

## 무기분말-폴리우레탄 복합체폼의 제조 및 후처리가 기계적 물성에 미치는 영향

안원술<sup>1\*</sup>, 이부윤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>계명대학교 화학공학과, <sup>2</sup>계명대학교 기계자동차공학과

### Fabrication of Inorganic Filler-Polyurethane Composite Foam and Postcure Effect on Mechanical Properties

WonSool Ahn<sup>1\*</sup> and BooYoun Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University,  
Daegu 704-701, Korea

요 약 0.5mm 크기의 타원형 무기분말을 충전한 폴리우레탄 폼 복합재료에 대한 가교반응의 특성과 후가교처리에 따른 기계적 물성의 변화에 대하여 생성반응의 온도 측정, TGA, 및 인장시험을 이용하여 연구하였다. 중량비로 20% 정도를 충전하는 CeO<sub>2</sub> 무기분말(Ce500)을 충전한 샘플 폼복합재료는 10분 이내에 100°C 정도의 최고 반응속도점 온도에 도달하였으며, 만들어진 샘플의 열분해반응은 약 250°C 부근의 저온 열분해와 약 350°C 부근의 고온 열분해의 이중모드로 일어나는 것이 관찰되었다. Kissinger의 해석방법에 의한 분해활성화에너지는 저온영역에서의 열분해에 대하여서는 117.4kJ/mol이며 고온영역에 대해서는 139.4kJ/mol의 값을 각각 나타내었다. 160°C에서의 샘플의 후가교 처리시간에 따른 기계적 성질은 후가교 시간에 따라서 파단응력이나 경도는 크게 변하지 않는 것으로 나타났으나 파단신율은 최대 1.72배까지 증가하였으며, 본 실험에서 사용된 샘플의 경우 160°C, 7시간 정도의 후가교 시간이 가장 적절한 후가교 조건으로 생각되었다.

**Abstract** Inorganic micropowder(Ce500)-filled polyurethane composite foams were fabricated and the effects of postcure on the mechanical properties were studied by the measurement of polymerization temperature, TGA, and UTM test. Temperature for the maximum reaction rate of 20wt% Ce500-filled sample reached upto ca. 100°C within 10min. and, for the same sample, double mode thermal decomposition was observed around two distinguished temperatures of 250°C and 350°C. The activation energies for the decomposition were calculated using Kissinger method as 117.4 and 139.4 kJ/mol, respectively. While break strength and hardness of the sample seemed nearly affected by postcure time at 160°C, elongation, however, was significantly changed upto 1.72 times after 7hrs treatment. As the results, the condition of 7hrs at 160°C was considered as the optimum postcure condition for the Ce500-filled PU composite foam samples.

**Key Words** : Inorganic Powder, PU Composite Foam, TGA, Postcure

#### 1. 서론

폴리우레탄(polyurethane, PU)은 고탄성 모듈러스, 내마모성, 넓은 범위의 경도조절성, 내인열강도 등 기계적 특성이 특히 우수하여 건축용 재료, 표면 피복제, 인조피

혁용 재료, 자동차 내장재 및 의료용 재료 등과 같이 광범위한 분야의 산업에 다양하게 사용되고 있다[1-4]. 폴리우레탄은 고무가 가지는 탄성과 함께 플라스틱, 금속, 세라믹 등의 물성도 함께 지닐 수 있는 다양한 특성을 가지며 또한 원료 에너지의 소비량이 낮고 비교적 저비용

\*교신저자 : 안원술(wahn@kmu.ac.kr)

