

教育學碩士學位 請求論文

깊은 홈 볼 베어링의 내륜 축 끼워맞춤에
관한 연구

A Study on the Shaft Fitting to Inner
Raceway of a Deep Groove Ball Bearing

2004年 2月

仁荷大學校 教育大學院

機械·金屬工學 教育專攻

具 勳 書

教育學碩士學位 請求論文

깊은 홈 볼 베어링의 내륜 축 끼워맞춤에
관한 연구

A Study on the Shaft Fitting to Inner
Raceway of a Deep Groove Ball Bearing

2004年 2月

指導教授 黃炳福

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

仁荷大學校 教育大學院

機械·金屬工學 教育專攻

具 勳 書

本 論文을 具勳書의 碩士學位 論文으로 認定함

2004 年 2 月

主審 _____ ①인

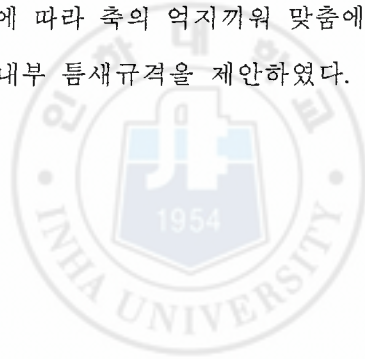
副審 _____ ①인

委員 _____ ①인



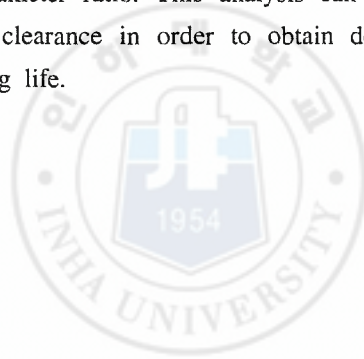
요 약

본 논문은 깊은 흠 불 베어링의 내륜에 축 끼워맞춤을 했을때의 간섭량에 따른 틈새의 영향에 관한 것이다. 이를 위하여 베어링의 설계조건과 수명에 관한 내용들을 정리하였으며 예압에 관한 영향도 검토하였다. 내륜과 축의 접촉문제를 해석하기 위하여 2차원 유한요소해석 프로그램을 이용하여 모의실험 하였다. 모의실험에서 다양한 축 간섭량에 대해 중실축의 재료와 베어링의 내경을 다르게 하여 수행하였다. 이로부터 유효변형률 분포, 베어링의 내경에 작용하는 면압 분포, 경방향 팽창량등의 자료들을 얻었다. 이와 같은 수치적 해석결과로부터 각 베어링의 내경과 간섭량에 따라 축의 억지끼워 맞춤에서 베어링의 수명비가 최대로 되기 위한 경방향 내부 틈새규격을 제안하였다.



Abstract

The main goal of this paper is to establish an interference tolerance for determining optimal amount of clearance in the shaft-bearing system supported by ball bearings. The 2-D frictional contact model is employed for the FE analysis between shaft and inner raceway. Several examples are simulated according to different material properties of solid shaft. Efforts are focused on the deformation applied in the radial direction as the selection of suitable bearing. The analysis indicates that the initial axial preload applied on the bearings plays a significant role to reduce bearing fatigue life. The proposed design parameters obtained by numerical simulations can be approximately predict a rate of bearing life reduction as a function of shaft diameter ratio. This analysis can also be used to calculate the optimal initial radial clearance in order to obtain design shaft-bearing system for high accuracy and long life.



목 차

요 약

Abstract

1. 서 론	1
1.1. 연구배경 및 목적	1
1.2. 연구방법	2
2. 접촉문제	3
2.1. 접촉경계조건	3
2.2. 구속방법	4
3. 베어링의 개요	5
3.1. 베어링의 수명	5
3.2. 베어링의 내부틈새	6
3.3. 베어링의 예압	8
4. 깊은 홈 볼 베어링의 설계조건	10
4.1. 구성요소	10
4.2. 하중의 성질과 끼워맞춤	12
4.3. 틈새에 따른 수명곡선	13
5. 유한요소해석	15
5.1. 해석조건	15
5.2. 유효변형률 분포	18
5.3. 면압분포	23
5.4. 간섭량에 따른 틈새변화	25
6. 결 론	29

참 고 문 헌

그림 목 차

Fig. 1	Boundary condition for contact problem	3
Fig. 2	Clearance between races and ball bearing	6
Fig. 3	The configuration and cross-section of a deep groove ball bearing	10
Fig. 4	The graph of life ratio according to clearance for ball bearing	14
Fig. 5	Schematic configuration for simulation (unit: mm)	16
Fig. 6	Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6206, shaft : AISI 1045)	19
Fig. 7	Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6206, shaft : AISI 1020)	20
Fig. 8	Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6210, shaft : AISI 1045)	21
Fig. 9	Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6210, shaft : AISI 1020)	22
Fig. 10	The distribution of surface pressure with each interference tolerance (bearing: B6210, shaft : AISI 1020)	24
Fig. 11	The radial variance of B6206 by interference fitting tolerance (unit: μm)	26
Fig. 12	The radial variance of B6210 by interference fitting tolerance(unit: μm)	27

표 목 차

Table 1	Material parameters for simulation	16
Table 2	The proposed clearance by simulation results(unit: μm)	28



1. 서 론

1.1. 연구배경 및 목적

유한요소법은 최근 컴퓨터 용량의 대형화와 계산속도의 향상으로 다른 수치해법에 비하여 적용이 일반적이고 응력이나 변형률의 분포를 쉽게 구할 수 있기 때문에 연속체 역학문제 등에 광범위하게 사용되고 있다[1]. 특히, 공정에 영향을 미치는 여러 가지 인자들을 고려할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 공정설계시 시행착오 및 다양한 실험으로 발생할 수 있는 시간 및 비용을 크게 절감할 수 있다. 실제로 유한요소법을 이용하여 단조, 냉간압출, 압연등에서 최적의 공정설계를 얻기 위한 노력이 계속되어 왔고, 앞으로도 수치적 모의실험방법과 컴퓨터를 이용한 해석방법은 여러 산업분야에서 더욱더 많이 응용되어 질 것이다.

베어링은 힘과 무게를 지지하면서 물체를 적은 마찰력으로 회전 운동(또는 직선운동)을 시켜 동력과 변위를 전달하기 위한 안내에 사용되는 기계 요소이다. 이때 베어링은 마찰의 형식에 따라 미끄럼 베어링(sliding bearing)과 구름 베어링(rolling bearing)으로 구분할 수 있다. 깊은 홈 볼베어링(deep groove ball bearing: DGBB)은 구름 베어링중에서 가장 대표적인 형식으로 설치와 유지, 보수가 용이하고 오일 또는 공기베어링에 비해 제한된 크기로 큰 하중을 지지할 수 있기 때문에 대부분의 산업기계에 폭넓게 사용되는 동력전달요소이다 [2]. 이 베어링은 경방향 하중과 축방향 하중 그리고 합성 하중 등 어느 방향의 하중도 받을 수 있으며 마찰 모멘트가 적어 고속회전과 저소음 및 저진동이 요구되는 용도에 가장 적합하다.

일반적으로 베어링의 수명은 베어링의 궤도면 또는 전동체 표면의 일부가 반복접촉응력에 의하여 플레이킹(flaking) 현상이 발생하는 시점까지를 말한다

[2]. 이러한 베어링의 수명은 Lundberg와 Palmgren[3]이 제안한 피로 수명식에 기초하지만 내륜과 축과의 끼워맞춤, 외륜과 하우징과의 끼워맞춤이 베어링의 수명에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 적절한 끼워맞춤을 선정하는 것은 용도에 적합한 베어링을 선택하는 것과 마찬가지로 중요하다.

