

## 초미립자 탈수성 증대를 위한 초음파 활용에 관한 연구

### Ultrasonically Enhanced Dewaterability of Fine Particles

오 철<sup>1)</sup>, Chul Oh, 김 병 일<sup>2)</sup>, Byoung-Il Kim, 김 영 옥<sup>3)</sup>, Young-Uk Kim

<sup>1)</sup> 명지대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

<sup>2)</sup> 명지대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

<sup>3)</sup> 명지대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji University

**SYNOPSIS** : In accordance with the need of developing a methodology for the sludge reduction, this study investigates the effect of sonication on the dewaterability of the sewage sludge. The investigation involves laboratory experiments of the sewage sludge from Yongin Waste Treatment Plant. The Laboratory tests were conducted under a broad range of conditions including energy levels of ultrasonic waves, time for the treatment, pH, and effect of polymers. The results of the study show that sonication enhances the dewaterability significantly. The degree of enhancement varies with sonication power, treatment time, the amount of sludge treated. The effect of sonication on the temperature and pH of the test specimens seems not to be significant. The polymer can be useful to enhance the effectiveness of ultrasound treatment.

**Key Words** : Dewatering, Sludge, Sonication, Ultrasound

## 1. 서론

최근 인구의 급격한 증가와 빠른 산업화로 인한 환경문제가 심각해지고 있다. 이에 따라서 생활 및 산업용 하수의 처리시설 및 용량이 동시에 증가하고있는 실정이며, 발생되고 처리 되어 할 슬러지의 양이 갈수록 증가하여 문제시되고 이 부분에 대한 관심이 증대되는 상황이다. 우리 나라의 경우 96년 전국 70개소 하수처리장에서 발생한 슬러지량은 128만 톤이다. 현재와 같은 추세로 하수슬러지가 발생된다면, 2001년에는 212만 톤, 2006년에는 285만 톤이 발생될 것으로 예상된다. 이중의 3.5%에 해당하는 4만 5천 톤만이 재활용되고, 나머지는 매립 또는 투기로써 버려지고 있다. 지금까지는 최종 슬러지 폐기물을 주로 매립과 투기를 통해서 처리하였고, 일부는 퇴비 등으로 재활용하여 처리되었다. 그러나 과거에 쉽게 이용되던 매립방법은 침출수와 냄새문제로 이제는 쉽게 이용할 수 없는 방법이 되었고, 또한 부지확보도 어려우며 소각은 대기오염문제를 일으키는 단점을 가지고 있다. 그리하여 복토재, 토지개량재, 비료로의 이용, 골재와 건축재료등의 이용방법이 강구되기도 한다. 발생하는 슬러지의 양이 갈수록 증가하기 때문에 이에 대한 비용절감, 친환경적 처리, 효율적인 처리기술의 개발을 위한 명확한 기준의 제시가 시급한 실정이다. 기존의 슬러지처리과정에서는 최종단계의 슬러지부피를 감소시키기 위하여 탈수성을 높이는 방법으로 탈수 전 약품처리과정을 거치고 있다. 그러나 약품처리과정으로 인한 2

차적인 환경오염 문제가 발생할 수 있어 탈수 전 물리적 처리방법에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 이중 환경분야에서는 물리적 처리방법으로 초음파를 사용하는 탈수성극대화 방법이 최근 몇몇 연구자에 의해 제기되고 있다. 이번 연구에서는 초음파가 슬러지 탈수성 증대에 미치는 영향에 관하여 실내시험을 통하여 알아보았으며, 최적 영향인자 도출을 위하여 상관관계 조사를 수행하였다.

