

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드의 아조메틴 일리드 형성 광화학 반응

정호철 · 박기현 · 박혜정 · 조대원 · 윤웅찬*

부산대학교 화학과
(2009. 5. 7 접수)

Azomethine Ylide Forming Photoreaction of *N*-(Tributylstannyl)methylphthalimide

Ho Cheol Jeong, Ki Hyun Park, Hea Jung Park, Dae Won Cho, and Ung Chan Yoon*

Department of Chemistry, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea
(Received May 7, 2009)

요 약. 이 연구에서는 *N*-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드의 광화학 반응에서 관찰한 아조메틴 일리드 반응 중간체 생성 과정과 유사하게 *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드의 광화학반응에서도 생성되는지를 알아보기 위해 *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드의 광화학반응을 연구하였다. *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드를 D_2O-CH_3CN 에서 광화학 반응시킬 때에 생성된 아조메틴 일리드 중간체가 물 분자에 의해 포획되어 생성되는 것으로 예상되는 한 개의 중수소 원자 (D)가 메틸기의 한 개의 수소 (H) 대신에 치환된 d_1 -*N*-메틸프탈이미드 생성물을 유일한 생성물로 높은 수율로 생성시킴을 관찰하였다. 이 결과는 이 광화학 반응에서도 매우 효율적으로 들뜬상태 전자전달-스탄일기 이동 과정을 거쳐 트리부틸스탄일 아조메틴 일리드 반응 중간체가 생성되는 것을 뒷받침 해주고 있다. 그러나 이 반응에서 생성된 트리부틸스탄일 일리드 중간체는 스타일기가 가지는 큰 입체장애 때문에 첨가된 메틸 아크릴레이트나 아크릴로 니트릴과 같은 친쌍극체 (dipolarophile)에 의해 포획되지 않았다.

주제어: *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드, 아조메틴 일리드, 광화학반응, d_1 -*N*-메틸프탈이미드

ABSTRACT. Investigation was conducted to examine whether photochemical reaction of *N*-(tributylstannyl)-methylphthalimide generates an azomethine ylide intermediate in its excited state as its silyl derivative *N*-(trimethylsilyl)methylphthalimide which has been observed to form an azomethine ylide. The irradiation of *N*-(tributylstannyl)methylphthalimide in D_2O-CH_3CN generates mono-deuterated *N*-methylphthalimide as an exclusive product which supports the efficient generation of azomethine ylide intermediate and its trapping by water molecule through a proto-destannylation pathway. However the generated tributylstannyl substituted ylide was not observed to be trapped with a dipolarophile such as methyl acrylate and acrylonitrile present in the reactions which is in contrast with the ylide from *N*-(trimethylsilyl)methylphthalimide.

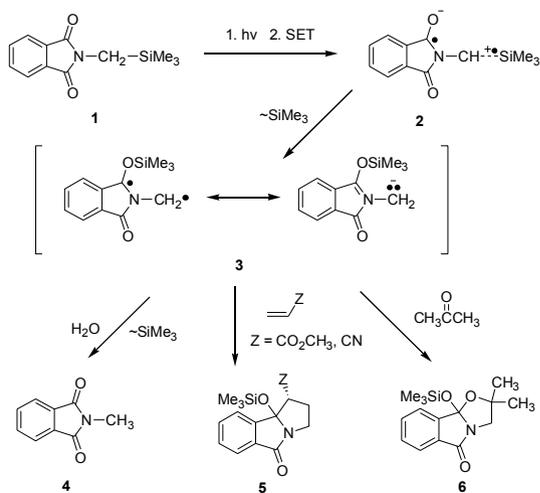
Keywords: *N*-(tributylstannyl)methylphthalimide, Azomethine ylide, Photochemical reaction, Mono-deuterated *N*-methylphthalimide

서 론

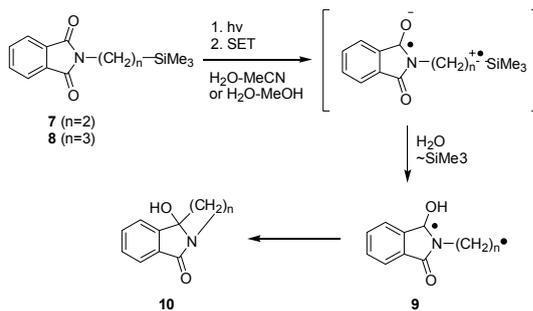
이미드 화합물들의 광화학반응 연구는 지난 연구에서 매우 광범위하게 이루어졌으며¹⁻³ 이미

