

Research Article



CrossMark

Open Access

## 당근 Phytoalexin 6-Methoxymellein 생합성에 미치는 Polychlorinated Biphenyls 및 Phenol의 영향

임도형, 임다솜, 김영수\*

건국대학교 생명환경과학대학 생명자원식품공학과

### Effects of Polychlorinated Biphenyls and Phenols on the Biosynthesis of 6-Methoxymellein, a Phytoalexin

Do-Hyung Lim, Da-Som Lim and Young-Soo Keum\* (Department of Bioresources and Food Science, College of Life and Environmental Sciences, Konkuk University, Seoul 27478, Korea)

Received: 11 July 2016 / Revised: 27 July 2016 / Accepted: 10 August 2016

Copyright © 2016 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### ORCID

Young-Soo Keum

<http://orcid.org/0000-0003-0682-5399>

Do-Hyung Lim

<http://orcid.org/0000-0002-8325-6268>

#### Abstract

**BACKGROUND:** Polychlorinated biphenyls (PCBs) are one of the most common environmental contaminants. Because of their recalcitrant properties and long-term toxicity, numerous studies have been performed. The toxicological concerns are focused on endocrinological effects of animal. Several different metabolites have been reported, including hydroxy PCBs, PCB quinones, and methylsulfonyl PCBs from animal tissues. However, details in plants have never been studied. It is well-known that plants can produce phytoalexin in response to chemical, physical, or pathological stress.

**METHODS AND RESULTS:** In this study, the several PCBs and hydroxy derivatives were prepared by chemical syntheses. Their effects on secondary metabolite biosynthesis were determined in carrot roots. The levels of 6-methoxymellein were determined in several different treatments, using gas chromatography-mass spectrometry. In general, the concentration of 6-methoxymellein reached a maximum at 2 days and gradually decreased to

trace level at 5 days in control experiments. However, the effects of PCBs or hydroxy derivatives were highly dependent on compounds. For example, the maximum concentrations of 6-methoxymellein were observed at 3 days for 2-hydroxy/4-hydroxybiphenyl, while 3,3',4,4',5-pentachlorobiphenyl and 3,5-dichloro-2-hydroxybiphenyl showed a rapid accumulation within 1 day, followed by rapid dissipation to undetectable levels.

**CONCLUSION:** Biphenyl derivatives were effective elicitor of 6-methoxymellein accumulation. In general, hydroxybiphenyls (phenols) more efficiently induced phytoalexin biosynthesis than those without hydroxy groups. It can be concluded that PCBs or their possible metabolites could change the plant secondary metabolism.

**Key words:** Biosynthesis, Elicitor, Phenol, Phytoalexin, Polychlorinated biphenyl, 6-methoxymellein

#### 서론

농작물을 비롯한 식물의 생리-생태학적 반응과 생화학적 조성은 다양한 환경인자에 의하여 변화된다(DiCosmo and Towers, 1984; Gershenzon, 1984; Hancianu and Aprotosoie, 2012). 이와 같은 환경 요인으로는 기후, 토성,

\*Corresponding author: Young-Soo Keum  
Phone: +82-2-450-3758; Fax: +82-2-450-3726;  
E-mail: [rational@konkuk.ac.kr](mailto:rational@konkuk.ac.kr)

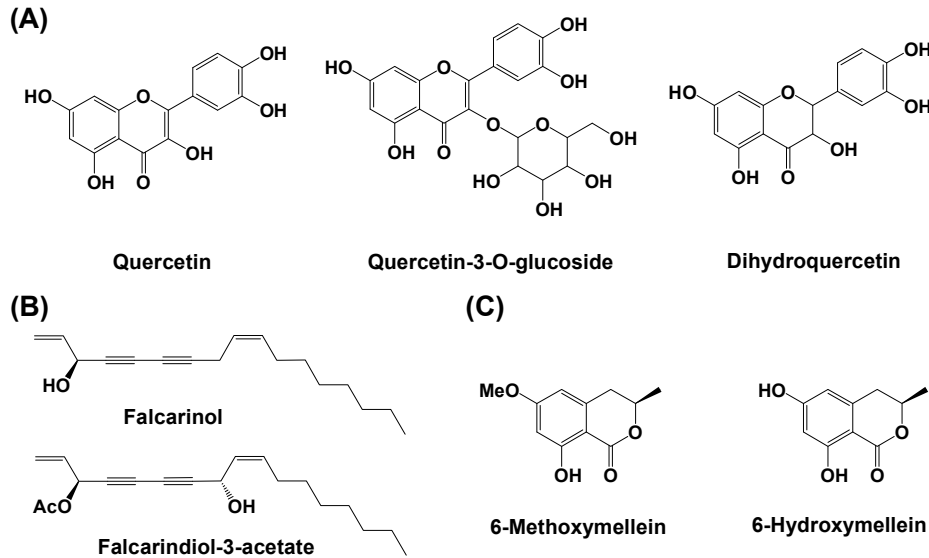


Fig. 1. Bioactive natural products from carrot (*Daucus carota*), flavonoids (A), polyacetylenes (B), and isocoumarins (C).

