

겔화 반응 시간 조절을 통한 상온에서의 폴리우레탄 폼 합성

이호준¹ · 오충익¹ · Chi Hao Liow · 김소연 · 한영준 · 오민석* · 주형욱* · 장수호* · 홍승범[†]

한국과학기술원 신소재공학과, *(주)풍산 기술연구원
(2020년 9월 4일 접수, 2020년 10월 22일 수정, 2020년 10월 26일 채택)

Synthesis of Polyurethane Foam at Room Temperature by Controlling the Gelling Reaction Time

Hojoon Lee¹, Chungik Oh¹, Chi Hao Liow, Soyeon Kim, Youngjoon Han, Min-Seok Oh*, Hyeong-Uk Joo*,
Soo-Ho Chang* and Seungbum Hong[†]

Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea

*Poongsan R&D Institute, Kyung Ju, 38026, Republic of Korea
(Received September 4, 2020; Revised October 22, 2020; Accepted October 26, 2020)

Abstract

We developed a processing recipe to synthesize flexible polyurethane foam with a pore size of $335 \pm 107 \mu\text{m}$. The gelling reaction time was varied from 0 to 30 minutes and the physical properties of the foam were evaluated. The gelling reaction where the polypropylene glycol and tolylene 2,4-diisocyanate (TDI) were reacted to form urethane prepolymer, proceeded until a chemical blowing agent, deionized water, was introduced. Fourier transform infrared (FT-IR) spectra showed that the composition of the foam did not change but the foam height reached a peak value when the gelling reaction time was 10 minutes. We found that increasing the gelling time lessened the coalescence and helped the formation of cells. Lastly, the repeatability of polyurethane foam was confirmed by one-way analysis of variance (ANOVA) by synthesizing ten identical polyurethane foams under the same experimental conditions, including the gelling reaction time. Overall, the new time parameter in-between the gelling and blowing reactions will give extra stability in manufacturing identical polyurethane foams and can be applied to various polyurethane foam processes.

Keywords: Polyurethane foam, Prepolymer method, Gelling time

1. 서 론

폴리우레탄은 1849년 독일의 Wurtz와 Hoffman이 최초로 하이드록실기 화합물(hydroxy compound)과 이소시아네이트(isocyanate)의 반응을 발표하면서 세상에 처음으로 알려지게 되었고 이후 1937년 Otto Bayer에 의하여 상업적으로 개발된 이후 그 사용량이 폭발적으로 늘었다[1-3].

폴리우레탄 폼(polyurethane foam)은 우레탄우레아(urethaneurea)로 이루어진 고분자 물질로서 원재료의 종류와 혼합되는 순서의 변화함으로써 그 특성이 민감하게 변화하기 때문에 목적에 맞게 폼, 고무, 섬유, 접착제, 도료 등 다양한 분야에 사용되고 있다[4,5]. 그중 고에너지 화합물(e.g. nitroamine)과의 결합을 통해 폴리우레탄을 바인더로 하

는 복합화약 중합체(polymer bonded explosive)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 최근에는 무거운 금속 탄피를 대체할 수 있는 소재로서 발포형 추진제(foamed propellant) 개발이 진행 중이다[6-8].

폴리우레탄 폼은 크게 겔화 반응과 발포 반응을 통해 만들어진다. 겔화 반응은 수산기(hydroxyl groups)를 가진 폴리올(polyol)과 이소시아네이트기(isocyanate groups)를 가진 디이소시아네이트(diisocyanate) 분자의 부가중합반응을 통해 우레탄 결합(urethane linkage)을 생성하고 발포 반응은 이소시아네이트기의 반응에 의해 형성된 카르바미산(carbamic acid)에서 이산화탄소가 방출되고 생성된 아민이 다른 이소시아네이트기와 반응하여 우레아를 생성한다[9].

제조 방법은 크게 원 샷(one-shot) 그리고 프리폴리머(prepolymer) 방법으로 분류되는데, 원 샷 방법은 모든 재료를 동시에 혼합한 후 몰드(mold)에 넣어 모든 반응이 동시에 시작되는 반면, 프리폴리머 방법은 폴리올과 디이소시아네이트를 우선 혼합해 추가 재료를 투입하기 때문에 반응이 순차적으로 진행된다[10]. 원 샷의 경우에는 프리폴리머 방법에 비해 공정이 간단하다는 장점이 있지만, 모든 화학반응열이 한꺼번에 배출되기 때문에 공정 온도가 높아지며[11], 본 연구진이 수

[†] Corresponding Author: Korean Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Department of Materials Science and Engineering, Daejeon 34141, Republic of Korea

Tel: +82-350-3324 e-mail: seungbum@kaist.ac.kr

¹ These authors contributed equally.

