

실험계획을 통한 자동차 촉매 소성 공정의 생산성 향상과 안정성 증대 연구

정철규*·이창호*
*인하대학교 산업경영공학과

A Study on the Improvement in Productivity and Safetiness for Calcination Process of Automotive Catalyst by Using Design of Experiment

Chule-kyou Jung*·Chang-Ho Lee*
*Department of Industrial Engineering, INHA University

Abstract

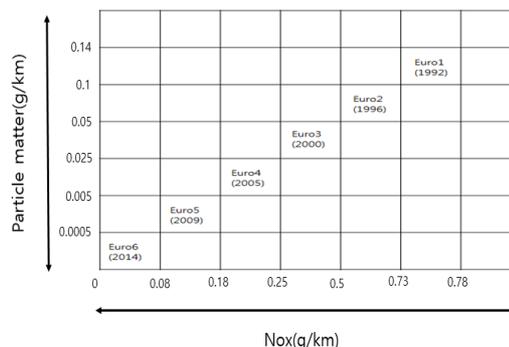
The diesel engine generate many pollutants such as PM(Particulate matter) and NOx(Nitrogen oxide). So the SCR(Selective catalytic reduction) must be required to meet the emission standard. The SCR catalyst market is growing rapidly, and the automobile markets using alternative energy sources are growing rapidly. This study deals with optimization of the calcination process the manufacturing process of SCR catalyst to be competitive.

The calcination process is a bottleneck and it is required to optimize productivity and accept to be safety, But we cannot trade off anything in terms of safety. We applied DOE(Design of experiments) among many research methods performed in various fields. In order to achieve quality and productivity optimization. The dependent variables in the DOE were selected as NO Conversion(%). The independent variables were selected as the calcination temperature, soaking time and fan speed RPM. the CCD(Central composite designs) constructs response surface using the data onto experience and finds optimum levels within the fitted response surfaces. Our tests are our stability guarantee and efficient together with operation.

Keywords : DOE, CCD, Productivity, Safety

1. 서론

배출가스 규제는 오염물질인 일산화탄소(CO, Carbon Monoxide), 질소산화물(NOx, Nitrogen Oxide), 탄화수소(HC, Hydrocarbon), 입자상물질(PM, Particulate matter), 입자상 물질 수(PN, Particulate Number) 등을 규제하는 기준이다. 아래 [Figure 1]은 유럽 배출가스 기준이다.



†Corresponding Author : Chang-Ho Lee, Professor, INHA UNIVERSITY, 100, inha-ro, Nam-gu, Incheon,
E-mail: lch5601@inha.ac.kr

Received February 18, 2019; Revision Received March 20, 2019; Accepted March 25, 2019.

[Figure 1] EU emissions standard

디젤 기관은 가솔린 기관에 비해 이산화탄소 배출량이 적고 열효율이 높아 자동차 및 여러 산업에서 많이 사용하는 에너지원이다.[1] 하지만 입자상 물질(PM, Particulate matter) 및 질소산화물(NOx, Nitrogen oxide)과 같은 오염물질이 많이 배출된다. 배출가스의 오염물질에 대한 규제는 시간이 지날수록 점점 강화되고 있다. 특히 디젤 내연기관의 환경 규제에 대응하기 위해 가장 필요한 기술로 평가되고 있는 SCR은 반드시 적용이 필요한 것으로 연구에서 언급된다. [2],[3]

이러한 환경 속에서 디젤기관의 규제를 만족하는 데에 필요한 SCR 촉매 시장 규모는 2020년까지 약 10배 이상 시장이 증가할 것으로 예측된다.

반면 환경이슈 및 대체 에너지를 사용하는 친환경 자동차 수의 증가 및 화학제품, 고온의 에너지를 사용하는 화학공장의 안전 및 위험성은 불확실한 위험 요인이다.