드 화합물의 한 종류인 프탈이미드화합물들은 광환원 반응 (photoreduction), 광첨가반응 (photo-addition), 광고리화반응 (photocyclization) 그리고 Norrish type I, II 반응 등 다양한 광화학 반응성

을 보여주고 있어 이들에 대한 광화학 반응연구는 특히 많이 이루어져 있다.¹ 최근에 우리는 전자수용체 (electron acceptor)로 이미드 그리고 전자공급체로 α -실릴치환 전자공급체/다전자공급체 (α -silyl terminated electron donor/polyelectron donor)들을 사용한 전자 전달과정을 통해 일어나는 광화학 반응 (single electron transfer promoted photoreaction)을 높은 효율과 위치 선택성을 가지는 거대 헤테로고리 화합물 합성 방법으로 개발할 수 있었다.²⁻⁴ *N*-[(트리메틸실릴)알킬]프탈이미드들의 광화학 반응에 대한 선행 연구에서⁵⁻¹¹ *N*-[(트리메틸실릴)알킬]프탈이미드는 들뜬상태 (excited state)에서 경쟁적으로 수소원자 추출 (hydrogen atom abstraction) 과정과 전자전달(single electron transfer SET) 유도 실릴기 전달 (silyl group transfer)과정이 일어나 이 과정을 통해 다양한 광반응성이 나타남을 관찰하였다. 특히 *N*-[(트리메틸실릴)메틸]프탈이미드 (1)는 전자전달 유도로 탄소원자로부터 산소원자로 일어나는 실릴기 전달 과정⁵⁻⁷을 거쳐 아조메틴 일리드 (3) 중간체를 효율적으로 생성시킴을 관찰하였다. 이들 생성된 아조메틴 일리드 중간체는 물 (H₂O) 분자에 의해 양성자화-탈실릴화 (protodesilylation)과정을 거쳐 *N*-메틸프탈이미드 (4)로 전환되고 반응물에 첨가되어 존재하는 메틸 아크릴레이트, 아크릴로니트릴 혹은 아세톤 등과 같은 친쌍극성체에 의해 1,3-쌍극성 첨가 반응을 통해 포획되어 1,3-쌍극성 생성물 5와 6들이 각각 생성되는 것을 관찰하였다.(Scheme 1)



Scheme 1.



Scheme 2.

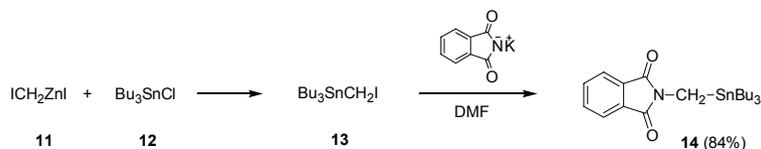
메틸기 보다 더 긴 알킬 사슬을 가진 화합물 *N*-실릴에틸- 그리고 *N*-실릴프로필프탈이미드 7-8 들은 양성자성-극성용매 (예를 들면 H₂O-MeCN 또는 H₂O-MeOH)에서의 광화학 반응에서 전자 전달-실릴기 전달 연속과정을 통해 이가라디칼 (biradical) 중간체 9를 주 반응 생성물로 생성시키며 이 생성된 이가라디칼중간체는 분자 내 라디칼 짝지움 과정을 거쳐 새로운 고리화 반응물 10을 높은 수율로 생성시킴을 관찰하였다. (Scheme 2)

양성자성-극성용매 하에서는 전자전달-실릴기 전달 과정을 통한 고리화반응이 우세하게 관측되는 반면에 극성이 낮은 비 양성자성 (less

polar-aprotic) 용매 하에서는 분자 내 수소원자 추출 (hydrogen atom abstraction) 과정이 경쟁적으로 일어나는 것으로 관찰되었다.⁹⁻¹⁰

실 험

¹H-NMR 스펙트라와 ¹³C-NMR 스펙트라는 Varian Gemini 200 분광계(spectrometer)를 사용하여 측정하였으며 화학적 이동은 내부표준물질로 넣은 테트라메틸실란(TMS)으로부터의 ppm으로 표시하였다. 광화학반응은 450W Hanovia medium pressure mercury lamp와 Pyrex filter 및 Vycor filter, quartz immersion well을 사용하여 질소 기류 하에서 수행하였다. 유기용매는 무수 Na₂SO₄로 탈수시켰으며 용매는 감압 하에서 증류 제거하였다. 관 크로마토그래피는Merck silica gel 60



Scheme 3.