미생물상, 및 농약을 비롯한 외래화합물의 유입/유출 등을 들 수 있다(Akula and Ravishankar, 2011). 이 가운데 농약 등의 화학적 인자가 식물 대사과정에 미치는 영향에 대한 연구는 비교적 다양한 측면으로 수행되었다. 예를 들어 광합성 저해제로서 작용하는 일부 제초제는 호밀의 대표적 생리활성 성분인 5-alkylresorcinol의 생합성을 촉진하는 것으로 밝혀졌다(Magnucka *et al.*, 2014). 반면 glyphosate 및 alachlor 등의 경우, 일부 식물의 flavonoid 생합성에 대한 강한 저해효과를 나타내었다(Lydon and Duke, 1989). 한편 식물은 환경 스트레스 요인에 대하여 다양한 생화학적 반응을 나타내는 데, 일차대사과정은 물론, 이차 대사물의 생합성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Akula and Ravishankar, 2011). 식물은 외부 환경스트레스에 대하여 systemic acquired resistance(SAR)로 지칭되는 방어반응을 일으키는 데, 이와 같은 반응은 외래물질 뿐만아니라 salicylate등의 내생물질도 관여하며, acibenzolar 등의 일부 농약은 SAR을 이용하여 식물의 병해저항성을 증대시키는 것으로 알려져 있다(Rohilla *et al.*, 2002). SAR에 의하여 나타나는 생화학적 변화 중, 대표적인 것으로 파이토알렉신(phytoalexin) 생합성 유도를 들 수 있다. 파이토알렉신은 식물이 환경 스트레스에 반응하여 생합성하는 물질로서 일반적으로 강력한 항균활성 및 타감작용 등의 유용한 생리활성을 지닌 물질의 총칭이다(Ahuja *et al.*, 2012). 파이토알렉신의 생합성을 유도하는 요인은 병원성 미생물 또는 해당 미생물이 분비하는 다당류 등의 물질뿐만 아니라 자외선, 기계적 손상, 가뭄 등의 요인과 함께 중금속을 포함한 다양한 외래오염물질이 있다.

당근은 국내 재배종인 대표적 근채류 작물로서  $\beta$ -carotene, lutein 등vitamin이 함유되어 다양한 생리활성을 지닌 것으로 보고되어 있다(Zaini *et al.*, 2012). 한편 당근에는 그 외에도 polyacetylenes, flavonoids, 및 isocoumarins 등 다양

한 이차대사산물이 존재한다(Fig. 1). 6-Methoxymellein (6MM)은 당근에서 발견되는 대표적 파이토알렉신으로서 진균 감염, 중금속 및 에틸렌 등, 화학적 처리에 의하여 당근에 축적되는 것으로 알려져 있다(Kurosaki and Nishi, 1983; Kurosaki, 1994). 6MM은 *Botrytis cinerea* 및 *Alternaria alternata*등 식물병원성 진균에 강한 균사억제효과를 나타낸다고 보고되어 있다 (Kurosaki and Nishi, 1983). 한편 6MM을 비롯한 당근 중 isocoumarin계 물질은 강한 쓴맛을 지니고 있어, 당근 가공품의 맛을 저해하는 요인으로도 작용한다고 알려져 있다 (Czepa and Hofmann, 2003). 6MM의 축적을 유도하는 화학적 요인으로 중금속(HgCl<sub>2</sub>)과 ethylene이 보고된 바 있으나, 실제 재배 환경에 존재하는 다양한 합성 유기화합물에 대한 연구는 부재하다. 이와 같은 화합물은 생리활성과 함께 식품으로서의 당근의 품질을 결정하는 요인으로 작용할 수 있다.

Polychlorinated biphenyls(PCBs)는 다양한 환경에 분포하는 대표적 난분해성 오염물질로서 독성 및 환경 중 동태에 대하여 광범위한 연구가 이루어져 있다. 해당 물질군의 환경 중 대사과정으로는 dehalogenation, hydroxylation, 및 methylsulfonyl화 등이 보고되어 있다(Grimm *et al.*, 2015). 일반적으로 지용성이 높은 PCBs의 식물 대사는 비교적 완만한 것으로 알려져 있으나, 10여종의 식물을 이용한 연구에 따르면, 다양한 PCB congener들이 주로 hydroxy PCB 및 배당체로 전환되었다(Wilken *et al.*, 1995). PCBs와 유사한 물리화학적 성상을 지닌, 다핵방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)는 비슷한 대사과정을 거치는 것으로 알려져 있다(Gao *et al.*, 2013). 상기의 연구와 비교하여, PCBs와 hydroxy PCB 등의 대사물이 식물의 대사과정에 미치는 영향에 대한 연구는 수행된 바 없다.

