

체결력이 개선된 대형 트럭용 풀림방지 평행 세레이션 형태의 휠 볼트 설계에 관한 연구

Design of Anti-releasing Parallel Serration Type Wheel Bolt for Large Trucks

이권수* · 안용식***†

Kwon-Soo Lee* and Yong-Sik Ahn***†

(Received 6 May 2020, Revision received 15 September 2020, Accepted 16 October 2020)

Abstract : To develop an anti-releasing wheel bolt for large trucks, the parallel serration (PS) type wheel bolt is introduced as an alternative for conventional saw blade (SB) type one. The forming load was analysed using FEM solver program according to the radius of curvature at the corner of serration top. The serration die for a PS type bolt which was designed with the possibly largest curvature radius (R) showed the lowest forming load at the top area of serration corner and PS type bolt die with R = 0.4 mm showed 1.6 times longer life cycle compared with SB type die. The PS type bolt revealed also higher clamping force and axial force compared with the SB type bolt.

Key Words : Design of parallel serration type bolt, Die life cycle, Clamping force

1. 서 론

자동차 휠의 체결용 볼트는 단조, 전조와 세레이션 소성가공에 의해 제작된다. 특히 허브에 휠을 연결시키는 역할을 하며 휠볼트는 헤드부, 세레이션부, 나사부로 이루어져 있다. 볼트에 작용하는 토크는 볼트의 체결력, 나사산 리드각(피치), 볼트헤드밀면과 나사면의 마찰력에 의해 발생된다.¹⁾ 현재까지 국내의 체결용 휠 볼트는 Mitsubishi에서 개발된 saw blade(SB) 형태를 대부분 적용하여 사용하고 있다. 이 방식은 수직 세레이션 형태로서 상대물 허브 내경에 압입 시 세레

이션 산 부위 뭉게짐, 압입 시 세레이션 산 부위 또는 압입 후 허브(Hub) 내경에 뭉게짐, 또한 압입 후 허브 내경 흠집발생 및 접촉면적의 부족에 의한 이탈현상 등 여러 가지 문제점이 발생하고 있다. 반면 유럽 자동차 업계는 주로 평행 세레이션(parallel serration, PS) 형태를 적용하고 있으며, 이로 인하여 휠 볼트 탈착 시 허브 내경 흠집발생 최소화와 함께 접촉면적 증대에 의하여 헛뎀발생 방지 및 토오크 값 증대로 풀림방지 효과가 개선됨으로써 운행 중 휠 너트(wheel nut)의 풀림으로 인한 휠 볼트 파손사례가 거의 전무한 실정이다. 신흥국인 인도, 인도네시아, 필리핀에서 운행 중

*** 안용식(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5250-1689) : 교수, 부경대학교 재료공학과
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6361
*이권수(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1196-1993) : 상무이사, (주) 유공금속

*** Yong-Sik Ahn(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5250-1689) : Professor, Department of Materials Sci. & Eng., Pukyong National University.
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6361
*Kwon-Soo Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1196-1993) : Senior manager, Yukong metal Co.

인 국산차에서는 25% 정도는 PS 형태를 적용하여 사용 중이며, 국내의 경우 대형차종의 A/S용으로 10% 정도, 중형차종은 5% 정도를 PS type이 점유하고 있다. PS 형태를 설계하는데 있어서도 충분한 체결력 및 풀림 방지 효과 개선을 위한 연구가 필요하다. 볼트의 체결력 및 풀림 방지 효과를 향상시키기 위해 와셔 또는 접착제 등이 사용되는 경우²⁾도 있으며, Khashaba 등³⁾은 와셔의 크기가 체결 토크에 미치는 영향을 연구하였다. 그러나 이러한 방법들은 실제 우수한 체결력을 위한 해결 방법은 아니다.

Kim^{4,5)} 등은 볼트의 직경과 길이에 따른 체결력에 대해 연구하였으며, Han⁶⁾ 등은 고장력 볼트 개선을 위해 나사의 치수를 변화시켜 유한요소 해석을 통해 응력분포를 분석하였고, Min⁷⁾ 등은 초소형 볼트의 나사산 각도가 볼트의 체결 토크에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 Lee⁸⁾ 등은 초소형 볼트의 나사산 각도와 비트의 깊이가 볼트의 체결 토크에 미치는 영향에 대해 연구하였고, Bhattacharya 등⁹⁾은 진동을 받는 구조물에서 볼트의 체결력 약화를 여러 형태의 볼트에 대해 실험을 통해 비교 분석하였으며, 체결력을 높이기 위한 최적의 조임 토크 설정에 대한 연구¹⁰⁾도 있었다. 본 연구에서는 기존 Saw blade(SB) 형태 대비 체결력이 개선된 평행 세레이션(PS) 형태의 휠 볼트를 설계 제작하기 위하여 세레이션 산부위 곡률반경을 다양하게 설계함으로써 이것이 체결력에 미치는 영향을 조사하였다. 이전의 연구¹¹⁾에서 단조공정이 휠 너트의 금형수명에 미치는 영향에 대해 조사한 바와 같이, 본 연구에서는 다르게 설계된 세레이션 산부를 가진 금형을 이용하여 직접 냉간단조하여 수명을 비교함으로써 최적 설계 조건을 구하고자 한다.

