

< 논문 >

## 흐르는 세제혼합액막에 의한 화학적 세척 메커니즘에 대한 연구

장충효\* · 송태호† · 박찬열\*\*  
(2006년 10월 18일 접수, 2007년 5월 17일 심사완료)

### A Study on Chemical Washing Mechanism by Flowing Film of Detergent/Water Solution

Choong-Hyo Jang, Tae-Ho Song and Chan-Youl Park

**Key Words:** Chemical Washing(화학적 세척), Detergent/Water Solution(세제 혼합액), Stearic Acid(스테아르산), Detergent Consumption Coefficient(세제소모계수), Flowing Film(흐르는 액막)

#### Abstract

This study aims to propose evaluation methods of chemical washing performance and estimate the washing capability by flowing detergent/water solution for application to home appliances such as dishwashers. Standard pollutant is stearic acid. A numerical study is also tried using a SIMPLER code. Preliminary experiments are performed by varying the concentration and temperature of the solution. From the pre-experiments, 10 minute pre-curing time is found to be necessary to remove the stearic acid. Stoichiometric ratio and detergent consumption coefficient of reaction between the detergent and stearic acid are estimated following a proposed method. Washing experiments of pollutant to compare with the numerical results are performed. The relative errors between the experimental and the numerical results with pre-curing time included are less than 7%. In conclusion, important mechanisms of chemical washing are revealed and methods of predicting washing performance are well established.

#### 기호설명

$a$	:	면적(m <sup>2</sup> )	$M$	:	질량(kg)
$C$	:	농도(concentration, mass fraction)	$\bar{m}$	:	질량유속(kg/m <sup>2</sup> ·s)
$D$	:	확산계수(m <sup>2</sup> /s)	$R$	:	당량비(stoichiometric ratio)
$d$	:	지름(m)	$t$	:	시간(s)
$g$	:	중력가속도(m/s <sup>2</sup> )	$u$	:	유동 속도(m/s)
$h_m$	:	물질전달계수(m/s)	$\alpha$	:	반지름(m)
$k$	:	볼츠만상수(J/K)	$\delta$	:	두께(m)
$k_m$	:	세제소모계수(kg/m <sup>2</sup> ·s)	$\mu$	:	점성계수(N·s/m <sup>2</sup> )
			$\nu$	:	동점성계수(m <sup>2</sup> /s)
			$\rho$	:	밀도(kg/m <sup>3</sup> )
			아래 첨자		
†	:	책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과	$b$	:	평균
	:	E-mail : thsong@kaist.ac.kr	$d$	:	세제
	:	TEL : (042)869-3032 FAX : (042)869-8207	$o$	:	입구
*	:	한국과학기술원 대학원 기계공학과	$p$	:	오염물
**	:	동양매직(주) 가전연구소			

1. 서론

최근 들어 우리나라에서는 식기세척기 등 자동 세척 가전제품의 수요가 증가하고 있다. 그러나 그 세척 메커니즘의 이해와 예측에 관한 연구는 거의 없어서 보다 근본적인 세척력에 대한 예측과 그 성능평가방법에 대한 연구가 필요한 상황이다.

비교적 역사가 오래된 유럽의 세척기 세척력의 평가방법<sup>(1)</sup>이라는 것도 세척기를 통해 세척을 한 후 실제 오염물을 육안으로 보고 세척력을 평가하는 것이다. 이는 평가 때마다 실험의 불확실성의 영향과 평가자의 주관적인 판단이 개입될 여지가 있으므로 주관적일 수밖에 없으며 선택적인 설계식을 제공하지 못한다.

세척기의 세척과정은 크게 밥풀 같은 덩어리를 제거하는 물의 분사에 의한 기계적인 세척과정과 마가린 같은 지방류의 오염물을 제거하는 세제에 의한 화학적인 세척과정으로 나눌 수 있다. 기계적인 세척과정은 생각보다 복잡한 수분확산 및 레올로지 특성이 있어서 상당히 심층적 연구가 요구된다고 판단된다. 본 논문에서는 후자 즉, 세제에 의한 화학적인 세척과정을 기초적 원칙을 통하여 연구하고자 한다.

