

상용차용 중공형 휠 너트 렌치의 냉간단조 공정 개발

김홍석[#] · 윤재웅¹

Development of Cold Forging Process of Hollow-type Wheel Nut Wrench for Commercial Vehicles

H. S. Kim, J. W. Youn

(Received September 28, 2012 / Revised November 21, 2012 / Accepted November 28, 2012)

Abstract

A wheel nut wrench is one of the hand tools used to loosen and tighten lug nuts on automobile wheels and it has generally a solid-type geometry for commercial vehicles. However, the solid-type wheel nut wrenches manufactured by hot forging processes exhibit several drawbacks such as heavy weight and rough surface finish. Thus, many efforts have been devoted to change the part geometry and improve the manufacturing process. For this purpose, the weight of the final product can be reduced drastically using a hollow tube as the initial stock, which can be manufactured by the more economical manufacturing process of cold forging. In this study, the cold forging of a hollow-type wheel nut wrench for commercial vehicles was designed based on the results of fundamental experiments and CAE analyses using the commercial finite element code DEFORM-3D. In addition, cold forging experiments were conducted on a special-purpose forming machine for hollow wheel nut wrenches in order to validate the designed process sequence. As results, it was found that the final products with a weight reduction of 39% and better surface appearance can be manufactured without any defect with the newly designed cold forging process.

Key Words : Wheel Nut Wrench, Commercial Vehicle, Hollow-type, Cold Forging Process, Weight Reduction

1. 서 론

휠 너트 렌치(Wheel Nut Wrench)는 자동차 타이어의 탈부착에 사용되는 수공구로서 1.2 톤 이상의 상용차에 제공되는 기존 제품의 사례를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타낸 휠 너트 렌치는 양구형으로서 대구경과 소구경측은 각각 육각 및 사각 볼트의 탈부착에 사용되며, 'A' 와 'B'로 표시된 구멍에 봉 형상의 레버잭(Lever-Jack)을 삽입하여 몸체를 회전시킨다. 휠 너트 렌치와 같은 자동차용 수공구류는 차량 구입 시에 기본적으로 제공되며 차량에 항상 적재되고 있음에도 불구하고

고 차체에 직접 조립되는 부품이 아니기 때문에 제품 개선의 노력이 상대적으로 미흡했으며, 유사한 형태의 제품이 관성적으로 사용되어 왔다.

중실형 제품의 가장 큰 단점은 단순 기능의 수공구로서는 중량이 과도하다는 점으로서 Fig. 1에 나타낸 제품의 경우 무게가 약 1.8kg에 달한다. 또한, 중실형 제품의 생산공정인 열간단조공정은 가열이 수반되는 고에너지 성형공정이며 제품의 표면 품질이 떨어지는 단점을 가지고 있다[1]. 특히, 소규모 형태로 운영되는 국내 수공구 제조업체의 특성 상 중간성형품의 이송 자동화가 어려워 작업자의 피로도 증가 및 작업 환경의 악화를

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University
Corresponding Author : School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University, E-mail: kimong@daegu.ac.kr

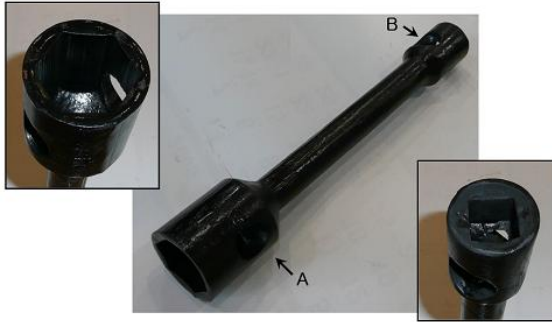


Fig. 1 An example of solid-type wheel wrench for commercial vehicles

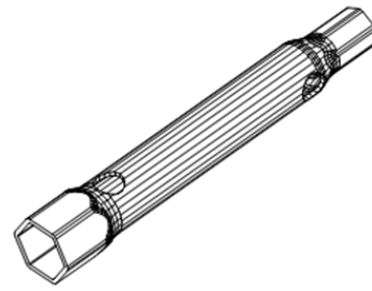
피할 수 없다. 따라서, 수년전부터 상용차용 휠 너트 렌치의 상당 부분은 중국 등 외국에서 수입되고 있는데, 현지 생산비 상승 및 환율 불안 등의 문제를 안고 있다.

