한국산업위생학회지, 제24권 제2호(2014) ISSN 1226-4326(Print) ISSN 2289-0564(Online)
Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2014: 24(2): 208-218
http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2014.24.2.208

Original Article

건설업 유해화학물질 노출 모델의 개발 및 검증: Tier-1 노출 모델

김승원[1*] · 장지영[1] · 김갑배[2]

[1]계명대학교, [2]한국산업안전보건공단

Development and Validation of Exposure Models for Construction Industry: Tier 1 Model

Seung Won Kim[1*] · Jiyoung Jang[1] · Gab Bae Kim[2]

[1]Keimyung University, [2]Korean Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objectives: The major objective of this study was to develop and validate a tier 1 exposure model utilizing worker exposure monitoring data and characteristics of worker activities routinely performed at construction sites, in order to estimate worker exposures without sampling.

Methods: The Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals(REACH) system of the European Union(EU) allows the usage of exposure models for anticipating chemical exposure of manufacturing workers and consumers. Several exposure models have been developed such as Advanced REACH Tools(ART). The ART model is based on structured subjective assessment model. Using the same framework, a tier 1 exposure model has been developed. Worker activities at construction sites have been analyzed and modifying factors have been assigned for each activity. Korean Occupational Safety and Health Agency(KOSHA) accrued work exposure monitoring data for the last 10 years, which were retrieved and converted into exposure scores. A separate set of sampling data were collected to validate the developed exposure model. These algorithm have been realized on Excel spreadsheet for convenience and easy access.

Results: The correlation coefficient of the developed model between exposure scores and monitoring data was 0.36, which is smaller than those of EU models(0.6~0.7). One of the main reasons explaining the discrepancy is poor description on worker activities in KOSHA database.

Conclusions: The developed tier 1 exposure model can help industrial hygienists judge whether or not air sampling is required or not.

Key words : construction, exposure model, structured subjective assessment

I. 서 론

작업환경관리를 위해서 측정하는 표본의 수는 사용되는 화학물질의 수에 비해서 적은 편이며, 법적으로 관리가 요구되는 화학물질들에 대한 측정을 하는 경우에도 모집단의 모수들을 추정할 수 있을 만큼 많은 수의 시료를 채취하는 경우는 드물다. 이 점에 착안하여 유럽연합에서는 Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals(REACH) 제도를 도입하면서 실질적인 측정 없이 과거노출자료를 바탕으로 화학물질의 독성 및 사용방법에 따라 노출정도를 추정하여 위험성 평가(risk assessment)를 수행하거나, 적은 수의 측정자료를 가지고 베이지안 통계를 이용하여 예상되는 노출농도의 범위를 추정할 수 있도록 독려하고 있다(Fransman et al., 2011).

Cherrie & Schneider(1999)의 SSA 모델은 이후 유

*Corresponding author: Seung Won Kim, Tel: 053-580-5197, Email: swkim@kmu.ac.kr, Baekeun-Gwan, #B50, Department of Public Health, Keimyung University. 1095 Dalgubeol-Daero, Dalseo-Gu, Daegu
Received: May 20, 2014, Revised: June 6, 2014, Accepted: June 18, 2014

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

럽연합에서 REACH에 따라 화학물질을 등록할 때 요구되는 노출수준 추정에 사용되는 노출모델들의 근간이 되었다. 이 연구에 사용된 개념적인 모델들도 만족스러운 수준의 사전확률분포를 제공하였으나, 여전히 할당되는 변수의 범위에 대한 주관적인 선택을 어떻게 반복성 있게 만들 수 있는가 등의 문제를 가지고 있다.

건설업은 제조업과는 달리 ① 연중 같은 작업이 매일 반복되는 경우가 드물고, ② 작업자도 수시로 바뀌며, ③ 많은 작업들이 실외에서 이루어지는 특성이 있다. 따라서 유해인자 노출에 대한 측정 및 예측이 힘든 경우가 많다. 이제까지 축적된 유해인자 노출 측정자료 또한 같은 이유로 많이 한정되어 있다.

현대에 이르러서는 건설업의 많은 작업들이 표준화되어 있어 시공의 각 단계별로 노출되는 유해인자가 어느 정도 특정될 수 있다. 이를 이용하면 유럽연합에서 개발해서 활용하고 있는 REACH tier 1 모델처럼 공정의 특성만을 가지고도 유해물질 노출수준의 범위 및 대표값들을 예측할 수 있다.

본 연구의 목적은 건설업에 대해 측정 없이 작업자 노출을 추정하기 위해 건설현장에서 수행되는 직무의 특성을 모니터링하고 tier 1 노출 모델을 개발하며 작업자의 실제 노출 자료를 이용하여 검증하는 것이다.

Ⅱ. 연구 내용 및 방법

1. 노출 모델 분석 및 노출결정 보정계수

산업보건 분야에서 사용되는 다양한 노출 모델들에 대하여 조사하였다. 이 중 유럽 연합 등에서 노출모델 개발에 주로 사용되는 일부 개념적인 모델에 초점을 맞추어 노출정도를 결정하는 노출결정인자들을 조사하였다.

2. 건설업 작업환경측정 자료 분석

한국산업안전보건공단이 보유하고 있는 역대 작업환경측정 데이터베이스를 분석하여 건설업 분야에서 측정된 자료들의 기본적인 특성을 분석하고 노출모델에 사용될 수 있는 형태로 변형하였다. 한국산업안전보건공단으로부터 2002년부터 2012년까지의 건설업 관련 작업환경측정 데이터를 개인정보를 제거한 상태에서 넘겨받았으며, 이들 중 필요한 데이터를 추려내는데 필요한 기준 등은 연구결과 부분에 자세히 기술하였다.

산업안전보건공단에서 받은 자료 중 많은 자료는 분석에 포함되지 않았다. 데이터베이스는 필드(field)와 레코드(record)로 구분되며, 여기서 레코드는 개별 측정 시에 조사된 내용을 말하고 필드는 조사항목을 가리킨다.

