

호흡기보호구의 Fit Test 방법과 규정에 관한 고찰

인제대학교 산업안전보건학과 · 신시내티대학 환경보건학과*
3M 산업보건 및 환경안전부**

한 돈 희 · Klaus Willeke* · Craig E. Colton**

— Abstract —

A Review on Fit Test for Respirators and the Regulations

Don-Hee Han, Klaus Willeke* and Craig E. Colton**

*Department of Occupational Safety and Health, Inje University
Department of Environmental Health, University of Cincinnati*
Occupational Health and Environmental Safety Division, 3M***

Respirator fit testing is required before entering specific work environments to ensure that the respirator worn satisfies a minimum of fit and that the user knows when the respirator fits properly. The fit of a respirator can be determined by qualitative (QLFT) or quantitative fit test (QNFT). The QNFT, having been universally accepted more than the QLFT, provide an objective and numerical basis by measuring a fit factor (FF). Until a few years ago, only one QNFT technique was available and accepted by U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) regulations. In the 1980's and 1990's, several new and fundamentally different QNFT methods were developed. Two of the newer methods are commercially available and are accepted by OSHA as suitable alternatives. In this article, the principle of operation of each QNFT technique is explained and each technique's major advantages and disadvantages are pointed out. Emphasis is given to negative-pressure air-purifying respirators, as they are in most frequent use today. The requirements and recommendations for fit testing positive-pressure respirators are discussed as well. Finally, the presently available QNFT standards and regulations are summarized to assist the user in making fit testing decisions.

Key Words : Respirators, Fit Test, Fit Factor (FF), Qualitative Fit test (QLFT), Quantitative Fit Test (QNFT), Negative-Pressure Air-Purifying Respirator, Positive-Pressure Respirator.

※ 이 논문의 일부는 1994년도 한국학술진흥재단의 대학교수 국비해외파견 연구비로 연구되었음.

I. 서 론

유해물질이 비산되는 작업환경에서 유해물질의 차단이 공학적인 수단으로 불가능하거나 설치가 곤란한 경우에는 적절한 호흡기보호구를 사용해야 한다. 호흡기보호구는 크게 두가지 형으로 나눌 수 있는데 주위공기로 부터 유해물질을 제거하는 공기정화형 보호구(air-purifying respirator)와 주위 공기 이외의 다른 곳으로 부터 새로운 공기를 제공 받는 공기공급형 보호구 (atmosphere-supplying respirator)이다(NIOSH (1), 1987). 특별한 경우를 제외하고는 공기정화형 보호구가 일반작업장에서 주로 사용되고 있으며 그 이유는 공기공급형보다 더 작고 관리가 간편한 데다가 착용자의 운동을 덜 제약하기 때문이다. 그래서 본 논문의 초점은 음압 공기정화형 보호구(negative-pressure air-purifying respirator)에 맞추었으며 좀 더 연구의 폭을 확대하여 양압 공기정화형 보호구(positive-pressure air-purifying respirator)와 공기 공급형 보호구까지 토의하였다.

가장 좋은 밀착형(tight-fitting) 보호구(예; quarter, half 혹은 full facepiece)라고 할지라도 만약 보호구 가장자리와 안면과의 밀착상태가 부적절하면 착용자를 충분하게 보호하지 못할 것이다. 그러므로, 호흡기 보호구에 대한 Fit Test는 착용자가 유해한 작업환경에 들어가기 앞서 최소의 밀착정도(aminimum of fit)를 만족시켜 주고 착용자가 어떻게 착용했을때 가장 적합한 Fit가 유지되는지 알게 하기 위하여 필요하다(Colton 등, 1991). 호흡기보호구에 대한 Fit 정도는 정성적인 방법(Qualitative Fit Test : QLFT)과 정량적인 방법(Quantitative Fit Test : QNFT)에 의해 측정될 수 있다. QNFT방법은 Fit Factor (FF)를 결정하여 객관적이고 수적인 방법으로 표현할 수 있다. 비록 QLFT방법이 현장에서 신속하게 이루어지는 결정적인 방법이기는 하지만 주로 착용자의 주관적인 반응에 의존하기 때문에 일반적으로 많이 받아 들여 지지는 않고 있다(NIOSH 2, 1987).

수년전 까지만해도 오직 한가지의 QNFT방법만이 상업적으로 사용가능하였고 OSHA (Occupational Safety and Health Administration)에

의해 인정되었었다. 이 방법을 이용하면 공기역학적 질량 중간값(Mass Median Aerodynamic Diameter : MMAD)이 $0.5 \mu\text{m}$ 인 에어로졸을 만들어 밀폐된 공간에 비산시킨 다음 광도측정기기를 이용하여 착용자 보호구의 안과 밖에서 그 농도를 측정 비교함으로써 Fit 정도를 알 수 있다. 1980년도와 1990년도에 들어와서 새롭고도 근본적으로 다른 QNFT방법들이 개발되었다. 새로와진 두 방법 모두 현재 상업적으로 이용가능하며 OSHA에 의해 인정되고 있는 방법들로서 하나는 "PortaCount™"에 의해 측정되는 연속흐름 응결핵계산법(Continuousflow Condensation Nuclei Counting : CNC)이고 다른 하나는 "FitTester 3000™"에 의해 측정되는 음압제어법(Controlled Negative Pressure : CNP)이다. 또 다른 방법으로는 아직 상품화되지는 않았으나 장차 상품화의 가능성이 높고 보다 새로운 방식으로 Fit 정도를 평가할 수 있는 2중 흐름법(Dichotomous-flow : Dichot QNFT)이다. 이들 방법들은 각각 다른 장단점을 가지고 있으면서 Fit 정도를 정량적으로 평가하는 방식이 다르기 때문에 각 방법에서 나오는 숫적인 값들이 각각 다를 수 있다(Biermann 과 Bergman, 1988; Biermann 등, 1991 ; da Roza 등, 1991; Oestenstad와 Graffeo, 1994; Crutchfield 등, 1995).

이 논문의 주된 목적은 아직까지 우리나라에서는 전혀 소개되지 않았으나 앞으로 필연적으로 실행이 불가피한 Fit Test 방법들을 소개하고 특히, QNFT 방법에 있어서 각 장단점과 더불어 그 작동 원리와 Fit Test에 대한 기준과 규정(Standard와 Regulation)을 토의하여 봄으로써 장차 한국에서 적용하는데 기초자료를 제공하기 위함이다.

II. QLFT와 QNFT 방법

QLFT를 수행할 때에는 착용자의 보호구 주위에 가스, 증기 혹은 에어로졸 같은 측정물질(challienge agent)를 비산시켜 주어야 한다. Fit의 결정은 냄새, 맛, 자극 등 주로 착용자의 주관적인 반응을 통한 측정물질의 존재여부에 의해 이루어 진다. 만약 존재가 감지되면 Fit는 부적절한 것으로 판정된다. 현재 QLFT방식에는 3가지 방법이 주로 사용되고 있는데 isoamyl acetate, sodium saccharin

그리고 irritant fume이 그것들이다(NIOSH (1), 1987; 29 CFR 1910.1001, 1994). QLFT방식은 값이 싸고 신속하며 상대적으로 단순하고 현장에서 수행이 용이한 장점을 갖고 있다. 그러나 주된 단점은 주로 착용자의 주관적인 반응에 의존하여 측정물질의 존재 여부가 결정되기 때문에 착용자가 어떤 반응에 대해 불감각적인 기능상 이상이 있을 경우에는 그 결과는 무용하게 된다.

QNFT를 수행할 때에는 상대적으로 안정된 측정용 공기나 때로는 에어로졸 입자를 함유한 공기 속에서 이루어진다. 일반적으로 Fit의 정도는 착용자 보호구의 안과 밖에서 에어로졸 농도를 측정하여 결정한다. QNFT를 수행할 경우에는 작업시 작업자의 움직임에 따라 작업장에서 유해물질이 새어 들어올 수 있다는 것을 가정하여 머리와 입의 위치를 여러 가지로 변화시키는 여러가지 Fit Test Exercises를 시행하면서 측정하게 된다. 또 측정 보호구의 모든 필터는 HEPA (High Efficiency Particulate Air)로 교체하기 때문에 보호구 안쪽에서 에어로졸의 존재는 필터를 통하여 들어온 것이 아니고 전적으로 보호구와 안면피부 사이의 침입(face seal leakage)으로만 가정한다. 보호구 밖에서 에어로졸의 농도(C_o)와 안에서 농도(C_i)의 비(Ratio)를 Fit Factor (FF)라고 하며 때때로 Quantitative FF라고도 한다(Myers 등, 1983; AIHA's Committee, 1985; NIOSH 2, 1987; Brown, 1992).

FF는 측정 당시 그 조건하에서 착용자의 안면과 보호구 사이의 Fit 정도만을 나타내 주는 것이지 실제 작업장에서 착용자에게 유해물질로부터 보호 정도(the degree of protection)를 예측하여 주지는 않는다. 실제 작업장에서 보호구를 착용하였을 경우에 작업환경으로부터 착용자의 Breathing Zone에 도달하는 에어로졸 입자의 양은 착용자를 감싸고 있는 에어로졸의 농도와 크기 분포, 사용한 필터의 종류, 안면부의 땀과 먼지 정도, 안면근육의 움직임, 보호구를 잘 착용하려는 착용자의 의지 및 기타 여러 요인에 의해 좌우된다. 개스상 물질이 존재할 경우에는 필터종류 대신에 오염물질에 대한 Cartridge의 흡착능력이 중요한 역할을 할 것이다. 실제 작업장에서 보호구의 밖과 안의 농도 비를 Workplace Protection Factor(WPF)라고 한 (Myers 등, 1983; AIHA's Committee, 1985; NIOSH

2, 1987; Brown, 1992).

