

질병의 업무관련성평가에서 과거 작업환경측정 결과값의 의미와 활용

성균관대 강북삼성병원 직업환경의학과 교수 / 김수근



서론

업무관련성평가를 위해서는 정확한 노출정보가 필요하다. 지난 수십 년에 걸쳐 작업환경의 노출평가 분야는 점점 더 고도로 복잡해져가고 있다. 정교한 측정 장비가 개발되고 개인별 오염원에 대한 노출량을 측정할 수 있게 되면서 미량의 유해물질과 시간에 따른 노출량 변화를 확인하고 다양한 건강위해영향을 살펴보는 것이 가능해졌다. 또한 노출정보의 정확도를 높이기 위해서는 노출자료를 표준화된 방법으로 수집하고 처리해야 한다는 사실이 강조되기 시작하였다.

근로자 질병의 업무관련성평가에서는 해당 근로자가 어느 정도의 발병위험에 처해 있는지를 판단할 수 있는 노출정보를 도출해내야 한다. 따라서 과거의 노출평가는 근로자가 질병에 걸렸을 때에 그 질병의 업무관련성을 조사하는데 있어서 가장 핵심적인 요소이다. 특히 최근에 직업성 암을 비롯하여 근로자의 만성적인 질병에 대한 산재보상신청이 증가하면서 과거노출정보에 대한 중요성이 부각되고 있다. 근로자의 노출정보에 대한 자료는 질적인 면은 물론 그 범위나 유형이 다양하다. 이런 다양한 노출정보를 이용한 업무관련성평가를 위한 과거노출재구성은 투명하고 과학적 타당성이 굳건해야 하며 일관성과 표준화된 방법을 유지해야 한다. 특히 과거 작업환경측정기록이 있을 경우에 그 기록은 매우 소중한 유익한 정보를 담고 있다.

이 글에서는 과거작업환경측정 결과 값의 변이성을 이해하고 노출양상을 파악하여 업무관련성평가에

적용하는 방안에 대하여 검토하고자 하였다. 업무관련성평가를 위하여 과거작업환경측정 결과값을 수집하고 정리하여 과거노출수준을 평가하는 과정과 이때에 필요한 통계적 기법을 제시하였다.

작업환경측정 결과값의 중요성

작업환경측정 결과값은 근로자 개인에 대한 공기모니터링으로 그 근로자의 호흡 위치에서 관심대상 유해물질에 대한 농도를 측정하는 것이다. 과거의 작업환경측정결과 보고서에서 확인할 수 있는 측정농도 값의 대부분은 해당 유해인자에 대한 직업적 노출기준(occupational exposure levels)에 초점을 맞춘 것이다. 따라서 제일 많이 노출될 것으로 여겨지는 시간대와 근로자에게 적용하여 노출농도가 정해진 기준치를 초과하는지를 결정하기 위하여 최고노출근로자^①에게 주목하였다.¹⁾

다른 한편으로는 측정대상 유해인자의 누락에 대한 법적 규제 순응을 위하여 노출측정이 광범위하게 이루어지고 있어서 검출한계 이하의 측정결과값들이 증가하고 있다.²⁾ 따라서 직업적 노출기준에 관계없이 근로자가 종사한 전시간대에 걸쳐서 노출 수준을 대표할 수 있는 노출농도라고 할 수 없는 경우가 대부분이나, 해당 단위작업장소의 최고노출농도라는 의미를 부여할 수 있다. 한편, 근로자의 만성질환은 노출기준 초과여부 및 초과 확률과 직접 관련이 없고 누적생애노출량(cumulative lifetime exposures)에 영향을 받는다.

작업환경측정결과 보고서는 업무관련성 평가에 필요한 해당 유해물질의 노출여부를 확인할 수 있고, 발생할 수 있는 영향을 가늠해볼 수 있는 유용한 노출정보를 담고 있다. 따라서 업무관련성평가에 작업장 유해인자의 작업환경측정 결과값은 발생할 질병과 연관성을 판단하기 위한 정보로 활용되어야 한다. 한편, 산업안전보건연구원의 근로자질병에 대한 업무관련성조사(직업병 진단) 프로토콜³⁾에서 작업환경측정자료는 일반적으로 환경자료와 생체자료가 피재자의 일부 공간 그리고 일정 기간의 상태만을 반영할 뿐이며, 특히 과거 측정 당시의 측정기술이나 제도가 그 측정결과에 영향을 미쳤다는 것을 감안하여야 한다는 점에서 평가절하하는 입장이 보인다. 그리고 이 프로토콜에서는 과거의 작업환경측정 결과값을 이용하여 노출양상을 파악하고 산재보상신청 근로자에게 노출되었을 정량적인 노출농도를 평가하는 방법에 대한 소개가 없어 아쉽다.

