건물의 배수 및 통기시스템 : 배관 내부압력의 능동적인 제어

저자 : Michael Gormly
John. A swaffield

번역 : 유 건 석
(주)스튜더 코리아 (kslew@studorkorea.co.kr)

요 약

건물의 배수 및 통기시스템에서 나타나는 현상 중에 확실한 내용이 아직 밝혀지지 않은 부분이 몇 가지 남아 있다. 이것은 19세기 말엽의 근대 위생공학의 시작 단계에서부터 잘 알려진 사실이다. 건물의 배수 및 통기시스템 운용에 대한 내용은 일반 공학과 특정 유체역학의 범위 내에서 가장 잘 이해할 수 있다.

건물의 배수 및 통기시스템의 운영에 종사했던 초기의 기술진들은 이러한 점을 잘 알고 있었으며 유체역학에 적합하게 응용한 많은 사례를 확인할 수 있었다. 제2차 세계대전이 끝나고 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 특히 유럽에서 시작된 전후 재건 붐을 통해 배수 및 통기시스템의 설계에 좀 더 효율적인 접근이 진척되게 되었다.

이러한 배수시스템의 중심에는 배수관 내부의 오염된 공기가 배수구 또는 위생기구를 통하여 주거 공간으로 유입되는 것을 방지하는 트랩(Water Trap)이 있다. 배수트랩의 주요 기능인 봉수는 일반적으로 깊이가 40 mm에서 50 mm 정도로 위생기구의 종류에 따라 봉수의 깊이는 다소 차이가 있다.

배수관내 공기의 흐름이 중요한 것처럼 트랩의 봉수 메커니즘이 중요하기 때문에 이 메커니즘을 소홀히 여긴다면 안전한 배수시스템의 운영을 기대하기는 어렵다. 배수관 내의 공기의 흐름은 배수에 의해 유입되거나 또는 배출된다. 배수관에서 내부 압력의 불규칙한 변화로 인하여 야기되는 불안정한 배수의 흐름은 트랩의 봉수를 파괴하고 나아가 주거공간으로 오염된 공기가 새어 나갈 수 있는 통로를 제공하게 된다.

관내압력의 천이는 이로 인한 문제가 발생할 가능성이 있는 위치에 그 압력을 완화할 수 있는 장치를 설계단계에 반영하여 적용함으로써 제어할 수 있다. 건물 내부에 상당한 길이의 통기배관을 설치하는 것은 배관의 마찰손실로 인하여 천이 현상을 효과적으로 제어할 수 있는 확실한 방법이 되지는 못한다. 그렇지만 통기밸브를 설치하는 것과 같이 배수관 내로 공기를 공급해주는 유입구를 건물 내부에 분산 설치하는 것이 효율적인 통기방식이 될 수 있고, 정압 천이로 인한 위험을 줄여줄 수 있다. 통기밸브는 정압 발생의 원인이 되지 않으며 단지 정압에 반응하여 더욱 기밀하게 닫히며, 약화된 압력파를 반사할 뿐이다.

고층 건물에서 배수입상관과 평행하게 설치된 통기입상관(Parallel Vent Pipe)의 경우 극히 일부분의 정압 천이 현상을 완화할 수 있다. (통기 배관의 직경이 배수 입상배관과 동일한 경우 대략 1/3 정도임), 그러므로 정압의 천이로 인한 압력파동은 배수 시스템의 나머지 부분을 통해 전파되어 배수 트랩에 영향을 미치게 된다. 정압의 천이가 예상되는 위치에 정압천이 완화 장치(Positive Air Pressure Transient Alleviation Device)를 사용

하면 배관 내부압력의 급격한 상승을 방지하여 연결된 트랩의 봉수를 보호할 수 있다. 이렇게 되면 순간적으로 발생하는 배관내 압력의 급등 현상을 90% 정도까지 완화 시킬 수 있다. 경험적으로 배수시스템에서 배관이 완전하게 막혀 과도한 정압이 발생하는 경우는 거의 없다. 이러한 경우에는 가장 낮은 위치에 있는 배수 트랩의 봉수가 깨지면서 자연스럽게 배수시스템의 압력이 해소되게 된다. 이러한 사례는 통기 방식과 상관없이 발생할 수 있다.

실제와 유사한 시뮬레이션을 통하여 통기 밸브(Air Admittance Valves)는 전면 통기 시스템(Fully Vented System)에서 최소한 트랩의 봉수 보호용으로 적합한 것이 확인 되었다. 어떤 경우에는 고층 건물에 더욱 적합하다는 것을 확인할 수 있었다. 부압 해소용으로 통기밸브를 이용하고 정압완화용으로 정압 완화장치(PAPAs: Positive Air Pressure Transient Attenuators)를 사용하는 전면적 능동 제어시스템(Fully Engineered Designed Active Control System)이 사용자에게 육안으로는 확인하지 못하는 기능을 보장하면서 배수시스템의 안전과 효율성에 대한 효과적인 방법을 제공하고 있다.

소 개

역사적인 인식

대부분의 사람들에게 있어 도기 또는 스테인리스 등으로 만들어진 가구 아래 내장된 배수시스템은 전혀 생소한 것으로 잘 이해하지 못하고 있다. 사용자들은 싱크대에 가득 찬 비눗물이 자신의 주방으로부터 공공 하수처리장까지 어떻게 운반 되는지 에는 관심이 없다. 마찬가지로 욕실에 있는 수세식 변기, 욕조 또는 비데로부터 하수처리장까지 배수가 어떻게 흘러가는지 에도 관심은 없다. 그러다가 "저기 어딘가" 에서 불쾌한 냄새가 나기 시작하고 새로 깔아놓은 바닥재에 변기의 물이 넘치게 되면 비로소 사람들은 관심을 갖기 시작한다. 게다가 상당한 금액의 수리비 청구서를 내밀면 비로소 배수설비에 대하여 관심을 갖게 된다.