QNFT의 주된 장점은 Standards에서 요구하는 최소 FF 값과 비교가 가능한 객관적인 숫자로 FF 값을 만들어 낼 수 있어서 그 보호구의 Fit 정도를 받아 들일 수 있는지를 결정할 수 있다. 그러나 사람의 안면 형상이 복잡하고 착용할 때마다 동일한 행태로 착용할 수 없기 때문에 동일한 보호구를 동일한 사람이 착용한다고 하더라도 FF가 쉽게 변할 수 있다(da Roza 등, 1983). 또 FF를 결정할 때 많은 요인들, 특히, 측정방법에 따라 많은 영향을 받을 수 있다(Myers 등, 1986; Biermann과 Bergman, 1988; Carpenter와 Willeke (1), (2), 1988; Rose 등, 1990; Biermann 등, 1991; da Roza 등, 1991; Oostenstad와 Graffeo, 1994; Krishnan 등 (1), (2), 1994; Crutchfield 등, 1995). 에어로졸 센서를 이용하여 QNFT를 측정할 경우에 보호구 밖의 에어로졸 입자들이 보호구 안으로 유입될 때 균질로 혼합되지 않은 상태에서 유선(stream line)을 타고 침투하기 때문에 부정확한 측정치를 기록할 수 있다(Myers 등, 1986). 착용자의 호흡 사이클이 에어로졸을 완전하게 혼합시키기에는 너무 짧기 때문에 FF 값이 새는 지점(leak site), 세서의 위치, 종류 등에 영향을 받게 되어 에어로졸 세서를 사용하는 QNFT는 많은 오차가 발생할 수 있다(Holton 등, 1987; Holton과 Willeke, 1987; Myers 등, 1988; Myers와 Allender, 1988; Willeke와 Krishnan, 1990; Oostenstad 등, 1990).

Ⅲ. 보호구형태와 Fit Test

에어로졸 입자를 이용하는 QNFT를 수행할 때 HEPA 필터를 사용하면 안면피부와 보호구 틈 사이를 통한 유입(face seal leakage)과 필터를 통과하는 것(filter penetration)을 쉽게 구별할 수 있다. HEPA 필터는 거의 100 %의 효율을 갖고 있어서 보호구 안으로 들어 온 모든 에어로졸은 Face seal Leakage로만 간주하게 된다. 또 깨끗하고 잘 관리된 보호구인 경우 호기밸브(exhalation valve)로의 유입이 전혀 없는 것으로 가정한다.

Fit Test 수행시 필터를 바꿀 수 있는 교체 가능 필터 보호구(replaceable filter respirator)는

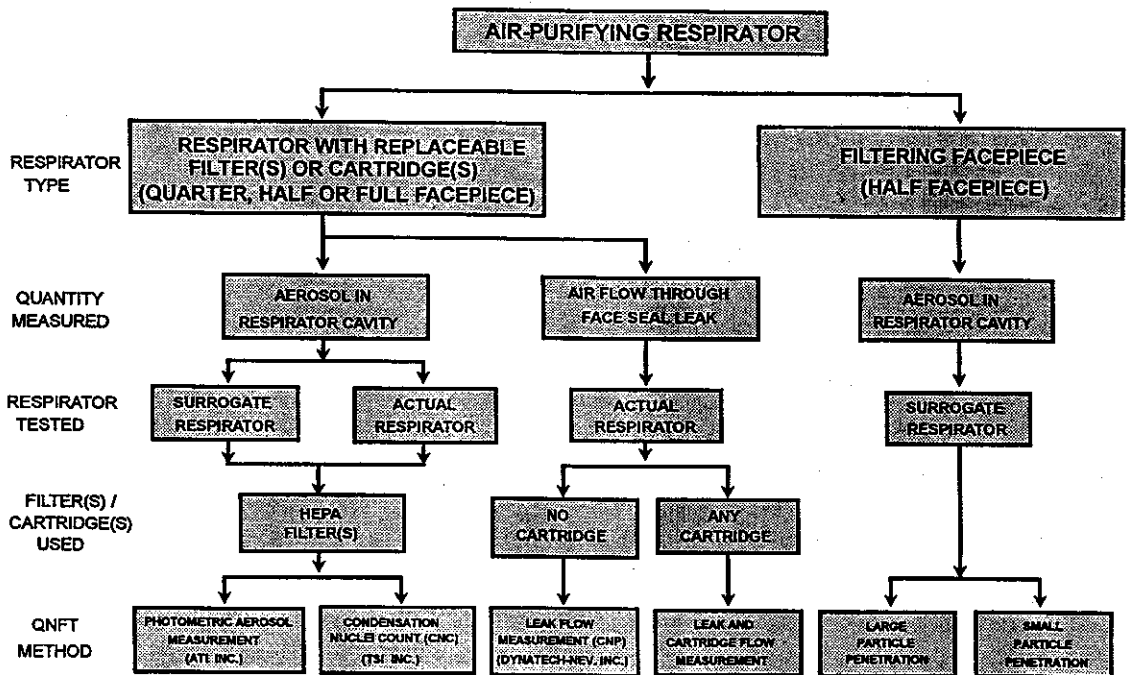


Fig. 1. Fit testing methods for air-purifying respirators

non-HEPA 필터를 HEPA 필터로 쉽게 바꿀 수 있으나 면체가 필터형 보호구(filtering facepiece respirator)인 경우에는 필터 자체와 그 지지 구조물들이 안면을 감싸고 있기 때문에 필터를 교체할 수 없어 또 다른 어려움을 갖게 된다. 만약 필터부가 HEPA 필터로 이루어져 있다면 보호구안의 에어로졸은 Faceseal Leakage로만 간주할 수 있으나 필터부가 non-HEPA인 경우에는 Faceseal Leakage와 Filter Penetration을 쉽게 구별할 수 없다. 그러므로 장차 필터형 보호구를 Fit Test할 수 있는 QNFT 방법의 개발과 상업화가 필요하다. 그림 1은 지금까지 개발된 HEPA 및 non-HEPA 필터 보호구에 대한 QNFT 방법들을 도식화한 것이다.

IV. 교체 가능 필터를 가지고 있는 공기정화형 보호구의 QNFT 방법

Fit Test는 결국 Faceseal Leakage를 최소화하려는데 있다. 안면과 보호구간 틈이 있으면 흡기 동안 보호구 안의 압력이 밖의 압력보다 적어 공기

가 안으로 유입할 것이다. 현재 사용되는 한가지 QNFT 방법에는 보호구 안과 밖에서 존재하는 에어로졸의 농도를 측정하는 것이고 또 다른 방법으로는 보호구 안쪽으로 유입되는 공기흐름을 측정하는 것이다. 그것이 에어로졸 입자이든 개스상 물질이든간에 공기를 통하지 않고서는 보호구안으로 침투할 수가 없다.

1. 에어로졸 측정법(Aerosol Measurement)

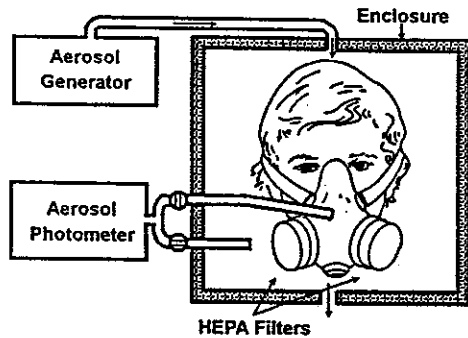
최초의 에어로졸을 이용한 QNFT 방법은 1961년 Burgess 등(1961)에 의해 발표되었다. 1972년 Hyatt 등(1972)은 에어로졸 측정기기로 전방산란 광도계(forward light-scattering photometry)를 이용하고 측정물질로서는 DOP(dioctylphthalate)을 이용하여 일상적으로 사용이 가능한 실질적인 에어로졸 시스템을 처음으로 개발하였다. 그후 여러 에어로졸 측정기기가 개발되었고 측정물질로도 Sodium Chloride, Corn Oil, 공기중 에어로졸 등이 사용되게 되었다.

에어로졸법을 사용할 때 측정자는 우선 피검자에게 가장 적합할 것으로 예상되는 보호구의 크기와

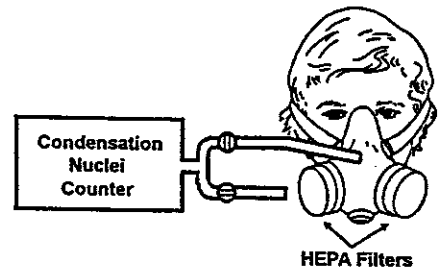
여러회사에서 만들어진 1개 이상의 보호구를 선정하여야 한다. 보호구내 에어로졸의 유입은 완전히 Faceseal Leakage로만 간주하기 위하여 HEPA 필터만 사용해야 한다. HEPA 필터는 MMAD 0.3 μ m인 입자의 침투에 대해 99.97 %의 효율을 갖고 있기 때문에 (NIOSH (1), 1987), 만약 Faceseal Leakage가 전혀 없다면 이 입자의 침투는 0.03 %가 될 것이고 따라서 FF는 3,333이 된다. 그러므로 만약 에어로졸 측정기가 HEPA 필터를 통한 입자의 유입을 효과적으로 감지할 수 있다면 FF 1000 이상의 값들을 해석할 때에는 상당히 주의하여야 한다. 어떤 QNFT에서는 MMAD 0.3 μ m보다 크거나 작은 입자를 사용하면서 효율 99.97 %를 보장하기 위해 99.997 %의 효율을 가진 HEPA 필터를 이용하기 때문에 FF 3000 이상에도 Faceseal Leakage를 반영하기도 하지만 역시 해석상 상당히

주의를 요한다. HEPA 필터는 실제 작업장에서 사용하는 필터나 Cartridge와 서로 다른 압력강하를 유발 할 수 있기 때문에 에어로졸 측정법은 작업장에서 착용자 자신의 보호구 대한 Fit를 반영하지 않을 수도 있다. 그래서 에어로졸 측정법은 작업장에서 보호구의 보호정도를 명확하게 밝혀 주기보다는 적합한 Fit의 보호구를 선정하여 주는데 보다 유용하게 사용된다.

