

VOC 흡착 및 산화분해 특성을 갖는 광촉매종이의 제조 및 특성 평가

유윤종[†] · 김홍수 · 전상호* · 장건익*
한국에너지기술연구원 기능소재연구센터
*충북대학교 재료공학과
(2004년 11월 17일 접수; 2005년 1월 7일 승인)

Preparation and Characterization of Photocatalytic Paper for VOCs Adsorption and Oxidation Decomposition

Yoon Jong Yoo,[†] Hong Soo Kim, Sang Ho Jeon,* and Gun Eik Jang*

Functional Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received November 17, 2004; Accepted January 7, 2005)

초 록

아나타제 TiO₂, 활성탄, 세라믹섬유를 포함하는 VOC 흡착과 광산화분해 특성을 동시에 갖는 내구성이 우수한 광촉매 종이를 제조하여 그 특성을 분석하였다. 광촉매 종이 제조용 슬러리 내에 함유되어 있는 TiO₂를 활성탄 및 세라믹섬유 표면에 선택적으로 결합시키기 위한 PDADMAC의 적정농도범위는 10~15 ppm이었으며, 제지방법에 의해 만들어진 광촉매 종이는 두께 0.4 mm, 평량 380 g/m²을 나타내었다. 제조된 광촉매 종이는 활성탄에 의한 흡착과 TiO₂에 의한 광산화 분해 반응이 동시에 진행되어 이들 두 반응이 각각 단독으로 진행되는 VOC 제거용 소재에 비하여 아세트알데히드의 제거속도를 크게 증가시켰다. 또한 세라믹섬유-TiO₂, 활성탄-TiO₂의 선택적인 결합은 UV 조사시 TiO₂에 의한 기지내 유기물의 분해를 방지하여 내구성을 개선하는데 효과적이었다.

ABSTRACT

Highly durable photocatalytic paper containing anatase TiO₂, active carbon and ceramic fiber, which can adsorb VOCs and decompose them by photo oxidation simultaneously, was manufactured and characterized. Optimum concentration of PDADMAC to let TiO₂ adhere on the surfaces of active carbon and ceramic fiber selectively was 10~15 ppm in a slurry mixture for making photocatalytic paper. The thickness and basis weight of the produced catalytic paper by paper-making method were 0.4 mm and 380 g/m², respectively. Adsorption reaction by active carbon and photocatalytic decomposition reaction by TiO₂ were proceeded simultaneously, by which the abatement rate was found to be greatly enhanced compared to the similar environment with single adsorption reaction or single photocatalytic reaction only. The selective attachment of TiO₂ on ceramic fiber and active carbon was found to be very effective in preventing decomposition of substrate by the TiO₂ attack during exposure to UV light.

Key words : TiO₂, Photocatalytic paper, VOC, Adsorption, Active carbon

1. 서 론

휘발성유기화합물(VOC)이 대기환경에 미치는 영향과 인체유해성은 익히 잘 알려져 있다. 특히 주거공간의 웰빙함과 함께 실내 VOC 오염물질에 대한 인식이 확대되면서 최근 천연소재를 사용한 건축 내장재의 수요가 급증하고 있으며, 생활주거공간에 존재하는 수 ppm 미만의 VOC를 제거하기 위한 다양한 형태의 실내공기정화기가 보급되어 있는 실정이다. 이러한 실내공기정화기의 대부

분은 활성탄에 의한 흡착이나 TiO₂ 광촉매에 의한 산화 분해반응에 의존하고 있다. 그러나 활성탄에 의한 흡착제거는 흡착제가 흡착포화상태에 이르면 탈기를 시켜줘야 지속적인 성능을 발휘하므로 이를 위한 열원의 공급이나 압력변동이 필요하다. 그렇지만 실내에서 사용하는 콤팩트한 공기정화시스템에 이러한 장치를 설치하는 것은 용이하지 않으며 또한 설비가 가능하다 하더라도 에너지소비 측면에서 바람직하지 못하다. 따라서 실내 저농도 VOC를 제거하기 위한 방법으로 TiO₂ 광촉매를 이용한 광산화분해 방법이 현장에서 많이 적용되고 있으며, TiO₂ 광촉매 자체에 금속이온을 결합시켜 특성을 개선하기 위한 연구와¹⁻³⁾ 흡착제에 촉매이온을 결합시켜 흡착과 촉매산화반응이 동시에 진행되도록 하기 위한 연구들이 활발히

