

열가소성 용기 내 시즈히터 발화 메커니즘의 규명

글 이승훈 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발조사팀

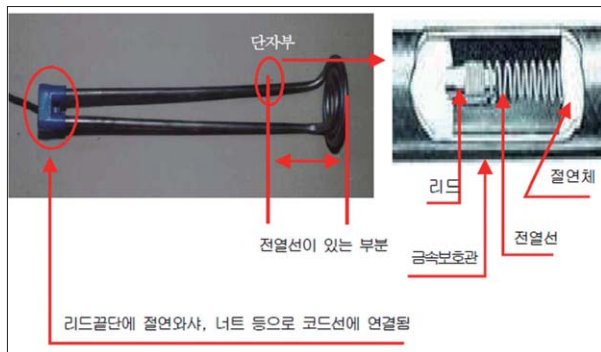
용기가 없는 시즈히터의 사용에 따른 화재가 종종 발생하고 있다. 시즈히터는 액체의 온도를 높이는 기구로 금년 겨울에도 시즈히터에 의한 크고 작은 화재가 발생할 것으로 예상된다. 기존의 시즈히터와 관련된 선행연구는 안전장치(온도조절기 등)가 없는 시즈히터의 과열에 의한 연구였다. 이는 합성수지 용기에서 액체의 증발로 인해 히터의 발열부가 공기 중에 노출될 경우 접촉되었을 때 용기에 착화되는 과정을 입증하고 위험성에 대하여 연구하였으며, 시즈히터에 의해서 발화하였을 때 히터 및 용기에 남는 특징들을 확인하여 시즈히터에 의한 화재의 입증을 위한 연구가 주를 이루고 있다.

본고에서는 액체에 담긴 상태에서도 시즈히터의 작동은 접촉되었던 열가소성 합성수지 용기를 변형 및 파괴하여 용기에 담겼던 액체가 누출되는 상황이 발생하고, 이로 인한 히터과열로 화재가 발생할 수 있다는 가설을 검토하고자 한다.

1. 시즈히터

가. 시즈히터의 구조

시즈(피복 파이프)히터는 [그림 1]과 같이 금속 파이프의 중간에 코일 형태의 전열선(Ni-Cr계열)을 통과시켜서 파이프(SUS, INCOLOY)와 전열선과의 접촉을 방지하기 위해 산화마그네슘 등의 열성 무기질 절연 분말 재료를 봉입한 것으로 시즈히터는 완전하게 밀봉되어 있으므로 물과 같은 액체 속에서 주로 사용된다.¹⁾



[그림 1] 안전장치 없는 시즈히터의 구조

1) 문용수 등. 2012

나. 자동온도조절장치의 부착

히터는 용도에 따라서 자동온도조절장치가 설치된 히터와 설치되지 않은 히터로 구분할 수 있다. 자동온도조절장치가 부착되지 않은 히터는 전원이 인가되었을 때 해당 히터의 최대출력이 발생하며 출력과 피가열물의 양에 따라서 시간에 따른 차이는 발생할 수 있으나 결국 끓는점에 도달하여 액체의 증발이 활발해진다. 반대로 온도조절장치가 부착된 시즈히터는 감열봉에 의해 피가열물의 온도를 감지하여 설정된 온도에서 오차가 크지 않은 상태로 지속적으로 유지하기 위해서 작동과 미작동 상태를 반복한다. 따라서 자동온도조절장치가 부착된 기기와 부착되지 않은 기기는 작동시점에서는 기기자체의 출력스펙에 따라서 최대출력을 사용할 뿐 출력에 대한 조절 기능은 없는 것이다. 다시 말한다면 자동온도조절장치가 부착된 시즈히터를 40℃에 설정하였다고 하여도 히터 표면의 온도가 40℃ 수준에서 고정되지는 않는다는 것이다. 그러므로 피가열물 속에서 히터표면의 작동 시 온도는 자동온도조절장치가 부착된 것과 부착되지 않은 히터를 비교하였을 때 유사하다고 볼 수 있다.