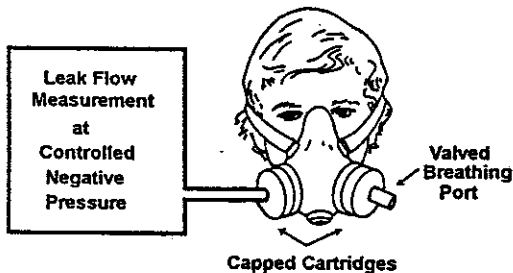
이 방법의 또 다른 문제는 에어로졸 측정기가 흡기시나 호기시 계속적으로 에어로졸을 측정하는 점이다. 호기시 보호구내에 있는 에어로졸은 착용자의 호흡기계를 통하여 나오는 동안 집적(deposition)되어 감소되어 진다(ICRP, 1966; Chan과 Lippmann, 1980; Blanchard와 Willeke, 1984). 에어로졸의 감소정도는 착용자의 호흡율과 폐구조에 달려 있다. 호흡기계의 크기와 물리적 구



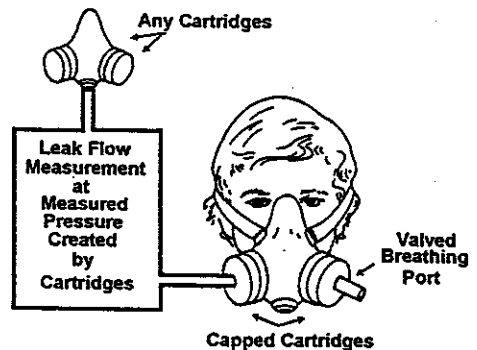
A. PHOTOMETRIC AEROSOL MEASUREMENT



B. CONDENSATION NUCLEI COUNT



C. LEAK FLOW MEASUREMENT



D. LEAK AND CARTRIDGE FLOW MEASUREMENT

Fig. 2. Schematic representation of QNFTs for elastomeric respirators with HEPA filters or replaceable cartridges

조는 외적인 머리, 팔, 몸의 크기에 따라 다르다. 이 방법은 Facesal Leakage의 정도를 산출하여 주지만 피검자의 폐내 에어로졸의 집적 정도에 영향 받을 수 있다.

최근까지 모든 에어로졸 측정법은 Breathing Zone인 코와 입 사이에 Sampling Probe를 부착한 대체보호구(surrogate respirator)로 측정하였다. 착용자 자신의 보호구와 똑 같은 회사, 모델의 이 대체보호구는 신축성 그리고 작동기전에서 착용자 자신의 보호구와 같다고 가정하며 따라서 동일한 FF를 생산한다고 가정한다. 최근들어 HEPA필터와 보호구몸체 사이에 끼울 수 있는 Sampling Probe나 Port가 개발되어 착용자 자신의 보호구를 직접 측정할 수 있게 되었다(Johnson 등, 1992). 이 방법은 대체보호구를 여러사람이 쓰는 일을 없었기 때문에 훨씬 위생적인 방법이다. 그러나 Adapter를 이용하여 Sampling Probe를 직접 끼운다고 하더라도 Sampling Probe나 Port에 잡힌 에어로졸의 농도가 보호구내의 평균 농도를 정확하게 나타내 주지는 못할 것이다(Hinds와 Kraske, 1987; Myers 등, 1991; Japuntich와 Johnston, 1992). 이와 같이 에어로졸 측정법의 근본적인 어려움은 짧은 흡기 동안 유입되는 에어로졸이 유선을 그으며 유입되면서 완전히 균일하게 혼합되지 않는 데 있다. 따라서 측정된 에어로졸 농도 값은 피검자에 따라 다른 Leak Site와 Sampling Probe나 Port의 위치에 상당히 의존적이다.

에어로졸 측정법을 수행하는 동안에는 여러가지 Fit Test Exercises를 하게 되는데 예를 들어 머리의 Up-and-Down, Side-to-Side, 말하기, 조깅 등이다. 이들 운동은 작업시 Facesal Leakage에 영향을 미칠 것을 고려하여 만든 것이다. 그러나 이들 운동은 아직까지 운동의 각도, 시간, 호흡을 등을 정하여 놓지 않아서 똑 같은 보호구를 착용하였다고 하더라도 착용자의 행동에 따라 다른 FF 값을 만들 수도 있다.

1) 에어로졸 광도 측정법(Photometric Aerosol Measurement) : 그림 2A에 나타나 있는 것처럼 최초의 QNFT 시스템은 광도계로 보호구의 안과 밖에서 에어로졸을 측정하는 것이다. 광도계로 에어로졸이 계속적으로 빨려 들어와 Light Beam이 에어

로졸 구름에 조사되면 감지된 산란광이 에어로졸의 농도에 비례하여 전자적 Signal을 만든다(Lehtimäki와 Willeke, 1981). Fit가 잘 된 보호구인 경우에는 보호구 안쪽에서 이들 입자의 농도가 일반 실내의 공기의 농도보다 훨씬 적어 감지하기 어렵기 때문에 광도계가 감지할 수 있는 범위에서 에어로졸을 만들어 주어야 한다. 그래서 이 시스템은 적어도 머리만이라도 들어 갈수 있는 휴대용 후드나 고정된 부스와 같은 밀폐용기가 필요하다. 이 시스템의 장점은 에어로졸의 농도를 일정하게 유지 시킬 수 있다. 이 시스템은 최초의 Fit Test로 개발되어 왔기 때문에 다른 시스템들을 평가하는 기준점(benchmark)으로 자주 사용되어 왔다(Carpenter와 Willeke (1), (2), 1988; Biermann과 Bergman, 1988; Rose 등, 1990; da Roza 등, 1991; Biermann 등, 1991; Oestenstad와 Graffeo, 1994). 단점은 에어로졸을 발생시키는 장치, 밀폐용기, 광도계가 필요하기 때문에 시스템이 크며 고가인데다가 앞서 언급한 대로 인체 호흡기내 집적이나 불균일한 혼합으로 인해 측정시 여러가지 오차가 발생할 수 있다는 점이다. 이 시스템은 현재 Air Techniques Inc. (Baltimore, Maryland), Dynatech-Nevada (Carson City, Nevada)에서 구입할 수 있다. QNFT에 대한 OSHA의 모든 규정들은 이 방법을 근거로 만들어져 있기 때문에 모든 상품화된 시스템들은 OSHA에 의해 인정받고 있다.

2) 연속 흐름 응결핵 계산법(Continuous-flow Condensation Nuclei Count : CNC) : 실외공기에는 직경 $0.05 \mu\text{m}$ 인 입자가 $0.5 \mu\text{m}$ 인 입자보다 10^3 나 10^4 배 더 존재한다. 실내 공기에서의 비는 비슷하다. 1981년 Willeke 등(1981)은 이 점을 이용하여 $0.5 \mu\text{m}$ 보다 더 작은 에어로졸을 이용한 QNFT 방법을 계획하였다. 에어로졸의 감지를 광도계 대신 CNC법을 이용해 본 결과 더 좋은 QNFT 방법임을 알게 되었다. CNC법에서는 눈에 보이지 않는 아주 작은 입자들에게 증기를 가하여 응결되면서 입자들의 핵이 커지면 산란광을 이용한 광도계나 광단입자 계산기법(optical single-particle counting)으로 감지하는 방법이다(Sinclair와 Hoopes, 1975). TSI Inc. (St. Paul, Minnesota)에서는 "Porta-CountTM"라는 이름으로 상품화하여 현재 QNFT

방법으로는 가장 많이 사용되고 있다. 그림 2B에서 보이는 것 처럼 이 방법은 공기중 에어로졸을 사용하기 때문에 밀폐용기가 필요 없다. 보통 공기중 에어로졸이 상대적으로 안정된 값을 가지고 있기는 하지만 흡연이나 다른 발생원들로부터 외부 에어로졸 농도가 변화할 수도 있다. 또 고효율로 여파되는 Clean Room인 경우에는 에어로졸 농도가 너무 낮아 바람직하지 않을 수도 있다.

주된 장점은 이 시스템 자체가 아주 작고 단순하며 경제적인 점이다. 그러나 에어로졸의 호흡기내 집적과 불균일한 혼합으로 인한 광도 측정법의 근본적인 단점을 그대로 지니고 있다. 또 만약 호기동안 피검자의 호흡기로 부터 작은 에어로졸이 발생할 경우에는 이것들이 Faceseal Leakage로 추가되어 계산되어 진다. 예를 들면, QNFT 전 피검자가 30-40분 사이에 흡연을 하였다면 호흡기내에 남아 있는 흡연 입자들이 배출되어 보호구내의 입자수를 증가시키게 될 것이다(Crosby, 1995).

2. 공기 흐름 측정법(Air Flow Measurement Methods)

입자상 물질이든 개스상 물질이든 보호구내에 존재하는 것들은 공기에 실려 Faceseal Leakage를 통해 들어 온 것들이다. 그러므로, 1980년대 말 Carpenter와 Willeke(1988), 1990년대 초 Crutchfield와 공동연구자들(1991, 1993)은 각각 독립적으로 직접 Faceseal Leakage를 통한 공기의 흐름정도를 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. 이들 두 방법은 그림 1과 그림 2C, D에 나타나 있다.

