

열동력 시스템 내부 열교환 표면의 클리닝에 관한 연구

한 규 일*

부경대학교 기계시스템공학과

A study of cleaning of heat transfer surface in thermal power system

Kyu-il HAN*

Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

The efficiencies of thermal power system using fossil fuel depend on heat exchangers which extract energy from the exhaust gas before it is expelled to the atmosphere. To increase heat transfer efficiency it is very important to maintain the surface of heat exchanger as clean condition. The accepted skill of cleaning of fouled surface of heat exchanger is soot blowing. A high pressure jet of air is forced through the flat surface of plate to remove the deposit of fouling. There is, however, little knowledge of the fundamental principles of how the jet behave on the surface and how the jet actually removes the deposit. Therefore, the study focuses on the measuring of cleaning area and cleaning dwell time after accumulating the simulated deposit on the flat surface. The deposit test rig was built for the study and simulated deposit material is used after measuring the physical property of the each material by shearing stress test. Much data was obtained for the analysis by the parameters change such as the different jet speed, different inner pressure and variable distance of the jet from the test rig surface. The experimental data was compared with the theoretical equation and most of the data matches well except some extreme cases.

Keywords: Heat exchanger, Soot blowing, Pressure jet, Dwell time, Shear stress, Fouling surface

서론

석탄을 연료로 사용하는 보일러 시스템 안의 전열관 군이나 열효율의 상승을 요하는 열교환기 전열표면, 그 밖의 식품회사나 화학공장에서 청결을 유지해야 하는 표면들은 각각 전자의 경우 연소후의 배기가스, 후자의 경우 공정상의 불순물 등으로 항상 표면이 오염되어 있기 마련이다 (Mott, 2006; Chilukuri et al., 1984). 특히 석탄을 원료로 사용하는 보일러 시스템에서의 열효율은 대기 중으로 방출되는 연소가스의 열을 열교환기를

사용하여 얼마나 이용하느냐에 달려있다. 발전소 등과 같이 석탄을 사용하는 규모가 큰 파워 스테이션 (power station)에서는 절탄기 (economizer)나 공기에열기 (air preheater)를 장치하여 열효율을 상승시키고 있다. 이 경우 열교환기 표면의 응축현상을 방지하기 위하여 가스의 온도를 125°C 이하로 하는 것이 중요하다. 하지만 더욱 높은 효율을 위해서는 배기가스 온도를 더 낮추는 것이 필요한데, 이때 우리는 열교환기 표면에 심각한 불순물 축적상태 (aggravated fouling)에 직면하게 된다

*Corresponding author: kihan@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-6194, 82-10-5599-5354, FAX: 82-51-629-6188

(Bott, 1990).

규모가 작은 파워 스테이션이나 많은 산업용 보일러에서는 장비설치의 복잡성과 추가되는 비용의 부담 때문에 배기가스 열 회수장치의 사용을 기피하기도 한다. 그럼에도 불구하고, 연소용 공기의 예열이나 보일러에 들어가는 급수를 배기가스로 예열했을 시에 나타나는 막대한 효율 향상과 에너지 절감효과를 감안할 때 이는 반드시 설치되어야 한다. 하지만 정작 소형의 열교환기를 석탄 연소용 보일러의 후면에 직접 장착했을 시, 보일러 운전 후 수 시간 만에 많은 양의 축적물이 쌓여 이를 효과적인 방법으로 클리닝 (cleaning)하지 않으면 안 된다 (Yeckel et al., 1990).

본 연구의 목적은 열교환기의 효율 향상에 직접적인 역할을 하는 열교환기 표면의 축적물을 어떻게 빨리 제거하여 열효율을 촉진시킬 수 있을가에 초점을 맞추었다. 지금까지 알려진 방법으로써 전열 표면 축적물 제거의 가장 효과적인 방법은 수트 블로잉 (soot blowing)이다 (Cleaver, 1992). 이는 고압의 공기, 또는 증기의 제트 (jet)를 열교환기 표면에 분사시켜 축적물을 제거하는 방법이다. 그러나 제트류가 열교환기 표면에 어떤 유동현상을 보인단든지, 그리고 실제로 어떻게 표면에 밀착된 축적물을 효과적으로 제거해 내는지에 대하여는 기본적인 원리 이외에 알려진 바가 없으며, 이것에 대한 참고 서적이거나 연구 결과도 거의 없는 실정이다.

