

技術資料

용융금속의 수증기 폭발

석 명 진

Steam Explosions in Melt

Myung-Jin Suk

용융금속이 수분과 접촉하게 되면 수분의 과열로 급격하게 생성된 고압의 수증기로 인하여 엄청난 대 폭발이 일어날 수 있다는 사실을 우리는 사고의 기록을 통하여 인지하고 있다.

“용해로에서 용강을 모두 배탕시킨후 슬래그를 용기에 담고 있었다. 슬래그 용기를 지탱하고 있던 체인중 하나가 절단되면서 내용물이 공장바닥의 피트(pit)속으로 흘러들어 갔다. 피트바닥에는 물기가 가득했고 곧이어 폭발이 일어났다. 1600 m²의 철판지붕과 280 m²의 강재 창틀이 비산하였다.”

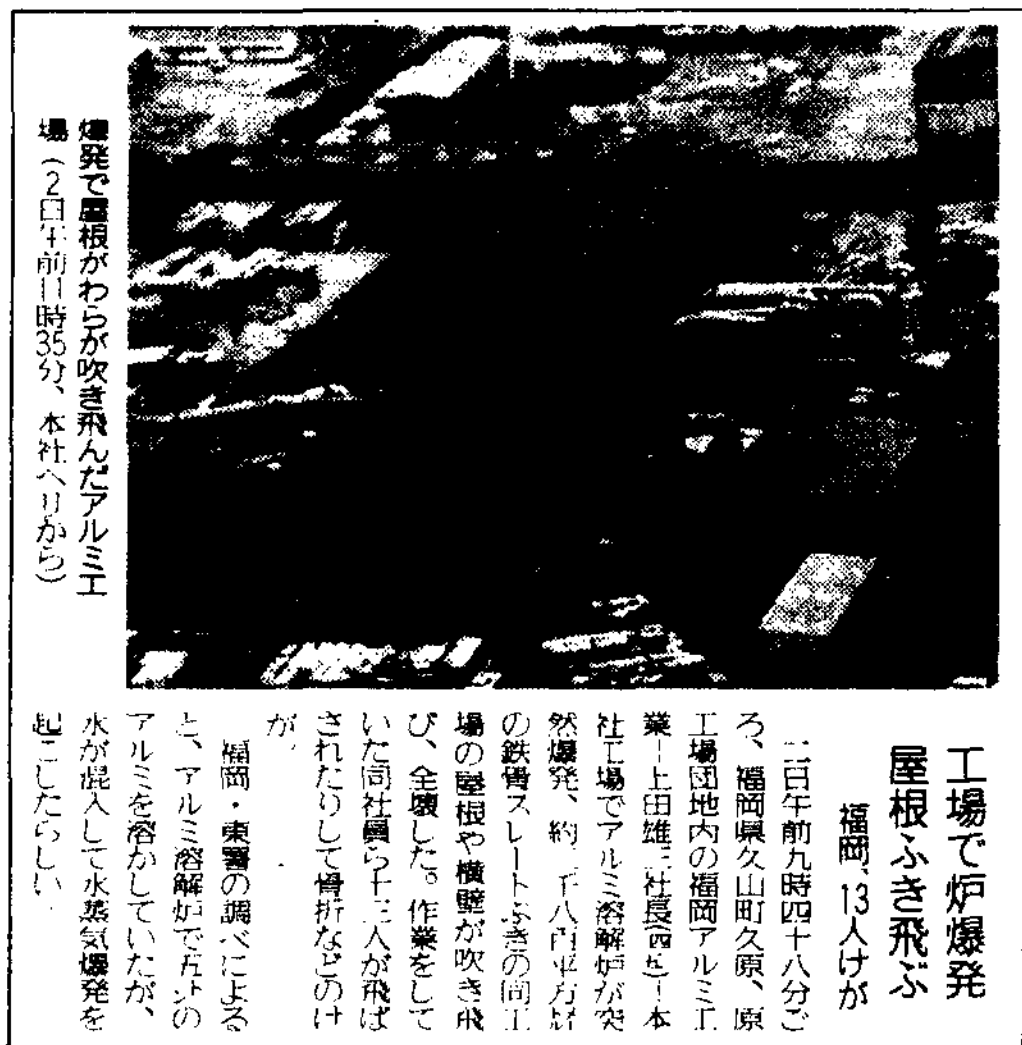
“11.5 t의 용융크롬강이 레이들(ladle)에서 용해로로 재 급탕되고 있었다. 이때 크레인 작업자가 실수로 레이들을 었었고 용강은 물받이 통속으로 흘러들었다.

대폭발의 굉음이 5 km 떨어진 곳에서도 들렸다.”

이상의 수증기폭발 사고의 기사내용은 용융알루미늄에서의 수증기 폭발에 관하여 최초의 체계적인 연구를 수행했던 Long의 논문[1]에서 인용한 것이다. 용융금속과 수분과의 접촉에 의해 발생하는 이 같은 안전사고는 산업현장에서 항상 일어날 수 있는 상황적 개연성을 가지고 있으며 최근의 신문지상에서도 종종 나타나고 있다. 그림 1은 일본의 「석간 요미우리신문」의 93년 7월 2일자 기사인데, 후쿠오카 소재의 알루미늄 주조공장에서 알루미늄 용해로에 수분이 혼입되어 수증기 폭발이 발생하였다는 내용을 기술하고 있다. 그림 2는 미국 주조학회(AFS)에서 발행되는 Modern Casting 96년 2월호 산업뉴스 칼럼에 실린 기사내용을 보여주고 있다. 1400°C에 달하는 용융금속이 넘쳐 흘러 물과 접촉하면서 폭발이 발생하였고 3명이 사망하고 16명이 부상을 당했다는 내용이다. 연전에 국내에서도 유사한 안전사고의 발생에 대한 기사가 실린적이 있다고 하나 확인하지는 못하였다.

