



## 도계폐기물의 열가수분해 반응에 따른 열전달 특성 연구

송형운<sup>†</sup>, 정희숙, 김충곤\*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터, (주)도화엔지니어링\*  
(2015년 11월 23일 접수, 2015년 12월 7일 수정, 2015년 12월 8일 채택)

### A Study on Heat Transfer Characteristics according to Thermal Hydrolysis Reaction of Poultry Slaughter Waste

Hyoung Woon Song<sup>†</sup>, Hee Suk Jung, Choong Gon Kim\*

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering  
Dohwa Engineering Co., Ltd\*

#### ABSTRACT

The purpose of this study was performed to quantitatively measure the thermal conductivity of poultry slaughter waste with variation of reaction temperature for optimal design of thermal hydrolysis reactor. We continuously quantified the thermal conductivity of dehydrated sludge related to the reaction temperature. As the reaction temperature increased, the dehydrated sludge is thermally liquefied under high temperature and pressure by the thermal hydrolysis reaction. Therefore, the bond water in the sludge cells comes out as free water, which changes the dehydrated sludge from a solid phase to slurry of a liquid phase. As a result, the thermal conductivity of the its sludge was more than 2.11 times lower than that of the water at 20°C. However, the thermal conductivity of the sludge approached to 0.677 W/m·°C of water at 200°C, experimentally substantiating liquefaction of the dehydrated sludge. Therefore, we confirmed that the change in physical properties due to thermal hydrolysis appears to be an important factor for heat transfer efficiency. And the thermal conductivity function related to reaction temperature was derived to give the boundary condition for the optimal design of the thermal hydrolysis reactor. The consistency of the calculated function was 99.69%.

Keywords : Thermal hydrolysis, Poultry slaughter waste, Thermal conductivity, dehydrated sludge, Bound water

<sup>†</sup>Corresponding author(hwsong@iae.re.kr)

## 초 록

본 연구에서 목적은 열가수분해 반응기에 최적설계를 위해 반응온도에 따른 도계폐기물의 열전도도를 정량하는 것이다. 이에 반응온도에 따른 탈수슬러지의 열전도도를 연속적으로 정량한 결과, 반응온도가 증가할수록 열가수분해 반응에 의한 고온, 고압에 의해 슬러지가 열적으로 가용화된다. 따라서, 슬러지 세포내에 결합수가 자유수로 용출되어 고상의 탈수슬러지가 액상의 슬러리로 상태가 변화된다. 그 결과 반응초기인 반응온도 20℃에서 도계슬러지에 열전도도가 물에 비해 2.11배정도 낮지만 200℃에서는 도계슬러지의 열전도도가 0.677 W/m·℃로 물과 유사하다. 따라서 열가수분해에 의한 슬러지의 물리적 특성변화는 열전달 효율에 매우 중요한 인자임을 확인하였고, 열가수분해반응기 최적 설계를 위한 경제 조건으로 실험 측정값과 일치도가 99.69%인 반응온도에 따른 열전도도 함수를 도출하였다.

주제어 : 열가수분해, 도계폐기물, 열전도도, 탈수슬러지, 결합수

## 1. 서론

국내 소, 돼지, 닭 등의 도축량은 꾸준히 증가 추세에 있으며, 특히 닭은 2003년 대비 약 50% 증가하였다. 2012년 기준 도계폐기물 탈수슬러지의 발생량은 약 120,000 톤/년으로 대부분 해양투기로 처리되고 있지만 런던협약에 의한 해양투기 금지로 육상에서 안정적으로 처리하기 위한 기술이 시급한 실정이다.<sup>1)</sup> 현행 도계폐기물 탈수슬러지는 닭 가공공정에서 세척에 의한 털, 혈액, 협잡물 등이 자체 폐수처리장으로 유입되어 화학적 응집을 통하고 기계적 탈수를 통하여 배출되어지고 있다. 따라서 폐수처리장에서 발생하는 탈수슬러지에 대한 처리비용의 절감과 보다 효율적인 처리를 위해서는 슬러지 내에 함유되어 있는 수분을 감소시키는 것이 최우선적으로 고려되어야 한다. 하지만 기존의 건조 방법은 높은 에너지 비용이 소비됨으로 탈수슬러지의 감량화를 위해 함수율을 낮추는 경제적인 방법에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 슬러지 가용화율을 높여 기계적인 탈수능과 용존 유기물의 증대를 통한 생물학적 처리효율을 향상시키는 오존처리, 초음파 처리, 열화학 및 전자파 처리 등의 전처리 기술에 관한 것이다.<sup>2-5)</sup> 그 중에서도 슬러지 가용화에 소비되는 에너지를 줄이기 위한 효율적인 처리방안으로 열처리에 의한 가수분해