[†]Corresponding author : Yoon Jong Yoo
E-mail : yjyou@kier.re.kr
Tel : +82-42-860-3118 Fax : +82-42-860-3133

진행되고 있다.^{4,5)}

TiO₂ 광촉매의 사용을 위하여 세라믹허니컴에 wash-coating 또는 졸겔법^{6,7)}으로 코팅하거나 천,⁸⁾ 유리섬유,⁹⁾ 유리관¹⁰⁾ 등의 표면에 바인더를 사용하여 코팅한 후 그 특성을 분석한 연구들이 수행되어져 왔으며, 최근 가장 많이 상용화 되어 있는 소재로는 TiO₂ 광촉매 분말과 유기펠프섬유를 혼합하여 종이로 만든 후 이것을 허니컴 형태로 성형하여 사용하는 것이 대부분이다. 그러나 이러한 소재들은 TiO₂를 코팅할 때 사용되는 바인더에 의해 광촉매로서의 고유특성이 크게 저하할 뿐만 아니라 TiO₂에 의한 광산화반응만으로 VOC의 분해가 이루어지기 때문에 제거속도가 느리고, 특히 펄프나 고분자물질 등 유기물로 이루어진 소재에 코팅한 경우에는 자외선(UV) 조사시에 TiO₂에 의한 기지의 분해가 동시에 진행되어 특성이 크게 저하하는 단점을 가지고 있다.¹¹⁾ 또한 압출 허니컴이나 금속소재 허니컴, 유리관 등을 기지로 사용한 경우에는 표면이 치밀하여 흡착제와 함께 코팅하기가 곤란하며, 장기간 사용에 따른 박리현상을 피할 수 없다.

Iguchi 등은 TiO₂, 유기섬유(펠프), 세라믹섬유가 함유된 광촉매종이를 제조함에 있어서 자외선 조사에 따른 TiO₂에 의한 유기섬유의 분해를 방지하기 위하여 광촉매종이 제조시에 응집제로서 polydiallyldimethylammonium (PDADMD)를 사용하여 TiO₂와 세라믹섬유를 선택적으로 결합시켜 줌으로서 자외선의 조사에도 불구하고 TiO₂에 의해 지지 분해가 거의 일어나지 않아 내구성을 크게 개선할 수 있었다고 보고하였다.¹²⁾ 또한 Ichiura 등은 TiO₂-제올라이트 복합시트를 제조하여 NO_x와 아세트알데히드의 제거능력을 평가한 결과 TiO₂나 제올라이트를 단독으로 사용한 경우보다 신속하고 완벽한 제거효율을 얻을 수 있었다고 보고하였고,¹³⁾ Shiraishi의 경우에도 흡착장치와 촉매 반응기를 조합한 시스템에서의 포름알데히드 제거실험 결과 단독적인 시스템에서보다 제거효율을 크게 상승시킬 수 있었다고 보고하였다.¹⁴⁾

본 논문에서는 TiO₂, 활성탄, 세라믹섬유, 유기섬유(펠프)를 포함하는 흡착과 산화분해특성을 동시에 갖는 광촉매종이를 제조하여 그 특성을 파악하고자 하였으며, 특히 종이 제조용 슬러리 내에서 TiO₂가 활성탄과 세라믹섬유 표면에 선택적으로 결합되도록 하기 위한 응집특성을 파악하고자 하였다. 또한 제조된 광촉매종이의 VOC 흡착 및 산화분해특성과 UV 조사에 따른 내구성 변화 등을 비교 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 광촉매 종이의 제조

실험에 사용된 광촉매는 Degussa P25 TiO₂이며, 아나타제 타입으로서 입자크기가 약 30 nm이고 BET 표면적은

50 m²/g을 나타내었다. 활성탄(SDG-100)은 신기화학(주)에서 제공하였으며, 입도는 약 80 μm이고 BET표면적은 1120 m²/g을 나타내었다. 세라믹섬유(1260C-Bulk, TOSHIBA Co.)의 화학조성은 Al₂O₃ ≥ 44%, Al₂O₃ + SiO₂ ≥ 97%이며, 섬유직경은 2.8 μm, 길이는 30 mm 미만이다.