## 2. 하수슬러지의 특성

하수슬러지는 유기물과 무기물의 혼합물로서 존재하는데, 유기물질의 대부분은 단백질과 탄수화물로 구성되어 있고, 무기물의 경우는 실리카분( $\text{SiO}_2$ )이 35-50%의 범위로 가장 많이 함유되어있으며, 알루미늄산화물( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )은 20-30%, 철분은 산화제2철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )로 4-5%정도 함유되어 있다. 즉, 물과 유기물과 무기물이 물리적, 화학적, 전기적 결합을 통하여 함께 존재하고 있다. 슬러지의 전기적인 부하상태는 대체로 (-)상태로서 서로 밀어내는 성질을 갖고, 수분 보유량이 많아질수록 입자가 서로 결합되기 어려워지고 또한 가벼워진다. 활성 미생물이 많은 슬러지는 농축이나 탈수가 잘 안되고, 슬러지의 pH에 따라서 약품소요량이 다르며, 슬러지내에 유기분이 많은 경우에는 탈수에 문제가 된다. 석회로 개량한 슬러지는 (-)전하를 가지는 폴리머가 효과적이며, pH가 중성이거나 약 알칼리인 슬러지의 경우에는 (+)전하를 띠는 폴리머를 주입하면 탈수가 잘 되는 것으로 나타났다.

## 3. 하수슬러지의 초음파처리

### 3.1 초음파의 원리 및 적용

초음파는 주파수 범위 이상의 진동수를 갖는 소리로 정의되는데, 보통 20,000Hz~30MHz까지를 초음파라고 한다. 초음파를 액체 중에 발사하면 액중에 수축과 팽창이 교대로 일어나며 파동이 액중으로 전파되어 간다. 초음파 에너지가 더욱 증가하면 액의 분자간에 응집력이 파괴되고 수천 만개 이상의 미세한 공동이 발생된다. 이것이 "캐비테이션(cavitation)"이라 불리는 현상인데, 이 공동이 폭발하면서 강력한 에너지를 방출한다. 결국 초음파로 인해서 발생하는 에너지를 슬러지의 입자의 파괴에 이용하여 슬러지 입자가 미세하게 분쇄되고 이 과정에서 표면에 흡착되어있는 전극수까지 방출하게 된다. 이와 같은 입자의 분쇄와 전극수의 방출이 슬러지의 투수성을 증대시키는 원인이 된다. 초음파의 응용원리가 (그림 3.1)에 나타나 있다.

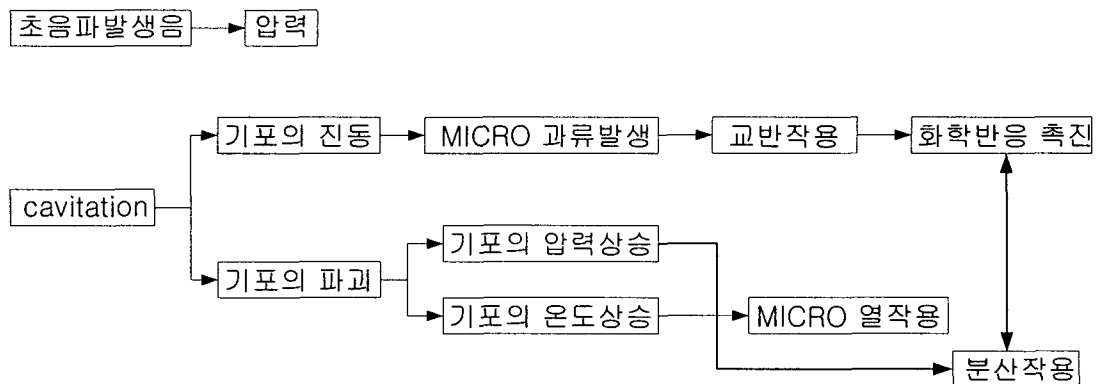


그림 3.1 초음파의 응용원리

## 3.2 시험방법

### 3.2.1 준비사항

하수슬러지의 초음파처리시험에 사용되는 장비 및 재료로는 초음파공급장치(CS 2300, 최대출력 500W), CST(Capillary Suction Time)측정장치, 자동 피펫(1~5ml), 마그네틱교반기(magnetic stirrer), 비이커(250, 300, 500ml), 메스실린더(1000ml), 폴리머(C-101P), filter paper(Whatman 17CHR), 하수슬러지(용인 하수처리장)등이 사용된다.

### 3.2.2 시험순서 및 방법

본 시험은 용인하수처리장에서 생산되는 하수슬러지를 시료로 사용하였다. 시험에 들어가기 전에 슬러지 시료의 농도를 일정하게 맞추고 초음파강도, 처리시간, 폴리머의 투입량 등을 변화시키면서 초음파 처리하여 각각의 CST를 측정한다. (그림 3.2)와 (그림 3.3)은 각각 초음파처리기와 CST측정장치를 나타낸다.

