

자동차용 휠 베어링의 Dust Cap 변형 해석

이승표*, 이인하⁺, 김봉철⁺, 진성규⁺

(논문접수일 2011. 04. 07, 수정일 2011. 05. 24, 심사완료일 2011. 05. 27)

Deformation Analysis for Dust Cap of Automotive Wheel Bearing

Seung-Pyo Lee*, In-Ha Lee⁺, Bong-Chul Kim⁺, Sung-Kyu Jin⁺

Abstract

In this paper, deformation of dust cap in the automotive wheel bearing produced during press-fit process was numerically analyzed. The commercial software, MSC.MARC which is based on the finite element method was used to calculate the deformation. From those results, interference between dust cap and sensor was investigated. To verify the analysis results, experiments were performed and compared experiment results with analysis results. To avoid the interference between dust cap and sensor, 4 modified designs were proposed and the best design was derived from them.

Key Words : Dust cap, Automotive wheel bearing(자동차용 휠 베어링), Finite element method(유한요소법)

1. 서론

자동차용 휠 베어링(automotive wheel bearing)은 1960년대 말, 전륜구동형 자동차의 개발이 진행됨에 경량화, 콤팩트(compact)화를 위하여 유닛(unit)화가 급속히 진행되었다⁽¹⁾. 휠 베어링 유닛은 속도센서, ABS센서 등 각종 센서류의 장착^(2,3)으로 콤팩트화 되었고, 플랜지(flange)와 같은 주변 부품과의 조합으로 인하여 더욱 복잡한 형상으로 발전되었다. 또한, 차량의 보증기간이 증가함에 따라 휠 베어링 유닛은 요구 수명을 만족시키기 위한 신뢰성 확보를 고려한 설계가 필요하게 되었다^(4,5). 이는 휠 베어링 유닛의 설계 시 주어진 공간을 최대한 활용한 설계가 되어야 함을 의미한다.

Dust cap은 휠 베어링의 외륜(outer ring)에 압입되어 불순물이 내부로 유입되는 것을 방지해주는 기능을 하는 부품이다. 이러한 dust cap은 압입 과정 중이나 압입 후에 주변 부품과 간섭이 발생하지 않아야 한다. Dust cap 주변 부품으로는 엔코

더(encoder)와 센서(sensor)가 있으며, 이들의 역할은 엔코더의 신호를 센서에서 검출하는 것이다. 따라서 엔코더와 센서의 간격을 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 만일 이 간격이 바뀌면 센서에서 신호 검출이 불가능하여 센서가 정상적으로 작동하지 못할 수도 있다. 압입 시 dust cap이 과도하게 변형할 경우, 센서와의 간섭이 발생하여 엔코더와 센서의 초기 설정 간격에 변화가 생길 가능성이 있으므로 이를 설계 단계에서 검토할 필요가 있다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 휠 베어링의 dust cap이 외륜에 압입 시 발생하는 변형을 수치적으로 해석하였다. 이를 위하여 유한요소법(finite element method)에 기반한 상용 소프트웨어인 MSC.MARC⁽⁷⁾를 사용하여 외륜과 dust cap의 변형을 해석적으로 계산하였고, 이 결과로부터 센서와의 간섭여부를 검토하였다. 또한, 해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 dust cap 압입 시험을 수행하여 해석과 시험 결과를 비교 검토하였다. Dust cap과 센서와의 간섭을 줄이기 위하여 4 가지로 개선 설계를 수행하였

* (주)일진글로벌 기술연구소 (leeseungpyo@iljin.com)
주소: 135-875 서울시 강남구 삼성동 12-5

+ (주)일진글로벌 기술연구소

고, 이로부터 가장 좋은 설계안을 도출하였다.

