

시멘트 사일로의 적분생성억제

양승혁 · 이병곤*†

한국산업안전공단 · *충북대학교 안전공학과

(2003. 2. 3. 접수 / 2003. 5. 12. 채택)

Suppression of Coating Formation in Cement Silo

Seung-Hyok Yang · Byung-Kon Lee*†

Korea Occupational Safety & Health Agency · Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received February 3, 2003 / Accepted May 12, 2003)

Abstract : The object of this research is to prevent the industrial accidents which frequently occurred in breaking the coating in cement silo. Research was conducted to identify the cause of the coating formation, and the model experiment of aeration system was done to investigate the effect of moisture air on the coating formation.

The results show that dehumidification of supply air in aeration system is the most important factor to suppress the coating formation, and the refrigerated low pressure air dryer applicable to the aeration system of cement silo was newly designed and developed. When this air dryer is applied to the cement silo, 88% of the moisture component of supply air can be reduced. Therefore the cleaning cycle extends over twice, and it contributes to the decrease of industrial accidents and cleaning cost.

Key Words : cement silo, coating

1. 서 론

충북 지역에는 국내 시멘트 생산량의 40% 이상을 점유하는 5대 시멘트 제조사가 있는데, 시멘트 제조공정은 대형 장치산업으로 고열 및 분진발생 등 작업환경이 매우 열악하다. 또한 원자재 및 시멘트를 저장하는 대형콘크리트 구조물의 사일로(silo) 내부에는 여러 가지 원인으로 발생한 수분이 시멘트 분체와 결합하여 고형화된 적분(coating)을 생성한다^{1,2)}. 이 적분은 원활한 시멘트 인출을 저해하여 많은 인력을 투입하여 수작업으로 이를 제거하며, 이 적분제거작업은 앞이 보이지 않을 정도의 분진과 고온, 적분의 붕괴로 인한 매물, 추락 등으로 매년 사망재해가 발생하여 인명손실 및 막대한 경제적 손실이 발생하고 있다.

본 연구는 적분제거작업의 위험성과 재해발생현황을 파악하고, 적분생성 원인을 분석하며, 적분생성을 억제할 수 있는 대책을 제시하여 적분 제거작

업시 지속적으로 발생하는 재해를 예방하고자 한다.

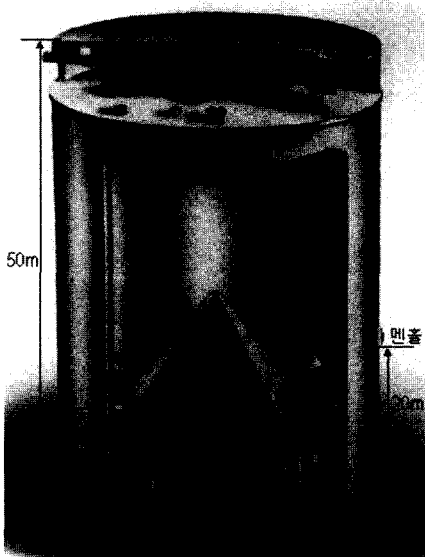
2. 시멘트 사일로

시멘트 사일로는 시멘트를 출하하기 전에 일시적으로 저장하는 대형 시멘트 저장설비로 국내에 많이 보유한 10,000ton 사일로의 직경은 약 18~20m, 높이는 약 50m이다. 국내 시멘트 제조사의 사일로는 약 70여 개에 달한다. Fig. 1은 시멘트 사일로의 외형과 내부구조로서, 하부에는 시멘트 인출을 위한 공기송급시스템(aeration system)이 설치되어 있다. 공기송급시스템은 하부 기계실에 설치된 로타리 블로워(rotary blower)를 사용하여 공기를 0.6kg/cm²의 압력으로 압축하여 하부의 시멘트 인출구를 중심으로 방사형으로 약 15°각도로 경사지게 설치된 에어박스(air box)로 송급한다. 에어박스 상부에는 약 1.5cm 두께의 섬유질의 텍스타일(tex tile)이 덮여 있으며 압축공기는 텍스타일을 거쳐 사일로 내부로 분산되고, 사일로 내부의 시멘트 분체는 에어슬라이딩(air-sliding) 현상이 발생하여 시멘트 인출구로

†To whom correspondence should be addressed.
bklee@cbuacc.chungbuk.ac.kr



(a) outer



(b) inner

Fig. 1. Outer and inner view of a cement silo

흘러 들어가 시멘트가 출하된다.