사실 건물의 배수시스템에 대하여는 별로 감춰진 내용이 없다. 모든 유체 (물과 공기)를 다루는 근본적인 원리들은 이미 잘 알려져 있고 배수시스템을 운영하는데 필요한 설계 및 작동하지 않는 원인을 찾아낼 수 있는 과학적인 분석 등은 이미 배수시스템에 적용되어왔다. 목욕탕에 대한 금기는 배수시스템에 대한 의혹만 커지게 하였지만, 물에 의해 오물이 이동한다는 것에 대한 과학적 근거는 수천 년 전부터 존재해왔음을 주목하여야 한다. 그러나 우리가 갖는 관심은 현대적인 배수설비 및 지난 120 ~ 150년 넘게 이어져 온 배수시스템의 발전에 있다.

건물의 안전하고 실질적인 배수시스템이 계속 진화하여 관련 학문에서 주목받기 시작한 것은 겨우 19세기 후반 무렵이었다. 배수냄새가 생활공간으로 스며들어오는 것을 방지함으로 배수시스템의 일체성을 확보하는데 중요한 요소인 트랩과 통기시스템은 이미 잘 알려져 있었고, 우리의 생각과는 관계없이 배수과정에서 일어나는 내부의 압력변화 현상에 대처하는 방법을 개발하고 또 개선하기 위한 많은 노력이 진행 중에 있다. 이러한 노력들은 그 시대의 과학자 및 공학자들에 의해 최초로 연구되어 왔다. 영국에서 배수 트랩은 1775년경에 "커밍스"가 발명하였다. 그는 공학자이자 시계 제작자였으며, 17세기 무렵에 "해링턴"이 최초로 발명했던 수세식 변기에 관한 아이디어를 실제에 적용한 기술자이다.

배수시스템의 많은 부분이 오랜 시간에 걸쳐 여러 부분에서 검증을 받는 동안 대도시와 큰 마을의 형편없었던 위생 상태를 개선하기위한 노력이 19세기에 접어들면서부터 시작되었다. 1842년 영국의 지방공무원이었던 "에드윈 채드윅"은 저서 "대영제국 노동계층의 위생 상태에 관한 보고서"를 출판하였다. 이 보고서는 영국에서 산업혁명으로 인하여 급속하게 팽창된 도시 슬럼가의 위생 상태를 개선하기 위한 투자를 요구하는 정책의 입안을 촉진하는 계기가 되었다. 오늘날 유체역학의 빈번한 토론에 많은 주제가 되며, 난류(Turbulent Flow)에 관한 독창적인 연구로 유명한 과학자이자 공학자인 "오스본 레이놀즈"가 19세기 후반 영국 맨체스터시의 슬럼가 위생 상태를 다룬 저서 "배수냄새와 냄새 차단방법"을 집필 하였다는 점

이 그 시대의 위생 상태를 대변해 준다.

유럽에서 위생상태의 개선 작업이 계속되는 동안, 미국에서는 많은 건축가, 과학자 그리고 공학자들이 급속한 경제성장에 따르는 문제에 직면하게 되었다. 유럽으로부터 유입되는 이민자들로 인한 인구의 증가와 급속한 경제팽창으로 인해 건물들이 우후죽순처럼 생겨나게 되었다. 유명한 공학자인 "조지 웨어링"이 작성한 논문이자 저서인 "How to drain a house, practical information for householders?"에서 "웨어링"은 그 당시로서 아주 유용한 내용을 주장하였다. "웨어링"이 제기한 내용 중 일부는 시대에 뒤떨어진 사항도 있었으나 전반적인 내용을 통해 기존 배수시스템에서 무엇이 문제인가에 대한 고찰과 배수시스템과 유체역학은 그 연관성에 있어서 비교적 분명한 차이가 있다는 점을 말하였다. 다음의 인용문은 이러한 점을 잘 나타내고 있다.

"통기시스템의 효율성은 트랩 이후의 배관에 물이 흐르면서 발생한 진공상태를 해소하기 위해서 필요한 공기를 신속하게 공급해야 하는 데에 있다. 공기를 공급하기에 충분한 유입구를 갖추는 것뿐만 아니라 그 유입구를 통하여 적당량의 공기가 저항 없이 자유롭게 흐르도록 해야 하는 문제도 있다. 예를 들면 구경이 1인치 배관이라 할지라도 충분하게 빨리 공기를 공급해줄 수 있다. 동일한 직경의 긴 배관이나 구경이 더 작은 같은 길이의 배관이 그러하지 못하더라도."

– 1895년 "웨어링"의 저서 101~102 페이지 –

여기에서 "웨어링"이 제시하는 것은 배수에 관한 문제를 독립적이고 역동적인 방법으로 분석할 필요가 있고 배관 내의 마찰을 중요하게 여겨야 한다는 것이다. 이것은 지난 30여 년간 컴퓨터를 이용하여 많은 배수시스템의 모델을 구축해 온 근거이기도 하다. 건물의 배수배관에는 불안정한 흐름이 존재하고 있는데, 이것은 배관 내부의 유체의 압력은 급격하게 변화하므로 공공 하수관로에서 사용하는 완만하고 안정적인 흐름을 가정한 간단한 계산식으로는 배수시스템을 완벽하게 분석할 수 없다는 것을 뜻한다.

"웨어링"과 같은 시대의 학자이며 보스턴 시의 건축가였던 "퓨트남"은 1911년에 출판된 자신의 저서 '위생배관 및 세대 위생'에서 사이폰 방지 트랩을 적절하게 이용하는 것으로 설계된 배수시스템에는 별도의 통기장치가 필요 없다고 말하고 있고, 사이폰 현상을 방지하기 위해서는 배수트랩에 인접한 위치에 공기를 공급하는 통기장치를 설치해야 한다는 내용을 덧붙였다. "퓨트남"의 주장은 신뢰성 있는 유체역학의 이론에 근거하여 수년간에 걸친 배수트랩과 통기설비를 통한 실험으로 입증되었으며, "웨어링"이 제기한 내용은 MIT 공대에서 "퓨트남"이 수행한 배관의 마찰에 관한 일련의 실험을 통하여 더욱 진전 되었다. 1911년 1월 18일 샌프란시스코에서 개최된 미국 건축학회 44주년 정기 모임에서 발표된 "퓨트남"의 논문은 718페이지 분량의 방대한 저서로서 제목은 "더 좋은 위생설비를 반 가격으로"로 경제적인 관점과 수년간 그가 행한 실험 및 경험에 근거하여 고층건물에도 적용가능한 단일 배관시스템을 제시하였다.