본 연구에서는 식물 중, 존재 가능성이 검증된

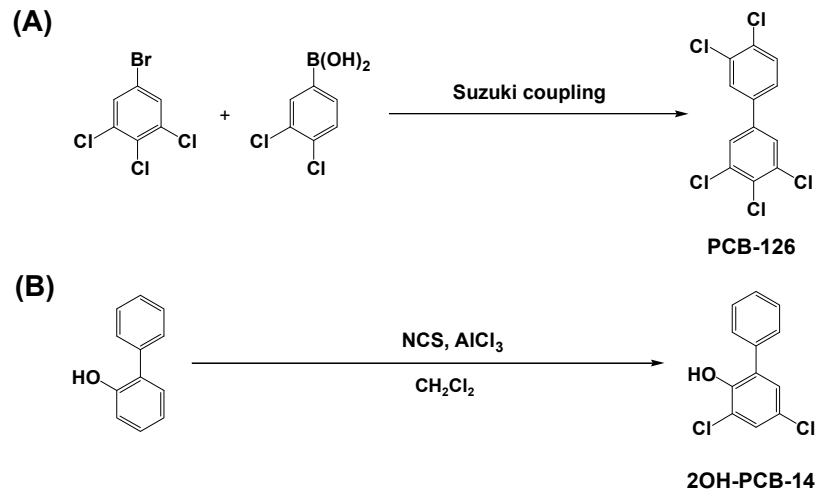


Fig. 2. Syntheses of PCB-126 (A) and 2OH-PCB-14 (B).

hydroxybiphenyl, hydroxy PCBs 수종을 당근에 처리한 후, 뿌리조직에 존재하는 것으로 알려져 있는 파이토알렉신 (6-methoxymellein)의 생합성에 미치는 해당 화합물의 영향을 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 재료 및 시약

Biphenyl(BP), 2-hydroxybiphenyl(2OH-BP), 및 4-hydroxybiphenyl (4OH-BP) 표준품은 Alfa Aesar Korea 사의 제품을 사용하였으며, 크로마토그래피용 silica gel은 Merck사의 제품을 사용하였고, ethyl acetate 등 대사물 추출용 용매는 대정사의(Korea) 제품을 구입, 사용하였다. 대사물의 trimethylsilyl(TMS) 유도체화는 Sigma-Aldrich사의 *N*-Obis(trimethylsilyl)trifluoroacetamide-trimethylchlorosilane (BSTFA-TMCS) 용액을 사용하였다. PCB-126은 Suzuki coupling 방법으로 합성하고, column chromatography를 이용, 정제하여(순도 > 99%) 사용하였다(Kim *et al.*, 2016). 2-hydroxy-3,5-dichlorobiphenyl(2OH-PCB-14)는 *N*-chlorosuccinimide를 이용한 방법으로 합성 및 정제하여(순도 98%) 실험에 사용하였다(Fig. 2).

### Biphenyl 유도체의 당근 disc 처리

실험에 사용한 당근은 노지 재배된 소천 품종(200-300 g)을 시중에서 구매하여 사용하였다. 증류수로 당근 표면을 세척한 다음, 80% ethanol에 1분간 침지 후, 멸균수로 세척하고, 멸균 환경 중에서 당근을 disc 형태로 절단하였다(직경 2-3 cm, 두께 3-4 mm). Biphenyl 등의 연구 대상 화합물은 1000 ppm 표준용액(ethyl acetate)에 cellulose 여과지(직경 15 cm), 침지 후, 1시간 동안 방치하고, petridish(직경 20 cm)에 옮긴 후, 12시간 내외 음건하여 용매를 제거하여 화합물 처리 disc를 조제하였다. GC-MS를 이용한 분석 결

과, 개별 disc에 잔류된 화합물은 대략 93-107  $\mu\text{g}$ 으로 나타났다. Petridish에 멸균수(40 mL)을 가한 다음, 상기 당근 disc를 개별 petridish 당 10개 내외 가하고, incubator를 이용하여, 암조건, 27°C에서 실험을 수행하였다.

