

## 석영계 인조대리석 가공·취급작업의 호흡성 결정형 실리카 노출과 규폐증: 문헌고찰 및 국내 작업관리 제언

김부욱<sup>1\*</sup> · 박소영<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>인제대학교 보건안전공학과, <sup>2</sup>강북삼성병원 직업환경의학과, <sup>3</sup>성균관대학교 의과대학

## Respirable Crystalline Silica Exposure and Silicosis in Quartz-Based Engineered-Stone Fabrication and Handling: A narrative review and workplace-management recommendations for South Korea

Boo Wook Kim<sup>1\*</sup> · So-Young Park<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University

<sup>2</sup>Department of Occupational and Environmental Medicine, Kangbuk Samsung Hospital

<sup>3</sup>Sungkyunkwan University School of Medicine

### ABSTRACT

**Objectives:** This study was performed to synthesize evidence on respirable crystalline silica (RCS) exposure, mineral phases, engineering controls, and silicosis in the fabrication and handling of quartz-based engineered stone and to develop workplace-management recommendations for South Korea.

**Methods:** PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus, Web of Science, KoreaMed, RISS, and KCI were searched through July 15, 2026. Agency documents and reference lists of eligible publications were also reviewed. One author screened the literature and extracted prespecified study characteristics and findings. Thirty-one original studies and three government or institutional documents were qualitatively synthesized. Contemporary regulatory and guidance documents were considered separately when developing workplace-management recommendations.

**Results:** Engineered stone is a resin-bound composite with substantial variation in its crystalline mineral phases. Personal RCS measurements ranged from below the reporting limit to 5,100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . In California, 38 of 152 personal measurements (25%) exceeded 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , whereas in Georgia, 39 of 75 full-shift samples (52%) were at or above 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Fabrication and lamination work that included dry tasks were repeatedly associated with high exposure, but wet processing alone did not assure adequate control. In selected screening populations, silicosis was identified in 5 of 43 current workers at one California facility and in 24 of 45 workers recruited from eleven Italian companies. These findings represent detection rates in selected populations rather than industry-wide prevalence estimates. Clinical reports described accelerated and chronic silicosis, progression after exposure cessation, severe disease among young and migrant workers, and silicoproteinosis in a worker previously diagnosed with accelerated silicosis.

**Conclusions:** South Korea should identify the mineral phases present in individual ES products, eliminate dry high-energy processing, and verify the combined effectiveness of water delivery and local exhaust ventilation through personal RCS sampling. A comprehensive respiratory-protection program should be operated, and exposure history should be integrated with risk-based health surveillance and disease reporting.

**Key words:** Crystalline silica, engineered stone, exposure assessment, silicosis, workplace control

\*Corresponding author: Boo Wook Kim, Tel: 055-320-3673, E-mail: bwkim@inje.ac.kr

197 Inje-ro, Gimhae-si, Gyeongsangnam-do, 50834

Received: July 31, 2026 Revised: August 20, 2026, Accepted: September 6, 2026

 Boo Wook Kim <http://orcid.org/0000-0001-6869-2320>

 So-Young Park <http://orcid.org/0000-0003-2163-5892>

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.

## I. 서 론

석영계 인조대리석(quartz-based engineered stone, ES)은 주로 결정형 실리카인 석영을 수지와 결합하여 만든 판상 복합재료로, 주방·욕실 상판과 실내 마감에 널리 사용된다. 이 원고에서 인조대리석은 이러한 석영계 ES를 뜻하며, 아크릴계 고형표면재, 저실리카 소결석 및 테라조는 조성과 가공 위해성이 달라 같은 위험군에 포함하지 않는다. 이 범위 설정은 상품명이라 아니라 실제 결정형 실리카 광물상(phase)과 분진 발생공정을 중심으로 위험을 평가하기 위한 전제이다.

ES는 1970년대 초 이탈리아에서 진공 진동압축(vibrocompression under vacuum) 기술을 바탕으로 상업화되었다(Breton S.p.A., 2026). 일반적으로 광물 골재·안료·수지를 혼합한 뒤 진공, 진동, 압력 및 경화 과정을 거쳐 ES 판재를 제조하며, 이후 제작·설치 단계에서 절단, 홈가공, 연마, 접착, 보수 및 철거가 이루어진다(Fazio et al., 2025). 자연석과 유사한 외관, 내구성 및 가공 편의성은 시장 확대의 배경이며, 한 시장전망은 2028년 세계 ES 상판 수요를 약 9,700만 m<sup>2</sup>와 91억 달러로 예측하였다(Freedonia Group, 2024).

2010년대부터 스페인, 이스라엘, 호주, 미국 및 영국에서 비교적 젊은 상판 가공근로자의 집단 중증 규폐증이 보고되면서 ES는 국제 산업보건의 핵심 문제로 부상하였다(NIOSH, 2014; Leso et al., 2019). 기존 종설은 ES 관련 규폐증의 국제적 확산을 정리했으나, 제품별 광물상 차이, 최신 정량 노출자료, 분석 전처리의 한계와 국내 관리체계를 함께 연결한 검토는 제한적이었다. 국내에는 ES를 별도 물질·공정으로 파악한 개인노출자료와 환자감시 자료가 부족하다.

본 고찰의 목적은 첫째, ES 가공·취급 중 호흡성 결정형 실리카(respirable crystalline silica, RCS) 노출의 정량 근거와 결정요인을 종합하고, 둘째, 석영(quartz)과 크리스토파라이트(cristobalite)를 제품·분석·노출 관점에서 구분하며, 셋째, 규폐증의 임상형과 선별·감시 연구에서 확인된 질병부담을 함께 정리하고, 넷째, 한국의 작업환경측정, 공학적 관리 및 건강감시를 위한 실행 가능한 제언을 제시하는 데 있다.

## II. 연구 방법

### 1. 검토 설계와 검색전략

본 연구는 석영계 인조대리석 가공 작업의 호흡성 결정형 실리카(RCS) 노출 및 건강영향에 관한 국내외 근거를 종합하기 위해 서술적 문헌고찰(narrative review) 방식을 적용하였다. 문헌 검색은 2026년 7월 15일까지 출판된 문헌을 대상으로 주요 국외 DB(PubMed, Embase, Scopus, Web of Science) 및 국내 DB(KoreaMed, RISS, KCI), 그리고 주요 산업보건 기관(NIOSH 등)의 정책 보고서를 대상으로 수행하였다.

검색식은 대상 재료(engineered stone, artificial stone, quartz conglomerate, quartz countertop, stone benchtop 등), 노출 유해인자 및 광물상(respirable crystalline silica, quartz, cristobalite, tridymite 등), 가공 공정(fabrication, cutting, grinding, polishing, installation 등), 그리고 건강영향(silicosis, silicoproteinosis, progressive massive fibrosis 등)에 관한 검색어를 AND와 OR로 연결하여 구성하였다. 노출·공정 특성과 임상·발생률 근거를 폭넓게 수집하기 위해 노출 분야와 건강영향 분야의 검색을 각각 수행한 뒤 통합하였다. 국문 DB 검색에는 ‘인조대리석’, ‘엔지니어드 스톤’, ‘석영 상판’, ‘호흡성 결정형 실리카’, ‘규폐증’ 등의 주요 키워드를 조합하여 적용하였다.

### 2. 선정기준과 자료추출

석영계 인조대리석 판재 또는 이를 제조·가공·설치·보수·철거하는 작업자를 대상으로 하며, 다음 중 하나 이상을 보고한 문헌을 포함하였다: ① 개인 또는 지역 RCS나 호흡성분진 측정, ② 제품 또는 가공분진의 석영·크리스토파라이트 등 광물상 분석, ③ 분진 발생특성 또는 공학적 제어의 정량적 비교, ④ 충분한 직업력을 바탕으로 ES 작업과 관련성이 확인된 규폐증 환자군·선별연구 또는 증례보고, 그리고 확인된 ES 판재를 사용한 실험실 모의가공 연구도 포함하였다.

자연석만을 대상으로 한 연구, 실리카 조성이나 정량적 노출·분진·제어·임상정보가 없는 연구, 실리카 자료가 없는 아크릴계 고형표면재 연구 및 중복 보고는 제외하였다. 종설, 규제문서 및 시장보고서는 원저 수에 포함하지 않고 배경 설명과 추가 문헌 탐색에 이용하였다.

최종적으로 노출·분진특성·공학적 제어 연구 18편과 환자군·선별·증례 연구 13편의 동료심사 원저 31편을 포함하였다. 추가로 정량 노출 또는 정책 맥락을 제공하는 정부·공공기관 기술·정책문서 3건도 포함하였다. 그 밖의 최신 규제·권고문은 고찰의 관리방안 근거로 참고하였다.

후보 문헌의 탐색과 1차 정리에는 연구보조원 2명이 참여하였다. 저자는 제목·초록 및 전문을 검토하여 최종 포함문헌을 선정하고, 사전에 정의한 항목에 따라 자료를 추출한 뒤 추출자료를 원문과 대조하여 근거를 해석하였다. 각 문헌에서 국가와 조사환경, 사업장 또는 실험조건, 시료 수와 측정시간, 작업 또는 유사노출군, 재료와 광물상, RCS 측정방법과 결과, 공학적 제어와 호흡보호구 상태, 임상결과, 연구대상 선정방식 및 주요 한계를 추출하였다. 포함된 임상연구의 연구설계, 주요 결과 및 해석상 한계는 Appendix Table A1에 정리하였다.