단일 배관시스템에 관해 설명한 이 논문에 대하여 세계 2차 대전이 끝난 20여년 뒤에 영국의 BRS (Building Research Station)에서 이와 관련한 연구를 수행하였다. 폐허가 된 도시를 재건하기 위한 수많은 건축 프로젝트가 이것의 원동력이 되었다. 1957년 "와이즈"가 출간한 저서에서는 "단일 배관시스템"이 설치가 쉽고 사용이 안전하며 경제적인 방식이고 이를 적절히 설계한다면 건물의 배수시스템의 모든 트랩에 통기가 필요하지 않을 수도 있다고 기술 하였다.

이러한 역사적인 배경에 기초하여 본 레포트에서는 건물의 오, 배수 및 통기시스템 운영에 대해 오랫동안 확립된 원칙 중 일부에 대한 해설과 건물의 배수시스템에서 발생되는 불안정한 유체의 흐름을 예측하고 또 표현하기 위하여 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통하여 효과적인 통기시스템에 대하여 설명한다.

건물의 배수관내의 배수

변기나 욕조 또는 화장실에서 배수가 시작되면

[그림 1] 가지관으로부터 입상관으로 유입되는 배수
(Heriot-Watt 대학교)

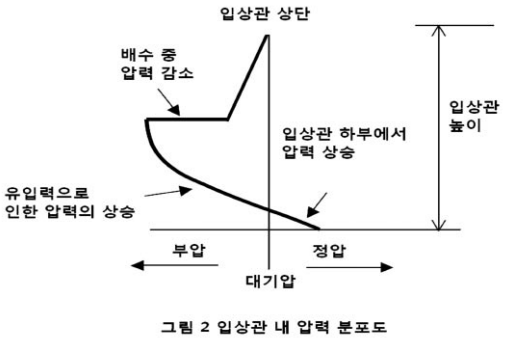


그림 2 입상관 내 압력 분포도

[그림 2] 입상관 내 압력 분포도

배수는 배수배관의 수평 부분으로 고형물과 함께 흐르게 되는데 이러한 흐름은 입상 배관과 만나게 되면 곡선을 그리며 입상관의 앞쪽 벽에 부딪힌 후 입상배관의 내면을 따라 나선형태로 흘러 내려간다. 중력의 작용으로 인해 배수는 배관의 내부 벽면에 붙은 상태로 흘러내려 가는데 이러한 흐름 형태를 환상 유동 (Annular Water Flow)이라고 한다. 이때 입상배관의 안쪽 벽에 생겨나는 수막의 깊이는 빠른 유속으로 인해 1/4인치 정도로 상당히 얇다. 배수 속에 포함된 일부 고형물은 배관의 벽체에 붙어 흘러 내려가지 못하고 중력으로 인해 배관의 가운데 부분으로 낙하하게 된다.

건물 배수관 내부의 공기

대부분의 사람들은 건물의 배수관 내로 배수가 흘러가는 것은 알고 있다. 이것은 사용자가 자신의 집이나 사무실에서 물을 사용하고 흘려보내기 때문이다. 하지만 배수시스템 내에서 공기가 중요한 역할을 하고 있다는 것을 아는 사람은 그리 많지 않다. 이 두 종류의 중요한 유체인 공기와 물에 관하여 설계자, 시공자 그리고 감독자와 같은 사람들에게는 배관 내의 공기흐름에 관한 제어가 그들이 해결해야 할 가장 큰 과제이다. 배관 내의 공기의 흐름을 조절하고 제어하는 일은 공기 역학에 관한 이해가 부족하면 어려운 일이다. 그래서 건물의 배수관 내에서 공기가 하는 역할을 알아보기로 한다.

앞에서 설명한대로 배수가 배관 내에서 흐르기 시작할 때 배관 내부의 공기는 배수와 함께 움직인다. 이러한 현상은 공기가 배관의 상단 개구부에서 내려올 때, 즉 입상관을 따라 배수가 아래로 흘러 내려갈 때에 더 확실하게 드러난다. 이는 공기의 흐름을 만들어 내는 물과 공기 사이에서 발생하는 전단력 때문이다.

수직 배관 상부가 대기중에 개방되어 있다고 하면 공기의 압력 (이곳으로부터 공기가 유입되기 시작함)은 배관을 따라 아래로 내려가면서 낮아질 것이다. 이 압력손실은 상단 개구부에서 초기에 유입되는 입구손실, 신정통기배관 내에서의 마찰, 가지관에서 입상관으로 유입되는 접속구에서의 단순 손실 등으로 인하여 발생하게 된다.

이러한 압력 손실은 배관 내에서 대기압보다 낮은 압력이 되어 흡입력을 발생시키게 된다.

가지관의 아래쪽 입상배관 내의 압력은 좀 다른 모양을 나타낸다. 배수가 공기 흐름을 유도하기 때문에 공기의 작용하는 힘은 마찰력이 아닌 상승력이 된다. 상승력은 공기압을 증가시키는 성질이 있어서 (혹은 흡입 압력의 감소를 가져오며) 배관 기저부에서 압력을 대기압 상태로 다시 복귀시킨다. 어떤 상황에서는 배관 기저부의 압력은 대기압 이상으로 상승할 수 있는데 이를 배압(back pressure)이라고 한다.

수직입상관 내의 압력 분포는 일반적으로 **그림 2**에 나타난 것과 같이 분포한다. 이것은 한번 배수가 되는 특정 순간에 대한 그래프로써 그 순간 전체 입상배관에 나타나는 압력 분포에 대한 '사

진 (temporal snapshot)' 과 같은 것이다. 또한 이것은 고층 건물일수록 이 그래프는 잘 적용이 된다. 하지만 실제로는 이렇지 않을 수도 있으며, 압력의 천이 현상이 나타나는 배관에서는 압력 분포가 상승과 하강을 반복하면서 급속히 변화하게 된다.

