

# 유한요소해석을 이용한 전자식 주차브레이크용 헬리컬 기어의 금형 도입부 각도에 따른 냉간 전방압출 성형성 분석에 관한 연구

## Study on Cold Forward Extrusion Formality Analysis along with Tool Entrance Angle of Helical Gear for Electronic Parking Brake Using Finite Element Analysis

김병길<sup>1</sup>, 이현구<sup>3</sup>, 조재웅<sup>2</sup>, 정광영<sup>2</sup>, 전성식<sup>2,✉</sup>  
Byeong Kil Kim<sup>1</sup>, Hyun Goo Lee<sup>3</sup>, Jae Ung Cho<sup>2</sup>, Kwang Young Jeong<sup>2</sup>, and Seong Sik Cheon<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 공주대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, The Graduate School of Kongju University)

<sup>2</sup> 공주대학교 기계자동차공학부 (Department of Mechanical Engineering, Kongju University)

<sup>3</sup> (주)영진정공 (Young Jin Precision Industrial Co., Ltd.)

✉ Corresponding author: sscheon@kongju.ac.kr, Tel: +82-41-521-9282

Manuscript received: 2015.6.22. / Revised: 2015.8.20. / Accepted: 2015.8.22.

*This study uses finite element analysis to evaluate the forming load of tool entrance angle of the cold forward extrusion molding process of helical gear; this can replace the spur gear applied to the Electronic Parking Brake (EPB) system. A cold forging process is often used in the automobile industry as well as in various industrial machines due to its high efficiency. Finite element analysis is frequently used when interpreting results of the forging process. Formality was evaluated by calculating tooth profile filling rate of helical gear. Change in required forming load was investigated when the entrance angle of forward extrusion tool die was changed from 30° to 60°, also by finite element analysis. We suggest suitable tool entrance angles.*

KEYWORDS: Entrance angle (도입부 각도), EPB system (전자식 주차브레이크 시스템), Finite element analysis (유한요소해석), Forward extrusion (전방 압출), Helical gear (헬리컬 기어)

### 1. 서론

최근 차량의 전자화가 급격히 진행되면서 현가, 조향, 제동 및 구동계 등의 샤시(Chassis)시스템 또한 전동 모터를 이용한 능동화로 승차감 및 주행 안정성 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1</sup> 본 논문에서는 이 중에서도 전자식 주차 브레이크 (Electronic parking brake, EPB) 시스템에 초점을

을 맞추었고, 이 시스템에서 사용되는 요소 중 하나인 헬리컬 기어에 관심을 갖게 되었다. Fig. 1에 서는 EPB 시스템의 개략도가 보여지고 있다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 기존 와이어 식의 기계식 주차 브레이크 시스템을 전자 기계식으로 변경하여 전자 제어를 이용한 최적의 주차 성능을 구현하도록 개발된 차세대 주차 브레이크 시스템이다.

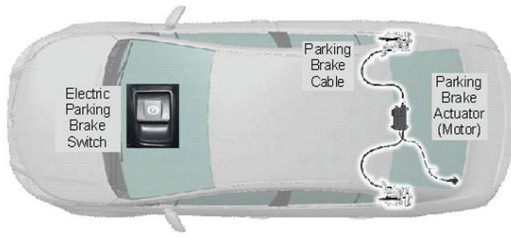


Fig. 1 Schematic diagram of EPB system

현재 국내 차량에 적용중인 EPB시스템은 캐리어 샤프트에 4개의 평 기어(Spur gear)를 이용하기 때문에 구조가 복잡하여 불량율이 높다. 또한 최대 브레이크 클램핑 하중이 약 13kN이 발생하여 18kN의 힘이 필요한 3000cc 이상의 차량에 적용하는데 한계가 있기 때문에 기존에 적용중인 평기어에서 불량율을 낮추고, 브레이크 클램핑 하중을 높일 수 있도록 헬리컬 기어로 대체하고자 한다.

현재 헬리컬 기어는 형상이 복잡하여 대부분 셰이빙 혹은 호빙 등 절삭가공을 통해 생산된다. 이와 같은 가공법은 재료의 물성과, 제조 효율성이 동시에 저하될 수 있다.