### 3. 해석 원칙

노출연구는 개인시료와 지역시료의 구분, 전일 측정 여부, 시료채취시간, 비측정시간의 처리, 재료와 광물상의 확인, 분진 제어설비의 설치·가동·관리 상태, 사업장과 작업자의 선정방식 및 통계적 정밀도를 중심으로 검토하였다. 임상연구는 대상자 모집방식, 이전 광물분진 노출력, ES 노출기간, 증상과 진단의 시간적 관계, 영상학적 분류, 추적기간 및 질병진행 여부를 중심으로 해석하였다.

RCS의 측정결과는  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 통일하여 제시하였고, 연구 간 비교를 위해  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 (=0.05 \text{ mg}/\text{m}^3)$ 를 공통 참조값으로 사용하였으며, 이는 한국의 노출기준과 여러 국가의 기준에 해당한다. 다만 분석법, 시료채취시간, 비측정시간 처리, 표본추출 방식, 사용 재료와 공정, 제어상태가 서로 달라 연구 결과를 통합하여 평균하거나 특정 농도를 안전한 수준으로 해석하지 않았다. 또한, 단시간 작업시료, 지역시료 및 전일 개인시료는 서로 직접 대체 가능한 값으로 간주하지 않았다.

Table 1과 Table 2에는 노출평가 연구별 정량결과와 측정·실험 맥락을 제시하였고, Table 3과 Appendix Table A1에는 선별·감시·환자군 연구의 질병부담과 임상근거를 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 연구별 수치를 단순 비교하거나 합산하지 않고, 제품의 광물상, 작업공정, 측정설계, 분진 제어상태 및 연구대상의 모집·선정 방식을 함께 고려하여 연구결과를 종합적으로 해석하였다.

## III. 결 과

### 1. 제품 범주, 제조공법 및 산업적 배경

ES 판재에서 발생할 수 있는 RCS 노출위험과 관리

필요성은 인조대리석이라는 상품명만으로 판단할 수 없으며, 제품의 광물상과 실제 가공방식에 따라 달라진다. ES는 수지결합체 안에 석영과 크리스토파라이트 같은 결정형 실리카를 높은 함량으로 포함할 수 있고, 절단·연삭 과정에서 이 광물이 호흡성 크기의 입자로 방출된다. 반면 아크릴계 고형표면재나 재활용 유리·시멘트계 제품은 다른 조성 and 위해성을 가질 수 있다. 따라서 구매·수입·작업지시 단계에서 제품군, 원재료, 광물상 및 예정 가공공정을 확인하는 절차가 이후 노출평가와 작업관리의 출발점이 된다.

기존 문헌은 ES 판재 제조공정보다 제조된 판재를 재단하여 상판 등을 제작하고, 설치·보수하는 작업에 주로 집중되어 있다. 최근 발표된 문헌고찰에서도 ES 판재 제조단계 작업자의 개인 RCS 노출을 직접 측정한 학술지 게재 연구는 확인되지 않았다고 보고하였다 (Fazio et al., 2025). 따라서 ES 판재를 직접 생산하지 않는 국가에서도 수입 판재의 재단, 상판 제작, 현장 설치 및 철거가 주요 노출원이 될 수 있으며, 국내 실태 조사 역시 판재 제조업에 한정해서는 안 된다.

### 2. 석영과 크리스토파라이트: 제품 조성, 생성 가정 및 분석

석영과 크리스토파라이트는 모두 결정형 실리카의 다형(polymorph)이지만, 제품에 '실리카'라고만 표시하면 위해성의 근거가 되는 광물상과 분석상의 불확실성을 구분하기 어렵다. Kumarasamy et al.(2022)은 6개 공급사의 인조석 25종을 분석하여 석영 우세 제품뿐 아니라 크리스토파라이트 함량이 높은 제품도 확인하였다. FS1의 경우 총 결정질 광물상 중 석영은 10 wt%, 크리스토파라이트는 90 wt%였고, 폴리에스터 수지는 별도로 12.2 wt%로 분석되었다. 해당 제품의 SDS에 기재된 광물상과 함량 정보는 실험적으로 확인된 조성 and 불일치하거나 광물상별 함량을 판단하기에 불충분했다.

크리스토파라이트의 위해성을 석영과 같다고 보거나, 실험독성 결과를 바탕으로 사람에게 적용할 일률적인 상대독성 계수를 설정하는 것은 적절하지 않다. 과거 OSHA의 분진별 PEL 산식은 크리스토파라이트와 트리디마이트에 석영 산식으로 계산한 값의 절반을 적용하였다. 이에 따라 해당 광물만으로 이루어진 호흡성 분진을 가정할 때 크리스토파라이트의 PEL은  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 석영의 PEL은 약  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 일부 실험독성 연구에서는 크리스토파라이트가 석영보다 강한 섬유화 반

**Table 1.** Field worker exposure studies identified for quartz-based engineered-stone fabrication and handling

| Study and setting                     | Material, task, and sample                                                                                                    | RCS result ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; comparison with 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ where applicable)                      | Control / benchmark context                                                                                                        | Interpretive point                                                                                              |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Phillips et al. (2013), USA           | Preliminary mixed natural/engineered-stone fabrication study; task observations and personal sampling                         | ES-only summary not isolated                                                                                               | Dry cutting, grinding, and dry sweeping were strong determinants.                                                                  | Important early task evidence; not an ES-only exposure estimate.                                                |
| Zwack et al. (2016), Texas HHE        | Mixed-stone countertop shop; full-shift personal samples during fabrication/lamination                                        | ND-140; diamond-cup wet-grinder full-shift samples 93-140 (1.9-2.8 $\times$ )                                              | Wet methods were used; no work process used LEV; bulk dust contained 48%-70% quartz; cristobalite and tridymite were not detected. | Government report; RCS exposure remained despite wet methods alone.                                             |
| Salamon et al. (2021), Italy          | 51 full-shift personal samples in four artificial-stone shops processing products containing 70%-90% quartz with resin binder | <3-98; max 98 (2.0 $\times$ ); mean 22; median 13; 14% >50                                                                 | Manual work median 17, versus mechanical work 12                                                                                   | Moderate central values can mask high task-day variability.                                                     |
| Surasi et al. (2022), California      | 152 personal measurements at 47 ES workplaces inspected in 2019-2020                                                          | 38/152 (25%) >50                                                                                                           | 34/47 workplaces cited for RCS-standard violations; nonsampled time treated as zero in 8-h TWA calculation                         | May underestimate full-shift exposure when sampling was noncontinuous.                                          |
| Weller et al. (2024), New South Wales | 123 full-shift personal samples in 27 ES workshops; all reported wet processing                                               | GM 34; 15/27 shops had $\geq 1$ sample >50                                                                                 | Wet saw, polish, lamination, and hand-tool tasks sampled                                                                           | Wet work is not synonymous with compliance.                                                                     |
| Seneviratne et al. (2024), Sydney     | 34 migrant workers in six ES shops; wet cutting, wet finishing, and dry finishing                                             | <40-1,420; dry finishing highest; one high-pressure wet grinder $\approx 1,340$ (26.8 $\times$ )                           | Inadequate ventilation and inappropriate respiratory protection were reported                                                      | Wet-tool work did not ensure low exposure.                                                                      |
| DeVaughn et al. (2025), Chicago       | Nine personal samples from eight workers in two shops                                                                         | 11-203; max 203 (4.1 $\times$ ); 7/9 samples (78%) >50                                                                     | Bulk dust 56%-95% silica; no respirators observed                                                                                  | Small pilot but direct field confirmation of high residual RCS                                                  |
| Soo et al. (2025), Georgia            | 75 full-shift personal RCS samples at 11 shops, 2017-2023                                                                     | <RL-5,100; 39/75 (52%) at or above 50; fabrication/lamination GM 279 (5.6 $\times$ ); individual max 5,100 (102 $\times$ ) | Automated, support, small-tool, and fabrication/lamination SEGs analyzed; fabrication/lamination included dry tasks                | Fabrication/lamination and selected small-tool work warrant priority sampling; not all small-tool work was dry. |
| McGowan et al. (2025), USA            | Shop-reported practices and 292 submitted RCS samples from 257 shops                                                          | GM 14.1; 9.2% >50; range 2.8-5,100                                                                                         | 47% of shops reported sampling; submitted data were not investigator-collected at every shop                                       | Broad multistate practice profile, but voluntary data may overrepresent better-documented shops.                |

RCS = respirable crystalline silica; GM = geometric mean; HHE = health hazard evaluation; LEV = local exhaust ventilation; ND = not detected; RL = reporting limit; SEG = similar exposure group; TWA = time-weighted average. Values are reported as published and are not pooled estimates. For Soo et al. (2025), the detailed exposure-category results (39 of 75 full-shift samples at or above 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) are presented. Multiples of 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  are calculated against the South Korean 8-h occupational exposure limit and are shown only for full-shift personal samples.