용융금속의 수증기 폭발에 관한 연구는 주로 용융알루미늄에 대해서 이루어져 왔는데 이는 알루미늄의 경우 잉곳(Ingot)이나 주조품 제조에 수냉에 의한 냉각을 널리 사용하고, 물과의 접촉 가능성이 다른 금속에 비해 상대적으로 많은 것에 기인한다.

본 고에서는 용융 알루미늄에서의 수증기 폭발에 관하여 여러 연구자들이 행했던 그간의 연구내용 및 결과를 정리하고, 본 테마와 관련하여 최근 미국의 Oak Ridge 국립연구소에서 진행하고 있는 수증기 폭발의 원인과 방지책에 관한 연구의 현황 및 추진 방향에 대한 보고 내용[2, 3]을 소개하고자 한다. 용융금속에서의 수증기 폭발을 단적으로 표현하면 「용융금속



煙突で屋根がわらが吹き飛んだアルミニウム工場(2日前11時35分、本社へりから)

工場で炉爆発 屋根ふき飛ぶ 福岡、13人けが 二日前九時四十八分ごろ、福岡県久山町久原、原工場地内の福岡アルミニウム工業(株)でアルミニウム溶解炉が突然爆発、約一千八百平方メートルの鉄骨スレートぶきの同工場の屋根や横壁が吹き飛ばし、全壊した。作業をしていた同社員ら十三人が飛ばされたりして骨折などのけがが。 福岡・東署の調べによると、アルミニウム溶解炉で五升の水が混入して水蒸気爆発を起したらしい。

그림 1. 일본의 알루미늄 주조공장에서 폭발사고를 다룬 기사(1993년 7월 2일 석간 요미우리신문).

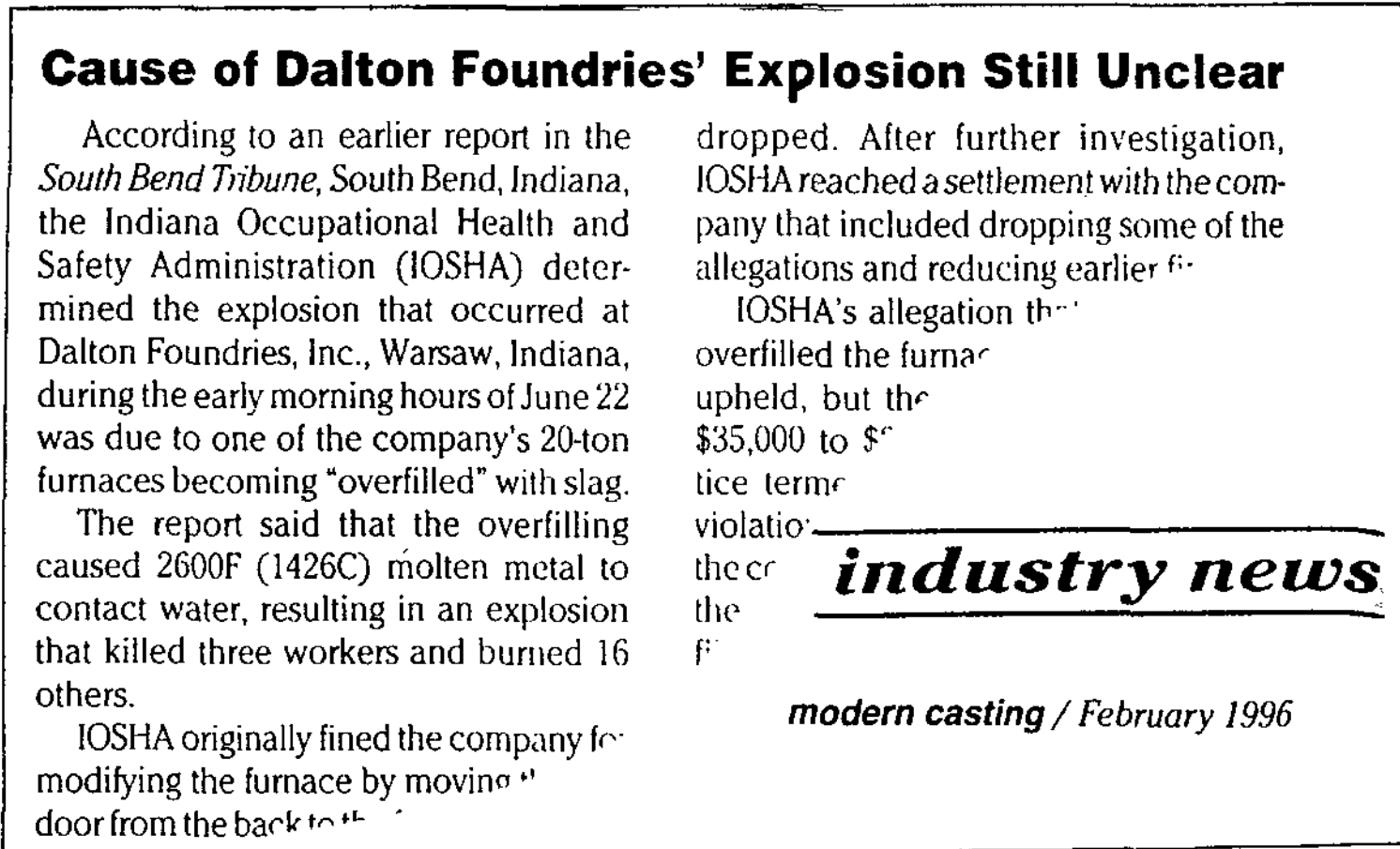


그림 2. 미국 인디애나주에서 발생한, 용융금속과 물과의 접촉에 의한 폭발사고의 기사(Modern Casting 1996년 2월호 p. 14).