구름베어링의 틈새(clearance)는 내외륜의 상대적인 경방향 또는 축방향의 변위를 말하며, 베어링의 회전성능, 수명, 진동 및 소음 등에 큰 영향을 미친다. 이와 같은 틈새는 베어링의 끼워 맞춤, 운전시 내외륜 및 전동체의 온도차, 베어링에 부하되는 하중 등에 의하여 변화한다. 따라서, 적절한 틈새의 선정은 형식, 치수가 정해진 베어링에 있어서 중요한 검사 항목의 하나이다. 따라서 본 논문에서는 2차원 접촉문제를 기반으로 깊은 홈 볼베어링의 내륜이 축에 억지끼워맞춤(tight fitting) 될 때의 틈새변화를 유한요소해석 하였다. 이를 통하여 끼워 맞춤 공차나 축 재료와 형상에 따라 궤도경에서의 변형이 베어링의 틈새에 미치는 영향을 비교·검토하였다.

1.2. 연구방법

본 논문에서는 우선 기계요소로서 베어링이 갖고 있는 수명, 하중특성, 예압 등의 기계적인 특성을 조사하였다. 정립된 이론적 근거를 바탕으로 발표된 문헌 등을 통해 이중에서 본 논문의 해석대상인 깊은 홈 볼 베어링의 구성요소 및 끼워맞춤등에 관한 설계조건들을 정리하였다. 유한요소해석을 위하여 참고문헌을 통하여 접촉문제에 대한 이론을 조사하고 Jang[4]이 제안한 접촉문제 해석프로그램을 이용하여 모의실험 하였다. 이를 통하여 베어링과 축의 형상과 따른 해석 결과를 정리하였으며 유효변형률 분포, 예압분포 등을 비교하고 다양한 끼워맞춤 공차에 따른 틈새변화를 비교하였다. 정리된 결과등을 이용하여 축-베어링 시스템의 억지 끼워 맞춤에서의 적절한 간섭량을 제시하였다.

2. 접촉문제

2.1. 접촉경계조건

접촉은 기계적으로 두 개 이상의 물체사이에서 발생할 수 있는 현상이며, 접촉발생의 위치와 시간은 물체의 변형정도에 따라 달라진다. 이때, 접촉은 변형체의 임의의 경계면에서 발생하고 이때 반드시 두 변형체에 대한 겹쳐지는 영역이 존재해서는 안된다[5]. 이러한 접촉 현상은 각 변형체에 대해 평형조건과 구성방정식을 만족하기 때문에 경계치 문제(boundary value problem)로 볼 수 있으며, 접촉 후 마찰을 수반한 상대적인 유동을 포함한다[6]. 접촉문제는 변형체뿐만 금형과 재료와의 경계면에서 발생할 수 있지만 본 논문에서는 시간증분에 따른 재료의 유동에 의한 두 개의 강소성 변형체(rigid plastic body)에 대한 접촉문제를 다루기로 한다.

Fig. 1은 접촉문제에 대한 경계조건을 도식적으로 나타낸 것으로 두 변형체

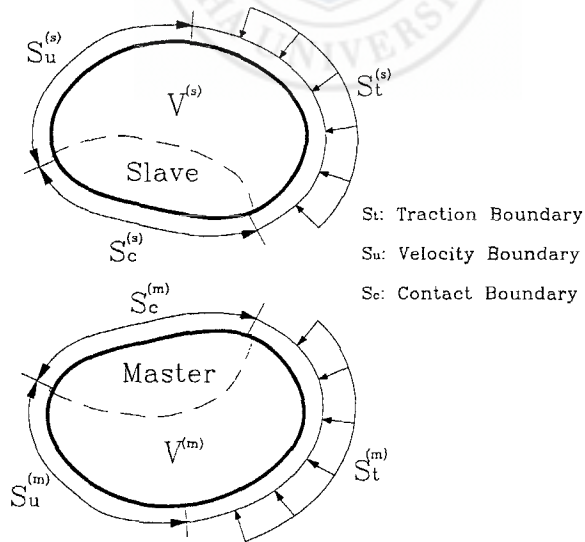


Fig. 1 Boundary condition for contact problem

를 구분하기 위해서 상점자를 사용하여 종속변형체(slave body)와 주변형체(master body)로 설정하였으며 V 는 변형체의 내부영역을 나타낸다. 그림에서 표면외력(surface traction) t_i 는 외력경계조건 S_f 에, 속도 v_i 가 속도경계조건 S_v 면에 작용한다. 이때 그림에 나타난 것처럼 이러한 경계조건을 갖고있는 두 변형체는 시간이 경과함에 따라 두 변형체의 공통경계영역으로 이루어진 새로운 접촉경계 S_c 를 갖게 된다. 여기서 접촉경계는 기존의 속도와 외력경계조건에도 포함되지 않는 독립된 경계영역이다.

2.2. 구속방법

두개의 변형체에 대한 접촉문제에서 각각의 경계영역은 서로 다른 경계영역에 대해서 불침투 조건(impenetrability condition)을 만족해야한다. 이것은 두 변형체에 대한 공통경계부분이 존재하지 않음을 의미하고 따라서 이러한 영역이 발생하지 않기 위한 구속조건이 필요하다. 그러나 접촉경계면에서 접촉은 극히 비선형적이고 불연속적인 특징을 갖고 있기 때문에 이러한 불침투 조건은 일반적인 변위식으로 표현하기란 대단히 어렵다[7,8]

두 개의 변형체에 벌칙함수가 부가되어 수정된 변분식은 다음과 같이 표현된다[4].

$$\delta\Pi^* = \delta\Pi^{(s)} + \delta\Pi^{(m)} + \beta\gamma_N\delta\gamma_N \quad (1)$$

여기서, β 는 벌칙상수이고 γ_N 은 주접촉면을 기준으로 법선 방향으로의 상대속도이다.

3. 베어링의 개요

3.1. 베어링의 수명

구름베어링에 요구되는 기능은 각각의 용도에 따라 다르고, 정해진 기간동안 계속 작동되는 것이 필요하다. 베어링을 어떤 용도에 올바르게 사용하여도, 어떤 기간을 경과하면, 음향·진동의 증가, 마모에 의한 정도저하, 윤활 그리이스의 열화, 내·외륜 및 전동체에 반복된 응력이 가해짐으로서 궤도나 전동체 표면에 비늘 모양의 입자가 나가는 현상 즉, 플레이킹(flaking)현상이 발생한다. 이때 일반적으로 베어링이 사용불능 상태까지의 기간이 넓은 의미의 베어링 수명이고, 이 중에서 구름피로 수명만을 좁은 의미의 베어링 수명이라고도 부른다. 따라서, 베어링의 회전에 따른 피로로 인한 플레이킹 현상이 일어날 때까지의 총 회전수를 베어링의 수명이라고도 정의한다.

동일한 치수, 구조, 재질, 열처리조건 및 가공 방법으로 만들어진 베어링들을 동일조건으로 작동시켰을 때 나타나는 수명의 일반적인 분포는 다르게 나타난다. 이것은 재료의 피로 자체가 일정하지 않고 산포도를 가지고 있다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 분포를 통계적으로 처리하기 위해 정격수명(rating life)을 정의함으로써 베어링 수명계산의 기준으로 사용하고 있다. 일군의 동일 호칭번호의 베어링을 동일조건으로 각각 회전시켰을 때 이들 중 90%가 플레이킹 현상을 일으키지 않고 회전할 수 있는 총 회전수 또는 총 회전시간(회전속도가 일정한 경우)을 정격 수명이라 한다.