방법이 주목되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 수분을 증발시키지 않고 열화학적인 방법을 적용하여 슬러지 세포를 파괴하고 세포내의 결합수를 자유수로 변환시키는 도계슬러지 열가수분해 기술<sup>6-7)</sup>을 적용하고자 한다. 도계슬러지는 기계적으로 탈수된 상태에서 함수율 80% 내외로 자유수와 결합수가 공존함으로 탈수슬러지의 상태는 고상을 유지하고 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 열가수분해 반응은 외부에서 공급되는 열원을 슬러지로 최적 열전달이 되도록 고려하는 것이 매우 중요하다. 특히, 고상의 탈수슬러지는 열전달이 주로 전도에 의해서 진행됨으로 슬러지 반응온도 상승 속도가 느리다. 하지만 이를 해소하기 위하여 슬러지 외부 열원의 에너지 밀도를 높게 유지하면 열원 접촉부에서 슬러지가 탄화되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 열가수분해 반응기의 용량 및 열원공급 등의 최적 설계를 위해서는 탈수슬러지 내의 결합수가 자유수로 용출되는 열가수분해 진행속도에 연동되어 외부 열공급원의 에너지 밀도를 점진적으로 증가시키는 것이 매우 중요하다.<sup>6)</sup>

이에 본 연구에서는 도계폐기물 탈수슬러지의 열가수분해 시에 반응온도에 따른 열전달 특성을 정량적으로 측정하고자 자체 제한한 열전도도 측정장치를 통해 물의 열전도도 표준물질로 설정하여 열전도도 측정장치를 검량하였다. 그

리고 물과 탈수슬러지의 온도차에 의한 열전달 특성을 연속 측정하여 물을 기준 물질로 탈수슬러지의 열전도도를 산출하였다. 또한 산출된 도계폐기물 탈수슬러지의 열전도도를 열가수분해 반응기의 최적 설계에 적용한 수치모델링의 정확도를 높이고자 수치 모델링의 경계조건에 주요한 영향인자인 반응온도에 따른 열전도도 함수를 도출하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

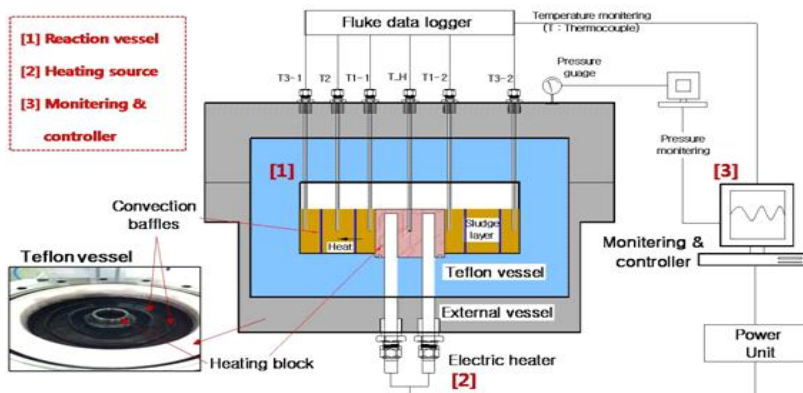
본 연구에서는 도계슬러지의 열가수분해 반응 온도 변화에 따른 고온 고압에서 열전달 특성을 정량적으로 측정하고자 [Fig. 1]과 같이 열전도도 측정장치를 설계·제작하였다.

