윤 활 역 사

굴음(볼, 롤러) 베어링의 역사적 발전과정에 관한고찰

공군사관학교
강석춘 교수

20세기의 정밀 굴음 베어링은 현대 과학과 기술의 산물로써 비록 모양과 이론은 간단하지만 넓은 범위의 모든 기계에서 마찰과 마모를 줄이는데 윤활제와 함께 매우 중요한 역할을 하고 있다.

또 베어링 기술의 발전은 모든 기계설계 및 제작에 많은 도움을 주므로써 20세기의 기계 기술 개발에 주역을 담당했고 아직도 하고 있으며 윤활과 직접적인 관련이 되어 있어서 그 역사적 발전 과정을 살펴보는 것은 의미있고 또 흥미있는 일이라 생각된다.

1. 초기 문명 시대의 롤러와 바퀴의 사용

유사이전의 동굴 그림이나 조각등에는 나무막대나 돌 같은 것이 무거운 물체를 움직이는데 사용된 증거는 있지않다. 그후 페르샤만의 부근인 메소포타미아에서 일어난 초기 문명사회에서 기원전 3200년경에서 부터 바퀴에 대한 증거가 나오기 시작하였다.

1.1 롤러의 사용

Ninevch에서 영국 Layerd경은 1949년에 건축용 돌이나 조각된 거석을 옮기는데 롤러가 사용된 벽화를 발견하였다. 그림 1은 2700년전에 사람모양의 거대한 석상을 옮기고 있는것이 그려진 아시리언의 그림으로써 썰매 밑에 롤러가 사용되고 있음을 보여주고 있다. 그러나 롤러의 배열이 약간 애매하게 되어있지만 분명히 롤러를 뒤에서 앞으로 이동하는 것이 잘 나타나 있다. 썰매는 거의 9000년 전부터 무거운 물체를 움직이는데 사용되어 왔지만 아시리안들은 2700년전 부터 썰매를 롤러위에 사용하는 잇점을 알고 있는 것처럼 보인다.

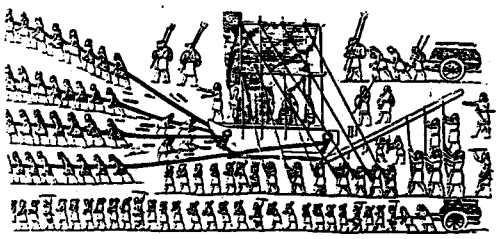

그림 1. BC 700년 경에 인간 머리를 한 거대 석상의 위치를 옮기는데 통나무를 사용하는 아시리안의 그림

1.2 바 퀴

미끌어지는 썰매에서 굴음으로 바뀌어지는 바퀴달린 기구는 그림 2에서 Uruk의 그림에 표시된 바 있고 이것은 약 5000년 전의 것으로 추측된다.

그림 2. BC 3000년 경에 썰매와 바퀴달린 기구에 대한 Uruk의 그림

그후에 중국에서 약 3500년 전에 요철 표면을 갖는 바퀴가 개발되었던 기록을 갖고 있다. 비슷한 기록이 중세에도 있었으나 나무바퀴는 쉽게 부식되어 사라졌고 약 4—5000년 전에 유럽이나 아시아에서 바퀴달린 기구가 발명되었던 것으로 추산된다.

그림 3은 중앙아시아에서 사용한 한개 혹은 세 조각으로된 바퀴를 보여준다. 세조각이 함께 접합되고 나무나 구리판으로 접합되어 있다. 바퀴테에는 구리못이 박혀져 있고 고정축을 중심으로 돌도록 만들어져 있다.

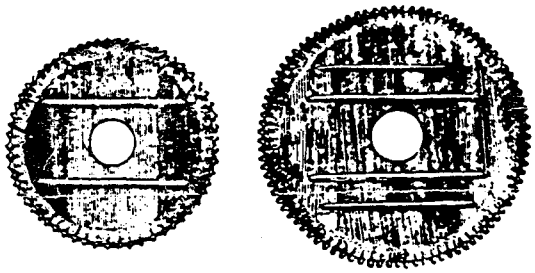

그림 3. BC 2500년 경에 Susa Apadana의 무덤에서 발견된 못을 박은 나무로된 바퀴

2. 고대 문명사회에서 굴음베어링의 초기 형태

기원전 900년부터 기원후 400년 까지의 고대 문명사회에서 볼이나 롤러의 형태가 사용된 증거가 분명하게 존재한다.