이와 같은 수명 외에 베어링이 사용될 수 없는 현상으로는 굽힘, 이상마모 균열, 용착, 전식, 밀봉시일의 손상 등이 있다. 이것들은 베어링의 고장으로서 수명과 구별되어야 될 성질의 것이고, 베어링 선정의 잘못, 축 하우징 주변의 설계불량, 설치불량, 부적합한 윤활 방식, 밀봉 장치의 결함, 사용방법 혹은 보수의 잘못 등에 의한 요인이 많다.

3.2. 베어링의 내부틈새

베어링의 내부 틈새는 내륜 또는 외륜의 어느 한 쪽을 고정시키고, 다른 쪽의 궤도륜을 상하 또는 좌우 방향으로 움직였을 때의 움직임량을 말하여 KSB 2102에 규정되어 있다. 내부 틈새는 외력을 가하지 않은 상태에서의 내륜 및 외륜의 상대적인 변위량으로 변위량의 방향에 따라 Fig. 2와 같이 경방향 틈새와 축방향 틈새로 구분된다. 이때 이론적으로는 틈새가 없이 회전하는 것이 가장 이상적이지만, 기구학적으로 실제 이러한 상태는 거의 불가능하다. 이러한 틈새는 끼워맞춤, 온도차에 의한 열팽창량의 차이, 하중에 의한 변형, 예압 등의 결과로 변화하므로 초기 틈새와 설치후 틈새로 구별되며 보통 전자는 후자보다 크다. 따라서 축이나 하우징에 설치할 때 틈새 변화가 회전에 미치는 영향을 사전에 충분히 고려하여야 한다. 일반적으로 베어링의 틈새는 보통의 사용 조건에 적합한 보통급 틈새와 이 보통급 틈새보다 작은 C2급, 보통급보다 큰 C3급, C4급, C5급 등이 있다[9].

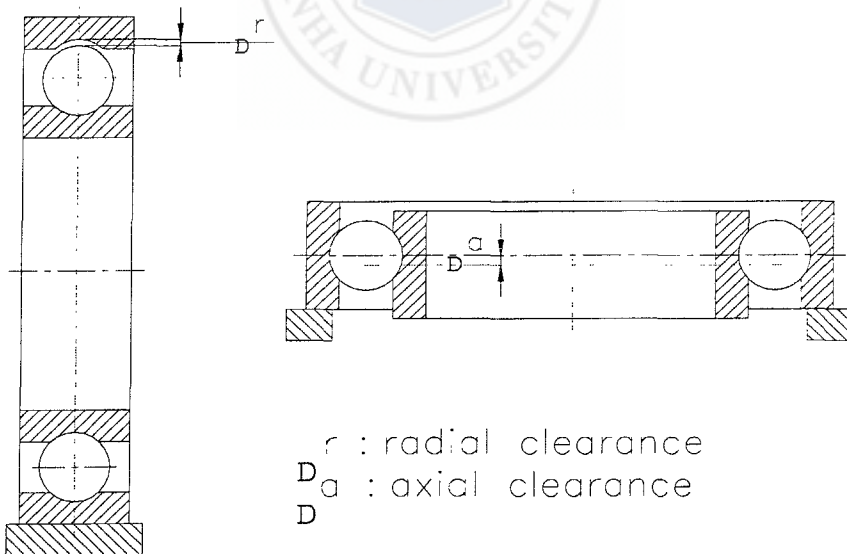


Fig. 2 Clearance between races and ball bearing

특히 테이퍼 구멍인 베어링은 테이퍼 시트에 억지 끼워맞춤하여 설치하기 때문에 경방향 틈새가 원통구멍 베어링 보다 크며 복열 앵글리 콘택트 볼 베어링과 짝지어서 조합 설치된 베어링은 경방향 틈새 대신 축방향 틈새로 규정된다. 베어링은 그 형식과 용도에 따라 각각 규정된 틈새를 사용하는데 정상적인 운전 조건이면 보통급을 사용하며 내, 외륜중 하나는 가벼운 억지 끼워맞춤을 한다, 가능한 한 틈새가 없는 것이 좋을 경우에는 C2급을 사용하며 끼워맞춤할 때 간섭량을 지나치게 많이 해서는 안된다. 보통급보다 큰 틈새인 C3, C4, C5급은 중하중을 받는 경우, 방향이 일정하지 않은 하중을 받는 경우, 내, 외륜 온도차가 비교적 큰 경우 등 억지 끼워맞춤하는 경우에 사용한다. 일반적으로 틈새를 측정할 때는 측정하중에 의한 틈새의 변화량을 보정해야 한다[9].



3.3. 베어링의 예압

베어링은 일반적인 운전상태에서 약간의 틈새를 갖도록 선정되고 사용되나, 용도에 따른 여러 가지 효과를 목적으로 구름 베어링을 장착한 상태에서 음(-)의 틈새를 주어 의도된 내부 응력을 발생시키는 경우가 있다. 이와 같은 구름 베어링의 사용방법을 예압법 이라 하며, 미끄럼 베어링에는 없는 구름 베어링의 특징 중하나이다.

예압이 주어진 베어링의 주된 목적과 대표적인 적용에는 다음과 같다

- (1) 베어링의 축방향과 경방향의 정확한 위치유지 및 축의 회전정밀도를 유지하기 위해 사용 : 공작기계, 측정기 등의 주축
- (2) 베어링 강성을 증가시키기 위해 사용 : 공작기계의 주축, 자동차 화이널 드라이브 기어의 피니온 축 등.
- (3) 축방향 진동과 공명음에 의한 소음의 극소화를 위해 사용 : 소형 전기모터 등
- (4) 전동체와 궤도사이의 선회모멘트에 의한 미끄러짐 방지를 위해 사용 : 앵귤러 콘택트 볼 베어링, 스러스트 볼 베어링 등 고속조건에 적용
- (5) 전동체와 베어링륜의 적절한 위치를 유지하기 위해 사용 : 수평축에 스러스트 볼 베어링과 자동조심 스러스트 로울러 베어링 조립시 사용

이러한 예압 방식에는 정위치 예압과 정압 예압이 있다. 정위치 예압은 서로 대항하고 있는 베어링의 축방향의 상대적 위치를 고정시켜주며 사용 중에도 위치가 변화하지 않는 예압방법이다. 정압예압은 작동중 베어링의 상대위치가 변하더라도 예압이 상대적으로 일정하게 유지되기 위해 예압이 가해진 코일 또는 판 스프링을 사용하여 얻는다.

만일 예압량이 필요이상으로 크면, 이상 발열, 마찰 모멘트의 증대 및 베어링 피로 수명의 저하 등이 일어날 수 있다. 따라서 예압량은 가동조건과 예압의 목적하에서 결정된다. 조합 앵귤러 콘택트 볼 베어링의 예압은 하우징에 끼워맞춤할 경우 끼워맞춤 공차의 하한은 고정단 베어링에 적용되고 상한은 자유단 베어링에 적용된다. 일반적으로 경예압 또는 중예압은 연삭기에 적용되고 중예압 (medium preload) 또는 중예압(heavy preload)은 고속선반과 밀링머신에 적용된다. 스러스트 볼 베어링에서 볼이 비교적 고속회전할 때 볼의 선회 모멘트에 의해 미끄러짐이 발생할 수 있다. 자동조심 롤러 스러스트 베어링을 사용할 때 예압은 외륜궤도에 대한 롤러의 적절한 위치를 유지시켜주기 위해 필요하다



4. 깊은 홈 볼 베어링의 설계조건

4.1. 구성요소

단열 깊은 홈 볼베어링은 구름 베어링 중에서 가장 대표적인 형식으로 그 사용 용도는 매우 광범위하며, 내륜과 외륜궤도의 홈은 전동체 볼의 반경보다 약간 큰 곡률반경을 갖는다. 이 베어링에는 개방형 외에 시일드 또는 고무 시일로 밀봉한 밀봉형 베어링 및 외륜외경에 스냅링이 부착된 형태의 베어링이 있다. 일반적으로 냉간 압연 강판재의 프레스 리테이너가 사용되고 있으나 최근 가전기기의 저 토크 및 저 소음의 요구 특성에 대응하기 위하여 소형 모터용 베어링에서는 플라스틱 리테이너 내장형 볼베어링을 사용하고 있는 추세이다.



