

자동차용 충격흡수기의 튜브 스피닝 공정 해석

김영호*, 박재우**, 조호성***

An Analysis of Tube Spinning for Shock Absorber on Vehicles

Young-Ho Kim*, Jae-Woo Park**, Ho-Sung Cho***

ABSTRACT

In process of tube spinning for shock absorber on vehicles, the selection of feed rate and rounding radius of forming roller and revolution speed of tube and forming roller, forming gap between die and forming roller are very important factors to obtain the optimal process result.

In this paper, rigid-plastic FEM and UBET analysis are applied to verify effect of each factors by forming load. We can obtain the optimal conditions to prevent defects during processing.

Key Words : tube spinning(튜브 스피닝), forming gap(성형 간극), rounding radius of forming roller(성형롤러의 라운드반경), rigid-plastic FEM(강소성 유한요소법), UBET(상계요소법)

기호설명

R_f : Rounding radius of forming roller

G : Forming gap

T : Thickness of material

FTM : Flexible Tolerance Method

1. 서론

현대에는 소비자의 요구에 따라 자동차의 고급화가 이루어지면서 자동차의 성능과 승차감이 현저히 개선되고 있는데 승차감을 더욱 좋게 하기 위하여 양질의 충격흡수기의 개발이 진행되고 있다. 충격흡수기는 차체의 진동방지 뿐만 아니라 노면

이나 운전상태에 따르는 충격을 흡수하여 차체의 핸들링이 용이하게 하는 역할도 한다.

이러한 충격흡수기의 생산공정에는 스피닝, 롤링 등의 작업이 수반되는데 성형시 소재의 두께와 다이의 형상에 따른 적절한 유동응력이나 소요동력, 하중 등의 정량적인 이해가 부족한 현실이다. 따라서 실제의 충격흡수기의 성형에 있어서의 메커니즘이 매우 복잡하므로 이것을 해결하기 위하여 단순한 모델에 대한 연구가 불가피하다.

현재의 충격흡수기에 관한 연구는 복잡한 감쇠모드를 밝히고 데이터베이스화하는 것과 감쇠발생기구의 특성을 모델링하여 동적거동특성을 해석하는데 대한 것들이다.^{[1][2][3]}

* ERC/NSDM, 부산대학교 기계공학부

** (주) 대우정밀공업 주임연구원

*** 부산대학교 대학원

Peterson은 충격흡수기에서 발생할 수 있는 감쇠 특성으로 시일, 로드가이드, 피스톤의 기계적 마찰에서 나타나는 감쇠효과를 조사하여 충격흡수기의 저항력이 유량, 관성 외에 기타의 복잡한 요인에 의해 복잡한 관계를 가지는 것을 밝혔다.^[4]

Hoffmann은 실험용 충격흡수기의 특성을 분석하여 충격흡수기의 감쇠력과 변위, 속도 관계를 일선도(work diagram), 특성 선도, 복원력면도 등을 구하는 연구를 행하였다.^[5]

Lang은 고진동수에서 나타나는 충격흡수기의 특성선도에서 그 이력특성이 유체압축성에 의해 나타남을 보이고, 실린더 압력이 기화압력 이하로 저하될 때 기포가 발생하고 소멸하는 과정상의 감쇠 지연현상을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하였다.^[6]

또한 충격흡수기의 외형을 이루는 튜브의 성형에 관련된 스피닝이나 드로잉에 관한 연구는 원추 형상 또는 컵 형상 등 일반적인 형태의 제품에 대하여 변위, 속도, 변형률속도, 그리고 응력장을 "Mises Material"을 소재로 하여 Mises의 응력-변형률 법칙으로부터 계산하는 것 등이었다.^{[7][8]}

