않기 때문에 생산비용이 절감되고 친환경적이며, 열에 의한 고분자 변성이나 약물 구조의 변화가 없으므로 약물전달용 렌즈 등에 적용이 가능하다.

상온중합의 효율성과 최종 물성은 중합 조건, 특히 계면활성제의 종류 및 농도, 물의 함량에 크게 의존한다. 계면활성제는 단량체와 첨가제의 상호혼합성 개선, 미세구조 조절, 산소투과성 향상 등에 기여할 수 있으며, 물의 함량은 렌즈의 기공 구조, 흡수율, 기계적 강도 및 산소투과도 등 주요 물성을 좌우한다. 특히 비이온성 계면활성제는 생체적합성이 우수하고, 단백질 흡착을 저감시켜 콘택트렌즈의 생물학적 안정성 향상에 기여할 수 있는 이점이 있다.<sup>7,8</sup>

상온중합에 사용되는 계면활성제는 음이온성, 양쪽성, 비이온성 등 다양한 것들이 있으며, 그 중에서도 비이온성 계면활성제는 생체적합성이 우수하고, 단백질 흡착을 줄이며, 하이드로젤 구조 내 물리화학적 안정성을 향상시킨다는 점에서 주목받고 있다.<sup>9</sup> 특히 비이온성 계면활성제는 콘택트렌즈에서 수화층을 형성하여 눈물 속의 단백질 부착을 감소시키며 습윤성을 향상 시킨다. 한편, 물 함량은 하이드로젤의 고유 특성인 흡수율과 산소투과도에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수로, 높은 수분 함량은 착용감을 개선하지만 지나치면 기계적 강도를 저해하는 단점이 있다.<sup>10</sup>

콘택트렌즈 중합방법 중에서 열중합과 상온중합은 모두 라디칼 중합반응으로 이루어지지만, 열중합에서는 물이 고온에서 라디칼을 억제하고 중합체 형성 과정 중에 변형과 균열 등으로 중합이 원활하게 이루어지지 않는다. 반면 상온중합은 상온 개시제를 사용하여 저온에서 반응이 느리게 진행되어 물의 영향을 덜 받고 중합이 전체적으로 안정적으로 진행되며 형상이 잘 이루어진다.

계면활성제가 포함된 삼성분계에서 물 함량 변화는 상과 미세구조를 변화시키고 이로 인한 고분자 네트워크 변화로 동역학적 거동이 달라진다.<sup>11</sup>

비이온성 계면활성제인 tween 계열과 poloxamer계열은 화학구조적인 차이로 인해 삼성분계 상평형도에서 나타나는 거동에 차이가 있다. Tween 계열은 단일 사슬구조를 형성하고 가소제 역할을 하는 반면 poloxamer계열은 삼중 블록 공중합체를 형성하여 네트워크안정화가 이루어진다.

상온중합법으로 제조하는 콘택트렌즈는 열중합법과 다르게 계면활성제를 사용한다. 지금까지 계면활성제의 양에 따른 연구는 이루어졌지만,<sup>8</sup> 계면활성제 종류와 물의 함량에 따른 특성 변화는 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 상온중합 조건에서 다양한 계면활성

제의 종류와 물 함량 변화가 하이드로젤 콘택트렌즈의 주요 물성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 보다 우수한 생체적합성과 기능성을 갖는 콘택트렌즈 소재의 설계 기반을 마련하고, 상온중합 기반의 공정 최적화 가능성을 제시하고자 한다.

상온중합 방법으로 제작된 콘택트렌즈의 계면활성제 종류와 물 함량 변화에 따른 특성을 파악하기 위해 광투과율, 흡수율, 산소전달률, 압축강도, 접촉각 등의 물리적 성질을 측정하고 단백질 흡착량과 표면분석을 하고자 한다.

## 실 험

**시약 및 재료.** 하이드로젤 제조에 사용한 친수성 단량체인 2-hydroxyethyl methacrylate(HEMA), 교차결합제인 ethylene glycol dimethacrylate(EGDMA), 라디칼을 생성하기 위한 열 개시제인 azobisisobutyronitrile(AIBN), 산화환원 개시제인 ammonium persulfate(APS), 그리고 APS의 개시반응 촉진제인 *N,N,N',N'*-tertamethylethylenediamine(TMEDA)를 사용하였다.

계면활성제는 비이온성 계면활성제로서 4종 즉, tween 20(T20), tween 80(T80), poloxamer 188(P188), poloxamer 407(P407)를 사용하였다. HEMA와 AIBN은 Junsei Chemical(Japan)에서 구입하였으며, 그 외 모든 시약은 Sigma-Aldrich사(USA)에서 구입하였다.