2. 시즈히터와 관련된 통념에 대한 분석과 가설

가. 히터의 수증온도에 대한 일반적인 통념

액체가 가열되는 경우에는 액체의 성질에 따라서 비점에 도달하였을 때 액체는 완전히 증기화 될 때까지 증발잠열 때문에 일정한 온도를 유지하게 된다. 예를 들면 끓고 있는 1기압에서 물은 계속해서 가열되더라도 남아 있는 액체는 100℃를 초과하지 않는다. 대부분 시즈히터는 피가열물 속에 잠긴 상태로 가열되어 피가열물의 온도를 높이는 역할을 한다. 따라서 최대출력으로 피가열물을 가열하더라도 열교환 때문에 피가열물의 끓는점 이상의 온도로 상승하는 것은 불가능하다는 논리로 용기의 파괴가능성에 대하여는 거론되지 않았으며, 관련 사고사례에서 실제원인분석 결과는 히터가열로 인한 액면 저하로 인해 히터가 노출되면서 화재가 발생한 것으로 결론지어지는 경우가 대부분이다.

나. 통념에 대한 이론적 검토 및 가설의 설정

액체의 끓는점은 일정하다. 물(H₂O)을 예를 들자면 1기압에서는 아무리 에너지를 가하더라도 액체가 완전히 증발되기 전까지 액체는 100℃의 일정한 온도를 유지하는데, 시즈히터에서 발생하는 열이 물을 통해서 열가소성 용기에 전달된다면 용기 표면을 100℃ 이상 가열하는 것은 불가능하다. 이것은 위에서 설명하였던 통념의 근간이 된 논리이다. 그러나 용기에 담아 사용하는 시즈히터의 대부분이 용기와 접촉된 상태로 사용되고 있는데, 히터가 용기와 접촉하고 있는 경우에는 물을 매개로 한 대류 열전달이 아니라 전도에 의한 직접적인 열전달이 이루어진다는 점을 간과한 단편적인 논리라고 볼 수 있다.

접촉되었을 경우 히터로부터 용기로의 열전달은 대류가 아니라 전도에 의한 것이다. 주변에 비교적 낮은 온도의 물이 존재하기 때문에 접촉부 주변은 물에 의해 열의 손실이 발생할 수 있지만, 히터와 용기 표면

중 접촉된 포인트에서는 전도현상에 의해서 히터의 표면과 근접한 온도까지 상승시킬 수 있다는 것을 논리적으로 검토해 볼 수 있다. 즉, 접촉된 포인트에서는 전도에 의한 열전달이 이루어지기 때문에 해당 포인트의 온도를 시즈히터의 표면 온도에 가까운 수준으로 상승시킬 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 접촉점부터 서서히 변형이 발생하게 되고, 계속해서 방치할 경우 따뜻한 젓가락을 초콜릿 위에 올려둔 것처럼 중력 등에 의해 히터의 발열부는 용기를 파고들어 결국 용기가 천공되고 누수가 발생하게 될 것이다.

수중에서 가열중인 히터는 단지 수중에 존재한다는 이유만으로 접촉부를 변형시킬 수 없다는 것에 대한 일반적인 통념이 과연 합리적이고 과학적인 명제인지는 고민해 볼 필요가 있다.

필자는 시즈히터와 관련된 여러 화재현장의 관계자들을 면담하였을 때, 수조 내에서 히터가 작동되었다고 하여도 발열부가 노출되지 않을 만한 수위 이상을 확보하였으므로 작업장으로부터 외출 또는 귀가하였을 때에도 안전하다고 판단을 하였고, 평소 그와 같은 수위로 몇 일간을 방치하여도 히터가 노출될 정도로 수면이 낮아지는 것을 본적이 없다는 경험적인 진술을 하며 증발에 의해서 화재가 발생한 것이 아니라고 항변하는 것을 수차례에 걸쳐 청취하였던 경험이 있다.

