

밀폐된 공간에서 환기에 의한 ETS 성분 제거

황건중* · 이문수 · 나도영
한국인삼연초연구원 분석부
(1999년 6월 15일)

Removal of ETS Components by Ventilation in a Closed Room

Keon-Joong Hwang*, Moon-Soo Rhee and Do-young Ra
Korea Ginseng and Tobacco Research Institute, Taejon 305-345, Korea
(Received June 15, 1999)

ABSTRACT : This study was conducted to evaluate the ventilation to remove gases, vapor and particles of environmental tobacco smoke(ETS) in a closed room. The ventilation rate choosed were 0.445 m³/min, 0.528 m³/min, and 0.625 m³/min. ETS components measured were total suspended particle(TSP), ultraviolet particulate matter(UVPM), fluorescent particulate matter(FPM), solanesol, carbon dioxide(CO₂), carbon monoxide(CO), nicotine, and 3-ethenylpyridine(3-EP). The concentration of ETS components measured rapidly decreased as increasing ventilation rate, but the removal efficiency by ventilation was different from each ETS compounds. The CO₂, and CO, gaseous components of ETS, were dominant components to be removed from the room by ventilation. The ventilation with 0.528 m³/min for 1 hr was enough to remove over 99% of those gaseous components. Nicotine and 3-EP needed the ventilation for 2 hrs to reduce over 95% of those components. As the same ventilation rate, 99% of TSP and solanesol concentration were removed from the room within 2 hrs, UVPM and FPM concentration decreased 90%.

Key words : Indoor air pollution, ventilation, ETS

ETS의 화학적 조성 및 분포는 흡연과 흡연 정지시간 중에 일어나는 다양한 화학작용에 기인되고, 담배에 부착된 filter의 선택적 여과능에 의해서도 크게 영향을 받으며, 공간의 부피, 환기량, 가구, 상대습도, 온도 그리고 기류속도 등과 같은 실내의 환경에 의해서도 달라진다(Baker and Robinson, 1990). 또한 ETS 구성 성분들은 ETS가 숙성되는 동안에 ETS 성분 단독 그리고 실내의 공기 성분들과 화학반응이 일어나고 ETS 입자들의 응축과 축적이 일어나기도 한다(Baker

and Proctor, 1990). 현재의 ETS에 대한 연구들은 주요 구성 성분에 대한 감소율과 반감기의 결정, 분포비율, 온도와 습도의 영향, 관능적 변화양상 등과 특히 ETS 연구의 실용적인 방안인 건축 구조물에 따른 효과적인 환기량 조절에 대한 경제적인 방안 등을 제시할 연구를 수행하고 있다(Nelson 등, 1993).

흡연에 의해 실내공기중의 ETS 농도가 변화하는 중요 인자로는 1) 흡연자의 수, 2) 흡연담배의 품질수준, 3) 실내 면적, 4) 실내로 유입 또는 배

* 연락처자 : 305-345, 대전광역시 유성구 신성동 302번지 한국인삼연초연구원

* Corresponding author : Korea Ginseng & Tobacco Research Institute, 302 Shing Seong-Dong, Yusong Ku, Taejon 305-345, Korea