상기한 세 가지 원료를 무게비로 적정량 달아서 400리터 용량의 혼합조에 투입한 후 1200 rpm으로 첨가물들이 완전히 풀어져 분산될 때까지 교반하였으며, 슬러리 제타전위를 측정(ELS-8000, Otsuka Electronics)하였다. 그 후 슬러리 내에 첨가되어 있는 TiO₂ 광촉매를 활성탄과 세라믹섬유 표면에 결합시키기 위하여 양이온성 응결제인 PDADMAC(Fixol-1230, Raisio Chemicals)을 15 ppm의 농도로 첨가하였으며, 실리카졸(ST-30, 일산화학)과 유기섬유(표백할염수 펄프-NBKP), 음이온성 지력증강제(Superex-1726, Raisio Chemicals) 및 polyvinyl acetate(DP-500, 대원폴리머)를 순서에 따라 적정량 첨가하였다.

광촉매종이의 제조를 위한 최종 슬러리의 고형분 농도는 1.2 wt%였으며, 완성된 슬러리를 종이제조장치¹⁵⁾에 공급하여 흡입과 압착에 의한 탈수공정 및 건조공정을 거침으로서 두께 약 0.4 mm, 평량 380 g/m² 정도인 광촉매종이가 제조되었다. 비교분석을 위하여 상기한 슬러리의 조성으로 제조한 샘플을 CS-26으로 명명하였으며, CS-26의 조성에서 세라믹섬유를 첨가하지 않은 샘플을 CS-24, TiO₂ 광촉매를 첨가하지 않은 샘플을 CS-25, 응결제인 PDADMAC를 첨가하지 않은 샘플을 CS-27 그리고 활성탄을 첨가하지 않은 샘플을 CS-28로 명명하였다.

2.2. 광촉매종이의 흡착 및 산화분해특성과 내구성 평가

비교분석을 위하여 제조된 다섯 개의 샘플에 대한 톨루엔 평형흡착량, UV조사에 따른 아세트알데히드의 산화분해능 및 UV 조사전후의 인장특성을 측정하였으며, SEM을 사용한 표면분석과 BET 표면적의 측정(ASAP-2010, Micromeritics)도 수행되었다.

톨루엔(C₆H₅CH₃)에 대한 평형흡착량 측정은 중량법 평형흡착량 측정장치(MSB-30G500P, Rubotherm)를 이용하였으며, 샘플을 반응기에 넣고 120°C에서 2시간동안 진공탈기 하였다. 그 후 톨루엔 분압을 단계적으로 증가시키면서 각 단계에서 무게 변화가 없을 때까지 유지시킨 후 톨루엔 흡착에 의해 증가된 무게를 측정하였다.

광촉매종이의 UV 조사에 따른 아세트알데히드의 제거 특성을 평가하기 위하여 각각의 광촉매종이 샘플을 반응기에 넣기 전에 2.5×2.5 cm의 동일한 크기와 동일한 무게로 취한 후 120°C에서 2시간 동안 진공 탈기하였다. 그 후 UV 조사 반응기에 샘플을 넣고 아세트알데히(CH₃CHO) 초기 농도를 100 ppm으로 맞춘 다음 파장(λ) 370 nm인 UV를 2 mV/cm²의 세기로 샘플과 10 cm 떨어진 상부에서 조사하면서 시간에 따른 아세트알데히드 농도를 GC(HP-5890,

Table 1. Reaction and Physical Characteristics of the Photocatalytic Papers

Sample	Composition	Adsorption amount, 0.1 torr-wt%	Removal rate (%) of CH ₃ CHO	ΔCO_2 ppm, CH ₃ CHO oxidation	ΔCO_2 ppm, substrate oxidation	BET surface area, m ² /g	Strength after UV irradiation, kgf/mm ²		
							0 h	65 h	187 h
CS-24	without CF	7.7	56	75	38	473	2.19	2.13	1.55
CS-25	without TiO ₂	7.3	27	16	14	423	2.13	2.17	2.14
CS-26	with all	6.9	57	112	27	434	2.77	2.63	2.67
CS-27	without PDADMAC	6.5	54	87	36	430	2.52	2.06	1.77
CS-28	without AC	0.2	22	104	75	14	6.92	4.36	2.31

FFAP 25 m × 0.2 mm × 0.33 μm)를 사용해 분석하였다. 한편 UV 조사에 따른 각각의 광촉매종이 샘플 내에 함유되어 있는 유기물의 분해정도를 파악하기 위하여 샘플이 놓여 있는 반응기 내에 아세트알데히드를 투입하기 전 후의 UV 조사에 따른 CO₂ 농도 증가를 CO₂ 분석기(41H, Thermo Environmental Instruments)를 이용하여 분석하였다.