본 논문에서는 냉간 전방압출을 통해 제품을 생산할 수 있도록 연구를 진행하였다. 절삭가공 대신 단조를 통하여 헬리컬 기어를 제작하게 되면, 위의 단점들을 해결할 가능성이 있는데, 냉간 단조의 장점으로는 깨끗한 표면마무리, 양호한 치수정밀도, 제품의 높은 인장강도와 바람직한 섬유조직, 높은 생산성 등이 있다.<sup>4</sup> 그러므로 높은 내구성을 필요로 하는 기어 제조에 있어 이를 충족할 수 있을 것으로 사료되고 있다.

각종 기어 류는 대표적인 정밀 단조품의 하나로써, 경제적 과급효과가 커서 현재까지도 세계적으로 집중적인 연구개발이 진행되고 있다.<sup>2</sup> 특히 냉간 단조 공정은 높은 생산성 때문에 각종 산업기계뿐만 아니라 자동차 부품제조에 많이 사용되고 있다.<sup>3</sup>

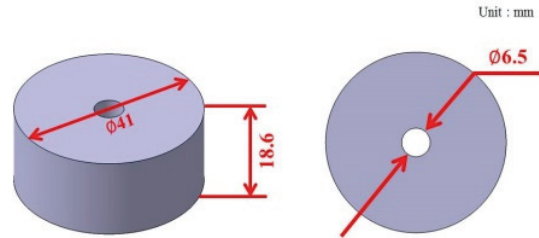
따라서 헬리컬 기어의 냉간 전방압출 성형성 분석을 위하여 최종제품에서부터 역 설계를 진행한 뒤 초기형상의 치수를 도출하고, 헬리컬 기어의 냉간 전방압출 성형공정 중 금형 도입부의 각도에 따른 성형하중 및 성형성을 평가하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 전방압출 금형 다이의 도입부 각도가 30°에서 60°로 변화할 때, 헬리컬 기어의 치형의 충진율을 계산하여 성형성을 확인하고, 동시에 성형에 요구되는 성형하중의 변화

Table 1 Specification of helical gear

Specification	Value
Material	SM35C
Pressure angle(°)	20
Helix angle(°)	14.117
Pitch circle diameter(mm)	Ø35.059
Module(mm)	1.03
Number of tooth	34
Height(mm)	8
Weight(g)	54.41



(a) Modeling of the helical gear



(b) Drawing of the billet

Fig. 2 Drawing of helical gear and billet

를 파악하였으며, 이를 통하여 제안하는 공정에 적합한 금형 도입부 각도를 제시하였다. 유한요소 해석에는 SFTC사의 성형해석 전문 프로그램인 Deform-3D를 활용하였다

## 2. 공정설계

### 2.1 기어의 제원 및 초기소재 설정

본 연구를 진행할 헬리컬 기어의 제원은 Table 1과 같으며, Fig. 2(a)는 제품의 3D 모델링 형상이다.

초기소재는 Fig. 2(a)의 제품으로부터 동일한 체적과 식(1)의 단면감소율을 기준으로 역설계를 진행하였다. 또한 후가공 공정을 위해 단조여유를 적용하여 초기소재의 치수를 결정하였다.

$$\epsilon_v = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = 1 - \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

일반적으로 전방압출의 단면감소율은 50-75%이지만 기어의 압출 성형의 경우 단면감소율이 높

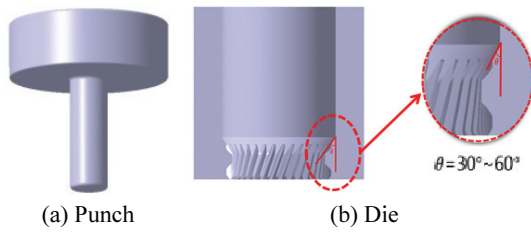


Fig. 3 Modeling of punch and die

아질 경우 치 성형이 제대로 이루어지지 않을 가능성이 있다. 최적의 충전상태를 보여주는 단면감소율은 27%이므로 이와 같은 단면감소율을 토대로 초기소재의 치수를 결정하였다.<sup>5</sup> 초기 소재의 직경은 41mm로 설정하였으며, 내경은 6.5mm로 설정하였다. 소재의 높이는 단조공정 후 절삭공정을 생각하여 16%의 단조여유를 주어 18.6mm로 설정하였으며 재료회수율을 향상시키기 위해 제품 2개를 한번에 생산할 수 있도록 하였다. Fig. 2(b)는 초기 소재(Billet)의 제원이다.