이 물이나 습기와 접촉하여 용융금속이 함유하고 있는 열이 수분으로 급속히 전달되면서 연이어 폭발적으로 격렬한 비등이 일어나게 되는 물리적 폭발현상이라고 할 수 있다. 예를 들어 1g의 수분이 660°C의 알루미늄 용탕속에 밀폐되어 존재할 경우, 순간적으로 형성된 수증기의 압력은 약 1600 kgf/cm²에 달하게 된다 (그림 3). 이 같은 인식아래 산업 현장에서는 모든 작업자들이 용해용 재료나 용해기구들이 습기나 수분에 노출되지 않도록 교육을 받고 있으며, 수증기 폭발사고에 대한 예방조치로서 용탕과 접촉할 모든 물건은 충분한 예열을 거쳐 건조시킨 상태로 사용토록 지침을 받고 있다. 물론 용탕의 수증기 폭발은 앞서 간략히 기술한 바와 같이 수분의 폭발적 비등에 의해 일어나지만, 구체적으로 어떠한 메카니즘에 의해 폭발이 이루어지며, 폭발의 근본적 이해를 통한 폭발의 방지책은 어떠한 것이 될 것인가에 대한 의문점이 남는다. 이와 관련하여 1957년에 발표된 미국 Alcoa 연구소의

Long의 연구[1]는 용융 알루미늄의 수증기 폭발에 관한 연구의 효시를 이룬다. 그는 22.5 kg의 순수한 용융 알루미늄을 도가니 하부의 구멍을 통해 직접 물이 담겨져 있는 수조 속으로 떨어뜨려 수증기 폭발여부를 체계적으로 조사하였다. 이때 용융 알루미늄이 통과하는 구멍의 직경 및 낙하높이, 수조내의 수심, 수온, 용탕의 온도, 물속의 첨가제, 수조 바닥면의 재질, 바닥 코팅재 등이 폭발의 생성 여부에 미치는 영향을 조사하였으며, 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

- 수조 바닥으로 부터 0.5~1.2 m의 높이에서 용탕을 떨어뜨릴 경우 모두 폭발이 일어났으나, 3 m 이상의 높이에서는 폭발이 일어나지 않았다.
- 용탕온도가 높을수록 폭발의 경향이 증대하였다.
- 수조 속의 수심이 8~25 cm인 경우, 매우 격렬한 폭발이 일어났다. 수심이 50~75 cm일 경우에는, 폭발이 일어나지 않았으며, 5 cm이하의 경우, 알루미늄 용탕이 수조로 부터 튀겨져 나왔다.

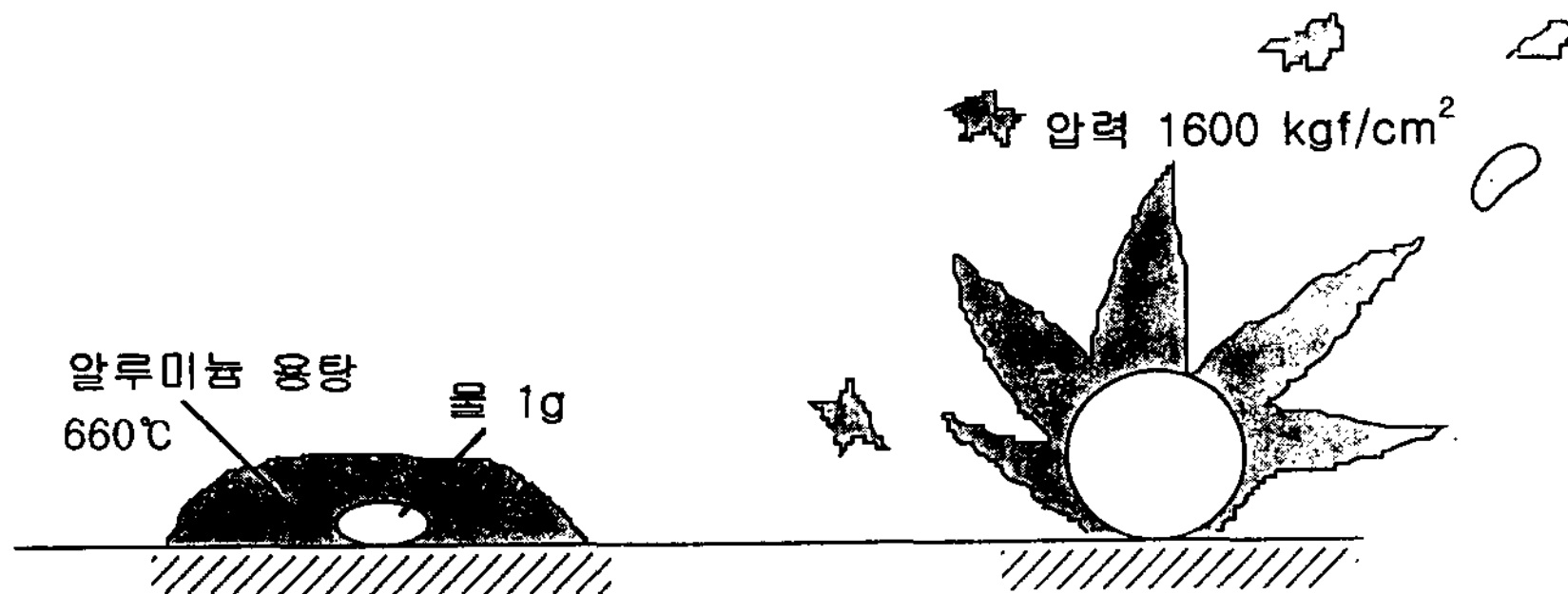


그림 3. 수증기 폭발의 도식적 그림.

○ 수조 바닥을 석회나 석고, 알루미늄 수산화물 슬러지(sludge) 등으로 코팅하였을 경우 폭발의 격렬성을 증대시켰다.

○ 그리스(grease)나 타르(tar), 페인트 등으로 수조 바닥을 코팅하였을 경우 폭발은 일어나지 않았다.

상기의 결과 및 부수적인 실험에서 얻어진 현상들을 통하여, 수증기 폭발이 일어나기 위한 세가지 요구조건을 다음과 같이 도출하였다.