### Biphenyl 유도체 분석법

시료(당근, 10 g)을 분취하여, acetone(100 mL)와 1N 황산수용액(2 mL)을 가하여 Waring blender를 이용하여 3분간 마쇄한 다음, sonicator를 이용하여 60분간 추출하였다. 추출물을 감압여과 후, 잔사를 동일한 조건에서 추출하여 여액을 합하였다. 여액을 감압, 건조 후, 잔사는 dichloromethane (50 mL)에 재용해하고, 증류수(100 mL)을 가하여 분배를 실시하였다. 수용액층을 동일한 방법으로 추출하여 유기용매층을 합한 다음, 무수 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 건조하였다. 감압하에서 용매를 제거하고 잔사는 dichloromethane(10 mL)에 재용해하여, biphenyl 및 PCB-126의 경우, 아래와 같은 column chromatography를 수행하였다. 상기의 용액을 적층 황산 silica gel column(column 하단에서부터 silica gel, 0.1 g, 5% 황산-silica gel, 0.9 g, 및 무수 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.1 g)에 가하여 용출한 다음, dichloromethane(5 mL)을 추가하여 biphenyl 및 PCB-126을 용출하였다. 용출분획을 감압 건조하고 dichloromethane(250  $\mu\text{L}$ )에 용해한 다음, gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS)에 주입하여 정량 분석을 수행하였다.

한편 hydroxybiphenyl류(2OH-BP, 4OH-BP 및 2OH-PCB-14)의 경우, 상기의 추출액을 silica gel column chromatography로 아래와 같이 정제하였다. 추출액을 silica gel(10 g)에 가하고, hexane(100 mL), ethyl acetate-hexane 혼합액(5% 및 20% ethyl acetate-hexane, 각 200 mL)로 용출하였다. 20% ethyl acetate-hexane 용출액을 감압, 건조하였다 잔사는 ethyl acetate에 용해하여 아래와 같이 trimethylsilyl(TMS) 유도체화를 실시하였다. 상기의 잔사를 ethyl acetate(EA, 700  $\mu\text{L}$ )에 용해한 다음, BSTFA-

Table 1. Concentrations of biphenyls in carrot

Days of incubation	Concentration in carrot (mg/kg)				
	BP	2OH-BP	4OH-BP	2OH-PCB-14	PCB-126
0	ND <sup>d</sup>	ND	ND	ND	ND
1	0.01±0.00	0.01±0.01	0.02±0.03	0.01±0.01	ND
2	0.02±0.01	0.02±0.01	0.04±0.02	0.03±0.01	0.01±0.01
3	0.06±0.02	0.04±0.01	0.05±0.01	0.06±0.01	0.02±0.01
5	0.08±0.02	0.07±0.03	0.06±0.03	0.04±0.02	0.02±0.01
Carrot <sup>a</sup>	2.31±0.59	2.11±0.89	1.81±0.90	1.20±0.61	1.21±0.62
Disc <sup>b</sup>	92.31±2.35	104.52±3.74	102.90±2.11	93.24±2.69	101.71±1.65
Ratio <sup>c</sup>	2.60	2.01	1.74	1.28	0.59

<sup>a</sup> Total amount of biphenyls in carrots in petridish after 5 days ( $\mu\text{g}$ /all carrots in each petridish)

<sup>b</sup> Total amount of treated chemicals in filter paper, after 5 days ( $\mu\text{g}$  /disc)

<sup>c</sup> Percent ratio of the amounts between carrot and filter paper disc after 5 days (percent ratio = 100 amount in carrot / amount in disc)

<sup>d</sup> ND, not detected; average values of 3 replicates  $\pm$  standard deviation

TMCS(200  $\mu\text{L}$ )와 pyridine(100  $\mu\text{L}$ )를 가하여, 40°C에서 2 시간동안 반응 후, GC-MS에 주입하여 분석을 수행하였다. 분석법의 회수율은 상기의 방법에 따라 당근에 분석 대상물질의 농도가 0.1 및 0.5 ppm이 되도록 처리하여 수행하였다.

당근을 제외한 증류수 및 화합물 처리 여과지는 acetone (300 mL)을 가한 후, 마쇄하고 감압 여과하였으며, 잔사를 동일하게 2회 처리한 다음, 여액을 감압, 건조하였다. 잔사를 ethyl acetate(10 mL)에 용해한 다음, 소량(200  $\mu\text{L}$ )를 분취하여 상기한 TMS 유도체화를 실시하여 GC-MS 분석을 수행하였다.

### 6-Methoxymellein(6-MM) 분석법

개별 petridish 중의 당근은 Waring blender로 마쇄 후, 일부(5 g)을 분취하여, 70% methanol(50 mL)와 1N 황산 수용액(5 mL)을 가하여 Waring blender를 이용하여 3분간 마쇄한 다음, sonicator를 이용하여 60분간 추출하였다. 추출물을 감압여과 후, 잔사를 동일한 조건에서 추출하여 여액을 합하였다. 여액을 감압, 건조 후, 잔사를 ethyl acetate(EA, 100 mL)에 재용해하고 포화식염수(100 mL)를 가하여 분배를 실시하였다. 동일과정을 2회 반복하여 얻어진 EA 추출액을 무수  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 로 건조한 다음, 용매를 제거하고 잔사는 EA(700  $\mu\text{L}$ )에 재용해하여, 상기 TMS 유도체화를 실시하고 GC-MS로 분석을 수행하였다.