물은 pure power(human)장비를 사용하여 초순수를 제조하였으며, 콘택트렌즈를 위해 -3.00D, B.C 8.6 몰드를 사용하였다.

**시료 제작.** 상온중합 콘택트렌즈 제작을 위한 시료의 구성비는 Table 1에 제시하였다. 계면활성제는 10%로 고정하고 물의 함량은 10-50%까지 10%씩 증가시켰으며, HEMA는 주어진 구성비로 혼합하였다. 교차결합제인 EGDMA와 개시제인 APS는 0.5%를 사용하였다. 단량체 혼합액은 산소 제거를 위해 10분간 질소 버블링한 후, 개시반응 촉진제인 *N,N,N',N'*-tertamethylethylenediamine(TMEDA)를 2  $\mu$ L를 넣어 주형주조법으로 1시간 동안 상온에서 중합하였다. 중합 후, 렌즈를 분리하고 미반응 물질 제거를 위해 초순수로 2회 세척하였다.

비교군으로 열에너지를 사용한 열중합 콘택트렌즈인

**Table 1. Composition of Contact Lenses According to the Amount of Water (wt%)**

Sample	HEMA	Water	Surfactant
W10	80	10	
W20	70	20	
W30	60	30	10
W40	50	40	
W50	40	50	

\*EGDMA and APS were added by 0.5% of HEMA.

polymacon 렌즈는 HEMA 99%를 사용하였으며 EGDMA와 열 개시제인 AIBN을 각각 0.5%씩 사용하였다.

계면활성제는 비이온성인 T20, T80, P188, 그리고 P407과 같은 4종류를 사용하였다. 계면활성제의 함량은 기존 연구에서 계면활성제의 종류와 양의 변화에 따른 물성 연구 결과,<sup>8</sup> 10%의 계면활성제를 사용한 시료들이 산소전달률이 가장 높았으며, 습윤성도 비교적 높게 나타났기 때문에 본 연구에서는 계면활성제를 10%로 고정하였다. 따라서, 물 함량에 따른 상온중합 콘택트렌즈의 특성을 알아보기 위하여 4종류의 계면활성제에 대해 각각 물 함량을 5단계로 변화시켜 20종과 열중합인 polymacon 1종을 제작하여 총 21종의 콘택트렌즈를 제작하였다.

물 함량 변화에 따른 구성성분비에 따라 다음과 같이 시료명을 정하였다. 즉, 계면활성제로 Tween 20을 사용하고 물 함량이 10%일 경우, T20W10으로 명명하였으며 물 함량이 20%이면 T20W20으로 명명하였다. 그리고 poloxamer 188을 사용하고 물 함량이 10%이면 P188W10으로 명명하였다.

**콘택트렌즈의 물리적 특성 평가.** 광투과도 측정은 인산완충용액에 24시간 동안 수화 후 UV-Vis spectroscopy(Cary 60 UV-Vis, Agilent Technologies)를 사용하였으며, 함수율(WH<sub>2</sub>O) 측정은 ISO 18369-4:2006을 기준으로 gravimetric method를 사용하여 측정하였다.

압축강도(N/cm<sup>2</sup>)는 만능시험기(AGS-X<sub>20N</sub>, SHIMADZU)를 사용하여 측정하였으며, 콘택트렌즈는 측정하기 전 인산완충용액에 24시간 동안 수화시켰다. 만능시험기의 지그는 콘택트렌즈를 고정시키기 위해 별도로 제작하였으며 환봉을 사용하여 시험속도 10 mm/min 조건에서 측정을 하였다.

산소전달률(DK/t)은 ISO 18369-4:2006을 기준으로 polarographic method를 사용하였다. 콘택트렌즈의 두께 측정은 비접촉식 장비인 optical thickness gauge(Bristol)를 사용하였으며 O<sub>2</sub> permeometer model 201T(CREATECH)로 측정된 전류값을 측정하여 DK/t 값을 계산하였다. 24시간 동안 실온에서 수화된 렌즈를 눈의 온도와 같은 35±0.5 °C로 항온항습기 내부에서 최소 2시간 이상 처리한 후 항온항습기 내부의 cell에 고정시켜 전류값을 측정하였다.

접촉각은 수화된 콘택트렌즈를 sessil drop법으로 DSA 100(KRUSS, Germany)를 사용하였으며 10초간 50번 측정하여 좌우 평균값을 제시하였다.