기존의 통념에 의하면 관계자들의 진술은 거짓말을 하는 것이라고 판단할 수밖에 없다. 연구자 또한 그러한 진술을 청취하면서 수위를 충분히 확보하지 못한 자신의 과실을 숨기기 위해 거짓말을 하는 것이라고 판단하였다. 그러나 최근 이와 같이 주장하는 관계자들의 진술에 진실성을 강화해 줄만한 몇 건의 사례가 발견되었다. 이 사례를 검토한 결과 연구자는 물 속에 잠긴 상태에서도 히터가 접촉에 의해서 열가소성 재질의 용기 등을 변형시킬 수 있으며 이로 인해 화재가 발생할 수 있다는 가설을 설정하였으며 이 가설은 위에서 설명하였던 이론적인 검토는 물론 면담하였던 관계자들의 진술과 부합하여 기존의 통념에 비하여 사고의 메커니즘을 보다 더 합리적으로 설명할 수 있는 것으로 판단된다.

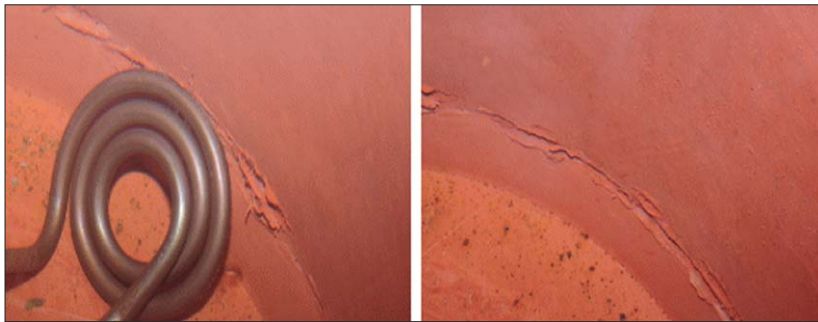
다. 사례의 검토 및 분석

(1) 사례 1

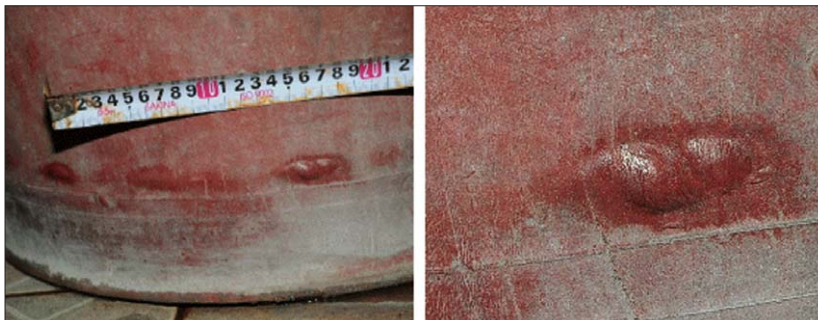
서울 광진구 00자동차 공업사의 목욕탕에는 공업사 직원들이 업무 후에 샤워를 할 수 있도록 온수를 보관하는 적색 고무통이 있으며, 이곳에는 3kW 용량의 시즈히터로 물을 가열하고 있었다. 이 히터는 자동 온도조절장치가 부착되어 약 45℃에 설정되어 있다. 이 통은 약 3년간 사용해 오던 것으로 온수의 수위가 낮아지면 물을 사용한 직원들이 퍼 담아 상부까지 항상 수위를 유지하여 왔다고 한다. 히터는 고무통 바닥까지 가라앉아 있는 상태로 있는데 목욕탕 관리자 및 이곳을 사용하는 직원들을 인터뷰하였을 때 항상 물을 채워두기 때문에 히터의 발열부가 노출될 만큼 수위가 낮아지는 일은 없었다고 한다. 하지만, 고무통 내부에는 시즈히터의 발열부 접촉에 의해 변형된 모습이 원주 전체에 이르는 약 50개소 이상에서 발견되는 것을 확인할 수 있었으며 외부에서도 변형된 모습을 확인할 수 있었다. 이는 열에 의한 용기의 변형이 발생하였으며, 천공되기 직전 상황도 여러 차례에 걸쳐 발생하였던 것으로 볼 수 있다.



[그림 2] 사례의 시즈히터의 자동온도조절장치는 45°C에 설정되어 있다.



[그림 3] 히터의 발열부에는 이물질의 부착 없이 깨끗한 상태이며 용기 내부 히터와 접촉된 부위에서 용기 원주 전체에 이르는 열변형 흔적이 관찰되었고, 각 접촉부위의 용융흔적은 천공직전에 이른 것으로부터 경미한 용융흔적까지 다양하게 관찰된다.