본 연구에서는 자동차용 충격흡수기의 외형을 이루는 관재의 말단을 성형하는 스피닝 공정에 있어서 현재는 이송율, 접선력, 소요동력의 결정을 경험에 의존하였으므로 최적의 성형조건으로 작업을 행하지 못하였다. 따라서 성형간극(G)에 따라 소재가 팽창하게 되거나, 성형부가 지나치게 얇아지거나, 찢어지는 결함, 그리고 유압프레스의 펀치가 로드가이드에 가하는 압력이 과도하여 발생하는 내부 소재의 굽힘 등이 발생하게 된다. 그러나 아직 이러한 공정에 대한 결함을 정량적으로 명확히 밝혀내지 못하고 있으므로, 제품의 정확한 성형을 위하여 성형간극과 성형 롤러와 로드가이드의 라운드 반경, 소재가 되는 관의 두께, 마찰조건 등에 대하여 실제 공정을 단순화한 수학적 모델을 설정하여 동적가속도장을 구성하고 프로그램을 구축하여 계산한 UBET 해석결과와 강소성 FEM을 이용한 수치해석 결과를 비교, 검토하여 성형간극(G)의 크기, 성형롤러의 라운드 반경(R_f)에 따른 불량 원인을 파악하고 최적의 성형조건을 조성하여 양질의 제품을 생산할 수 있도록 한다.

2. 자동차용 충격흡수기의 제작

본 논문의 해석목표인 자동차용 충격흡수기를 Fig.1에 튜브스피닝 성형공정을 Fig. 2에 보인다.

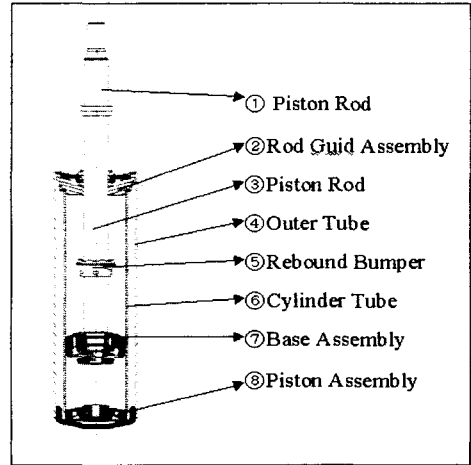


Fig. 1 shock absorber on Vehicles

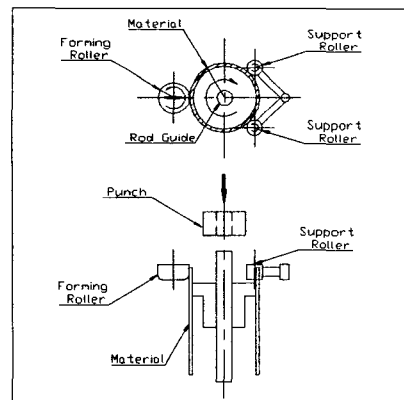


Fig. 2 Manufacturing Process of shock absorber on Vehicles

전체 성형공정은 최초에 소재가 프레스에 장착한 상태에서 진동 모터에 의해 일정한 속도로 회전하고 소재와 성형장치와의 편심을 막기 위해 로드 가이드를 펀치로 가압한 후 펀치를 상승시키고 성형간극을 고려한 적정 높이에 위치시킨 성형롤러를 반경방향으로 이송시켜 튜브소재 말단의 굽힘 작업을 행한다.

수치해석에 사용된 소재는 AISI 1020 steel이며 마찰계수(μ) 0.2로 가정하였다. 초기소재 두께는 2mm이며 성형간극(G)은 1.5~2.0mm로 정하였는데 이것은 굽힘변형 후의 소재두께는 초기소재 두께의 7)~100 %로 하여 소재의 소성유동을 유발 시켜 완전히 밀폐하기 위해서이다. 또한 다이 모서리의 라운딩은 1~3mm로 설정하여 행하였다.

3. 이론적 배경

Fig. 3은 본 연구의 UBET 해석에 사용된 요소들 나타내고 있다.

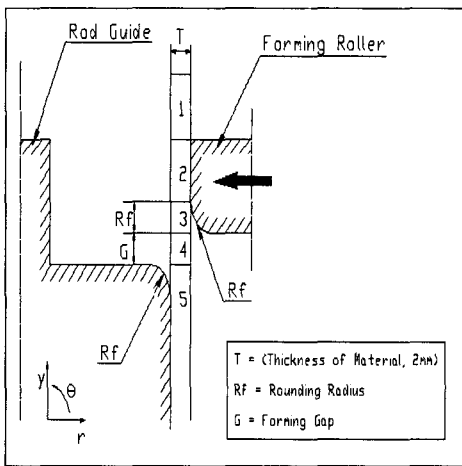


Fig. 3 Element Division for UBET Analysis

실제의 제품생산에서는 성형롤러가 회전과 동시에 이송됨에 따라 소재 말단이 점진적으로 성형되거나 소재의 변형이 매우 짧은 시간에 이루어지므로 성형공정 중의 소재는 모든 방향에서 동시에 변형된다고 가정한다. 형상의 대칭성을 기초로 다음과 같이 유도되었다. 또한 성형공정 전체에 대하여 모델 전체에 적용되었으며 소재의 가공경화를 고려하였다.

