



테네시주 금속분말 제조공장

2011년 미국 테네시주의 금속분말을 제조하는 공장에서 가연성 금속분진과 관련하여 3차례의 폭발 및 화재사고가 발생하였다.

1차 사고는 방폭구조에 미흡한 기동 모터의 아크가 점화원이 되어 가연성 금속분진이 폭발하여 2명의 엔지니어가 사망하였다. 2차 사고의 점화원은 금속간 마찰에 의한 기계적 불꽃에너지였을 것으로 추정되며, 3차 사고 시에는 기계절 마찰로 인한 수소가스 폭발 및 금속분진 착화로 사망 3명, 부상 2명의 인명피해가 발생하였다.

공장내 설비로부터 금속분진이 지속적으로 누출되어 구조물 위에 쌓이거나 공기 중에 부유하고 있었으나 적절하게 관리되지 못했고, 금속분진의 가연성과 위험성을 알고도 관리적 대책 또는 공학적 대책과 같은 조치를 취하지 않은 상태였다.



사진 1. Hoeganaes Gallatin 공장 전경

1. 일반사항

- 소재지 : 미국 테네시주 Gallatin
- 사고일시 : 2011년 1차 사고(1월 31일), 2차 사고(3월 29일), 3차 사고(5월 27일)
- 발화장소 : Hoeganaes Gallatin공장 내 분진누적장소
- 인명피해 : 1차 사고(2명 사망), 2차 사고(1명 부상), 3차 사고(3명 사망, 2명 부상)
- 발화원인 : 다량의 금속분진이 부유된 장소 인근에서 1차 사고는 전기 아크(ARC), 2차 사고는 기계적 마찰(불꽃), 그리고 3차 사고는 기계적 마찰로 인한 수소가스 폭발 및 불꽃에 의한 금속분진 착화



사진 2. Hoeganaes Gallatin공장의 위성사진

2. 시설개요

Hoeganaes사는 영국에 본사를 둔 국제적인 엔지니어링 회사 GKN사의 자회사이다. 1999년 GKN사는 세계적인 금속분말 제조회사인 Hoeganaes사를 인수하였다. GKN사는 분말야금산업에 중점을 두고 있으며, 생산된 분말야금은 주로 항공 및 자동차 산업에 사용되고 있다. Hoeganaes사의 금속분말은 열과 압력을 가하여 소형금속부품을 만드는 자동차산업에 주로 사용된다. Hoeganaes사는 미국 New Jersey의 Cinnaminson에 본사를 두고 있으며, 미국, 독일, 중국, 루마니아에 공장을 두고 있다.

사고가 발생한 Hoeganaes Gallatin공장은 미국 Tennessee주 Nashville에서 북동쪽으로 약 50km가량

떨어진 곳에 위치하고 있으며, 약 200여명의 직원이 근무하고 있다. 1980년대 45,000톤의 금속분말제품을 생산하기 시작하였고, 현재는 설비 증설을 통해 약 300,000톤의 제품을 생산하고 있다. 1980년대에 비해 현재의 생산능력은 약 550% 증가하였다.

3. 공정개요

Hoeganaes Gallatin공장에서는 금속 조각을 원료로 받아 이를 용융시킨다. 소비자의 요구사양에 따라 특정한 성질을 갖은 제품을 생산하기 위해 이 용융된 금속에 다양한 성분을 첨가하고, 이후 용융된 금속을 냉각시킨 후 분쇄하여 조분말로 만든다. 이 조분말은 30m 길이의 컨베이어 벨트 또는 밴드를 사용하는 긴 소둔로를 거쳐 더욱 큰 연성을 가지게 된다. 이 때 금속의 산화를 방지하고 산소를 제거하기 위하여 소둔로에는 수소 분위기가 조성된다. 여기에 사용되는 수소는 사업장 내 위치한 계약업체에 의하여 공급된다. 수소는 도랑을 파고 그 내부에 설치한 배관을 통하여 이송되며, 도랑은 금속판으로 덮여 있다. 소둔로를 통과하는 공정에서 조분말은 더욱 두꺼운 고형화가 이루어지며, 고형화된 조분말은 분쇄기로 보내져서 최종적으로 미세한 금속분말제품이 된다. 최종 생산된 금속분말제품은 머리카락 두께인 45~150micron 정도의 지름을 가지게 된다.