[그림 4] 용기의 외부에서 원주를 따라 시즈히터가 접촉된 부위에서 열변형 흔적이 관찰된다.

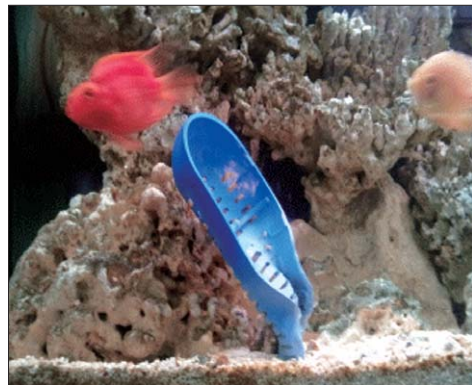
사용자 등은 평소 용기가 수중에 잠긴 상태에서 히터에 의해 접촉부가 녹는 듯 변형되는 것을 확인하였는데 단지 고무통이 파손되는 것을 우려하여 히터를 이동시켜 발열부 접촉위치를 변경하기는 하였지만 이로 인해 화재가 발생할 수 있다는 점은 생각하지 못하였기 때문에 계속해서 접촉 위치를 변경해 가면서 같은 방법으로 용기를 사용해 왔다고 진술하였다.

현장에서 변형된 흔적을 살펴보면 시즈히터 발열부의 접촉부에서 용기가 열에 의해 변형되었지만 비교적 온도가 낮은 열에 의해서 소성변형된 흔적뿐이며 과열에 의해 검게 변색되거나 탄화된 흔적은 식별되지 않는다. 접촉되었던 히터의 발열부에도 변색된 흔적, 늘어붙은 흔적 등 과열되었다고 볼 수 있는 흔적은 발견되지 않는다. 시즈히터가 공기 중에 노출되었을 때의 온도가 약 600~900℃ 가량인 점을 고려할 때, 이 사례에서도 만일 수면이 낮아져 대기 중에 노출된 상태로 시즈히터의 발열부에 접촉하였다면 용기의 접촉부위는 부분적으로 탄화된 흔적이 식별될 것이며, 발열부에도 이물질이 늘어붙은 얼룩 등 흔적이 발견되어야 할 것이다. 또 대기 중에 노출된 상태로 접촉한다면 거의 즉각적으로 용기가 급격히 파괴되고 화재가 발생할 것이므로 여러 차례에 걸쳐 천공되지 않는 정도의 지속적인 변형흔적을 나타낼 수 없었을 것으로 추정된다.

물이 담겨진 상태에서 용기의 변형은 히터와 용기의 표면이 접촉된 포인트로부터 시작되며, 주변에는 물에 의한 에너지의 손실이 발생하기 때문에 수중에서의 변형은 대기 중에서의 변형에 비하여 상당히 많은 시간이 소요될 것으로 사료된다. 이 사례의 경우에는 장시간에 걸쳐 변형이 진행되는 상황이 관계자들에게 의해 발견되었지만 천공까지는 이르지 않은 것으로 추정된다. 만일 이 사례에서도 적절한 시기에 발견되지 않아 천공에 이르는 파괴가 발생하였다면 물이 누출되어 히터과열에 의해 화재가 발생하였을 것으로 예상된다.