이런 사항에 대한 지식 및 경험 부족으로 열교환기 표면이 종종 심하게 축적물에 오염되어, 수트 블로잉 시스템을 계속해서 작동시켜야 하거나, 또는 결국 시스템을 정지시켜 사람 손으로 직접 클리닝을 해야 하는 지경에까지 이르게 된다. 이런 경우 열효율의 손실뿐만 아니라 수트 블로워 (soot blower) 작동을 위한 공기나 증기의 손실, 그리고 오염된 축적물로 야기된 압력강하 현상이 시스템 효율을 떨어뜨리게 된다.

시스템효율이 향상되면 열효율의 증가로 인하여 전체 열동력 시스템의 오염물질 배출 (pollutant emissions)도 더불어 감소하는 효과가 된다. 따라서 시스템 효율 향상뿐만 아니라 오염물질 배출 감소도 전열 표면을 깨끗하게 유지시킴에 따른 결과라는 것을 알 수 있으며, 이는 열교환기 표면 축적물 제거에 수반되는 이론의 이해와 제트류가 교환기 표면을 지날 때의 복잡한 유체역학적 지식의 유무에 달려있다고 하겠다.

본 연구에서는 열교환기의 열전달 표면을 분석이 가

능한 평행 평판형으로 채택하여 전열 표면에 모의 축적물을 축적시킨 후 여러 가지의 유체역학적 변수를 다양하게 적용시켜 파울링된 표면이 클리닝되는 현상을 다각적으로 분석하고, 적용된 데이터를 이론식과 비교하여 타당성을 검토하였다. 따라서 수트 블로잉을 위해 사용되는 노즐의 압력, 전열면과의 거리, 분사속도 등의 최적변수를 찾아 효과적인 클리닝을 위한 요구조건을 정확히 분석하여 이를 기초자료로 사용할 수 있다. 실제 열교환기 표면이 워낙 복잡하기 때문에 우선 간단한 구조의 실험부터 시작하여 구해진 실험 데이터를 바탕으로 점점 복잡한 구조로의 적용가능성도 타진해 볼 수 있으리라 사료된다.

재료 및 방법

클리닝 과정의 중요한 변수는 가장 유효한 클리닝 면적과 제트류가 축적물을 제거위해 필요한 체류시간 (dwell time)이다. 열교환기를 오염시키고 또 클리닝하기 위한 새로운 장치가 필요하므로 추후 만들 수 있는 실험 장치를 설계하였다. 제한된 실험실 내에서 큰 규모의 석탄 연소 장치를 만들어 내는 것은 불가능하기 때문에, 그 대신 출력을 120 kW까지 낼 수 있는 가스 연소 버너와 열교환기 표면을 수 시간 만에 오염시킬 수 있는 부속장치를 디자인하였다. Fig. 1은 이를 위하여 만들어질 실험 장치를 나타낸다.

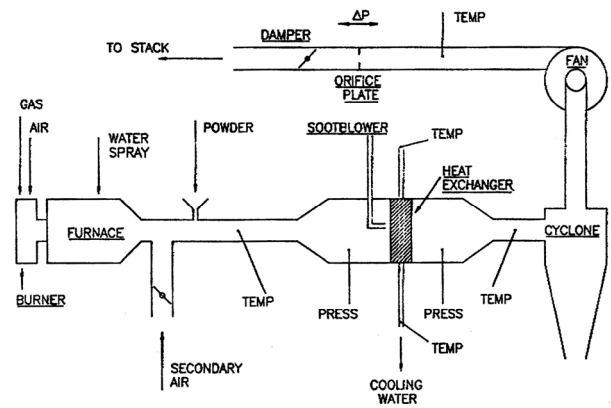


Fig. 1. Deposition and soot blowing rig.

