

## 대형 디젤기관에서 매연가스 예측에 관한 연구

백두성<sup>1\*</sup>, 이종선<sup>1</sup>

### Study on Smoke Prediction in Heavy-duty Diesel Engine

Doo-Sung Baik<sup>1\*</sup> and Jong-Sun Lee<sup>1</sup>

**요약** 대형디젤 기관에서 매연배기가스에 대한 배기가스 재순환장치의 영향을 KIVA-3V 전산유체해석코드를 통해서 수치 해석적으로 연구했다. 지배방정식으로 RNG  $k-\epsilon$  난류 모델을 이용했고, 부화, 벽 침투 그리고 매연 등의 물리적인 현상을 나타내기 위해서 TAB, Wave, Watkins-Park, Nagle-Strickland 모델이 적용되었다.

**Abstract** The effects of exhaust gas recirculation (EGR) on smoke emissions in heavy duty diesel engine are numerically studied by using KIVA-3V CFD code. For the analysis, RNG  $k-\epsilon$  turbulence model was given as a governing equation, and mathematical models of Tab, Wave, Watkins-Park, Nagle-Strickland were applied to describe physical process of droplet breakup, atomization, wall impingement and smoke respectively.

**Key Words** : diesel engine(디젤기관), EGR(배기가스재순환), RNG  $k-\epsilon$  model(RNG  $k-\epsilon$  모델), wall impingement model (벽충돌모델), Nagle-Strickland model(Nagle-Strickland모델)

## 1. 서론

디젤기관의 높은 열효율, 고효율 및 내구성 등이 다른 기관에 비해 우수하기 때문에 상용차뿐만 아니라 여러 동력원으로 폭넓게 사용되고 있지만 최근 공해문제와 관련되어 배기가스에 대한 규제가 강화됨에 따라 여러가지 방법을 통해 대기오염 물질의 발생을 저감시키려는 지속적인 연구가 수행되고 있으며 이러한 저감방법중 EGR (Exhaust Gas Recirculation)은 후처리 기술에서 배기가스 중의 NOx를 저감하는 중요 기술로 인식되고 있지만 매연을 증가시키는 문제를 안고 있다[1].

디젤기관의 연소실에 분사된 액체 연료의 분무 과정은 연료제트의 미립화와 액적 분열현상은 디젤 연료분부의 증발, 공기와의 혼합, 자발화 및 연소과정에 영향을 미친다[2].

본 연구에서는 연료제트의 미립화 과정과 액적 분열 과정을 고려해 주기 위해 Reitz의 TAB model[3]를 사용하였다. 본 연구에서는 연료제트의 미립화 과정과 액적 분열과정을 고려해 주기 위해 Reitz의 TAB model[3]를 사용하였다. 탄화수소계(C12H26)연료처럼 분자량이 큰 탄화

수소계 연료에 대해서는 과도한 계산량의 요구 등으로 다차원 연소 유동장해석에 적용이 어렵기 때문에 Reduce kinetic mechanism을 이용한 탄화수소계 연료의 저온 영역 화학반응모델은 디젤의 점화지연 예측을 위해 필요하다.

본 연구에서는 분무 연소모델을 이용하여 디젤기관을 표현하였으며, 실험 전에 EGR을 적용한 대형 디젤기관의 연소실에서 일어나는 연소현상을 분석하기 위해 산소, 질소, 이산화탄소, 물의 질량분율을 변화시키면서 일정한 운전조건에서 연소 수치해석 프로그램인 KIVA-3V를 이용하여 EGR 율에 따른 매연을 예측하고자 하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식

가스상(gas phase)의 경우에 층류와 난류의 적용이 가능하고 난류일 때는 난류 속도 성분 때문에 전달계수의 크기와 형태가 층류일 때와 구분된다. 액상(fluid phase)은 분무 모델로서 표현되고 분무 입자들과 주변 가스와의 상호작용을 나타내는 분무 생성항을 지배방정식에 제

<sup>1</sup>대진대학교 컴퓨터응용기계설계공학과  
접수일 08년 4월 6일      수정일 08년 6월 24일

\*교신저자: 백두성(dsbaik@daejin.ac.kr)  
계재확정일 08년 8월 11일

공한다.