본 열전도도 측정장치는 반응용기부, 열원공급부, 측정제어부로 구성되어 있다. 반응용기부는 원통형으로 고온 고압에서 내구성을 갖기 위해 외부는 250℃, 50 bar에서 견딜 수 있는 스테인레스 재질로 제작되었으며, 열전달 시에 열손실을 최소화하고 단열효율을 극대화하기 위하여 용량이 3ℓ인 원통형 테프론용기를 스테인레스 내부에 설치하였다. 그리고 탈수슬러지의 열가수분해에 따른 대류 열전달을 억제하기 위하여 황동 재질의 원형 대류방해판 2개( $\phi$ 110mm,  $\phi$

180mm 높이 50mm, 두께 0.5mm)를 각각 열전대 사이에 설치하였다. 열원공급부는 카드리지 전기히터(200W, 3기)와 전기히터를 감싼 히팅블럭으로 구성되어 열전달은 히팅블럭에서 반경방향으로 선형적으로 전달되도록 반응용기부 중심부에 설치하였고, 히팅블럭 상하부에는 세라믹블럭을 설치하여 수직방향으로 열전달에 의한 손실을 최소화하였다. 측정제어부는 온도와 압력을 연속 측정하고 입력전원은 동일한 에너지가 공급되도록 자동제어 된다. 열전대는 [Fig. 1]에서 보는 바와 같이 반응기 중심부의 히팅블럭(H)에 1개와 반경방향으로 탈수슬러지 층에 온도를 측정하기 위한 5개로 총 6개의 K-type 열전대가 설치되어 있다. 이때 탈수슬러지 층에 온도를 측정하기 위해 설치한 5개의 열전대는 반응용기 중심부에서 반경방향으로 일직선 상의 40mm 지점에 좌우 대칭으로 2개(T1-1, T1-2), 70mm 지점에 1개(T2), 100mm 지점에 좌우 대칭으로 2개(T3-1, T3-2)이다. 그리고 반응용기 중심부에서 반경방향 지점 40mm와 100mm에 좌우 대칭으로 각각 설치된 2개의 열전대는 히팅블럭에서 전달된 열이 반경방향으로 선형적으로 동일하게 전달되는지를 비교 분석하기 위하여 설치한 것이다.

### 2.2 열전도도 계산

도계슬러지의 반응온도 증가에 따른 열전도도를 측정하는 원리는 푸리에 법칙(Fourier's



[Fig. 1] Schematic diagram of thermal conductivity measuring equipment.

law)<sup>8,9)</sup>에 따라 다음과 같다. 단면적 A(m<sup>2</sup>)인 물체의 미소구간 Δx(m) 사이의 온도차가 ΔT(°C)라면 미소시간 Δt(sec) 동안 ΔQ(W·s)의 열이 흐를 경우 열전달 속도는 다음 식 (1)과 같다.

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots\dots\dots (1)$$

위의 식(1)에서 비례상수 K는 물질의 열전도도(thermal conductivity, W/m·°C)라 하며 푸리에의 법칙에 따르면 전도에 의한 열전달은 온도차, 열전도도, 면적 및 두께의 요인에 따라 결정된다. 이러한 열전도도는 물질의 고유한 성질로 물질에 따라 다르고 같은 물질이라도 온도에 따라 다르다. 열전달속도는 두 개의 다른 물질 열전달의 관계는 동일한 출력(q 또는  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ), 전달간격(Δx), 전달면적(A) 하에서 열전도도(K)와 온도차(ΔT)의 관계로 식(2)와 같다.

$$K_a \cdot A \cdot \frac{\Delta T_a}{\Delta x} = q = K_b \cdot A \cdot \frac{\Delta T_b}{\Delta x} \dots (2)$$

여기서, K<sub>a</sub>는 목적시료의 열전도도(W/m·°C), K<sub>b</sub>는 기준시료의 열전도도(W/m·°C), ΔT<sub>a</sub>는 목적시료의 순간온도차(°C), ΔT<sub>b</sub>는 기준시료의 순간온도차(°C)이다.

따라서, 본 측정장치를 통해 동일출력하에서 열전도도를 알고 있는 물질(물)의 온도차를 측정

하고 같은 조건하에서 대상시료(탈수슬러지)의 온도차를 측정하여 다음 식(3)에 의하여 열전도도를 도출해 낼 수 있다.

$$K_a = K_b \cdot \frac{\Delta T_b}{\Delta T_a} \dots\dots\dots (3)$$

### 2.3 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 도계슬러지는 충북 진천군의 도계가공 공장의 폐수처리장에서 원심탈수기를 통해 배출되는 탈수케이크를 사용하였고, 물리·화학적 특성은 [Table 1]과 같다.

