

자동차 변속기용 헬리컬 기어의 냉간전방압출 공정 개발에 관한 연구

김홍석[#] · 이일환¹ · 최석탁¹ · 이영선²

A Study on Development of Cold Forward Extrusion Process for Helical Gears of Automotive Transmissions

H. S. Kim, I. H. Lee, S. T. Choi, Y. S. Lee

(Received August 5, 2011 / Revised September 30, 2011/ Accepted October 6, 2011)

Abstract

The application of helical gears in crucial parts of automotive transmissions has been steadily increasing due to their higher power transfer performance compared to spur gears. However, the traditional gear manufacturing methods such as hobbing and deburring require large cycle times with expensive production lines so that there have been intensive efforts trying to manufacture gears via forging processes. Although forging processes for spur and bevel type gears have been developed on the practical level, the manufacturing of helical gears is still dependent on the traditional cutting process. Therefore, this paper seeks to develop a cold forward extrusion process for the helical gear with the pitch diameter of 43.5mm and a helix angle of 18.4°. A forward extrusion process was used due to the relatively small diameter of the target geometry. The material deforming behavior influenced by the die geometry was examined by using CAE analysis. Finally, it was found that the helical gear manufactured by the developed extrusion process satisfied the dimensional accuracy and mechanical characteristics for automotive transmissions.

Key Words : Helical Gear, Automotive Transmission, Cold Forging, Forward Extrusion, CAE Analysis

1. 서론

최근 자동차용 변속기의 성능 향상을 위하여 헬리컬 기어(Helical Gear)의 적용이 확대되고 있다. 특히, 헬리컬 기어는 평기어(Spur Gear)보다 치면 접촉 효율이 높기 때문에 기어 두께를 줄일 수 있어 고단 변속이 요구되는 고급형 차량의 변속기에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나, 호빙(Hobbing)과 디버링(Deburring), 셰이빙(Shaving)으로 이어지는 전통적인 기어 생산 방식의 경우 상당한 가공 시간과 고가의 장비 및 공구가 요구되

기 때문에 보다 효율적으로 기어를 생산하고자 하는 노력이 지속적으로 이루어져 왔다. 특히, 단조 공정은 기존의 절삭 방식을 대체할 수 있는 효율적인 기어의 생산법으로 주목되어 왔다[1~3]. 국내에서도 1990년대부터 꾸준한 연구를 통하여 평기어와 베벨기어(Bevel Gear)의 경우 상당한 성과를 거두어 현장 기술 수준의 기어 성형기술이 확보되었으나, 헬리컬 기어의 경우 아직 충분한 단조기술이 확보되지 못한 상태로 남아 있다.

고정밀 기어의 경우 최종 단계에서 정밀 연삭이 추가되는 경우가 있지만 기존 절삭방식의 호

1. ㈜티에이케이

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소

교신저자: 대구대학교 기계자동차공학부,

E-mail: kimong@daegu.ac.kr

빙 및 디버링 단계만이라도 단조 공정으로 대체가 가능하다면 상당한 비용절감 및 생산성 향상 효과를 얻을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존 절삭 방식으로 생산 중인 자동차 변속기용 헬리컬 기어의 생산 효율화를 위하여 냉간단조공정을 설계하였으며, 금형 및 시제품 제작을 수행하였다.

본 연구의 대상은 피치원 지름이 43.5mm 인 헬리컬 기어로서 18.4°의 헬리컬각을 갖는 자동차 변속기용 기어이다. 헬리컬 기어의 치형 성형을 위해서는 폐쇄단조 또는 전방압출 형태의 공정구상이 가능한데, 본 연구의 대상 제품은 비교적 작은 직경의 헬리컬 기어로서 전방압출 형식의 공정을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 CAE 해석을 통하여 전방압출형 기어성형의 소재 유동 및 치형 창생 경향을 파악하였으며 성형 실험을 통하여 시제품을 제작하였다. 또한, 제작된 시제품에 대한 3 차원 기어측정 및 치형굽힘강도시험을 통하여 치형 정밀도 및 기계적 특성이 자동차 변속기에 적용 가능함을 확인하였다.