2. Dust Cap 변형 해석

Dust cap이 외륜에 압입된 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 외륜과 dust cap의 형상은 축대칭이므로 축대칭 해석을 수행하였다. 축대칭 해석을 위하여 MSC.MARC의 4절점(node), Element 10(arbitrary quadrilateral axisymmetric ring) 요소를 사용하였다. 모델링과 메쉬(mesh) 생성은 I-DEAS⁽⁸⁾을 이용하였고, 메쉬 결과는 Fig. 2와 같다. 전체 절점의 수는 4,252이고, 요소의(element)의 수는 3,816이다.

Dust cap과 외륜의 물성치를 Table 1에 나타내었다. Dust cap과 외륜의 물성치는 SM55C로 동일하다고 가정하였고, 압입 지그는 강체(rigid body)로 가정하였다. Dust cap이 외륜에 압입되는 것을 모사하기 위하여 소성 변형을 고려한 탄소성 해석을 수행하였다. 이를 위하여 인장 시험으로부터 얻은 응력-변형을 선도의 탄소성 물성치⁽⁹⁾가 필요하며, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

경계조건으로 외륜의 하부를 고정하였고, 하중은 압입 지그가 외륜과 접촉할 때까지의 변위(δ)로 하였다. Dust cap과 외륜 사이에 억지끼워맞춤에 의한 간섭량(interference)이 있으며, 이를 위하여 dust cap과 외륜 사이의 간섭량을 고려한 접촉 해석(contact analysis)⁽¹⁰⁾을 수행하였다. 경계조건과 하중을 Fig. 4에 나타내었다.

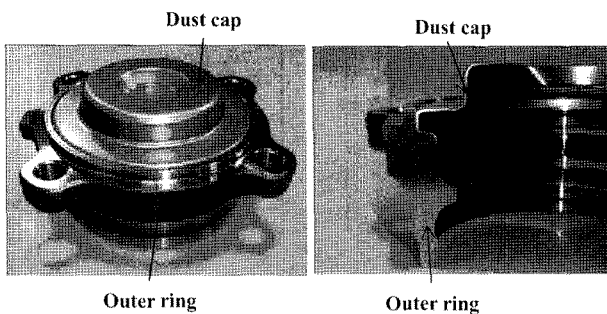


Fig. 1 Dust cap assembly⁽⁶⁾

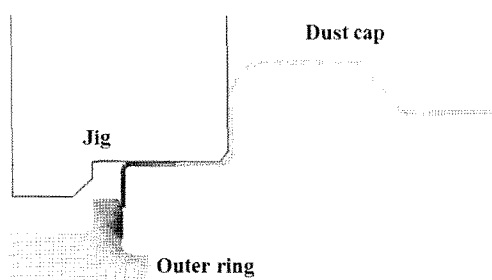


Fig. 2 Mesh generation of dust cap assembly

Table 1 Material properties of dust cap and outer ring

Name	SM55C
Young's modulus	21428.57kgf/mm ²
Yield stress	46.46kgf/mm ²
Poisson's ratio	0.3

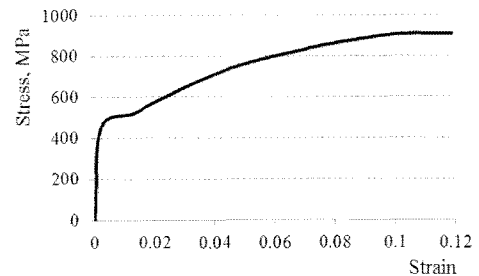


Fig. 3 Stress-strain curve of dust cap and outer ring

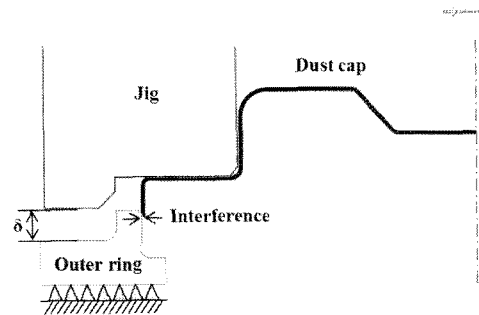


Fig. 4 Boundary conditions and loadings⁽⁶⁾

3. 해석 결과 및 고찰

Dust cap과 외륜의 간섭량이 0.3mm인 경우, dust cap의 변형량을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 변형량은 전역 좌표계(global coordinate, XY axis)로 표시한 변형량으로써 dust cap이 외륜과 접촉할 때까지의 변위를 포함한 초기 위치에서부터 최종 위치까지 변형된 양을 나타낸다. Dust cap의 변