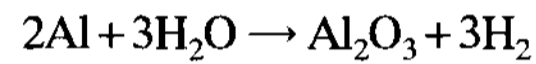
- ① 충분한 양의 알루미늄 용탕이 수조의 바닥면까지 도달되어야 한다.
- ② 수조 바닥면이 용탕에 의해 뒤덮이게 되면, 어떠한 형태의 것이든 순간적으로 방아쇠 작용(triggering action)이 일어나야 한다
- ③ 용탕으로 부터 물로의 급격한 열전달이 이루어질 수 있도록 수심, 수온, 물의 조성 등이 적당해야 한다.

여기서 ②항의 방아쇠 작용이란, 수조 바닥에 침강되어 있는 용탕과 바닥면 사이에 포획된 매우 얇은 층의 물이 수증기로 급격하게 변화함으로써 일어나는 소폭발을 의미한다. 앞에서의 실험 결과들은 ①~③의 폭발 전제조건으로 미루어 볼 때 설명이 가능하였다. 즉, 수심이 깊을 경우, 침강도중 용탕이 소량의 용탕줄기들로 분산되고 따라서 충분한 양의 용탕이 수조 밑바닥까지 도달하지 못하여 폭발이 일어나지 않게 된다. 그리스나 오일, 페인트 등을 수조 바닥에 코팅하였을 경우 방아쇠 작용을 해야하는 얇은 층의 물이 용탕과 수조 바닥면 사이에서 포획되기 힘들기 때문에 폭발이 방지될 수 있는 것이다. 이 같은 조사결과를 토대로 Alcoa에서는 주조피트(casting pit)의 벽과 바닥 그리고 수분과 접촉될 수 있는 모든 영역의 표면에 그리스나 역청질 코팅(bituminous coating), 페인팅 등을 실시하였으며 주조피트내의 냉각수 수심도 최소한 90 cm 이상으로 하여 가능한 수증기 폭발을 예방하고자 하였다. 지속적인 경험을 통해 Tarsel이라 불리는, 코일 타르(coal tar)를 주성분으로 하는 에폭시 수지가 내구성 면에서 양호하고 효과도 좋은 것으로 밝혀졌다(그러나 Tarsel의 생산은 현재 환경적인 이유로 인해 중단된 상태이다).

동일한 Alcoa 연구소의 Hess 등[4]은 여러 가지 형태의 알루미늄-수분 폭발 현상의 이해를 위해 고속촬영기를 동원하여 폭발 메커니즘을 규명하고자 하였다. 그들은 폭발을 크게 3가지 형태로 분류하였다: 중

형폭발(moderate explosion), 대형폭발(violent explosion), 초대형폭발(catastrophic explosion).

중형폭발은 용탕을 튀겨내는 정도의 폭발을 말하며 수조 자체는 파손되지 않는다. 대형폭발은 수조 자체를 파괴시킬 정도의 폭발을 의미하는데, 용탕-물 계면에 형성된 응고층이 수증기를 폐쇄시키는 역할을 하게 되며 폐쇄공간에서의 급격한 압력증가가 이 급의 폭발을 일으킨다. 초대형폭발은 대형폭발에 화학반응이 부가된 상태의 폭발을 의미한다. 고온의 용탕이 수조 바닥면에 도달하여 칼슘 수산화물이나 철산화물 등과 같은 산화물과 발열반응을 일으키고, 순간적으로 1170°C 이상의 고온이 형성되면서 아래와 같이 알루미늄과 물사이의 직접적인 폭발반응이 일어나게 된다.



경우에 따라서는 알루미늄과 물 사이에 일어나는 반응에서 생성된 수소의 폭발이 부가될 수 있다. 그러나 이 화학반응과 관련된 내용은 Long의 연구에서는 가능성이 없는 것으로 논의된 바 있다. 또한 최근의 연구에서도 화학반응의 참여에 대한 보고가 이루어지지 않고 있다는 점에서 좀더 확실적인 연구가 필요할 것이라 생각된다. 그들은 Long의 연구[1]에서와 마찬가지로 수증기 폭발을 예방할 수 있는 2가지 방법을 제시하였다. 첫째 수조의 수심을 충분히 깊게하고, 둘째, 바닥면을 코팅하는 것이다. 수심이 깊을 경우, 침강하면서 용탕은 충분히 냉각될 것이며 수조의 바닥에 도달하였을 때 과열효과는 상당히 완화된다. 또한 바닥에 도달하여 바닥면과 용탕사이에 수분을 포획할 수 있을 정도의 유동성을 상실하게 되어 사실상 폭발을 어렵게 할 것이다. 바닥면의 코팅은 다음의 두가지 요인으로 인해 폭발방지 효과를 가져온다. 첫째 고온의 용탕에 의해 코팅층이 분해되며, 이로 인해 생성된 분해가스는 용탕을 유동시켜 응고층의 형성을 방해함으로써 수증기압의 상승을 가져올 폐쇄 공간의 형성을 불가능하게 할 것이다. 둘째, 코팅층으로 인해 용탕과 수조 바닥면의 산화물 혹은 수산화물 간의 직접적 접촉이 불가능하고 따라서 화학반응이 일어나지 못하게 된다. Long[1]과 Hess 등[4]은 수증기 폭발방지 효과에 대한 근본 이유를 설명하는데 약간의 차이를 보이긴 했지만, 공통적으로 알루미늄 용탕에서의 수증기 폭발을 예방할 수 있는 방법으로 수조의 수심을 깊게 하는 것과 수조의 바닥면을 적절하게 코팅하는 것

을 제시하였다.

최근 미국의 Oak Ridge 국립연구소(ORNL: Oak Ridge National Laboratory)와 미국 알루미늄 협회(AA: Aluminum Association)에서는 알루미늄 용탕의 수증기 폭발의 메카니즘 규명 및 방지책에 대한 보다 광범위하고 체계적인 실험연구 및 이론 연구를 수행하고 있는 바, 이들의 연구 방향과 현재까지 얻어진 실험결과[2,3]에 대하여 기술한다.

최근의 연구결과 및 연구동향

수증기 폭발과정은 크게 3단계로 구분될 수 있다.

