

농작업자에 대한 농약 노출의 정량적 측정 방법

김은혜 · 이혜리 · 최 훈¹ · 문준관² · 홍순성³ · 정미혜³ · 박경훈³ · 이효민⁴ · 김정한*

서울대학교 농생명공학부, ¹식품의약품안전청 식품의약품평가원, ²한경대학교 식물생명환경과학부,
³농촌진흥청 농업과학기술원, ⁴식품의약품안전청 위해예방정책국

(2011년 9월 28일 접수, 2011년 10월 25일 수리)

Methodology for Quantitative Monitoring of Agricultural Worker Exposure to Pesticides

Eunhye Kim, Hyeri Lee, Hoon Choi¹, Joon-Kwan Moon², Soonsung Hong³, Mihye Jeong³, Kyung-Hun Park³, Hyomin Lee⁴ and Jeong-Han Kim*

Department of Agricultural Biotechnology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

¹National Institute of Food and Drug Safety Evaluation, Cheongwon-gun 363-951, Korea

²School of Plant, Life and Environmental Sciences, Hankyong National University, Ansong 456-749, Korea

³National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon 441-857, Korea

⁴Risk Information Division, Risk Prevention Policy Bureau, Korea Food and Drug Administration, Cheongwon-gun 363-951, Korea

Abstract

Agricultural workers who mix/loads and spray pesticide in fields expose to pesticide through dermal and inhalation routes. In such situation, exposed amount should be measured quantitatively for reasonable risk assessment. Patch, gloves, socks and mask will be good materials for monitoring for dermal exposure while personal air monitor equipped with solid adsorbent and air pump will be a tool for inhalation exposure. For extrapolation of absorbed amount in dermal exposure matrices and of trapped amount in solid sorbent to total dermal or inhalation exposure, Korean standard body surface area and respiration rate were proposed in substitution of EPA data. Important exposure factors such as clothing and skin penetration ratio of dermal and inhalation exposure were suggested based on Spraying time for exposure monitoring must be long enough that the amount of pesticide to get absorbed/trapped in exposure matrices results in reasonable analytical value. In domestic case for the both of speed sprayer and power spray machine, spraying time of 20~40 minutes (0.1~0.2 ha) will be reasonable per single replicate before extrapolating to 4 hours a day with triplicates experiment.

Key words Exposure, dermal exposure, inhalation exposure, patch, solid sorbent

서 론

농약노출(pesticide exposure)이란 신체외부의 경계(입, 코, 피부)를 통한 농약과의 접촉을 말하며(Crosby, 1998), 농작업

자는 영농 활동 중 농약의 조제, 살포, 사용 후 포장 재출입, 농작물의 수확 작업과 같은 다양한 노출 상황(exposure scenario) (Fig. 1, 2)에서 농약에 노출(Ramwell 등, 2006; Ramos 등, 2010)되며 이때 중요한 노출경로(exposure route)로는 피부노출(dermal exposure)과 흡입노출(inhalation exposure)이다 (Fenske와 Day JR, 2005; Hughes 등, 2008; Chester, 2010). 이러한 상황과 경로를 통한 농약과의 직접적 접촉은 건강 위

*연락처 : Tel. +82-2-880-4644, Fax. +82-2-873-4415

E-mail: kjh2404@snu.ac.kr

해성을 초래할 수 있고 그 위해의 정도는 농약의 독성과 노출 량에 달려있다(Turnbull, 1985). 하지만 독성은 해당 농약/화합물 그 자체의 고유 특성인 것에 반해서, 노출의 수준은 화합물의 특징보다도 주로 작업의 종류, 작업자의 위생습관, 작업시간, 농약과의 접촉시간, 살포기기, 제형, 제제의 포장형태, 작업환경, 보호복, 기상조건 등에 의해 영향을 받기 때문에(Turnbull, 1985; Machado-Neto 등, 1996; Vercruysee 등, 1999; Machado-Neto 등, 2000; Machado-Neto, 2001; Matthews, 2002; Fenske와 Day JR, 2005; Hughes 등, 2008), 농작업자에 대한 농약의 노출 평가는 실제 포장 살포 상황에서의 측정이 매우 중요하고 그 결과는 위해성평가의 필수 자료가 된다(Calumpang, 1996). 농약 노출 측정방법(김 등, 1998; Fenske와 Day JR, 2005; Lewis, 2005; Franklin과 Worgan, 2005; Chester, 2010; Krieger, 2010)은 크게 수동적 측정법(Passive dosimetry), 생물학적인 측정법(Biological monitoring)으로 구분한다(Fenske와 Day JR, 2005). 수동적 측정법은 농약을 살포할 때 농약을 직접 포집하는 다양한 수단을 사용하여 피부노출 및 호흡노출을 측정하고 여러 가

지 노출인자(Exposure factors)를 사용하여 외적/내적 노출 량 또는 흡수용량을 예측하는 방법으로서 가장 보편적으로 사용되고 있다. 수동적 측정법은 ‘직접측정법’(Krieger 등, 1992)이라고 할 수 있고, 농작업자의 피부노출 측정방법으로서 패치(patch), 장갑, 양말, 마스크, whole body dosimeter 등이 일반적이고, 호흡 노출은 주로 personal air monitor(PAM)를 사용하는데, 이 장치는 농약 조제/살포 중 공기를 흡입하여 농약을 흡착하는 기능을 갖고 있다. 생물학적인 측정법은 ‘간접측정법’(Krieger 등, 1992)이라고 할 수 있고, 살포자와 작업자의 소변, 혈액, 타액, 땀 등에 포함된 농약량을 측정하는 것으로 농약의 인체 내부 노출 정도(내적노출량, 흡수용량)를 측정할 수 있다. 최근 수동적 측정법과 생물학적 측정법의 비교 연구(Ross 등, 2008)에서 두 가지 측정법간의 상관성을 입증하여 수동적 측정법의 유효성을 보고하였다. 본 총설은 간접적 측정법인 생물학적인 측정법을 제외하고 직접 측정법인 수동적 측정법의 전반적 내용을 다루어 농작업자가 포장에서 농약 사용 시 정량적인 농약 노출 측정 및 평가 연구의 발전에 기여하고자 하였다.



Fig. 1. Mixing/loading of WP and EC formulations.



Fig. 2. Application of pesticide with speed sprayer and power sprayer on various crops.

본 론

농작업자 농약노출 측정/평가 지침

Parathion 살포 후 포장에서 작업하던 작업자가 중독되어 사망하는 사건이 발생하면서 농약 노출 연구는 1950년 초에 시작(Gunther 등, 1977)되었는데, 최초의 연구로서(Griffiths 등, 1951) 오렌지에 수동 살포 및 airblast 살포에 의한 흡입 노출을 respirator filter traps을 사용하여 비교 실험한 이래 Batchelor와 Walker(1954)는 살포자의 의복에 부착한 pad를 사용하여 피부 노출을 측정함으로써 피부 및 호흡, 두 가지 경로에 의한 농약의 상대적인 노출도를 측정하였다. Durham and Wolfe(1962)는 농약 노출에 사용되었던 방법들을 고찰하고 실험적인 유효성을 제공하여 농약 노출 연구에 크게 공헌하였으며, Wolfe(1976) 및 Davis (1980)도 농약 노출 측정연구의 초기 발전에 공헌하였다. 이와 같이 노출 측정법의 가장 대표적인 방법을 제시한 Durham와 Wolfe(1962)의 방법을 바탕으로 하여 patch를 사용하는 WHO 표준지침서(World Health Organization, 1975)가 마련되었고, 개정판(World Health Organization, 1982)에는 whole body dosimeter(WBD)도 제안되었다. 이 후로 U.S. National Agricultural Chemicals Association (NACA) 지침서(NACA, 1985), Groupement International des Associations Nationales de Fabricants

de Produits Agrochimiques (GIFAP, 1990) 지침서의 확립(Chester, 2010)을 거쳐 농약 노출 측정에 관한 전반적인 검토 및 비교(Curry와 Iyengar, 1992)와 노출 평가의 조화 및 통합 지침에 대한 workshop에서의 제안(Chester, 1993; Henderson 등, 1993)을 바탕으로 OECD 지침서(OECD, 1997)가 발행되었다. 한편 USEPA도 노출 평가의 전반적 지침서(USEPA, 1984, 1986, 1996) (Table 1)와 Exposure Factors Handbook (USEPA, 1997, 1999a, 2009, 2011)을 발행하였다. 가이드라인/지침서 외에 농약 노출 측정에 관련된 저서/고찰/총설(Siewierski, 1984; Curry와 Iyengar, 1992; 김 등, 1998; Krieger 2001, 2010; Chester 등, 2001, 2010; Franklin과 Worgan, 2005; Fenske와 Day JR, 2005; Lewis, 2005)들도 다양하게 출판되었으며, 이와 같은 농약노출 평가/연구의 국제적 추세에 발맞추어 우리나라는 농촌진흥청에서 농작업자 노출허용량(AOEL, Acceptable Operator Exposure Level) 설정 지침, 농약 살포자 위해성 평가기준 및 농약 살포자 노출량 측정시험 지침(농촌진흥청, 2010)을 마련하여 농약 노출 평가의 표준화를 확립하면서 시험에 적용하고 있다. 이 지침은 생물학적 측정법에 대한 사항은 포함하지 않고, patch와 PAM을 이용한 직접적인 노출 시험 및 연구에 필수적이고 실용적인 사항을 요약하여 다루고 있다.

Table 1. Series 875- Occupational and residential exposure test guidelines (USEPA, 1996a)

Group A-Applicator Exposure Monitoring Test Guidelines.	
875.1000	Background for Application Exposure Monitoring Test Guidelines
875.1100	Dermal Exposure — Outdoor
875.1200	Dermal Exposure — Indoor
875.1300	Inhalation Exposure — Outdoor
875.1400	Inhalation Exposure —Indoor
875.1500	Biological Monitoring
875.1600	Application Exposure Monitoring Data Reporting
Group B-Postapplication Exposure Monitoring Test Guidelines.	
875.2000	Background for Post application Exposure Monitoring Test Guidelines
875.2100	Foliar Dislodgeable Residue Dissipation
875.2200	Soil Residue Dissipation
875.2400	Dermal Exposure
875.2500	Inhalation Exposure
875.2600	Biological Monitoring
875.2800	Descriptions of Human Activity
875.2900	Data Reporting and Calculations

수동적 측정법(Passive dosimetry)

피부 노출 측정(Dermal exposure monitoring) 방법/기구/재료

살포자나 작업자의 작업복에 부착되어 피부에 노출/침투(Driver 등, 2007)되는 농약의 양은 다양한 종류의 천이나 물질을 사용하여 농약이 피부에 접촉, 흡수되기 전에 포집, 제거함으로써, 또는 피부에 묻어 있는 농약을 적당한 용매로 세척 제거하여 측정할 수 있다. 농작업자의 피부노출 측정법(Fenske, 1993a; Ness, 1994; OECD, 1997; USEPA, 1996a, 1998, 1999a; Soutar 등, 2000)은 patch(pad), whole body dosimeter(WBD), 장갑, 양말, 마스크, 수건, 다양한 세제용액 등을 사용한다. 흥미로운 방법으로 fluorescent tracer를 이용한 video imaging 기법(Fenske 등, 1985, 1986a, b; Fenske, 1988; Fenske 등, 1990; Fenske, 1993b; Archibald 등, 1994; Methner와 Fenske, 1994a, b; Roff, 1994; Archibald, 1995; Black과 Fenske, 1996; Kross 등, 1996; Fenske와 Birnbaum, 1997 Bierman 등, 1998; Brouwer 등, 1999; Cherrie 등, 2000)도 고안되었고, 이러한 기법의 단점인 신체표면의 형태

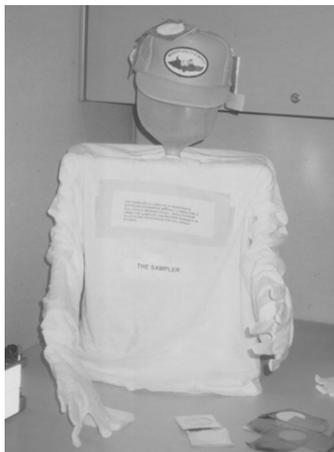


Fig. 3. Plastic model for pesticide exposure measurement.

적 특징에 기인하는 문제를 보완한 dodecahedral lighting system(Roff, 1994)을 비롯해서 ATR-FTIR(Attenuated total reflectance Fourier-transform infrared) (Doran 등, 2000) 등이 개발되었다. 하지만 이는 현장에서 농약 노출의 상대적 인 강도는 관찰할 수 있으나 실질적인 농약의 노출량을 정량하기에는 크게 활용되지 못하였다. 아이디어가 돋보이는 노출 측정 도구로서 플라스틱으로 간단하게 만든 인체 몸통인형(Fig. 3, California EPA)도 고안되었는데, 이 인형을 과수 수확 동작의 움직임을 모방하면서 얼굴, 몸통, 손의 노출 측정을 시도하기도 하였다.

이러한 다양한 방법들 중에서 α-cellulose 종이 및 거즈를 이용하는 patch와 의복을 사용하는 WBD가 비교적 보편적 방법이다. WBD(Batchelor 등, 1954; Miller 등, 1980; WHO, 1982; Abbott 등, 1987; Chester 등, 1992; Teschke 등, 1994; de Vreede 등, 1998; Capri 등, 1999; Egea González 등, 1999; Hughes 등, 2006)는 100% 면 또는 polyester 혼합재질(Fenske, 1993; OECD, 1997)이 가장 전형적이며, Strentex ‘Corovin’ disposable 옷(Abbott 등, 1987)도 사용되었다. 장점은 측정 범위가 대표성이 있고, 작업복 속에 입고 작업을 수행하면 살포나 작업 중 피부에 접촉되는 농약을 채취할 수 있다. 그러나 patch 법처럼 표준화된 의복 재질의 기준이 없고, 일상적인 포장 조건에서 각각의 노출 시간 후 의복을 갈아입기가 어렵고, 신체의 다른 부위(특히, 손이나 머리)의 농약에 의한 오염 없이 의복을 바꿔 입는 것은 거의 불가능할 뿐 아니라 분석 간섭 물질의 예비 추출 및 흡착된 농약의 추출 시에 많은 양의 용매, 큰 추출 장비, 긴 추출 시간을 필요로 한다. 또한 머리, 얼굴, 손, 발은 역시 따로 측정해야한다. 따라서 영유아처럼 기어 다니는 나이의 어린이의 실내 농약 노출 측정(Ross 등, 1991)에는 적당하다고 생각되나 일반적인 포장에서의 농작업자 농약 노출 측정 에 사용하기에 문제와 제약이 있다(Table 2).