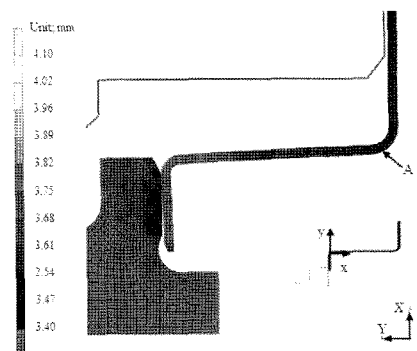


Fig. 5 Deformation of dust cap assembly

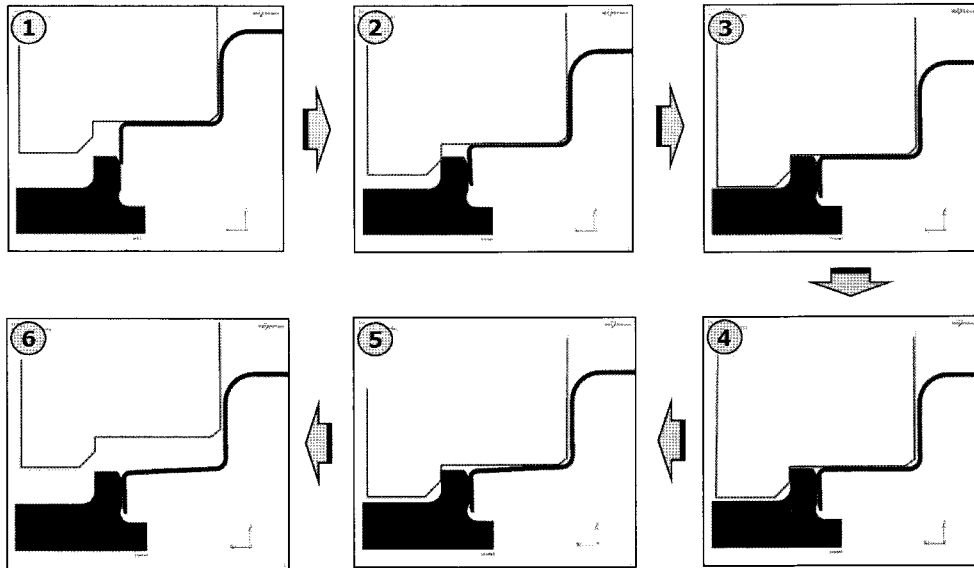


Fig. 6 Deformation of dust cap assembly along the jig position

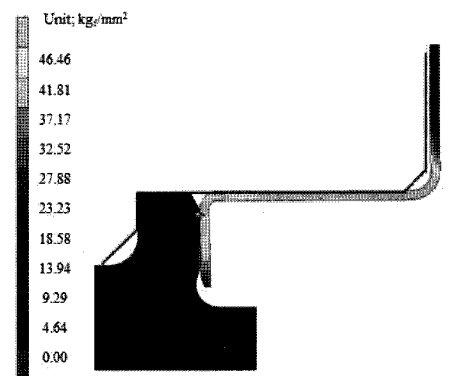
형을 검토하기 위해서는 전역 좌표계를 국부 좌표계(local coordinate, xy axis)로 좌표 변환하는 것이 편리하다. Dust cap의 변형을 검토한 결과, x 축 값이 커질수록 y 방향의 변형이 커지며, 최대 변형량은 오른쪽 끝부분(A 지점)에서 0.42 mm임을 알 수 있다.