1) Leak flow 측정법 : 이 방법의 최초 발표자들은 Carpenter와 Willeke(1988)이며 Faceseal Leakage를 통한 공기의 흐름정도를 직접 측정하는 것이다(그림 2에는 나와 있지 않음). 공기정화통을 가지고 있는 보호구(elastomeric respirator)의 두 Cartridges를 모두 막혀 있는 다른 Cartridges로 바꾼다. 한쪽 Cartridge에는 작은 밸브가 달려 있어서 이를 통하여 호흡을 할 수 있는데 착용자는 이 밸브를 닫고 약하게 공기를 들어마셔 보호구내에 음압을 만든 다음 수초간 숨을 멈춘다. 이 Cartridge나 또 다른 Cartirdge에 압력을 측정하는 센서가 부착되어 있어서 내부의 압력을 추적하게 된다. 만

약 압력이 그대로 남아 있으며 leakage가 없는 것이고 만약 외부와의 압력 감소가 발생하면 감소를 만큼 Leakage의 정도를 나타내는 것이다. 이 방법은 한때 Dynatech-Frontier (Albuquerque, New Mexico)사에 의해 80년대 말과 90년대 말 상품화되어 보호구 몸체가 단단한 보호구(rigid respirator)에 대해 널리 사용되었다(McGlone, 1988). 그러나 90년대 초 보호구의 몸체가 보다 유연해지면서(pliable respirator) 보호구내의 부피가 압력변화에 관계없이 일정한 값을 유지한다는 가정이 더 이상 존재할 수 없게 되었다. 즉, 보다 유연해진 보호구에서의 압력 감소율은 Leakage를 통한 공기 뿐만 아니라 보호구의 용량에도 영향을 받게 된 것이다. 비록 부피의 변화를 Leak 흐름 계산에 포함하여 계산한다 하더라도 이 방법은 더 직접적인 Leak 흐름의 측정법으로 더 이상 사용이 중단되었다.

Crutchfield와 공동연구자들(1991, 1993)에 의해 개발되어 현재 상품화된 "FitTester 3000™" (Dynatech Nevada, Carson City, Nevada)에 의해 보다 직접적으로 측정이 가능하게 되었다. 그림 2C에 보이는 것 처럼 이 방법 역시 막혀진 Cartridge들을 사용하며 측정기기가 어떤 호기상태를 대표하는 미리 정해진 수준만큼 보호구내 압력을 낮추는 동안 피검자는 호흡을 멈추어야 한다. 이렇게 보호구내에 음압을 제어하는(Controlled Negative Pressure : CNP) 동안 - 따라서 이 방법을 CNP 법이라고 함 - 음압을 유지하는데 필요한 공기의 흐름을 Mass Flow Meter가 측정하게 된다. 호기밸브로부터 Leakage만 없다면 이 Flow Rate는 그 압력만큼 Faceseal Leak Rate와 동일할 것이다. FF는 어떤 흡기상태를 나타내는 미리 선정된 대표치의 Flow Rate를 측정한 Leak Rate로 나눔으로 결정된다.

이 방법은 에어로졸 측정법보다 더 좋은 반복성(repeatability)을 가졌다(Crutchfield 등, 1995). 그 이유는 새어 들어 온 공기가 보호구내에서 음압을 만드는 순간에 어느 곳에서나 일정한 압력을 유지하는 반면, 에어로졸 입자는 보호구내 모든 곳에서 균일한 농도로 완전 혼합되기 위해서는 어느 정도 시간이 필요하기 때문이다. FitTester 3000™의 또 다른 장점은 가격면인데 압력과 공기흐름을 측정하는 시스템은 고도의 정밀성을 요구하는 에어로졸

측정기기보다 근본적으로 가격이 싸기 때문이다. CNP 법의 단점은 FF가 사전에 결정된 대표치의 음압에 의해 좌우된다는 것이다. 비록 동일한 타입의 Cartridge나 필터라고 하더라도 서로 다른 회사 제품간에 동일한 유속에서 다른 유속 저항을 보였기 때문에(Xu 등, 1991; Chen과 Willeke (1), (2), 1992), 보호구내 공간에서 다른 음압을 만들 수 있다. CNP 방법도 Fit Test 동안에 Head Movement 등 Exercise를 수행한다. 그러나 측정 중에 숨을 멈추고 움직이지 말아야 하기 때문에 OSHA에서 강조하고 있는 여러가지 Fit Test Exercise를 완전하게 수행할 수 없는 것이 또 다른 큰 단점이다(Crosby, 1995).

2) Leak와 Cartridge flow 측정법 : 작업장에 실제 사용하고 있는 필터와 Cartridge를 가진 보호구를 가지고 착용자 자신이 만든 음압으로 Faceseal Leakage를 측정하는 방법이 그림 2D와 같이 최근 Willeke와 동연구자들에 의해 개발되었다(Han 등, 1991; Krishnan 등 (1), (2), 1994). 이 방법에는 HEPA나 기타 다른 필터나 Cartridge를 사용할 수 있다. 이 방법에는 Cartridge를 Reference 보호구에 부착하고 압력, 즉, Cartridge 흐름은 전형적인 평균흐름을 상태에서 측정할 수 있다. Feedback 시스템을 통하여 동일한 압력이 피검자가 쓰고 있는 보호구내에서도 만들어진다. 흐름을 멈추고 있는 동안 Leak의 흐름은 착용자가 실제 사용하고 있는 필터나 Cartridge를 통해 만들어진 음압으로써 측정된다. FF는 Cartridge Flow를 Leak Flow로 나눔으로써 결정된다. 이 방법에서는 두 곳에서 흐름을 측정할 수 있기 때문에 Dichotomous QNFT 혹은 간단히 "Dichot"라고 한다. 아직까지 이 방법은 상품화되지 않은 상태이지만 유해 작업현장에서 작업자 자신의 보호구를 착용하기 전과 후에 실질적인 보호정도를 측정할 수 있을 것이다.

V. Non-HEPA 부착 필터형 보호구(Filtering Facepiece)의 QNFT

만약 보호구가 HEPA 필터로 만들어져 있다면 에어로졸의 유입은 Faceseal Leakage로만 가능한

것으로 가정하기 때문에 이들 보호구에 대한 Fit Test는 두 에어로졸 방법을 사용할 수 있을 것이다. 그렇지만 이때에도 보호구에 Probe가 부착된 대체 보호구를 사용해야 한다. 현재 사용되고 있는 필터형 보호구들은 non-HEPA 필터로 이루어져 있기 때문에 이들 보호구들을 위한 또 다른 방법들이 모색되어 왔다. 한때는 non-HEPA 필터를 사용하는 필터형 보호구의 Fit test를 위해 대체보호구로 HEPA 필터를 부착한 필터형 보호구가 만들어졌었다. 그러나 이 보호구는 재질이 촘촘하고 단단할수록(rigidity) 더 많은 압력강하를 유발하기 때문에 재질이 훨씬 영글고 부드러운 non-HEPA 필터형 보호구의 Fit를 대신할 수 없다. 그러므로 필터의 재질에 어떤 변화를 유발하지 않은 상태에서 Face-seal Leakage를 측정할 방법이 필요하였다. 물론, 필터형 보호구의 Fit Test는 공기흐름 측정법으로는 불가능하다. 그 이유는 이 보호구의 안과 밖의 압력이 측정 불가능한 빠른 속도로 동일하게 되므로 Faceseal Leakage와 Filter Penetration을 도저히 구분할 수 없기 때문이다.

1. 큰 입자 통과법(Large Particle Penetration)

보호구 필터를 가장 잘 통과하는 입자의 크기는 0.3 μm 이다. HEPA 필터란 이 크기에서 적어도 99.97 %의 효율을 갖는 것을 말한다. 최근 미국 OSHA (42 CFR 84)에서 바꾼 보호구의 인정구분을 보면 용도에 따라 세개의 시리즈로 즉, N, R 그리고 P로 나누고 효율에 따라 MMAD 0.3 μm 에서 99.97 %, 99 %, 95 %로 나누었다(Federal Register 60: 110). 이전의 구분에서는 Dust/Mist (DM)과 Dust/Fume/Mist (DFM) 보호구는 일반적으로 MMAD 0.3 μm 에서 95 %이하의 효율을 가지고 있는 것을 말하였다. 보통 이들 모든 보호구는 MMAD 0.3 μm 이상과 이하의 크기입자에 대해서는 더 좋은 효율을 가지고 있다. 특히, MMAD 1 μm 이상의 입자에 대해서는 특히 좋은 효율을 갖고 있다(Chen과 Willeke (1), (2), 1992; Chen 등, 1992).

DM과 DFM 보호구가 2.5 μm 입자에 대해 거의 완벽에 가까운 정도의 포집효율을 갖는다는 점은 3M사로 하여금 "Large Particle Quantitative Fit Test (LPQNFT)"를 개발하게 하였다(Iverson 등, 1992; Danisch 등, 1992). 상품화되어 있는 이

Table 1. OSHA Standards Requiring Quantitative Fit Tests

Substance	Standard Number ^a	Condition Requiring QNFT	Required Frequency of Fit Testing
Acrylonitrile	1910.1045(h)(3)(iii)(B)	More than 10 employees wearing negative pressure respirators	Initially and semiannually
Arsenic	1910.1018(h)(3)(iii)	More than 20 employees wearing respirators	Initially and semiannually
Asbestos	1910.1001(g)(4)(iii) ^b	Exposure>10 x PEL ^c	Initially and semiannually
Cadmium	1910.1027(g)(4)(iii),(iv)	Exposure>10 x PEL ^c	Initially and annually
Lead	1910.1025(f)(3)(ii)	Exposure>10 x PEL ^c	Initially and semiannually

^aThe same requirements are found in Construction (1926) and Shipyard Employment (1915) regulation

^b(h)(4)(ii) in 1926.1101 and 1915.1001.

^cPermissible Exposure Limit

3M사의 시스템은 단일입자크기(monodisperse)에어로졸 발생기, 챔버 그리고 에어로졸 센서장치로 구성되어 있다. 이 시스템을 사용할 때는 단일크기의 “큰” 입자들은 오직 Faceseal Leakage로만 유입한다는 가정이 필요하다. 측정된 FF는 2.5 μm 입자들의 존재만 반영하는 것이므로 보호구를 다른 것으로 바꾸거나 변화시킬 필요가 없다. 또한 입자의 크기가 다른 입자들로 바꾸어 측정된 FF 값들이 전통적인 방법에 의해 측정된 FF들과 잘 일치하였다(Iverson 등, 1992). 따라서 이 방법은 원래 면체가 필터형인 보호구를 위해 만들어 진 것이지만 교체 가능 필터나 Cartridge를 가진 보호구에도 사용이 가능하다.

