

마이크로웨이브와 구리 촉매 조건에서 다양한 방향족할라이드에 대한 페놀 및 사이오페놀 유도체의 친핵성 치환 반응성 연구

강희성 · 염을균 · 허정석*
충남대학교 자연대학 화학과
(접수 2020. 10. 15; 게재확정 2020. 11. 20)

O, S-Aryl Nucleophilic Substitution of Various Aryl Halides Under Microwave-Assisted Copper Catalyzed Reaction

Hee-Sung Kang, Eul Kgun Yum, and Jungseok Heo*

Department of Chemistry, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseung-gu, Daejeon, 34134, Korea.

*E-mail: jungseokheo@cnu.ac.kr

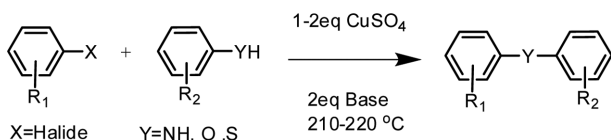
(Received October 15, 2020; Accepted November 20, 2020)

Key words: O, S-아릴 친핵성 치환반응, 방향족할라이드, 페놀 및 사이오페놀, 마이크로웨이브 반응, 구리촉매/L-프롤린

서 론

Diaryl ether 구조는 천연물, 고분자 과학, 약학적으로 활성이 있는 다양한 유기화합물에 존재한다.¹⁻³ 특히 이러한 구조화합물은 다양한 식물 및 인간의 질병분야의 약효를 가지고 있어 치료제로서 광범위하게 사용되고 있다.^{4,5} Diaryl ether 합성에서는 전자가 부족한 방향족 할라이드(aromatic halide)에 친핵성 방향족 치환(Nucleophilic aromatic substitution = S_NAr) 반응이 산업이나 학술적으로 상당히 관심을 가지고 이용되고 있다. 하지만 S_NAr은 방향족고리에 전자를 강하게 당기는 치환체를 가지며 전기 음성도가 큰 할라이드가 도입되어 있는 경우에만 친핵성치환반응이 잘 진행되는 성질이 있다.⁶ 다른 O-Nucleophile을 이용한 aryl ether 형성 반응은 Ullmann에 의해 처음보고 되었으며 초기 연구에서는 몇 가지 해결해야 하는 단점을 가지고 있었다 (Scheme 1).^{7,8}

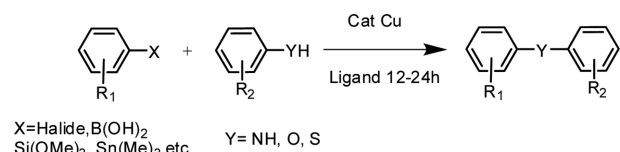
고전적인 Ullmann 방법은 치환체에 매우 민감하며 당량 이상의 구리시약이 필요 하고 과격히 높은 반응온도와 긴 반응 시간이 필요하여 온도에 민감한 화합물 들은 낮은 수율과 부반응을 동반하는 문제점을 가지고 있었다.



Scheme 1. O-nucleophile을 이용한 aryl ether 형성 반응.

최근에는 Ullmann 결합반응의 단점을 극복하기 위하여 N,O-, N,N-,과 O,O-bidentate ligand를 이용한 Cu, Pd, Fe, Rh 촉매 금속을 이용한 보다 효율적인 방법이 연구되어 효율적 합성 방법임을 보여 주고 있다.⁹ 하지만 변형된 리간드를 이용한 Ullmann 결합반응은 열반응을 이용하여 진행되며 대체로 긴 반응시간(12-24 h)이 필요하며 동일한 반응도 사용되는 리간드와 금속촉매에 따라서 반응수율 및 반응 시간이 현저히 달라지는 것을 보여주었다(Scheme 2).¹⁰⁻¹²

최근 녹색 화학(Green chemistry)이 화학이나 화학공학에서 큰 주목을 받고 있는데 그 이유는 생성물의 수율을 높이기 위함 뿐만 아니라 해로운 물질의 생성을 줄이거나 에너지를 절약하는 화학 관련분야에 많은 관심을 가지고 연구되고 있기 때문이다.¹³ 이러한 그린화학의 다양한 방법 중 마이크로웨이브를 이용한 화학반응이 유기화학, 나노화학, 고체화학 등 화학의 다양한 분야에서 매우 효율적인 방법임을 보여주고 있다.^{14,15} 마이크로 웨이브를 이용하면 기존에 사용하던 열반응의 긴 반응시간을 현저히 줄일 수 있을 뿐만 아니라 생성물의 수율을 향상하며 부반응을 감소 시키는 장점이 있다. 따라서 마이크로웨이브



Scheme 2. N,O-, N,N-,과 O,O-bidentate ligand를 활용한 Ullmann 결합반응.