열전도도 측정실험은 반응용기부 내부에 설치된 3ℓ용량의 테프론용기에 1.8kg의 탈수된 도계슬러지를 균일하게 채웠다. 이때 탈수된 도계슬러지는 반응온도의 증가에 따라 열적 가수분해가 진행되면서 고상에서 액상 슬러리 상태로 변환<sup>11)</sup>되며, 전도에 의한 열전달과 대류에 의한 열전달이 동시에 일어나게 된다. 따라서 대류에 의한 열전달을 억제하기 위하여 황동재질로 된 고리모양에 대류억제판을 φ110mm, φ180mm로 하여 각각 설치하였다.

탈수슬러지층으로 열원 공급은 전기히터에 380W의 전력을 연속적으로 공급하여 탈수슬러지를 승온하였다. 그리고 승온 시에 탈수슬러지의 열전달율이 매우 낮아 히팅블럭의 급격한 온도 상승으로 히팅블럭과 접촉한 탈수슬러지의 탄

[Table 1] Physico-chemical Characteristics of Poultry Slaughter Waste<sup>10)</sup>

Items	Contents	Poultry slaughter waste
Proximate analysis (%)	Moisture	82.47
	Volatile	14.26
	Fixed-C	1.28
	Ash	1.99
Ultimate analysis (dry basis, wt %)	Carbon	55.35
	Hydrogen	8.18
	Oxygen	15.77
	Nitrogen	6.74
	Sulphur	0.00
High heating value (kcal/kg)		6,089
Mean particle size (μm)		239.3

화가 발생하는 문제를 해결하기 위하여 히팅블럭의 온도가 230℃가 되면 전원공급을 차단하고 220℃가 되면 전원이 공급되도록 입력 전원을 자동 제어하였다. 그리고 슬러지에 투입되는 에너지는 기준 물질인 물과 동일한 에너지가 공급되도록 제어하여 투입하였다. 그리고 반응기내에 온도, 압력과 유입 전력은 1분 간격으로 연속적으로 모니터링하였다.

열가수분해 시에 열전도도 측정 실험은 반응용기부의 중심에 있는 히팅블럭에서 투입되는 열이 탈수슬러지를 통해 반경방향으로 전달되는 온도차를 통해 측정한다. 이때 온도차( $\Delta T$ )는 히팅블럭 중심온도와 반경방향으로 특정지점에 설치된 열전대(H)의 온도차를 기준으로 반경방향 열전대 T1, T2, T3에서 측정된 온도의 차를 연속적으로 모니터링한 결과이다.

도 값이 정상화되어 있는 물을 표준물질로 설정하였고 이를 바탕으로 물과 도계슬러지의 열전달 특성을 파악한 결과를 나타낸 것이다. 이때 온도차( $\Delta T$ )는 반응용기 중심부에 있는 히팅블럭에 설치된 열전대(H)의 온도를 기준으로 반경방향 열전대 T1, T2, T3에서 측정된 온도의 차를 연속적으로 모니터링한 결과이다.

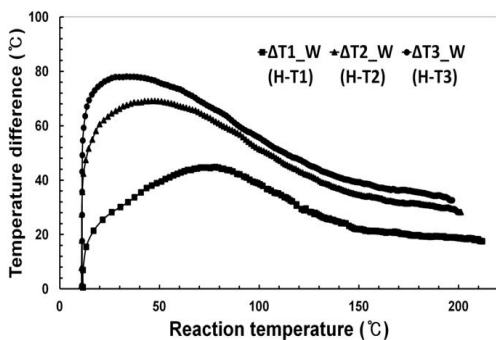
**[Fig. 2(a)]**는 물의 열전달 특성을 파악하기 위하여 반응온도에 따른 온도차를 나타낸 것이다. 각각의 온도차에서 보는 바와 같이 반응온도가 증가할수록 온도차는 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 반응온도의 증가에 따른 물분자들의 활성화에너지가 증가되어 열전달 효율이 높아졌기 때문이다. 하지만 T1~T3 열전대별 온도차 그래프에 변동폭이 있는 이유는 측정장치 내에 대류억제판을 설치하여 대류를 최대한 억제하고자 하였으나 국부적으로 대류현상이 발생된 것으로 판단된다.

