



종이를 향해 쏴라

— 잉크젯 프린터 노즐의 최적설계

조 이름 : Bull's Eye

조 원 : 김 기 환 (조 장)

(2003007817)

이 상 범

(2003007527)

서멀 방식

▲ step1 : project statement

서멀 방식

HP프린터 계열

헤드 안쪽의 얇은 저항체(코일)를 가열하여 잉크가 끓게 되고 잉크내의 수분이 증기로 변하면서 체적이 증가하게 되어 증가된 체적만큼 잉크를 밀어내는 방식



HP프린터 계열

헤드 안쪽의 얇은 저항체(코일)를 가열하여 잉크가 끓게 되고 잉크내의 수분이 증기로 변하면서 체적이 증가하게 되어 증가된 체적만큼 잉크를 밀어내는 방식



버블젯 방식

Canon 프린터 계열

기존의 Thermal방식이 가지지 못한 미세한 칼라 입자표현을 위해 가열되어 밀려나온 잉크를 그냥 떨어 뜨리는것이 아닌 수많은 방울로 형성시키는 방식



▲ step1 : project statement - 노즐의 설계

①



②



② 모양의 원인

같은 유량으로 좀 더 나은 속도
를 얻기 위해 출구가 좁아짐



Project Statement

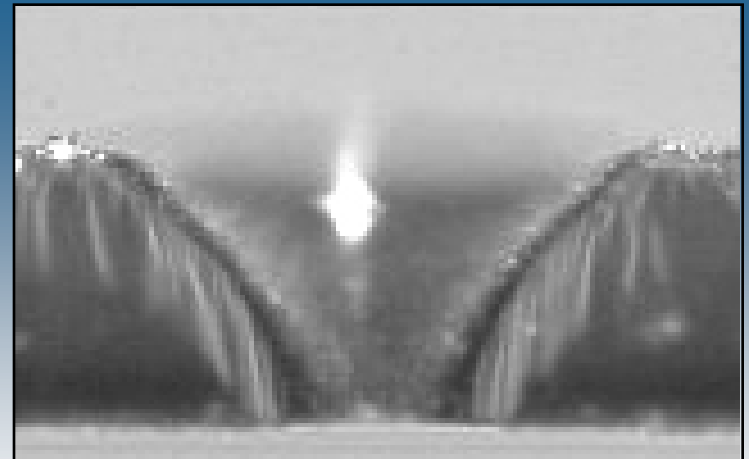
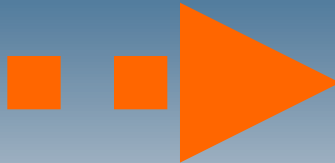
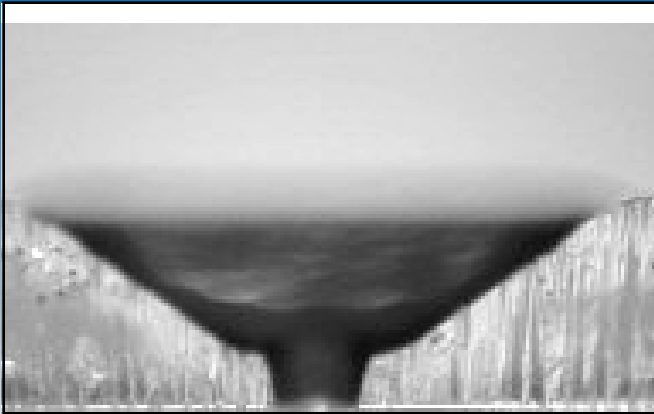
기하학적 형상의 변형만으로 최소의
압력손실을 얻고자 한다.