응을 일으킬 가능성이 제시되었지만, 이를 사람에게 적용되는 보편적 상대독성 계수로 해석할 수는 없다. 현재 미국 OSHA와 한국은 석영·크리스토파라이트·트리디마이트를 포괄하여  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 RCS 기준을 적용한다(NIOSH, 1988; OSHA, 2016; MoEL, 2020). 크리스토파라이트는 일반적으로 고온 조건에서 형성되는 결정형 실리카의 한 상이지만, 일반적인 ES 절단·연삭 과정에서 발생하는 열만으로 석영이 크리스토파라이트로 상전이한다고 보기는 어렵다. 따라서 가공분진에서 확인되는 결정형 실리카의 상 조성은 ES 판재 자체에 존재하는 광물상과 충전재의 조성을 함께 고려하여 해석할 필요가 있다. Ramkissoon et al.(2022)은 12개 ES 제품을 건식 절단하여 발생한 호흡성 분진을 분석하였다. 이 중 9개 제품에서 발생한 분진에서는 석영과 크리스토파라이트가 함께 검출되었으나, 석영이 우세한 결정형 광물상이었다고 보고하였다. Thompson & Qi(2023)는 실험실에서 수행한 ES 연삭시험에서 석영계 ES 2종의 가공분진을 분석한 결과, 두 제품 모두 크리스토파라이트 함량이 석영 함량보다 높았다고 보고하였다. 또한 제품에 따라 연삭 과정에서 발생한 공기 중 분진의 양과 그 안에 포함된 결정형 실리카의 함량이 달랐다. 따라서 작업환경측정에서는 총분진 또는 총 결정형 실리카 농도가 아닌 호흡성 분진 중 석영과 크리스토파라이트 광물상별로 정량하여 보고해야 한다. 수치 매트릭스가 있는 시료에서는 전처리법에 따라 X선 회절분석법(X-ray diffraction, XRD)의 정량 결과가 달라질 수 있다. 따라서 수지의 종류와 필터에 포집된 분진량을 고려하여 전처리 회수율을 확인해야 하며, 특히 THF(tetrahydrofuran)를 이용한 수치 용해 전처리에서는 결정형 실리카가 과소평가될 가능성을 검증할 필요가 있다(Wang et al., 2026).

### 3. 작업장 RCS 노출수준과 결정요인

Table 1은 현장 노출평가 연구를 작업 내용과 분진 제어 조건을 함께 고려하여 요약하였다. 개인시료의 RCS 농도는 검출한계 미만부터  $5,100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 넓게 분포하였다. 캘리포니아에서는 Cal/OSHA가 점검한 47개 ES 상판 제작 작업장에서 수집한 개인시료 152건 중 38건(25%)이 고용노동부 노출기준인  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과했다. 조지아의 11개 석재 상판 제작 작업장에서는 ES와 자연석을 함께 가공하였으며, 개인시료 75건 중 39건(52%)이  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이였다(Surasi et al., 2022;

Soo et al., 2025). 미국 시카고의 2개 석재 상판 제작 작업장에서는 ES 판재를 브리지톱으로 절단한 뒤 휴대용 전동공구로 에지(가장자리)와 표면을 마감하였으며, ES를 가공하던 근로자 8명에게서 채취한 개인시료 9건 중 7건(78%)이  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과했고 최고 농도는  $203 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다(DeVaughn et al., 2025). 이탈리아 북동부의 4개 인조석 상판 및 부속품 제작 작업장에서는 기계가공과 휴대용 전동공구를 이용한 수작업 마감이 이루어졌으며, 개인시료 51건의 RCS 농도는  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만부터  $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지였다. 이 중 13.7%가  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과했고, 수작업 마감작업의 RCS 중앙값은  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기계가공의  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높았다(Salamon et al., 2021). 조지아 연구에서는 건식 작업을 포함한 제작·라미네이션 유사노출군(fabrication/lamination similar exposure group, SEG)의 RCS 기하평균이  $279 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다(Soo et al., 2025).

연구마다 개인시료 또는 지역시료의 사용, 전일 또는 단시간 측정 여부, 시료채취시간과 미측정시간의 처리 등 측정방법이 다르고, 조사대상 사업장과 근로자를 선정한 방식도 서로 달라 공정별 평균 농도나 업계 전체의 기준 초과율을 산출할 수는 없다. 그럼에도 절단·연삭·라미네이션 등 상판 제작공정에서 건식 작업의 포함, 휴대용 전동공구 사용, 가공 부위로의 불충분한 물 공급 및 국소배기 미설치는 높은 RCS 노출이 반복적으로 보고되었다. 반면 ‘습식작업’이라는 표기만으로 가공 부위가 충분히 습윤하게 유지되고 분진이 효과적으로 제어되었다고 판단할 수는 없었다. 호주 뉴사우스웨일스에서 조사한 ES 제작사업장 27곳이 모두 습식공정을 사용했음에도 RCS 기하평균은  $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고, 15개 사업장(55.6%)에서는 적어도 한 시료가  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다(Weller et al., 2024). 시드니의 소규모 ES 상판 제작사업장에서 수행한 이주노동자 조사에서는 건식 마감작업의 노출이 가장 높았고, 고압수 공급식 습식 그라인더 작업에서도 약  $1,340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 26.8배에 이르렀다(Seneviratne et al., 2024).

따라서 ‘건식 수공구 작업’과 같은 포괄적 표현 대신, 작업별 습식 가공 여부, 국소배기 포집 상태, 분진 발생원과 작업자의 상대적 위치, 물의 공급량과 물이 절단·연마 부위에 직접·지속적으로 공급되는지 여부, 슬러리 관리 방식, 재비산 억제 조치 및 환기 상태를 함께 기록해야 한다. Surasi et al.(2022)은 비연속 측정에서 측정하지 않은 시간의 농도를 0으로 가정하여 8시간 시간

가중평균(time-weighted average, TWA)을 산출했으므로, 실제 노출이 과소평가되었을 가능성이 있음을 밝혔다. 반대로 사업장이 자발적으로 제공한 과거의 RCS 측정자료는 측정·관리체계가 비교적 잘 구축된 사업장에 편중되었을 가능성이 있다(McGowan et al., 2025).

#### 4. 공학적 제어와 분진 특성

실험실 모의가공 연구는 습식 가공만으로는 분진을 충분히 제어하기 어려우며, 분진 발생원에 국소배기장치를 함께 적용하고 그 제어성능을 평가할 필요가 있음을 보여준다. Cooper et al.(2015)의 석영 함량 85% ES 절단실험에서 30분 모의절단 시 건식 조건의 호흡성 석영 농도는  $44,600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고, 습식 톱날만 사용한 조건에서는  $1,870\text{--}4,850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 톱날 주변에 수막(water curtain)을 형성한 조건에서는  $920\text{--}3,410 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 습식 톱날과 국소배기장치를 함께 적용한 조건에서는  $<120\text{--}200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 이 실험은 단시간 모의가공에서 얻은 결과이므로 개인노출 수준을 나타내지는 않는다. 다만 분진 발생량이 큰 절단작업에서는 가공 부위에 물을 지속적으로 공급하고, 발생 분진이 작업자 호흡영역으로 확산되기 전에 국소배기장치로 충분히 포집할 때 분진 저감효과가 커질 수 있음을 보여준다.

Johnson et al.(2017)은 휴대용 전동공구를 이용한 ES 가공에서 물 공급과 국소배기의 분진저감 효과가 공구와 후드의 형상 및 조합에 따라 달라질 수 있음을 보였다. Carrieri et al.(2020)은 서로 다른 ES 판재를 절단·연삭할 때 발생한 분진의 특성과 결정형 실리카 함량을 비교하였다. Di Benedetto et al.(2019)은 ES 판재와 가공분진의 물리화학적 특성을 비교하여, 가공 과정에서 수지 피복과 입자 표면 특성이 달라질 수 있으며 이러한 변화가 분진의 표면 반응성에 영향을 줄 가능성을 제시하였다. Ramkissoon et al.(2022)과 Rishi et al.(2024)은 ES 가공 중 발생한 호흡성 및 나노크기 분진 분율에서 석영과 크리스토파라이트가 검출될 수 있음을 제시했다. Hall et al.(2022)은 ES 절단·연마 과정에서 RCS뿐 아니라 휘발성유기화합물(VOC)도 함께 발생할 수 있음을 보고하였다(Table 2).

따라서 분진저감 대책의 효과는 물 공급장치와 국소배기장치를 설치했다는 사실만으로 판단할 수 없다. 발생 분진이 작업자 호흡영역으로 확산되기 전에 발생원에서 충분히 포집되는지, 물이 절단·연마 부위에 지속

적이고 충분하게 공급되는지, 가공 후 발생한 물·석분 혼합물(슬러리)과 침전물이 건조·비산하지 않도록 젖은 상태에서 회수·제거되는지, 그리고 보조작업자와 인접 공정 근로자의 개인 RCS 노출이 적절히 관리되는지를 함께 확인해야 한다.