을 사용하였고, 물질 분리를 위한 박층 크로마토그래피 (preparative TLC)는 E-Merck silica gel PF₂₅₄를 입힌 20cm X 20 cm판을 이용하여 수행하였다.

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (N-Tributylstannylmethyl)phthalimide, (14)의 합성

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)는 보고된 합성방법¹²을 따라 합성한 트리부틸스탄일 메틸 요오드 (13)를 프탈이미드 칼륨염과 반응시켜 높은 수율 (84%)로 합성하였다. (Scheme 3)

생성물 14의 스펙트럼자료: ¹H-NMR(CDCl₃) 0.83 (t, 9H, *J* = 7.14, CH₃), 0.92 (t, 6H, *J* = 8.06, SnCH₂), 1.20-1.34 (m, 6H, CH₂CH₂CH₂CH₃), 1.40-1.56 (m, 6H, CH₂CH₂CH₂CH₃), 3.22 (s, 2H, CH₂N), 7.64-7.67 (m, 2H, aromatic), 7.75-7.79 (m, 2H, aromatic); ¹³C-NMR(CDCl₃) 10.2 (CH₃), 13.8 (CH₂-CH₂CH₂CH₃), 21.0 (CH₂N), 27.2 (SnCH₂), 28.9 (CH₂CH₂CH₂CH₃), 122.5 and 133.5 (CH, aromatic), 132.4 (C, aromatic), 168.3 (C=O)

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 CH₃CN용매 하에서의 광화학 반응

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14) (0.50 g, 1.11 mmol)를 200 mL CH₃CN에 녹여 질소 기류 하에서 Pyrex 필터를 이용하여 22시간 동안 광화학반응을 수행하여 *N*-메틸프탈이미드 (4) 0.11 g (88%)을 얻었다.

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 친쌍극성체 메틸 아크릴레이트 (methylacrylate) 첨가하에서의 광화학 반응

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14) (0.50 g, 1.11 mmol)를 200 mL CH₃CN에 녹이고, 메틸 아크릴레이트 (1.02 g, 11.8 mmol)를 첨가하여 질소 기류 하에서 Pyrex 필터를 이용하여 28시간, 33

시간, 46시간 동안 광화학반응을 수행하여 각각 *N*-메틸프탈이미드 (4)를 0.10 g (58%), 0.76 g (42%), 0.52 g (32%) 수율로 얻었다.

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 아크리로나이트릴 (acrylonitrile) 첨가하에서의 광화학 반응

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14) (0.50 g, 1.11 mmol)를 200 mL CH₃CN에 녹이고, 아크리로나이트릴 (0.59 g, 11.1 mmol)를 첨가하여 질소 기류 하에서 Pyrex 필터를 이용하여 32시간 동안 광화학반응을 수행하여 *N*-메틸프탈이미드 (4) (0.58 g, 36%)를 얻었다.

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)와 비닐 아세테이트 (vinylacetate) 존재하에서의 광화학 반응

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14) (0.50 g, 1.11 mmol)를 200 mL CH₃CN에 녹이고, 비닐 아세테이트 (1.02 g, 11.8 mmol)를 첨가하여 질소 기류 하에서 Pyrex 필터를 이용하여 32시간 동안 광화학반응을 수행하여 *N*-메틸프탈이미드 (4) 0.61 g (38%)을 얻었다.

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 CH₃CN-30% D₂O 용매 하에서의 광화학 반응

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14) (50 mg)을 NMR 튜브에 넣고 CH₃CN-30% D₂O 용매 하에서 Pyrex 필터를 이용하여 100시간 동안 광화학반응을 수행하여 메틸기에 중수소 한 원자가 치환된 생성물 d₁-*N*-메틸프탈이미드 (4-d₁)을 90%의 수율로 얻었다.