레코드의 배제기준들은 물리적 인자에 대한 레코드와 유럽의 노출모델들이 커버하지 못하는 섬유상 물질 등이 제외되었다. 지역시료는 작업자와의 거리를 알 수 없으므로 이 거리를 이용해서 근거리와 원거리를 나누는 노출모델의 성격과 맞지 않아 배제되었다.

또한, ‘유해물질명’에 ‘소음’, ‘고열’, ‘석면(및 함유물질)’, ‘유리섬유’, ‘기타유해물질’, ‘기타물질’, ‘기타유해인자’, ‘기타화학물질’, ‘혼합물질평가’, ‘단일물질평가’, ‘3000uw/cm 2~1초’, ‘중등작업’, ‘중작업’, ‘경작업’, ‘조도(조명)’, 가스상 물질(‘이산화탄소’, ‘일산화탄소’, ‘황화수소’, ‘아황산가스’, ‘암모니아’, ‘염소’, ‘염화수소’, ‘일산화질소’, ‘이산화질소’, ‘이불화산소’, ‘가연성가스’, ‘이황화탄소’, ‘불화수소’, ‘액화석유가스’, ‘삼불화질소’, ‘삼불화붕소’, ‘산소’)이 포함된 경우와 ‘금회측정치’에 측정값이 없거나 숫자가 아닌 모든 값(‘검출한계미만’, ‘불검출’, ‘미량검출’, ‘흔적’, ‘N.D.’, ‘ND’, ‘TRACE’, ‘-’)인 경우, ‘측정위치 이름’에서 ‘지역’ 또는 ‘지__역’ 항목이 포함된 자료는 제거하였다.

3. 노출 모델 개발

조사된 자료를 바탕으로 노출 모델을 개발하였다. 건설업의 특성에 따라 노출결정인자들의 일부를 단순화 시키는 것이 가능하다. 현장 방문을 통하여 공종별 노출결정인자들에 대한 기본 할당치를 결정하였다. 한국에서 조사된 건설업에 관련된 문헌들을 참고하여 현장 방문을 통하여 관찰할 수 없었던 공종들에 대한 노출결정인자들을 할당하였다. 여기에서 개발된 모델은 오염물질에 대한 실측 없이 과거자료와 노출모델에 기반으로 하여 노출 예상치를 제시하며, 위험성 평가에서 이 수준의 도구를 tier 1 모델이라고 한다. 과거자료의 수가 충분한 경우에 예상되는

노출 범위(예를 들면 90%)와 중앙값 등의 대표값들을 제시하도록 하였다.

4. 노출 모델 검증

건설 현장의 같은 작업 혹은 공종에 대하여 실측된 자료들과 노출결정인자들을 이용하여 노출 모델로 예측한 값들을 비교하여 모델을 검증하였다. 검증에 사용된 통계는 일차적으로 스피어만 상관계수(Spearman correlation coefficients)이며, mixed-effect regression model을 이용하여 그룹 간 및 그룹 내 변이의 크기를 분석하였다.

건설 현장에서 실측된 자료들과 개발된 같은 상황에서 노출결정인자들을 이용하여 노출 모델로 예측한 값들을 비교하여 모델을 검증하였다. 모델 검증에 사용된 유해인자는 일반 건설현장에서 충분진이었다. 2002년부터 2012년 자료를 분석한 결과 소음을 제외한 가장 많은 측정데이터는 분진 및 개별 금속이었다. 산업보건연구원에서 연구하여 발표한 2011년 건설업 보건관리 매뉴얼에서도 물리적 인자인 소음을 제외하면 광물성 분진과 망간, 크롬, 용접흄, 카드뮴 등의 금속이 주요 유해인자임을 보여주었다(Lee et al., 2011). 총분진의 채취 및 분석은 미국산업안전보건연구원(National Institute for Occupational safety and Health, NIOSH)의 Method 0500 공정시험법에 따라 실시하였으며 중량법을 사용하였다.

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

1. 노출모델분석 및 노출결정인자 조사

산업보건 분야에서 노출모델(exposure model)이란 어떤 유해인자에 대하여 작업자가 어느 정도 수준으로 노출되고 있는지를 추정하게 해주는 도구이다.

유럽연합 등에서 이미 개발되어 활용되고 있는 노출 모델들에 대하여 검토하여 모델들의 공통적인 요소와 모델들 간의 비교를 통해 본 연구와 맞는 모델을 선택하는 과정을 거쳤다.

유럽연합에서 개발되어 사용 중인 노출모델 소프트웨어를 크게 나누면 tier 1 모델과 tier 2 모델이 있다. 가장 큰 차이는 측정데이터를 이용하는가의 여부에 달렸다. Tier 1 모델의 경우 사용되는 화학물질과 사용량, 작업환경 등에 기반에서 기존에 측정된 데이터베이스에서 동일한 화학물질이 유사작업에서 사용된 경우에 대한 측정값들을 검색하여 예상되는 노출 범위를 제시해준다.

여기서 주의할 점은 이들 노출모델들은 선별도구(screening tool)로 개발되었다는 점이다. 가능한 보수적으로 노출 예측치를 잡고 필요한 상황에서만 측정을 통하여 노출가능수준을 평가함으로써 자원과 노력을 최대한 절약하는데 그 목적이 있다.

유럽 연합에서 사용하는 노출 모델의 뿌리는 Cherrie et al.(1996)이 제시한 SSA 모델이다. 이 모델에서는 작업자와 유해물질 발생원의 거리에 따라 near field와 far field의 이분화된 노출영역(exposure zone)을 사용한다.