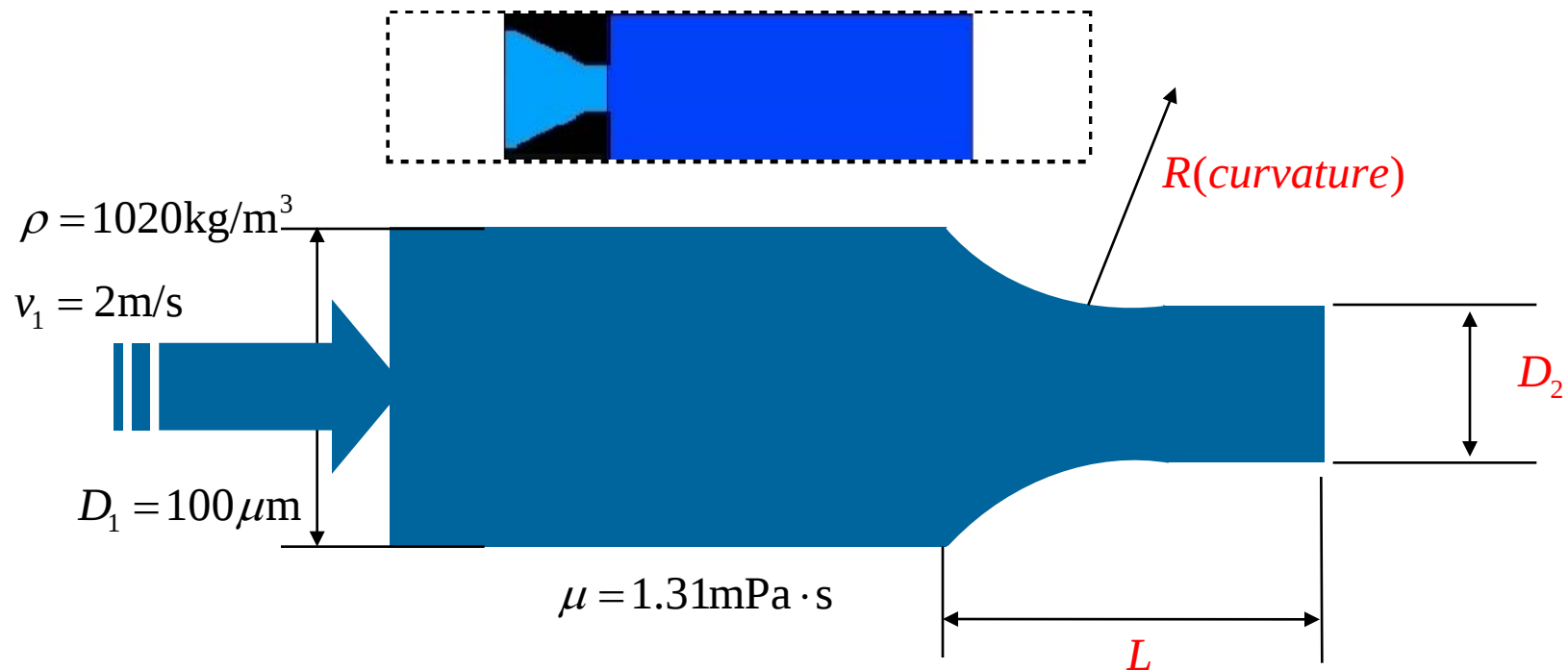
문제제기

형상, 마찰, 열에 따른 다양한
손실 : 압력손실이 가장 큰 영
향

▲ step1 : project statement - 설계 보완



▲ step2 : Data, Assumption and design variable



Assumption

1. 정상상태 라고 가정한다 (Steady state)
2. 층류 유동이라고 가정한다. (주어진 값을 고려할 때, 층류라고 가정가능)
3. 잉크 방울이 구 형태라고 가정한다.
4. 위치 에너지의 변화는 없다고 간주한다.(실제로 경미)

▲ step3 : Formulation

원관 손실

원관 전반에 걸친 압력 손실

Darcy-Weisbach Equation

(출처6)

$$h_L = \frac{\Delta(P + \gamma z)}{\gamma} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$\Delta P_1 = f \frac{L}{D_2} \frac{v^2}{2g} \gamma$$

$$= f \frac{L}{D_2} \frac{v^2 \rho}{2} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{L}{D_2} \frac{v^2 \rho}{2}$$

$$= \frac{32v^2 \rho}{\rho v D_2^2} = \frac{\mu L V}{D_2^2}$$

출구 표면장력

출구를 빠져나가는 잉크의 표

면장력에 의한 압력손실

Young-Laplace Equation

(출처 1,4,6)

$$\Delta P_2 = T \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

구에서

$$r_1 = r_2,$$

$r = \text{radius of ink droplet}$

$$\Delta P_2 = \frac{2T}{D_2}$$

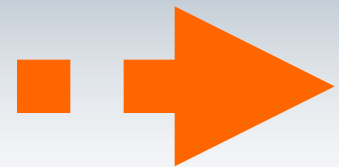
곡률에 의한 손실

노즐 연결 부위에 곡률을 준 영

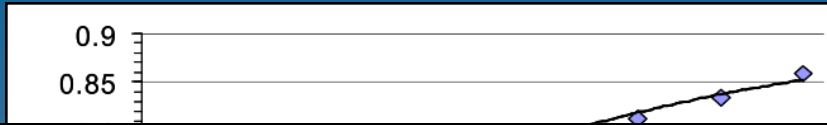
향에 의한 압력손실

Discharge Coefficient 값을 이

용하여 손실 압력 값을 계산



▲ step3 : Formulation



$$\sum \Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$= \frac{\mu L v}{D_2^2} + \frac{2T}{D_2} + \left(\frac{v}{-7.65(R/D_2)^2 + 2.48(R/D_2) + 0.62} \right)^2 \frac{\rho}{2}$$

▲ step4 : Constraints

제한조건

$$1. \frac{We}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} \leq 0.385$$

$$2. 0 \leq \frac{R}{D_2} \leq 0.1$$

$$3. Re = \frac{\rho v D}{\mu} \leq 2000$$

$$4. 0 \leq D_2 \leq D_1$$

$$5. 10 \leq \frac{\pi D_1^2}{\pi D_2^2} v_1 = v_2$$

$$6. 40 \mu m \leq L$$



제한조건

$$g_1 = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} - 0.385 \leq 0$$

$$g_2 = -\frac{R}{D_2} \leq 0$$

$$g_3 = \frac{R}{D_2} - 0.1 \leq 0$$

$$g_4 = \frac{\rho v_1 D_1}{\mu} - 2000 \leq 0$$

$$g_5 = -D_2 \leq 0$$

$$g_6 = D_2 - D_1 \leq 0$$

$$g_7 = -\frac{D_1^2}{D_2^2} v_1 + 10 \leq 0$$

$$g_8 = 40 \times 10^{-6} - L \leq 0$$

▲ step4 : Constraints

제한조건

$$1. \frac{We}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} \leq 0.385$$

$$2. 0 \leq \frac{R}{D_2} \leq 0.1$$

$$3. Re = \frac{\rho v D}{\mu} \leq 2$$

$$4. 0 \leq D_2 \leq D_1$$

$$5. 10 \leq \frac{\pi D_1^2}{\pi D_2^2} v_1 =$$

$$6. 40\mu m \leq L$$

제한조건

$$g_1 = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} - 0.385 \leq 0$$

$$R \leq 0$$

잉크 방울을 C.V analysis를 하여 속도에 대한 미방을 세움. (출처 1)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + gz$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = \left[-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r_N} + \frac{1}{r_t} \right) + 3 \frac{We}{Re} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{Fr^2}$$

$$\left[\frac{We}{Re} \right]_{\text{비}} = \frac{\text{표면장력에 대한 관성력의 비}}{\text{점성력에 대한 관성력의 비}} = \frac{\text{표면장력}}{\text{점성력}}$$