연소시에는 확산연소에 의한 난류 성분과 자연 발화에 의한 화학반응에 따른 생성항을 지배방정식에 제공한다. 운동방정식은 PGS(pressure gradient scaling) Method[4]와 연결되어 압력이 거의 균일한 저 마하수유동에 있어서 계산효율을 증대시킬 수 있게 되어있다.

[표 1] 수학적인 모델

Physical Process		Sub Model	
Spray		Standard spray model	
Drop drag		Droplet drag and distortion model	
Droplet breakup		Wave model	
Atomization		TAB model	
Wall impingement		Watkins-Park model	
Combustion		Hybrid model	
		Laminar flame	Arrhenius model
		Diffusion flame	Eddy breakup model
Emission	NOx	Extended Zeldo'vich	
	Smoke	Formation	Hiroyasu model
		Extinction	Nagle-Strickland model

지배방정식과  $k-\epsilon$ 방정식을 수정한 RNG  $k-\epsilon$ 방정식[5]은 Eulerian형태로 분무액적(droplets)은 Lagrangian 형태로 처리된다. 공간차분은 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)에 의해 계산영역을 직육면체 cells로 나누는 유한체적법[6]으로 이루어지며 압력구배 및 확산항은 Simple Algorithm에 의해 음해법으로, 대류항은 양해법으로 처리된다.

본 연구에 사용한 물리모델은 분무모델, 벽충돌모델, 연소모델은 층류영역에서는 Arrhenius모델, Eddy breakup모델을 연결한 Hybrid모델 등이 포함되고 매연모델로는 Hiroyasu model, Nagle-Strickland model을 포함하였다. 본 연구에 사용된 모델은 표 1과 같다.

2.2 분무연소모델

분무 현상을 수치적으로 묘사하기 위해서는 분무 액적이 겪는 미립화, 충돌유착, 난류와의 상호작용, 기화의 물리현상에 대한 이해가 필요하며 이 때 액적과 가스사이에서 질량, 운동량, 에너지의 교환을 고려해 주어야 한다. 분무의 계산은 존재하는 모든 개별 액적을 고려하여 정확한 결과를 얻을 수 있지만 계산량이 많아지는 단점이 있다. 여기에서는 계산을 단순화하기 위해서, 액적군의 집합을 하나의 Parcel로 간주하고 Parcel에 존재하는 액적군은 동일한 물리량(크기, 속도, 온도, 질량 등)을 갖는다

고 생각하는 Discrete method의 개념을 사용하였으며, 실제 계산에 있어서는 모든 액적군을 약 3000에서 5000개의 Parcel로 묶어서 계산하였다. 또한 액적이 겪는 여러 가지 현상을 분포함수를 따른다고 가정하고 무작위 추출하는 Monte Carlo method의 개념을 도입하였다[7].

2.2.1 액적 미립화모델 (TAB model)

디젤기관에서 일어나는 액적의 미립화에 대해서 TAB 모델[3]을 사용한다. TAB모델은 진동하고 변형되는 액적과 스프링-질량-감쇠계 사이의 상사성에 기초를 두고 있다. 스프링의 복원력은 액적의 표면장력, 질량에 작용하는 외력은 공기역학적인 힘, 감쇠력은 액체의 점성력에 각각 대응하는 것으로 표현하고 이 때 발생하는 변위  $x$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$m \ddot{x} = F - k_{spring}x - c\dot{x} \tag{1}$$