설계가 잘 된 배수시스템의 조건

설계가 잘 된 배수시스템의 주요 조건은 사용자가 그 존재를 느끼지 못할 정도로 운영되어야 한다는 것이다. 그러나 이것은 막연한 내용이므로 잘된 시스템으로 인정받을 수 있는 몇 가지 조건을 보다 명확하게 할 필요가 있다. 다음의 조건들은 안전하고 유용하며 신뢰성 있는 배수시스템을 확립하는데 필수적이라고 할 수 있겠다.

- 배관시스템은 가능한한 신속하게 모든 배수를 건물 외부로 신속하게 배출할 수 있어야 한다.
- 긴 수평배관은 자정 기능이 있어야 한다 (적절한 구배를 갖춰야 한다).
- 배수관 내 가스의 실내 유입을 막기 위하여 어떤 경우에도 봉수의 손실은 최소가 되어야 한다.

그 외에 다른 조건들은 다음과 같다.

- 배수시스템 내의 발생소음은 낮을수록 좋다.
- 위생 기구에서 발생하는 냄새는 최소한도가 되어야 한다. (수세식 변기 등 사용)
- 유지보수가 간단해야 한다.

배수시스템과 연관된 각종 코드나 규정은 배수시스템의 위생기기들이 상기 조건을 만족하고 사용자들이 오수나 배수에 직접 접촉하지 못하도록 하기 위하여 제정되었다. 산업화가 이루어진 선진국에서는 대부분의 위생기기들이 상기 조건을 만족하고 배수 시스템의 영향을 받을 수 있는 위험도가 상당히 낮은 편이다. 관련 학문이 그러하듯이, 위생 장비 및 기술력은 과학과 공학의 발전으로 인하여 배수시스템 운영에 대한 이해도를 개선시켜왔으며, 위생상 위험을 야기하지 않고 안전하고 신뢰성 있는 배수시스템을 확립하는데 혁신적이며 효율적인 방법을 개발하는데 일조하였다.

배관 시스템 내 압력의 천이 현상

압력의 천이 현상이란 무엇인가?

건물에 배수시스템을 설치하는 과제에 관한 논의는 배관 내 공기압력의 천이 현상을 고려하지 않고서는 완전하다고 할 수가 없다. 여기서 말하는 압력의 천이 현상이란 배관시스템상의 한 곳에서 다른 곳으로 압력이 이동하는 것을 의미한다. 만일 A 위치에서 압력 천이 현상이 발생한다면 이 현상은 파동이라는 매개체에 의해 B 위치로 전달된다. 압력 파동은 임의의 방향으로 공기의 움직임보다 더 빨리 움직이지만 꼭 유체가 흐르는 방향으로만 움직이지는 않는다. 배관 내에서 압력의 천이 현상이 이동하는 속도는 음속과 비슷한 약 1050 ft/sec이다. 공기 압력이 감소하면 (부압) 상대적으로 많은 공기가 필요하고 배관 내에 흡입력이 생기는 반면 공기 압력이 증가하면 (정압) 이는 공기의 흐름을 줄여줄 필요가 있다는 것을 알려주며 저항력이 생기게 된다. 부압은 배수시스템으로부터 배출되는 공기에 의해 발생할 수 있다 (그러므로 배관 내에는 더 많은 공기가 필요하게 된다). 그리고 정압은 막혀있는 배관의 말단으로 움직이는 공기에 의해 발생될 수 있다 (그리고 도피구가 없는 공기의 흐름을 정지시킨다.)

다음과 같은 상황을 상상해 보면 가시화하는데 도움이 될 수 있다. 차가 많은 러시아워 때 고속도로를 따라 정속주행 속도인 40마일로 운전을 하고 있다고 가정하자. 도로는 약간의 오르막길로 길고 굽었으며 수 마일 앞쪽의 차량 후미등이 보일 만큼 날은 어둡다. 주행하던 중 어떤 교차로에서 시야에 보이는 가장 앞쪽의 차량이 정지하게 되면 뒤쪽의 운전자들은 차례로 브레이크를 밟으며 정지하게 된다. 이 때 제일 뒤쪽의 여러분은 여전히 40마일의 속도로 달린다고 생각하면, 바로 앞 차량의 브레이크에 반응을 보이는 뒤쪽 차량들의 브레이크등이 차례대로 하나 둘씩 켜지는 것을 여러분은 볼 수 있을 것이다. 즉 여러분이 브레이크를 밟고 멈출 때까지 여러분은 브레이크등의 '파장' 즉 '파동' 의 진행을 볼 수 있을 것이다. 브레이크등은 저 앞에 (여러분의 시야에서 벗어난 곳에서) 무슨 일이 있고 멈추어야 한다는 것을 여러분에

게 전달하는 일종의 공기압 파동과 같은 지시자이다. 이러한 정압 파동은 여러분이 브레이크를 밟기 전에 달렸던 속도 40마일 보다 훨씬 빠르게 이동한다 (이 경우에 파동의 속도는 전방의 브레이크등을 보는 운전자의 반응 속도에 따라 결정된다).

차량이 다시 움직이기 시작하면 이전과 상반되는 일이 생겨나는데 앞쪽의 차량들의 브레이크등이 하나 둘씩 꺼지면서 뒤쪽의 차량들은 다시 움직이기 시작한다. 차량이 다시 움직일 수 있다는 정보는 '꺼져가는 등과 같은' 타입의 감소되어가는 압력의 파동을 통해 전달된다.

만일 속도가 증가한다면 그 결과는 흥미롭다고 본다. 자동차가 70마일의 속도로 달리고 있는데 앞차가 갑자기 멈춘다면, 유체흐름에서 "주코프스키" 타입의 압력이 급등하는 순간과 같이 뒤를 따르던 차량들과 충돌하기 쉽게 된다. ["주코프스키"는 압력 급등 정도는 유체의 속도, 유체의 밀도, 유체파동의 속도에 좌우된다는 결론을 내렸다.]