Table 2. Main advantages and limitations of the methods for estimating dermal exposure of the body (OECD, 1997)

Dermal exposure method	Main advantages	Main limitations
Patch	Ease of analysis	Assumes uniform deposition
Whole body	No body region size or surface area correction necessary	Analysis may be more cumbersome
	Less time-consuming in the field	May be uncomfortable for operator
Dyes/video imaging	Visual and quantitative analysis (conventionally or video imaging) Measures exposure directly from skin (video imaging) Useful for training operators	Assumes equivalent clothing permeation by dye and pesticide

반면에 거즈 등의 천으로 만든 소형의 patch(pad)는 노출을 측정하고자 하는 신체 부위에 부착(Krieger 등, 2000)하여 사용한다. 이는 사용하기에 간단하고 편리하며 경제적이므로 WBD보다 보편적으로 표준화되어 사용되고 있다. 또한 patch를 사용하여 측정한 결과나 WBD를 사용해서 측정한 결과가 유사하다는 연구도 보고되었다(Delgado 등, 2003). 일반적으로 피부 노출 농약의 포집에 사용하는 patch의 재료는 우선 액상 농약 사용의 경우 피부와 접촉하는 농약 액체 성분을 모두 흡수할 수 있도록 흡수력이 충분하여야 하고, 분말이나 건조된 상태의 농약 측정용은 충분히 다공성이어야 한다. 또한 작업동안 물리적으로 상하지 않도록 튼튼해야 함은 물론 분석 상 문제가 없도록 재료에 불순물로 존재하는 화합물이 없어야 한다. 이러한 불순물은 적당한 용매를 사용한 예비 추출로 제거가 가능하지만, 불가능할 때도 있다. 가장 대표적인 피부 노출 측정 재료로서 α -cellulose 종이 및 거즈 등의 천이 삽입된 patch(Durham과 Wolfe, 1962; Davis, 1984; Gold와 Holcslaw, 1985; Kurtz와 Bode, 1985; Nigg와 Stamper, 1985; Grover 등, 1986; Hussain 등, 1990; Machado-Neto 등, 1992; 변, 2000; Cattani 등, 2001; Tuomainen 등, 2002; Liu 등, 2003; Choi, 2004; Hughson 등, 2004; Rajan-Sithamparanadarajah 등, 2004; Byoun 등, 2005; Choi 등, 2006; Kuye 등, 2007; Nuyttens 등, 2009; Park, 2009; Farahat 등, 2010; Kim, 2011)를 들 수 있다. 이 밖에 cellulose filter paper disc(Batchelor와 Walker, 1954), combined filter paper disc 및 surgical gauze pads(Lavy 등, 1980), 옷에 침투한 농약을 측정하기 위하여 외과 거즈로 등을 댄 patch 및 다양한 종류의 옷감(Knaak 등, 1978), 피부의 매끄러운 표면을 모방한 lanolin으로 처리한 pad(Fletcher 등, 1959)등이 있으며, OECD 지침(OECD, 1997)은 α -cellulose 종이의 대체 재료로서 100% 면이나 polyester 면을 추천하

고 있다. Patch의 단점은 신체 표면 전체로 노출이 일정하지 않을 수 있고(Franklin 등, 1981; Fenske, 1990), patch(pad)에 침착된 농약의 양을 신체 표면적으로 외삽을 해야 하며, patch 재질이 실제적으로 농약 살포시 입는 의복/보호복과 재질이 달라서 농약을 흡착하는 능력이 서로 다를 수 있다(Niven 등, 1993; Tannahill 등, 1996). 하지만 여러 가지 장단점을 고려할 때, 또한 Tannahill 등(1996)이 결론 내린 바와 같이 patch가 피부 노출 측정 재료로 가장 적당하다고 인정받고 있으며, WHO 방법(WHO, 1982), USEPA 방법(USEPA, 1996a) 및 OECD 지침(OECD, 1997) 모두 α -cellulose 종이 patch를 추천하고 있고, 다중 거즈 patch는 분제나 입제 같은 제형의 노출 측정에 추천하고 있다(Fenske와 Day JR, 2005). 따라서 농약의 피부 노출과 관련한 유용한 자료의 대부분이 patch를 사용하였으므로 피부노출 측정에는 patch를 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

손은 신체 중에 가장 많이 활동에 동원되고, 손에 대한 농약 노출은 농약 살포자에 대한 전체 피부 노출 중 10~98% 까지 높은 수치를 보이고 있으며(Levy 등, 1981; WHO, 1982; Davis 등, 1983a; Wojcek 등, 1983; Grover 등, 1986; USEPA, 1996a; Machado-Neto 등, 1998; 변, 2000; Calumpang, 2003; Choi, 2004; Choi 등, 2006; Hughes 등, 2006; Nuyttens 등, 2009; Park, 2009; Kim, 2011), 이에 따라 농약의 손 노출 평가는 매우 중요하다. 손의 농약 노출 측정은 전통적으로 손을 헹구거나 세척하는(Hand-rinses or washes) 방법(Fig. 4)이 많이 사용되었는데, (Durham과 Wolfe, 1962; Kazen 등, 1974; Ware 등, 1974; Davis, 1980, 1984; Maddy, 1980; Atallah 등, 1982; Keenan과 Cole, 1982; Sell과 Maitlen, 1983; Wojcek 등, 1983; Zweig 등, 1983; Grover 등, 1985; Fenske 등, 1986b; Knaak 등, 1986; Aprea 등, 1998; Fenske와 Lu, 1994; Lewis 등, 1994; Fenske 등, 1998; Cessna와

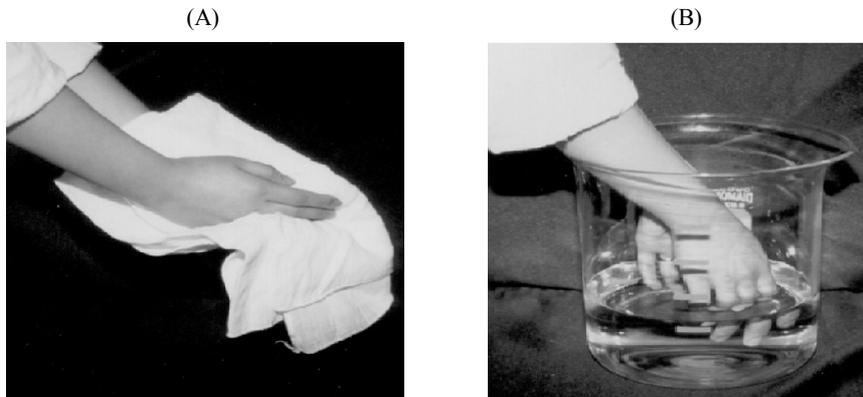


Fig. 4. Hand wipe (A) and rinse/wash (B).

Grover, 2002) 주로 plastic bag에 담겨있는 용매에 손을 행구는 bag rinse 방법(Durham과 Wolfe, 1962; Davis, 1980)이 그릇에 담긴 용매를 사용하는 것 보다 더 편리하고 표준화되어 대부분의 기존 자료는 이 방법으로 측정되었다. 이러한 세척법은 피부에 손상을 주지 않고, 세척 시 농약의 흡수를 증가시키지 않는 용매의 선택과 세척 방법이 중요하며, 대표적인 용매로서 95% ethanol, 물 및 세제를 포함하는 용액은 피부에 해도 없었고 농약의 흡수를 증가시키지도 않은 것으로 알려져 있다.

손을 세척하는 방법은 또한 장갑을 사용할 때 침투한 농약의 측정에도 사용할 수 있어서, 손의 농약 노출 측정에는 bag rinse 방법과 함께 경량 장갑을 사용하는 방법도 가능하다. 하지만 수용성 용액을 사용하면 농약의 가수분해, 분석을 위한 추출 등의 문제를 내포하고 있는데 세척 효율성 연구를 보면(Davis 등, 1983a; Fenske 등, 1989; Fenske와 Lu, 1994; Geno 등, 1996; Fenske 등, 1998; Fenske 등, 1999; Brouwer 등, 2000; Ross 등, 2001) 행굼/세척법은 농약의 종류에 따라 달라서 농약의 회수율이 적절한 경우 또는 제대로 되지 않아 정확하지 않은 경우가 있었다. 이에 반해 면 거즈 등으로 손을 닦는 방법(Hand-wipes)(Hirai 와 Tomokuni, 1993; Fenske 와 Lu, 1994; Geno 등, 1996; USEPA, 1996b), 또는 타액, 인공타액, 세제용액, 2-propanol 등으로 손을 적신 후 hand-wipes를 수행하는 방법(Camann 등, 1993a; Majumdar 등, 1995; USEPA, 2000)도 시도 되었는데, 일반적으로 행굼/세척보다도 간단하고 편리하나 정확하고 일반적인 회수율이 확립되지 않았고(Geno 등, 1996; Fenske 등, 1999), 이 방법 또한 농약의 가수분해, 분석을 위한 추출의 효율성 등의 문제를 내포하고 있어 일상적인 방법으로 사용 시 제약을 받고 있다(Majumdar 등, 1995). 이와 같은 hand-rinses/washes/wipes 방법 외에 일반적인 장갑도 포장에서 사용하기 용이하며, 살포 중 피부에 직접 노출되는 농약을 방지할 수 있으므로

(Makinen, 2003) 농작업자의 노출을 측정하기 위해 많이 사용되었다(Durham과 Wolfe, 1962; Davis, 1980; Davis 등, 1983a; Wojcek 등, 1983; Zweig 등, 1983; Fenske 등, 1986b; Grover 등, 1986; Camman 등, 1993b; Chester 등, 1987; Hussain 등, 1990; Garrod 등, 1998; Machado-Neto 등, 1998; Egea González 등, 1999; 변, 2000; Machera 등, 2003; Choi, 2004; Hughson 등, 2004; Rajan-Sithamparanadarajah 등, 2004; Byoun 등, 2005; Ramwell 등, 2005; Choi 등, 2006; Hughes 등, 2006; Hughes 등, 2008; Park, 2009; Nuyttens 등, 2009; Kim, 2011; Tsakirakis 등, 2011). 전반적으로 장갑은 hand-rinses/washes/wipes 방법보다 일반적으로 노출 양상이 과대 평가되는(Davis 등, 1983a; Fenske 등, 1989; Fenske와 Lu, 1994; Geno 등, 1996; Fenske 등, 1999; Fenske 등, 1986b; Camman 등, 1993b; Brouwer 등, 2000; Ross 등, 2001)경향이 보고되고 있다. Fenske 등(1999)은 사과 과수원에서 thinner 작업 시 hand-wash 보다 hand-wipe는 10배 정도 저 평가되는 반면 장갑은 hand-wash에 비해 2.4배 과대 평가된다고 보고하였다. 이유는 장갑은 면이고, 조직이 다공성이기 때문에 매끄러운 피부 보다 상대적으로 농약을 더 흡수할 수 있기 때문이기도 할 것 이다(Fenske 등, 1989; Brouwer 등, 1999)(Table 3). 하지만 짧은 노출 시간 동안(0.5 및 1시간)에는 노출이 높았으나 어느 정도 시간이 지나면(1.5 및 3시간) hand-washes와 크게 다르지 않다는 보고도 있다(Fenske 등, 1989).

따라서 수동적 측정법인 장갑을 손의 노출 측정 방법으로 사용하는 것이 좋을 것으로 판단한다. 왜냐하면 농작업 시에는 손의 보호를 위해서라도 일단 장갑을 착용하는 것이 원칙이고, 피부에 노출될 수 있는 모든 농약을 포집할 수 있고, 피부에 침투되지 않으므로 비록 과대평가의 가능성은 있지만 이 또한 “가능한 최악의 시나리오”로 평가하는 노출 평가의 원칙에 부합하며, 용매, 세제 및 다른 기구를 사용하지 않는 편리함과 경제성이 입증되었기 때문이다. 또한 살포액으로 포

Table 3. Main advantages and limitations of the methods for estimating dermal exposure of the hands (OECD, 1997)

Hand exposure method	Main advantages	Main limitations
Absorbent gloves	Ease of use	Possible overestimation of exposure May disrupt barrier function of skin
Solvent/swab rinse wash	Standardized method enabling comparison with most previous data	Laboratory validation requires human volunteers Possible underestimation of exposure
Hand wash (soap and water)	Does not interfere with process of skin contamination and absorption	Possible lack of standardization among workers Laboratory validation requires human volunteers Possible underestimation of exposure

화되거나 젖는 경우는 교체해야하며(Ness, 1994), 보호 장갑을 착용하는 경우에도 필요에 따라 내부에 얇은 면장갑을 착용하면 장갑 내부의 손 노출을 측정할 수 있는데, 이와 연관되어 고무장갑 착용시에도 손 노출이 있다는 사실이 보고되기도 하였다(Maddy 등, 1983). 다만 장갑의 단점은 장갑의 품질에 따라서 미량 분석에 방해가 되는 불순물을 포함할 수 있으며 예비 추출로 제거하기 힘든 경우도 발생할 수 있다는 것인데, 따라서 용매 추출 시 불순물 검출이 최소화된 고품질의 장갑을 잘 선택해서 사용하는 것이 바람직하다.