Fig. 5로부터 압입 후 dust cap의 변형은 수평이 아니고 왼쪽 부분이 오른쪽 부분에 비하여 약간 내려가 있음을 알 수 있으며, 이와 같은 변형이 발생한 원인을 파악하기 위하여 압입 단계에 따른 dust cap의 변형을 Fig. 6과 같이 고찰하였다. ① 단계는 압입 지그가 dust cap을 눌러서 dust cap이 외륜에 접촉하는 순간을 나타내며, ② 단계는 dust cap과 외륜 사이에 0.3 mm의 간섭량을 갖고 압입되는 과정을 나타낸다. ③ 단계는 압입 지그가 외륜과 접촉할 때까지 눌러져서 dust cap, 외륜과 밀착되어진 순간을 나타낸다. 이때 dust cap의 변형은 수평을 유지하고 있다. ④ 단계는 압입 지그가 dust cap과 접촉하여 상승하는 과정이며, 이때도 dust cap은 수평을 유지하고 있다. ⑤ 단계는 압입 지그가 더 상승한 경우이다. ⑤ 단계에서 압입 지그가 dust cap과 분리되며, dust cap의 변형이 수평이 아니라 왼쪽 부분이 오른쪽 부분에 비하여 약간 내려간다. ⑥ 단계는 압입 지그가 초기 위치로 복귀한 경우이다.

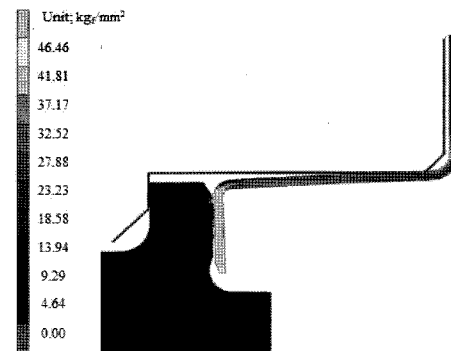
Fig. 6에서 알 수 있듯이 ④에서 ⑤의 단계로 넘어가는 과정에서, 즉 dust cap 압입 후 압입 지그와 dust cap이 분리되는 순간에 dust cap의 왼쪽 부분이 오른쪽 부분에 비하여 약간 내려감을 확인할 수 있으며, 이는 스프링 백(spring back) 현상으로 설명할 수 있다. 스프링 백 현상을 보다 정확히 파악하기 위하여 ④와 ⑤ 단계의 von Mises stress를 검토하였다.

Fig. 7은 압입 지그와 dust cap이 접촉하고 있는 경우(a)와 지그와 dust cap이 분리되기 시작하는 경우(b)의 von Mises

stress를 나타낸다. Fig. 7에서 회색 부분은 von Mises stress가 항복 응력을 초과하는 부분, 즉 소성 영역을 나타낸다. 압입 지그와 dust cap이 접촉하고 있는 경우는 소성 영역이 dust cap의 수평 부분에 주로 분포한다. 이는 수평 부분에서 소성 변형이 발생하여 dust cap이 외륜에 압입되어 있음을 의미한다. 그러



(a) In case dust cap contacts jig



(b) In case dust cap starts falling off jig

Fig. 7 von Mises stress of dust cap assembly

나 압입 지그가 dust cap과 분리되는 경우는 소성 영역이 dust cap의 수직 맨 끝 부분에 주로 분포하며, 이는 dust cap의 수평 부분이 탄성 영역에 존재하며, 따라서 dust cap의 오른쪽 부분이 왼쪽 부분보다 위로 올라가는 스프링 백 현상이 발생함을 의미한다. 이와 같은 스프링 백 현상으로 인하여 압입 중 dust cap과 엔코더 사이에서 간섭이 발생할 가능성이 있으며, 설계 시 이를 검토하여야 한다.