화학공장 사고는 발생하면 사업장 자체는 물론이고 주변지역 까지 큰 피해를 가져오는 특징을 가지고 있다. 대형화, 복잡화를 추구하는 현대 기술의 특성상 화학공정 설비의 중대산업사고로 인한 위험성은 더욱 커지고 있다.[4]

이러한 변화 속에서 기업은 생존하기 위해 환경변화에 대응하고 고객의 만족을 목표로 하는 품질, 생산성, 안전의 확보가 필요하다.[5]

이에 본 연구에서는 촉매 제조공정의 기업 경쟁력 확보를 위한 촉매 제조 공정의 품질, 생산성 및 안전성 향상을 위한 연구를 진행하였고 연구를 수행하는 데 있어서 여러 가지 생산성 및 품질 향상 기법을 고려하여 가장 적합한 방법 활용을 통해 생산성 및 품질 향상을 이루는 것을 연구의 목적으로 두고 있다.

2. 이론적 배경

2.1 실험계획법(DOE, Design of experiments)

실험계획법이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대한 많은 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다. 실험계획법은 영국의 통계학자 R. A. Fisher가 농장에서 작물 수확에 영향을 주는 주요 인자를 연구하려는 방법으로 구체화하였다.[6]

실험인자와 반응과의 관계에 대한 이해도가 높고 중요한 실험인자를 알고 있는 경우라면 최적해를 구하기 위한 실험을 할 수 있다. 최적해는 소수의 중요한 인자들로 독립변수(인자)와 종속변수(반응)의 관계를 보다 세밀하게 분석할 수 있는 곡선 반응을 만들고 등고선분석 등을 통해 구한다.

2.2 요인배치법

요인배치법(FD, Factorial design)은 각각의 설계변수들의 수준을 일정한 간격으로 배치한 실험계획법이다. 설계변수의 개수가 k 이며 수준의 수가 n 인 경우 n^k 요인배치법이라고 한다. 각 설계변수 마다 2개의 주효과, 1개의 교호작용을 알 수 있으며 총 4번의 실험이 필요하다. 2^k 요인배치법은 선형반응에는 효율적이지만 반응의 곡률을 감지할 수 없기 때문에 그 활용이 한정되어 있다.

2^3 요인배치법은 3개의 요인, 2인자 교호작용, 1개의 3인자 교호작용을 가지며 8번의 실험을 해야 한다. 이렇게 인자의 수가 증가하면 요인배치법은 설계변수의 개수가 증가함에 따라 실험횟수가 급격히 많아지기 때문에 비효율적이다.[7]

2.3 CCD

중심합성계획법은 요인배치법의 단점을 보완하고 효율성을 높이기 위해 2^k 요인배치법에 중심점과 축점을 추가시킨 형태의 실험계획법이다.

반응변수인 y 가 독립변수 x_1, x_2 와 함수관계이고, 관심 영역에 있는 임의의 독립변수들의 값 x_1, x_2 에서의 반응변수의 모평균을 η 식(1)이라고 표현한다.

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (1)$$

최적조건은 인자가 x_1, x_2 인 경우 일반적으로 곡면을 나타내는 식

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2)$$

에 대하여

$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = 0$ 을 동시에 만족하는 점 x_1, x_2 를 반응표면의 정상점(Stationary point)이라 부르는데 편미분하여 영으로 놓고 풀어서 얻어 진 (x_1, x_2) 의 점을 정상점이라고 하며, 이 점은 다음의 세 가지 중 하나이다.

① 최대점 : 모평균 η 를 최대로 하는 점 ② 최소점: 모평균 η 를 최소로 하는 점 ③ 안부점 : 모평균 η 를 방향에 따라 최대 또는 최소로 하는 점이다.

곡면을 나타내는 2차 반응표면 식을 행렬을 이용하여 표현하면

$$E(y) = \beta_0 + x'b + x'Bx \quad (3)$$

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{12} & \beta_{22} \end{pmatrix} \quad \text{와 같고, 이때 정}$$

상점을 구하면

$$x_0 = -\frac{1}{2} B^{-1}b \quad (B^{-1} \text{는 } B \text{의 역행렬이다})$$

정상점에서 반응표면의 최대, 최소, 또는 이외의 안부점을 가진다.

