

디스크 브레이크 허브 볼트의 억지 끼워 맞춤에서 발생하는 소성변형의 해석

이요셉¹· 곽시영²· 강신일[#]

An Analysis of Plastic Deformation Developed During Interference Fitting of Disk Brake Hub Bolt

J. S. Lee, S. Y. Kwak, S. Kang

(Received June 3, 2008)

Abstract

A brake system in automobile is one of the important parts that directly affect the safety of passengers. Particularly, disk brake module is applied to almost all kinds of automobile brake system due to its remarkable braking power and braking distance. In the disk brake module of an automobile, the bolt for tire wheel is assembled to the disk brake hub by interference fit (bolt pressing process). The process induces small deformation whose range is within tens of μm and this deformation may cause the runout badness of the whole disk brake module, and even braking problems such as judder or squeal phenomena which makes the loss of braking efficiency. In this study, bolt pressing fit into hub was simulated by ANSYSTM, a commercial structure analysis program. Also, the aspect and the cause of hub displacement were analyzed and the solution for decreasing runout of hub was proposed.

Key Words : Disk Brake Hub, Interference Fit, Bolt Pressing Process, Runout, FEM, Contact Analysis

1. 서 론

억지 끼워 맞춤 공정 중 하나인 볼트 압입 공정은 자동차용 디스크 브레이크 허브와 타이어 훨을 고정시키는 볼트와의 체결에 사용되는 공정이다. 허브의 볼트 압입 공정은 볼트 나사산과 허브의 억지 끼워 맞춤으로 유발되는 양 부품의 소성변형에 의해 체결력을 확보하는 방법으로써 허브의 소성변형은 그 하단면에 수십 μm 단위의 변형을 초래하게 되며 이 변형은 디스크 브레이크 시스템 모듈의 런아웃 불량을 유발한다. 런아웃 불량이란 평판인 디스크 브레이크 허브가 억지 끼워 맞춤 같은 생산공정에서 변형이 발생되는 경우나 작동 중 브레이크 패드에 과도한

열이 발생하여 변형되는 경우를 말하며 이러한 불량은 자동차 운행 중 브레이크 제동시 차체가 떨리는 저더 현상을 발생시킴으로써 브레이크의 성능 및 승차감을 저하시키는 원인이 된다[1]. 디스크 브레이크에 대해서는 많은 연구가 진행되었으며 특히 최근 디스크의 저더현상을 디스크의 진동모드와 연계하여 현상을 파악하려는 시도도 있다[2~4].

본 논문에서는 상용 구조해석 프로그램인 ANSYSTM를 이용한 내연적 탄소성 해석을 수행하여 허브의 볼트 억지끼워맞춤 공정을 구현하고 공정 중 발생하는 허브의 변형 원인을 분석하여 이 변형에 의해 발생하는 브레이크 런아웃 불량 및 브레이크 저더 현상을 최소화하는 방법을 연구하였다.

1. 연세대학교 대학원 기계공학과

2. 한국생산기술연구원

교신저자: 연세대 기계공학과, E-mail : snlkang@yonsei.ac.kr

2. 볼트 압입 공정

2.1 볼트 압입 공정

축과 허브를 연결하는 방법에는 억지 끼워 맞춤을 이용한 방법과 키와 키홀을 이용하는 방법 등이 있다. 이중 억지 끼워 맞춤에는 허브의 내경을 축보다 조금 작게 가공하여 두 접촉 부분에 가급적이면 윤활해서 서서히 가압하여 연결하는 압입끼워 맞춤과 허브를 가열하여 확장시킨 후 연결하는 팽창끼워 맞춤, 축을 냉각하여 축경을 축소 시킨 후 연결하는 수축끼워 맞춤 등이 있다.