3. 적분생성의 원인과 억제대책

적분이 생성되는 원인을 사일로 운전담당자와의 인터뷰, 제작도면 및 운전 매뉴얼 검토 등 현지조사와 관련 자료를 조사하여 분석한 결과 다음의 3가지를 주요원인으로 파악하였다.

3.1. 송급공기중의 함유수분

시멘트 인출용 공기송급시스템은 대기중의 수분을 함유한 공기를 여과없이 흡입하여 습도가 높은 대기중에서 장시간 연속적으로 운전할 경우 시멘트

분체와 합습공기가 최초로 접촉하는 텍스타일 상부에서 공기중의 수분과 시멘트 조성 중 수화활성도가 높은 성분(C_3A , alkali sulphate, calcium sulfate 등)이 수화반응을 일으켜 가수화물 즉 적분을 생성한다^{1,3,5)}. 텍스타일 상부에서 성장하기 시작한 적분은 점차 진행되어 2~3년이 지나면 텍스타일의 약 70% 이상을 덮어 공기송급이 차단되어 시멘트 인출작업을 저해하여 2~3년 주기로 적분을 제거하여야 한다⁶⁾.

3.2. 사일로 내외부 온도차에 의한 결로

시멘트 사일로 내부는 시멘트 밀(mill)의 분쇄과정에서 발생한 마찰열이 전달되어 약 $60\sim 80^{\circ}C$ 의 온도를 갖게 된다. 이 고온 다습한 내부의 공기가 사일로 외벽의 노점온도 이하의 차가운 부분과 접촉하는 경우 결로를 형성하고 수화반응을 일으켜 적분을 형성한다^{3,5)}.

3.3. 이수석고의 탈수반응

시멘트 응결속도 조절용으로 첨가하는 이수석고는 약 $80\sim 150^{\circ}C$ 사이에서 탈수반응이 시작되어 종결된다. 이 이수석고가 사일로 내부의 고온에서 무수석고로 변화하는 탈수과정중에 발생하는 수분이 수화반응을 일으켜 적분을 형성한다^{3,5)}.

3.4. 억제대책

이와 같은 3가지 적분생성의 원인중에서 이수석고 탈수반응에 대해서는 시멘트 제조사에서 연구가 진행되어 무수석고 등 대체 응결조절제가 개발되어 일부 사용중이며, 사일로 내부온도를 탈수반응이 일어나지 않도록 $60^{\circ}C$ 미만으로 유지하기 위한 방안들이 검토되고 있다^{1,2)}. 사일로 내외부 온도차에 의한 결로에 대해서는 대형 콘크리트 구조물에 온도차가 발생하지 않도록 단열처리하는 것이 현실적으로 불가능하여, 본 연구에서는 송급공기중의 함유수분에 대한 대책을 주된 연구대상으로 검토하였다. 실제로 발생한 적분의 상태를 조사한 결과, 내외부 온도차에 의해 생성된 적분은 손이나 압축공기의 토출에 의해 제거할 수 있는 정도의 경도였으나, 송급공기중의 수분유입에 의한 텍스타일 상부의 적분은 곡괭이나 착암기 등으로 제거해야 될 정도의 단단한 경도를 갖고 있어 텍스타일 상부에서의 적분생성이 가장 영향이 큰 것을 확인할 수 있었다.