2. 재료 및 시험방법

Fig. 1에서는 본 연구에서 사용된 휠 볼트의 세레이션 형태에 따른 세레이션 산부 미세조직을 나타낸다. PS type이 SB type에 비해 허브 내경면에 접촉되는 면적이 넓다.

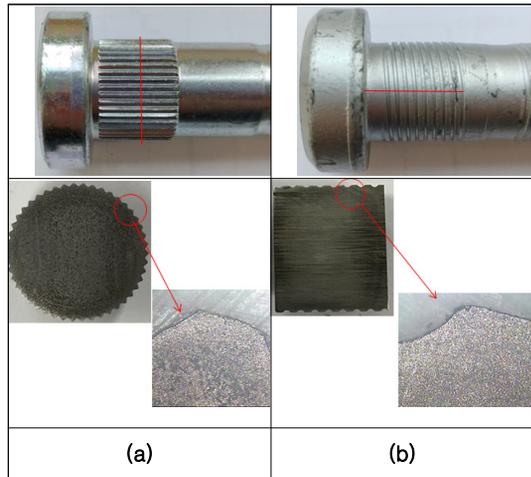


Fig. 1 Comparison of microstructure of two types of wheel bolts of (a) saw blade(SB) and (b) parallel serration(PS) type

Table 1 Mechanical properties of used materials for wheel bolt and serration dies

Term	Material	Hardness (HRC)	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)
Wheel bolt	SCM435 (10.9T)	35	1,100	990
die	SKD-11	56	2,365	2,150

Table 1에서는 본 연구에 사용된 휠 볼트와 세레이션 금형 소재의 기계적 특성을 나타내고 있다.

본 연구에서 휠 볼트 세레이션 금형의 성형하중 해석을 위해 초기 소재 및 금형은 CATIA를 사용하여 모델링하고 Stp file로 저장하여 성형하중 해석을 수행하였다. 성형하중 해석 시에는 범용적으로 사용되는 강소성 유한요소법(FEM) Solver를 기반으로 하는 AFDEX V19 program을 사용하였다. 세레이션 금형 수명에 미치는 변수로서 세레이션 Top부의 외경 모서리 부분 R 치수를 0.2~0.5 mm의 범위에서 0.1 mm씩 단계적으로 변화시켜 세레이션 Top 외경 코너 R부에 작용하는 하중값을 구하고, 실제 공정에 적용하여 금형 수명을 측정하였다.



Fig. 2 Torque test device

Table 2 Specification of torque test device

Model No.	KDMT-335B
Shaft Horse Power	20~50tf
Specimen Bolt	M5~M36
Torque	100~400kgf-m
Angle	3600
Max. Test Speed	100 rpm

Fig. 2는 시험에 사용한 휠볼트의 토오크 축력을 비교하기 위한 토오크 시험기를 나타내며, Table 2에서는 토오크 시험기에 대한 모델 및 사양을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 세레이션 산부위의 성형하중 해석

해석 시 소재의 경계조건은 파이프 유형으로 하고 상부금형의 평행이동속도는 실제조업 속도를 고려하여 20 rev/min이고, 하부금형의 평행이동속도는 20 rev/min, 쿨롱 마찰계수는 0.05로 선택하고 성형조건에서 스트로크 제어시간은 3초로 지정하였다.

Fig. 3은 PS 금형의 휠 볼트 세레이션 외경과 피치 설계표준 조건에 의거하여 세레이션부를 설계한 산부위 모서리의 형상을 나타내고 있다.