외륜과 dust cap의 변형량 계산 결과로부터 센서와의 간섭 여부를 검토하였다. 설계 시 dust cap과 센서와의 간격은 0.7mm이다. 그러나 dust cap의 변형으로 인하여 센서와의 간격은 Fig. 8과 같이 0.28mm로 상당히 줄어든다. 해석 결과를 검증하기 위하여 dust cap 변형량 시험을 수행하였다. 시험은 90° 간격으로 dust cap의 4 부분에서 최대 변형량을 측정하여 평균을 구하였다. 시험 시 간섭량은 0.2mm이며, 이때 최대 변형량은 0.62mm이었다. 시험 결과로부터 dust cap과 센서와의 간격을 계산하면 0.08mm로 간섭이 발생할 가능성이 충분하며, 재설계가 요구된다. 따라서 case study를 통하여 압입 중, 압입 후 dust cap의 간섭이 발생하지 않는 설계를 검토하였다.

4. Case Study

3장에서 언급한 바와 같이 압입 중, 압입 후 dust cap의 간섭이 발생하지 않도록 4가지로 재설계를 수행하였다. 4가지 설계안은 Table 2에 나타내었고, 각각의 형상은 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 dust cap 1은 외륜과의 압입면에 2°의 둔각을 적용한 설계이며, dust cap 2는 수평면에 0.3mm의 예각을 적용한 설계이다. Jig 1은 평평한 지그를 의미하며, jig 2는 0.3mm의 예각을 적용한 지그를 의미한다.

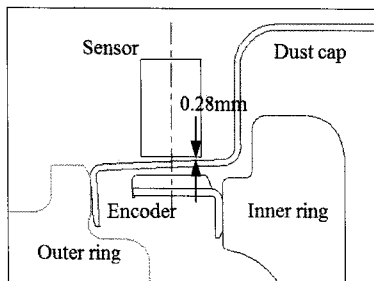


Fig. 8 Calculated gap between dust cap and sensor

Table 2 Case study for dust cap and jig design

Case	Dust cap	Jig
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

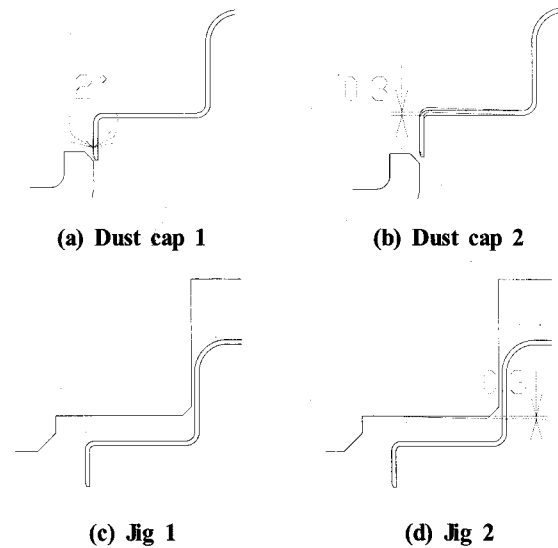


Fig. 9 Design for dust cap and jig

Dust cap 압입 해석 결과, Fig. 10과 같은 결과를 얻었다. 모든 경우에 대하여 x 축으로의 거리가 멀수록 y 방향으로의 변형이 선형적으로 증가하며, case 4의 경우가 dust cap의 변형량이 가장 작다. 해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 4 가지 설계안에 대하여 시험을 수행하였다. 시험을 위하여 각각 4 개의 시료를 제작하였고, 1 개의 시료에 대하여 4 부분에서 최대 변형량을 측정하였다. Fig. 11과 12는 각각 시험과 해석에 대한 dust cap의 최대 변형량과 간섭량을 나타낸다. 해석과 시험 결과를 비교한 결과, current를 제외하고는 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 case 3, 4에서 dust cap의 변형이 작음을 확인하였다.