1) Stoffenmanager의 노출모델

Stoffenmanager의 정량적 평가 알고리즘은 Tielemans et al.(2008)에 의해 공개되었다. 이 알고리즘은 전술한 Cherrie의 SSA 모델에을 기반으로 near field(C_{nf}), far field(C_{ff})로 구분하는 것에 더해 확산성 오염원(diffusive source, C_{ds})을 추가하였다. 또한 제어실처럼 작업자를 작업공간으로부터 격리하는 수단이 있는 경우에 대한 승수(η_{imm})를 고려하였다.

$$C_i = (C_{nf} + C_{ff} + C_{ds}) \cdot \eta_{imm} \quad (1)$$

여기서 각 노출원별 농도(C_{nf}, C_{ff}, C_{ds})는 다시 다음과 같이 계산된다.

$$C_{nf} = E \cdot H \cdot \eta_{lc} \cdot \eta_{gv_nf} \quad (2)$$

$$C_{ff} = E \cdot H \cdot \eta_{lc} \cdot \eta_{gv_ff} \quad (3)$$

$$C_{ds} = E \cdot a \quad (4)$$

여기서 각 위치에서의 유해물질 농도는 다음의 승수들(multipliers)의 곱에 의해서 결정된다.

- E : 제품 내부로부터 나오는 유해물질 방출량
- H : 제품을 다루는 방법
- η_{lc} : 작업자 위치에서의 관리방법의 효율
- η_{gv_nf}와 η_{gv_ff} : 각각 near field와 far field에서의 전체 환기 효율
- a : 상대승수

이렇게 계산된 예상농도(C_t)는 Stoffenmanager score라고 부르며, 바로 농도예측에 사용할 수는 없다. Stoffenmanager score를 실측자료와 비교하여 통계적으로 처리한 후 일반적으로 사용하는 농도를 예측할 수 있으며 이 통계처리 부분은 Advanced REACH Tool(ART) 노출모델과 공통적이다.

2) Advanced REACH Tool(ART) **노출모델**

ART에서 사용된 노출 모델은 기본적으로 near field와 far field로 나누어서 계산하는 Stoffenmanager의 접근법과 뿌리가 같다. ART에서는 Stoffenmanager의 승수 대신에 수정계수(modifying factor, MF)라는 용어를 사용하는 등의 차이가 있고 diffusive source 대신 표면오염(surface contamination, Su)에서 오는 노출을 고려한다는 점 등이 다르다 (Tielemans et al., 2008; Fransman et al., 2011).

ART 노출모델의 알고리즘은 다음의 가정에 기반하고 있다. 첫째, near field와 far field 노출이 같은 작업장에서 발생하고 있다. 둘째, 작업조건이 안정적이어서 한 작업을 하는 동안 오염물질 발생량이 변하지 않는다. 셋째, near field와 far field 중 주된 오염물질 발생원(main source)이 하나뿐이고, 만약 주 발생원이 near field에 위치한 경우 far field에 발생원이 하나 더 있을 수 있다.

$$C_i = \frac{1}{t_{total\ tasks}} \sum \{ t_{\mathrm{exposure}} \cdot (C_{nf} + C_{ff} + Su) + t_{non-\mathrm{exposure}} \cdot 0 \} \quad (5)$$

여기서 t는 시간을 나타내며, 작업(task)별로 시간가중평균을 구한다는 것을 알 수 있다.

식 (5)에 사용된 C_{nf}, C_{ff}, S_u는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{nf} = (E_{nf} \cdot H_{nf} \cdot LC_{nf1} \cdot LC_{nf2}) \cdot D_{nf} \quad (6)$$

$$C_{ff} = (E_{ff} \cdot H_{ff} \cdot LC_{ff1} \cdot LC_{ff2} \cdot Seg_{ff}) \cdot D_{ff} \cdot Sep \quad (7)$$

$$Su_{nf} = Su_{factor} \cdot (E_{nf} \cdot H_{nf} \cdot LC_{nf1} \cdot LC_{nf2} \cdot D_{nf}) \quad (8)$$

$$Su_{ff} = Su_{factor} \cdot (E_{ff} \cdot H_{ff} \cdot LC_{ff1} \cdot LC_{ff2} \cdot Seg_{ff} \cdot D_{ff} \cdot Sep_{ff}) \quad (9)$$

여기서 각 위치에서의 유해물질 농도는 다음의 보정계수들(modifying factors)의 곱에 의해서 결정된다.

Table 1. Description of principal modifying factors(MF) (Tielemans et al., 2008)

Principal modifying factor(MF)	Description
Substance emission potential (E)	Determines the intrinsic emission potential of a substance(e.g. dustiness for particulate agents and volatility for liquids).
Activity emission potential (H)	Describes the potential of the activity to generate exposure and is determined by the following characteristics: type and amount of energy transfer, scale (e.g. amount product used), and product-to-air interface(e.g. level of containment).
Localized controls (LC)	Control measures in close proximity of the source intended to remove emissions (e.g. LEV, wet suppression techniques).
Segregation (Seg)	Isolation of sources from the work environment without containment of the source itself(e.g. separate drying room).
Dispersion (dilution)	Natural and mechanical ventilation characteristics, determining the dilution of air contaminants through the room, i.e. between NF–FF zone and FF outside.
Personal enclosure (separation, Sep)	Providing a worker with a personal enclosure within a work environment (e.g. air conditioned cabin).
Surface contamination and fugitive emissions (Su)	Emission related to release of deposited contaminants on surrounding surfaces (including worker clothing) due to natural means or general workplace activities(e.g. moving equipment/vehicles) and unintended and unpredictable leaks from process equipment.

Stoffenmanager에서 사용된 승수들(multipliers)과 같은 개념이지만 조금 더 세분했다고 볼 수 있다. ART 노출모델의 보정계수들에 대한 자세한 설명은 Table 1에 정리되어있으며 이를 도식화하면 Figure 1과 같다.

계산된 C_t 역시 노출점수(exposure score)라는 별도의 이름을 가지고 있지만 Stoffenmanager와 마찬가지로 실측자료와의 비교를 통해서만 사용가능하다.

3) **노출점수와 실측데이터의 비교**

이 부분은 ART와 Stoffenmanager의 공통적인 부분에 해당된다. 식 (6)을 통해서 계산된 값은 노출점수(exposure score)로 단위를 갖지 않는 값(dimensionless)이다. 계산된 노출점수는 그 자체로는 의미가 없고 승수(multiplier, 혹은 변경인자, modifying factor)가 알려진 상황에서 측정된 실측자료와의 비교를 통해서만 의미를 가질 수 있다.