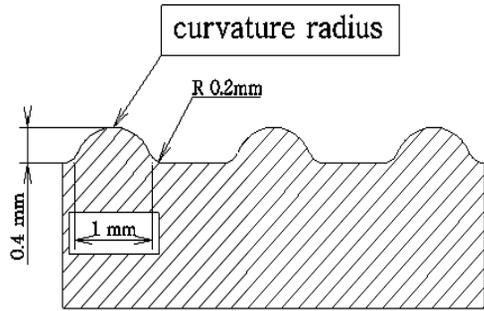


Fig. 3 Detailed drawing of the Curvature radius on the PS dies

실제 세레이션 소성가공 공정이 진행되면 산모서리 R 부위에 가장 큰 하중이 걸리게 되고, 이로 인하여 이 부위에 파손 및 마모가 발생된다. 따라서 산 모서리 R 치수를 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5 mm가 되도록 각각 설계하여 성형하중을 해석하였다.

Fig. 4에서는 PS 금형의 모서리부 곡률반경(R)이 0.2 mm에서 0.5 mm까지 변화함에 따라 성형하중이 가해질 때 전체 세레이션 부위의 응력분포 상태를 전산 모사하여 정밀하게 해석한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보면 성형하중 하에서 모든 조건에서 세레이션 top의 모서리 부위에 가장 높은 하중이 집중되고 있다. 특히 R=5일 때는 다른 조건에 비해 전체적으로 하중이 뚜렷이 낮게 나타나고 있다.

Fig. 5에서는 각 세레이션 top 부 모서리에 집중된 최대하중 값을 모서리 반경의 크기에 따라 나타내고 있는데 곡률반경 값이 커질수록 최대하중 값이 연속적으로 감소함을 알 수 있다. 특히 그림에서 보면 외경 곡률 반경이 0.5 mm로 가장 클 경우 가공하중이 17.5 ton으로 가장 작게 나타났으나, 이 곡률반경 값은 휠 볼트 세레이션 설계 시 top부의 외경이 상한치에서 0.1 mm를 초과 (Fig. 3)하기 때문에 실제 적용할 수 없어 R=0.2, 0.3 및 0.4 mm의 세 가지 곡률반경만 가지고 실제 세레이션 금형에 적용하여 설계하였다.

Fig. 6은 세레이션 top부 모서리 R = 0.4 mm로 설계한 PS type 금형과 현재까지 당사에서 통상적으로 사용되고 있는 SB 형태의 금형을 가지고 실제 세레이션 성형 시 성형시간에 따른 하중 변화를 비교하여 나타내고 있다.

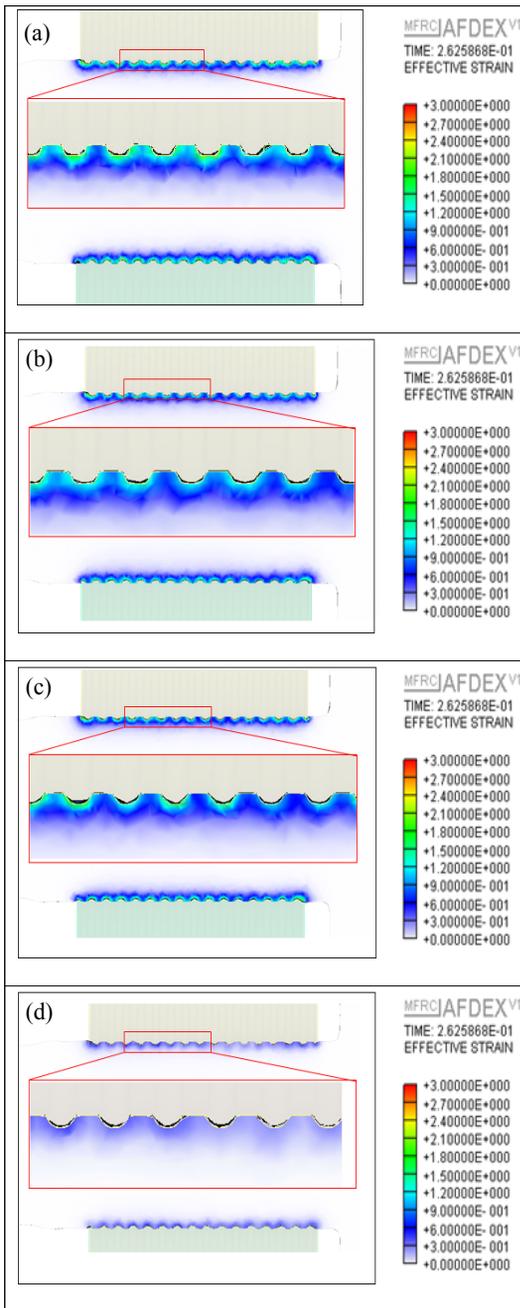


Fig. 4 The result of FE Analysis on the parallel serration type dies according to the curvature radius(R) (a) R=0.2 mm, (b) R=0.3 mm, (c) R=0.4 mm and (d) R=0.5 mm

그림에서 보면 PS 금형의 경우, 성형에 필요한 시간이 0.6초로 SB 형태의 1.4초에 비해 훨씬 짧았을 뿐만 아니라 세레이션 top부 모서리에 작용하는 최대 성형하중도 17.5 ton으로 SB 형태의 26.8 ton에 비해 월등히 작은 값을 나타내고 있다. 이와 같이 PS 금형에서 나타내는 짧은 성형시간 및 낮은 성형하중 값은 금형의 수명향상에 지대한 기여를 하게 될 것으로 예상된다.