여기에서,  $m$ 은 계의 질량,  $x$ 는 변위,  $F$ 는 외력,  $k_{spring}$ 은 스프링 상수,  $c$ 는 점성감쇠계수를 의미한다. 질량이 움직이는 변위  $x$ 를 액적이 반경방향으로 변하는 변위에 대응시키고, 각 힘들의 상사성을 무차원계수  $C_F, C_k, C_c$ 를 사용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{External force} &: \frac{F}{m} = C_F \frac{\rho_g (u + u' - v)^2}{\rho_l r} \\ \text{Spring force} &: \frac{k_{spring}}{m} x = C_k \frac{\sigma}{\rho_l r^3} x \\ \text{Damping force} &: \frac{c}{m} \dot{x} = C_c \frac{\mu_c}{\rho_l r^2} \dot{x} \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하고 무차원수  $y = x / (C_b r)$ 을 도입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{y} = \frac{C_F \rho_g}{C_b \rho_l} \frac{(u + u' - v)^2}{r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{C_c \mu_c}{\rho_l r^2} \dot{y} \tag{3}$$

여기서, 무차원 계수  $C_F, C_k, C_c$ 는 충격파를 이용한 Nicolls실험[8]과 Lamb의 기본주파수 진동에 대한 이론적 결과[9]로부터  $C_F = 1/3, C_k = 8, C_c = 5$ 로 주어지고, 분열이 발생하는 조건을  $C_b = 1/2$ 로 가정하였다. Weber 수  $We$ 는 상대속도에 의한 관성력과 표면장력  $\sigma$ 의 비로 정의한다.

$$We = \frac{\rho_g (u + u' - v)^2 r}{\sigma} \tag{4}$$

점성에 의한 감쇠주기  $t_d$ 는

$$t_d = \frac{2}{5} \frac{\rho_d r^2}{\mu_l} \quad (5)$$

으로 주어지며,  $\mu_l$ 은 액적의 점성계수이다. 진동하는 액적의 진동수는 다음 식으로 구해진다.

$$\omega = \left( 8 \frac{\sigma}{\rho_d r^3} - \frac{1}{t_d^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

그리고  $y_0 = y(0) = 0$ 이며,  $\dot{y}_0 = \frac{d}{dt} y(0) = 0$ 의 초기조건을 의미한다.

TAB모델에서는 식(3)의 결과가  $y > 1$ 일 때 (즉,  $x > C_b \cdot r$ 일 때), 분열이 발생하는 것으로 표현된다. 분열후의 액적의 크기를 계산하기 위해서 계산 격자 안에 존재하는 모든 액적군의 체적의 합과 표면적 합의 비로 정의하는 SMR(Sauter Mean Radius)의 개념을 도입하였다.

$$SMR = \frac{\sum_i r_i^3}{\sum_i r_i^2} \quad (7)$$

분열 후 액적의 SMR은 분열전의 진동에너지, 표면장력에 의한 에너지 그리고 변형에너지를 합한 값은 분열후의 표면장력에 의한 에너지와 운동에너지를 합한 값과 같다는 에너지의 보존법칙을 이용하여 다음과 같이 표시된다. 여기에서 분열전의 상태를 하첨자 b로 표시하였다.

$$SMR = \frac{r_b}{\frac{7}{3} + \frac{1}{8} \frac{\rho_d \cdot r_b^3 \cdot y_b^2}{\sigma}} \quad (8)$$

분열후 액적의 개수는 분열전의 액적과 분열후의 액적 사이의 질량보존을 의미하는 다음의 식으로부터 구해지게 된다. 여기에서 분열후의 상태를 하첨자 a로 표시하였다.

$$N_a = N_b \left( \frac{r_b}{r_a} \right)^3 \quad (9)$$

변형하는 액적이 갖는 가스과 액적의 상대속도에 수직 한 방향의 속도성분은 다음 식으로 주어지며,

$$V_{normal} = C_b \dot{r} y \quad (10)$$

분열후 액적의 속도는 가스과 액적의 상대속도벡터와 식(10)의 벡터합으로 구해진다.