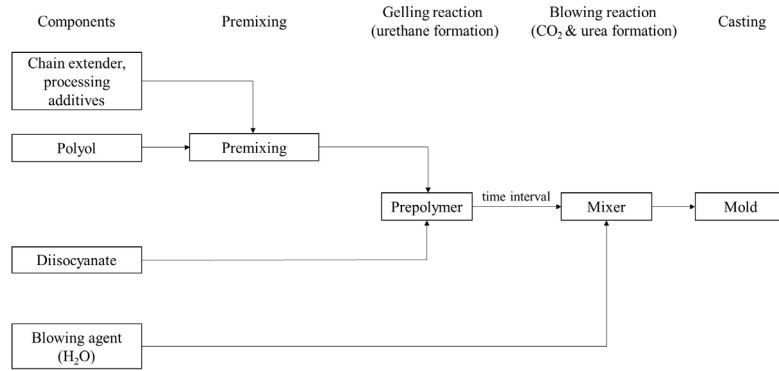


Figure 1. Schematic diagram of polyurethane foam synthesis method.

행해본 결과 재현성 확보가 어렵다는 단점이 있었다. 폴리우레탄 폼을 만드는 다양한 방법들이 보고되었음에도 불구하고 원 샷 제조법의 경우 재현성 확보가 어려웠으며, 프리폴리머 제조법의 경우 각 공정의 시간차에 대한 구체적인 언급이 없었다. 특히, 화학적 발포제인 물을 마지막에 첨가함으로써 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차를 활용한 폴리우레탄 폼 제작법은 아직까지 보고되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차라는 새로운 공정 변수를 추가해 폴리우레탄 폼을 제작했고 시간차가 폼의 형태, 기공 크기 및 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 이러한 공정 변수 제어를 바탕으로 동일한 폴리우레탄 폼을 제작해 보다 안정하고 재현성 있는 폴리우레탄 폼 성형기술을 확보하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험재료

실험에 사용된 폴리올은 polypropylene glycol이며 Sigma Aldrich사의 81380 제품을 사용하였다. 디이소시아네이트는 tolylene 2,4-diisocyanate, 80% tech.이며 Acros Organics사의 202500010 제품을 사용하였다. 계면활성제는 피유택(주)사의 B-8404 제품을 사용하였고 촉매는 dibutyltin dilaurate으로 Sigma Aldrich사의 291234 제품을 사용하였다. 가교제는 triethanolamine로서 Sigma Aldrich사의 90279 제품을 사용하였고 물리적 발포제는 cyclopentane로 Sigma Aldrich사의 459747 제품을 사용하였다. 마지막으로 화학적 발포제는 deionized water를 사용하였다.

2.2. 폴리우레탄 폼의 제조

본 연구에서 사용한 폴리우레탄 폼 제조 공정 모식도를 Figure 1에 표시하였다. 공정 과정은 크게 재료(components), 예비 혼합(premixing), 겔화 반응(gelling reaction), 발포 반응(blowing reaction) 그리고 주조(casting)의 5단계로 나뉘었다. 예비 혼합 단계에서는 폴리올, 가교제, 촉매, 물리적 발포제, 계면활성제 등을 500 mL 컵에 순서대로 섞은 후 Daihan사의 High-Speed Digital Overhead Stirrer (HS-30D) 모델의 교반기로 500 rpm에서 20 s 간 교반하였다. 그 다음, 폴리올 용액에 계산된 양의 TDI (tolylene-2,4-diisocyanate)를 투여한 후 500 rpm에서 20 s 간 교반한 후 일정 시간만큼 상온에 놓아두었다. 그 후 계산된 양의 탈이온수를 투여하였고 교반기의 속도를 500 rpm으로 하여 20 s 간 교반하였다. 폴리우레탄 폼 물성 분석은 제조 후 상온에서 최소 24 h 지난 후 절단하여 평가하였다. 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차가 0

min일 경우 탈이온수를 폴리올 혼합 용액에 미리 섞은 후 TDI를 투입하였다. 재현성과 반복성을 확인하기 위한 실험에서는 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차를 10 min으로 고정하고 계면활성제가 첨가된 상태에서 동일한 실험 조건으로 폴리우레탄 폼을 10번 제작하였다.