본 논문에서 연구하고자하는 화학적인 세척과정은 다음과 같다. Fig. 1과 같이 오염물이 묻어 있는 면이 세워져 있다. 이 면을 따라 세제혼합액이 얇은 막을 형성하며 흘러내린다. 세제혼합액 내의 계면활성제의 소수기가 오염물에 붙어서 오

염물의 표면장력을 약화시키고 친수기는 물과의 강한 인력에 의해 결국 오염물이 미셀(micelle)을 이루며 흐르는 세제혼합액과 같이 제거가 된다.<sup>(2)</sup>

본 논문에서는 이러한 화학적 세척과정을 수치 해석을 통해 결과를 예측하고 그에 필요한 여러 다양한 인자들을 실험적으로 구할 것이다. 또한 실제 장치를 제작하여 오염물의 제거실험을 하고 수치해석과 실험의 결과를 비교 분석한다. 그리하여 화학적 세척과정에 대한 세척 메커니즘을 예측하고 그 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식과 경계 조건

오염물의 제거현상을 수치 해석으로 예측하기 위하여 Fig. 2와 같이 모델링을 하였다. 오염면을 따라 흐르는 세제혼합액막을 두께가  $\delta$  이고 길이가  $L$ 인 2차원 채널유동으로 볼 수 있고 오염물의 확산에 대하여 지배 방정식<sup>(3)</sup>은

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \tag{1}$$

과 같이 표현된다. 여기서  $C$ 는 세제혼합액의 농도로 본 논문에서는 질량비율(mass fraction)을 사용하고 다음과 같이 정의한다.

$$C = \frac{\text{mass of detergent (g)}}{\text{mass of water (g)}} \tag{2}$$

이 때 세제혼합액의 속도는 입구에서부터 완전 발달되어 흐른다고 가정하면 다음 식처럼 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

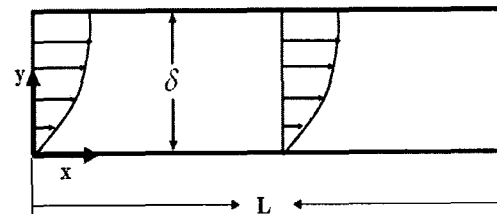


Fig. 2 Numerical modeling of washing process

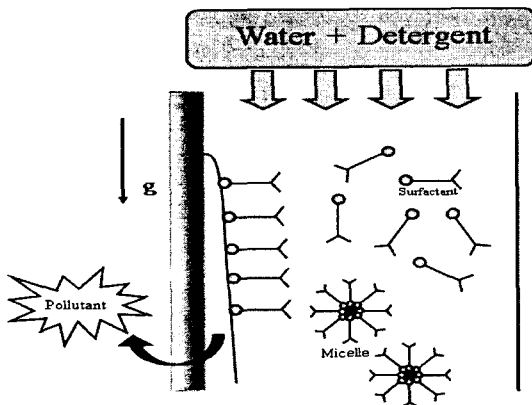


Fig. 1 Chemical washing mechanism by flowing detergent/water solution

$$u = \frac{\rho g}{2\mu} y(2\delta - y) \quad (3)$$

경계 조건은 다음과 같다. 채널 입구에서 세제 혼합액의 농도는 일정하다. 채널의 상층부는 물질전달이 없고, 채널의 바닥에는 오염물이 묻어 있다. 바닥 오염물의 제거량이 바닥면에서의 세제 혼합액의 농도에 선형적인 비례를 한다고 가정한다. 즉, 바닥의 세제혼합액의 농도가 진할수록 오염물이 선형적 비율로 제거가 된다. 여기서 비례상수  $k_m$ 을 세제소모계수라고 정의한다. 그러면

$$\begin{aligned} C &= C_o & \text{at } x &= 0 \\ \frac{\partial C}{\partial y} &= 0 & \text{at } y &= \delta \\ \rho D \frac{\partial C}{\partial y} &= k_m C & \text{at } y &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

과 같은 경계 조건들을 설정할 수 있다.

