

성형하중을 감소시키기 위한 아우터 타이로드의 열간 단조해석

김영준¹, 안교진², 이권희³, 박영철^{3*}

¹(주)센트럴 중앙연구소, ²동아대학교 대학원 기계공학과, ³동아대학교 기계공학과

Hot Forging Simulation of Outer Tie Rod for Reducing Forming Load

Young-Jun Kim¹, Kyo-Jin An², Kwon-Hee Lee³, Young-Chul Park^{3*}

¹Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

²Technical Center, Central Corporation

³Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 최근 차량 성능이 개선됨에 따라 차량의 부품 수 및 중량이 증가하는 추세이다. 아우터 타이로드는 다른 차량 부품에 비해서 중량이 작지만, 자동차의 연비 향상을 위해서는 아우터 타이로드의 중량을 감소시킬 필요가 있다. 따라서 이전 연구에서는 아우터 타이로드를 실험계획법과 메타모델을 사용하여 좌굴성능을 만족시키는 아우터 타이로드의 모델을 제시하였다. 아우터 타이로드를 단조 공정을 통해서 제작되어지는데, 본 연구에서는 실제 성형가공 공정을 토대로 아우터 타이로드의 단조해석을 통해서 급형 이동속도에 변화에 따른 성형하중의 크기를 비교하였다.

Abstract Recently the improvement in vehicle performance trend to increase in accordance with the weight of this part. Outer tie rod is small when compared to the other vehicle part by weight, but there is a need to reduce the weight of the outer tie rod in order to improve fuel efficiency of the vehicle. Therefore, from previous studies, a model of outer die rod is proposed using Design of Experiments and Meta model satisfying the buckling performance. Outer tie rod are manufactured through forging process, in this study, we compare the size of the forming load in accordance with the change in the moving speed through the die forging analysis of the outer tie rod on the basis of the actual molding process.

Key Words : Forming Load, Hot Forging, OTR(Outer Tie Rod), Plastic Working

1. 서론

현재 자동차 산업에서 가장 중심이 되는 화두는 지구 온난화에 대응하기 위해 연비가 높고 배기가스의 배출이 적은 친환경 자동차의 개발이라고 할 수 있다. 연비향상과 배기가스 저감 기술은 서로 연계성이 높은 기술로 세계 각국에서는 차량의 연비규제를 실시하고 있으며 이는 향후 새로운 기술 장벽으로 작용 할 것으로 예상된다. 따

라서 국내에서도 연비가 높은 자동차를 만들기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다[1,2].

최근 가장 기술 개발이 활발한 하이브리드 자동차(hybrid vehicle), 전기 자동차 등의 안전성과 편의성에 대한 요구 증대로 차량에 장착되는 부품의 수 및 중량이 증가하는 추세에 있어, 자동차 연비 향상을 위해서 이전 연구에서 중량 감소를 실현시킨 아우터 타이로드(outer tie rod) 모델(model) 제시하였다[3].

본 연구는 지식경제 기술혁신사업 계획서 [지능형자동차상용화연구기반구축사업] 조정안정성 및 4-Wheel Steering 지원을 위한 후륜조향모델 개발(과제번호 10045695)과 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2026078)으로 수행된 연구결과임.

*Corresponding Author : Young-Chul Park(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7652 email: parkyc67@dau.ac.kr

Received February 16, 2015

Revised March 10, 2015

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

일반적으로 단조품은 버스터(buster), 블락커(blocker), 피니셔(finisher) 공정을 거쳐 성형된다. 그 중 최종 단조품의 형상과 치수를 결정하는 피니셔공정에서 사용하는 금형은 기계가공품의 형상과 치수를 기본으로 하여 설계한다. 이러한 피니셔 설계는 주로 숙련된 설계자의 경험과 판단에 의존하고 있다. 하지만 종종 잘못 설계된 금형으로 인하여 과대한 단조하중, 금형 마모, 금형 파괴, 미충진, 유동결합 등의 문제가 발생되고 이러한 경우 재설계 및 이에 따른 금형의 재가공 등 경제적인 손실을 초래하게 된다[4].

본 연구에서는 알루미늄(aluminum)을 소재로 하여 플래쉬 제거를 위한 트리밍(trimming) 공정은 제외한 아우터 타이로드의 단조해석을 진행하였다. 열간단조 공정 참고문헌에서 참조한 해석 조건을 바탕으로[5] 초기 원형 소재를 두고, 2번 가압하여 완성시킨 아우터 타이로드의 단조 모델을 제시하였다. 이 때, 금형의 이동속도에 변화를 시키고 이에 따른 성형하중 값을 비교하였다.