4. 사고상황

4.1 1차 사고(2011년 1월 31일, 2명 사망)

Hoeganaes Gallatin공장에서 최종 생산된 금속분말제품은 스크류 컨베이어 및 승강식 운반기에 의하여 운반된다. 승강식 운반기는 운반기를 잡아당기는 벨트가 정위치에 정렬되지 않았을 때, 동작 중 탈락되는 경향이 있다.

2011년 1월 31일 5시경 Hoeganaes공장의 근무자는 #12 승강식 운반기가 탈락되었다고 생각하여 기계분야 및 전기분야의 보수기술자에게 정비를 요청했다. 보수를 담당한 기술자들은 현장조사에서 벨트가 탈락되지 않았다고 생각하였고, 조정실의 근무자에게 모터를 재가동할 것을 요청했다. 승강기가 재가동되었을 때 장비의 진동으로 인해 미세한 금속분말이 공기 중으로 부유하였고, 이어 순간적으로 화재가 발생하였다. 미국 화학안전위원회의 사고조사 인터뷰 중 한 목격자는 승강기 모터가 재가동되자마자 화염에 휩싸였다고 진술했다.



그림 1. 1월 31일 화재사고 전 운반기를 조사하는 보수기술자 모습[컴퓨터 그래픽]



사진 3. 1월 31일 화재사고 현장

Gallatin시의 소방대원이 현장에 도착해서 전신에 심각한 화상을 입은 2명의 보수기술자를 Nashville시에 있는 Vanderbilt 화상병원으로 이송하였다. 2일 뒤 부상자 중 1명이 사망하였고, 사고 4개월 후 2011년 5월말에 다른 1명도 사망하였다.



그림 2. 1월 31일 금속분진 화재[컴퓨터 그래픽]

4.2 2차 사고(2011년 3월 29일, 1명 부상)

2차 사고 당시 Hoeganaes Gallatin공장에서는 연소로 개선작업이 진행 중이었다. 3월 29일 개선작업의 일환으로 Hoeganaes사의 엔지니어와 외부 공사업체 기술자는 점화기를 교체하고 있었다. 작업자들은 점화기를 교체한 후 점화기에 천연가스배관을 연결하는 작업을 남겨둔 상태였다. 엔지니어는 가스점화기의 접속부와 가스배관이 쉽게 연결되지 않자 연결부위에 망치질을 하였고, 이 때 소둔로 측면으로부터 대량의 가연성 금속 분진이 부유하는 것을 목격하였다.

부유된 분진이 엔지니어 위로 6m 가량 퍼져나갔고, 분진이 확산되는 순간 화염에 휩싸였다고 엔지니어는

회상했다. 그는 화염을 피하기 위해 사다리로부터 뛰어 내렸다. 그러나 결국 그는 양쪽 허벅지 및 얼굴에 1~2도 화상을 입었고 전도로 인한 찰과상을 입었다. 한편, 공사업체 기술자는 분진 착화에 이은 초기 화염을 본 후에 바로 피난하여, 큰 부상없이 탈출하였다.

사고 당시 엔지니어는 Hoeganaes사에서 제작한 내염성능이 있는 보호복 및 개인보호장비를 착용하고 있었다. 또한, 그는 화재로부터 상체를 보호할 수 있도록 내염성능이 있는 상의를 추가로 입고 있었다.



그림 3. 3월 29일 사고 당시 가스배관 연결부 작업
[컴퓨터 그래픽]



사진 4. 3월 29일 화재사고와 관련된
가스배관 연결부



그림 4. 3월 29일 금속분진 화재[컴퓨터 그래픽]

4.3 3차 사고(2011년 5월 27일, 3명 사망, 2명 부상)

2차 사고가 발생한 지 2개월이 지나서 금속분진에 의한 3차 사고가 발생하였다.

2011년 5월 27일 6시경 #1 소둔로 근처의 운전원은 '쉬익'하고 가스누출이 의심되는 소리를 들었다. 운전원은 도랑 안에서 가스누출이 일어나고 있다고 판단했다. 소둔로 아래에 위치한 그 도랑은 수소, 질소 등의 가스 배관 뿐만 아니라 소둔로의 냉각수 배출 배관이 지나가는 장소였다.