출되는 공기의 양, 5) 실내 벽의 소재, 6) 실내의 온도 및 습도, 7) 실내공기의 분산효율 등이 있으며(Kent, 1977), 실내공기중의 ETS를 제거하는 방법에는 1) ETS 발생원의 제어 및 대체, 2) 깨끗한 공기로 오염된 공기를 희석, 3) 오염된 공기를 배출하는 국소배기, 및 4) 청정기술을 이용한 공간내 공기중의 ETS 물질을 제거하는 공기청정 등이 있다(김, 1995). 이와같은 실내공기 청정기술 중에 환기에 의한 방법은 실내공기 오염물질의 감소에 대한 방법 중 가장 일반적인 것으로, 미국에서는 건물 내 환기 시설이 총 에너지 소비의 반 이상을 차지하는 것으로 조사되었으며 환기 기준에 대해서는 각 관리 관련 기관별로 관리되고 있다. Sehmer(1987)는 실내공기의 청정을 위해서 비흡연실은 $0.14 \text{ m}^3/\text{min}$, 흡연실은 $0.556 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 환기량을 제시한바 있으며, 미국 냉난방공조학회에서 1989년도에 제시한 실내공간 유형별 필요 외부공기량의 기준은 식당 $36 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{인}$, 사무실 $36 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{인}$, 흡연실 $144 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{인}$ 이었다(Janssen, 1989). 흡연강도에 따른 실내공간의 환기량 산출은 미국 RJR ETS 연구팀이 1992년에 제시한 바 있는데 흡연자와 실내공간이 증가할수록 환기량도 증가하며 5명의 흡연자를 위한 2명 규모의 흡연실은 $540 \text{ m}^3/\text{hr}$ 의 환기량을 제시할 반면 10명을 위한 4.2명의 흡연실은 $756 \text{ m}^3/\text{hr}$ 의 환기량이 필요하다고 제시하고 있다. 이와같은 환기량의 제시는 실내공기를 신선한 외부공기로 교체시켜 오염물질의 상대적 농도를 감소시키는 것으로 이러한 목적을 위해서 국소배기를 사용할 수도 있으며 외부공기의 질적수준과 공조환기 설비가 공기질 오염의 또 다른 중요인자로 밝혀지고 있어 이러한 모든 것을 종합한 실내공기의 오염도 평가를 할 수 있는 기술이 필요하다고 생각된다.

본 연구는 Sehmer(1987)가 제시한 흡연실 환기량인 $0.556 \text{ m}^3/\text{min}$ 정도를 중간값으로하여 환기량을 다소 많고 적게 조절하면서 실내공간에서 환기량 변화에 따른 기체상, 증기상 및 입자상의 ETS 구성 성분의 함량과 분포변화를 조사하여, 흡연으로 인해서 야기되는 실내공기 오염에 대해 적절한 환기조건을 제시하므로서 흡연자의 흡연

관리와 비흡연자의 혐연권 주장에 대한 능동적 대응방안을 제시하고자 실시하였다.

재료 및 방법

본 실험은 실질 실내공간에서 이루어졌는데 이 공간의 면적은 $3\text{m} \times 3\text{m} \times 2.7\text{m} = 24.3\text{m}^3$ 이었고, 실내온도는 $21-22^\circ\text{C}$, 실내습도는 60-65 %RH 범위에 있었으며, 환기를 실시하지 않은 실내의 기류속도는 $0.00-0.03\text{m}/\text{s}$ 범위에서 측정되었다. 환기량의 조절은 한일 환풍기 EKS-250AT에 전압조정기를 이용하여 흡입구와 배기구의 풍량을 각각 $0.445\text{m}^3/\text{min}$ (Low), $0.528\text{m}^3/\text{min}$ (Mid), 및 $0.625\text{m}^3/\text{min}$ (High)의 3단계로 하였으며, 풍량은 Pacer Industries의 풍속계(Model DA40V)로 확인하였다. ETS의 발생은 실험용 담배인 CORESTA monitor cigarette CM2 10개피를 자연 연소시켜 발생하는 부류연을 이용하였으며 측정기기 및 환풍기의 설치 상황은 다음 그림 1과 같았다. 완전 밀폐의 경우를 대조구(Control)로하여, 각각의 환기량에서 3회 반복 실시하여, 허용오차 5%내의 실험값만을 선별하여 평균값을 구하였다.

실험공간내의 CO, CO₂ 및 TSP 함량은 일본 Kanomax사의 Auto building set (Model No. 2111)를 이용하여 ETS 발생 후 매 30분마다 측정하였으며, ETS 증기상 성분인 니코틴과 3-EP의 분석은 Amberlite XAD-4 resin tube를 사용하여 매 1시간 간격으로 증기상 성분을 포집한후 tube에 흡착된 증기상 성분을 0.01% triethylamine이 함유된 ethylacetate 용액 1ml로 ultrasonic bath에서 30분간 추출하였다. 추출된 시료에 quinoline을 내표준물질로 시료당 5ug을 첨가하여 DB-5(30m x 0.53 mm ID, fused silica capillary coated with 1.5ug of 5% phenylmethylpolysiloxane) column을 이용하여, 주입구 온도는 220°C , 오븐온도는 170°C 등온으로 하였으며, 감지기는 220°C , Nitrogen phosphorous detector를 사용하여 분석하였다.