접수일 11년 04월 11일

수정일 11년 04월 25일

게재확정일 11년 05월 12일

으로 가공될 수 있으므로 전통적으로 사용되어 오던 고무나 플라스틱, 또는 금속의 자리를 대체하여 그 사용이 점차로 증가하고 있으며, 활용분야에 따라 연질용, 반경질용, 경질용, 및 CASE (Coating, Adhesive, Sealant, Elastomer)용 등의 다양한 형태로 분류된다. 그 중에서 CASE용을 제외하고는 일반적으로 발포체의 형태로 제조되어 활용되는데 그 중의 한 가지는 ITO(Indium-Tin-Oxide) 유리 등의 표면 연마에 사용되는 연마패드용 PU 품이다. 이때 사용되는 PU수지는 반경질 재료로서 발포제와 함께 무기물 분말로서 CeO<sub>2</sub> (cerium dioxide) 등의 무기산화물을 충전제로 사용하게 된다. 이렇게 제조된 PU 복합재료는 적절한 폼(foam)의 형태를 가지면서도 내부에 연마특성을 향상시키기 위한 무기분말을 포함하고 있기 때문에 PU 수지의 본래적인 내마모성과 결합하여 매우 우수한 연마 재료 특성을 발휘한다. 따라서 근래에 산업적으로 사용되는 거의 모든 연마패드는 PU를 근간으로 하는 고분자 복합재료를 사용하고 있다. 한편 디스플레이 및 전자 기술에 사용되는 소자부분은 더욱 미세화 되고 있으며 대면적의 전극유리를 요구하고 있는 추세이다. 따라서 이에 사용되는 ITO 유리의 크기는 상대적으로 대형화되는 반면 엄격한 광역 평탄화 기술이 요구되고 있으므로 이의 연마 기술에 사용되는 패드의 수요는 급격하게 증가할 전망이다. 그러나 현재의 국내 현황은 그 고부가가치성에도 불구하고 전량 수입에 의존하고 있으므로 외국 기술 의존도를 벗어나지 못하고 있다. 이 때문에 야기되는 생산 원가의 상승은 기업의 부가가치 창출에 큰 걸림돌이 되고 있는 실정이다. 따라서 이에 관한 기술 개발 및 기술 축적은 생산원가의 절감뿐만 아니라 국내 기술의 개발에 의한 수입 가격의 절감효과 등의 여러 가지 유익한 상호작용을 가지고 올 수 있다.

일반적으로 폴리우레탄의 제조 공법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있는데, 폴리에스테르 또는 폴리에테르기를 포함하고 있는 폴리올의 일부와 과량의 이소시아네이트를 반응시켜 생성된 프리폴리머(pre-polymer)를 폴리올, 발포제, 촉매 등을 섞어 반응시키는 프리폴리머법과, 폴리올과 이소시아네이트 및 체연장제(chain extender) 등을 한꺼번에 전부 섞어서 반응시키는 원샷(one-shot)법이 있다[3]. 전자의 경우 생산되는 폴리우레탄의 발포가 균일하므로 반경질 및 경질품 등 품질을 중요시하는 제품생산에 많이 이용되며, 후자의 경우에는 원료 성분을 한꺼번에 혼합하여 발포시키므로 사용법이 간단하여 프리폴리머법보다는 경제적으로 유리한 이점이 있다. 주로 연질품 생산에 이용되고 있지만 불균일한 기포 발생으로 인한 품질에 문제점이 있다[4]. 한편, 이렇게 많은 제품이 다양하게 나오고 있는 폴리우레탄 재료이지만 아직도 중

합조건과 열안정성 및 기계적 성질과의 관계에 대하여 연구해야할 분야가 많이 남아있다. 특히 폴리우레탄 폼은 발포제의 혼입에 의하여 생기는 폼의 안정을 위하여 반응속도를 조절하기 위한 촉매를 사용하기 때문에 늦어도 수 분 이내에 반응이 거의 완결되는 택-프리(tack-free) 시간을 가지는 경우가 많다. 이러한 경우에는 1차적인 반응이 끝난 후에 후가교(postcure) 공정을 거치는 경우가 일반적이며, 최종적인 제품의 열적 성질이나 기계적 성질은 이러한 후가교 공정을 어떻게 거치느냐에 따라 매우 달라지게 된다[5].

따라서 본 연구에서는 일반적 산업용의 ITO 유리연마 패드로 사용되는 입경 약 0.5 마이크로 크기의 CeO<sub>2</sub>가 20wt% 정도 충전된 폴리우레탄 복합재료 폼 샘플의 생성반응과 후가교조건이 열적 기계적 성질에 어떻게 영향을 미치는가에 대하여 집중적으로 연구를 진행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

실험에 사용된 베이스 수지용의 이소시아네이트와 폴리올은 상온중합용 재료로서 KPX Chemical의 KONIX HS-209와 FA-703을 기본수지로 사용하고 여기에 가교제로서 NP-300을 적절히 사용하였다. 이소시아네이트로는 MDI (methylol diisocyanate)계로서 금호미쓰이화학의 Cosmonate LL을 사용하였다. 또한 베이스 수지혼합물의 반응속도 및 물성조절을 위하여 촉매로서 DABCO (1,4-diazabicyclo-2.2.2-octane)와 Stannous Octate를 혼합하여 사용하고 발포제로서 Cyclopentane을 사용하였다. [표 1]에 실험에 사용된 폴리올과 이소시아네이트의 점도 및 -OH값과 -NCO값을 나타내었다. 충전제로서는 일본 Mitsui사의 타원구형 산화세륨과우더(Ce500)로서 평균직경 0.5 $\mu$ m인 것을 사용하였으며 총사용 수지량에 대하여 중량비로 20% 되도록 하였다.