본 연구에서는 우선 일차적으로 열교환기의 복잡한 관군에서의 축적물 클리닝을 위한 연구의 시초가 되는 평탄한 평면에 얇게 축적물이 오염되어 있을 때 이를

고압의 제트로 분사시켜 클리닝하는 것에 초점을 맞추었다. 노즐에서의 공기 제트 분사는 표면에 축적된 오염물을 제거하는데 가장 많이 사용되는 방법이다. 고압 제트가 제트 분사 방향에 직각 또는 경사각을 가진 표면에 충돌했을 시, 충돌점을 중심으로 평면에 수직하게 흘러나가는 유체의 유동에 대한 사항은 지금까지 많은 연구 자료가 있으나, 표면에 균일하게 분포되어 있는 얇은 막에 충돌했을 때의 유체흐름 상태와 표면막의 변화에 대한 연구는 거의 없다. 그러므로 표면에 축적된 오염물의 제거가 노즐의 분사압력, 표면에서 노즐까지의 거리, 오염물의 물성치 등에 따라 어떻게 변화하는지 분석해 보는 것은 매우 흥미로운 일이다.

Fig. 2는 주어진 노즐의 변수에 따라 클리닝되는 면적을 측정하기 위한 장치로서 본 연구의 데이터 분석에 사용되었으며, 차후 Fig. 1에서 보여준 바와 같이 수트 블로워 노즐에 사용 되어 오염시킨 열교환기 표면에 장착될 것이다.

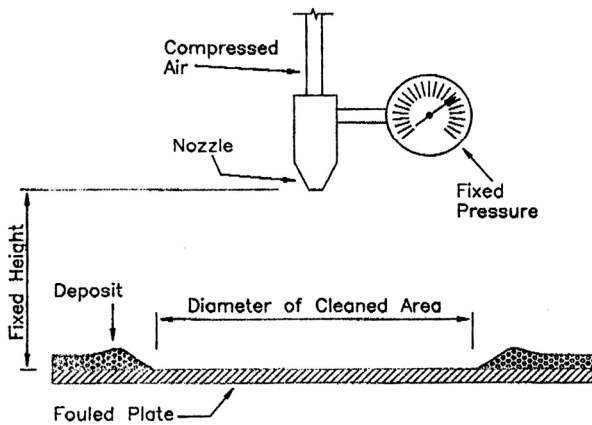


Fig. 2. Deposition test rig.

공기분사에 의한 오염물의 제거는 분사된 공기제트가 표면에 축적된 오염물과는 전혀 화학적인 반응을 하지 않기 때문에 오로지 물리적인 반응에 의해서만 제거된다고 할 수 있다. 즉, 제트가 평판벽 표면에 충돌되어 충돌점을 중심으로 표면에 평행하게 흘러가면서 제트류의 전단력 (shear force)과 압력에 의해 오염물은 제거되기 시작한다. 물론 효과적인 오염물의 제거는 오염물의 화학적인 분석을 기초로 하여 오염물을 쉽게 용해시킬 수 있는 액체나 기체로 제거를 용이하게 하는 방법도 생각해 볼 수 있으나 이는 경제적인 측면과 환경

오염 문제를 생각하였을 때 거의 고려되지 않는다.

오염물이 제거되어 나가는 것에 대한 관계식은 식품 산업 연구 자료에 간혹 볼 수 있으나 이는 전적으로 많은 실험에 의한 경험식에 지나지 않는다. 왜냐하면 대상 표면의 기하학적 상태, 오염물의 성질, 주위 온도 등에 따라 매우 복잡하여 이론적인 분석이 거의 불가능하기 때문이다.

파울링 재료는 Table 1에서 보는 바와 같은 물성치를 가진 오일과 입자 크기가 180~355 μm 사이에 있는 모래를 중량 비율 (sand/oil)이 3인 혼합체를 사용하였으며, 리오미터 (rheometer)를 사용하여 전단력 테스트를 실시하였다. 낮은 속도에서 높은 속도로 회전수를 증가시켰을 때의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이는 높은 속도에서 낮은 속도로 회전시켰을 때의 결과와 별반 차이를 보이지 않았다.

