

GDI Fuel Rail 제조를 위한 멀티 롤 다이 인발 공정 설계

김세환¹ · 김정훈¹ · 김병민[#]

Process Design for Multi Roll-Die Drawing of GDI Fuel Rail

S. H. Kim, J. H. Kim, B. M. Kim

(Received September 23, 2016 / Revised October 24, 2016 / Accepted October 27, 2016)

Abstract

GDI fuel rail is component of GDI system which directly fuel with high pressure in the engine combustion chamber. And it is required to high strength and dimensional accuracy. Multi roll-die drawing process consists of the idle roll-die and drawing die in tandem. In the course of drawing with roll-die, deformation takes place between the idle roller pair or pairs. The friction force decreases with the idle roll-die, enabling the reductions to be risen in one step. In this study, the caliber of 4-roll was designed into pass schedule that made the draw force at the exit of the drawing die be equal. In order to compensate for over-filling area, the roll caliber was modified using the result of FE-analysis. The results of FE-analysis and experiment show that the proposed design method can be used to effectively design the multi roll-die process, leading to an accurate shape and correct dimensions of the final within an allowable tolerance of ± 0.08 mm. Furthermore, the productivity was evaluated by comparing with multi roll-die drawing process and conventional multi shape drawing process. The result was confirmed that it has an efficiency of about 2 times than conventional process in terms of time.

Key Words : Process Design, Multi Roll-die Drawing, Idle Shape Roll, 4-roll, Shape Drawing Die

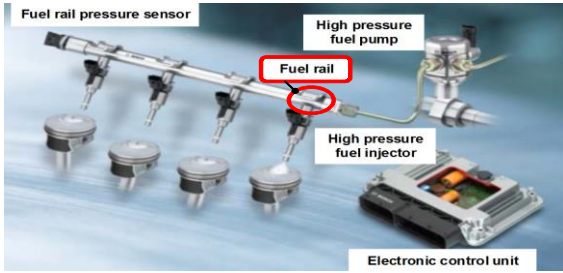
1. 서론

최근 EURO-5/6, ZLEV 등의 환경규제에 대응하기 위한 GDI 엔진의 주요 구성요소인 Fuel rail은 고압의 연료를 실린더 내에 직접 분사하는 장치 중의 하나이다[1, 2]. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 Fuel rail은 압력 센서(pressure sensor)와 분사노즐(injection nozzle)을 연결하는 부품으로 분사압력의 고압화에 따라 물리적, 기계적 성질의 향상이 필수적이며, 동시에 높은 치수정밀도가 요구된다.

기존의 단단 인발 공정은 여러 단일 패스의 인발 공정을 통해 제조하는데 비해 멀티 롤 다이 인발(multi

roll-die drawing) 공정은 두개 이상의 다이를 나란히 두고 한번에 인발함으로써 후방장력의 효과로 인한 총 인발력을 감소시키는 효과가 있으며, 인발 공정의 생산성 향상에 효과가 있다[3]. 그뿐만 아니라 멀티 롤 다이 인발 공정은 고정된 인발 다이를 회전 운동이 가능한 비구동 롤 다이(idle roll-die)로 대체하여 다이와 소재의 접점에서 유동응력과 마찰력을 감소시킴으로써 인발력을 저감시키는 장점이 있다[4, 5]. 따라서 롤 다이를 사용할 경우, 기존의 인발 다이를 사용한 공정보다 더 높은 감면율을 확보할 수 있고, 멀티 롤 다이 공정에서 등하중 패스스케줄로 설계함으로써 다이 수명향상을 기대할 수 있다[6, 7].

1. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템전공
Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr



(a) GDI fuel rail assemblies



(b) Cross-sectional shape of GDI fuel rail

Fig. 1 Assemblies and cross-sectional shape of GDI fuel rail

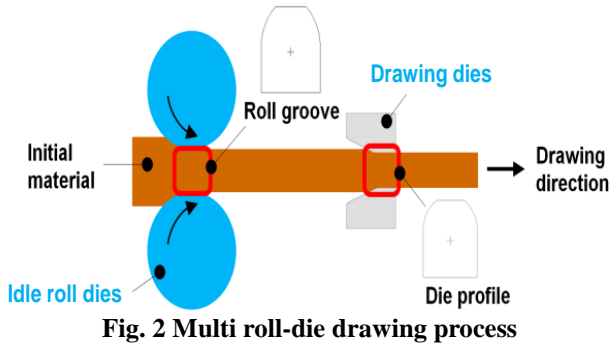


Fig. 2 Multi roll-die drawing process

본 연구에서는 단면형상이 이형인 Fuel rail 제품에 대하여 멀티 롤 다이 인발 공정을 적용하였으며, 비구동 롤 다이 인발 공정의 설계 방법을 제안하였다. 롤 다이의 공형은 인발력 저감 효과를 고려하여 등하중 패스 스케줄로 설계하였으며, 유한요소해석 결과로부터 롤 갭(gap)사이로 발생하는 충전 결함량을 고려한 롤 다이 공형의 치수를 보정하였다. 설계된 멀티 롤 다이 인발 공정은 유한요소해석 및 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다. 또한, 멀티 롤 다이 인발 공정 및 기존 다단 형상 인발 공정의 생산성을 비교하였다.

2. 멀티 롤 다이 인발 공정설계

2.1 멀티 롤 다이 인발 공정

본 연구에서 멀티 롤 다이 인발 공정은 Fig. 2와

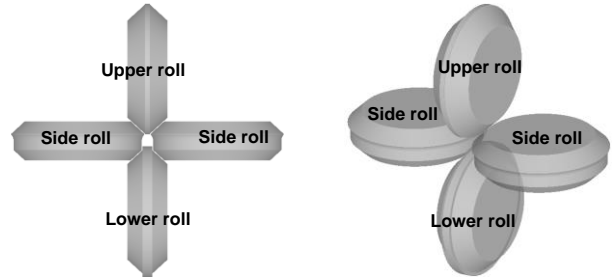


Fig. 3 Idle roll-die drawing by 4-roll dies

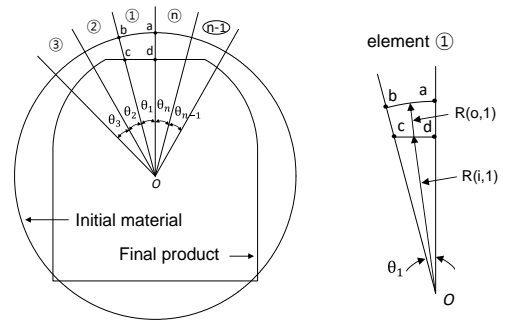


Fig. 4 Divided drawing material

같이 비구동 롤 다이 및 치수정밀도 확보를 위한 인발 다이로 구성하였다. 롤 다이는 4-롤인 경우 2-롤 및 3-롤 다이 보다 단순 연신 변형이 직선에 가까워 치수정밀도와 연신 효율이 우수하다[8]. 따라서 Fig. 3과 같이 4-롤 다이 및 인발 다이를 사용한 멀티 롤 다이 인발 공정을 통해 초기 원형에서 Fuel rail 형상으로 제조하였다.

2.2 인발 하중 예측

본 연구에서는 중간패스 형상을 설계하기 위해 롤 다이와 인발 다이에 대해 요구되는 인발하중을 계산하였고, 등하중 패스 스케줄 설계를 통해 롤 공형을 설정하였다.

인발하중은 초기 소재 및 제품 형상의 단면을 유한개의 요소로 나누어 소재에 발생하는 형상 인발하중을 평가하는 단면요소분할법을 이용하여 계산하였다[9]. Fig. 4에 나타난 미소 요소 ①에 대해 중심점 O와 초기 소재 외곽선 a-b까지의 평균 반경 $R(o, 1)$, 인발 후 c-d까지의 평균거리의 반경이 $R(i, 1)$ 인 축대칭 인발로 가정하였다. 미소 요소 ①의 인발하중은 전체 축대칭 모델(중심각 2π)에 비례하여 다음의 식(1)로 계산이 가능하다.

$$Z_{i,ele} = Z_i / (\theta_i / 2\pi) \quad (1)$$

여기서, Z_i 는 전체 축대칭 모델(중심각 2π)에 대한 인발하중, θ_i 은 미소 요소 중심각, 그리고 $Z_{i,ele}$ 는 하나의 미소 요소에 대한 인발하중이다.