2.3. 폼 성분, 높이 및 기공 크기 분석

성분 분석은 Thermo Fisher Scientific Instrument사의 Nicolet iS50 모델의 푸리에변환 적외선 분광기(Fourier transform-Infrared spectrometer)를 사용하였다.

폼의 높이는 몰드 내에 형성된 폼을 측면에서 사진촬영을 하여 측정하였다. 컵의 높이를 기준으로 하여 Photoshop 소프트웨어를 활용하여 폼의 최고 높이를 측정하였다.

폼의 미세 구조는 SEM (scanning electron microscope, Hitachi S4800)을 사용하여 사진을 얻고 각 시료의 폼 중앙 부분에서 1 cm (L), 2 cm (W), 0.5 cm (T) 크기의 시료를 채취한 후 절단면을 스퍼터를 이용해 백금 코팅(platinum sputter coating)한 후 10.0 kV의 가속전압과 35의 배율로 관찰하였다. 기공 면적은 Adobe Photoshop 2020을 이용해 측정하였고 반지름은 기공 면적을 원형으로 간주하여 계산하였다. 기공이 서로 붙어 터지거나 기공 벽(cell window)이 온전하지 않아 생긴 구멍들은 기공 면적 측정에서 제외하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 폴리우레탄 합성도 분석

Figure 2는 계면활성제를 첨가했을 때와 첨가하지 않았을 때 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차에 따른 폴리우레탄 폼의 성분 변화를 나타내는 FT-IR spectra이다. 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차에 상관없이 모든 폼에서 우레탄(1702 cm^{-1})과 우레아(1642 cm^{-1}) 피크(peaks)를 확인할 수 있었다.

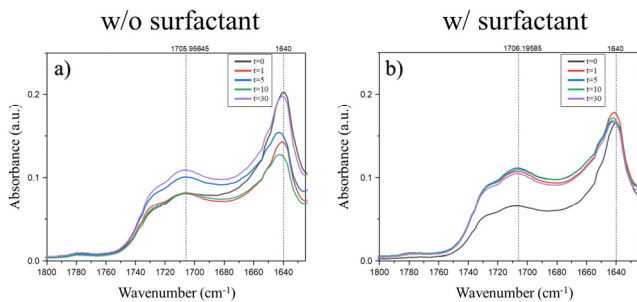
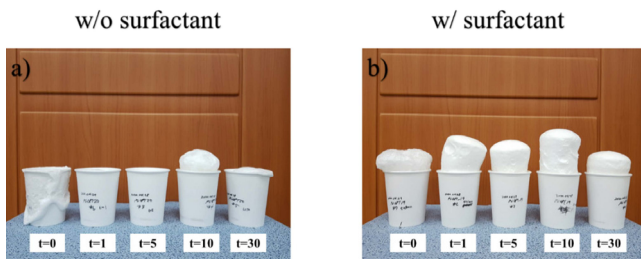
-C=O 피크(1702 cm^{-1})는 폴리우레탄 결합 내 경질 분절(hard segment)의 N-H와 C=O 그룹 간 그리고 연질 분절(soft segment)의 에스터 또는 에스터-산소 그룹 간의 수소결합에 의해 나타나며[12] 이는 폴리우레아의 -C=O 피크(1642 cm^{-1})와 다르게 나타난다[13].

Figure 2(a)에서 보여주듯이 실리콘 계면활성제가 첨가되지 않은 경우, 폴리우레탄, 폴리우레아 피크(peak)의 세기는 겔화 시간에 따라 크게 달라졌지만 Figure 2(b)에서 보여주듯이 계면활성제가 첨가된 경우, 원 샷 제조법($t = 0$)을 제외하고 그 세기가 모두 균일했다.

