

산업역학에서의 폭로평가

백 도 명
서울대학교 보건대학원

산업장 근로자들의 건강상태에 대한 역학조사에서는 건강에 대한 조사와 함께 산업장에서 폭로되는 건강유해요인들에 대한 적절한 평가가 함께 이루어 져야 한다. 이러한 산업장에서의 폭로에 대한 평가가 역학조사에서 제대로 이루어지기 위해서는, 일정한 원칙에 따른 폭로평가가 이루어져야 하며, 또한 평가된 폭로에 대한 정확도 및 신뢰도가 파악되어야 한다.

여기서는 산업역학에서 폭로평가시에 고려되어야 하는 원칙들을 살펴보고, 산업역학에서 사용되고 있는 여러 다른 폭로평가가 갖는 제한성을 제시된 원칙에 따라 살펴보도록 한다. 마지막으로 수행된 폭로평가상의 오차가 결과에 미치는 영향을 간단히 살펴 보도록 하며, 이러한 오차를 파악하고 줄일 수 있는 방안을 살펴보도록 한다.

I. 폭로평가 대상 및 방법 선정의 일반원칙

역학과 독성학 - 관찰과 실험

병인론에 적합한 병과 그의 원인

폭로평가의 6원칙

Who Epidemiologist?, Industrial Hygienist?

Why 평가의 목적 - Dose

What 평가대상 - 질병의 원인 그 자체 혹은 유사원인, covariate

Where 표본추출

How 평가방법

When 평가주기 및 시기

과학은 자연현상으로서의 사물의 생성과 변화에 대한 원인을 밝히고자 체계적으로 원인현상과 결과현상을 분류, 측정 및 분석하는 사고체계의 산물이다. 이러한 과학적 사고체계에 있어 역학과 독성학은 모두 인간을 비롯한 생물에게 일어나는 현상을 기술하고 그에 대한 원인을 규명하고자 학문적으로 접근하는 방법으로서, 개인과 집단에 대한 관찰을 하거나 실험을 통하여 집단내 변화와 집단간의 차이에 대한 원인을 밝히는 학문이다. 역학은 좀 더 구체적으로 '인간집단내 발생하는 질병의 빈도와 분포를 결정하는 요인들에 관하여 연구하는 학문'으로 정의되고 있으며, 이러한 역학에서 폭로평가는 집단에서 관찰되는 건강에 영향을 미치는 요인에 대한 폭로를 결과현상과 맺을 수 있도록 평가하는 것이다. 한편 산업장 역학조사상의 폭로평가는 일반적인 폭로평가의 원칙과 함께 산업장 폭로에 특수한 성격들을 고려하여 이루어져야 한다.

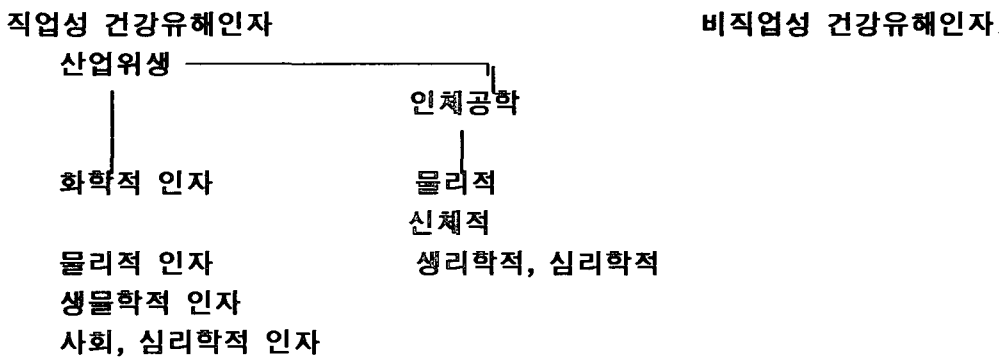
산업역학에서 다루어야 하는 산업장 유해요인의 전문적인 평가는 흔히 산업위생사에 의하여 이루어지고 있다. 그러므로 산업역학조사상의 평가주체는 역학조사를 총괄하여 담당하는 조사자보다는 산업장 유해요인에 대한 전문적 평가를 할 수 있는 산업위생사가 담당하거나 최소한 기본 평가자로 참여하는 것이 바람직하다. 이러한 독립적인 폭로평가는 후에 기술할 역학조사 설계에 있어 질병군과 대조군에 대한 일정하지 않은 평가로 인한 비뚤림(Bias)을 방지하기 위하여서도 바람직하다. 한편 비뚤림을 초래하지 않을 객관적인 최소한의 자료를 가지고 수행하게 되는 특정 조사에서는 전문적인 산업위생사의 참여없이 역학조사자가 직접 폭로에 대한 평가를 할 수도 있다.

실제 역학조사에서 요구되는 폭로평가의 목적은 작업환경의 개선 혹은 허용농도 준수 여부를 평가하기 위한 폭로평가와 상이하기 때문에 폭로평가에 있어 역학조사자와 산업위생사와의 충분한 의견교환이 필수적이다. 역학조사에서 폭로를 평가하는 궁극적인 목적은 질병의 발생과 변화가 관찰되는 개인에게서 혹은 그러한 개인내 변화의 한 시점에서, 질병의 원인이 될 수 있는 유해인자가 질병의 발생과 변화에 직접적 영향을 미칠 수 있는 위치에 얼마나 많은 양(Dose)이 존재하는지를 평가하기 위함이다.