Dust cap은 압입 중 엔코더와 간섭이 발생할 수 있으므로 이를 검토하였다. 압입 중 dust cap과 엔코더의 간격을 시험을 통하여 예측하는 것은 불가능하므로 해석 결과만을 비교하였다. Fig. 13으로부터 알 수 있듯이 case 1, 3에서 dust cap과 엔코더와의 간격이 상대적으로 커서 간섭의 가능성이 적다. 그

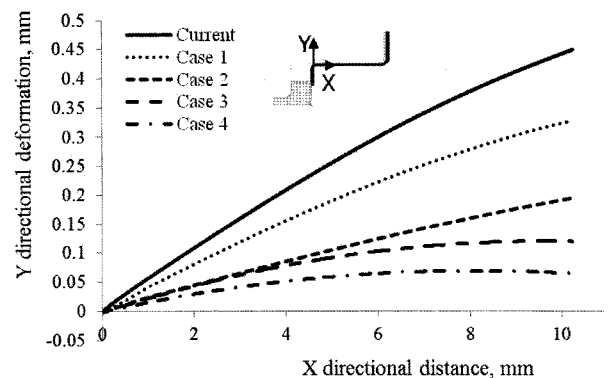


Fig. 10 Deformation of dust cap according to design cases

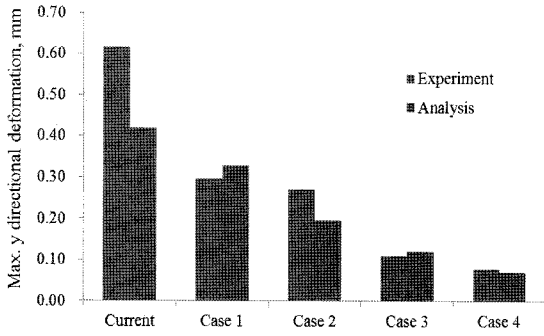


Fig. 11 Maximum deformation of dust cap

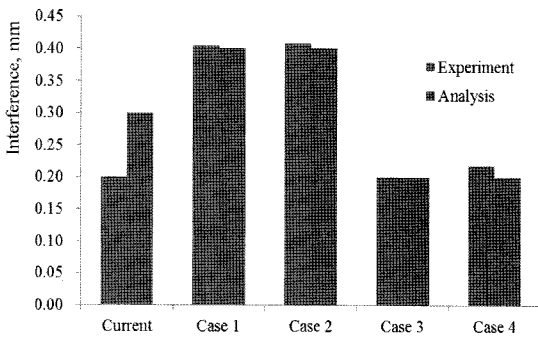


Fig. 12 Interference of dust cap

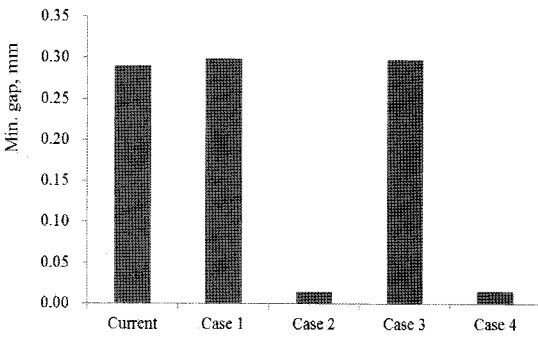


Fig. 13 Minimum gap between dust cap and encoder for press-fit process

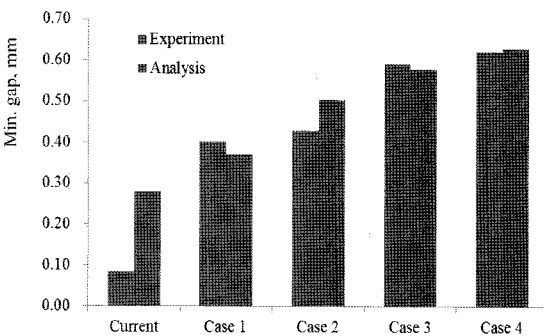


Fig. 14 Minimum gap between dust cap and sensor for press-fit process

이유로는 case 2, 4는 0.3mm 예각으로 가공된 지그를 사용하였기 때문에 case 1, 3보다 dust cap이 오른쪽으로 갈수록 더 많이 변형이 발생하였기 때문으로 예상된다. 즉 스프링 백을 줄여줄 것으로 예상되는 jig 2 설계가 오히려 압입 도중에 엔코더와 간섭이 발생할 가능성이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 14는 각각 시험과 해석에 대한 압입 후 dust cap과 센서와의 간격을 나타낸다. Fig. 14로부터 알 수 있듯이 case 3, 4에서 dust cap과 센서와의 간격이 상대적으로 커서 간섭의 가능성이 적음을 예상할 수 있다. Case 3, 4는 모두 dust cap 2 설계를 적용한 것으로서, dust cap 수평면에 0.3mm의 예각을 형성하면 압입 후 dust cap과 센서의 간섭을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

위의 두 가지 결과를 종합해보면, 압입 중 dust cap과 엔코더와의 간섭을 회피하기 위해서는 case 1, 3이 유리하며, 압입 후 센서와의 간섭을 회피하기 위해서는 case 3, 4가 유리하다. 따라서 두 가지 모두 만족하는 경우는 case 3으로써 dust cap은 수평면에 0.3mm 예각을 형성하고, 지그는 평평한 지그가 엔코더와 센서와의 간섭에 가장 유리한 설계임을 알 수 있다.

5. 결론

- (1) 자동차용 휠 베어링의 dust cap이 외륜에 압입 시 발생하는 변형을 수치적으로 해석하였고, dust cap과 센서와의 간섭을 검토하였다.
- (2) Dust cap의 변형 형태를 검토한 결과, 스프링 백 현상이 발생함을 확인하였고, 이로 인하여 압입 중 dust cap과 엔코더가 간섭이 발생할 수 있음을 예상할 수 있었다.