다음의 식 (1)은 본 연구에서 UBET 해석에 사용된 속도장이며 비압축성 조건을 만족하고 a_i , b_i , c_i 는 각 요소의 미지계수이다.

$$\begin{cases} U_r = r(a_i y + b_i) \\ U_\theta = 0 \\ U_y = -a_i y^2 - 2b_i y + c_i \end{cases} \quad \text{식 (1)}$$

여기서 U_r , U_y , U_θ 는 각 방향의 속도이고 i 는 임의의 요소 개수($i = 2 \sim n$)이며 요소 1은 강체로 가정하였다.

성형공정 중의 전체에너지소비율 J^* 은 식 (2)와 같으며 구속조건을 가지는 다변수 비선형함수를 최소화하는 기법인 FTM(Flexible Tolerance Method)⁽⁹⁾을 사용하여 각 요소의 미지계수를 결정하였다.

$$J^* = \Sigma \dot{W}_i + \Sigma \dot{W}_s + \Sigma \dot{W}_f \quad \text{식 (2)}$$

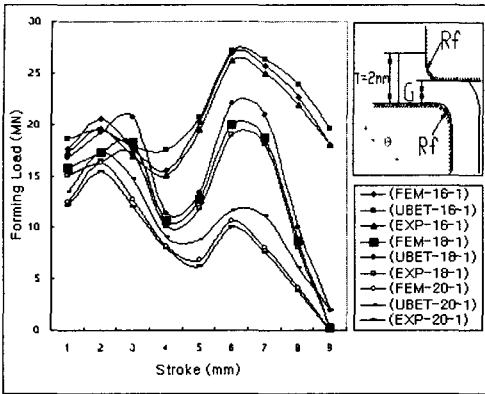
여기서, $\Sigma \dot{W}_i$ 는 내부에너지, $\Sigma \dot{W}_s$ 는 전단에너지, $\Sigma \dot{W}_f$ 마찰에너지를 나타낸다.

4. 실험과 해석결과 및 고찰

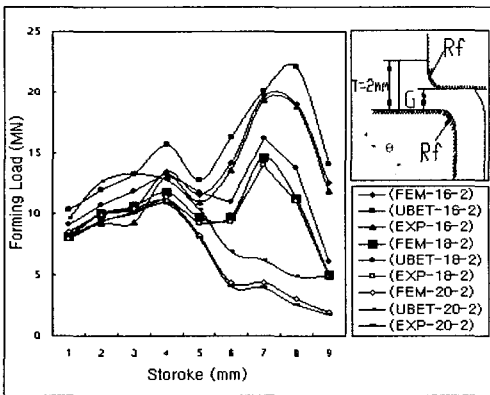
Fig. 4의 (a)와 (b)는 성형롤러의 라운딩반경 (R_f)과 성형간극(G)에 대하여 성형하중-이송률 선도의 일례로서 소재의 두께(T)가 2mm, $R_f=1$ mm, 2mm일 때 $G=1.6$ mm, 1.8mm, 2.0mm로 증가할 경우의 UBET 해석결과와 상용 강소성 FEM 해석 프로그램인 Form2D를 이용한 강소성 FEM 해석결과를 비교한 것이다. (FEM-16-1)이라는 선도의 범례는 FEM 해석결과로서 $G=1.6$ mm, $R_f=1$ mm라는 것을 나타낸다.

