

Introduction

최근 전 세계적으로 탄소중립과 기후변화 대응을 위한 산업 구조 전환이 가속화되면서, RE100-CBAM 등 국제 정책은 제품 생산 단계의 탄소 배출을 기업 경쟁력의 핵심 요소로 만들고 있다. 이에 따라 플라스틱-폴리머-폼 소재 전반에서 재활용 가능하거나 바이오 기반의 저탄소 소재 수요가 크게 증가하고 있으며, 기존 석유계 폴리올을 재생 가능한 바이오 폴리올로 대체하는 전략이 주목받고 있다. 바이오 폴리올은 식물성 오일 유래 원료로 약 30-50%의 탄소 감축과 높은 공급 안정성을 기대할 수 있으나, 분자 구조 차이로 인해 반응성 저하 및 셀 구조 불균일 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 바이오 폴리올 기반 폴리우레탄 폼의 물성을 확보하기 위해서는 NCO Index의 정밀한 조절과 공정 조건 최적화에 대한 연구가 필수적이다.

- 30-50% lower carbon footprint
- Renewable, stable, and oil price-resilient

Analysis

- FT-IR**
→ 바이오 폴리올을 활용해 합성된 폴리우레탄 폼의 작용기 분석
- UTM**
→ 기계적 물성 분석
- Mini-SEM**
→ 형태학 분석

Fourier transform infrared spectroscopy Universal Testing Machine Mini-Scanning Electron Microscope

R&D Results - 실험 1

바이오 폴리올 함량 변화에 따른 폴리우레탄 폼 물성 변화 측정

- Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR)**

Fig 1. FT-IR spectra of polyurethane foams with varying bio polyol contents

- 우레탄 결합으로 인해 **-NH결합**이 생성됨
- FT-IR 결과를 통해 3300cm^{-1} 부근에서 **-NH결합**에 해당하는 피크를 확인 가능

- UTM Data (Hysteresis loss, Sag factor)**
- Mini-SEM Data**

Fig 2. (a) Hysteresis loss and (b) Sag factor of polyurethane foams as a function of bio-polyol contents

- Hysteresis loss:** 20wt% 바이오 폴리올 함량에서 **최대**
- SAG factor:** 20wt% 바이오 폴리올 함량에서 **최소**

Fig 3. SEM images for vanillyl bio-polyol contents of (a) 0wt%; (b) 5wt; (C) 10wt%; (d) 15wt%; (e) 20wt% (f) 25wt%

- Pore, Cavity diameter**
- Cell wall area ratio, Open porosity**

Fig 4. (a) Pore diameter and (b) cavity diameter of polyurethane foams as a function of bio-polyol contents

- Pore size:** 바이오 폴리올 함량과 관계없이 거의 **일정**
- Cavity size:** 20wt% 바이오 폴리올 함량에서 **최대**

Fig 5. (a) Cell wall area ratio and (b) open porosity of polyurethane foams as a function of bio-polyol contents

- Cell wall area ratio:** 전구간에서 거의 일정하게 **유지**
- Porosity(미세구멍 개폐도):** 바이오 폴리올 함량이 증가할수록 감소하고 20wt% 함량에서 **최소**

공동벽 면적비 ↑ → Sag factor ↓
실제 측정에서는, 공동벽 면적비가 거의 일정하게 유지되지만 20wt%에서 폼의 Sag factor가 급격하게 감소하는 경향이 나타남
bio20wt%의 꺼짐 인자 값은 2.4434로 권장 하한선 아래에 위치하고 있기 때문에 채감 안락성이 떨어질 수 있음

Porosity ↓ → Internal resistance ↑ → Hysteresis loss ↑
Porosity(미세구멍 개폐도)는 bio 20wt%에서 최소가 되고, bio 20wt%에서 이력손실이 급격하게 증가함

Why? 초기 셀의 개방도가 낮아지면서 Stress at strain 25%가 과상승하고 bio20wt%에서의 큰 공동 직경으로 인해 막 파열-좌굴이 발생하며 strain 65%에서 상승이 제한
Stress at strain 25% ↑ >> Stress at strain 65% ↑
⇒ Sag factor가 급격하게 감소함

Why? bio 20wt% 점도와 극성이 임계에 도달하고 물의 확산이 지연되면서 **젤화 반응 >> 발포 반응** 되고 **폐쇄형 셀 비율의 증가**로 인해 이력 손실이 급격하게 증가함

Experiment

Synthesis method of polyurethane foam

Materials

- Polyol**
Polypropylene glycol 6000 (PPG 6000)
- Bio Polyol**
ECOPOL 35
- Isocyanate**
Methylene diphenyl diisocyanate (MDI)
Toluene diisocyanate (TDI)
- Cross Linker**
Diethanolamine (DEOA)
- Catalyst**
TEDA(Dabco 33LV) Triethylenediamine
BL-17(BDMEE) Bis(2-(dimethylamino)ethyl)ether