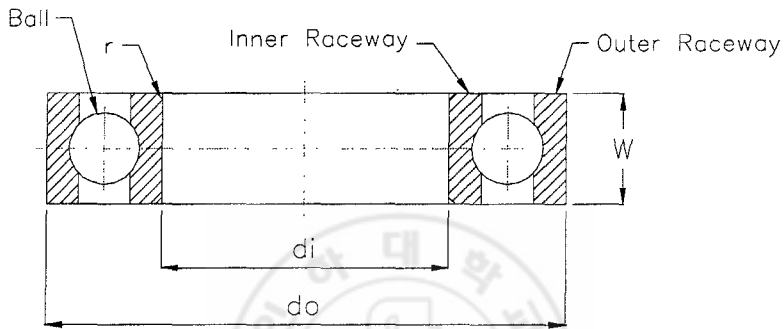


Fig. 3 The configuration and cross-section of a deep groove ball bearing

Fig. 3은 본 논문의 해석 대상인 깊은 홈 볼 베어링의 형상을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 깊은 홈 볼 베어링은 하중전달 매개체인 전동체(볼), 전동체를 등 간격으로 유지시키기 위한 리테이너 및 축과 하우징에 끼워지는 내륜과 외륜으로 구성되어 있다. 외부치수는 내경(d_i), 외경(D_o), 폭(W) 및 모뎀기 치수(r)로 구성되어 있다. 현재 직경계열(diameter series) 및 폭 계열(width series)로 구성된 치수계열과 내경기호로 구분되어 전세계적으로 통용이 가능하도록 표준화가 잘 발달되어 있다.

4.2. 하중의 성질과 끼워맞춤

베어링의 끼워맞춤은 베어링에 작용하는 하중의 성질, 베어링의 치수, 온도 조건, 축 또는 관련부품의 열팽창, 요구되는 회전정밀도 등의 영향을 받는다. 일반적으로 베어링의 내륜 또는 외륜에 대해 하중의 방향이 상대적으로 회전하는가 정지하는가가 끼워맞춤 틈새를 선정하는데 가장 기본적인 고려사항이다. 베어링에 작용하는 하중은 방향에 따라서 크게 회전하중(rotating load)과 정지하중(stationary load)으로 분류할 수 있다. 회전하중은 특정 궤도륜에 대하여 하중의 방향이 연속적으로 변화하는 반면에 정지하중은 하중의 방향이 언제나 궤도륜의 특정 부분을 향하는 하중을 말한다. 일반적으로 회전하중을 받는 궤도륜은 억지 끼워맞춤(tight fitting)으로 축 또는 하우징과 조립하게 된다. 그러나 정지하중을 받는 궤도륜은 끼워맞춤면에서 미끄럼을 발생시키는 요소가 없기 때문에 사용조건에 따른 회전정밀도나 하중분포를 고려하여 일반적으로 헐거운 끼워맞춤(loose fitting)으로 한다. 만약 내륜 회전하중(rotating inner ring load)의 경우 내륜이 축과 헐거운 끼워맞춤으로 조립되었다면 내륜은 축과의 접촉면에서 크리이프(creep)가 발생하게 된다. 이러한 크리이프는 끼워맞춤면의 마모, 용착, 크랙(crack) 등을 유발하여 베어링의 수명을 단축하는 원인이 된다. 따라서 끼워맞춤면의 간섭량(interference)을 크게 하여 크리이프의 발생을 억제한다. 그러나 과도한 간섭량은 베어링의 틈새에 영향을 미치게 되어 적절한 끼워맞춤조건을 고려해야한다. 본 논문에서는 회전하중을 고려하여 축을 깊은 홈 볼 베어링에 억지 끼워맞춤하고 간섭량을 설정하였다.

4.3. 틈새에 따른 수명곡선

일반적으로 베어링의 틈새는 기하틈새, 잔류틈새, 유효틈새 등으로 구분할 수 있다. 이중에서 잔류틈새는 베어링이 설치될 때 끼워 맞춤에 의한 궤도면의 팽창 또는 수축 후 베어링에 남아 있는 틈새로서 축의 중량 등에 의한 베어링의 탄성변위는 고려하지 않는다. 또한 유효틈새는 베어링의 끼워 맞춤과 운전시 내외륜의 온도차이에 의한 틈새 변화를 고려한 것으로 베어링의 수명과 관련하여 가장 중요하다.

Fig. 4는 유효틈새에 따른 베어링의 수명곡선을 나타낸 것이다[3]. 그림에 나타난 수명곡선은 B6208 기준의 수명곡선이지만 일반적으로 볼 베어링의 한계 수명을 나타내는데 적용되며 적용하중은 2280kgf이다. 그림에서 알 수 있듯이 일반적으로 유효틈새의 값이 0보다 약간 작은 예압상태에서 베어링의 수명이 최대로 나타나며 더 큰 음수가 되면 발열 및 온도차에 의한 틈새의 감소로 인해 점점 수명은 급격히 감소한다. 따라서 베어링의 틈새선정시 내외륜의 간섭을 고려한 잔류틈새에 온도차이에 의한 틈새의 감소량을 고려하여 최대 수명일 때의 틈새보다 양(+의 값)에 올 수 있도록 유효틈새가 결정되어야한다. 참고문헌에 의하면 단열 깊은홈 볼베어링 6310의 내외륜 온도차이가 약 5℃일 경우 틈새의 감소량은 약 $-6\mu\text{m}$ 로 알려져 있다[10].

베어링의 틈새규격에서 일반적으로 추천되는 보통틈새는 일반적인 하중조건에서 표준 끼워맞춤으로 베어링을 설치했을 때 유효틈새가 베어링의 수명을 최대로 할 수 있는 값으로 결정되어 있다. 그러나 베어링의 변위나 진동을 규제할 경우, 운전시 내외륜의 온도차가 클 경우 또는 하중이 과대하여 내륜의 간섭량을 더 크게 할 경우에는 보통틈새보다도 더 큰 틈새를 고려해야한다.