운전원은 가스누출로 추정되는 소리 및 누출이 발생하고 있다고 생각되는 장소를 보존부서에 알렸다.

6명의 유지보수기술자가 누출지점을 찾으려고 시도하였다. 유지보수기술자들이 누출부위를 찾고 있을 때, 인근 가열냉각 공정지역에는 한 명의 운전원이 근무 중이었다. 유지보수기술자는 보고된 도랑 안에 수소배관이 지나간다는 것을 알았지만, 최근 공장 내 다른 지역에서 질소배관 누출사고가 있었기 때문에 불활성가스인 질소가스가 누출되고 있을 것이라고 생각했다. 유지보수기술자들이 도랑의 덮개를 들어 올리려고 했으나 도랑의 덮개는 기계의 도움없이 들어올리기 어려웠다. 그래서 기술자들은 크레인을 사용하여 도랑의 덮개 중 일부를 제거하였다. 그리고 크레인 작업이 어려운 남쪽 도랑의 덮개 근처에서 누출이 진행되고 있다는 사실을 알게 되었다. 6시30분경 기술자는 지게차에 쇠사슬을 설치하고 남쪽 도랑 덮개에 연결하여 덮개를 들어올리기 시작했다.



사진 5. 5월 27일 사고 전 현장
- 도랑덮개 주위 금속분진 누적 -



사진 6. 5월 27일 사고 후 현장



그림 5. 5월 27일 폭발 전 지게차를 이용하여
도랑덮개를 들어올리려는 보수기술자
[컴퓨터 그래픽]



사진 7. 5월 27일 사고 배관에서 발견된 구멍

미국 화학안전위원회의 사고조사 인터뷰에서 목격자인 공정지역의 운전원은 도랑의 덮개가 지게차에 의하여 들어 올려지는 순간 마찰에 의하여 불꽃이 발생하였고, 이어서 강한 폭발이 있었다고 진술했다. 폭발이 발생한지 수일 후, 화학안전위원회 조사관은 도랑 내 설치된 수소이송배관에서 부식이 진행

중이었다는 것을 확인하였고, 배관에서 커다란 구멍(약 8cm后cm)을 발견하였다. 조사관들은 그 구멍에서 수소가 누출된 것으로 추정하였다.

누출된 수소가스가 폭발하는 순간, 과압으로 인하여 주변지역의 분진이 다량 부유되어 확산되었고, 이러한 분진에 다시 화재가 발생하였다. 다수의 목격자가 공기 중에 떠있는 불씨를 보았고, 이 불씨가 부유된 분진에 착화되어 화재가 발생하였다고 진술하였다. 먼지와 연기 때문에 사고현장에서는 가시거리가 확보되지 않았으며, 한 증인은 손전등을 비춰도 약 1m 전방밖에 볼 수 없었다고 진술했다.



사진 8. 5월 27일 수소폭발 이후 들러진 도랑 덮개



그림 6. 5월 27일 수소폭발
[컴퓨터 그래픽]

수소폭발 및 금속분진에 의한 화재로 가열냉각공정에 있던 운전원 및 4명의 기술자가 부상을 당했다. 지체차 주변에 있던 2명의 기술자는 지역병원으로 이송되어 연기흡입으로 인한 부상을 치료받고, 바로 퇴원하였다. 그러나 다른 두 명의 기술자들과 운전원은 Vanderbilt 화상병원으로 이송되었다. 사고 후 1주일 지나서 부상자 중 2명의 직원이 사망하였다. 그리고 사고 후 7주가 지나서 3번째 사망자가 발생하였다. 사고 현장에는 많은 양의 수소가스와 가연성 금속분진이 동시에 존재하였기 때문에, 이 중 어떠한 물질로 인하여 희생자들이 치명적인 부상을 당하였는지는 분석할 수 없었다.