중심합성계획법은 각 설계변수마다 6개의 수준을 가지며 추출점의 수는 총 9개이다. 중심합성계획법은 요인배치법보다 더 많은 수준을 가지므로써 곡면반응을 좀 더 효과적으로 표현한다. 식(4)과 식(5)는 각 요인배치법과 중심합성법의 추출점의 수를 나타낸다.

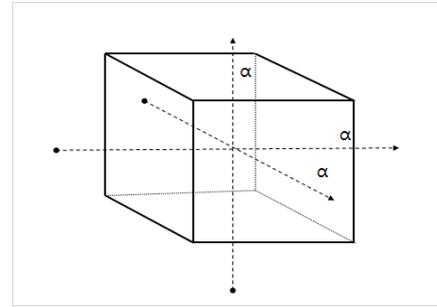
$$NS_{FD} = n^k \quad (4)$$

$$NS_{CCD} = 2^k + 2k + n_0 \quad (5)$$

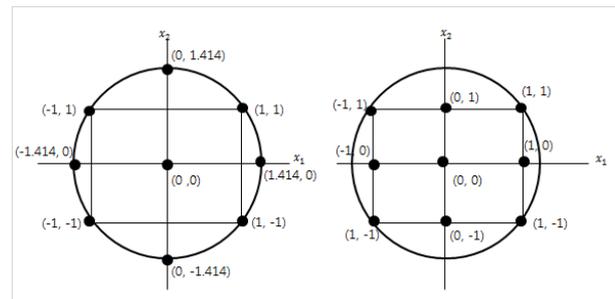
여기서 n_0 는 중심점의 수를 나타내며 최소 1개 이상이면 된다. 설계변수가 3개인 경우 3^k 요인배치법의 추출점의 수는 27개이다. 반면 중심합성계획법의 경우 2^3 요인 실험점, 중심점(Center point), 축점(Axial point) 추출점의 수가 15개($n_0 = 1$)이기 때문에 3^k 요인배치법보다 효율적이다.

중심합성계획이 [Figure 2]의 성질을 만족하기에 회전 가능 중심합성계획(rotatable CCD)이라 한다.

[Figure 3] 회전가능한 CCD의 또 다른 바람직한 성질은 원점에서의 \hat{y} 의 분산 크기와 원점에서 단위길이만큼 떨어진 독립변수들의 값에서의 \hat{y} 의 분산 크기를 같게 해 준다는 것이다.



[Figure 2] Central composite design for k=3 and $\alpha = \sqrt{3}$



[Figure 3] k=2, Rotatable Central composite design

실제로 계산해 보면 단위 구면체(Unit sphere) 내의 독립변수 값에서 추정된 \hat{y} 의 분산 크기가 거의 동일하므로 이러한 실험설계를 균등정밀 실험계획(uniform precision design)이라 하고, <Table 1>에 주어진 중심합성계획을 균등정밀 중심합성계획(precision CCD)이라 한다.[8]

<Table 1> Unifrom precision design

k	2	3	4	5	6	7	8
F	4	8	16	16	32	64	128
n_α	4	6	8	10	12	14	16
n_0	5	6	7	6	9	14	20
α	1.414	1.682	2.000	2.000	2.378	2.828	3.364

2.4 유사 연구 분석

박석준, 이철위, 정필조의 “NO의 선택적 촉매 환원반응에 대한 Co/ZSM-5의 조성 조건에 따른 안전성에 관한 연구”에서 코발트(Co, Cobalt)의 이온교환율이 낮은 SCR은 고온 산화 분위기에서 안정하였지만, 코발트가 과량으로 담지된 경우에는 제올라이트 격자 내부 또는 표면에 존재하는 코발트 산화물로 인하여 촉매 특성이 변한다는 것을 연구하였다.

이러한 촉매가 실용화되려면 고온 다습한 조건에서도

활성을 잃지 않고 오랫동안 유지되어야 하는데, 촉매에 활성과 안정성은 촉매를 이루고 있는 화학 종류와 그들의 상대적인 양에 따라 결정된다.

이 연구는 촉매의 노화 과정을 이해하고 안전성을 개선하려는 연구의 일환으로서 산화질소(NO)의 선택적 촉매 환원반응에서 소성시간에 따른 촉매의 활성과 안정성에 대하여 관심을 가졌다. 따라서 연구에서는 코발트의 담지량 및 소성 온도와 시간에 따른 연구를 하였다.