#### 5. 규폐증의 임상 구분과 ES 관련 사례

규폐증의 임상형은 흉부영상 소견만으로 구분할 수 없으므로, 노출강도, 노출기간 및 발병까지의 잠복기를 함께 고려해야 한다. 급성 규폐증은 흔히 실리코단백증 양상으로 나타나며, 매우 높은 RCS 노출이 시작된 뒤 수주에서 수개월, 때로는 수년 이내에 발생할 수 있다. 가속성 규폐증은 통상 5-10년의 고농도 노출 뒤, 만성 규폐증은 보통 10년 이상의 지속 노출 뒤 발생한다. 가속성형과 만성형은 흉부영상 소견만으로 명확히 구분되지 않을 수 있으며, 두 유형 모두 진행성 거대섬유화(progressive massive fibrosis, PMF)로 진행할 수 있다. 임상형을 분류할 때에는 최초 ES 노출 시점, 이전 광물분진 노출력, 증상 발생시점 및 흉부영상 소견의 시간적 변화를 함께 확인해야 한다(NIOSH, 2026).

ES 가공·취급작업 근로자에서는 가속성 또는 만성 규폐증뿐 아니라, 매우 높은 RCS 노출과 관련된 급성 규폐증의 형태인 실리코단백증도 보고되었다. Shen et al.(2021)은 ES 연마작업에 8년간 종사한 33세 남성에서 가속성 규폐증 진단 7개월 후 실리코단백증과 크립토코쿠스 감염이 동반된 증례를 보고하였다. 이 환자는 중증 호흡부전으로 기관지경을 이용한 분절 폐세척과 체외막산소공급(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO) 치료가 필요하였다. 개인 RCS 농도는 보고되지 않았으므로 이 증례만으로 정량적 노출수준을 추정할 수는 없다. 다만 고농도 RCS 노출이 추정되는 ES 연마작업을 해 온 근로자에서 가속성 규폐증 진단 후 실리코단백증과 크립토코쿠스 감염이 동반되어 급성 호흡부전이 발생한 사례가 보고되었음을 보여준다.

환자군 연구와 감시사례만으로는 ES 가공·취급업 전체의 발생률이나 유병률을 산출할 수 없다. 다만 능동적 선별검사를 시행한 일부 집단에서는 규폐증이 비교적 높은 빈도로 확인되었다(Table 3). 캘리포니아의 한 사업장에서는 현재 근무 중인 제작근로자 43명 전원이 흉부방사선검사와 폐기능검사를 이용한 선별검사에 참여했고, 이 중 5명(11.6%)이 규폐증으로 확인되었다(Heinzerling et al., 2021). 이탈리아 북동부 11개 사

**Table 2.** Material-characterization and engineering-control evidence

| Study                      | Material / design                                                                                                    | Principal quantitative or phase finding                                                                                                                                                                  | Workplace-management implication                                                                                               |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cooper et al. (2015)       | 85% quartz ES; 30-min cutting in an unventilated test enclosure                                                      | Dry 44,600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; wet blade 1,870–4,850; water curtain 920–3,410; wet + LEV <120–200                                                                                                 | Eliminate dry cutting and verify point water with effective capture; laboratory values are not full-shift worker TWA.          |
| Johnson et al. (2017)      | Simulated powered hand-tool fabrication on >85% quartz ES                                                            | Control performance varied across tool, shroud, water-flow, and LEV configurations; combinations were not uniformly additive                                                                             | Commission each tool-control configuration with air sampling rather than relying on procurement specifications.                |
| Di Benedetto et al. (2019) | Parent materials and wet/dry processed dust from three workshops; mineralogical and physicochemical characterization | Wide chemical/mineral variability and process-related signatures; stable radicals were associated with Si-O bond disruption in resin-coated crystalline silica.                                          | Hazard is not determined by quartz mass alone; biological relevance is a laboratory inference, not a worker-exposure estimate. |
| Carrieri et al. (2020)     | Controlled cutting/grinding of three artificial stones and granite; bulk and respirable fractions characterized      | Two artificial stones had 91% bulk silica and 53%–54% in the respirable fraction; a third had <10% bulk and <5% respirable silica.                                                                       | Use material-specific phase and size-fraction characterization; chamber concentrations are not worker TWA.                     |
| Kumarasamy et al. (2022)   | 25 artificial-stone products from six suppliers; SDS compared with XRD/XRF/resin measurements                        | Large variation; in FS1, quartz 10 wt% and cristobalite 90 wt% were proportions within the total crystalline mineral fraction; polyester resin was 12.2 wt% separately; SDS often incomplete/inaccurate. | Require phase-specific product/batch data; do not accept generic “silica” SDS labels.                                          |
| Ramkissoon et al. (2022)   | Twelve resin ES and natural stones machined with a dry angle grinder                                                 | ES respirable dust generally contained >80% total crystalline silica; low-quartz products could be cristobalite-dominant.                                                                                | Measure phases separately and evaluate lower-silica substitution rather than assuming a homogeneous product class.             |
| Hall et al. (2022)         | Natural- and artificial-stone cutting/polishing emission characterization                                            | Bulk composition showed some relation to emitted RCS; resin-containing stone also emitted VOCs.                                                                                                          | Control programs should address non-silica hazards and avoid treating one material class as homogeneous.                       |
| Thompson & Qi (2023)       | Grinding of four natural/engineered stones; XRD of bulk and airborne dust                                            | One resin ES contained 46 wt% cristobalite + 14 wt% quartz; another 12% + 11%; the product with higher combined crystalline silica emitted the most RCS under tested grinding.                           | Product-specific phase composition can materially change emission potential.                                                   |
| Rishi et al. (2024)        | Controlled ES grinding and size-fraction characterization                                                            | Quartz and cristobalite occurred in nano- and respirable fractions; the sub-100-nm fraction had high crystalline-silica content.                                                                         | Consider particle-size distribution and phase composition in addition to total mass.                                           |
| Wang et al. (2026)         | XRD analytical-method compatibility across resin ES materials                                                        | THF dissolution substantially underestimated RCS for one polyester-resin ES at low loading; ashing was more broadly reliable in tested materials.                                                        | Validate preparation and recovery by matrix and report analytical limitations.                                                 |

ES = engineered stone; LEV = local exhaust ventilation; RCS = respirable crystalline silica; SDS = safety data sheet; THF = tetrahydrofuran; TWA = time-weighted average; VOC = volatile organic compound; XRD = X-ray diffraction; XRF = X-ray fluorescence. Crystalline-silica content in a material or dust fraction must not be treated as a personal exposure measurement.

**Table 3.** Disease burden and clinical features reported in selected engineered-stone studies

| Study and setting                      | Design / ascertainment                                                                                                                           | Confirmed silicosis or detection rate                                                                                                                                                                     | Age / exposure duration                                                                                  | Interpretive limitation                                                                   |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Heinzerling et al. (2021), California  | All 43 current fabrication workers at one company were screened with spirometry and chest radiography                                            | 5/43 (11.6%) had silicosis (ILO $\geq 1/0$ ).                                                                                                                                                             | Median age among cases 40 years; median job duration 14.9 years among four cases with available duration | Single employer; chest radiography may miss early disease; current workers only           |
| Guarnieri et al. (2020), Italy         | Active case finding in 11 companies; 45 workers recruited with occupational history, lung function, chest radiography, HRCT, and selected biopsy | 24/45 (53.3%) diagnosed with silicosis                                                                                                                                                                    | Mean age 43 years; exposure duration 3.5–20 years                                                        | High-risk regional workforce and active screening; not generalizable to all ES workers    |
| Martínez González et al. (2019), Spain | Clinical cohort of 96 confirmed ES silicosis cases                                                                                               | 10/96 classified as accelerated; 53 simple and 43 complicated radiographic cases                                                                                                                          | Accelerated cases mean age 33 years; mean ES exposure 15 years (range 5–34)                              | Referral cohort; radiographic simple/complicated categories are not latency categories    |
| León-Jiménez et al. (2020), Spain      | Longitudinal clinical cohort of 106 cases                                                                                                        | 28/106 (26.4%) developed accelerated silicosis 5–10 years after first ES exposure; no case developed before 5 years. PMF increased from 7 (6.6%) to 40 (37.7%) after a mean 4.01 years despite cessation. | Accelerated silicosis occurred 5–10 years after first ES exposure                                        | Specialty cohort; documents progression after cessation, not workforce prevalence         |
| Fazio et al. (2023), California        | Statewide surveillance case series                                                                                                               | 52 men; 10 deaths reported                                                                                                                                                                                | 51 were Latino immigrants; median work tenure 15 years                                                   | Reported and clinically recognized cases; describes severity and inequity, not prevalence |
| Feary et al. (2024), United Kingdom    | Referral-based case series                                                                                                                       | Eight men; one death and two transplant referrals                                                                                                                                                         | Median age 34 years; median exposure 12.5 years                                                          | Small first UK series; referral-based and not a population prevalence estimate            |

HRCT = high-resolution computed tomography; ILO = International Labour Organization; PMF = progressive massive fibrosis. Detection rates from screening or actively recruited workers must not be interpreted as industry-wide prevalence estimates.

업장에서 모집한 근로자 45명 중에서는 24명(53.3%)이 규폐증으로 확인되었다(Guarnieri et al., 2020). 다만 두 수치는 단일 사업장 또는 고위험 사업장을 대상으로 한 선별검사 결과이므로, ES 업계 전체의 유병률로 일반화해서는 안 된다.