산업역학에서 다루어야 하는 평가대상은 다른 모든 역학조사에서와 같이 산업장 근로자들 질병의 직접적 원인 이외에도 기타 모든 혼란변수(confounder, effect modifier를 포함)를 망라하여야 한다. 진폐 등의 전형적인 직업병을 비롯하여 근로자들의 질병은 산업장 건강유해요인 이외에 다른 일반 비직업적 건강유해요인에 의하여서도 발생하거나 그 진행이 영향받으므로 실제 산업역학의 평가대상은 직업적 및 비직업적 건강유해요인이 모두 포함이 된다. 특히 직업성 폐질환에 있어 흡연은 반드시 함께 조사되어야 한다.

한편 산업역학에서의 폭로평가의 방법과 주기는 이미 알려진 직업병 혹은 직업관련성 질환의 병인론과 수행하고자 하는 조사에서 새로이 검증 혹은 조사하고자 하는 병인론에 비추어, 이에 맞는 형태로 모든 조사대상 요인들에 대하여 최소한의 수준 이상의 평가가 되도록 하여야 한다.

II. 산업장 폭로평가의 대상



공간적, 시간적 변이 (Spatial and Temporal Variability)
 대수정규분포 - log normal distribution

평가기준 (Operational Definition)

범주형

명목변수(Nominal Scale)

순위변수(Ordinal Scale)

연속형

등간변수(Interval Scale)

등비변수(Ratio Scale)

산업역학에서 다루어지는 폭로로는 산업장에서 폭로되는 화학물질 등의 전형적인 건강유해요인들을 비롯하여, 유해요인들이 질병을 발생시키는데 있어 영향을 미치는 근로자 자신의 특성, 혹은 이러한 유해요인에 대한 보호책이나 혹은 유해요인들이 관리되는 방안 등 다양한 형태의 관심사들이 조사대상이 되고 있다. 이러한 다양한 요인들에 있어 공통되는 것은 산업장에서 발견되고 작용하는 것으로, 대표적인 것이 산업위생의 주요 평가대상인 화학적 건강유해요인들이다. 그 외에 다른 전형적인 건강유해요인들로서 소음, 고열, 진동 등의 물리적요인, 감염원, 알려지된 등의 생물학적 요인, 그리고 직업성 스트레스와 같은 심리학적 요인이나 효과적인 안전교육 등의 사회적인 요인 등이 조사되고 있다. 이와 같이 매우 다양한 폭로가 산업역학의 조사대상이 될 수 있으나 본 고에서는 산업위생의 주요 평가대상이 되는 화학적 건강유해요인을 중심으로 기술하고자 한다.

유해요인의 경우 한 중요한 특징으로 언급되어야 하는 것이 폭로의 가변성이다. 이러한 가변성은 비단 공간적으로 만이 아니라 시간적으로도 가변적이며, 특별한 변화없이 일상적으로 근무하는 경우에도 근로자들 간에 있어 그리고 관찰되는 기간에 걸쳐 많은 변화를 보이고 있다. 이러한 변화는 일반적으로 대수정규분포(Log-Normal Distribution)를 보이며, 일부 조사된 폭로에 있어 이러한 분포상에 가변도를 나타내는 기하표준편차는 상당히 클 수 있음을 보여주고 있다.

측정이란 일반적으로 정해진 기준에 따라 사건이나 현상을 분류하는데 있어 숫자, 문자, 혹은 간단한 기술과 같이 일정한 기호를 부여하는 작업을 일컫는다. 실제 이러한 작업의 근간에는 경험된 사항을 평가기준이라는 추상적인 개념에 따라 정리 연결하는 과정이 벌어지고 있다. 그러므로 이러한 측정에 있어 사용되는 개념과 그에 따른 기호에 의거한 평가기준에 따라 폭로평가를 범주형 변수와 연속형 변수로 나누거나, 좀 더 자세히 종사직업, 종사산업 등의 명목변수, 폭로의 정도에 따른 공정의 나열과 같은 순위변수, 공장개시 년도와 같은 등간변수, 그리고 산업위생학적 폭로측정값과 같은 등비변수로 나눌 수 있다. 등비변수는 등간변수와 달리 그 기준점을 기준으로 하여 서로 비교하였을 때, 기준점으로 부터의 떨어진 거리의 비가 실제 변수가 나타내는 현상의 양이나 정도의 비를 나타낼 수 있는 변수이다.

직업성 스트레스와 같은 경우 계량화된 측정의 어려움으로 인해 범주형 변수를 사용

한 평가가 주로 이루어지듯이, 산업역학에서의 측정 평가대상의 특성에 따라 사용될 수 있는 평가기준이 결정이 되기도 한다. 그 평가척도로는 또한 다음에 기술할 바와 같이 폭로의 변이로 인하여 계량적 측정기준을 사용하였을 때 오차의 발생이 클 것으로 예상되는 경우, 오차가 없이 적절한 평가치를 구할 수 있는 정성적 평가척도를 선택할 수도 있다.

III. 평가단위에 따른 표본 추출의 방법 및 제한

폭로평가의 단위 - 장기조직 혹은 개인, 사업장 혹은 공정, 직업 혹은 업종

사업장 - 물적환경, 인적환경, 사회적환경

물적환경

사업장의 위치지역

사업장의 물적공간

사업장의 공정 - 유해물질의 발생, 폭로의 강도, 폭로의 경로

인적환경

근로자 작업방법 - 보호구착용

근로자 건강상태

사회적환경

근무형태, 근무시간, 임금체계, 안전 및 보건관리체계

| 평가단위 | 평가 개인화의 정도 |
|------|------------|
| 업종 | 불량 |
| 사업장 | V |
| 공정 | V |
| 개인 | 양호 |

산업장에서 폭로되는 유해요인은 공간적 시간적으로 달라지고 있다. 한 사업장안에서 공간에 따라 폭로가 달라지는 요인으로는 사업장의 지형적 위치, 사업장내의 시설 및 건축의 배열, 사업장안의 서로 다른 공정의 연결 및 사용 유해물질의 종류 등의 물적환경요인들을 들 수 있다. 그 외에도 근무하고 있는 근로자들의 작업방법이나 보호구의

착용여부, 그리고 근로자들의 일반 건강상태 등 인적환경요인과 근무형태, 근무시간, 임금체계, 안전 및 보건관리체계 등의 사회적환경요인 등을 또한 들 수 있다.