원 샷 제조법은 실리콘 계면활성제 유무와 관계없이 프리폴리머 제

Table 1. FT-IR Absorption Peak Intensity of Polyurethane Foams with Different Time Durations between the Gelling and Blowing Reactions

Time (min.)	w/o silicone surfactant			Time (min.)	w/ silicone surfactant		
	Urethane	Urea	Urethane/urea		Urethane	Urea	Urethane/urea
0	0.081	0.203	0.399	0	0.066	0.165	0.403
1	0.081	0.143	0.568	1	0.107	0.178	0.603
5	0.100	0.154	0.649	5	0.113	0.167	0.677
10	0.083	0.128	0.646	10	0.110	0.171	0.645
30	0.110	0.199	0.553	30	0.105	0.168	0.627

**Figure 2. FT-IR absorption spectra of polyurethane foams with different time durations between the gelling and blowing reactions (1800~1625 cm⁻¹) (a) without the surfactant and (b) with the surfactant.****Figure 3. Polyurethane foams with different time duration between the gelling and blowing reactions (a) without the surfactant and (b) with the surfactant.**

조법($t = 1, 5, 10, 30$) 보다 폴리우레탄 피크의 세기가 약했으며, 특히 폴리우레아 대비 폴리우레탄 피크의 비율이 가장 낮았다(Table 1). 이러한 낮은 비율은 폼 내 폴리우레탄의 비율이 폴리우레아에 비해 적게 합성된다는 것을 의미하며 겔화 반응과 발포 반응이 동시에 일어날 경우 물로 인한 우레아 반응이 디이소시아네이트를 함께 소진 시키면서 합성되는 폴리우레탄 양을 감소시킨다고 볼 수 있다[14].

3.2. 폼의 구조

실리콘 계면활성제가 미 첨가된 폼은 발포 반응에 의해 폼이 빠르게 부풀어 오른 후 그 무게를 이기지 못하고 무너지거나 외부 공기와 접촉하면서 급격한 수축(shrinkage)과 동시에 붕괴됐다(Figure 3 좌측). 계면활성제가 첨가된 폼은 윈 샷 방법을 제외하고 모두 안정적인 폼 성장을 보여주었다.

10 min의 시간차를 준 폴리우레탄 폼은 실리콘 계면활성제 유무와 상관없이 가장 높은 폼 높이를 보였다. 반면, 30 min의 시간차를 준 폴리우레탄 폼은 10 min의 시간차를 준 폼만큼 성장하지 않았다.

계면활성제가 첨가된 폼은 윈 샷 방법(Figure 3 우측 맨 왼쪽)을 제외하고 모두 안정적인 폼 성장을 보여주었으며 10분의 시간차를 준 폴리우레탄 폼(Figure 3 우측, 왼쪽에서 네 번째)에서 그 최종 높이가 가장 높았다.

이러한 높이 차이의 원인은 우레탄 프리폴리머의 경화도(degree of curing)에 따른 박막 두께(film thickness)의 차이에 기인한 것으로 보인다[15]. 발포 반응 시점이 너무 이를 경우 기공 벽(cell window)을 이루는 우레탄 뼈대가 이산화탄소 발생으로 인한 기공의 급격한 팽창을 이기지 못하고 끊어지지만 반대로 발포 반응 시점이 너무 늦을 경우 우레탄 박막의 경화가 상당 부분 진행되어 박막 두께(film thickness)가 증가하고 더불어 강성(stiffness)이 증가하여 기공 확장에 제약을 받는 것으로 보인다[15].

3.3. 폴리우레탄 폼 내부 미세구조 분석

겔화 반응과 발포 반응 간 시간차가 폴리우레탄 폼의 미세구조에 끼치는 영향을 알아보기 위해 SEM을 통해 기공 크기를 측정하였다(Figure 4).

그 결과, 계면활성제가 첨가되지 않은 폼은 시간차가 길어질수록 기공 크기가 작아지고 기공 밀도가 증가했지만 계면활성제가 첨가된 폼의 경우 시간차는 기공 크기와 밀도에 큰 변화를 주지 못했다(Figure 5). 특히, 계면활성제가 없는 경우 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차가 10 min 이상일 때 계면활성제를 첨가한 폼과 같이 비교적 온전한 기공 벽이 관찰됨을 알 수 있다.

반면 계면활성제를 첨가한 경우, 모든 시간차에서 벽이 온전하게 형성됨을 알 수 있고, 시간차에 따라서 평균 기공 크기(반경)가 최소 227, 최고 300 μm 사이에서 변화함을 볼 수 있다(Figure 5). 다만, 기공 크기의 표준편차가 평균 차이보다 같거나 크기 때문에 겔화 반응과 발포 반응의 시간차가 기공 크기에 통계적으로 유의미한 변화를 일으켰다고 단정하기는 어렵다.