2.1 그 리 스

플라토의 수제자 아리스토텔레는 마찰력에 관해 다루었고 둥근 물질이 위에 있을때 최소가 됨을 관찰하였다. 그러나 볼베어링을 만들었는지는 확인할 수 없고 그는 그리스의 예술가나 공학자들의 문제보다도 천체역학이나 천체의 움직임에 더많은 관심을 가졌다.

알렉산드리아에 살고 있는 기계 기술자들은 금속으로 만든 축(Pivot) 베어링이나 평면 베어링을 개발하여 사용하였지만 굴음베어링의 사용이나 연구의 흔적은 없다.

2.2 로 마

고대 문명시대에 베어링 발전에 관한 많은 기록이 남아있으며 그중 유명한 기술자이면서 건축가인 Pollio는 큰 돌을 움직일때 나무바퀴를 사용하므로써 건축에서 굴음운동의 잇점을 최대한 이용하였다.

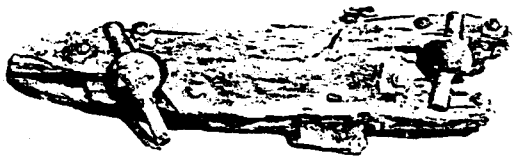

그림 4. Nemi호의 배에서 발견한 청동 볼과 쇠봉으로된 회전식 나무평판의 일부분

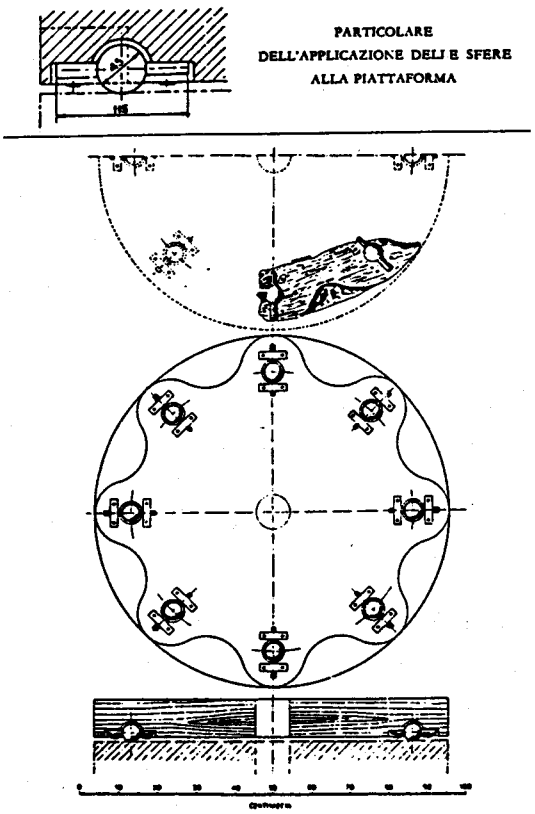

그림 5. Nemi 호의 나무판자가 원래 이루었던 형태를 재현한 그림

그림 4에 있는 청동베어링은 서기 44—54년경에 만든 회전판의 하부에 부착되었던 굴음베어링의 실물 조각으로써 1895년에 발견되었다. 그의 원래 트러스트 베어링의 도면이 그림 5에 제시되어 있다. 이때 볼은 선반으로 만들었고 선반작업 자국인 깍인 부분이 남아있으며 경사진 롤러베어링의 형태도 같이 발견되었음은 특기할 사실이다.