건물 배수 시스템에서 이러한 압력의 천이 현상은 무슨 역할을 하는가?

배수 트랩에서 부압은 봉수를 빨아들이려는 경향이 있다. 트랩의 물을 한 번에 빨아들이기에는 압력이 충분하지 않을 수 있지만 계속된다면 그 영향은 트랩의 봉수를 파괴하는데 까지 도달할 수 있다. 또 배관 내부의 정압은 봉수를 밀어내어 주거 공간으로 배수냄새를 새어 나가도록 작용할 수 있다.

압력의 천이 현상을 극복할 수 있는 방법은 무엇인가?

공기 흐름의 증가와 감소를 최대한 빠른 시간 내에 파악하는 것이 안정된 배수시스템을 유지하기 위해 필요한 주요사항이다. 배수시스템에서 압력의 평형 상태를 유지하기에 가장 중요한 내용은 가능한 한 압력의 변동이 발생한 지점과 가까운 곳에서 압력을 해소 하는 것이다. 앞에서 인용한 차량 흐름에 관한 예를 보면, 주행에 장애가 되는 앞 차량을 피해 가까운 우회로를 이용한다면 정체로 인한 불편을 대부분 줄이게 될 것이다. 배수관내에서 발생하는 흡입 압력을 해소해야 한다고 "웨어링"이 제기한 내용은 아직까지 사실로 여겨지고 있는데 그것은 배수에 필요한 공기는 가능한 한 신속히 공급되어야 하고, 통기배관이 길어질수록 공기가 흐르는데 필요한 시간이 그만큼 더 소요된다는 것으로 이것은 공기가 공급되기 전에 트랩이 파괴되어 배수 트랩이 무용지물이 될 가능성이 높다는 점이다.

최상을 위한 설계

부압의 완화

앞에서 설명한대로, 부압은 배관시스템 내부에 공기가 부족하다는 것을 의미한다. 이 현상은 다음과 같은 사유들로 인해 발생한다.

- 충만한 상태로 배수되는 가지관에서는 사이폰 작용으로 인해 트랩의 봉수를 흡입하는 진공상태를 만든다.
- 수직 입상배관을 따라 낙하하는 배수로 인한 압력의 손실은 거의 음속의 속도로 배관 시스템 내로 퍼져가는 부압의 천이를 일으킨다. 이러한 부압의 천이 중 일부는 트랩의 봉수를 빨아들이기에 충분한 흡입압력이 될 수 있다(유도 사이폰 현상).
- 어떤 이유로든지 공기의 흐름이 증가하면 부압의 천이현상을 생성하게 되고 더 많은 공기가 필요하다는 신호를 공기가 유입되는 유입구로 전달하게 된다.
- 배관시스템을 빠져 나가는 공기는 (배수와 함께 외부관로로 들어가거나 기타 다른 접속 지점으로 흘러 들어가는 경우. 예: 옥상 통기구) 부압의 천이를 발생시킨다.

더 많은 공기의 흐름을 필요로 하는 상황에 가장 효과적으로 대처하는 방법은 가능한 한 신속하게 대응하는 것이다. 이것은 필요로 하는 양만큼의 공기를 가능한 한 신속하게 공급한다는 의미이다. 이상적인 배수시스템에서는 공기가 필요한 지점에 가장 가까운 곳에 공기 유입구가 있어야 한다. 실제 통기밸브를 사용하는 통기 방식은 공기를 가장 효과적으로 신속하게 공급할 수 있다. 만일 트

랩이 공기 유입구로부터 약 30피트 정도 떨어져 있다면 공기의 흐름은 지연되고 결과적으로 배수 트랩의 기능에 부정적인 영향을 미칠 수도 있다.

만일 그러하다면 왜 사람들은 전면 통기 방식을 사용하면서 가끔씩 역한 냄새를 맡아 본적이 없는가? 앞에서 언급했듯이 제2차 세계대전 후 영국의 "와이즈"가 수행한 작업을 통해 배관 작업시 배관의 구배가 적절하고 필요한 배수 부하를 감당하기에 직경이 충분하다면 트랩의 봉수 기능은 배수의 영향을 받지 않고 작동한다는 것이 증명되었다. 이러한 방식 (단일 배관 방식)은 건물 내 배수배관을 묶어서 사용할시 위험 요소가 거의 발생하지 않고 지난 50여 년간 유럽에서 성공적으로 사용되고 있다.

분산 통기 방식(Distributing Venting System)은 위생 기구로부터 하수도에 이르는 거리가 50여 년 전보다 길어진 현대 건물의 배수배관 설계에 선택적으로 적용할 수 있는 또 다른 방식이다.

정압의 완화

배관 내에서 발생하는 부압은 공기가 더 많이 필요하다는 신호인 반면 정압은 공기의 유입을 제한하라는 신호이다. 압력의 천이현상에 대한 분석은 일련의 잘 정리된 규칙을 따르므로 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 배수와 공기의 유량의 변화는 부압뿐만 아니라 정압도 발생시킨다.
- 하수구에서 배수가 넘쳐 배수시스템의 말단부가 갑자기 막힌다면 외부로 빠져나가야 할 공기 흐름이 정체되면서 정압의 파동이 발생되어 배수시스템의 전체로 전파되는 결과가 발생할 수 있다.
- 배수시스템의 장애 및 주요 정체

정압은 부압과 마찬가지로 음속과 동일한 속도로 배관 내를 돌아다니며 공기와 배수의 원활한 흐름을 제지하는 역할을 한다. 그러다가 정압이 트랩에 부딪히게 되면 정압으로 인해 트랩의 봉수를 파괴하며 관내 공기를 순간적으로 밀어내거나 만일 정압의 크기가 더욱 커진다면 트랩의 봉수 전체를 주거 공간으로 밀어내며 관내의 공기를 실내로 밀어내게 된다.