### 분석기기 및 분석조건

Biphenyl 및 유도체 분석은 Shimadzu GC-2010/SE GC-MS로 수행하였으며, Restek사의 Rtx-5MS(30 m, 0.25 mm i.d., 0.25  $\mu\text{m}$  film thickness) column을 사용하였다. Column 온도조건은 초기온도 170 C로 10분간 유지 후, 2 C/분로 승온하여 290 C에서 20분간 유지하였으며, injector 온도는 250 C, interface 온도는 275 C로 설정하였고, helium carrier gas는 1 mL/분으로 유지하였다. Biphenyl

및 유도체의 정성 분석은 total ion chromatogram( $m/z$  50-500)에서 실시하였으며, 정량 분석은 selected ion monitoring(SIM) mode로 수행하였다. SIM 분석을 위한 정량/(정성) ion으로는, BP,  $m/z$  154 및 PCB-126, 326/(254/324)를 선정하였으며, TMS 유도체화된 2OH-BP 및 4OH-BP, 227(242), 2OH-PCB-14, 295(310)을 이용하였다. TIC 및 SIM 분석 시 시료는 2  $\mu\text{L}$ 를 주입하였다. 6-MM 및 관련 대사물의 분석은 동일 조건에서 실시하되, SIM 분석의 경우, TMS 유도체화되지 않은 6-MM 분석 시 정량/(정성) ion으로는 208(164), 유도체화 시료의 경우 265 (219/237)을 선정하였다.

### 결과 및 고찰

#### 당근 중 Biphenyls의 농도

여과지에 흡착된 biphenyl 및 유도체의 시간에 따른 당근으로의 흡수-이행은 검토하였다. 본 연구의 대상화합물 중 hydroxybiphenyl 유도체의 분석법의 회수율은 75-85%, 표준편차는  $\pm 10\%$ 였다. 한편 초기 연구 결과, 여과지 표면에 존재하는 연구대상물질 결정이 당근 표면에 물리적으로 부착되는 현상이 발견되어, 본 연구에서는 마쇄 전 시료를 acetone 용액에 20초간 침지하여 표면 부착 오염물을 제거한 다음, 식물 조직 내부로 이행된 biphenyl계 물질의 정량 분석을 실시하였다. 식물 조직 중 오염물의 농도는 실험기간 중 비교적 완만하게 증가하였으며, 5일 경과 후, 대략 0.02-0.08 mg/kg으로 관찰되었다(Table 1). 오염물질의 환경-생물 간의 흡수 및 이행은 다양한 요인에 의하여 변화되는 데, 일반적으로 물질의 수용해도 또는 logP 등의 분배계수와 강한 상관관계를 나타내는 것이 알려져 있다(Sabjic and Nakagawa 2014). 본 연구에서는 오염물질을 여과지에 흡착한 다음, 증류수를 가하고 당근을 처리하였으므로, 이와 같은 환경에서의 흡수/이행은 화합물의 분배계수 뿐만 아니라 수용성과도 상관관계