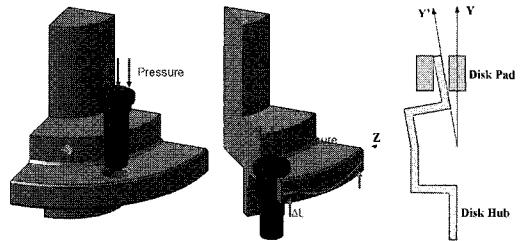
식(1)처럼 일반적인 환봉의 억지끼워맞춤에서 축은 축표면에 균일한 외부 압력을 받는 응력 상태와 동일하며 허브는 내압을 받는 두꺼운 원통의 응력상태와 동일하다. 두꺼운 원통의 응력식은 작용압력과 원통의 반지를 값에 의존한다. 압입끼워 맞춤으로 발생하는 응력 p 는 간섭으로 인해 발생하는 부재의 변형으로부터 구해진다. 여기서 δ 은 두 부재 사이의 적경방향 간섭의 전체 양이고, r 은 부재 사이에 간섭되는 부분의 호칭반경이다. r_i 는 중공축의 안지름, r_o 는 허브의 바깥지름이다. E 와 v 는 각각 두 부재의 탄성계수와 프와송비이다[5].

$$p = \frac{0.5\delta}{\frac{r}{E_o} \left(\frac{r_o^2 + r^2}{r_o^2 - r^2} + v_o \right) + \frac{r}{E_i} \left(\frac{r_i^2 + r^2}{r_i^2 - r^2} + v_i \right)} \quad (1)$$

이번 논문에서 사용되는 나사산이 있는 환봉의 억지 끼워 맞춤에 대한 정확한 설계 식은 없지만, 식(1)에 의해 발생응력 p 는 간섭량 δ 과 각 재질의 탄성계수와 비례관계에 있고, 반경 r 과는 반비례관계에 있음을 확인할 수 있다.

압입기는 유압으로 볼트를 눌러 압착시키는 유압 암과 허브를 고정시키는 지그로 구성되어 있으며 볼트를 압입하는 유압기의 압입력은 300~1,500 Kgf, 압입 공정 시간은 1~2초이다.

Fig. 1은 압입 공정 후의 허브의 변형양상을 보여주는데, 다이얼 게이지를 이용해 변형(ΔL)을 측정한 결과 볼트 구멍 주위가 20~30 μm 정도 위로 올라가는 변형양상이 나타났다. Fig. 1(a)처럼 볼트의 억지 끼워 맞춤을 위해 큰 압입력이 위에서 아래로 작용하나 볼트 압입이 일어난 부위의 변형(ΔL)은 오히려 압입력이 작용한 방향과 반대로 들리는 현상이 발생하였다. 이는 실제 산업 현장 엔지니어의 직관적인 상식으로 이해하기 어려운 현상임으로



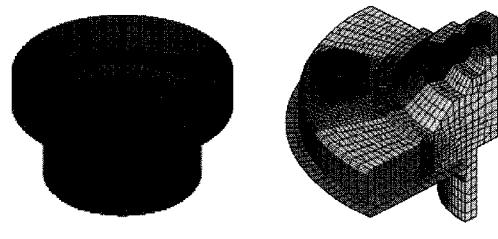
(a) Disk Break Interference Fit (b) Runout
Fig. 1 Runout Badness of Disk break Interference Fit

이번 시뮬레이션을 통해 이러한 변형 원인을 분석하고 변형을 최소화하는 방안을 제시하려 한다. 이러한 변형 최소화는 브레이크 허브의 런아웃 불량 및 브레이크 저더 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3. 유한요소 해석

3.1 해석모델

Fig. 2는 유한요소해석에 사용된 모델을 보여주고 있으며 억지 끼워 맞춤을 구현하기 위해 많은 수의 요소와 접촉에 의한 해석이 필요하므로 해석의 효율을 위해 허브의 1/4 대칭 모델을 사용하였으며 접촉이 일어나지 않는 볼트의 하부 등 해석에 영향을 주지 않는 부분은 고려하지 않았다[6].



(a) bolt mesh (b) hub mesh

Fig. 2 FE Mesh of Analysis Model

해석 모델은 90% 이상이 육면체, 나머지는 프리즘 요소이며, 해석의 정확도를 위해 소성변형이 일어나는 부분은 모두 육면체로 처리하였으며 전체 요소 수는 82,839개로 구성되었다. Fig. 3에서 보는 것과 같이 볼트 나사산과 허브 흘 직경은 서로 침투하게 된다. 현재 현장에서 사용되는 간섭량(Δt)은 0.25mm이며 이 부분이 소성변형을 일으켜 서로 기계적인 고착화를 거쳐 체결력을 확보하게 된다.