여기서 배수배관의 하부에서 생성된 정압의 파동이 꼭 입상배관의 상부 개구부를 통해 외부로 빠져 나가면서 압력이 완화되지 않는다는 점을 주목하여야 한다. 왜냐하면 압력파는 배수배관으로부터 빠져 나가기 위하여 연결된 배수배관의 전체로 돌아다니다가 위생기구의 트랩에 다다르게 되며, 봉수를 밀어낼 만한 충분한 힘이라면 봉수를 밀어내어 배관 내부의 압력의 평형을 유지하게 되는 것이다.

배관 내에서 발생한 정압을 완화시키는 가장 좋은 방법은 공기의 압력이 높아진 곳에 PAPA와 같은 압력 완화 장치를 설치하는 것이다. 그래서 입상배관 하단에서 정압이 발생할 경우 하단의 공기압을 완화시킬 필요가 있지만 상부에서는 그럴 필요가 없다. 통기 입상관은 압력파동의 일부를 우회시킬 뿐이고 통기배관의 직경이 배수배관의 직경과 동일할 경우에만 압력완화의 효과가 크다. 그러나 이러한 경우에도 발생 정압의 1/3 정도까지만 감소시킬 수 있다. 실험실에서 실험한 결과 PAPA는 발생한 정압의 90% 정도까지 완화 시키는 것으로 나타났다. 이 장치는 흐름이 정압 천이의 방향을 전환하도록 하고 또 점진적으로 감소시킨다. 이에 대한 예는 상기 고속도로의 비유에 나타나 있다.

통기밸브가 정압을 발생시키는가? 그렇지 않다. 통기밸브는 닫힘으로써 정압의 천이 현상에 감응하고 정압의 일부를 단순히 반사시킨다. 통기밸브는 공기의 유입이 차단될 때 적은 부압의 천이를 일으킨다.

정압의 크기와 폐해는 건물에 통기시스템을 분산함으로써 제한할 수 있다. 정압 파동의 크기는 공기의 흐름을 정체시키는 기능이 있기 때문에 공기의 흐름 비율은 건물 내부에 소량의 공기 흐름을 유입할 수 있는 여러 개의 공기 유입구를 설치함으로써 대량의 공기 흐름이 정지되는 위험을 줄여주어 임의로 생성될 수 있는 잠재적 정압의 천이 현상을 제한할 수 있다. 이러기 위해서는 건물 곳곳에 통기밸브를 설치하는 것이 가장 좋은 방법이라고 할 수 있다.

건물 사례 연구

배수 배관망 내 공기 흐름 모델링

실제 건물의 배수시스템에 관한 연구 및 분석은 실사용 건물로부터 데이터를 받아 수행하는 것은 어렵다. 대부분의 공학 분야에서는 연구 과정에 모델링 기술을 차용하고 개발 과정에 접근하기 위해 '보고 확인 - Look and See'를 활용한다. 오, 배수 통기 분야 연구에서 복합적 시간에 따라 변동된 공기 흐름을 다룰 수 있는 모델링 기법은 거의 없었다. 컴퓨터 소프트웨어인 AIRNET이 우리들이 지금까지 알고 있는 유력한 도구이며 이러한 복잡한 작업을 할 수 있는 유일하게 인증된 소프트웨어이다. AIRNET 소프트웨어의 심장부는 특성화 방법(Method of Characteristics)으로 알려진 수학적 기술의 집합체이다. 이 AIRNET을 통해 시간대별로 배관의 길이 방향을 따라 공기의 파동의 전파를 예측할 수 있다. 이는 건물의 배수 배관시스템 내부에서 실제로 진행되는 상황을 '보고 확인' 할 수 있는 매우 강력하며 독특한 방법이며 이 레포트에서는 AIRNET을 사용하여 연관된 시뮬레이션을 수행하였다.

2층 건물의 사례

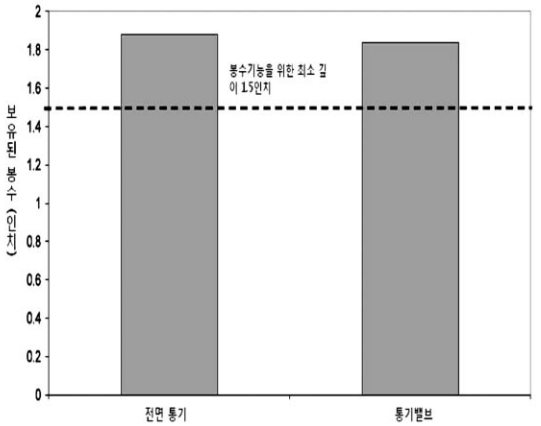
앞에서 설명한 것과 같이 2층 건물의 배수시스템의 경우 적절히 설계하고 설치한다면 최소한의 통기 시스템으로도 충분히 안전하게 사용 할 수 있다. 이는 **그림 3**과 **4**에 나타난 설치방법과 관련하여 나온 결론이다. 사례의 건물은 일반적으로 여러 개의 욕실과 일련의 주방/세탁 기구별로 가지관을 갖추고 있는 주택이다. 모의실험은 다음과 같이 2가지 시나리오로 진행하였다.

1. 옥상 개방통기구를 갖춘 시스템
2. 입상배관 상부에 통기밸브를 갖춘 시스템

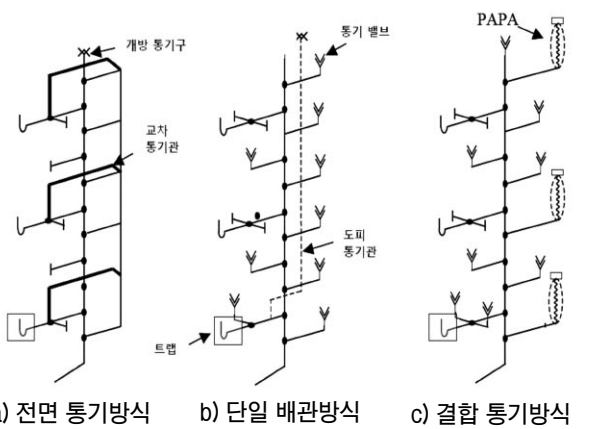
배수되는 유량은 위층의 수세식 변기와 욕조로부터 혼합된 배수의 유량을 측정하였다. 이때의 배수방출의 경우 위층으로부터 측정하였으며, 표시된 트랩에 미치는 영향은 데이터로 기록하였다. 두 가지 경우에서 실험한 결과, **그림 2**에서 보듯이, 트랩의 봉수는 거의 영향이 없었다.