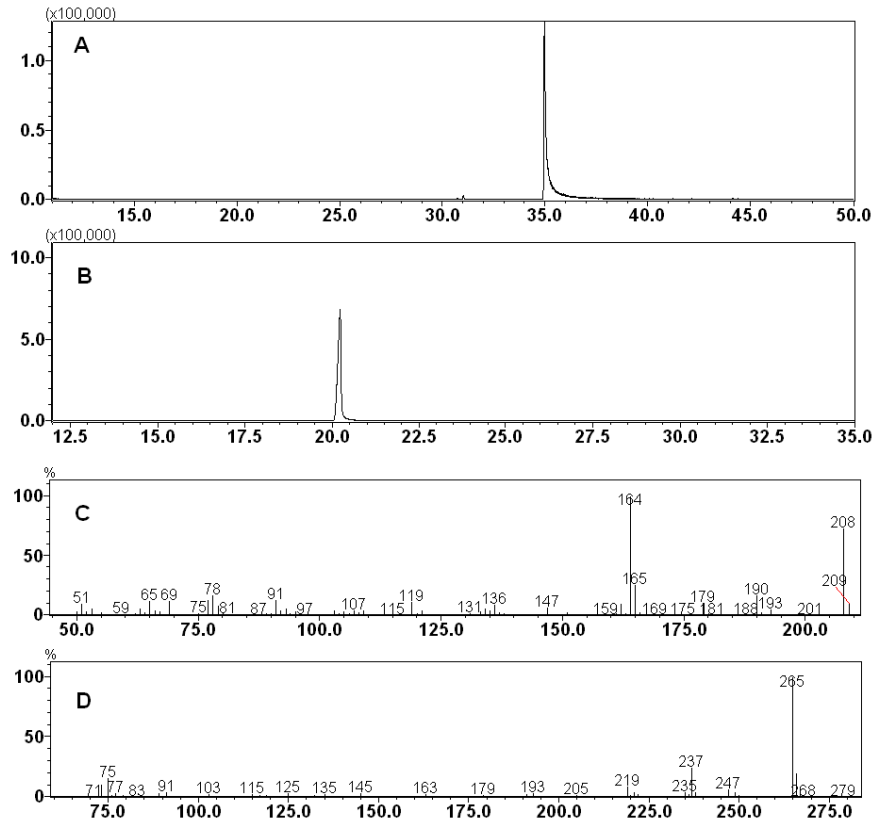


Fig. 3. GC-MS TIC chromatograms of semi-purified 6-methoxymellein (6-MM, A) and trimethylsilyl derivative of 6-MM (B) and mass spectra of 6-MM (C), and 6-MM TMS derivative (D).

가 있을 것으로 사료되었다. 물질연구 대상물질의 물성을 EPI suite(ver. 4.1, US EPA)로 계산한 결과, BP, 2OH-BP, 4OH-BP, 2OH-PCB-14 및 PCB-126의 logP는 각각 3.76, 3.28, 3.20, 4.57 및 6.98를 예측되었다. 해당 물질의 수용해도는 BP, 2OH-BP, 4OH-BP, 2OH-PCB-14 및 PCB-126 등에 대하여 각각 27, 535, 430, 13 및 0.01 mg/L로 계산되었다.

처리 후 5일 경과 시료의 분석 결과, 2OH-PCB-14 및 PCB-126 등의 지용성 화합물의 당근으로의 이행은 매우 제한적이었으며, 여과지 처리량의 0.59-1.28%가 당근으로 이행되었다. 한편 수용성이 비교적 높은 다른 물질의 경우 1.74-2.6%의 이행량을 나타내었다. 상기의 결과를 종합하면 지용성 화합물의 경우 낮은 수용성으로 인하여 식물로의 이행도가 낮은 것으로 결론지을 수 있었다.

### 6-Methoxymellein 분석

70% methanol에 의한 조추출물을 EA를 이용한 분배/추출한 결과, 비교적 순도가 높은 6-MM을 확보할 수 있었다. 그리고 상기의 조추출물을 일반적인 Kurosaki 등의 방법으로 정제하여 분석 표준품을 확보하였다(Kurosaki and Nishi, 1983). 이와 같이 정제된 6-MM의 mass spectrum은 문헌으로 보고된 바와 일치하였다(Fig. 3) (De Girolamo *et al.*, 2004). 기존 연구에 따르면 당근 중, 6-MM의 함량은 일반적

으로 매우 낮다고 알려져 있다(Girolamo *et al.*, 2004). 한편 6-MM 등과 같이 hydroxy group이 포함된 물질의 경우, GC-MS 분석 시 낮은 분석감도를 지닌 것이 밝혀졌다. 즉 동일량의 6-MM의 TMS 유도체화 전후의 GC-MS 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이에 따르면 TMS 유도체화된 6-MM은 6-MM과 비교하여 대략 8배 내외의 높은 분석감도를 보여주었으며, TMS유도체화 시의 최소검출량은 20 ng이었다.

한편 기존 연구에 따르면 6-MM을 비롯한 다양한 식물 유래 파이토알렉신은 유기/무기 독성물질 및 병원균의 자극에 반응하여 비교적 단기간에 함량의 증가를 보이며, 특히 병원균 유래의 자극의 경우, 감염부위에 선택적인 농축을 나타낸다고 하였다(Jeandet *et al.*, 2014). 이와 같은 경향은 본 연구의 6-MM에서도 동일하게 관찰되어, 물질의 종류에 따라 처리 후 2-3일 경에 최대치의 6-MM이 농축되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4, 5). 일반적으로 파이토알렉신 생합성은 다양한 병원균 또는 병원균 유래물질에 의하여 촉진되는 것으로 알려져 있는 데, 병원균 세포벽의 glucan 중합체 등의 예가 있다(Schmidt and Ebel, 1986). 한편 trifluralin 등의 dinitroaniline계 제초제를 이용한 연구에서 Grinstein 등은 토마토와 가지의 경우 제초제에 의하여 유도된 파이토알렉신에 의하여 *Verticillium*을 비롯한 일부 병원균의 감염억제효과를 보고하였다(Grinstein *et al.*, 1984). 이와 같이 파이토알렉신 유도효과를 나타내는 물질(elicitor)로는 상술한