Fig 4에 나타난 튜브 스피닝 공정에서의 성형롤러의 라운딩 반경(R_f)과 성형간극(G)에 따른 UBET 해석과 FEM 해석 결과를 검토해 보면, 이송율 2~3mm 부근과 이송율 6~7mm에서 하중이 급격히 증가하는 부분이 있는데 이러한 하중변화는 튜브소재를 스피닝하여 굽힘이 진행됨에 따라 성형롤러와 다이간의 간격, 즉 성형간극(G)이 소재두께보다 작으므로 소재가 굽힘변형과 동시에 두께방향으로의 변형을 함께 겪으면서 소성유동을 하기 때문이며, 이송율 6~7mm 부근에서의 하중증가는 소재가 두께방향으로 유동하면서 소재와 성형롤러,

다이와의 마찰면적이 증가하므로 하중증가를 가속화하는 것으로 보인다.



(a) ($T=2\text{mm}$, $R_f=1$, $G=1.6, 1.8, 2.0\text{mm}$, AISI 1020 steel)



(b) ($T=2\text{mm}$, $R_f=1$, $G=1.6, 1.8, 2.0\text{mm}$, AISI 1020 steel)

Fig. 4 Comparison of FEM and UBET Results

또한 다이의 라운딩반경, R_f 에 대한 영향을 보면 R_f 가 1mm일 경우에 비해 2mm인 경우가 성형초기의 소재의 굽힘에 소요되는 성형하중이 현저히 적게 나타나며 외부소재의 팽창(expansion)도 막아준다. 또한 R_f 이 증가함에 따라 성형압력이 급격히 증가되는 것도 방지한다. 이 이유는 R_f 가 크므로 소재의 두께방향으로의 변형시작 시점을 지연

시키고 마찰면적의 증가율을 낮추어 소재유동을 안정화시키기 때문이다. 예외로 성형간극이 1.5mm인 경우에는 이러한 현상이 나타나지 않는데 그 이유는 성형간극이 소재의 두께에 비해 너무 작아서 소재가 굽힘을 받음과 거의 동시에 두께방향으로의 유동이 개시되기 때문이다.

성형간극에 대하여 고찰해보면, 성형간극이 1.6mm인 경우는 하중이 변동하기는 하지만 계속되는 증가추세이며 소재가 성형부 하면이 팽창하는 결함을 발생시키게 된다. 그러나 성형간극이 1.8mm 이상인 경우에는 첫 번째 하중증가량보다 낮게 나타나는 감소추세가 되며 성형간극이 2mm인 경우에는 R_f 가 1mm, 2mm인 경우는 하중이 지속적으로 변화하는 형태를 보이지만 라운딩이 3mm인 경우는 하중의 변화가 현격히 줄어들어 거의 안정한 하중상태로 성형이 진행되는 것을 볼 수 있다. 성형간극이 소재 두께의 80%인 1.6mm인 경우 소재의 모서리부분이 지나친 응력을 받아 매우 취약해져 결국에는 찢어짐을 볼 수 있는데 이것 역시 성형간극이 너무 작으면 소재의 두께방향으로의 변형을 방해하여 결함을 발생시킨다는 것을 증명한다.

Fig. 5는 FEM 해석결과로서 성형간극이 1.6mm, R_f 이 1mm인 경우에서 소재의 유효응력분포이다. 여기에서 다이의 라운딩 부분에 성형하중과 유효응력의 집중되어 소재의 찢어짐이 발생할 수 있는 부분임을 확인할 수 있으며 성형간극이 작은 경우 로드가이드의 우측에 소재가 반경방향으로 팽창되어 있음을 볼 수 있다.

강소성 FEM 해석결과로서 Fig. 5와 Fig 6에 성형다이 역할을 하는 로드가이드의 라운딩반경에 따른 응력분포를 보인다.

여기서 소재가 성형될 때 라운딩반경이 크면 유동할 수 있는 면적이 증가하므로 소재유동이 안정화되어 응력이 집중되지 않으며 로드가이드에 미치는 최대응력이 감소함을 볼 수 있다.

한편, 강소성 FEM 시뮬레이션 결과로서 결함이 발생하는 성형간극 $G=1.6$, $R_f=1\text{mm}$ 인 경우의 소재의 유동속도분포를 Fig. 7에, 그리고 결함이 발생하지 않는 성형간극 $G=1.8$, $R_f=3\text{mm}$ 인 경우를 Fig. 8에 보인다. 여기서, $G=1.6$, $R_f=1\text{mm}$ 의 경우는 소재가 외부로 팽창하려는 반경방향의 속도는 소재

가 압힘을 받은 후 두께방향으로 유동을 시작하면서 증가함을 보인다.