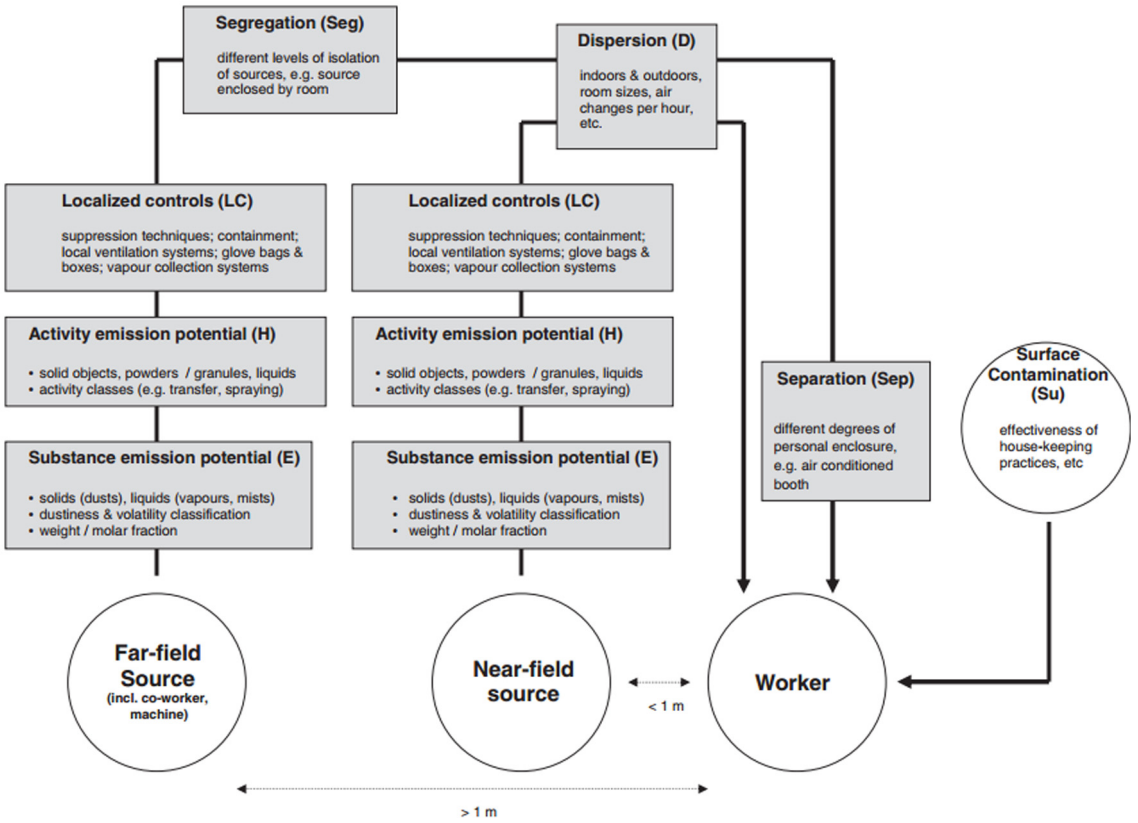

Figure 1. Flow diagram of the ART mechanistic model(Fransman et al., 2011)

검출한계(limit of detection, LOD) 이하의 측정자료는 Stoffenmanager의 경우 Hornung & Reed(1990)의 추천에 따라 LOD의 0.5배의 값을 사용하였다. 본 연구에서는 산업안전보건공단에서 얻은 자료에서는 LOD에 대한 정보가 없어 검출한계 이하의 측정 자료는 분석에 포함되지 않았다. 실측자료는 우선 대수정규분포(lognormal distribution) 여부를 판별하여야 한다.

이는 Kolmogorov-Smirnov test 혹은 Shapiro-Wilk test 등의 통계적 검증방법이나 대수 확률지에 그려보는 등의 시각적 자료검토 등이 가능하다. 대수정규분포가 확인된 실측자료는 노출점수와 함께 로그 변환하여 혼합효과회귀모형(mixed-effect regression model)을 이용하여 다음식과 같이 그룹 내(동일 작업장) 변이와 랜덤효과에 의한 변이를 추정한다.

$$\ln(Y_{ij}) = X_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(C_i) + \delta_i + \epsilon_{ij} \quad (10)$$

여기서 Y_{ij}는 i번째 회사의 j번째 작업자에 대한 측정치이며, X_{ij}는 대수 변환된 측정치이다. β_0는 대수 변환된 측정치의 절편(intercept)이고 β_1은 기울기로 대수 변환된 노출점수의 고정된 효과(fixed effect)이다. δ_i는 i번째 회사에게서 발견되는 랜덤 효과(random effect)이고, ε_{ij}는 i번째 회사의 j번째 작업자에 대한 랜덤 효과이다. 이 분석에서 얻어진 계수들을 사용하면 주어진 노출점수에 따른 예상노출수준($\hat{Y}$)을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{Y} = \exp(\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(C_i)) \quad (11)$$

건설업에서는 야외에서 작업하는 경우가 많고 공사기간동안 청소를 한다고 하더라도 다양한 분진 발생 작업이 지속되어 바닥의 청결상태를 일정수준 이상 유지하기 힘들다. 따라서 표면으로부터 오염되는 요소가 중요하기에 ART 모델이 건설업에는 더 적합하다고 판단되었다. 변수가 더 많아 변이에 대한 설명력이 더 크다는 점도 고려되었다. Schinkel et al.(2010)에 따르면 마모에 의해 발생되는 분진(abrasive dust)의 경우

Stoffenmanager는 변이의 47%를, ART는 66%를 설명할 수 있다. 그 외의 요소들은 비슷하기에 Stoffenmanager를 선택하지 않는데서 오는 불리함은 없을 것으로 판단하였다.

4) 유해물질 방출량(E)의 결정

유해물질의 방출량은 ART 개발팀 중 일원인 Tongeren et al.(2011)에 의해 별도의 논문으로 작성되었다. Tongeren et al.(2011)은 우선 Popendorf (2006)의 논문에 의거하여 유해물질의 노출형태를 7가지 형태로 가스, 증기, 분진, 흄, 미스트, 섬유상물질, 바이오에어로졸로 구분하였다. 유럽연합의 노출모델은 이들 중 증기, 미스트, 분진의 3 가지 형태에 대해서만 구축되어 있다.

