

고압 분사노즐의 최적형상에 관한 연구

이종선*, 김형철⁺

(논문접수일 2003. 1. 15, 심사완료일 2003. 2. 28)

A Study on the Optimum Shape of High-Pressure Injection Nozzle

Jong-Sun Lee*, Hyeong-Chol Kim⁺

Abstract

This study makes to flow analysis of computational fluid dynamics(CFD) according to the basic theory of turbulent flow regarding high-pressure injection nozzle. It also makes structural analysis to find out the structural validity of the optimum shape of high-pressure injection nozzle. It divides to two areas such as plunger area and high-pressure injection nozzle area including plunger.

Key Words : Flow Analysis(유동해석), High-pressure Injection Nozzle(고압 분사노즐), Structural Analysis(구조해석), Maximum Stress(최대응력), Maximum Strain(최대변형률), Optimum Shape(최적형상)

1. 서론

고압균질기(high pressure homogenizer)는 액상 상태를 균일한 유화상태(乳化狀態)로 변화시키기 위한 기계로서 균질기에 고압상태로 통과한 제품은 물리적으로 지방구가 2 μ m 이하로 분쇄되어 부상력이 감소되고, 액체의 성분이 완전히 균일한 상태로 존재하게 된다. 이 미세한 지방구는 점성마찰이 부력보다 강해져서 떠오르지 않게 되어 제품의 외관은 물론 맛과 품질의 효과를 극대화시킬 수 있어 각 분야의 액상 생산라인에 중요한 역할을 차지하고 있다. 최근에

는 고효율화 및 다종 물성에의 적용기술을 개발하고 있으며, 요구되는 최적의 분쇄 입자 크기를 유지하기 위한 고압 기술과 내구성 향상으로 고품질화하는 추세이다. 산업용으로 사용되는 균질기는 우유 균질에 대부분 사용되고, 화장품이나 그리스 등과 같은 고가품 처리용에는 도입단계에 있다. 또한 국내의 기술개발은 균질기의 핵심기술인 내압 구조설계, 재질, 가공기술, 내구성 문제로 인하여 최근에 국산화되었다.

본 논문에서는 상용 유한요소 해석코드인 ANSYS를 활용하여 분사노즐을 플런저(plunger)영역과 플런저를 포함

* 주저자, 대전대학교 기계설계공학과 (jongsun@daejin.ac.kr)
주소: 487-711 경기도 포천군 포천읍 선단리 산 11-1

+ 대전대학교 대학원 기계설계공학과

하는 분사노즐의 두 영역으로 나누어 해석한다. 플런저영역에 대하여 플런저의 직경과 출구의 형상을 변화시켜가며 유동 해석을 수행한다. 유동 해석의 결과를 바탕으로 최적형상을 결정하고, 경계조건, 하중조건 등을 적용하여 구조해석을 수행한다.

플런저의 최적형상을 기초로 하여 고압 분사노즐 전체의 형상을 설계하고, 그 최적형상에 대하여 유동 및 구조 해석을 실시 한 후 플런저와 분사노즐에 대한 응력과 변형률 등을 비교하여 구조적 타당성을 검토한다.

2. 해석 이론

점성 유체의 흐름에서 층류흐름과 난류흐름에 대한 실험을 통해 레이놀즈는 무차원 함수 레이놀즈수를 도입하였으며, 레이놀즈수는 층류 및 난류의 구분 기준으로 사용되고 있다.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, V 는 유체의 평균 속도, D 는 관 지름, μ 는 유체의 점성계수, ν 는 유체의 동점성계수이다.

난류의 특징은 그 시간적 공간적 불규칙성에 있다. 난류가 불규칙적이지만 그 운동은 Navier-Stoke의 운동방정식에 따르고 있기 때문에 유동장을 이론적으로 구하는데는 Navier-Stoke 운동방정식을 수치적으로 풀면 된다.

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

3. 플런저 영역의 해석

3.1 플런저 영역의 유동 해석

플런저 영역은 일정한 압력의 유지와 속도의 증가가 이루어져야 하는 영역으로 고압 분사노즐 전체에 미치는 영향은 대단히 크다.