비구동 롤 다이에 적용되는 식(2)와 인발 다이에 적용되는 식(3)에 대해 요구되는 i 번째 미소 요소의 인발하중값은 A.Geleji 모델을 이용하여 계산되었다 [10].

$$Z_i = k_{m,i} (F_i + Q_i \frac{V_r}{V_k} \cdot \mu_i) + 0.77 \cdot k_{fm} \cdot f_{2,i} \cdot \alpha_i \quad (2)$$

$$Z_i = k_{m,i} (F_i + Q_i \cdot \mu_i) + 0.77 \cdot k_{fm} \cdot f_{2,i} \cdot \alpha_i \quad (3)$$

여기서, $k_{m,i}$ 는 재료의 평균변형저항, k_{fm} 은 재료의 평균변형강도, F_i 는 다이 입구부와 출구부의 단면적 차이, Q_i 는 소재와 다이 접촉면 길이, V_k 는 롤의 주 속도, V_r 은 표면에서의 상대 미끄럼 속도의 평균값, μ_i 는 다이와 소재 사이의 마찰계수, $f_{2,i}$ 는 다이 출구부 단면적, α_i 는 다이 반각이다. 비구동 롤 다이 및 인발 다이에 대한 최종 인발하중(Z_{total})은 식(4)와 같다.

$$Z_{total} = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (4)$$

여기서, n 은 단면요소분할법에 의해 분할된 미소 요소 단면의 개수이다.

2.3 비구동 롤 다이 공형 설계

초기 원형 소재에서 이형 제품으로 인발하기 위한 비구동 롤 다이 공형의 설계 순서는 Fig. 5와 같다. 등하중 패스에서 구한 감면을 만큼 최종제품 단면형상의 치수를 확대하여 비구동 롤 다이 공형의 치수로 결정한다. 또한 유한요소해석을 통해 설계된 비구동 롤 다이에서의 충전 결함(filling defect)을 확인한다. 국부적인 충전 결함이 발생한 부분에 대해 소재의 연신량을 보상하는 Local-offset법을 적용한다[11].

이때, 소재의 반경방향 대신 길이방향으로 성형되어 롤 갭에 발생하는 충전 결함의 단면적에 대한 소재 연신량 보상은 식(5)와 같이 계산된다

$$A_i' = A_i + (1 + \varepsilon_i) A_0 \quad (5)$$

여기서, A_i' 는 연신량 보상식을 적용하여 수정된 공형 단면적, A_i 는 처음 설계된 공형 단면적, ε_i 는

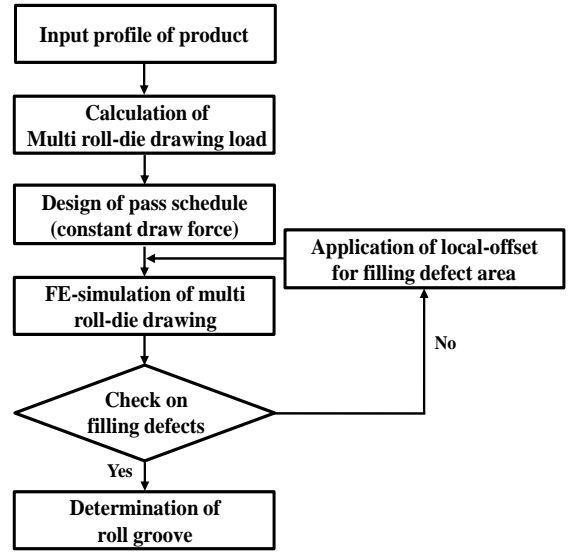


Fig. 5 Flowchart for design of roll groove

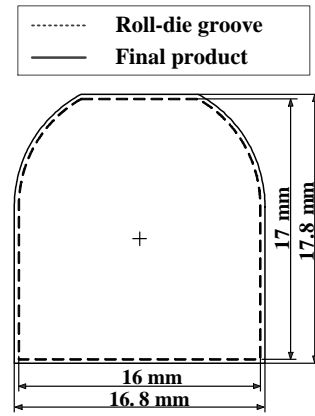


Fig. 6 Profile of roll-die groove

멀티 롤 다이에 비구동 롤 다이를 통과한 후 발생하는 패스 연신율, A_0 는 인발할 때 발생하는 충전 결함 단면적이다.

