

디스크 브레이크 허브 볼트의 억지 끼워 맞춤에서 발생하는 소성변형의 해석

이요셉¹, 광시영², 강신일^{1#}

An analysis of plastic deformation occurring by interference fit of disk brake hub bolt

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

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 : Finite Element Method(유한요소 해석), Contact Analysis(접촉 해석), Disk Brake Hub(디스크 브레이크 허브), Interference fit(억지 끼워맞춤), Bolt Pressing Process(볼트압입공정), Runout(런아웃)

1. 서론

억지 끼워 맞춤 공정 중 하나인 볼트 압입 공정은 자동차용 디스크 브레이크 허브와 타이어 휠을 고정시키는 볼트와의 체결에 사용되는 공정이다. 허브의 볼트 압입 공정은 Fig. 1과 같이 볼트 spline 부(나사산부)와 허브의 억지 끼워 맞춤으로 유발되는 양 부품의 소성변형에 의해 체결력을 확보하는 방법으로써 허브의 소성변형은 그 하단면에 수 십 μm 단위의 변형을 초래하게 되며 이 변형은 디스크 브레이크 시스템 모듈의 Runout 불량을 유발한다. Runout 불량은 제동 시 떨림 현상을 유발하여 디스크 브레이크의 저더(Judder) 현상을 발생시킴으로써 브레이크의 성능을 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 FEM(유한요소해석) 기법을 사용하여 허브의 볼트 압입 공정을 구현하고 변형양상을 분석하여 허브 외면의 변형원인을 파악, 변형을 최소화하는 방법을 연구하였다.

2. 볼트 압입 공정

2.1 볼트 압입 공정

축과 허브를 연결하는 방법에는 억지 끼워 맞춤

1. 연세대학교 대학원 기계공학과

2. 한국생산기술연구원

교신저자: 연세대학교 대학원 기계공학과,
snlkang@yonsei.ac.kr

(Interference fit)을 이용한 방법과 키와 키홈(keys and keyways)을 이용하는 방법 등이 있다. 이중 억지 끼워 맞춤에는 허브의 내경을 축보다 조금 작게 가공하여 두 접촉 부분에 가급적이면 윤활해서 서서히 가압하여 연결하는 압입 끼워 맞춤(Press fit)과 허브를 가열하여 확장시킨 후 연결하는 팽창 끼워 맞춤(Expansion fit), 축을 냉각하여 축경을 축소 시킨 후 연결하는 수축 끼워 맞춤(Shrink fit) 등이 있다[5].

압입기는 유압으로 볼트를 눌러 압착시키는 유압 암(arm)과 허브를 고정시키는 지그(jig)로 구성되어 있으며 볼트를 압입하는 유압기의 압입력 spec은 300~1,500 Kgf, 압입 공정 시간은 1~2초이다. Fig. 1은 압입 공정 후의 runout 측정을 보여주는데, 변형을 측정된 결과 볼트 구멍 주위가 위로 올라가는 변형양상이 나타나며 Runout(ΔL)은 20~40 μ m의 범위를 가지고 있음을 알 수 있었다. 볼트의 억지 끼워 맞춤을 위해 큰 힘이 작용하나 볼트 압입이 일어난 부위의 변형은 오히려 압입력이 작용한 방향과 반대로 발생함을 실제 변형량의 측정을 통하여 알 수 있으며 이는 실제 산업 현장 엔지니어의 직관적인 상식으로 이해하기 어려운 현상이었다.

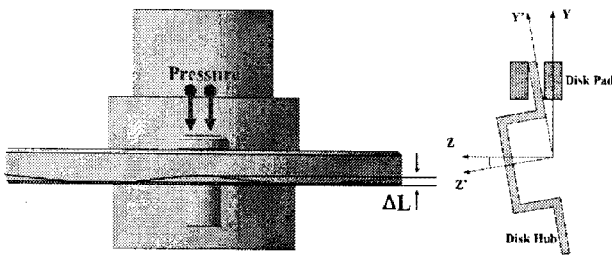
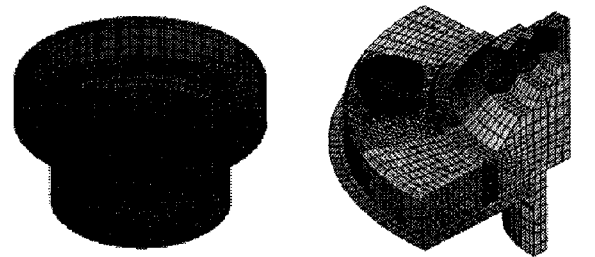


Fig. 1 Runout badness of disk break after interference fit

3. 유한요소 해석

3.1 해석모델

Fig. 2은 FEM 해석에 사용된 모델을 보여주고 있으며 억지 끼워 맞춤을 구현하기 위해 많은 수의 요소와 접촉에 의한 해석이 필요로 하므로 해석의 효율을 위해 허브의 1/4 대칭 모델을 사용하였으며 접촉이 일어나지 않는 볼트의 spline 밑 나사산 부분 등 해석에 영향을 주지 않는 부분은 고려하지 않았다[6].