[표 1] 폴리올 및 이소시아네이트의 물성

	Polyol			Isocyanate
	HS-209	FA-703	NP-300	Cosmonate LL
OH Value [mgKOH/g]	450.0	32.5	750.0	-
NCO content [wt%]	-	-	-	29.0
Viscosity [cps@25°C]	6200.0	920.0	1600.0	40.0
Composition [g]	25.0	70.0	5.0	53.1

### 2.2 복합재료의 제조

직경 110mm되는 원형 반응장치에 먼저 정해진 조성비 량의 폴리올들을 표 1에서와 같이 당량비로 넣어 혼합하고 여기에 무기물 충전재파우더 Ce500을 전체 수지혼합물의 량에 대하여 20 wt%가 되도록 정량하여 넣은 뒤에 이 혼합물을 소형 고속임펠러를 사용하여 3,000rpm의 회전속도로 5분간 예비혼합을 한 뒤에 다시 10wt%의 발포제(cyclopentane, CP)와 촉매 혼합물 0.003g을 투입하여 다시 10분간 교반하였다. 여기에 MDI를 투입하고 10초 정도 최대 RPM으로 교반한 뒤 원통형 몰드에 부어 발포되도록 하였다.

### 2.3 중합반응온도 측정

제조되는 샘플은 MDI가 혼합되는 순간부터 중합반응을 시작하게 되므로 Delta OHM사의 HD2108.2 디지털온도계의 thermocouple을 반응조의 중앙부위에 직접 설치하여 시간에 따른 혼합물의 반응온도를 혼합 시부터 측정할 수 있도록 하였다. thermocouple의 위치는 항상 반응조 내부의 일정한 위치에 놓이도록 하여 각 샘플마다 중합물의 위치에 따른 반응온도의 편차를 최대한 줄이도록 하였다.

### 2.4 후가교

샘플은 1차중합이 끝난 상태에서 하루 정도 상온에서 숙성과정을 거친 뒤에 강제 환기에 의해 외부 공기가 잘 유입되는 가열 오븐에 넣고 160°C의 온도로 유지하면서 후가교 처리를 진행하는 도중에 매 1시간마다 샘플링 하였다.

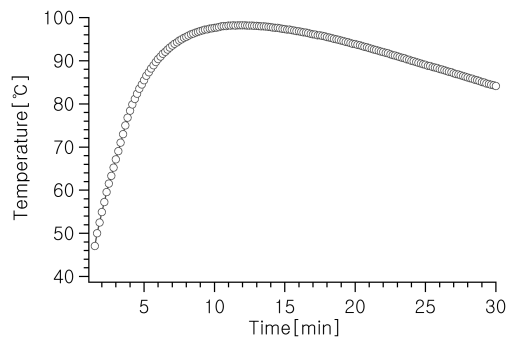
### 2.5 TGA 열분석 및 인장시험

열분석은 Shimadzu사의 TGA-50을 사용하여 질소 분위기 하에서 상온에서부터 800°C까지 승온속도 10°C/min로 온도를 올리면서 열분해 곡선을 얻었다. 또한 인장시험은 ASTM D638의 규정에 따라 시편을 제작하여 경성 시험기사의 KST-05S UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 10mm/min의 변위증가속도로 각각의 샘플에 대하여 인장강도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

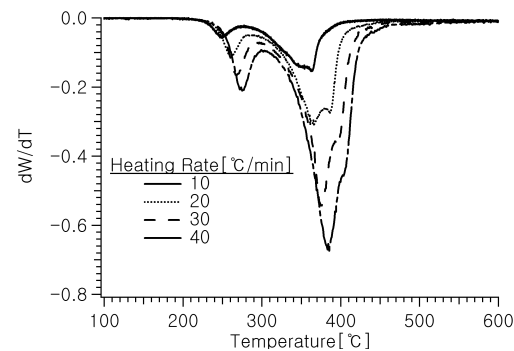
PU 중합반응은 발열반응이므로 반응이 진행됨에 따라 샘플혼합물의 초기 온도는 급격히 증가하게 되지만, 반응기 외부로의 열전달 속도에 따른 열손실에 의하여 일정