방아쇠 작용(triggering action)단계 : 이 단계에서는 포획수분의 소폭발이나 외적인 충격에 의해 용탕-물 계면에서의 수증기막이 왜곡되고 불안정성이 증폭된다.

전파단계 : 폭발이 진행되고 증폭된다.

팽창단계 : 고압의 수증기가 급격히 팽창하고 주위의 계에 대하여 파괴적인 일을 행한다.

우선 ORNL의 연구의 초점은 방아쇠 작용의 규명에 맞춰져 있다. 방아쇠 작용이 배제된 폭발은 존재할 수 없기 때문이다. 수증기 폭발의 방아쇠 작용 단계에 대한 설명이 그림 4에 도식적으로 나타나 있다. 그림 4a는 용탕이 수조 바닥면에 침강해 있는 상태를 보여 준

다. 이러한 상황에서 전파성 폭발은 용탕과 물(water pool)사이에서의 계면에서만 일어날 수 있다. 이 계면에서 전파성 폭발을 일으키기 위해서는 용탕-물 계면이, 포획된 수분의 폭발적 비등(방아쇠작용)에 의해 생성되는 충격을 받는 상태에 놓여 있어야 한다. 즉, 포획수분의 비등에 의한 충격파는 용탕을 통과하여 용탕-물(water pool) 계면의 수증기 막을 불안정하게 하고, 이 과정에서 용탕의 분출이 일어나 약 20°C의 물이 800°C의 용탕과 접촉하게 된다. 이 결과 즉각적인 물의 분출과 국부적인 수증기압의 상승이 초래되고 효율적인 폭발의 전파가 이루어지게 된다(그림 4b). 포획수분에 의한 방아쇠 작용이 없는 경우에도, 햄머 등에 의한 외적인 물리적 충격에 의해 폭발이 시작될 수 있다. 이 경우 충격파는 수조내의 물에서 직접 발생하여 용탕-물 계면의 불안정을 초래하는데 이 경우 충격파가 충분히 강력하다면 코팅의 효과는 존재하지 않을 것이다. 왜냐하면 전술한 바와 같이 코팅의 효과는 용탕과 수조 바닥면 사이에 수분이 포획되지 않도록 하여 방아쇠 작용의 원천봉쇄를 하는데 있기 때문이다(그러나 실제적으로 폭발을 시작시키는데 있어 외적인 충격에 의한 효과는 포획수분의 방아쇠 작용에 비하면 그리 중요한 요소는 아니다). ORNL에서는 그림 5와 같은 실험장비를 사용하여 사람 및 장비의 안전성을 해치지 않는 상태에서 매우 다양한 실험을 수행하였다. 이 실험장비의 핵심은 용탕을 직접 물에 접촉시키는 대신 용탕 밑에 텅스텐이나 알루미늄 디스크를 부착하여 이 디스크가 물에 직접 접촉되도록 하였다. 실제 열전달이 일어나는 상황은 용탕이 물과 접촉했을 때와 동일하지만, 실제적인 폭발이 일어나지 않는 상태에서 가속도계를 통한 충격파 분석을 통해 폭발성 유무를 감지할 수 있도록 하였다(보다 상세한 내용은 참고문헌 3을 참조바람). 이 실험의 결과, 폭발은 다음과 같은 인자에 의해 좌우된다는 사실이 밝혀졌다: 수조 바닥면의 습윤성, 코팅(페인트)의 벗겨짐, 코팅의 열분해성.

수조 바닥면의 습윤성 여부에 의한 효과는 그림 6a, b에 도식적으로 나타나 있다. 습윤성 표면(콘크리트, 부식된 철 등, 혹은 석회, 석고 등 습윤 증대 물질로 덮힌 면)의 경우, 용탕과의 사이에 수분의 포획이 용이하여 방아쇠 작용이 일어날 수 있으나 비습윤성 표면(그리스, 타르, 페인트 등으로 적절하게 코팅된 면)에서는 물방울들이 밀려나가 수분 포획이 어렵게 되어 폭발의 원동력이 되는 방아쇠 작용이 일어나지 못

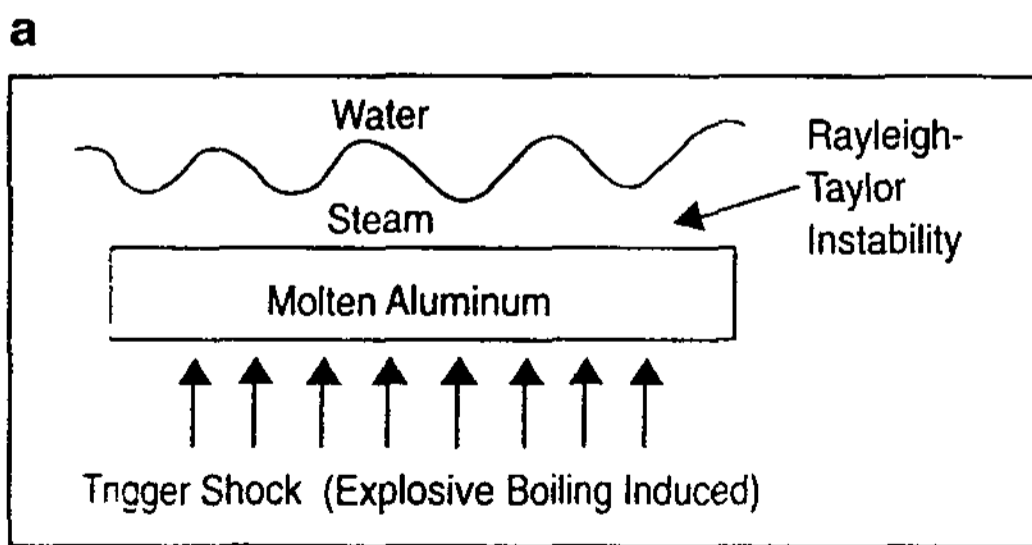
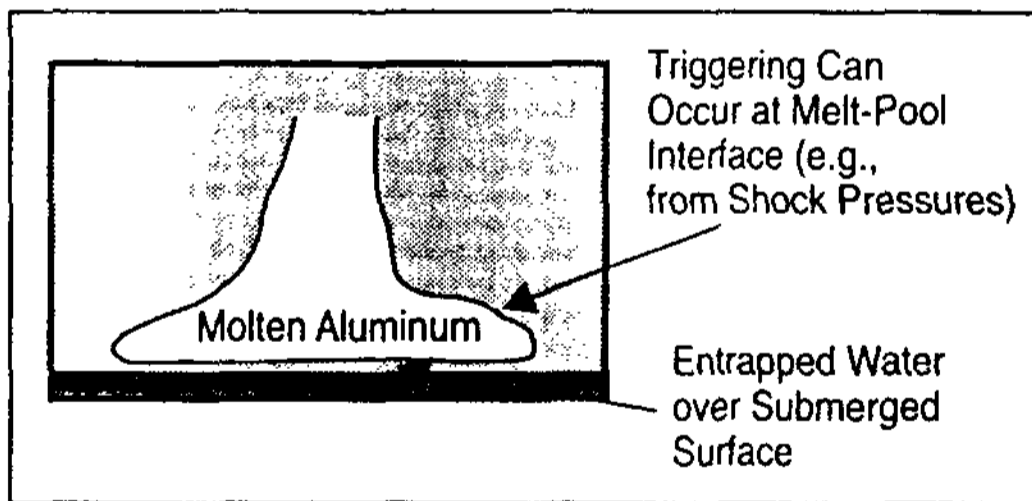