(a) bolt mesh

(b) hub assemble 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. 3에 나타낸 바와 같이 볼트 spline과 허브 hole 직경과의 Overlap Δt 는 0.25mm이며 이 부분이 소성변형을 일으켜 서로 기계적인 고착화를 거쳐 체결력을 확보하게 된다.

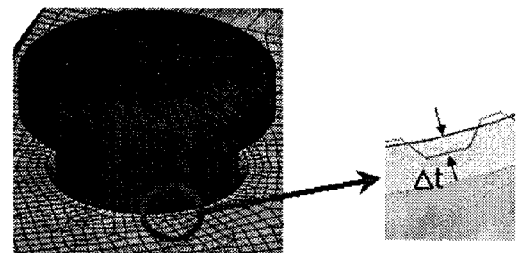


Fig. 3 Overlap Δt between bolt spline and hob

3.2 해석조건

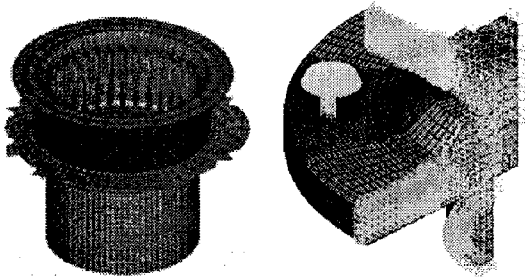
볼트와 허브의 재질은 CrMo합금강과 S45C이며 해석을 위하여 사용한 기계적 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material property for the analysis

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

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

해석 설정 시간은 실제 공정시간에 맞춰 1.4초까지 볼트가 완전히 압입되는 공정 후 압입력을 제거해 탄성복원되는 과정까지이며 시간에 따른 볼트 상부의 변위를 제어함으로써 접촉에 의한 압입 공정을 구현하였다. 적용된 변위 경계조건은 Fig. 4(b)과 같으며 모든 변위를 고정시키고 강체로 설정된 Jig의 변위 경계 조건은 생략하였다.



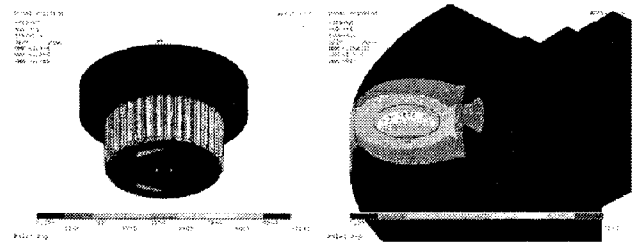
(a) Contact element (b) Boundary condition

Fig. 4 Contact element and boundary condition for interference fit Analysis

4. 해석결과

해석 결과 볼트 압입 시에 볼트 spline부가 완전 소성 변형을 일으키며 허브 hole로 들어가게 되며 허브 hole 내경 부분도 볼트 spline부가 원래상태로 복원 하려는 복원력에 의해 내부가 넓어지는 변형 양상을 보이게 됨을 알 수 있다. Fig. 5은 압입 공정이 완전히 끝난 뒤의 볼트부 및 허브부의 Von Mises 응력 분포를 각각 보여주고 있는데 볼트부 최대응력은 약 11.1 GPa이며 허브부 최대응력은 약 3.2 GPa로써 볼트부의 응력은 소성응력을 매우 높게 벗어난 범위의 응력상태를 보여주고 있다. 이는 접촉부가 완전 파손 변형을 일으키며 체결되는 부위이며 실제 제품과 유한요소 모델의 볼트 Spline부 형상의 차이에서 오는 과다응력 현상으로 판단된다.

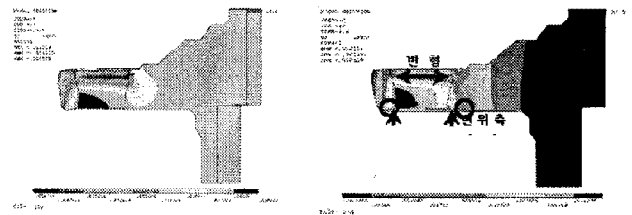
Fig. 6(a)는 압입기에 의해 압입 하중이 완전해해진 상태의 허브 밀면의 변위를 나타내며, Fig. 6(b)는 압입 후 하중이 제거된 상태의 변위를 나타



(a) bolt (b) Disk break hub

Fig. 5 Von Mises stress after bolt press fit

내고 있으며 변위방향은 허브의 평탄면 Runout에 직접적인 영향을 주는 Z-방향 변위이다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 압입하중이 적용된 허브 하단면의 Z-방향 변위는 최대 10 μ m 정도로 비교적 적음을 알 수 있으나 공정이 끝난 후 압입하중이 제거된 후에는 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 허브의 탄성복원과 볼트 Spline부와의 접촉에 의한 소성변형으로 인해 허브 hole 상부가 벌어지면서 허브 하단면이 윗방향으로 50 μ m 정도 변형되는 현상이 나타남을 알 수 있다.