**[Fig. 2(b)]**는 위의 물과 동일한 방법으로 탈수슬러지를 대상으로 열전달 특성을 파악한 결과이다. 온도차를 보면 물과 달리 반응 초기의 탈수슬러지는 고상 상태로 히팅블럭 중심부에서 전달된 열이 반경방향으로 열전달이 크지 않아 온도차가 166.7℃이상으로 매우 크다. 하지만 반응온도의 증가에 따른 탈수슬러지의 열가수분해에 의해 세포벽 내의 결합수분이 자유수로 용출된

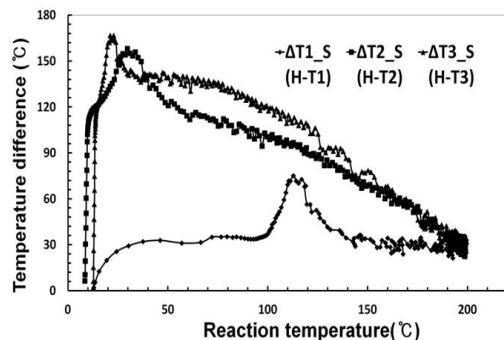
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 물과 도계슬러지 열전달 특성

**[Fig. 2]**은 본 연구에서 제안한 열전도도 측정장치를 검량하기 위하여 반응온도에 대해 열전도



(a) Water



(b) Dehydrated sludge

**[Fig. 2]** Temperature difference profile of water and dehydrated sludge according to thermal hydrolysis reaction temperature.

다.<sup>10-11)</sup> 따라서 용출된 자유수는 고형물 사이의 공극을 채움으로 히팅블럭에서 전달되는 열의 전도에 의한 열전달율이 증가하여 온도차는 반응온도 증가에 따라 급격히 감소하고 있다. 이때 반응온도 증가에 따라 온도차가 선형적으로 감소하는 이유는 열전달이 자연적인 대류의 영향을 무시할 수 있을 정도로 작아 전도에 의존적으로 진행되고 있기 때문이다.

### 3.2 물과 도계슬러지 열전달 비교

[Fig. 3]는 반응온도에 따른 물과 탈수슬러지의 온도차와 적산전력량의 변화를 비교한 것이다. [Fig. 3(a)]는 물과 탈수슬러지의 반응온도에 따른 온도차를 비교한 것으로 세 지점(T1, T2, T3)의 열전대에서 측정된 슬러지층의 반응온도와 히팅블럭(H)과 각 지점에서 측정된 온도의 차를 최대한 선형화하여 나타내고자 하였다. 그 결과 반응온도가 서로 겹치는 영역에 대해 다양한 반복 계산을 통해 다차원 함수화로 상관관계수 R값이 99%이상의 정확도를 갖도록 하였다. 또한 반응온도에 따른 영역 구분은 상온에서 60°C이하, 60°C에서 150°C, 150°C이상에서 200°C로 구분되었다. 이때, 구분된 반응영역에서 측정된 온도차의 값은 상온에서 60°C이하는 히팅블럭과 반경방향 100mm에서 측정된 온도차(H-T3), 60°C에서 150°C에서는 히팅블럭과 반경방향 70mm에서 측정된 온도차(H-T2), 15

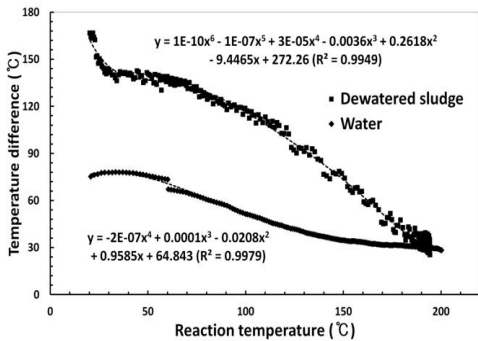
0°C이상에서 200°C에서는 히팅블럭과 반경방향 40mm에서 측정된 온도차(H-T1)이다. 따라서 상온에서 탈수슬러지의 온도차를 보면 히팅블럭과 최 외곽슬러지의 온도차(H-T3)가 166.7°C로 물의 온도차 78.9°C에 비해 탈수슬러지의 열전달 효율이 약 2.11배 낮게 나타나고 있다. 하지만 반응온도가 증가할수록 열가수분해에 의해 열전달 속도가 증가하면서 반응온도 200°C에서 탈수슬러지의 열전달 속도가 물과 거의 유사해짐을 알 수 있다. 따라서 측정된 온도차를 기준으로 상관관계수 R값이 99%이상의 정확도를 갖는 다차원 함수식을 나타낸 결과 다음 식(4), (5)와 같다.