한 시간이 경과하게 되면 최고 반응 속도점을 지나게 되며 그 후에는 샘플 내의 반응물 농도가 감소함에 따라 반응열도 감소하게 되므로 샘플의 온도는 서서히 실온으로 접근하게 된다. 따라서 반응시간 동안의 온도변화를 실시간으로 측정하면 샘플혼합물의 반응속도 변화 역시 정성적으로 알 수 있게 된다. 그림 1에 Ce500을 충전재로 사용한 경우에 샘플혼합물의 반응시간에 따른 반응온도의 변화를 나타내었다. 그림에서 보아 알 수 있듯이 샘플혼합물의 최고온도는 약 100°C 부근에까지 상승하여 최고 반응온도점을 지나게 되며 이 후에는 서서히 감소하는 경향을 보인다.



[그림 1] Ce500 무기분말충전 PU복합재료의 반응시간에 따른 중합반응온도의 변화.

한편 그림 2에는 중합이 완결된 복합체에 대하여 열분해 반응의 승온속도에 따른 TGA 열분석 곡선을 온도에 대해 미분한 DTG(differential thermogravimetry)곡선을 나타낸다.



[그림 2] Ce500 무기분말충전 PU복합재료의 승온속도에 따른 DTG 열분석 곡선.

분해반응 속도로부터 분해반응 활성화에너지( $E_a$ )를 구하기 위하여서는 Kissinger method가 많이 사용된다.

Kissinger method는 “샘플에서 일어나는 반응의 반응속도가 최대인 점의 온도는 열분석곡선에서의 최대변곡온도, 즉 피크점에서의 온도( $T_p$ )와 같다”라는 가정을 바탕으로 하여 서로 다른 승온속도( $q$ )에서의 분해 피크점 온도  $T_p$ 와의 관계식으로부터 활성화에너지와 빈도인자를 구하는 방법으로서 상대적으로 매우 신빙성이 높다는 것이 잘 알려져 있다[6]. Kissinger에 의하면 반응이 일어나는 시스템의 열분석 실험에서 다른 실험조건을 모두 고정하고 승온속도  $q$  만을 변화시켜 가면서 열분석 곡선을 얻게 되면, 이로부터 반응에 필요한 활성화에너지를 간단하게 얻을 수 있다. 즉, 반응속도가 최대인 온도  $T_p$ 에서는 여러 단계의 수학적 과정을 거쳐 식 (1)에 보이는 바와 같이 유도된

Kissinger 식을 이용하여 활성화에너지를 구할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{q}{T_p^2}\right) = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_p}\right) + \ln\left(\frac{R}{E_a}A\right) \quad (1)$$

여기서  $q = dT/dt$ 로서 승온속도를 나타낸다. 따라서 열분석 곡선으로부터 피크점의 온도( $T_p$ )를 얻으면,

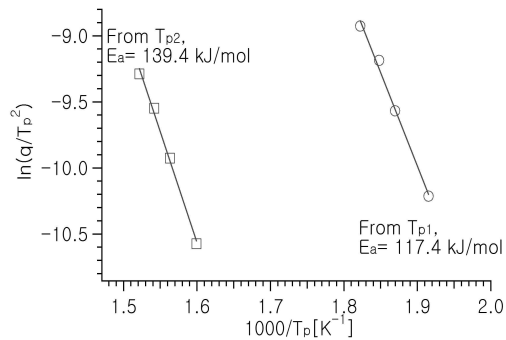
$\ln\left(\frac{q}{T_p^2}\right)$  vs.  $\frac{1}{T_p}$  플롯의 기울기로부터 활성화에너지  $E_a$

를 구할 수 있다.