### 2.2.2 분무 안전성 모델(Wave model)

액적의 미립화 과정을 액체 제트에 대한 안정성 해석 결과(Wave)[10]을 이용하여 표현하였다. Reitz는 액적이 주변 기체와의 상호 작용에 의해 변형을 일으킬 때 최대

성장률  $\Omega$ 를 갖는 파의 파장을  $\Lambda$ 라하고 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02 \frac{(1+0.45Z^{0.5})(1+0.47^{0.7})}{(1+0.87We_l^{1.67})^{0.6}} \quad (11)$$

$$\Omega \left[ \frac{\rho_l \cdot a^3}{\sigma} \right]^{0.5} = \frac{0.34+0.38We_l^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})} \quad (12)$$

$$Z = We_g^{0.5} / Re_g, \quad We_g = \rho_g(u+u'-v)a/\sigma,$$

$$T = ZWe_l^{0.5}, \quad We_l = \rho_l(u+u'-v)^2a/\sigma \text{으로 주어진다.}$$

액적의 특성 반경  $a$ 는 시간에 따라 다음과 같이 반경  $r$ 과 분열 시간  $\tau$ 의 함수로서 결정되며 식 13과 같다.

$$\frac{da}{dt} = -(a-r)/\tau \quad (13)$$

여기서  $\tau = \frac{3.2726B_1a}{\Lambda\Omega}$  이고  $B_1$ 은 액적의 미립화에 영향을 미치는 상수이다.

### 2.2.3 Smoke 모델

매연의 질량변화율은 Arrhenius 1단계 반응형태로 나타내었을 때 매연의 생성율과 산화율의 차와 같고 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{sf}}{dt} - \frac{dM_{so}}{dt} \quad (16)$$

이때 매연 생성율은 아래 기술된 Hiroyasu의 매연 생성모델[11]을 사용하였다.

$$\frac{dM_{sf}}{dt} = K_f M_f \quad (17)$$

여기서,  $M_{f,s}$ 는 연료증기의 질량,  $A_f = 100$ ,

$$E_f = 12500 \text{ (cal/mole)}, \quad K_f = A_f P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_f}{RT}\right) \text{ 또}$$

한, 매연산화율은 Nagle과 Strickland-Constable의 산화모델[11]을 이용하여 표현하였다. 이 모델에서는 탄소의 산화반응이 surface chemistry에 의존하는 화학반응기구에 의해 일어난다고 가정하고 탄소의 산화율 (g-atom carbon/sec-cm<sup>2</sup>)을 아래와 같이 정의한다.

$$R_{Total} = \left( \frac{K_I P_{O_2}}{1 + K_Z P_{O_2}} \right) x + K_B P_{O_2} (1-x) \quad (18)$$

여기서,  $x = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + (K_T/K_b)}$ 이며,  $P_{O_2}$ 는 산소의 부분압으로 표현된다.

그리고 반응계수는 다음과 같으며

$$\begin{aligned}
 K_A &= 20\exp(-30,000/RT) \\
 K_B &= 4.46 \times 10^{-3}\exp(-15,200/RT) \\
 K_T &= 1.51 \times 10^5\exp(-97,000/RT) \\
 K_Z &= 21.3\exp(4,100/RT)
 \end{aligned}$$

매연의 산화율은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM_{so}}{dt} = \frac{6M_{wc}}{\rho_s D_s} M_s R_{Total} \quad (19)$$

여기서,  $M_s$ 는 매연의 질량,  $M_{wc}$ 는 탄소의 분자량,  $\rho_s$ 는 매연의 밀도(2.0g/cm<sup>3</sup>), 그리고  $D_s$ 는 매연의 직경으로 3×10<sup>-6</sup> cm이다.

### 2.3 EGR 시스템 모델

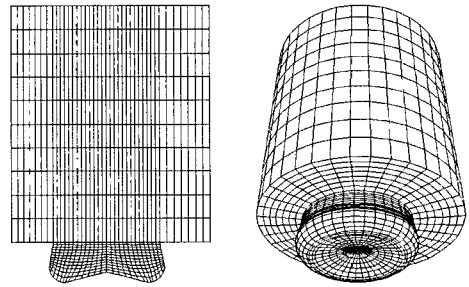
배기관에서 흡기관으로 재순환되는 EGR율은 각화학종의 질량분율의 변화로 EGR시스템을 표현했으며, EGR의 질량유동률은 식 (20)과 같이 나타내며, EGR은 총흡입량의 질량분율로 정의되며,  $m_i$ 는 실린더내의 총질량률이다.