매년 정기적으로 연 2회 이상 작업환경을 측정하고 5년 이상 보관하는 자료를 산업안전보건공단에 데이터베이스하고 있기 때문에 이들 자료를 이용하면 산재신청근로자의 직접 노출농도를 측정한 결과값은 확인하기 어렵더라도 유사하게 노출되는 근로자 군에 대한 정량적인 과거 노출재구성을 하여 업무관련성평가에 활용하여야 할 것이다.

우리나라 작업환경측정제도는 단위작업장소²⁾를 측정대상의 공간적 단위로 삼고 있기 때문에 측정결과 보고서를 이용하여 유사노출군(similar exposure group)³⁾을 선정하고 구분하는 것이 가능하다.⁴⁾ 따라서 작업환경측정결과는 업무관련성평가를 위한 과거노출재구성에서 다른 어떤 자료보다도 질적·양적인 면에서 객관성을 가지고 있다는 점을 부인할 수 없다.

유사노출군의 선정과 검증

산재보상신청 근로자의 과거노출재구성을 위해서는 유사하게 노출되는 근로자를 한 군으로 묶어서 노출양상을 규명하는 방법으로 달성할 수 있다. 근로자의 질병에 대한 업무관련성평가를 할 때에 해당 근로자에 대한 직접적인 과거 작업환경측정 결과값을 확보할 가능성은 거의 없기 때문이다.

대부분의 작업장에서 모든 작업자를 대상으로 노출을 측정하는 것은 어렵고, 또한 모든 작업자를 대상으로 측정이 이루어진다 하더라도 매일 측정하는 것은 거의 불가능하다. 가령 방사선 노출을 측정하는 누적노출량계를 매일 사용하여 이러한 어려움을 극복한다고 하더라도 각 작업자들을 대상으로 매일의 노출을 측정하는 것은 거의 현실적이지 않다. 따라서 작업환경측정 결과 보고서에서 조사대상 근로자와 같은 단위작업장소⁴⁾에서 일한 동료근로자의 측정 결과값을 활용하는 방법이 필요하다. 이런 방법은 과거노출재구성을 용이하게 하기 위하여 조사 대상자의 직업력을 근간으로 유사노출군을 정의하고 구분하면 가능하다.

일반적으로 유사노출군은 정성적인 노출정보를 이용하여 선정하고 구분한다.⁵⁾ 즉, 조사대상자의 직업력과 정성적인 노출정보를 이용하여 유사노출군을 선정하고, 작업환경측정 결과값을 수집하여 통계적 분석기법(특히, 분산분석)을 이용하여 동질성을 평가하고 유사노출군 여부를 검증한다. 또한, 작업장의 95%가 평균노출의 2배까지 해당되도록 근로자를 그룹화할 수 있는 유용한 방법으로 제시되고 있다. 다만, 노출이 직업노출기준의 1/100정도 되는 단위작업장소에서 근로자 평균노출과 10배 정도 차이난다면 이때에는 별로 문제될 것이 없지만, 노출이 직업노출기준의 1/2에서 1배에 해당되는 유사노출군에서 2배 이상 근로자의 평균 노출이 차이가 난다면 고노출에 해당될 수 있으므로 유사노출군의 범위를 보다 엄격하게 정하는 것이 필요하다.

검증된 유사노출군에 대한 노출농도 값의 대푯값과 변이를 산출하여 조사대상자의 노출양상을 규명하며 업무관련성 판단에 합리적인 근거를 제공할 수 있게 된다. 결론적으로 조사 대상자의 직업력을 근간으로 유사노출군을 선정하여 보다 더 나은 과거 노출특성을 규명할 수 있고 해당 질병과 관련성을 보다 명확하고 합리적으로 판단하는 것이 가능해진다. 이와 같이 과거노출재구성을 위하여 유사노출군을

선정하고 구분함으로써 제한된 자원을 잘 분배할 수 있고, 부족한 과거작업환경측정 결과값을 보완하여 해당 근로자의 정량적인 노출을 평가할 수 있다.