2. 제품 분석 및 공정 구상

본 연구에서 목표로 하는 헬리컬 기어의 형상 조건을 Table 1에 나타내었다. 자동차 변속기에 사용되는 헬리컬 기어로서는 기어두께 16.8mm, 피치원 지름 43.5mm의 비교적 소형 제품이며 헬리컬각도 18.4°로서 완만한 편에 속한다. 소재로는 자동차 기어용 침탄강인 SCM920HVS1이 사용되었으며 절삭가공 또는 단조성형 후 침탄열처리가 수행된다.

일반적으로 헬리컬 기어의 단조 성형공정은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 밀폐형 금형 내에 소재의 상하를 가압하여 측면 방향으로 치형을 창생시키는 폐쇄단조공정과 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 소재의 상면에 하중으로 가하여 길이 방향으로 치형을 생성시켜 하방향으로 취출하는 전방압출공정으로 구분된다[4~5].

본 연구에서는 상기 두 가지 공정 중 대상 제품에 적절한 단조 공정의 선택을 위하여 상용소프트웨어인 Deform-3D를 이용하여 CAE 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 소재의 응력-변형률 선도는 Fig. 2에 나타낸 바와 같고, 마찰상수는 0.08을 사용하였다. 해석을 위한 형상모델은 사면

Table 1 The geometrical specifications of the helical gear used in this study

No. of Teeth	31
Pressure Angle	20°
Helix Angle	18.4° (LH)
Pitch Circle Diameter	43.5mm
Base Circle Diameter	40.6mm
Thickness	16.8mm

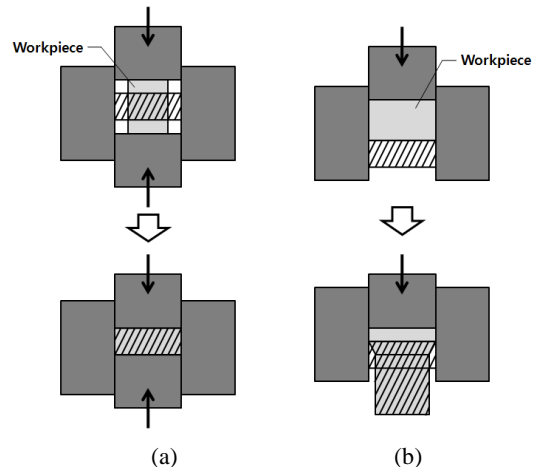


Fig. 1 The typical forging process for gear: (a) closed-die forging and (b) forward extrusion process

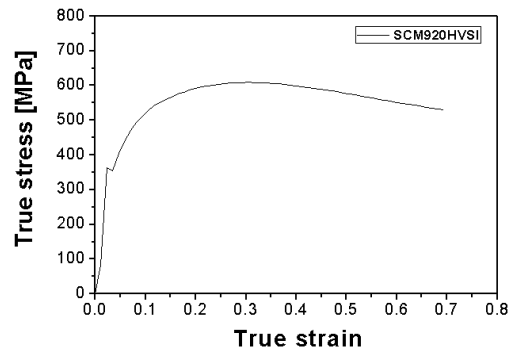
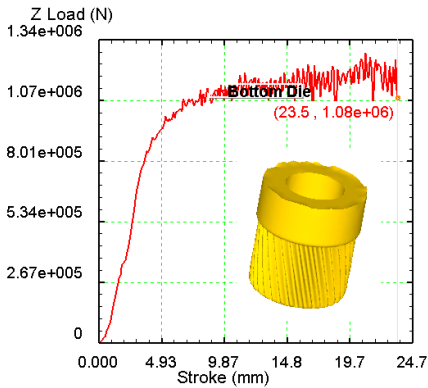
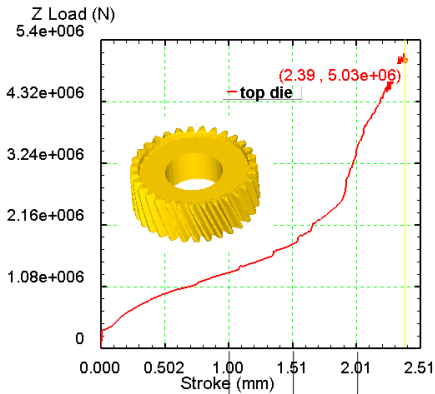


Fig. 2 The stress-strain curve for SCM920HVS1 obtained by compression test

체요소(Tetrahedral Element)를 이용하여 구성하였는데, 폐쇄단조공정과 전방압출공정 각각에 대하여 약 180,000개와 330,000개의 격자를 구성하였다. 또한, 두 공정 모두 금형은 강체(Rigid-body)를 가정하였으며, 가압 속도는 실제 사용될 성형장비의 사양을 고려하여 70mm/sec로 설정하였다.



