

VOC 소각 및 연소가스 재 순환 에나멜 도장장치 개발

정남조·유인수·유상필·송광섭
한국에너지기술연구원

Development of a Enamel Coating Machine Typed VOC Incineration and Flue Gas Recirculation

Nam Jo Jeong, Ryou In Su, Sang Phil Yu and Kwang Sup Song
Korea Institute of Energy Research

요 약

에나멜 도장장치의 건조 과정에서는 유해한 VOC가 다량 배출된다. 이 VOC 가스는 촉매연소를 통해 완전 소각될 수 있으며, 소각되는 과정에서 발생된 열은 공정에 다시 사용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 기술적 특성을 이용하여 환경개선과 에너지 절감 효과가 뛰어난 에나멜 도장장치를 개발하였다. 이를 위한 기초 연구로서 촉매의 VOC 가스에 대한 연소 특성 및 성능 평가와 수치해석이 수행되었다. 연구 결과에 의하면, 고온에서 VOC에 대한 금속 촉매 품의 성능은 우수한 것으로 나타났으며, 건조 과정이 효율적으로 진행되기 위해서는 재 순환 가스 공급량 및 건조 가스 흡입량의 정밀한 조절이 가능한 구조로 설계되어야 함을 보여 주었다.

Abstract — A lot of VOCs that is noxious are exhausted at drying process of enamel coating device. This VOC gas can be incinerated perfectly through catalytic combustion, and heat that is occurred in incineration process can be again used in drying process. By using VOC catalytic combustion technology, in this study, we developed a enamel coating machine that have an excellent environment improvement and energy saving effects. As basic research for this development, characteristics and performance of catalytic combustion for VOC gas was evaluated and numerical analysis for drying oven was calculated. According to the results, VOCs combustion characteristics of metal form catalysis was excellent in high temperature, and it was seen that enamel coating machine should be designed as a precious controllable structure of recirculating supply rate and suction rate.

1. 서론

동선 에나멜 도장(코팅) 장치는 전동기, 변압기 등에 사용되고 있는 에나멜 동선을 만드는 기계로서, 에나멜 도장장치를 이용하여 전기 전도체인 동선에 도료(바니쉬)를 일정한 두께로 도포하고 전기가열 또는 열풍 간접가열 방식을 이용하여 도료에 들어있는 용제를 제거하여 폴리에스테르, 폴리우레탄, 폴리에스테리미드 등과 같은 수지를 피복하여 동선이 절연되도록 해준다. 이 과정에서 인체에 유해한 다량의 VOC가 건조공기와 함께 배출된다. 에나멜 도장장치의 구성은 동선의 공급장치(Supply Device), 동선의 전처리 장치(Pre-Annealer), 동선에 도료를 일정하게 공급하기 위한 장치(Applicator)와 바니쉬 탱크(Vanish Tank), 동선에 입혀진 도료를 건조시키는 오븐(Oven), 수지가 도포된 동선을 감기 위한 선결이 장치(Line Connecting Device)와 권취기(Wind-up Machine) 및 전체 시스템을 조절하기 위한 제어판(Control System) 등으로 구성된다.

에나멜 도장장치에 대한 연구는 이탈리아와 일본 등지에서 주로 많은 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 건조속도를 증대시키면서 제품의 코팅 질을 향상시킬 수 있도록 장치의 구조를 개선하는데 기술 개발의 초점이 맞춰지고 있다. 그러나 국내에서는 외국에서 제작된 장치를 그대로 수입하거나 재래식 장치를 사용하는 정도의 기술 수준에 머물러 있는 형편이다. 그러므로 중국 등과 같은 동남아 국가에서 에나멜 도장장치에 대한 기술수요가 급증하고 있는 현 상황에서 기술 개발에 의한 수출 효과를 증대시키고, 국내 에나멜 도장산업의 자체 기술 수급을 현실화하기 위해서는 국내 독자 모델 개발이 어느 때 보다도 절실하다.

