

바이오에어로졸의 노출 및 인체 위해성 평가

고광표 | 서울대학교 환경보건학과 조교수
gko@snu.ac.kr

1. 서론

현대인들이 90%이상의 시간을 실내에서 거주하면서 주거환경이나 작업환경에서 생물학적 병원체의 노출에 의해 감염성 질환, 알레르기, 암 등의 질병을 유발하면서 바이오에어로졸에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 건물 내의 부적절한 난방, 환기, 환경조건 등에 의해 바이오에어로졸의 노출가능성은 많아지고 있다.

대기 자체는 미생물이 성장할 수 있는 환경은 아니며 대기 중에 있는 대부분의 미생물은 토양, 식물, 동물, 사람을 통해서 방출된 것이다. 바이오에어로졸(bioaerosol)은 식물, 동물, 미생물 등에서부터 발생한 에어로졸이나 미세먼지를 의미하며¹⁾ 살아 있거나 죽은 박테리아와 곰팡이, 바이러스, 알레르

겐, endotoxin, peptidoglycan, β -glucan 등의 다양한 종류로 구성되어 있다. 일반적으로 바이오에어로졸은 입자의 크기에 의해 분류되는데 0.02~100 μ m에 해당하며 그림 1과 같다. 0.1 μ m보다 작은 입자는 nuclei mode(핵모드 입자), 0.1~2 μ m에 해당하는 입자는 accumulation mode(축적모드 입자), 2 μ m 이상의 입자는 coarse mode(조립모드 입자)로 구분된다.²⁾

사람은 일생동안 50억 리터 정도의 공기를 들이 마시는데 그 안에는 미생물을 포함하고 있는 먼지가 많이 포함되어 있다. 사람의 호흡기도는 그림 2와 같으며 상부호흡기도, 하부호흡기도로 나누어져 있다.³⁾

상부호흡기도는 코, 입, 목이며, 하부호흡기도는 기관지, 폐로 구성되어 있다. 호흡기를 통과하는 공

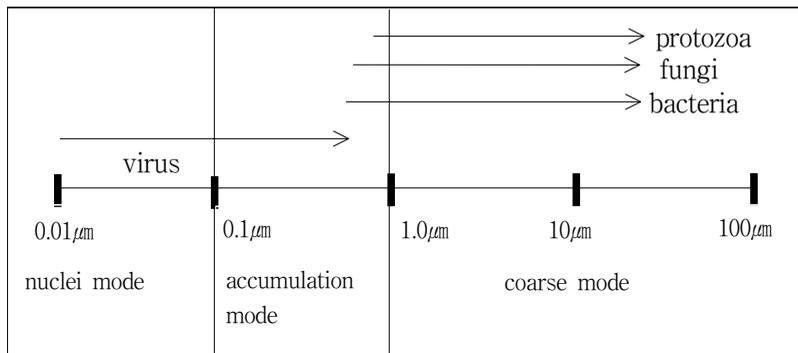


그림 1. 바이오에어로졸의 상대적인 크기 (Maier, R. M., et. al.)

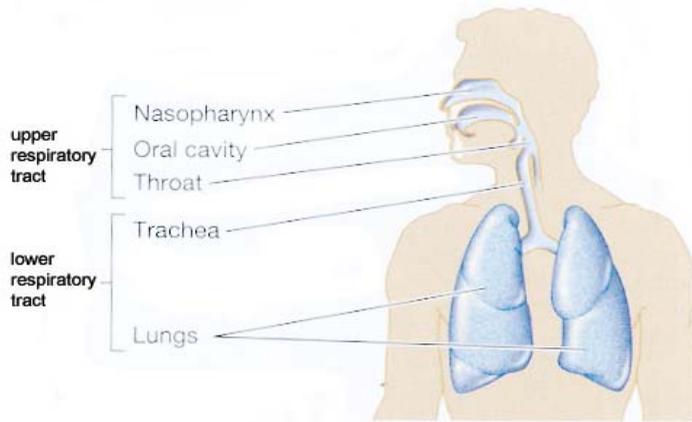


그림 2. 인체 호흡기도의 모형 (Madigan, M. T., et. al.)