를 이용한 의약합성, 정밀화학제품, 소재 화학물질의 합성은 매우 유용한 방법으로 활용되고 있다.¹⁶ 본 연구실은 마이크로 웨이브를 이용한 유기금속 반응을 통하여 헤테로고리 화합물의 다양화에 관한 연구를 진행하였으며,¹⁷⁻¹⁹ 최근 보고한 구리촉매와 리간드 없이 질소접합고리 화합물의 C-O 결합 형성 반응¹⁹과 달리 단일환 방향족 할라이드의 종류와 위치에 따른 C-O, C-S 결합형성 반응을 이해함으로써 신약연구에 필요한 아릴 에테르 기본 골격을 용이하게 확보 할 수 있는 기초연구를 수행 하였다.

결과 및 고찰

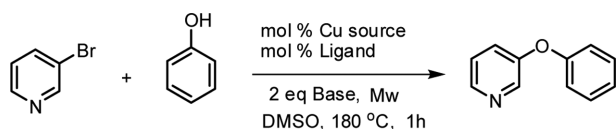
방향족고리 화합물에 *O*-aryl을 도입하기 위해서는 촉매, 리간드, 염기, 용매 등의 여러 가지 반응조건에 따라서 마이크로웨이브 반응의 효율성이 결정된다. 따라서 본 실험에서는 우선 다양한 리간드, 촉매, 염기, 용매 등의 반응조건 변화를 통하여 3-브로모 피리딘과 페놀에 적용하여 *O*-arylation 반응조건의 최적화를 수행하였다(Table 1).

동일한 온도의 마이크로웨이브 반응조건에서 4종류의 리간드를 바꿔가면서 그에 따른 수율의 변화를 살펴 보았다. L-proline 을 리간드로 Ulmann 반응을 보고한 사례가 있다.²¹ 본 연구에서도 L-proline 을 리간드로 진행했을 경우 리간드가 충분한 최적 조건에서 출발 물질이 완전히 반응하였다. 리간드가 부족하거나 다른 구조의 리간드들을

사용한 경우에는 완전히 반응이 진행되지 않아 출발물질이 남아 있었다(entries 1-7). 동일반응에 온도를 200 °C 이상 올려 반응을 진행하여도 수율은 크게 변하지 않았다. 위의 반응에서 가장 좋은 효율을 보이는 L-proline의 당량이 반응에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 L-proline의 당량을 조절하면서 실험을 수행하였다. 리간드를 20 mol% 보다 소량 사용할 경우 반응의 수율이 떨어지는 것을 확인하였다. 하지만 20 mol% 이상을 사용하여도 거의 같은 수율을 보이기 때문에 20 mol%를 최적 조건으로 설정하였다(entries 2-4). 다른 L-histidine, picolinic acid 및 살리실산 리간드 조건에서도 58-77%의 수율로 반응이 진행되었다(entries 5-7). 따라서 C-O 결합반응의 가장 좋은 효율을 보인 L-proline 리간드의 20 mol% 조건에서 다양한 구리 촉매에 대한 수율의 변화를 살펴보았다. CuI, CuBr, Cu₂O와 같은 산화상태가 Cu(I)인 촉매들은 비교적 높은 수율로 반응이 진행되었다(entries 3, 8-9). 하지만 산화상태가 Cu(II)인 Cu(OAc)₂와 CuO 촉매반응에서는 완전히 반응이 완료되지 못하여 약간 낮은 생성물의 수율을 보여주고 있다(entries 10-11).