그러므로 이렇게 변화하는 폭로를 평가하는 단위로서 가장 적절한 것으로 개인적인 폭로를 직접 측정할 수 있는 것이 바람직하다. 그러나 개인폭로를 비롯하여 실제 폭로의 측정은 변화가 가능한 모든 장소에서 측정하는 것이 가능하지 않다. 현실적으로는 이러한 변화가능한 범위 중에서 표본을 추출하여 평가를 하게 되며, 이러한 표본의 선정범위를 얼마나 넓게 잡는가에 따라 폭로평가의 적절성에 제한이 있게 된다.

Ever vs. Never employed in industry

example: Standardized Mortality Ratio (SMR)

assumption: equivalent distributions of non-occupational disease determinants in the occupational and reference groups

**issues - healthy worker effect
dilution of exposure category**

흔히 사용되는 폭로평가의 단위로 가장 넓게 범위를 잡은 것으로 종사업종 혹은 종사직업을 들 수 있다. 이러한 경우 기본적인 가정은 업종이나 직업에 따른 고유한 폭로가 있으며 조사하고자 하는 폭로 이외에 질병에 영향을 미치는 다른 폭로들은 업종이나 직업에 상관없이 동일하게 분포하고 있다는 것이다.

그러나 이러한 종사업종 혹은 종사직업에 따른 폭로의 평가에서 흔히 문제되는 것은 폭로가 일어날 수 있는 업종이나 직업에 종사하는 근로자들 개개인에 있어 실제 폭로되고 있지 않는 근로자들이 있으며, 또한 상대적으로 적은 비율이더라도 다른 업종이나 직업에 종사하는 근로자들 중에도 문제되는 건강유해요인에 폭로되는 근로자들이 존재하여 폭로구분이 희석되는 결과를 초래하는 것이다. 또한 조사하고자 하는 업종이나 직업에 고유한 폭로 이외에도 업종이나 직업에 따라 질병에 영향을 미치는 다른 요인들이 동일하지 않게 존재할 수 있는 바, 대표적으로 일반인들을 대조군으로 사용하는 경우 건강근로자효과(Healthy Worker Effect)를 들 수 있다.

Length of Service in the industry

employment duration as surrogate of dose from one exposure

employment duration as surrogate of getting multiple risks

assumption: 1) intensity levels are relatively constant throughout work areas of the plant, 2) intensity levels have not varied substantially over time, 3) work assignment into higher and lower intensity jobs is not made on the basis of tenure, 4) non-occupational risk factors do not vary systematically according to employment duration

**issue - dynamic vs fixed cohort
short-term workers**

다른 폭로평가의 단위로 사업장을 들 수 있는데, 사업장에 근무한 경력은 사업장 전체를 한 단위로 하였을 때 폭로의 정도를 가르키는 평가로 사용될 수 있다. 이러한 사업장에 근무한 경력을 폭로평가로 사용하는 경우 기본적인 가정은 서로 다른 공정이나 사업장내 공간에 따른 폭로의 강도가 일정하다는 것, 또한 시간적으로도 폭로의 강도가 예전과 지금을 비교하여 변화가 없었다는 것, 근무경력에 따라 작업배치가 달라지더라도 선택적으로 폭로의 높낮이에 따라 배치되지 않는다는 것, 그리고 비직업적인 건강유해요인에의 폭로가 근무기간에 따라 변화하지 않는다는 것 등이다.

실제 근무력은 문제되는 사업장에 근무함으로써 문제되는 유해요인에 폭로되는 총량을 평가하거나 혹은 문제되는 유해요인이 다수인 경우 이러한 다수중에 하나라도 폭로될 수 있는 위험도를 평가하는데 사용이 되고 있다. 그러나 전방이나 후방 cohort조사에서 cohort에 포함되는 조사대상이 일시점에서 폭로된 대상이 아니라 어느 일정기간 동안에 폭로된 대상이 포함되는 경우, 처음 사업장이 설립되면서는 높은 폭로가 있었으나 점차 폭로가 낮아짐으로써, 실제 폭로가 있었던 시점에 따라 폭로의 강도나 성격이 다른 경우가 흔히 관찰되고 있어 폭로평가로서 근무력 사용의 적절함이 제한되고 있다. 또한 근무력이 짧은 집단의 경우에는 장기근무를 하는 집단과 비교하여 직업적 폭로이외에 흡연이나 음주 등의 건강관련행위, 결혼이나 교육 등의 사회적지위 등이 다른 것이 흔히 관찰되고 있어, 근무력에 따라 비직업적 건강유해요인에 차이를 초래할 수도 있다.