4. 적분 제거작업과 위험성

국내외의 시멘트 사일로 적분 제거작업의 분석결과, 외국에서는 압축공기 분출설비나 공압을 사용한 기계화작업이 인력작업과 병행하여 이루어지고 있으나 국내에는 압축공기 분출설비가 부착된 사일로는 거의 없으며 대부분이 20년 이상 노후되어 압축공기 분출설비를 설치할 경우 구조물의 안전성에 문제가 있어 설치가 불가능한 상태이다. 따라서 대부분의 사일로 적분 제거작업은 대행업체에서 전적으로 수작업에 의존하고 있다. Fig. 2와 같이 사일로 측면 맨홀에 작업대를 설치하여 맨홀을 개방하고 내부 진입용 관을 설치하여 작업자가 엎드린 자세로 진입한다. 사일로 내부로 진입한 작업자들은 관을 통하여 작업대 조립용 장비를 투입받아 사일로 바닥에서 2-3인 탑승용 작업대를 조립한다. 조립된 작업대는 사일로 상부에 설치된 원치에 연결하여 벽체 상하로 이동하면서 쇠창살 등의 수공구를 사용하여 적분 제거작업을 진행한다. 이러한 적분 제거작업은 많이 보이지 않을 정도의 시멘트 분진이 발생하고, 60~80°C의 고온으로 작업자가 30분 이상 연속작업을 수행하기 어려운 열악한 작업환경으로, 사일로 벽체의 적분 붕괴시 매몰 및 질식으로 사망 재해의 위험이 상존하고 있다. 또한, 대부분 영세한 협력업체 하도급에 의해 이루어져 안전장구 및 안전의식 미흡, 작업인원 노령화에 따른 안전사고가 높은 작업으로 조사되었다. Table 1은 적분제거작업 공정과 각 공정의 위험인자를 분석한 것으로 1994~2001년간 사망재해는 총 9건으로 매년 1명 이상이 목숨을 잃고 있으며, 한 업체의 근로자수가 약 30명으로 사망발생율이 타공정에 비해 상당히 높은 수준이다. 재해발생형태도 매몰, 질식사고가 대부분으로 동종재해의 예방대책이 시급하다.

5. 공기송급시스템의 축소모형 실험

5.1. 실험장치

공기송급시스템의 송급공기 함유수분량이 적분 생성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 축소모형을 제작하여 실험하였다. 실험장치는 Fig. 3과 같이 내부 관찰이 가능하도록 아크릴로 제작한 사일로 모형과 습도를 조절할 수 있는 가습기, 로타리 블로워와 같은 기능을 하는 소형송풍기로 구성하고 사일로 모형 하부에는 여러 개의 구멍을 뚫고 부직포를

올려놓아 사일로의 에어박스 및 텍스타일과 동일한 효과가 발생하도록 제작하였다. 실험장치의 주요 사양은 Table 2와 같다.

5.2. 실험방법

실험은 2002년 1월과 2월에 실험실내에서 시행하였으며, 실험실 온도는 평균 18.5°C, 상대습도 35%이었다. 상대습도를 감소시킬 수 있는 제습설비 확보의 어려움으로 최저 상대습도는 35%로 하고 상대습도 75%까지 가습하면서 적분생성량을 측정하였다. 실제 사일로에서는 시멘트 자중에 의한 영향이 있으나, 본 실험에서는 투입 시멘트량이 6kg의 소량으로 자중에 의한 영향은 무시하였다. 실험방법은, 아크릴 사일로 모형에 송풍기와 가습기를 연결하고, 일정한 상대습도에서 6kg의 포틀랜드 시멘트를 투입 후 4시간 동안 송풍기로 공기를 송급한다. 밀봉하

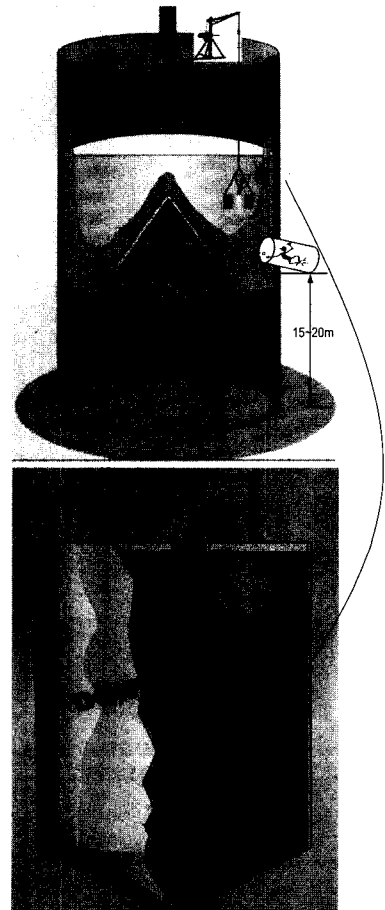


Fig. 2. Coating cleaning work on a working platform

여 48시간 동안 적분이 형성되도록 방치한 후, 개봉하여 0.84mm 표준체로 직경이 0.84mm 이상되는 것과 부직포 상부에 고착된 시멘트 덩어리를 적분으로 간주하여 이것들의 무게를 측정한다. 각 습도별로 상기 과정을 3회이상 반복 측정하여 평균하였다.

Table 1. Dangerous factors of coating cleaning process.

