

제철소 용융금속의 수증기 폭발에 관한 완화대책



조 영 재
포스코 안전방재부, 방재색션
대리
firefightercho@posco.com

1. 서론

고온의 용융(鎔融) 금속을 다량 취급하는 제철 산업의 특성상 대형 화재, 폭발은 항상 일어날 수 있는 상황적 개연성을 가지고 있으며, 용융 금속과 수분의 접촉으로 발생하는 수증기 폭발은 이러한 산업현장의 특성을 반영한 안전사고 중 하나이다. 수증기 폭발이란 용융 금속이 가지고 있는 열이 바닥의 잔존 수분과 접촉하여 폭발적으로 비등하는 물리적 현상이며, 선제적 폭발사고 예방을 위해 제철소에서는 지속적인 직원 교육을 실시하고 있으나, 매년 1건 이상의 수증기 폭발이 발생하고 있다. 이러한 제철소 내(內) 수증기 폭발은 고온의 용융 금속을 인위적으로 다루는 과정에서 바닥 내 잔존 수분을 충분히 건조하지 않은, 작업 과정의 실수로 일어나는 경우가 대부분인데, 최근 집중호우, 태풍 등과 같은 자연현상이 고온의 용융 금속과 결합하여 수증기 폭발 사고로 이어지는 사례가 발생하였다. 실제로 2013년 7월 호우 기간 중, 고온의 용융 금속을 냉각시키는 Dry Pit 바닥내 집중호우로 표면 계류가 발생하였고, 이에 고온의 용융 금속이 접촉, 폭발하는 사고가 발생하였다. 이는 집중호우와 같은 1차 자연재난으로 파생된 2차 복합재난 사고 형태로 진압 및 접근이 어려운 상황으로 확대된 대표적인 수증기 폭발 사고 사례이다. 이와 같은 특성 산업현장에서의 폭발은 때때로 예측이 불가능한 자연 현상과 함께 우발적으로 발생되고, 비등된 용융 금속에 의해 2차 폭발(Secondary Explosion)을 일으켜 대형화재로 확산된다는 특징을 가진다.

다양한 개소에서 수증기 폭발을 방지하기 위해 작업표준, 지침 준수 및 교육이 진행되고 있지만, 현재 산업현장에서 준수하는 지침과 표준은 과거 직원들의 경험에서 나오는 결과 값을 바탕으로 작성되어진 것들이 대부분이기 때문에, 생각하지 못했던 다른 위험요소들이 발생할 수 있다는 것이다.

이러한 문제점 해결을 위해서는 초고속 열화상 카메라, 압력 센서 등을 설치하여, 수증기 폭발 실험을 직접 수행할 필요가 있고, 기초적인 자료 확보 외에도 수증기 폭발의 원리와 완화 방법에 대해 강구하여야 한다. 또한, 고열의 용융금속을 냉각하는 과정에서 현재 사용하고 있는 수분의 양, 압력, 입자 등의 요소를 변화시켜 최적의 냉각시간을 도출할 필요가 있고, 도출된 결과값을 바탕으로 2차 피해 범위 분석과 작업장 내부 차량에 미치는 복사열 정도를 확인하여 현장 직원의 안정적인 작업을 확보하여야 한다.

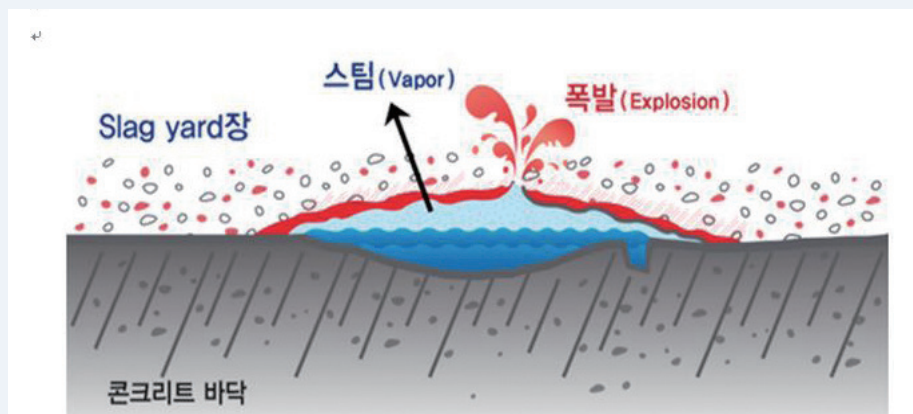
2. 수증기 폭발현상

고온의 용융 금속이 바닥의 수분과 접촉하게 되면, 수분의 순간적인 온도 상승으로 생성된 고압의 수증기로 대(大) 폭발이 일어날 수 있다는 사실은 고온의 용융 금속을 취급하는 산업현장의 안전사고를 통하여 인지할 수 있다.