(a) Forward Extrusion



(b) Closed-die Forging

Fig. 3 The forming loads obtained by CAE analyses

CAE 해석에서 얻어진 두 공정의 성형하중 분포를 Fig. 3에 나타내었는데, 전방압출공정의 경우 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 성형초기에 하중이 급격히 증가 하지만 일반적인 전방압출공정과 유사하게 정상상태(Steady State)에 도달하면 성형하중이 일정하게 형성되어 약 120톤 정도로 유지됨을 알 수 있었다. 그러나 폐쇄단조공정의 경우 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 기어치의 형상이 뚜렷해질수록 하중이 급격하게 증가하여 500톤 이상의 하중이 공급되어야 고른 치형이 형성됨을 관찰할 수 있었다.

본 제품의 경우 기어의 피치원 지름이 43.5mm로서 비교적 소형 제품에 속하기 때문에 소재의 가열은 고려하지 않았으며, 폐쇄단조공정이 사용

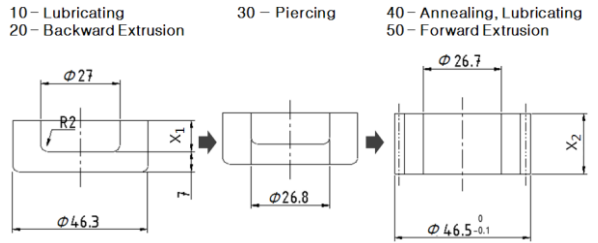
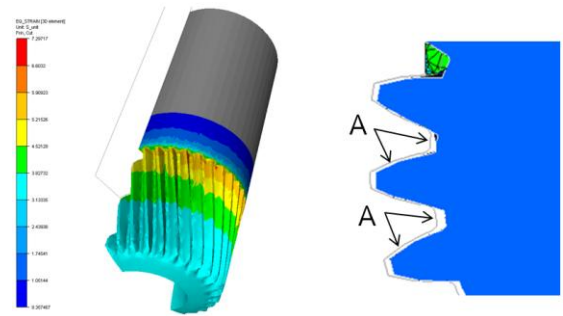


Fig. 4 The designed process for the cold forward extrusion of helical gear



(a) Effective Strain (b) Deformed Geometry

Fig. 5 The effective strain and deformed geometry of the extrusion without mandrel

될 경우 충분한 성형하중이 공급되지 않는다면 요구되는 치형 정밀도를 얻기 힘들 것으로 판단되었다. 또한, 전방압출공정의 경우 성형 완료 후에 제품을 금형의 하방향으로 자연스럽게 배출시킬 수 있으나 폐쇄단조공정의 경우 제품의 취출을 위해서는 금형 또는 소재가 회전되어야 하기 때문에 보다 복잡한 금형 구조가 요구될 것으로 예측되었다. 따라서, 본 제품과 같은 소구경 헬리컬 기어의 경우 전방압출공정을 적용하는 것이 보다 효율적이라고 판단되었으며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 후방압출과 피어싱으로 압출 블랭크를 성형하고 최종적으로 전방압출을 적용하는 3단계 공정을 구상하였다

3. CAE 해석을 통한 성형특성 분석

3.1 맨드릴 미적용 자유형 압출

중공형 제품의 전방압출은 내경부에 맨드릴(Mandrel)을 삽입하여 성형을 수행하는 구속형과 맨드릴을 사용하지 않는 자유형으로 나눌 수 있다. 그러나, 본 제품과 같이 내경 부위가 비어 있는 중공형의 경우 맨드릴을 사용하지 않는다면