이 3가지를 다시 노출모델을 적용 가능한 4가지 범주로 구분하여 보면 Table 2와 같다. 분진의 발생을 고체를 가공하면서 발생하는 분진과 원래부터 분말형태로 존재했던 두 가지로 추가로 나누었으며 이 구분은 모델링에서 매우 중요하다. 원래부터 분말형태로 존재하는 제품의 경우와 고체를 가공하면서 발생하는 경우는 다음 세션에서 설명하는 작업방식(activity)이 확연히 다르며 작업방식을 세세하게 구분하여 할당된 보정계수를 사용하게 된다.

원래부터 분말형태로 존재하는 제품의 경우 분진성(dustiness)에 따라 분진을 발생시킬 수 있는 가능성이 달라지므로 이를 구분하고 각각에 상대승수(relative multiplier, D)를 사용하여 유해물질 방출량을 결정한다.

Table 2. Overview of categories for modelling of 'substance emission potential'(Tongeren et al., 2011)

Categories for modelling substance emission potential	Type of product	Type of exposure
Handling solid objects resulting in dust exposure	Solid objects	Dust
Handling powders resulting in dust exposure	Powders, granules, or pelletized material	Dust
Handling liquids resulting in vapour exposure	Volatile liquids (vapour pressure .10 Pa)	Vapour
Handling liquid resulting in mist exposure	Low-volatile liquids (vapour pressure 10 Pa)	Mist

Table 3. The effect of moisture content on dustiness of powdered, granular, or pelletized products and solid objects

Category	Powders, granules, or pellets	Solid objects
Dry product(,5% moisture content)	1.0	1.0
5-10% moisture content	0.1	0.3
>10% moisture content	0.01	0.03

분진의 발생에 많은 영향을 끼치는 또 다른 요인은 제품의 수분함량이다. 상식적으로 수분함량이 적은 제품은 분진을 발생할 확률이 크다. Table 3과 같이 수분함량에 따른 구분은 3가지 그룹으로 나뉘었으며, 각각의 구분기준은 수분함량 5%와 10%였다.

전술한 부분들을 고려하여 분말 형태의 제품을 사용하는 경우에 유해물질 발생량은 다음 식처럼 계산된다.

$$E = DMW \tag{12}$$

여기서 D는 분진성(dustiness), M은 수분함량에 따른 상대승수(relative multiplier, Table 3), W는 중량분율(weight fraction)이다.

고체로부터 분진을 발생하는 작업에 대해서는 다음 식을 사용한다.

$$E = MW \tag{13}$$

각 변수에 대한 설명은 위와 같고 분진성은 고체로 존재하기 때문에 고려할 필요가 없다.

액체의 제품인 경우 증기압에 따라 증기 혹은 미스트의 형태로 노출 형태가 달라진다. 먼저 증기압이 높아 증기로 작업장에 존재하는 휘발성 액체의 경우를 살펴보면 다음과 같다. 증기의 발생량을 추정할 때 가장 중요한 정보는 증기압이다. 증기압은 물질안전보건자료 등에서 얻는 것이 가능하지만 불가능한 경우 Trouton의 법칙을 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\ln p = -10.6 \times \left(\frac{T_{BP}}{T} - 1 \right) \tag{14}$$

여기서 p는 증기압(단위: atm), T_{BP}는 끓는점(단위: K), T는 액체의 온도(단위: K)이다. 혼합물질의 경우

증기압이 달라지는데 이 경우에는 Raoult의 법칙을 이용하여 해당 액체의 분압(partial vapor pressure)을 결정할 수 있다.

$$p_T = \sum_i x_i p_i \quad (15)$$

여기서 pT는 혼합물의 증기압, x_i는 i 성분의 몰분율(mole fraction), p_i는 i 성분의 증기압이다.

이러한 정보들을 종합하여 증기형태로 노출되는 유해물질의 방출량은 다음 식에 의해서 계산된다.

$$E = \frac{p_{i,mix}}{30,000} \quad (16)$$

증기압이 30,000 Pa 이상인 물질의 경우 즉시 증기화된다. 증기압이 100,000 Pa 이상인 물질의 경우 가스로 분류되며 현재 버전의 노출모델에서는 적용할 수 없는 대상이 된다. 또한 증기압이 낮아서 증발이 어려운 물질에 대한 한계는 10 Pa로 정해져있다. 이런 물질의 경우 미스트로 분류하여 노출모델을 적용하여야 한다.

미스트 형태로 노출되는 유해물질의 경우 다음 식을 적용하여 노출량을 계산한다.

$$E = \frac{10}{30,000} WV \quad (17)$$

여기서 W는 중량분율(weight fraction), V는 점도(viscosity)에 대한 상대승수(relative multiplier)이다.

5) 작업(activity) 분석

작업의 분석은 ART 개발팀 중 일원인 Marquart 등(2011)에 의해 별도의 논문으로 작성되었다. 작업에 따른 유해물질 방출량(activity emission potential, E)은 다음 세 가지의 요인에 의해서 결정될 수 있다. 첫째, 작업 중 전달되는 에너지의 형태와 양(the type and amount of energy transfer during an activity) 둘째, 사용하는 정도(the scale of use) 셋째, 제품과 주변공기와의 접촉 정도(the extent of contact between product and adjacent air 혹은 the product-to-air interface)이다.

REACH에서는 공정 분류(process categories)의 개념이 정립되어 있다(ECHA, 2010). 이 분류법은 처음에 ECETOC TRA에서 사용되었으며 그 후에 Stoffenmanager에 도입되었다. ART에서는 새로운 분류를 사용하였으며 이 분류에서 사용된 용어에 대한 설명은 Table 4에서 확인할 수 있다.