2. 아우터 타이로드의 열간 단조해석

2.1 소성가공 이론

소재에 하중을 가했을 때 발생하는 총 변형량은 소성 변형량과 그 외 나머지 차이 변형량으로 구성되어 있다. 일반적으로 차이 변형량을 탄성변형량이라고 간주해도 무관하다. 소성변형은 하중을 제거했을 때 원상대로 복구 되지 않으며, 탄성변형은 원상대로 복구된다. 소성가공은 소성변형에 근거한 성형방법이다. 일반적으로 소성가공에서 소성 변형량에 비하여 탄성 변형량은 매우 작다. 탄성 변형량을 무시한 경우를 강소성이라고 한다. 강소성 이론에서는 탄성변형이 무시되는 반면, 탄소성이론에서는 탄성변형과 소성변형이 동시에 고려된다. 탄소성은 강소성에 비하여 실제의 현상을 보다 정확하게 반영할 수 있으나, 이론의 이해와 활용이 어렵고 계산시간이 훨씬 많이 소요되는 단점을 지니고 있다. 그리고 잘못 사용했을 경우, 예측결과가 오히려 실제의 현상에서 크게 멀어질 수 있다. 즉, 불확실성이 증가한다. 반면, 강소성은 탄성의 영향을 무시한 단점은 있으나 해 찾기의 안전성 측면에서 유리하다. 현재 강소성 이론은 체적소성가공(Bulk Metal Forming)분야에서 공정 적용 단계에 와 있으나, 이 분야에서 탄소성 이론은 강소성 이론에 비해

여 그 적용이 많지 않다. 강소성 이론을 바탕으로 Von Mises 항복함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(\sigma'_{pq}) = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} - k^2 \quad (1)$$

Drucker의 가설은 일반적인 소성가공 문제에 적합하다. Drucker의 가설에 의하면, 항복곡면은 볼록(convex)해야 하며, 소성 변형률의 증분은 항복곡면에 직교해야 한다. 식(1)에서 항복함수 f 는 볼록하므로 Drucker의 가설을 만족한다. 소성 변형률 속도가 항복함수에 직교해야 한다는 조건으로부터 다음의 관계가 성립해야 한다.

$$\Delta \dot{\epsilon}_{ij} = \Delta \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \Delta \lambda \dot{\sigma}_{ij} \text{ or } \dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \dot{\lambda} \dot{\sigma}_{ij} \quad (2)$$

여기서 $\Delta \lambda$ 및 $\dot{\lambda}$ 는 비례상수이다.

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=3}^3 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4)$$

식(3)의 유효변형률속도의 정의와 식 (4)의 유효응력의 정의로부터

$$\dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \quad (5)$$

가 되어야 하므로, Von Mises 항복이론을 따르는 강소성 재료의 유동법칙은 다음과 같다.

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{\frac{2}{3} \sum_k \sum_l \epsilon_{kl} \epsilon_{kl}}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (6)$$

여기서 강소성 이론에서는 $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^p$ 이다.

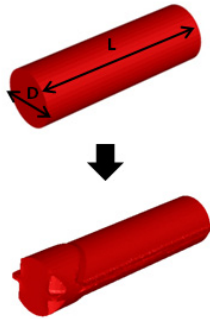
식(6)에서 $\bar{\sigma}$ 는 재료의 성질을 반영하는 것으로 유동응력(flow stress) 또는 변형저항식이라고 일컫는다. 유동응력은 변형률, 변형률속도, 온도, 손상도 등의 함수이며, 실험적으로 구해진다.[6]

2.2 열간 단조해석

2.2.1 3차원 모델링

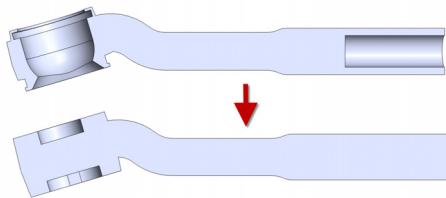
본 연구에서의 소재 형상은 기존 소재 치수 지름(D)

39mm, 길이(L) 141mm이며, 선행 연구에 따라 Blocker 공정 이후 성형된 형상을 선정하였다.