Fig. 3에서의 데이터를 이용하여 기기의 매뉴얼에 있는 대로 산출 식을 적용하면 주어진 혼합체의 점성 계수 (dynamic viscosity)는 약 120 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 으로 계산되었다.

Table 1. Typical physical characteristics of oil

Density at 15°C (kg/l)	0.886
Flash point (°C)	197
Pour point (°C)	-26
Kinematic viscosity at 40°C (cSt)	111.0
at 100°C (cSt)	14.8
Sulphate ash (Wt. %)	1.2

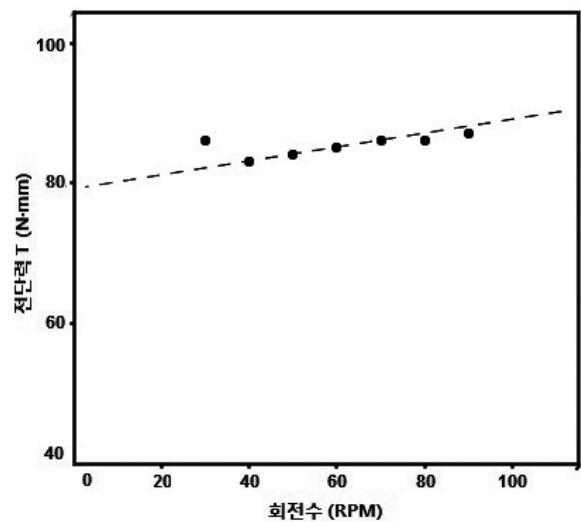


Fig. 3. Shear force index T vs. rpm of rheometer.

파울링 재료는 Fig. 4와 같이 특별히 제작된 장치를 사용하였다. 알루미늄 평판에 각각 파울링 두께를 변화시키며 균일하게 분포되도록 하고 알루미늄 실험판에는 가로 세로 0.5 cm의 격자선을 그려 노즐에서 제트류가 분사됨에 따라 클리닝되는 현상을 분석하였다. 이 장치를 이용하여 제트류 중심에 맞춰진 실험판 원점에서의 클리닝 반경, 두께, 그리고 이에 따른 클리닝 면적을 계산할 수 있었다.

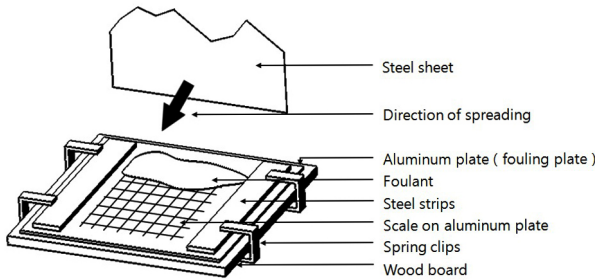


Fig. 4. Apparatus used to obtain a uniformly fouled plate.

노즐에서 분사되는 제트류의 속도는 다음 식으로 구할 수 있다 (Massey and Wardsmith, 2006)

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1) \left(\frac{V}{a} \right)^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

여기서 P_0 는 스테그네이션 압력 (stagnation pressure), P 는 정압력 (static pressure), γ 는 공기의 비열비, V 는 노즐에서 분사되는 제트류의 속도, 그리고 a 는 음속을 나타낸다. P_0 와 P 는 각각 피토 튜브 (Pitot tube)에 연결된 압력을 나타내며 절대압력 (absolute pressure)을 사용하였다. 압축 펌프 라인에서의 주 압력을 변경시켜 가며 노즐에 연결된 피토 튜브로 스테그네이션 압력과 정압력을 측정하여 각 경우마다의 제트류 속도를 산출하였다 (Potter, 2009; Crowe, 2005).

Fig. 4의 장치를 사용하여 평판으로 이루어진 시험판에 파울링 재료의 두께를 mm단위로 변화시키며 실험을 진행하였으며, 시험판 중앙에서 노즐 팁까지의 거리도 단계적으로 변화시키며 각 경우에 대한 클리닝율을 분석하였다. 시험판 위에 축적된 파울링 재료는 노즐이 분사되는 시험판의 정 중앙에서부터 시간이 지남에 따

라 클리닝 반경이 증가하기 때문에, 클리닝 두께 및 클리닝 반경과 클리닝 면적을 분사압력 및 제트류 속도를 변화시키기에 따른 시간의 함수로 분석하였다.