본 연구는 에나멜 도장장치에서 건조과정 중에 발생하는 유해한 VOC 가스를 촉매 연소 방식을 이용하여 완전 소각하고 이 과정에서 얻은 열과 연소가스를 다시 건조용 가스로서 사용할 수 있는 VOC 회수/이용형 고 효율 에나멜 도장 장치에 대한 설계 및 제작 기술을 제공하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 고온에서 VOC를 처리할 수 있는 촉매 및 촉매 지지체에 대한 연소 특성과 성능을 평가하고, 최적의 건조 조건을 만족시킬 수 있는 구조를 구성하기 위해 다양한 조건에 대한 수치해석을 수행하여 장치의 설계 및 제작에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 반응실험 및 수치해석 결과

2.1. 하니컴 촉매($Pt/\gamma-Al_2O_3$)체에 대한 VOC 반응 특성 실험

Fig. 1은 반응특성분석 장치에 대한 공정도를 나타낸다. 공기는 4~6 atm의 압축 공기를 사용하며, MFC(Mass Flow Controller)에 의해 조절된다. 공기는 1kW의 히터에 의해 가열된 후에 촉매 반응기 내부로 유입된다. 모사 VOC용 용액을 공급하는 실린지

는 액체상태의 물질이 들어있는 피스톤을 일정한 속도로 압축하여 얇은 주사기를 통해 혼합기로 유입시키는 방식으로 작동한다. 배기 가스는 sampling unit에서 수분을 제거한 뒤 분석기에서 측정하였다. 연소촉매로는 코티어라이트 하니컴(200cpi)에 백금이 담지된 촉매체를 사용하였으며, 백금의 담지량은 0.5wt%(하니컴 기준)로 하였으며, 기존에 소형 반응 특성 분석을 위해 주로 이용된 분말 형태를 배제하고 하니컴에 담지한 촉매를 사용하였다. 촉매체의 크기는 $20 \times 20 \times 50 \text{ mm}^3$ 로 하였다.

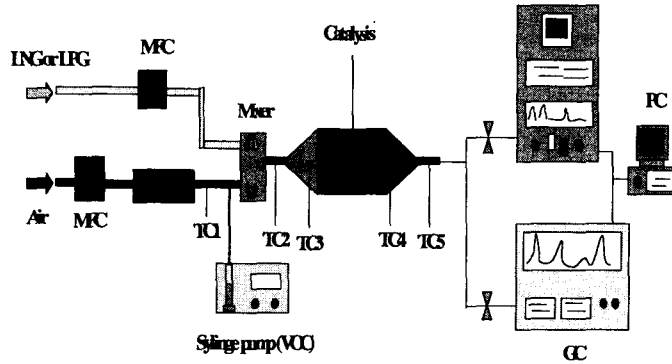
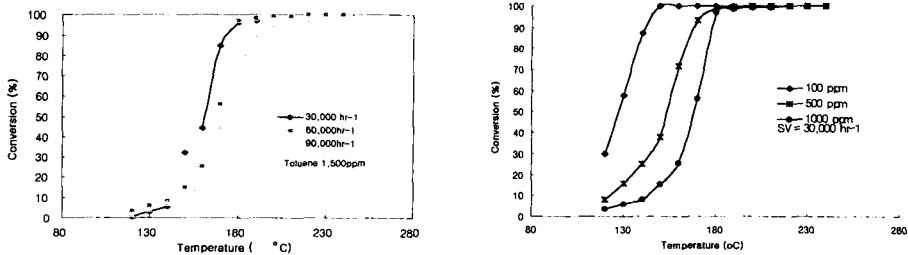


Fig. 1. Flow diagram of reactor

Fig. 2의 (a)는 톨루엔을 사용하여 제조한 모사 VOC를 사용하여 예열 공기와 혼합된 혼합가스의 농도가 1500 ppm인 경우에 대한 공간속도의 변화에 따른 연소 반응성 및 전환율을 나타낸다. 공간속도가 증가할수록 완전 연소에 필요한 예열 온도가 상승하는 것으로 나타남을 알 수 있으며, 이것은 농도의 변화에 대한 실험결과와 일치한다. 톨루엔의 농도가 1,500 ppm 이며, 공간속도가 $60,000 \text{ hr}^{-1}$ 인 경우에 완전연소를 얻기 위해서는 250°C 정도로 예열 해야 함을 알 수 있다.