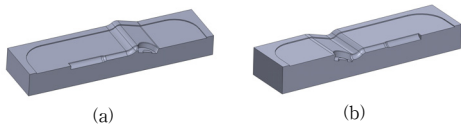


[Fig. 1] Preform Shape

2차 공정에 대한 금형의 플래쉬 깊이는 4mm으로 설정하였다. 모델이 좌우 대칭이므로 해석시간을 감소시키기 위해 하프(Half)모델로 진행하였다.

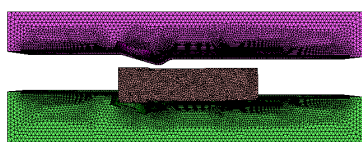


[Fig. 2] Outer Tie Rod Modified Model



[Fig. 3] Outer Tie Rod Finisher Die
(a) Upper Die (b) Lower Die

유한요소해석을 위해 진처리 과정 중 하나인 유한요소 모델을 생성해야한다. [Fig. 4]는 각 모델에 대한 유한요소 모델이며, [Table 1]은 유한요소 모델에 대한 정보이다.



[Fig. 4] FEM Model of Outer Tie Rod

[Table 1] FEM Model Information

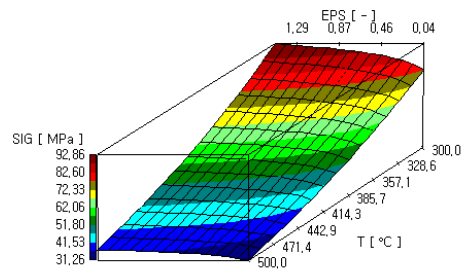
	Number of Nodes	Number of Elements
Preform	17689	74513
Upper Die	22302	44600
Lower Die	24142	48280

2.1.2 소재선정

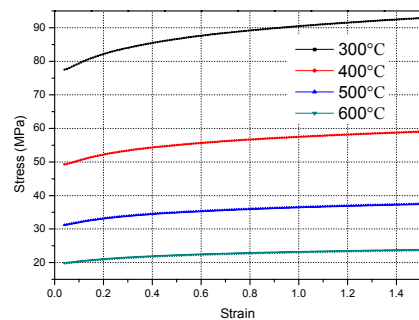
자동차 경량화는 연비 향상과 직결되어 있다. 이러한 측면에서 알루미늄(aluminum)은 기존의 강(steel)을 대체할 수 있는 현실적인 대안이 되고 있다. 이미 자동차 프레임을 알루미늄으로 양산되고 있다. 자동차용 주요 부품에도 알루미늄이 적용되고 있으며, 다수의 부품의 소재도 강에서 알루미늄으로 대체 될 전망이다. 열간단조에서 사용되는 알루미늄 소재는 주로 Al6061과 Al6082가 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Al6061 소재를 적용하였다.[7,8] [Table 2]는 Al6061 성분을 표기하였으며 [Fig. 5]와 [Fig. 6]은 온도에 대한 응력-변형률 선도를 나타내었다.

[Table 2] Al6061 Chemical Composition

Alloying addition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Percentage(%)	0.6	0.35	0.275	0.075	1	0.195	0.025	0.075



[Fig. 5] Al6061 Strss-Strain-Temperature Curve



[Fig. 6] Al6061 Strss-Strain Curve

2.1.3 해석조건

아우터 타이로드는 열간단조 공정을 통해 성형된다. 열간단조는 초기 소재를 최종 형상을 성형하는데 있어서 성형성을 증가시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단조 시뮬레이션을 위하여 금형의 초기 온도는 200 ℃로 가정하였으며, 소재의 초기 온도는 Al6061의 적절한 단조 온도를 참고하여 530℃로 설정하였다.[9] 금형과 소재 사이 마찰계수는 0.3으로 일정하다고 가정하였다. 프레스는 유압식이며 상형 속도에 따른 성형하중을 비교하기 위해 500mm/s, 1000mm/s, 1500mm/s, 2000mm/s에 대해 해석을 수행하였다.