점성력에 대한 관성력의 비

다음의 미분 방정식을 수치해석적 방법으로 풀었을 때, 잉크가 출구에서 분리되는 속도점에서의 We/Re 수를 Constraint로 설정

▲ step4 : Constraints

제한조건

$$1. \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} \leq 0.385$$

$$2. 0 \leq \frac{R}{D_2} \leq 0.1$$

$$3. Re = \frac{\rho U D_2}{\mu} \geq 10$$

$$4. 0 \leq D_2 \leq 0.1$$

$$5. 10 \leq \frac{\pi R^2}{\pi D_2^2} \leq 100$$

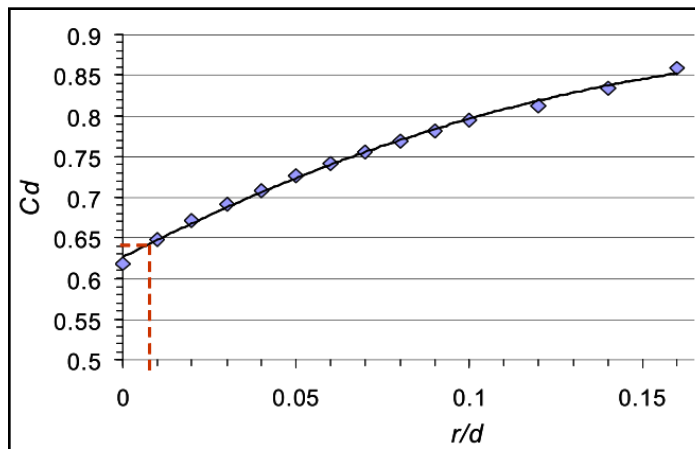
$$6. 40 \mu m \leq D_2 \leq 100 \mu m$$

제한조건

$$g_1 = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} - 0.385 \leq 0$$

$$g_2 = -\frac{R}{D_2} \leq 0$$

$$R \leq 0.1 D_2$$



노즐곡률에 의한 Discharge Coefficient (출처2)

실험에 의한 Graph를 Curve fitting 한 식

$$C_d = -7.65 \left(\frac{R}{D_2} \right)^2 + 2.48 \left(\frac{R}{D_2} \right) + 0.62$$

이 Curve fitting 한 식의 적용 범위가

$0 < R/D < 0.1$ 일 때 성립 가능

▲ step4 : Constraints

제한조건

$$1. \frac{We}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} \leq 0.385$$

$$2. \frac{R}{D_2} \leq 0.1$$

$$3. \frac{\rho v D}{\mu} \leq 2000$$

$$4. 0 \leq D_2 \leq D_1$$

$$5. 0 \leq \frac{\pi D_1^2}{\pi D_2^2} v_1 = v_2$$

$$6. 4\mu m \leq L$$

$$\dot{m} = v_1 A_1 = v_2 A_2$$

제한조건

$$g_1 = \frac{\mu}{\sqrt{\rho D_2 T}} - 0.385 \leq 0$$

$$g_2 = -\frac{R}{D_2} \leq 0$$

$$g_3 = \frac{R}{D_2} - 0.1 \leq 0$$

$$g_4 = \frac{\rho v_1 D_1}{\mu} - 2000 \leq 0$$

$$g_5 = -D_2 \leq 0$$

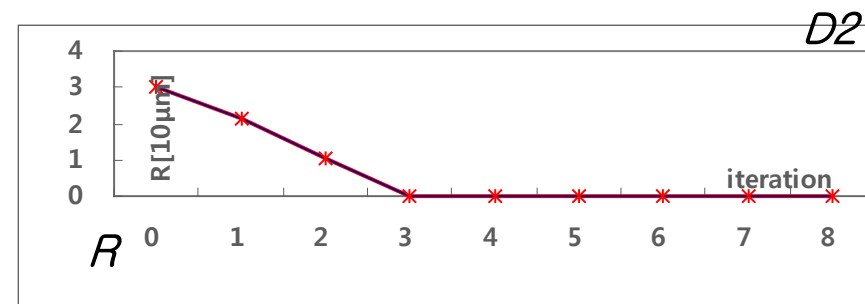
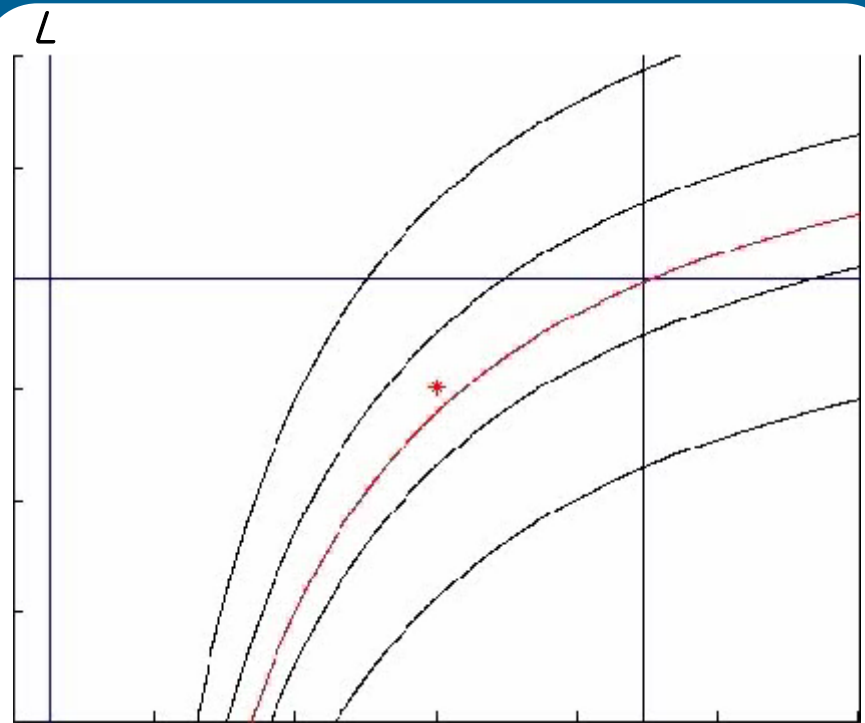
$$g_6 = D_2 - D_1 \leq 0$$

$$g_7 = -\frac{D_1^2}{D_2^2} v_1 + 10 \leq 0$$

$$g_8 = 40 \times 10^{-6} - L \leq 0$$

▲ step5 : 알고리즘 비교 -Excel Solver(뉴튼법)