3. 공정 설계의 적용

3.1 공형 설계 및 유한요소해석

Fuel rail 제품을 위한 멀티 롤 다이 인발하중의 계산은 각 패스의 단면을 중심각이 6° 인 60개의 미소 요소로 분할하여 수행되었으며, 등하중 패스 스케줄을 통해 결정된 각 패스의 치수는 Fig. 6과 같다. 단면감소율은 각각 26.29%, 8.9%이며, 총 단면감소율은 32.84%이다. 초기 소재의 직경은 22mm이다.

유한요소해석에 적용된 소재는 STS304이며, 인장 시험을 통해 확보한 유동 응력식은 식(6)과 같다.

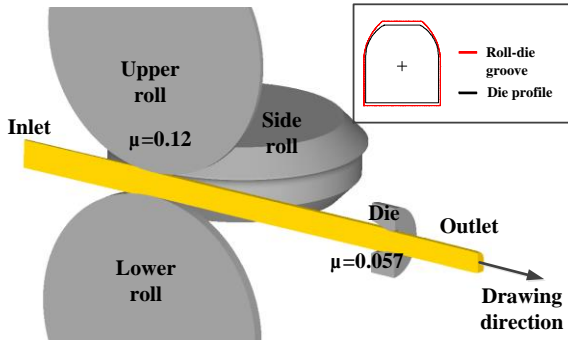


Fig. 7 FE-model of drawing process

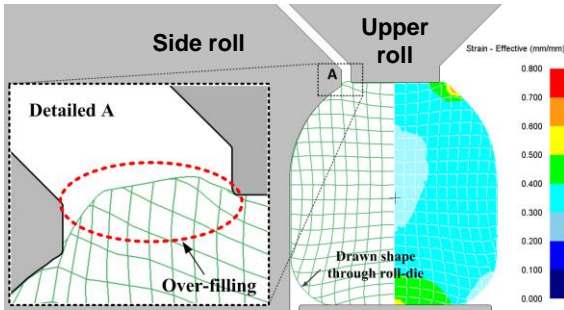


Fig. 8 Drawn shape through roll-die in FE-simulation

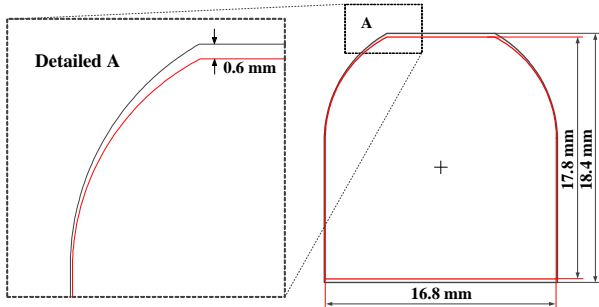


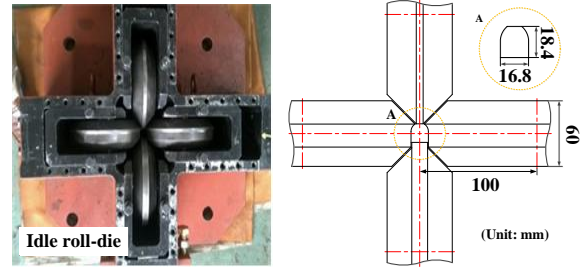
Fig. 9 Modification of roll-die groove

$$\bar{\sigma} = 1308.58 \cdot \bar{\epsilon}^{0.4491} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

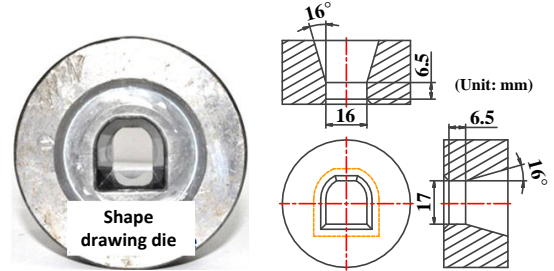
유한요소해석은 Fig. 7과 같이 1/2-모델로 수행하였다. 해석 조건으로 인발속도는 10mm/s, 초기 소재의 길이는 350mm, 요소 수는 150,000개로 설정하였다. 마찰계수(μ)는 실험을 통해 얻은 값을 적용하였으며, 그 값은 각각 0.12, 0.057이다.