공정	위험 인자	제한건수 (1994-2001)
1 측면 맨홀개방	추락, 분진 분출 - 맨홀에서 추락 - 맨홀 개방시 분진 분출로 매물	1
2 사일로 진입로 개설	붕괴, 매물 - 사일로 진입로 개설하여 내부 진입시 적분 붕괴	2
3 사일로 내부 바닥 평탄작업	붕괴, 함몰 - 사일로 내부 바닥 평탄작업 실시중 벽체 적분 붕괴 또는 바닥 함몰되어 매물 질식	2
4 탑승용 작업대 조립	붕괴 - 탑승용 작업대를 조립하기 위해 부품 번입 및 조립 도중 적분 붕괴되어, 작업자 매물 질식	1
5 벽체 적분 제거작업	붕괴, 추락 - 작업대에 탑승하여 벽체 적분 제거 중 작업위치 상부의 적분 붕괴되어 매물 - 안전대 미착용등으로 작업대에서 추락	3
6 시멘트 인출	함몰 - 제거된 적분을 인출하기 위해 인출설비가동시 작업자가 적분과 같이 함몰	-
7 맨홀 폐쇄	추락 - 맨홀 폐쇄, 용접작업시 추락 재해 발생	-
합계		9

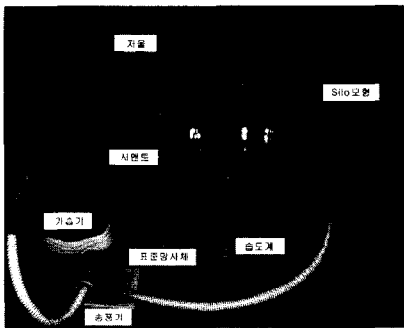


Fig. 3. Composition of model experimental apparatus

Table 2. Specification of model experiment.

equipment	specification
acrylic model	40cm × 40cm × 65cm
fan type blower	1.5m ³ /min, 33mmAq
humidifier	40w, 550cc/hr
hydrometer	Testo 450 digital hydrometer
scale	digital scale, accuracy 0.01kg
cement	portland cement(KSL 5201)

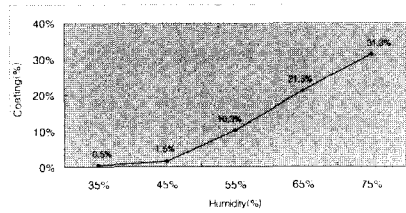


Fig. 4. Coating formation for the relative humidity

5.3. 실험결과

Fig. 4는 상대습도별 적분생성율로 습도가 증가함에 따라 적분생성이 크게 증가한다. 상대습도 35%의 적분생성량은 0.03kg으로 적분 생성율이 불과 0.5%에 불과하였다. 이 적분생성량도 부직포 섬유 조직내의 시멘트 분체 무게이며 체에 의한 적분은 전혀 발생하지 않았다. 축소모델 실험결과 적분생성억제를 위해서는 송풍공기의 제습이 필수적임을 알 수 있었다.

6. 냉동식 미압 에어 드라이어의 개발

자동화 설비에 사용되는 압축공기는 수분유입을 방지하기 위해 공기압축기 후단에 제습설비(dryer)를 설치하는 것이 일반화되어 있다⁷⁾. 여기에 착안하여 공기송급시스템의 로타리 블로워에 공기압축기용 일반 드라이어를 설치하여 사일로 내부로 송급되는 공기를 제습하고자 하였다. 그러나 일반 드라이어는 압력손실이 0.3kg/cm² 이상으로 토출압력이 0.6kg/cm²의 저압인 로타리 블로워에 설치하면, 토출압력의 50% 이상이 감소되어 정상적인 시멘트 인출이 불가능하게 된다. 또한, 일반 드라이어는 공기온도가 40℃ 이하이어야 제습이 가능한데, 로타리 블로워의 토출공기는 60~80℃로서 제습효과를 기대할 수 없다. 그래서 공조기기업체와 공동연구를 통하여 사일로 공기송급시스템에 적용이 가능하도록 압력손실을 최소화한 냉동식 미압 에어 드라이어를 고안하여 설계하고 시제품을 개발하였다.

Table 4는 냉동식 미압 에어 드라이어의 사양으로 노점온도 4℃ 이상의 함습공기를 상대습도 10% 미만으로 제습할 수 있도록 설계하였다.

