*Transactions of KSAE, Vol. 24, No. 3, pp.338-344 (2016)*

Copyright © 2016 KSAE / 142-10
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
**DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.3.338**

# 초고압 커먼레일 연료분사튜브 원재료 강성 최적화를 위한 인발 공정에서의 Die와 Plug 각도 변경에 따른 해석적 연구

안 서 연[1] · 박 정 권[*1] · 김 용 겸[1] · 원 종 필[1] · 김 현 수[2] · 강 인 산[2]

자동차부품연구원 열제어시스템연구센터[1]
YCP 기술연구소[2]

# An Analytical Study by Variation of Die and Plug Angle in Drawing Process for the Strength Optimization of Ultra High Pressure Common Rail Fuel Injection Tube Raw Material

Seoyeon Ahn[1] • Jungkwon Park[*1] • Yonggyeom Kim[1] • Jongphil Won[1] • Hyunsoo Kim[2] • Insan Kang[2]

*[1]Thermal Management System R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea*
*[2]R&D Center, YCP Co. Ltd., 74 Dasan-ro, Saha-gu, Busan 49498, Korea*
***(Received 20 October 2015 / Revised 25 March 2016 / Accepted 25 March 2016)***

**Abstract** : The study is actively being performed to increase fuel injection pressure of common rail system among countermeasures to meet the emission regulation strengthen of the Diesel engine. The common rail fuel injection tube in such ultra high pressure common rail system has the weakest structural characteristics against vibration that is generated by fuel injection pressure and pulsation during engine operation and driving. Thus the extreme durability is required for common rail fuel injection tube, and the drawing process is being magnified as the most important technical fact for strength of seamless pipe that is the raw material of common rail tube. In this respect, we analyzed the characteristic of dimension and stress variation of the ultra high pressure common rail fuel injection tube by variation of Die and Plug angle in drawing process. Based on the analysis, we tried to obtain the raw material strength of common rail fuel injection tube for applying to the ultra high pressure common rail system. As a result, Plug angle is more important than entry angle of Die and we could obtain the target dimension and strength of the ultra high pressure common rail fuel injection tube through optimization of Plug angle.

**Key words** : Direct injection diesel engine(직분사 디젤 엔진), Common-rail system(커먼레일 시스템), Ultra high pressure fuel tube(초고압 연료튜브), Drawing process(인발 공정), Finite element method(유한요소법)

## Nomenclature

$u$ : displacement vector of a nodal point
$\dot{u}$ : velocity vector of a nodal point
$\ddot{u}$ : acceleration vector of a nodal point
$i$ : increment number
$M$ : lumped mass matrix
$F$ : load vector
$I$ : internal force vector
$\triangle t$ : time increment
$\omega_{\max}$ : element maximum eigenvalue
$L_e$ : characteristic element dimension
$C_d$ : dilatational wave speed of the material

*Corresponding author, E-mail: parkjk@katech.re.kr

### Subscripts

$a$ : average stress of the die nib side tube
$a'$ : average stress of the plug nib side tube
$\omega$ : die semi-angle
$\omega'$ : plug semi-angle
OD : out side diameter of the pipe
$t$ : tube thickness

## 1. 서 론

높은 열효율을 지닌 디젤엔진은 향후 $CO_2$ 규제에 대응하기 위한 가장 좋은 기술적 대응 방안 중 하나로 알려져 있다.[1,2] 특히 직분사 디젤엔진은 $CO_2$ 및 배출가스 저감 그리고 연비 성능에 있어 우수한 성능을 지니고 있으며,[3-5] 분사 시기의 자유로운 선택 및 높은 분사압력의 구현이 가능한 커먼레일 시스템을 기반으로 하고 있다.[6]

커먼레일 시스템은 연료분사압력을 기준으로 1세대인 1,350 bar에서 2세대인 1,600 bar, 3세대인 1,800 bar 그리고 고업 분사압력으로 구분되는 4세대인 2,000 bar까지 적용된 상태이다.[7]