따라서 시험에 사용한 변수들을 다음과 같이 요약될 수 있다. 분사압력 및 제트류 속도의 변화, 시험판에 축적된 파울링 재료의 두께의 변화, 시험판의 중앙에서 노즐팁까지의 거리 변화, 그리고 노즐에서 분사되는 제트류의 분사 시간 변화 등이다.

클리닝 분석을 위하여 다음과 같은 이론식이 사용되었다. 클리닝시 파울러트의 잔존막의 크기는 시간의 함수로 표시될 수 있으므로 파울러트가 축적된 검사판의 관심 영역에서의 파울러트 막 두께의 평균치는 다음 식에 의하여 계산될 수 있다 (Yeckel and Middleman, 1987)

$$\bar{h} = \frac{2}{r_w^2} \int_0^{r_w} r h dr \quad (2)$$

$$\frac{1}{h^*} = 1 + t^* \quad (3)$$

여기서, \bar{h} 는 파울러트 막의 평균 두께, r_w 는 시험 초기 입혀진 시험판의 파울러트의 반경을 나타낸다. 무차원 변수인 \bar{h}^* 와 t^* 는 다음과 같이 정의된다. 즉, \bar{h}^* 는 무차원 파울러트 막 두께의 평균치이고 t^* 는 무차원 시간이다.

$$\bar{h}^* = \frac{h}{h_0} \quad (4)$$

$$t^* = \frac{0.089 \rho \nu^{0.2} U_j^{1.8} h_0 t}{\mu_f r_w^{1.2}} \quad (5)$$

여기서, h_0 는 초기 파울러트 막의 두께, ρ 는 공기의 밀도, ν 는 공기의 동점성계수 (kinematic viscosity), U_j 는 제트류의 속도, t 는 시간, 그리고 μ_f 는 파울러트 막의 동점성 계수를 나타낸다.

위에 주어진 식을 이론식으로 하여 여러 가지 변수로 변화를 주어 각각 실험을 실시하여 각각의 경우에 대한 데이터를 도출하였다.

결과 및 고찰

앞서 설명한 바와 같이 각각 다양한 변수를 적용해 가며 실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 무차원 시간과 무차원 두께의 관계식이다. 제트속도 U_j 가 38 m/s인 경우를 사용하여 실험을 진행하였다. 이는 제트류의 속도가 높지 않은 경우의 결과로서, 실험 데이터는 이론식이 보여주는 라인에 비해 대체로 약간 낮은 곳에 위치하고 있다.

각각의 경우, 실험을 행할 때마다 정상 상태에서 실험을 실시하였으나, 파울링 재료 및 모래 입자 크기의 미세한 변화에 의한 혼합체 상태의 미묘한 차이, 시험판에 파울러트를 축적시킨 후 정상 상태로 도달할 때까지의 실험을 시작하는 시간의 차이 등의 변화가 존재한다. 특히 시험판과 파울러트간의 접촉성이 시험판 세트마다 조금씩 차이를 보여 분사지속시간 (dwell time)이 길어짐에 따라 축적물로 사용된 혼합물의 건조 및 분리 현상이 오차를 증가시킨 것으로 사료된다. 따라서 이로 인한 오차가 상존하며, 각각의 실험 세트 시도 때마다 약간의 데이터 취득 오차에 기인하여 차이를 보이지만, 이론식과 대체적으로 같은 흐름으로 움직이는 것을 확인할 수 있었다.