따라서, 본 연구에서는 진술한 문제점을 극복하기 위해 중공형으로 설계된 상용차용 휠 너트 렌치의 냉간단조공정을 개발함으로써 제품의 중량을 감소시키고 외관 품질을 향상시키고자 하였다. 이러한 연구를 위하여 중공형 휠 너트 렌치에 대한 구조해석을 수행하여 제품의 기계적 강도를 검토하였으며, 기초 실험 및 CAE 해석을 통하여 냉간단조공정을 설계하였다. 또한, 설계된 공정을 기반으로 전용 성형기를 제작하여 단조 실험을 수행함으로써 개발된 설계공정을 검증하였다.

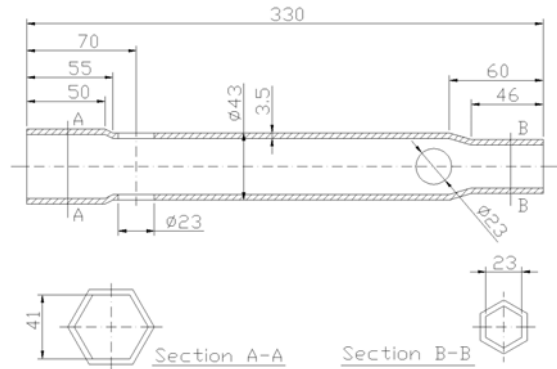
2. 제품 형상 및 공정흐름 검토

2.1 제품 형상 및 규격 검토

중공형으로 설계된 상용차용 휠 너트 렌치의 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 제품의 몸통부는 외경 43mm, 두께 3.5mm의 파이프이며 제품의 양단은 내측 기준으로 맞변 길이가 41mm와 23mm인 육각 형상을 갖는다. KS 규격에서는 휠 너트 렌치의 재질이 SM45C로 지정되어 있으며, 제품 강도는 대구경축 육각형의 맞변 길이가 41mm인 경우 100kgf·m의 비틀림 모멘트를 1분간 견디도록 지정되어 있다[2]. 볼트 착탈 시 발생하는 응력을 계산하기 위하여 외경 43mm, 두께 3.5mm의 파이프에 100kgf·m의 비틀림모멘트를 가하면 단순 비틀림식에서 123MPa의 전단응력이 발생하는 것으로 계산되는데, 일반적인 SM45C의 항복응력은 500MPa 이상[3]으로 강도 상의 문제



(a) Isometric View



(b) Cross-Sectional View

Fig. 2 The part geometry of the hollow-type wheel wrench for commercial vehicles

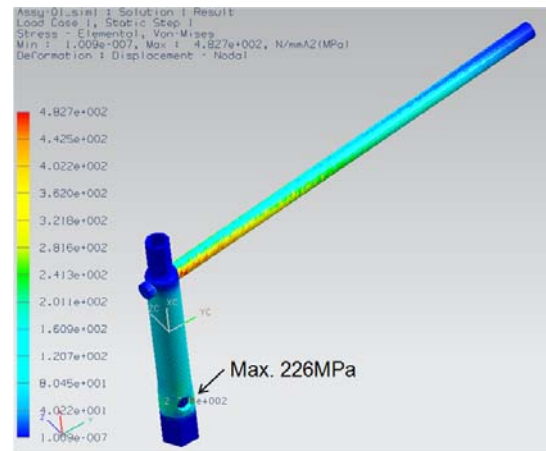


Fig. 3 Effective stress distribution predicted by CAE analysis for torsional test

는 없을 것으로 판단되었다. 그러나, 휠 너트 렌치는 단순한 원통형 제품이 아니기 때문에 실제 제품의 사용 조건과 유사하게 레버잭을 사용한

비틀림 시험에 대한 CAE 해석을 수행하였다. 해석에는 구조해석 소프트웨어인 NASTRAN을 이용하였고 예측된 유효응력을 Fig. 3에 나타내었다.