(a) Concentration = 1,500ppm

(b) SV = 30,000 hr⁻¹

Fig. 2. Characteristic of catalytic combustion for toluene

(b)는 혼합가스의 공간속도가 $30,000 \text{ hr}^{-1}$ 인 조건에서 농도에 따른 연소 반응성 및 전환율을 나타낸다. 120°C 정도에서 연소반응이 개시됨을 알 수 있고, 완전 연소온도는 농도가 증가함에 따라 상승함을 알 수 있다. 즉, 모사VOC 농도가 100 ppm 인 경우에는 유입되는 가스를 150°C 정도로 예열 하여도 완전연소가 일어나지만, 농도가 $1,000 \text{ ppm}$ 인 경우에는 200°C 에서 완전 연소되었다.

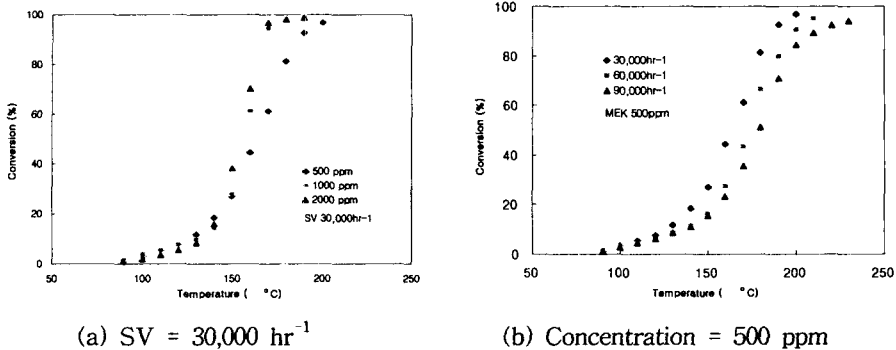


Fig. 3. Characteristic of catalytic combustion for MEK

Fig. 3의 (a)는 모사 VOC의 공간속도를 $30,000 \text{ hr}^{-1}$ 인 조건으로 하고, MEK의 농도를 변화시키면서 농도변화에 따른 연소 반응성 및 전환율을 측정하였다. 농도가 500 ppm 인 경우 모사VOC의 예열 온도가 100°C 부근에서 연소가 시작되어 160°C 에서 급격한 반응 특성을 보이며 200°C 전후에서 대부분이 완전 연소된 것을 알 수 있다. 그러나 모사가스 중에 MEK 농도가 높아짐에 따라 전환율이 빠르게 증가함을 알 수 있다. 즉, T_{10} (전환율이 10%되는 온도)의 경우에는 농도가 낮을수록 낮은 온도가 얻어지는 반면, T_{50} (전환율이 50%되는 온도)의 경우에는 농도가 높을수록 낮은 온도가 얻어진다. 대부분의 경우 농도가 증가함에 따라 높은 온도에서 같은 전환율을 보이는데, MEK의 경우 약간 다르게 나타나고 있다.

(b)는 MEK의 농도가 500 ppm 인 경우에 대하여 공간속도에 따른 연소 반응성 및 전환율을 나타낸다. 톨루엔과 마찬가지로 공간속도가 증가할수록 완전 연소에 필요한 예열 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 백금촉매 상에서 MEK로 만든 VOC는 100°C 이하에서도 촉매연소반응이 개시됨을 확인할 수 있었다. 촉매연소반응의 개시온도는 톨루엔과 차이가 없었지만, 반응온도의 증가에 따른 전환율은 톨루엔에 비해 상대적으로 낮음을 알 수 있었다. 공간속도가 $30,000 \text{ hr}^{-1}$ 인 경우 톨루엔의 50%의 전환율(T_{50}) 온도는 150°C 전후인 반면, MEK는 160°C 전후에서 T_{50} (50%의 전환율온도)이 나타남을 알 수 있었다. 공간속도가 $60,000 \text{ hr}^{-1}$ 인 경우에도 톨루엔의 경우 T_{50} 이 160°C 전후인 반면, MEK는 165°C 전후에서 T_{50} 을 보인다. 또한 완전 연소가 되는 온도 또한 MEK의 경우에서 더욱 높게 나타남을 알 수 있었다.

