

건축 산업에서 발생하는 실리카와 먼지의 공학적 제어

전문연구위원 이경운

1. 개요

- 건축산업에서의 나오는 먼지와 특정 실리카에 대한 공학적 제어 기술 연구를 살펴보았다.
- 특정 실리카에 노출은 규폐증(silicosis)과 폐섬유증(lung fibrosis)을 유발할 수 있고 폐암으로 발전할 수도 있다. 30여 개의 보고서들은 4가지 일(벽돌이나 콘크리트 블록을 자르는 일, 벽돌들 사이의 모르타르를 가는 일, 구멍뚫기, 콘크리트 표면 갈기)을 할 때의 실리카와 먼지 생성속도와 노동자의 노출에 대한 정보를 포함하고 있다. 중요한 제어 방법으로 습식 방법과 부분적 배기가스 환기가 있다.
- 석영, cristobalite 또는 trydimite와 같은 결정체로 된 규소의 흡입은 오래전부터 규폐증, 광범위한 섬유증과 폐암과 같은 폐병과 연관되어 왔다. 여러 기관 및 단체에서는 규소 및 먼지의 흡입에 관한 한계치를 제시하고 있다.
- 최근 논문들은 공사현장의 공중에 떠있는 먼지와 규소에 현저하게 노출되는 것은 다른 일과 관련되어있다고 말한다. 이것은 위에서 언급한 4가지의 일이다. 돌과 화강암 작업을 하는 동안 발생된 규소 노출을 위한 성공적인 국소 배기가스 환기(local exhaust ventilation, ELV) 제어는 1930년대에 일찍이 기록되었다. 벽돌들 사이의 모르타르를 제거하는 일, 콘크리트의 표면을 가는 일, 콘크리트 벽돌을 자르는 일, 규소를 포함한 물질의 구멍 뚫는 일 등의 구체적인 작업을 평가하였다. 이런 작업들로부터 규소의 제어에 적절한 정보들을 보고하고 있는 요즘 문헌들을 요약하였다.

2. 이음매 작업(Re-pointing) 전의 모르타르 제거

- 현존하는 석조건축물의 노후화에 따라 벽돌, 콘크리트 블록과 돌 같은 석조물들의 수리를 포함한 재건축 프로젝트가 점점 중요해지고 있다. 석조물 사이의 모르타르를 제거하기 위해 일반적으로 손에 들고 쓰는 각분쇄기(angle grinder)를 가지고 기존의 벽돌에 손상이 가지 않게 조심하며 제거한다. 몇몇 연구는 이런 종류의 갈기 작업들 동안 노동자의 노출 정도를 보고한다. 첫번째는 재건축 중의 오래된 모르타르를 제거하기 위해 분쇄기를 사용하는 노동자의 호흡할 수 있는 실리카 노출을 포함한다.
- 벽돌 사이에서 모르타르를 제거하기 위한 유사한 현장 연구에 따르면 순식간에 분쇄기가 환기되지 않으면 충분한 흐름이 생기지 않아 작업현장으로 다시 먼지가 분출된다. 호흡할 수 있는 먼지의 평균 노출은 4명의 작업자의 경우 $20.99\text{mg}/\text{m}^3$ 이고 기준 편차는 $14\text{mg}/\text{m}^3$ 이다. 유사한 호흡가능한 실리카 노출은 평균 $2.94\text{mg}/\text{m}^3$ 이고 기준 편차는 1.68 그리고 $0.1\sim 4.5\text{mg}/\text{m}^3$ 의 범위이다. 이 연구는 환기되는 4인치 각 분쇄기를 위한 덮개 마다 120cfm의 권장을 인용하였다.
- 벽돌과 콘크리트 벽돌 자르기, 벽돌 사이의 모르타르 갈기, 표면 갈기를 포함한 몇 개의 다른 실리카 노출 시나리오들을 평가한 제어된 현장 실험을 포함한 연구가 있다. 환기 속도, 먼지의 방출 속도 그리고 노출의 측정이 발표되어졌고 신중한 통계적인 분석이 행해졌다. 예를 들어 십자 통풍, 실리카를 포함한 물질들 그리고 다른 일률과 같은 복합적인 경우를 위해 잘 제어된 환경에서 합리적으로 실험이 행해졌다. 개량된 장비 디자인에 기초를 두고 최적의 해결책을 나타내고 있다. 저자는 이것이 감압, 공기정화, 마스크의 사용이 허가되어 PEL보다 10배 이하로 감소된 첫번째 노출이라고 제안한다.
- 마지막 분야 연구는 대학 기숙사 보수 공사에서 모르타르를 제거하는 벽돌 공과수습생들의 보고된 먼지와 실리카 노출을 인용하였다. 노동자들은 4.5인치 지름의 1.4인치 너비의 다이아몬드 바퀴로 이루어진 손에 들고 쓰는 전기 분쇄기를 사용하였다. 분쇄기는 국수 배기가스 시스템을 장착하고 약 바퀴의 80%를 덮는 플라스틱 덮개를 가지고 있었다. 분쇄기의 모터에 의해 구동되는 날개바퀴에 의해 먼지가 배출된다. 먼지는 1.5인치 지름의 호스를 통해 섬유제의 여과통으로 이동된다. 실리카 노출 범위는