2 작은 입자 통과법(Small Particle Penetration)

작은 입자들이 보호구의 재질에 접근하여 필터 통과시 여러 곳을 곡선을 그으며 지나올 수 있기(tortuous path) 때문에 결과적으로 대부분이 제거된다. 하지만 이들 입자들이 Leak Site에 접근하면 이들 공간은 입자에 비해 매우 크게 된다. 1 μm 의 입자라고 하더라도 이 공간의 크기는 10, 100 혹은 1000배의 크기가 될 수 있다. 이들 입자가 Leak Site를 통과시 Leak Site 표면에 의해 제거 가능하

기 때문에 보호구재질(medium)을 통과할 때의 입자의 운동과는 다르다. 이러한 차이점은 Willeke와 공동 연구자들에게 최근 “Small Particle Quantitative Fit Test (SPQNFT)”를 개발하게 하였다(Myjo 등, 1994). 이 방법은 필터형 보호구에 Probe를 끼우고 필터를 통과한 에어로졸과 Faceseal Leakage를 통한 에어로졸을 동시에 합쳐 측정하되 다른 유속, 즉, 저유속(예를 들면, 10Lpm)과 고유속(100 Lpm)에서 나누어서 측정한다. 그후 Faceseal Leak율이 두 유속에서 측정된 값들의 비에서 결정된다. Test는 정상적인 호흡이나 정지된 상태에서 이루어 질 수 있다. 호흡기에 집적상태를 피하고 앞서 지적했던 Probe로 Sampling시 발생하는 문제점을 피하기 위해서는 후자가 더 좋은 방법이다. 아직까지 이 방법은 상품화되지 않은 상태이다.

Non-HEPA 부착 필터형 보호구의 QNFT 방법들은 아직까지 크게 보급화되지 않았고 거의 상품화되어 있지 않은 상태이다. 이들이 일단 상품화가 이루어 지면 필터형 보호구의 사용이 증가하고 있는 보건분야 종사자에게 유용할 것이며(CDC, 1992; Chen과 Willeke (1), (2), 1992; Weber 등, 1993 ; Chen 등, 1994), Saccharin과 같이 모든 사람들이 사용할

수 없는 QLFT의 결함을 피하게 될 것이다.

Ⅶ. QNFT 방법들간의 비교연구

1. 에어로졸 광도 측정법 대 응결핵 계산법(CNC)

두 기법의 중요한 차이는 측정입자의 차이에 있다. 광도 측정법에서는 입경 $0.5 \mu\text{m}$ 에서 가장 예민한 반응을 보이지만 CNC에 의한 방법은 이 보다 더 작은 입자에서 예민하다. 입자의 작은 공간 통과 는 입자의 크기에 의존하기 때문에 FF의 차이를 예견할 수 있다. 두 방법을 비교한 최초의 연구에서는 두방법이 20 % 이하의 차이를 보였다(Laye, 1987). 보호구에 임의로 5 %의 Leak를 만든 다음 비교한 연구에서는 두 방법간 FF의 차이가 매우 적었다(Ernstberger, 1988). MMAD 0.5에서 0.7 m의 입자를 측정물질로 사용하고 24명의 피검자들을 대상으로 Half Mask 보호구를 실험한 결과 두 방법의 FF 값 차이가 매우 컸으며 모두 대수 정규 분포를 하고 있었고 기하표준편차는 CNC 3.9, 광도측정법 6.7로 나타났다(Rose 등, 1988). Pass/Fail Test 결과는 Pass에서는 두 방법 모두 동일 하였으며 Fail에서는 하나만 제외하고 일치하였다. 마 네킹과 Breathing Machine을 가지고 실험한 Biermann 등(1991)의 연구에서는 FF 1000 이하에서 두 방법이 잘 일치하였다. 사람을 대상으로 하였을 때 좋은 상관관계를 보였다. 주위공기중 에어로졸의 농도가 낮은 경우에는 호흡기에서 만들어진 작은 에어로졸 입자가 Faceseal Leak에 합해질 수 있으므로 FF 1000 이상에서는 많은 논란의 여지가 있을 수 있다. CNC에 의해 감지된 더 작은 입자들은 Leak Site에서 더 높은 확산손실(diffusion losses)을 가져 옴으로 작은 Leak로 부터 CNC 법으로 기록된 에어로졸의 Leakage 정도는 광도계에 기록된 것 보다 낮게 나타날 것이다. 즉, 같은 Leakage라고 해도 CNC에 의한 FF 값이 광도계에 의한 것 보다 높게 나타난다(Willeke와 Krishnan, 1990).

2. 에어로졸 측정법 대 공기 흐름 측정법

대부분의 연구에서 Leak 흐름 측정법에 의한 FF 가 에어로졸 광도 측정법에 의한 값들보다 더 낮았으며 더 낮은 변이(variability)를 보여 주었다

(Carpenter와 Willeke (1), (2), 1988; Burnis, 1991; Crutchfield 등, 1991; Crutchfield 등, 1993; Oestenstad와 Graffeo, 1994; Crutchfield 등, 1995). 에어로졸 입자들이 Leak를 통해 보호구내로 들어 갈 때 입자들의 손실이 없거나 완전 균일혼합이 이루어지면 에어로졸법에 의한 FF 값이나 공기 흐름 측정법에 의한 FF 값이나 동일할 것이다. 그러나 Leak Site가 작으면 작을 수록 Leak Site에서의 손실은 더 많아 질 것이다. 추가적으로 보호구 내부 벽에서의 손실도 있을 것이다. 그래서 낮은 FF 값들에 대해서는 두 방법이 비슷한 값을 기대할 수 있으나 Fit 정도가 좋아질 수록 즉, FF 값들이 높아질 수록 에어로졸법에 의한 FF 값들은 공기흐름법에 의한 것보다 더 높은 값을 나타내게 될 것이다. 추가적으로 에어로졸 측정법은 보호구내에서 에어로졸의 불완전한 혼합으로 인해 더 큰 변이가 생길 것이다(Carpenter와 Willeke (1), (2), 1988; Krishnan 등 (1), (2), 1994)

Ⅶ. 양압보호구(Positive Pressure Respirator)의 QNFT

최근 들어 Tight-Fitting 양압보호구들에 대한 관심이 높아지고 있다. 양압보호구에는 Powered Air-Purifying Respirators (PAPRs), 연속흐름 Airline 보호구, Open-Circuit Self-Contained Breathing Apparatus (SCBA) 그리고 양압 Closed-Circuit SCBA 등이 포함된다. 양압보호구들도 따로 구별하지 않으면 음압보호구들과 비슷하다. 따라서 적합한 Fit 를 얻으려는 점도 동일하다. OSHA의 Cadmium Standard에는 이들 보호구들에 대한 Fit Test를 요구하고 있다(29 CFR 1910.1027). ANSI 역시 모든 상황에서 Tight-Fitting 양압보호구들 대해 Fit Test를 권고하고 있다(ANSI Z88.2-1992).

양압보호구에 대한 Fit Test의 목적은 Leakage로 인한 보호정도 감소와 SCBA의 서비스 생명 단축을 예방하는데 있다(ANSI Z88.2-1992). 양압보호구라고 하더라도 fit test는 음압형태로 수행해야 한다. 공기공급을 하는 상태에서는 Fit Test를 할 수 없다. 만약 양압상태에서 테스트가 이루어지면 공기공급이 밀착정도(seal)를 변화시킬 것이다. 압

Table 2. Standards or Regulations with Minimum Required Fit Factors

Standard	Negative-Pressure Facepiece Type	
	Half	Full
ANSI Z88.2-1992	100	1000
29 CFR 1910.134(existing)	-- ^A	-- ^A
29 CFR 1910.134(proposed) ^{B,C}	100	500
Asbestos (29 CFR 1910.1001) ^{B,C}	100	1000
Benzene (29 CFR 1910.1028)	100	500
Cadmium (29 CFR 1910.1027) ^B	100	500
Formaldehyde (29 CFR 1910.1048)	100	500
Methylenedianiline (29 CFR 1910.1050) ^B	250	1250
Lead in Construction (29 CFR 1926.62)	100	500
AS/NZS 1715:1994	-- ^A	-- ^A
CSA Z94.4-93	>10	>100

^ANot established in the standard or regulation.

^BThe same requirement is found in the construction version of the regulation (29 CFR 1926).

^CThe same requirement is found in the shipyard employment version of the regulation (29 CFR 1915).

측공기 발생원이나 PAPR 모터는 에어로졸이나 미세한 입자들을 함유하고 있고 많은 모터가 필터 뒤에 위치하고 있어서 입자들이 공기흐름을 타고 들어올 수 있다. 만약 에어로졸 센서를 이용하면 Faceseal Leak와 공기공급을 구별할 수 없다. 그래서 양압형태의 테스트는 Faceseal Leakage 정도를 반영할 수 없다. 호흡을 중단하는 방법들에게도 공기공급은 측정을 방해할 것이다.

음압으로 변형시키는 방법에는 두가지로 할 수 있다. 한 방법은 보호구 제작회사에서 만든 Adapter를 이용하여 보호구에 HEPA 필터를 부착하고 음압상태로 변화시키는 방법이다. 또 다른 방법은 이미 확인된 동일한 형의 공기정화형 음압보호구를 이용하는 것이다. 두 방법 모두 QNFT를 위해서 Probe가 필요하다. 따라서 양압보호구에 대한 Fit Test는 음압보호구의 Fit Test에 의해 수행되어야 한다.