(a) Before remove load (b) After remove load

Fig. 6 Z-direction displacement of the disk break

이는 실제 Runout 변위 측정점보다 해석 결과가 조금 높게 나온 것을 알 수 있다. 이는 해석 시물레이션의 경우 압입 압력이 온전히 볼트를 압입하는데 사용되고, 일반 공정의 경우 마찰 및 공정 중 에너지 손실이 발생하기 때문이다.

Table 2 Comparison of Experiment and Calculation

	Z-direction displacement
Experiment	20~40 μ m
Calculation	50 μ m

5. 토의 및 고찰

Runout 불량률의 원인이 허브 hole 내경의 소성변형에 의한 것이므로 이 소성변형을 최소화 한다면 허브 하단 면의 Runout 불량을 개선할 수 있게 된다. 볼트 Spline과 허브 볼트구멍 내경의 Overlap Δt 는 현 모델에서 0.25mm이므로 볼트의 Spline 높이를 줄임으로써 Overlap을 감소시키면 허브 하단 평탄면의 Runout 불량을 개선할 수 있다. 그러나 볼트 spline의 높이를 감소시킴으로써 볼트와 허브와의 체결력이 감소되는 단점을 유발할 수 있으므로 필요 체결력을 얻을 수 있는 범위 안에서 볼트 Spline의 높이를 감소해야 한다.

또한 Fig. 7과 같이 볼트부의 Spline 위치를 아래쪽으로 이동함으로써 허브 hole 상단부 벌어짐을 최소화하여 허브 하단 평탄면의 Runout 불량을 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

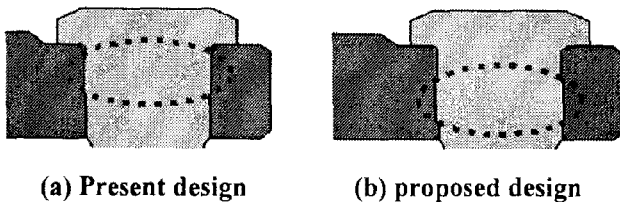


Fig. 7 Proposed location of the spline for decreasing runout badness

6. 결론

본 연구에서는 디스크 브레이크용 허브와 볼트의 압입 체결공정 시 Runout 불량을 유발할 수 있는 미세변형을 유한요소 해석을 수행하여 원인을 분석하고 개선 방안을 도출하였다.

해석결과 압입공정에서의 Runout 변형은 볼트 spline 부위의 과도한 소성변형을 유발하고 이러한 소성변형의 복원력에 의해 허브 hole이 벌어지면서 허브 밑면의 Runout 변형이 발생하는 것을 알 수

있었다. 그러므로 볼트 spline 부위의 형상을 최적화하고 그 위치를 조정함으로써 허브 밑면의 Runout 변형량을 최소화 할 수 있다. Runout 불량률은 디스크 브레이크 저더 현상의 주요 원인 중의 하나이다. 본 연구의 개선안은 디스크 브레이크 모듈의 디자인 변경이 진행중에 있으며, 디스크 브레이크 저더 현상을 줄이는데 크게 기여할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 산업기반조성사업의 일환인 금속소재엔지니어링 설계센터 구축사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 안수익, 2002, FFT-FEM을 이용한 자동차용 브레이크의 열탄성 해석, Ph. D Thesis, pp.52~55.
- [2] Masahiro Kubota, Tomihiro Suenage and Kazuhiro Doi, 1998, A study of the Mechanism Causing High-Speed Brake Judder, SAE Technical Paper Series, 980594.
- [3] John D. Fieldhouse and Carl Beveridge, 2001, An Experimental Investigation of Hot Judder, SAE Technical Paper Series, 2001-01-3135.
- [4] H. Cho, M. Kim, J. and C. Cho, 2005, Analysis of the cause for judder vibration of automotive disk brake, KSAE 2005 fall conference, pp.1056~1061.
- [5] Robert L. Norton, 1996, Machine Design, Prentice Hall.
- [6] 최창근, 2002, 유한요소법, 테크노 프레스, pp. 499~538.
- [7] ASM handbook, 1990, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International.
- [8] ANSYS™, 2005, Documentaion for ANSYS™, Release 10.0, Chapter 8.