활성 금속 이온이 담지된 촉매는 적절한 조건에서 소성 시킴으로써 활성을 가지게 되는데, 촉매의 활성도와 안정성은 소성조건의 영향을 받으므로 해당 연구에서는 소성의 영향을 살펴보았다.

연구 결과 소성을 오래 시킨 시료일수록 NO_x 전환율은 현저히 감소하며 최대 NO_x 전환율은 1시간 소성시킨 시료가 63%, 9시간 소성시킨 시료가 18%를 보여 주었다. 최대 활성은 400~450°C에서 관찰되었다.

소성 시간이 증가할수록 프로판 산화 활성도가 증가한 이유는 제올라이트 세공 내 또는 외부 표면에 존재하는 여분의 코발트가 산화물로 전환되어 이 산화물에 의하여 프로판 산화 반응이 촉진되었다고 분석하였다. [9]

본 연구에서는 앞의 진행된 연구 결과를 바탕으로 금속 제올라이트 촉매인 SCR의 선택적 촉매 환원 반응에서의 소성 조건 최적화를 통한 품질 및 생산성 향상 연구를 진행하였다.

동일한 금속 물질이 사용된 SCR 촉매를 대상으로 제품으로 개발된 정량의 금속이 담지된 자동차 촉매 제품을 대상으로 진행하였다.

실제 제품 양산 소성 공정을 최적화 기법으로 도출된 최적 조건을 통해 NO_x 전환율이 최대가 되는 조건을 도출하였다.

기존 연구와 다른 점은 일정 온도 구간에서의 NO_x 전환율의 결과가 높은 구간 범위를 찾는 연구가 아닌 본 연구에서는 실험계획법을 통해 NO_x 전환율이 최대가 되는 점을 찾아 품질 및 생산성이 최적화를 할 수 있는 조건을 수립하는 것을 목적으로 하였다.

3. 실험계획과 결과분석

3.1 요인과 수준 선정

소성 공정은 불필요한 이온이나 제조과정에서 들어간 결합제, 윤활제 등을 제거하고 제품의 기계적 강도를 주는 과정 및 활성 상태가 형성되는 공정이다.

본 연구의 개선 대상 소성 공정은 해당 제품의 소성로에

서 규정 온도 900°C에서 노출 시간 60분 이상을 규정으로 제품을 생산하고 있다.

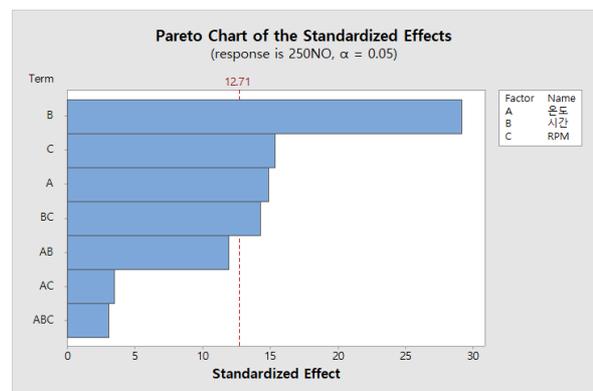
이러한 소성 조건은 양산 설비에 최적화된 것이 아닌 연구·개발 설비에서의 평가 조건으로 최적화가 아닌 연구소 랩 평가에 통해서 설정된 공정 규정이다.

반응값(종속변수)은 촉매의 활성(NO Conversion) 평가 항목 결과 2가지로 망대 특성의 반응 값으로 선정하였다. 450°C NO Conversion(%)과 250°C NO Conversion(%)이다.

설계변수(독립변수)는 반응 값에 영향을 주는 소성 공정의 해당 설비인 소성로 제어인자로 소성 온도, 소성 시간, 공급 RPM으로 선정하였다. 제어인자를 3인자로 선택한 이유는 해당 공정에서 설비를 제어하는 인자는 언급된 3가지가 전부이다.