2.2 금형 모델링

초기소재가 중공형 이므로 성형 시 내경부 형상으로의 유동을 방지하여 외경부로 유동이 잘 이루어져 기어치의 정밀도가 향상되도록 펀치에 맨드렐을 부착하는 방식을 채택하였다. 그 후 중공형 소재를 펀치에서 다이로 가압하는 전방압출 성형법에 맞도록 펀치의 모델링을 진행하였다.<sup>6</sup>

고정도 형상을 갖는 헬리컬 기어의 냉간 성형을 위해서는 다이의 치형 도입부 각도 설계가 매우 중요하다.<sup>5</sup> 그 이유는 다이의 도입부 각도는 펀치 하중과 소재의 치 성형에 영향을 미치기 때문이다. 따라서, 최적의 도입부 각도를 찾기 위해 Fig. 3(b)와 같이 각도를 바꿔가며 다이의 모델링을 진행하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석조건 수립

초기소재와 금형에 대한 유한요소 모델링을 진행한 후 DEFORM-3D를 이용하여 성형해석을 수행하였다. 도입부 각도는 Fig. 3(b)에서 보이는 것처럼 30°부터 60°까지 5°의 간격으로 변경하면서 모델링하였고, 치 성형이 잘 표현되기 위해서는 한 번이 기어의 치형 보다 작아야 하기 때문에 길이는 0.5mm 이하가 되도록 설정하여 약 25만개의 요소가 생성

Table 2 Conditions of FE-analysis

Conditions	Value
Material	SM35C
Number of mesh	250,000
Friction coefficient	0.12
Punch speed(mm/s)	10

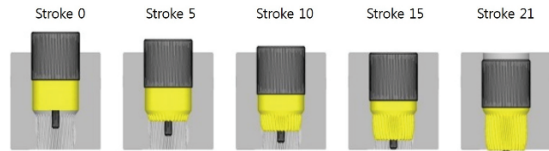


Fig. 4 Forward extrusion process of helical gear

되었으며, 헬리컬기어의 복잡한 형상을 표현하기 위해선 element 형상을 3차원형 삼각요소로 표현을 해야한다. 삼각요소를 적용할 경우 수렴성은 좋으나 벤드폭이 커져 해석 시간은 길어지는 단점이 있다.<sup>8</sup> 해석 모델의 요소를 25만개의 3차원 사면체로 선정한 이유는, 요소의 개수가 25만개 보다 적으면, 유한요소해석을 수행할 시 치 형상이 제대로 표현되지 않아 가시화가 불가능하며, 25만개 이상 일 때부터 치 형상이 제대로 표현이 되는 것을 확인하였기 때문이다. 또한, 25만개 요소의 해석 모델의 평균 해석 시간은 하루 정도 소요 되었는데, 요소의 개수가 25만개 보다 많으면 같은 결과의 해석 소요시간이 그 이상 지연되어 비효율적이라 판단하였다.

금형과 소재의 접촉면에 발생하는 마찰현상을 고려하기 위해 냉간 단조 공정에서 일반적으로 사용되는 0.12를 마찰계수로 사용하였다.<sup>7</sup> 해석조건은 Table 2와 같다.

3.2 해석결과 비교

Fig. 4는 헬리컬 기어의 전방압출에 대한 유한요소 해석과정을 보여주고 있다.

헬리컬 기어의 냉간 전방압출 공정 시 최적의 도입부 각도를 찾기 위하여 기어의 성형성 분석을 수행하였다. 성형성 분석은 Table 3에서 보이는 바와 같이 두 가지 변수, 즉 도입부 각도에 따라 달라지는, 기어치의 충전율과 가공 시 발생하는 최대하중 값을 확인하였다.