이러한 커먼레일 시스템 중 초고압 연료분사튜브는 커먼레일 시스템의 높은 분사압력과 반복되는 분사에 의한 맥동, 그리고 엔진 구동 및 차량 주행 과정에서 발생하는 진동을 극복할 수 있는 극한의 내구 신뢰성을 필요로 하고 있다.[8,9]

이러한 관점에서 초고압 연료분사튜브의 원재료인 seamless pipe에 대한 강성 확보를 위한 인발공정이 중요한 기술적 요소로 부각되고 있다.

인발 공정은 경사가 있는 Die를 통하여 소재를 잡아당겨 원하는 단면을 얻고자 하는 체적소성가공으로써 주로 봉재 및 관재의 단면적을 축소시키거나 그 두께를 감소시키기 위하여 사용된다. 특히, 보다 작은 직경의 정밀한 튜브의 제조를 위하여 Plug를 사용하면 튜브의 내면 및 외면의 직경 제어가 용이하다.[10]

이러한 인발 공정에 대한 연구로써, Kampus[11]는 인발된 소재의 치수 및 형상에 영향을 주는 인자를 연구하기 위하여 elasto-plasticity equations로 구성된 모델과 FEM(Finite Element Model) 상용프로그램으로 구성한 모델의 결과를 비교, 분석하였다. 또한 이영선 등[12]은 실험과 유한요소해석에서 구한 strains를 비교하여 Die와 소재의 치수에 영향을 미치는 인자들은 분석하였다. 또한 Dixit 등[13]은 wire의 감면율(reduction ratio), Die 각도(Die semi-angle), 마찰계수(coefficient of friction) 및 back tension등의 인자들이 Die에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다.

이러한 관점에서, 본 연구는 인발공정에서의 Die와 Plug의 각도 변경에 따른 초고압 커먼레일 연료분사튜브의 물리적 수치변화 및 그에 따른 응력 변화를 비교, 분석하였다. 이를 통해 2,200 bar 커먼레일 연료분사튜브의 원재료인 seamless pipe의 최적화된 강성을 확보하고자 하였다.

## 2. Solution procedures

### 2.1 Explicit dynamic analysis

본 연구는 접촉과 함께 큰 변형을 포함하는 3차원 해석이다. 그러므로 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)기법을 적용하여 이와 같이 비선형성이 큰 해석에서 강건한 해를 구하기 위하여 Abaqus의 explicit solver를 이용하여 초고압 연료분사튜브에 대한 인발 공정 해석을 수행하였다.

Explicit procedure는 diagonal element mass matrix의 사용에 기초하고 있다.[14] 물체의 운동 방정식은 중앙차분법에 의해 식 (1) ~ (3)과 같이 정의한다.

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \triangle t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+1)} \tag{1}$$

$$\dot{u}^{(i+1/2)} = \dot{u}^{(i-1/2)} + \frac{1}{2}(\triangle t^{(i+1)} + \triangle t^{(i)})\ddot{u}^{(i)} \tag{2}$$

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1} \cdot (F^{(i)} - I^{(i)}) \tag{3}$$

위의 내용과 같이, explicit 방법은 조건적으로 안정하기 때문에 시간증분은 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\triangle t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \tag{4}$$

그리고 각 요소에서 구해진 임계시간증분들 중 최소값을 그 계산단계의 시간증분으로 결정하여 시간증분 크기는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\triangle t \leq \min\left(\frac{L_e}{C_d}\right) \tag{5}$$