그림 4. (a) 수조 바닥에 침강한 용탕과 바닥면 사이의 수분 포획(외적인 충격이 있을 경우 방아쇠 작용은 용탕-물 계면에서도 직접 일어날 수 있다.) (b) 방아쇠 작용에 의한 충격(triggering shock)이 용탕을 거쳐 용탕-물 계면으로 전파되는 모습 [2].

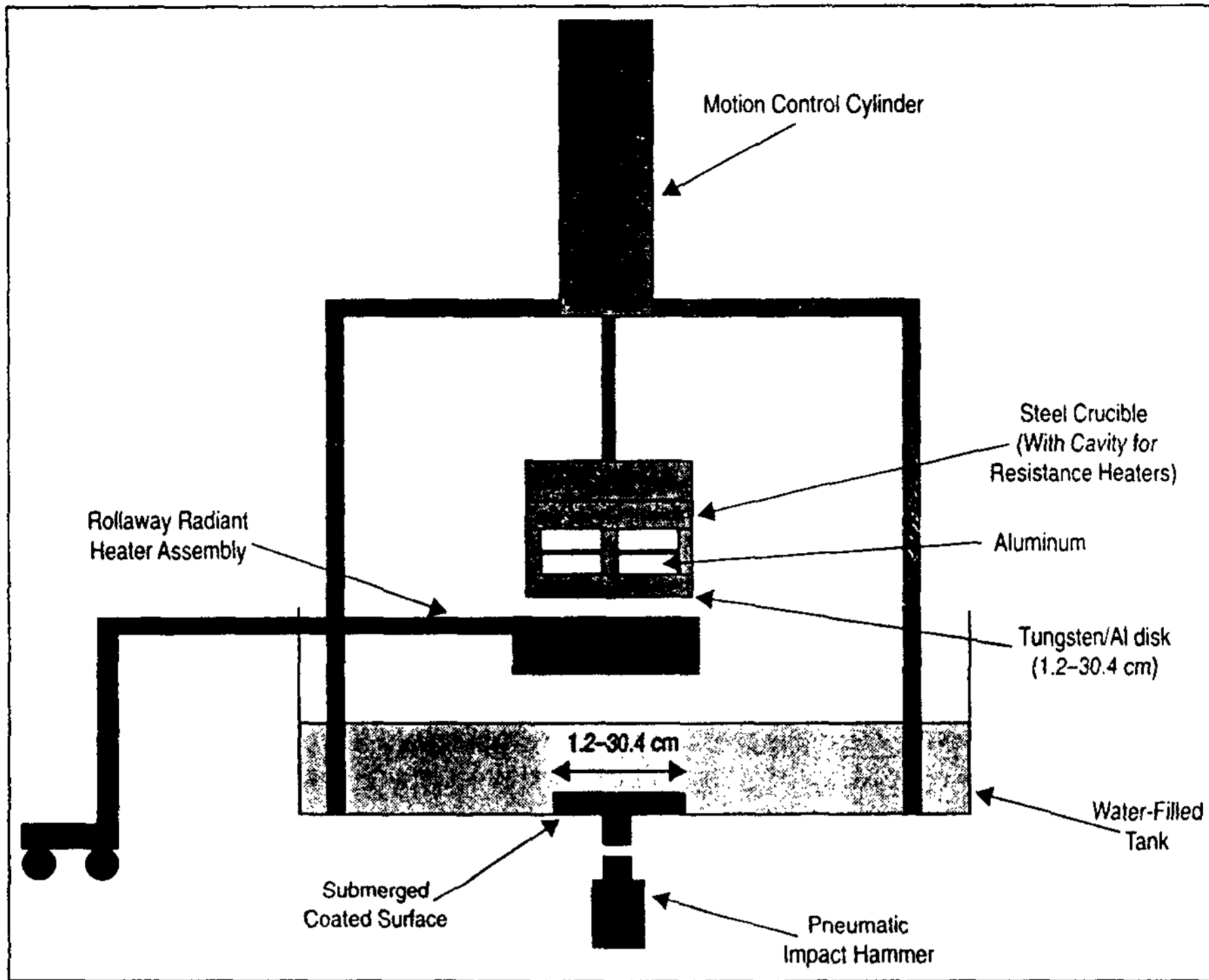


그림 5. 미국 Oak Ridge 국립 연구소에서 현재 수행중인 수증기 폭발 모사실험을 위한 장치 [2].