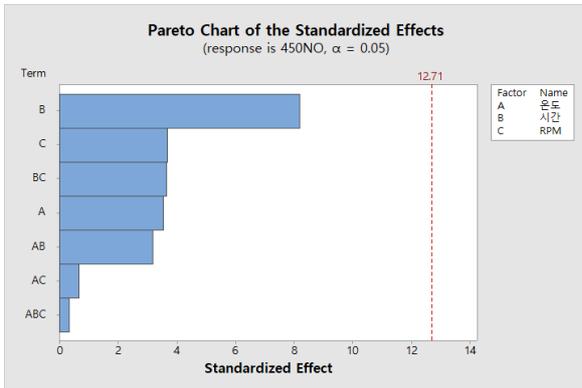
3.2 요인과 수준 선정

실험결과를 분석한 결과, 250°C NO Conversion(%)의 경우 [Figure 4]의 표준화된 효과의 파레토 차트는 12.71의 기준선을 벗어나는 B(시간), C(RPM), A(온도), B*C(시간*RPM)의 효과는 유의수준($\alpha=0.05$)에서 유의하다. 아래 [Figure 4]의 표준화된 효과의 파레토 차트에 나타난 12.71의 점선 경우 잔차에 의한 실험의 오차가 계산할 수 없을 때 그래프로 인자들의 효과가 통계적으로 유의한지를 판단할 수 있게 해준다. 즉 점선 라인보다 큰 값을 갖는 인자의 효과는 $\alpha=0.05$ 에서 유의한 것으로 판단하면 된다.

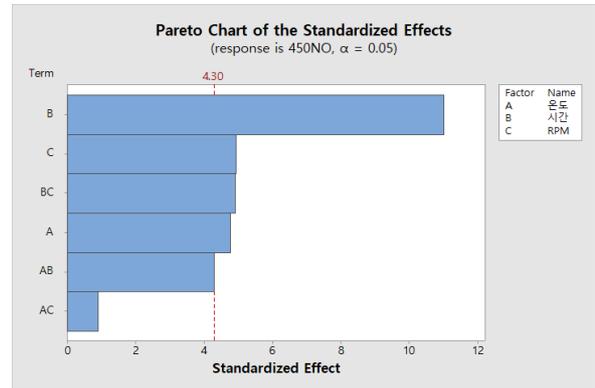


[Figure 4] Pareto Cart of the (250°C NO Conversion (%))

반대로 450°C NO Conversion(%)은 [Figure 5]의 표준화된 효과의 파레토 차트의 결과 12.71의 기준선을 벗어나는 인자들이 없다. 즉 유의한 인자들이 없는 결과를 얻게 되었다.



[Figure 5] Pareto Cart of the Standardized Effects(450°C NO Conversion(%))

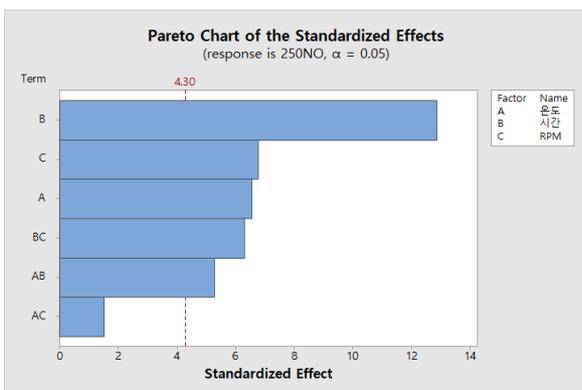


[Figure 7] Pareto Cart of the Standardized Effects after three factor interactions pooling (450°C NO Conversion(%))

3.3 교호작용 풀링 후 분석 결과

3인자 교호작용(A*B*C, 온도*시간*RPM)을 풀링 한 후 재분석하였다.

[Figure 6] 250°C NO Conversion(%)의 표준화된 효과의 파레토 차트에서 4.30의 기준선을 벗어나는 B(시간), C(RPM), A(온도), B*C(시간*RPM)의 효과는 유의수준($\alpha=0.05$)에서 유의한 결과를 얻었다. [Figure 6]에서 250°C NO Conversion(%)의 표준화된 효과의 정규확률 플롯 결과 역시 동일한 인자의 유의 수준을 나타내었다.