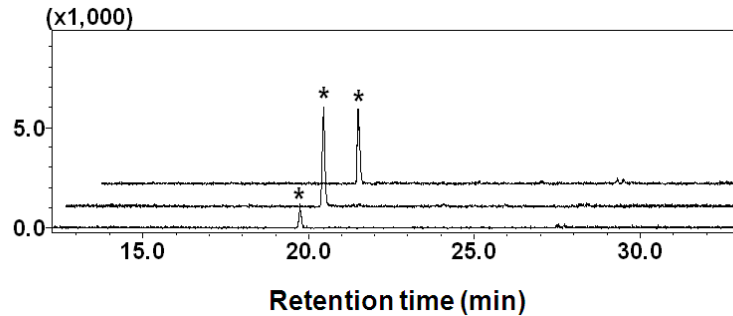


Fig. 4. Overlaid MIC chromatograms of extracts of carrots, treated with 2-hydroxybiphenyl and incubated for different period (from bottom to top, 1, 3, and 5 days). (\*) for 6-methoxymellein.

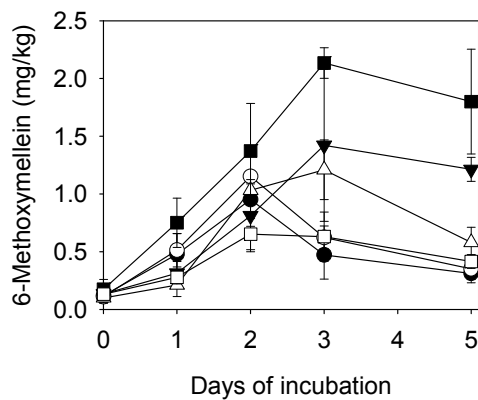


Fig. 5. Concentration of 6-methoxymellein (6-MM) in carrot, treated with distilled water control (filled circle), BP (blank circle), 2OH-BP (filled triangle), 4OH-BP (blank triangle), 2OH-PCB-14 (filled square), and PCB-126 (blank square).

glucan, 농약 및 중금속 무기염 등이 있다. 그러나 환경 오염 물질로서 비교적 광범위하게 보고되고 있는 dioxin 및 PAHs 등에 대한 연구는 보고된 바가 없다. 당근 절편을 이용한 본 연구 결과, 2OH-PCB-14는 가장 강한 6-MM 유도 효과를 나타내어 처리 후 3일 시료의 6-MM 농도는 2.27 mg/kg으로 동일 시기의 대조구에 비하여 4배 이상의 농축 비율을 나타내었다. 한편 2OH-BP 및 4OH-BP의 경우에도 대조구 또는 hydroxy group이 없는 BP 및 PCB-126과 비교하여 다량의 6-MM이 생합성된 것을 알 수 있었다(Fig. 5). 이상의 결과를 종합하면, hydroxy group을 보유한 방향족 물질(phenols)은 일반적인 biphenyl 및 PCB등의 방향족 오염물질과 비교하여 식물의 자기방어에 관련된 이차 대사과정을 효율적으로 유도하는 것으로 사료된다.

## 요 약

Polychlorinated biphenyl은 잔류성 환경 오염물질로서, 다양한 생리 독성 때문에 인축에 대한 세부적 연구가 수행된 바 있다. 한편 포유동물을 대상으로 진행된 연구에서 hydroxy PCBs, PCB quinones, 및 methylsulfonyl PCBs

등의 대사물이 발견되었으며, 이들은 모화합물과는 상이한 독성을 나타낸다고 보고되었다. 그러나 이와 같은 동물에 대한 연구와 비교하여, 식물 및 토양 미생물에 대한 영향, 독성 등에 대한 연구는 매우 제한적이다. 일반적으로 식물의 경우, 농약 등과 같은 외래 물질 또는 자외선, 병원균 등의 외래 스트레스원의 작용을 받게되면, 특히 생물활성을 지닌 파이토알렉신 등의 이차 대사산물을 생합성하는 것이 알려져 있다.

본 연구에서는 수 종의 PCB 및 hydroxy PCB, phenol 류 등을 화학적으로 합성하고, 이들의 처리에 따른 당근 중, 파이토알렉신인 6-메톡시멜레인 생합성에 미치는 영향을 검토하였다. 증류수를 처리한 대조구의 경우, 파이토알렉신의 농도는 처리 후 2일에 최대치까지 증가하였으며, 이후 지속적으로 감소하였다. 한편 2-hydroxy/4-hydroxybiphenyl의 경우, 처리 후 3일까지 증대한 반면, 비교적 지용성이 높은 PCB-126 및 3,5-dichloro-2-hydroxybiphenyl 처리구에서는 처리 1일 후, 최대치를 나타내어 화합물의 구조 또는 지용성 등에 따라 다른 유도효과를 나타내었다. 이상의 결과에 따라, 환경 오염물질의 성상에 따라, 토양 중, 재배 농작물의 생리 활성 2차 대사물질의 생합성이 다양하게 변화됨을 알 수 있었다.