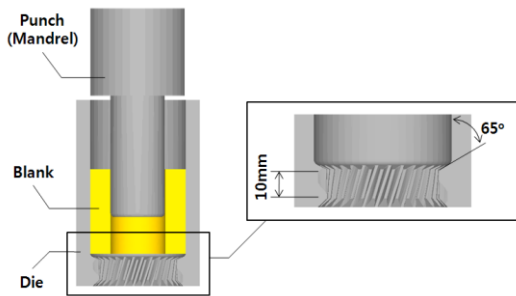


Fig. 6 Configuration of die and punch with mandrel

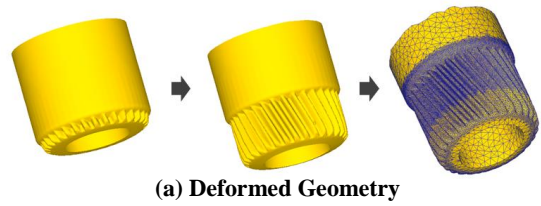
반경 방향의 압축력에 의해 소재가 금형면에서 이탈하여 치형의 정밀도를 확보하기 어려울 것으로 예상되었다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 자유형 전방압출의 경우 블랭크의 길이 방향으로 유효 변형률에 차이가 발생하며, Fig. 5(b)의 'A'로 표시된 바와 같이 소재가 성형 중에 금형의 치형부에서 이탈하여 요구되는 치수정밀도를 만족할 수 없음을 CAE 해석을 통하여 확인할 수 있었다.

3.2 맨드렐 적용 구속형 압출

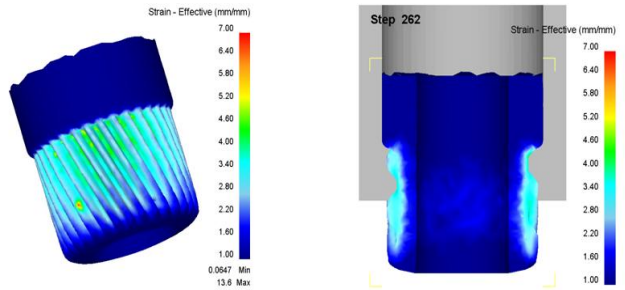
전술한 바와 같이 맨드렐을 사용하지 않을 경우 내경 방향의 소재 유동으로 인하여 성형 제품의 치형 정밀도를 확보할 수 없을 것으로 판단되었다. 따라서, 치형 정밀도의 향상을 위하여 Fig. 6에 나타난 바와 같이 블랭크의 내경부에 맨드렐을 삽입하여 CAE 해석을 수행하였다. 이때, 치형 성형부의 도입각은 65°, 랜드부의 길이는 10mm로 설정하였다.

Fig. 7에 해석을 통하여 얻은 변형형상과 유효변형률 분포를 나타내었는데, 맨드렐의 삽입을 통한 내경 방향으로의 소재 유동이 제어되어 블랭크 길이 방향의 유효변형률 편차가 감소되고 있음을 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 8에 나타난 바와 같이 맨드렐을 삽입할 경우에 대한 소재의 유동 경향을 파악하기 위하여 금형의 하단부를 기준으로 3, 7, 12mm를 절단하여 금형 치형부에 대한 소재의 변형형상을 비교하여 보았다. 블랭크의 길이방향 위치에 대한 소재 유동 특성은 특별한 차이를 보이지 않았으며, 그림에 나타난 출구부 'Z-3.0'에서의 변형형상을 Fig. 5(b)와 비교하면 맨드렐 삽입을 통하여 내경 방향의 소재 유동이 제한되어 소재와 금형면의 접촉이 금형의 압출 출구부까지 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 다만, 약 330,000개의



(a) Deformed Geometry



(b) Effective Strain Distribution

Fig. 7 The deformed geometry and effective strain of the extrusion with mandrel

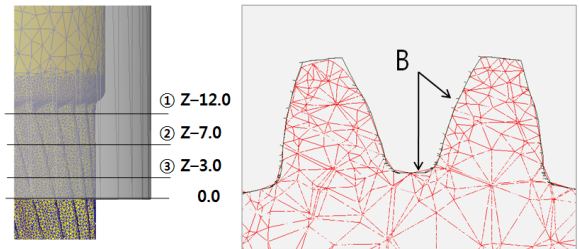


Fig. 8 The deformed geometry of material on the z-direction position of 3.0mm

격자를 사용했음에도 불구하고 해석 모델이 미세한 치형단부를 모사하기에는 다소 불충분한 면이 있지만 Fig. 5(b)와 Fig. 8에 각각 'A', 'B'로 표시된 부위를 비교하면 변형소재와 금형면의 접촉 범위가 증가하였음을 확인할 수 있었다.