영국의 UK Healthand Safety Executive(HSE, 2008)는 유해물질 발생기전을 12개의 공정으로 분류를 하였고, ART의 분류체계는 이를 바탕으로 발전시켰다. 작업, 작업 분류(Activity Class), 발생기전, 노출결정

Table 4. Assignment of modifying factor by task

Activity	E_{nf}	H_{nf}	LC_{nf1}	LC_{nf2}	D_{nf}	E_{ff}	H_{ff}	LC_{ff1}	LC_{ff2}	D_{ff}	Seg	Sep	Su
concrete sanding & drilling	1	100	1	1	10	0	-	-	-	-	-	-	0.01
formwork building	1	0.3	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	0.01
bricks & tiles stacking	1	1	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	0.01
explosion, drilling	1	10	1	1	10	0	-	-	-	-	-	-	0.01
formwork dismantleing	1	1	1	1	10	0	-	-	-	-	-	-	0.01
interior	1	0.1	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	0.01
waterproofing	1	0.1	1	1	3	0	-	-	-	-	-	-	0.01
shotcrete	1	1	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	0.01
duct installation	1	0.01	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	0.01
sanding & shot blasting	1	10	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	0.01
paving	1	1	1	1	3	0	-	-	-	-	-	-	0.01
operating construction vehicles	0	-	-	-	-	1	10	1	1	0.1	1	0.1	0.01
tunneling & timbering	0	-	-	-	-	1	10	1	1	1	1	0.3	0.01
muck dumping	0	-	-	-	-	1	1	1	1	0.1	1	0.3	0.01

인자(exposure determinant), 매개변수(parameter), 작업별 방출점수(activity emission score) 사이의 관계는 다음의 규칙에 따라 결정되었다.

- 작업 분류(Activity Class)는 한 개 또는 그 이상의 발생기전을 가지고 있고 같은 분류 안에 들어가는 모든 작업들은 이 발생기전을 공유한다.
- 유해물질 발생기전은 유해물질의 발생을 결정하는 한 개 또는 그 이상의 물리적 현상과 관계가 있다. 본 분류에서는 그런 물리적 현상을 노출결정인 자라고 한다.
- 노출결정인자를 노출모델에 사용하기 위해서는 어떤 식으로든 점수화(score) 되어야 한다. 이 과정은 한 개 또는 그 이상의 매개변수를 통해서 이루어진다. 노출결정인자는 정량이 힘든 경우가 있지만 매개변수는 측정, 관찰, 또는 예측하는 것이 가능하다.
- 한 개의 매개변수는 한 개의 노출결정인자와 관련되어 있다.
- 매개변수들은 분류가능하다. ART 노출모델에서 각 매개변수들에게는 고유의 점수가 주어진다.

전술한 기준으로 작업 분류를 수행하고 각 작업 분류별로(있는 경우) 작업 세분류(Activity Subclass), 유해물질 발생기전 및 해당하는 작업들을 예시하고 이를 다시 점수화 할 수 있도록 작업분류별 매개변수를 나열하고 각 매개변수가질 수 있는 입력범위가 정리된 바 있다(Marquart et al., 2011).

6) 노출모델의 개발

선행 연구들에 기초해서 본 연구에서는 ART 노출모델을 기초로 일부 변형을 시도했다. 본 연구에서 각 보정계수에 할당한 승수는 ART 모델에서 각 보정계수에 따른 승수를 사용하였는데 이는 물질을 다루는 방법(Activity emission potential, H)과 물질의 형태 및 노출 종류에 따른 유해물질 방출량에 관한 내용이다. 또한 각각 고체 형태, 분말 형태, 액체 형태의 유해물질에 대해서 활동에 따른 유해물질 방출 가능성에 대해서 승수들을 나열하여 사용하였다(Fransman et al., 2011).

2. 건설업 작업환경측정 자료 분석

2002년부터 2012년 자료를 분석한 결과 소음을 제외한 가장 많은 측정데이터는 분진 및 개별 금속이었다. 이것은 이들 유해인자들이 건설업에서 가장 빈번하게 노출되는 관리가 필요한 항목들임을 나타낸다.

이 사실은 다른 자료에서도 확인되었다. 산업보건연구원에서 연구하여 발표한 2011년 건설업 보건관리 매뉴얼에서도 물리적 인자인 소음을 제외하면 광물성 분진과 망간, 크롬, 용접 흄, 카드뮴 등의 금속이 주요 유해인자임을 보여주었다.

이들 자료를 노출모델에 사용하기 위해서는 다양한 보정계수를 구하기 위하여 측정 당시 상황에 대한 정보가 필요하다. 불행히도 공단 데이터베이스에는 그러한 정보들은 수집되어 저장되지 않았다. 따라서 원칙적으로는 이들 자료를 모델에 사용하는 것이 불가능하다. 하지만 일부 건설현장의 작업들에 대해서는 보정계수를 추정하는 것이 용이하다. 그러한 이유는 많은 작업이 야외에서 이루어지기 때문에 보정계수를 고려할 필요가 없거나, 전국에 걸쳐 비슷한 장비를 사용하여 작업이 이루어지기 때문에 몇 군데의 작업장만 관찰해도 나머지를 추정할 수 있기 때문이다. 도색작업 등의 휘발성 액체에서 유해물질이 노출되는 경우 중량분율 등에 대한 정보를 얻는 것이 불가능하지만 견출작업이나 할석 작업 등의 고체물질을 다루는 작업은 유해물질의 발생량(E)이 아닌 작업방식에 따라 발생량이 정해지기 때문에 상대적으로 적은 변이를 예상하고 모델링을 시도할 수 있다.

3. 노출 모델의 개발

추려진 데이터를 가지고 우선 건설에 각 공종별로 작업(activity)를 분석하고 작업에서 유해물질 발생이나 노출 정도에 영향을 미치는 인자들을 선별하였다. 작업에 대한 정보는 '보고된_공정명(공정코드)', '코드상_공정명', '단위작업장소' 3 가지 필드에 걸쳐 담겨있었으며, 이는 데이터베이스에 입력하는 담당자들이 해당 필드를 잘 이해하지 못하거나 혼동한 것으로 보인다.