또한, 유사노출군에서는 한 명 내지 여러 명의 정성적 또는 정량적인 노출 특성이 단위작업장소 내의 모든 근로자들의 노출을 대표하기 때문에, 유사노출군을 선정하는 것은 노출수준의 크기가 매분, 매시간, 그리고 날짜별로 변화하는 것을 반영한 노출양상을 파악하는데 도움이 된다. 왜냐하면 유사노출군 내의 동료근로자의 작업환경측정은 근로자마다 또는 시간에 따라 노출이 서로 다른 경우에 대한 측정 결과값을 반영하고 있기 때문이다.

따라서 해당 근로자가 종사한 전체 작업기간에 대하여 해당 발병유해인자의 노출양상을 산출하여 발병위험도를 평가하여야 하는 업무관련성평가에서 유용한 현실적인 방안이다. 노출양상은 분포를 규명하고 평균노출농도를 산출하여 판단하게 된다. 이와 같이 노출양상 평가는 노출평균, 표준편차 그리고 신뢰구간 등으로 제시되는 수준 높은 정량적 평가일 수도 있고 지식과 경험 그리고 전문적 판단에 의존하는 정성적인 평가도 가능하다. 이렇게 산출된 노출기준에 대한 상대적인 노출등급을 다음 <표 1>과 같이 정하여 업무관련성평가에 노출강도로 활용할 수 있다.

<표 1> 노출등급 구분 : 직업적 노출기준과 95 백분위수의 추정치의 비교

등급	내용
4	>직업적 노출기준 5% 초과(95백분위수>직업적 노출기준)
3	>직업적 노출기준 0.5배의 5% 초과(직업적 노출기준 0.5배와 직업적 노출기준 사이에 해당하는 95백분위수)
2	>직업적 노출기준 0.1배의 5% 초과(직업적 노출기준 0.1배와 직업적 노출기준 0.5배 사이에 해당하는 95백분위수)
1	직업적 노출기준의 0.1배를 초과안함(095 백분위수<직업적 노출기준 09.1배)

과거 작업환경측정 결과를 근거로 유사노출군을 선정하여 산재보상신청 근로자의 과거노출재구성을 하는 경우에 정량적인 노출양상 규명이 가능하며, 특히 작업공정에 변화가 없었다면 더욱 유용한 자료가 된다.

유사노출군의 기술통계량

노출양상을 제시하는 데에 이용되는 정보는 양적, 질적 자료 또는 둘 다를 포함할 수 있다. 처음에는 질적 정보에 근거하게 되고, 양적 정보를 모아서 유사노출군을 재설정하게 된다. 유사노출군의 측정 결과 값이 부족할 경우에는 다른 사업장의 유사작업공정으로 유사노출군을 확장하여 더 많은 작업환경측정

결과 값을 수집하여 불확실한 노출판단을 줄일 수 있도록 한다. 수집된 정보를 이용하여 다른 사업장의 유사노출군 간의 동질성을 평가하여 유사노출군을 재분류하여 확대할 수 있다. 재분류된 유사노출군의 측정 결과값에 대한 통계적 분석을 하여 조사대상자가 속한 유사노출군의 노출양상을 포괄적으로 제시하게 된다.

결국, 작업환경측정자료가 수집되면 통계적 기법을 이용해서 노출양상의 윤곽을 좀 더 자세히 이해할 수 있게 되고, 다른 요소를 추가하게 되면 업무관련성 평가를 위한 노출양상과 발병위험도를 산출하고 판단하는 데에 기여할 수 있다. 특성이 규명된 노출양상은 업무관련성을 판단하기 위한 발병위험도를 산출하여 관련성이 있는지 없는지를 결정하는 데 사용된다. 수집된 측정값들에 대한 적절한 통계적 기법의 선택과 통계적 분석결과를 해석하는 것으로 산재보상을 신청한 근로자의 과거노출재구성은 완성된다.

과거에 실시된 작업환경측정결과에서 같은 단위작업장소로 유사노출군을 선정하였다면, 해당 근로자 및 동료근로자의 측정 결과값을 수집하여 앞에서 제시한 분산분석의 통계기법을 이용하여 유사노출군 여부를 검정⁶⁾하거나 평균노출값의 2배 이내에 들어오는 경우에 대하여 유사노출군으로 선정하여 노출양상⁷⁾을 평가하기 위해서는 기술통계량을 산출하여야 한다.