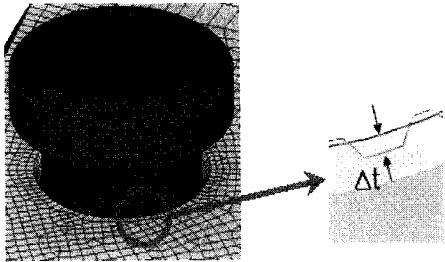


Fig. 3 Overlap Δt between bolt spline and hub

3.2 해석조건

볼트와 허브의 재질은 CrMo합금강과 S45C이며 해석을 위하여 사용한 기계적 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties for the analysis

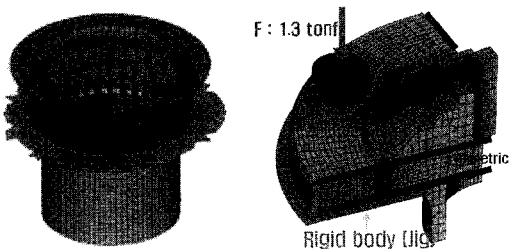
| | Bolt(CrMo steel) | Hub(S45C) |
|-----------------|------------------|-----------|
| Young's Modulus | 223GPa | 210GPa |
| Poisson ratio | 0.29 | 0.3 |
| Yield Strength | 940MPa | 325MPa |
| Plastic Modulus | 25GPa | 109GPa |

볼트 압입 공정을 구현하기 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS™를 이용, 비선형 과정도 접촉 해석을 수행하였으며 생성된 접촉 요소는 Fig. 4(a)와 같다.

해석 설정 시간은 실제 공정시간에 맞춰 1.4초까지 볼트가 완전히 압입되는 공정 후 압입력을 제거해 단성복원되는 과정까지이며 시간에 따른 볼트 상부의 변위를 제어함으로써 접촉에 의한 압입 공정을 구현하였다. 적용된 경계 및 하중조건은 Fig. 4(b)와 같으며 모든 변위를 고정시키고 지그는 강체로 가정하고 해석을 수행하였다.

4. 해석결과

해석 결과 볼트 압입시 볼트 나사산이 완전 소성 변형을 일으키며 허브 홀로 들어가게 되며 허브 홀 내경 부분도 볼트 나사산이 원래상태로 복원하려는 복원력에 의해 내부가 넓어지는 변형 양상을 보이게 됨을 알 수 있다. Fig. 5은 압입 공정이 완전히 끝난 뒤 허브부의 응력 결과인데, Fig. 5(a)



(a) Contact element (b)Boundary & Load condition
Fig. 4 Contact element and boundary condition for interference fit Analysis

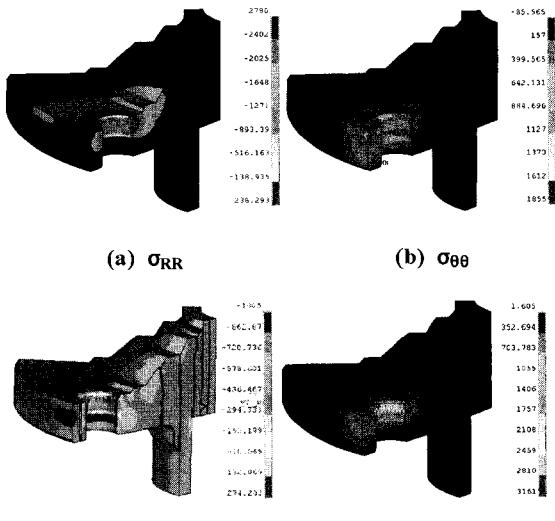
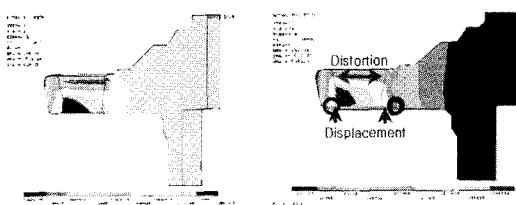