$$y_w = -2 \times 10^{-7}x^4 + 0.0001x^3 + 0.9585x + 64.843 \dots \dots \dots (4)$$

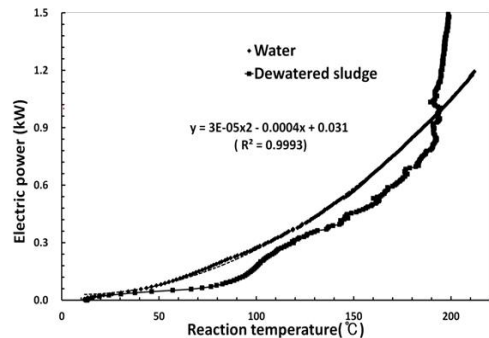
$$y_s = 10^{-10}x^6 - 10^{-7}x^5 + 3 \times 10^{-5}x^4 - 0.0036x^3 + 0.2618x^2 - 9.4465x + 272.26 \dots \dots \dots (5)$$

여기서,  $y_w$ 는 물,  $y_s$ 는 탈수슬러지 온도차( $\Delta T$ )이고,  $x$ 는 반응온도(°C)를 나타낸 것이다.

[Fig. 3(b)]는 물과 탈수슬러지의 투입 적산전력량의 변화를 비교한 것이다. 물의 경우에는 반응온도가 증가할수록 적산전력량이 선형적으로 증가하고 있지만 탈수슬러지의 경우에는 반응온도 80°C까지 적산전력량의 변화가 거의 없다가 그 이상의 온도에서는 빠르게 적산전력량이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 Song et al.<sup>14)</sup>의 논



(a) Temperature difference( $\Delta T$ )



(b) Electric power(kWh)

[Fig. 3] Comparison of temperature difference on water and dehydrated sludge.

문에서 나타난 바와 같이 80°C 이하에서는 주로 고상의 탈수슬러지 형태를 유지함으로 히팅블럭에 투입된 열에너지가 탈수슬러지 반경방향으로 열전달율이 매우 낮다. 이는 히팅블럭의 온도가 히터 제한온도인 230°C에 빠르게 도달함으로 히터의 출력이 반복적으로 on/off됨으로 소비되는 전력량이 낮기 때문이다. 따라서 탈수슬러지 열가수분해에 따른 물리적 물성변화가 열전달 효율에 매우 주요한 영향인자임을 확인하였다.

### 3.3 물과 도계슬러지 열전도도 비교

[Fig. 4]는 물과 탈수슬러지의 반응온도에 따른 열전도도를 나타낸 것이다. [Fig. 4]에서 물에 열전도도는 Kirillov<sup>12)</sup>과 Ramires et al.<sup>13)</sup>에 제시된 실험값을 적용하였고, 탈수슬러지의 열전도도는 물을 기준물질로 설정하고 [Fig. 3(a)]의 측정된 온도차를 식(3)에 적용하여 열전도도를 계산한 것이다. 물의 경우 100°C이하에서는 반응온도가 증가하면 열전도도값이 점진적으로 증가하지만<sup>12)</sup> 100°C이상에서 열전도도 값은 큰 변화폭이 없고 150°C이상부터는 미소하게 감소하는 경향을 보인다. 하지만 탈수슬러지의 열전도도를 보면 위의 [Fig. 3(b)]의 적산전력량에서 보는 바와 같이 반응초기에는 물과 비교하여 낮은 0.291 W/m·°C의 열전도도 값을 보이지만