스페인의 ES 관련 규폐증 환자 96명을 분석한 연구에서는 10명(10.4%)이 가속성 규폐증으로 분류되었고, 이들의 평균 연령은 33세였다. 전체 환자군의 평균 ES 노출기간은 15년(범위 5–34년)이었다(Martínez González

et al., 2019). 별도의 106명 환자군에서는 28명(26.4%)이 최초 ES 노출 후 5–10년에 가속성 형태로 발생했고, 최초 ES 노출 후 5년 미만에 발생한 사례는 없었다. 진단 후 모두 노출을 중단했음에도 평균 4.01년의 추적기간 동안 PMF로 분류된 환자 수는 7명(6.6%)에서 40명(37.7%)으로 증가하였다(León-Jiménez et al., 2020).

다른 국가에서 보고된 ES 관련 사례군에서도 비교적 젊은 남성 근로자가 주로 확인되었다. 캘리포니아 감시 체계에서 확인된 52명 사례군은 거의 모두 라틴계 이주

남성이었으며, 38%는 진행성 거대섬유화(PMF)로 진단되었고 19%가 사망하였다(Fazio et al., 2023). 미국 4개 주에서 이루어진 조사와 감시를 통해 확인된 석재 상판 제작근로자 18명은 대부분 ES를 주로 가공한 근로자였으며, 여러 환자에서 중증·진행성 질환이 관찰되었고 2명이 사망하였다(Rose et al., 2019). 영국에서 보고된 8명 사례군은 모두 불충분한 안전조치 하에서 인조석 상판을 건식 절단·연마한 근로자였고, 1명이 사망했으며 2명은 폐이식 평가를 위해 의뢰되었다(Feary et al., 2024). 다만 이들 연구는 임상형의 분류기준과 보고 방식이 서로 달라, 모든 환자를 급성·가속성·만성 규폐증으로 일관되게 분류하여 제시하지는 않았다. 이스라엘 이식평가 환자군(Kramer et al., 2012), 초기 스페인 집단발생(Pérez-Alonso et al., 2014), 이탈리아의 증례 및 적극적 선별연구(Paolucci et al., 2015; Guarnieri et al., 2020), 텍사스 감시사례(Friedman et al., 2015)에서도 ES 또는 인조석 가공근로자에서 중증·진행성 규폐증의 위험신호가 반복적으로 보고되었다.

## 6. 노출과 질병의 연계에 관한 근거 종합

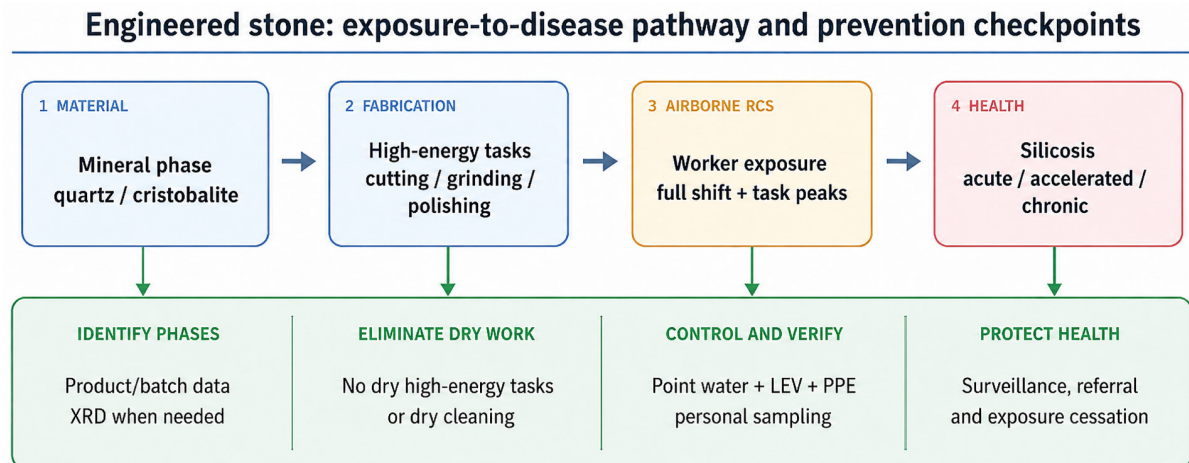
이 고찰에서 검토한 연구를 함께 살펴보면, 제품별 결정질 광물상 조성의 차이, 절단·연삭 등 분진 발생량이 큰 건식 가공작업과 불충분한 분진 제어, 높은 개인 RCS 노출, 그리고 비교적 짧은 노출기간 후 발생한 가속성 규폐증 및 중증·진행성 질환이 서로 연계되어 나타나는 경향이 반복적으로 보고되었다(Figure 1). 특히 제품의 실리카 함량과 광물상은 노출위험을 이해하는

데 중요한 정보이지만, 특정 근로자의 개인 RCS 노출 수준을 직접 예측할 수는 없다. 마찬가지로 실험실의 단시간 모의가공에서 측정한 농도는 제어조건별 분진저감 효과를 비교하는 데 유용하지만, 실제 작업 중 근로자의 RCS 노출수준으로 해석해서는 안 된다.

동일한 근로자를 대상으로 정량적 개인 RCS 노출과 장기 임상결과를 함께 측정하여 그 관계를 평가한 연구는 부족하다. 따라서 본 고찰에서는 정량적 용량-반응 관계를 제시하지 않았다. 대신 제품의 광물상, 작업방식과 분진 제어상태, 개인 RCS 노출, 노출기간 및 질병양상 사이의 관계를 문헌에서 확인되는 범위 안에서 종합하여 질적으로 해석하였다. 이러한 질적 근거는 국내에서 제품 정보의 확인, 공정별 노출평가, 분진 제어설비의 성능 검증 및 건강감시를 각각 별개의 업무로 수행하기보다, 서로 연계된 관리체제로 설계할 필요가 있음을 시사한다.

## 7. 국내 제도와 ES 작업의 관리상 한계

우리나라의 고용노동부 노출기준 고시는 석영, 크리스토파라이트 및 트리디마이트에 대해 각각 호흡성분진  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 (=0.05 \text{ mg}/\text{m}^3)$ 의 노출기준을 제시하고 있다(MoEL, 2020). 산업안전보건법 시행규칙에는 작업환경측정과 특수건강진단의 대상 유해인자로 광물성 분진과 결정형 실리카가 포함되어 있으며, 특수건강진단의 시기와 주기도 규정되어 있다(Ministry of Government Legislation, 2026). 현행 별표에 따르면 광물성 분진 노출근로자는 배치 후 12개월 이내에



**Figure 1.** Evidence-informed exposure-to-disease pathway and prevention checkpoints for quartz-based engineered-stone work

**Table 4.** Proposed risk-based workplace-management framework for quartz-based engineered stone in Korea

| Control domain          | Proposed enhanced action                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Verification metric                                                                                    | Regulatory / policy use                                                                                                         | Nature of basis                                                                                                                  |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Product identification  | Maintain product/lot records for quartz, cristobalite, tridymite, resin, and other materials; verify uncertain products by XRD when needed.                                                                                                                                                                                | Percentage and method reported separately by mineral phase; lot traceability                           | Flag products with unknown phase composition or high crystalline-silica content for prior assessment and restricted processing. | Author proposal informed by material-characterization evidence                                                                   |
| Inventory and SEG       | Map manufacturers, importers, fabrication shops, installers, repair/removal contractors, and subcontractors; create task-based SEGs.                                                                                                                                                                                       | Coverage of all work locations, worker status, task hours, and material type                           | Use the registry to target inspection, outreach, and disease-cluster investigation.                                             | Author proposal                                                                                                                  |
| Source control          | Eliminate dry cutting, grinding, drilling, polishing, dry sweeping, and compressed-air cleaning; use enclosed/automated equipment where feasible, point water + capture, and HEPA vacuum/wet cleaning.                                                                                                                     | Observed task compliance; water flow; LEV airflow/capture tests; maintenance and sediment-removal logs | Stop work when water/capture fails and redesign before relying on respirators.                                                  | International guidance (NIOSH & OSHA, 2026) and author proposal; not a new South Korean legal requirement                        |
| Exposure assessment     | Conduct full-shift personal RCS sampling for highest-risk SEGs at baseline and after material/process/control changes; record unsampled time and task logs.                                                                                                                                                                | Quartz and cristobalite reported separately; 8-h TWA, duration, method, and control state documented   | Repeat sampling after exceedance and use results for control redesign and respirator selection.                                 | Korean measurement obligation (MoEL, 2020; Ministry of Government Legislation, 2026) plus ES-specific author proposal            |
| Respiratory protection  | Use as supplemental protection within a written program based on exposure data, medical evaluation, fit testing, training, cleaning, and filter change.                                                                                                                                                                    | Fit-test completion; correct use observed; program audit                                               | Escalate protection for unknown or short high-exposure work while engineering controls are corrected.                           | International guidance (NIOSH & OSHA, 2026) and existing respiratory-protection principles                                       |
| Health surveillance     | Obtain baseline occupational history and conduct a proposed annual high-risk review of exposure history and respiratory symptoms. Perform spirometry and chest imaging in accordance with statutory health examinations and earlier when exposure intensity, symptoms, abnormal findings, or specialist judgment indicate. | Completion and continuity of exposure/symptom review; appropriate referral and follow-up               | Initiate a cluster review and arrange specialist assessment; pending evaluation, avoid further RCS exposure.                    | Statutory health examination (Ministry of Government Legislation, 2026) plus author proposal; not annual imaging for all workers |
| Governance and research | Develop linked national exposure/disease surveillance, validate laboratory methods, and protect migrant, temporary, and subcontracted workers.                                                                                                                                                                             | Published exposure distributions; timely case reporting; inspection outcomes                           | Use domestic evidence to assess restrictions, licensing, or prohibition of high-risk ES.                                        | Author proposal for domestic policy development                                                                                  |

SEG = similar exposure group; LEV = local exhaust ventilation; XRD = X-ray diffraction; TWA = time-weighted average. Only the statutory exposure limit, workplace measurement, and health-examination provisions cited in the text are current Korean legal requirements. Product/lot reporting, annual review of exposure history and symptoms, linked registry, and product restrictions are proposed enhanced measures, not statements of current legal obligations.