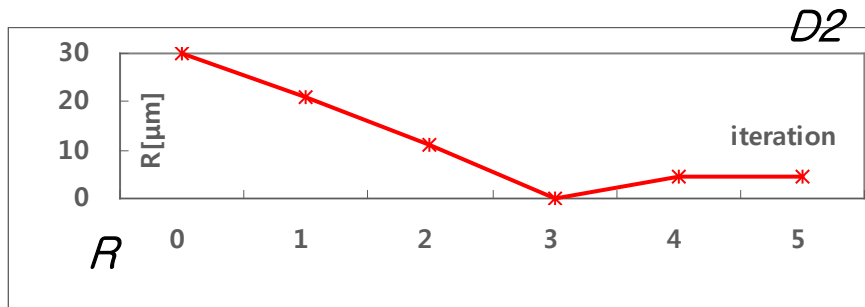
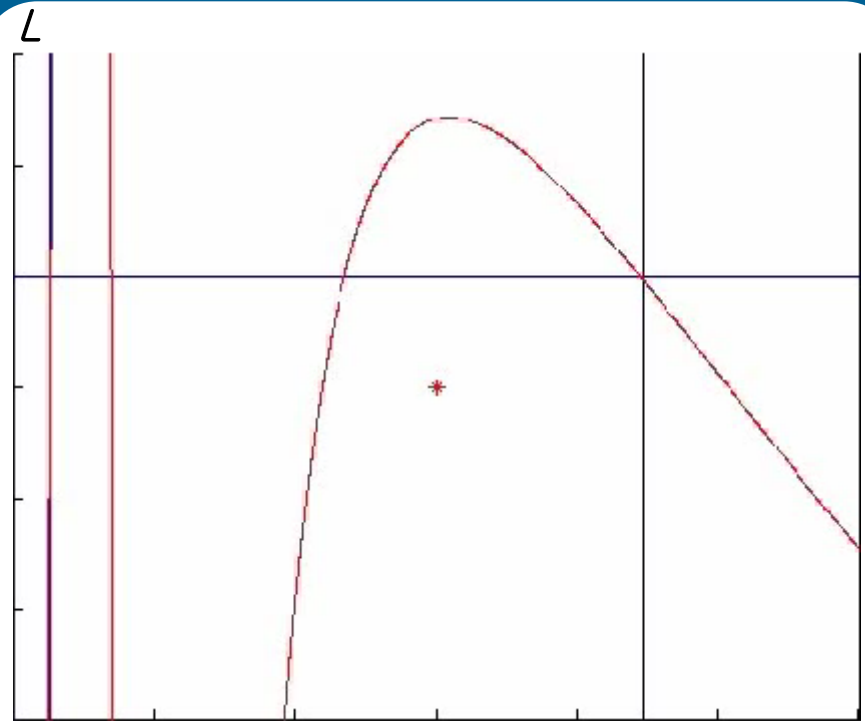
Properties			Design Variable & Constraints	
mu	1.31E-03	Pa·s	D1	1.00E-04
rho	1020	kg/m ³	D2	4.47E-05
G	3.40E-08	m ³	curvature	0.00E+00
v1	2	m/s	L	4.00E-05
T	4.50E-03	N/m	g1	-2.94E-01
Formulation			g2	0.00E+00
delta P	5.84E+03		g3	-1.00E-01
			g4	-1.84E+03
			g5	-4.47E-05
			g6	-5.53E-05
			g7	3.50E-07
			g8	0.00E+00



- ☐ 선형 모델 가정(M) ☒ 단위 자동 설정(U)
☐ 음수 아닌 것으로 가정(G) ☐ 중간 결과 보기(R)
- 근사 방법 미분 계수 탐색 방법
- ☒ 1차식(A) ☒ 전진(F) ☒ 뉴튼법(N)
☐ 2차식(Q) ☐ 중앙(C) ☐ 공액 경사법(O)

▲ step5 : 알고리즘 비교 -Excel Solver(공액경사법)

Properties			Design Variable & Constraints	
mu	1.31E-03	Pa*s	D1	1.00E-04
rho	1020	kg/m^3	D2	4.47E-05
G	3.40E-08	m^3	curvature	4.47E-06
v1	2	m/s	L	3.98E-05
T	4.50E-03	N/m	g1	-2.94E-01
Formulation			g2	-1.00E-01
			g3	-1.62E-07
delta P			g4	-1.84E+03
			g5	-4.47E-05
			g6	-5.53E-05
			g7	-2.39E-11
			g8	2.33E-07



- ☐ 선형 모델 가정(M)
☐ 음수 아닌 것으로 가정(S)
☒ 단위 자동 설정(U)
☐ 중간 결과 보기(B)
- 근사 방법 미분 방법 탐색 방법
- ☒ 1차식(A) ☒ 전진(F) ☐ 뉴턴법(N)
☐ 2차식(Q) ☐ 중앙(C) ☒ 공액 경사법(O)

▲ step5 : 알고리즘 비교 -MatLab(fmincon)

```
options=optimset('Algorithm','active-set',...
'Display','iter');
[x,fval]=...
fmincon(@func2,x0,[],[],[],[],[],[],@constrain2,options)
```

Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative
0	4	648.139	0.9		
1	8	4882.4	0.1941	1	2.19e+007
2	12	4739.24	0	1	-6.82e+008
3	16	3805.44	0	1	-4.87e+008

Optimization terminated: magnitude of search direction less than 2 and maximum constraint violation is less than options.TolCon.