5. 사고분석

5.1 점화원

미국 화학안전위원회가 2010년 Hoeganaes사에서 실시한 금속분진의 가연성에 대한 실험을 분석한 결과, 2011년 1월 31일에 발생한 1차 금속분진 화재의 점화원은 기동모터의 아크(arc)일 것으로 추정하였다. 이 실험에서 공장에서 취급하는 대표적인 금속분말의 최소착화에너지는 500mJ보다 높은 것으로 나타났으나, 연속적인 아크(arc)에 의해 금속분말이 점화될 수 있는 것으로 분석되었다.

사고당시에 한 작업자는 현장에서 ‘전기적 음향(electric sound)’을 들었다고 증언했다. #12 승강식

운반기의 기동모터는 접지가 되어 있지 않았으며, 배선이 노출된 상태였고 모터에 전원을 공급해주는 전기배선이 모터의 접속배선함에 연결되지 않아서 방폭구조에 미흡한 상태로 노출되어 있었다. 또한 사고 시 분진운과 모터가 인접한 위치에 있었다는 것을 볼 때 이 기동모터가 사고의 점화원일 가능성이 높은 것으로 추정된다.

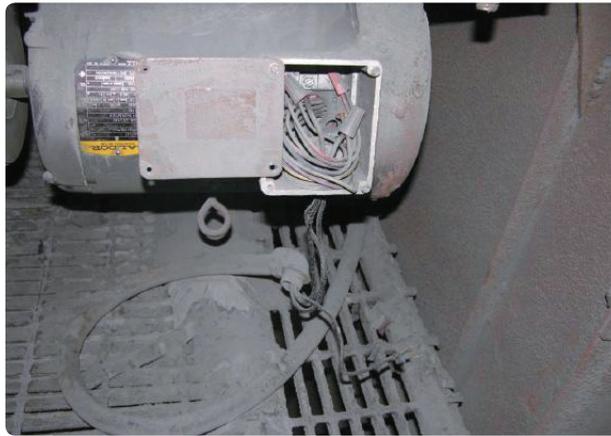


사진 9. 2011년 1월경 승강기 모터에 노출된 전선

미국 화학안전위원회에서 정밀한 사고조사를 위하여 Hoeganaes사에 현장을 보전해달라고 통지하였다. 그러나 그 전에 이미 Hoeganaes사는 현장에서 일부 설비를 철거하였다. 이러한 상태의 사고현장을 조사하면서 모터함 밖과 접속배선함 내부 양쪽에 아크 흔적을 발견하였다.

2011년 3월 29일과 2011년 5월 27일 발생한 화재 및 폭발사고의 점화원은 기계적 불꽃에너지였을 것으로 추정된다. 실험에 의하면 금속간 마찰에 의한 기계적 불꽃에너지는 금속분말의 최소착화에너지 및 수소의 최소착화에너지(0.02mJ)보다 훨씬 높다는 점을 알 수 있었다. 실제로 3차 사고의 목격자는 도랑 덮개를 들어 올리는 중에 발생한 불꽃에 의해 수소가 폭발하였다고 증언했다.

5.2 위험의 인지 및 관리

일반적으로 금속분말의 가연성은 잘 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 금속분말 화재와 폭발은 계속 발생하고 있으며, 이로 인해 지속적으로 인명 피해와 재산손실이 발생되고 있다. 사고분석과정에서 미국 화학안전위원회에서는 1940년~50년대에 출간된 금속분진 재해 및 폭발 방호와 관련된 자료를 검토하였다. 그 중 우선적으로 검토된 자료는 NFPA에서 1946년에 출간한 분진폭발 예방에 대한 기준이다. 이 기준에는 금속분진 등 특수한 분진을 포함한 모든 종류의 분진에 대한 일반적인 사고 예방책이 기술되어 있다. 특히 건축구조와 관련된 내용으로 청소 등 관리가 어려운 높은 곳에는 먼지가 축적될 수 있는 기둥, 선반 등과 같은 구조물을 설치하지 않도록 규정하고 있다. 또한 NFPA에서는 분진이 누출되지 않도록 장비를 설계하고 이것이 불가능할 때에는 주기적인 청소 등 적절한 유지관리절차를 수립할 것을 규정하고 있다. 그리고

분진이 있는 장소에서는 점화원에 대한 각별한 주의가 필요하며, 옥외 또는 폭발방산구가 설치된 별도의 구획된 공간에 집진기를 설치할 것을 규정하고 있다. 1980년대에 세워진 Gallatin공장은 이러한 규정을 준수하지 않았고, 분진이 축적되는 것을 방지하기 위한 설계가 고려되지 않았다.