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 CD₃CN-30% H₂O 용매 하에서의 광화학 반응

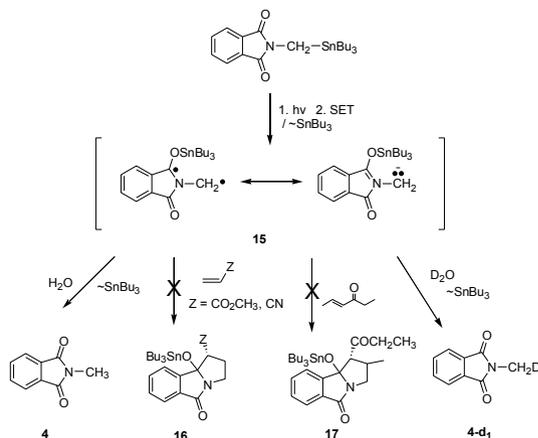
N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14) (50

mg)을 NMR 튜브에 넣고 CH₃CN-30% D₂O 용매 하에서 Pyrex 필터를 이용하여 100시간 동안 광화학반응을 수행하여 N-메틸프탈이미드 (4)를 88%의 수율로 얻었다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 우리들의 선행 연구를^{5,6} 통해 관찰한 N-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드 (1)의 광화학반응에서 효율적으로 생성되는 아조메틴 일리드 반응 중간체 (3)이 트리부틸스탄일 유도체에서도 효율적으로 생성되는지를 조사하기 위해 N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)를 보고된 합성방법¹²을 따라 합성한 트리부틸스탄일메틸 요오드 (13)를 프탈이미드 칼륨염과 반응시켜 높은 수율로 합성하였다. (Scheme 3) 합성한 N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)을 아세트니트릴 용매 중에서 광화학 반응시켜 반응 중간체 아조메틴 일리드 (3)가 생성되어 최종적으로 양성자화-탈스탄일 (protodestannylation) 과정을 거쳐 생성될 것으로 예상되는 N-메틸프탈이미드 (4)가 생성되는지를 관찰하였다. 이 광화학반응에서 예상되는 생성물 N-메틸프탈이미드 (4)가 매우 높은 수율 (88%)로 생성됨을 관찰하였다. N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 아세트니트릴 용매 중에서의 광화학 반응에서 예상되는 생성물 N-메틸프탈이미드 (4)가 매우 높은 수율로 생성됨은 이 반응에서도 실릴유도체 N-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드 (1)의 광화학 반응에서와 유사하게 트리부틸스탄일기의 탄소원자로부터 산소원자로의 전달과정을 거쳐 아조메틴 일리드 반응 중간체 (15)가 유사한 전자전달-스탄일기 이동 연속과정 (sequential SET-destannylation pathway)을 거쳐 효율적으로 생성됨을 보여주고 있다. (Scheme 4)

N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 광화학 반응에서 예상되는 생성물 N-메틸프탈이미드 (4)가 높은 수율로 생성되고 따라서 이 반응에서도 실릴유도체 N-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드 (1)의 광화학 반응에서와 유사하게 연속과정 (sequential SET-destannylation pathway)을 거쳐 아조메틴 일리드 반응 중간체 (15)가 효율적



Scheme 4.

으로 생성됨을 보여주고 있어 N-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드 (1)의 선행 연구에서와 유사하게 반응물 중에 첨가되어 존재하는 1,3-친쌍극체들 메틸 아크릴레이트, 아크릴로니트릴이나 비닐 아세테이트 등에 의해 생성된 아조메틴 일리드 중간체가 1,3-쌍극성 고리첨가반응을 거쳐 포획되는지를 조사하였다. 그러나 실릴유도체 N-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드 (1)의 광화학 반응에서와 달리 생성된 아조메틴 일리드 중간체 (15)는 첨가된 친쌍극체에 의해 포획되어 생성될 것으로 예상되는 고리화합물이 생성되지 않고 유일하게 용매 중에 소량으로 존재하는 물 분자에 의해 생성되는 N-메틸프탈이미드 (4)만이 유일한 생성물로 32~58%로 생성되는 것을 관찰하였다. 이와 같이 N-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 광화학 반응에서 생성되는 트리부틸스탄일 아조메틴 일리드 중간체 (15)는 산소원자에 부피가 매우 큰 트리부틸스탄일기를 가지고 있어 친쌍극체와 1,3-쌍극성 고리화첨가 반응할 때에 나타나는 전이상태에서 매우 증가된 입체장애로 인한 많은 에너지의 증가를 가지고 와서 고리화첨가 반응이 거의 일어나지 않는 것으로 보인다. 이 연구에서 생성된 트리부틸스탄일 아조메틴 일리드 중간체 (15)가 첨가된 친쌍극체들에 의해 포획되지 않아 친쌍극체 메틸 아크릴레이트의 첨가된 농도를 변화시키고 또한 반응시간을 연장하여 반응시켜 조사하였으나 고리첨가 생성물 (16)의 생성을 관찰하지 못하였고 N-

메틸프탈이미드 (4)만이 유일한 생성물로 생성되는 것을 관찰하였다.