또한 광촉매종이의 UV 조사 전후 인장특성을 파악하기 위하여 각각의 샘플을 폭 2 cm × 길이 22 cm의 크기로 재단하여 동일한 조건에서 건조하였으며, 이들을 UV 조사반응기에 넣고 상기와 동일한 조건으로 0, 65, 187시간 UV를 조사한 후 인장시험기(H10KS-0146, Hounsfield)를 사용하여 표점거리 18 cm, 인장속도 1 mm/min의 조건으로 인장강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 광촉매종이의 응집특성 및 표면특성

광촉매 종이를 제조하기 위한 슬러리 제조공정에서 TiO₂ 광촉매와 활성탄, 세라믹섬유를 첨가한 후 TiO₂ 입자를 활성탄과 세라믹섬유 표면에 선택적으로 결합시키기 위해 사용된 응결제(PDADMAC)의 첨가량 변화에 따른 슬

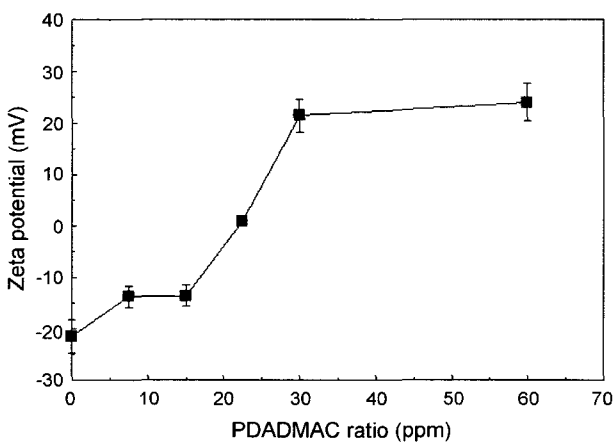


Fig. 1. A variation of zeta potential in a slurry as a function of a coagulant addition rate.

러리 내에서의 제타전위변화를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 응결제를 투입하기 전 슬러리의 제타전위는 -27 mV를 나타냄으로서 슬러리 내에 여분의 음이온이 다량 존재하여 슬러리 내에 존재하는 입자들의 분산을 위한 조건을 충족시켰다. 그러다가 양이온 응결제를 첨가하면 20 ppm 정도에서 음이온과 양이온이 평형을 이루는 등전점이 이루어지며, 응결제의 첨가량을 60 ppm까지 더욱 증가시키면 슬러리의 제타전위는 +30 mV 정도로 증가하여 여분의 양이온이 발생하여 이들의 반발력으로 인한 입자분산 조건이 유지되었다.

이러한 결과로 볼 때 응결제 20 ppm 정도에서 입자들 간의 응집이 가장 잘 이루어지지만 오히려 입자들의 응집이 너무 크게 이루어질 수 있다. 이러한 경우 조대한 응집물의 내부에 분포되어 있는 TiO₂ 입자가 많아져서 UV 조사시 광원의 도달이 곤란함으로 인해 산화특성의 저하를 초래할 수 있고 또한 활성탄과 세라믹섬유의 응집도 조대해져 종이의 평활도에 나쁜 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 따라서 응결제 농도범위를 10~15 ppm 또는 25~30 ppm 일때 가장 좋은 특성의 광촉매 종이를 제조할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서는 10~15 ppm 범위를 선택하여 제조한 결과 Fig. 2의 SEM 사진에 나타난바와 같이 세라믹섬유와 활성탄에 TiO₂ 입자가 많이 분포되었고 전체적으로 첨가물들이 균일하게 혼재된 상태



Fig. 2. SEM image of CS-26 photocatalytic paper.