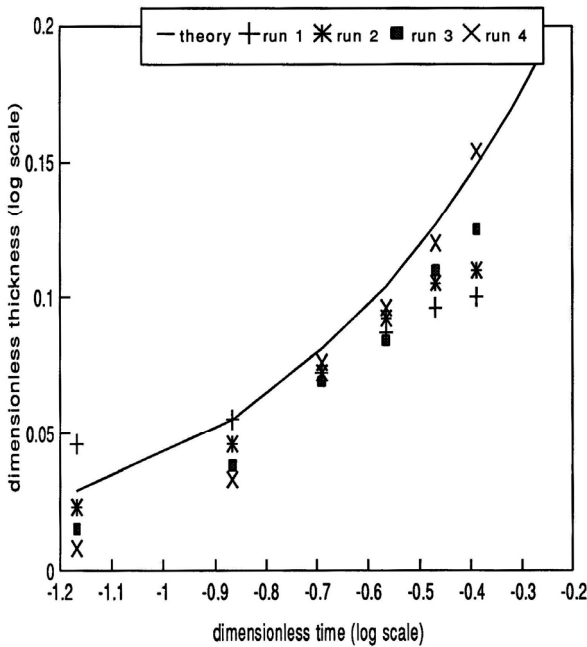


Fig. 5. Thickness vs. time at $U_j=38$ m/s.

Fig. 6는 제트 속도를 48 m/s로 증가시켰을 경우의 그래프이다. 시간이 증가함에 따라 데이터가 이론식에서 좀 더 멀어지며 산발 형태로 흩어짐을 보이고 있다. 이는 Fig. 5의 경우와 같은 이유에서 발생하는 것으로 생각된다. 즉, 제트 속도가 상대적으로 고속인 경우, 제트류의 분사 시간이 길어지면 시험편위의 파울러트의 건조 현상이 저속에 비하여 커서 좀 더 큰 오차가 발생하는 것으로 사료된다. 차후 더욱 정확한 실험을 위해서는 실험판 위에 파울러트 재료를 축적시킨 후 이를 고온 오븐에 넣어 선 처리하여 파울러트 재료와 실험판간의 밀착도를 조정하여 실험하는 것도 하나의 방법일 수 있으나, 현실적으로 그러한 상태를 만들어 실험하는 것이 불가능하였다. 실제 연소로 내의 열교환기에 부착되는 파울링의 표면 접촉도를 생각해 보았을 때 시험판을 그러한 형태로 처리하여 실험하는 것이 합당하겠으나, 이는 차후 Fig. 1에서 보여준 실험 장치를 구축한 후 가능하리라 사료된다.

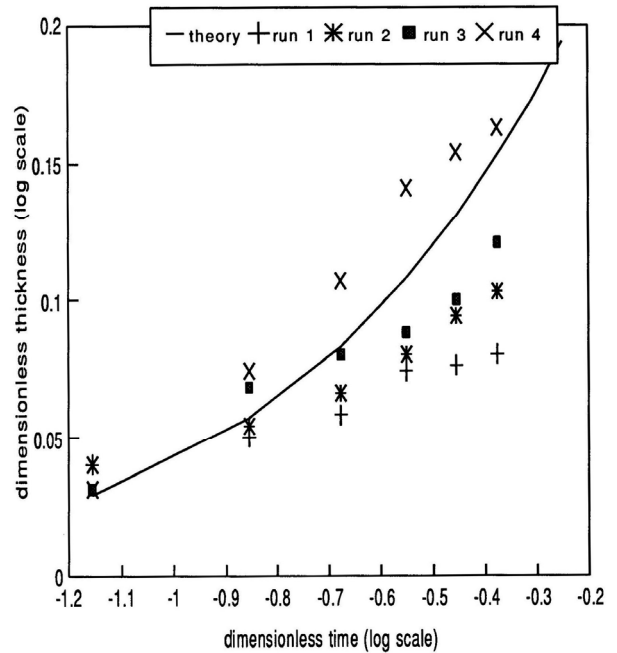


Fig. 6. Thickness vs. time at $U_j=48$ m/s.

Fig. 7은 무차원 시간과 무차원 클리닝율을 표시하고 있으며 U_j 가 38 m/s인 경우를 나타내었다. 이론식과 데이터가 비교적 유사한 형태를 보이고 있다.