입자상 성분중 UVPM과 FPM의 분석은 ASTM의 방법에 따라 cyclone seperator를 사용하여 37mm milipore filter(fluoropore membrane filter, pore size 1.0ul)에 매 1시간마다 포집한후 메탄올

로 추출하고 추출물을 325nm과 420nm의 흡수파장 영역에서 ultraviolet detector를 갖춘 columnless HPLC로 흡광도를 측정하여 분석하였으며 solanesol은 15cm x 4.6mm ID Deltabonded ODS HPLC column을 사용하였고, 이동사으로는 Acetonitrile : Methanol = 95 : 5, v/v 혼합용액을 사용하였으며 감지기는 205nm UV detector를 사용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

담배연기는 휘발성 성분과 비휘발성 성분을 함유한 가스상 내에 수천 개의 유기 및 무기화합물이 분산된 형태로 존재하고 있다. 이들 성분중 담배가 연소시 생성되는 주요 기체상 성분인 이산화탄소 및 일산화탄소의 시간경과에 따른 변화를 보면 그림 2 및 그림 3와 같다. 환기량이 증가할수록 이들 기체상 성분의 제거율도 증가하는 것을 알 수 있으며, 시간경과에 따른 제거율은 이산화탄소가 일산화탄소에 비하여 다소 높은 경향을 보이고 있다. 이산화탄소의 경우 0.625 m³/min의 환기량에서는 1시간, 0.528 및 0.445 m³/min의 환기량에서는 90분 경과시 처음 발생된 농도의 99%가 감소하는 반면, 일산화탄소는 같은 환기량에서 30분정도 시간이 더 소요되는 것을 알 수 있다. 실내공기중의 일산화탄소는 사람의 혈중 헤모글로빈과 밀접한 관련이 있는 실내 오염물질로 분류되고 있으며, 담배연소시 최고 20,000ppm 까지 발생되며 흡연실 공기 중에는 400-500ppm

이 존재하는 것으로 알려져 있는데(Hueter 등, 1972), 실내공간에 존재하는 일산화탄소가 이산화탄소보다 환기에 의해 제거되는 비율이 다소 낮은 것은 일산화탄소가 실내공간에서 좀더 안정된 상태로 존재하기 때문으로 생각된다. ETS 가스상성분을 효과적으로 제거하기 위해서는 0.528 m³/min 이상의 환기량으로 1시간 정도의 시간이 소요되며 그 이하의 환기량으로는 2시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 대조구에 비하여 환기량 증가에 따른 이들 가스성분의 감소 효율이 월등히 높은 것으로 볼 때 환풍기를 이용한 환기 system은 ETS의 가스성분인 일산화탄소 및 이산화탄소의 제거에 매우 효과적이라는 결론을 얻을 수 있다.

담배연기의 증기상 성분중 대표적인 것으로는 암모니아, 니코틴, pyridine, 3-EP 및 myosmine 등이며 특히 니코틴은 ETS의 독특한 성분으로서, 어떤 흡연공간에서도 감지할 수 있을 정도로 충분한 양으로 존재하고 있다(Delbert 등, 1989). 한편 3-EP는 700℃에서 열분해하여 3-acetylpyridine을 형성하고, 열분해되는 ethenylpyridines과 vinylpyridines의 치환위치에 따라서 quinoline과