### 2.2 Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) adaptive meshing

Arbitrary Lagrangian-Eulerian 기법은 소재의 변형이 극심한 대변형 관련 해석 시 발생하는 요소의 왜곡 문제를 회피하기 위하여 개발된 기법이다.[15] 이러한 대변형은 격자를 심하게 변형시켜서 정확한 결과를 제공하는 것이 어려워지거나 수렴이 어려워져서 해석이 중단되는 것을 방지해준다. 그러므로 이러한 왜곡을 최소화시켜 정확해를 얻기 위하여 ALE 기법을 적용하였다. 이 기법은 요소를 매끄럽게 하게하고, 요소 종횡비를 유지하여 요소의 왜곡을 줄여준다. 이렇게 형상의 변형에 따라 적절하게 요소를 적응배열시킴으로써 격자의 왜곡을 최소화하는 효과를 준다. 또한 절점 변위와 재료의 변위를 구분하여 해석하지만 이전 단계에서 계산된 각 요소의 변수값은 변위 발생 이후에도 재료 변위와 부합하도록 2차 advection기법이 적용된다.[16,17]

## 3. 해석 모델

### 3.1 Geometry model

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 커먼레일 초고압 연료분사튜브의 인발 공정 모델의 개략도이다. Die, Plug, 튜브로 구성되어 있으며, 고정된 Die와 Plug의 사이를 튜브가 일정한 속도로 이동하며 인발이 진행된다.

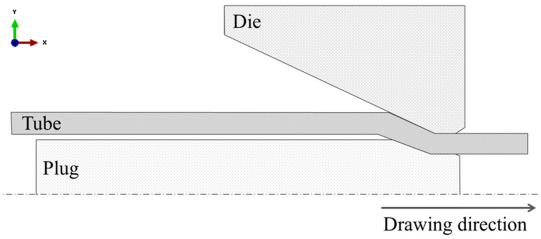


Fig. 1 Schematic of tube drawing with fixed Plug

### 3.2 유한요소해석 모델

커먼레일 초고압 연료분사튜브의 인발 공정에서 Die와 Plug의 형상 변화가 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 유한요소해석 Software인 Abaqus v6.14-1을 이용하여 연구를 수행하였다.

Die와 Plug는 탄성 변화량이 미비하다고 가정하여 rigid body로 모델링 하였으며, 튜브는 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 모두 hexahedron element로 모델링 하였다. 또한 Die와 튜브, Plug와 튜브가 맞닿는 면에는 0.01의 coulomb friction을 가지는 마찰조건을 적용하였으며[18] Fig. 2와 같이 1/4 symmetric 모델로 구성하여 해석 시간의 경제성을 확보할 수 있도록 하였다.

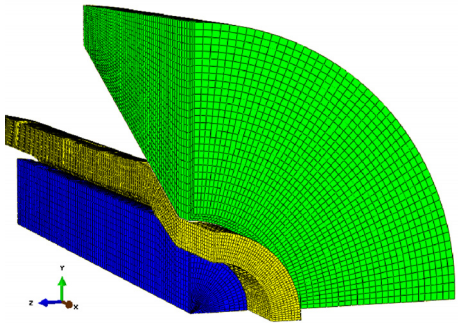

Fig. 2 FE model of the ultra high pressure fuel tube drawing process

### 3.3 재질 물성치

본 논문의 공정에 대한 유한요소해석을 수행하기 위하여 튜브에 적용한 재질은 ST52(DIN17135)로써, Table 1과 같은 재질 특성을 가지며 참고한 유동응력식(flow stress)은 식 (6)과 같다.[19]

또한 인발 공정 후 최종 제품에서 yield strength는 600 N/mm², tensile strength는 700 N/mm²의 이상의 성능을 가지도록 한다.