얼굴은 비록 신체표면적의 작은 부분을 차지하여 노출에 대한 기여도는 작지만 눈, 코, 입 등 중요한 노출 대상을 모두 포함하고 있어서 측정해야하는 대상이다. 얼굴의 노출 측정은 수건으로 닦기, 또는 세척 등을 이용할 수 있고, 또는 양쪽 어깨 patch로 대신 측정하는 경우(Nigg 등, 1986; USEPA, 1986)도 있으나 이는 너무 과대평가 가능성이 있어서 가슴 patch로 측정하는 것을 권장하고 있다(USEPA, 1997). 하지만 수건, 세척법, patch 등과 같이 불편하지 않으며 간단하면서도, 일정한 면적(약 200 cm²)을 갖고, 농약 살포 작업 시에 얼굴도 보호할 수 있는 면 마스크(Machado-Neto, 2001; Liu 등, 2003; Choi, 2004; Choi 등 2006; Park, 2009; Kim, 2011)가 얼굴의 농약 노출 측정 재료로 적당할 것으로 판단한다.

피부노출 측정용 patch

일반적으로 patch의 크기는 가로 세로, 10×10 cm의 크기를 사용하지만 더 작은 크기의 patch를 사용한 경우도 있다(Fenske 등, 1990, Pependorf 등, 1995; de Cock 등, 1998). 현재 사용 중인 patch(Fig. 5, A)는 가로, 세로 약 10 cm의 α-cellulose나 여러 겹으로 포갠 거즈를 patch pocket에 넣어서 쓰는데, patch pocket은 은박종이 재질로서 가운데에 구

멍(면적=50 cm²)이 있어 내부의 거즈나 α-cellulose가 노출되어 조제/살포작업 중 피부에 접촉되는 농약을 채취하며, 해당 신체부위에 큰 안전핀을 사용하거나 접착테이프를 사용하여 부착한다. 또한 거즈나 α-cellulose를 침투한 농약에 의해 patch 내면이 오염되지 않도록 aluminium foil을 거즈나 α-cellulose의 뒷면에 대어 사용하였다.

피부노출 측정용 장갑, 양말 및 마스크

얼굴(어깨) patch를 대체해서 사용하는 얼굴용 마스크(Fig. 5, B)는 면적이 약 200 cm²의 크기의 면 마스크를 사용하며, 면양말, 면장갑은 일정 규격의 상품을 사용한다. 특히 장갑은 용매 추출 시 불순물이 많이 발견되었기 때문에 여러 종류의 장갑을 구매하여 불순물을 조사한 후 한 종류를 선택한다.

Patch의 부착위치 및 수

정량적 피부 노출 측정을 위해 착용하는 patch의 수는 6개(WHO, 1982)부터 10개(USEPA, 1986, 1999a6), 및 13개(OECD, 1997)로서 머리, 얼굴(어깨), 앞목, 목덜미, 가슴/배, 등, 상박, 하박, 대퇴부, 정강이 등에 부착하여 사용하는데 기본적으로 10개 이상의 patch(USEPA, 1996; 농촌진흥청, 2010)(Table 1)를 추천하고, 최근의 국내 연구(Liu 등, 2003; Choi, 2004; Choi 등, 2006; Park, 2009; Kim, 2011)는 얼굴(어깨) patch를 좀 더 합리적인 마스크로 대체하고 나머지 신체 부위에 13개의 patch를 부착하여 노출 측정을 하였다. 연구자는 노출 측정에 필요한 위치에 추가 또는 조정할 수 있는데, 정상적 patch 위치가 아닌 부위에서 노출이 크게 예상되면, patch의 위치를 이동하거나 추가의 patch를 사용할 수 있고, 또한 외부 patch외에도 농약의 의복 침투율을 측정(Gold 등,

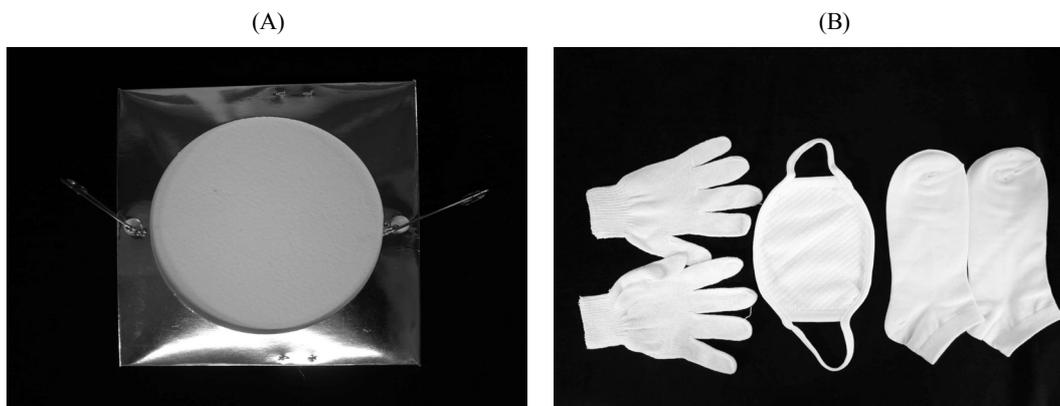


Fig. 5. Patch (A), gloves, socks and mask (B) for dermal exposure monitoring.

1982; Keeble 등, 1988; Nigg 등, 1986; Fenske 등, 1990; Nigg 등, 1992)하기 위하여 1~2개의 patch를 방제복/의복 안쪽에 부착할 수 있는데(USEPA, 1986, 1996a) 그 위치는 옷의 바느질 아래 부분과 같은 농약의 침투가 예상되는 장소이고, 외부 patch와는 겹치지 않는 근접한 부위도 추가 patch를 부착할 수 있다.

신체표면적

신체 전체에 대한 농약 노출량의 계산은 농약의 노출이 신체 전체적으로 고르게 일률적으로 노출 된다는 가정 하에 patch에 침착/부착된 농약량을 계산한 후, 신체피부면적으로 외삽(extrapolation) (변, 2000; Martinez Vidal 등, 2002; Liu 등, 2003; Choi, 2004; Choi 등, 2006; Nuyttens 등, 2009; Park, 2009; Kim, 2011)하기 때문에 신체표면적은 노출 평가에서 가장 중요한 노출 인자 중의 하나다.

신체 각 부위의 표면적에 대한 자료로서 WHO(1982)와 USEPA(1986, 1996)의 자료가 다르고, OECD(1997)는 USEPA (1986, 1996a)의 자료를 따르고 있다. USEPA의 경우를 보면 Berkow의 자료(Berkow, 1931) (Table 4), 해부학적 모델링에 근거한 체표면적(Popendorf와 Leffingwel, 1982), OHEA 자료(Table 4)가 대표적인데, Berkow의 자료가 많이 사용되기도 하였으나(Davis 1980; Durham와 Wolfe, 1962; Wolfe, 1976; USEPA, 1984) 현재 USEPA(USEPA, 1996a) 및 우리나라 지침(농촌진흥청, 2010)에서 사용하고 있는 신체 표면적 자료(Table 5)는 Berkow와 OHEA의 자료를 서로 보완하여 만들었는데 대부분의 자료는 Berkow의 자료를 사용하였다. 이 때 머리 면적은 OHEA의 자료 1,300(얼굴포함)에서 Berkow의 얼굴 650을 빼고 남은 650으로 하였고, 상박과 허벅지는 OHEA의 자료를 사용하여 신체 표면적 자료를 구성하였다.

하지만 위와 같은 EPA 자료는 우리나라 농업 환경에서 측정된 노출량 계산에 활용하기에는 부적절하고, 우리나라 사람의 신체 표면적을 이용하여 외삽하는 것이 타당하다. 따라서 본 총설에서 농약 노출 측정을 위한 우리나라 사람에 대한 표준 신체표면적을 제안하고자 하는데 그 동안의 우리나라 신체표면적에 관한 연구를 보면 임순(1994), Lee (2005) 및 환경부의 노출인자보고서(장재연 등, 2007), 2007년(식약청, 2007) 및 2008~2009년(식약청, 2009)의 피부표면적에 관한 식약청 연구를 요약한 식약청의 ‘위해평가를 위한 피부표면적 조사집(식약청, 2010) 등의 신체표면적 연구보고서가 대표적이다. Lee와 식약청의 신체표면적 자료를 비교해 보면

Table 4. Surface Area for Regions of the Adult Male Body (USEPA, 1996a)

Region of the body	Surface area of region (Berkow)	Surface area of region (OHEA) (for 50th percentile men; NHANES II)
Head	-	1,300 (includes the face)
Face	650	-
Trunk	-	7,390 (includes the neck)
Back of Neck	110	-
Front of Neck	150	-
Chest/Stomach	3550	-
Back	3550	-
Upper Arm	1320	2,910
Forearm	1210	1310
Hand	820	990
Thigh	2250	3820
Lower Leg	2380	2560
Feet	-	1310

Table 5. Body Surface Area (cm²) for Calculation of Adult Dermal Exposures (USEPA, 1996a)

Region of the Body	Surface Area of Region
Head	650
Face	650
Back of Neck	150
Front of Neck	110
Chest/Stomach	3,550
Back	3,550
Upper Arm	2,910
Forearm	1,210
Thigh	3,820
Lower Leg	2,380
Feet	1,310
Hands	820

(Table 6) 얼굴과 목 면적이 상당히 다르고 나머지 부분은 비슷한 것을 알 수 있다. Lee의 자료(Lee, 2005) (Korea1, Table 6)에서는 허벅지와 종아리의 면적 차이가 별로 나지 않지만 USEPA(USEPA, 1996a), 일본(Kurazumi, 1994) 및 식약청 자료(식약청, 2010) (Korea2, Table 6)를 보면 차이가 나는 것을 알 수 있다. 또한 목의 면적도 USEPA와 일본 자료를 비교해 보면 식약청 자료가 더 농약 노출 평가에 적합할 것으로 판단된다.

Table 6. Surface Area for Regions of the adult male body (cm²)

Region of the body	USEPA	Japan	Korea1	Korea2
Head	650	647	568 (Back of the head)	-
Face	650	570	800	484
Front of Neck	150	305	160	242
Back of Neck	110	224	120	182
Chest/Stomach	3,550	1,892	3,195 (Chest + Abdomen)	3,324 (Chest + Abdomen + Pelvis)
Back	3,550	2,873	3,361 (Back + Hip)	3,336 (Back + Hip)
Upper Arm	2,910	1,637	1,599	1,537
Forearm	1,210	929	1,138	1,127
Hand	820	737	897	935
Thigh	3,820	2,938	2,742	2,769
Lower Leg	2,380	2,026	2,511	2,197
Feet	1,310	1,112	1,247	1,266

Table 7. Suggestion for body surface area (cm²) for the Korean adult male

Body parts	Surface area	Body parts	Surface area	
Head	484	Upper Arm	1,537	
Face	484	Forearm	1,127	
Front of Neck	242	Thigh	2,769	
Back of Neck	182	Lower leg	2,197	
Chest/Abdomen/Pelvis	3,324	Torso	Feet	1,266 (Socks)
Back/Hip	3,336	Hand	935 (Glove)	

따라서 우리나라 사람의 표준 신체표면적으로서는 가장 최근의 연구보고서인 식약청의 자료(식약청, 2010)를 대부분 인용하여 잠정적으로 설정할 수 있을 것 같다(Table 7). 비록 머리의 표면적이 없지만 머리와 얼굴 면적을 동일하게 설정한 USEPA(1996a) 가이드라인을 참고하여 우리나라 자료의 머리 면적은 얼굴 면적과 동일하게 484 cm²로 설정하고자 한다(Table 7). 물론 이러한 우리나라 사람의 신체 표면적 설정과 관련되어서 농약 노출 연구 관련 산, 학, 연, 관의 여러 관계자들 간의 심도 있는 토론과 의견 교환이 있어야 할 것이다. 농약 노출 예측 모델 중 대표적인 UK-POEM(POEM, 1992)의 경우를 보면 몸통, 다리 및 손의 노출 평가를 위주로 하는데 이를 참조하고, 노출에서 중요한 부분인 팔을 추가해서 Table 7의 가슴(배, 골반 포함)과 등(엉덩이 포함)을 포함하는 몸통과, 상박과 하박을 포함하는 팔, 대퇴부 및 정강이를 포함하는 다리, 그리고 손의 표면적은 장갑으로 대체하여 사용하면 우리나라 농약 살포 상황에 부합하는 농작업자의 농약 피부 노출 예측 및 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단한다.

잠재적 피부노출량(PDE; potential dermal exposure) 및 내적(Internal) 피부노출량 계산

1) 잠재적 피부노출량

농약 살포액의 조제, 살포 중에 발생된 직접적인 외적 피부 노출량은 PDE로 표현되고, 부위별 노출량의 총합이며 살포액의 노출부피(mL) 또는 유효성분의 노출량(mg, µg)으로 구할 수 있다. 살포액의 노출부피(mL) PDE의 경우를 보면 부위별, 노출량을 산출해 내기 위해서 patch 등 노출 측정용 재료의 기기 분석을 통해 단위면적당 노출량(노출강도; µg/cm²)을 계산한 후 부위별 체표면적을 곱해서 얻은 각 부위별 노출량을 실제 살포한 유효성분의 양으로 나누어 살포 유효성분량에 대한 노출량의 비율을 구한 다음, 실제 살포한 살포액 부피에 곱해서 실제 작업시간동안 노출된 살포액의 부피를 구한다. 이 수치를 살포시간으로 나누어 시간당 살포액이 몸에 노출되는 살포액 부피를 의미하는 신체부위별 시간당 노출속도(mL/h)가 계산된다. 따라서 각 부위 별 노출 속도를 합하고 1일에 해당하는 전체 작업시간을 곱하여 PDE를 계산

Table 8. Suggestion for clothing and skin penetration factors in mixing/loading and application

	Mixing/loading (Hand)			Spraying machines	Application			
	Solid	liquid			SS	Torso	Arms	Legs
Clothing penetration		WB*	5%	SS				
	1%	OSB**	10%	PS		10%		
Skin penetration				1% (Solid)				
				10% (Liquid)				

*WB; Water based
 **OSB; Organic solvent based

한다. 이때 반복 측정치의 평균치 또는 75%에 해당하는 수치 등 상황을 고려하여 PDE 수치를 결정하여 사용할 수 있다.

$$*PDE(mL) = \text{신체부위별 시간당 노출 속도}(mL/h) \text{ 총합} \times 1 \text{ 일 살포시간}$$

$$\text{신체부위별 시간당 노출강도}(\mu g/cm^2) \times \text{신체부위표면적}(cm^2) \times \text{실제 살포액 부피}(mL) / \text{노출속도}(mL/h) = \text{실제 살포 유효성분량}(\mu g) \times \text{실제 살포시간}(h)$$

*노출측정용 재질의 표면적 : 마스크, 200 cm²; patch, 50 cm²
 *장갑(OECD, 1997)과 양말의 노출량은 손과 발의 표면적으로 외삽하지 않고 그대로 사용한다.