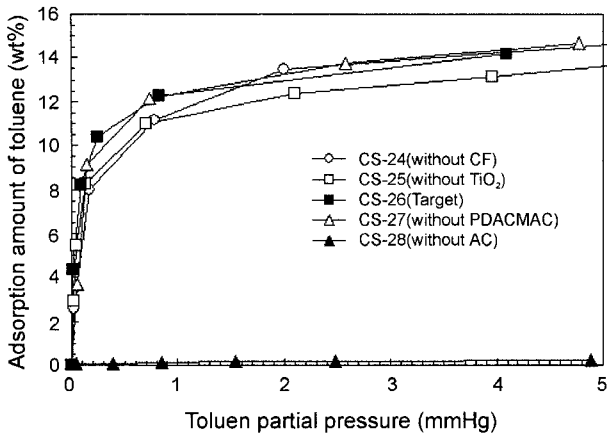


Fig. 3. Equilibrium adsorption amount of toluene on photocatalytic paper : the adsorption temperature was 30°C.

로 분포되어 있는 광촉매종이를 제조할 수 있었다.

3.2. 광촉매종이의 톨루엔 흡착 및 아세트알데히드 제거특성

Fig. 3은 비교를 위하여 제조된 각각의 광촉매종이에 대한 톨루엔 평형흡착실험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 활성탄이 함유되지 않은 CS-28의 경우 톨루엔 흡착이 거의 이루어지지 않았으며, 이는 TiO₂ 분말은 흡착을 위한 기공이 거의 없기 때문이다. 반면에 거의 동일한 량의 활성탄이 함유된 다른 4개의 샘플은 톨루엔 평형흡착량에 있어서도 비슷한 결과를 나타내었다. 따라서 광촉매종이 내에서 흡착에 기여하는 활성탄을 함유시킴으로써 VOC의 제거효율을 크게 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(a)~(e)는 일정농도의 아세트알데히드가 포함된 밀