기의 속도는 다양하며, 하부 호흡기에서의 속도는 느리다. 공기의 이동속도가 느려지면, 입자는 움직임을 멈추고 정착한다. 입자가 클수록 먼저 가라앉게 되고 $3\mu\text{m}$ 보다 작은 입자는 하부 호흡기의 기관지까지 침투한다. 일반적으로 병원성을 띄고 있는 입자는 $3\mu\text{m}$ 보다 작아서 서로 다른 속도로 호흡기도에 가라앉게 된다.³⁾

그러나 인체에 미치는 바이오에어로졸의 인체위해성에도 불구하고, 노출정도 및 인체위해성과의 정량적 및 정성적 연관성 등은 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 또한 학교, 사무실, 주거 공간 내 바이오에어로졸의 기준이 정해져 있지 않은 상황이다.

2. 바이오에어로졸의 종류

(1) 바이러스

바이러스는 그 자체로는 생존할 수 없고 살아있는 숙주를 필요로 한다. 호흡기를 감염시키며 부적절한 환기가 이루어지고 있는 복잡한 실내에서 사람들을 통해서 퍼져나간다.⁴⁾ 바이러스는 호흡기, 코의 점막, 눈의 결막 등을 통해서 인체에 들어가게

된다.⁵⁾

(2) 세균

바이러스와 다르게 세균은 습기가 있으면, 건축 자재 등에서 증식할 수 있다. 박테리아는 감염성 질환의 주된 요인으로 알려져 있으며, 감염성질환 뿐만 아니라 exotoxin과 endotoxin 등을 배출하기도 한다. 그람음성 박테리아는 환기가 잘 되지 않고, 청결하지 못한 건물 내에 많이 존재한다. 일반적으로 정체되어있는 물이 그람음성박테리아에 오염되며 악취가 나고 에어로졸상태로 된다.⁴⁾ 그람음성박테리아의 lipopolysaccharides(LPS)로 구성된 endotoxin은 세포의 성장기에 세포막을 파괴시키는 독성을 지니고 있다.⁶⁾

(3) 내독소 (endotoxin)

내독소(endotoxin)는 그람음성박테리아의 세포 벽을 이루고 있으며, lipopolysaccharides (LPS)의 화학적 조성으로 구성되어 있다. 그러므로 polysaccharide와 lipid를 모두 갖고 있어서 양친매성을 띤다.⁷⁾ LPS의 지질부분인 lipid A가 독성을

갖고 있다. 흡입에 의한 노출은 애완동물, 가습기 등을 통해서 실내에서 쉽게 이루어진다. 내독소에 노출되었을 때 초기에는 호흡곤란과 함께 감기와 유사한 증상을 나타낸다. 독성은 매우 강하여 열, 불안감, 백혈구수치 변화, 호흡기질환, 쇼크 등을 유발하며 면역체계에 영향을 준다.⁵⁾

(4) 곰팡이 (fungi)

곰팡이는 polysaccharide, 단백질, 인 등으로 구성되어 있는 세포벽을 갖고 있으며 포자를 만든다. 포자는 공기를 통해 건물 내로 유입되고 환기시스템을 거쳐 이동한다. 그러므로 환기시스템 내에서 증식한 곰팡이의 포자는 sick building syndrome 등의 주된 요인으로 밝혀지고 있다. 또한 실내에서 곰팡이는 지하실, 창문 아래와 같이 습한 곳에 많이 생기며 포자는 공기의 흐름과 사람의 행동에 영향을 받는다.

Aflatoxin, ochratoxin, sterigmatocystin을 포함한 mycotoxin을 생산하여 독성을 나타낸다.⁷⁾ Mycotoxin은 곰팡이의 대사과정으로 생산된 부산물

로 세포를 파괴하고 세포의 생성과정을 방해한다.⁵⁾

(5) 다른 indoor allergen

Indoor allergen은 알레르기반응을 일으키는 생물학적, 화학적 요인으로 50세 이하의 어른들에게 천식을 유발시키는 주원인이다.

Allergy는 allergen에 노출되어 면역학적으로 과민한 상태를 의미하며, immunoglobulin E(IgE) 항체와 같은 면역체계의 구성물질이 과잉 생산될 때 발생한다. Allergen에 반응하는 면역체계는 항체와 비만세포로 나눌 수 있다. 항체는 immunoglobulin E(IgE)의 단백질이며 비만세포는 IgE의 수용체로 histamine을 방출한다.