다음으로 일정한 마이크로웨이브 반응조건하에 염기에 따른 수율의 변화를 살펴보았다. K₃PO₄를 염기로 진행하였을 경우 Cs₂CO₃, K₂CO₃와 Na₂CO₃로 반응을 진행하였을 때 보다 훨씬 수율이 향상됨을 보여주고 있다(entries 12-14). 한편 반응에서 염기의 당량은 1당량보다 2당량일 때 약간

Table 1. C-O 결합반응을 위한 3-브로모 피리딘과 페놀의 최적화 반응조건의 확립



Entry ^{a,b}	mol% (Ligand)	Ligand	Cu Source	Base (2 eq)	Yields (%)
1	-	-	CuI	K ₃ PO ₄	25
2	10	L-proline	CuI	K ₃ PO ₄	40
3	20	L-proline	CuI	K ₃ PO ₄	96
4	30	L-proline	CuI	K ₃ PO ₄	98
5	20	L-histidine	CuI	K ₃ PO ₄	77
6	20	Picolinic acid	CuI	K ₃ PO ₄	75
7	20	Salicylic acid	CuI	K ₃ PO ₄	58
8	20	L-proline	CuBr	K ₃ PO ₄	92
9	20	L-proline	Cu ₂ O	K ₃ PO ₄	85
10	20	L-proline	Cu(OAc) ₂	K ₃ PO ₄	60
11	20	L-proline	CuO	K ₃ PO ₄	38
12	20	L-proline	CuI	K ₂ CO ₃	40
13	20	L-proline	CuI	Cs ₂ CO ₃	45
14	20	L-proline	CuI	Na ₂ CO ₃	50

^a모든 반응은 1.0 mmol scale 로 Biotage 5-mL 바이알과 initiator instrument (EXP EU, Biotage, 400 W, 2450 MHz)를 이용하여 진행하였다.

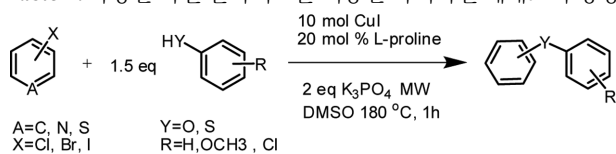
^b반응용기의 내부압력은 180 °C에서 5-7 기압을 유지하였다.

의 수율 증가를 보여주고 있으며 2당량 이상에서는 수율 증가를 보여주지 않았다. 따라서 위의 Table 1의 결과로부터 방향족할라이드(1 당량)와 페놀(1.5 당량)을 이용한 최적반응 조건은 10 mol% CuI, 20 mol% L-proline, 2 당량 K₃PO₄, 및 DMSO 용매를 이용하여 180 °C에서 1 시간 임을 확인하였다.

본 연구의 목적인 다양한 방향족 할라이드와 페놀 및 싸이오페놀의 반응성을 살펴보기 위하여 확립된 최적의 반응 조건에서 C-O와 C-S 결합생성을 고찰하였다(Table 2).

3-브로모 피리딘은 2- 또는 4-브로모 피리딘 에 비하여

Table 2. 다양한 아릴 할라이드를 이용한 다이아릴 에테르의 형성



Entry	Ar-X	HO(S)-Ar	Product	Yield (%)
1				96
2				86
3				73
4				81
5				85
6				73
7				90
8				73
9				35
10				94
11				51
12				32

S_NAr 반응이 잘 일어나지 않는 것으로 문헌에 보고되어 있지만, 본 연구에서 확립한 최적화 조건을 이용하여 O-arylation 된 화합물 **2a**을 96% 수율로 얻을 수 있었다. 서로 다른 위치에 할라이드가 도입된 2-클로로-4-아이오도 피리딘 과 2-클로로-5-브로모 피리딘 반응에서 피리딘의 2-위치에 C-O 결합이 형성되어 할라이드의 반응성보다, 위치에 대한 선택성이 C-O 결합의 형성에 더 중요하다는 것을 확인하였다(entries 2, 3). 2,3- 다이브로모 싸이오펜과 페놀의 반응은 생성물 **2d**를 분석한 결과 2위치 Br이 반응성이 더 큰 것을 보여주며 3-위치의 Br은 반응하지 않고 남아 있는 것을 확인할 수 있었다(entry 4). 3-브로모 피리딘과 3-아이오도 피리딘을 4-메톡시 페놀과 반응시킨 결과 3-브로모 피리딘이 더욱 높은 수율로 화합물 **2e**를 생성하였다 (entries 5-6). 4-메톡시 페놀을 이용한 3-브로모 벤젠과 3-아이오도 벤젠 반응에서 3-브로모 벤젠이 더욱 높은 수율로 화합물 **2f**을 주는 것을 확인할 수 있었다 (entries 7-8).