플런저의 기본형상은 기존의 균질기에서 사용되는 제품을 기초로 하여 설계되었고, 해석에 사용될 유체는 물로써 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에서와 같은 축대칭 단면 모델을 유동 영역에 대하여 모델링하고, Fig. 2에서는 5,781개의 절점과 5,600개의

Table 1 Material property of water

Liquid	Density ρ (kg/m ³)	Specific Weight γ (kN/m ³)	Dynamic Viscosity μ (N · s/m ²)	Kinematic Viscosity ν (m ² /s)
Water	999	9.80	1.12E-03	1.12E-06

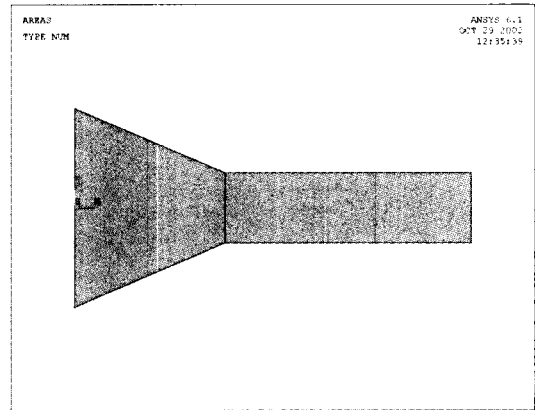


Fig. 1 Axisymmetric model for flow field of plunger

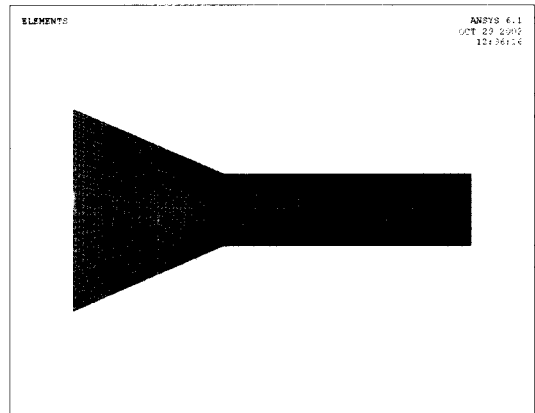


Fig. 2 Finite element model of plunger by node and element

요소로 나누어 유한요소 모델을 생성한다. 해석 옵션으로 정상상태(steady static), 비압축성 유체(incompressible fluid), 난류유동(turbulent flow)을 적용하고, Fig. 3에서와 같이 입구조건(inlet condition), 출구조건(outlet condition) 및 경계조건(boundary condition)을 적용한다.