2.3 고대영국(Celts)

고대 영국은 훌륭한 수레와 마차를 만든것으로 유명하다. 서부 뉴틀렌드에서 1881년에 발견된 4륜 마차의 경우 청동으로 된 베어링케이스와 베어링이 참나무 차륜에 장치되어 있었다. 하나의 베어링에는 32개의 축방향 홈이 만들어져 있고 그 사이에 롤러 같은 나무가 있었다. 고대 영국(Celt)등 유럽에서 청동으로 된 롤러 베어링을 사용하려고 시도한 것으로써 2000년 전에 만든것으로 보인다.

2.4 중　　국

내부가 4혹은 8개의 칸으로 되어있고 그 속에 회전하는 것을 넣은 청동으로 만든 베어링 형태가 중국 산시(Shansi) 마을에서 발견되었고 약 2100년 전에 만들어진 것으로 보인다. 그중 하나를 그림 6에서 보여주고 있다. 중국에서 굴음베어링의 개발은 내부칸에 쇠로된 굴음 물질을 넣었다는 것이 기록으로 나타난다. 회전 물체를 각 칸내에 넣고 그 속에서 굴으도록 한 것으로 추측된다.

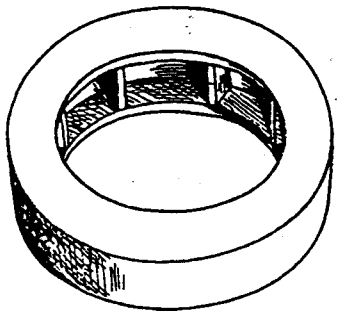

그림 6. 중국 산시(Sansi)에서 발견된 내부 칸을 갖는 원형 청동 베어링 틀

3. 중　　세(AD 400—1450)

중세 암흑시대에는 거의 굴음베어링에 대한 발전이 없었고 같은 시대에 미주대륙에서 만들어진 문화나 문명에서도 바퀴나 회전체를 이용한 증거가 없다.

4. 르네상스 시대(AD 1450—1600)

지금까지 설명한 것은 고고학적 발견에 바탕을 둔 것이다. 그러나 르네상스 시대에 문화와 기계공업은 커다란 발전을 하였고 이 기간 동안의 발전과정은 설명이나 인쇄된 책으로 상당한 지식을 제공하고 있다.

Tribology 분야에서도 천재인 레오나르도 다빈치의 업적에 의해 상당한 발전을 이루게 된다. 다빈치는 마찰에 관한 연구를 하였고 후에 Amonton(1699년)에 의해 기본법칙으로 나타낸 실험을 수행하였다. 그는 미끄럼 마찰계수는 일정하고 모든 물질에 대해 1/4이 된다고 결론을 내렸다.

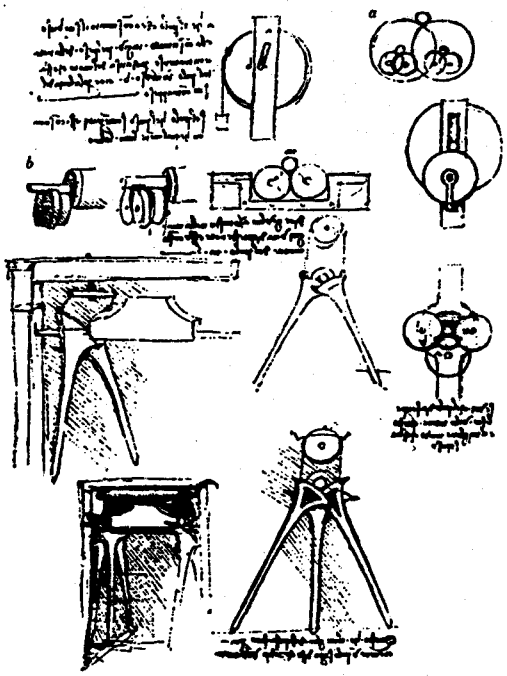

그림 7. 레오나르드 다빈치의 연속 진동 동작을 위한 원판 베어링에 대한 스케치

기계에서 미끄럼 운동보다 굴음 운동이 마찰을 적게하는데 유리하다는 것은 르네상스의 시대에서 분명히 인정되었다. 다빈치는 자유롭게 굴으는 굴음베어링의 전신인 두개의 회전 원판위에 축을 올려놓는 두 원판굴음 베어링에 매혹되었고 스케치를 그림 7같이 그렸다. 이 원판 베어링의 실제 사용은 그림 8에서와 같은 발로 밟는 고리를 갖인 디딜방아(tread mill)의 축을 지지하는 베어링으로 Ramellils 책에서 보여주고 있다.