유체흐름저항을 최소화한 구조의 증발기를 장착하고 드라이어 흡입구 및 토출구를 400, 300mm로 최대한 크게하여 압력손실을 0.02~0.03kg/cm² 이하, 즉 일반 드라이어의 1/10 이하로 감소시켰다. 냉동 사이클은 예냉기에 의해 예냉된 흡입공기가 증발기

Table 4. Specification of refrigerated low pressure air dryer

1	air volume	700 m ³ /h
2	suction air pressure	0.6 kgf/cm ²
3	pressure loss	0.02 ~ 0.03 kgf/cm ²
4	suction air temperature	40°C
5	dew point temperature	4°C
6	refrigeration type	refrigerant direct refrigeration
7	compressor	7.5kw(10hp)
8	refrigerant	freon gas (R-22)



(a) outer



(b) inner

Fig. 5. Photograph of refrigerated low pressure air dryer

에서 냉매에 의해 노점온도 이하로 냉각되면서 공기중에 함유된 수분이 응축되어 제습된다. 냉각된 건공기는 열교환기에서 상온의 흡입공기와 간접 접촉하여 재열된 후 드라이어에서 토출된다. 또한 40°C로 설계된 드라이어 입구 공기온도 조건을 맞추기 위하여 드라이어 설치 위치를 로타리 블로워 후단이 아니고 전단에 설치할 수 있도록 설계하여 이 문제를 해결하였다.

Fig. 5는 시제품 내외부의 사진이다. 습도가 가장 높은 여름철 30°C, 상대습도 75%의 공기를 상대습도 10%로 제습하는 경우에 대하여 습공기선도를 이

용하면, 설치전의 공기 1kg에 함유된 절대습도 0.020kg/kg의 수분이 설치후에는 0.0025kg/kg으로 감소되어 88% 이상의 제습효과를 얻을 수 있다. 따라서 실제의 시멘트 사일로 공기송급시스템에 적용할 경우 송급공기 함유수분에 의한 적분생성은 현격히 감소하여 적분제거 작업주기가 현재의 2-3년에서 5-6년 이상으로 연장이 가능할 것으로 생각된다. 이러한 근원적인 적분생성 억제에 따라 산업재해발생의 예방 및 감소와 적분제거 비용의 절감과 더불어 시멘트의 품질 향상도 기대할 수 있다. 현재 충북지역 5개 시멘트 제조사가 이의 도입 및 설치를 검토·진행 중에 있다.

7. 결 론

시멘트 사일로 내부의 적분생성을 억제하여 적분 제거작업시 발생하는 산업재해를 예방하기 위하여 적분생성 원인을 분석하고 공기송급시스템의 축소 모델을 제작하여 실험하고, 개선방안으로 냉동식 미압 에어 드라이어를 고안하여 시제품을 개발하였다.

1) 시멘트 사일로 내부의 적분생성 원인은 송급 공기중의 함유수분, 사일로 내외부 온도차, 이수식 고의 탈수반응 등이며, 가장 영향이 큰 것은 송급공기 중의 함유수분이다.

2) 공기송급시스템의 축소모델 실험결과 상대습도가 증가할수록 적분 생성량이 크게 증가하며, 상대습도 35%에서 적분생성율이 0.5%로 적분 생성 억제를 위해서는 송급공기의 제습이 필수적이다.

3) 저압의 로타리 블로워에 적용이 가능하도록 압력손실을 최소화한 냉동식 미압 에어 드라이어를 개발하였으며, 입구 공기온도 조건을 만족시키기 위하여 로타리 블로워 전단에 설치한다. 이를 실제의 시멘트 사일로에 적용할 경우 적분생성이 현격히 감소하여 적분제거 주기가 5~6년 이상으로 연장되며 산업재해발생의 감소 및 적분제거비용을 절감할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 신규연, 김창범, "분쇄온도 및 저장조건이 시멘트 품질에 미치는 영향," 시멘트 포럼, 양회협회, pp. 112~118, 1992.
- 2) Von S. Sprung, "Effect of storage condition on the

- properties of cement” ZKG, No. 6, pp. 305, 1978.
- 3) H. C. Alsyed Nielsen “How to Avoid lumping of cement in silo” Rock product No. 2, pp. 72, 1980.
 - 4) K. H. Lagerdorf, “Measurements of coating formation in cement silo” ZKG, No. 9, pp. 443, 1980.
 - 5) J. Skalny, I. Jawed, H. Taylor, “Studies on hydration of cement,” World Cem. Tech., 1978.
 - 6) Krupp Polysius Service Manual, “Problems in cement storage”.
 - 7) 戸崎重弘, 空氣調和設備技術百科, 1985.