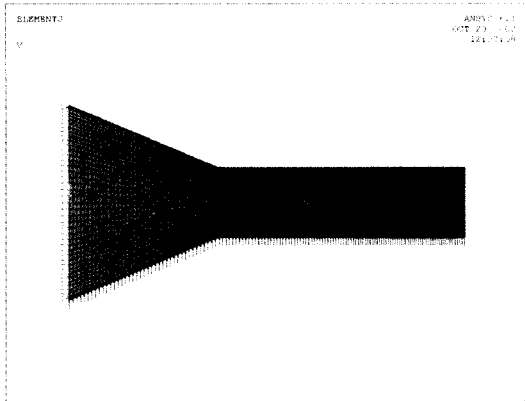


Fig. 3 Inlet condition, outlet condition and boundary condition for flow field

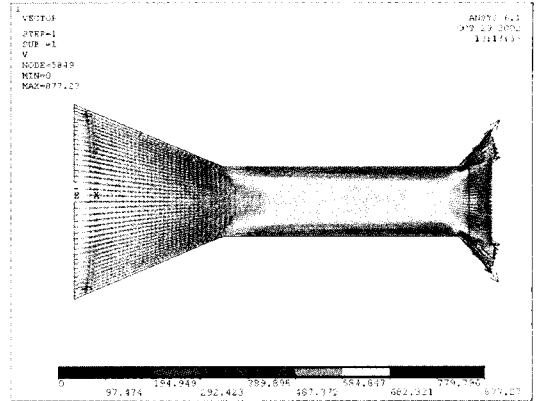


Fig. 4 Velocity distribution of plunger with d=6mm, chamfer 1.0mm

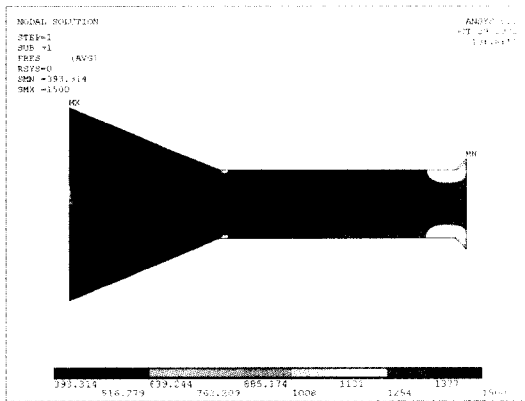


Fig. 5 Pressure distribution of plunger with d=6mm, chamfer 1.0mm

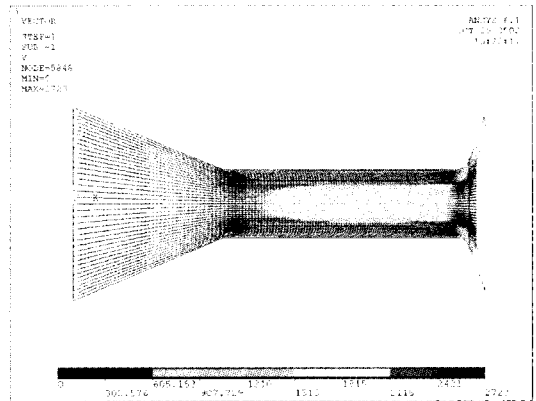


Fig. 6 Velocity distribution of plunger with d=6mm, round 1.0mm

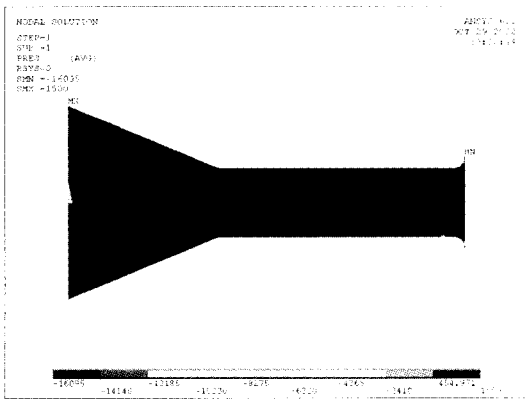


Fig. 7 Pressure distribution of plunger with d=6mm, round 1.0mm

플런저 영역에 대한 유동 해석은 직경 5~8mm에 대하여 chamfer형상과 round형상의 변화에 대하여 수행한다. 플런저의 직경 6mm로 하였을 경우, chamfer 1.0형상과 round 1.0형상에 대한 속도분포와 압력분포를 Fig. 4~Fig. 7에 나타내었다.

3.2 유동 해석 결과 및 최적형상 선택

플런저의 직경과 출구형상의 변화에 따라 해석을 수행한 결과 모든 경우의 형상에서 출구부분의 압력감소가 두드러진다. chamfer형상에서는 직경과 chamfer의 치수와 관계없이 입구로부터 출구까지 압력이 계속적으로 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 속도의 변화는 계속적으로 증가하지만 그 수치 또한 round형상에 비해 증가폭이 낮음이 확인된다.

Table 2 Material properties of stainless steel and zirconia

Material	Density ρ (kg/cm^3)	Modulus of Elasticity E (kg_f/cm^2)	Poisson's Ratio ν
Stainless steel	0.00793	204E+04	0.29
Zirconia	0.00609	210.12E+04	0.30

round형상에서는 round의 치수가 커짐에 따라 속도는 증가하고 직경이 커짐에 따라 속도의 증가가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 round의 치수가 커질수록 출구 부분에서의 압력 강하가 두드러진다. 이러한 사항들을 비교 검토한 결과 chamfer형상보다는 round형상이 압력 유지 면에서 최적형상에 가까우며, 속도 변화에 있어서도 chamfer형상보다 round형상이 유리하다. 그리고 round형상의 치수와 직경의 결정은 압력 유지면에 중점을 두고 고려한 결과 직경 6mm에 대한 round형상의 치수를 1.0mm로 최적형상을 결정한다.