## Acknowledgment

This research is supported by Rural Development Administration, Research fund # PJ011435.

## References

- Ahuja, I., Kissen, R., & Bones, A. M. (2012). Phytoalexins in defense against pathogens. *Trends in Plant Science*, 17(2), 73-90.
- Akula, R., & Ravishankar, G. A. (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling and Behavior*, 6(11), 1720-1731.
- Czepa, A., & Hofmann, T. (2003). Structural and sensory characterization of compounds contributing to the

- bitter off-taste of carrots (*Daucus carota* L.) and carrot puree. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(13), 3865-3873.
- De Girolamo, A., Solfrizzo, M., Vitti, C., & Visconti, A. (2004). Occurrence of 6-methoxymellein in fresh and processed carrots and relevant effect of storage and processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(21), 6478-6484.
- DiCosmo, F., & Towers, G. H. N. (1984). Phytochemical adaptations to stress. *Stress and secondary metabolism in cultured plant cells.* (eds. Timmermann, B. N., Steelink, C., Loewus, F. A.), pp. 97-175. Springer, New York, USA.
- Gao, Y., Zhang, Y., Liu, J., & Kong, H. (2013). Metabolism and subcellular distribution of anthracene in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.). *Plant and Soil*, 365(1-2), 171-182.
- Gershenzon, J. (1984). Phytochemical adaptations to stress. Changes in the levels of plant secondary metabolites under water and nutrient stress. (eds. Timmermann, B. N., Steelink, C., Loewus, F. A.), pp. 273-320. Springer, New York, USA.
- Grimm, F. A., Hu, D., Kania-Korwel, I., Lehmler, H. J., Ludewig, G., Hornbuckle, K. C., Duffel, M. W., Bergman, A., & Robertson, L. W. (2015). Metabolism and metabolites of polychlorinated biphenyls. *Critical Reviews in Toxicology*, 45(3), 245-272.
- Grinstein, A., Lisker, N., Katan, J., & Eshel, Y. (1984). Herbicide-induced resistance to plant wilt diseases. *Physiological Plant Pathology*, 24(3), 347-356.
- Hancianu, M., & Aprotosoaie, A. C. (2012). Biotechnological production of plant secondary metabolites. The effects of pesticides on plant secondary metabolites. (eds.) Bentham Science Publishers Ltd, pp. 176-186. Potomac, USA.
- Jeandet, P., Hébrard, C., Deville, M. A., Cordelier, S., Dorey, S., Aziz, A., & Crouzet, J. (2014). Deciphering the role of phytoalexins in plant-microorganism interactions and human health. *Molecules*, 19(11), 18033-18056.
- Kurosaki, F., & Nishi, A. (1983). Isolation and antimicrobial activity of the phytoalexin 6-methoxymellein from cultured carrot cells. *Phytochemistry*, 22(3), 669-672.
- Kurosaki, F. (1994). Regulation of biosynthesis of carrot phytoalexin 6-methoxymellein. *Phytochemistry*, 37(3), 727-730.
- Lydon, J., & Duke, S. O. (1989). Pesticide effects on secondary metabolism of higher plants. *Pesticide Science*, 25(4), 361-373.
- Magnucka, E. G., Pietr, S. J., Kozubek, A., & Zarnowski, R. (2014). Various effects of the photosystem II-inhibiting herbicides on 5-n-alkylresorcinol accumulation in rye seedlings. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 116, 56-62.
- Rohilla, R., Singh, U. S., & Singh, R. L. (2002). Mode of action of acibenzolar-S-methyl against sheath blight of rice, caused by *Rhizoctonia solani* Kühn. *Pest Management Science*, 58(1), 63-69.
- Sabljić, A. & Nakagawa, Y. (2014). Biodegradation and quantitative structure-activity relationship (QSAR). ACS symposium series vol 1174. Non-first order degradation and time-dependent sorption of organic chemicals in soil. (eds. Chen, W., Sabljic, A., Cryer, S. A., Kookana, R. S.), pp. 57-84. American Chemical Society, Washington DC, USA.
- Schmidt, W. E., & Ebel, J. (1987). Specific binding of a fungal glucan phytoalexin elicitor to membrane fractions from soybean *Glycine max*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 84(12), 4117-4121.
- Wilken, A., Bock, C., Bokern, M., & Harms, H. (1995). Metabolism of different PCB congeners in plant cell cultures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(12), 2017-2022.
- Zaini, R. G., Brandt, K., Clench, M. R., & Le Maitre, C. L. (2012). Effects of bioactive compounds from carrots (*Daucus carota* L.), polyacetylenes, beta-carotene and lutein on human lymphoid leukaemia cells. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry, (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents)*, 12(6), 640- 652.