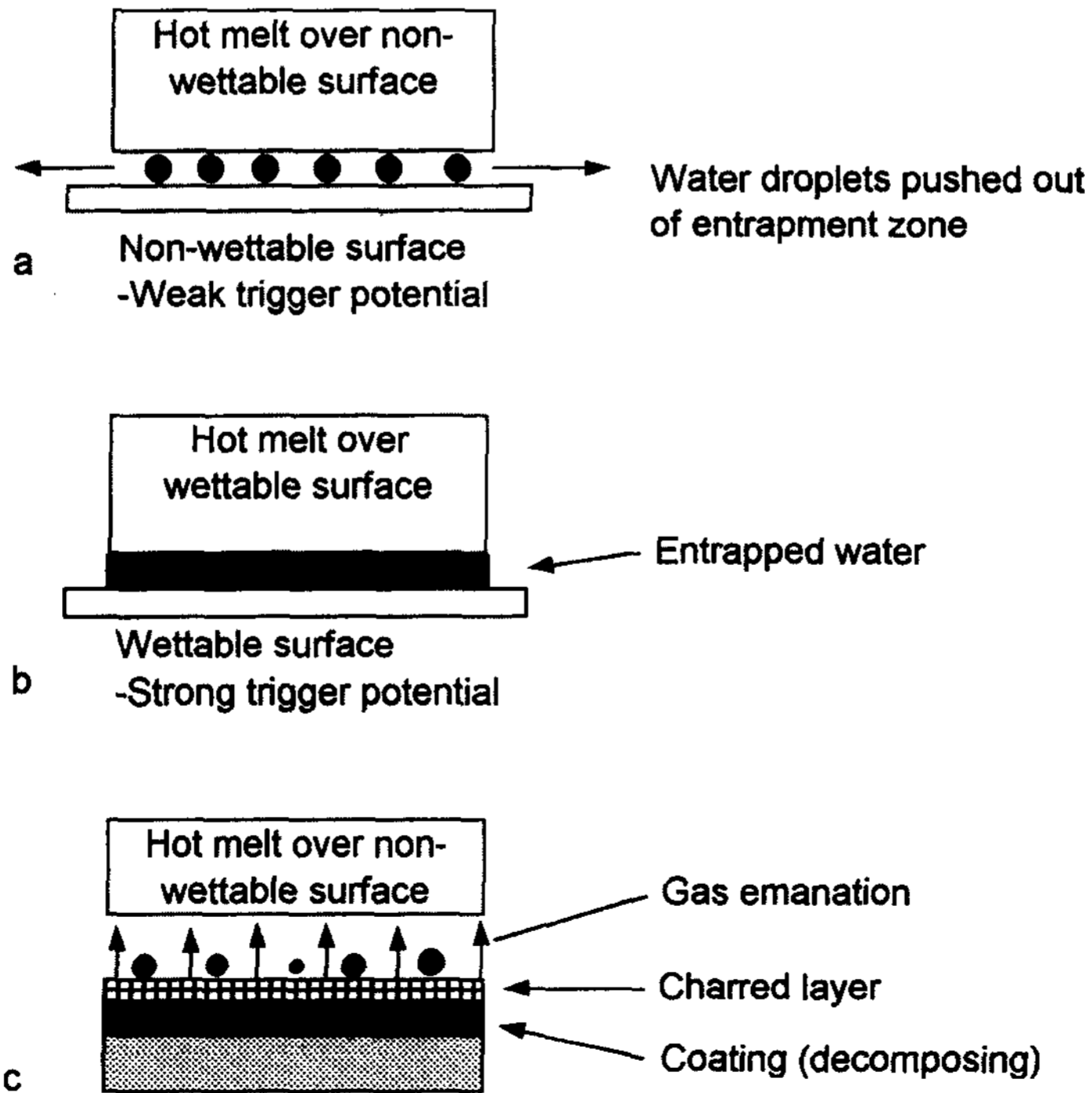


그림 6. (a) (b) 습윤표면(wettable surface) 및 비습윤표면(non-wettable surface)에서의 수분 포획 여부를 보여주는 도식적 그림 (c) 코팅 표면에서의 열분해 가스의 생성을 보여주는 도식적 그림 [3].

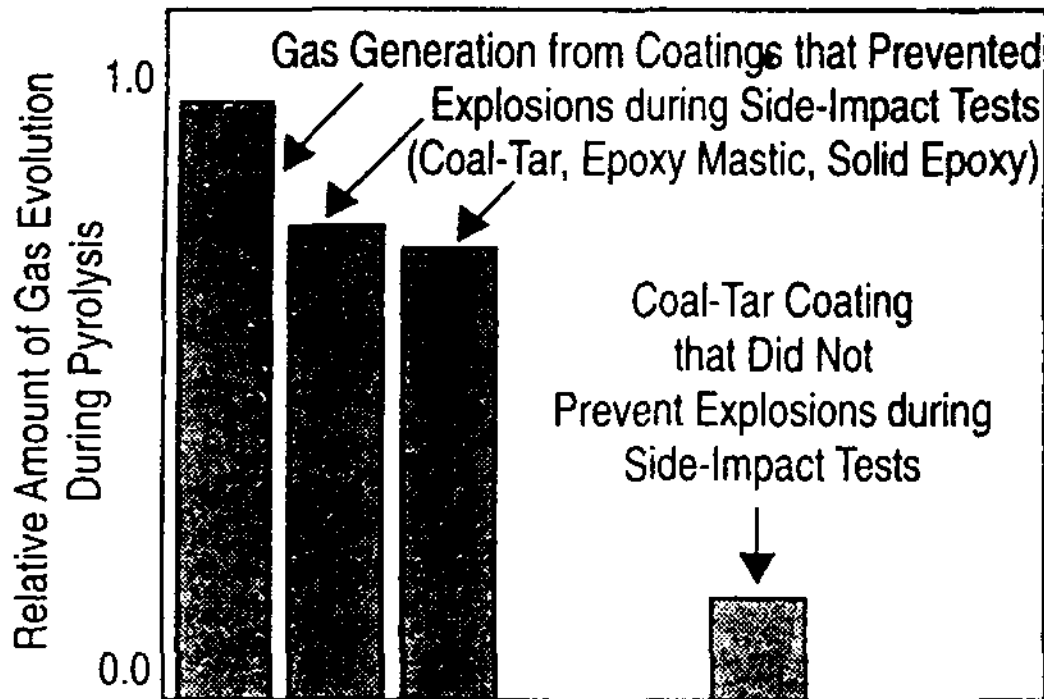


그림 7. 여러 코팅재에서 열분해 가스 발생량의 상대 비교 [2].