2.2. 금속 촉매(Pd-Pt/ γ - Al_2O_3)체에 대한 VOC 반응 특성 실험

건조오븐의 제작과 더불어 가열부(전기히터+촉매체)의 스펙을 제작하기에 앞서 사용하고자 하는 촉매의 VOC에 대한 연소특성 및 장기성능 테스트를 수행하였다. VOC로는 톨루엔 600ppm으로 제조된 표준가스를 사용하였으며, 실제 장치에 장착되어질 금속 촉매체 일부를 추출하여 마이크로 반응기에 설치한 다음 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 촉매체는 Pd이 주이고, Pt가 소량 담지된 촉매체를 사용하였다. Fig. 4는 본 실험 장치의 흐름도를 나타낸다.

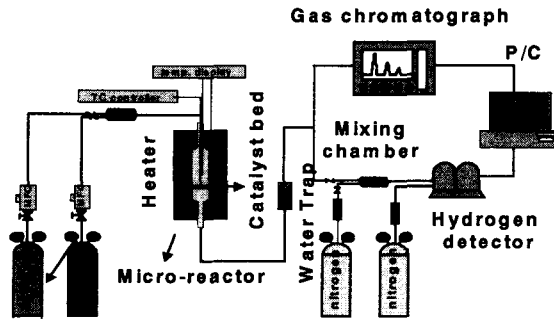


Fig. 4. Flow diagram of reactor

Fig. 5는 금속 폼 형태 촉매의 VOC 연소 특성을 알아보기 위하여 가열 온도에 대한 톨루엔의 연소 전환율을 측정된 결과를 나타낸다. 실험을 위해 사용된 톨루엔의 농도는 600ppm이었으며, 반응기에 유입된 전체 유량은 공기와 톨루엔의 혼합가스가 $SV=15,000hr^{-1}$ 에 만족하도록 공급하였다. 촉매는 그 부피가 지름이 25mm이고 높이가 8mm이며 공극률이 70% 정도가 되도록 장착하였다.

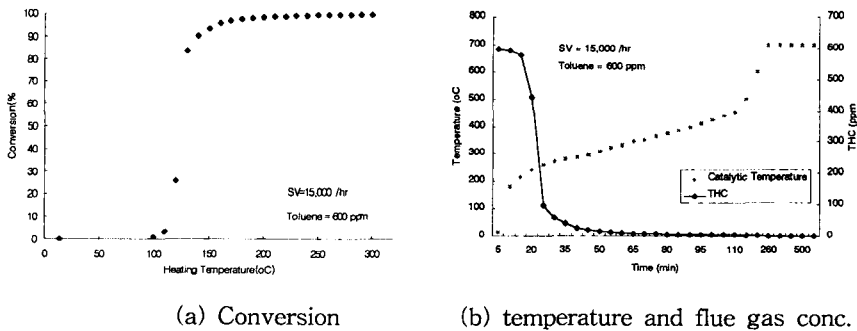


Fig. 5. Combustion characteristic of Catalysis Pd-Pt/ γ - Al_2O_3 for toluene

결과에서 마이크로 반응기의 가열 온도가 130°C 정도에서 활성이 급격히 증가하면서 150°C 부근에서부터는 점차 안정된 형태로 연소가 진행되어 300°C에 이르면 거의 완전 연소되고 있음을 알 수 있었다. 그러므로 실제 에나멜 코팅 장치의 작업 중 촉매층에서의 온도가 최고 450°C 정도임을 감안한다면, 본 실험 촉매를 통해 VOC에 대한 연소 성능이 우수할 것으로 보인다.