$$EGR = \frac{m_{EGR}}{m_i} \times 100 \quad (20)$$

### 2.4 계산 조건

[표 2] 수치해석을 위한 엔진 제원

Bore	11.1 cm	
Stroke	13.9 cm	
Connecting rod length	24.66 cm	
Displacement	8.071 L	
Compression ratio	17.2	
Valve open/close	Intake valve open	BTDC 16 deg
	Intake valve close	ABDC 36 deg
	Exhaust valve open	BBDC 46 deg
	Exhaust valve close	ATDC 14 deg
Injection timing	BTDC 11 deg	
Swirl ratio (normal)	0.1841	
Engine speed	1400 rpm	
Injection system	In-line	
Cylinder boundary temperature	450 K	
Fuel spray angle	-11.0 deg	
Bowl type	Toroidal	



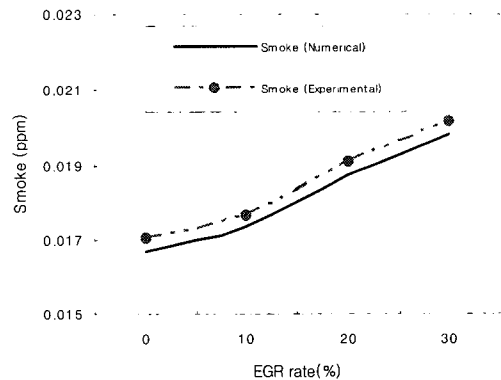
[그림 1] 연소실 격자 (TDC at the view)

EGR이 적용된 대형 디젤기관에서 매연 예측을 하기 위해 채택한 기관의 사양은 표 2에 나타내었다. 사용된 연료는 C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>이고 EGR의 변화율은 각 분자의 질량분율을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에 적용된 대형 디젤기관의 보울의 형태는 Toroidal 형태이고 실린더 헤드의 중앙에 5개의 분사기가 등각도로 위치하고 초기의 선회분포에 대해서 강회회전으로 가정하였다. 그림 1은 피스톤이 상사점에 도달했을 때의 연소실 격자 형상을 보여 준다.

## 3. 결과 및 고찰

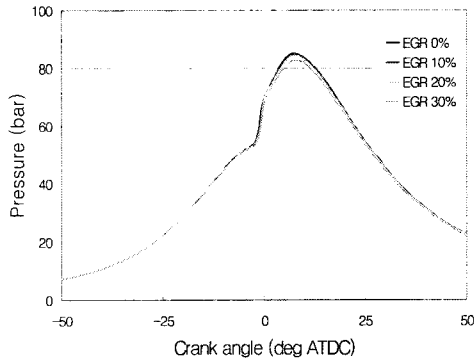
### 3.1 EGR 실험과 수치해석 검증

본 연구에서는 검증된 수치해석 코드인 KIVA3[12]에서 매연모델에 대한 부모모델의 타당성 검증을 위하여 Daewoo 8L의 실험값[13]과 비교하여 매연모델의 검증을 실시하였다. 검증 결과 본 논문의 허용오차범위인 ±2.0%에서 만족하는 것을 그림 2에 나타내었다.



[그림 2] EGR율에 따른 실험과 계산값과의 비교

### 3.2 EGR에 따른 연소특성 해석

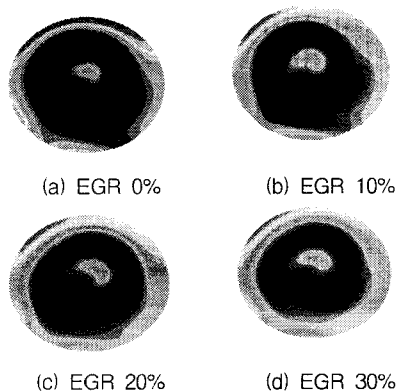


[그림 3] EGR율에 따른 압력 변화 (1400 RPM)

본 연구에서는 계산조건을 기관 회전수 1400 rpm에서 EGR 변화에 따른 연소특성을 고찰하였다. 그림 3은 EGR에 따른 연소실내의 압력 변화를 보여준다. 연소는 상사점 이전에 시작되고 크랭크 각도 7°근방에서 최대의 압력을 나타내고 있다. EGR이 증가함에 따라 연소 최고 압력이 감소하는 경향을 보이고 있는 것은 연소 조건이 과잉 공기 상태로 되어 EGR이 증가하여도 연소에 필요한 산소의 변화가 적기 때문이다.