10층 건물의 사례

10층 높이의 건물에 대한 실험은 **그림 6**에 나타나 있다. 여기에서는 기본적으로 세 가지 타입의 시뮬레이션을 수행하였는데 그것은 **그림 6 a)**의 전면 통기방식, **그림 6 b)**에는 도피통기 배관과 분산통기를 위한 통기밸브를 갖춘 단일 배관방식, **그림 6 c)**에서 통기밸브가 설치되어 있는 단일 배관방식에 정압의 천이를 완화시키기 위한 P.A.P.A.를 결합한 방식이다. 각각의 방식에서 배수시킨 후 건물의 3층에 있는 배수 트랩의 상태를



[그림 5] 2층 건물의 경우 봉수 비교



[그림 6] 10층 높이의 건물에 대한 실험

관찰하였다.

논 의

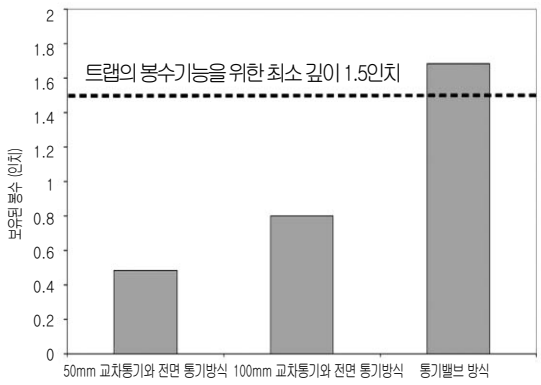
본 모의 실험에 사용된 유량은 100 mm 입상 배관에서 배수 가능한 최대치(80 USgpm)로 상정할 수 있지만 실제는 배수방출이 동시에 발생하는 배수방출의 가능성이 거의 없기 때문에 이러한 유량은 발생하지 않는다(1940년 "헌터"). 배수 통기시스템의 한계까지 실험하기 위해 배수유량을 '최악의 상황으로 설정' 하여 실험하였으며, 각각의 경우에 대한 실험결과를 비교하고 있다. 이 배수량은 균등하게 동시에 방출되도록 입상배관을 따라 골고루 분포하여 실험하였다 (5 개층에서 약 16 USgpm의 유량).

그림 7의 막대그래프는 이 실험을 실시한 후 **그림 6**의 표시된 트랩에서의 잔존한 봉수의 깊이를 나타내고 있다.

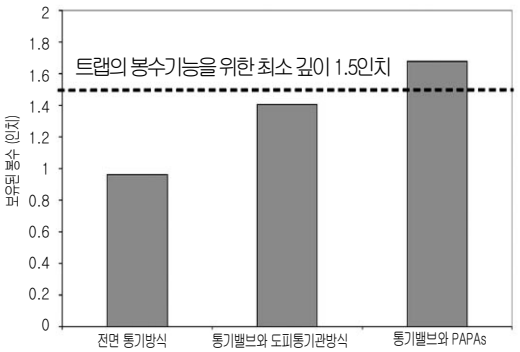
그 결과 통기밸브를 갖춘 시스템(**그림 6 b)**)이 가장 많은 봉수를 유지한 것으로 나타났다. 왜 그런가? 그 주요한 이유는 배수가 되면 배수입상관 내에 부압을 발생시켜 더 많은 공기를 필요로 하기 때문이다. 발생한 부압은 '공기를 찾아' 배수시스템 전체로 퍼져간다. 부압은 트랩의 봉수를 빨아들일 수 있는 흡입력을 나타낸다. 만일 부압이 충분히 클 경우에는 트랩으로부터 봉수를 흡입하여 트랩의 기능을 파괴 한다. 이러한 현상을 방지하려면 어딘가로 부터 부족한 공기를 공급받아야 하는데 **그림 6 a)**와 **6 b)**에 나타난 방법은 서로 다른 두 가지 상이한 공급방법을 나타내고 있다. **그림 6 a)**에서 공기는 약 100피트 정도 떨어진 입상배관의 최상부로부터 공급된다 (그러나 부압의 천이가 입상배관의 최상단까지 먼저 전달된 후 공기가 공급되기 때문에 실제 이동 거리는 200 피트가 된다). 이것과 다른 방법으로 통기밸브를 사용하면 공기는 트랩과 가까운 곳에서 바로 공급될 수 있다. (**그림 6 b)**). 이러한 경우 공기의 이동거리는 불과 10 ft 정도가 되며 이는 전체 통기배관시스템을 적용했을 경우보다 더 빠르게 필요한 공기를 공급할 수 있음을 의미한다.

또한 막대그래프는 통기 기능 작동 시 교차통기관 관경의 영향력을 나타낸다. 상대적으로 관경이 작은 통기 배관의 경우 마찰력이 증가하므로 직경이 큰 통기 배관보다 통기효과가 적게 된다. 이 내용은 이미 1895년에 "웨어링"이 지적한 내용이다 (상기 도입 부분 참고).