면역반응의 단계는 그림 3과 같으며 초기단계(sensitization)에서 면역적으로 약한 사람은 allergen을 항원으로 인식하게 된다. 이 항원에 대하여 항체인 IgE를 만들게 되고 antigen-IgE(항원-항체)는 비만세포에 결합되면서 sensitization 단계가 마무리된다. 이 때, allergen에 다시 노출되면 비만세포와 결합되어 있던 IgE는 antigen과 결합하면서

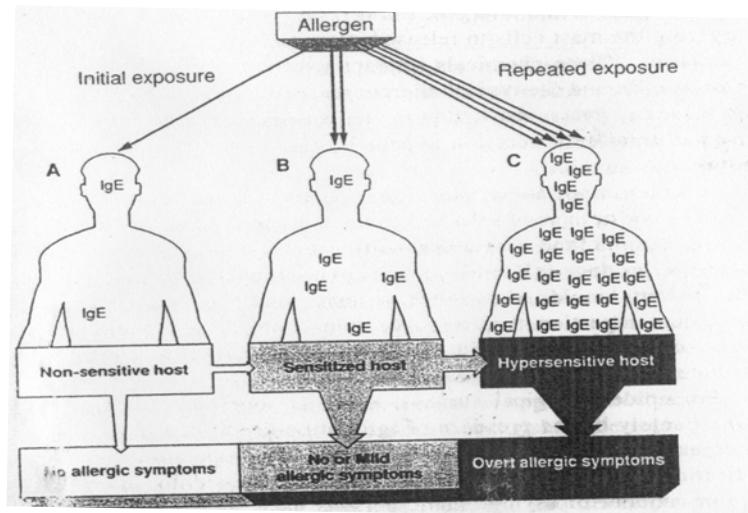


그림 3. 과민성반응과 IgE 알레르기반응 (Pope, A. M., et. al.)

histamine을 방출한다. histamine이 세포와 반응하면 염증이 생기면서 알레르기 반응이 일어나게 된다.⁸⁾

Allergen은 먼지진드기, 곰팡이, 애완동물 등이 있다. 먼지 진드기는 사람이나 동물의 죽은 피부 조각으로 주로 침대나 거실의 카펫, 가구 등에서 많이 존재한다. 먼지진드기의 주된 allergen은 *Der p I*, *Der f1* 등으로 먼지내에 10 μ g/g 이상이 있을 경우 진드기에 예민해 질 수 있다.

고양이의 주된 allergen은 *Fel d I*으로 모든 고양이에서 발견된다. 보통 *Fel d I*을 포함하고 있는 입자의 크기는 2.5 μ m보다 작기 때문에 공기중에 오랫동안 bioaerosol의 상태로 존재하며 폐 내부까지 깊숙히 들어갈 수 있다.

개의 주된 allergen은 *Can f1*으로 고양이보다는 질병이 유행하지는 않으나 침에서 분비되며 개의 털을 빗으로 빗겨줄 때 발생한다.

이외에도 바퀴벌레 allergen은 벌레의 일부분으로 알레르기성 비염과 천식을 유발한다.⁸⁾

3. 바이오에어로졸의 인체위해성

바이오에어로졸은 감염성질환, 내독소 등의 독성 관련 질환, 과민성질환 등의 매우 다양한 인체위해성을 나타낸다. 이러한 질환의 종류 들 중의 대표적인 예는 아래와 같다.

3.1. 감염성 질환

3.1.1. 감기, influenza

감기는 rhinovirus에 감염되어 나타는 증상으로 기침, 목아픔 등의 증상을 나타내며 influenza는 orthomyxovirus에 의해 나타나며 상부호흡기관인 코, 입, 인두, 후두의 점막을 감염시키고 폐를 손상시킨다. 증상은 3일~7일간의 낮은 발열, 오한, 피로, 두통이 나타나며 회복은 빠른 편이다. 그러나 유아나 노인들은 폐렴으로 진행될 수 있다.⁵⁾