다음으로 검토된 자료는 1958년 미국화학연구회에서 발표한 문서이다. 이 문서에는 ‘분말형태의 금속은 산소 또는 공기와 혼합되어 가연성 혼합물을 형성한다.’라고 기술되어 있다. 이외에도 1957년 NFPA에서 발간한 ‘주요 분진폭발사고에 관한 보고서’를 검토하였다. 이 보고서에는 1860년에서 1956년 사이 미국과 캐나다에서 발생한 1,000여건의 분진폭발에 대하여 기술되어 있는데, 이 중 80여건이 금속분진 화재 및 폭발이었다. 이외에도 철과 같은 금속의 폭발성에 대한 연구는 지속적으로 이루어져 왔다. 그러나 Hoeganaes사 및 GKN사에서는 2009년까지 자사의 가연성 금속분말에 대한 어떠한 분석도 실시하지 않았다. 2008년 보험사에서 위험조사를 실시하였고, 그에 따른 조치사항으로 2009년 금속의 가연성에 대한 분석을 실시하였다. 실험결과 공장 내 다양한 장소에서 수집한 3개의 금속분말이 모두 가연성이 있다는 결론을 얻었다. 그러나 이러한 결과에도 불구하고 Gallatin공장은 분진에 대한 효과적인 집진 대책 및 유지관리 절차를 수립하지 않았다.



사진 10. 2011년 2월 3일 Gallatin공장 내 분진 누적

Hoeganaes사의 대표이사는 2009년 실시한 분석결과를 바탕으로 가연성분진의 위험성에 대한 내용을 운전원 교육프로그램에 포함시켰다고 진술했다. 하지만 Hoeganaes사는 이러한 교육 이외에 특별히 분진의 위험을 경감시키는 대책을 수립하지 않았다. Hoeganaes사에서는 가연성 분진의 위험을 제어하지 못하였고, 운전원은 이후에도 사고가 발생할 수 있는 상황에서 일하도록 방치된 것이다. 운전원과 기술자들은 Gallatin공장에서 근무하는 동안 분진에 의한 화재를 여러 번 경험했다고 진술했다. 이러한 분진화재는 2011년 1월 31일 인명피해사고가 발생하기 전에는 심각한 부상을 야기하지 않았다. 그로 인해 많은 사람들이 금속분진의 가연성을 인지하고 훈소할 수 있다는 사실을 알고 있었지만, 분진에 의한 위험성을 심각하게 받아들이지 않았다. 또한 그들은 축적된 분진이 공기 중으로 부유되었을 때 잠재적으로 심각한 사고위험이 있다는 것을 교육받지 못했다. 사고위험을 효과적으로 관리하기 위해서는 위험성을 인지하는 것이 필요하나, Hoeganaes사는 이점을 간과하였다.

5.2.1 가연성 분진

가연성 분진의 위험성을 인지한 후 화재 및 폭발 방지를 위한 관리대책을 수립해야한다. 관리 대책은 공학적 대책, 관리적 대책이 상호보완적으로 이루어지는 것이 바람직하다.

위험물질을 관리하는 공학적 대책의 일례로, 분진이 누적되는 것을 방지하기 위한 밀폐된 이송설비 및 집진설비를 들 수 있다. 이는 가연성 금속분진의 취급이 불가피한 경우에 효과적인 제어방법이 될 수 있다. 일반적으로 분진 제거를 위해 집진설비를 설치하는 공학적 대책이 분진청소 등 유지관리와 같은 관리적 대책보다 선호된다. 그러나 관리적 대책이 분진의 누적을 제어하는 데 있어서 중요한 요소임에는 분명하다. 그리고 작업자 교육 및 운전절차수립 등의 관리적 대책은 공학적 대책을 보완해준다. 이외에 개인안전장비 착용 등과 같은 절차적 대책을 통해 인명피해의 위험을 제거할 수 있다. 이러한 대책을 통해 위험물질, 공정설비, 작업절차를 집중적으로 관리하는 것이다.