3.3 플런저 영역의 구조 해석

플런저 영역의 유동 해석을 바탕으로 결정된 최적형상을 고려하여 플런저의 모델을 10,470개의 절점과 10,459개의 요소로 유한요소 모델을 생성한다. 플런저의 재질로는 기본적으로 스테인리스 강(stainless steel)을 사용하고, 유체와 직접적으로 접촉하는 부분은 마모를 고려하여 내마모성과

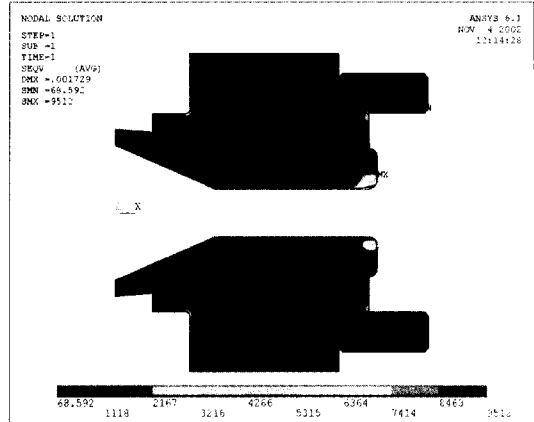


Fig. 9 Stress distribution of plunger with pressure 1000kgf/cm²

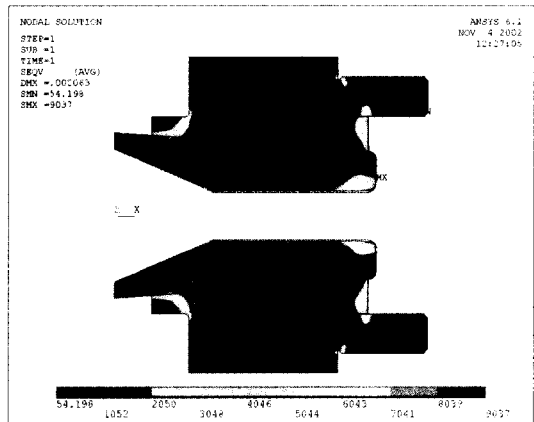


Fig. 10 Stress distribution of plunger with pressure 1500kgf/cm²

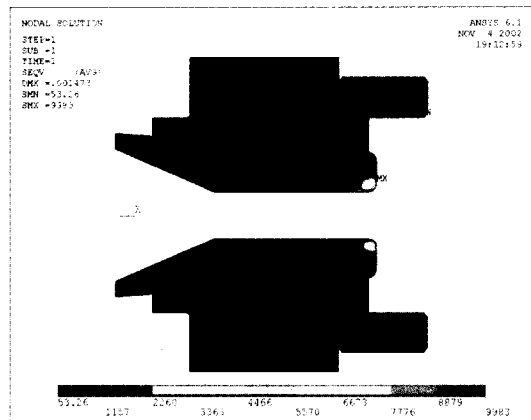


Fig. 8 Stress distribution of plunger with pressure 500kgf/cm²

강도가 우수한 지르코니아(zirconia)를 사용한다. 각 재질에 대한 물성치는 Table 2에 나타내었다. 해석은 압력이 500 kgf/cm² ~ 1500kgf/cm²로 까지 변화할 경우, 유동 해석을 통해 얻어진 압력 분포를 구조 해석의 하중조건으로 하고 경계조건 등을 적용하여 수행한다.

하중조건으로는 내압이 작용하게 되는 것이며, 경계조건은 플런저가 균질기내에 조립되는 위치를 고려하여 적용된다. Fig. 8 ~ Fig. 10은 압력이 각각 500, 1000, 1500kgf/cm² 일 경우의 응력(stress)분포를 나타낸다.