Active inequalities (to within options.TolCon = 1e-006):

lower	upper	ineqlin	ineqnonlin
			8

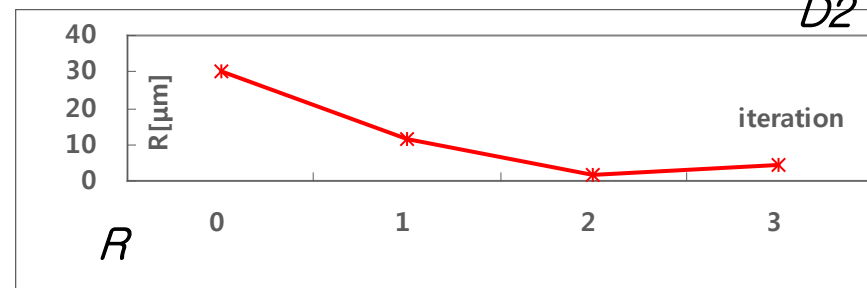
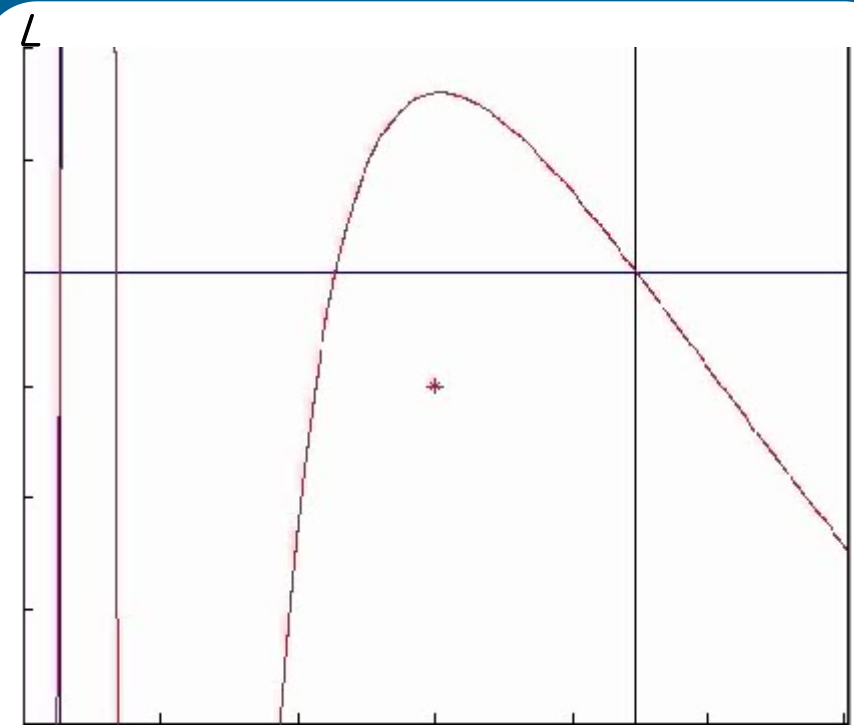
x =



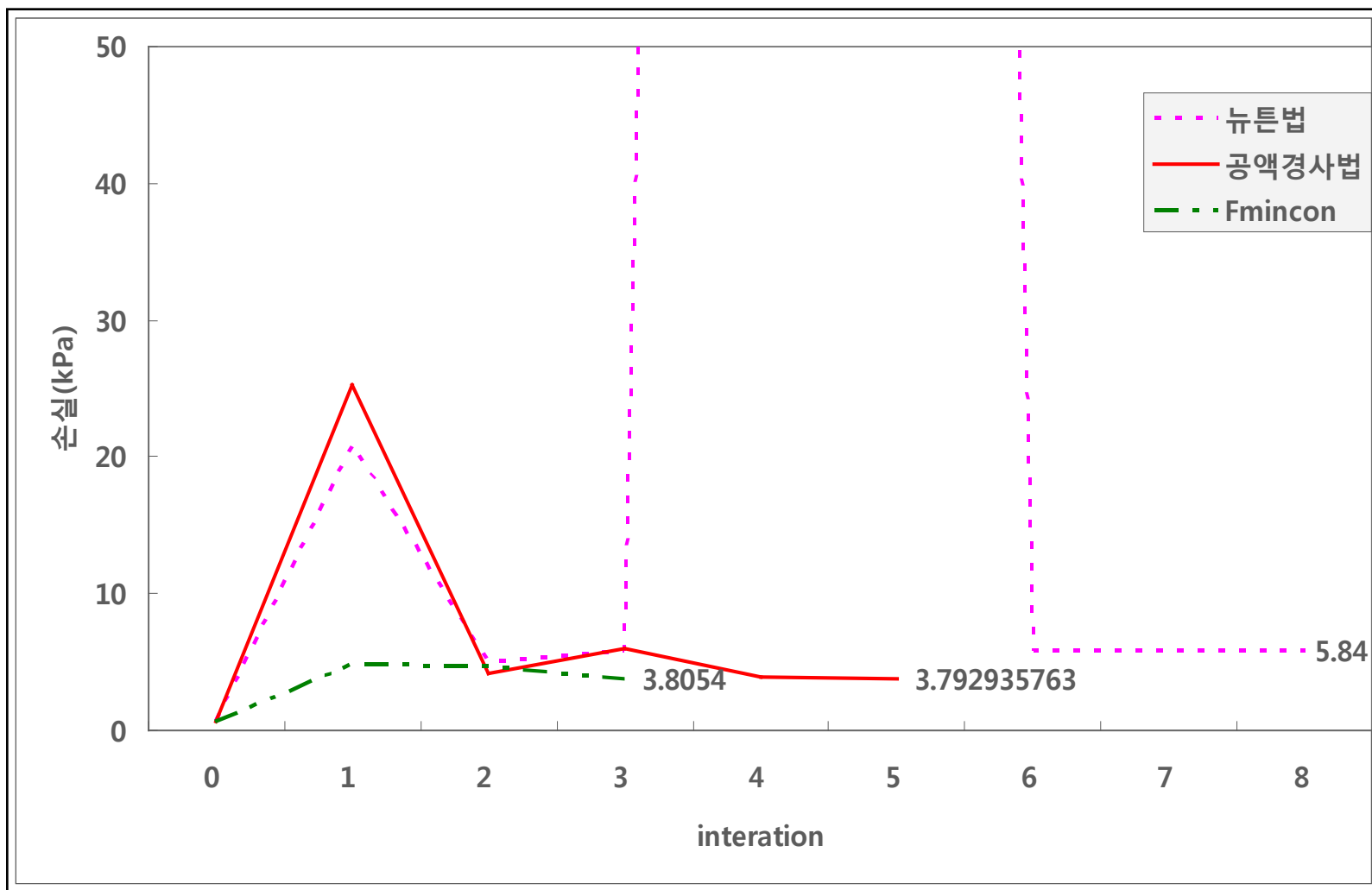
0.4466	0.4000	0.0438
--------	--------	--------