**Job Categories by process division or task duties
mutually exclusive categories based on process division or**

similarity of job duties

issue - job mobility

longest held job?

last job?

most frequent job?

age and year of exposure

person-years of analysis

assumptions: 1) job categories are independent from one another, at least with respect to health outcome, 2) employment duration within a job category is a surrogate of exposure

issue: job mobility pattern

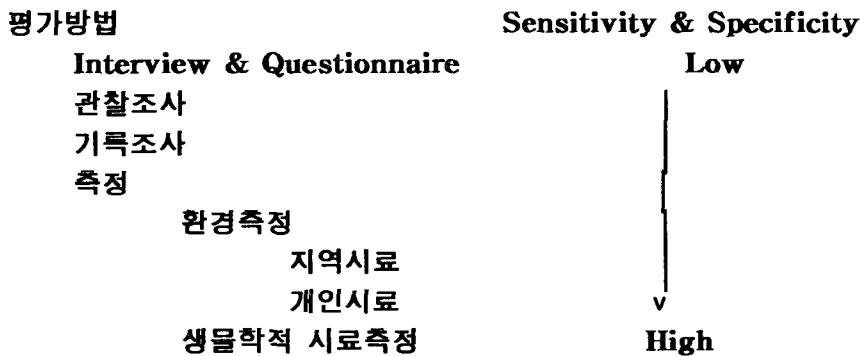
다음으로 사용되는 폭로평가의 단위로는 공정 혹은 작업에 따른 폭로평가를 들 수 있다. 이러한 공정 혹은 작업에 따른 폭로평가를 하는데 있어 주로 동일 폭로군 (Homogeneous Exposure Group)의 개념에 따라 여러개의 공정 혹은 작업단위를 묶기도 하고 혹은 같은 공정내에서 여럿으로 나누기도 한다.

동일폭로군은 같은 혹은 비슷한 정도의 폭로에 노출이 되거나 그 노출의 분포가 비슷한 근로자집단을 가리키는 개념이다. 이러한 동일 폭로군을 정의하는 접근방법으로 수행하고 있는 과제에 따라 분류를 함으로써 접근을 하거나, 혹은 수행하는 직책에 따라 분류를 하여 접근을 하거나, 혹은 폭로되고 있는 물질 하나 하나에 따라 분류를 하여 접근할 수 있다. 이와 비슷한 개념으로 폭로근로자들을 동일 폭로지역(Exposure Zone)에 따라 분류하는 방법이 제시되기도 하는 바, 동일 폭로지역은 작업내용의 유사성, 취급유해물질의 유사성, 환경의 유사성에 근거하여 서로 겹치지 않는 지역으로 분류할 수 있다.

이상과 같이 폭로를 동일폭로군 혹은 동일폭로지역에 따라 평가하더라도, 근로자들이 한 사업장에서 근무하는 동안 실제 한 지역이나 한 직종에만 종사하지 않고, 서로 다른 지역이나 서로 다른 직종으로 이동을 할 수 있어, 이와 같은 근로자의 이동을 고려하여야 한다. 그러나 이동을 하는 많은 근로자들의 경우 가장 최근에 근무한 폭로지역 혹은 가장 오래 근무한 지역, 아니면 가장 빈번하게 근무한 지역이 서로 다르므로 가장 적절한 폭로로 어느 것을 평가하여야 하는 것인지에 따라 그 폭로평가가 달라질 수 있다.

실제 이동을 자주 하는 근로자에 있어 어떠한 폭로평가가 이루어 져야 하는 지가 연구된 것은 드르나, 한 근무자가 근무하게 되는 서로 다른 직책을 모두 폭로평가에 포함 시키기 위한 방안으로 각각 근무한 직책에 근무년수를 곱하여 직책별로 모든 근로자의 자료를 묶는 직책 인년의 평가방법이 제시되기도 한다. 그러나 이러한 평가도 역시 이동근무한 부서에서의 나이와 폭로된 년도에 따르는 특성을 모두 고려할 수 있는 형태는 아니다.

IV. 폭로평가방법에 따른 제한



한 개인의 폭로를 평가하는데 있어 평가방법으로 설문지를 사용하거나, 관찰을 통하여 평가하거나, 평가를 위한 것이 아닌 다른 목적으로 수집된 기록들을 사용하여 평가하거나, 혹은 폭로되고 있는 유해요인을 직접 계량적으로 측정할 수 있다. 일반적으로 Interview나 설문조사에 비하여 관찰 및 기록조사 그리고 측정의 순으로 더 높은 민감도와 특이도를 보이는 폭로평가가 이루어 진다.

한편 산업역학에서 쓰일 수 있는 이러한 서로 다른 개인폭로평가방법은 계량적 측정 여부와 사용되는 자료에 따라 크게 3가지로 구분이 되고 있다. 첫째는 계량적 측정이 이루어지지 않거나 혹은 실제 계량적 측정을 하더라도 참고치로 사용이 되며 최종적으로는 범주적 평가가 주축을 이루는 것, 둘째는 계량적 측정을 환경시료를 갖고 하는 것, 그리고 마지막으로 생물학적 시료를 통하여 폭로평가를 하는 것으로 나누어 볼 수 있다. 한편 계량적 측정을 위한 환경시료의 채취방법은 지역시료와 개인시료로 더 자세히 나누어 볼 수 있다.

Job Categories ranked ordinally by exposure

ordinal intensity ranking based on existing environmental data,detailed

knowledge of industrial processes, job tasks and engineering controls

dichotomous

polychotomous

흔히 사용되는 개인폭로의 범주적 평가의 하나로 동일 작업군이나 작업지역에 따라 폭로의 순위를 정할 수 있다. 이와 같은 범주에 따른 평가는 폭로수준의 변이를 개인내 변이와 개인간의 변이, 그리고 각 개인을 집단으로 묶을 수 있는 경우 집단내 변이와 집단간의 변이로 나누어 보았을 때, 개인내 변이가 개인간의 변이보다 매우 커서 일회 측정으로 개인별 폭로평가를 하는 경우 오류가 많이 발생하나, 집단내의 변이 보다 집단간의 변이가 커서 집단에 따른 폭로 평가를 하는 경우 개인별 오류가 적게 발생하는 경우 매우 유용하다.