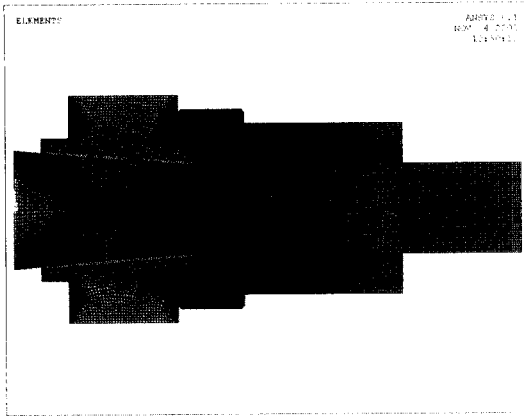


Fig. 11 Finite element model of injection nozzle by node and element

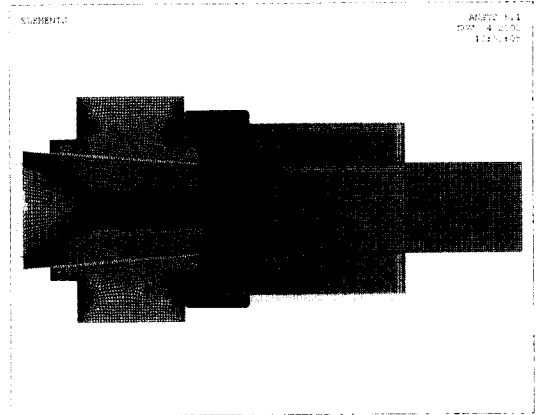


Fig. 12 Boundary condition of injection nozzle

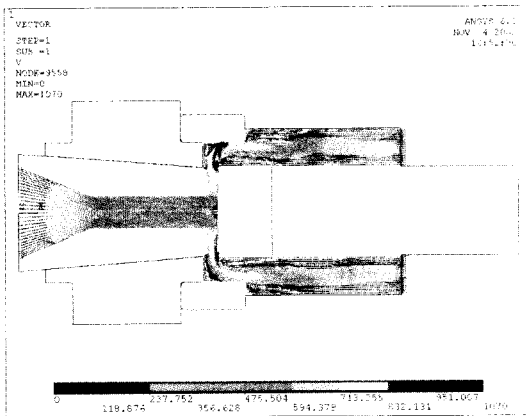


Fig. 13 Velocity distribution of injection nozzle

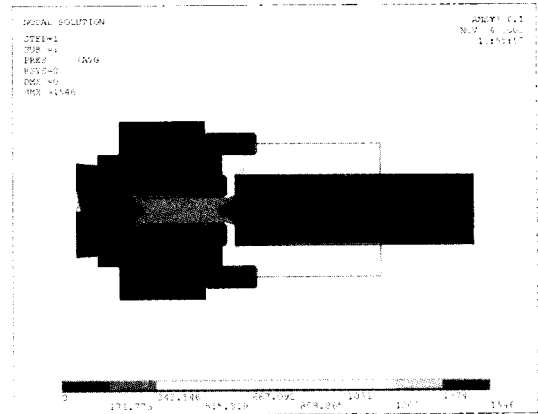


Fig. 14 Pressure distribution of injection nozzle

4. 분사노즐 영역의 해석

4.1 분사노즐 영역의 유동-구조 해석

Fig. 11은 24,728개의 절점과 24,588개의 요소로 이루어진 분사노즐의 유동 해석영역과 구조 해석영역의 유한요소 모델을 보여준다. 분사노즐에 대한 해석은 유동 해석영역과 구조 해석영역이 공존하므로 두 영역을 모두 유한요소 모델화하며 절점생성시 두 해석영역의 경계면에서 절점이 공유될 수 있도록 한다.

Fig. 12는 유동 해석영역에 입구조건과 출구조건, 경계조건 등을 적용한 상태를 보여주는 것이다.