### 3.3 EGR에 따른 매연 배출량 예측

그림 4는 1400rpm 전부하 조건에서 EGR 변화에 따른 크랭크 각도 146°ATDC에서 실린더 내에 존재하는 매연의 분포를 보여주고 있다. 배기 밸브가 열리는 시점에 매연은 EGR이 증가함에 따라 국부 온도 감소의 영향으로 불완전 연소 영역이 확대되어 매연농도는 증가하고 있다. 따라서 매연 발생은 연소 온도에 영향을 받고 있다고 볼 수 있다.



[그림 4] EGR율에 따른 매연 농도 변화 (146.0°ATDC)

### 4. 결론

본 연구에서는 대형 디젤기관을 대상으로 매연을 예측하기 위한 수치해석 결과로 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) EGR이 증가함에 따라 연소 최고 압력이 감소하는 경향을 보이고 있는 것은 연소 조건이 과잉 공기 상태로 되어 EGR이 증가하여도 연소에 필요한 산소의 변화가 적다고 볼 수 있다.

(2) EGR이 증가할수록 불활성 가스 성분이 많아져 연소 반응이 늦어지므로 전체적으로 열발생율이 낮아지고 있다.

(3) EGR 증가에 따라 연소실내에 연소온도가 저하됨으로 연소불안정으로 인해 매연이 증가되는 것을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] Yuichi Kamada, "Development of a Heavy-Duty Diesel Engine with Very High Pressure Fuel Injection System", JSAE9941926, 1999.
- [2] O'Rourke, Amsden, "The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup", SAE872089, 1987.
- [3] Amsden, "KIVA-II : A computer program for chemical three-dimensional Fluid Flows with Chemical Reactions and Fuel sprays, Los Alamos National Laboratory report LA-10245-MS.
- [4] Magnussen, Hjertager, "On Mathematical Modeling Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th Symposium on combustion, Combustion Institute, 1976.
- [5] Daiguji, "Fundamentals of computational fluid dynamics", CORONA, 1988.
- [6] B.Dillies, Marx, Dec, "Diesel Engine Combustion Modeling using the coherent Flame Mode in KIVA-II", SAE930074.
- [7] 田畑哲夫, "DI디젤기관에 있어서 연료분무의 수치해석에 관한 연구", 9538122 일본자동차기술회 Vol26, No3, July1995 pp.39 ~ 44.
- [8] Nicolls, "Stream and droplet breakup by shock waves", NASA-SP-194.
- [9] Lamb, "Hydrodynamics", Dover Publications.
- [10] Reitz, "Structure of high-Pressure Fuel spray", SAE870598.
- [11] Patterson, Kong, Hampson, Reitz, " Modeling the

effects of fuel injection characteristics on diesel engine Soot and NOx emission", SAE940523.

[12] Anthony A. Amsden, "KIVA-3 : A KIVA Program with Block-Structured mesh for complex geometries", LA-12503-MS.

[13] 한영출, "G7 경유차 저공해 대기오염 방지기술", 환경부, 2000.

---

### 백 두 성(Doo Sung Baik)

[정회원]



- 1983년 2월 : 국민대학교기계공학과(공학사)
- 1991년 3월 : University of Cincinnati(공학석사)
- 1997 5월 : Wichita State University(공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 컴퓨터응용기계공학과 전임강사

<관심분야>

미세열유체, CFD, 대체에너지

---

### 이 종 선(Jong-Sum Lee)

[종신회원]



- 1982년 2월 : 국민대학교 기계설계학과(공학사)
- 1984년 2월 : 국민대학교 기계공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 국민대학교 기계설계학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과 교수

<관심분야>

최적설계, 생산공학