이러한 범주적 평가인 집단에 따른 구분은 특히 집단간의 특성이 상이한 것을 선형적(a priori)으로 판단하는 경우 측정결과에 바탕을 둔 후협적(post priori)판단 상에 개입을 할 수 있는 측정상의 오류를 배제하기 때문에 더욱 유용하다. 그러나 실제 산업장 폭로평가에 있어 많은 경우 측정을 하지 않고 작업형태나 작업공간에 관한 정보만에 바탕을 두고 선형적인 판단을 하는 것이 매우 어렵거나 불가능하다. 또한 동일 집단이라고 하더라도 개개인별 행동의 특성이나 미세한 차이 때문에 집단내의 변이가 또한 매우 큰 것이 알려지고 있어, 집단 구별이 실제 어려운 경우가 많다.

Quantitative Exposure Intensity Categories

usually for acute, short term effects

for chronic effects, quantification per se will be meaningful if exposure intensities remain constant over time

Quantitative Dose estimation

dose - exposure intensities integrated over time

relative importance of dose subcomponents

- duration, intensity, temporal sequencing

dose as an interaction between intensity and duration

issue - Toxicologic Mechanisms

duration of minimum effective intensity (threshold)

duration of minimum effective duration (latency)

no exposure scheduling effect

quasi-quantitative dose: ordinal ranking combined with duration

issue: ranking - quantitative or qualitative?

quality of concentration data

personal vs area or job sampling

환경폭로 측정에 따른 폭로평가는 폭로기간과 변화양상을 반영할 수 없는 경우 측정 기간동안의 평균 폭로의 세기(Intensity such as concentration)에 따라 이루어진다. 측정기간은 Impinger 등의 포집기를 이용하는 경우 수초, 단기 폭로측정인 경우 15분, 그리고 시간가중치를 계산하기 위한 측정인 경우에도 6-8시간에 머무르고 있다. 이러한 폭로세기에 대한 측정결과는 주로 폐염, 급성유기용제 중독 등 몇 시간, 며칠 등 단기간에 걸쳐 급성으로 질병이 발생하거나 변화하는 경우에 유용하다. 그러나 진폐증, 암 등과 같이 몇 개월, 몇 년에 걸쳐 만성으로 진행되는 경우에는 문제되는 기간에 걸쳐 폭로세기에 변화가 있는 한 다음 장에서 기술할 바와 같이 폭로평가에 한계가 있다.

폭로세기에 대한 측정이 주기적으로 이루어진 경우, 관찰기간에 걸쳐 폭로세기를 종합하여 폭로된 양(Dose)을 산출하고, 이에 근거하여 폭로평가를 할 수 있다. 일반적으로 폭로량의 산출은 폭로세기, 폭로기간, 그리고 서로 다른 폭로세기가 폭로기간에 걸쳐 분포하고 있는 양상들을 모두 고려하여 이루어진다.

한편 이와 같은 폭로량에 근거한 폭로평가는 폭로량을 산출하는데 기여한 부분들을 따로 따로 평가하고 이를 종합할 수 있어야 의미가 있다. 경우에 따라서 전체 폭로량 보다는 최고로 높게 폭로된 농도가 질병의 발생을 결정하기도 한다. 이러한 경우 관찰기간이 길수록 높은 농도의 폭로세기에 노출될 가능성이 커지므로, 전체 관찰기간에 걸친 폭로량 그 자체보다는 관찰기간이 더욱 의미를 지닐 수 있다. 경우에 따라서는 짧은

기간에 걸친 강한 폭로와 긴 기간에 걸친 약한 폭로가 비슷한 질병발생을 보일 수 있다. 이러한 경우는 폭로기간과 폭로세기와의 혼합작용(Interaction)이 존재하는 것으로, 폭로량(Dose)이 이러한 혼합작용을 나타내는 지표가 된다.

이러한 환경폭로의 평가는 그러나 실제 환경의 건강유해요인이 어떠한 독성기전으로 인체에 작용하는지를 고려하지 않는 한 매우 제한적일 수 밖에 없다. 공기 중의 석면측정을 한 예로 살펴보면, 밝혀지는 독성학적 기전에 따라 그 평가방법이 변화되어 왔음을 볼 수 있다. 즉 예전에는 공기중에서 포집되는 전체 분진에서 크기를 고려하지 않고 분진의 갯수를 측정하였으나, 동물실험 등을 통하여 분진의 특성에 따른 질병발생의 차이가 보고되면서, 현재 산업장 폭로측정의 경우 길이가 5 μ m 이상이며, 길이와 직경이 비가 3:1 이상인 형태로 갯수 측정이 제한되고 있다. 한편 인체에서 직접 석면으로 인한 폐섬유화와 폐장조직내의 석면섬유의 측정을 통해, 석면 분진의 갯수가 아닌 그 표면적이 석면으로 인한 섬유화와 더욱 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되어, 환경측정의 평가 또한 달라져야 하는 것으로 제기되고 있다.

앞서와 같은 독성학적 기전에 근거하지 않는 환경평가의 제한성은 역치(Threshold), 잠복기(Latency), 그리고 병리현상의 시간경과에 따른 변화 등을 고려하지 않는 경우에도 제기될 수 있다. 특히 폭로의 세기가 질병 발생의 관건인 경우, 폭로세기가 어느 정도 이상에서는 정상적인 방어기전이 작동하지 않아 질병이 발생하거나, 또는 그 폭로에 대한 반응이 급격히 증가하거나, 혹은 가역적인 병리상태가 비가역적인 질병으로 진전하는 등의 질적인 차이를 가져오는 폭로수준의 중요한 한계치 혹은 역치가 존재할 수 있다. 이러한 경우 일상적인 폭로수준의 평가는 질적인 폭로의 차이를 반영하지 못하게 된다.