그림에 나타낸 바와 같이 휠 너트 렌치의 몸통부에서는 최대 226MPa의 유효응력이 하단의 레버잭 구멍 부근에 발생하는 것으로 예측되었다. 따라서, 설계된 중공형 제품은 규격 상의 강도조건을 큰 문제없이 만족시킬 수 있을 것으로 판단할 수 있었다.

2.2 공정흐름 구상 및 기초 실험

본 제품은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 양단에 맞변 길이가 내경 기준으로 각각 41mm와 23mm인 육각 구멍을 갖는다는 형상 특징이 있다. 따라서, 초기소재의 형상을 몸통부와 동일하게 외경 43mm, 내경 36mm인 원통형상으로 설정하면 제품의 한쪽단은 유효직경이 증가하고 다른 쪽은 유효직경이 감소되어야 한다. 결국, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 전체 공정흐름은 직관적으로 제품양단에 육각 확장(Expanding) 및 축관(Shrinking), 측면의 레버홀 생성의 순서로 배치된다. 단, 측면 구멍의 경우 가압 방향이 다르고 소재 직경과 비교하여 구멍의 직경이 크기 때문에 금형을 이용한 피어싱(Piercing) 공정의 적용은 어렵기 때문에 단조 성형 후에 드릴링(Drilling) 공정을 이용하여 생성시키는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

직관적으로 설계된 Fig. 4의 공정 흐름을 검토하기 위해 Fig. 5(a)에 나타낸 공구를 유압 압축기에 장착하여 기초 실험을 수행하였다. 초기 소재는 외경 41mm, 두께 3.5mm의 SM45C 파이프로서 중간 성형공정이 없이 육각 축관 및 확장 공정을 적용시켰는데, Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 성형 불량이 발생하여 원하는 형상을 얻을 수 없었다. 육각 축관 공정에서는 과도한 압축하중으로 인한 좌굴(Buckling)이 발생하는 경우가 많았으며, 육각 확장 공정에서는 펀치의 육각 모서리 부위에서 찢어짐(Tearing) 현상의 발생이 관찰되었다. 압출이나 인발공정과 같이 축방향 가압을 통하여 단면적 감소가 발생하는 경우 성형량이 과도하게 설정되면 좌굴과 같은 불량이 발생할 수 있으며, 확관의 경우 인장응력에 의한 균열(Crack) 및 연성 파괴(Ductile Fracture)가 발생할 수 있다[4-6]. 따라서, 보다 안정적인 성형을 위해서는 단면의 변화를 적절하게 분배시킬 수 있는 단조공정의 설계가 필요하다고 판단되었다.

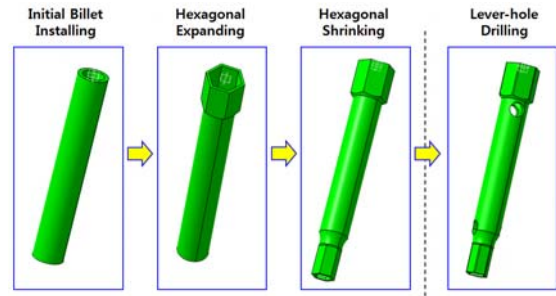


Fig. 4 The intuitive designed process sequence for the hollow-type wheel wrench



(a) Experimental tools



(b) Defected products

Fig. 5 Expanding and Shrinking Tools and forging results of the fundamental experiments

3. 냉간단조 공정설계 및 CAE 해석

3.1 냉간단조 공정설계

전술한 바와 같이 파이프형 초기 소재에서 단조공정으로 육각 축관 또는 확장 공정을 적용하면 좌굴 또는 균열 발생이 확인되었는데, 이는 축관 또는 확관에 의한 단면적의 과도한 변화와 육각형상으로의 변형이 동시에 이루어지기 때문으로 판단되었다. 일반적으로 냉간단조에서는 성형량이 과도할 경우 여러 단계를 거쳐 최종 제품 형상을