첫 특수건강진단을 받고, 이후에는 24개월의 기본주기로 검진을 받는다.

이러한 제도적 틀은 결정형 실리카 노출근로자를 보호하기 위한 기본 장치로서 중요하지만 ES 작업의 제품별 광물상, 분진 발생량이 큰 가공작업, 소규모 하도급 구조 및 근로자의 사업장 이동 특성이 측정과 건강감시 과정에서 별도로 파악되지 않는다면, 고위험 작업자에 대한 노출평가와 건강감시가 실제 위험 수준에 비해 늦게 이루어질 수 있다.

#### IV. 고 찰

##### 1. 작업환경관리 전략

국내 대책은 해외의 특정 국가에서 시행 중인 규제방식을 그대로 도입하기보다, 노출원 파악, 공정관리, 분진 제어설비의 성능 확인 및 건강감시가 서로 연계된 관리체제로 설계되어야 한다(Table 4; Figure 1). 가장 우선적으로 필요한 조치는 ES 가공에서의 건식 절단·연삭·천공·연마와 압축공기 청소·건식 쓸기를 중단하고, 가공지점에 충분한 물을 지속적으로 공급하면서 발생한 분진을 국소배기장치로 포집하는 것이다. 물만 공급하는 방식, 천장형 전체환기, 출입문 개방 또는 일반 선풍기는 분진을 발생원에서 포집하지 못할 뿐만 아니라 오염물질을 작업장 전체로 확산시킬 수 있다(Cooper et al., 2015; Johnson et al., 2017; NIOSH & OSHA, 2026). 해외 개인시료 노출평가 연구에서 건식 작업이 포함된 제작·라미네이션 작업군(fabrication/lamination SEG)의 RCS 기하평균은 한국 노출기준의 5.6배였고, 일부 개인시료는 100배를 넘었다(Soo et al., 2025). 본 고찰에서 확인한 노출양상을 고려할 때, 국내 노출평가에서는 건식 절단·연삭, 예지·마감, 수공구 작업, 청소·보수 등 분진 발생량이 크거나 재비산 위험이 큰 작업을 우선적으로 포함할 필요가 있다. 또한 습식 공정으로 분류된 작업에서도 고농도 노출이 보고되었으므로, 물 사용 여부만으로 분진 제어수준이 충분한지를 판단하기는 어렵다. 물이 가공 부위에 어떤 방식으로 공급되는지와 국소배기장치가 발생 분진을 작업자 호흡영역으로 확산되기 전에 포집하는지를 함께 확인하고, 실제 분진저감 효과는 개인 RCS 노출 측정을 통해 평가할 필요가 있다.

한편, ES 작업환경관리를 위해서는 제품명, 로트번호 및 가공공정에 대한 이력관리를 우선 갖출 필요가 있

다. ES 판매 공급자가 제공하는 MSDS에 'silica'라고 포괄적으로만 기재하는 것으로는 제품의 위해성을 충분히 판단하기 어렵다. 석영, 크리스토파라이트 및 트리디마이트 등 각 광물상의 질량분율과 분석방법, 수지 및 기타 광물성분, 제품·로트 식별정보를 확인·제공하는 방안을 마련할 필요가 있다. 사업장에서는 재료, 공정, 설비 또는 가공량이 바뀌는 경우 기존 노출평가 결과를 검토하고 필요 시 갱신해야 한다. 또한 유사노출군(SEG)은 수공구 작업, 자동/CNC·위터젯 작업, 예지·연마 작업, 접착·라미네이션 작업, 청소·보수 작업 및 설치·철거 작업 등으로 구분하여 설정할 필요가 있다.

##### 2. 호흡보호구, 건강감시 및 취약근로자 보호

호흡보호구는 공학적 제어대책을 대체하는 수단이 아니라, 공학적·관리적 대책을 적용한 뒤에도 남은 노출, 설비 고장·정비 등 비정상 작업, 그리고 단시간의 고농도 노출에 대비하기 위한 보완적 보호수단이다. 사업장에서는 노출평가에 근거한 보호구 선정, 의학적 평가, 밀착도검사, 착용 교육, 세척·보관, 필터 교체 및 밀착을 방해하는 요인의 관리를 포함하는 호흡보호 프로그램을 운영할 필요가 있다. 일회용 방진마스크를 지급하는 것만으로는 이러한 호흡보호 프로그램을 갖추었다고 보기 어렵다(NIOSH & OSHA, 2026).

본 고찰에서는 ES 고위험 작업자에게 법정 특수건강진단을 충실히 시행하는 것을 기본으로 하되, 배치 전 또는 배치 초기 단계에서 노출력과 호흡기 건강상태를 확인하고, 이후 매년 노출력과 호흡기 증상을 점검하는 강화된 관리체계를 제안한다. 이는 현행 국내 법정 검진주기를 대체하는 새로운 의무가 아니라, 고위험 작업자에게 추가로 적용할 수 있는 관리방안이다. 폐기능검사와 흉부영상검사의 추가 시행 여부는 누적노출력, 증상, 기존 폐기능검사 또는 흉부영상검사 이상, 그리고 전문의의 판단을 종합하여 결정할 필요가 있다. 고해상도 흉부 컴퓨터단층촬영(high-resolution computed tomography, HRCT)은 무증상 작업자 전체에 일괄 적용하기보다, 누적노출력이 높거나 호흡기 증상, 폐기능 저하, 흉부 X선 이상이 있거나 전문의가 필요하다고 판단한 경우에 고려할 수 있다. Heinzerling et al.(2021)의 단일 사업장 선별연구는 선별검사를 통해 상당수의 규폐증 사례가 확인될 수 있음을 보여주지만, 모든 작업자에게 매년 HRCT를 시행해야 한다는 근거는 아니다.

자연석 가공, 광산, 주물 및 건설업에서의 과거 광물

성 분진 노출력도 함께 기록할 필요가 있다. 또한 이주·일용·하도급 근로자처럼 고용형태 또는 사업장 이동이 잦은 근로자가 감시체계에서 누락되지 않도록, 사업장 이동 후에도 노출력과 검진결과가 연계·추적될 수 있는 관리방안을 마련할 필요가 있다(NIOSH, 2026).

### 3. 규제·감시체계의 단계적 강화

호주는 2024년 7월부터 ES 상판·패널·판재의 제조·공급·가공 및 설치를 원칙적으로 금지하였다. 다만 기존에 설치된 ES의 철거·보수·경미한 개조, 폐기, 연구 및 시료 확인 등에는 제한적인 예외가 적용된다(Safe Work Australia, 2024). 미국 캘리포니아는 2023년 말 도입한 결정형 실리카 관련 응급 규칙을 2025년 2월 영구화하여, 인조석 및 결정형 실리카 함량이 높은 자연석의 절단·연삭·연마·청소 등 고노출 유발작업에 대한 보호조치를 강화하였다(California Department of Industrial Relations, 2024; California Department of Industrial Relations, 2026). 또한 2026년 5월에는 결정형 실리카 함량이 1%를 초과하는 인조석의 제작·설치를 금지하도록 요청한 청원을 수용하여, 관련 규정 개정방안에 관한 자문과 검토 절차를 개시하였다. 다만 2026년 7월 현재 해당 금지 규칙은 확정·시행되지 않은 상태이다(California Department of Industrial Relations, 2026).

한국에서도 우선 ES 관련 사업장의 현황을 파악하고, 제품별 광물상 정보의 관리체계, 노출자료와 질병자료를 연계한 감시체계, 집단발생 사례에 대한 역학조사체계를 구축할 필요가 있다. 이러한 기초자료를 바탕으로 고실리카 ES의 수입·제조·가공을 제한하거나 허가 또는 금지할 필요가 있는지를 위험도, 대체재의 위해성 및 분진 제어대책의 실현 가능성과 함께 단계적으로 검토할 수 있다. ‘저실리카’ 또는 ‘무실리카’ 제품도 수지, 다른 무기분진 및 가공분진의 위해성을 별도로 평가해야 하므로, 일률적으로 안전한 제품으로 간주해서는 안 될 것으로 판단된다.

### 4. 한계

본 연구는 체계적 문헌고찰이 아니라, 사전 기준에 따라 문헌을 탐색·정리한 서술적 문헌고찰이다. 따라서 문헌선정과 자료추출을 독립적으로 이중 수행하거나, 연구별 비뮌 위험을 정식으로 평가하지는 못했다. 다만 검색 데이터베이스, 검색기한, 핵심 검색어, 포함·제

외기준 및 최종 포함문헌의 구성은 본문에 제시하였다. 이러한 한계로 인해 문헌 누락, 문헌선정 판단 및 자료 추출 오류의 가능성을 완전히 배제할 수는 없다.