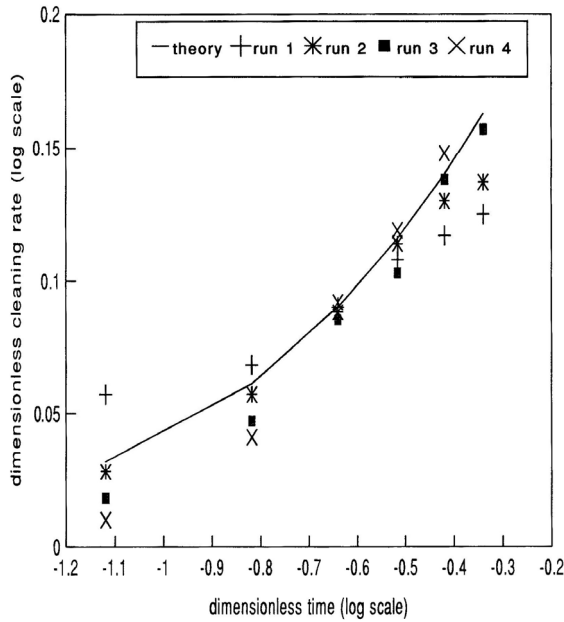
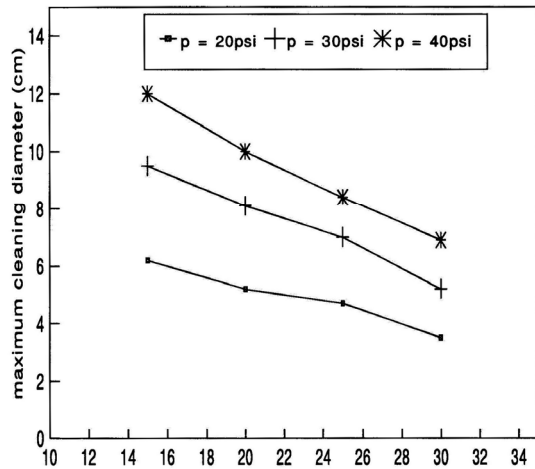


Fig. 7. Time vs. cleaning rate at $U_j=38$ m/s.



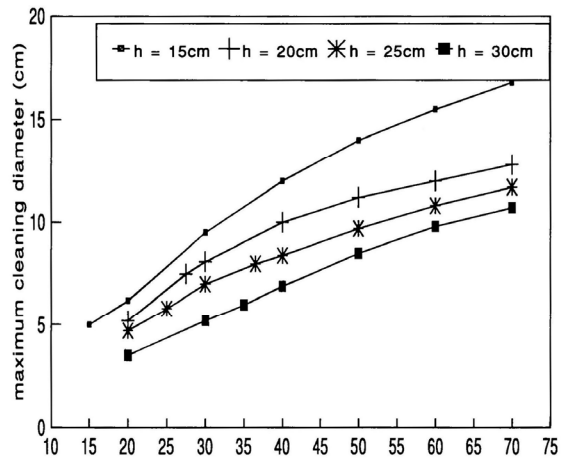
p = 20psi	6.2	5.2	4.7	3.5
p = 30psi	9.5	8.1	7	5.2
p = 40psi	12	10	8.4	6.9
	height (cm)			

Fig. 8. Maximum cleaning diameter vs. nozzle height at the same pressure each.

Fig. 8은 모래와 오일을 중량 기준 3:1로 혼합한 파울런트를 분사 압력을 변화시키며 클리닝했을 때의 그래프이다. 노즐 팁과 시험판과의 거리가 멀어짐에 따라 클리닝 반경이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 세 가지의 경우 감소하는 율이 비슷하게 나타나고 있다. 따라서

클리닝이 원활하게 되기 위해서는 분사 압력에 상관없이 시험판을 적정 거리 이내로 유지시켜야 함을 알 수 있다.