### 2.2 수치 해석과 그 결과

본 논문에서 사용된 수치 해석의 결과는 모두 멱법(power-law scheme)을 적용한 2차원 SIMPLER 코드를 활용하고 다음의 무차원수<sup>(9)</sup>를 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{u_b \delta}{\nu} & \text{Reynolds number} \\ Bi_{m,\delta} &= \frac{k_m \delta}{\rho D} & \text{mass transfer Biot number} \\ Sh_\delta &= \frac{h_m \delta}{D} & \text{Sherwood number} \\ Sc &= \frac{\nu}{D} & \text{Schmidt number} \\ Pe_{m,\delta} &= \frac{u_b \delta}{D} & \text{mass transfer Peclet number} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $u_b$ 는 평균속도로 그 정의는 다음과 같다.

$$u_b = \int_0^\delta u \, dy \quad (6)$$

$h_m$ 은 물질전달계수로서 질량유속으로부터 다음과처럼 구한다.

$$m'' \left( = -\rho D \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \rho h_m C_b \quad (7)$$

$C_b$ 는 평균농도로 다음과 같이 정의된다.<sup>(4)</sup>

$$C_b = \frac{1}{u_b \delta} \int_0^\delta u C \, dy \quad (8)$$

수치해석을 통해 나온 농도 분포를 (6)부터 (8)식을 이용하여 무차원화 된 결과를 구하였다. Fig. 3은 유동의 진행방향을 따라 바닥의 경계조건인  $Bi_{m,\delta}$ 수에 따라 세제혼합액의 유동경계조건인  $Pe_{m,\delta}$  수가 1일 때 채널내부에서의 물질전달량을 나타내는  $Sh_\delta$ 수의 수치 해석 결과이다. 입구에서는 유입되는 세제혼합액에 의해 높은  $Sh_\delta$ 수를 보이고 유동의 진행방향에 따라  $Sh_\delta$ 수가 감소하다가 완전발달 영역에서는 일정한  $Sh_\delta$ 수를 보인다. 즉, 입구에서는 오염물의 제거가 잘되지만 점차적으로 제거량이 감소하다가 완전발달 영역에서는 오염물의 제거량이 일정하다.

### 3. 예비 실험

수치 해석을 통해서 경계조건에 따른 세제혼합액막의 유동에 대한 결과를 얻을 수 있다. 그런데 그러기 위해서는 농도나 세제소모계수 등의 다양한 인자의 값을 미리 알아야 한다. 이에 따라 이번 예비 실험에서는 경계 조건과 세제혼합액에 따르는 각각의 여러 물리적 인자를 구하는

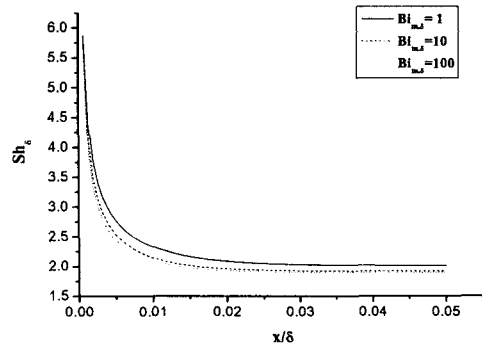


Fig. 3 Numerical results along the x-direction (using SIMPLER code,  $Pe_{m,\delta} = 1$ )

방법을 제안하였다. 본 실험에서 사용된 옥시사의 세제(상품명 피니쉬)를 사용하였다. 세제혼합액을 만들기 위한 용매로는 증류수(pure water)를 사용하였다.

3.1 농도 측정

세제는 여러 종류의 계면활성제와 단백질 분해 효소로 이루어져 있고 계면활성제는 물에 녹으면 그중 미량이 이온화되어 전기전도성이 나타나게 된다.<sup>(2)</sup> 그러므로 세제혼합액의 전기전도도(electric conductivity)를 측정하여 농도를 예측하였다. 먼저 일정한 농도의 세제혼합액을 항온조에서 일정한 온도를 유지시키면서 전기전도도를 측정하였다. Fig. 4는 각 온도(20°C~60°C)에서 농도에 따른 세제혼합액의 전기전도도의 결과이다. 농도와 전기전도도의 관계가 선형적인 관계를 보임을 알 수 있다. 이를 통하여 세제혼합액의 온도와 전기전도도의 측정으로 농도를 구할 수 있다.

기타 점도와 밀도 등으로부터 농도를 측정하는 방법도 시도해 보았으나 상관성이 좋지 않아 채택하지 않았다.