VIII. 기준과 규정

호흡기보호구에 대한 Fit Test를 미국과 캐나다에서는 요구하고 있으나 대부분의 다른 나라에서는 요구하지 않고 있다. 현 시점에서 호흡기보호구에

대한 Fit Test를 요구하는 기준(standards)과 규정(regulations)을 사용하는 국가로는 미국, 캐나다, 호주, 뉴질랜드로 한정되어 있다. 그러나 Fit Test와 유사한 방법으로 호주, 뉴질랜드, 유럽 대부분의 국가에서는 보호구를 인정하는 과정에서 Total Inward Leakage (TIL) Test를 이용하여 안면과의 Fit 정도를 평가하고 있다(European Committee for Standardization (1), (2), 1989; Standards Australia and Standards New Zealand, 1994). TIL에서는 모든 발생원 즉, Faceseal, 필터, 호기밸브로 유입되는 에어로졸을 테스트하게 되는데 작업장에서 사용하는 필터를 부착한 보호구를 일단의 Panel(예를 들면, 10명)들이 착용하고 측정하게 된다. Non-HEPA 필터를 사용하기 때문에 Filter Penetration이 심각하며 에어로졸 방법을 사용하기 때문에 Sampling시 오는 동일한 결점을 겪게 된다. 이들 방법들은 어떤 보호구가 한 개인에게 얼마나 잘 Fit되고 있는지 예측할 수 없다.

1. QLFT 대 QNFT

ANSI Z88.2와 대부분의 OSHA 규정에서는 Tight-Fitting 보호구에 대해서 QLFT나 QNFT

중 어느 것이나 사용하도록 정하여져 있다(ANSI Z88.2-1992; 29 CFR 1910; 29 CFR 1926; 29 CFR 1910.134; Federal Register 59). 그렇지만 일부 OSHA의 특수물질(substance-specific) 규정에 의하면 어떤 상황에서는 QNFT만을 사용하도록 요구하고 있다. 표 1은 QNFT 방법을 사용토록 한 OSHA의 규정을 정리한 것이다. 표에서 보는 것 처럼 석면, 카드뮴, 납에 대해 Full-Facepiece 보호구를 테스트할 때 오직 QNFT를 사용토록 정하였으나 허용기준 10배까지는 QLFT를 사용해도 되는 것으로 만들어 놓았다(OSHA CD-ROM A95-3 (1), (2)). 단지 최근의 기준에서는 QLFT와 QNFT를 어떻게 사용해야 하는가를 기술해 놓았다. QNFT Protocol를 가지고 있는 기준들(석면, 벤젠, 카드뮴, 포름알데히드, 공사중 납, 메틸렌디아닐린)은 에어로졸 발생기와 챔버를 가지고 있는 에어로졸 광도 측정법을 기술해 놓고 있다(29 CFR 1910.1001). 그러나 OSHA는 CNC와 CNP 법의 사용도 허용해 놓고 있다(Department of Labor, 1994). 불행하게도 새롭고 앞으로 개발되어 사용가능한 더 진보된 기법에 대한 특별기준은 현 단계에는 마련되어 있지 않다.

어느 한 방법이 다른 방법보다 더 좋은 방법이라는 것을 아직까지는 보여주지 못하고 있다. Half-Facepiece 보호구에 대한 WPF의 연구들은 ANSI에서 요구하는 것처럼 Fit Test가 매우 유용한 것임이 밝혀졌으나 어느 한 방법이 더 좋은 보호정도를 밝혀주는지는 확실치 않다(Colton, 1994). 앞에서도 언급했듯이 호주, 캐나다 그리고 뉴질랜드에서도 보호구 사용시 fit test를 요구하는 기준을 만들어 놓았다. 이들 기준들도 QLFT와 QNFT의 사용을 모두 "밀접한" 관계로 사용하도록 정해 놓았다. 또한 에어로졸 광도 측정법이나 CNC 법 모두를 허용하고 있다.

2. Fit Test 회수

OSHA의 Respiratory Protection Standard에는 Fit Test의 회수와 Fit Test를 해야할 보호구의 형태에 대해서는 모호하다(29 CFR 1910.134). 이 기준에 의하면 음압보호구를 착용하는 모든 피고용자들은 Fit Test로 QLFT나 QNFT를 반드시 받아야 한다고 명기하여 놓았다. 이것은 피고용자들은 유해환경에서 보호구를 착용하기 전에 Fit Test를

반드시 받아야 하며 새로운 제품이나 새로운 모델을 사용할 때는 다시 재 Fit Test를 받아야 함을 의미한다. 표 1 특수한 물질에 대한 Fit Test 회수를 명시하여 놓았으며 이것외에도 벤젠, 포름알데히드, 4,4'-메틸렌디아닐린은 매년 1회씩 수행하도록 되어 있다(29 CFR 1910).

OSHA의 기준이 모든 물질에 대한 Fit Test의 회수를 명확히 해 놓지 않은 반면, 한 연구에서는 반복된 Fit Testing의 결과들이 더 좋은 FF 값을 가졌다고 보고하였다(Johanson과 Morgan, 1984). 이것은 착용자가 자신의 보호구에 대한 착용 경험에 익숙해진 결과라고 생각된다. 이 결과는 Fit Test를 반복해야 하는 회수를 정하는데 도움을 주었다. 따라서 OSHA의 Respiratory Protection에 관한 Proposed Rule에 의하면 최초 테스트 후 1년에 1회씩 하도록 요구하고 있다(Federal Register 59, 1994). ANSI에서는 최초 Fit Test 후 1년에 1회씩 그리고 새로운 제품이나 모델이 선정되었을 때 다시 Fit Test를 하도록 권고하고 있다. 또 보호구의 심각한 무게변화(10 % 혹은 20 pounds 이상)나 치아모양의 변화로 Facepiece Sealing에 방해를 받게 되면 반복하도록 되어 있다(ANSI Z88.2-1992). OSHA의 석면 Standard에는 착용자의 Facepiece Sealing에 이상을 초래할 조건이 발생하면 즉각 Fit Test를 재수행하도록 요구하고 있다(29 CFR 1910.1001). 다른 나라의 기준들도 이와 비슷한데 호주, 뉴질랜드, 캐나다의 기준에서도 보호구를 선정할 때, 매년 1회, Facial Seal에 이상을 초래할 경우 반복해서 Fit Test를 수행하도록 규정하였다(Canadian Standards Association, 1993; Standards Australia and Standards New Zealand, 1994).

3. Test Exercises

Test Exercises는 Fit Test 수행시 Facesal Leakage를 찾아내는데 가장 중요한 요소로 생각된다. OSHA는 Test Exercises를 사용하지 않는 어떤 새로 개발된 방법이라고 할지라도 일련의 Exercises가 이루어져야 한다고 강조하고 있다(Federal Register 59, 1994). 우선적으로 작업시 있을 수 있는 머리와 얼굴의 움직임을 고려하여 다섯가지 Test Exercises가 만들어졌다. 이들 Exer-

cises들은 정상호흡(normal breathing), 깊은 호흡(deep breathing), 머리의 좌우운동(head side-to-side), 머리의 상하운동(head up and down) 그리고 말하기(talking) 등이며 상하좌우의 머리운동을 하나로 수행하고 조깅(jogging)을 추가하기도 한다. 정상호흡은 여섯번째 다시 한번 수행하도록 되어 있다. OSHA는 어떤 QNFT Protocols에는 다른 Exercises를 추가시켰다. Test Exercises의 형태와 수는 OSHA의 특수물질 기준 사이에 일정하지 않다. 벤젠, 카드뮴, 포름알데히드 그리고 공사중 납은 QNFT 수행시 여덟가지의 운동을 수행하도록 되어 있으며 이들 기준에는 웃기(grimace), 제자리에서 조깅이나 발가락을 잡기 위한 굽히기(bending over to touch the toes)가 추가된다. 석면과 메틸렌디아닐린의 QNFT에서는 아홉가지가 포함되는데 이상의 것들을 모두 수행토록 하였다. 이러한 불일치는 보호구에 대한 프로그램을 운영하는 데 어려움을 줄 뿐만 아니라 이렇게 변화를 주는 것이 꼭 필요한 것인지 또 이러한 변화가 보다 더 나은 Protection을 제공하여 주고 있는지 정확한 근거도 모호한 상태이다. 웃기 Exercise는 피검자들 사이에 반복해 수행하기가 어려운 안면표현(facial expression) 운동이다. Hyatt(1974)는 안면표현운동은 Standard Exercise에 포함시키지 말도록 권고하였다. 정상호흡은 여러가지 Test Exercises 수행시 깨어진 밀착상태가 다시 회복되었는지를 확인하기 위하여 맨 마지막에 다시 한번 수행한다. OSHA Protocols에서는 웃기만을 제외하고 모든 Exercises를 1분 동안 수행하도록 요구하고 있다. 웃기 Exercise는 15초 동안 수행하도록 되어 있다(29 CFR 1910).

호주/뉴질랜드 기준에는 QNFT 수행시 Test Exercise에 대해 특별한 언급이 없으나 QNFT 수행시에는 정상호흡, 깊은 호흡, 머리의 좌우운동과 상하운동, 말하기, 상황에 맞는 기타 운동을 30초 동안 수행하도록 되어 있다(Standards Australia and Standards New Zealand, 1994). 캐나다 기준에는 QNFT 수행시 5가지 서로 다른 기본 Test Exercises를 수행하도록 되어 있다(Canadian Standards Association, 1994).

4. 최소 FF 요구치

QNFT는 어떤 값이 더 나은 Fit 정도를 나타내 주

는지를 객관적인 값으로써 제공하여 준다. ANSI Z88.2는 음압보호구에 대해서 최소 FF 요구치로 Assigned Protection Factor (APF)의 10배를 요구하고 있다. APF란 보호구 착용을 훈련받고 적절한 Fit로 보호구를 착용한 사용자들에 적절한 기능을 가지고 있는 등급으로 구분된 보호구가 제공하는 작업장에서의 보호기대치로 정의된다(AIHA's Committee, 1985). 쉽게 말해서 APF란 보호구를 선정하는 데 사용되는데 만약 APF 10이란 어떤 작업장의 유해물질 허용농도가 10배 이내로만 존재하면 사용가능하다(ANSI Z88.2-1992). 이 권고는 최소 FF를 유지하기 위해서는 Safety Factor를 10으로 잡았다는 의미이다. 아직까지는 FF와 WPF 사이에 명확한 상관관계가 밝혀지지 않았기 때문에 지금까지 사용되어 온 최소 허용 FF 값이 다소 임의적으로 선정된 값이 있다. 그러나 많은 연구들은 Pass/Fail를 이용한 QNFT로 선정된 보호구를 작업장에서 착용하고 있는 한 모든 작업자들이 적절한 수준의 보호를 받았다는 결과를 보여 주고 있다(Dixon과 Nelson, 1984; Colton 등, 1989; Colton, 1994).