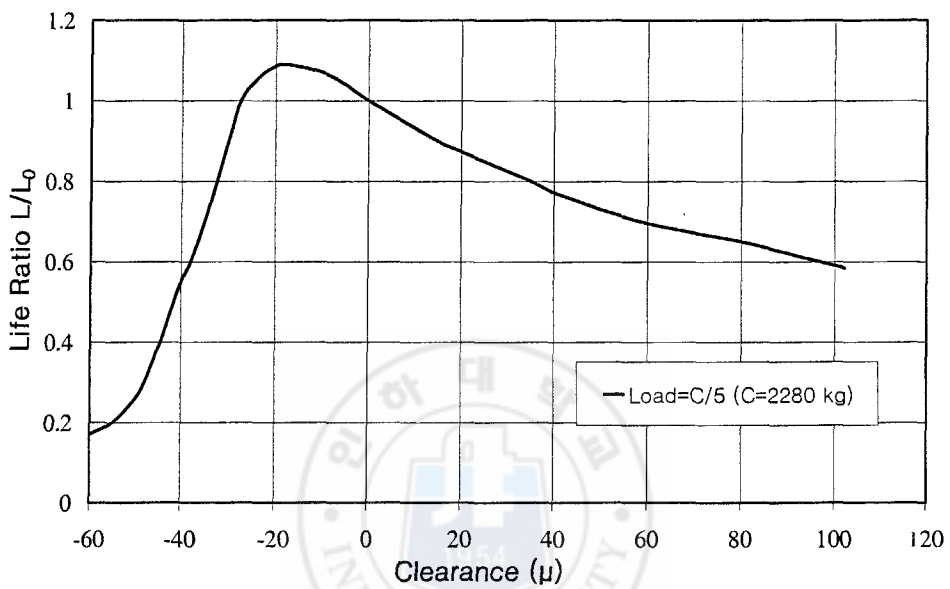


Fig. 4 The graph of life ratio according to clearance for ball bearing

5. 유한요소해석

5.1. 해석 조건

금속성형공정에서 실제실험을 통해 소재유동, 변형률 분포, 성형하중 등과 같은 성형특성을 알기 위해 여러 설계변수들을 변화시켜가면서 파악하기란 쉬운 일이 아니다. 그러나, 최근 유한요소법을 이용한 모의실험방법이 등장하여 실험을 통해 얻을 수 있었던 각종 자료들을 모의실험을 통하여 경제적으로 얻을 수 있도록 재료의 유동, 응력, 변형률, 내부결함, 다이충만 정도 그리고 연성과 피 등의 각종 특징들을 예측할 수 있게 되었다. 또한 공정상의 특징들에 대한 비교·분석이 가능하게 되어 시간적·비용적 절감을 이룰 수 있게 되었다. 이러한, 유한요소법은 다른 방법들에 비해 융통성이 있으며, 보다 정확하고 자세한 정보의 제공이 가능하다. 특히 강소성 유한요소법은 Lee와 Kobayashi[11]가 변분 원리에 입각한 행렬법을 수식화한 이후 금속의 성형해석에 많이 이용되고 있다. 이때 강소성 유한요소법은 소성변형에 비해 탄성변형이 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한 것으로 잔류응력이나 탄성회복(spring-back)현상 등의 탄성변형에 대한 계산이 고려되지 않는 단점이 있다. 그러나, 매 단계마다 재료의 항복을 검증하는 탄소성 유한요소법에 비하여 응력의 오차가 누적되지 않으며 계산시간을 줄일 수 있어 단조나 압출 같은 소성변형문제에 효율적으로 이용되고 있다.

본 논문에서는 축대칭 강소성 유한요소법에 의한 접촉문제의 해석프로그램[4]을 이용하여 모의실험 하였다. 강소성 유한요소법에 의한 모의실험을 수행하기 위하여 유동응력과 유효변형률의 관계는 Power law[12]에 따라 다음 식과 같다.

$$\sigma = K \epsilon^n \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

여기서 K는 강도계수(strength coefficient)이며, n은 가공경화지수(work-hardening exponent)로서 진응력-진변형률 곡선의 대수 그래프상에서 기울기를 나타낸다.

일반적으로 베어링의 궤도륜에는 고탄소 크롬 베어링강이 사용되며 본 논문에서는 규격화되어 있는 강으로서 탄소함유량과 화학적 조성비를 고려하여 AISI 5120을 적용하였다[참]. 축의 재료로는 일반적으로 강재가 사용되며 0.2~0.4%의 탄소강이 가장 많이 사용된다. 본 논문에서 모의실험에 사용한 재료들의 K와 n값이 Table 1에 나타나있다[12]. 축의 간섭량은 KS 0급의 m5(44 μ m), p6(66 μ m), r7(83 μ m)을 각각 적용하여 해석하였다. 마찰조건은 접촉경계면에서 접촉압력에 초점을 두고 두개의 변형체 접촉경계면에 동일하게 쿨롱마찰계수(friction coefficient)를 0.1을 적용하여 모의실험을 수행하였다.

Fig. 5는 모의실험에 사용된 깊은 홈 볼 베어링의 초기격자의 모양과 형상을 나타낸 것이다. 그림에 나타나듯이 본 논문에서는 내경 30mm인 B6206와 내경 50mm인 B6210을 사용하여 모의실험 하였으며 모떼기는 각각 동일하게 1mm를 적용하였다.

Table 1 Material parameters for simulation

	Inner Raceway	Shaft	
Material	AISI 5120	AISI 1020	AISI 1045
Strength Coefficient(K)	89.01	76.01	103.99
Work-hardening Exponent(n)	0.18	0.20	0.11
Strain Range	0.1-0.7		

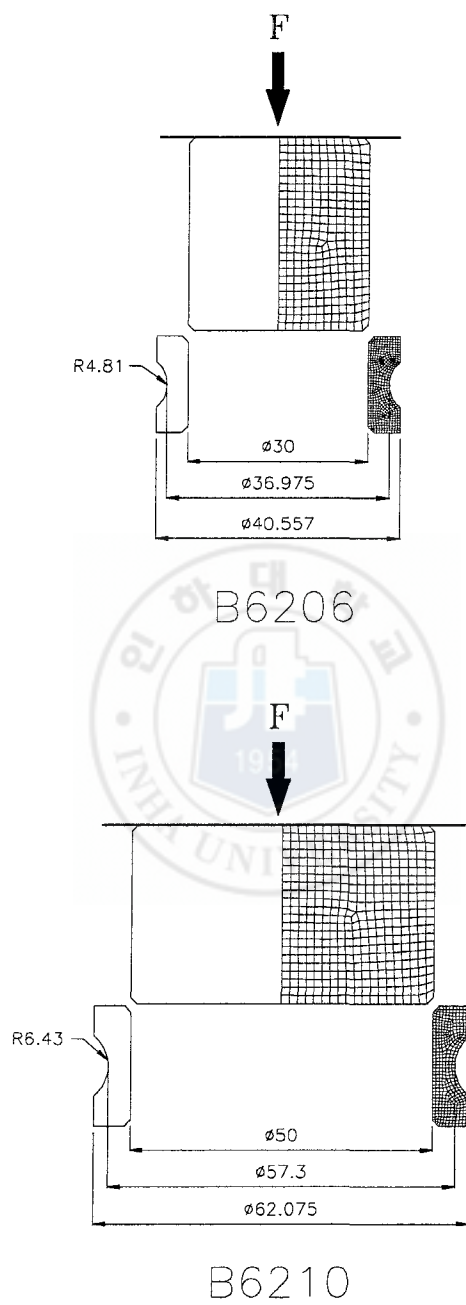
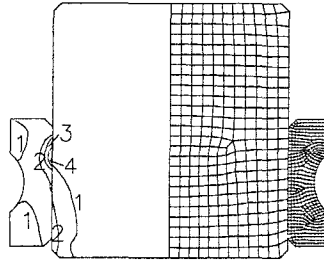


Fig. 5 Schematic configuration for simulation (unit: mm)