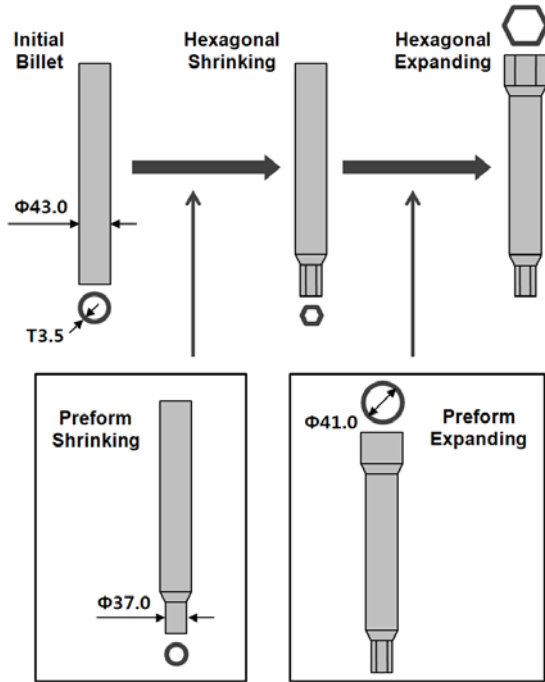


Fig. 6 Schematic diagram of the modified cold forging process with the preform stages

성형하는 다단계 성형공정이 사용된다[7]. 따라서, Fig. 6에 나타난 바와 같이 육각형상의 성형 전에 원형 단면을 갖는 축관 및 환관 공정을 삽입함으로써 각 단계의 단면 변화를 완화시키고자 하였다. 각 성형단계에서의 성형비(Forming Ratio)는 A_0 와 A_1 이 각각 성형 전후의 단면적이라 할 때, (1)식에 나타난 바와 같이 단면적의 변화량과 성형 전 단면적의 비율로 계산된다.

$$R = \frac{|A_0 - A_1|}{A_0} \times 100(\%) \quad (1)$$

본 제품의 경우 내경과 외경이 각각 36mm와 43mm인 초기 소재에서 직접 육각 축관 및 환관 공정을 수행할 때 소재의 두께가 3.5mm로 유지된다고 가정하면 각각의 성형비는 26.0% 및 24.2%로 계산된다. 그러나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 예비성형체를 배치함으로써 축관공정에서의 성형비는 15.2%와 12.8%로 감소하고 환관공정에서는 12.7%와 10.3%로 성형비가 감소하여 각 성형단계에서의 성형 부담을 낮출 수 있었다.

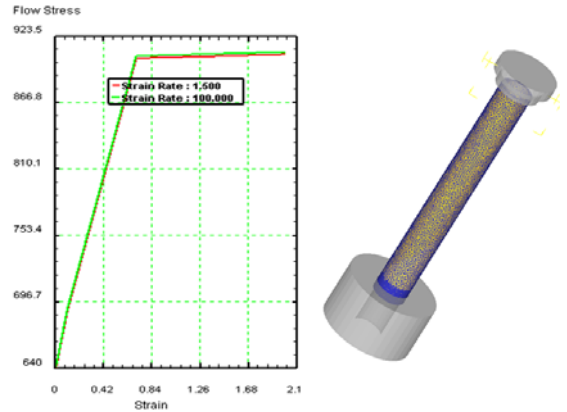


Fig. 7 Stress-strain curve of SM45C and geometrical model of the initial stage

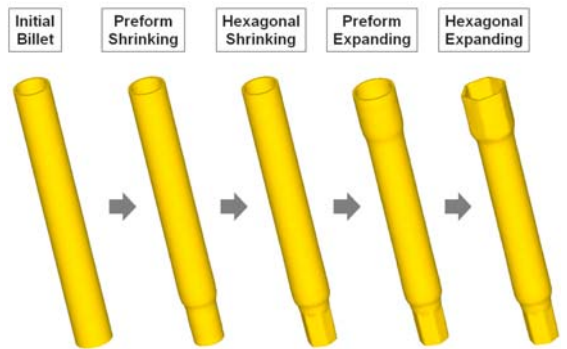
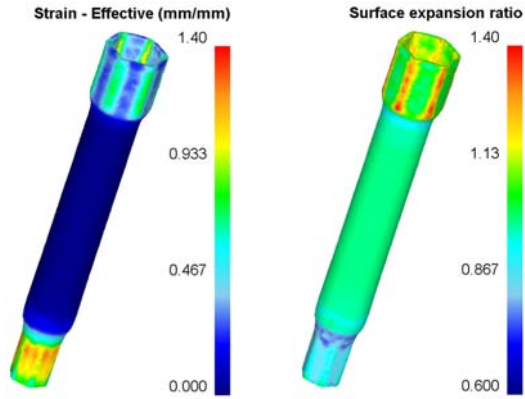