Table 1 Material properties

| | |
|---|---|
| Young's modulus (GPa) | 210 |
| Poisson's ratio | 0.3 |
| Density (Ton/mm$^3$) | $7.85 \times 10^{-9}$ |

$$\sigma = 1161.62(\epsilon - 0.007122)^{0.222}\dot{\epsilon}^{-0.0271} \quad (6)$$

## 4. 인발 공정 설계

### 4.1 공정 변수

본 연구에서는 초고압 연료분사튜브의 인발 공정에서 Fig. 3과 같이 Die의 $\omega$와 Plug의 $\omega'$ 중 어떤 인자가 더욱 영향을 미치는지 분석하기 위하여 두 인자

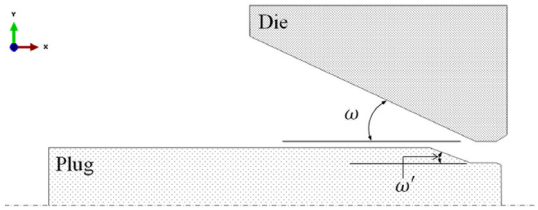


Fig. 3 Design description

Table 2 $\omega$ and $\omega'$ of each case

| Design | $\omega$[°] | $\omega'$[°] |
|---|---|---|
| Base | 20 | 15 |
| Case 1 | 20 | 10 |
| Case 2 | 20 | 20 |
| Case 3 | 15 | 15 |
| Case 4 | 25 | 15 |

를 변수로 설정하여 각도 변경에 따른 물리적 특성에 대한 해석을 수행하였다.

Table 2는 이러한 해석 Case에 대한 내용을 제시하고 있으며, 기준이 되는 Base를 $\omega$는 20°, $\omega'$는 15°로 설정하였다.

이때 $\omega'$의 변화가 초고압 연료분사튜브의 인발 공정에 미치는 영향을 분석하기 위해 $\omega$는 20°로 고정하고 $\omega'$를 10°, 20°로 하여 Case 1, Case 2를 모델링하였다. 또한 $\omega$의 변화가 초고압 연료분사튜브의 인발 공정에 미치는 영향을 분석하기 위해 $\omega'$는 15°로 고정하고 $\omega$를 15°와 25°로 구성하여 Case 3과 Case 4를 모델링하여 해석을 수행하였다.

### 4.2 초고압 연료 튜브의 인발 공정

초고압 연료분사튜브의 인발공정은 총 4차로 이루어지며, 각 차수의 인발 후, 후처리를 통하여 잔류응력을 제거한 후 다음 차수의 인발을 진행한다. 이때 튜브의 치수 변화 및 단면적의 변화는 Table 3과 같다.

Table 3 Base design dimension of each pass

| Pass | OD[mm] × t | Area[mm$^2$] |
|---|---|---|
| Initial | 34.000 × 4.500 | 417.046 |
| 1st | 25.000 × 4.150 | 271.834 |
| 2nd | 16.700 × 2.780 | 121.572 |
| 3rd | 11.140 × 2.395 | 65.798 |
| 4th | 6.350 × 1.675 | 24.601 |

## 5. 유한요소해석 결과

### 5.1 결과 요약

Table 4는 인발 공정 차수에 따른 OD에 대한 해석 결과로써 $\omega'$가 15°인 Base와 Case 3 그리고 Case 4의 경우에서 OD의 수치가 가장 작게 나타남을 확인할 수 있다.

Table 5는 초고압 연료분사튜브의 내압강도를 위한 thickness의 결과를 제시한 것으로써 $\omega$와 $\omega'$의 값이 상이한 Case 1과 Case 4가 $\omega$와 $\omega'$의 값이 동일한 Case 2와 Case 3에 비해 두꺼운 형태로 최종 유지됨을 확인할 수 있다.

Table 6은 $a$구간에서 발생하는 튜브의 응력, Table 7은 $a'$구간에서 발생하는 튜브의 응력을 제시한 것으로써, $\omega$와 $\omega'$의 값이 상이한 Case 1과 Case 4가 $\omega$와 $\omega'$의 값이 동일한 Case 2와 Case 3에 비해 낮게 형성된 것을 확인할 수 있다.