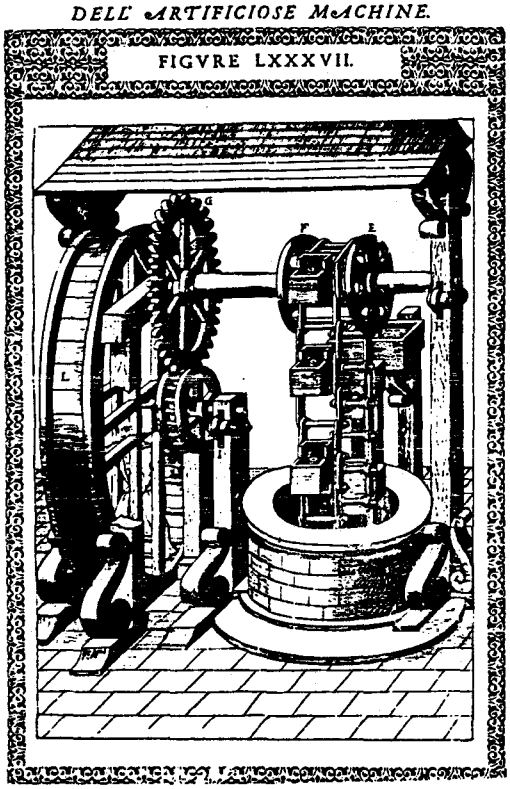

그림 8. 고리로 작동되는 방아간의 주축을 지지하는 굴음 원판의 베어링

현재 사용되는 볼베어링의 형태인 그림 9에서 보여주는 것과 같이 분리판으로 된 볼 트러스트 베어링의 스케치를 다빈치가 그린바 있다. 그림 10에서 보여주는 굴음 요소를 갖는 피봇 베어링의 몇가지 형태는 굉장히 우수한 창조적 생각이다.

그위에 프랑스의 Cellini는 네개의 굴음 나무볼을 갖는 트러스트 베어링을 만들어 주피터 동상을 만드는데 사용하였다(1534년).

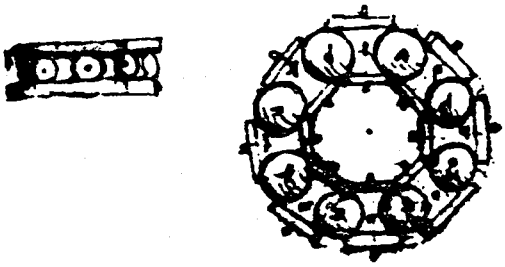

그림 9. 레오나르드 다빈치에 의해 제의된 분리식으로된 볼 트러스트 베어링의 전체적인 형태

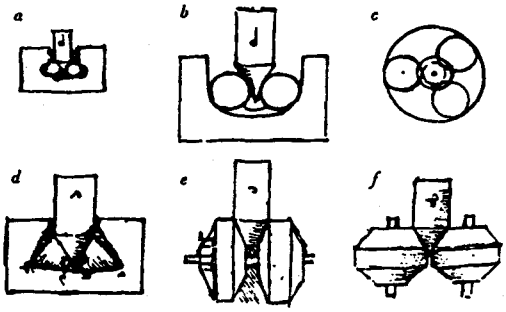

그림 10. 볼, 원추, 롤러 피봇 베어링에 관한 레오나르드 다빈치의 스케치

5. 17세기와 18세기 초의 베어링 발전(AD 1600—1750)

이 150년 동안 베어링에 관한 기술의 대부분은 평면베어링에 관한 것이다. 이때 원판 롤러나 굴음 베어링은 거의 무시되었다. 단지 후크(Hooke)같은 과학자가 굴음 마찰의 성질에 관해 의견을 제시하기 시작했다.