3.2 표준 오염물의 선정

표준오염물의 조건은 다음과 같다. 첫번째, 세제와 반응을 하는 지방이나 유기류이어야 한다. 두번째, 세제활성화 온도(50°C이상, 본 실험 기준)에서 녹지 않는 높은 녹는점(melting point)을 가져야 물리적으로 녹아내리지 않는다. 즉, 가정에서 사용하는 일반적인 지방제품은 세제가 활성화 되기 전에 녹아버려 세제에 의한 제거량을 측정할 수가 없다. 다양한 오염물을 시도해 본 결과 스테아르산(stearic acid)을 표준 오염물로 선정하

였다. 즉, 스테아르산은 지방족 탄화수소의 일종으로 녹는점이 71.3°C로 세제활성화 온도 이상에서 녹고 물과는 반응하지 않고 유기용매에 잘 녹아서 표준 오염물의 조건을 만족한다.<sup>(6)</sup>

3.3 여러 반응 계수의 측정

세제혼합액과 오염물의 반응에는 다음과 같은 당량비가 존재한다. 즉,  $m_p''$ 이 오염물의 단위표면적당 제거량이고  $m_d''$ 가 세제의 소모량이라면

$$m_p'' = Rm_d'' \tag{9}$$

여기서  $R$ 은 세제와 오염물간의 반응 당량비(stoichiometric ratio)로서 세제 1g당 반응하는 오염물의 g수이다. 한편 오염물의 질량유속과 세제 농도와의 관계는 당량비, 식 (4)의 오염면에서 세제혼합액의 경계조건과 식 (7)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_p'' = Rk_m C \tag{10}$$

결국 알아야 할 계수는  $R$ 과  $k_m$ 이라는 것을 알 수 있다. 이를 위해 일정한 세제혼합액의 농도에서 오염물이 제거되는 질량유속을 구하고 세제와 오염물 간의 당량비  $R$ 을 구하고 또 식 (10)을 이용하여 세제소모계수를 구한다.

3.3.1 반응 당량비  $R$ 의 측정

우선 당량비를 측정하기 위하여 과량의 오염물에 소량의 세제를 반응시킨다. 세제의 양을 증가시켜가며 그에 따른 오염물의 제거량을 측정한다.

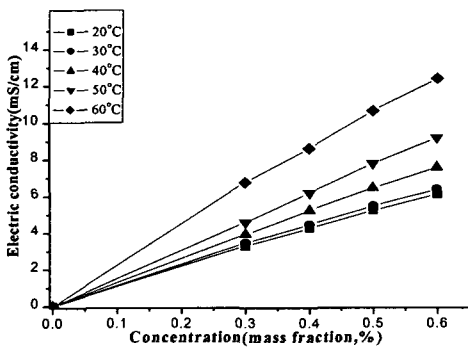


Fig. 4 Electric conductivity with detergent/water solution concentration

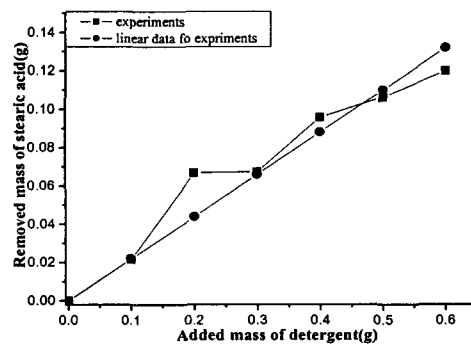


Fig. 5 Stoichiometric number between the detergent and the pollutant

다.

당량비의 측정결과는 Fig. 5에 보였다. 실험결과를 선형화시켜 기울기를 통해 당량비를 구해보면  $R=0.22$ 가 나온다. 오차가 가장 심할 때의 세제의 질량 0.2g의 결과를 제외한 구간에서의 값과 실험결과와의 상대오차는 10%미만을 보인다.

3.3.2 세제소모계수  $k_m$ 의 측정

$k_m$ 을 구하기 위하여 Fig. 6처럼 오염물이 제거되어도 농도의 변화가 없을 만큼 많은 양의 세제혼합액을 취하고 핫플레이트와 자석교반기, 온도 조절기를 이용하여 세제혼합액의 농도와 온도를 일정하게 유지시킨다. 표면적이 일정한 오염물을 시편에 묻힌 뒤 세제혼합액에 넣어 일정시간( $t$ )을 기다린다. 그 후 오염물의 질량차이를 측정하여 구하면 오염물의 질량유속은

$$m_p'' = \frac{M_1 - M_0}{at} \quad (11)$$

이 된다.