fval =

3.8054e+003



▲ step5 : 알고리즘 비교 -결과 비교

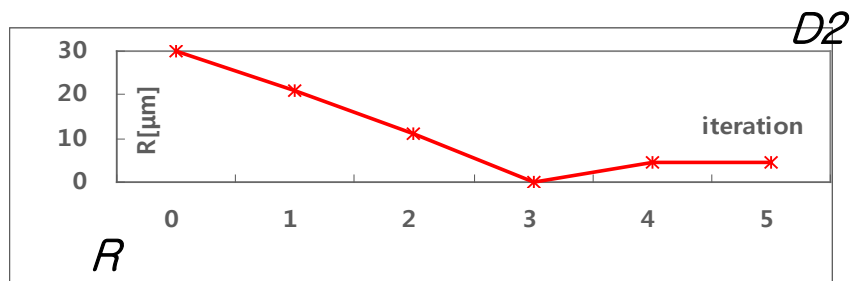
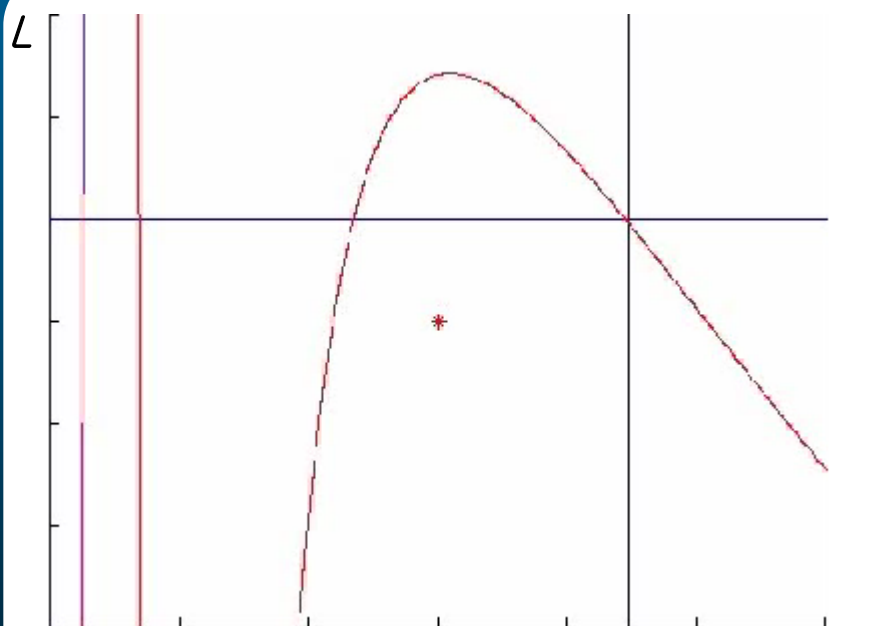


▲ step5 : 알고리즘 비교 -결과 비교

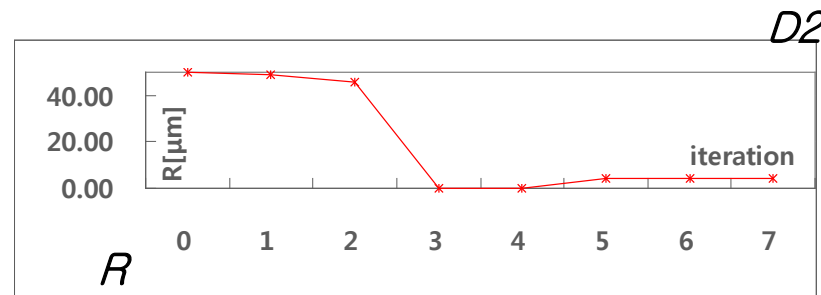
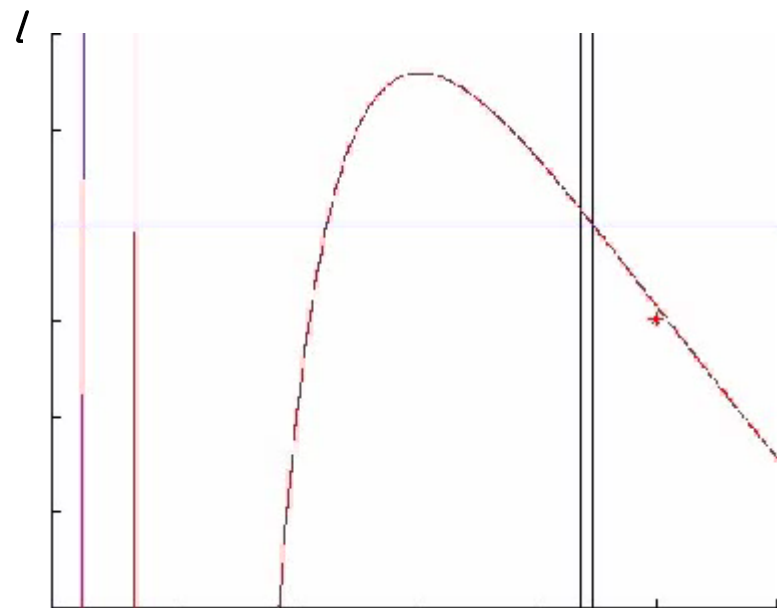
방법	iteration	최종 L값	최종D2값	최종R값	압력손실(kPa)
뉴튼법	8	4.47214E-05	0.00004	0	5.84
공액경사법	5	4.47214E-05	0.00004	4.47214E-06	3.792935763
Fmincon	3	4.46631E-05	0.00004	4.38327E-06	3.8054