5.2. 유효변형률 분포

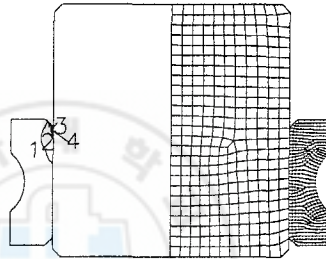
Fig. 6~9는 각각의 베어링의 내륜이 연강(AISI 1020)과 경강(AISI 1045)인 축에 억지 끼워맞춤 되었을때의 간섭량에 따른 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대변형률은 모든 경우에서 베어링과 축의 끼워맞춤면 끝단에서 나타나고 있다. 동일한 베어링의 내륜에서는 간섭량이 클수록 유효변형률이 커지며, 이러한 유효변형률의 차이는 베어링의 내경이 클수록 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 7 참조). 축이 연강인 경우에는 간섭량이 작은 경우에는 유효변형률이 작게 나타났지만 간섭량이 큰 경우에는 상대적으로 경강을 사용한 경우와 비교하여 유효변형률이 더 크게 나타났다(Fig. 8,9 참조). 또한 유효변형률 분포도 내륜에 전체적으로 균일하게 나타나고 있으며 축의 변형도 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 이유는 연강인 경우 축의 끼워 맞춤하중에 의해서 경방향으로 변형이 원활히 일어나기 때문이다. 따라서 이러한 경우 축의 팽창으로 인하여 내륜에 많은 예압이 가해질 것으로 예상된다. 또한 앞서 경강인 경우와 반대로 내륜의 끝단에서 최대변형률이 내경이 작은 경우에 상대적으로 크게 나타났으며 간섭량에 따른 변형률 차이도 더욱 크다(Fig. 8 참조). 따라서 연강인 축을 이용하여 억지 끼워맞춤을 하는 경우는 간섭량의 선택이 우선적으로 중요하다고 볼 수 있다.

- 1: 0.0021
- 2: 0.0059
- 3: 0.0097
- 4: 0.0135
- 5: 0.0173



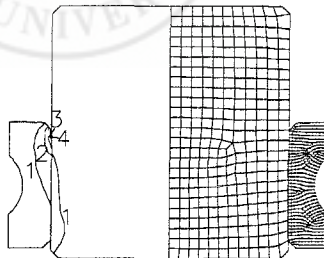
M5

- 1: 0.0121
- 2: 0.0356
- 3: 0.0591
- 4: 0.0826
- 5: 0.1061



P6

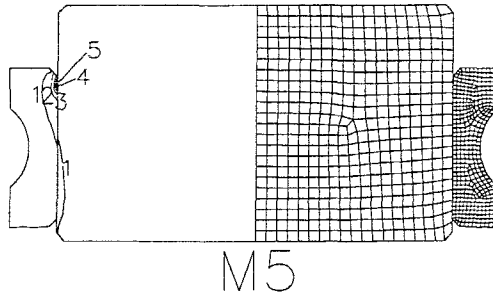
- 1: 0.0178
- 2: 0.0513
- 3: 0.0849
- 4: 0.1185
- 5: 0.1520



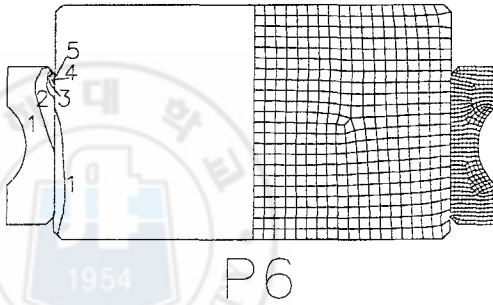
R7

Fig. 6 Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6206, shaft : AISI 1045)

- 1: 0.0198
- 2: 0.0589
- 3: 0.0980
- 4: 0.1371
- 5: 0.1762



- 1: 0.0216
- 2: 0.0644
- 3: 0.1273
- 4: 0.1802
- 5: 0.2030



- 1: 0.0412
- 2: 0.1227
- 3: 0.2041
- 4: 0.2856
- 5: 0.3670

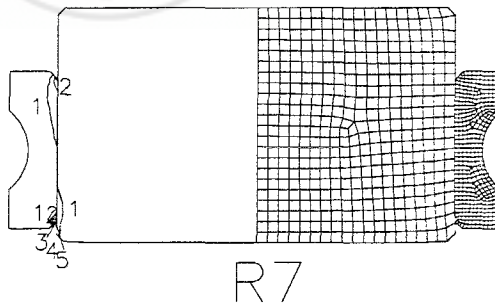
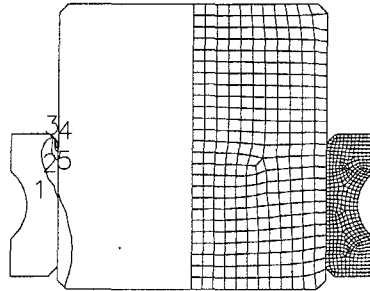


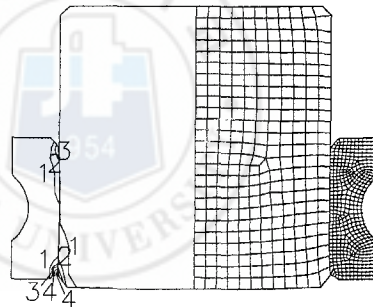
Fig. 7 Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6210, shaft : AISI 1045)

- 1: 0.0059
- 2: 0.0165
- 3: 0.0272
- 4: 0.0379
- 5: 0.0486



P6

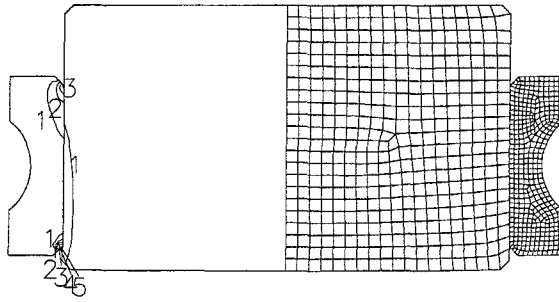
- 1: 0.0566
- 2: 0.1643
- 3: 0.2719
- 4: 0.3796
- 5: 0.4872



R7

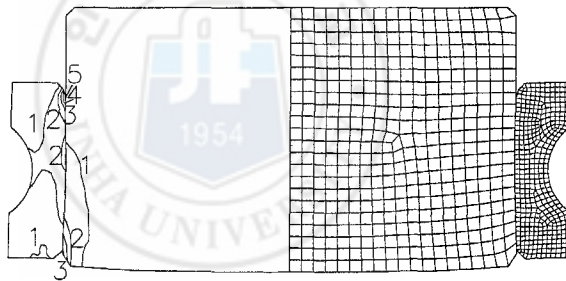
Fig. 8 Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6206, shaft : AISI 1020)

- 1: 0.0226
- 2: 0.0667
- 3: 0.1108
- 4: 0.1549
- 5: 0.1989



P6

- 1: 0.0519
- 2: 0.1517
- 3: 0.2514
- 4: 0.3512
- 5: 0.4510



R7

Fig. 9 Deformation patterns and distribution of effective rate with each interface tolerance (bearing: B6210, shaft : AISI 1020)

5.3. 면압분포

앞서 설명했듯이 예압을 적절하게 부여함으로써 여러 가지 효과를 얻을 수 있어 유용하지만, 예압량을 필요 없이 크게 취하면 이상 발열, 마찰 모멘트의 증대 및 베어링 피로 수명의 저하 등의 현상을 초래하므로 베어링 운전 조건의 정확한 해석 및 예압의 목적 등을 적절히 고려해서 예압량을 결정해야 한다.