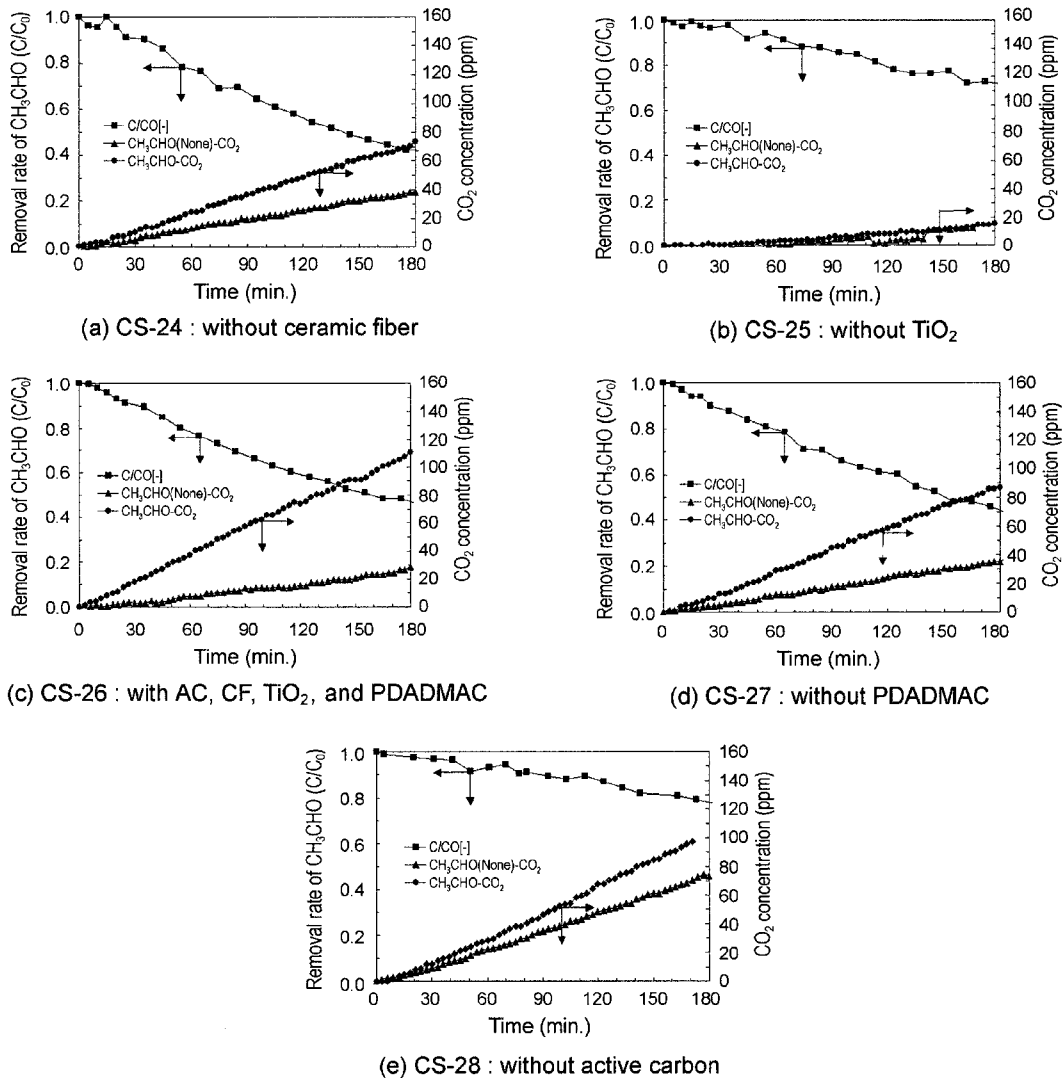


Fig. 4(a-e). Acetaldehyde removal and carbon dioxide formation rate of the photocatalytic paper by adsorption and photocatalytic oxidation.

폐된 공간에 각각의 광촉매종이를 넣고 UV를 조사했을 때 아세트알데히드 제거량(즉, 흡착+광산화분해에 따른 아세트알데히드 제거량, ■) 및 분해량(즉, 광촉매종이의 분해+아세트알데히드분해에 따른 CO₂ 증가량, ●), 그리고 아세트알데히드가 전혀 없는 밀폐된 공간에 광촉매종이를 넣고 UV를 조사했을 때 광촉매종이의 분해에 따른 CO₂ 증가량(▲)을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 일정농도의 아세트알데히드가 포함된 밀폐된 공간에 각각의 광촉매종이 샘플을 넣고 UV를 3시간 조사했을 때 아세트알데히드 제거량(즉, 흡착+광산화분해에 따른 아세트알데히드 제거량, ■)은 CS-24, 26, 27에서 약 55% 정도로 비슷하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 광촉매종이에 함유된 활성탄과 TiO₂ 분말의 양이 거의 같기 때문에 이들에 의한 흡착제거량과 산화분해량 또한 동일한 수준으로 나타나고 있음을 의미한다. 그러나 TiO₂를 넣지 않은 CS-25의 경우에는 CS-24, 26, 27와 동일한 조건으로 UV조사 했음에도 불구하고 아세트알데히드 제거량은 약 27% 정도이며, 활성탄을 넣지 않은 CS-28의 경우에는 약 22% 정도로 낮게 나타났다. 즉 이들의 경우에는 각각 광산화분해 및 흡착특성이 제외된 상태이므로 TiO₂ 분말과 활성탄이 혼재되어 있는 CS-24, 26, 27에 비해서 훨씬 적은 양의 아세트알데히드를 제거시켰다. 따라서 흡착제와 TiO₂ 분말이 혼합되어 이들에 의한 아세트알데히드의 흡착과 광산화분해 반응이 동시에 이루어질 경우 이들이 단독으로 존재하는 경우보다 오염공기의 제거가 훨씬 빠르게 일어남을 알 수 있다.

한편 반응기 내부에 아세트알데히드를 넣지 않고 UV를 조사했을 때 CO₂ 증가량 즉, 광촉매종이 자체의 분해에 따른 CO₂ 증가량(▲)은 CS-25의 경우 TiO₂를 넣지 않음으로 인해 이에 의한 광촉매종이의 분해가 거의 일어나지 않은 결과로서 CO₂ 증가량이 거의 없었다. 또한 CS-26의 경우에도 응집제에 의해 TiO₂가 세라믹섬유 및 활성탄에 선택적으로 결합되어짐으로서 광촉매종이의 분해에 따른 CO₂ 증가량이 상대적으로 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 CS-24, 27, 28의 경우에는 광촉매종이 내에 세라믹섬유, 응집제 또는 활성탄이 각각 결합되어 CS-26에 비하여 상대적으로 CO₂ 증가량이 크게 나타남으로서 광촉매종이 자체의 분해가 많이 일어났음을 알 수 있다. 이러한 결과들은 UV를 조사했을 때 TiO₂에 의해 광촉매종이 내부에 포함된 유기물의 분해가 일어나고 있음을 확인할 수 있는 결과이며, 특히 본 연구에서 제안한 응집제를 사용한 세라믹섬유-광촉매, 활성탄-광촉매 형태의 선택적인 결합은 광촉매종이의 분해를 방지하는데 효과적임을 나타내는 결과라 판단된다.