[Figure 6] Pareto Cart of the Standardized Effects after three factor interactions pooling (250°C NO Conversion(%))

450°C NO Conversion(%)은 풀링 전 모든 인자가 유의하지 않은 수준이었다. 하지만 3인자 교호작용 풀링 후 재분석 결과는 [Figure 7]에서와 같이 450°C NO Conversion(%) 표준화된 효과의 파레토 차트에서 결과에서 4.30의 점선인 기준선을 벗어나는 B(시간), C(RPM), B*C(시간*RPM) A(온도)의 효과는 유의수준($\alpha=0.05$)에서 유의하다는 결과를 얻었다.

3.4 중심합성계획법 결과 분석

250°C, 450°C NO Conversion(%)의 분산분석 결과를 보면, 2차 교호작용의 온도*RPM은 250°C NO Conversion(%)의 P-value가 0.751, 450°C NO Conversion(%)의 P-value가 0.639로 유의하지 않았다. 또한, 250°C NO Conversion(%)에서 적합성 결여(Lack-of-fit)는 0.045로 유의한 수준의 결과값이 나왔다. 적합성 결여가 유의한 수준의 결과는 실험을 통한 다항회귀모델이 반응모델을 설명하는 데 적합하지 않아서 발생하는 변동값이 크기 때문에 회귀모델을 신뢰할 수 없다는 결과이다 이 유의하지 않은 2차 교호작용을 풀링 한 후 재분석하였다.

풀링 후 재분석 한 결과 450°C NO Conversion(%)에서 적합성 결여의 P-value는 0.054로 유의하지 않으나, 250°C NO Conversion(%)에서 적합성 결여의 P-value는 0.044로 유의한 수준의 결과값이 나왔다. 따라서 다시 2차로 제거한 2차 교호작용 온도*시간 인자를 제거하지 않고 재투입하여 결과를 재분석하였다.

재분석 한 결과 두 결과 모두 적합성 결여는 유의하지 않으며, 블록, 선형식, 2차식은 유의한 결과를 얻었다.

예측 모델 결과는 250°C NO Conversion(%)의 회귀분석표에서 결정계수(R-Sq)는 92.71%, 수정 결정계수(R-Sq(Adj))는 83.60%이다.

450°C NO Conversion(%)의 회귀분석표에서 결정계수는 95.10%, 수정 결정계수는 88.97%이다.

결정계수의 경우 회귀분석의 결정계수로서 0~1의 사이 값을 가지며, 모델의 총 변동에서 회귀식에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율로 정의된다. 두 결과 값에 모두 충분히 만족한다. 또한, 수정 결정계수 역시 충분하다.

잔차분석을 통해 오차항에 대한 가정들을 확인하였다. 잔차의 정규확률도(Normal Probability Plot)의 경우 두 결과는 점들이 모두 직선을 벗어나지 않는다. 즉 정규분포를 벗어나지 않고 유의한 수준이다. 대적합지(Versus

Fits) 역시 0 근처에서 랜덤하게 흩어져 있다. 대순서 (Versus order) 또한 잔차가 0 근처에서 시간에 영향을 받지 않는 것으로 확인이 된다.

Residual Plots를 이용하여 모델의 오차항에 대한 항목들을 확인하였다. 결과적으로 구해진 모델 식은 실험이 정상적으로 이루어졌다는 것을 확인할 수 있다.