2) 내적(Internal) 피부노출량

이상의 직접적인 외적 피부노출량은 위해성평가를 위한 노출량 평가 시 그대로 사용하지 않고, 의복/보호복의 침투율 및 피부 투과율을 고려하여 내적 피부노출량을 예측한다. 의복침투율은 일반적으로 10%의 의복/보호복 침투율을 가정하여 사용한다(Jensen, 1984; POEM, 1992; Thongsinthusak 등, 1993). 또한 의복/보호복을 침투한 농약이 피부를 침투하는 비율을 보면, 일반적으로 액체로 살포하는 제형은 10%의 피부 침투율을 가정하여 산출하며, 입제 및 분말제제는 1% 피부투과율을 가정한다(Maibach와 Feldman, 1974; Jensen, 1984; Thongsinthusak 등, 1993; Machado-Neto, 2001; Ross 등, 2001; Choi 등, 2006; 홍 등, 2007). 실제적으로 fenprothrin의 risk characterization의 경우(California EPA, 1994) 32%를 가정하였고, methidathion의 경우 30%를 가정한 사례도 있다(USEPA, 1999b). 보편적으로 노출량 산정 예측 mode로 사용되는 UK-POEM(The UK Predictive Operator Exposure Model)의 내용을 보면 의복 투과율의 경우 조제는 손(장갑)만 해당되고 고상 제형과 액상 제형을 나누어 의복투과율을 설정하였고, 살포시는 신체 부위에 따라서 서로 다른 투과율을 설정하였다. 피부투과율은 조제나 살포시 모두 10%를 기본으로 가정하고 경우에 따라 변경이 가능하도록 하였다. 따

라서 UK-POEM의 경우를 기본으로 하면서 위에서 언급한 사례를 참고로 하고 팔의 의복침투율을 추가하여 국내 노출 측정을 위한 의복/피부 침투율을 Table 8과 같이 잠정적으로 제안한다.

호흡 노출 측정 방법/기구/재료

호흡 노출은 대개 전체 노출의 극히 일부분을 차지하지만 (0.029-9.1%) (Culver 등, 1956; Miller 등, 1980; WHO, 1982; Wojcek 등, 1983; May, 1984; USEPA, 1996a; Capri 등, 1999; Oliveira와 Machado-Neto, 2003; Choi, 2004; Choi 등, 2006; Park, 2009; Kim, 2011) 피부 노출량과는 다르게 노출량 전체(100%)가 몸에 흡수된다는 가정(Fenske와 Day JR, 2005; Flanklin과 Worgan, 2005)이 성립되고 시설 재배와 실내 같은 밀폐된 공간에서의 분제, 분무제, 및 훈증제의 사용 시에는 호흡 노출이 중요하다.

호흡 노출의 측정법에는 매우 다양한 방법이 있으며(Culver, 1956; Durham과 Wolfe, 1962; Linch, 1974; Van Dyk과 Visweswariah, 1975; Lewis, 1976; Davis, 1980; USEPA, 1998; NIOSH, OSHA), 농약의 이화학적 성질 및 작업의 종류에 따라서 선택해야한다(Linch, 1974; USEPA, 1996a). 예를 들어 호흡기(respirator)를 변형하여 먼지 filter 대신에 거즈 pad를 이용한 방법(Durham과 Wolfe, 1962)은 만들기 쉽고, 작업자의 호흡 속도 및 전체 흡입량을 따로 측정할 필요도 없다. 그러나 대상 농약을 효율적으로 포집할 수 없거나 (Davis, 1980), 호흡기가 얼굴에 딱 맞아야 하며 작업 도중에 벗을 수 없기 때문에 불편한 점이 있다. 또한 ethylene glycol를 농약 흡수제로 사용한 midget impinger 방법(Linch, 1974; Van Dyk과 Visweswariah, 1975) 이 전통적으로 사용되었는데, 작업 중에 쉽게 오염되고 흘러거나, 펌프로 빨려 들어가기도 하며 농약에 따라 ethylene glycol에 포집되지 않는 것도 있다. 또한 분석에 방해가 가능한 불순물을 미리 제거해야

하고(Thompson, 1977). 오랜 시료 채취 기간 동안에 농약이 증발되기도 하며, ethylene glycol이 공기에서 많은 양의 물도 포함하므로 가수분해에 의하여 농약이 분해되기도 한다(USEPA, 1996a). 따라서 현재는 고체 흡착제와 공기펌프가 연결된 personal air monitor(PAM)(Davis 등, 1983b; Grover, 1985; Calumpang 등, 1996; Calumpang과 Medina, 1996; 변, 2000; Machera 등, 2003; Choi, 2004; Byoun 등, 2005; Choi 등, 2006; Park, 2009; Farahat 등, 2010; Baharuddin 등, 2011; Kim, 2011; Tsakirakis, 2011)이 편리성, 표준 호흡량의 확립, 시료 채취 및 분석 방법상 검증과정의 정립과 많은 농약에 대한 효율이 높고 다양한 고체 흡착제의 개발을 바탕으로 가장 적합한 것으로 추천되고 있고(Lewis, 2005), 대표적인 호흡 노출 측정법으로 쓰이고 있다.

Personal air monitor(PAM)와 고체 흡착제

호흡노출 측정에 사용하는 PAM은 최소한 공기 흡입능력이 2 L/min이 되어야하고 4시간 동안은 재충전 없이 작동이 가능한 것을 추천하고 있다(USEPA, 1996a) PAM은 공기를 빨아들이는 공기펌프와 filter, 고체 흡착제(solid sorbent) 관 등으로 연결되어 구성되어 있다(Fig. 6, A). Filter는 보통 지름 37 mm 유리섬유 filter를 사용하며 뒷면에 cellulose support를 대고 주로 농약으로 오염된 공기 중 부유 먼지를 포집/제거하거나(USEPA, 1996a), 공기 중 농약의 직접 포집(Fenske, 1990)에도 사용한다. 농약의 포집에 사용된 고체 흡착제(Fig. 6, B)는 Chromosorb 102(Thomas와 Seiver, 1974; Hill과 Arnold, 1979; Leidy와 Wright, 1991), Tenax-GC or -TA(Billing과 Bidleman, 1980, 1983; Lewis와 Jackson, 1982; Lewis와 MacLeod, 1982; Roinestad 등, 1993; Calumpang과 Medina, 1996), florisil(Yule 등, 1971; Lewis와 Jackson, 1982; Garrod 등, 1998), Amberlite XAD-4

(Woodrow와 Seiber, 1978; Jenkins 등, 1993) 등의 수지와, polyurethane foam (PUF) (Bidleman과 Olney, 1974; Orgill 등, 1976; Lewis 등, 1977; Wright와 Leidy, 1982; Billing과 Bidleman, 1980; Lewis와 MacLeod, 1982; Hussain 등, 1990; Capri 등, 1999; Cessna와 Grover, 2002), Amberlite XAD-2(Farewell 등, 1977; Johnson 등, 1977; Lewis와 Jackson, 1982; Billing과 Bidleman, 1983; Williams 등, 1987; Leidy와 Wright, 1991; Wright 등, 1993; Lu와 Fenske, 1998; 변, 2000; Machera 등, 2003; Choi, 2004; Byoun 등, 2005; Choi 등, 2006; Park, 2009; Farahat 등, 2010; Kim, 2011)등이 있는데, 이 중에서 주로 XAD-2, PUF 등을 사용하며 가장 보편적인 XAD-2 resin은 소수성의 폴리스티렌 혼성중합체로 20~60 mesh의 하얀색의 불용성 비드로 이루어져 있다. 이상의 filter, 고체 흡착제 tube 등을 공기 펌프와 연결하고, 농약을 살포하는 사람이나 포장에서 작업하는 사람에게 장착하여 작업시간동안 공기를 빨아 들여 공기 중 농약을 포집한다. 이때 흡입하는 공기의 유속은 1.0~2.0 L/min이 일반적이다. 고체흡착제를 비롯한 농약을 흡착하는 재료에 대해 유효성을 확립하기 위해서 포집효율(Trapping efficiency) 및 파과율(Breakthrough)에 대한 검증을 실시하도록 하고 있다(USEPA, 1986, 1996a).

호흡률

농약 살포나 작업 기간 동안 호흡에 의한 전체 농약의 노출량을 알기 위해서는 흡입한 공기의 단위 용적 당 농약 잔류량을 계산한 후, 이 양을 전체 호흡량으로 환산하는 외삽이 역시 필요하다. 따라서 노출 평가에서 또 하나의 중요한 노출 인자가 표준 호흡량이다. 농약의 호흡노출 측정에 사용하는 외국의 대표적 표준 호흡률 연구보고로 USEPA(USEPA, 1985; Thongsinthusak 등, 1993) (Table 9)와 Spector(1956)

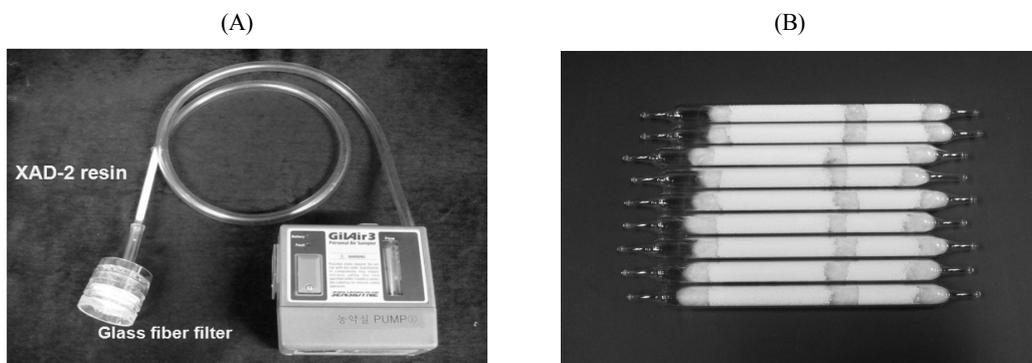


Fig. 6. PAM (A) and solid adsorbent (XAD-2 resin) tube (B) for inhalation exposure monitoring.

Table 9. Estimated ventilation rates by sex and activity level^a (Thongsinthusak etc, 1993)

	Ventilation rate (L/min)			
	Resting ^b	Light ^c	Moderate ^d	Heavy ^e
Adult male (n=454)	12	14	41	80
Adult female (n=595)	6	8	27	48

^aAdapted from U.S.EPA (1985).

^bResting period includes watching television, reading, and sleeping.

^cExample of a light work activity for adult male workers: Continuous loading one bag at a time, seven bags of 50-pound bag granular formulation pesticide in one minute. The walking distance was one meter.

^dModerate work activity represents approximately three times heavier work task the light work activity. Power used can be estimated according to equation in^(f).

^eHeavy work activity category is generally not applicable to occupational exposure to pesticides.

Table 10. Standard Breathing Rates (USEPA, 1996a)

Level of exertion	Ventilation (L/min)	
	Male	Female
Rest	7.4	4.5
Light work	29	16
Heavy work	60	24

자료가 있는데, 현재 USEPA(1997) 및 우리나라(농촌진흥청, 2010)는 Spector(1956)의 자료를 활용하고 있다(Table 10).

하지만, 우리나라 상황을 반영한 호흡 노출 평가를 하려면 호흡률 역시 신체표면적의 경우와 동일하게 우리나라 자료를 활용하는 것이 타당한데, 우리나라의 경우 위해성평가와 관련되어 호흡률을 연구한 환경부의 보고서(장재연 등, 2007, Table 11)자료가 대표적이다. 이 자료를 농약 노출에 활용하기 위해서는 우리나라 농약 노출 평가를 위한 신체표면적 설정의 경우와 마찬가지로 농약 노출 연구 관련 여러 관계자들 간의 토론이 있어야 할 것이지만, 일단 현재의 자료를 인용/참조하여 Table 12와 같이 잠정적으로 제안하였다. 이 때 USEPA의 ‘heavy work’나 환경부의 ‘달리기’ 경우를 제외하였는데, Table 9의 e항목과 같이 작업의 성격을 보아 농약 살포 작업은 ‘heavy work’나, ‘달리기’의 경우와는 적합하지 않을 것으로 판단하였다. 따라서 USEPA(Table 10)의 ‘light work(간단한 작업)’의 경우와 환경부의 ‘빠르게 걷기(medium exercise)’의 경우를 비교, 평가해서 환경부의 ‘빠르게 걷기 (medium exercise)’의 경우의 호흡률을 ‘농약 노출 측정을 위한 우리나라 농작업자의 표준 호흡률’로 잠정적으로 설정

Table 11. Short term breathing rates for Korean adults (m³/h, Average of 20-49 years old)

Activity	Male		Female	
	Speed	m ³ /h	Speed	m ³ /h
Resting	0	0.48	0	0.39
Light exercise	2.5 mph	1.04	1.7 mph	0.79
Medium exercise	3.3 mph	1.27	2.5 mph	0.93
Heavy exercise	4.2 mph	2.08	3.5 mph	1.57
Very heavy exercise	5.0 mph	2.58	5.0 mph	1.97

Table 12. Suggestion or standard breathing rates (L/h) of Korean adults

Activity	Male	Female
Resting	483	393
Medium exercise	1,270	930

하였다(Table 12). 이 호흡률을 사용하면 현재로서 우리나라 농약 살포 상황에 부합하는 농작업자의 농약 호흡 노출 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단한다.