Fig. 10은 내경 50mm인 내륜에서 연강축이 각각의 끼워맞춤 조건에서 베어링의 끼워맞춤 면압을 나타내고 있다. 그림에서 간섭량이 작은 경우는 내륜의 상단부에 최대면압이 분포하고 큰 경우에는 곡률반경의 중심에 분포한다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 유효변형률 분포에서 예상했던 것처럼 간섭량이 큰 경우에 내륜에 많은 면압이 발생하고 있으며 최대/최소 면압 차이가 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 이러한 경우에 베어링의 볼에 많은 예압이 발생하고 되고 과도한 원주응력에 의해 베어링에 크랙이 발생될 수 있다. 그러나 적용하고자 하는 기계시스템에 따라 특히 많은 강성이 요구되어지는 경우에는 상대적으로 큰 예압을 필요로 하기 때문에 내륜에 가해지는 면압도 비례적으로 큰 값을 갖는 것이 적절하다.

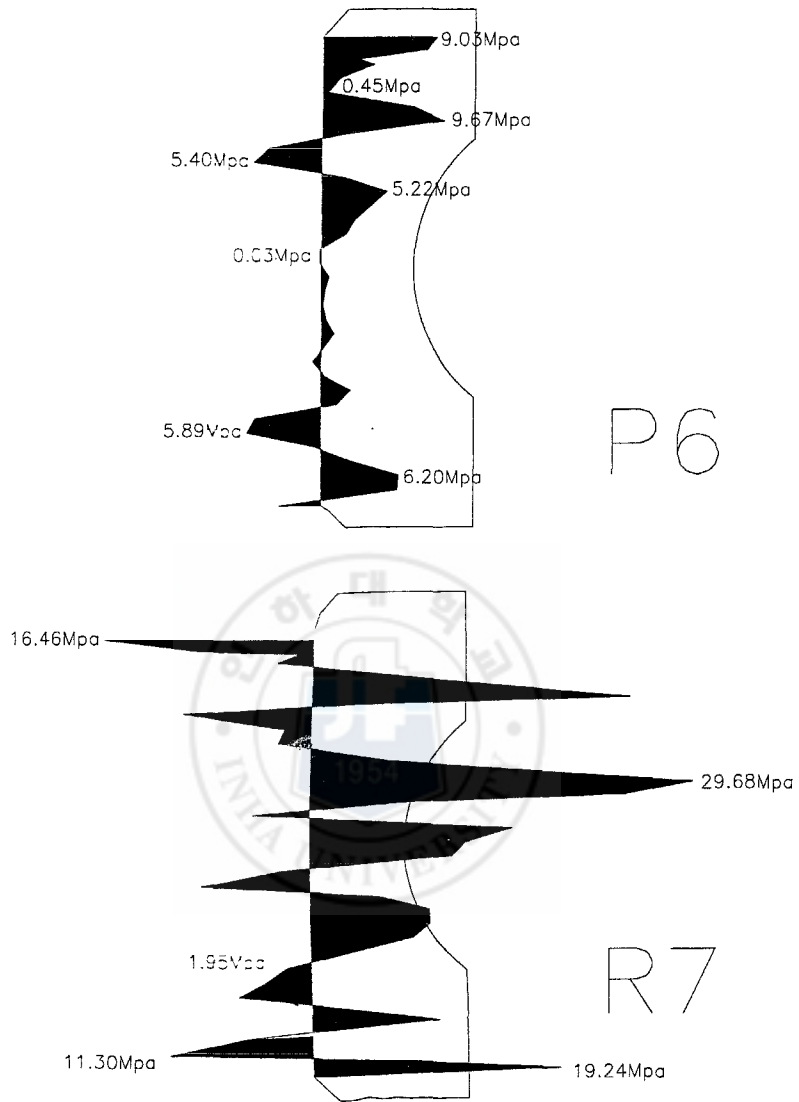


Fig. 10 The distribution of surface pressure with each interference tolerance (bearing: B6210, shaft : AISI 1020)

5.4. 간섭량에 따른 틈새 변화

일반적인 베어링의 적용조건인 내륜에 회전하중이 작용하는 경우 내륜과 축의 억지끼워맞춤에 의해 내륜의 궤도경은 팽창한다. 따라서 끼워맞춤에 의한 틈새의 감소량을 고려하여 베어링의 유효틈새를 결정해야한다. 본 논문에서는 내륜 궤도의 곡률반경의 중심을 기준선으로 설정하여 축의 간섭량에 따른 내륜 궤도경의 경방향 팽창량을 계산하였다. 이와 같은 변형량을 기준으로 잔류틈새를 결정하고 이로부터 베어링의 끼워맞춤시 수명이 최대가 될 수 있는 유효틈새를 제시하였다.

Fig. 11와 12는 각 베어링 내경에서 간섭량에 따른 궤도경의 팽창량을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 대체적으로 간섭량의 증가에 따라 팽창량은 증가하며 이에 따라 잔류틈새는 음의 방향으로 커진다. 동일한 간섭량에서 축의 재료에 따른 팽창량의 차이는 동일한 재료에서의 간섭량에 의한 차이보다 작았다. 그러나 축이 연강이고 간섭량이 큰 경우에는 내륜이 다른 경우와 비교하여 팽창량이 극심하였다. 따라서 이와 같은 경우에는 수명곡선상에서 수명비는 급격히 감소할 것으로 생각되며 초기 베어링 설치시 보통틈새이상으로 설정하여야 한다.

본 논문에서는 이와 같은 변형량을 기준으로 잔류틈새를 결정하고 이로부터 베어링의 끼워맞춤시 수명이 최대가 될 수 있는 유효틈새를 제시하였다. Table 2는 앞서 계산된 궤도경의 팽창량을 기준으로 각 베어링의 내경과 축의 재료에 따른 제안된 간섭량이다. 표에서 내외륜 온도차이에 의한 틈새 감소량은 참고문헌[10]에 따라 $-6\mu\text{m}$ 로 동일하게 적용하였으며 유효틈새는 간섭량을 보통급으로 설정하였을 때 계산된 범위이다. 제안된 틈새는 수명곡선에서 수명비가 최대인 0에 근접하기 위한 깊은 홈 볼 베어링의 경방향 내부 틈새규격이다. 표에서 알 수 있듯이 대부분의 베어링은 초기의 기하틈새를 크게 하여 유효틈새의 최소치를 더욱 크게 하는 것이 적절함을 알 수 있다.

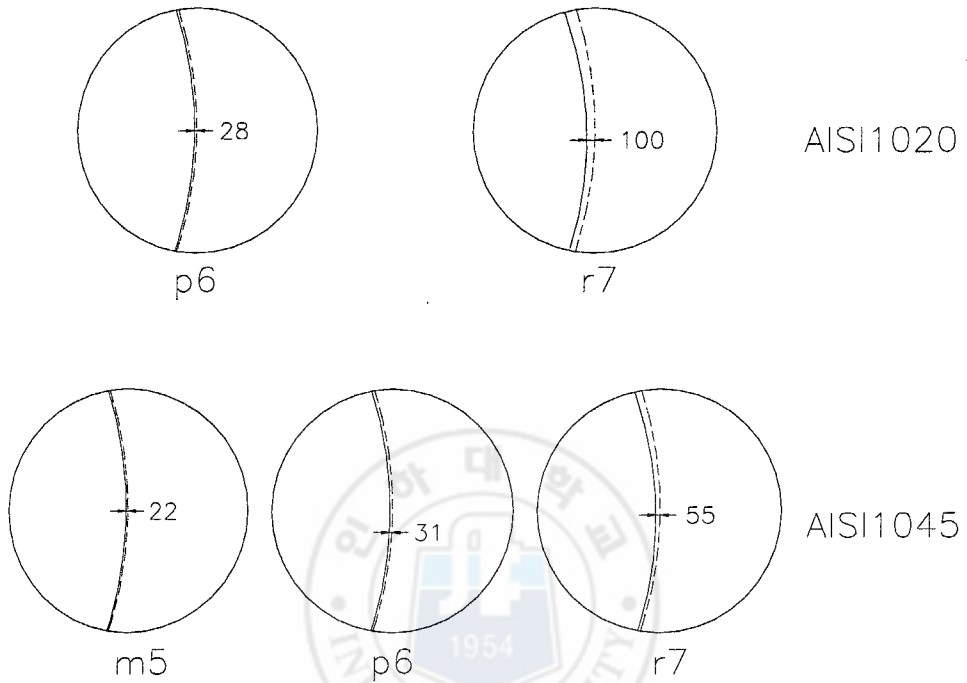


Fig. 11 The radial variance of B6206 by interference fitting tolerance (unit: μm)