상기 필드에 담긴 공정을 Table 4와 같이 구분하였는데 이는 작업의 형태가 다르더라도 노출 모델에서 같은 보정계수를 사용하는 경우 같은 작업으로 분류하였다. 보정계수를 산출할 때 원거리지점(far field)에 대한 정보는 건설장비 운전의 경우에만 계산하고 나머지 작업에서는 무시하였다. 건설장비 운전은 대부분 운전자가 캐빈(cabin) 형태의 폐쇄된 운전석 안에서 작업하기 때문에 근거리지점(near field)에서의

노출은 없다고 볼 수 있기 때문이다. 이들 작업에 대하여 일정하게 할당된 보정계수(modifying factor, MF)는 Table 4와 같다.

4. 노출 모델의 검증

Figure 2처럼 계산된 노출점수(exposure score)와 실측자료를 이용하여 일차적으로 계산된 스피어만 상관계수(Spearman correlation coefficients)는 0.36이었다.

이 값은 유럽모델의 검증결과에 비하면 낮은 수치이다. Stoffenmanager의 상관계수는 0.44-0.83의 범위를 보였다. 이러한 차이를 원인으로는 첫째, 직접 관찰되지 않은 작업들에 대하여, 작업특성에만 기초해서 Table 4에 따라 일괄적으로 보정계수들을 할당함 둘째, 원거리지점에 있는 오염원에 대한 고려가 제외함 셋째, 건설업 특성상 표면에 축적되어 있다가 작업에 의해서 비산되는 분진이 많은데 노출모델에서는 실내를 기준으로 작성되어 이를 반영할만한 계수가 없음(즉, 청소상태가 보통보다 나쁜 '불량' 등급이 있어야 하나 유럽모델에서 찾을 수 없음) 넷째, 보정계수들이 연속변수라기보다는 이산변수에 가까워 계단식의 한정된 값만 사용됨으로 예상할 수 있었다. 유럽모델의 경우 모델의 calibration에 대해서 별도의 논문이 존재한다(Schinkel et al., 2010).

같은 자료를 가지고 mixed-effect regression model을 이용하여 그룹 간 및 그룹 내 변이의 크기를 분석하였으며 이 계수들은 노출모델에서 노출 예상농도를 계산하는데 사용되었다.

예상 노출평균은 식 (20)을 이용해서 계산된 값을 제시하였다. 예상 노출범위의 경우 기하표준편차(GSD)가 4를 초과하는 경우가 드문 점을 감안하여 계산된 예상노출평균과(GM)과 GSD=4인 대수정규분포에서 95% 신뢰구간을 계산하여 제시하였다.

실측치와 모델이 제시한 예상치와의 스피어만 상관계수는 0.23이었다. 낮은 상관성의 이유로는 측정대상 작업이 견출과 형틀해체 등의 작업으로 제한되었고 측정사이트별로 각 작업에 대한 수행행태가 달랐기 때문으로 추정된다.

5. 노출 모델의 구현

현재 버전의 엑셀 스프레드시트의 특징 중 하나는 색을 이용한 안내(color coding)이다. 노란색 셀은 사용자가 직접 숫자를 입력해야하는 경우에 사용하고 제일 위에 있는 안내 페이지도 같은 배경색을 사용하였다.

파란색 셀은 사용자가 주어진 목록 중에 선택(drop-down menu)해야 하는 경우이다. 입력해야하는 각 셀 옆에는 단위가 있고 도움말이 노트 형태로 삽입되어 있다. 인쇄를 하는 경우 한 페이지에 나올 수 있도록 크기를 제한하였다.

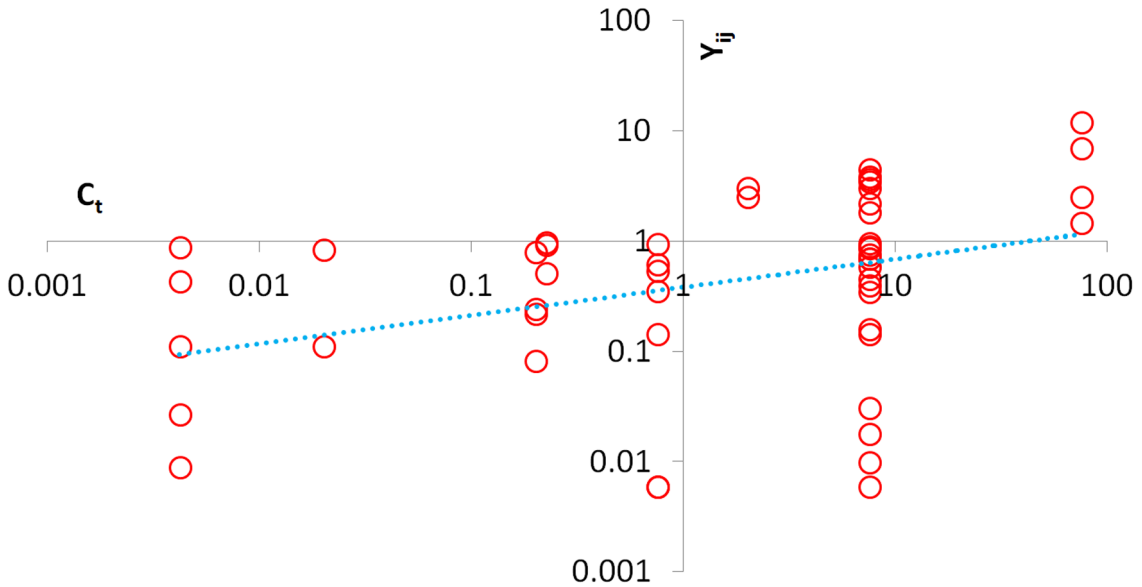

Figure 2. Correlation of exposure score(C_t) and Measured data(Y_{ij}) with r=0.36