잠재적 호흡노출량(PIE; potential inhalation exposure) 및 내적 호흡노출량 계산

1) 잠재적 호흡노출량 계산

농약 살포나 작업 기간 동안 직접 측정된 외적 호흡노출량은 PIE로 표현되고, 살포액의 노출부피(mL) 또는 유효성분의 노출량(μg, ng)으로 구할 수 있다. 살포액의 노출부피(mL) PIE의 경우를 보면, 고체흡착제에 흡착된 농약의 분석량(ng)을 personal air pump의 유속과 호흡율의 비로 곱하여 실제 포집량을 구하고 이 수치를 실제 살포 유효성분량(ng)으로 나누어 실제 살포 유효성분량에 대한 노출량의 비율을 구한다. 다음 실제 살포액 부피에 곱하고 실제 작업시간(h)으로 나누어 단위시간당 호흡 노출속도를 산출한 뒤 1일 작업시간을 곱하여 PIE (mL)를 계산한다.

$$* \text{PIE (mL)} = \text{단위시간당 호흡 노출속도(mL/h)} \times 1 \text{일 살포시간}$$

$$* \text{단위시간당 호흡 노출속도(mL/h)} = \frac{\text{분석량(ng)} \times \text{호흡률(L/h)} \times \text{실제 살포액 부피(mL)}}{\text{Air pump 유속(L/h)} \times \text{실제 살포 유효성분량(ng)} \times \text{실제 작업시간(h)}}$$

*만약 해당 시험연구에서 실제적인 호흡노출량 측정 자료가 없을 경우에는 피부노출 측정치의 10%를 가정(WHO, 1975)하기도 하지만, 대부분의 호흡 노출은 피부 노출의 일부분(WHO, 1982; Wojcek 등, 1983; USEPA, 1996a; Machera 등, 2003; Choi,

2004; Choi 등, 2006; Park, 2009; 변, 2000; Kim, 2011)이기 때문에 1%를 가정하여 계산(Wolfe 등, 1967, 1972; Machado-Neto, 2001)하는 경우가 일반적이다.

2) 내적 호흡노출량 계산

조제, 살포 중에 발생된 직접적인 잠재적 호흡노출량은 위해성평가를 위한 내적 호흡노출량으로 전환해야하는데, 내적 피부노출량의 경우처럼 의복/보호복 및 피부 침투율을 고려하지 않고, 호흡으로 노출된 양 전체(100%)가 인체 내부로 침투된다는 가정(Jensen, 1984; USEPA, 1996a; USEPA, 1999b; Fenske 와 Day JR. 2005)을 이용하여 PIE 수치를 그대로 사용한다.

효과적 노출 측정을 위한 살포 시간 및 살포 면적

노출 평가를 위한 살포 시간은 정확히 규정 되어 있지 않고 분석이 될 만큼 충분한 농약이 포집될 수 있도록 살포시간이 충분해야 하고, 너무 길어서 농약이 증발, 흡착 또는 분해될 정도의 살포 시간은 지양해야 할 것을 추천하고 있다(USEPA, 1986, 1996a). 국내 연구를 포함한 대표적인 경우를 살펴보면, 약 15분~2시간 정도(Wolfe, 1976; Davis 등, 1983a; Maddy 등, 1983; USEPA, 1996a; 변, 2000; Liu 등, 2003; Choi 2004; Byoun, 2005; Choi 등, 2006; Park, 2009; Ramos 등, 2010; Kim, 2011)이었다. 또한 노출 평가 시 살포시간과 살포면적 중 어느 요소를 활용하는 것이 더 효과적인가를 본다면, 앞에서 언급한 바와 같이 USEPA(1986, 1996a) 지침의 경우 살포 시간에 대한 추천이 있고, 관련된 논문(변, 2000; Cattani 등, 2001; Liu 등, 2003; Machera 등, 2003; Choi 2004; Byoun, 2005; Choi 등, 2006; Hughes 등, 2006; Hughes 등, 2008; Machera 등, 2009; Park, 2009; Kim, 2011; Tsakirakis 등, 2011)들도 주로 살포 시간을 이용한 노출속도($\mu\text{g}(\text{mg})/\text{h}$; mL/h)를 활용하였고, UK-POEM(POEM, 1992)도 살포 노출 평가 시 실질적으로 시간당 노출량(mL/h)를 이용해서 하루 살포시간으로 환산한 1일 노출량인 mL/day 를 노출 평가에 이용하고 있기 때문에 살포 시간을 활용하는 것이 더 좋다고 본다. 즉 노출량은 ‘하루에 얼마만큼의 시간 동안 노출되는가?’가 살포 면적보다는 더 중요하고 활용성이 있다고 본다.

홍 등(2007)은 우리나라의 과수농가의 농약 살포 양상을 파악하기 위해 204농가 4,351건의 농약 사용 경우를 조사하였고, 이 조사 결과를 바탕으로 또한 UK-POEM(POEM, 1992)을 참조로 하여 확립된 우리나라의 농약 등록을 위한 노출 시험 지침의 경우 살포 시간/면적 규정(농촌진흥청, 2010)

은 과수 살포 중 농약 노출 측정을 위한 살포 시간을 두 가지 경우 동일하게 1일 6시간으로 설정하였고, 1일 살포작업면적은 SS기의 경우는 4 ha, 동력분무기경우는 1 ha로 설정하였다. 하지만 홍 등(2007)의 논문에도 SS기의 경우 1일 작업시간이 3~4시간이 45.8%로 가장 많았고, 1일 살포 면적도 0.5~1 ha 처리 농가가 29.8%로 가장 많았다. 또한 과수원에서 수행한 근래의 연구(Liu 등, 2003; Choi 2004; Choi 등, 2006; Park, 2009)에서도 4시간을 1일 살포 시간으로 설정하여 노출 및 위해성 평가를 수행하였다.

따라서 홍 등(2007)의 논문 및 관련 연구들을 참고하여 노출 측정을 위한 포장 실험 시 살포 시간을 제안한다면 가장 많이 사용하는 500 L 탱크를 탑재한 SS기는 한 차를 살포하는데 약 20분(면적은 약 0.1 ha)이 걸리므로 한 차에서 두 차(500~1000 L)를 20~40분에 살포(0.1~0.2 ha)해도 1반복 당 노출 측정을 하기에는 문제가 없을 것 같고, 동력분무기의 경우도 살포 시간을 1반복 당 20~40분으로 해도 무방할 것으로 보며, 3반복 측정 결과를 4시간으로 환산하면 될 것이며 이러한 제안 역시 관련 연구자들의 토의가 필요할 것이다.

결론

포장에서 농약 살포액의 조제, 살포, 사용 후 포장 재출입, 농작물의 수확 등의 작업을 수행하는 농작업자는 피부노출, 호흡노출경로를 통해 농약에 노출되며, 이러한 상황에서의 농약 노출에 대한 위해성 평가는 농약 자체의 독성과 노출량에 의해 결정된다. 농약 자체의 독성은 국제적으로 표준화된 수치와 자료를 이용할 수 있으나 노출량은 영농 방법과 환경, 작업의 습관, 사용하는 제형, 살포량 등 많은 변수가 있어서 해당 영농상황에서 정량적으로 측정할 자료만 유효하다. 따라서 농작업자에 대한 농약의 정량적 노출 평가가 매우 중요하고 그 결과는 위해평가의 필수 자료이다.

농약 노출 측정방법으로 수동적 측정법과 생물학적인 측정법이 있으며 수동적 측정법 중에서 patch, 장갑, 양말, 마스크를 이용하는 방법이 농작업자의 정량적 피부 노출 측정법으로 유효할 것으로 판단된다. Patch는 가로, 세로 약 10 cm로 된 은박종이 patch pocket의 가운데에 면적 50 cm^2 의 구멍이 있고 α -cellulose나 여러 겹으로 포갠 거즈를 patch pocket에 넣어서 사용하며, 해당 신체부위에 큰 안전핀을 사용하거나 접착테이프를 사용하여 부착한다. 얼굴용 마스크는 면적이 약 200 cm^2 의 크기의 면 마스크를 사용하며, 면양말, 면장갑은 일정 규격의 상품을 사용한다. 특히 장갑은 용매 추출 시 불순물이 많이 발견되었기 때문에 여러 종류의 장갑을 구매

하여 불순물을 조사한 후 한 종류를 선택한다.

신체 전체에 대한 농약 노출량의 계산은 patch, 마스크, 장갑, 양말 등에 침착/부착된 농약량을 분석/계산한 후, 신체피부면적으로 외삽하기 때문에 신체표면적은 노출 평가에서 가장 중요한 노출 인자 중의 하나이다. 따라서 USEPA자료가 있기는 하지만, 우리나라 사람의 신체 표면적을 이용하여 외삽하는 것이 타당하며, 식약청의 자료를 대부분 인용하여 ‘농약 노출 측정을 위한 우리나라 사람의 표준 신체 표면적’을 잠정 제안하였다. 따라서 가슴(배, 골반 포함)과 등(엉덩이 포함)을 포함하는 몸통과, 상박과 하박을 포함하는 팔, 대퇴부 및 정강이를 포함하는 다리, 그리고 손의 표면적은 장갑으로 대체하여 사용하면 우리나라 농약 살포 상황에 부합하는 농작업자의 농약 피부 노출 예측 및 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단한다. 또한 농약 살포액의 조제, 살포 중에 발생된 직접적인 외적 피부노출량은 일반적으로 의복 침투율과 피부 침투율을 고려하여 내적 피부노출량을 예측하는데, UK-POEM의 경우와 관련 사례를 참고하여 다양한 침투율을 제안하였다.

호흡 노출은 주로 고체흡착제와 공기흡입펌프가 연결된 PAM를 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 호흡노출 측정에 사용하는 PAM은 최소한 공기 흡입능력이 2 L/min이 되어야하고 4시간 동안은 재충전 없이 작동이 가능한 것을 추천하고 있다. 농약 살포나 작업 기간 동안 호흡에 의한 농약의 전체 노출량을 알기 위해서는 흡입한 공기의 단위 용적당 농약 잔류량을 전체 호흡량으로 환산하는 외삽이 역시 필요하다. 따라서 호흡률 역시 신체표면적의 경우와 동일하게 우리나라 자료를 활용하는 것이 타당한데, 우리나라의 경우 위해성 평가와 관련되어 호흡률을 연구한 환경부의 보고서 자료를 바탕으로 USEPA의 ‘간단한 작업’의 경우와 환경부의 ‘빠르게 걷기’의 경우를 비교 평가해서 해서 환경부의 ‘빠르게 걷기’의 경우의 호흡률을 ‘농약 노출 측정을 위한 우리나라 농작업자의 표준 호흡률’을 잠정적으로 제안하였고, 이 호흡률을 사용하면 우리나라 농약 살포 상황에 부합하는 농작업자의 농약 호흡 노출 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단한다. 조제, 살포 중에 발생된 직접적인 외적 호흡노출량은 위해성 평가를 위한 내적 호흡노출량으로 전환할 때 의복/피부 침투율의 경우와는 다르게 호흡으로 노출된 양 전체(100%)가 인체 내부로 침투된다는 가정을 사용한다. 만약에 해당 시험연구에서 실제적인 호흡노출량 측정 자료가 없을 경우는 피부 노출의 1%를 가정하여 계산하는 경우가 일반적이다.

노출 평가를 위한 살포 시간은 노출 측정 재료에 침착된 농약이 분석이 될 만큼 충분한 농약이 포집될 수 있도록 살포

시간이 충분해야 하는데, 국내의 경우 가장 많이 사용하는 500 L 탱크를 탑재한 SS기는 한 차에서 두 차(500~1000 L)를 약 20~40분에 살포(0.1~0.2 ha)로하고, 동력분무기의 경우도 살포 시간을 1반복 당 약 20~40분으로 해서 3반복 측정 결과를 4시간으로 환산할 것을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ007411)의 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

>> 인 / 용 / 문 / 헌

- Abbott, I. M., J. L. Bonsall, G. Chester, T. B. Hart, and G. J. Turnbull (1987), Worker exposure to a herbicide applied with ground sprayers in the United Kingdom, *Am Ind Hyg Assoc J*, 48(2), 167~175.
- Aprea, C., C. Sciarra, P. Sartorelli, R. Mancini and V. Di Luca (1998), Environmental and biological monitoring for mancozeb, ethylenethiourea and dimethoate during industrial formulation. *J. Toxicol. Environ. Health*, 53, 263~281.
- Archibald, B. A., K. R. Solomon, and G. R. Stephenson (1994), A new procedure for calibrating the Video Imaging Technique for Assessing dermal Exposure to pesticides, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 26(3), 398~402.
- Archibald, B. A., K. R. Solomon, and G. R. Stephenson (1995), Estimation of Pesticide Exposure to Greenhouse Application Using Video Imaging and Other Assessment Techniques, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56(3), 226~235.
- Atallah, Y. H., W. P. Cahill, and D. M. Whitacre (1982), Exposure of pesticide applicators and support personnel to O-ethylO-(4-nitrophenyl) phenylphosphonothioate (EPN), *Archives of environmental contamination and toxicology*, 11(2), 219~225.
- Baharuddin, M. R. B., I. B. Sahid, M. A. B. M. Noor, N. Sulaiman, and F. Othman (2011), Pesticide risk assessment: A study on inhalation and dermal exposure to 2,4-D and paraquat among Malaysian paddy farmers, *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 46(7), 600-607.
- Batchelor, G. S., and K. C. Walker (1954), Health hazards involved in use of parathion in fruit orchards of North Central Washington, *A. M. A. archives of industrial health*, 10(6), 522~529.
- Berkow, S.G. (1931), Value of surface area proportions in the prognosis of cutaneous burns and scalds, *American Journal*