2.3. 수치해석

에나멜 도장 장치의 설계 및 제작에 앞서 가장 바람직한 시스템의 구조와 운전 조건을 도출하기 위한 자료를 얻기 위하여 장치에 대한 수치해석을 수행하였다. 특히 장치의 핵심 부분이라고 할 수 있는 건조기 부분에 대한 계산을 집중적으로 하여 건조기 내부의 구조에 따른 유동과 온도 분포가 실제 코팅 과정에서 동선의 표면에 코팅된 물질을 건조하는데 어떠한 영향을 미치는지에 대해 예측하였다. Fig. 6은 건조기에 대한 격자 생성 및 경계조건을 나타낸다. 해석을 위한 격자의 수는 150,000개이고, 경계조건은 입구조건, 압력경계조건, 벽조건 그리고 흡입 조건이 사용되었다. 지배방정식으로는 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 그리고 난류 운동·소실 에너지 방정식을 사용하여 비압축성 정상상태에 대한 해를 얻었으며, 실제 촉매에서의 화학반응은 고려하지 않았다.

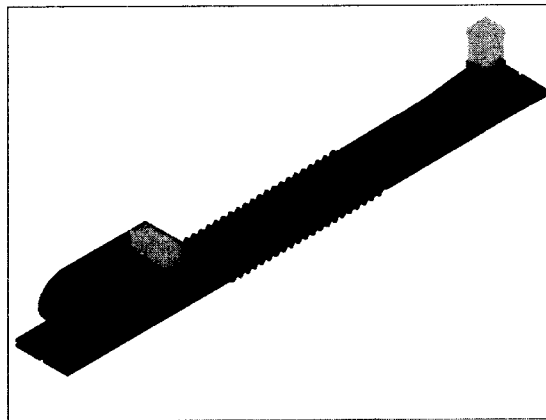


Fig. 6. Mesh generation and B.C

Fig. 7은 건조기 부분에 주름 모양의 구조가 있는 경우와 없는 경우에 대한 건조기 내부의 온도와 압력 분포를 나타낸다. 계산에 적용된 순환 혼합가스의 양은 1,350Nm³/hr이고, 압력경계조건에서 dP=0이다. (a)와 (b)는 주름 구조가 없는 경우이고, (c)와 (d)는 있는 경우이다.

(a)와 (c)에서 주름 구조의 영향으로 순환공기의 초기 유입부에서의 온도 분포가 상당히 균일해졌으며, 특히 각 채널의 수직 상·하 부분에서 온도 편차가 많이 감소되어 동선 표면에 코팅된 에나멜 액의 균일한 건조가 가능 할 것으로 예측된다.

그러나 (b)와 (d)를 보면 상대적으로 주름 구조 부분에 많은 압력 손실이 발생하고 있어, 송풍기의 풍압을 결정하는데 고려되어야 할 요인으로 나타났으며, 주름부에서의 압력 손실로 인해 송풍기에 의한 흡입량이 각 채널에 따라 다르게 유지될 수 있을 것으로 예측되어 유량 조절 밸브 등의 별도 장치가 부착되어야 할 것으로 보인다.