Fig. 8 Deformed geometries of the designed process sequence obtained by CAE analysis

3.2 CAE 해석을 통한 설계공정 검증

설계된 공정의 타당성을 검증하기 위하여 상용 소프트웨어인 Deform-3D를 이용하여 CAE 해석을 수행하였다. 본 제품에 사용된 소재는 SM45C로서 소프트웨어에 내장된 물성치를 사용하였는데 Fig. 7의 좌측에 응력-변형률선도를 나타내었다. 또한 Fig. 7의 우측에 나타난 해석 모델은 약 77,000개의 사면체 요소로 구성되었으며, 소재와 금형 간의 마찰상수는 0.16으로 설정하였다. CAE 해석에서 얻어진 각 성형 단계별 변형 형상을 Fig. 8에 나타내었는데, 외관 상 불량 형상은 관찰되지 않았다. 또한, Fig. 9(a)에는 최종성형품의 유효변형률을 나타내었는데, 축관 부위에서 약 1.4의 최대치가 형성됨을 확인할 수 있었다. 그러나, 환관 부위의 경우 육각 모서리 부위에 변형이 집중되고 있음이 예측되었는데, 유효변형률값이 약 1.1로서



(a) Effective strain (b) Surface expansion ratio
Fig. 9 The distributions of effective strain and surface expansion ratio predicted by CAE analysis

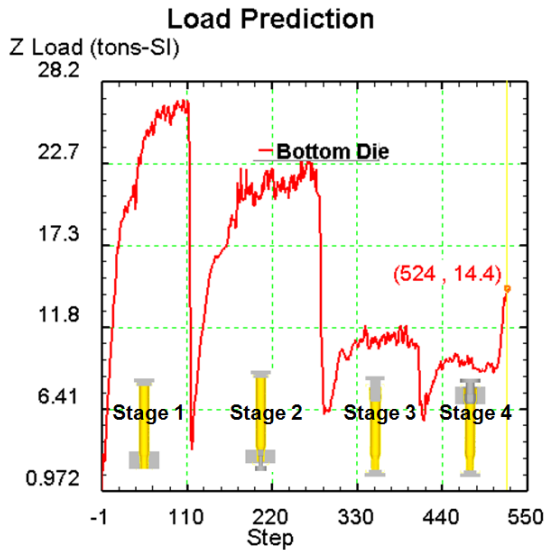


Fig.10 Forming load for each stage predicted by CAE analysis

축관 부위보다는 작지만 Fig. 9(b)의 표면확장률 분포에 나타난 바와 같이 인장방향의 변형이 이루어지고 있어 실제 성형에서 균열 발생의 위험이 존재함을 예측할 수 있다. 따라서, 육각 확관 공정에서는 육각형의 성형을 위한 육각 맨드릴의 도입부에 모따기 및 모서리반경 증가를 통하여 가급적 완만한 소재 유동을 유도해야 할 것으로 판단되었다. 또한, CAE 해석으로 예측된 각 성형 단계의 성형하중을 Fig. 10에 나타내었는데, 확관 공정에 비해 축관 공정의 성형하중이 높음을 알



Fig.11 The manufactured forging machine based on the designed process sequece

수 있다. 다단계 공정에서는 각 단계별 성형하중이 균일하게 분포되는 것이 바람직하지만 본 제품의 경우 육각 확관공정에서 발생 가능한 균열을 억제하는 것이 중요하기 때문에 축관 공정에 비하여 확관 공정에서의 성형량을 감소시킨 설계의도에 적합한 성형하중이 형성되었다고 판단할 수 있었다.