▲ step6 : 초기값 변화의 비교-Excel Solver(공액경사)

D2	3.00E-05
curvature	3.00E-05
L	3.01E-05

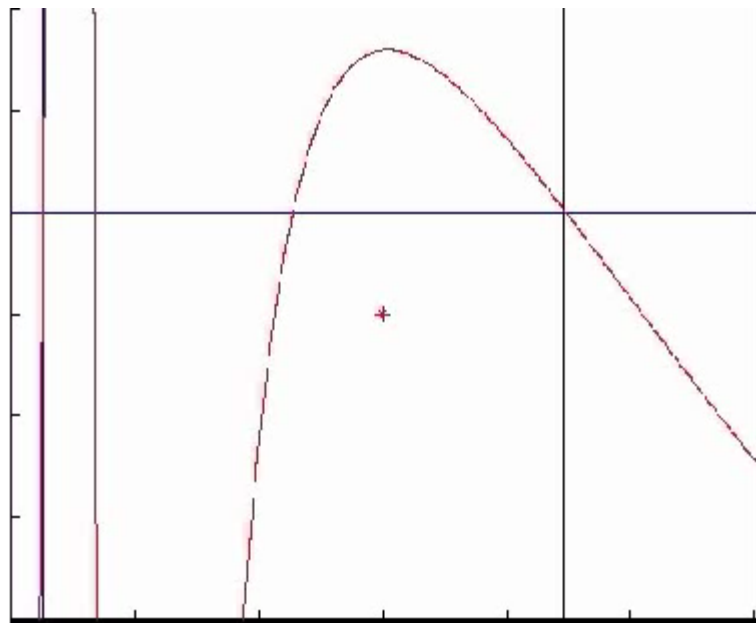


D2	5.00E-05
curvature	5.00E-05
L	3.01E-05

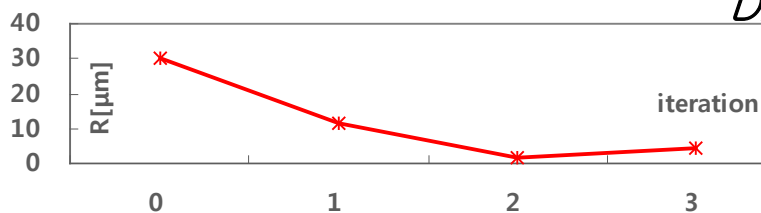


▲ step6 : 초기값 변화의 비교 -MatLab(fmincon)

```
>> x0=[30E-6 30E-6 30E-6];  
options=optimset('Algorithm','active-set',...  
'Display','iter');
```

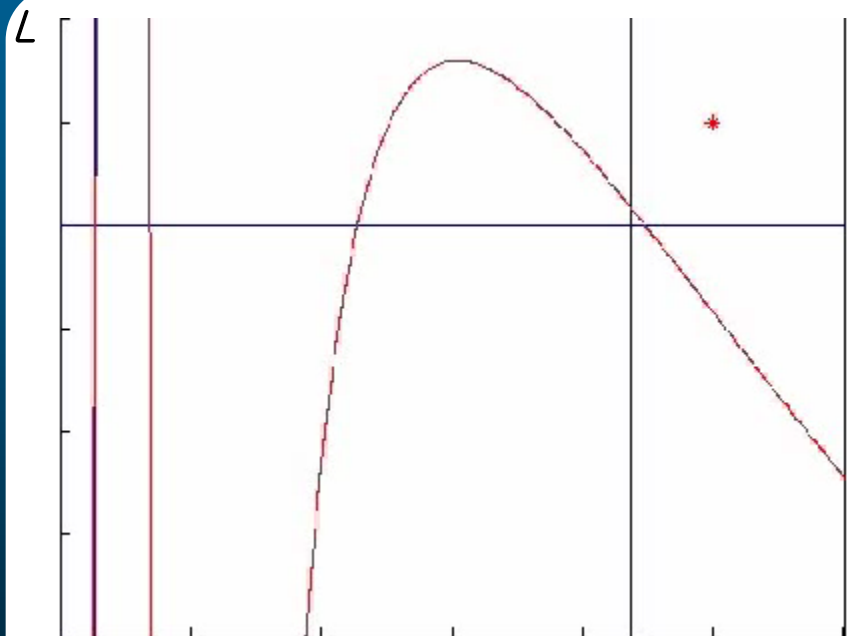


D2

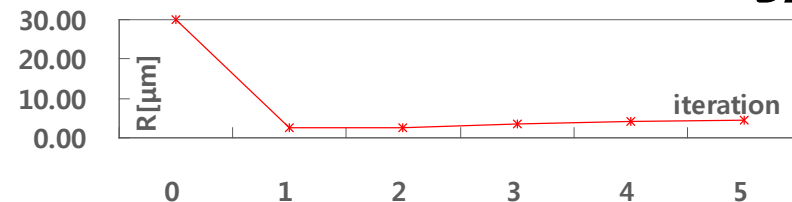


R

```
>> x0=[50E-6 50E-6 30E-6];  
options=optimset('Algorithm','active-set',...  
'Display','iter');
```