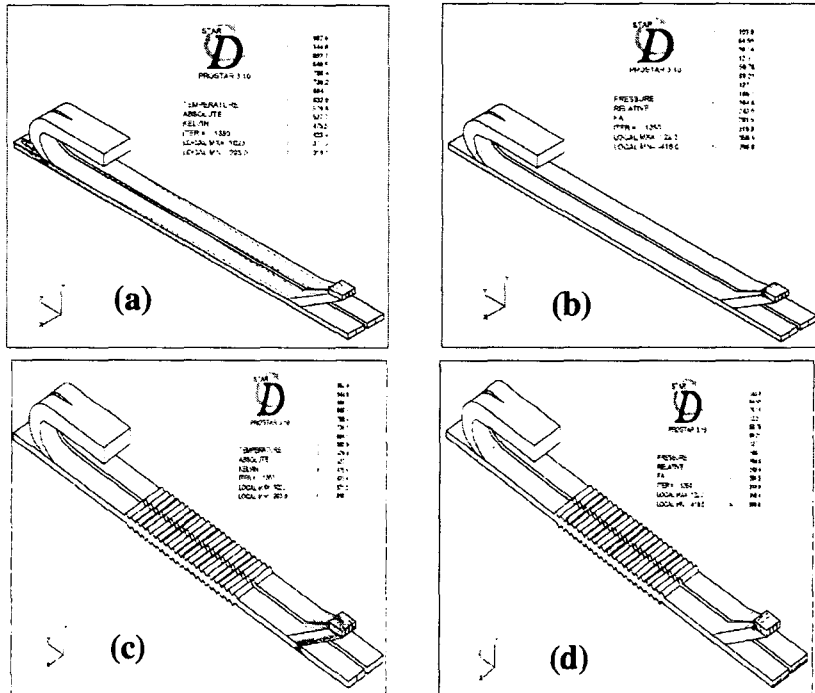


Fig. 7. Temperature and pressure distribution at dry zone

Fig. 8은 송풍기의 놓임 위치에 따른 혼합가스의 흐름 형상을 예측한 결과이다. (a)에서 (d)까지는 경계조건의 값이 $dP=0$ 으로 설정하여 놓임 각도에 의한 영향을 비교하였으며, (e)는 (a)와 동일한 놓임 각도에서 후단에 촉매체 및 전기히터가 설치될 경우의 압력 손실을 고려하여 $dP=100\text{mmAq}$ 로 설정하여 계산하였다. (a)와 (e)는 송풍기의 놓임 각도가 0도이면서 어느 정도 유도관을 지난 이후에 확관되는 형태이며, (c)는 유도관 없이 바로 확관되는 형태로 구성하였다. (b)는 22도 그리고 (d)는 8도로 구성하였다.

(a)에서 (d)까지의 결과로부터 송풍기의 놓임 각도가 0도이면서 유도관 이후 확관 구

조가 있는 경우에서 재 순환 영역이 가장 적게 발생하였으며, 실제 후단에 촉매체와 전기 히터가 장착될 경우 이 재 순환 영역은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 여전히 상부와 하부에서의 속도 차이가 발생하고 있으므로, 실제 장치에서의 전기히터 제어는 상부와 하부를 각각 다른 존으로 구분하여 조절함으로써 전기히터의 수명을 연장시키고 안정된 제어를 할 수 있을 것으로 예측되었다.