그림 2의 DTG 분석 결과로부터 얻은 샘플복합재료의 열분해는 약 250°C 부근에서 일어나는 미가교된 고분자 또는 가교가 덜된 고분자 그물 영역 등이 열분해되는 저온 열분해와 이후의 약 350°C 부근에서 일어나는 본격적인 고온 열분해 영역의 두 구간으로 구분된다. 따라서 그림 3에는 저온영역에서의 피크점 온도를  $T_{p1}$ , 고온영역에서 나타나는 피크점의 온도를  $T_{p2}$ 로 구분하고, 이를 Kissinger의 해석방법에 의해 플롯한 결과를 나타내었다. 먼저 두 영역의 그래프가 모두 직선성을 보이는 것으로부터 Kissinger의 해석방법이 본 실험의 해석에도 그대로 적용될 수 있음을 보여준다. 그래프의 기울기로부터 분해 활성화에너지를 구하여 보면 저온영역에서의 열분해에 대하여서는 117.4kJ/mol이며 고온영역에 대해서는 139.4kJ/mol의 값을 나타내었다.

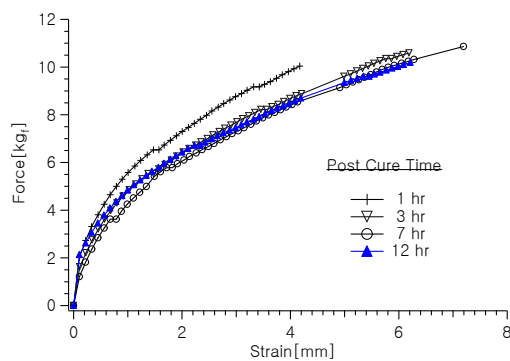
한편 폴리우레탄 복합수지의 물성에 영향을 미치는 가장 큰 인자는 원재료의 포물레이션과 가공조건이지만 1차 합성반응 이후의 2차 후처리 과정에 따라서도 기계적 물성은 많은 영향을 받게 되는 것이 일반적으로 알려져 있다[7-10]. 이러한 사실은 위에서의 결과로부터 살펴볼 때에도 미루어 판단할 수 있다. 즉, 본 실험에서 만들어지는 폴리우레탄 복합재료는 열적으로 이중모드의 분해 메

커니즘을 보여주고 있으며 이는 1차반응에서 만들어지는 재료에 대한 2차적인 후가교 반응에 의하여 미반응 원료의 반응완결에 따르는 가교 네트워크의 재구성 등의 모폴로지 변화가 일어날 수 있고 이것은 최종 재료의 물성에 영향을 미칠 수 있다는 것이다.



[그림 3] Ce500 무기분말충전 PU복합재료의 DTG 열분해 곡선으로부터의 Kissinger 플롯.

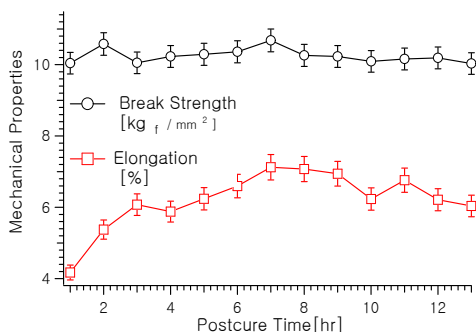
PU재료의 일반적인 후가교 처리는 필요에 따라 대개 120~160°C의 온도에서 수 시간의 후처리 과정을 거치게 되는데 이 공정을 거치면서 재료 내부에서는 미반응 물질의 반응완결, 불활성 저분자 유기화합물질의 휘발 등에 의하여 재료구조의 안정화와 기계적 물성의 변화를 가져오게 된다. 그림 4에는 160°C의 후처리 온도를 고정하고 공기가 잘 순환되는 열처리로에서 Ce500 20wt% 샘플에 대하여 후가교 처리시간에 따른 인장시험 결과를 나타내었다. 인장시험은 KS규격에 따라 시편을 만들고 5개 샘플에 대한 평균값을 취하였다. 그림에서 보아 잘 알 수 있는 것은 후 가교 시간에 따라서 파단강도는 거의 변하지 않고 비슷하지만 신율은 상당히 변하는 것을 관찰할 수 있다.



[그림 4] Ce500 무기분말충전 PU복합재료에 대한 160°C에서의 후가교 시간에 따른 기계적 성질의 변화.