3.3. 광촉매종이의 내구성 평가

UV 조사반응기에 광촉매종이를 넣고 0, 65, 187시간 동

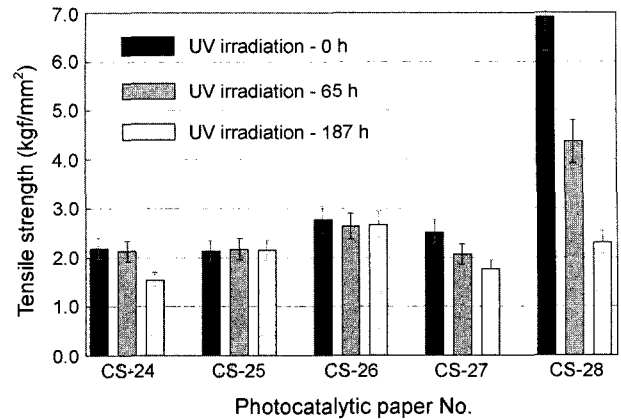


Fig. 5. A variation tensile strength of the photocatalytic papers with different UV irradiation time.

안 UV를 조사한 후 인장 특성을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. CS-26의 경우에는 응집제를 사용하여 무기섬유-광촉매, 활성탄-광촉매의 형태로 TiO₂ 광촉매를 무기물질에 선택적으로 결합시켜 줌으로서 자외선 조사에 따른 광촉매종이의 분해가 거의 일어나지 않아 UV 조사 전후의 인장강도는 거의 같은 값을 나타내었다. 또한 CS-25의 경우에는 광촉매종이 제조시에 TiO₂를 넣지 않은 경우이므로 이 역시 자외선 조사 전후의 인장강도는 거의 같은 값을 나타내었다. 그렇지만 CS-24, 27, 28의 경우에는 자외선을 조사했을 때 TiO₂에 의한 유기물의 분해가 진행되어 UV 조사시간이 길어짐에 따라서 인장강도는 크게 감소하였다.

특히 CS-27과 CS-28은 인장강도의 감소가 두드러지게 나타났는데 CS-27의 경우에는 응집제를 첨가하지 않음으로 인해 세라믹섬유 및 활성탄과 TiO₂의 선택적인 결합이 이루어지지 않았고 또한 CS-28의 경우에도 흡착제를 첨가하지 않음으로 인해 상대적으로 TiO₂가 유기섬유 표면에 많이 분포되어 UV 조사에 따른 유기섬유의 분해가 크게 일어난 결과라 판단된다. 따라서 UV조사시에 TiO₂에 의한 유기섬유의 분해는 광촉매종이의 내구성에 큰 영향을 미치고 있음이 보다 명백해졌다.

4. 결 론

활성탄, 세라믹섬유 및 TiO₂가 혼합된 광촉매 종이는 일반적인 제조방법에 의해 성공적으로 제조되었으며, 제조과정에서 슬러리 내 제타전위의 제어는 흡착제 및 세라믹섬유와 TiO₂를 선택적으로 결합시키는데 유효하였다. 이러한 결과로서 본 연구에서 궁극적으로 개발하고자 했던 CS-26의 방법으로 제조된 광촉매종이는 VOCs를 제거함에 있어 흡착 및 광산화분해반응이 동시에 진행됨으로서 이들의 반응이 각각 단독적으로 이루어질 때보다 제거효

율이 크게 상승하였다. 또한 CS-26의 경우에는 UV조사 시 순수한 아세트알데히드만의 분해에 따른 CO₂ 증가량이 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 광촉매 종이 제조용 슬러리 제조시 응집제에 의한 세라믹섬유-TiO₂, 활성탄-TiO₂ 형태의 선택적인 결합이 이루어졌기 때문으로 이해할 수 있으며, 결국 광촉매종이의 내구성을 증가시키는 결과를 보여주었다.