**단백질 정량 분석.** 단백질 농도를 정량하는 방법은 bovine serum albumin(BSA) 5 mg/mL가 포함된 용액에 콘택트렌즈를 넣은 후 35 °C에서 24시간 동안 단백질을 침착시켰다. 단백질이 침착된 렌즈를 3% SDS용액에 콘택트렌즈를 넣고 95 °C로 15분 동안 가열한 후 3분간 vortex로 흔들어 단백질을 렌즈로부터 분리하였다. 콘택트렌즈에 흡착되었던 단백질의 농도를 측정하기 위하여 280 nm에서 흡광도를 측정하였다. 단백질 흡착량은 다음의 공식에 의해 산출하였다.

$$Q = \frac{VC}{m} \tag{1}$$

*Q* is protein adsorption amount

*V* is the volume of the solution

*C* is the protein concentration in the solution

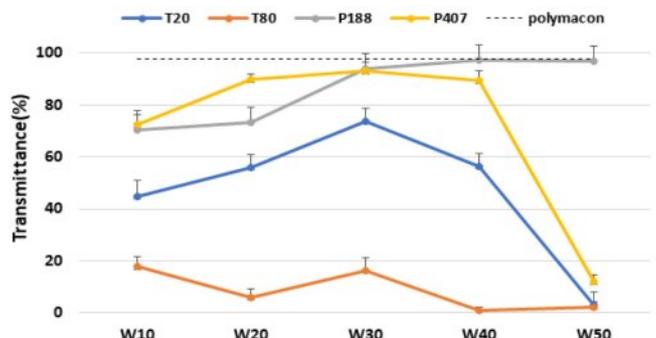
*m* is the mass of the hydrated test specimens

**표면 분석.** 콘택트렌즈의 표면을 분석하기 위해 주사전자현미경(FE-SEM)을 사용하였다. 표면 분석을 위한 시료는 콘택트렌즈를 JFD-310(JEOL)으로 48시간 동안 동결건조 하고, 그 다음 Sputter coater 108 auto를 이용한 금코팅 후 JSM-6335F(JEOL)을 사용하여 ×1000배율로 촬영하였다. T20, T80, P188, 그리고 P407 각각의 계면활성제에 대해 물 함량을 10%에서 50%까지 변화를 주어 만든 시료에 대해 표면 분석하였다.

### 결과 및 토론

**계면활성제 종류와 특성 변화. 광투과성(Transmittance):** 투광도는 콘택트렌즈가 갖추어야 할 가장 근본적이며 중요한 특성이다. 4종의 계면활성제 종류와 물 함량 변화에 따른 투광도를 Figure 1에 제시하였다. 계면활성제와 물이 포함된 상온중합 콘택트렌즈의 투광도는 열중합 polymacon 렌즈의 97.56%에 비해 계면활성제의 종류 및 물의 함량과 상관없이 대체로 낮은 값을 나타내었다. T20과 P407의 계면활성제를 사용할 경우, 물의 함량이 30%일 때 가장 높게 나타났으며, 그 이상으로 증가해도 투광도는 오히려 더 감소하는 경향성을 보였다.

특히 50%의 물이 포함될 경우, T20, T80, 그리고 P407의 계면활성제를 사용한 렌즈는 투광도가 20% 미만으로 빛이 거의 투과되지 않았으며, 콘택트렌즈로서의 활용성이 낮았다. Poloxamer 계열 계면활성제는 tween 계열보다 투광도가 높게 나타났다. P188은 물 함량이 30% 이상에서는 투광도가 모두 90% 이상으로 가장 높게 나타났으며, 물함량 40%, 50%인



**Figure 1.** Transmittance of contact lenses according to surfactant type and amount of water.

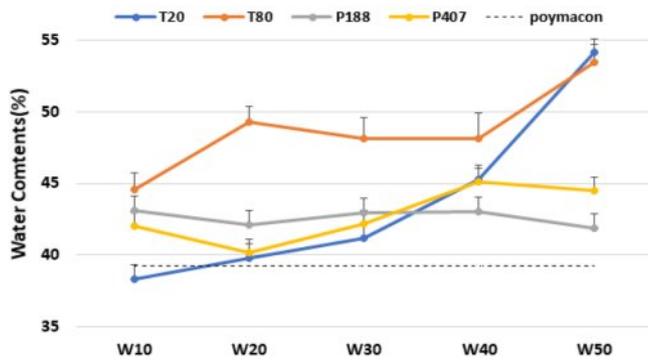


Figure 2. Water content of contact lenses according to surfactant type and amount of water.

경우에는 기존의 polymacon과 동일한 수준의 매우 높은 투광도를 보였다. P407이 포함된 20-40%의 물 함량을 가진 렌즈의 경우, ANSI Z80.20의 광투과율 기준인 88% 이상으로 콘택트렌즈의 투광도 기준을 만족하였다.