계면활성제가 없는 폼에서 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차가 10 분 이상일 때 계면활성제를 첨가한 폼과 같이 온전한 기공들이 관찰되는 현상은 기공 형성과 그 벽을 이루는 우레탄 뼈대(urethane backbone)와 밀접한 관계를 보여준다. 계면활성제는 기공 벽에 표면 장력 구배(surface tension gradient)를 만들어 급격한 팽창에 따른 기공 벽 배액(cell window drainage) 현상을 막아주는 것으로[15] 알려져 있는데, 겔화 반응과 발포 반응 간 시간차가 10 min 이상일 때 우레탄 프리폴리머의 경화가 상당 부분 진행되고 박막 두께가 두꺼워져서 급격한 기공 팽창에 의해 터질 확률이 줄어들기 때문이다.

3.4. 반복성 및 재현성

겔화 반응과 발포 반응 간 시간차를 10 min으로 놓았을 때 가장 높

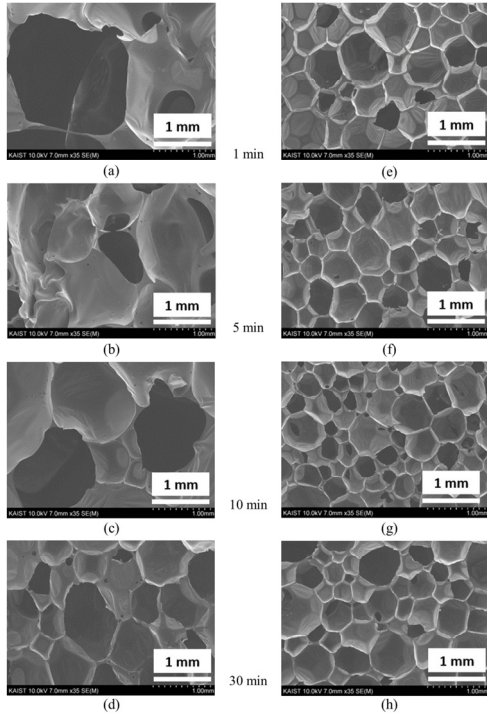


Figure 4. SEM images of PU foams at different time duration between the gelling and blowing reactions. (a)~(d) for the foams without the surfactant and (e)~(h) for the foams with the surfactant.

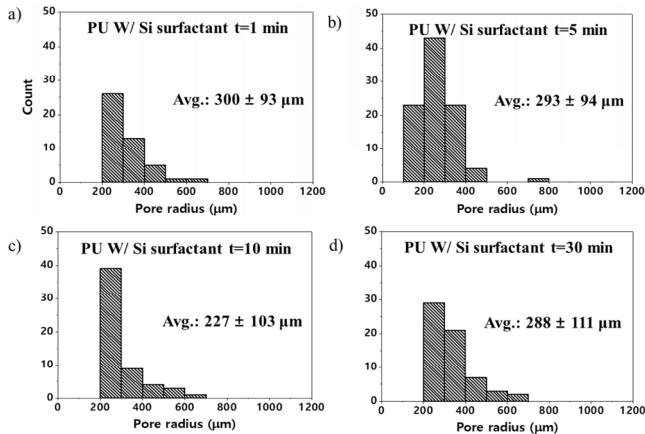


Figure 5. Distribution of different cell sizes of PU foams with different time duration between the gelling and blowing reactions. (a)~(d) for the foams with the surfactant given 1, 5, 10, and 30 minutes time intervals, respectively.

은 높이의 폴리우레탄 폼이 생성되었고, 이를 기준으로 총 열 번의 폴리우레탄 폼을 제작해 반복성, 재현성을 검토하였다(Figure 6).

폴리우레탄 폼의 평균 높이는 160 ± 3 mm으로 측정됐으며(Figure 7), 기공 평균 반지름은 335 ± 107 μm으로 확인됐다(Figure 8).

또한, 각 시료의 평균 기공 크기가 동일하지 확인하기 위해 one-way ANOVA 테스트를 진행했으며, 그 결과 각 그룹의 평균 간 유의미한 차이는 발견되지 않았다($F(9, 665) = 0.685, p = .72$). Analysis of variance (ANOVA)은 세 개 이상 모집단 평균이 동일하다는 귀무가설(H_0) 및 최소 한 개 이상의 모집단 평균이 서로 다르다는 대립가설(H_1)을 검정



Figure 6. The frontal view of polyurethane foams with the same time duration (10 min) between the gelling and blowing reactions. (a) for the frontal view (b) for the cross-sectional view.