그러나 Hoeganaes Gallatin공장에서는 다량의 금속분진이 설비로부터 누출되고 있어 위험물질의 통제가 이루어지지 않았다. 운송설비의 밀폐가 미흡하여 금속분진이 다량 누출되고 여기에 집진설비의 작동신뢰성이 부족하여, 공정지역 전체적으로 높은 장소에는 많은 양의 가연성 분진이 누적되고 있었다. 결과적으로 Hoeganaes Gallatin공장은 가연성 금속분진에 대한 공학적, 관리적 대책 수립이 미흡하였다.

5.2.2 수소가스

2011년 5월 27일 3차 사고 당시 도랑안에는 질소배관, 수소배관 등 많은 배관이 설치되어 있었다. 또한 도랑은 소둔로에서 사용되는 냉각수의 배수로 기능도 겸하고 있었다. 사고 당시 소둔로에서 배출된 뜨거운 물이 도랑 내 배관 위로 직접 쏟아지고 있었다.

ASME B31.3 등 배관과 관련된 여러 기준에 따르면 배관 설계 시 공정배관에 물리적인 영향을 주는 주변 환경에 대해 고려하도록 되어 있다. 또한 NFPA 55 압축 및 액화가스에 관한 기준에서는 배관의 누설 여부 및 물리적 손상에 대하여 매년 조사를 실시하고, 지속적으로 보수하도록 규정하고 있다. 사고현장과 같은 도랑에 설치된 배관은 고온의 물에 노출됨에 따라 점진적 부식이 발생할 수 있으므로, 배관의 선정에 있어서 이러한 외부환경을 고려하여야 하며, 지속적인 유지보수가 필요하다.

그러나 Hoeganaes사는 도랑 안의 배관에 대한 정기적인 점검을 실시하지 않았다. 실제로 미국 화학안전위원회는 조사과정에서 수소가스 이송배관의 가스 누출 여부 와 배관의 부식상태에 대한 Hoeganaes사의 점검 및 보수이력을 발견하지 못했다. 게다가 Hoeganaes사는 가스누설사고 시 비상대응에 대한 문서화된 절차를 수립하고 있지 않았으며, 보수기술자가 가스누출에 대해 조사할 때 폭발성가스의 농도를 측정하고 조사를 실시하도록 규정하고 있지 않았다.



사진 11. 도랑 안의 부식된 배관

5.3 유지관리 및 보수

첫 번째 사고 이후 미국 화학안전위원회 조사관들은 Gallatin공장 내 설비로부터 가연성 분진이 지속적으로 누출되고 있었으며, 설비 주변은 청소 등 유지관리가 미흡하다는 것을 발견하였다.



사진 12. 서까래 위 금속분진



사진 13. 공장상부 금속분진



사진 14. 구조물 위 금속분진



사진 15. 사진에 찍힌 공기 중 부유 분진

현장조사 시 조사관들은 공장 내 일부지역에 가연성 분진이 거의 10cm 가량 쌓여있고, 공기 중에는 분진이 부유하고 있는 것을 확인하였다. Gallatin공장에서는 가연성 분진을 제거하기 위하여 진공흡입 청소를 실시하고 있으나, 그 효과는 크지 않았다.

승강식 운반기와 컨베이어설비는 구획되어있지만, 이송설비의 구획이 미흡하여 가연성분진이 누출되고 설비에 전체적으로 쌓여있었다. 또한, 조사관은 백필터설비에 사용된 백이 진동에 의해 흔들릴 때마다 가연성분진이 지속적으로 부유, 확산되고 있는 것을 발견했다. 가연성 분진을 제거하기 위하여 백필터설비는 가장 미세한 분진을 포집하도록 설계되었지만, 결론적으로 화재 및 폭발 위험이 매우 높은 설비가 된 것이다.

조사관은 집진설비가 종종 고장나며, 이에 대한 보수가 즉각적으로 이루어지지 않고 있다는 사실을 발견했다. 실제로 한 운전원은 #12 승강식 운반기와 관련된 집진설비가 2011년 1월 31일 1차 사고가 발생할 때까지 약 7일정도 고장난 상태였다고 진술했다. 이로 인하여 미세한 가연성분진이 사고 지역에

전체적으로 누적되었고, 보수 중 승강기가 재가동될 때 진동에 의하여 분진이 부유되어 사고의 원인이 되었다.