- of Surgery 11,315~317
- Bidleman, T. F., and C. E. Olney (1974), High-volume collection of atmospheric polychlorinated biphenyls, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 11(5), 442~450.
- Bierman, E. P. B., D. H. Brouwer, and J. J. Van hemmen (1998), Implementation and Evaluation of the Fluorescent Tracer Technique in Greenhouse Exposure Studies, *Annals of Occupational Hygiene*, 42(7), 467~475.
- Billings, W. N., and T. F. Bidleman (1980), Field comparison of polyurethane foam and Tenax-GC resin for high-volume air sampling of chlorinated hydrocarbons, *Environmental Science & Technology*, 14(6), 679~683.
- Billings, W. N., and T. F. Bidleman (1983), High volume collection of chlorinated hydrocarbons in urban air using three solid adsorbents, *Atmospheric Environment* 17(2), 383~391.
- Black, K. G., and R. A. Fenske (1996), Dislodgeability of chlorpyrifos and fluorescent tracer residues on turf: Comparison of wipe and foliar wash sampling techniques, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 31(4), 563~570.
- Brouwer, D. H., R. Kroese, and J. J. Van Hemmen (1999), Transfer of Contaminants from Surface to Hands: Experimental Assessment of Linearity of the Exposure Process, Adherence to the Skin, and Area Exposed During Fixed Pressure and Repeated Contact with Surfaces Contaminated with a Powder, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 14(4), 231~239.
- Brouwer, D. H., M. F. Boeniger, and J. J. Van Hemmen (2000), Hand wash and manual skin wipes, *Annals of Occupational Hygiene*, 44(7), 501~510.
- Byoun, J. Y., H. Choi, J. K. Moon, H. W. Park, K. H. Liu, Y. B. Ihm, B. S. Park, and J. H. Kim (2005), Risk Assessment of Human Exposure to Methidathion during Harvest of Cucumber in Green House, *Journal of Korean Society of Toxicology*, 21,297~301.
- California Environmental Protection Agency (1994) Fenpropathrin-risk characterization document, Health assesment section, medical toxicology branch, department pesticide regulation, California environmental protection agency.
- California Environmental Protection Agency, Personal Communication.
- Calumpang, S. M. F. (1996), Exposure of four Filipino farmers to parathion-methyl while spraying string beans, *Pestic Sci*, 46(1), 93~102.
- Calumpang, S. M. F. (2003), Applicator exposure to the insecticides deltamethrin, cypermethrin, imidacloprid and profenofos sprayed on crops of different canopy heights, *Philipp Agric Sci*, 86(3), 266~281.
- Calumpang, S. M. F., and M. J. B. Medina (1996), Applicator Exposure to Imidacloprid while Spraying Mangoes, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 57(5), 697~704.
- Camann, D.E., H.J. Harding, S.R. Agrawal and R.G. Lewis (1993a) Comparison of transfer of surface residues from carpets by three dislodgeable residue methods, in measurement of toxic and related air pollutants, *Proceedings of the 1993 USEPA/A&WMA international symposium*, publication VIP-34, Air and Waste management association, Pittsburgh, PA, USA, pp. 848~856.
- Camann, D.E., H.J. Harding, S.R. Agrawal and R.G. Lewis (1993b) Measurements to assess exposure of the farmer and family to agricultural pesticides, in *Measurement of Toxic and Related Air Pollutants*., *Proceedings of the 1993 USEPA/A&WMA international symposium*, publication VIP-34, Air and Waste management association, Pittsburgh, PA, USA, pp. 712~717.
- Capri, E., R. Alberici, C. R. Glass, G. Minuto, and M. Trevisan (1999), Potential Operator Exposure to Procymidone in Greenhouses, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(10), 4443~4449.
- Cattani, M., K. Cena, J. Edwards, and D. Pisaniello (2001), Potential dermal and inhalation exposure to chlorpyrifos in Australian pesticide workers, *The Annals of Occupational Hygiene*, 45(4), 299~308.
- Cessna, A. J., and R. Grover (2002), Exposure of ground-rig applicators to the herbicide bromoxynil applied as a 1 : 1 mixture of butyrate and octanoate, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 42(3), 369~382.
- Cherrie, J. W., D. H. Brouwer, M. Roff, R. Vermeulen, and H. Kromhout (2000), Use of qualitative and quantitative fluorescence techniques to assess dermal exposure, *Annals of Occupational Hygiene*, 44(7), 519~522.
- Chester, G., L. Hatfield, T. Hart, B. Leppert, H. Swainet, and O. Tummon (1987), Worker exposure to, and absorption of, cypermethrin during aerial application of an "Ultra Low Volume" formulation to cotton, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 16(1), 69~78.
- Chester, G., N. N. Sabapathy, and B. H. Woollen (1992), Exposure and health assessment during application of lambda-cyhalothrin for malaria vector control in Pakistan, *Bull World Health Organ*, 70(5), 615~619.
- Chester, G. (1993), Evaluation of Agricultural Worker Exposure to, and Absorption of, Pesticides. *Annals of Occupational Hygiene* 37, 509~523.
- Chester, G. (2001). Worker exposure: Methods and Techniques. In: *Handbook of Pesticide Toxicology*. Vol. 1. principles. pp. 425~433. Academic press.
- Chester, G. (2010), Worker Exposure: Methods and Techniques, In: *Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology*, edited by W. J. Hayes, pp. 1127~1137, Elsevier.
- Choi, H. (2004), Exposure and risk assessment for applicator during treatment of imidacloprid and thiophanate-methyl in various crop fields. MSc thesis. Seoul National University.
- Choi, H., J. K. Moon, K. H. Liu, H. W. Park, Y. B. Ihm, B. S. Park, and J. H. Kim (2006), Risk assessment of human exposure to cypermethrin during treatment of mandarin

- fields, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 50(3), 437~442.
- Crosby, D. G. (1998), Exposure and risk, in *Environmental Toxicology and Chemistry*, edited, pp. 185~204, Oxford University Press, Inc.
- Culver, D., P. Caplan, and G. S. Batchelor (1956), Studies of human exposure during aerosol application of malathion and chlorthion, A.M.A. *Archives of Industrial Health*, 13(1), 37~50.
- Curry, P., and S. Iyengar (1992), Comparison of exposure assessment guidelines for pesticides, *Rev Environ Contam Toxicol*, 129, 79~93.
- Davis, J. E. (1980), Minimizing occupational exposure to pesticides: personnel monitoring, *Residue Reviews*, 75, 33~50.
- Davis, J. E. (1984), Procedures for dermal and inhalation studies to assess exposure to pesticides, in *Determination and assessment of pesticide exposure*, edited by M. Siewierski, pp. 123~131, Elsevier.
- Davis, J. E., Stevens, E. R., Staiff, D. C., Butler, L. C. (1983a) Potential exposure to diazinon during yard applications, *Environmental monitoring assessment*, 3,23~28.
- Davis, J. E., E. R. Stevens, and D. C. Staiff (1983b), Potential exposure of apple thinners to azinphosmethyl and comparison of two methods for assessment of hand exposure, *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology*, 31(6), 631~638.
- de Cock, J., D. Heederik, H. Kromhout, J. S. M. Boleij, F. Hoek, H. Wegh, and E. T. Ny (1998), Exposure to captan in fruit growing, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 59(3), 158~165.
- Delgado, P., Nocete, F., Arechabala, M. and Castro, S. (2003), Potential dermal exposure and garment performance for pesticide applicators in Southern Europe. 1st International Congress Prevention Risks at Work. Spain.
- De Vreede, J. A. F., D. H. Brouwer, H. Stevenson, and J. J. Van Hemmen (1998), Exposure and risk estimation for pesticides in high-volume spraying, *Annals of Occupational Hygiene*, 42(3), 151~157.
- Doran, E. M., M. G. Yost, and R. A. Fenske (2000), Measuring Dermal Exposure to Pesticide Residues with Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR) Spectroscopy, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(5), 666~672.
- Driver, J., J. Ross, G. Mihlan, C. Lunchick, and B. Landenberger (2007), Derivation of single layer clothing penetration factors from the pesticide handlers exposure database, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 49(2), 125~137.
- Durham, W. F., and H. R. Wolfe (1962), Measurement of Exposure of Workers to Pesticides, *B World Health Organ*, 26(1), 75~91.
- Egea González, F., M. Castro Cano, J. Martínez Vidal, C. Glass, and M. Cruz Márquez (1999), Analytical method for assessing exposure of greenhouse applicators to procymidone by gas chromatography and whole body dosimetry, *Chromatographia*, 50(5), 293~298.
- Farahat, F. M., R. A. Fenske, J. R. Olson, K. Galvin, M. R. Bonner, D. S. Rohlman, T. M. Farahat, P. J. Lein, and W. K. Anger (2010), Chlorpyrifos exposures in Egyptian cotton field workers, *Neurotoxicology*, 31(3), 297~304.
- Farewell, S. O., F. W. Bowes, and D. F. Adams (1977), Evaluation of XAD-2 as a collection medium for 2,4-D herbicides in air, *J Environ Health*, B12, 71~83.
- Fenske, R. A. (1988), Correlation of fluorescent tracer measurements of dermal exposure and urinary metabolite excretion during occupational exposure to malathion, *Am Ind Hyg Assoc J*, 49(9), 438~444.
- Fenske, R. A., J. T. Leffingwell, and R. C. Spear (1985), Evaluation of Fluorescent Tracer Methodology for Dermal Exposure Assessment, *Acs Sym Ser*, 273, 377~393.
- Fenske, R., and C. Lu (1994), Determination of handwash removal efficiency: incomplete removal of the pesticide chlorpyrifos from skin by standard handwash techniques, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55(5), 425~432.
- Fenske, R. A. (1990), Nonuniform dermal deposition patterns during occupational exposure to pesticides, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 19(3), 332~337.
- Fenske, R. A. (1993a), Dermal exposure assessment techniques, *Annals of Occupational Hygiene*, 37(6), 687~706.
- Fenske, R. A. (1993b), Fluorescent Tracer Evaluation of Protective Clothing Performance. Final Report, US Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, OH, USA.
- Fenske, R. A., and S. G. Birnbaum (1997), Second Generation Video Imaging Technique for Assessing Dermal Exposure (VITAE System), *American Industrial Hygiene Association Journal*, 58(9), 636~645.
- Fenske, R. A., and E. W. Day JR (2005), Assessment of Exposure for Pesticide Handlers in Agricultural, Residential and Institutional Environments, in *Occupational and Residential Exposure Assessment for Pesticides*, edited, pp. 11~43, John Wiley & Sons, Ltd.
- Fenske, R. A., J. T. Leffingwell, and R. C. Spear (1986a), A Video Imaging Technique for Assessing Dermal Exposure I. Instrument Design and Testing, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(12), 764~770.
- Fenske, R. A., S. M. Wong, J. T. Leffingwell, and R. C. Spear (1986b), A Video Imaging Technique for Assessing Dermal Exposure II. Fluorescent Tracer Testing, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(12), 771~775.
- Fenske, R. A., S. G. Birnbaum, M. M. Methner, and R. Soto (1989), Methods for assessing fieldworker hand exposure to pesticides during peach harvesting, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 43(6), 805~813.
- Fenske, R. A., A. M. Blacker, S. J. Hamburger, and G. S.

- Simon (1990), Worker exposure and protective clothing performance during manual seed treatment with lindane, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 19(2), 190~196.
- Fenske, R. A., C. Schultze, C. Lu, and E. H. Allen (1998), Incomplete Removal of the Pesticide Captan from Skin by Standard Handwash Exposure Assessment Procedures, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 61(2), 194~201.
- Fenske, R. A., N. J. Simcox, J. E. Camp, and C. J. Hines (1999), Comparison of Three Methods for Assessment of Hand Exposure to Azinphos-Methyl (Guthion) During Apple Thinning, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 14(9), 618~623.
- Fletcher, T. E., J. M. Press, and D. B. Wilson (1959), Exposure of spray-men to dieldrin in residual spraying, *Bulletin of the World Health Organization*, 20(1), 15~25.
- Franklin, C. A., and J. P. Worgan (2005), *Occupational and residential exposure assessment for pesticides*, Wiley.
- Franklin, C. A., R. A. Fenske, R. Greenhalgh, L. Mathieu, H. V. Denley, J. T. Leffingwell, and R. C. Spear (1981), Correlation of urinary pesticide metabolite excretion with estimated dermal contact in the course of occupational exposure to Guthion, *J Toxicol Environ Health*, 7(5), 715~731.
- Garrod, A. N. I., D. A. Rimmer, L. Robertshaw, and T. Jones (1998), Occupational exposure through spraying remedial pesticides, *Annals of Occupational Hygiene*, 42(3), 159-165.
- Geno, P. W., D. E. Camann, H. J. Harding, K. Villalobos, and R. G. Lewis (1996), Handwipe sampling and analysis procedure for the measurement of dermal contact with pesticides, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 30(1), 132~138.
- Gold, R. E., and T. Holclaw (1985), Dermal and Respiratory Exposure of Applicators and Residents to Dichlorvos-Treated Residences, *Acs Sym Ser*, 273, 253~264.
- Gold, R. E., J. R. C. Leavitt, T. Holclaw, and D. Tupy (1982), Exposure of urban applicators to carbaryl, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 11(1), 63~67.
- Griffiths, J. T., C. R. Stearns, and W. L. Thompson (1951), Parathion Hazards Encountered Spraying Citrus in Florida, *Journal of Economic Entomology*, 44(2), 160~163.
- Groupement International des Associations Nationales de Fabricants de Produits Agrochimiques (GIFAP) (1990) Monitoring studies in the assessment of field worker exposure to pesticides. Technical Monograph No.14. GIFAP, Brussels.
- Grover, R., A. J. Cessna, and L. A. Kerr (1985), Procedure for the determination of 2,4-D and dicamba in inhalation, dermal, hand-wash, and urine samples from spray applicators, *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 20(1), 113~128.
- Grover, R., C. A. Franklin, N. I. Muir, A. J. Cessna, and D. Riedel (1986), Dermal exposure and urinary metabolite excretion in farmers repeatedly exposed to 2,4-D amine, *Toxicology Letters*, 33(1-3), 73~83.
- Gunther, F. A., Y. Iwata, G. E. Carman, and C. A. Smith (1977), The citrus reentry problem: research on its causes and effects, and approaches to its minimization, *Residue Rev*, 67, 1~132.
- Henderson, P. T., D. H. Brouwer, J. J. G. Opdam, H. Stevenson, and J. T. J. Stouten (1993), RISK ASSESSMENT FOR WORKER EXPOSURE TO AGRICULTURAL PESTICIDES - REVIEW OF A WORKSHOP, *Annals of Occupational Hygiene*, 37(5), 499-507.
- Hill, R. H., and J. E. Arnold (1979), Personal Air Sampler for Pesticides, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 8(5), 621-628.
- Hirai, Y., and K. Tomokuni (1993), Levels of Chlordane, Oxychlordane, and Nonachlor on Human Skin and in Human Blood, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 50(2), 316-324.
- Hughes, E. A., A. Zalts, J. J. Ojeda, A. P. Flores, R. C. Glass, and J. M. Montserrat (2006), Analytical method for assessing potential dermal exposure to captan, using whole body dosimetry, in small vegetable production units in Argentina, *Pest Management Science*, 62(9), 811-818.
- Hughes, E. A., A. P. Flores, L. M. Ramos, A. Zalts, C. R. Glass, and J. M. Montserrat (2008), Potential dermal exposure to deltamethrin and risk assessment for manual sprayers: Influence of crop type, *Science of The Total Environment*, 391(1), 34~40.
- Hughson, M. Mäkinen, and J. J. van Hemmen (2004), Patterns of dermal exposure to hazardous substances in European union workplaces, *Ann Occup Hyg*, 48(3), 285-297.
- Hussain, M., K. Yoshida, M. Atiemo, and D. Johnston (1990), Occupational exposure of grain farmers to carbofuran, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 19(2), 197-204.
- Jenkins, J. J., A. S. Curtis, and R. J. Cooper (1993), Two Small-Plot Techniques for Measuring Airborne and Dislodgeable Residues of Pendimethalin Following Application to Turfgrass, in *Pesticides in Urban Environments*, edited, pp. 228~242, American Chemical Society.
- Jensen, J. K. (1984), The assumptions used for exposure assessment, in *Determination and assessment of pesticide exposure*, edited by M. Siewierski, pp. 147~152, Elsevier.
- Johnson, E. R., T. C. Yu, and M. L. Montgomery (1977), Trapping and analysis of atmospheric residues of 2,4-D, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 17(3), 369~372.
- Kazen, C., A. Bloomer, R. Welch, A. Oudbier, and H. Price (1974), Persistence of Pesticides on Hands of Some Occupationally Exposed People, *Arch. Environ. Health*, 29(6), 315~318.
- Keenan, R. R., and S. B. Cole (1982), A Sampling and Analytical Procedure for Skin-Contamination Evaluation, *American*