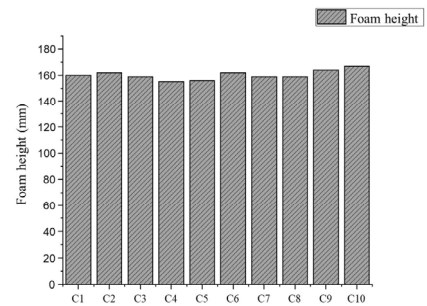


Figure 7. The heights of polyurethane foams with the same time duration (10 min) between the gelling and blowing reactions.

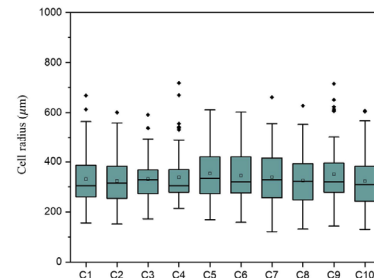


Figure 8. The mean cell radii of polyurethane foams with the same time duration (10 min) between the gelling and blowing reactions. There were no statistically significant differences between the group means of cell radii as determined by one-way ANOVA ($F(9, 665) = 0.685, p = .72$).

하는 통계적 기법이다. 일원분산분석(one-way ANOVA)은 한 가지의 기준에 의하여 표본들을 구분하여 관측한 후 각 표본들이 추출된 모집단들의 평균치를 비교하여 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 검정한다. 통계적 유의성(statistical significance)은 유의 수준(significance probability) 또는 F-분포 (F-distribution) 함수를 기준으로 p-값(p-value)에 의해 결정되며 이는 F-값을 계산한 후 F-분포 (F-distribution)를 기준으로 계산한다. F-값은 아래와 같이 계산된다.

$$F = \frac{\text{집단 간 분산도 (intergroup variance)}}{\text{집단 내 분산도 (intragroup variance)}} = \frac{\sum_{i=1}^K n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 / (K-1)}{\sum_{ij=1}^K (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 / (N-K)} \quad (1)$$

\bar{Y}_i 는 집단 평균(the mean of the group i), n_i 는 i 집단 내 표본 수(the number of observations of the group i), \bar{Y} 는 전체 표본 평균(the overall mean), K 는 모집단의 수(the number of groups), Y_{ij} 는 i 집단 내 j 번째 표본의 종속 변수의 값(the j^{th} observational value of group i), 그리고 N 은 모든 표본의 개수(the number of all observational values)[16].
이로써 겔화 반응과 발포 반응의 시간차라는 공정 변수를 제어하여 더 높은 재현성과 반복성을 갖는 폴리우레탄 폼 제작이 가능하다는 것을 확인했다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 프리폴리머 합성법과 다르게 폴리올, 가교제, 촉매, 물리적 발포제가 섞인 혼합물에 디이소시아네이트를 첨가한 후 화학적 발포제를 첨가하여 겔화와 발포 반응 간에 시간차를 두는 새로운 폴리우레탄 폼 공정을 개발했다.

계면활성제를 첨가하지 않았을 경우 동일한 재료 조성비와 실험 조건에도 시간차를 달리했을 때 폴리우레탄 폼의 붕괴 정도와 높이에 현격한 차이가 보이는 것을 확인했다.

특히, 시간차를 10 min으로 고정했을 때 가장 높은 폴리우레탄 폼이 생성됐으며 이를 바탕으로 동일한 실험조건 하에 총 열 번의 폴리우레탄 폼을 합성했을 때, 생성된 폴리우레탄 폼 모두 통계적으로 균일한 높이와 미세구조를 가진 것이 확인됐다.

이번 연구에서는 겔화 반응과 발포 반응 사이의 시간차라는 공정 변수를 통제해 더 높은 재현성과 반복성을 갖춘 폴리우레탄 폼을 제작하였고 이를 토대로 향후 발포 추진체에 특화된 폴리우레탄 폼을 연속적이고 안정적으로 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

This research was supported by “Poongsan-KAIST Future Research Center Project” and the authors gratefully acknowledge the financial support of Poongsan Corporation.