OSHA의 특수물질기준에는 QNFT시 필요한 최소 FF 요구치가 일정하지 않다. OSHA는 6개의 특수 물질, 즉, 석면, 벤젠, 카드뮴, 포름알데히드, 공사중 납 그리고 메틸렌디아닐린에 대한 것이다. 표 2는 최근 FF의 최소 요구치를 요약한 것이다. 일반적으로 최소 FF는 APF의 10배이지만, 석면과 메틸렌디아닐린에서는 다른 Pass/Fail 수준을 설정하여 놓았다(29 CFR 1910.1001, 1994; 29 CFR 1910.1050, 1994). 이들 모든 기준에서 OSHA는 따로 따로 세번의 QNFT를 수행해야 하며 이중 가장 낮은 FF가 최소 요구 FF 값 이상일 것을 요구하고 있다. 이것은 중요한 의미를 갖는데 앞서 기술한 QNFT의 Pass/Fail 수준을 사용함에 있어 동일한 보호구와 피검자를 다른 QNFT 방법들로 측정했을 때 하나의 기법이 인정되면 또 다른 기법은 인정할 수 없다는 뜻이다. 현재까지 한 기법과 다른 기법간의 상관관계는 인정되지 않고 있다.

호주/뉴질랜드 기준은 최소 FF 값을 설정해 놓지 않았다. 캐나다는 측정한 FF 값이 그들 기준에서 정해 놓은 APF와 동일하든지 초과하면 Fit Test를 통과한 것으로 인정하고 있다(Canadian Standards Association, 1993).

결 론

Fit Testing 방법을 QLFT와 QNFT로 나누어 설명하고 QNFT 방법을 중심으로 그 원리, 장단점을 상세히 알아 보았으며 아울러 Fit Test 제도에 대한 규정도 살펴 보았다.

에어로졸 발생기와 광도측정기기를 이용한 에어로졸 방법은 OSHA가 인정하고 최초로 상품화된 QNFT 방법이며 수치를 사용하여 Fitting이 적합한 보호구를 선정하여 주기 때문에 산업위생분야에 많은 도움을 주었다. Fit Test의 필요성이 증가하면서 CNC방법이 개발이 되었으며 이 방법은 에어로졸 발생기가 불필요하여 널리 사용되게 되었고 역시 OSHA에 의해 인정받았다. 이 방법은 기기가 작고 가격이 저렴한 장점을 갖고 있으나 에어로졸 방식이 갖고 있는 보편적인 문제, 즉, 보호구 내부에서 에어로졸의 불완전한 혼합과 인체 호흡기내 에어로졸의 침착으로 야기되는 측정 오차의 문제점을 안고 있다.

보호구내부에 존재하는 에어로졸은 결국 Face-seal Leakage를 통해 들어오는 공기와 함께 유입된 것임을 인식한 사람들은 "Fit 정도를 보다 잘 나타내 주는 Parameter로써 Faceseal을 통하는 공기흐름을 측정하는 것이 바람직하다"는 것을 깨닫게 되었다. CNP 방식은 바로 이것을 이용한 것이며 OSHA에 의해 이미 인정 받았고 폭 넓은 평가를 거치면서 사용이 증가하고 있는 중이다. 공기흐름을 이용한 이 방식은 좋은 정밀성과 반복성을 갖고 있으나 측정시 호흡을 멈추어야 하고 머리 움직임에 따른 공기의 유입정도를 나타낼 수 없는 단점을 안고 있다.

어느 방법이 더 좋은 방식이라고 결론 내릴 수는 없으나 현 단계보다 더 나은 QNFT방식의 개발이 요망되며 또 새로운 규정 역시 새로이 개발될 방식들을 수용할 수 있도록 바뀌어야 한다. 현 규정들은 Fitting에 적합한 보호구를 선정하기 위한 목적으로 만들어져 있다. 기존 기술로 어떤 위치의 안면 뒤를 림에서 Fitting상에 심각한 유입을 유발하는지 그 머리의 위치를 결정할 수 있다. 최근 새로 개발된 기술로 유해 환경에 투입전후에 착용자 자신의 보호구에 대한 Fit정도를 측정할 수 있다.

현재 우리나라에서는 Fit Test에 대한 개념조차 정립되지 않은 상태이며 따라서 어떤 규정이나 제도

도 마련되어 있지 않은 상태이다. 더구나 호흡기보호구의 연구가 미미하고 많은 작업자들이 외국산 보호구를 사용하고 있기 때문에 Fitting 정도를 평가하기 위해서 Fit Test 제도의 마련은 매우 시급하다고 할 수 있다. Stauder 등(1995)의 미국내 한 병원의 QLFT 프로그램 연구에서 Hispanic계 여자와 아시아계 남성들에게 Fitting정도가 가장 나빴다는 점을 우리는 의미있게 받아 들여야 할 것이다.

REFERENCES

- AIHA's Respiratory Protection Committee: Respirator performance terminology : *Letter to the editor. Am Ind Hyg Assoc J* 1985; 46(5):B22-B24
- American National Standards Institute : *American National Standard for Respiratory Protection (ANSI Z88.2-1992)*, New York, American National Standards Institute, 1992, 1-15
- "Asbestos." *Code of Federal Regulations Title 29, Part 1910.1001*, 1994, 34-42
- Australian and New Zealand Standards : *AS/NZS 1716:1994, Respiratory Protective Devices, Homebush, NSW 2140 Australia:Standards Australia*, 1994
- Biermann AH, Bergman W : *Filter penetration measurements using a condensation nuclei counter and an aerosol photometer. J Aerosol Sci* 1988;19(4): 471-483
- Biermann AH, da Roza RA, Sawyer CR, Foote KL, McCormack C, Sackett CR : *Evaluation of Portacount for determining respirator fit factors, Part II: Laboratory breathing machine tests of stability and comparison with an aerosol photometer. J Int Soc for Respiratory Protection* 1991;9(2):26-41
- Blanchard JD, Willeke K : *Total deposition of ultra-fine sodium chloride particles in human lungs. J Applied Physiol: Resp Environ and Exer Physiol* 1984;57:1850-1856
- Brown RC: *Protection factors of respirators with special reference to dust respirators. J Int Soc for Respiratory Protection* 1992;10(1):5-33
- Burgess WA, Silverman L, Stein F: *A new technique for evaluating respirator performance. Am Ind Hyg Assoc J* 1961;22(6):422-429
- Burnis RP: *A comparison of fit factors determined by an aerosol method and a dynamic negative pressure method. Master's research project report, Department of Environmental Health Sciences, University of Alabama at Birmingham*, 1991
- "Cadmium." *Code of Federal Regulations Title 29,*

Part 1910.1027, 1994, 204-208

Canadian Standards Association : Z94.4-93, *Selection, Use, and Care of Respirators*, Rexdale, Ontario, Canada, Canadian Standards Association, 1993

Carpenter D, Willeke K (1) : *Noninvasive, quantitative respirator fit testing through dynamic pressure measurement*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1988;49(10):485-491

Carpenter D, Willeke K (2) : *Quantitative respirator fit testing: dynamic pressure versus aerosol measurement*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1988;49(10):492-496

Center for Disease Control and Prevention : *NIOSH Recommended Guideline for Personal Respiratory Protection of Workers in Health-Care Facilities Potentially Exposed to Tuberculosis*, Washington, DC., Government Printing Office, 1992, 32-55

Chan TL, Loppmann M : *Experimental Measurements and empirical modeling of the regional deposition of inhaled particles in humans*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1980; 41(6):399-409

Chen CC, Lehtimäki M, Willeke K : *Aerosol penetration through filtering facepieces and respirator cartridges*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1992;53(9):566-574

Chen CC, Willeke K (1) : *Aerosol penetration through surgical masks*. *Am J Infect Control* 1992;20(4):177-184

Chen CC, Willeke K (2) : *Characteristics of face seal leakage in filtering facepieces*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1992; 53: 533-539

Chen SK, Vesley D, Brosseau LM, Vincent JH : *Evaluation of single-use masks and respirators for protection of health care workers against mycobacterial aerosols*. *Am J Infect Control* 1994;22(2):65-74

Colton CE : *Qualitative fit testing or quantitative fit testing: Which one should you use?* 3M JobHealth Highlights, Vol 12(2), St. Paul, MN, 3M, 1994, 3-4

Colton CE, Birkner LR, Brosseau LM (eds) : *Respiratory Protection: A Manual and Guideline*, 2nd ed., Fairfax, VA, American Industrial Hygiene Association, 1991

Colton CE, Johnson AR, Mullins HE, Rhoe CR : *Workplace protection study on a full facepiece respirator*, Paper presented at the AIHCE, St. Louis, MO, May 1989

Crosby DW : *Quantitative respirator fit testing-Which technology to use?* (A News Letter: Respiratory Protection Update, 6(1), Jefferson, Maryland, Respirator Support Services, 1995

Crutchfield CD, Eroh MP, Van Ert MD : *A feasibility*

of quantitative respirator fit testing by controlled negative pressure. *Am Ind Hyg Assoc J* 1991;52(4):172-176

Crutchfield CD, Murphy RW, Van Ert MD : *A comparison of controlled negative pressure and aerosol quantitative respirator fit test systems by using fixed leaks*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1991;52(6):249-251