수증기 폭발이 주로 발생하는 산업현장은 알루미늄을 취급하는 현장이 타 금속 취급 개소에 비해 많은데, 이는 잉곳(ingot)이나 주조품 제조에 물에 의한 냉각을 널리 사용하고, 물과 접촉 가능성이 상대적으로 많기 때문이다.

고온의 용융 알루미늄과 물과의 접촉은 아래 식(1)과 같이 화학 반응을 일으켜, 수소를 발생 시키고 폭발을 부가시킬 수도 있으나, 수증기 폭발과 관련하여 최초로 체계적인 연구를 수행한 G.Long(1957)은 “용융 금속이 함유하고 있는 열이 수분으로 급속히 전달되면서 폭발적으로 격렬한 비등이 일어나게 되는 물리적 현상이다”라고 밝힌 바 있으며 이와 관련된 도식적

그림 1.
수증기 폭발의
도식적 그림





그림은 그림 1과 같다.



이러한 수증기 폭발과 관련하여 본 장에서는 관련된 국내, 외 주요 사고 사례를 통해 수증기 폭발의 위험성을 언급 할 예정이며, 과거 G.Long(1957)이 수행했던 수증기 폭발 실험 내용과 미국 Oak Ridge 국립연구소 (ORNL : Oak Ridge National Laboratory)에서 규명된 실험 결과를 인용하여 수증기 폭발의 메커니즘 (Mechanism)에 대해 정립이 필요하다.

고열의 용융 금속과 잔존 수분의 접촉으로 발생하는 물리적 비등현상인 수증기 폭발은 수분의 제어가 쉽지 않다는 점에서 해마다 끊임없이 발생하는 산업재해의 일부이다. 바닥 내 잔존 수분을 반복되는 일상 작업에서 인간이 완벽히 제거하기란 어려우며, 폭우 및 장마 같은 자연 현상이 수증기 폭발에 기인한다는 점에서 향후 더 많은 사고와 피해 사례가 속출할 것으로 예상된다. 다음 표 1은 공식적으로 알려진 국내, 외 수증기 폭발 관련 주요 사고 사례이다.

표 1.
수증기 폭발 관련
국내·외
주요 사고 사례

구분	년도	발생지역	사고 내용
국내	2013	한국 (경상북도)	집중호우로 인해 Dry Pit 내 빗물이 유입되며 폭발
국내	2007	한국 (경기도)	알루미늄 주조기 운전 준비 중 냉각수 접촉에 의한 폭발
국내	2006	한국 (경상남도)	고열 폐기물 소각재가 냉각용 물통에 쏟아지며 폭발
국외	1996	미국 (인디애나)	고열의 용융 금속이 넘쳐 물과 접촉하며 폭발
국외	1993	일본 (후쿠오카)	고온의 알루미늄 용해로에 수분이 혼입되어 폭발

이러한 국내·외 사고 사례에서 시사하는 바는 수증기 폭발에서 수분의 제어가 절대적으로 중요하다는 사실과 고열의 용융 금속 외에도 고열의 폐기물 소각재와 같은 고온의 물질이 수증기 폭발을 발생시킬 수 있다는 것이다. 이처럼 다양한 물질과 폭발 규모로 끊임없이 발생하는 수증기 폭발의 폭발적 비등은 인간의 제어 범위를 넘어 2차적인 대형재난을 발생시킬 것으로 생각된다.

3. 선행연구

수증기 폭발의 최초 실험자인 G.Long(1957)은 1g의 수분이 660도의 용융 알루미늄 속에 밀폐되어 존재할 경우, 순간적으로 형성되는 수증기의 압력은 약 160Mpa에 달한다고 하였다. 이러한 수증기 폭발은 전술한 바와 같이 수분의 폭발적 비등에 의해 발생되지만, 구체적인 메커니즘은 G.Long에 의해 연구되었으며, 이 실험에서 그는 22.5kg의 순수한 용융 알루미늄을 도가니 하부의 구멍을 통해 물이 담긴 수조 속으로 떨어뜨려 수증기 폭발 여부를 조사하였다. 이때 용융 알루미늄이 통과하는 구멍의 직경 및 낙하높이, 수조 내의 수온, 수심,

용융 알루미늄의 온도, 물속의 첨가제, 이물질, 수조 바닥면의 재질, 바닥 코팅재 등이 폭발의 생성여부에 미치는 영향을 조사하였으며, 주요 결과는 아래와 같다.