Polyol System	Materials	Contents						
		100	95	90	85	80	75	
Polyol System	Polyol(PPG-6000)	100	95	90	85	80	75	
	Bio Polyol(Ecopol 35)	0	5	10	15	20	25	
	Catalyst(33LV)	0.72						
	Catalyst(BL17)	0.08						
	Cross Linker(DEOA)	0.8						
	Blowing Agent(Water)	3						
	Surfactant(L-3002)	1.32						
Isocyanate	CG-7070S	57.53	58.29	58.56	58.83	59.10	59.36	

NCO index : 1.0

Fig 1. Formulation Details for Fabrications of Flexible PU Foams with varying bio-polyol contents

- PU 폼 합성은 **one-shot method**로 진행
- 모든 원료들을 종이컵에 부어 1차 및 2차 교반을 진행한 후, 60°C의 몰드에 넣어 경화를 진행
- 경화를 마친 PU 폼은 **50±10%**의 실온에서 **72시간** 동안 보관 후, 물성 분석에 활용

Polyol System	Materials	Contents				
		0.950	0.975	1.0	1.025	1.050
Polyol System	Polyol(PPG-6000)	80				
	Bio Polyol(Ecopol 35)	20				
	Catalyst(33LV)	0.72				
	Catalyst(BL17)	0.08				
	Cross Linker(DEOA)	0.8				
	Blowing Agent(Water)	3				
	Surfactant(L-3002)	1.32				
Isocyanate	CG-7070S	59.10				

Fig 2. Formulation Details for Fabrications of Flexible PU Foams with varying NCO index

R&D Results - 실험 2

NCO index 변화에 따른 폴리우레탄 폼 물성 저하 개선

- Hysteresis loss**

Fig 1. Hysteresis loss of PU foams as a function of (a) bio-polyol(ECPOL 35) contents, (b) NCO Index

(a) 실험 1. bio 20wt%의 이력손실 ↑
(b) 실험 2. 낮은 NCO Index 영역에서 이력손실 ↓

바이오 폴리올에 의한 이력손실 증가 문제가 부분적으로 해결됨

- SAG factor**

Fig 2. SAG factor of PU foams as a function of (a) bio-polyol(ECPOL 35) contents, (b) NCO Index

(a) 실험 1. bio 20wt%의 꺼짐 인자 ↓
(b) 실험 2. 낮은/높은 NCO Index 영역에서 모두 꺼짐 인자 ↑

Why?
• 전체 NCO양 감소
NCO 과량과 부반응이 완화
→ 탄성회복이 좋은 구조로 발달
• NCO Index 증가에 경우
가교밀도 ↑ → 꺼짐 인자 ↑
but, 부반응과 경질 도메인 편중 존재
→ 이력손실 해결 X

- Pore, Cavity diameter**

Fig 3. (a) Pore diameter, (b) Cavity diameter of PU foams as a function of NCO Index

NCO Index 조절 → (a) 기공, (b) 공동 크기 ↓

Why?
낮은 NCO Index 영역에서
• 전체 NCO양 감소
→ NCO 반응을 통해 생성되는 CO₂와 부반응 생성물 감소
• 발포-젤화 속도의 균형 완화
→ 기포의 과도한 성장 억제
→ 셀 미세화, 공동 감소

NCO Index 조절이 기공-공동 구조와 기계적 물성을 동시에 좌우하는 핵심 인자임을 시사

- Cell wall area ratio, Open porosity**

Fig 4. (a) cell wall area ratio, (b) open porosity of PU foams as a function of NCO Index

공동벽 면적비는 큰 변화가 없는 반면, 낮은 NCO Index 영역에서는 높은 개폐도를 보임

전체 골격의 양은 크게 달라지지 않았지만, 셀 벽의 부분적인 파열 & 미세한 개구자 형성

낮은 NCO Index 영역에서 **셀의 개방성이 증가** 반면, 높은 NCO Index 영역에서는 **폐쇄적인 구조**가 형성됨

Conclusion

(1) Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR)
• 피크 ~3300 cm⁻¹ (-NH), 1740-1750 cm⁻¹ (C=O) ⇒ 우레탄 결합 형성
결론: 화학 구조 목표 충족 ⇒ 폼 합성의 기초 반응 확인

(2) 물리적 특성
• 미세구조: Index 최적화 후: pore · cavity 직경 감소 및 균질화, 개폐도(open-cell) ↑
공동벽 면적비는 거의 일정
• 이력 손실 · 꺼짐 인자 실험 1: bio 20wt%에서 이력손실 ↑, 꺼짐 인자 ↓
실험 2: 이력손실 ↓ (기준 수준으로 회복), 꺼짐 인자 ↑ (지지력 회복/향상)
결론: bio 20wt% 포함 타 조성과 동등~우수 성능 확보

미세구조 안정화와 기계 성능 목표 달성
∴ 바이오 폴리올 기반 PU 폼의 석유계 폴리올 대체가능성 확보