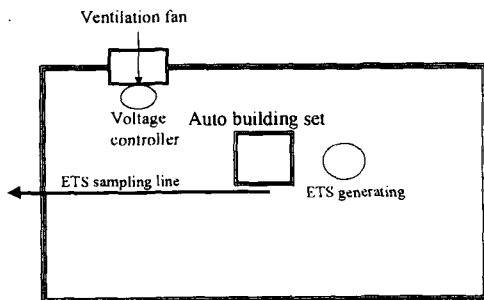


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental laboratory

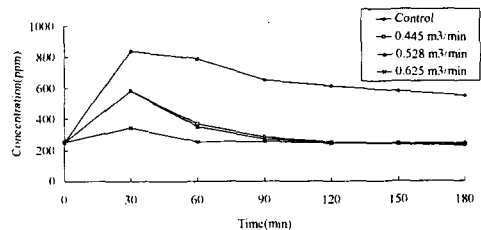


Fig. 2. Changes of carbon dioxide concentration by ventilation

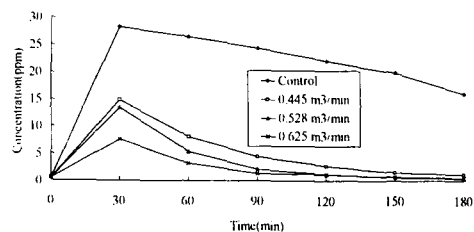


Fig. 3. Changes of carbon monoxide concentration by ventilation

밀폐된 공간에서 환기에 의한 ETS 성분 제거

Table 1. Change of nicotine and 3-ethenylpyridine contents by ventilation

Time (min)	Nicotine(ug/m ³)				3-ethenylpyridine(ug/m ³)			
	Control	Low	Mid	High	Control	Low	Mid	High
30	421	374	295	264	254	197	178	174
60	122	107	72	26	90	72	42	10
90	69	52	29	17	75	28	17	7
120	61	33	18	8	49	18	7	4
150	57	25	14	7	36	9	6	2
180	44	23	13	6	33	8	5	2

iso-quinoline의 생성비율이 결정되는 것으로 알려져 있는데(Kaburaki 등, 1970), 환기량 변화에 따른 이들 니코틴 및 3-EP의 함량변화를 조사하여 표 1에 나타내었다. 환기량이 증가할수록 대조구에 비하여 시간경과에 따른 니코틴과 3-EP의 함량이 모두 감소되었으며, 환기량 차이에 의해 시간경과에 따라 다소 상이한 감소 경향을 보이고 있었다. 담배연소로 인하여 발생된 니코틴 및 3-EP를 90%이상 제거하기 위해서는 0.445 m³/min의 환기량에서는 2시간, 0.528 m³/min의 환기량에서는 1시간 30분, 그리고 0.625 m³/min의 환기량에서는 1시간이 소요되는 것으로 나타나고 있다. 대조구에서도 시간경과에 따른 니코틴의 제거율이 상당히 높은 것으로 나타나고 있는데 이러한 결과는 담배연기에 존재하는 니코틴은 흡착이나 화학적 반응에 의하여 다른 성분들보다

빨리 공기 중으로부터 감소하며(Eudy, 1985), 니코틴의 상대적인 반감기가 다른 성분에 비하여 짧은 것에 기인하는 것으로 생각되고, 니코틴의 표면 친화력이 다른 성분에 비하여 크기 때문에 실내의 벽이나 시설물에 쉽게 흡착되어 일어나는 현상으로 추정된다. 담배의 연소에 의해 발생된 증기상 성분의 90% 이상을 제거하기 위해서는 0.625 m³/min의 환기량으로 1시간이상의 환기가 필요하며, 0.445 m³/min의 환기량으로는 2시간 이상이 소요되는 것으로 조사되었다. 증기상 성분의 제거율이 가스상 성분보다 낮은 것은 이들 성분이 실내의 표면에 흡착하는 성질이 더 큰 것에 기인하는 것으로 사료되며, 같은 제거효율을 얻기 위해서는 환기량을 늘리거나 활성탄과 같은 흡착제를 함께 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

Table 2. Change of TSP and solanesol contents by ventilation

Time (min)	TSP(cpm)				Solanesol (ug/m ³)			
	Control	Low	Mid	High	Control	Low	Mid	High
30	3,675	2,218	1,190	725	25.4	6.9	4.5	2.9
60	3,589	1,025	390	106	23.9	4.4	1.5	1.7
90	3,319	486	123	96	22.3	2.0	0.5	0.7
120	3,005	230	45	32	21.1	1.0	nd	0.4
150	2,691	111	21	21	18.4	0.4	nd	nd
180	2,394	57	14	15	16.3	nd	nd	nd