5.4 개인보호장비

미국 직업안전위생관리국(OSHA)에서는 고용주가 화재, 폭발위험이 있는 장소에서 근무하는 작업자에게 내염성보호의를 제공하도록 규정하고 있다. 또한 NFPA 484 가연성 금속, 금속분말, 금속 분진에 관한 기준에서는 금속분진을 다루는 공정에서 일하는 작업자는 내염성 보호의를 입도록 규정하고 있다. 이에 따라 금속분말을 취급하는 공정지역에서 일하는 근무자들은 화재사고 시 복사열에 의한 부상의 위험을 줄이기 위해 내염성보호의를 입어야 한다. 내염성보호의는 공학적, 관리적 대책이 실패할 경우 화염으로 인한 부상을 줄일 수 있다. 따라서 내염성보호의는 신체 전체를 보호할 수 있어야 하며, 열을 견딜 수 있고, 화상을 입지 않도록 제작되어야 한다.

Hoeganaes사는 공정지역 내 근무자가 내염성보호의를 입도록 규정하고 있으며, 사고 당시 부상자와 사망자는 모두 회사에서 제공한 내염성보호의를 착용하고 있었다. 그럼에도 불구하고 금속분진 화재사고로부터 3명의 근무자가 심각한 부상을 입었고, 5명이 사망했다. 결국 Hoeganaes사에서 제공한 내염성보호의는 가연성 금속분진 화재 및 수소폭발로부터 근무자를 보호할 수 없었던 것으로 판단된다.

5.5 자체 교육

2008년 11월 독일 보험사인 알리안츠는 Hoeganaes공장에 대하여 위험조사를 실시했다. 이 조사 이후에 여러 가지 제안사항이 도출되었으며, 2011년 사고가 발생하기 전까지 Hoeganaes사에서는 계획된 일정에 따라 조치를 실시하고 있었다. 조사보고서에는 위험개선을 위한 제안사항 중 하나로 금속분진의 폭발 가능성과 이에 대한 적절한 경감대책에 대하여 외부 컨설팅을 받도록 권장하였다. 2009년 1월 Hoeganaes사는 3개 금속분말 샘플을 채취하여 금속분진의 가연성에 대한 조사를 실시하였다. 2010년 8월에는 다양한 금속분말을 수거하여 화재 및 폭발 가능성에 대한 다른 종류의 실험을 실시하였다.

이러한 실험 결과는 사업장 자체교육에 활용되었다. 실험에서 도출된 가연성 금속분진의 위험성과 분진 관련 NFPA 코드에 대한 교육을 실시하였다. 그러나 이러한 자체교육은 가연성분진의 위험성을 경감시키기 위한 실질적 대책이 되지 못하였다.

6. 결론

Hoeganaes Gallatin공장 사고 이후 미국 화학안전위원회는 금속분말과 관련된 여러 법규를 개정하도록 권고하였다. 권고된 주요사항은 OSHA 가연성 분진 기준에 철분과 같은 금속분진을 포함시키고, 관련 기준에 유지관리에 관한 강제조항을 신설하고, 기존 규정에서 명확하지 않은 사항을 자세하게 보완하는 것이었다. 사고조사에서 발견된 다음 사항과 그에 대한 대책이 개정의 근거가 되었다.

6.1 중요사항

Hoeganaes공장에서 2011년 발생한 3건의 사고를 조사하는 과정에서 다음과 같은 중요한 사항이 발견되었다.