앞에서 C-O 반응에서 확립한 반응조건을 C-S결합 형성에 대하여 실험하기 위하여 2-클로로-5-브로모 피리딘과 싸이오 페놀을 반응시킨 결과 페놀과는 다르게 5-bromo가 반응하며 2-위치의 Cl은 그대로 유지되며 낮은 수율로 화합물 **2g**를 생성하는 것을 확인하였다.

한편 동일한 아이오도 벤젠에서 싸이오 페놀과 4-메톡시 페놀을 반응시킨 결과 싸이오 페놀이 페놀에 비하여 높은 수율의 화합물 **2h** 생성하였다(entries 6 and 10). 3-브로모 피리딘을 싸이오 페놀과 반응시킨 결과 페놀을 사용할 때 보다 낮은 수율로 화합물 **2i**를 생성하였다(entry 11). 마지막으로 2-클로로-5-브로모 피리딘과 2-클로로 싸이오 페놀을 반응을 시킨 결과, 5-위치의 Br이 반응한 화합물 **2j**를 생성하였다(entry 12).

실험 방법

실험기구 및 시약

본 실험에서는 합성을 위해 Biotage 사의 Initiator TM EXP Microwave 반응기를 이용 하였으며, 반응 후에 1차적으로 UV lamp 하에서 TLC를 확인하여 반응의 정도 및 반응 생성물을 확인하였다. ¹H-NMR과 ¹³C-NMR 스펙트럼은 Jeol 사의 JNM-400MHz 모델을 이용하여 확인되었고. Chemical shift는 tetramethyl silane(TMS)를 내부 표준물질로 하여 ppm(δ) 단위로 표시하였다. Coupling 상수 *J*는 Hz로 표시 하였다. Mass 스펙트럼은 MS-DX303 mass spectrometer를 사용하여 측정하였다. 컬럼 크로마토그래피는 Merck silica gel 60 (230 -400 mesh)를 사용하였다.

본 실험에서 합성을 위해 사용한 시약은 Aldrich 사 및

TCI사 등의 상업적으로 구입 할 수 있는 시약을 사용하였으며, 합성 및 추출 용매는 Aldrich사 및 Samchun사의 시약을 정제 없이 사용하였다. 분석용 NMR용매로는 Aldrich사의 chloroform-*d* 99.8%를 사용하였다.

실험내용

대표적 Microwave 반응을 이용한 C-O 및 C-S결합 형성반응 실험 방법

Microwave 반응을 위하여 3-브로모 피리딘 (1.0 mmol, 158 mg), 페놀(1.5 mmol, 141 mg), K₃PO₄ (2 mmol, 425 mg), CuI (10 mol%, 19 mg, 0.10 mmol), L-proline (23 mg, 0.20 mmol), DMSO 3 ml를 5 ml 마이크로웨이브 바이알에 압력에 견디는 cap을 밀봉하여 반응기에 넣고 180 °C에서 1시간 반응시켰다. 반응 후 TLC를 이용하여 반응 정도를 확인한 후 DMSO를 제거하기 위하여 NH₄Cl 포화 수용액과 ethyl acetate를 이용하여 추출하였다. Ethyl acetate 층은 MgSO₄로 건조한 후 감압 하에서 용매를 제거하였다. 생성물은 hexane/ethyl acetate (10:1)을 사용하여 컬럼 크로마토그래피 통하여 연노란색 액체 화합물 **2a**를 96%수율로 얻었다.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 8.2 (m, 2H), 7.3 (m, 4H), 6.9 (m, 3H); ¹³C NMR(100 MHz, CDCl₃) δ 153.2, 153.0, 139.0, 137.5, 127.7, 122.6, 122.0, 120.7, 117.3.: Ms *m/z* (relative intensity) : 171(M⁺).

아래의 화합물들은 위의 대표적 합성 방법에 따라 합성하였다.