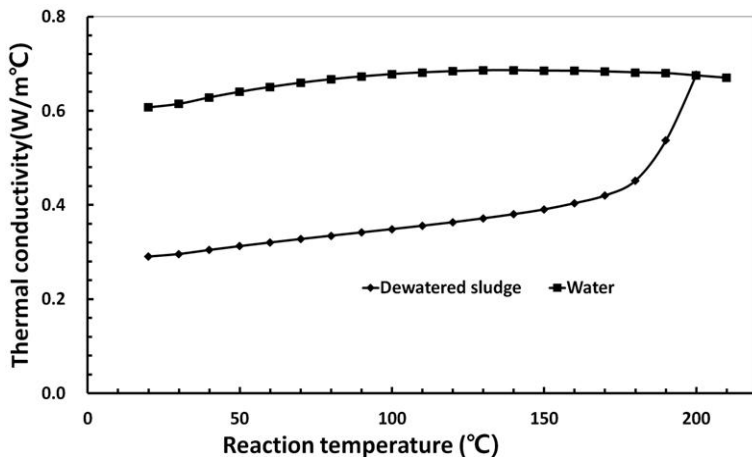
슬러지내의 결합수가 용출되면서 열전달이 향상되는 150°C이상에서는 빠르게 열전도도 값이 상승하고 있다. 그리고 탈수슬러지가 완전한 액상 슬러리(slurry)<sup>14)</sup>로 변화된 200°C에서 물과 유사한 0.677 W/m·°C의 열전도도 값을 나타내고 있다.

### 3.4 도계슬러지 열전도도 함수

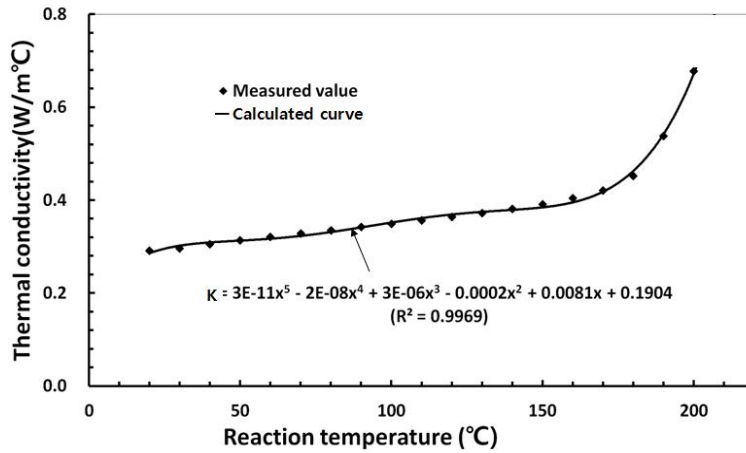
열가수분해 반응기의 최적 설계를 위해 적용하고자 하는 수치모델링 기법의 정확도를 높이기 위해서는 반응기 설계의 핵심인자에 대한 정확한 입력값을 도출해서 경계조건으로 설정하는 것이 매우 중요하다. [Fig. 5]는 열가수분해 반응기 최적 설계를 위한 수치해석 모델의 입력 경계조건인 반응온도와 열전도도 관계를 함수로 수식화한 것이다. 따라서 반응온도에 따른 열전도도 측정값에 대해 반복 함수화를 통해 상관도가 99% 이상 되는 5차원 함수를 도출하였다. 그 결과 도출된 함수식은 식(6)과 같고 이때 상관도는 99.69%로 실험을 통한 측정값과 매우 높은 일치도를 보임을 확인하였다.

$$K = 3 \times 10^{-11}x^5 - 2 \times 10^{-8}x^4 + 3 \times 10^{-6}x^3 - 0.0002x^2 + 0.0081x + 0.1904 \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $K$ 는 탈수슬러지의 열전도도(W/m·°C)이고,  $x$ 는 반응온도(°C)이다.



[Fig. 4] Comparison of thermal conductivity on water and dehydrated sludge.



[Fig. 5] Comparison of calculated and measured thermal conductivity on poultry slaughter waste sludge.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열가수분해 반응기 최적 설계를 위한 주요한 영향인자인 탈수된 도계슬러지의 열전달 특성을 연속적으로 측정하고 이를 통해 반응온도에 따른 열전도도를 정량화하고 함수화한 결과는 다음과 같다.