실험결과 반응시간 10분까지는 오염물의 제거가 거의 이루어지지 않았다. 이는 세제혼합액이 오염물을 제거하기 위한 준비과정으로 오염물의 표면층 안으로 세제의 계면활성제가 우선 확산이 되어야 한다는 것을 보여준다. 이 사실을 증명하기 위하여 다음과 같은 추가 실험을 하였다. 오염물이 제거되지 않는 증류수에 오염물을 반응시키고 10분 뒤 세제를 첨가를 한다. 10분이라는 시간이 오염물의 표면층 안으로 세제의 확산에 필요한 시간이면 이 실험의 결과와 앞의 실험결과는 10분의 시간차를 보이지만 같은 형태로 나타날 것이다. Fig. 7은 추가 실험의 결과와 처음 반응 실험의 결과를 10분 시간차를 뒤 오프셋

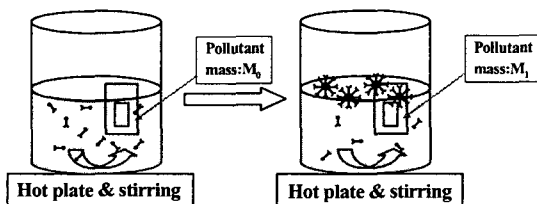


Fig. 6 Schematic diagram of experimental method for determining detergent consumption coefficient  $k_m$

(offset) 시킨 결과의 비교이다. 약 5분 정도의 시간차(delay)가 발생하는데 이는 세제가 증류수에 녹는 시간을 의미한다. 그러므로 이 결과는 세제혼합액이 오염물을 제거하기 위한 준비과정으로 오염물의 표면층 안으로 세제의 계면활성제가 우선 확산이 되어야 한다는 것을 보여주고 확산에 필요한 시간은 10분임을 알 수 있다. 오염물을 제거하기 위한 오염물의 표면에서 세제혼합액의 확산을 pre-curing으로 정의한다.

Fig. 8은 실험온도는 60°C, 실험시간은 1시간으로 한 세제소모계수 측정실험 결과이다. 세제혼합액의 농도가 0.5%까지는 오염물의 제거량이 선형적으로 증가하지만 그 이후로는 세제의 농도가 증가하여도 오염물이 제거 되지 않는다. 0.5%의 세제혼합액의 농도가 CMC(critical micelle

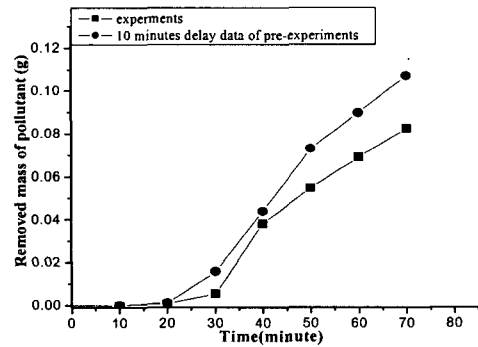


Fig. 7 Pre-curing experiments of detergent/water solution at the surface of pollutant

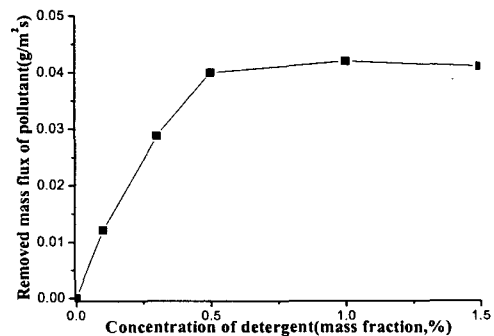


Fig. 8 Removed mass flux of pollutant by the detergent/water solution

concentration)이기 때문에 그 이상의 농도에서는 계면활성제 스스로 미셀을 형성하여 세척과정에 참여를 할 수가 없다.<sup>(7)</sup> 이는 실제 식기세척기에 사용되고 있는 세제혼합액의 한계농도인 0.5~0.6%임을 고려해 보면 상당히 타당한 결과이다. Fig. 8의 기울기와 식 (10) 그리고 당량비  $R=0.22$ 를 이용하면  $k_m=0.41 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2\text{s}$ 이다. 0.5%에서 3회 실험의 평균은  $0.0395 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2\text{s}$ , 표준편차는  $0.0011 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2\text{s}$ 으로 재현성이 상당히 높다.