Table 4 Results of OD[mm]

| Case | $\omega$ | $\omega'$ | 2 pass | 3 pass | 4 pass |
|---|---|---|---|---|---|
| Target | · | · | 16.700 | 11.140 | 6.350 |
| Base | 20 | 15 | 16.397 | 10.906 | 6.266 |
| Case 1 | 20 | 10 | 16.156 | 10.909 | 6.379 |
| Case 2 | 20 | 20 | 16.278 | 10.871 | 6.379 |
| Case 3 | 15 | 15 | 16.417 | 10.952 | 6.266 |
| Case 4 | 25 | 15 | 16.251 | 10.837 | 6.289 |

Table 5 Results of thickness[t]

| Case | $\omega$ | $\omega'$ | 2 pass | 3 pass | 4 pass |
|---|---|---|---|---|---|
| Target | · | · | 2.780 | 2.395 | 1.675 |
| Base | 20 | 15 | 2.619 | 2.280 | 1.635 |
| Case 1 | 20 | 10 | 2.545 | 2.235 | 1.692 |
| Case 2 | 20 | 20 | 2.666 | 2.210 | 1.635 |
| Case 3 | 15 | 15 | 2.635 | 2.300 | 1.617 |
| Case 4 | 25 | 15 | 2.560 | 2.246 | 1.646 |

Table 6 Stresses on section $a$[MPa]

| Case | $\omega$ | $\omega'$ | 2 pass | 3 pass | 4 pass |
|---|---|---|---|---|---|
| Base | 20 | 15 | 464.663 | 337.812 | 465.516 |
| Case 1 | 20 | 10 | 506.475 | 309.915 | 365.172 |
| Case 2 | 20 | 20 | 450.938 | 369.381 | 456.280 |
| Case 3 | 15 | 15 | 466.951 | 413.940 | 403.274 |
| Case 4 | 25 | 15 | 407.348 | 373.650 | 388.981 |

Table 7 Stresses on section $a'$ [MPa]

| Case | $\omega$ | $\omega'$ | 2 pass | 3 pass | 4 pass |
|---|---|---|---|---|---|
| Base | 20 | 15 | 506.583 | 449.844 | 426.727 |
| Case 1 | 20 | 10 | 502.844 | 398.465 | 370.807 |
| Case 2 | 20 | 20 | 486.362 | 493.048 | 464.773 |
| Case 3 | 15 | 15 | 390.583 | 282.317 | 458.850 |
| Case 4 | 25 | 15 | 372.017 | 270.825 | 394.156 |

Fig. 4 ~ 7은 이러한 인발공정에 대한 최종 차수인 4차에 대한 결과로써 Fig. 4는 OD, Fig. 5는 thickness, Fig. 6은 $a$구간에서 발생하는 튜브의 응력, Fig. 7은 $a'$구간에서 발생하는 튜브의 응력을 그래프로 제시하였다.

Fig. 4와 Fig. 5를 통해 Case 1이 target 치수와 가장 근접함을 확인 할 수 있으며 $\omega$와 $\omega'$가 상이한 Case 1과 Case 4가 $\omega$와 $\omega'$가 동일한 Case 2와 Case 3에 비해 최종 인발되는 튜브의 두께가 두꺼운 것을 확인할 수 있다.