국가별 노출기준, 시료채취시간, 미측정시간 처리 방식, 사용 재료와 광물상의 확인 여부, 사업장 표본추출 방식 및 분진 제어 상태가 서로 달라 동일한 농도를 직접 비교하기 어렵다. 임상문헌도 전문기관 의뢰 환자군과 수동감시 자료가 많아, 유병률이나 임상형 비율을 전체 ES 가공·취급작업 근로자에게 일반화할 수 없다. 본 고찰의 검색 범위에서는 국내 ES 작업자를 대상으로 한 공개 개인 RCS 노출연구와 체계적인 환자감시 자료를 확인하지 못했다. 따라서 Table 1에 제시된 값은 한국의 평균 노출수준을 나타내는 값이 아니라, 문헌에서 보고된 위험범위와 노출 결정요인을 보여주는 근거로 해석해야 한다. Table 3의 발견률과 사례도 대상자 선정방식 및 일반화의 한계와 함께 해석해야 한다.

## V. 결 론

석영계 ES의 가공·취급 작업은 높은 RCS 노출과 중증 규폐증이 반복적으로 보고된 고위험 작업이다. 검토한 연구에서 건식 절단·연삭 등 분진 발생량이 큰 가공작업과 분진 제어가 충분하지 않은 조건에서는 RCS 노출기준인  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 수 배 초과하는 개인노출이 확인되었으며, 일부 현장 개인시료에서는 시료채취시간 동안 측정된 농도가  $5,100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 100배를 넘는 수준까지 보고되었다. 따라서 ES 작업의 위험은 제품명만으로 판단할 수 없으며, ES 판재의 광물상별 조성, 가공작업의 특성, 청소·보수작업 중 발생하는 노출, 그리고 일부 근로자가 관리체계에서 누락될 가능성을 함께 고려해야 한다.

또한 제품별로 석영·크리스토파라이트 등 결정질 광물상을 확인하고, 건식 공정을 제거하며, 분진이 발생하는 가공 부위에 물을 지속적으로 공급하고 국소배기장치로 발생 분진을 포집해야 한다. 이러한 관리대책의 실제 분진저감 효과는 개인 RCS 측정을 통해 검증해야 한다. 아울러 고위험 작업 종사자의 노출정보와 건강영향을 연계하여 감시하고, 의심사례와 집단발생을 조기에 파악할 수 있는 노출·질병 등록체계를 구축할 필요가 있다. 이들 조치는 ES 작업의 특성을 반영한 통합적 예방관리체계로 운영되어야 한다.

## References

- Breton S.p.A. History [Internet]. Castello di Godego (IT): Breton S.p.A.; 2026 [cited 2026 July 15]. Available from: [https://breton.it/en\\_eu/about-us/history](https://breton.it/en_eu/about-us/history)
- California Department of Industrial Relations. Standards Board votes to adopt permanent standard protecting workers from silica hazards [Internet]. Sacramento (CA): California Department of Industrial Relations; 2024 Dec 19 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.dir.ca.gov/DIRNews/2024/2024-111.html>
- California Department of Industrial Relations. Standards Board advances efforts to protect workers from silicosis [Internet]. Los Angeles (CA): California Department of Industrial Relations; 2026 May 22 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.dir.ca.gov/DIRNews/2026/2026-45.html>
- Carrieri M, Guzzardo C, Farcas D, Cena LG. Characterization of silica exposure during manufacturing of artificial stone countertops. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(12):4489. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124489>
- Cooper JH, Johnson DL, Phillips ML. Respirable silica dust suppression during artificial stone countertop cutting. *Ann Occup Hyg* 2015;59(1):122-126. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu083>
- DeVaughn A, Go LHT, Cohen RA, Shao Y. Investigation of occupational exposure to respirable crystalline silica (RCS) among engineered stone fabricators in Chicago—a pilot study. *J Occup Environ Hyg* 2025;22(2): 101-109. <https://doi.org/10.1080/15459624.2024.2421488>
- Di Benedetto F, Giaccherini A, Montegrossi G, Pardi LA, Zoleo A, et al. Chemical variability of artificial stone powders in relation to their health effects. *Sci Rep* 2019;9:6531. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42238-2>
- Fazio JC, Gandhi SA, Flattery J, Heinzerling A, Kamangar N, et al. Silicosis among immigrant engineered stone (quartz) countertop fabrication workers in California. *JAMA Intern Med* 2023;183(9):991-998. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2023.3295>
- Fazio JC, Viragh K, Houlroyd J, Gandhi SA. A review of silicosis and other silica-related diseases in the engineered stone countertop processing industry. *J Occup Med Toxicol* 2025;20:9. <https://doi.org/10.1186/s12995-025-00455-8>
- Feary J, Devaraj A, Burton M, Chua F, Coker RK, et al. Artificial stone silicosis: a UK case series. *Thorax* 2024;79(10):979-981. <https://doi.org/10.1136/thorax-2024-221715>
- Freedonia Group. Global demand for engineered stone countertops to exceed \$9 billion in 2028 [Internet]. Cleveland (OH): The Freedonia Group; 2024 Aug 29 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.freedoniagroup.com/press-releases/global-demand-for-engineered-stone-countertops-to-exceed-9-billion-in-2028>
- Friedman GK, Harrison R, Bojes H, Worthington K, Filios M. Notes from the field: silicosis in a countertop fabricator—Texas, 2014. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 2015;64(5):129-130
- Guarnieri G, Salasnick M, Lucernoni P, Sbaraglia M, Putzu MG, et al. Silicosis in finishing workers in quartz conglomerates processing. *Med Lav* 2020;111(2): 99-106. <https://doi.org/10.23749/mdl.v111i2.9115>
- Hall S, Stacey P, Pengelly I, Stagg S, Saunders J, et al. Characterizing and comparing emissions of dust, respirable crystalline silica, and volatile organic compounds from natural and artificial stones. *Ann Work Expo Health* 2022;66(2):139-149. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab055>
- Heinzerling A, Cummings KJ, Flattery J, Weinberg JL, Materna B, et al. Radiographic screening reveals high burden of silicosis among workers at an engineered stone countertop fabrication facility in California. *Am J Respir Crit Care Med* 2021;203(6):764-766. <https://doi.org/10.1164/rccm.202008-3297LE>
- Hsu SC, Chen YJ, Fan HY, Wang CW, Lee HJ, et al. Successful lung transplantation for artificial stone-associated accelerated silicosis: a case report. *Ind Health* 2024;62(3):209-214. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2023-0093>
- Johnson DL, Phillips ML, Qi C, Van AT, Hawley DA. Experimental evaluation of respirable dust and crystalline silica controls during simulated performance of stone countertop fabrication tasks with powered hand tools. *Ann Work Expo Health* 2017;61(6):711-723. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx040>
- Kramer MR, Blanc PD, Fireman E, Amital A, Guber A, et al. Artificial stone silicosis: disease resurgence among artificial stone workers. *Chest* 2012;142(2):419-424. <https://doi.org/10.1378/chest.11-1321>
- Kumarasamy C, Pisaniello D, Gaskin S, Hall T. What do safety data sheets for artificial stone products tell us about composition? A comparative analysis with physicochemical data. *Ann Work Expo Health* 2022;66(7):937-945. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac020>
- León-Jiménez A, Hidalgo-Molina A, Conde-Sánchez MÁ, Pérez-Alonso A, Morales-Morales JM, et al.