4. 냉간단조 성형실험

CAE 해석에서 검증된 설계공정을 바탕으로 Fig. 11에 나타난 바와 같이 전용 성형기를 제작하였다. 제작된 성형기는 단발식으로서 각 단계마다 금형을 교체하여 성형을 수행하며, 50톤 용량의 유압 펌프가 사용되었다. 특히, 육각 축관 및 확관공정에서는 스프링으로 지지되는 가동형 맨드릴 방식을 적용함으로써 소재와 맨드릴간의 상대운동으로 인하여 발생하는 마찰력을 줄일 수 있었다. 또한, 제작된 성형기에는 유압식 소재 공급장치 및 성형품 이송장치를 부착하여 성형 효율을 증가시키고자 하였다.

제작된 성형기를 이용하여 얻어진 단조품의 단계별 형상을 Fig. 12에 나타내었는데, 각 단계별로 무리없는 성형이 이루어졌음을 확인할 수 있다. Fig. 13에는 냉간단조품에 측면홀 생성을 위한 드릴링 및 흑색도장 처리를 통하여 얻어진 최종 제품 형상을 나타내었다. 제품 양단에 육각형상이 뚜렷하게 형성되었으며, Fig. 1에 나타난 열간단조품에 비하여 외관 품질이 우수하다고 판단되었다. 특히 증공형 휠 너트 렌치의 경우 최종 제품의 중량이 1.1kg으로서 1.8kg의 증실형 제품에 비하여 약 39%의 중량 감소 효과를 얻을 수 있었다.



Fig.12 The intermediate and final forgings obtained by cold forging experiments



Fig.13 The final product of the hollow-type wheel nut wrench

5. 결론

본 연구에서는 기존 중실형 휠 너트 렌치의 중량 감소 및 외관 개선을 위한 중공형 제품의 냉간단조공정을 개발하였다. 이러한 일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 외경 43mm, 두께 3.5mm의 파이프에 대한 냉간단조공정의 적용을 통하여 중공형 휠 너트

렌치를 개발하였다. 개발된 제품은 기존 제품에 비하여 약 39%의 중량 감소 효과를 갖는다.

(2) 제품 양단에 요구되는 축관 및 환관 공정을 단공정으로 수행할 경우 좌굴 또는 균열 불량 발생이 예상되었다. 따라서, 본 연구에서는 불량 해소를 위하여 원형단면을 갖는 예비성형공정을 삽입하여 불량없는 제품을 얻을 수 있었다.

(3) 본 연구는 국내에서 저급 기술로 치부되어 경쟁력이 저하된 제품이라 할지라도 제품 및 생산 공정의 개선을 통하여 국내 기반기술의 경쟁력을 다시 높일 수 있음을 보여 주는 사례라고 판단된다.

후 기

본 연구는 대구대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, (주)대영공업에서 시험작업에 도움을 주셨습니다. 이에 관계자께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill, New York.
- [2] Korea Agency for Technology and Standards, 2009, Wheel Nut Wrenches for Automobiles, KS B 3016, Korea.
- [3] MatWeb, 2012, Material Property Data: AISI 1045 Steel, <http://www.matweb.com>.
- [4] S. K. Lee, H. J. Moon, B. M. Kim, J. H. Lee, Y. S. Lee, 2005, Process Design of Monobloc Tube for Steering Input Shaft in Cold Drawing, Trans Mater. Process., Vol. 14, No. 9, pp. 779~784.
- [5] S. S. Lim, S. J. Lim, H. J. Choi, C. D. Cho, 2006, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.(M. Y. Huh), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, p. 153.
- [6] H. S. Kim, J. W. Youn, 2009, A Study on Development of Combined Drawing Process for Automotive Cowl Cross Bar with Variable Diameters, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 7, pp. 538~543.
- [7] H. S. Kim, Y. T. Im, 1999, An Expert System for Cold Forging Process Design Based on a Depth-first Search, J. Mater. Process. Technol., Vol. 95, No. 1-3, pp. 262~274.