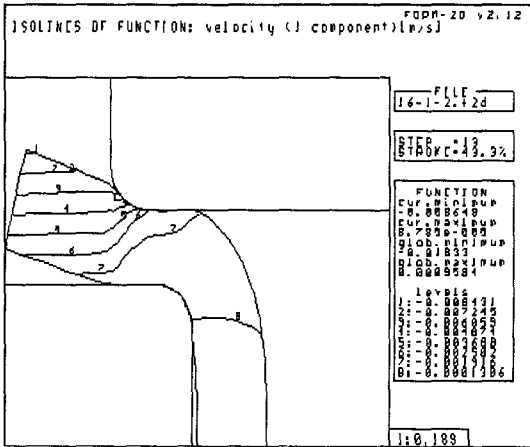


Fig. 5 Distribution of Effective Stress for Material when $G=1.6\text{mm}$, $R_f=1\text{mm}$

수 있는 공간이 넓어지므로 두께방향으로의 소재유동이 안정화되고 그에 따라 압축되는 성형부하면의 소재량도 적어지므로 소재의 팽창을 막을 수 있음을 알 수 있다.

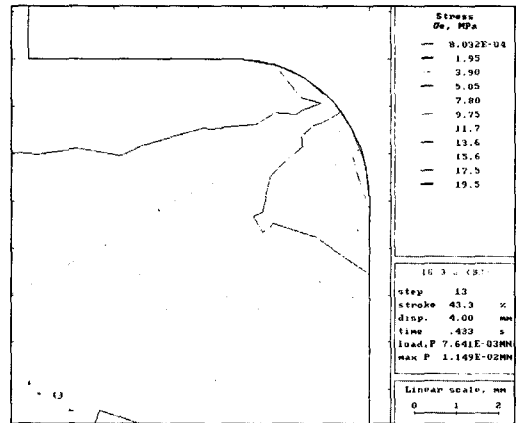


Fig. 7 Distribution of Stress for Rod Guide when $G=1.5\text{mm}$, $R_f=3\text{mm}$

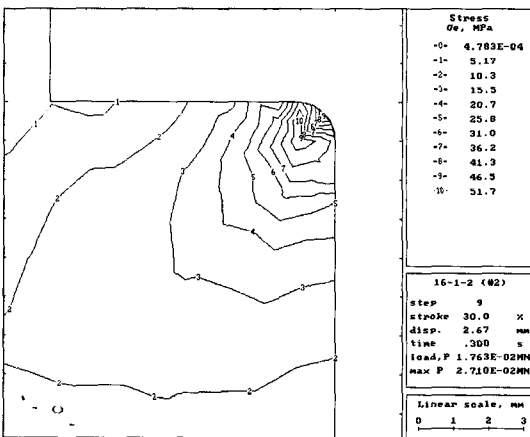


Fig. 6 Distribution of Stress for Rod Guide when $G=1.5\text{mm}$, $R_f=1\text{mm}$

Fig. 7의 경우, 성형부의 소재가 두께방향으로 유동하면서 성형부 하면의 소재가 압축되는데 이때 성형간극이 너무 작아서 압축되는 소재의 양이 많으므로 반경방향의 속도성분이 발생하는 것으로 보인다. 그러나 Fig. 8의 경우에는 성형간극이 크고 R_f 가 커짐에 따라 성형부의 소재가 유동할

5. 결론

UBET 해석 프로그램을 구축하여 계산한 결과와 강소성 FEM 해석결과를 비교, 검토하여 성형간극과 성형장치의 라운딩반경에 대한 영향을 고찰한 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 성형간극(G)과 성형롤러의 라운딩반경(R_f)을 주된 공정변수로 하는 범용 UBET 해석 프로그램을 개발하여 강소성 FEM 해석결과와 잘 일치함을 보였다

2. 소재의 성형시 성형간극(G)과 성형롤러의 라운딩 반경(R_f)을 증가시키면 두께방향으로의 소재 유동을 안정화시킬 수 있으므로 성형하중의 급격한 증가를 방지할 수 있음을 확인하였다.