nd : Not detected

ETS의 입자상 성분은 실내공기의 중요 오염원중의 하나이며, 호흡기 질환과의 상관성이 높기 때문에 실내공기의 질적 수준의 척도가 되고 있기도 하는데, 우리나라에서도 이러한 부유물질에 대해서 실내 위생관리기준에 의하여 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 규제하고 있다. 환기량 변화에 따른 입자상성분인 TSP 및 solanesol 함량변화는 표 2와 같았다. 시간경과에 따른 TSP의 감소는 환기량 증가에 따라 현저하게 증가하는 것으로 나타나고 있다. $0.528 \text{ m}^3/\text{min}$ 이상의 환기량에서는 환풍기 작동 1시간 경과시 담배연소로 인하여 발생된 TSP의 98% 이상이 제거되는 것으로 나타났으며, $0.445 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 환기량에서는 2시간 이상 경과시 같은 제거 효과를 보이고 있었다. Solanesol은 담배연기중의 대표적인 고체상 물질로 ETS중 TSP의 2 - 3%를 차지하고 있으며 (Ogden and Maiolo, 1989), 실내공기중 담배연기 입자상 물질로서의 감도 및 명확성 등으로 인하여 ETS marker로 많이 사용되고 있는데, 특히 solanesol/ TSP의 비율은 ETS와 비ETS 성분중의 TSP를 결정하는 중요한 인자로 많이 사용되고 있다(Ogden and Maiolo, 1989). Solanesol 역시 환기량이 증가할수록 함량의 감소율이 증가하는 경향이었으며 $0.528 \text{ m}^3/\text{min}$ 이상의 환기량에서 1시간 경과시 초기 발생농도의 95% 정도가 제거되며, 2시간 경과시 99%가 제거되는 것으로 조사되었다. 환기에 의한 이러한 감소효과는 이들 입자상 성분들이 실내의 공기중에 부유물로 존재하며 배기 공기와 함께 외부로 쉽게 배출되기 때문으로 생각되며, 증기상 성분인 니코틴 및 3-EP

보다 제거효율이 높은 것을 고려할 때 이들 입자상성분의 제거를 위해서는 환풍기를 이용한 환기 system이 매우 효과적인 방법이라고 생각된다.

실내공간의 입자상 물질인 TSP는 그 근원이 매우 다양하고 분석의 불명확성 등으로 인하여 ETS의 지표성분으로는 부적합하다고 주장이 있으며, 따라서 담배연기에만 존재하는 입자상 물질을 분석하기 위하여 사용하는 것이 UVPM과 FPM이다. ETS의 입자상 성분인 UVPM, 및 FPM의 환기량 변화에 따른 함량변화를 조사하여 표 3에 나타내었다. UVPM의 경우 같은 시간경과에 따른 TSP나 solanesol의 감소율보다 다소 느린 것으로 조사되었다. 담배 연소에 의해 발생된 초기농도의 95%이상을 제거하기 위해서는 $0.528 \text{ m}^3/\text{min}$ 이상의 환기량으로 90분 이상의 시간이 필요한 것을 알 수 있으며, $0.445 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 환기량에서는 3시간이 소요되는 것으로 조사되었다. FPM 함량 변화 역시 대조구에 비하여 환기량이 증가할수록 제거율이 증가하는 경향이었으며 시간경과에 따른 초기 감소율이 UVPM에 비하여 다소 높은 반면, 최종 감소율은 다소 낮은 것으로 나타났다. 담배연소로 인하여 발생된 ETS FPM의 제거를 위해서는 $0.528 \text{ m}^3/\text{min}$ 이상의 환기량에서는 1시간, $0.445 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 환기량에서는 2시간 이상이 소요되었다. 환기에 의한 이들 ETS 입자상 성분의 감소효과 차이는 이들 입자상 성분의 대부분이 실내공기중에 부유물질로 존재하나 UVPM 이나 FPM의 일부성분은 실내공간에 안정적이면서 분해되거나 제거되지 않는 형태로 존재하기 때문으로 생각되며, 또한 실내표면

Table 3. Change of UVPM and FPM contents by ventilation

Time (min)	UVPM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				FPM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	Control	Low	Mid	High	Control	Low	Mid	High
30	1,205	649	467	265	1,737	728	544	420
60	938	567	189	97	1,474	615	316	282
90	817	269	88	81	1,060	461	216	219
120	615	163	28	60	746	286	172	191
150	551	63	16	9	479	209	169	183
180	359	38	13	8	294	197	164	172

과의 흡착 정도에도 기인하는 것으로 사료된다. 본 실험결과 Sehmer(1987)가 제시한 흡연실의 환기량 $0.556 \text{ m}^3/\text{min}$ 은 ETS 성분의 제거에 효과가 있으며, 흡연자의 흡연공간을 확보하기 위해서는 환기에 의한 실내공간의 ETS 성분 제거 특성뿐만 아니라 유입공기의 질적 수준 및 환풍시설에 의한 자체 오염 등을 고려한 종합적인 실내공기 오염도 평가가 수반되어야 할 것으로 생각된다.