각 변수에 대한 목표치는 기어의 성형성을 고려하여, 기어치의 충전율 91% 이상, 그리고 현재 성형기의 최대 가능하중을 고려하여 최대하중이

Table 3 Design variable and target values

Design variables	Target value
Height of tooth(mm)	higher than 2.03
Filling-Ratio(%)	higher than 91
Load(ton) limit	less than 125

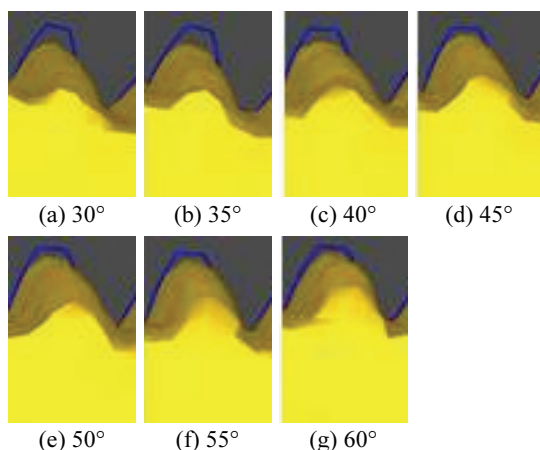


Fig. 5 Filling-Ratio of helical gear in accordance with die entrance angle

125t 이하로 선정되었다. 기어치가 100% 충전되었을 때의 높이는 2.23mm이나, 본 논문에서는 기어치의 목표 충전율이 91% 이상이므로 최소 2.03mm를 기어치의 목표 높이로 설정하였다. 충전율과 치 높이를 각각의 목적변수로 넣은 이유는 충전율이 91%일때 기준으로 높이가 2.03이 계산되었는데, 이는 그 높이 이하에서는 폭 방향으로 100% 충전이 발생하는 경우를 기준으로 계산된 값이다. 실제 해석 및 실험에서는 높이가 만족되더라도 폭 방향으로 미충진 때문에, 충전율이 91% 이하가 되는 경우가 생길 수 있다. 이에 따라, 높이와 충전율을 따로하여, 목적함수로 사용하게 되었다.

Fig. 5는 압출 후 도입부 각도에 따른 헬리컬 기어의 치성형을 보여준다. 도입부 각도가 30°일 때는 67%의 충전율을 보여 목표 값에 미치지 못하지만, 도입부 각도가 증가함에 따라 기어치의 충전율이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 50°까지는 치높이가 최대 약 1.73mm로 치형의 목표 높이인 2.03mm에 약 15% 부족한 충전율을 보였고, 도입부 각도가 55° 이상일 때부터는 치형의 충전율이 목표치인 91%, 목표 높이인 2.03mm에 도달한 성형성을 보였다.

Fig. 6에서는 헬리컬 기어의 성형 이후 충전상태를 확인하기 위해서 Deform에서 다이와 성형품

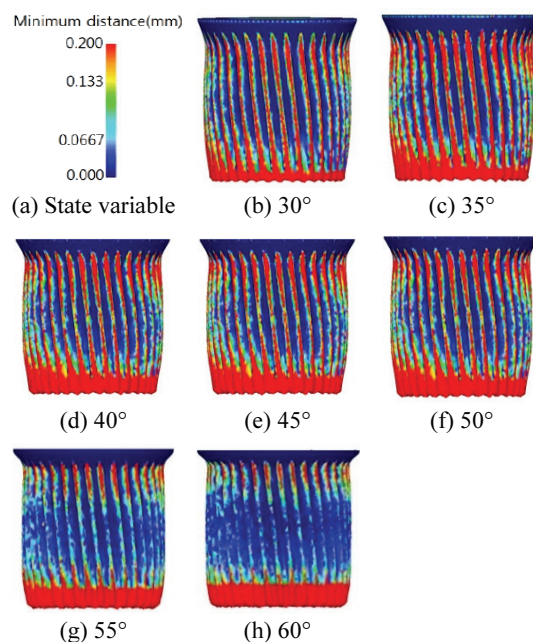


Fig. 6 Numerical value of the filling-ratio of helical gear

간의 간격을 계산하여 수치화하여 표현하였다. 이 간격은 성형된 성형품 표면에서 다이 표면까지의 거리를 나타낸 것이며 이 결과 값을 통하여 두 객체가 접촉을 했는지를 확인할 수 있다.