Poloxamer 계열은 비이온성 트리블록 공중합체라는 독특한 구조를 형성하는 반면 tween 계열은 비교적 단순한 단일 블록구조를 형성한다. 따라서 poloxamer 계열은 tween 계열보다 미셀크기가 작아 콘택트렌즈의 투명성 유지에 더 유리하며, 수용액 상태에서 50 nm에서 100 nm의 미셀을 형성하므로<sup>12</sup> 가용화 능력이 좋아서 tween 계열보다는 투명한 특징을 보이는 것으로 판단된다.

**함수율(Water Contents):** 함수율은 콘택트렌즈의 착용감에 영향을 미치며, 다른 물성에 미치는 많은 영향을 미친다. 다양한 계면활성제와 다양한 물 함량을 가진 상온중합 콘택트렌즈의 함수율 측정 결과는 Figure 2에 나타내었다. T20W10을 제외한 모든 상온 중합 콘택트렌즈의 함수율은 열중합 polymacon의 39.25%에 비해 높게 나타났다. 계면활성제 T20이 포함된 콘택트렌즈는 물 함량이 증가함에 따라 함수율도 점차 증가하였다. Tween 계열이 포함된 렌즈에서는 물 함량이 50%일 때 매우 높은 함수율을 나타내었다. P188은 물 함량 증가에 따라서 최소 41.91%에서 최대 43.13%로 함수율 변화를 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았다. P407은 P188과 같이 물의 함량 변화에 따른 콘택트렌즈 함수율의 변화와 무관하였다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 tween 계열은 분자량이 비교적 작고 구조가 단순하여 HEMA 고분자 사슬 사이에 끼여들어 가스체 역할을 하여 분자내 네트워크가 더 유연하고 느슨해지게 함으로써 함수율이 향상되는 반면, poloxamer계열은 친수성 PEO 블록이 HEMA의 수산기와 수소결합을 통하여 고분자 네트워크가 강해져서 구조적으로 안정된 상태를 유지하기 때문으로 판단된다.

**압축강도(Compressive Strength):** 압축강도의 측정결과는 Figure 3에 제시하였다. 모든 시료에서 polymacon의 1.357 N/cm<sup>2</sup> 보다 압축강도가 낮게 나타났다. T20의 압축강도는 물

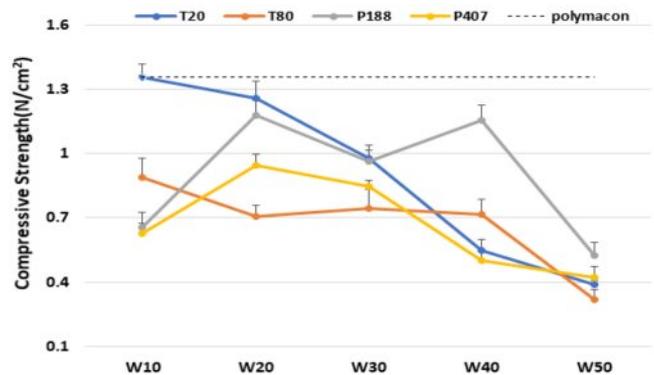


Figure 3. Compressive strength of contact lenses according to surfactant type and amount of water.

함량이 증가함에 따라 지속적으로 감소하여 물이 50% 포함된 시료에서는 0.390 N/cm<sup>2</sup>으로 감소되었다. 그러나 T80의 압축강도는 물 함량 증가에 따라 0.889 N/cm<sup>2</sup>에서 0.318 N/cm<sup>2</sup>로 감소하여 T20에 비해 급격한 변화는 보이지 않았다.

P188의 압축강도는 물 함량이 50%일 때 0.523 N/cm<sup>2</sup>로 가장 낮았으며 물 함량이 20%일 때 1.180 N/cm<sup>2</sup>로 가장 높게 나타났다. P407의 압축강도는 물 함량 50%일 때 0.421 N/cm<sup>2</sup>로 가장 낮았으며 물 함량이 20%일 때 가장 높게 나타났다. Poloxamer 계열 계면활성제 첨가 시 압축강도는 물 함량 변화에 Tween 계열보다 영향을 덜 받았으며 물 함량이 20%일 때 가장 높았으며 물 함량 50%일 때 가장 낮았다.

물 함량이 증가함에 따라 압축강도가 낮아지는 현상은 물 함량 증가 시 함수율이 증가되고, 콘택트렌즈 내부의 고분자간 거리가 멀어지면서 밀도가 저하되기 때문에 나타나는 현상<sup>13</sup>으로 판단된다. 콘택트렌즈 재료의 강도는 렌즈 취급하는 동안 렌즈의 손상에 대한 내구성과 관련하여 중요한 고려 사항이지만, 실제 필요한 강도에 대한 명확한 기준은 없다. 하지만 재질들을 비교해 볼 수 있는 유용한 정보를 제공해 준다.