Fig. 5 Stress results of disk brake hub

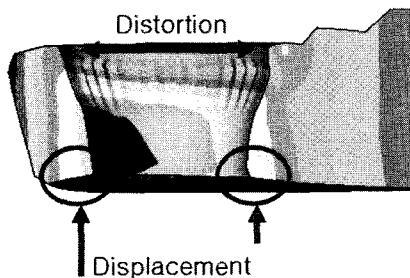
의 결과를 보면 나사산과 접촉하는 허브의 홀 윗부분에 RR방향으로 약 2.78GPa의 큰 압축응력이 발생하며, Fig. 5(b)의 결과를 보면 역시 나사산과 접촉하는 허브의 홀 윗부분에 θθ방향으로 약 1.86GPa의 인장응력이 작용한다. 특히 두 결과 모두 변형이 쉬운 허브의 바깥쪽에 좀더 큰 응력이 발생하였다. 또한, Fig. 5(c)의 결과를 보면 나사산과 접촉하는 허브의 홀 아랫부분에는 약 1.0GPa의 압축응력이 발생하고 이에 의해 홀 아랫부분에는 약 0.3GPa 인장응력이 발생한다.

이 시뮬레이션의 목적은 정확한 응력 예측 보다는 소성 변형에 따른 불량 분석 및 불량률을 감소에 있으며 컴퓨터 시뮬레이션에서는 계산의 단순화를 위해 Bi-linear 모델을 사용하였다.

실제 압입 공정에서는 나사산이 찌그러지며 파괴되어 체결력을 확보한다. 즉, 나사산은 극한하중 이상에서 파괴되어 응력이 해소되나 본 해석모델은 나사산의 파괴를 고려하지 않았기 때문에 응력이 과다하게 나타나고 있다. 상기 이유로 Fig. 5와 같이 제품에 응력값은 매우 높으나 변형양상에는 크게 변화가 없을 것으로 판단됨으로 런아웃 불량 및 브레이크 저더현상 분석에는 문제가 없다고 판단된다.



(a) Before removing load (b) After removing load



(c) After removing load (Twice enlarged)

Fig. 6 Z-direction displacement of the disk break

Fig. 6(a)는 압입기에 의해 압입 하중이 완전히 가해진 상태의 허브 밑면의 변위를 나타내며, Fig. 6(b)는 압입 후 하중이 제거된 상태의 변위를 나타내고 있다. 변위방향은 허브의 평탄면 런아웃 에리에 직접적인 영향을 주는 Z-방향 변위이다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 압입하중이 적용된 허브 하단면의 Z-방향 변위는 최대 $10\mu\text{m}$ 정도로 비교적 적음을 알 수 있으나 공정이 끝난 후 압입 하중이 제거된 후에는 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 허브의 탄성복원과 나사산과의 접촉에 의한 소성변형으로 인해 허브 홀 상부가 벌어지면서 허브 상단면이 윗방향으로 $25\mu\text{m}$ 정도 하단면은 윗방향으로 $50\mu\text{m}$ 정도 들리는 현상이 나타남을 알 수 있다.

이 결과를 Table 2와 같이 측정 실험과 비교하였을 때 비슷한 결과를 보이는 것으로 판단된다.

Table 2 Comparison of Experiment and Calculation results for Z-direction displacement

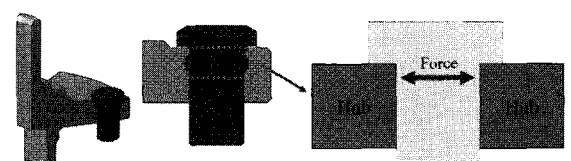
| | Top | Bottom |
|-------------|---------------------|------------------|
| Experiment | 15~20 μm | - |
| Calculation | 25 μm | 50 μm |

Fig. 5의 응력결과에서 R과 0방향의 응력에 의해 허브 홀의 벌어짐이 발생하며 이 벌어짐을 복원하려는 힘이 허브와 볼트의 체결력을 확보한다. 또한 나사산이 허브의 상부를 밀어 줌으로 Z방향의 응력이 발생하고 이에 따라 Z방향으로 들리는 소성변형이 발생한다. 이것이 디스크 브레이크의 런아웃 불량 및 저더현상을 발생시킨다. 따라서 Z 방향으로의 응력 발생을 최소화 하는 방향으로 설계변경시 디스크 브레이크의 런아웃 불량 및 저더현상의 발생 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