- (1) 수조 바닥으로부터 0.5~1.2m의 높이에서 용융 알루미늄을 낙하할 경우 모두 폭발이 일어났으며, 3m 이상의 높이에서는 폭발이 일어나지 않는다.
- (2) 용융 알루미늄의 온도가 고온일수록 폭발의 경향이 증대한다.
- (3) 수조 속의 수심이 8~25cm인 경우, 매우 격렬한 비등이 일어났고, 수심이 50~75cm일 경우에는 폭발이 일어나지 않으며, 5cm 이하일 경우에는 용융 알루미늄이 수조로부터 튀어나왔다.
- (4) 수조 바닥을 석회나 석고, 알루미늄 수산화물 Sludge 등으로 코팅할 경우 폭발의 격렬성을 증대시킨다.
- (5) 그리스, 타르, 페인트 등으로 수조 바닥을 코팅하였을 경우 폭발은 일어나지 않는다.

이러한 연구결과를 토대로 수증기 폭발이 일어나기 위한 3가지 조건을 다음과 같이 도출하였다. 첫째, 충분한 양의 고온 용융 알루미늄이 수조의 바닥면까지 도달되어야 한다. 둘째, 수조 바닥면이 웅덩이에 의해 포위되면, 방아쇠작용(Triggering Action) 이 일어나야 한다. 셋째, 고온의 용융 알루미늄으로부터 물로의 급격한 열전달이 이루어지도록 수심, 수온 등이 조성되어야 한다.

전술한 방아쇠 작용이란, 수조 바닥면에 침강되어있는 고온의 용융 알루미늄과 바닥면 사이에 포획된 매우 얇은 층의 물이 급격하게 수증기로 변화함으로써 일어나는 소규모의 폭발을 의미하며, 수심이 깊은 경우, 침강 도중 용융알루미늄이 소량의 줄기로 분산되고 충분한 힘이 수조 바닥면까지 도달하지 못하므로 폭발이 일어나지 않게 되는 것이다. 또한 수분과 접촉 될 수 있는 모든 영역의 표면에 그리스나 페인트 등으로 코팅을 할 경우, 방아쇠 작용을 해야 하는 얇은 층의 물이 용융 알루미늄과 수조 바닥면 사이에서 포획되기 어렵기 때문에 폭발이 방지될 수 있다고 결론을 내린 바 있으며, 이러한 결과로 규명한 수증기 폭발의 3가지 형태는 아래 표 2와 같다.

표 2. 수증기 폭발의 3가지 형태

구분	내용
중형폭발 (Moderate Explosion)	고온의 용융 알루미늄을 수조 밖으로 비등시키며, 수조 자체는 파괴 시키지 않는 수준
대형폭발 (Violent Explosion)	고온의 용융 알루미늄과 물 계면에 형성된 응고층이 수증기를 폐쇄시키는 역할을 하게 되며, 폐쇄공간에서의 급격한 압력 증가가 폭발력을 증대시켜 수조가 파괴되는 수준
초대형폭발 (Catastrophic Explosion)	대형폭발에 화학반응이 부가된 상태를 의미하며, 고온의 용융 알루미늄이 수조 바닥면에 도달하여 칼슘 수산화물 및 철산화물 등과 같은 산화물과 발열반응을 일으켜 순간적으로 1170도 이상의 고온이 형성돼 직접적인 폭발반응이 일어나는 수준



표 3.
수증기 폭발과정의
3단계

구분	내용
방아쇠 작용 단계 (Triggering Action)	포획수분의 소폭발이나 외적인 충격에 의해 용융 알루미늄과 물 계면에서의 수증기 막이 왜곡되고 불안정성이 증폭되는 단계
전파단계	폭발이 진행되고 증폭되는 단계
팽창단계	고압의 수증기가 급격히 팽창하고 주위의 계에 대하여 파괴적인 일을 행하는 단계

과거 선행연구의 실험결과를 분석해 본 결과, 수증기 폭발은 고열의 용융금속과 수조 바닥면 사이에 포획된 수분의 폭발적인 비등에 의해 시작되며, 방아쇠 작용의 충격파로 인해 인간의 제어 수준을 넘는 대형 폭발을 발생시킨다.

이러한 수증기 폭발을 예방하기 위해서는 폭발의 원동력이 되는 방아쇠 작용을 방지해야 되며, 방아쇠 작용을 억제하기 위해서는 그리스, 타르, 페인트 등과 같은 물질로 코팅을 하는 것이 중요하다. 바닥면에 있는 코팅물질은 열분해를 통해서 비응축성 가스를 생성하게 되고, 용융 금속과 바닥면 사이에 경계층을 형성하여 수분 포획을 억제하므로, 각 산업 현장에서는 이러한 예방법을 통해 수증기 폭발을 선제적으로 차단할 필요가 있다고 판단된다.

그럼에도 불구하고 경제적 여건상, 고열의 용융 금속을 취급하는 외부 콘크리트 바닥 개소에 전반적인 코팅은 어려울 것이라 판단되며, 수분제거 또는 고열의 용융금속의 신중한 취급 등 다른 요소의 제어를 통해 수증기 폭발을 예방할 필요가 있을 것이다.