- Artificial stone silicosis: rapid progression following exposure cessation. *Chest* 2020;158(3):1060–1068. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2020.03.026>
- Leso V, Fontana L, Romano R, Gervetti P, Iavicoli I. Artificial stone associated silicosis: a systematic review. *Int J Environ Res Public Health* 2019;16(4):568. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040568>
- Martínez González C, Prieto González A, García Alfonso L, Fernández Fernández L, Moreda Bernardo A, et al. Silicosis in artificial quartz conglomerate workers. *Arch Bronconeumol* 2019;55(9):459–464. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2019.01.017>
- McGowan CM, Cantley LF, Klein R, Redlich CA. Work practices and respirable crystalline silica exposures in stone countertop fabrication shops. *Am J Ind Med* 2025;68(11):973–987. <https://doi.org/10.1002/ajim.70020>
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure limits for chemical substances and physical agents (MoEL Public Notice No. 2020–48) [Internet]. Sejong (KR): Ministry of Employment and Labor; 2020 Jan 14 [cited 2026 July 15]. Available from: [https://www.moel.go.kr/info/lawinfo/instruction/view.do?bbs\\_seq=20200100629](https://www.moel.go.kr/info/lawinfo/instruction/view.do?bbs_seq=20200100629)
- Ministry of Government Legislation. Enforcement Rule of the Occupational Safety and Health Act [Internet]. Sejong (KR): Korean Law Information Center; 2026 Jul 15 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=288431>
- National Institute for Occupational Safety and Health. 1988 OSHA PEL project – cristobalite [Internet]. Cincinnati (OH): National Institute for Occupational Safety and Health; 1988 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/chemicals/pel88/pell-pages/14464-46.html>
- National Institute for Occupational Safety and Health. Silica hazards from engineered stone countertops [Internet]. Atlanta (GA): Centers for Disease Control and Prevention; 2014 Mar 11 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/bulletin/2014/countertops.html>
- National Institute for Occupational Safety and Health. Symptoms and medical monitoring [Internet]. Atlanta (GA): Centers for Disease Control and Prevention; 2026 Jul 7 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/silica/symptoms/index.html>
- National Institute for Occupational Safety and Health, Occupational Safety and Health Administration. Worker exposure to silica during countertop manufacturing, finishing and installation [Internet]. Atlanta (GA): Centers for Disease Control and Prevention; 2026 Feb 26 [cited 2026 Aug 28]. DHHS (NIOSH) Publication No. 2026–101, OSHA HA–3768–2026. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2026-101/pdfs/2026-101.pdf>
- Occupational Safety and Health Administration. Occupational exposure to respirable crystalline silica: final rule. *Fed Regist* 2016;81(58):16285–16890. Available from: <https://www.osha.gov/laws-regs/federalregister/2016-03-25-1>
- Paolucci V, Romeo R, Sisinni AG, Bartoli D, Mazzei MA, et al. Silicosis in workers exposed to artificial quartz conglomerates: does it differ from chronic simple silicosis? *Arch Bronconeumol* 2015;51(12):e57–e60. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2014.12.010>
- Pérez-Alonso A, Córdoba-Doña JA, Millares-Lorenzo JL, Figueroa-Murillo E, García-Vadillo C, et al. Outbreak of silicosis in Spanish quartz conglomerate workers. *Int J Occup Environ Health* 2014;20(1):26–32. <https://doi.org/10.1179/2049396713Y.0000000049>
- Phillips ML, Johnson DL, Johnson AC. Determinants of respirable silica exposure in stone countertop fabrication: a preliminary study. *J Occup Environ Hyg* 2013;10(7):368–373. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.789706>
- Ramkissoon C, Gaskin S, Thredgold L, Hall T, Rowett S, et al. Characterisation of dust emissions from machined engineered stones to understand the hazard for accelerated silicosis. *Sci Rep* 2022;12:4351. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08378-8>
- Rishi K, Ku BK, Qi C, Thompson D, Wang C, et al. Release of crystalline silica nanoparticles during engineered stone fabrication. *ACS Omega* 2024;9(51):50308–50317. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06437>
- Rose C, Heinzerling A, Patel K, Sack C, Wolff J, et al. Severe silicosis in engineered stone fabrication workers—California, Colorado, Texas, and Washington, 2017–2019. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 2019;68(38):813–818. <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6838a1>
- Salamon F, Martinelli A, Vianello L, Bizzotto R, Gottardo O, et al. Occupational exposure to crystalline silica in artificial stone processing. *J Occup Environ Hyg* 2021;18(12):547–554. <https://doi.org/10.1080/15459624.2021.1990303>
- Seneviratne M, Shankar K, Cantrell P, Nand A. Respirable silica dust exposure of migrant workers informing regulatory intervention in engineered stone fabrication. *Saf Health Work* 2024;15(1):96–101. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.01.003>
- Shen HS, Lai YT, Tsai HC, Chang SC. Artificial stone-associated silicosis with concurrent *Cryptococcus* infection. *Respirol Case Rep* 2021;9(6):e00765. <https://doi.org/10.1002/rcr.2.765>
- Soo JC, Houlroyd J, Warren H, Philpot BJ, Castillo S.

- Respirable dust and respirable crystalline silica exposures among workers at stone countertop fabrication shops in Georgia from 2017 through 2023. *Ann Work Expo Health* 2025;69(5):473–485. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaf014>
- Surasi K, Ballen B, Weinberg JL, Materna BL, Harrison R, et al. Elevated exposures to respirable crystalline silica among engineered stone fabrication workers in California, January 2019–February 2020. *Am J Ind Med* 2022;65(9):701–707. <https://doi.org/10.1002/ajim.23416>
- Thompson D, Qi C. Characterization of the emissions and crystalline silica content of airborne dust generated from grinding natural and engineered stones. *Ann Work Expo Health* 2023;67(2):266–280. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac070>
- Wang C, Rishi K, Ku BK, Kulkarni P, Thompson D, et al. Compatibility of engineered stone materials with tetrahydrofuran processing for crystalline silica analysis by XRD. *Ann Work Expo Health* 2026;70(1):wxaf052. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaf052>
- Weller M, Clemence D, Lau A, Rawlings M, Robertson A, et al. An assessment of worker exposure to respirable dust and crystalline silica in workshops fabricating engineered stone. *Ann Work Expo Health* 2024; 68(2):170–179. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxad072>
- Safe Work Australia. Engineered stone ban [Internet]. Canberra (AU): Safe Work Australia; 2024 [cited 2026 July 15]. Available from: <https://www.safeworkaustralia.gov.au/safety-topic/hazards/silica/engineered-stone-ban>
- Zwack LM, Victory KR, Brueck SE, Qi C. Evaluation of crystalline silica exposure during fabrication of natural and engineered stone countertops [Internet]. Cincinnati (OH): National Institute for Occupational Safety and Health; 2016 Mar [cited 2026 Aug 28]. Report No. HHE 2014–0215–3250. doi:10.26616/NIOSH-HHE201402153250. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/hhe/reports/pdfs/2014-0215-3250.pdf>

#### <저자정보>

김부욱(교수), 박소영(교수)

## Appendix. Clinical evidence map for engineered-stone-associated silicosis

**Appendix Table A1.** Clinical studies included in the narrative review

| Study and setting                      | Design / ascertainment                                                       | Key evidence summarized                                                                                                                                                          | Interpretive limitation                                                                                                  |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kramer et al. (2012), Israel           | Retrospective lung-transplant referral cohort                                | 25 patients referred; 10 underwent transplantation                                                                                                                               | Severe disease in a highly selected referral population; not an estimate of workforce prevalence                         |
| Pérez-Alonso et al. (2014), Spain      | Outbreak investigation and case series                                       | 46 men; median age 33 years; median countertop-work duration 11 years                                                                                                            | Early cluster evidence; ascertainment and regional outbreak context limit prevalence inference                           |
| Paolucci et al. (2015), Italy          | Three clinical cases                                                         | Three cases; two workplaces had respirable silica far above recommended levels; bronchoalveolar lavage findings in two cases were interpreted in relation to accelerated disease | Small case series; useful for exposure-clinical linkage but not frequency estimation                                     |
| Friedman et al. (2015), Texas          | Sentinel public-health case report                                           | One countertop fabricator with silicosis                                                                                                                                         | Single sentinel case; demonstrates occurrence, not incidence                                                             |
| Rose et al. (2019), USA                | Multistate public-health case series                                         | 18 cases in four states, including two fatalities; severe progressive disease reported                                                                                           | Heterogeneous state investigations and passive/clinical ascertainment                                                    |
| Martínez González et al. (2019), Spain | Clinical cohort                                                              | 96 cases; 10 classified as accelerated (mean age 33); mean ES exposure 15 years, range 5–34                                                                                      | Referral cohort; simple/complicated radiographic categories are not equivalent to chronic/accelerated latency categories |
| Guarnieri et al. (2020), Italy         | Active case finding in 11 companies                                          | 45 workers examined; 24 silicosis cases; exposure duration 3.5–20 years                                                                                                          | Regional high-risk workforce; active screening improves detection but cannot be generalized to all ES workers            |
| León-Jiménez et al. (2020), Spain      | Longitudinal clinical cohort                                                 | 106 cases; 28 (26.4%) developed accelerated silicosis 5–10 years after first ES exposure; PMF increased from 7 to 40 over a mean 4.01 years after exposure cessation             | Specialty cohort; strong evidence of progression after cessation, not workforce prevalence                               |
| Heinzerling et al. (2021), California  | Single-facility radiographic screening of all 43 current fabrication workers | Five workers (11.6%) had silicosis; median case age 40 years                                                                                                                     | Single facility; current workers only; chest radiography may underestimate disease                                       |
| Shen et al. (2021), Taiwan             | Single case report                                                           | 33-year-old, 8 years of artificial-stone grinding; silicoproteinosis and Cryptococcus infection 7 months after accelerated-silicosis diagnosis; lavage and ECMO                  | No quantitative personal RCS measurement; rare-case evidence                                                             |
| Fazio et al. (2023), California        | Statewide surveillance case series                                           | 52 men; 51 Latino immigrants; median work tenure 15 years; 10 deaths                                                                                                             | Reported and clinically recognized cases; describes severity and inequity, not prevalence                                |
| Hsu et al. (2024), Taiwan              | Single case report                                                           | 43-year-old cutter/polisher with severe accelerated silicosis, bilateral pneumothorax, and lung transplantation                                                                  | Single case; supports clinical severity and transplant need                                                              |
| Feary et al. (2024), United Kingdom    | Referral-based case series                                                   | Eight men; median age 34 years; median exposure 12.5 years; one death and two transplant referrals                                                                               | Small first UK series; referral-based and not a population prevalence estimate                                           |

This evidence map summarizes selected clinical studies; it does not pool prevalence. PMF = progressive massive fibrosis; BAL = bronchoalveolar lavage; HRCT = high-resolution computed tomography; ECMO = extracorporeal membrane oxygenation.