이를 좀 더 자세히 보기 위하여 파단응력과 신율을 계산하여 그림 5에 나타내었다. 앞의 결과에서도 기술하였듯이 후처리 시간에 따른 파단강도의 변화는 크게 나타나지 않는다. 그러나 신율의 변화는 상당히 크게 나타나는 것을 살펴볼 수 있다. 이러한 사실로부터 알 수 있는 것은 파단응력의 경우에는 1차 가교반응 시에 재료물질 내에서 이미 생성된 가교 고분자량 네트워크에 의한 것이므로 후처리 전 후에 큰 차이가 없을 것으로 예상되지만 신율의 경우에는 후가교처리 공정에 의하여 미반응물질의 반응완결에 의한 고분자화 및 저분자물질의 휘발 등에 의해 안정화된 그물구조 또는 3차원 네트워크 형성이 더욱 진행되어 고무의 특성이 향상되기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 변화에 의하여 후가교 시간이 7시간에 이르면 1시간 후가교된 샘플 대비 파단신율은 1.72배, 파단응력은 1.08배 증가한다. 즉, 파단강도 증가에 비해 신율 증가 현상이 월등히 크다.

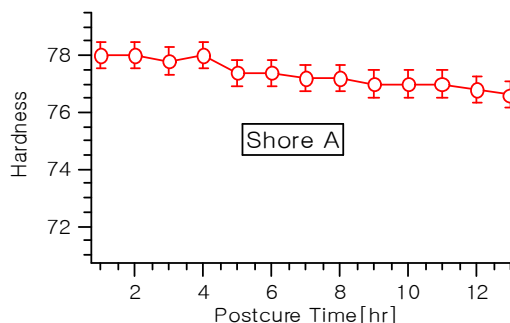
한편 위에서의 신율 향상 등에 의한 물성의 개선 현상은 후가교시간이 7시간 이후에는 둘 모두 어느 정도 감소하는 경향을 보이고, 시간이 더 길어져서 11시간 이후 정도에는 오히려 3차원 네트워크의 노화현상에 의해 강도 및 신율이 더욱 저하되는 현상이 나타난다. 이때에도 강도저하보다는 신율 저하가 더 뚜렷이 나타난다. 따라서 이러한 결과로 볼 때, 본 실험에서 사용된 샘플의 경우 160°C, 7시간 정도의 후가교 시간이 가장 적절한 후가교 조건이라 할 수 있다.



[그림 5] Ce500 무기분말충전 PU복합재료의 160°C에서의 후가교 시간에 따른 인장강도 및 신율의 변화.

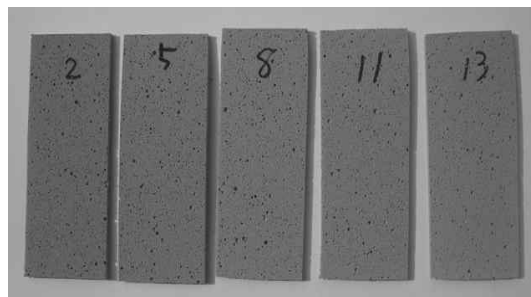
한편 인장시험에서의 결과와는 달리 후가교처리 시간에 따른 샘플의 경도 변화는 10시간 이상의 후처리 시간에서도 2%이내의 경도 저하 범위 내에서 크게 달라지지 않는다. 그림 6에서 보이는 경도 변화의 현상은 4시간 정도까지 거의 일정하다가 그 이후 서서히 저하되는 현상을 보인다. 이것은 뒤의 후처리시간에 따른 표면 사진

색상변화에서도 보이듯이 장시간 공기분위기에 노출되어 나타나는 표면열화와 상관이 있는 것으로 생각된다. 그러나 앞에서 기술한 바와 같이 이러한 변화는 상당히 미미하여 실질적인 물성의 저하에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.



[그림 6] Ce500 무기분말충전 PU복합재료의 160°C에서의 후가교 시간에 따른 경도변화.

그림 7에서는 후가교 시간에 따른 샘플의 외관 표면색상을 관찰한 것이다. 사진 속의 숫자는 후처리 시간을 나타낸다. 이 사진 상으로는 쉽게 구분이 되지 않으나 실제로 관찰되는 변화로서는 후처리 초기에는 짙은 주황색으로서 색상변화가 거의 없다가 시간이 지남에 따라 색상이 조금씩 색상이 옅어지는 현상을 보인다. 이러한 변화는 고온에서의 순환공기와의 접촉에 의하여 샘플의 열안정화가 먼저 일어나게 되고 그 다음의 안정화 이후에 발생하는 열화 현상을 가시적으로 보여주는 결과라 할 수 있다.



[그림 7] Ce500 무기분말충전 PU복합재료의 160°C에서의 후가교시간에 따른 표면색상 변화.