유사노출군의 노출양상을 규명하기 위해서 필요로 하는 정보는 측정결과 값의 평균, 표준편차, 기하평균, 기하표준편차, 노출범위, 95% 신뢰구간, 노출기간(hr/day, days/yr), 8시간 시간가중 평균(TWA), 최고노출 수준, 연도별 노출시기(time period; 예 1989년도 등), 노출기간에 따른 누적노출량, 사고나 누출 등으로 인한 노출 가능성, 돌발적인 고농도 노출가능성(excursions), 측정 결과값과 관련된 불확실성과 자료 분석에 사용되는 전제(추정) 조건들이다.

통계적 기법은 다른 것으로는 얻기 어려운 노출양상의 윤곽을 그려보는데 도움을 준다. 통계적 기법을 적용하기 위해서는 수집된 측정값에 대한 분포를 파악해야 한다. 측정값들이 무작위로 모아졌고, 그 자료는 합리적으로 적당한 분포를 따른다는 것을 입증하는 것이 필요하다. 작업환경측정 결과값에 대한 무작위 시료포집과 공기중 모니터링 결과와 관련된 분석오차는 대개 정규분포를 한다. 근무조 안에서의 노출의 무작위적인 변동은 대수정규분포하는 경향이 있다. 다른 분포를 한다고 믿어지는 확실한 이유가 있는 경우가 아니라면, 작업장 노출자료의 고유분포가 대수정규분포를 한다고 가정하는 것이 합리적이다.⁶⁾ 그러나 대수정규분포에 대한 추정은 검정을 해서 확인하는 것이 필요하다.⁸⁾ 어떤 자료 세트의 분포가 통계분석 이전에 입증되어야 한다는 것은 적당한 통계적 기법을 선택하여 주기 때문에 항상 중요하다. 분포가 확인되면 적합한 기술통계량을 산출한다.

기술통계량은 자료를 요약하는데 이용된다. 특히 자료의 중앙집중성을 알아보는 대푯값(평균, 중앙값, 기하평균)과 자료의 흩어진 정도를 측정하는 산포도(영역, 최소값 및 최대값, 표준편차, 기하표준편차)를 구하는 것이다. 노출 대수정규분포에서 평균노출을 가장 잘 나타내는 대푯값은 산술평균이지 기하평균이 아니라는 것을 주목해야 한다. 대수정규분포 자료에서 기하평균은 분포의 중앙값과 같은 값이다. 기하평균이 대수정규분포에서 산술평균보다 낮기 때문에 기하평균을 사용하는 것은 평균노출을 과소추정하게 된다.⁷⁾

통계분석을 할 작업환경측정 결과값의 시료채취 근로자수는 단위작업장소^⑧에서 최고 노출근로자^⑩ 2명 이상에 대하여 동시에 측정하되, 단위작업장소에 근로자가 1명인 경우에는 그러하지 아니하며, 동일 작업근로자수가 10명을 초과하는 경우에는 매 5명당 1명(1개 지점) 이상 추가하여 측정한 것이다. 다만, 동일 작업근로자수가 100명을 초과하는 경우에는 최대 시료채취 근로자수를 20명으로 조정할 수 있다. 지역시료채취방법^⑪에 따른 측정시료의 개수는 단위작업장소에서 2개 이상에 대하여 동시에 측정한 것이다. 다만, 단위작업장소의 넓이가 50평방미터 이상인 경우에는 매 30평방미터마다 1개 지점 이상을 추가로 측정한 것이다.

과거의 작업환경측정 결과값을 수집하여 유사노출군 여부를 검증하고, 분포를 확인하여 적합한 기술통계량을 다음과 같은 순서로 산출한다.