그림 8은 같은 배수시스템 내 정압의 영향으로 인한 트랩의 봉수 변화를 나타낸다. 여기에서 횡주관에 배수가 넘치도록 모의실험을 실행하므로 정압을 발생시켜 입상관을 통해 흐르는 공기가 순간적으로 정체하도록 하였다. 이러한 시나리오를 다루는 두 가지 방법은 **그림 6 a)**에 나타난 전면적 통기방식과 **그림 6 c)**에 나타난 통기밸브와 PAPA를 활용하는 '능동적인 제어' 방식이다. 트



[그림 7] 부압의 영향을 받은 최하층 트랩의 봉수깊이의 비교



[그림 8] 정압의 영향을 받은 최하층 트랩의 봉수량 비교

랩의 변동에 대한 막대그래프에서 능동적인 제어 방식이 이러한 정압으로 인한 상황으로부터 트랩을 보호하여 준다는 것을 나타내 주고 있고, 통기밸브와 PAPA가 설치된 통기 방식이 전면적인 통기 방식보다 더 우수한 것을 보여주고 있다. 능동적인 제어가 더 나은 이유는 두 가지가 있다. 첫 번째는 공기 유입구를 분산함으로써 가장 염려되는 위치에 최대 정압이 발생할 가능성을 감소시키고 두 번째로는 PAPA로써 정압 파동을 상쇄시킬 수 있어 정압으로 인한 피해가 일어나지 않도록 이를 조율하고 그 영향력을 감소시킨다. 그림 8에 점선과 막대그래프 사이는 정압 파동으로 손실된 봉수의 양을 나타낸다.

결 론

이 레포트는 배수시스템 중 통기시스템에 관하여 작성하였다. 통기시스템에 관한 이러한 논의는 위생기구에서 배수가 되면서 배수배관 내에서 시작되는 유체의 불안정한 흐름을 설명하기위해 기본적인 유체역학의 원리를 인용하였다.

이 레포트에서 설명된 배수 및 통기시스템의 작동에 대한 내용은 결코 새로운 것은 아니다, 일찍이 많은 관련자들이 이 내용에 대하여 잘 알고 있었지만 세계 여러 나라의 표준 또는 규정과 기준의 다양함으로 인하여 과학적인 접근보다는 해당 산업의 발전에 비중을 둔 내용을 선호하기 때문에 유체역학에 근거한 공학적인 원리에 대한 자세한 기술을 회피하는 경향이 있는 것이 현실이다.

배수시스템의 마찰과 관내압력의 생성 및 전파에 관한 이론적 근거는 왜 통기시스템이 우선적으로 필요한가를 이해하기 위한 중요한 내용이다. 압력의 천이 현상을 완화하기 위하여 필요한 방법과 어떤 특정한 경우에는 통기배관이 없이도 배수시스템이 잘 운영된다는 견해도 논의 하였다.

우수한 컴퓨터시스템의 도입을 통해 건물의 배수시스템 및 통기시스템에서의 불안정한 공기와 배수의 흐름에 대하여 모델링 기법과 모의실험을 통하여 잘 해석할 수 있는 능력을 배양하였고, 18세기에 처음으로 발표된 난해한 파동의 방정식까지 쉽게 이해 할 수 있는 능력을 제공해 주었다. 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 AIRNET은 현재 20년 넘게 개발 및 보완 하는 중이고 수많은 실험실과 현장 조사에서 그 성능이 입증되어 왔다. 이 레포트는 두 가지 형태의 건물을 가지고 모의 실험한 결과를 기술 하였다. AIRNET 프로그램 결과를 통해 통기밸브를 사용한 분산 통기시스템 및 정압을 완화하는데 효과적인 PAPA(Positive Air Pressure Attenuator: 정압 천이 완화 장치)의 우수한 성능을 확인시켜주었다.

본 레포트를 통하여 건물의 부엌가구 등과 같은 내장재에 감춰져있던 배수 및 통기시스템의 세부내용을 쉽게 이해하는데 도움이 되었기를 바란다. 또한 이러한 노력이 사용자들에게 안전하고 위생적인 생활환경을 만들어 주게 되기를 바란다. 산업혁명의 초기에 "웨어링", "퓨트남", "레이놀즈", "와이즈" 와 같은 공학자들이 그들의 해당분야에 대하여 이룬 업적으로가 아닌 유익한 생활환경을 만들기 위해 노력한 것으로 인해 기억되길 바란다, ("웨어링"은 위생과 전염병과의 연관관계를 조사하던 중 황열병으로 사망하였음) 그러나 그들의 연구가 안전한 공학 및 과학적인 방법에 근거하였음에도 오늘날의 연구와 토론의 장에서 소외되고 있음은 안타까운 일이 아닐 수 없다.

참고 문헌

1. Munro, B.(2000) 'Ceramic Water Closets' Shire Publications London.
2. Reynolds, O. (1872) 'Sever Gas ad How to Keep It Out of Houses' in Allen, M "FROM CESSPOOL TO SEWER: SANITARY REFORM AND THE RHETORIC OF RESISTANCE, 1848-1880' Victorian Literature and Culture (2002), 30: 383-402 Cambridge University Press.
3. Waring, G. E. (1895) 'How to drain a house, practical information for householders' D. Van Nostrand company, New York.
4. Putnam, J, P.(1911) 'Plumbing and household sanitation' Doubleday. Page & Co, Garden City, New York.
5. Wise, A.F.E(1957) 'Drainage pipework in

buildings:Hydraulic design and performance' HMSO, London.
6. Swaffield J.A & Boldy A.P (1993) 1993, 'Pressure surge in pipe and duct systems', Avebury Technical, England.
7. Swaffield J. A. and Galowin L.S., (1992) 'The engineered design of building drainage systems', Ashgate Publishing Limited, England.
8. Jack L.B., (200), Developments in the definirion of fluid traction forces within building drainage vent systems', Building Services Engineering Research & Technology, Vol. 21, No. 4, pp 266-273, 2000.
9. EN 12056:2000 'Gravity Drainage System inside buildings Part 2; Sanitary Pipework, layout and calculations'. British Standards Institute, London.
10. Swaffield, J.A., Campbell, D.P., Gormley, M. (2005) "Pressure transient control: Part I-criteria for transient analysis and control' Building Services Engineering Research and Technology, Volume 26, Number 2, June 2005. pp. 99-114(16).
11. Swaffield, J.A., Campbell, D.P., Gormley, M. (2005) 'Pressure transient control: Part II-simulation and design of a positive surge protection device for building drainage networks.'