Fig. 9는 노즐과의 거리를 고정시키고 분사 압력을 증가시켜 가며 클리닝한 것을 나타내었다. 네 가지 경우의 거리를 사용하였으며 그래프에서 보듯이 압력이 증가함에 따라 클리닝 반경은 늘어났으나 증가율은 점점 감소하고 있다. 하지만 거리가 15 cm로 가까울 때는 타 경우에 비하여 압력의 증가에 따른 반경 증가와 반경 증가율이 더 높은 값으로 나타나는 것을 알 수 있다.



h = 15cm	5	6.2		9.5			12	14	15.5	16.8
h = 20cm		5.2		7.5	8.1		10	11.2	12	12.8
h = 25cm		4.7	5.8		7		8.4	9.7	10.8	11.7
h = 30cm		3.5			5.2	6		6.9	8.5	9.8
	pressure (psig)									

Fig. 9. Maximum cleaning diameter vs. pressure with variable nozzle height.

다양한 변수로 실험을 실시한 결과의 데이터를 분석해 보면 제트 속도의 상한선은 약 50 m/s, 분사 시간은 약 3분 이내, 그리고 시험판 중앙 위에서 노즐 팁까지의 거리의 상한선은 약 25 cm까지가 적당하였으며, 각 변수의 상한선까지의 결과가 이론식과 비교적 잘 일치하였다. 그 이유에 대한 분석은 차후 더 연구해 보아야 할 과제라고 생각된다.

결론

시험편 위에 모래와 오일의 혼합체로 이루어진 파울런트를 축적시켜 분사압력 및 제트류 속도의 변화, 시

시험판에 축적된 파울링 재료의 두께의 변화, 시험판의 중앙에서 노즐 팁까지의 거리 변화, 그리고 노즐에서 분사되는 제트류의 분사 시간 변화 등을 변수로 하여 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 제트류의 속도는 38 m/s의 경우와 48 m/s의 경우에 대한 결과를 분석한 결과, 저속의 경우가 고속의 경우에 비하여 이론식에 근접함을 보였다. 이는 제트류가 고속으로 분사될 때 분사 지속시간 (dwell time)이 길어짐에 따라 축적물로 사용된 혼합물의 건조 및 분리현상에 의한 오차의 발생으로 여겨진다. 제트류의 속도는 본 연구시 50 m/s 이상은 분석하지 않았다. 시험판 위에서 분사 압력을 변화시키며 클리닝했을 때, 노즐 팁과 시험판과의 거리가 멀어질수록 클리닝 반경이 줄어들었으며 압력 변화를 세 가지 경우로 실험하였을 때 거리 증가에 의한 감소율이 비슷하게 나타났다. 클리닝 반경은 압력이 증가함에 따라 늘어났으나 클리닝 증가율은 점점 감소하였다. 본 연구에서의 각 변수에 대한 상한선은 제트류 속도의 경우 약 50 m/s, 분사 시간은 약 3 분 이내, 그리고 시험판과 노즐 팁과의 거리는 약 25 cm 정도였으며, 각 변수의 상한선까지의 결과가 이론식과 비교적 잘 일치하였다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2014년)에 의하여 연구되었음

References

- Bott TR. 1990. Fouling notebook. I Chem Eng, 25-45.
- Chilukuri R, Aeling D and Middleman S. 1984. Removal of a thin liquid film from a flat surface using an axisymmetric impinging jet. J Fluids Eng 106, 223-226.
- Cleaver JW. 1992. Hydrodynamic removal of a deformable foulant. Technical Report. University of Liverpool, U.K., 1-13.
- Crowe CT. 2005. Engineering fluid mechanics. John Wiley & Sons, Singapore, pp. 35-89.
- Massey BS and Wardsmith AJ. 2006. Mechanics of fluids. Taylor & Francis Group., U.S.A., pp. 76-135.
- Mott RL. 2006. Applied fluid mechanics. Prentice Hall, New Jersey, U.S.A., pp. 121-189.
- Potter MC. 2009. Fluid mechanics demystified. McGraw-Hill, New York, U.S.A., pp. 55-110.
- Yeckel A, Middleman S and Klumb LA. 1990. The removal of thin liquid films from periodically grooved surfaces by an impinging jet. Chem Eng Comm 96, 69-79.
- Yeckel A and Middleman S. 1987. Removal of a viscous film from a rigid plane surface by an impinging jet. Chem Eng Comm 50, 165-175.

2015. 9. 30 Received

2015. 11. 05 Revised

2015. 11. 05 Accepted