References

- O. Bayer, Das Di-isocyanat-polyadditionsverfahren (polyurethane), *Angew. Chemie*, **59**, 257-272 (1947).
- R. B. Seymour and G. B. Kauffman, Products of chemistry - polyurethanes: A class of modern versatile materials, *J. Chem. Educ.*, **69**, 909-910 (1992).
- H. Choi, S. polyol for polyurethane and foam, *Polym. Sci. Technol.*, **10**, 621-628 (1999).
- H. S. Kang and S. B. Kim, Synthesis and characterization of polyurethane-silica composite foam, *Appl. Chem. Eng.*, **31**, 30-35 (2020).
- J. O. Akindoyo, M. D. H. Beg, S. Ghazali, M.R. Islam, N. Jeyaratnam, and A. R. Yuvaraj, Polyurethane types, synthesis and applications - A review, *RSC Adv.*, **6**, 114453-114482 (2016).
- J. Bchnlein-Mau and H. Kröber, Technology of foamed propellants, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **34**, 239-244 (2009).
- W. Yang, J. Yang, Y. Zhao, and Y. Zhang, Preparation and structure study of water-blown polyurethane/RDX gun propellant foams, *J. Energ. Mater.*, **36**, 121-126 (2018).
- J. Böhnlein-Mauß, A. Eberhardt, and T. S. Fischer, Foamed propellants, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **27**, 156-160 (2002).

- S. Kang, I. Cho, and S. Kim, Effect of isocyanate index on the physical properties of rigid polyurethane foam under sea water, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**, 427-431 (2008).
- H. Dodiuk and S. H. Goodman, *Handbook of Thermoset Plastics*, Elsevier, Doi:10.1016/C2011-0-09694-1 (2013).
- P. Król, Synthesis methods, chemical structures and phase structures of linear polyurethanes. Properties and applications of linear polyurethanes in polyurethane elastomers, copolymers and ionomers, *Prog. Mater. Sci.*, **52**, 915-1015 (2007).
- A. Asefnejad, M. T. Khorasani, A. Behnamghader, B. Farsadzadeh, and S. Bonakdar, Manufacturing of biodegradable polyurethane scaffolds based on polycaprolactone using a phase separation method: physical properties and *in vitro* assay, *Int. J. Nanomedicine*, **6**, 2375-2384 (2011).
- S. M. Kim, S. H. Kim, E. J. Lee, H. J. Park, and K. Y. Lee, Curing kinetics of polyurethane elastomers depending on the amount of curing agent and temperatures by real time FTIR spectroscopy, *Polym.*, **41**, 610-618 (2017).
- M. Barrère and K. Landfester, High molecular weight polyurethane and polymer hybrid particles in aqueous miniemulsion, *Macromolecules*, **36**, 5119-5125 (2003).
- X. D. Zhang, C. W. Macosko, H. T. Davis, A. D. Nikolov, and D. T. Wasan, Role of silicone surfactant in flexible polyurethane foam, *J. Colloid Interface Sci.*, **215**, 270-279 (1999).
- T. K. Kim, Understanding one-way anova using conceptual figures, *Korean J. Anesthesiol.*, **70**, 22-26, Doi:10.4097/kjae.2017.70.1.22g (2017).

Authors

- Hojoon Lee; B.Sc., Researcher, Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea; holee7272@kaist.ac.kr
- Chungik Oh; Ph.D., Post-doctoral Fellow, Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea; oci9207@kaist.ac.kr
- Chi Hao Liow; Ph.D., Post-doctoral Fellow, Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea; chihaliow@kaist.ac.kr
- Soyeon Kim; B.Sc., Graduate Student, Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea; soyeon_kim@kaist.ac.kr
- Youngjoon Han; M.Sc., Graduate Student, Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea; khkhkh13@kaist.ac.kr
- Min-Seok Oh; B.Sc., Assistant Manager, Poongsan R&D Institute, Kyung Ju, 38026, Republic of Korea; oos1844@poongsan.co.kr
- Hyeong-Uk Joo; M.Sc., Manager, Poongsan R&D Institute, Kyung Ju, 38026, Republic of Korea; hujoo@poongsan.co.kr
- Soo-Ho Chang; Ph.D., Team Leader, Poongsan R&D Institute, Kyung Ju, 38026, Republic of Korea; soo-ho.chang@poongsan.co.kr
- Seungbum Hong; Ph.D., Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Republic of Korea; seungbum@kaist.ac.kr