- (3) Dust cap과 센서, 엔코더의 간섭을 줄이기 위하여 4가지의 설계안에 대하여 해석을 수행하였고, 그 결과를 시험과 비교하였다. 비교 결과, 해석과 시험 결과는 상당히 유사하며, 이로부터 case 3이 가장 좋은 설계임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Hofmann, H., and Tröster, M., 1988, "Progress with Car Wheel Bearing Units," *Ball and Roller Bearing Engineering - Industrial Engineering published by FAG*, Vol. 27, No. 2, pp. 13~15.
- (2) Hofmann, H., and Bayer, O., 1990, "ABS Wheel Bearing," *Ball and Roller Bearing Engineering - Industrial Engineering published by FAG*, Vol. 501, pp. 19~24.
- (3) Ouchi, H., 1996, "Hub Unit Bearing with Annular Passive Sensor," *NSK Technical Journal*, No. 662, pp. 1~7.

- (4) Yoon, K. C., and Choi, D. H., 2000, "A Design of an Automotive Wheel Bearing Unit for Long Life," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 2, pp. 319~328.
- (5) Ahn, T. K., and Lee, S. H., 2003, "Design of a Wheel Bearing Unit Using Taguchi Method," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 10, pp. 164~168.
- (6) Lee, S. P., Lee, I. H., Park, J. S., Hwang, S. H., and Park, J. Y., 2010, "Deformation Analysis for Dust Cap of Wheel Bearing," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineering spring conference*, p. 60.
- (7) MARC, 2008, *Volume B: Element Library Manual Version 2008 r1*, MSC.Software Corporation.
- (8) I-DEAS, 2008, *Finite Element Modeling User's Guide Version NX 6*, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.
- (9) Lee, S. P., Lee, I. H., Cho, Y. G., Kim, B. C., and Koo, M. H., 2010, "Stress Analysis of Automotive Wheel Bearing Considering the Heat Treatment," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering spring conference*, pp. 923~924.
- (10) Lee, S. P., and Koh, B. K., 2007, "Stability Analysis of Turbo Compressor Rotor Considering the Contact Phenomena," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 3, pp. 75~80.