6.9mg/m³에서 발견되지 않은 경우까지 이고 유사한 먼지의 노출은 0.106~49.32mg/m³이었다

- 현장연구에 더하여, 환기를 하는 경우와 하지 않는 경우의 모르타르를 제거할 때 생성되는 먼지 양의관계에 대한 중요한 실험실 연구가 행해졌다. 저자는 부분 배기 시스템이 없을 때 모르타르를 제거하기 위해 가는 동안 1cm³당 20mg의 먼지가 발생된다고 보고했다. 4인치 연마 바퀴에서 80cfm이 0.2mg/cc 아래로 분출되도록 하는 최소 부분 배기 흐름이다. 35cfm의 부분 배기 흐름에서도 똑 같은 먼지의 생성 수준을 성공적으로 이룰 수 있었다. 유량을 더 증가시키는 것은 추가적인 효과를 일으키지는 않는 것 같았다. 보고서의 그림은 분쇄기의 점근율(asymptotic rates)이 0.1mg/cc일 때 최소 먼지 생성율(최고 배기 유량에 기초해서)이 0.01mg/cc에 접근한다고 시사한다. 저자는 분쇄기가 역방향으로 움직일 때 먼지 분출이 증가함을 관찰하였다. 저자는 4인치 분쇄기는 20cfm/inch의 날 또는 바퀴 지름이 배출을 제어하기 위해 (ACGIH Ventilation Manual이 권고하는 25cfm/inch에 부합) 필요하다고 결론내렸다.

3. 표면 연마 기술

- 모르타르 제거 작업에 더하여 중요한 노출은 콘크리트 벽과 바닥의 표면 갈기와 매끄럽게 만드는 중에 일어난다. 한 연구는 4인치 바퀴를 사용하는 전기 분쇄기를 가지고 콘크리트 벽을 매끄럽게 만드는 노동자의 먼지와 실리카 노출에 주시하였다. 세 가지 상용화된 환기 시스템들과 습식 방법들이 제어으로써 평가되었다. 습식 방법과 국소 배기 방법은 제어를 하지 않는 경우에 비해 상당한 노출이 감소되었다.
- 두번째 현장 연구는 체육관의 콘크리트 벽과 기둥들의 표면 가공 동안의 노출을 보고하였다. 노동자들은 5인치 지름의 분쇄기를 사용하였고 평균 노출(N=7)이 실리카 0.25mg/m³, 먼지 2.24mg/m³ 임을 보여주었다. 생산성의 저하와 후드의 덮개의 코너 작업방해 등의 이유로 국소 환기 후드는 사용되지 않았다.
- 위에서 보고된 각 분쇄 작업에 더하여 Croteau는 또한 표 4에 자료가 보고된 표면 가공 연구도 행하였다. 최근 논문에 실리카 표본으로서 49명이 콘크리

트에 광을 내기 위해 그라인더를 사용하여 선 자세로 작업 했다고 보고되었다. 농도는 $0.31\sim 81.0\text{mg}/\text{m}^3$ 이고 실리카의 농도는 $0.02\sim 7.1\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 분쇄기 중 15개는 유량이 명기되지 않은 국수 환기 장치가 장착되었고 이것을 사용한 작업자들의 평균 실리카 노출은 $0.38\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 이것을 사용하지 않은 경우의 $1.5\text{mg}/\text{m}^3$ 과 비교되어진다. 저자는 호흡 범위에서 먼지를 밀어내는 주위 바람의 방향이 작업자를 보호하는 효과라고 기술하였다.