3.1.2. 결핵

결핵은 *Mycobacterium tuberculosis*에 의해 발생하는 질병으로 사람들 간의 접촉으로 옮겨진다. 하부호흡기도가 감염되는 폐질환이지만, 간, 뼈, 림프에도 영향을 준다. 초기 단계에는 전염성을 갖고 있지 않으나 박테리아가 증식하기 시작하면 기침, 짧은 호흡, 체중감소, 열 등의 증상이 나타난다. 심해지면 폐의 세포를 손상시키고 혈액을 통해서 인체로 퍼지게 된다. 면역이 약한 어린이들은 결핵에 가장 예민하다.⁵⁾

3.1.3. Legionnaire's disease

레지오넬라병은 흔히 냉방병이라고도 불리운다. *Legionella pneumophila*에 의해 발병되며, 주로 감기와 유사한 증상을 보인다. 레지오넬라 박테리아는 자연에 많이 존재하며 인위적으로 만든 water system에도 많다. 레지오넬라병은 사무실 내의 에어컨이나 냉각탑이 미생물에 의해 오염되었을 경우에 발생한다.⁵⁾

3.2. Inhalation fever

3.2.1. humidifier fever

humidifier fever는 influenza와 유사한 증상을 나타내는 질환으로 미생물로 오염된 가습기나 에어컨으로부터 발생하는 에어로졸에 노출된 후 4~12시간이 지나서 증상이 나타난다.

3.3. 과민성 질환

과민성 질환은 면역적 반응을 자극하는 항원에 의한 질병으로 곰팡이에 의해 발생된다. 동일한 곰팡이에 계속 노출되었을 경우 알레르기 증상을 초래한다. 과민성질환에 한번 걸리면, 작은 양의 오염물질에도 강한 반응을 나타낸다.

과민성 폐렴은 열, 기침과 함께 호흡이 짧아지는 만성적인 폐질환이다. 기침이 계속되면 호흡성 바

이오에어로졸에 민감한 사람들에게 많이 나타나는 질환으로 IgG(antigen-specific immunoglobulin), 기관지폐포세척액 내의 T림프구 증가 등과 관련이 있으며 천식과 함께 나타난다.⁵⁾

3.4. 알레르기성 질환

알레르기성 질환의 발달단계는 그림 4와 같다. 유전적으로 병의 요인을 갖고 있거나 민감한 사람이 allergen에 노출되면 면역적으로 예민해진다. 이 단계에서는 사람에게 자극 증상이 없지만 계속적으로 노출되면 알레르기성 질환을 유발하게 된다. 이때 담배와 같은 비알레르기성 물질에 노출되면 호흡기도를 자극하여 알레르기성 반응이나 질환으로 발전할 수 있다.⁹⁾

알레르기성 질환은 천식, 피부질환, 알레르기성 비염 등이 있다. 알레르기성 비염은 사람이 가장 걸리기 쉬운 만성질환이며, 천식은 미국 시민의 8 ~ 12%에 해당하는 사람이 갖고 있다.

3.4.1. 알레르기성 천식

천식은 폐질환으로 기도가 막히거나, 기도에 염증이 발생하거나, 많은 자극에 의해 기도의 반응성이 증가하는 경우에 해당한다. endotoxin은 기도의 호

름을 더욱 방해하고 염증을 악화시키며 endotoxin과 먼지진드기에 예민한 사람은 천식에 걸리기 쉽다.¹⁰⁾

천식이 있는 사람은 호흡이 짧고 숨을 헐떡거리고, 재채기를 하게 된다. 높은 농도의 endotoxin에 노출되면 숨을 헐떡이는 증상이 증가한다.

3.4.2. 알레르기성 비염

알레르기성 비염은 주로 공기역학적 직경이 5~10 μ m의 입자들이 상부호흡기도에 침착되면서 코의 점막에 염증이 생기는 질병이다.¹¹⁾ IgE에 의해 염증이 생기고 histamine이 방출되어 재채기를 하게 되며 콧물, 충혈 등의 증상이 나타난다.