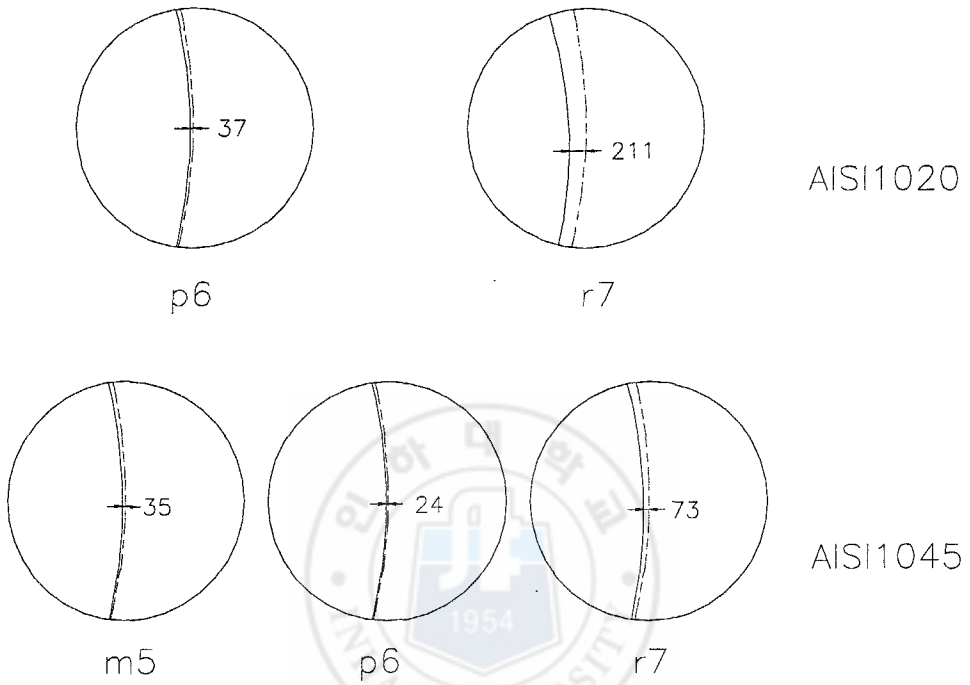


Fig. 12 The radial variance of B6210 by interference fitting tolerance(unit: μm)

Table 2 The proposed clearance by simulation results(unit: μm)

	Shaft	Fitting Tolerance	Residual Clearance	Thermal Clearance	Effective Clearance	Proposed Clearance
B6206	AISI1020	p6	-28	-6	-29~-14	C5
		r7	-100		-101~-86	C5 ↑
	AISI1050	m5	-22		-23~-8	C4
		p6	-31		-32~-17	C5
		r7	-55		-56~-41	C5 ↑
B6210	AISI1020	p6	-37	-6	-37~-20	C5
		r7	-211		-211~-194	C5 ↑
	AISI1050	m5	-35		-35~-18	C5
		p6	-24		-24~-7	C4
		r7	-73		-73~-56	C5 ↑

6. 결 론

본 논문에서는 깊은 홈 볼 베어링의 내륜에 축 끼워맞춤 공차에 따른 틈새에 대한 영향을 2차원 접촉문제의 유한요소해석 프로그램을 이용하여 모의실험하였다. 이와 같은 모의실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 동일한 베어링의 내륜에서는 간섭량이 클수록 유효변형률이 커지며, 이러한 유효변형률의 차이는 베어링의 내경이 클수록 더 크게 나타났다.
- (2) 간섭량이 큰 경우에 내륜에 많은 면압이 발생하고 있으며 최대/최소 면압 차이가 상대적으로 크게 나타났다.
- (3) 동일한 간섭량에서 축의 재료에 따른 팽창량의 차이는 동일한 재료에서의 간섭량에 의한 차이보다 작았다. 그러나 축이 연강이고 간섭량이 큰 경우에는 내륜이 다른 경우와 비교하여 축의 변형으로 인하여 팽창량이 극심하였다.
- (4) 수명곡선에서 수명비가 최대에 근접하기 위한 깊은 홈 볼 베어링의 경방향 내부 틈새규격은 대부분 초기의 기하틈새를 보통급 이상으로 크게 하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Serope Kalpakjian, Manufacturing processes for engineering materials, 2nd ED., Addison-Wesley publishing company Inc., 1992.
- [2] 이재선, 한동철, "볼 베어링의 등가하중에 관한 연구", 한국자동차공학회지, Vol. 8, No. 1, p. 157, 2000
- [3] G. Lundberg. G., A. Palmgren, "Dynamic capacity of rolling bearinga", ACTA Polytechnica, Mecanical Engineering Series 1
- [4] D. H. Jang and B. B. Hwang, "Rigid-plastic FE modelling of frictional contact problems on a penalty method", Trans. of Materials Processing, Vol. 12, No. 1, pp. 34-42, 2003.
- [5] Z. H. Zhong and L. Nilsson, "A unified contact algorithm based on the territory concept", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, Vol. 130, pp. 1-16, 1996.
- [6] S. Wang and A. Makinouchi, "Contact search strategies for FEM simulation of the blow molding process", Int. J. Numer. Mech. Engng, Vol. 48, pp. 501-521, 2000.
- [7] Herman C. J. Bruneel and I. D. Rycke, "QuickTrace: a fast algorithm to detect contact", Int. J. for Numer. Meth. Engng., Vol. 54, pp. 299-316, 2002.
- [8] T. Belytschko and W. K. Liu and B. Moran, Nonlinear finite elements for continua and structures, John Wiley & Sons, LTD, England, 2000.
- [9] FAG 한화베어링(주), 구름베어링 카탈로그 WL 41 510/2 KA.
- [10] NSK Industries, NSK Report, No 719, p. 33, 1989.
- [11] C. H. Lee, S. Kobayashi, "New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method", J. Eng. Ind. Trans. ASME 95, p. 865, 1973.
- [12] Air Force Material Laboratory, Forming Equipment, Materials and Practices, Metal and Ceramics Information Center, p. 164, 1973.

感謝의 글

知天命의 늦각이 나이에 이렇듯 결실을 맺을 수 있도록 심혈을 기울여 지도해 주신 황병복 교수님, 정말 감사합니다. 또 선뜻 용기를 내지 못하고 머뭇거리던 저에게 할 수 있다는 용기와 배려를 주신 본교 교장 선생님과 교감 선생님 그리고 동료 교사 여러분께도 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 아울러 본 실험을 수행하는 과정에서 마무리에 이르기까지 몰심양면으로 협조해 주신 생산자동화 연구실 장동환 박사님, 최호준 박사님께도 무어라 감사의 뜻을 표해야 할 지 모르겠습니다. 여러분들의 성원과 격려 가슴깊이 간직하겠습니다. 마지막으로 저의 든든한 후원자 민용이 엄마에게 이 영광을 돌립니다. 감사합니다.