Fig. 7은 당사에서 통상적으로 설계 사용하던 SB 형태 금형(fig. 7(a))과 R=0.4 mm로 설계 제작한 PS 형태 금형을 나타내고 있다.

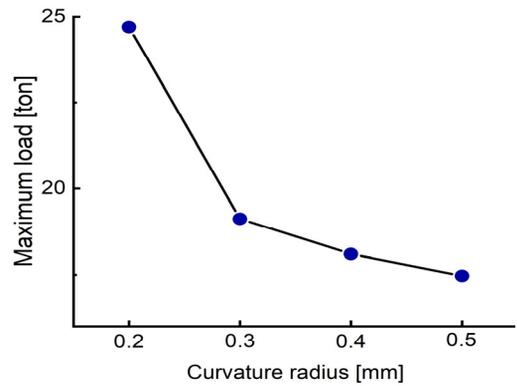


Fig. 5 Various maximum load values according to the radius of curvature

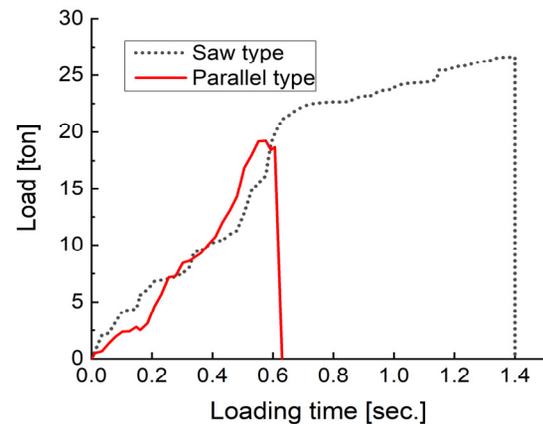


Fig. 6 Comparison of deformation load with two serration types by FE analysis

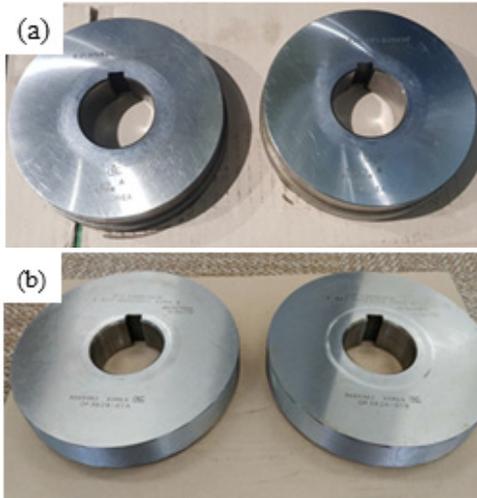


Fig. 7 Figures of (a) Saw blade type dies and (b) Parallel serration type dies

3.2 휠볼트의 토크값과 금형 수명

휠볼트의 조임토크 시험은 피치 1.5 mm, 나사부직경 18 mm, 인장강도 112.0 kg/mm², 내력 90%, 나사부 및 외측부 마찰계수 각각 0.03과 0.119, 측면외경(Do) 및 내경(Di) 각각 40 mm와 26 mm, 토크계수 0.14 인 조건으로 측정되었다. 본 연구에서 성형하중이 가장 낮았던 R=0.4 mm로 제작된 PS 형태 볼트의 조임 토크값(T_f)과 축력값(F_f) 및 금형수명(T_n)을 측정하여 기존 SB 형태 볼트의 측정값과 비교하였으며, 이것을 Table 3에 나타내었다. 도표에서 보면 PS 형태 휠볼트의 경우 SB 형태에 비해 T_f가 약 20% 높으며 F_f도 역시 12% 높은 값을 나타내고 있다. 즉 PS 형태가 기존의 SB 형태의 휠 볼트보다 뚜렷이 높

Table 3 Comparison of torque(T_f), axial force(F_f) and total number of products(T_n) between two types of serration dies

Term	Type of serration dies	
	Saw blade(SB)	Parallel(PS)
T _f (N-m)	525.72	621.21
F _f (kN)	208.6	232.5
T _n	190,000	320,000

은 토크값과 축력값을 나타내므로 PS 형태의 휠 볼트를 사용하여 허브 조립 시 높은 체결력으로 풀림방지 효과가 더 우수할 것으로 판단된다.