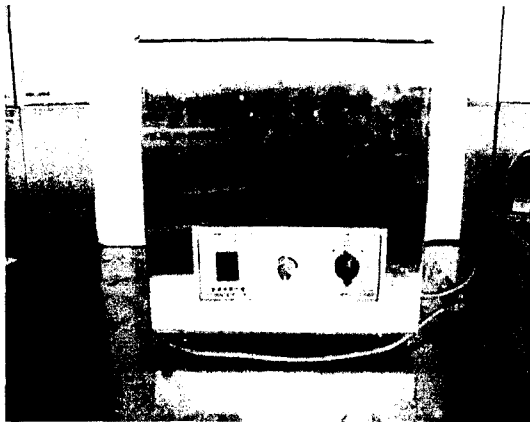


그림 3.2 초음파처리기

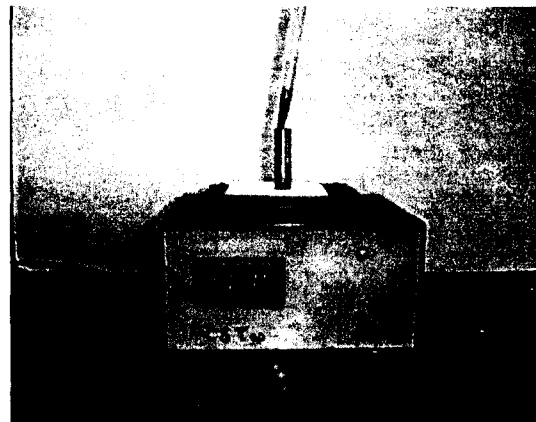


그림 3.3 CST측정장치

### 3.2.3 CST(Capillary Suction Time)

CST는 모관현상에 의하여 시료속의 물이 빠져나와 filter paper에 흡수되면서 전파되어 가는 시간을 말하며, 시료의 투수성과 직접적인 관련을 갖는다. CST-측정장치는 CST를 측정하는 장치로서 슬러지 시료에 물이 흡착되어있는 특성에 따라서 측정되는 시간이 다르게 나타난다. 즉, 탈수성이 불량한 시료의 경우 CST는 높게 나타나고, 탈수성이 양호한 시료의 경우는 낮게 나타난다. 이 장치는 탈수성능을 측정하는 다른 장치에 비하여 장치가 간단하고 측정시간이 짧다는 장점이 있다. 필터는 균질한 투수성을 가질 수 있도록 제작된 종이(Whatman 17CHR)로서 6cm×8cm의 크기로 사용한다. 슬러지를 담게되는 원통은 직경 1.5cm, 높이 5cm의 크기를 갖으며, 밑면이 평평해야 시료가 임의적으로 빠져나가는 것을 예방할 수 있다.