- 콘크리트 인도의 표면 연마 동안 생성되는 실리카의 노출이 보고 된 웹사이트에서 정보를 다운받을 수 있다. 7인치 표면 연마기의 경우 Sawtec Mini Vac을 상용한 경우와 제어하지 않은 경우의 비교가 이루어졌다. 알루미늄 집진장치로 제어하지 않은 실리카 노출을 측정하였을 때 $11.71\text{mg}/\text{m}^3$ 이었지만 6ft 호스가 연결된 Mini Vac을 사용한 경우 $0.48\text{mg}/\text{m}^3$, 25ft 호스가 연결된 경우 $0.4\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다.

4. 절단과 톱질 작업

- 제어하기 위해 도전하는 작업들 중의 하나는 콘크리트 블록과 벽돌 물질의 절단이다. 이것을 하기 위해 사용되는 톱들은 특정한 장비로 특히 이동 가능한 석조용 톱이 있다. 그림 4는 이동 가능한 석조용 톱(chop saw)이 콘크리트 블록을 자르기 위해 사용되었을 때 생성되는 먼지 구름의 형태를 보여준다. 습식 방법은 제어를 얻기 위해 필수적인 것으로 나타나고 몇몇 최근 연구들은 타당하다. 그림 5는 먼지를 진정시키기 위해 물을 사용하는 고정된 석조용 톱을 보여준다. 건설업에서의 절단 톱들을 위한 먼지 억제시스템들의 연구실과 현장 연구는 습식 방법들과 국부 배기가스 환기 모두현장에서 3~7배 정도의 감소가 이루어진다고 기술한다. 습식 방법과 국부 배기가스 환기 방법 또한 적어도 90%의 먼지가 줄어든다. 수지 칼날보다 다이아몬드 칼날 바퀴가 더 빠르게 자르고 물저장소의 압력이 떨어지기 전에 절단이 이루어지게 된다.

- Croteau의 이론에서 역시 고정된 석조용 톱들과 손에 들고 쓰는 톱들에 대한 먼지 노출을 위한 제어를 주시하였다. 국소 환기 장치의 세 가지 수준이 평가되었다. 통계적으로 중요한 ($p<0.05$) 노출 감소는 비록 감소가 TLV의 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 아래로 유지되더라도 손에 들고 쓸 수 있는 톱을 제외한 모든 경우에서 보고 되었다. 이동 가능한 톱의 작업자는 환기 시스템이 있는 경우와 없는 경우 모두 $2.4\text{mg}/\text{m}^3$ 의 먼지 수준을 가졌다. 표 5는 석조

용 톱에 대한 결과들을 나타낸다. 한 연구는 부분적으로 폐쇄된 부스 형태의 덮개에서 약 930cfm으로 환기되는 고정된 석조용 톱을 주시하였다. 제어하지 않은(환기 없이 열린 공간에서 건조 절단) 경우 농도는 $5.03\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 결과가 나타났다. 환기를 할 경우 $0.74\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 낮아졌다. 이 연구는 환기 시스템의 여과통이 먼지로 빠르게 포화되었으며 일반적으로 환기 디자인이 특별히 좋지 않았다고 기술했다.

- 또 다른 연구에서 실내에서 콘크리트 청공 작업, 벽과 석판 톱질을 포함한 습식 절단 작업 동안의 실리카 노출을 검토하였다. 5명의 작업자가 석판을 자를 동안의 평균 노출은 $0.31\text{mg}/\text{m}^3$, 벽 절단 작업은 $0.13\text{mg}/\text{m}^3$ 그리고 코너에서는 $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 석판 톱질 중의 2가지는 물 유량이 0.5gallon/min(GPM)이고 작업자들의 평균 노출은 $0.33\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 반면에 물 유량이 2.0GPM의 경우 $0.11\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 특별히 그것을 언급하지 않더라도 모든 측정들은 호흡 가능함을 나타낸다.
- NIOSH 조사자들은 먼지 생성율을 10인치 고정형 석조용 톱의 연구실 실험을 검토하였다. 국부 배출 환기 장치가 없을 때 먼지 농도는 추출 터널에서 $13\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 벽돌 아래에서 93cfm, 날 지지대로부터 113cfm일 때 추출 터널농도는 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 떨어졌다. 그들은 20cfm/inch의 날이 배출을 제어하기 위해 필요하다고 결론지었다. 또한 일련의 현장 연구들에서 NIOSH 조사자들은 또한 높은 노출이 콘크리트와 석조물의 절단과 관계가 있다고 서술하고, 습식방법이 사용되었을 때 낮은 노출을 보여 주었다.