간격은 0mm부터 0.2mm까지로 설정하여 확인을 하였으며, 확인결과 30°부터 40°까지는 기어 치형 전체가 금형과 0.2mm 이상 접촉하지 않은 모습을 보여주었다. 이는 기어치의 성형이 제대로 이루어지지 않았다는 것을 보여준다. 반면에 45°부터는 간격이 0.2mm 부근으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6(g)에서 보이는 바와 같이 55°부터는 접촉하지 않은 부분이 0.2mm이하로 이루어지므로 치형의 목표 높이인 2.03mm에 부합하게 성형이 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 헬리컬 기어의 단면에서 보여지는 미충진량을 보여준다. 다이의 도입부 각도가 45° 이하에서는 Fig. 7(a)에서 보이는 것처럼 미충진 범위가 넓게 형성되었지만, 60°에서는 Fig. 7(b)에서 보이는 바와 같이 미충진이 국부적으로 발생 하였다.

기어를 성형하는데 필요한 하중을 확인한 결과 도입부 각도가 증가함에 따라 하중 또한 최대 45% 정도까지 증가되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8에서는 도입부 각도에 따른 성형하중의 변화를 보여주고 있다.

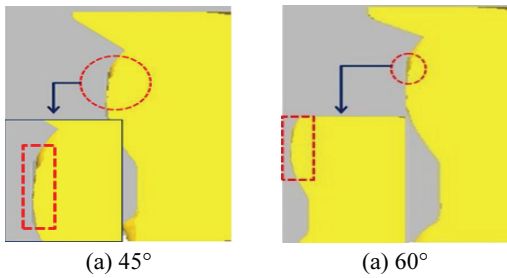


Fig. 7 Filling-Ratio of entrance angle 45° and 60°

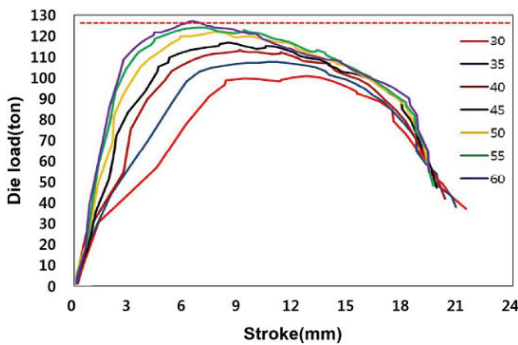
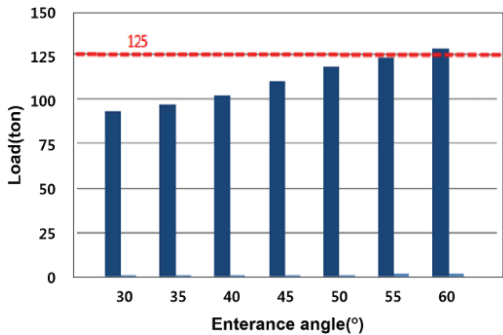
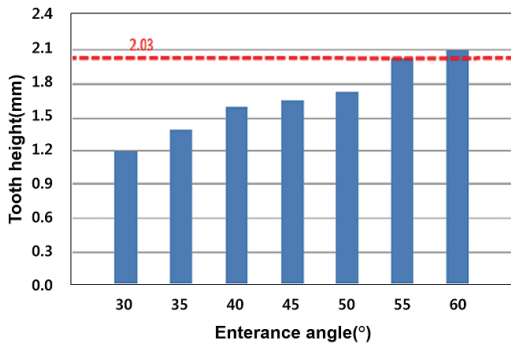