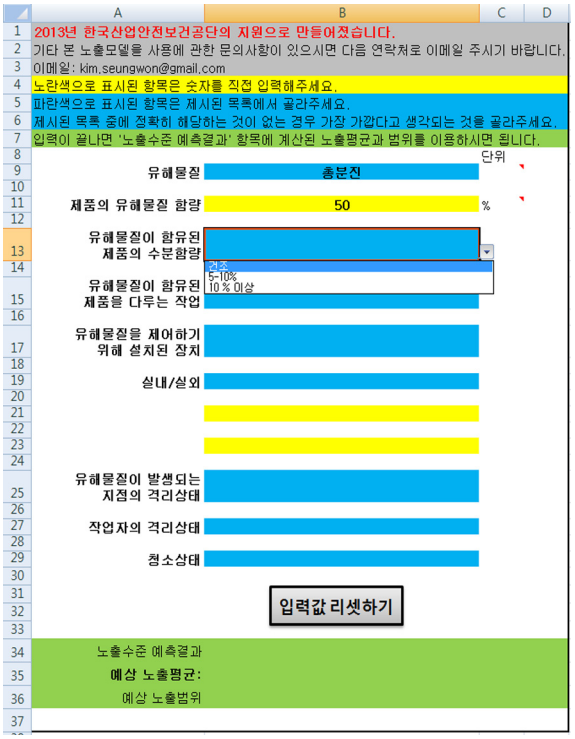

Figure 3. Formation of 'exposure model tier 1' excel spreadsheets tap

Figure 3은 '노출모델-Tier 1'탭을 나타낸 것으로 노출모델의 입력 값만으로 예상 노출평균과 노출범위를 계산한다. 이 탭에서는 매크로가 사용되지 않았다.

유해물질에서는 이번 연구에서 조사된 유해물질들의 목록이 포함되어 있다. 실리카의 경우 노동부와 국외의 관련 조직에서 모두 호흡성 분진을 측정하여 농도를 결정하도록 하고 있다. 본 프로그램에서 사용된 계수는 산업안전보건공단에 축적된 작업환경측정 자료를 사용하여 계산되었으므로 호흡성 분진에 대한 결과로 해석할 수 있다. 하지만 노출모델의 검증에 사용된 실리카 농도는 총분진 중 실리카 농도였으며, 이것은 실리카의 함량을 결정하기 위한 것이었다. 그러므로 이로 인한 예측값과 실측값의 차이에서 오는 오차가 증가할 수 있다.

유해물질 함량의 경우 0-100범위의 숫자만 입력할 수 있으며, 실내/실외 항목에서 요구하는 숫자의 경우 0이나 이보다 작은 음수는 입력하는 경우 에러 메시지가 보여 지고 값을 입력할 수 없다.

'입력 값 리셋하기' 버튼을 누르면 입력 값 들이 초기화되어 입력 값 들을 한꺼번에 지울 수 있다.

Ⅳ. 결 론

유럽 연합에서 주로 사용되는 노출 모델의 프레임을 기반으로 하여 건설업에서 사용될 수 있는 노출모델을 개발하였다. 건설업의 특성에 따라 노출결정인자들의 일부를 단순화 시키고 현장 방문을 통하여 공종별 노출결정인자들에 대한 기본 할당치를 결정하였다. 한국에서 조사된 건설업에 관련 문헌들을 참고하여 현장 방문을 통하여 관찰할 수 없었던 공종들에 대한 노출결정인자들을 할당하였다.

여기에서 개발된 tier 1 모델은 오염물질에 대한 실측 없이 과거자료와 노출모델을 기반으로 노출 예상치를 제시한다. 과거자료의 수가 충분한 경우에 예상되는 노출 범위(예를 들면 95% 신뢰구간)와 기하평균 등의 대표값들을 제시하도록 하였다. 구현된 모델은 유럽연합의 모델들과 비교했을 때 노출점수와 실측치의 상관성이 낮았으며, 그 원인 중 하나는 한국산업안전보건공단에서 보유하고 있는 자료에 노출결정인자들을 추정할만한 자료가 포함되어 있지 않다는 사실이다. 노출모델은 접근성을 높이기 위하여 엑셀 스프레드시트로 구현되었다.

이 연구를 통하여 이후 노출 모델 개발에 있어 필요한 정보와 개발 가능성을 확인하였고, 이후 현장실측치에 대한 데이터베이스를 구축 시 포함시켜야 하는 노출경정인자들을 확인할 수 있었다.

감사의 말씀

이 논문은 2013년도 산업안전보건연구원의 위탁연구 용역사업 지원을 받아 수행된 것(2013-연구원-1196)으로 이에 감사를 드립니다.

References

Cherrie JW, Schneider T, Spankie S, Quinn M. A new method for structured, subjective assessments of past concentrations. Occup Hyg 1996;3:75-83

Cherrie JW, Schneider T. Validation of a new method for structured subjective assessment of past concentrations. Ann Occup Hyg 1999;43(4):235-245

Fransman W, Tongeren MV, Cherrie JW Tischer M, Schneider T, et al. Advanced reach tool(ART):

development of the mechanistic model. Ann Occup Hyg 2011;55(9):957-979

Hornung RW, Reed LD. Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. Appl Occup Environ Hyg 1990;5(1):46-51

Lee IS, Park HH, Seo HK. Development of occupational health manual applicable in construction. Occupational Safety and Health Research Institute; 2011. p. 52-74

Marquart H, Schneider T, Goede H, Tischer M, Schinkel J, et al. Classification of occupational activities for assessment of inhalation exposure. Ann Occup Hyg 2011;55(9):989-1005

Popendorf W. Industrial hygiene control of airborne chemical hazards. Boca Raton, Florida: Taylor and Francis; 2006

Schinkel J, Warren N, Fransman W, Tongeren MV, McDonnell P, et al. Advanced REACH tool(ART): calibration of the mechanistic model. J Environ Monit 2011;13:1374-1382

Tielemans E, Noy D, Schinkel J, Heussen H, Schaaf DVD, et al. Stoffenmanager exposure model: development of a quantitative algorithm. Ann Occup Hyg 2008; 52(6):443-454

Tongeren MV, Fransman W, Spankie S, Tischer M, Brouwer D, et al. Advanced REACH tool: development and application of the substance emission potential modifying factor. Ann Occup Hyg 2011;55(9):980-988