[Table 3] Analysis Condition

Spec.	Value
Stroke (mm)	45mm
Die Temperature(℃)	530℃
Billet Temperature(℃)	200℃
Upper Die Velocity(mm/s)	500, 1000, 1500, 2000
Lower Die	Fixed
Coefficient of Friction	0.3
External Condition(℃)	25 (air temperature)

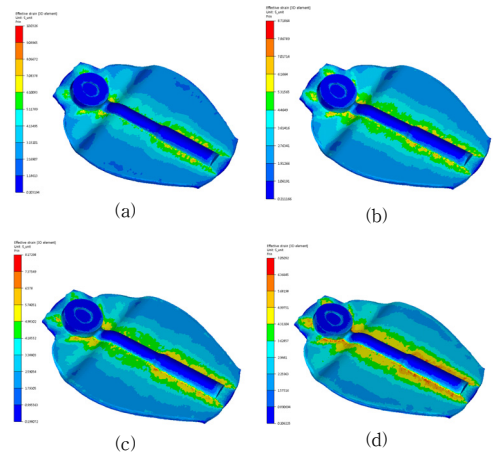
2.1.4 해석결과

열간 단조에서는 소재를 재결정 온도보다 높은 곳에서 성형을 한다. 따라서 소재의 유효변형률(effective strain)이 높아 성형하는데 용이하다. 상형의 각 속도에 대한 최대 유효변형률을 살펴보면 [Table 4]과 같다. [Fig. 5]는 상형의 속도에 대한 유효변형률을 나타내었으며 속도가 빠를수록 유효변형률은 낮게 나타났다. 이는 성형 속도가 빨라질수록 성형이 더 불안정적으로 된다는 것을 예상 할 수 있었다.

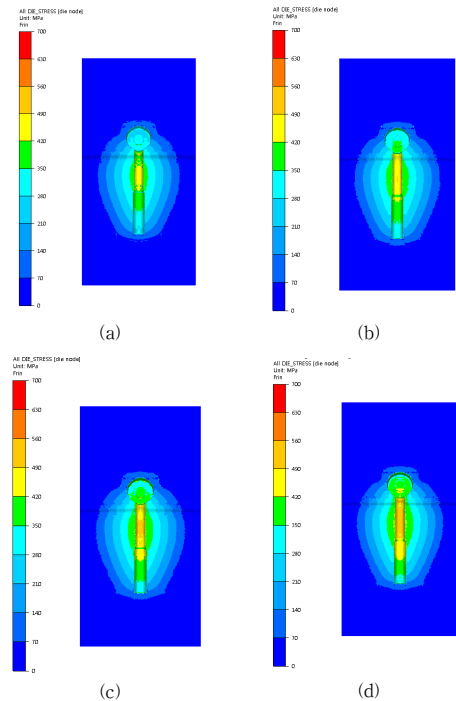
[Table 4] Effective Strain Value

Upper Die Velocity(mm/s)	Effective Strain
500	10.03
1000	8.71
1500	8.17
2000	7.05

성형 중에는 소재와 상형사이 마찰이 발생하여 응력이 생긴다. 응력이 클수록 상형의 수명은 줄어들어 내구성에 문제가 야기 될 수 있다. [Fig. 7]은 상형에 미치는 응력 분포에 대한 해석결과를 나타내었다.



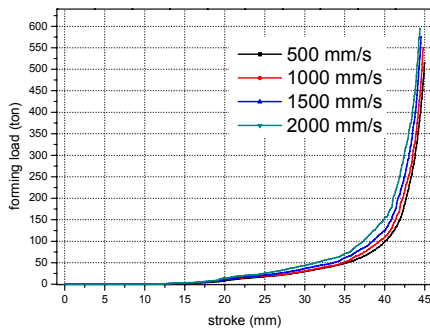
[Fig. 7] Effective Strain of Billet
(a) 500mm/s (b) 1000mm/s (c) 1500mm/s (d) 2000mm/s



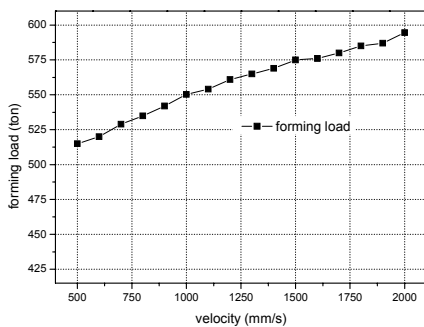
[Fig. 8] Stress of Upper Die
(a) 500mm/s (b) 1000mm/s (c) 1500mm/s (d) 2000mm/s

[Fig. 7]은 상형의 속도에 대한 성형 하중을 나타낸 것이다. 상형과 소재가 닿는 순간부터 성형하중은 증가하기 시작하며 스트로크가 42~43mm였을 때 급격하게 증가하다가 성형이 끝나게 된다. 상형 속도가 클수록 성형

하중이 증가하는 것을 확연히 확인 할 수 있었으며, [Fig. 8] 은 상형 속도 500mm/s~2000mm/s 사이 100mm/s 단위로 해석을 수행하였을 때 최고 성형 하중을 비교 분석하였다.