제조된 광촉매종이를 사용하여 편파성형 함으로서 얻어진 허니컴은 기존의 제품을 대체시킬 수 있는 충분한 특성을 가졌다고 판단되었으며, 향후 활성탄을 대신하여 제올라이트를 혼합시킨 경우에는 VOCs 뿐만 아니라 NO_x, SO_x 등의 오염물질을 제거하기 위한 소재로도 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 지원한 2004년도 핵심연구개발사업의 수행 결과이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. V. Keller, P. Bernhardt, and F. Garin, "Photocatalytic Oxidation of Butyl Acetate in Vapor Phase on TiO₂, Pt/TiO₂, and WO₃/TiO₂ Catalysts," *J. of Catalysis.*, **215** 129-38 (2003).
2. K. Y. Jung and S. B. Park, "Photoactivity of SiO₂/TiO₂ and ZrO₂/TiO₂ Mixed Oxides Prepared by Sol-Gel Method," *Mater. Lett.*, **58** 2897-900 (2004).
3. S. Yin and T. Sato, "Photocatalytic Activity of Platinum Loaded Fibrous Titania Prepared by Solvothermal Process," *J. of Photochem., A : Chem.*, **169** [1] 89-94 (2005).
4. S. Anandan and M. Yoon, "Photocatalytic Activities Enhanced for Decompositions of Organic Compounds over Metal-Photodepositing Titanium Dioxide," *Chem. Eng. J.*, **97** 203-11 (2004).
5. S. W. Back, J. R. Kim, and S. K. Ihm, "Design of Dual Functional Adsorption/Catalyst System for the Control of VOC's by Using Metal-Loaded Hydrophobic Y-Zeolites," *Catalysis Today*, **93-95** 575-81 (2004).
6. P. Avila, B. Sanchez, and A. I. Cardona, "Influence of the Methods of TiO₂ Incorporation in Monolithic Catalysts for the Photocatalytic Destruction of Chlorinated Hydrocarbons in Gas Phase," *Catalysis Today*, **76** 271-78 (2002).
7. P. Avila, A. Bahamonde, J. Blanco, B. Sanchez, and M. Romero, "Gas-Phase Photo-Assisted Mineralization of Volatile Organic Compounds by Monolithic Titania Catalysts," *Appl. Catalysis B : Environmental*, **17** 75-88 (1998).
8. A. Yamamoto and H. Imai, "Preparation of Titania Foams Having an Open Cellular Structure and their Application to Photocatalysis," *J. of Catalysis*, **226** 462-65 (2004).
9. R. D. Sun, A. Nakajima, I. Watanabe, T. Watanabe, and K. hashimoto, "TiO₂-Coated Optical Fiber Bundles Used as a Photocatalytic Fiber for Decomposition of Gaseous Organic Compounds," *J. of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, **136** 111-16 (2000).
10. Y. Zhang, R. Yang, and R. Zhao, "A Model for Analyzing the Performance of Photocatalytic Air Cleaner in Removing Volatile Organic Compounds," *Atmospheric Environment*, **37** 3395-99 (2003).
11. H. Matsubara, M. Takada, S. Hashimoto, and K. Fujishima, "Photoactive TiO₂ Containing Paper: Preparation and Its Photocatalytic Activity Under Weak UV Light Illumination," *Chem. Lett.*, 767-68 (1995).
12. Y. Iguchi, H. Ichiura, T. Kitaoka, and H. Tanaka, "Preparation and Characteristics of High Containing Titanium Dioxide Photocatalyst Supported on Inorganic Fiber Matrix," *Chemosphere*, **53**, 1193-99 (2003).
13. H. Ichiura, T. Kitaoka, and H. Tanaka, "Preparation of Composite TiO₂-Zeolite Sheets Using a Papermaking Technique and their Application to Environmental Improvement : Part 1. Removal of Acetaldehyde with and without UV Irradiation," *J. of Mater. Sci.*, **37** 2937-41 (2002).
14. F. Shiraishi, S. Yamaguchi, and Y. Ohbuchi, "A Rapid Treatment of Formaldehyde in a Highly Tight Room Using a Photocatalytic Reactor Combined with a Continuous Adsorption and Desorption Apparatus," *Chem. Eng. Sci.*, **58** 929-34 (2003).
15. Y. J. Yoo, J. S. Kim, H. S. Kim, Y. S. Ahn, M. H. Han, and G. E. Jang, "Dispersion Characteristics of Slurry and Preparation of Ceramic Paper," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [11] 1042-47 (2002).