**산소전달율(Oxygen Transmissibility):** 산소는 눈의 각막 대사에 필수 요소로서 콘택트렌즈의 재질은 산소 전달성에

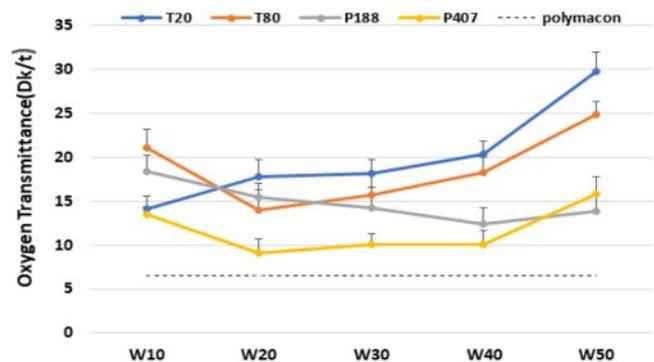


Figure 4. Oxygen transmittance of contact lenses according to surfactant type and amount of water.

많은 영향을 미친다. 따라서 계면활성제와 물이 포함된 상온중합 콘택트렌즈의 산소전달률을 측정하였으며 Figure 4에 결과를 제시하였다. 모든 상온중합 시료는 열중합 polyacon에 비해 높은 산소전달률을 나타내었으며, 특히 물 함량 50%이며 tween 계열 계면활성제를 사용한 렌즈는 매우 높은 값을 보였다. T20의 산소전달률은 물 함량이 증가함에 따라 지속적으로 증가하여 물 50%일 때에는 29.84 Dk/t로 polyacon 렌즈의 6.54 Dk/t보다 3.56배 증가하였다. T80의 산소전달률은 W10일 때는 21.16으로 높게 나타났지만, 물 함량이 20%에서는 급격히 떨어져서 14.02 Dk/t로 되었다가 다시 물의 양을 증가시키기에 따라 T20과 같은 경향성을 보였다.

P188 계면활성제를 사용한 경우, 10%의 물이 포함된 P188W10의 산소전달률은 18.39 Dk/t로 가장 높으며 물 함량이 40%일

때 12.40으로 점차 감소하였다가 물 함량이 50%일 때 13.94 Dk/t로 다시 증가하였다. P407 계면활성제를 사용한 시료에서는 물 함량 증가에 따라 T80과 비슷한 양상을 보였다.

**습윤성(Wettability):** 접촉각은 습윤성의 척도로서 값이 작을수록 습윤성이 우수하며 본 연구에 사용한 시료에 대한 접촉각은 Figure 5에 제시하였다. 상온중합 콘택트렌즈는 계면활성제의 친수성기 도입으로 인해 polyacon의 58.1°보다 접촉각이 모두 낮게 나타나 습윤성이 더 좋은 것으로 나타났다. 그리고 물 함량 변화에 영향을 받지 않았다. T20은 물 함량이 30%일 때 5.6°로 가장 낮았으며 물 함량이 40%일 때 24.3°로 가장 높았다. T80은 물 함량에 따른 접촉각 변화가 거의 없으며 T20에 비해 접촉각이 높아서 습윤성이 낮게 나타났다.

계면활성제는 습윤성을 높이는 주요 인자로서 본 연구에 사용한 4종의 계면활성제 중에서도 T20은 접촉각이 가장 낮아서 습윤성이 우수한 것으로 나타났다. 일반적으로 계면활성제는 미셀을 형성하는 성질 때문에 수용액 상태에서 HEMA의 소수성기는 미셀 내부로 향하게 되면서 T20의 결합력이 좋은 것으로 판단된다. 또한 T20이 T80보다 습윤성이 좋은 것은 T20의 친수성지용성균형(Hydrophilic lipophilic balance, HLB)이 T80보다 높아서 친수성 표면을 형성하였기 때문이다. 또한 T20은 분자량이 작고 흡수면적이 작아서 기질의 습윤성이 우수하다.<sup>14</sup>

P188을 사용한 렌즈는 물 함량이 20%일 때 26.3°로 접촉각이 가장 낮았으며, P407의 경우 물 함량이 20%일 때에 가장 높았으며, 40%일 때 19.5°로 가장 낮았다. P407 계면활

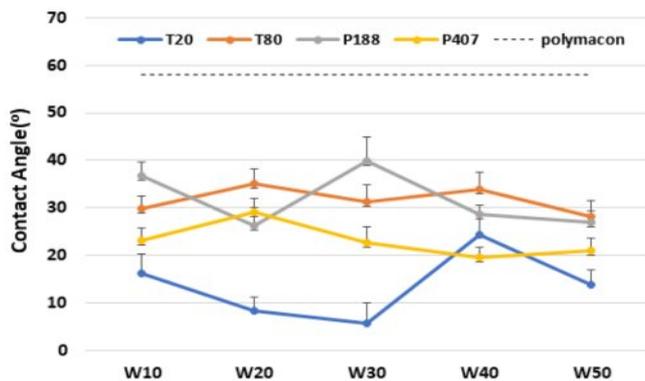


Figure 5. Contact angle of contact lenses according to surfactant type and amount of water.