이 두 가지 금형을 가지고 실제 공정에 적용하여 금형 파손 시까지의 수명(T_n)을 측정하였다.

측정결과 PS 형태의 경우 Table 3에서 보면 성형하중 값이 가장 작았던 R=0.4 mm일 때의 T_n이 320,000회로서 SB 형태의 금형에서의 190,000회보다 60% 높게 나왔다. 따라서 평행 세레이션의 모서리가 완만한 세레이션 top 모양을 적용하면 금형 수명도 뚜렷이 향상된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대형 차량용 휠 볼트의 체결력 향상을 위한 기존의 SB 형태의 세레이션을 가진 볼트를 대체할 목적으로 PS 형태의 볼트를 설계 연구하였으며, 이를 위해 각 세레이션 top부의 모서리 곡률반경에 따른 토크 값과 축력값 및 금형의 수명을 기존 SB 형태와 비교 조사하여 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다.

1) 세레이션 모서리 top부의 곡률반경에 따른 성형 하중을 유한요소설계를 이용하여 계산한 결과 곡률반경이 클수록 성형하중이 낮았으며 실제 형상을 고려한 설계 시 세레이션 높이를 초과하지 않는 범위에서 최대의 곡률반경(R=0.4 mm)을 가지도록 설계하면 최소의 성형하중과 함께 최대의 금형수명을 획득할 수 있었다.

2) PS 형태의 휠 볼트가 SB 형태에 비해 토크 값 및 축력값이 상대적으로 10~20% 더 높아 볼트의 체결력 및 풀림 방지 효과가 상대적으로 더 우수하다.

3) 위와 같은 조건(R=0.04 mm)으로 설계한 PS 형태의 금형을 가지고 세레이션 전조 공정을 실시한 결과, 응력집중부위 하중이 낮아짐으로써 기존 SB 형태의 금형을 사용한 것보다 금형수명이 1.6배 이상 증가한 결과를 나타내었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의해 연구되었습니다.

Author contributions

K. S. Lee; Methodology, Data curation and Investigation. Y. S. Ahn; Conceptualization, Supervision and Writing - review & editing.

References

1. Y. Jiang, J. Chang and C. Lee, 2001, "An Experimental Study of the Torque-tension Relationship for Bolted Joints", *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol. 16, pp. 417-429.
2. Y. Yan, W. D. Wen, F. K. Chang and P. Shyprykevich, 1999, "Experimental Study on Clamping Effects on the Tensile Strength of Composite Plates with a Bolt-Filled Hole", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.30, pp. 1215-1229.
3. U. A. Khashaba, H. E. M. Sallam, A. E. Al-Shorbagy and M. A. Sief, 2006, "Effect of Washer Size and Tightening Torque on the Performance of Bolted Joints in Composite Structures", *Composites Structures*, Vol. 73, pp. 310-317.
4. S. S. Kim, S. Y. Kim and K. S. Kim, 2006, "Evaluation of Clamping Forces according to Length-to-Diameter Ratios and Preserved Thread Lengths of High Strength Bolts", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 13, pp. 259-268.
5. Y. H. Kim and K. S. Kim, 1999, "Evaluation of tightening forces according to length - diameter ratios for high strength bolts", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 15, pp. 37-44.
6. J. W. Kim, J. H. Kim and Y. S. Park, 2011, "Evaluation of Structural Performance and Improvement of Screw Thread Shape on 1,300 MPa High Strength Bolts", *Journal of the Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 37-44.
7. K. B. Min, J. B. Kim, K. Park and S. W. Ra, 2000, "Evaluation of clamping characteristics for subminiature screws according to thread angle variation", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 31, pp. 839-849.
8. H. K. Lee, K. Park, S. W. Ra and J. B. Kim, 2014, "Prediction of Joining Torque for Bit Depth of Subminiature Bolt", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 38, pp. 917-923.
9. A. Bhattacharya, Avijit Sen and Santanu Das, 2010, "An Investigation on the Anti-loosening Characteristics of Threaded Fasteners under Vibration Conditions", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 45, pp. 1215-1225.
10. H. Y. Hwang, 2013, "Bolted Joint Torque Setting using Numerical Simulation and Experiments", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, pp. 1361-1371.
11. K. S. Lee and Y. S. Ahn, 2017, "Study of a Forging Process for the Application of Boron Steel for Automotive Wheel Nut Material", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 21, pp. 41-47.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.2.041>)