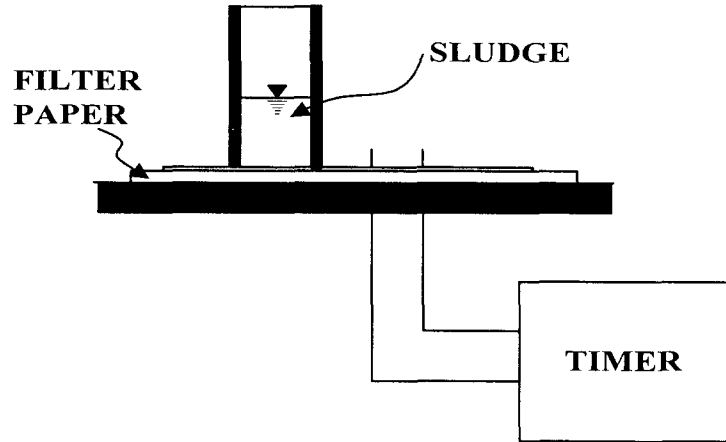


그림3.4 CST 측정장치

## 4. 시험결과

### 4.1 처리시간과 강도에 따른 CST

시료양을 400ml로 일정하게 하고 초음파강도를 200W, 300W, 500W로 변화시켜 시험을 실시하였다. 초음파 처리할 시료의 초기 CST를 100~110으로 일정하게 조절한 후 시험을 실시하였다. (그림 4.1)는 세 가지의 경우를 동시에 나타낸 그림으로서 모든 경우에 있어서 초음파처리로 인해서 처리 전에 비하여 CST가 크게 감소하였음을 보여준다. 이는 초음파처리로 인해서 탈수성이 증대되었음을 의미하고, 또한 처리강도가 클수록 탈수효율이 급격하게 증가함을 나타낸다. 하수슬러지에 대한 초음파처리로 슬러지의 탈수능력이 300~500%정도 향상되었다. 그러나 초음파 적용시 초기부분에는 CST가 급격히 증가하는데, 이는 슬러지의 세포막 파괴에 의해 슬러지의 점도가 증가하여 CST가 증가하다가 초음파의 에너지가 어느 지점 이상 슬러지에 흡수되면, 세포막이 모두 파괴된 후 입자로부터 흡착수 분리가 일어나기 시작하고 CST가 감소하기 시작하는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 여러 연구자(King and Forster, 1990, Bien and Wolny, 1997)의 연구결과와 동일하나 그들은 약한 에너지(약 20W)를 사용하여 CST 감소효과는 보지 못 하였다. 초음파강도가 증가할수록 슬러지의 탈수성은 매우 크게 향상되고, 처리시간의 증가 또한 영향을 미친다. 여기서 중요한 점은 초음파강도와 처리시간중에서 초음파의 강도가 더 큰 영향을 미친다는 점이다. 작은 초음파강도는 매우 오랜 처리시간을 거쳐야 탈수성 향상을 얻을 수 있는 반면에 초음파강도가 크면 매우 빠르게 처리 효과를 볼 수 있다. 또한 초음파강도, 처리시간 및 CST사이의 관계가 유사한 경향을 갖는 하나의 그래프로 통일 될 수 있다는 결론을 얻었다. 이는 초음파강도와 처리시간에 따른 슬러지의 탈수성과의 관계를 일반화시킬 수 있음을 의미한다. 이상의 결과를 종합하여 parameter  $\alpha$ 와 연계시키면 (그림 4.2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{P^{2.5}(\text{kW}) \times \text{time}(\text{min})}{l(\text{시료량})} \quad (1)$$

(그림 4.2)에서 알 수 있듯이 상호관계가 매우 양호하게 나타났으며, 실제 활용에서 parameter  $\alpha$ 를 정하면 요구되는 CST를 얻기 위한 운전인자(Power, 처리시간, 시료양)를 결정할 수 있다. 예를 들어 CST를 30 이하로 낮추기 위해서는 시료 1ℓ 당 1분이 소요되는 시간에서 요구되는 전력량은 약 3.5kW

임을 알 수 있다. 이를 이용하여 실제적인 운전인자를 구할 수 있다. (그림 4.3)은 주파수와 초음파강도 사이의 상관관계를 나타내고 있는데, 실제에 적용할 수 있는 적절한 사용범위가 존재함을 보여주며, 본 연구에 의해 결정된 범위가 실제에 적용 가능함을 그림을 통해 알 수 있다.