5. 청공 작업

- 위에서 규정한 작업들에 더하여 청공, 콘크리트 섞기, 청소를 포함한 실리카 발생을 야기 시키는 많은 다른 건축 일들이 있다. NIOSH 조사자들은 채석장에서 바위에 구멍을 뚫는 작업들을 표본 조사했다. 드릴은 바위와 접하는 면에 10~100gallons/day로 물을 공급하는 스프레이를 장착했다. 공기와 부스러기를 끌어들이기 위해 국부배출 후드와 공기 정화기 또한 사용되었다. 게다가 조사자들이 기술한대로 작업자들이 종종 낮 시간 동안 뚜껑의 창문을 열어두는 것에도 불구하고 폐쇄된 차량들을 위해 뚜껑을 제공하였다. 여기서 모든 노출은 (N=5) TLV의 실리카 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 이하로 보고 되었다.

- Flanagan은 다리 재건축 프로젝트에서 콘크리트에 구멍 뚫는 작업 동안의 실리카 노출을 보고하였다. 청공작업자의 TWA 실리카 노출은 $0.09\sim0.08\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 석공들의 노출은 $0.03\text{mg}/\text{m}^3\sim0.08\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 상자에 넣고 쓰는 드릴은 확연하게 낮은 노출을 보였다. 저자는 알루미늄과 나일론 원심분리식 집진장치 모두를 사용하였고 여기서 보고 된 결과는 1.7Lpm의 나일론 집진장치로 사용한 것이다.
- 최근 연구는 호흡지역에서 깨끗한 공기를 불어주는 것과 먼지 저감의 관계를 설명하고 정량화한다. Chipping hammers, 콘크리트 파쇄기 그리고 작업마기 들이 현장에서 평가되었고 공기를 불어주는 경우와 불어주지 않는 경우의 실시간 먼지 농도를 비교하였다. 감소는 20분이 지나지 않아서 명백해졌다. 다른 현장 연구에서 작업자들의 개인 노출 측정은 고속도로 건설에서 수집되었다. 외관상으로 사용되는 제어가 거의 없고 콘크리트를 섞는 작업자의 호흡 지역으로부터 먼지를 날리기 위한 팬의 사용이 관찰될 뿐이다. 조사자들은 첫 표본을 팬으로부터 아래로 8ft 떨어진 곳에서 수집하고 개인 표본도 구하였다. 지역의 먼지가 $0.91\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 측정된 반면에 개인의 먼지 측정은 $6.17\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 보고 되었다. 저자는 개인 표본은 3.5micron이하의 물질이 13%인 반면에 지역 표본은 30%를 가지고 있었다고 서술하였다. 팬은 작업자에게 어떤 크기의 입자들에 대한 노출을 감소시키는 영향을 가진다.
- Riala는 건설 청소부들의 먼지와석영의 노출을 보고하였다. 건조한 쓸기 동안의 평균 총 먼지는 $32\text{mg}/\text{m}^3$, 석영은 $0.53\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. 진공청소가 쓰는 것보다 노출을 감소시킨다. 다른 연구는 중앙 진공 시스템의 사용을 재건축 현장에서의 제어 측정으로 제안한다.
- 작업자들의 결정화된 실리카와 먼지에 대한 노출은 여기서 검토된 작업들을 포함하여 많은 건축 일들에서 도전적인 제어 문제로 남아있다. 이런 노출들의 연구가 보고 되고 있을지라도 상대적으로 효과적인 공학적 제어를 기록하기 위해 필요한 종합적인 정보를 포함하고 있지 않다. 환기와 물 유량, 먼지 생성을 그리고 실제 작업에 대한 부분적 정량적 정보가 부족하다. 그러나 몇몇 연구들이 검토되었고, 많은 유용한 정보 및 결과가 요약 되었다. 건설업에서 최적의 제어 해결책을 필요하더라도, 요즘 기술이 노출의 극적인 감소를 제공하는 것이 가능해졌다.