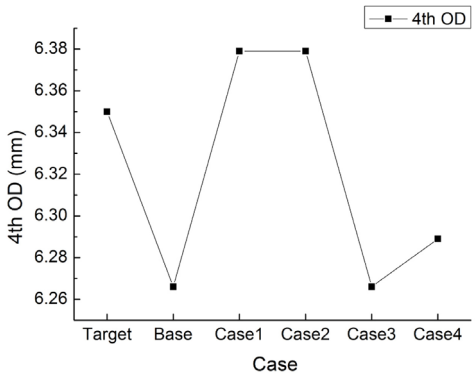


Fig. 4 Analysis results of the last OD

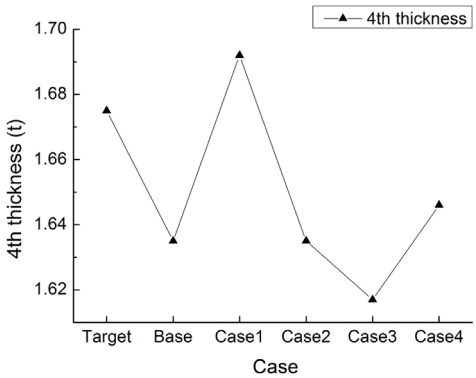


Fig. 5 Analysis results of the last thickness

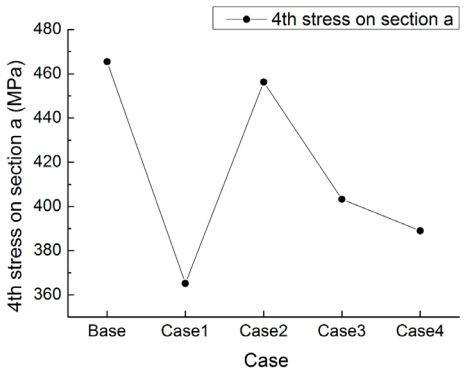


Fig. 6 Analysis results of the last stress on section $a$

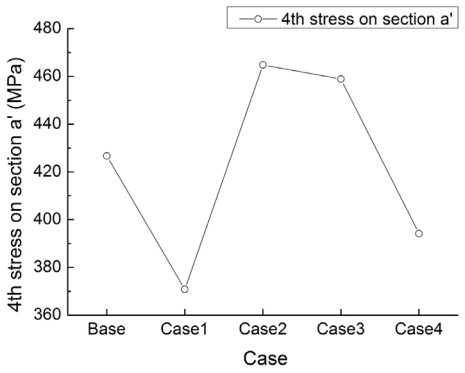


Fig. 7 Analysis results of the last stress on section $a'$

또한 Fig. 6과 Fig. 7을 통해 $a$구간의 응력과 $a'$구간에서 발생하는 튜브의 평균 응력 또한 Base와 Case 1 그리고 Case 4와 같이 $\omega$와 $\omega'$의 값이 상이한 경우가 $\omega$와 $\omega'$가 동일한 Case 2와 Case 3보다 낮게 발생됨을 확인할 수 있다.

이러한 응력의 분포는 Fig. 8 ~ 13을 통하여 각 Case별로 확인할 수 있으며, 인발이 진행되는 차수에 따라 튜브가 변형되는 형상 또한 확인할 수 있다.