이 밖에 환경측정에 따른 폭로수준의 파악이 갖는 제한성은 기본적으로 산업위생의 질관리에 따라 크게 좌우된다는 점이다. 특히 지역시료 혹은 개인시료 등 환경측정의 대상선정 범위, 그리고 그 선정된 대상의 대표성 등에 따라 좌우되는 환경측정시 표본 추출의 정확성에 따라 폭로평가가 매우 달라질 수 있다. 대부분의 경우 이러한 환경측정의 표본추출과정은 시료의 분석 보다도 전체 측정결과의 정확성에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다.

Effective Dose

biologic dose

absorption, clearance, retention, activation, detoxification

a. time pattern of exposure intensity

b. biological clearance

c. physiologic residence time in the target organ

d. latency

마지막으로 폭로평가는 개인으로부터 채취된 생물학적 시료의 분석에 바탕을 두고 이루어 질 수 있다. 이러한 생물학적 시료에 바탕을 둔 폭로지표는 실제 인체에 흡입되어 일부 제거가 되고 남아 있으면서 인체에 영향을 미칠 수 있는 위치에서 측정됨으로써 질병발생에 연관이 있는 유효한 폭로량을 가리킬 수 있다. 특히 인체 대사에 따라 독성작용이 활성화되거나 약화되는 것을 고려할 수도 있다.

한편 이러한 생물학적 시료분석에 따른 폭로평가는 그러한 폭로평가 지표가 질병발생의 가능성을 직접적으로 나타내는 것이 아닌 한, 환경 시료분석에 따른 폭로평가와 동일한 제한성을 지니게 된다. 즉 독성학적 기전이 알려지지 않은 경우, 혹은 평가하고자 하는 폭로이외의 다른 요인에 의해서도 생물학적 시료분석이 영향을 받는 경우, 폭로평가의 의미가 제한적이 된다. 또한 일반적으로 실험실에서 시료분석의 질관리에 따라 폭로평가의 정확성이 크게 영향을 받고 있다. 한국에서 가장 많이 측정되는 생물학적 시료의 하나로 요중 마뇨산 측정의 경우에도 요중 마뇨산의 농도는 환경폭로와 개 개인의 운동량에 따른 흡수된 전체량 이외에 성별, 인종 혹은 개인에 따른 특성 등으로 인해 영향을 받으며 또한 한 개인내에서도 환경폭로와 관계없이 자연적인 일중변화에 따라 달라지고 있다.

V. 평가기간과 주기 및 시점에 따른 제한

Exposure vs Dose - temporality

issues

Biological Dampening of Exposure Variability

Latency

Exposure Window

환경 폭로 그리고 생체내의 폭로지표로서 건강유해요인의 폭로수준은 폭로가 시작된

이후 시간이 경과함에 따라 변화를 한다. 폭로량(Dose)은 앞서 언급한 바와 같이 시간적으로 변화하는 폭로수준 전체를 총괄하는 지표로서, 폭로량의 산출에 있어 시간이 중요한 부분을 구성하고 있다. 이러한 시간의 중요성은 일반적으로 폭로의 수준이 일정하지 않고 시간에 따라 변동을 보이고 있다는 점(Exposure Variability) 이외에도, 독성학적 기전에 따라 폭로되는 시점과 병이 발생하는 시점 간에는 일정한 시간간격이 있을 수 있다는 점(Latency), 그리고 경우에 따라서는 문제되는 폭로로 인하여 병이 발생되기 위해서는 한정된 연령범위 등과 같이 개체가 일정한 상태에 머무르고 있는 기간 동안에 폭로가 이루어져야 한다는 점(Exposure Window) 등에 있어서도 중요하다.

폭로량의 파악에서 실제 측정되는 폭로수준은 측정되는 기간에 걸친 평균 폭로의 세기로서, 관찰기간에 걸쳐 변동되는 폭로량의 정확한 파악을 위해서는 적절한 측정기간과 그 간격의 설정이 중요하다. 이러한 적절한 측정기간의 설정에는 환경에서 폭로된 유해요인이 생체내에 들어와서 존재하면서 환경 폭로수준의 변동에 따라 생체내 폭로수준의 변동이 어떻게 연관되어 있는지를 파악하는 것이 중요하다. 일반적으로 환경에서 폭로된 유해물질이 생체에 전혀 축적되지 않고 그 반감기가 매우 짧은 경우에는 환경 폭로수준의 변동이 그대로 생체내 폭로수준의 변동으로 이어진다. 그러나 생체내 유해물질의 배설 반감기가 길어짐에 따라 폭로로 인하여 점차 유해물질이 축적되고, 이러한 축적과정을 통해 유해물질의 생체내 수준의 변동폭은 상대적으로 줄어들게 된다. 그러므로 환경폭로 평가에 있어 그 측정기간은 반감기에 따라 설정되어야 하지, 일률적으로 8시간 평균치를 구하는 것은 의미가 없다.

환경폭로수준과 생체내 수준과의 관계에 대한 수리적 분석은 몇가지 가정을 통하여 이루어 질 수 있다. 즉 생체를 유해물질이 생체에 유입되어 배설되는 과정 중에 머무르는 커다란 하나의 방으로 간주하고, 방안의 유해물질의 분포는 균질하게 동일할 것이라는 것, 또한 환경폭로수준의 시간에 따른 변화가 무작위로 이루어 지거나 혹은 어느 일정한 연관성을 가지고 이루어 지는 것 등의 가정하에 계산을 하였을 때, 생체내 축적되고 있는 유해물질 수준의 변동을 제대로 반영하기 위하여서는 한번의 측정기간, 즉 여러번의 측정이 이루어 질 때 그 측정간격이 생체내 반감기의 1/10 정도가 적당하며, 특히 반감기가 2시간 미만이면 15분 간격의 단기측정이 되어야 하고 2시간 이상이면 이와 같은 단기측정이 필요없는 것으로 보고되고 있다. 그러므로 생체내 반감기가 짧은 유기용제 등의 경우에는 8시간 동안 시료포집을 하여 평균농도의 측정을 하는 것이 제대로 생체농도의 변화를 반영하지 못할 수 있다. 한편 반감기가 40시간 이상인 경우에

는 8시간 측정을 한 하루 동안의 평균농도 보다는 반감기에 비례하여 장기간에 걸쳐 측정된 평균농도가 생체내 유해물질의 수준을 반영할 수 있는 것으로 보고된다. 그러므로 장기간의 생체내 반감기를 갖는 산업장에서 폭로되는 많은 독성물질들을 측정하고자 하는 경우, 한국의 작업환경측정과 같은 단 하루의 환경측정은 의미가 제한되게 된다.