이와 같이 *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 광화학 반응에서 생성된 트리부틸스탄일 아조메틴 일리드 중간체 (15)가 산소원자에 존재하는 부피가 큰 트리부틸스탄일기의 입체장애로 인해 반응물에 첨가된 친쌍극체들에 의해 포획되지 않고 *N*-메틸프탈이미드 (4)만이 유일한 생성물로 생성되는 것을 관찰하여 트리부틸스탄일 아조메틴 일리드 중간체 (15)의 생성을 확인하기 위해 중수소원자를 가진 D₂O를 포함하는 CH₃CN-D₂O 혼합용매에서 광화학반응을 수행하여 생성된 트리부틸 아조메틴일리드 중간체가 중수소 양성자에 의해 포획되는지를 조사하였다. 그 결과 메틸기의 수소원자 하나가 중수소로 치환된 중수소치환 *N*-메틸프탈이미드 (4-d₁)가 90%의 수율로 얻어지는 것을 관찰하였다. (Scheme 4) 이와 같이 D₂O를 포함하는 CH₃CN-D₂O 혼합용매에서의 광화학반응에서 얻은 결과는 *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드 (14)의 광화학 반응에서 트리부틸스탄일 아조메틴 일리드 중간체 (15)가 효율적으로 생성되고 D₂O에 의해 효율적으로 포획되는 것을 뒷받침해 주고 있다. 더불어 이 실험에서 생성된 중수소치환 *N*-메틸프탈이미드 (4-d₁)가 트리부틸스탄일 아조메틴 일리드 중간체의 중수소양성자-탈스탄일화 과정(deutrodestannylation pathway)를 거쳐 생성되고 다른 경로를 통해 생성되지 않는 것을 알아보기 위해 중수소원자 공급원을 가진 CD₃CN를 포함하는 CD₃CN-H₂O 혼합용매 하에서 광화학 반응을 수행하여 그 반응에서 생성되는 생성물 *N*-메틸프탈이미드에 중수소원자가 치환되어 존재하는지를 조사하였다. 예상과 같이 이 반응에서는 생성된 *N*-메틸프탈이미드는 중수소원자가 치환되지 않은 *N*-메틸프탈이미드는 (4)가 88%의 수율로 생성되는 것을 관찰하였다.

결 론

이 연구에서는 *N*-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드의 광화학 반응에서 관찰한 아조메틴 일리드 반응 중간체 생성 과정과 유사하게 트리부틸

스탄일 유도체 *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드의 광화학반응에서도 생성되는지를 알아보기 위해 *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드의 광화학반응을 연구하였다. *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드의 CH₃CN 용매에서의 광화학 반응에서 *N*-메틸프탈이미드 생성물이 높은 수율로 생성되며 이러한 반응 결과는 실릴 유도체 *N*-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드의 반응에서와 유사하게 전자전달-스타일기 이동과정을 거쳐 트리부틸 아조메틴 일리드 반응 중간체가 효율적으로 생성됨을 보여주고 있다. 이때 생성된 트리부틸 아조메틴 일리드 반응 중간체의 생성을 확인하기 위해 *N*-(트리부틸스탄일)메틸프탈이미드를 D₂O-CH₃CN에서 광화학 반응시켜 생성된 *N*-메틸프탈이미드에 한 개의 중수소원자가 치환되어 있는 것을 관찰하였다. 이 결과는 이 광화학 반응에서도 매우 효율적으로 아조메틴 일리드 반응 중간체가 생성되는 것을 뒷받침해 주고 있다. 그러나 이 반응에서 생성된 트리부틸스탄일 일리드 중간체는 스타일기가 가지는 큰 입체장애 때문에 *N*-(트리메틸실릴)메틸프탈이미드의 반응에서와 달리 첨가된 메틸 아크릴레이트나 아크릴로 니트릴과 같은 친쌍극체(dipolarophile)에 의해 포획되지 않았다.