4-Iodo-2-phenoxy pyridine (2b)

화합물은 페놀과 2-클로로-4-아이오도 피리딘을 사용하여 흰색 고체 86 %를 얻었다.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 7.2 (m, 3H), 7.0 (m, 4H), 6.5 (m, 1H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 163.3, 153.4, 146.1, 125.3, 122.7, 120.3, 113.0, 104.3; Ms *m/z* (relative intensity) : 297(M⁺).

5-Bromo-2-phenoxy pyridine (2c)

화합물은 페놀과 5-브로모-2-클로로 피리딘을 사용하여 연보라색 액체(수율 73%)를 얻었다.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 7.6 (s, 1H), 7.51 (m, 1H), 7.2 (m, 2H), 7.0 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 161.8, 154.7, 150.8, 147.5 128.5, 123.4, 121.6, 109.0, 107.3; Ms *m/z* (relative intensity): 252(M+2), 250(M⁺).

3-Bromo-2-phenoxy thiophene (2d)

화합물은 페놀과 2,3-다이브로모 싸이오펜을 사용하여 노란색 액체(수율 81%)를 얻었다.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 7.8 (d, 1H, *J* = 1.2 Hz), 7.2 (m, 2H), 7.0 (m, 3H), 4.32 (d, 1H, *J* = 1.2 Hz); ¹³C NMR

(100 MHz, CDCl₃) δ 163.5, 156.2, 130.1, 128.4, 124.1, 122.9, 117.4, 88.4.; Ms *m/z* (relative intensity) : 255(M+2), 253(M⁺).

3-(4-Methoxyphenoxy)pyridine (2e)

화합물은 4-메톡시 페놀과 2-브로모 피리딘을 사용하여 무색 액체(수율 85%)를 얻었다.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 8.31 (s, 1H), 8.2 (m, 1H), 6.9~7.2 (m, 6H), 3.61(s, 3H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 156.1, 154.2, 148.7, 141.6, 139.8, 125.4, 125.0, 119.8, 116.2, 55.3; Ms *m/z* (relative intensity) : 201(M⁺).

1-Methoxy 4-phenoxy benzene (2f)

화합물은 4-메톡시 페놀과 브로모 벤젠을 사용하여 무색 액체(수율 90%)를 얻었다.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 7.3 (m, 4H), 7.1 (m, 3H), 6.9 (m, 2H), 3.61 (s, 3H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 157.0, 153.5, 149.2, 128.1, 121.4, 119.5, 118.6, 114.1, 55.8; Ms *m/z* (relative intensity) : 200(M⁺).

2-Chloro-5-(phenylthio)pyridine (2g)

화합물은 벤젠 싸이올과 5-브로모-2-클로로 피리딘을 사용하여 갈색 액체(수율 35%)를 얻었다.

¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 8.64 (s, 1H), 7.71 (d, 1H, *J* = 1.2 Hz), 7.3 (m, 5H), 7.1 (d, 1H, *J* = 1.2 Hz); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 149.4, 148.5, 137.1, 136.4, 135.8, 131.2, 129.8, 129.1, 125.5; Ms *m/z* (relative intensity) : 223(M+2), 221(M⁺).

Diphenylsulfide (2h)

화합물은 싸이오페놀 과 아이오도 벤젠을 사용하여 노란색 고체(수율 94%)를 얻었다.

m.p. 123 °C; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 7.4 (m, 4H), 7.2 (m, 6H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 135.5, 131.7, 129.8, 127.2; Ms *m/z* (relative intensity) : 186(M⁺).

2-(Phenylthio)pyridine (2i)

싸이오페놀과 2-브로모 피리딘을 사용하여 노란색 고체(수율 51%)를 얻었다.

m.p. 123 °C: ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 8.3 (m, 2H), 7.4 (m, 4H), 7.0 (m, 3H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 154.0, 153.3, 140.2, 138.1, 128.3, 123.4, 123.1 121.3, 118.2; Ms *m/z* (relative intensity) : 187(M⁺).

2-Chloro-5-(2-chlorophenylthio)pyridine (2j)

화합물은 2-클로로벤젠 싸이올 과 5-브로모-2-클로로 피리딘을 사용하여 노란색 고체(수율 32%)를 얻었다. m.p. 123 °C; ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ 8.6 (s, 1H) 7.7 (m, 2H), 7.1 (m, 4H); ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ 149.7, 148.7, 137.6, 136.0, 128.5, 131.6, 131.2, 130.1, 128.6, 127.3, 129.9; Ms *m/z* (relative intensity): 259(M+4), 257(M+2), 255(M⁺).