Fig. 8 Die load in accordance with entrance angle



(a) Maximum load in accordance with entrance angle



(b) Tooth height in accordance with entrance angle

Fig. 9 Overview of forward extrusion result

이와 같이 해석결과 도입부 각도가 45° 이상이 되면 기어치의 성형이 목표치수에 근접해 가는 것을 확인할 수 있었으며, 기어의 외경치수에도 부합하는 결과를 얻을 수 있었으나, 기어 성형에 필요한 성형하중 또한 증가되는 것을 확인하였다. 도입부 각도가 55° 일 때, 치 성형 결과가 목표치를 만족하고, 성형하중도 성형기의 최대 가능하중인 125ton 이하로 유지되는 것으로 나타났다. Fig. 9 에 해석결과분석이 요약되어 있다.

위의 결과를 토대로 EPB시스템에 적용되는 헬리컬 기어 성형을 위한, 냉간 단조공정에 있어서 성형성과 성형하중을 동시에 고려했을 때, 55°가 가장 적합한 금형의 도입부 각도로 사료될 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 주차 브레이크용 헬리컬 기어의 냉간 전방압출 성형공정 중 금형 도입부의 각도에 따른 성형하중 및 성형성을 평가하기 위한 유한요소해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 도입부 각도 30°부터 40°까지는 기어 치형 전체가 금형과 0.2mm 이상 접촉하지 않은 모습을 보여주었다. 이는 기어치의 성형이 제대로 이루어지지 않았다고 판단할 수 있다. 반면에 45°부터는 간격이 0.2mm 부근으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 도입부 각도가 작으면 기어의 외경치수 충족이 되지 않으며, 45° 이상부터 외경치수가 부합 하다는 결론을 내릴 수 있다.

(2) 도입부 각도가 55° 일 때 성형하중은 성형기의 최대 가능하중인 125ton 이하로 유지되는 것으로 나타났다. 도입부 각도가 커질수록 기어치의 충진율이 높아지는 것을 확인할 수 있었으나, 금형의 하중 또한 최대 45%가 증가되는 것이 확인되었다.

따라서 성형성과 성형하중을 동시에 고려했을 때, 55°가 가장 적합한 금형의 도입부 각도로 여겨진다.

#### 후 기

본 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 지역산업기술개발사업으로 수행된 연구결과입니다. 본 논문 작성시 물심양면으로 지원해주셨던故박용복 교수님의 명복을 빕니다. (A005900846)

**REFERENCES**

1. Choi, J. Y., "Yaw Stability Control of a Vehicle by Gear Ratio Change and Active Steering," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 325-330, 2013.
2. Nam, J. H., Jung, S. H., Jung, T. W., and Lee, Y. S., "Study on New Process for Precision Forging of Helical Gear," *Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Spring Conference*, pp. 107-110, 2012.
3. Park, Y. and Yang, D., "Study on Precision Cold Forging of Helical Gear," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 8, No. 4, pp. 384-392, 1999.
4. Lee, H. G. and Park, Y. B., "Process Reduction Design of Cold Forging for Cost-Saving of Asymmetric Pinch Yoke at Automobile Steering System," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 16, No. 2, pp. 1365-1370, 2014.
5. Jeong, M. S., Lee, S. K., Yoon, J. H., Sung, J. H., Kim, K. E., et al., "Development of Cold Extrusion Process for Helical Pinion Gear of Automatic Transmission," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 1217-1218, 2012.
6. Jung, T. W., Lee, Y. S., Moon, Y. H., Lee, I. H., Choi, S. T., et al., "Study on Process Design of Forward Extrusion for Improvement of Dimensional Accuracy of Helical Gear," *Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Spring Conference*, pp. 115-118, 2010.
7. Wang, C., Lim, S., and Park, Y., "Effect of the Design Parameter for Internal Spline Forming Using the Tube," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 15, No. 7, pp. 512-517, 2006.
8. Park, K., Lee, Y. K., Park, Y. B., and Yang, D. Y., "Improvement of Element Stability Using Adaptive Directional Reduced Integration and Its Application to Rigid-Plastic Finite Element Method," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 12, No. 3, pp. 32-41, 1995.