Fig. 13과 Fig. 14는 분사노즐의 유동 해석을 통해 얻어진 속도와 압력분포를 나타낸다. 분사노즐의 재질은 스테인

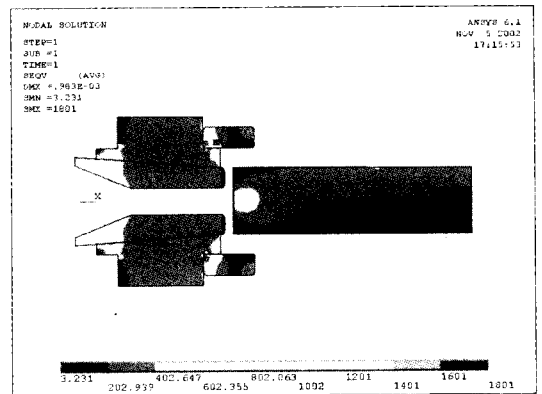


Fig. 15 Stress distribution of injection nozzle with pressure 500kgf/cm²

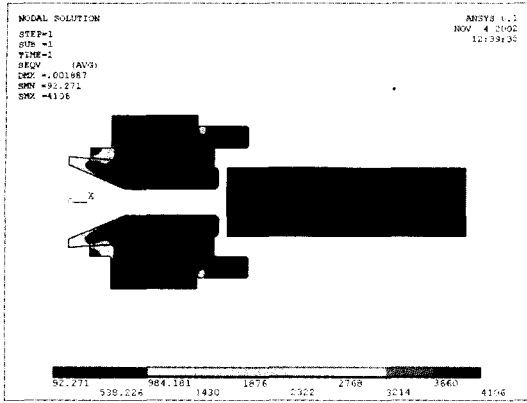


Fig. 16 Stress distribution of injection nozzle with pressure 1000kgf/cm²

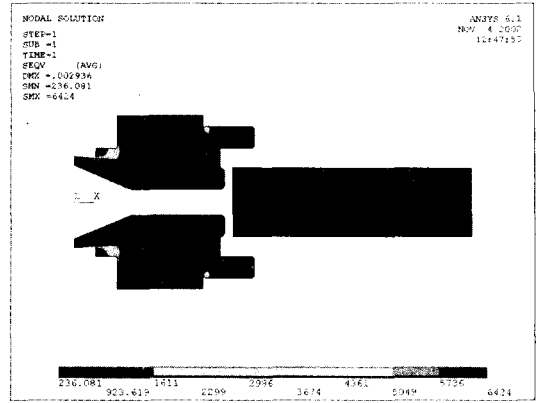


Fig. 17 Stress distribution of injection nozzle with pressure 1500kgf/cm²

리스 강과 지르코니아로 이루어져있으므로 재질들이 접촉하는 부분에는 contact을 정의하고, 균질기내에서의 위치 등을 고려하여 경계조건을 적용한다. 그리고 유동 해석으로 얻어진 압력분포값을 내압조건으로 활용하여 적용한다.

분사노즐의 해석은 압력 300kgf/cm²~1500kgf/cm²의 경우에 대하여 수행하였으며, Fig. 15~Fig. 17은 압력 500, 1000, 1500kgf/cm²에 대한 응력의 분포를 나타낸다.

사노즐의 최적형상에 대한 구조 해석 결과를 Table 4에 나타내었다.

플런저에서 응력의 분포는 압력이 증가함에 따라 구조적으로 취약한 부분에 집중되던 것이 구조물 전체로 확산되며 최대값은 점차적으로 감소한다.

분사노즐에서 응력의 분포는 저압에서 구조적으로 취약하게 여겨지는 일부분에 집중되는 현상을 나타내었으나 그

4.2 구조 해석 결과 및 고찰

플런저의 최적형상에 대한 구조 해석 결과를 Table 3, 분

Table 3 Stress and strain results of plunger

Pressure (kg /cm ²)	Stress (kg /cm ²)		Strain	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
500	9983	53.26	0.004751	0.273E-04
600	9888	60.081	0.004706	0.339E-04
700	9793	77.903	0.004661	0.371E-04
800	9701	74.722	0.004617	0.356E-04
900	9607	72.418	0.004572	0.345E-04
1000	9512	68.592	0.004527	0.326E-04
1100	9419	66.258	0.004483	0.315E-04
1200	9327	63.251	0.004439	0.301E-04
1300	9233	60.179	0.004394	0.287E-04
1400	9139	57.177	0.005654	0.354E-04
1500	9037	54.198	0.005591	0.335E-04