3.4.3. 아토피질환

아토피질환은 IgE와 질환의 가족력과 관련이 있다. 대표적인 증상은 가려움으로 계속적으로 긁게 된다. 아토피 환자의 60%는 1살 이전에, 30%는 1세에서 5세, 10%는 6세에서 20세에 발병하며 나이에 따라 다양하게 나타난다. 아토피가 발병되면, 환자의 58%는 15년 이상 지속되고, 대부분 60세 정도에 낫는다.¹¹⁾

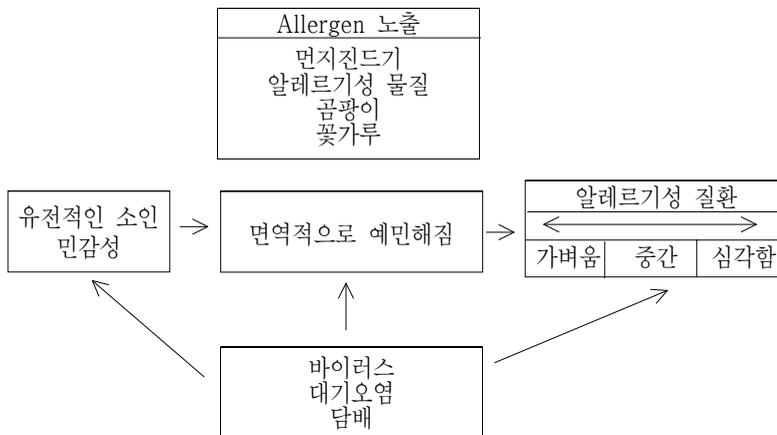


그림 4. 알레르기성 질환의 발달단계 (Pope, A. M., et. al.)

4. 노출 및 위해성 평가

노출평가는 오염물질과 오염원, 환경노출 매질, 인체의 노출경로 등을 포함하며 그림 5와 같다.

위해성 평가는 노출과 오염원, 영향 등의 관계를 평가하는 것이다. 일반적으로 위해성 평가는 1) 유해성확인 2)노출평가 3) 용량-반응평가 4) 위해도 결정, 네 단계로 이루어져 있다. 유해성확인 단계는 노출된 사람의 수, 환경 중의 배경농도, 건강에 미치는 영향, 노출 수준 등을 통해 오염물질이 인체에 유해한 영향을 미치는지를 결정하는 단계이다. 노출평가 단계는 실제 환경에서 노출된 정도를 알아보는 단계이며, 환경 중미생물의 농도, 노출빈도, 숙주의 생물학적 요인(체중, 오염원의 흡수능력, 병원성에 대한 면역력)을 고려해야 한다.²⁾

노출된 양에 따라 용량-반응 평가를 한다. 용량-반응 평가는 노출에 의해 나타나는 독성의 관계를 정량적으로 나타내는 것이다. 마지막으로 위해도 결정은 노출된 용량과 반응의 관계를 통해 미생물의 잠재적인 영향을 평가하는 것이다.⁹⁾

5. 결론

바이오에어로졸이 인체에 미치는 영향은 매우 심각하며, 오염원의 종류는 매우 다양하다. 그러므로 이러한 오염원에 대한 인식과 함께 바이오에어로졸을 관리하는 것이 필요하다.

외기의 미생물은 습한 토양, 나뭇잎의 표면 등에 존재하며 실내에 있는 미생물들은 이러한 외기로부터 건물 내로 들어온 것이다. 이러한 미생물들은 습도, 온도, 영양분 등 여러 가지 요인에 의해 성장한다. 특히 이러한 요인들은 사람이 살아가는 데도 필요한 중요하기 때문에 미생물이 성장하는 것을 예방하는 것은 어려운 일이다.^{5,9)}

습도는 미생물의 성장을 조절할 수 있는 가장 중요한 요인으로 실내에 물이 오랫동안 새고 있는 경우에 미생물이 성장하기 쉽다. 곰팡이의 경우 물 피해가 있는 후 24시간이 지나면 포자를 형성하며 성장한다. 그러므로 실내에서 물이 새는 일이 없도록 해야 하며 빠른 개선이 필요하다.