3.4 확산계수  $D$ 의 결정

Stokes-Einstein equation에 따르면 농도와 점도 사이의 관계는<sup>(8)</sup>

$$D = \frac{kT}{6\pi\mu\alpha} \quad (12)$$

로 나타난다. 이 식은 확산 종의 전하에 무관하므로 전기전도도를 띠는 세제혼합액에서도 사용이 가능하다. 점도는 Schott사의 Cannon-Fenske 점도계를 이용해 구하였다.

세제혼합액에서 세제의 입자의 반경은 Zeta Potential Analyzer를 이용하여 측정하였다. Fig. 9은 Zeta Potential Analyzer를 이용하여  $0.01\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$  사이의 세제입자크기와 크기에 따른 분포이다. 이로부터 세제는 직경이  $d_1=205.1\text{nm}$ 와  $d_2=646.3\text{nm}$ 의 크기인 두 입자로 구성되어 있는 것을 알 수 있다.

두 종류 입자에 대한 각각의 확산계수를 점도와 식 (12)와 입자의 크기를 이용하여 구해보면 작은 직경의 입자인 경우 확산계수는  $D_1=8.492 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 이고 큰 입자의 경우에는  $D_2=2.767 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 이다.

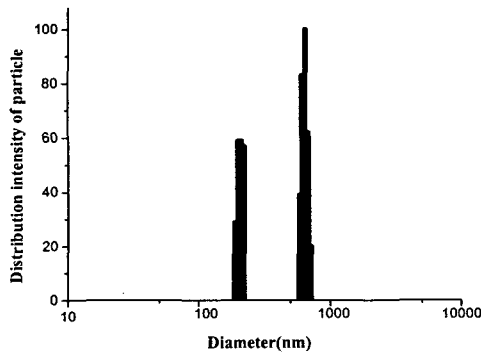


Fig. 9 Distribution intensity of particle(detergent)

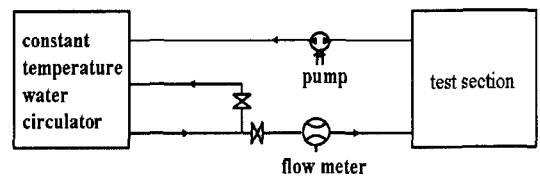
이 두 종류의 결과로부터 본 실험의 결과를 통하여 반응에 참가하는 입자를 찾아내고 그 타당성을 검증할 것이다.

4. 본 실험

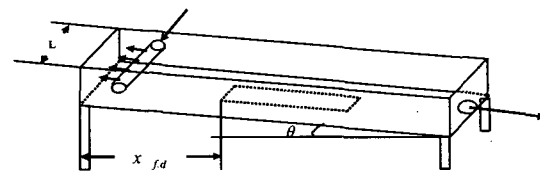
앞서 예비 실험을 통한 여러 인자들로 구한 수치 해석의 결과와 비교하기 위하여 본 실험을 하였다. 본 실험은 실제로 오염물을 시편에 묻혀 놓고 세제혼합액을 흘려 오염물이 얼마나 제거가 되는가를 측정하였다.

Fig. 10(a)는 실험장치의 구성도이다. 항온순환기에서 나온 세제혼합액은 유량계를 거쳐 시험부로 유입된다. 시험부에서 오염물의 제거실험이 된 세제혼합액은 펌프를 통하여 다시 항온순환기로 들어가서 일정한 온도가 유지된다. 제거되는 오염물의 양을 무시할 수 있을 만큼 많은 양의 세제혼합액을 사용하여 일정한 농도를 유지하게 하였다. Fig. 10(b)는 시험부의 구성도이다. 유량계를 거쳐 들어온 세제혼합액은 완전발달된 후 오염물이 묻어 있는 시편에서 오염물을 제거하고 펌프를 통해 유출이 된다. 시험부는 개수로로써 지면과 이루는 수평각( $\theta$ )은  $5^\circ$ 이고 폭(L)은 100mm, 입구에서 오염물까지의 거리( $x_{f,d}$ )는 완전 발달유동을 고려하여<sup>(9)</sup> 200mm로 아크릴로 제작하였다. 세제혼합액의 실험온도는 예비 실험과 같이  $60^\circ\text{C}$ 로 하였고 유량은  $4.42 \text{liter}/\text{min}$ 으로 하였다.