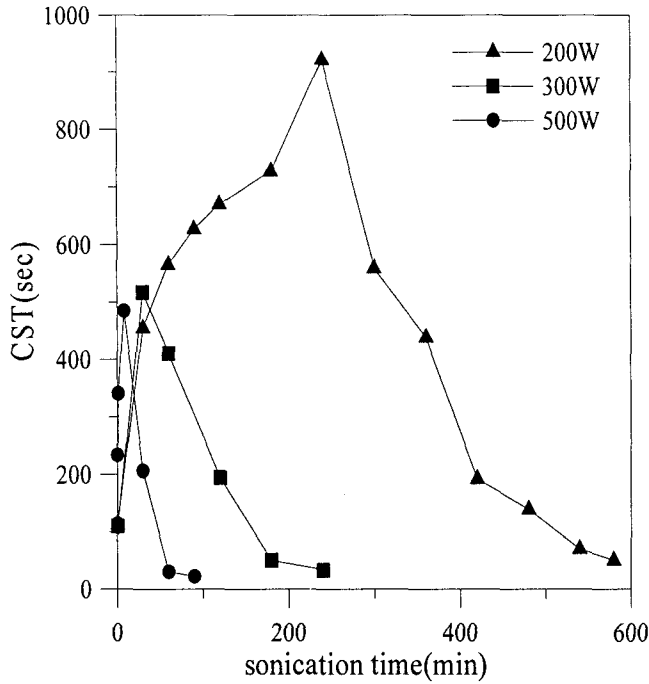


그림 4.1 초음파강도와 처리시간에 따른 CST

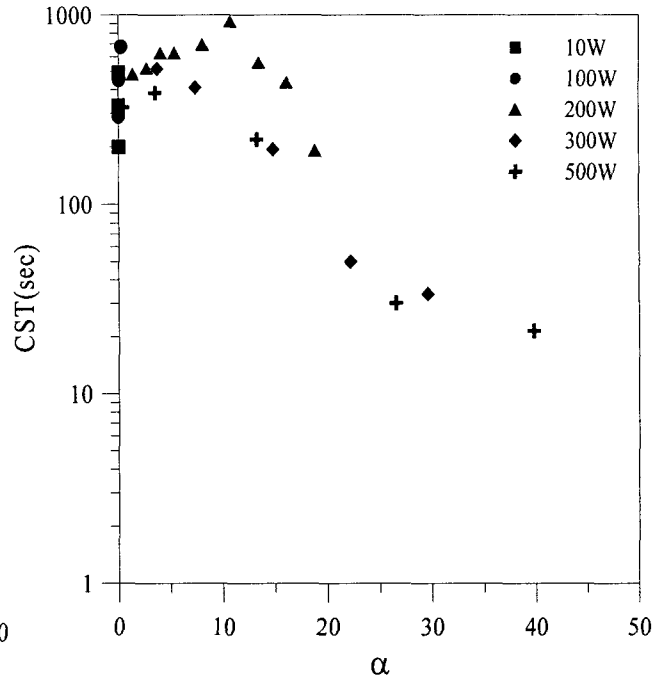


그림 4.2  $\alpha$ 와 CST사이의 관계

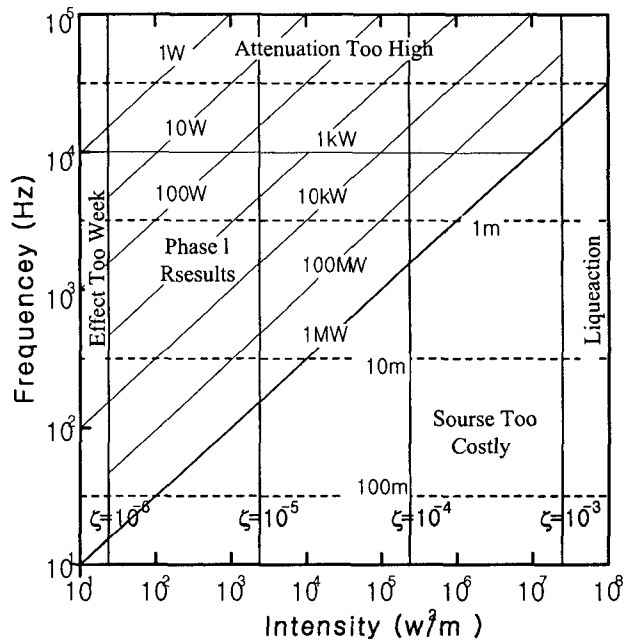


그림 4.3 적합한 주파수와 처리강도의 결정  
(Iovenitti, et al, 1996)

### 4.1.2 폴리머 첨가에 따른 CST

초음파강도 400W로 슬러지를 처리하고 난 후 정해진 양의 폴리머를 첨가하였다. 첨가된 폴리머의 양은 각각 0.1, 0.2, 0.4, 0.8g/400ml이고, 이에 대한 결과가 (그림 4.4)에 나타나 있다. 그림은 초음파 처리된 시료양 400ml에 대해서 0.2g의 폴리머 투입이 초음파처리를 통한 슬러지의 투수성 향상에 가장 효율적임을 보여준다. 초음파 처리한 시료에 각각 다른 양의 폴리머를 투입한 결과 투입된 폴리머의 양에 따라서 탈수성이 다르게 나왔다. 초음파처리와 폴리머를 같이 사용하면 탈수성향상의 효율이 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 시료의 양이 400ml인 경우는 0.2ml 폴리머 투입이 가장 적합하며, 크기효과를 고려한 최적의 폴리머 투입량이 존재함을 알 수 있었다.