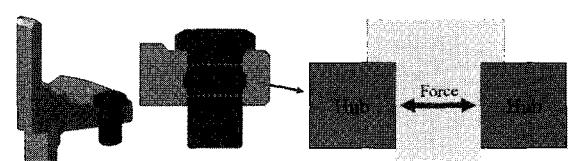
5. 토의 및 고찰

런아웃 불량의 원인이 허브 홀 내경의 Z방향으로의 소성변형에 의한 것이므로 이 소성변형을 최소화 한다면 허브 하단 면의 런아웃 불량을 개선할 수 있게 된다.

Fig. 7은 나사산의 위치에 따른 하중 모식도이다. Fig. 7(a)와 같이 허브 홀 상부에서 억지끼워맞춤이 일어나면 허브의 상부를 미는 힘이 발생하고 Fig. 7(b)와 같이 허브 홀 중심 쪽에서 억지끼워맞춤이 일어나면 허브의 중심부분을 미는 힘이 발생한다.

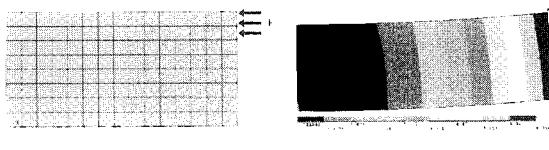


(a) Before design

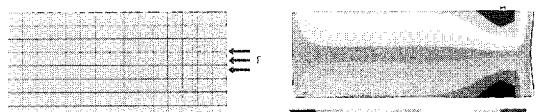


(b) After design

Fig. 7 Design of the spline for decreasing runout badness



(a) Eccentric load (b) ZZ Displacement result
Fig. 8 Eccentric load results of simple model



(a) Center load (b) ZZ Displacement result
Fig. 9 Center load results of simple model

Fig. 8은 나사산의 위치에 따라 발생된 하중의 변형 양상이다. Fig. 8(a)의 편심된 하중은 Fig. 8(b)와 같이 Z방향의 큰 변위를 발생시키고, Fig. 9(a)의 편심되지 않은 하중은 Fig. 9(b)와 같이 상하부의 하중이 상쇄되어 프와송 비에 의한 미소한 변위만 발생시킨다. 이는 런아웃 불량 및 디스크브레이크 저더현상의 최소화를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 디스크 브레이크용 허브와 볼트의 압입 체결공정 시 런아웃 불량을 유발할 수 있는 미세변형을 유한요소 해석을 수행하여 원인을 분석하고 설계를 변경하였다.

해석결과 압입 공정에서의 런아웃 변형은 볼트나사산의 과도한 소성변형을 유발하고 이러한 소성변형의 복원력에 의해 허브 홀이 벌어지면서 허

브 밑면의 런아웃 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 과도한 소성변형을 최소화하기 위해 나사산의 위치를 조정하여 허브 밑면의 런아웃 변형량을 최소화 할 수 있었다. 이 변경은 디스크 브레이크 런아웃 불량 및 저더 현상을 줄이는데 크게 기여할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 산업기반조성 사업의 일환인 금속소재엔지니어링 설계센터 구축 사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S. I. Ahn, 2002, Thermoelastic Analysis of Atomotive Disc Brake by using FFT-FEM Technique, Ph. D Thesis, pp. 52~55.
- [2] M. Kubota, T. Suenage, K. Doi, 1998, A study of the Mechanism Causing High-Speed Brake Judder, SAE Technical Paper Series, 980594.
- [3] J. D. Fieldhouse, C. Beveridge, 2001, An Experimental Investigation of Hot Judder, SAE Technical Paper Series, 2001-01-3135.
- [4] H. Cho, M. Kim, J. C. Cho, 2005, Analysis of the cause for judder vibration of automotive disk brake, KSAE 2005 fall conference, pp.1056~1061.
- [5] R. L. Norton, 1996, Machine Design, Prentice Hall.
- [6] D. L. Logan, 2004, A First Course in Finite Element Method, Thomson,
- [7] ASM handbook, 1990, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International.