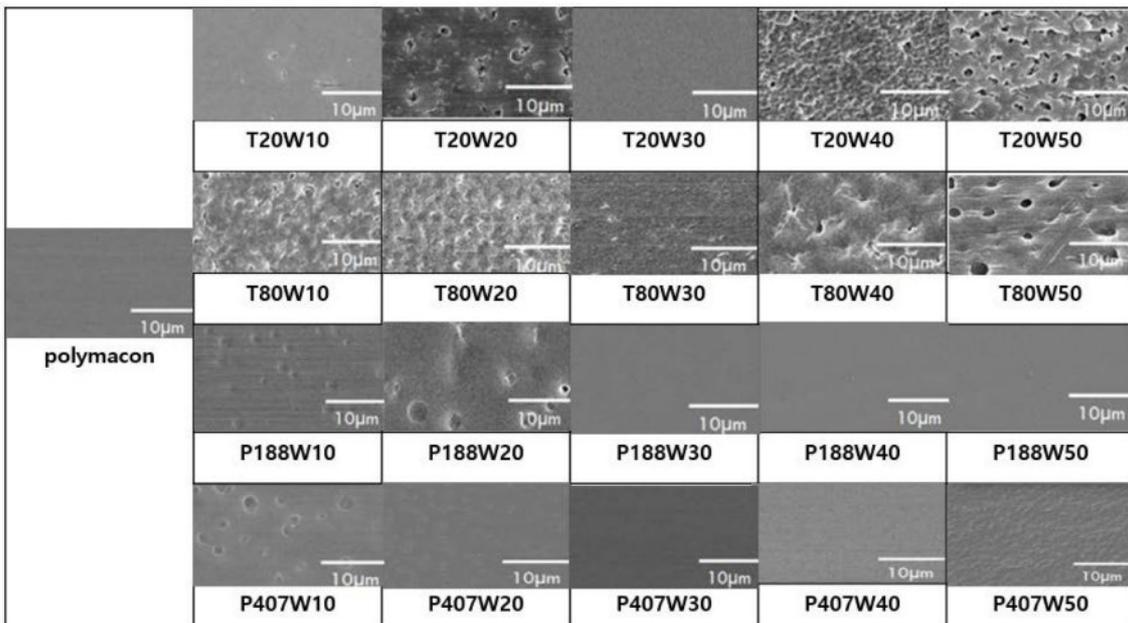


Figure 6. Scanning electron microscope (SEM) of contact lenses according to surfactant type and amount of water.

성제를 사용하면, polyacon에 비해 접촉각이 약 3배 감소되어 습윤성이 우수한 것으로 나타났다.

**계면활성제 종류와 물 함량에 따른 콘택트렌즈의 표면분석.** 계면활성제의 종류와 물의 함량이 콘택트렌즈의 표면에 어떤 영향을 미치는지를 파악하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석하였으며, 그 결과를 Figure 6에 나타내었다.

Tween20이 포함된 콘택트렌즈의 표면을 보면, T20W30은 polyacon과 유사하게 표면에 기공이 거의 보이지 않았으나 나머지 시료에서는 모두 기공이 보였다. T20W50은 기공의 크기가 크고 기공의 수도 많아서 함수율, 산소전달률이 높게 나타났으며, 접촉각이 낮아 습윤성이 좋았다. 그러나 콘택트렌즈의 필수 요소인 투광도가 매우 낮아서 콘택트렌즈에 적용하기에는 어려움이 있다.

T80은 T20보다 다양한 크기의 기공을 보였다. 이로 인해 T80의 내부에 물이 많이 포함되었기 때문에 T20보다 T80의 함수율이 높게 타났다. T80W20과 T80W30의 경우 기공의 수가 적어서 산소투과도가 낮게 나타났으며 T80W10과 T80W50의 경우 기공의 크기는 다르지만 기공끼리의 연결성이 좋아 산소투과도가 높게 나타났다.