- 유사노출군의 작업환경측정 결과값을 통계분석을 위하여 정리한다.
- 정리한 데이터 세트에 대하여 정규분포를 하는지 검정한다. 정규분포를 하지 않으면 결과값을 대수변환하고 대수정규분포를 하는지 검정을 한다.
- 유사노출군 여부를 검증하기 위하여 각 데이터 세트에 대하여 분산분석을 한다. 분산분석은 유사노출군에서 근로자간의 변동과 근로자내의 변동을 비교하는데 사용된다. 만일 근로자간의 변동 크기가 근로자 내 변동의 크기보다 충분히 크다면 유사노출군이라고 할 수 없다. 따라서 재분류가 필요하다.
- 유사노출군으로 확인이 되면 다음의 기술통계량을 계산한다 ; 표본수, 최대값, 최소값, 범위, 노출기준 초과율, 평균, 중앙값, 표준편차, 95백분위수, 대수전환 자료의 평균, 대수 전환자료의 표준편차, 기하평균, 기하표준편차, 각 평균의 95% 신뢰구간 등


이상과 같이 해당 유해물질의 노출평균농도, 범위 및 분포 등에 대한 기술통계량으로 파악한 노출양상은 산재보상신청 근로자의 해당 질병에 대하여 유의한 발병위험도를 제시한 연구문헌이나 해당 유해물질에

의하여 질병발생이 유의하게 증가하였다는 노출양상(보고된 질병 의심 유해인자에 대한 정량적, 정성적 수준과 그 평가결과 등을 정리)과 비교한다.

결론

근로자가 질병에 걸려서 산재신청을 하게 되면 업무관련성을 평가하게 된다. 이때에 해당 질병을 일으켰을 것으로 의심되는 근로자의 과거에 종사하였던 작업내용을 조사하고 노출정보를 수집하게 된다. 노출에 관한 정보수집에서 과거의 유해물질에 대한 측정 결과값을 수집하였을 때에 이를 어떻게 해석하는 것이 합리적인가에 대한 의사결정방법이 필요하다. 이에 과거 측정 결과값의 의미를 이해하고 평가하여 업무관련성 평가에서 중요한 정보를 제공하는 방법으로 유사노출군 선정과 구분, 유사노출군의 노출농도의 분포 파악, 노출양상을 요약한 기술통계량 산출 및 질병 발생을 증가시키는 노출양상과 비교하는 과정을 제시하였다. 특히, 유사노출군을 선정하여 직접 대상자의 측정 결과값이 부족한 것을 보완하여 정량적인 노출량을 평가할 수 있다는 점을 제시하였다.

이상과 같이 파악된 산재보상 신청을 한 근로자가 포함된 유사노출군의 노출양상은 기존에 해당질병의 인과관계를 규명한 역학연구에서 해당 유해물질의 노출양상과 비교하여 업무관련성평가에 활용한다.

과거노출을 재구성하는 필요성과 관심이 높아지고 있지만 구체적인 방법에 대한 논의는 아직 활발하지 않다. 특히 직업성 암에 대한 관심이 확산되면서 과거노출정보의 필요성이 제기되었다. 국제적으로도 과거노출 재구성에 대한 논의가 본격적으로 이루어진 것은 1990년대 초반부터이다. 여기에서 제시한 과거노출평가는 과거의 작업환경측정 결과값을 활용하는 방법을 제시한 것이다. 

참고문헌

1. Tornero-Velez R, Symanski E, Kromhout H, Yu RC, Rappaport SM. Compliance versus risk in assessing occupational exposures. Risk Anal. 1997 Jun;17(3):279-92.
2. 정재민. 일부 공단지역의 작업환경측정 결과자료 분석을 통한 유해인자 노출수준 및 특성에 관한 연구, 한성대학교 대학원 석사학위논문, 2012
3. 박동욱, 백도명. 근로자질병에 대한 업무관련성조사(직업병진단) 프로토콜(2013 -연구원-233). 산업안전보건연구원. 2013. 5
4. Corn M, N Esmen, Workplace Exposure Zones for Classification of Employee Exposures to Physical and Chemical Agents. Am Ind Hyg Assoc J 1979; 40(1):47-54
5. Kromhout H, Symanski E, Rappaport SM. (1993) A comprehensive evaluation of within- and between-worker components of occupational exposure to chemical agents. Ann Occup Hyg; 37: 253-0.
6. Scheffers, TML. "HYGINIST-AComputer Program for the Lognormal Evaluation of Air Exposure Data." Maastricht, The Netherlands: Scheffers IHOC, 1994.[Software]
7. S. Borjanovic and S. Djordjevic. A method for evaluating exposure to nitrous oxides by application of lognormal distribution. Journal of Occupational Health1999;41:27-32