1. 도계슬러지는 반응온도가 증가할수록 열가수분해에 의해 슬러지 가용화가 진행되면서 액상 슬러리화되어 열전달 속도가 빨라진다. 따라서 반응초기에는 도계슬러지 온도차 166.7°C로 물 온도차 78.9°C에 비해 열전달 효율이 약 2.11배 낮지만 반응온도 200°C 이상에서는 물과 유사한 열전달 속도를 보이고 있다.
2. 반응온도 증가에 따른 적산전력량을 보면 물은 반응온도가 증가할수록 적산전력량이 선형적으로 증가하고 있지만 도계슬러지의 경우에는 반응초기에는 변화가 거의 없다가 80°C 이상부터 적산전력량이 급격히 증가하고 있는데 이는 공급되는 열이 빠르게 슬러지내로 전달되는 것으로 열가수분해에 따른 물리적 물성변화가 열전달 효율에 매우 주요한 영향인자임을 확인하였다.
3. 도계슬러지의 열전도도를 보면 반응초기에는 0.291 W/m · °C의 열전도도 값을 보이지만 탈

수슬러지가 완전한 액상 슬러리로 변화된 200°C 이상에서는 물과 유사한 0.677 W/m · °C의 열전도도 값을 나타내고 있다.

4. 열가수분해 반응기 최적설계를 위한 반응온도와 열전도도의 관계 함수식을 도출하여 수치모델링의 경계조건을 확보하였으며, 실험에 의한 측정값과 상관도는 99.69%로 매우 높은 일치도를 나타내고 있다.

#### 사 사

본 연구는 농림축산부 수출전략기술개발사업과 첨단생산기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

1. Ministry of environment, Livestock waste treatment statistics livestock waste generation amount and treatment status (2012).
2. Lee, J.H., Lee, J.M., Lim J.S., Park, T.J., and



- Byun, I.G., "Enhancement of microwave effect with addition of chemical agents in solubilization of waste activated sludge", *J. of Industrial and Engineering Chemistry*, 24, pp. 359~364. (2015).
3. Toshikazu S., Mio N., Hiroyuki Y., Hiroaki K., Minoru N., Tadahiro F., Hiroshi S., Akihiko T., and Masaaki H., "High-pressure jet device for activated sludge reduction: Feasibility of sludge solubilization", *Biochemical Engineering Journal*, 100, pp. 1~8. (2015).
  4. Neyens, E. and Baeyens, J., "A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability", *J of Hazardous Materials*, 98(B), pp. 51~67. (2003).
  5. Jose M.A., Sara I.P., Jezabel S., Roberto de la C., Juan R. Portela, and Enrique N., "Enhancement of methane production in mesophilic anaerobic digestion of secondary sewage sludge by advanced thermal hydrolysis pretreatment", *Water Research*, 71, pp. 330~340. (2015).
  6. Bougrier, C., Delgenes, J.P. and Carrere, H., "Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation", *Physical properties and anaerobic digestion*, *Chem. Eng. J.* 139(2), pp. 236~244. (2008).
  7. Yonggang X., Huajie L.S., Chen, N.D., Xiaohu D., and Ning L., "Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge", *Chemical Engineering Journal*. 264, pp. 174~180. (2015).
  8. Fourier. J., *The Analytical Theory of Heat*, Dover Publications, New York (1955).
  9. Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons (1996).
  10. Han, S.K., Song, H.W., Choi, C.S., Kim, H. and Lee, S.E., "Physicochemical properties of sewage sludge according to thermal hydrolysis reaction temperature", *J. of Korea Society of Waste Management*, 29(4), pp. 414~420. (2012).
  11. Song, H.W., Park, K.J., Han, S.K, and Jung, H.S., "Thermal conductivity characteristics of dewatered sewage sludge by thermal hydrolysis reaction", 64(12), pp. 1284~1389. (2014).
  12. Kirillov, P.L., *Thermophysical properties of materials for nuclear engineering*, Obninsk (2006).
  13. Ramires, M.L.V., Nieto de Castro, C.A., Nagasaka, Y., Nagashima, A., Assael, M.J. and Wakeham, W.A., *Standard Reference Data for the Thermal Conductivity of Water*, IUPAC, pp. 1377~1381 (1995).
  14. Song, H.W., Han, S.K., Kim, C.G. and Shin, H.G., "A study on the viscosity characteristics of dewatered sewage sludge according to thermal hydrolysis reaction", *J. of KORRA*, 22(1), pp. 27~34. (2014). 