#### 4. 결 론

ITO 유리면마패드로 사용되는 PU 복합재료 폼은 일

반적으로 CeO<sub>2</sub> 분말이 약 20wt% 충전된 것이며 여기에 촉매와 발포제 등에 따라서 조절된 셀크기를 가진 페드의 형태로 사용된다. 또한 경도, 강도, 신율 등의 기계적인 물성은 연마력 뿐 만 아니라 페드제품의 내마모성과도 연관된다. 이러한 물성들은 본 연구 결과에서도 보인 바와 같이 초기조성비에 따라 달라지며 2차적인 후가교 처리 조건에 따라서도 변하게 된다.

본 연구에서의 결과로서 중량비로 20% 정도를 충전하는 Ce500 무기분말을 충전하는 경우에는 약 10분 이내에 100°C 정도의 최고 반응속도점 온도에 이르게 되며 그 이후에는 반응기 외부로의 열전달에 의하여 서서히 온도가 감소하는 것이 관찰되었다.

만들어진 샘플의 열분해반응은 약 250°C 부근의 저온 열분해와 약 350°C 부근의 고온 열분해의 이중모드로 열분해 반응이 일어나는 두 구간으로 구분되었으며, Kissinger의 해석방법에 의한 분해활성화에너지는 저온 영역에서의 열분해에 대하여서는 117.4kJ/mol이며 고온 영역에 대해서는 139.4kJ/mol의 값을 나타내었다.

샘플의 160°C에서의 후가교 처리시간에 따른 기계적 성질의 변화로서 후가교 시간에 따라서 파단응력이나 경도는 크게 변하지 않는 것으로 나타났으나 파단신율은 최대 1.72배까지 증가하는 것으로 판명되었다.

후가교 처리 온도에 의한 기계적 성질변화 및 외관 색상 변화를 종합적으로 고려할 때, 본 실험에서 사용된 샘플의 경우 160°C, 7시간 정도의 후가교 시간이 가장 적절한 후가교 조건으로 생각되었다.

### 참 고 문 헌

[1] W. Ahn and S. Yoon, "A Study on Formation and Thermal Decomposition Kinetics of PU Elastomers by Dynamic DSC and TGA Analysis", *Elastomer*, **42**(1), 47-54 (2007).

[2] W. Ahn and H. S. Kim, "Reactions and Properties of a RT-Castable PU Elastomer Modified with Oligomeric Diol", *Elastomer*, **43**(1), 18-24 (2008).

[3] O. Gunter, "Polyurethane Handbook", 2<sup>nd</sup> ed, Hanser Gardner Publications, Ch.8, 387-405(1993).

[4] U. Henri, "Chemistry and Technology of Isocyanate", John Wiley & Sons, New York, 1996.

[5] W. Ahn and S. H. Lee, *J. Elastomer*, **38**, 4(2003).

[6] H. E. Kissinger, "Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis", *Analytical Chemistry*, **29**(11), 1702-1706 (1957).

[7] C. Prisacariu and I. Agherghinei, "Reactions in Solid

State within Polyurethanes. Kinetics and Postcure Reaction Mechanism in Casting Polyurethane Elastomers", *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, **37**, 785-806(2000).

[8] Johnson Controls Technology Company, "Post-Cure of Molded Polyurethane Foam Products", *WIPO Patent WO/2010/033999A1*, 2010.

[9] G-N. Chen, P-H. Liu, M-S. Chen, and K-N. Chen, "Convenient post-curing reactions for aqueous-based polyurethane anionomers", *Journal of Polymer Research*, **4**(3), 165-175(1997).

[10] M. W. Cho, and Y. W. Chang, "Synthesis and Physical Properties of Polyurethane/Clay Nanocomposite", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **11**(5), 517-521 (2000).

### 안 원 술(WonSool Ahn)

[정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 화학공학(공학사)
- 1981년 2월 : 서울대학교 화학공학(공학석사)
- 1992년 8월 : KAIST 화학공학과(공학박사)
- 1995년 ~ 현재 : 계명대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

고분자 기능화, 고분자복합재료, 고무재료 등

### 이 부 윤(BooYoun Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 부산대학교 기계공학과(공학사)
- 1984년 2월 : KAIST 기계공학과(공학석사)
- 1991년 8월 : KAIST 기계공학과(공학박사)
- 1984년 ~ 1998년 : 두산중공업 기술연구원 팀장
- 1998년 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

최적설계, 열변형, CAD 등