감사의 말씀

이 논문은 부산대학교자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

- (a) Kanaoka, Y. *Acc. Chem. Res.* **1978**, *11*, 407; (b) Colye, J. D. In *Synthetic Organic Photochemistry* Horspool, W. M. Ed.; Plenum Press: New York, U. S. A., 1984; p 259; (c) Mazzocchi, P. H. In *Organic Photochemistry* Padwa, A. Ed.; Marcel Dekker: New York, U. S. A., 1981; Vol. 5, p 421 and references therein.
- (a) Yoon, U. C.; Mariano, P. S. In *Organic Photochemistry and Photophysics* Ramamurthy, V.; Schanze, K. Ed.; CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, U. S. A., 2006; p 179 (b) Yoon, U. C.; Mariano, P. S. In *CRC Handbook of Organic Photochemistry and Photobiology 2nd Edition* Ramamurthy, V.;

- Schanze, K. Ed.; CRC Press, Talyor & Boca Raton, FL. U. S. A., 2003; Vol. 85, p 1 (c) Yoon, U. C. Mariano, P. S. *Acc. Chem. Res.* **2001**, 34(7), 523 (d) Yoon, U. C. Jin, Y. X.; Oh, S. W.; Cho, D. W.; Park, K. H.; Mariano, P. S. *J. Photochem. Photobiol. A* : **2002**, 150, 77.
3. (a) Yoon, U. C. Oh, S. W.; Lee, J. H.; Park, J. H.; Kang, K. T.; Mariano, P. S., *J. Org. Chem.* **2001**, 66(3), 939 (b) Yoon, U. C.; Jin, Y. X.; Oh, S. W.; Park, C. H.; Park, J. H.; Campana, C. F. Cai, X.; Duesler, E. N. Mariano, P. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125(35), 10664 (c) Yoon, U. C.; Kwon, H. C.; Hyung, T. G.; Choi, K. H.; Oh, S. W.; Yang, S.; Zhao, Z.; Mariano, P. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, 126(4), 1110 (d) Cho, D. W. Choi, J. H. Oh, S. W. Quan, C. Yoon, U. C. Wang, R. Yang, S. Mariano, P. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, 130(7), 2276 (e) Yoon, U. C. Oh, S. W. Lee, C. W. *Heterocycles* **1995**, 41(12), 2665.
4. (a) Wang, R. Zhao, Z. Mariano, P. S.; Choi, K. H. Kim, S. H. Yoon, U. C. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **2005**, 175(2-3), 232 (b) Yoon, U. C.; Jin, Y. X.; Oh, S. W.; Cho, D. W.; Park, K. H.; Mariano, P. S. *J. Photochem. Photobiol. A* : **2002**, 150, 77 (c) Maeda, H.; Tierney, D. L. Mariano, P. S. Banerjee, M.; Cho, D. W.; Yoon, U. C. *Tetrahedron* **2008**, 64(22), 5268.
5. Yoon, U. C. Kim, D. U. Kim, J. C. Lee, J. G. Mariano, P. S. Lee, Y. J. and Ammon, H. L. *Tetrahedron Lett.* **1993**, 34, 5859.
6. Yoon, U. C. Kim, D. U. Lee, C. W. Choi, Y. S. Lee, Y. J. Ammon, H. L. Mariano, P. S. *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, 117, 2698.
7. Yoon, U. C. Cho, S. J. Lee, Y. J. Mancheno, M. J. Mariano, P. S. *J. Org. Chem.* **1995**, 60(8), 2353
8. Lee, Y. J.; Lee, C. P. Jeon, Y. T. Mariano, P. S. Yoon, U. C. *Tetrahedron Lett.* **1993**, 34, 5855.
9. Lee, Y. J. Ling, R. Mariano, P. S. Yoon, U. C. Kim, D. U. Oh, S. W., *J. Org. Chem.* **1996**, 61(10), 3304-3314.
10. Yoon, U. C. Oh, S. W. Lee, S. M. Cho, S. J. Gamlin, J. Mariano, P. S., *J. Org. Chem.* **1999**, 64(12), 4411-4418.
11. Yoon, U. C. Oh, S. W. Mancheno, M. Su, Z. Falvey, D. F. Mariano, P. S., *J. Am. Chem. Soc.* **1999**, 121(16), 3926-3932.
12. Davis, D. D.; Chambers, R. L.; Johnson, H. T., *J. Organomet. Chem.* **1970**, 25, C13.