일반적으로 실내에서의 온도는 18~24℃가 생활

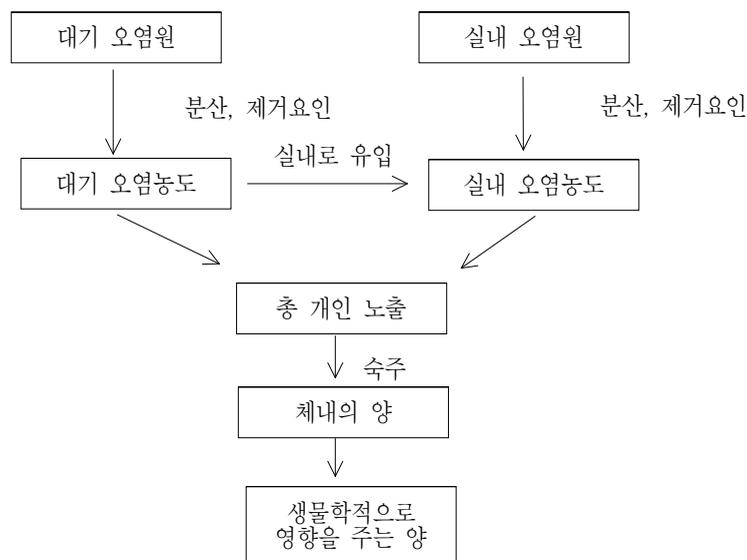


그림 5. 노출평가방법 (Pope, A. M., et. al.)

하는 데 가장 적당하지만 이 온도 범위는 미생물 또한 선호한다. 실내의 온도는 water system을 조절하는 것이 중요하다.

또한 indoor allergen을 줄이기 위해서는 애완동물의 경우, 제한된 장소에서 키우고 침실에는 들어오지 못하도록 하는 것이 좋다. 예를 들어, 카펫을 깔지 않고, 진공청소기로 자주 청소하며, 공기청정기를 사용하는 경우에 공기 중 allergen을 90% 이상 줄일 수 있다. 진드기를 줄이기 위해서는 침실의 경우 침대 매트리스와 배개의 커버를 불침투성의 재질을 이용하며 54°C(130°F)의 온도에서 세탁한다. 또한 마스크를 쓰고 진공청소기로 청소하는 것이 좋다. 실내에 침실이 아닌 나머지 공간에서는 카펫 사용을 줄이고 상대습도가 70% 이상이면, 미생물의 성장이 촉진되므로 45%이하로 유지한다.⁹⁾

건물의 공기정화장치는 건물 내에 미생물이 성장하지 못하도록 만들어져야 한다. 공기정화장치의 필터는 바이오에어로졸로부터 거주자를 보호하는데 중요한 요인이다. 곰팡이 포자와 박테리아를 제거하기 위해서 필터는 50~70%이상의 제거효율을 가져야 한다.¹²⁾ 이와 같이 바이오에어로졸에 대한 관리방법을 인식하고, 노출을 줄이도록 하는 것이 중요하다.

— 참고문헌 —

1. Douwes, J., Thorne, P., Pearce, N. and Heederik, D., 2003. "Bioaerosol Health effects and exposure assessment: Progress and prospects". The Annals of Occupational Hygiene, vol47. No. 3, pp. 187-200.
2. Maier, R. M., Pepper, I. L., Gerba, C. P., 1999, Environmental microbiology, Academic Press
3. Madigan, M. T., Martinko, J. M., 2006, Brock Biology of microbiology, eleventh edition

4. Linda, D., Stetzenbach, Amman, H., Johanning, E., King, G., Shaughnessy, R. J., 2004, "Microorganism, mold, indoor air quality", The American society for Microbiology
5. Janet Macher, Sc. D., M. P. H.. Bioaerosols: Assessment and Control
6. Mante, 1996, "Sick building syndrome and building-related illness"
7. Luke C. MS, CIH, Allan L. MD., Martha S. MD, William R. MD, Mar-nom V. MD., "Adverse Health effects of Indoor molds", 2004, Journal of Nutritional & Environmental Medicine, vol14, 261-274
8. Thorne, P. S., Kulhankova, K., Yin, M., Cohn, R., Samuel, J., Arbes, Jr., Zeldin, D. C., 2005, "Endotoxin exposure is a risk factor for asthma", American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, vol 172, pp.1371-1377
9. Pope, A. M., Patterson, R., and Burge, H., 1993, "Indoor allergen", National Academy Press Washington DC
10. Pastuszka, J. S., Kyaw Tha Paw, U., Lis, D. O., Wlazlo, A., Ulfig, K., 2000, "Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in upper silesia, Poland", Atmospheric Environment, vol 34, pp.3833-3842
11. Schwartz, D. A., 2001, "Dose inhalation of endotoxin cause asthma?", American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, vol 163, pp. 305-313
12. <http://www.state.nj.us/eoh/peoshweb/bioaero.htm>