- Industrial Hygiene Association Journal, 43(7), 473~476.
- Keeble, V.B., R.R. Dupont, W.J. Doucette and M. Norton (1988) Guthion penetration of clothing materials during mixing and spraying in orchards, in performance of protective clothing: Second symposium, S.Z. Mansdorf, R. Sagar and A.P. Nielson (Eds), American Society for the testing of material, Philadelphia, PA, USA, Std 989, pp. 573~583.
- Kim, E.H. (2011), Exposure and risk assessment of methomyl and benomyl for applicator during treatment on apple orchard. MSc thesis. Seoul National University.
- Knaak, J. B., K. C. Jacobs, and G. M. Wang (1986), Estimating the hazard to humans applying nemacur 3EC with rat dermal-dose ChE response data, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 37(1), 159~163.
- Knaak, J. B., K. T. Maddy, M. A. Gallo, D. T. Lillie, E. M. Craine, and W. F. Serat (1978), Worker Reentry Study Involving Phosalone Application to Citrus Groves, Toxicol Appl Pharm, 46(2), 363~374.
- Krieger, R. I. (2001), Handbook of Pesticide Toxicology, second edition, vol.1, Academic press.
- Krieger, R. I. (2010), Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology, third edition, vol.1, Elsevier.
- Krieger, R. I., J. H. Ross, and T. Thongsinthusak (1992), Assessing human exposures to pesticides, in Reviews of environmental contamination and toxicology, edited by G. W. Ware, pp. 1~15.
- Krieger, R. I., C. E. Bernard, T. M. Dinoff, L. Fell, T. G. Osimitz, J. H. Ross, and T. Thongsinthusak (2000), Biomonitoring and whole body cotton dosimetry to estimate potential human dermal exposure to semivolatile chemicals, J Expo Anal Env Epid, 10(1), 50~57.
- Kross, B. C., H. F. Nicholson, and L. K. Ogilvie (1996), Methods Development Study for Measuring Pesticide Exposure to Golf Course Workers Using Video Imaging Techniques, Applied Occupational and Environmental Hygiene, 11(11), 1346~1350.
- Kuye, R. A., K. J. Donham, S. P. Marquez, W. T. Sanderson, L. J. Fuortes, R. H. Rautiainen, M. L. Jones, and K. R. Culp (2007), Pesticide handling and exposures among cotton farmers in the gambia, J Agromedicine, 12(3), 57~69.
- Kurazumi, Y., T. Horikoshi, T. Tsuchikawa (1994), The body surface area of Japanese Japanese Journal of Biometeorology, 31(1), 5~29.
- Kurtz D, A., and M. Bode W (1985), Application Exposure to the Home Gardener, in Dermal Exposure Related to Pesticide Use, edited, pp. 139~161, American Chemical Society.
- Lavy, T. L., J. S. Shepard, and D. C. Bouchard (1980), Field Worker Exposure and Helicopter Spray Pattern of 2,4,5-T, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 24(1), 90~96.
- Lee JY (2005) Study on the body surface area of Korean adults. Ph.D. Dissertation. Seoul National University, Seoul.
- Leidy, R. B., and C. G. Wright (1991), Trapping efficiency of selected adsorbents for various airborne pesticides, Journal of Environmental Science and Health, Part B, 26(4), 367~382.
- Levy, K. A., S. S. Brady, and C. D. Pfaffenberger (1981), Chlorobenzilate Residues in Citrus-Worker Urine, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 27(2), 235~238.
- Lewis, R. G. (1976), Sampling and analysis of airborne pesticides. pp.51~94 in Air Pollution from Pesticides and Agricultural Processes. R.E. Lee, Jr., ed. CRC Press, Cleveland, OH.
- Lewis, R. G. (2005), Residential Post-Application Pesticide Exposure Monitoring, In: Occupational and Residential Exposure Assessment for Pesticides, edited, pp. 71~128, John Wiley & Sons, Ltd.
- Lewis, R. G., A. R. Brown, and M. D. Jackson (1977), Evaluation of polyurethane foam for sampling of pesticides, polychlorinated biphenyls and polychlorinated naphthalenes, in ambient air, Analytical Chemistry, 49(12), 1668~1672.
- Lewis, R. G., and M. D. Jackson (1982), Modification and evaluation of a high-volume air sampler for pesticides and semivolatile industrial organic chemicals, Analytical Chemistry, 54(3), 592~594.
- Lewis, R. G., and K. E. MacLeod (1982), Portable sampler for pesticides and semivolatile industrial organic chemicals in air, Analytical Chemistry, 54(2), 310~315.
- Lewis, R. G., R. C. Fortmann, and D. E. Camann (1994), Evaluation of methods for monitoring the potential exposure of small children to pesticides in the residential environment, Archives of environmental contamination and toxicology, 26(1), 37~46.
- Linch, A. L. (1974), Evaluation of ambient air quality by personnel monitoring, CRC Press.
- Liu, K. H., C. S. Kim, and J. H. Kim (2003), Human exposure assessment to mancozeb during treatment of mandarin fields, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 70(2), 336~342.
- Lu, C., and R. A. Fenske (1998), Air and Surface Chlorpyrifos Residues following Residential Broadcast and Aerosol Pesticide Applications, Environmental Science & Technology, 32(10), 1386~1390.
- Machado-Neto, J. G. (2001), Determination of safe work time and exposure control need for pesticide applicators, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 67(1), 20~26.
- Machado-Neto, J. G., A. J. Bassini, and L. C. Aguiar (2000), Safety of working conditions of glyphosate applicators on Eucalyptus forests using knapsack and tractor powered sprayers, Bull Environ Contam Toxicol, 64(3), 309~315.
- Machado-Neto, J. G., T. Matuo, and Y. K. Matuo (1992), Dermal exposure of pesticide applicators in staked tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) crops: Efficiency of a safety measure in the application equipment, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 48(4), 529~534.

- Machado-Neto, J. G., T. Matuo, and Y. K. Matuo (1996), Semiquantitative evaluation of dermal exposure to granulated insecticides in coffee (*Coffea arabica* L.) crop and efficiency of individual protective equipment, *Bull Environ Contam Toxicol*, 57(6), 946~951.
- Machado-Neto, J. G., T. Matuo, and Y. K. Matuo (1998), Efficiency of safety measures applied to a manual knapsack sprayer for paraquat application to maize (*Zea mays* L.), *Arch Environ Contam Toxicol*, 35(4), 698~701.
- Machado-Neto, J. G., A. J. Bassini, and L. C. Aguiar (2000), Safety of working conditions of glyphosate applicators on Eucalyptus forests using knapsack and tractor powered sprayers, *Bull.*
- Machera (2011), Determination of operator exposure levels to insecticide during bait applications in olive trees: Study of overall performance and duration of application, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214(1), 71~78.
- Machera, K., M. Goumenou, E. Kapetanakis, A. Kalamarakis, and C. R. Glass (2003), Determination of Potential Dermal and Inhalation Operator Exposure to Malathion in Greenhouses with the Whole Body Dosimetry Method, *Ann Occup Hyg*, 47(1), 61~70.
- Maddy, K. T., (1980), A study of dermal and inhalation exposure of mixer/loaders and applicators to nitrofen in Monterey and Santa Barbara counties of California, *Worker Health and Safety Unit Report HS-745*, California Department of Food and Agriculture, Sacramento, CA. 35PP.
- Maddy, K. T., R. Wang, and C. Winter (1983), Dermal Exposure Monitoring of Mixers, Loaders and Applicators of Pesticides in California, *Worker Health and Safety Unit Report HS-1069*, California Department of Food and Agriculture, Sacramento, CA. 7PP.
- MÄKINEN, M. (2003), Dermal exposure assessment of chemicals - an essential part of total exposure assessment at workplaces. Doctoral dissertation Kuopio University.
- Maibach H. I. and R. T. Feldman (1974), in Milby (ed), *Systemic absorption of pesticide through the skin of man*. *Occupational exposure to pesticide*, pp120~127.
- Majumdar, T. K., D. E., Camann, W. D., Ellenson and R. G. Lewis (1995) Determination of pesticides and their stabilities in salivary matrices, In *Measurement of toxic and related air pollutants: Proceedings of the 1995 USEPA/A&WMA international symposium*, Publication VIP-50, Air and Waste Management association, Pittsburgh, PA, USA, pp. 569~571.
- May, L. L. (1984), *Dynamic Risk/Benefit Analysis in Pesticide Regulation: The Case of Toxaphene*. Master's Thesis in Economics. University of California, Riverside, CA.
- Martinez Vidal, J. L., F. J. Egea Gonzalez, A. Garrido French, M. Martinez Galera, P. A. Aguilera, and E. Lopez Carriue (2002), Assessment of relevant factors and relationships concerning human dermal exposure to pesticides in greenhouse applications, *Pest Manag Sci*, 58(8), 784~790.
- Matthews, G. (2002), Operator exposure to pesticides, *Pesticide Outlook*, 13(6), 233-237.
- Methner, M. M., and R. A. Fenske (1994a), Pesticide Exposure during Greenhouse Applications, Part II. Chemical Permeation Through Protective Clothing in Contact with Treated Foliage, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 9(8), 567~574.
- Methner, M. M., and R. A. Fenske (1994b), Pesticide Exposure during Greenhouse Applications, Part I. Dermal Exposure Reduction Due to Directional Ventilation and Worker Training, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 9(8), 560~566.
- Miller, C. S., W. L. Hoover, and W. H. Culver (1980), Exposure of Pesticide Applicators to Arsenic Acid, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 9(3), 281~288.
- National Agricultural Chemicals Association (NACA) (1985). *Guidelines for conducting Biological Monitoring-Applicator exposure studies*. NACA, Washington, DC.
- Ness, S. A. (1994), *Surface and Dermal Monitoring for Toxic Exposures*, John Wiley & Sons.
- Nigg H, N., and H. Stamper J (1985), *Field Studies: Methods Overview*, in *Dermal Exposure Related to Pesticide Use*, edited, pp. 95~108, American Chemical Society.
- Nigg, H. N., J. H. Stamper, and R. M. Queen (1986), Dicofol exposure to Florida citrus applicators: Effects of protective clothing, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 15(1), 121~134.
- Nigg, H. N., J. H. Stamper, E. Easter, and J. O. DeJonge (1992), Field evaluation of coverall fabrics: Heat stress and pesticide penetration, *Archives of environmental contamination and toxicology*, 23(3), 281~288.
- NIOSH, <http://www.cdc.gov/niosh/>
- Niven, K. J. M., A. J. Scott, S. Hagen, E. R. Waclawski, M. Lovett, B., Cherie, P. L. Bodsworth, A., Roverson, A. Elder, J. Cocker, B. Nutley and M. Roff (1993), *Occupational hygiene assessment of sheep dipping practices and processes*. IOM report TM/93/03, Institute of Occupational Medicine, Edinburgh.
- Nuytens, D., P. Braekman, S. Windey, and B. Sonck (2009), Potential dermal pesticide exposure affected by greenhouse spray application technique, *Pest Management Science*, 65(7), 781~790.
- OECD (1997), *Guidance document for the conduct of studies of occupational exposure to pesticides during agricultural application*. OECD environmental health and safety publications. Series on Testing and Assessment Paris: Environmental Directorate, OECD/GD(97).
- Oliveira, M. L., and J. G. Machado-Neto (2003), Use of manganese as tracer in the determination of respiratory exposure and relative importance of exposure routes in the safety of pesticide applicators in citrus orchards, *Bull Environ Contam Toxicol*, 70(3), 415~421.
- Orgill, M. M., G. A. Sehmel, and M. R. Petersen (1976), Some