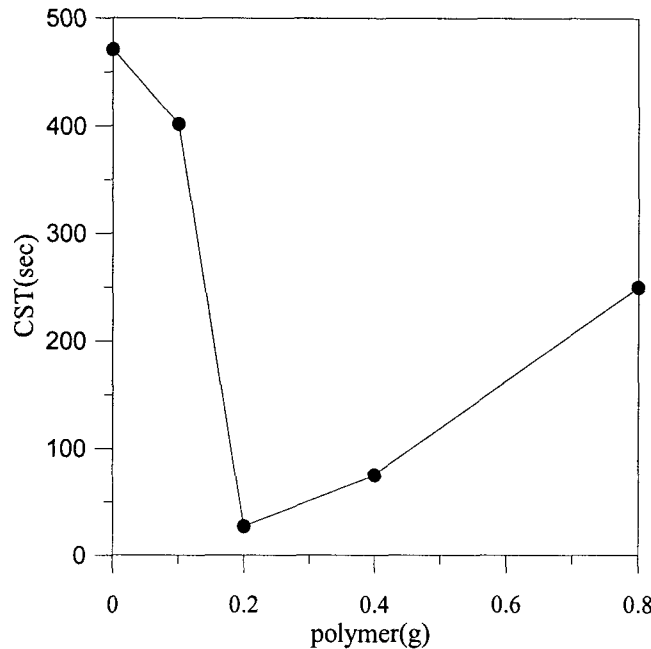


그림 4.4 CST에 대한 폴리머 투입량의 영향

### 4.1.3 초음파처리로 인한 pH의 변화

초음파처리하지 않은 경우와 400W의 강도로 2분 동안 초음파 처리한 경우에 대한 슬러지의 pH변화가 (그림 4.5)에 나타나 있다. 그림은 초음파처리후 48시간동안의 pH변화를 보여주는데, 초음파처리로 인해서 슬러지의 pH가 변화함을 알 수 있다. 이 결과를 통해서 슬러지에 대한 초음파처리가 물리적인 특성뿐만 아니라 전기, 화학적 특성에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있으나, 변화폭은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

### 4.1.4 초음파처리로 인한 슬러지 시료의 함수비 변화

초음파처리 전·후에 대한 슬러지시료의 함수비 변화가 (그림 4.6)에 나타나 있다. 함수비를 구하기 위한 건조 온도는 시료내의 유기물을 고려하여 55 °C로 하였으며, 그림을 통해서 초음파 처리한 경우의 시료가 함수비 감소율이 더 크다는 것을 알 수 있다. 초음파처리는 슬러지 입자를 미세입자로 파괴시키고, 이 파괴과정에서 입자표면에 전기적으로 흡착되어 있는 물분자들이 떨어져 나온다. 또한 입자의 비표면적 증가로 인해서 처리하지 않은 시료에 비하여 함수비의 변화가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