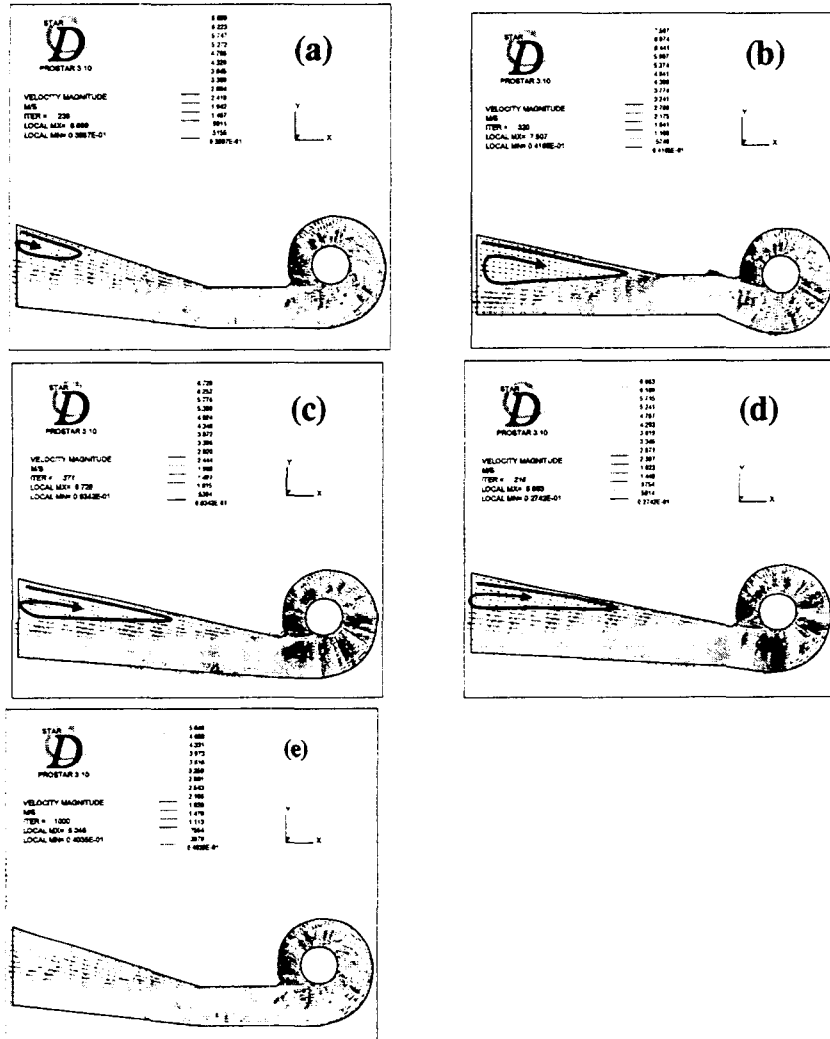


Fig. 8. Streamline of mixing gas as blower position angle

3. 결 론

1. 세라믹 하니컴 구조의 촉매체(Pt/v-Al₂O₃)에 대한 톨루엔과 MEK의 연소특성에서 MEK가 톨루엔에 비해 반응 속도는 더 빠르나 완전 연소에 필요한 반응기 온도는 더 높았다.
2. 금속 폼 형태의 촉매체(Pd-Pt/v-Al₂O₃)에서의 톨루엔 반응 특성을 분석한 결과 300°C 미만의 온도에서 모든 톨루엔이 완전 연소되어, 작업 온도가 450°C인 실제 장치에서 우수한 소각 성능을 보일 것으로 나타났다.
3. 에나멜 도장장치의 건조부를 주름 구조로 구성할 경우 강한 난류장이 형성되어 건조기 내부의 온도를 균일하게 하고 건조 성능을 향상시킬 것으로 예측되었다.
4. 반면 주름 구조는 건조부에 많은 압력 손실을 발생시켜 각 채널에서 송풍기에 의해 흡입되는 양과 동선의 유입구에서 자연 흡입되는 양을 불균일하게 만들어 동일한 건조 상태를 저해할 수 있으므로 별도의 조절 장치가 요구되는 것으로 나타났다.
5. 송풍기는 놓임 각도가 0도인 경우에 가장 바람직한 유동장을 보였으나, 상·하단의 속도 차이가 여전히 크게 나타나고 있어 전기히터를 상하로 분리 제어하는 것이 바람직한 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 환경부의 2002~2003 환경기술개발사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) G.J.K. Acres, "Platinum catalysis for the control of air pollution, The elimination of organic fume by catalytic combustion", *Platinum Metals Rev*, 14, 2, 1970
- (2) Horvath et al. "Plant for Producing Enameled Wire Using an Inline Process", *US Patent*, No.4365790, Dec.28, 1982
- (3) K. Chandrasekharan and P. H. Calderbank, "Kinetics of the catalytic air-oxidation of σ -Xylene measured in a tube-wall-catalytic reactor", *Chemical Engineering Science*, Vol. 6, pp. 172, Aug. 1987
- (4) DEA TECH MACHINERY S.p.A., "Enameling Oven for Wire Materials", *European Patent Application*, No.0770842A1, Feb.5, 1992
- (5) M.A.Palazzolo and B.A. Tichenor, "Destruction of Volatile Organic Compounds via catalytic incineration", *Environmental Progress*, Vol. 17, pp. 349-358, 1993
- (6) J.Hermia and S.Vigneron, "Catalytic incineration for odour abatement", *Catalysis Today*, Vol. 17, pp. 349-358, 1993
- (7) DEA TECH MACHINERY S.p.A., "에나멜동선도장장치", *Japan Patent*, No.5-225840, 1993년09월03일