(2) 사례 2

2012. 9월경 서울 광화문에 위치한 00건물 로비에 대형 관상용 어항이 설치되었으며, 그 내부에는 물고기들의 생존을 위해 수온을 조절하기 위한 1kW 용량의 시즈히터가 부착되어 있었다. 히터는 수조의 하부에 설치되어 있으며, 자동온도조절장치가 부착되어 관상용 어류가 생존하기에 적절한 온도인 약 28℃에 설정되어 있다. 설치 후 약 3개월이 경과한 시점에 수중에 있던 히터의 플라스틱 외함이 열에 의해 변형된 상태로 히터로부터 분리되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 변형된 커버는 위 사례의 물통과 마찬가지로 소성변형되었을 뿐 과열된 히터의 접촉에서 볼 수 있는 탄화흔적 등은 발견되지 않았다. 또 만일 공기 중에서 과열된 히터와 접촉하였다면 국부적인 용융형태가 식별될 것이나 이 사례의 플라스틱 커버는 국부적인 용융흔적이 발견되지 않았으며, 변형부위가 비교적 완만한 수준으로 변형되어 있다는 것을 볼 수 있는데, 이러한 특징도 수중에서 변형되었다는 것을 뒷받침해줄 수 있는 근거가 될 수 있을 것이다. 이 어항에는 수많은 관상용 어류가 있으며 물갈이 등으로 일부 수위가 낮아지는 경우가 발생하지만 수조 내의 절반정도 물을 남긴 상태로 물갈이를 하고 있으며, 관리자에



[그림 5] 수중에 설치된 시즈히터 커버가 열변형되어 있다.

의해 24시간 관리, 유지되고 있기 때문에 설치 이후 히터가 공기 중에 노출될 만큼 수위가 낮아진 적이 없다. 따라서 이 히터의 플라스틱 커버는 수중에서 변형되었다는 것을 보증할 수 있다.

(3) 사례 3



[그림 6] 수조의 연소형태



[그림 7] 시즈히터 온도설정 12~13°C



[그림 8] 드레인밸브 잠김 상태



[그림 9] 연소중심부에는 시즈히터가 있음



[그림 10] 시즈히터의 연소잔해



[그림 11] 시즈히터 접촉부의 파괴형태

시즈히터 관련 화재사고는 작은 용기는 물론 대형용기에서도 발생하는데 이 사례는 활어횃집에서 활어를 보관하고 있는 수조에 담긴 시즈히터에 의해 화재가 발생한 사례이다. 수조는 약 300L 가량의 해수가 담겨 있으며, 이곳에는 수온유지를 위한 1kW 용량의 시즈히터가 12~13℃의 온도로 세팅되어 바닥에 잠긴 상태로 작동되고 있었다. 관리자는 전날 영업을 마치고 23:00경에 퇴근하였으며, 퇴근 당시에도 평상시와 마찬가지로 수조의 상부까지 수위가 차있는 것을 확인하였으며, 화재는 그로부터 7시간 후인 다음날 06:00에 발생하였다.

대략적인 증발량을 계산하기 위해 수조에 담긴 해수가 순수한 물이라고 가정하고, 시즈히터의 온도설정을 무시한 상태로 최고 출력인 1kW가 지속적으로 작동하며 외부의 열전달을 전혀 고려하지 않고, 오로지 에너지가 물의 온도를 증가시키는 데에만 사용되었다고 가정하고, 다음과 같은 조건으로 에너지 역학적 계산을 검토해 보았다.

물 1g을 1℃ 상승시키기 위한 에너지는 1cal, 수조 내에 수온 30℃의 물 100L을 100℃까지 상승시키는데 소용되는 열량은 7,000,000cal가 필요하다. 1kW 용량 시즈히터로 1시간당 에너지는 860kcal로 계산하였을 때 30℃의 물 100L을 100℃까지 상승시키는데 소요되는 시간은 약 8시간으로 계산된다. 여기에 100℃의 물에서 1g을 증발시키기 위한 에너지는 539cal이므로 수조 내의 물을 완전히 증발시키는 데까지 필요한 에너지는 60,900,000cal 이며 소요되는 시간은 약 71시간이다.

계산된 내용을 사례와 비교하여 보았을 때 수조 내에는 약 300L 가량의 물이 차있었으므로 완전히 증발시키는데 소요되는 열량과 시간은 위 계산 값의 3배 가량이 소요된다. 더군다나 사례에서는 히터의 온도가 12~13℃를 유지하도록 설정되어 있었기 때문에 관리자가 자리를 비운 시간인 약 7시간 동안 증발에 의한 수조의 수면저하 가능성은 배제할 수 있다. 그 외 수면이 저하된 원인에 대하여 고려한다면 드레인밸브는 완전히 잠김상태이므로 이곳을 통한 누수의 가능성은 배제되며, 용기 파괴에 의한 누수로 인해 수면 저하가 발생하였다고 볼 수 있는데, 본 사례에서 용기 파괴의 원인으로는 충격이나 피로 등 다른 원인에 의해서 파괴되었을 개연성이 희박하며, 시즈히터에 의해 용융 천공된 부위를 제외하고는 누수가 될 만한 파손개소가 식별되지 않는 점으로 보아 용기는 시즈히터의 열에 의해 변형되면서 파괴가 발생하였다고 추정해 볼 수 있다.