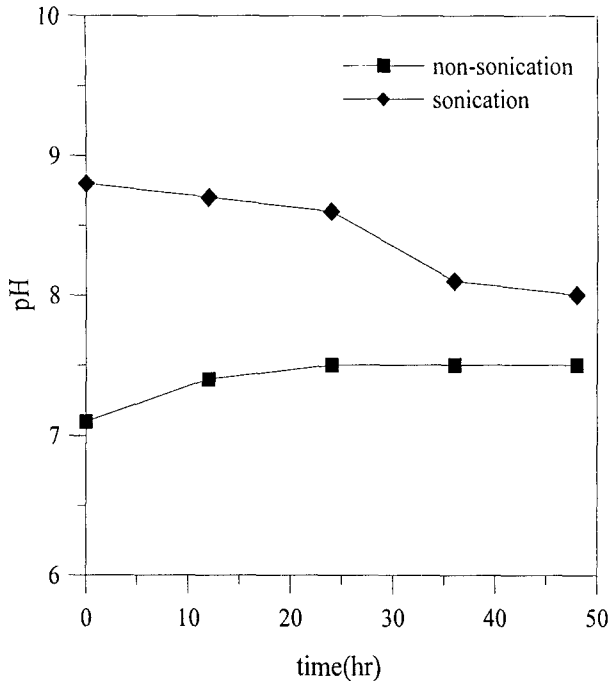


그림 4.5 시간에 따른 pH의 변화

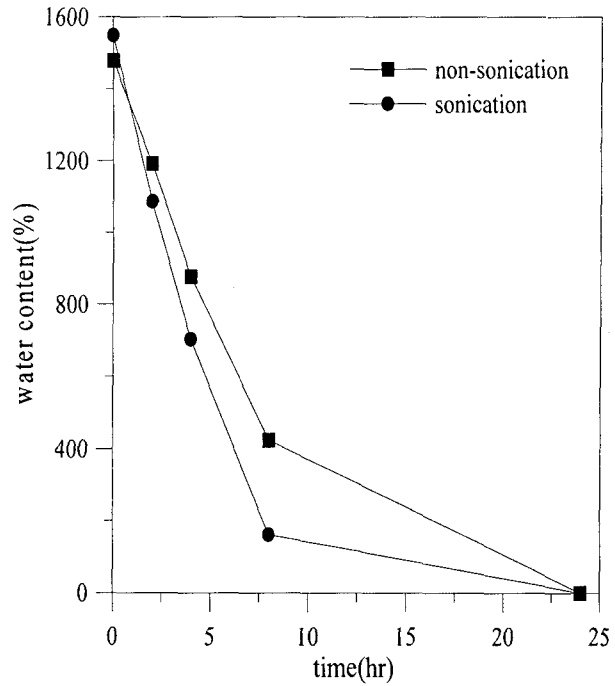


그림 4.6 시간에 따른 함수비 변화

## 5. 결론

본 연구에서는 초음파가 초미립자 탈수 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 초미립자 시료로는 용인하수처리장 슬러지를 사용하였으며, 여러조건하에 실내실험을 수행하였다. 실내실험의 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 슬러지에 대한 초음파처리는 슬러지입자의 물리·화학적 특성을 변화시켜 탈수성을 크게 향상시킨다.
- 2) 초음파처리에 있어서 초음파강도와 처리시간이 매우 큰 영향인자로 작용하고, 특히 초음파강도가 더욱 큰 영향을 미친다.
- 3) 특정한 강도에는 적절한 처리량이 존재하므로 상관관계 도표를 이용하여 처리효율을 고려한 처리량을 결정할 수 있다.
- 4) 초음파처리 자체로도 매우 큰 탈수성의 향상을 가져올 수 있으며, 여기에 적정량의 폴리머를 투입할 경우 탈수효율을 크게 향상시킬 수 있다.
- 5) 초음파처리로 인하여 슬러지의 pH가 변화하지만, 큰 영향을 미치지 않는다.
- 6) 초음파처리로 슬러지 입자는 매우 미세하게 파쇄되고 이로 인해서 비표면적이 매우 커지게 된다. 또한 입자파쇄과정중에 흡착수의 분리로 인해서 처리전에 비하여 함수비 감소율이 증가한다.
- 7) 초음파강도, 처리시간 그리고 CST의 관계를 종합하여 실제에서 필요한 운전인자를 결정할 수 있다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 경기지역환경기술개발센터의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 말씀을 드립니다.

## 7. 참고문헌

1. 최의소, (1998), “오염물처리와 자원화”, 청문각, pp.103-113.
2. 한국 수자원공사(1993), “정수장 슬러지 처분 및 활용방안 연구(2차년도)”
3. 황경수, (2001), “고화 하수슬러지의 특성 연구”, 석사논문, 명지대학교 토목공학과, pp.6-16.
4. Bien, January and Wolny, Lidia., (1997), “Changes of Some Sewage Sludge Parameters Prepared with an Ultrasonic Field”, Wat. Sci. Tech. Vol.36, No.11, pp.101-106.
5. Iovenitti, J.L. and Rynne, T.M., (1996), “Acoustically Enhanced Remediation, Phase II -Technology Scaling”
6. King, R.O. and Forster, C. F., (1990), “Effects of Sonication on Activated Sludge”, Enzyme Microb. Technol., vol.12, February, pp.109-115.