4. 시제품 제작 및 검증

4.1 시제품 제작

Fig. 9에 제작된 금형의 하측 조합과 프레스에 설치된 전체 금형세트를 나타내었다. 금형 랜드부의 길이와 압출각은 전절에서 수행된 CAE 해석에서의 조건과 동일하게 각각 10mm와 65°를 적용하였다. 성형 실험에는 450톤 너클프레스를 사용하였으며, 성형된 헬리컬 기어의 시제품을 Fig.10에 나타내었다. 전방압출공정의 특성을 활용하여

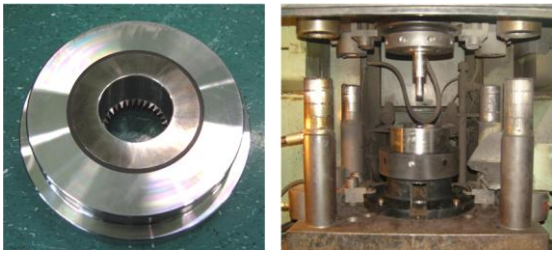


Fig. 9 The manufactured die set for the forward extrusion process of helical gears

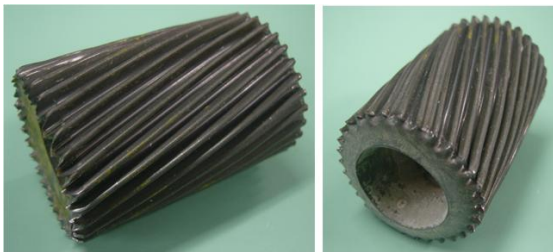


Fig.10 Helical gear prototype obtained by cold forward extrusion experiments

초기 소재의 길이를 20~60mm 범위로 변화시켜 시험 작업을 수행하였는데, 그림에 나타난 시제품은 초기 소재의 길이가 44mm인 경우로서 단조품을 최종 제품의 치수에 맞게 절단하면 한 번의 성형으로 2개의 제품을 얻을 수 있다.

4.2 치형 정밀도 및 기계적 특성 검증

헬리컬 기어의 단조에서는 전극의 가공 오차 및 금형의 방진 오차, 단조 성형 시의 탄성 회복, 열처리에 따른 변형 오차 등 다양한 오차 발생의 원인을 제어해야 치형의 정밀도를 구현할 수 있다[6]. 본 연구에서는 금형 제작 및 단조 성형, 열처리의 각 과정에서 전극 및 금형, 시제품에 대한 3차원 측정을 통하여 치수 정밀도를 검토하였다. 제품에 요구되는 치수 정밀도를 확보하기 위하여 3 차례의 금형 보정이 수행되었는데, Fig. 11에 나타난 바와 같이 전극 및 방진가공의 정밀도 향상을 통하여 단조품의 치형 정밀도가 향상됨을 알 수 있었다.

또한, Fig. 12에 나타난 장치를 사용하여 단조성형 및 기계가공된 헬리컬 기어의 치형굽힘강도 시험(Gear Tooth Bending Test)를 수행하였다. 상단 지그가 헬리컬 치형의 측면에 고르게 접촉되어야