하게 된다. 코팅의 열분해에 의해서는 비응축성 가스(noncondensable gas)가 생성되고, 이 가스가 그림 6c에 도식적으로 나타낸 바와 같이 용탕과 바닥면 사이에 경계층을 형성하여 수분 포획을 억제한다. 그림 7은 몇몇 코팅재에서 폭발이 일어나지 않은 경우와 폭발이 일어난 경우에 있어 코팅재의 열분해에 의해 생성된 가스의 양을 비교한 것이다. 가스가 많이 생성된 경우 폭발이 일어나지 않았음을 알 수 있다. 이 같은 결과를 기반으로 최근에는 인위적으로 가스를 주입시키는 방법이 개발되었는데[5], 수조의 바닥면에 구멍을 뚫고 그 구멍을 통해 압축공기를 주입하는 것이다. 그림 8은 인위적인 가스주입에 의한 수증기 폭발 방지 효과를 도식적으로 보여주고 있다.

결론적으로 수증기 폭발은 용탕과 수조 바닥면 사이에 포획된 수분의 급격한 비등에 의해 시작되며, 이러한 방아쇠 작용이 없다면 폭발은 일어나지 않게 된다. 이러한 수분 포획, 즉 방아쇠 작용의 근원을 없애는 여하한 방법도 수증기 폭발을 방지할 수 있는 수단이 될 수 있는 것이다. 수증기 폭발의 방지책으로 산업현장에서 성공적으로 사용되어 왔던 바닥면 코팅의 효과는, 고온의 용탕에 의해 코팅재의 열분해가 일어나고 이로 인해 생성된 가스가 수분포획이 일어나는

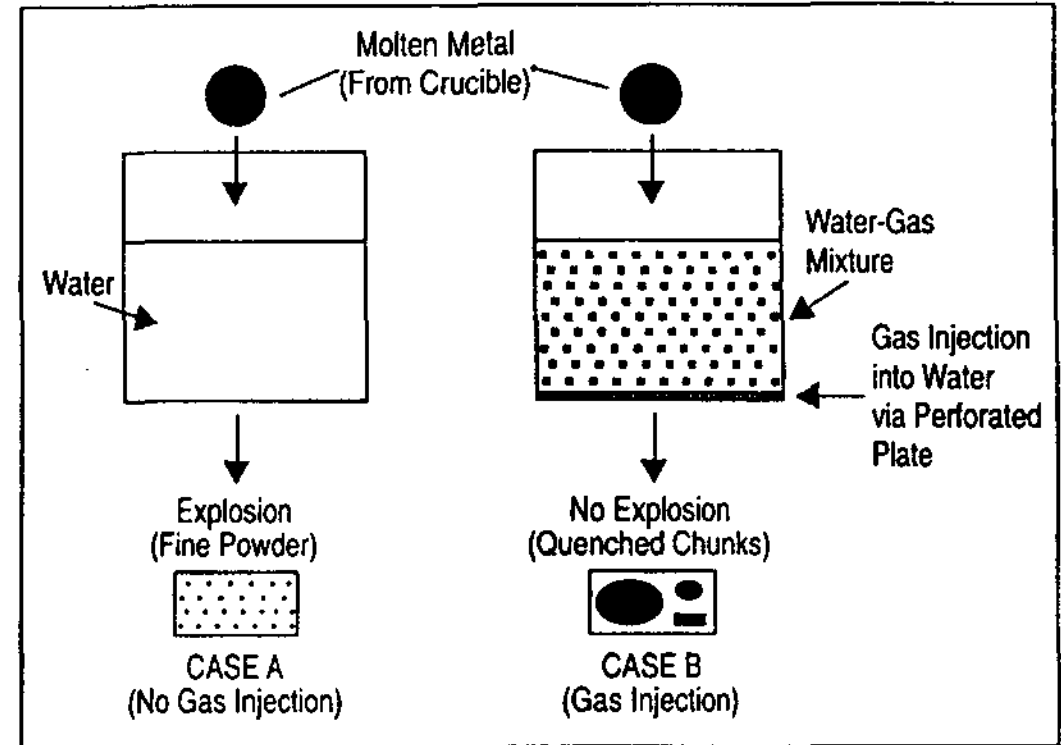


그림 8. 인위적 가스 주입에 의한 폭발실험의 도식적 그림 및 결과(case A: 가스주입 무, case B: 가스주입) [2].

밀폐공간의 생성을 방해하는 데 있는 것이다.

ORNL에서 추후 진행될 2단계 연구에서는, 지금까지의 결과를 기반으로 코팅의 수증기 폭발 방지 역할에 대한 효용성 및 현실성을 더욱 진보시키기 위하여 코팅의 내구성 및 적정 재코팅 시간의 산정, 코팅 벗겨짐의 최대 허용치 산정 등에 초점을 맞추고 있다. 또한 인위적인 가스주입의 효과에 대한 실험적 확인 작업도 병행될 예정이다.

후 기

본 고의 작성을 위한 참고자료의 획득에 도움을 주신 일본 나고야 공업연구원(NIRIN)의 오승탁 박사께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Long, Metal Progress, May 1957, 107.
- [2] R. P. Taleyarkhan, JOM, 50(1998) No. 2, 35.
- [3] R. P. Taleyarkhan, V. Georgevich, L. S. Nelson, Light Metal Age, June 1997, 26.
- [4] P. D. Hess, K. J. Brondyke, Metal Progress, April 1969, 93.
- [5] R. P. Taleyarkhan, U. S. Patent 5, 586, 597 (12 Dec, 1996).