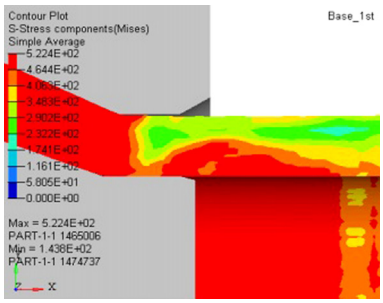


Fig. 8 Deformation and stress on 1st pass of base design

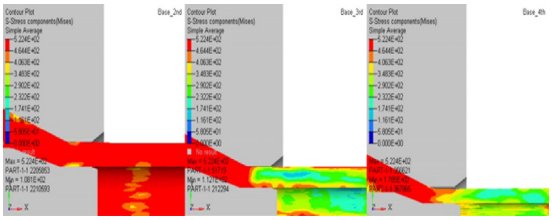

Fig. 9 Deformation and stress on each pass of base design

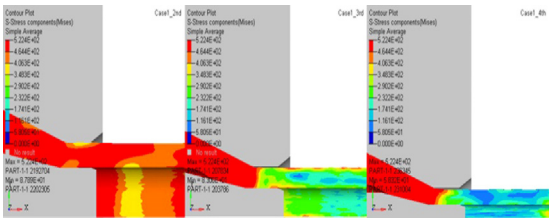

Fig. 10 Deformation and stress on each pass of Case 1

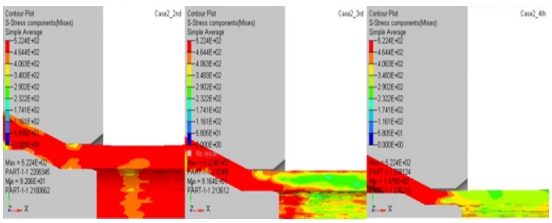

Fig. 11 Deformation and stress on each pass of Case 2

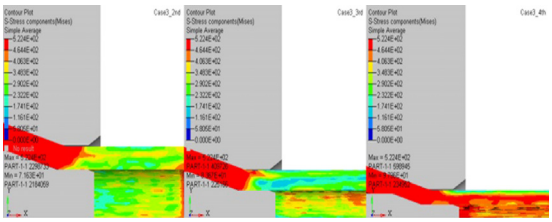

Fig. 12 Deformation and Stress on each pass of Case 3

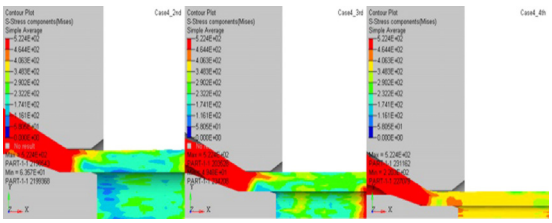

Fig. 13 Deformation and Stress on each pass of Case 4

## 6. 결 론

본 연구에서는 2,200 bar 이상에 대응할 커먼레일 초고압 연료분사튜브 개발을 위한 인발 공정에서 Die와 Plug 각도 변화에 따른 해석적 연구를 진행하였으며 다음과 같은 결과 및 결론을 얻었다.

1) Base을 포함한 Case 3과 Case 4와 같이 Plug의 각도가 15°일 때 최종 인발 공정의 OD에서 상대적으로 그 수치가 작아짐을 확인할 수 있다. 따라서 Die보다는 Plug의 각도가 OD의 수치에 보다 영향을 미치는 것으로 판단된다.
2) 초고압 연료분사튜브의 내압강도를 위한 thickness의 측면에서 Die와 Plug 각도가 다른 Case 1과 Case 4가 Die와 Plug의 각도가 동일한 Case 2와 Case 3에 비해 두꺼운 형태를 유지함을 확인할 수 있었다.
3) $a$, $a'$ 구간에서 발생하는 튜브의 평균 응력 또한 Die와 Plug 각도가 다른 Case 1과 Case 4가 Die와 Plug의 각도가 동일한 Case 2와 Case 3에 비해 낮게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.
4) 이러한 이유는 최종 인발 과정에서 Die와 Plug의 진입각도가 동일 할 경우, 튜브의 형상 변형이 시작되는 부분부터 두께를 결정하는 $a$, $a'$ 구간 전까지 인발되는 높이가 일정하게 유지되므로 인발 초기부터 높은 응력 발생으로 인한 소성변형이 진행되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 처음부터 높은 응력으로 공정이 계속 진행되는 것보다는 Die와 Plug의 진입각도가 달라 튜브의 변형이 서서히 작아지는 형상으로 진행되어 발생하는 응력 또한 서서히 안정적으로 증가하는 방향이 더 좋은 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.
5) 따라서 이러한 결과를 종합해보면 Die의 각도보다는 Plug의 각도를 최적화하는 것이 초 정밀성을 요구하는 초고압 연료분사튜브의 인발 공정에서 목표하는 튜브의 강성확보를 유지하는데 있어 보다 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 구매조건부 신제품 개발 사업[S2151678]의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