P188 계면활성제를 사용한 P188W30, P188W40, P188W50은 표면은 매끈하였으며, 투광도가 높게 나타났다. 투광도가 낮은 시료는 기공이 많이 존재하였으며 산소투과도가 높게 나타났다. P407을 사용한 시료에서는 물 함량이 20-40%인 P407W20, P407W30, 그리고 P40740의 표면은 매끈하나 P407W10, P407W50은 기공이 존재하였다. 본 연구에 사용된 시료를 분석해 보면 렌즈의 표면에 기공이 많고 크면 투광도가 낮고 기공이 적고 매끈하면 투광도가 높게 나타났다. 콘택트렌즈의 기공은 빛의 산란뿐만 아니라 렌즈의 습윤성, 단백질 흡착 등 착용감에 영향을 주며 광학적 특성에도 영향을 미친다. 일반적으로 SEM 표면에 기공이 없고 균질성이 좋으면 투광도가 높다.

물 함량 30%일 때에 P188과 P407의 두 시료 모두 표면이 매끈하며 물 함량이 30%보다 낮을 때는 P188의 표면이 더 거칠고 기공이 많으며 물 함량이 30%보다 높을 때는 P407의 표면이 더 거칠고 기공이 더 많았다. 콘택트렌즈의 표면 분석한 결과, poloxamer 계열은 tween 계열보다 투광도가 높아서 표면이 매끄러운 특징을 보였다.

**계면활성제 종류와 물 함량에 따른 콘택트렌즈의 단백질 흡착.** 물 함량 변화에 따른 물리적 특성을 평가한 결과 상대적으로 우수한 결과를 보였던 시료는 물 함량이 30%일 때이었다. 그래서 단백질 정량은 비교적 좋은 물리적 특성을 지닌 30%의 물이 포함된 시료를 대상으로 각기 다른 4종의 계면활성제를 첨가한 콘택트렌즈에 대한 단백질 흡착량을 분석하였으며 Figure 7에 결과를 제시하였다.

열융합의 polyacon에 비해 모든 상온융합 렌즈는 단백질 흡착량이 낮았다. T20과 P188이 포함된 렌즈의 단백질 흡착

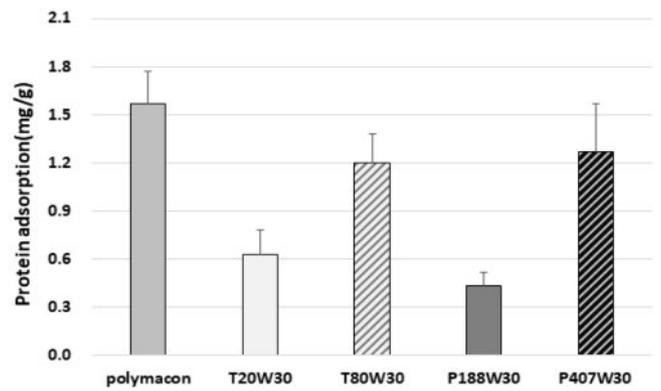


Figure 7. Protein adsorption amount of contact lenses with water 30%.

량은 매우 낮은 것으로 나타났으며, 특히 P188W30은 0.43 mg/g로 가장 낮았다. T20W30은 0.63 mg/g으로 T80W30의 1.20 mg/g 보다 단백질 흡착정도가 50% 정도 낮았다. 한편 P188W30은 P407W30의 1.27 mg/g로 3배 가량 낮게 나타났다.

콘택트렌즈에 단백질이 침착되는 것은 눈물 성분의 영향이지만, 렌즈 재료의 화학적 특성에 의해 변화된다.<sup>15</sup> 단백질의 침착의 요인은 물질의 조성비,<sup>16</sup> 함수율,<sup>17</sup> 기공 크기,<sup>18</sup> 표면 거칠기,<sup>18</sup> 소수성,<sup>18</sup> 표면의 전하<sup>19</sup> 등에 따라 차이가 있다. 하이드로젤 콘택트렌즈의 알부민 흡착에는 매우 많은 요인이 복합적으로 작용한다.

## 결론

상온융합 콘택트렌즈 제조 시, 계면활성제 종류와 물의 함량이 콘택트렌즈 물성, 표면분석, 단백질 흡착 등에 미치는 효과를 살펴보았다. 제조한 시료 21종 중에서 기능이 우수한 렌즈는 물 함량이 30% 이상이고 poloxamer 계열 계면활성제를 포함한 콘택트렌즈이었으며, 투광도, 습윤성, 산소전달률, 그리고 단백질 흡착저하 등과 같은 콘택트렌즈가 갖추어야 할 특성에서 모두 높은 값을 보였다. 따라서 상온융합 콘택트렌즈 제조 시에 계면활성제 종류와 물의 함량이 콘택트렌즈의 특성에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하였다.