결 론

실내공간에서 환기량 변화에 따른 ETS 성분의 함량변화를 조사하므로써 배기환풍기에 의한 환기system의 효과를 검증하고 오염된 실내공간의 질적 수준을 개선하는데 사용할 수 있는지를 확인하기 위하여 본 실험을 실시하였다. ETS의 기체상 성분인 이산화탄소와 일산화탄소는 환기량이 증가할수록 현저하게 감소하는 경향을 보이고 있으며 $0.528 \text{ m}^3/\text{min}$ 이상의 환기량에서 1시간 경과시 초기 농도의 99%가 제거되었다. 증기상 성분인 니코틴과 3-EP는 환기량에 따라 감소효과에 차이가 있었으며 니코틴 및 3-EP를 90% 이상 제거하기 위해서는 $0.625 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 환기량으로 1시간 이상이 소요되는 것으로 나타나고 있다. 입자상 성분인 TSP, solanesol, UVP, FPM도 환기량 증가에 따라 현저하게 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 같은 환기량 및 시간경과에서 TSP 및 solanesol의 감소율이 UVP 및 FPM의 감소율보다 높은 것으로 조사되었다. ETS 입자상 성분중 UVP 및 FPM의 95% 이상의 제거를 위해서는 $0.528 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 환기량으로 2시간이 소요되는 반면 TSP 및 solanesol의 제거를 위해서는 1시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 본 실험의 결과 환기에 의해 ETS의 모든 성분이 효과적으로 제거되는 것을 확인하였으며, 특히 가스상 성분인 일산화탄소 및 이산화탄소와, 입자상 성분인 TSP 및 solanesol의 제거에 매우 효과가 있음을 알 수 있었고, $0.528 \text{ m}^3/\text{min}$ 이상의 환기량에서 1시간 경과시 담배연소에 의해 실내에 발생된 ETS의 90% 이상을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 김윤신 (1995) 실내환경과학, 대우학술총서, 자연과학 95, 민음사.
- Baker, R. R. and D. P. Robinson (1990) Tobacco combustion; The last ten years, *Recent Advances in Tobacco Science*, 16; 3-71.
- Baker, R. R. and C.J. Proctor (1990) The origins and properties of environmental tobacco smoke. *Environ. Int.*, 16(3); 231-246.
- Delbert, J. E., C. L. Benner, J. M. Bayona, G. Rucgards, J. D. Lamb, M. L. Lee, E. Lewis, and L. D. Hansen (1970) Chemical composition of environmental tobacco smoke. 1. Gas-phase acids and bases. *Environ. Sci. Technol.* 23(6); 679-687.
- Eudy, M.W., F. A. Thome, D. L. Heavner, C. R. Green, B. J. Ingebretsen (1985) Presented at the 39th tobacco chemists' research conference, Montreal, Canada, 2-5.
- Hueter, F. G., H. W. Goerke, A. Muezzinoglu, A. Liberti, J. Ternisien (1972) Air pollution: Air quality criteria for carbon monoxide. North atlantic treaty organization, committee on the challenges of modern society, Brussels, Belgium, 265.
- Janssen, J. E. (1989) Ventilation for acceptable indoor air quality, ANSI/ASHRAE 62-1989.
- Kaburaki, Y., S. Surawara, U. Kobashi, and Y. Doihara (1970) Composition of tobacco smoke. Part XIV. Formation of pyridines in pyrolysis of nicotine. *Nogyo Denka*, 44(5); 224-231.
- Kent, D.C. (1977) Filtration and ventilation of tobacco smoke, Health consequences, education, cessation activities, and governmental action, 2. Proceedings of third world conference on smoking and health, NY, 357-361.
- Nelson, P. R., S. B. Sears, and D. L. Heavner (1993) Application of methods for evaluating air cleaner performance. *Indoor Envir-*

onment, 2; 111-117.

Ogden, M. W., K. C. Maiolo (1989) Collection and determination of solanesol as a tracer of environmental tobacco smoke in indoor air.

Environ. Sci. Tech. 23(9); 1148-1154.

Sehmer, J. M. (1987) Tobacco smoke and air quality, *J of Occupational Medicine* 29(8); 637.