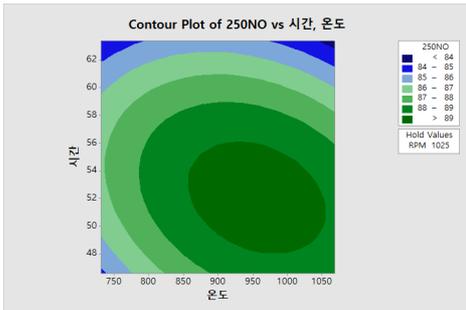
3.5 결과 분석 및 최적조건 수립

3.5.1 등고선도

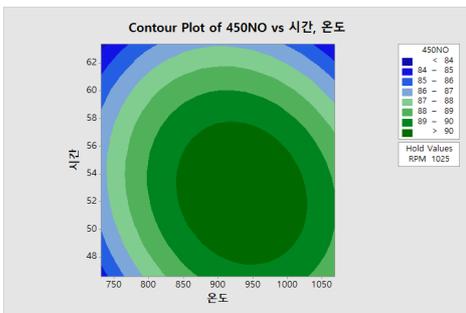
[Figure 8] 의 250℃ NO Conversion(%) 등고선도 결과를 분석해 보면 온도가 900~1050℃ 높아질수록 시간이 48~55분 영역에서 가장 높은 Conversion(%)의 결과를 보여준다.

[Figure 9]의 450℃ NO Conversion(%) 등고선도 분석 결과 역시 NOx Conversion이 온도 850~1025℃ 높아질수록 시간이 48~57분 영역에서 높은 전환율(%)의 결과를 보여준다.

[Figure 8]과 [Figure 9]에서 RPM의 경우 양산 공정의 설비 운전 조건을 고려하여 1025에 고정하여 분석을 진행하였다.



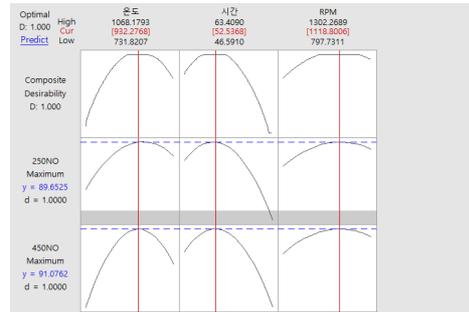
[Figure 8] Contour Plot (250 ℃ NO Conversion(%))



[Figure 9] Contour Plot (450 ℃ NO Conversion%)

[Figure 10]에서 최적반응도구의 최적 조건은 아래의 소성 온도 932.2768℃, 소성 시간 52.5358분, 1118.8006RPM에서 활성 값이 250℃ NO Conversion(%) 89.6226, 45

0℃ NO Conversion(%) 91.0762로 최적의 조건이 도출되었다.

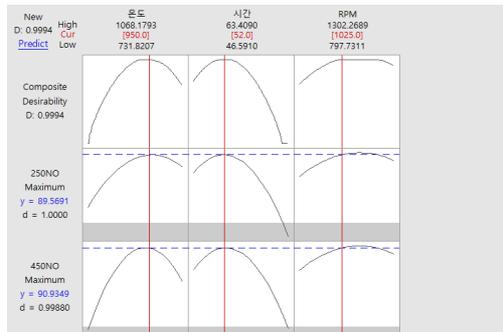


[Figure 10] Optimization Plot

하지만 실제 양산 공정에서 운영 가능한 조건의 값을 이용하여야 한다. 따라서 조건을 공정의 운영 조건과 여러 가지를 고려하여 [Figure 11]와 같이 변경하였다. 조건은 소성 온도 950℃, 소성 시간 52분, 1025 RPM 조건 시 예상되는 활성 값은 250℃ NO Conversion(%) 89.5691, 450℃ NO Conversion(%) 90.9349이며, 만족도(D)는 0.9994로 충분한 것으로 나타났다.

만족도(D)는 변수의 조합이 반응 변수에 대해 정의한 목표를 만족하는 정도를 표현한다. 만족도의 범위는 0에서 1까지이다. 1은 이상적인 경우를 나타내고, 0은 하나 이상의 반응이 허용 한계를 벗어난다는 것을 나타낸다. 즉 우리가 구한 최적 조건의 만족도(D)는 0.9994로 이상적인 상태이다.

자동차 촉매 제품 또한 다품종 소량 생산으로 인해 생산 라인에서 이러한 수요의 변화를 유연하게 대응하여야 한다. 이러한 상황 속에서 소성공정은 고온의 작업 조건을 다양한 제품별로 확인하고 온도 등 공정조건을 변경해야하는 작업환경으로 위험성이 존재하며, 작업자 또한 심리적 으로 불안정한 상태일 수 있다. 하지만 이번 연구를 통해 다른 동일 제품의 작업의 조건과 동일한 온도 조건에서 작업을 진행 할 수 있기 때문에 앞에서 언급한 위험성에 대한 리스크를 감소할 수 있는 기회가 되었다.