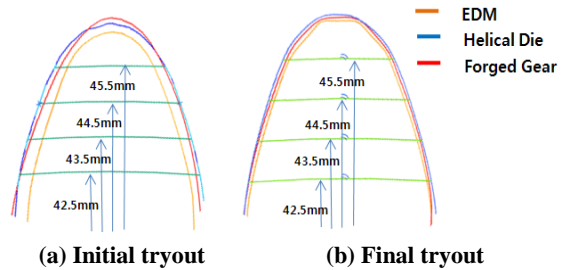


Fig.11 Gear tooth profiles obtained by 3 dimensional gear measurements

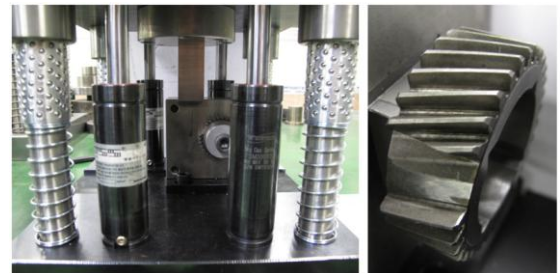


Fig.12 Gear tooth profiles obtained by 3 dimensional gear measurements

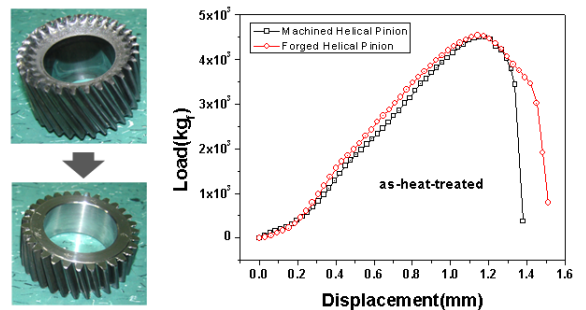


Fig.13 Comparison of fracture strength between machined and forged gear

하기 때문에 우측 그림에 나타난 바와 같이 일부 치형을 절삭가공으로 제거한 후 하단 지그에 설치하였다. 본 연구에서는 단조품을 절단 및 웨이빙 가공한 후 열처리를 수행하였는데, 기존 기계가공품과 동일하게 800~900°C 범위에서 점진적으로 승온시키며 침탄, 확산시킨 후 담금질 및 뜨임 열처리를 수행하였다. 치형굽힘강도시험의 결과를 Fig. 13에 나타내었는데, 전방압출공정을 통하여 얻어진 시제품이 기존의 절삭 방식으로 제작된 헬리컬 기어에 비하여 보다 큰 파단강도와 연신율을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동차 변속기에 사용되는 소구경 헬리컬 기어에 대한 냉간단조공정을 개발하였으며, 이러한 일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) CAE 해석을 통하여 소구경 헬리컬 기어의 경우 성형하중에 따른 소재 유동특성의 측면에서 전방압출공정이 폐쇄단조공정보다 우수함을 확인할 수 있었다.

(2) 헬리컬 기어 전방압출공정의 CAE 해석을 통하여 성형부의 소재와 금형면 간의 접촉 유지 및 치형정밀도 향상을 위해서는 맨드렐을 삽입하는 것이 바람직함을 확인할 수 있었다.

(3) 전극 및 금형, 단조품에 대한 3 차원 측정 및 금형 보정을 통하여 자동차 변속기용 헬리컬 기어의 호빙 및 디버링 가공품에 상당하는 정도를 갖는 헬리컬 기어의 제작이 가능하였다.

(4) 치형굽힘강도시험을 통하여 냉간단조 공정으로 제작된 제품이 기존의 절삭가공을 통하여 제작된 제품보다 더 높은 파단강도와 연신율을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지역전략기획기술개발사업의 일환인 ‘차세대 변속기 구동부품 무선삭 정밀제조기술 개발’의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] J. J. Park, J. H. Lee, 1993, Research on Gear Manufacture by Cold Forging, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 33, No. 3, pp. 213~222.
- [2] Y. B. Park, J. H. Yoon, D. Y. Yang, 1994, Finite Element Analysis of Steady-state Three-Dimensional Helical Extrusion of Twist Sections using Recurrent Boundary Conditions, Int. J. Mech. Sci., Vol. 36, No. 2, pp. 137~148.
- [3] Y. C. Kwon, J. H. Lee, C. M. Lee, Y. S. Lee, 2007, Dimensional Changes and Residual Stress of Spur Gear According to the Manufacturing Processes - Comparison of Cold Forging Part with Machining Part-, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 8, pp. 575~581.
- [4] J. C. Choi, H. Y. Cho, H. H. Kwon, J. C. Han, 1991, A Study on the Helical Gear Forming by Cold Extrusion, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 15, No. 1, pp. 127~138.
- [5] J. C. Choi, Y. Choi, J. Tak, H. Y. Cho, 1997, A Study on the Clamping Type Forging of Helical Gear, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 21, No. 11, pp. 1827~1836.
- [6] Y. S. Lee, T. W. Jung, Y. H. Moon, 2009, Proc. Kor. Soc. Prec. Eng. Conf., KSPE, Daegu, Korea, pp. 537~538.