Table 4 Stress and strain results of injection nozzle

Pressure (kg /cm ²)	Stress (kg /cm ²)		Strain	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
300	1344	6.257	0.739E-03	0.307E-05
400	1525	10.987	0.788E-03	0.544E-05
500	1801	3.231	0.001022	0.260E-05
600	2258	9.174	0.001271	0.437E-05
700	2719	31.592	0.001521	0.206E-04
800	3181	73.338	0.001772	0.456E-04
900	3643	82.787	0.002024	0.449E-04
1000	4106	92.271	0.002275	0.537E-04
1100	4569	131.126	0.002527	0.696E-04
1200	5032	176.86	0.002779	0.853E-04
1300	5496	197.323	0.003032	0.104E-03
1400	5960	216.519	0.003284	0.116E-03
1500	6424	236.081	0.003536	0.125E-03

값은 작고, 고압으로 갈수록 구조물 전부분에 넓게 확산되며 구조적으로 불안정한 한 곳에 응력이 집중되고 그 값 또한 크게 증가한다.

변형률은 압력의 증가에 따라 큰 폭으로 증가하며 최대값과 최소값 발생부분은 응력의 경우와 동일하다.

5. 결론

본 논문에서는 분사노즐을 플런저 영역과 플런저를 포함하는 분사노즐의 두 영역으로 나누고, 플런저 영역에 대하여 유동 해석을 수행하여 최적형상을 결정하였다. 플런저의 최적형상을 기초로하여 분사노즐 전체의 형상을 설계하고 최적형상에 대하여 유동 및 구조 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 플런저의 유동 영역에 대해 플런저의 직경을 5~8mm, 출구 형상을 round와 chamfer로 변화시키며 유동 해석을 수행하여 각 형상에 대한 속도분포와 압력분포를 얻을 수 있었으며, 압력유지와 속도에 알맞는 최적형상을 결정하였다.
- (2) 플런저에서는 압력이 증가함에 따라 응력의 분포가 플런저 구조물 전부분에 걸쳐 확산되며 그 최대값은 점차적으로 감소함을 알 수 있었고, 변형률의 분포는 압력의 증가에 따라 응력과 같은 분포를 가지며 그 최대값은 점차적으로 감소한다.
- (3) 분사노즐에서 응력의 분포는 저압에서 구조적으로 취약하게 여겨지는 몇부분에 집중되는 현상을, 고압으로 갈수록 구조물 전부분에 걸쳐 넓게 확산되며 구조적으로 불안정한 한 곳에 응력이 집중되고 그 값 또한 크게 증가함을 알 수 있다. 응력의 분포에 따라 응력

의 최대값과 최소값도 압력이 증가할수록 한 부분에 집중됨으로 그 값이 큰 폭으로 증가한다.

- (4) 유동 해석에 의해 최적설계된 분사노즐의 구조적 형상이 300kgf/cm²~1500kgf/cm²까지 모든 압력에 대해 안정적임을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2002학년도 대전대학교 학술연구비지원에 의한 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Bae, D. H. and Shin, J. S., 2000, "Silicone Nanoemulsion with Hydrogenated Lecithin", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 11, No. 5, pp. 522~527.
- (2) 1996, *ANSYS User's Manual Revision 5.3*, Swanson Analysis System, Inc.
- (3) Chandrupatla, T. R. and Belegundu, A. D., 1991, *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Prentice Hall.
- (4) Weaver, Jr. W. and Johnston, R., 1993, *Finite Elements for Structural Analysis*, Prentice Hall, Inc.
- (5) Shackelford, J. and Alexander, W., 1994, *Material Science & Engineering Hand Book*, CRC Press.
- (6) Yamamoto, T., 2000, "A Study of Internal Flow in Diesel Fuel Injection Nozzle", *Transactions-Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 31, No. 1, pp. 11~16.