- initial measurements of airborne DDT over Pacific Northwest forests, *Atmospheric Environment* (1967), 10(10), 827~834.
- OSHA, <http://www.osha.gov/>
- Park, S.W. (2009), Risk assessment of fenvalerate for applicator during treatment on apple orchard and its metabolism by human liver microsome. MSc thesis. Seoul National University.
- POEM (1992), UK Predictive Operator Exposure Model (POEM): A Users Guide, Pesticides Safety Directorate, York, UK.
- Rajan-Sithamparanadarajah, R., M. Roff, P. Delgado, K. Eriksson, W. Fransman, J. H. Gijssbers, G. Hughson, M. Makinen, and J. J. van Hemmen (2004), Patterns of dermal exposure to hazardous substances in European union workplaces, *Ann Occup Hyg*, 48(3), 285~297.
- Ramos, L. M., G. A. Querejeta, A. P. Flores, E. A. Hughes, A. Zalts, and J. M. Montserrat (2010), Potential Dermal Exposure in greenhouses for manual sprayers: Analysis of the mix/load, application and re-entry stages, *Science of The Total Environment*, 408(19), 4062~4068..
- Roff, M. W. (1994), A Novel Lighting System for the Measurement of Dermal Exposure Using a Fluorescent Dye and an Image-Processor, *Annals of Occupational Hygiene*, 38(6), 903~919.
- Roinestad, K. S., J. B. Louis, and J. D. Rosen (1993), Determination of Pesticides in Indoor Air and Dust, *J Aoac Int*, 76(5), 1121~1126.
- Ross, J., T. Thongsinthusak, H. R. Fong, S. Margetich, and R. Krieger (1990), Measuring potential dermal transfer of surface pesticide residue generated from indoor fogger use: An interim report, *Chemosphere*, 20(3~4), 349~360.
- Ross, J., H. R. Fong, T. Thongsinthusak, S. Margetich, and R. Krieger (1991), Measuring potential dermal transfer of surface pesticide residue generated from indoor fogger use: using the CDFA roller method interim report II, *Chemosphere*, 22(9-10), 975~984.
- Ross, J., G. Chester, J. Driver, C. Lunchick, L. Holden, L. Rosenheck, and D. Barnekow (2008), Comparative evaluation of absorbed dose estimates derived from passive dosimetry measurements to those derived from biological monitoring: Validation of exposure monitoring methodologies, *J Expo Sci Env Epid*, 18(2), 211~230.
- Ross, J. H., J. H. Driver, R. C. Cochran, T. Thongsinthusak, and R. I. Krieger (2001), Could pesticide toxicology studies be more relevant to occupational risk assessment?, *Annals of Occupational Hygiene*, 45, S5~S17.
- Sell, C. R., and J. C. Maitlen (1983), Procedure for the determination of residues of (2,4-dichlorophenoxy) acetic acid in dermal exposure pads, hand rinses, urine, and perspiration from agricultural workers exposed to the herbicide, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 31(3), 572~575.
- Siewierski, M. (1984), Determination and assessment of pesticide exposure, Edited by Marie Siewierski, Elsevier.
- Soutar, A., S. Semple, R. J. Aitken, and A. Robertson (2000), Use of patches and whole body sampling for the assessment of dermal exposure, *Annals of Occupational Hygiene*, 44(7), 511~518.
- Spector, W.S. (1956), *Handbook of Biological Data*. W.B. Saunders Co., Philadelphia, PA.
- Popendorf, W., and M. Selim (1995), Exposures while applying commercial disinfectants, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56(11), 1111~1120.
- Popendorf, W. J., and J. T. Leffingwell (1982), Regulating Organophosphate Pesticide-Residues for Farmworker Protection, *Residue Reviews*, 82, 125~201.
- Ramwell, C. T., P. D. Johnson, and H. Corns (2006), Transferability of Six Pesticides from Agricultural Sprayer Surfaces, *Annals of Occupational Hygiene*, 50(3), 323-329.
- Ramwell, C. T., P. D. Johnson, A. B. A. Boxall, and D. A. Rimmer (2005), Pesticide Residues on the External Surfaces of Field Crop Sprayers: Occupational Exposure, *Annals of Occupational Hygiene*, 49(4), 345-350.
- Tannahill, S. N., A., Roverton, B., Cherrie, P. Donnan, E. L. A., MacConnell, G. J. MacLeod (1996), A comparison of two different methods for assessment of dermal exposure to non-agricultural pesticides in three sectors. IOM report TM/96/07, Institute of Occupational Medicine, Edinburgh.
- Tsakirakis, A., K. M. Kasiotis, N. Arapaki, A. Charistou, A. Tsatsakis, C. R. Glass, and K. Machera (2011), Determination of operator exposure levels to insecticide during bait applications in olive trees: Study of coverall performance and duration of application, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214(1), 71~78.
- Teschke, K., S. A. Marion, A. Jin, R. A. Fenske, and C. Vannetten (1994), Strategies for Determining Occupational Exposures in Risk Assessments - a Review and a Proposal for Assessing Fungicide Exposures in the Lumber Industry, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55(5), 443~449.
- Thongsinthusak, T., T. C. Blewett, J. Ross, R. I. Krieger (1993), Estimation of Exposure of Persons in California to Pesticide Products That Contain Chlorothalonil, Publication No. HS-1475, California Department of Pesticide Regulation, Worker Health and Safety Branch(WHSB), Sacramento.
- Thomas, T. C., and J. N. Seiber (1974), Chromosorb 102, an efficient medium for trapping pesticides from air, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 12(1), 17~25.
- Thompson, J.F. (1977), *Manual of analytical methods for the analysis of pesticide residues in human and environmental samples*. Section 8. B. IV, 1. U.S. EPA. Environmental Toxicology Division, Research Triangle Park, N.C.
- Tuomainen, A., J. A. Kangas, W. J. A. Meuling, and R. C. Glass (2002), Monitoring of pesticide applicators for potential dermal exposure to malathion and biomarkers in urine, *Toxicology Letters*, 134(1~3), 125~132.
- Turnbull, G. J. (1985), Current trends and future needs in Occupational hazards of pesticide use edited, pp. 99~116,

- Taylor and Francis, Ltd.
- U.S. Environmental Protection Agency (1984), Pesticide assessment guidelines, subdivision K, Exposure: Reentry protection, Office of pesticide programs, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1985), Development of statistical distributions or range of standard factors used in exposure assessments. Office of research and development, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1986), Pesticide assessment guidelines, subdivision U, Applicator exposure monitoring, report No. 540/9-87-127, Office of prevention, pesticides and toxic substances, Washington, DC, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (1996a), Occupational and residential exposure test guidelines, OPPTS875.1000, EPA 712-C-96-261, U.S. EPA, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1996b), Evaluation of Dust Samplers for Bare Floors and Upholstery, Report No. 600/R-96/001, National Exposure Research Laboratory, research Triangle Park, NC, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (1997), Exposure factors handbook, EPA/600/8-89/043, May, U.S. EPA, Office of Research and Development, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1998), Post Application Exposure Guidelines: Series 875-Group B, Environmental Protection Agency, Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1999a), Exposure factors handbook, EPA/600/C-99/001, February, U.S. EPA, Office of Research and Development, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (1999b), Methidathion-Human health risk assessment, Environmental protection agency office of pesticide programs, Health effects division (7509C), Robert Travaglini, Risk Assessor, December 8.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000), Evaluation of saliva and artificial salivary fluids for removal of pesticide residues from human skin. Report No. 600/R-00/041. National exposure research laboratory, Research Triangle Park, NC, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (2007), Review of worker exposure assessment methods, FIFRA Scientific advisory panel meeting, held at the EPA Conference Center, Arlington, Virginia. 9-12th January 2007.
- U.S. Environmental Protection Agency (2009), Exposure Factors Handbook Update 2009 (External Review Draft). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/052A.
- U.S. Environmental Protection Agency (2011), Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/052F.
- Van Dyk, L. P., and K. Visweswariah (1975), Pesticides in air: sampling methods, Residue Reviews, 55, 91~134.
- Vercruyse, F., S. Drieghe, W. Steurbaut, and W. Dejonckheere (1999), Exposure assessment of professional pesticide users during treatment of potato fields, Pestic Sci, 55(4), 467~473.
- Ware, G. W., D. P. Morgan, B. J. Estes, and W. P. Cahill (1974), Establishment of reentry intervals for organophosphate-treated cotton fields based on human data II. Azodrin, ethyl and methyl parathion, Archives of environmental contamination and toxicology, 2(2), 117~129.
- Williams, D. T., C. Shewchuck, G. L. Lebel, and N. Muir (1986), Diazinon levels in indoor air after periodic application for insect control, American Industrial Hygiene Association, Fairfax, VA, ETATS-UNIS.
- Wojeck, G. A., J. F. Price, H. N. Nigg, and J. H. Stamper (1983), Worker Exposure to Paraquat and Diquat, Archives of environmental contamination and toxicology, 12(1), 65~70.
- Wolfe, H. R., W. F. Durham, and A. J. F. (1967), Exposure of Workers to Pesticides, Arch. Environ. Health, 14(4), 622~633.
- Wolfe, H.R. (1976), Field exposure to airborne pesticides, In: Air pollution from pesticides and agricultural processes. ED. Lee, R.e., Jr CRC Press, Cleveland, Ohio
- Wolfe, H. R., J. F. Armstrong, D. C. Staiff, and S. W. Comer (1972), Exposure of spraymen to pesticides, Arch Environ Health, 25(1), 29~31.
- Woodrow, J. E., and J. N. Seiber (1978), Portable device with XAD-4 resin trap for sampling airborne residues of some organophosphorus pesticides, Analytical Chemistry, 50(8), 1229~1231.
- World Health Organization. (1975), Survey of exposure to organophosphorus pesticides in agriculture. Standard protocol, VBC/75.9. WHO, Geneva.
- World Health Organization. (1982), Field surveys of exposure to pesticides. Standard Protocol, VBC/82.1. WHO, Geneva.
- Wright, C. G., and R. B. Leidy (1982), Chlordane and heptachlor in the ambient air of houses treated for termites, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 28(5), 617~623.
- Wright, C. G., R. B. Leidy, and H. E. Dupree, Jr. (1993), Cypermethrin in the ambient air and on surfaces of rooms treated for cockroaches, Bulletin of environmental contamination and toxicology, 51(3), 356~360.
- Yule, W. N., A. F. W. Cole, and I. Hoffman (1971), A survey for atmospheric contamination following forest spraying with fenitrothion, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 6(4), 289~296.
- Zweig, G., R. Y. Gao, and W. Pendorf (1983), Simultaneous Dermal Exposure to Captan and Benomyl by Strawberry Harvesters, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 31(5), 1109~1113.
- 김정환, 김균, 이해근 (1998), 인체의 농약 노출 측정, 농업생명과학, 5(2), 72~76.
- 농촌진흥청 (2010), 농촌진흥청 고시 제2010~3호.
- 변지연 (2000), 施設栽培에서 農藥 撒布 後 再出入期間設定(시설재

배에서 농약 살포 후 재출입 기간설정) 석사학위논문, 서울대학교 식품의약품안전청 (2007) 피부노출평가를 위한 체표면적 측정 기초 조사연구(고려대학교/이흥만), 용역연구개발과제.
 식품의약품안전청 (2009), 위해평가를 위한 피부체표면적 조사 연구(고려대학교/이흥만), 용역연구개발과제.
 식품의약품안전청 (2010), 위해평가를 위한 피부체표면적 조사집. 1~56.

입순 (1994), 체표면적 산출식에 관한 연구, 복식문화학회. 2(2), 385~394.
 장재연, 조수남, 김소연, 김선자, 정해관 (2007), 한국노출계수핸드북, 환경부.
 홍순성, 이제봉, 박연기, 신진섭, 임건재, 류갑희 (2007), 과수 농작업자 농약노출량 산정법 제안, 농약과학회지, 11(4), 281~288.

농작업자에 대한 농약 노출의 정량적 측정 방법

김은혜 · 이혜리 · 최 훈¹ · 문준관² · 홍순성³ · 정미혜³ · 박경훈³ · 이효민⁴ · 김정한*

서울대학교 농생명공학부, ¹식품의약품안전청 식품의약품평가원, ²한경대학교 식물생명환경과학부, ³농촌진흥청 농업과학기술원, ⁴식품의약품안전청 위해예방정책국

요 약 포장에서 농약 살포액의 조제, 살포 등의 작업을 수행하는 농작업자는 피부노출, 호흡노출경로를 통해 농약에 노출되며, 이러한 상황에서의 농약 노출에 대한 합리적인 위해성 평가를 위해서는 해당 영농상황에서 노출량을 정량적으로 측정해야 한다. 농약 노출 측정방법으로 patch, 장갑, 양말, 마스크를 이용하는 방법과 호흡 노출은 주로 고체흡착제와 공기흡입펌프가 연결된 personal air monitor를 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 이 농작업자의 정량적 피부 노출 측정법으로 유효할 것으로 판단된다. 노출 재료에 침착/부착된 농약량이나 고체흡착제에 포집된 농약량을 신체 전체에 대한 농약 노출량으로 외삽하기 위한 EPA 자료를 대체할 수 있도록 한국 사람의 표준 신체표면적 및 호흡률을 제안하였다. 중요한 노출 인자인 피부노출의 의복 침투율과 피부 침투율, 그리고 호흡노출의 침투율을 UK-POEM과 관련된 연구결과를 참고하여 다양하게 제안하였다. 노출 평가를 위한 살포 시간은 노출 측정 재료에 침착된 농약이 분석이 될 만큼 충분한 농약이 포집될 수 있도록 살포시간이 충분해야 하는데, 국내의 SS기나 동력분무기의 경우는 1반복 당 모두 약 20~40분에 살포(약 0.1~0.2 ha)로 해서 3반복 측정 결과를 4시간으로 환산할 것을 제안하였다.

색인어 농약 노출, 피부노출, 호흡노출, patch, 고체흡착제