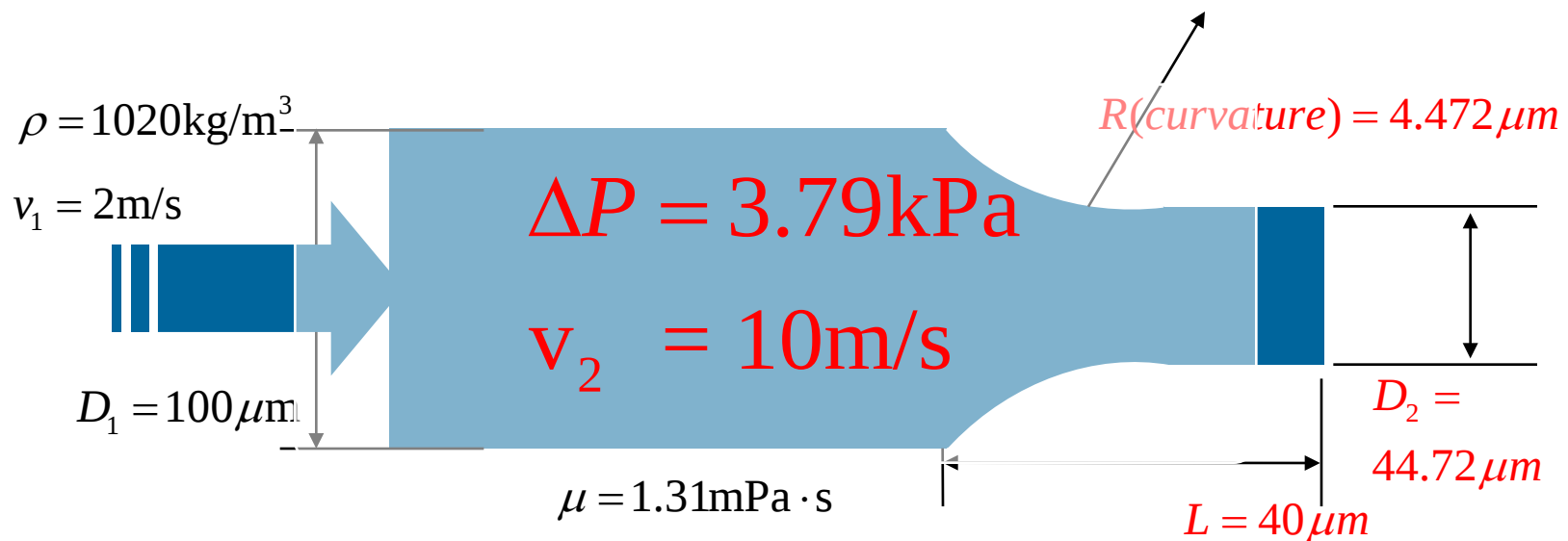
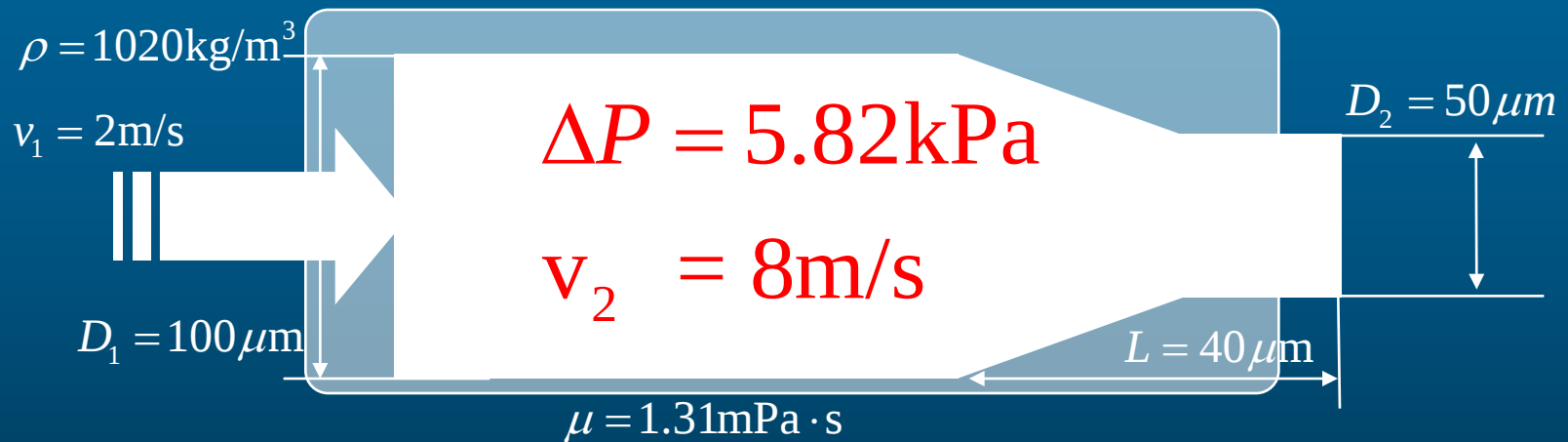


D2



R

▲ step7 : 최적해를 통한 설계 제안 및 기존설계 비교



▲ 참고문헌

1. Chen, P. H., Chen, W. C., Ding, P. P. and Chang, S. H., 98, "Droplet Formation of a Thermal Sideshooter Inkjet Printhead," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 382~390.
2. N. Anantharamaiah, H. V. Tafreshi, B. Pourdeyhimi "A Simple Expression for Predicting Inlet Roundness of Hydroentangling Nozzles" *NCRC, NCSU, January 2006*
3. Lee J D, Yoon J B, Kim J K, Chung H J, Lee C S, Lee H D, Lee H J, Kim C K and Han C H 1999 "Thermal inkjet printhead with a monolithically fabricated nozzle plate and self-aligned ink feed hole J. Microelectromech." *Syst. 8* 229-36
4. Fromm, J. E., "Numerical calculation of the fluid dynamics of drop-on-demand jets." *IBM Journal of Research and Development*, 1984, 28, 322-333.
5. A. H. Lefebvre, Atomization and sprays. New York: Hemisphere Publishing/Taylor & Francis, 1989.
6. 맹주성, 도서출판 병진, "유체역학" 330~362.
7. Jasbir S, Arora, Elsevier, "Introduction to optimum design "
8. 이창식, "열역학"