결 론

구리 촉매/L-proline 리간드의 마이크로웨이브 반응기를 이용하여 방향족 할라이드와 페놀과 싸이오페놀의 친핵성 치환 반응이 다양한 방향족할라이드 유도체에 적용 가능함을 확인하였다. 또한 페놀과 싸이오페놀의 경우를 비교하여 서로 다른 위치 선택성이 나타나는 유용한 특성을 관찰하였다. O,S-arylation 수율과 반응성은 방향족 할라이드의 종류와 위치에 따라 큰 영향을 받음을 보여주고 있다. 특히 헤테로아릴 할라이드의 종류와 위치선택성은 헤테로아릴 에테르 할라이드를 제공하여 유기금속을 통한 합성 연구에 필요한 중간체로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement. This work was financially supported by the research fund of Chungnam National University.

REFERENCES

- Cirla, A.; Mann, J. *Nat. Prod. Rep.*, **2003**, *20*, 558.
- Pitsinos, E. N.; Vidali, V. P.; Couladouros, E. A. *Eur. J. Org. Chem.* **2011**, 1207 and references cited therein.
- Brockway, A. J.; Grove, C. I.; Mahoney, M. E.; Shaw, J. T. *Tetrahedron Lett.* **2015**, *56*, 3396
- am Ende, C. W.; Knudson, S. E.; Liu, N.; Child, J.; Sullivan, T. J.; Boyne, M.; Xu, H.; Gegina, Y.; Knudson, D. L.; Johnson, F.; Peloquin, C. A.; Slayden, R. A.; Tonge, P. J. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2008**, *18*, 3029.
- Cox, C. *Journal of Pesticide Reform Summer* **2003**, *23*, 10.
- Walton, J. W.; William, J. M. J. *Chem. Commun.*, **2015**, 51, 2786.
- Ullmann, F.; Bieleccki, J. *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1901**, *34*, 2174.
- Ullmann, F. *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1903**, *36*, 2382.
- (a) Krishnan, K. K.; Ujwaldev, S. M.; Sindhu, K. S.; Anilkumar, G. *Tetrahedron* **2016**, *72*, 7393 and references cited therein. (b) Yang, S.; Wu, C.; Zhou, H.; Yang, Y.; Zhao, Y.; Wang, C.; Yang, W.; Xu, J. *Advanced Synthesis & Catalysis.* **2013**, *355*, 53. (c) Ramezani, L.; Yahyazadeh, A.; Sheykhan, M. *ChemCatChem* **2018**, *10*, 4636.
- Qiao, J. X.; Lam, P. Y. S. *Synthesis* **2011**, 829.
- Kunz, K.; Scholz, U.; Ganzer, D. *Synthesis* **2003**, 2428.
- Frlan, R.; Kikelj, D. *Synthesis* **2006**, 2271.
- Bryan, M. C.; Dunn, P. J.; Entwistle, D.; Gallou, F.; Koenig, S. G.; Hayler, J. D.; Hickey, M. R.; Hughes, S.; Kopach, M. E.; Moine, G.; Richardson, P.; Roschangar, F.; Steven, A.; Weiberth, F. J. *Green Chem.*, **2018**, *20*, 5082.
- Gawande, M. B.; Shelke, S. N.; Zboril, R.; Varma, R. S. *Acc. Chem. Res.* **2014**, *47*, 1338.
- Kumar, A.; Kuang, Y.; Ling, Z.; Sun, X. *Materials Today Nano*, **2020**, 100076.
- Kappe, C. O.; Dallinger, D.; Murphree, S. S. *Practical Microwave Synthesis for Organic Synthesis*, Wiley-VCH, Weinheim, **2009**.
- Park, A. R.; Yum, E. K. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2018**, *39*, 1259.
- Oh, Y. J.; Yum, E. K. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2019**, *40*, 404.
- Park, A. R.; Choi, S. M.; Kim, T. S.; Yum, E. K. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2019**, *40*, 1134.
- Choi, S. M.; Byeon, J. S.; Yum, E. K. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2020**, *41*, 837.
- Ma, D.; Cai, Q. *Synlett*, **2004**, 128.