[Figure 11] Optimization Plot (Consider the equipment Operating Condition)

4. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구를 통해 얻은 최적 조건 적용 시 품질측면의 효과는 적용 전/후에 정화 능력 값은 유의한 수준으로 확인되었다. 즉 소성조건에서 오는 정화 능력의 품질적인 영향은 다른 주요 코팅량, 코팅물질 등의 주요 변수에서 오는 정화 능력 보다 작은 것으로 이전 연구들과 같이 확인되었다.

반면 생산성은 소성 공정의 촉매 설정 온도 노출 시간 기준으로 8분이 감소하였으며, 소성 전체 공정의 Cycle time을 기준으로 약 18%의 생산성을 향상할 수 있었다.

또한 여러 제품군의 소성온도를 타 제품과 동일한 조건에서 최적조건 도출을 통해 설비 작업조건의 변경 및 운영 조건, 환경의 변화 등으로 인한 작업자가 가지고 있는 심리적 불안감을 감소시킬 수 있었으며, 고온의 설비의 온도 조건의 잦은 변경을 통해 올 수 있는 작업자 및 기구적 위험에 대한 인자의 영향을 감소시킬 수 있게 되었다.

본 연구를 통하여 최적 조건 수립을 통한 생산성 및 안전성 향상의 결과를 얻을 수 있었다.

이번 결과를 통해 향후 추가로 연구가 진행된다면 품질측면의 촉매 제품 정화능력 기준 최대가 수준의 고려가 아닌 기존 정화능력의 유의수준 범위에서 생산성과 안전성을 더욱 높일 수 있는 최적 조건을 도출 한다면 생산성 측면으로 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

5. References

[1] Y.-C. Han, et al, (1998), "New edition of Internal Combustion Engine." 170~203, 249~272, 1998.
[2] Seungwon Park, et al, (2017), "Experimental Study

on Characteristics of NOX Reduction with Urea-Selective Catalytic Reduction System in Diesel Passenger Vehicle." Transactions of The Korean Society of Mechanical Engineers B, 41(4): 269-275
[3] S. Park(2016), "Worldwide RDE-NOX Investigation Status on Diesel Passenger Vehicles and Its Implication." KSAE Workshop
[4] J. B. Baek, J. W. Ko(1999), "A Study on the Establishment of Process safety Management(PSM) System for Small and Medium Size Chemical Plants." KIGAS, 3(1):8-13
[5] H. G. Chang, K. S. Kim(2004), "Effect of Quality Management on Production Performance of manufacturing company." Journal of the Korea Safety Management and Science, 6(1):229-249
[6] S. H. Park, J. W. Kim(2013), "Modern Design of Experiments Using MINITAB." Minyoungsa, 43(3):9-10, 453-466
[7] S. H. Park(1995), "Modern Design of Experiments." Minyoungsa, 547-554
[8] J. S. Park, D. J. Lee, J. B. Im(2005), "The Study for Construction of the Improved Optimization Algorithm by the Response Surface Method." Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 13(3):22-33
[9] Seok Joon Park, Chul Wee Lee, Paul Joe Chong(1997), "Calcination Effect on the Stability of Co/ZSM-5 for the Selective Catalytic Reduction of NO." Journal of the Korean Chemical Society, 41(6):324-328

저자 소개



정철규

순천향대학교 화학공학과 공학사 취득. 인하대학교 대학원 산업경영공학과 석사 취득. 현재 인하대학교 대학원 산업경영공학과 박사 과정 중.
관심분야 : SCM, 품질, 생산관리 등
주 소 : 인천광역시 남구 용현동 253, 인하대학교 산업공학과



이창호

인하대학교 산업공학과 학사 취득. 한국과학기술원 산업공학과 석사, 경영과학과 공학박사 취득. 현재 인하대학교 교수로 재직 중.
관심분야 : 물류, RFID, SCM 등
주 소 : 인천광역시 남구 용현동 253, 인하대학교 산업경영공학과