현재의 폭로 vs 과거의 폭로

과거 환경폭로평가의 목적

**Compliance Determination
vs Exposure(Dose) Assessment**

과거 생체폭로평가의 목적

**다른 질병이나 건강상태에 대한 평가
alcohol testing for drivers**

과거폭로의 평가방법

과거측정자료 변환

생산량의 변화 + 공정변화, 사용물질변화, 보호구사용

Simulation Study

Job - Exposure Matrix

많은 폭로평가의 경우, 현재 벌어지고 있는 폭로는 자세히 정확하게 평가할 수 있으나, 과거에 벌어졌던 폭로에 대하여서는 평가자료가 부족하거나, 혹은 정확하게 목적에 맞게 평가된 자료가 없거나, 아니면 전혀 평가자료가 없어 제대로 폭로평가를 할 수 없는 경우가 많다. 특히 과거에 이루어진 폭로평가는 그 목적이 현재에 관심을 갖고 있는 질병과 관련되어 폭로량(Dose)을 측정하고자 하는 목적과는 다르게 이루어진 것들이 대부분이다. 환경측정의 경우 많은 경우는 허용된 환경폭로농도를 준수하는가를 평가하기 위하여 수행되고 있다. 이러한 환경측정은 고농도에 폭로될 수 있는 집단을 선정하여, 독성학적 기전에 바탕을 두고 선정된 측정방법을 사용하기 보다는 당시 행정상의 목적을 달성하기 위하여 법규 등에 규정되어 있는 방법을 사용하여 수행된다. 그러므로 고농도에 폭로된다고 의심되는 집단만이 아니라 저농도에 폭로되는 집단이더라도 건강과 연계하여 그 수준을 파악하여야 하는 역학조사상의 폭로평가와는 다른 결과를 초래할 수 있다. 계량분석적 측정을 통한 평가는 평가하고자 하는 폭로수준과 그 범위에 따라 환경 및 생물 시료의 채취 시간, 채취된 시료의 양, 분석방법 등이 달라지는데,

이러한 요소에 따라 그 분석결과의 정확성이 달라지므로, 서로 다른 목적으로 수행된 폭로평가의 정확성 또한 달라지게 된다.

일반적으로 접근할 수 있는 과거에 일어난 폭로를 현재의 시점에서 평가할 수 있는 방법은 없으나, 개별 폭로평가상의 여건에 따라 몇가지 방법이 시도될 수 있다. 현재에 관심을 갖고 있는 물질 그 자체는 아니지만 석면광산에서의 분진농도와 같이 측정하고자 하는 물질을 포함하거나 혹은 밀접한 관계가 있는 물질에 대한 과거의 측정자료가 있는 경우, 현재의 폭로평가에 근거하여 과거의 폭로농도를 유추할 수 있다. 특히 현재와 비교하여 다른 방법을 사용하여 측정된 과거의 측정자료가 있는 경우에는 일반적으로 모든 경우에 다 가능하지는 않으나 적절한 자료변환을 할 수도 있다.

많은 경우 현재에 와서 발견할 수 있는 자료는 과거 생산량에 관한 자료에 국한되고 있는데, 이러한 생산량만을 바탕으로 과거 폭로를 추정하는 접근법이 제시되기도 한다. 즉 동일한 작업방법을 사용하는 작업공간 내에서는 생산량에 비례하여 발생하는 유해물질의 농도도 증가하거나 감소한다는 관찰에 따라, 우선 동질의 작업형태 혹은 작업공간을 분류하고 현재의 폭로농도와 생산량에 근거하여 과거의 폭로농도를 추정하는 방법이 제시되고 있다. 이 경우 과거와 비교하여 첫째 공정상의 변화, 둘째 문제되는 유해물질의 물리화학적 성상의 변화, 그리고 마지막으로 개인보호구의 사용여부에 따라 변화된 양상을 고려하여 평가하게 된다. 이와 함께 일부에서는 실험적으로 과거의 폭로를 재현시킴으로써 과거폭로 양태를 추정할 수도 있다.

한편 이와 같은 방법을 사용하여 계량적인 폭로수준을 평가하지 않더라도, 단지 폭로수준의 질적 변화에 따른 질병발생의 변화를 분석할 수도 있다. 즉 관찰기간에 걸쳐 공정개선시기, 사용물질 대체시기 등 폭로수준과 양태가 확연히 달라지는 시점을 확인하여 폭로된 근로자들을 이러한 시점에 따라 구분하고, 구분된 집단을 따로 따로 분석 비교함으로써, 폭로수준의 변화에 의한 영향을 살펴볼 수도 있다. 또한 계량적인 분석을 하지 않더라도 일반적으로 직업에 고유한 유해인자에의 폭로를 정리한 직업-폭로 관계표(Job-Exposure Matrix)를 이용하여 폭로평가를 할 수도 있다.