3.2 유한요소해석 결과

Fuel rail 제품을 위한 멀티 롤 다이 인발 공정의 유한요소해석 결과, Fig. 8과 같이 다이와 소재가 접촉되는 부분은 Upper roll과 Side roll 사이에서 보다 반경방향으로 소재의 유동이 많아진다. 따라서 롤의 갭 사이에서 과충진 결함(over-filling)이 발생한다. 또



(a) Idle roll-die



(b) Drawing die

Fig.10 Roll-die and drawing die for experiment

한 과충진 결함 근처에서 변형률 분포가 집중되어 이는 인발 다이에서 소재의 접힘(folding), 흠 등의 추가적인 결함을 야기시킬 수 있다. 따라서 등하중 패스 스케줄을 통해 0.4mm 확장된 공형으로부터 Local-offset법을 이용하여 Fig. 9과 같이 결함부에 해당하는 롤 다이 공형을 Upper roll 방향으로 0.6mm 만큼 확대·수정하였다. 따라서, 최종 단면감소율은 각각 24.32%, 11.25%이다.

4. 검증 실험

4.1 실험조건

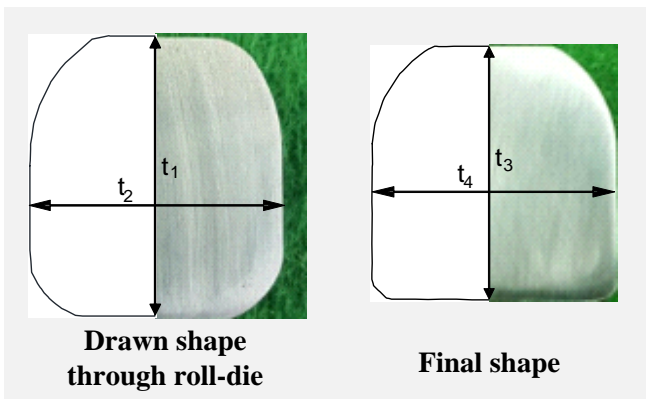
본 연구에서는 제안한 공형 설계방법의 유효성을 검증하기 위하여 멀티 롤 다이 인발 공정의 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 소재는 STS304이며, 초기 소재의 직경은 22mm, 길이는 1000mm이다. 실험에 사용된 비구동 롤 다이, 인발 다이의 형상 및 치수를 Fig. 10에 나타내었다. 인발속도는 10mm/s로 수행되었다.

4.2 결과 및 고찰

멀티 롤 다이 인발 공정의 실험을 통해 최종 성형된 제품은 Fig. 11(a)에 나타내었으며, 3차원 비접촉식 측정기를 사용하여 횡단면의 중요 치수를 측정하였다. 또한, 유한요소해석 결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 11(b), Table 1 및 Table 2에 나타내었다.



(a) Cold drawn fuel rail



(b) Cross-section of drawn product

Fig.11 Results of experiment

Table 1 Comparison of measured dimensions

	FE analysis (mm)	Experiment (mm)	Error (%)
t ₁	18.39	18.41	0.11
t ₂	16.78	16.82	0.24
t ₃	16.92	16.93	0.06
t ₄	15.95	15.98	0.19

Table 2 Comparison of experimental result and target

	Target (mm)	Experiment (mm)	Error (%)
t ₃	17.00	16.93	0.41
t ₄	16.00	15.98	0.13

Table 3 Comparison of cycle time (sec)

	Conventional drawing process	Multi roll-die drawing process
Cycle time	26,482	12,968

결과에서 알 수 있듯이 폭과 높이의 차이가 각각 0.04mm, 0.02mm로 해석과 실험이 유사하게 측정되었다. 또한, 실험과 최종 제품의 치수도 폭과 높이가 각각 0.02mm, 0.07mm이므로 제품의 치수허용 오차 값인 ±0.08mm 이내를 만족함을 확인하였다. 따라서 멀티 롤 다이 인발 공정의 실험을 통해 본 연구에서 제시한 공정설계 방법에 대한 타당성을 확인 할 수 있었다.