Fig. 11(a)는 실험시간 20분, 세제혼합액의 온도  $60^\circ\text{C}$ 에서 농도에 따른 오염물의 제거량을 나타낸다. 농도가 0%일 때 즉, 증류수에서는 오염물을



(a) Schematic diagram



(b) Test section

Fig. 10 Schematic diagram of the experimental apparatus

전혀 제거하지 못하였다. 그러므로 본 실험에서는 세제혼합액막의 유동에 의한 기계적인 세척과정은 없다는 것을 알 수 있다. 농도가 증가할수록 제거량이 증가하는 것을 보여준다.

Fig. 11(b)는 농도 0.5% 온도 60°C에서 시간에 따른 오염물의 제거량의 결과이다. 30분 이상의 시간에서는 화학적 제거작용에 의한 오염물 제거 뿐만 아니라 오염물이 쓸려나가는 기계적인 세척 과정이 또한 발생하므로 그 이상의 시간은 무의미하다. 시간의 증가에 따라 오염물의 제거량이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 실험 결과 해석 및 고찰

본 실험에서의 여러 계수들을 이용한 수치 해석과 실험 결과의 비교를 행하였다. Fig. 12와 같이 오염물이 있을 때  $dx$ 구간에서의 오염물의 제거량은

$$dm_p(x) = \rho R \left( \frac{Sh_\delta(x)D}{\delta} \right) a C_b(x) t dx \quad (13)$$

가 된다. 이를 적분하여 오염물 전체길이  $L$ 에서의 총 오염물 제거량을 구한다. 이를 본 실험에서 구한 오염물의 제거량과 비교하였다.

Fig. 13(a)는 여러 농도에서 각각의 입자 크기에 대한 오염물의 제거량과 실험결과를 비교하였다. 실제 실험치는 오염물과 반응하는 세제의 성분이 큰 입자( $d_2=646.3nm$ )일 때의  $D$ 값을 식 (12)로

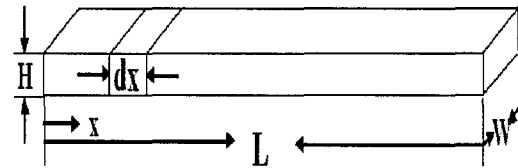
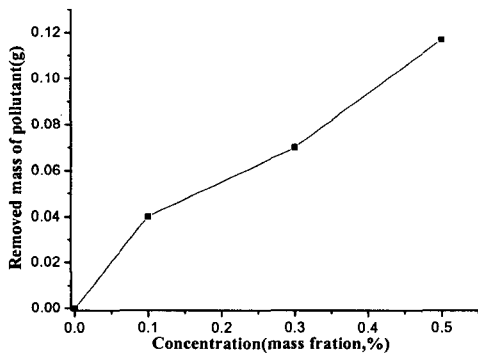
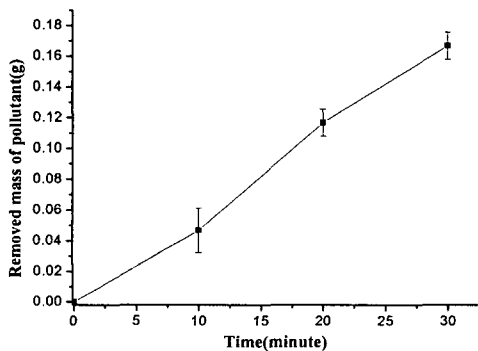


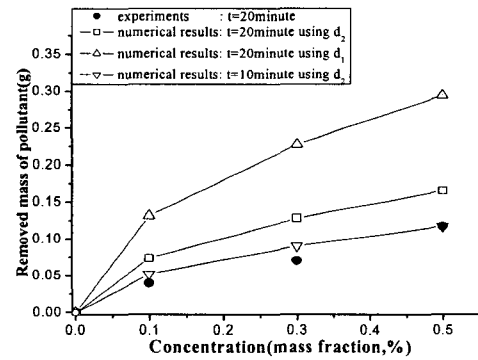
Fig. 12 Model of pollutant strip



(a) Relation between detergent concentration and removed mass



(b) Relation between time and removed mass  
Fig. 11 Removed mass of the pollutant