VI. 폭로평가상의 오차

Error - validity and reliability (precision)

Differential Misclassification

Differential validity, differential precision

Study Design의 문제

**통제방안 - 오차평가와 보정
방향성이 중요함**

Non-differential Misclassification

Random Error의 평가

통제방안 - 오차평가와 보정

역학조사에 있어 어떠한 평가든 오류를 예상하고 수행하여야 하며, 특히 산업역학에서의 폭로평가는 앞서 평가의 주체, 목적, 대상 선정, 방법, 시기 등에 따라 언급하였듯이 작업장에서의 폭로특성으로 인하여 많은 오류를 범할 수 있다. 이러한 폭로평가의 오류는 일반적으로 평가하고자 하는 실체에 평가결과가 얼마나 근접하고 있는가를 나타내는 정확도(validity)와 다른 연구자가 혹은 다른 시기에 반복하여 평가하는 경우 그 결과들이 얼마나 서로 근접하는가를 나타내는 신뢰도(reliability)로 나누어 볼 수 있다. 폭로평가의 신뢰도는 반복하여 평가함으로써 개선될 수 있으나, 정확도는 폭로평가의 주체, 목적, 대상 선정, 방법, 시기 등을 적절히 개선하지 않는 한 단순한 반복평가로는 개선이 되지 않는다.

한편 폭로평가의 오류는 조사하고자 하는 폭로와 질병간의 관계를 염두에 두고 질병여부에 따라 서로 다른 폭로평가 오류, 즉 서로 다른 정확도와 신뢰도가 발생하는 경우 차별적인 분류오류(Differential Misclassification)가 발생하며, 질병여부와 관계없이 정확도와 신뢰도가 같다면 무차별적인 분류오류(Non-differential Misclassification)가 발생하게 된다. 차별적인 분류오류의 경우 대부분은 역학조사의 설계가 잘못되었기 때문에 발생하고 있으며, 실제 이러한 오류의 평가에 있어 가장 중요한 것은 그 방향성이다. 즉 차별적인 분류오류로 인하여 실제 폭로와 질병발생의 관계가 약화되었는지 혹은 강화되었는지의 방향을 파악하는 일이다. 한편 일반적으로 무차별적인 분류오류는 폭로와 질병간의 관계가 있는 경우, 이를 약화시키는 것으로 알려져 있으나, 일부 다항분류(polychotomous classification)된 폭로평가에서 발생할 수 있는 것으로 제시된 것처럼 폭로와 질병간의 관계에 영향을 미치는 방향이 일정하지 않을 수도 있다.

이러한 폭로평가의 오류는 적절히 평가되고 역학조사를 하기 전에 평가된 경우에는 통제되거나, 역학조사가 이루어진 후에는 결과에 대한 해석을 달리하거나 결과보정이 되어야 한다. 폭로평가상의 오류는 일반적으로 조사에서 사용된 폭로평가와 사용되지 않았으나 좀 더 정확하다고 판단되는 다른 폭로평가 등 서로 다른 두 종류의 폭로평가를 비교하거나(Inter-method validation), 또는 동일한 폭로평가를 수차례 반복하여 시행함으로써(Intra-method validation) 그 오류의 정도를 파악할 수 있다. 폭로평가상의 오류의 정도를 파악하기 위하여 따로 조사를 하지 않더라도 많은 역학조사의 경우 동일한 폭로평가를 개개인당 혹은 동일 폭로군당 시도하고 있는데, 이러한 반복 평가를 통해 평가오류의 보정을 시도할 수도 있다. 가장 간단한 접근법으로 반복평가가 그 순서나 방법 상에 전혀 관계가 없이 무작위로 이루어 지는 것이라면 여러번의 평가결과간의 변이를 개인내 변이와 개인간 변이, 혹은 동일집단내 변이와 동일집단간의 변이로 분산분석(analysis of variance)를 통해 나누어 볼 수 있다. 이 경우 개인내 변이 혹은 동일집단내의 변이는 오차변이(error variance)이며 개인간의 변이 혹은 동일집단간의 변이는 참변이(true variance)로서 두 변이 간의 비를 계산하여 다음과 같이 폭로와 질병간의 상관관계분석상의 상관계수 혹은 회귀분석상의 회귀계수를 보정할 수 있다.

variance ratio: $\lambda = \text{error variance} / \text{true variance}$

regression coefficient: $b = B (1+\lambda)^{-1}$

correlation coefficient: $r = R (1+\lambda)^{-1/2}$

오류의 평가와 보정을 위한 더욱 자세한 접근법은 다음의 참고문헌들에 기술된 것들을 참고할 수 있다:

참고문헌

1. Bruce K. Armstrong, Emily White, Rodolfo Saracci. Principles of exposure measurement in epidemiology. 1992 Oxford University Press, Oxford
2. Harvey Checkoway, Neil E. Pearce, Douglas J. Crawford-Brown. Research methods in occupational epidemiology. 1989 Oxford University Press, Oxford
3. M. Dosemeci, S. Wacholder, J. H. Lubin. Dose nondifferential misclassification of exposure always bias a true effect toward the null value? Am J Epi 1990;

132:746-748

4. N. Esmen. Retrospective industrial hygiene surveys. *Am Ind Hyg Assoc J* 1979; 40:58-65
5. Neil C. Hawkins, Samuel K. Norwood, James C. Rock. A strategy for occupational exposure assessment. 1991 American Industrial Hygiene Association, Ohio
6. S. M. Rappaport, Thomas J. Smith. Exposure Assessment for epidemiology and hazard control. 1991 Lewis Publishers, Michigan
7. Sven Hernberg. Introduction to occupational epidemiology. 1992 Lewis Publishers Michigan
8. Richard R. Monson. Occupational epidemiology. 1990 CRC Press, Florida
9. WHO. Epidemiology of occupational health. 1986 WHO