## References

1) R. Pesic and S. Milojevic, “Efficiency and Ecolo-

gical Characteristics of a VCR Diesel Engine," Int. J. Automotive Technology, Vol.14, No.5, pp.675-681, 2013.
2) J. C. Bang, "The Study for Improving the Combustion in a Common-rail Diesel Fatigue Using Swirl Groove Piston," Transactions of KSAE, Vol.18, No.6, pp.145-151, 2010.
3) G. M. Bianchi, S. Falfari and P. Pelloni, "Numerical Analysis of High-Pressure Fast-Response Common Rail Injector Dynamics," SAE 2002-01-0213, 2002.
4) J. S. Kim, C. H. Song, J. H. Kim and B. D. Min, "An Experimental Study on the System Effect of Oil Aeration in a Common-Rail Direct Injection Diesel Engine," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.264-269, 2009.
5) S. W. Hong, D. H. Jung and M. H. Sunwoo, "A Control Strategy of Fuel Injection Quantity and Common-rail Pressure to Reduce Particulate Emissions in a Transient State of Diesel Engines," Transactions of KSAE, Vol.23, No.6, pp.623-632, 2015.
6) U. Flaig, W. Polach and G. Ziegler, "Common Rail System(CR-System) for Passenger Car DI Diesel Engines; Experiences with Applications for Series Production Projects," SAE 1999-01-0191, 1999.
7) R. Bosch, "Advanced Diesel Common Rail Injection System for Future Emission Legislation," 10th Diesel Emission Reduction Conference, pp.1-27, 2004.
8) J. H. Bae, M. S. Kim, M. J. Song, S. Y. Jung and C. Kim, "A Study on Optimal Design and Fatigue Life of the Common Rail Pipe," Int. J. Precision Engineering and Manufacturing, Vol.12, No.3, pp.475-483, 2011.
9) J. S. Jang and Y. H. Yoon, "Sensitivity Analysis on Design Parameters of the Fuel Injector for CRDI Engines," Transactions of KSAE, Vol.17, No.5, pp.107-114, 2009.
10) E. M. Rubio, C. Gonzales, M. Marcos and M. A. Sebastian, "Energetic Analysis of Tube Drawing Processes with Fixed Plug by Upper Bound Method," Int. J. Material Processing Engineering and Manufacturing, Vol.177, No.1, pp.175-178, 2006.
11) Z. Kampus, "Analysis of Factors Influencing Accuracy in the Drawing of Round Rods," Journal of Materials Processing Technology, Vol.87, No.1, pp.90-96, 1999.
12) Y. S. Lee, J. H. Lee, Y. N. Kwon and T. Ishikawa, "Analysis of the Elastic Characteristics at Die and Workpiece to Improve the Dimensional Accuracy for Cold Forged Part," Journal of Materials Processing Technology, Vol.153, pp.1081-1088, 2004.
13) U. S. Dixit and P. M. Dixit, "An Analysis of the Steady-state Wire Drawing of Strain-hardening Materials," Journal of Materials Processing Technology, Vol.47, No.3, pp.201-229, 1995.
14) J. S. Sun, K. H. Lee, and H. P. Lee, "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Dynamic Problems," Journal of Materials Processing Technology, Vol.105, No.1, pp.110-118, 2000.
15) S. Ghosh and N. Kikuchi, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method for Large Deformation Analysis of Elastic-viscoplastic Solids," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.86, No.2, pp.127-188, 1991.
16) J. H. Lee, J. S. Park and S. M. Byon, "ALE FE Analysis of Sheet Parts with Variable Thickness During Flow Forming," Transactions of KSME, pp.1342-1346, 2011.
17) S. H. Na, I. S. Jang, O. S. Kwon and S. H. Lee, "Study on Pullout Behavior of Embedded Suction Anchors in Sand Using ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.34, No.1, pp.167-173, 2014.
18) F. O. Neves, S. T. Button, C. Caminaga and F. C. Gentile, "Numerical and Experimental Analysis of Tube Drawing with Fixed Plug," Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol.27, No.4, pp.426-431, 2005.
19) G. H. Majzoobi, S. F. Z. Khroshahi and H. B. Mohammadloo, "Determination of Materials Parameters Under Dynamic Loading: Part II: Optimization," Computational Materials Science, Vol.49, No.2, pp.201-208, 2010.