- (1) Hoeganaes공장 내 쌓여있는 가연성 금속분진은 점화원 근처에서 부유될 때 치명적인 화재를 일으킬 수 있다.
- (2) 치명적인 화재사고가 발생하기 2년 전 Hoeganaes공장 관리부서는 이미 실험을 통해 금속분말의 가연성에 대하여 파악하고 있었다. 그러나 위험성을 경감시키기 위하여 관리적 대책 또는 공학적 대책과 같은 필요한 조치를 취하지 않았다.
- (3) Hoeganaes사는 가연성가스 누출에 대한 대응절차를 수립하지 않았으며, 작업자에게 가스화재 또는 폭발을 예방하고, 대처하는 방법에 대한 훈련을 실시하지 않았다.
- (4) Gallatin시 소방서는 2번의 금속분진 화재 후에 Hoeganaes공장을 조사했다. 그러나 공장 내 쌓여있는 가연성 분진의 위험성에 대해서 알려주지 않았고, 수주 후 3번째 수소폭발 및 금속분진 화재가 발생했다.
- (5) Hoeganaes사에서 작업자에게 제공한 내염성 보호의는 가연성 금속분진 화재와 수소폭발로부터 작업자를 보호하기에 적합한 기능을 가지고 있지 못했다.
- (6) GKN사와 Hoeganaes사는 일련의 사고가 발생하기 전에 Gallatin공장이 가연성 분진을 적절하게 관리하는지 조사하지 않았다.

6.2 권장사항

금속분진과 관련된 유사재해를 예방하기 위해 Hoeganaes Gallatin공장의 사고로부터 다음과 같은 권장사항이 도출되었다.

- (1) 가연성 금속분진을 생산하는 금속분말 생산공장에서는 전문가에 의한 주기적인 진단을 실시하고, 그 결과로 도출된 모든 조치권장사항을 보완하여야 한다. 주기적인 진단은 아래의 NFPA 기준을 참고하여 실시한다.
 - 가. NFPA 484, 가연성 금속, 금속분말, 금속 분진에 관한 기준(Standard for Com-bustible Metals, Metal Powders, and Metal Dusts)
 - 나. NFPA 499, 화학공정지역 내 전기시설용 위험장소 및 가연성분진의 분류를 위한 권장실행기준 (Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas)
 - 다. NFPA 497, 화학공정지역 내 전기시설용 위험장소 및 인화성 액체, 기체, 증기의 분류를 위한 권장실행기준(Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas)
 - 라. NFPA 2, 수소 기술 코드(Hydrogen Technologies Code)

마. NFPA 2113, 순간적인 화재에 대한 인명 보호를 위한 내염보호의의 선정, 관리, 사용, 유지보수에 관한 기준(Standard on Selection, Care, Use, and Maintenance of Flame-Resistant Garments for Protection of Industrial Personnel Against Flash Fire)

- (2) 사업장에서 취급하는 모든 가연성분진 및 금속분진의 위험성에 대해 조사하고, 그 결과를 바탕으로 훈련교재를 개발하여 모든 근로자 및 외부업체에게 교육을 실시하여야 한다. 또한 이들에게 위험성에 대한 주기적인(예: 연간) 보수교육을 실시하여야 한다.
- (3) 모든 가연성 가스배관 및 가스취급설비에 대하여 사전 보수 프로그램, 누출 감지 및 누출 시 대응 절차를 수립하여야 한다.
- (4) 아래 사항을 고려하여 아차사고에 대한 보고 및 조사프로그램을 개발·시행한다.
 - 가. 재해를 유발할 수 있는 모든 아차사고 및 공정위험요소(예: 안전하지 못한 근무환경, 다량 축적된 금속분말 등)에 대하여 모든 근무자가 보고에 참여하는지 여부
 - 나. 아차사고 보고프로그램에 적절한 사고조사가 이루어졌는지에 관한 내용을 포함시키고, 그 결과에 대하여 전 공장의 공유하는지 여부
 - 다. 아차사고 조사로부터 도출된 모든 조치사항의 관리 및 시행, 그리고 그에 대한 책임과 역할
 - 라. 아차사고 프로그램의 상시 운영여부(예: 야간, 주말, 휴일근무)
- (5) 금속분말을 취급하는 공정지역에서 일하는 근무자들은 화재사고 시 화염에 의한 부상의 위험을 줄이기 위해 내염성보호의를 입어야 한다. 이 내염성보호의는 신체 전체를 보호할 수 있어야하며, 내열성이 있으며, 근무자가 화상을 입지 않도록 제작되어야한다.
- (6) 화재조사관 및 비상대응요원들이 가연성분진 재해의 위험성을 충분히 숙지할 수 있도록 교육 프로그램을 실시하여야 한다.