Crutchfield CD, Murphy RW, Van Ert MD : *A comparison of controlled negative pressure and aerosol quantitative respirator fit test systems by using human subjects*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1991;54(1):10-14

Crutchfield CD, Pham TK, Van Ert MD : *Determination of inspiratory pressure and flow rates for work rate-dependent quantitative respirator fit testing*. *Appl Occup Environ Hyg* 1993;8(2):103-107

Crutchfield CD, Van Ert MD : *An examination of issues affecting the current state of quantitative respirator fit testing*, *J Int Soc Res Pro* 1993;11(2):5-18

Crutchfield CD, Park DL, Hensel JK, Kvesic MK, Flack MD : *Determination of known respirator leakage using controlled negative pressure and ambient aerosol QNFT systems*, *Am Ind Hyg Assoc J* 1995;56(1):16-23

Danisch SG, Mullins HE, Rhoe CR : *A quantitative fit test for dust/mist respirator: part II*. *Appl Occup Environ Hyg* 1992;7(4):241-254

da Zoza RA, Biermann AH, Foote KL, McCormack C, Sackett CR : *Evaluation of Portacount for determining respirator fit factors, part III: human subject tests and comparison with an aerosol photometer*. *J Int Soc for Respiratory Protection* 1991;9(3):22-37

da Roza RA, Cadena-Fix CA, Carlson GJ, Hardis KE, Held BJ : *Reproducibility of respirator fit as measured by quantitative fitting tests*, *Am Ind Hyg Assoc J* 1983; 44(11):788-794

Dixon SW, Nelson TJ : *Workplace protection factors for negative pressure half-mask facepiece respirator*. *J Int Soc for Respiratory Protection* 1984;2(4):347-361

Ernstberger HG, Gall RB, Turok CW : *Experiments supporting the use of ambient aerosols for quantitative respirator fit testing*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1988;49(12): 613-619

European Standards (1) : *EN 136 Respiratory Protective Devices: Full-face Masks, Requirements, Testing, Marking*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 1989

European Standards (2) : *EN 140 Respiratory Protective Devices: Half-masks, Quarter-masks; Requirements, Testing, Marking*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 1989

Han D, Xu M, Foo S, Pilacinski W, Willeke K :

- Simplified pressure method for respirator fit testing. Am Ind Hyg Assoc J* 1991;52(8):305-308
- Hinds W, Kraske G : *Performance of dust respirators with facial seal leaks: I. experimental. Am Ind Hyg Assoc J* 1987;48(10):848-854
- Holton PM, Tackett DL, Willeke K : *Particle size-dependent leakage and losses of aerosol in respirators. Am Ind Hyg Assoc J* 1987;48(10):848-854
- Holton PM, Willeke K : *The effect of aerosol size distribution and measurement method on respirator fit. Am Ind Hyg Assoc J* 1987; 48(10):855-860
- Hyatt EC : *Respiratory studies for the National Institute for Occupational Safety and Health July 1, 1972 through June 3, 1975, Los Alamos Scientific Laboratory (LA-5620-PR), Los Alamos, NM, 1974*
- Hyatt EC, Pritchard JA, Richards CP: *Respirator efficiency measurement using quantitative DOP man test. Am Ind Hyg Assoc J* 1972;33:635-643
- International Commission on Radiological Protection : *Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract. Health Phys* 1966;12: 173-207
- Iverson SG, Danisch SG, Mullins HE, Rudolph SK : *Validation of a quantitative fit test for dust/fume/mist respirators: part I. Appl Occup Environ Hyg* 1992;7(3): 161-167
- Japuntich DA, Johnston AR : *Respirator leak tracking using a fluorescent aerosol. Paper presented at the International Society for Respiratory Protection Conference, Toronto, Canada, October 1987*
- Johanson RE, Morgan MS : *Some observations on frequency of respirator fit tests, Am Ind Hyg Assoc J* 1984; 45(2):134-135
- Johnson BR, Bjork KA, Weed JB : *A new sampling technique that allows quantitative fit testing by using the employee's own respirator. Am Ind Hyg Assoc J* 1992; 53(12):776-779
- Krishnan U, Willeke K, Juozaitis A, Lehtimäki M, Szewczyk K (1) : *Development of a dichotomous-flow quantitative fit test for half-mask and full-facepiece respirators. Am Ind Hyg Assoc J* 1994;55(3):223-229
- Krishnan U, Willeke K, Juozaitis A, Myojo T, Talaska G, Shukla R (2) : *Variation in quantitative respirator fit factors due to fluctuations in leak size during fit testing. Am Ind Hyg Assoc J* 1994;55(4):309-314
- Laye R : *Evaluation of a miniaturized condensation nucleus counter for measurement of respirator fit factor. J Int for Respiratory Protection* 1987;5(3):1-7
- Letimäki M, Willeke K : *Measurement methods. In Aerosol Measurement, ed. by K. Willeke and P.A. Baron, New York, Van Nostrand Reinhold, 1993*
- McGlone JT : *Quantitative respirator fit testing through dynamic pressure decay measurement. Appl Ind Hyg* 1988;3(11):F27-F29
- "Methylenedianiline," *Code of Federal Regulations Title 29, Part 1910.1050, 1994, 461-468*
- Myers WR, Allender JR : *Causes of in-facepiece sampling bias - II. Full-facepiece respirators. Ann Occup Hyg* 1988;32(3):361-372
- Myers WR, Allender JR, Iskander W, Stanley C : *Causes of in-facepiece sampling bias - I. Half-facepiece respirators. Ann Occup Hyg* 1988;32(3):345-359
- Myers WR, Allender JR, Plummer R, Stobbe T : *Parameter that bias the measurement of airborne concentration within a respirator. Am Ind Hyg Assoc J* 1986;47(2):106-114
- Myers WR, Kim H, Kadrichu N : *Effect of particle size on assessment of facepiece leakage. J Int Soc for Respiratory Protection* 1991;9(3):6-20
- Myers WR, Lenhart SW, Campbell D, Provost G : *Letter to the editor. Am Ind Hyg Assoc J* 1983;44(3): B25-B26
- Myojo T, Willeke K, Chen CC : *Fit test for filtering facepiece: Search for a low-cost, quantitative method. Am Ind Hyg Assoc J* 1994;55(9):797-805
- National Institute for Occupational Safety and Health (1) : *Guide to Industrial Respiratory Protection (DHHS/NIOSH Pub. No. 87-116), Washington, D.C., Government Printing Office, 1987, 3-123*
- National Institute for Occupational Safety and Health (2) : *Respirator Decision Logic (DHHS / NIOSH Pub. No. 87-108), Washington, D.C., Government Printing Office, 1987, 50-51*
- Occupational Safety and Health Administration : "29 CFR 1910.134(e)(5)-Respirator Fit Testing "[Compliance Directive CPL 2-2.29] Washington D.C., October 27, 1980
- "Occupational Safety and Health Standards," *Code of Federal Regulation Title 29. Part 1910. 1994, 66-584*
- Oostenstad RK, Graffeo JB : *Determination of respirator fit by an aerosol method and a negative pressure method. J Int Soc for Respiratory Protection* 1994; 11(3):6-14
- Oostenstad RK, Hollenbeck SM, Sherill JL : *Variation of respirator fit among the exercises of a quantitative fit test as measured in a respiratory protection program, Paper presented at the AIHCE, Kansas City, Missouri, May 1995*

Oestenstad RK, Perkins JL, Rose VE : *Identification of face seal leak sites on a half-mask respirator*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1990;51(5):280-284

OSHA CD-ROM (1) : Miles JB to Sekulic T, 25 September 1986, *Occupational Safety and Health CD-ROM (QSHA 95-3) through June 1995*, Washington, D.C., 1995

OSHA CD-ROM (2) : Shepich TJ to Boggs RF, 8 February 1988, *Occupational Safety and Health CD-ROM (QSHA 95-3) through June 1995*, Washington, D.C., 1995

"Quantitative Respirator Fit Testing Requirements and Compliance." *Memorandum from U.S. Department of Labor, Washington, D.C. 20210, dated June 24, 1994*

"Respiratory Protection," *Code of Federal Regulations Title 29, Part 1910.134*, 1994, 413-417

"Respiratory Protection; Proposed Rule," *Federal Register* 59: 219(15 November 1994), 58884-58956

"Respiratory Protective Devices; Final Rules and Notice." *Federal Register* 60: 110(8 June 1995), 30336-30398

Rose JC, Oestenstad RK, Rose VE: *A comparison of respirator fit factors determined by portable condensation nuclei counting and forward light-scattering photometric methods*. *Appl Occup Environ Hyg* 1990;5(11):792-797

"Safety and Health Regulations for Construction," *Code of Federal Regulations Title 29, Part 1926*, 1994, 1-951

Sinclair D, Hoopes GS : *A continuous condensation nucleus counter*, *J Aerosol Sci* 1975;6(1):1-7

Standards Australia and Standards New Zealand : *AS/NZS 1715, 1716, Respiratory Protective Devices, Selection, Use and maintenance of Respiratory Protective Devices*, Homebush, NSW 2140 Australia, 1994

Stauder T, Conroy LM : *A descriptive study of a hospital respiratory protection qualitative fit test program*. *Presented at the AIHCE, Kansas City*, May 1995

Weber A, Willeke K, Marchioni R, Myojo T, Mckay R, Donnelly J, Liebhaber F : *Aerosol penetration and leakage characteristics of masks used in the health care industry*. *Am J Infect Control* 1993;21(4):167-173

Willeke K, Ayer HE, Blanchard JD : *New method for quantitative respirator fit testing with aerosols*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1981;42:121-125

Willeke K, Krishnan U : *Present pressures in quantitative fit testing: problems and potential solutions*. *Appl Occup Environ Hyg* 1990;5(11):762-765

Xu M, Han D, Hangal S, Willeke K : *Respirator fit and protection through determination of air and particle leakage*. *Ann Occup Hyg* 1991;35(1):13-24