○ Re-Pointing에 앞선 모르타르 제거

손에 들고 쓰는 연마기와 분쇄기의 성공적인 국부 환기 장치의 사용은 추가 연구를 필요하다. 몇몇 결과들이 기술되었음에도 불구하고 습식 방법들의 추가가 이것을 성취할 수 있을지는 확실치 않다. 문제의 일부분은 실제 작업을 하는 동안 부분적으로 연마기가 앞뒤로 움직이고 벽에 덮개가 고정되지 않는다는 것이다.

이 작업을 위한 국부 배출 환기 장치의 성공은 또한 적절한 공기 정화기를 포함한 잘 디자인된 시스템에 달려있다. 공기 필터의 보통 정화기 규정들은 환기 흐름의 저하를 피할 수 있도록 만들어져야 하고 압력 강하 경고와 스프레이 부스도 고려되어야 한다. 적절한 이동 속도를 유지하고 후드로의 공기 흐름의 손실을 막기 위해 충분한 용량의 팬이 필요하다. 모르타르를 제거하기 위한 장비들의 발전은 먼지의 감소를 고려해야 한다.

○ 표면 연마 작업들

콘크리트의 표면 연마 작업 동안 먼지와 실리카의 노출은 국부 배출 환기와 습식 방법 모두로 줄일 수 있다. 그러나 연구들이 최종적인 결론을 내리기 위한 적절한 세부사항을 제공하지 못했고 후드에서 필요한 공기의 유량을 기술할 수 있는 그 이상의 연구들이 필요하다.

○ 절단과 톱질 작업들

습식 방법들과 국부 배출 환기의 사용은 이동 가능하거나 고정된 석조용 톱을 써서 절단 작업을 하는 동안 노출의 중요한 감소를 제공하였다. 톱으로의 물 유량은 직접적으로 먼지 감소와 연관이 있었다. 최소 유량인 0.5GPM을 계속 유지하는 것이 성공적인 제어를 하는데 결정적이고 이 안정성을 얻기 위해 적절한 압력이 물 수송 시스템에서 필요하다.

◁ 전문가 제언 ▷

- 작업자들의 특정한 실리카와 먼지에 대한 노출은 여기서 검토된 작업들을 포함하여 많은 건축 일들에서 도전적인 제어 문제로 남아있다.
- 이런 노출들의 연구가 보고 되고 있을지라도 상대적으로 효과적인 공학적 제어를 기록하기 위해 필요한 종합적인 정보를 포함하고 있지 않다. 환기와 물 유량, 먼지 생성을 그리고 실제 작업에 대한 부분적 정량적 정보가 부족하다.
- 건설산업에서의 절단 톱들을 위한 먼지 억제시스템들의 연구실과 현장 연구는 습식 방법들과 국부 배기가스 환기 모두현장에서 3~7배 정도의 감소가 이루어진다고 기술한다. 습식 방법과 국부 배기가스 환기 방법 또한 적어도 90%의 먼지가 줄어든다. 수지 칼날보다 다이아몬드 칼날 바퀴가 더 빠르게 자르고 물저장소의 압력이 떨어지기 전에 절단이 이루어지게 된다.
- 현장 연구에서 작업자들의 개인 노출 측정은 고속도로 건설에서 수집되었는데 외관상으로 사용되는 제어가 거의 없고 콘크리트를 섞는 작업자의 호흡 지역으로부터 먼지를 날리기 위한 팬의 사용이 관찰될 뿐이다. 조사자들은 첫 표본을 팬으로부터 아래로 8ft 떨어진 곳에서 수집하고 개인 표본도 구하였다. 지역의 먼지가 $0.91\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 측정된 반면에 개인의 먼지 측정은 $6.17\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 보고 되었다
- 건설산업 현장에서 이러한 노출의 극적인 감소를 위해 철저한 산업현장의 보호와 규제를 강화하는 것이 중요하다.