3. UBET 해석결과와 강소성 FEM 해석결과에서 공통적으로 성형간극(G)과 라운딩반경(R_f)를 증가 시킴에 따라 소재의 팽창을 막을 수 있음을 확인하였다.

4. 성형하중이 가장 크게 집중되는 부분은 다이의 라운딩 부분이므로 소재의 찢어짐이 발생할 수 있다. 따라서 이 부분의 강도보강이 필요함을 확인할 수 있다.

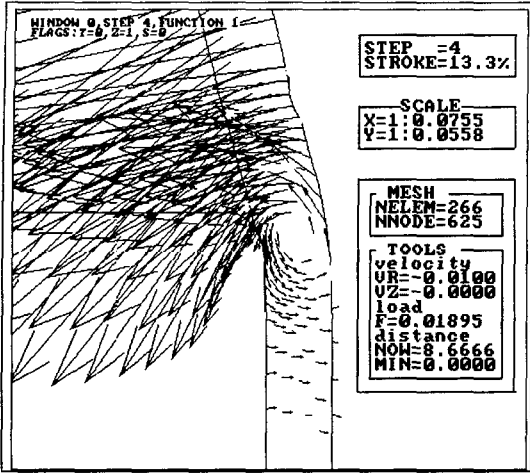


Fig. 8 Distribution of Velocity when $G=1.5\text{mm}$, $R_f=1\text{mm}$

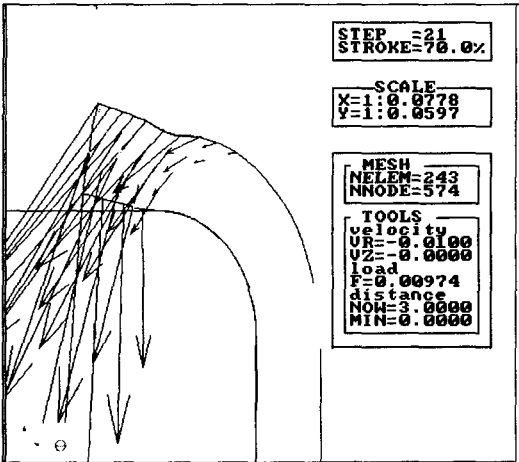


Fig. 9 Distribution of Velocity when $G=1.5\text{mm}$, $R_f=2\text{mm}$

참고문헌

1. 박재우, 신상운, 주동우, 이시복, 자동차용 충격 흡수기의 동적거동 해석,, 추계 한국정밀공학회, 학술대회 논문집, pp. 362~370, 1996.
2. 박재우, 신상운, 주동우, 이시복, 충격흡수기의 동적거동 해석 프로그램을 이용한 각 파라미터가 댐핑력에 미치는 영향 조사, 추계 한국정밀공학회 학술대회 논문집, pp. 371~376, 1996.

3. 김학봉, 나기웅, 항공기 착륙장치 완충기의 전산유체역학을 이용한 유량계수 예측 및 동특성 해석, 항공산업기술연구소 연구지, 제6집, 한국항공대학교, 1996.
4. Peterson, R, R., "Hydraulic Applied to the Automobile Suspension," Proceedings of the National Conference of Industrial Hydraulics, Vol. 7, pp. 23-43, May 1953.
5. Hoffmann, H, J., "Effectiveness of Shock Absorbers on Vehicles," Automobiltechnische Zeitschrift, Jahrg. 60, Heft 10, Seite 289, Oktober 1958.
6. Lang, Harold Harvey., "A Study of the Characteristics of Automotive Hydraulic Dampers at High Stroking Frequencies," Ph. D. Dissertation, University of Michigan, 1977.
7. M. Hayama., "An Analysis of working force in Shear Spinning," Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama Nat. Univ., Vol. 26, pp, 99, 1977.
8. K, Manabe, 傾斜工具による圓管の壓縮加工の解析, Journal of the JSTP, Vol. 29, pp. 163-170, 1988.
9. D. M. Himmelblau, "Applied Nonlinear Programming," McGraw-HILL, pp. 345-359, 454-468