(a) Dependence on detergent concentration

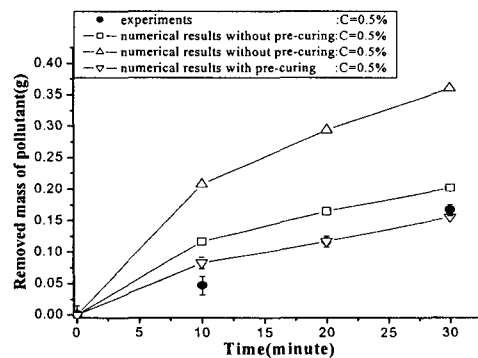


Fig. 13 Comparison between experimental results and numerical results with pre-experiments

구하여 넣고 실제 세척시간 20분에서 10분의 세제확산시간을 빼고 나머지 10분간만 세척이 된 것으로 본 경우의 수치 해석 결과와 가장 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 큰 입자의 확산계수를 이용하여 계산한 10분의 수치 해석 결과와 20분의 세척 실험과의 결과가 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로 오염물과 반응하는 세제의 성분은  $d_2=646.3\text{nm}$ 인 큰 입자임을 알 수 있다.

Fig. 13(b)는 세제혼합액의 농도 0.5%일 때 시간에 따른 비교 결과이다. 오염물 표면에서 세제혼합액의 확산시간을 고려해 수치 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 이 결과에서도  $d_2=646.3\text{nm}$ 인 큰 입자가 세척과정에 참여하는 것을 확인할 수 있다. 세제확산시간에 따른 세척시작 지연시간(10분)을 감안하면 실험과 계산의 상대오차가 7%미만이다. 이로부터 본 연구에서 제시한 예측 방법 및 관련계수의 결정방법의 타당성을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 세척기 내의 세제혼합액막의 흐름에 의한 화학적 세척과정에 대하여 연구를 수행하였다. 화학적 세척과정을 수치적으로 해석하였고, 해석에 필요한 여러 변수들을 실험적으로 구하는 방법을 제시하였다. 예비 실험을 통해 스테아르산을 표준오염물로 제안하였다. 실제 표준 실험을 통하여 세제혼합액이 흐름 때 오염물의 제거 질량을 구하였다. 실험의 결과와 수치 해석의 결과를 비교한 결과 실제 세척의 초기에 10분 가량의 세제확산에 따른 세척 지연을 감안하면 이론과 실험의 오차가 7%내로 잘 일치하였다. 이로써 본 연구에서 제시한 화학적 세척 메커니즘의 예측과 평가방법이 타당함을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 동양매직(주)의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

## 참고문헌

- (1) German Industrial Association of the Manufacturers of Toiletries and Detergents (IKW), 1998, "Methods for Ascertaining the Cleaning Performance of Dishwasher Detergents(Part A)," *SÖFW-Journal*, Vol. 124, p. 702.
- (2) Porter, M. R., 1991, *Handbook of Surfactant*, Chapman & Hall, New York.
- (3) Kays, W. M., and Crawford, M. E., 1993, *Convective Heat Transfer and Mass Transfer*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 480~502.
- (4) Munson, B. R., Young, D. F. and Okishi, T. H., 1999, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 359~361 & 640~665.
- (5) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 312~321.
- (6) Weast, C. R., 1989, *Handbook of Chemistry and Physics*, 70th ed., CRC Press, Cleveland, pp. 465~496.
- (7) Dianne, J. L. P. and Parmely, H. P., 2005, "Solubilization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Mixtures in Micellar Nonionic Surfactant Solutions," *Water Research*, Vol 34, pp. 3463~3472.
- (8) Atkins, P. W., 2002, *Physical Chemistry*, 7th ed., Oxford University Press, New York.
- (9) Bejan A., 1995, *Convection Heat Transfer*, 2nd ed., John Wiley & Sons, NewYork, pp. 92~144.