[Fig. 9] Die Stroke-Forming Load Curve



[Fig. 10] Die Velocity-Forming Load Curve

3. 결론

본 연구에서는 자동차 조향장치 중 하나인 아우터 타이 로드가 알루미늄(Al6061) 소재로 제작되는데 있어서 열간단조 공정 과정에서 상형의 속도에 따른 성형 하중에 미치는 영향을 살펴보고 비교하였다. 그 결과, 상형의 속도가 빠를수록 성형 하중이 증가하는 것을 확인하였다.

4. 후기

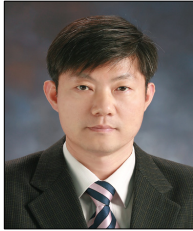
본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업(2012H1B8A2026078)으로 수행된 연구결과.

References

- [1] J.K. Kim, S.M. Seo, Y.J. Kim, D.J. Lee, S. Lee, Y.C. Park, K.H. Lee "Structural Performance Test of Optimized Outer Tie Rod", Journal of Automobile Engineering, Vol. 11, No. 5, pp. 82-87 2012
- [2] Song B. C., Park Y. C., Kang S. W., Lee K. H., "Structural Optimization of an Upper Control Arm, Considering the Strength", Journal of Automobile Engineering, Vol. 223, No. 6, pp. 727-735, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09544070JAUTO1090>
- [3] B.K. Seo., J.K. Kim., D.J. Lee., S.M. Seo., K.H. Lee., Y.C. Park., "Structural Design of the Outer Tie Rod for an Electrical Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 14, No. 9, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4171>
- [4] D.Y. Kim, J.J. Park., "Development of a Finisher Design System for Axisymmetric Hot Steel Forging", J. of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 7, No. 3, pp. 291-297, 1998.
- [5] J.G. Eom, S.M. Jang., M.C. Lee., S.J. Jung., M.S. Joun., "Flow Stress of Al6061 at Elevated Temperature and Its Application to Forging Simulation for verification", Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 474-477, 2009.
- [6] M.S. Jeon, Forging Simulation, pp. 59-60, JINSAEM, 2013.
- [7] J.G. Eom, S.M. Jang, M.C. Lee, S.J. Jung, M.S. Joun, "Flow Stress of Al6061 at Elevated Temperature and Its Application to Forging Simulation for verification" Transactions of Materials Processing, pp. 474-477, 2009.
- [8] D.H. Jung, J.S. Koo, H.D. Lee, "Development of Aluminum Front Lower Control Arm", Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers, pp.1473-1478, 2005.
- [9] Y.S. Lee, M.Y. Lee, Forging Technology, pp. 263, Corona Publishing Co., Ltd, 2013
- [10] H.T. Kim, J.G. Eom, I.S. Choi, M.C. Lee, S.Y. Park, M.S. Joun, "Computer Simulation of Complex Hot Forging Processes by a Forging Simulator Based on Finite Volume Method", Transactions of Materials Processing, Vol. 16, No. 3, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5228/KSPP.2007.16.3.187>

김 영 준(Young-Jun Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 부산대학교 기계공학과 대학원 (석사)
- 1989년 1월 ~ 2008년 7월 : 현대모비스 기술연구소 부장
- 2008년 7월 ~ 현재 : 센트랄 중앙연구소 상무

<관심분야>
최적설계, 구조설계

박 영 철(Young-Chul Park)

[정회원]



- 1982년 2월 : 부산대학교 금속공학과 대학원 (석사)
- 2002년 2월 : 일본 동북대학교 기계공학과 대학원 (박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 7월 : 동아대학교 산학협력단 단장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
금속재료, 구조설계

안 교 진(Kyo-Jin An)

[준회원]



- 2014년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (학사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 대학원 (석사과정)

<관심분야>
최적설계, 구조설계

이 권 희(Kwon-Hee Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 기계공학과 대학원 (석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 기계공학과 대학원 (박사)
- 1994년 1월 ~ 1999년 12월 : 대우자동차 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
최적설계, 구조설계