Table 3은 본 연구에서 수행한 멀티 롤 다이 인발 공정 시간과 기존의 다단 형상 인발 공정의 시간을 각각 나타내었다. 여기서 공정 시간은 포인팅, 열처리, 인발 공정을 포함한 시간을 의미한다. 멀티 롤 다이 인발 공정을 적용함으로써 패스 수가 감소하고 열처리 및 포인팅 공정의 횟수가 줄어든다. 따라서 다단 형상 인발이 요구되는 제품에 대해 생산성 향상 및 생산 단가 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 Fuel rail 부품 제조를 위한 멀티 롤 다이 인발 공정 설계 방법을 제안하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 비구동 롤 다이를 이용한 멀티 롤 다이 인발 공정의 설계 방법을 제안하였다. 제안한 설계방법을 제품의 단면이 이형인 Fuel rail 제품에 적용하였다.

(2) 롤 다이의 공형은 인발력 저감 효과를 고려하여 등하중 패스스케줄로 설계하였으며, 유한요소해석 결과로부터 롤 갭(gap)사이로 발생하는 충전 결함량을 고려한 롤 다이 공형의 치수를 보정하였다.

(3) 설계된 멀티 롤 다이 인발 공정에 대해 유한요소해석 및 실험을 수행하였으며, 제품의 단면치수 비교를 통해 설계방법의 타당성을 검증하였다. 유한요소해석과 실험의 치수 차이는 최대 0.24%이었으며, 제품의 목표치수와 실험의 치수는 최대 0.41%이었다.

(4) 기존의 다단 형상 인발 공정과 본 연구에서 수행한 멀티 롤 다이 인발 공정의 제조공정 시간을 비교하였다. 그 결과 멀티 롤 다이 인발 공정이 기존 공정보다 제조 시간 측면에서 약 2배의 효율을 가짐을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유학술과제(2년) 학술연구비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] U. Kirchner, R. Vogt, M. Maricq, 2010, Investigation of EURO-5/6 Level Particle Number Emissions of European Diesel Light Duty Vehicles, SAE Technical Paper, 2010-01-0789.
- [2] N. Kishi, S. Kikuchi, N. Suzuki, T. Hauashi, 1999, Technology for Reducing Exhaust Gas Emissions in Zero Level Emission Vehicles(ZLEV), SAE Technical Paper, 1999-01-0772.
- [3] J. Chakrabarty, 2010, Applied Plasticity Second Edition., Springer Science & Business Media, New York, pp. 203~205.
- [4] L. Gillemot Jr, 1975, Study on Industrial Application of Wire Drawing With Rotating Die, Periodica Polytechnica. Eng. Mech. Eng., Vol. 19, No. 3, p. 199.
- [5] L. S. Bayoumi, 1999, Round-to-square Section Drawing Through Flat Idle Rolls, Int. J. Mech. Sci., Vol. 41, No. 11, pp. 1323~1338.
- [6] F. Lambiase, 2012, Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 21, No. 2, pp. 161~166.
- [7] J. W. Pilarczyk, H. Dyja, B. Golis, E. Tabuda, 1998, Effect of Roller Die Drawing on Structure, Texture and other Properties of High Carbon Steel Wires, Met. Mater., Vol. 4, No. 4, pp. 727~731.
- [8] K. Ono, J. Yanagimoto, 1998, Characterization of Wire Rolling and Wire Roll Drawing Using 2-Roll, 3-Roll and 4-Roll Mills, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 39, No. 447, pp. 83~89.
- [9] T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2009, Prediction of Drawing Load in the Shape Drawing Process, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 323~328.
- [10] A. Geleji, 1995, Die Berechnung der Kräfte und des Arbeitsbedrafts bei Formgebung im Bildsame Zustande der Metalle, Akademi-Verleg, Budapest, p. 10.
- [11] J. S. In, 2015, Study on Intermediate Dies Design of Multi-Pass Forming Process for Shaped Wire, Thesis for the degree of Master of Eng., Pusan National University, pp. 11~13.