**감사의 글:** 본 연구는 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업(No. 2021R1F1A106332211)으로 연구되었습니다.

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참고문헌

1. Sankaridurg, P.; Lazon, J. P.; Holden, B. The Future of Silicone Hydrogel. *Eye Contact Lens*, **2013**, 39, 125-129.

2. Maulvi, F. A.; Soni, T. G.; Shah, D. O.; A Review on Therapeutic Contact Lenses for Ocular Drug Delivery. *Europe PMC* **2016**, 23, 3017-3026.
3. Tran, N. P. D.; Yang M. C. Synthesis and Characterization of Silicone Contact Lenses Based on TRIS-DMA-NVP-HEMA Hydrogels. *Polymers* **2019**, 11, 944-956.
4. Musgrave, C. S. A.; Fang, F. Contact Lens Materials: A Materials Science Perspective. *Materials (Basel)*. **2019**, 12, 261-295.
5. Williams, C. G.; Malik, A. N.; Kim, T. K. Manson, P. N.; Elisseeff, J. H. Variable Cytocompatibility of Six Cell Lines with Photoinitiators Used for Polymerizing Hydrogels and Cell Encapsulation. *Biomaterials*. **2005**, 26, 1211-1218.
6. Tomal, W.; Orty, J. Water-Soluble Photoinitiators in Biomedical Applications. *Polymers* **2020**, 12, 1073-1102.
7. Bae, J. H.; Ko, N. Y.; Lee, H. M. Physical Properties of Contact Lens according to Room Temperature Polymerization Conditions. *J. Korean Ophthalmic Opt. Soc.* **2019**, 24, 231-237.
8. Heo, S. I.; Lee, H. M. Changes in Physical Properties Depending on the Type of Surfactant in the Manufacture of Energy-saving Contact Lenses, *J. Korean Ophthalmic Opt. Soc.* **2022**, 27, 7-13.
9. Guan, A.; Li, Z.; Phillips, K. S. The Effects of Non-ionic Polymeric Surfactants on the Cleaning of Biofouled Hydrogel Materials. *Biofouling* **2015**, 31, 689-697.
10. Kim, E.; Saha, M.; Ehrmann, K. Mechanical Properties of Contact Lens Materials. *Eye Contact Lens*, **2018**, 44, 1-9.
11. Judy, C.; Gamal, M. M. E. M.; Jennifer, P. C.; Raid, G. A. Phase Transition Water-in-oil Microemulsions as Ocular Drug Delivery Systems: *In Vitro* and *In Vivo* Evaluation. *Int. J. Pharm.* **2007**, 328, 65-71.
12. Chiappetta, D. A.; Sosnik, A. Poly(ethylene oxide)-poly(propylene oxide) Block Copolymer Micelles as Drug Delivery Agents: Improved Hydrosolubility, Stability and Bioavailability of Drugs. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* **2007**, 66, 303-317.
13. Phillips, A. J.; Speedwell, L. *Contact Lenses, 5<sup>th</sup> edition*; Elsevier: Amsterdam, 2007; pp 225-227.
14. Kim, C.-H. Detergency and Liquid Wetting/Retention Properties of Soiled Polyester/Cotton(65/35) Cloth in Nonionic Surfactant Solutions. *Textile Coloration and Finishing*. **2011**, 23, 140-145.
15. Willcox, M.; Pearce, D.; Tan, M.; Demirci, G.; Carney, F. Contact Lenses and Tear Film Interactions. *Lacrimal Gland, Tear Film, and Dry Eye Syndromes 3*. **2002**, 879-884.
16. Atala, A.; Lanza, R.; Thomson, J. A.; Nerem, R. Principles of *Regenerative Medicine*; Elsevier/Academic: Boston, 2008; pp 579-742.
17. Keith, D.; Hong, B.; Christensen, M. A. Novel Procedure for the Extraction of Protein Deposits from Soft Hydrophilic Contact Lenses for Analysis. *Curr. Eye Res.* **1997**, 16, 503-510.
18. Castillo, E.; Koenig, J.; Andersen, J.; Lo, J. Characterization of Protein Adsorption on Soft Contact Lenses: I. Conformational Changes of Adsorbed Human Serum Albumin. *Biomaterials* **1984**, 5, 319-325.
19. Soltys-Robitaille, C. E.; Ammon, D. M.; Valint, P. L.; Grobe Iii, G. L. The Relationship between Contact Lens Surface Charge and *In Vitro* Protein Deposition Levels. *Biomaterials* **2001**, 22, 3257-3260.

**출판자 공지사항:** 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.