이 사례의 시즈히터는 플라스틱 외함으로 히터의 발열부가 보호되어 있는 상태이나 발열부와 완전히 분리되어 접촉되지 않도록 설계되어야 한다. 그와 같이 설계되었다고 하여도 조립과정의 오류 또는 히터 관리 중 충격 등에 의해 히터의 위치가 변경되어 외함과 접촉하게 된다면 외함 조차도 열가소성 합성수지로 제작되었으므로 변형되면서 결국 히터의 발열부는 수조의 바닥과 접촉할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 맺음말

위 사례들의 시즈히터는 자동온도 조절장치가 부착된 히터로 온도는 50℃ 이하로 설정되어 있었다. 그럼에도 불구하고, 수중에서 접촉된 열가소성 합성수지가 열변형된 것을 여러 사례를 통해 확인할 수 있다. 이러한 사례 검토는 기존 시즈히터 관련 화재사건에서 관련자들이 증발에 의해 수위가 낮아져 화재가 발생한 것은 아니라는 항변 및 진술과 일치한다.

본 사례검토를 통해서 시즈히터는 수중에서 열교환이 이루어진다고 하여도 히터의 발열부 표면 자체는 열가소성 용기를 파괴시킬 정도로 온도가 상승할 수 있으며, 용기가 파괴된다면 이로 인하여 용기에 담긴 피가열물이 누출되어 수위가 낮아지면서 발열부의 과열로 화재가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이 논지에 대한 근거로 과거의 시즈히터 관련 사고를 살펴보았을 때 대부분 열경화성 합성수지 용기에서 발생하였던 점도 간과할 수 없을 것이다. 기존의 시즈히터 관련 사고에서 열가소성 용기는 최초 가연물로서만 논의되어 왔으나, 검토결과를 고려할 때 관련 화재사건에 있어서 열가소성 용기는 최초 가연물로서의 역할에 우선하여 근본적인 화재원인으로 논의되어야 할 것으로 판단된다.

시즈히터 관련 발화 메커니즘을 정리하면 다음과 같다.

[발화 메커니즘]

히터 발열부 표면과 열가소성 용기의 접촉 ⇒ 용기의 변형 ⇒ 파괴 ⇒ 피가열물의 누출 ⇒ 액면 저하 ⇒ 히터 발열부 노출 및 과열 ⇒ 용기 등 인접 가연물 발화

연구의 결과를 정리하면 증발에 의한 수면저하로 화재가 발생한다는 논제는 통념에 불과한 것이며, 시즈히터에 의해 화재가 발생하는 근본적인 이유는 히터의 발열부 접촉에 의한 열가소성 용기의 파괴에 의한 것이라고 말할 수 있다. 기존의 증발에 의한 수면 저하를 원인으로 결정하였던 시즈히터 관련 사고도 이와 같은 과정을 거쳐 발생한 화재사례가 많았을 것으로 판단된다.

시즈히터 화재는 히터의 발열부 접촉에 의해서 용기가 파괴되면서 발생하는 것으로 용기가 열에 의해 파괴되지 않는 금속이나 세라믹, 열경화성 수지 용기 등을 사용한다면 이와 같은 파괴에 의해 피가열물이 누출되는 사고를 막을 수 있을 것이다. 열가소성 용기 내에서 사용할 경우에도 발열부에는 열전도율이 낮은 세라믹이나 열경화성 합성수지 재질의 그릇이나 받침대 등을 사용하여 용기에 직접 접촉되는 것을 막거나, 별도의 고정장치 등을 이용하여 용기 표면과 접촉이 없도록 한다면 시즈히터와 관련된 많은 화재사고를 예방할 수 있을 것으로 생각된다. ☞