5.1 롤러 베어링의 응용

굴음베어링의 관심은 마차나 운반도구의 제작과 항해용 시계 제조에 흥미가 있었다. 롤러 베어링은 네덜란드의 풍차에 사용되었고 그에 대한 것은 그림 11에서 보여주고 있으며 이때 사용한 베어링은 길이나 직경이 180㎜정도로 나무로 만들었으며 링(ring)에 의해 구속되어 있다. 뒤에 영국 풍차는 좀더 작은 주철 굴음베어링을 만들어 사용하였다.

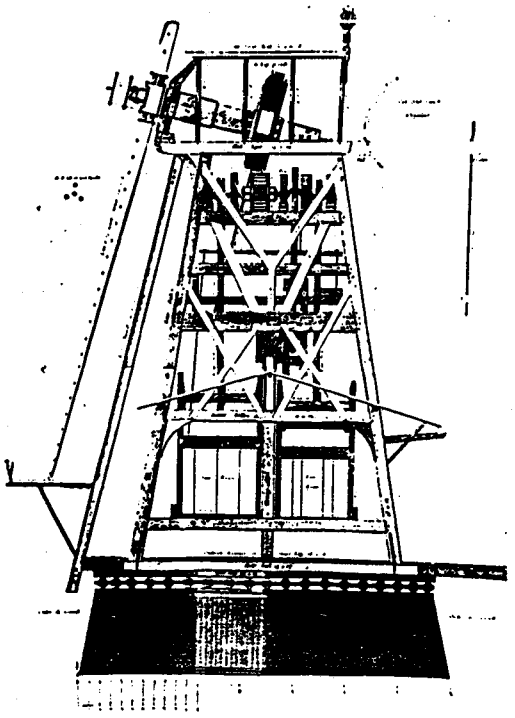

그림 11. 18세기 초에 네델란드에 설치된 풍차에서 베어링의 사용

18세기 초반에 롤러 베어링의 역사에 가장 찬란한 업적은 Powe에 의해 이루어졌고 죠지왕에 의해 특허까지 받았다. 그는 마찰륜(베어링이 부착된 축)이 마차, 수레, 수차, 풍차 또는 말에 의해 구동되는 방앗간 등에 이용되는 방법에 관해 자세히 설명하였다.

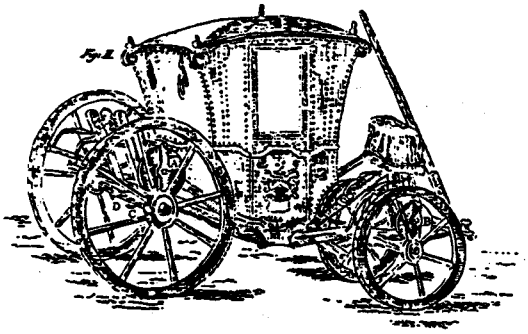

그림 12. 마찰 차륜을 장착한 마차에 관한 Jacob Row의 실례

Powe의 마찰륜을 이용한 훌륭한 4륜 마차를 그림 12에서 보여준다. A와 B에 부착되어 있는 마찰륜은 직경이 0.61m와 0.46m로 되어 있다. 이것은 쇠로 된 테를 갖고 있으며 쇠나 종을 만드는 금속 베어링이 쇠로된 축 위에서 돌도록 하였다. 이들은 또 산업혁명의 초기 단계에서 자유로이 굴으는 볼 베어링의 기초 배경을 제공해 주었다.

5.2 굴음 마찰의 개념

굴음 마찰의 성질은 1685년 Hooke에 의해 두가지 요소에 의한 것으로 설명되었다. 먼저 바퀴가 하중을 받고 굴으면서 평면을 항복상태로 만드는 과정과 바퀴의 접촉 부분에서 일부가 평면에 달라 붙는 현상에 의한것이 마찰로 나타난다고 정의하였다.

6. 산업혁명시대(AD 1750—1850)

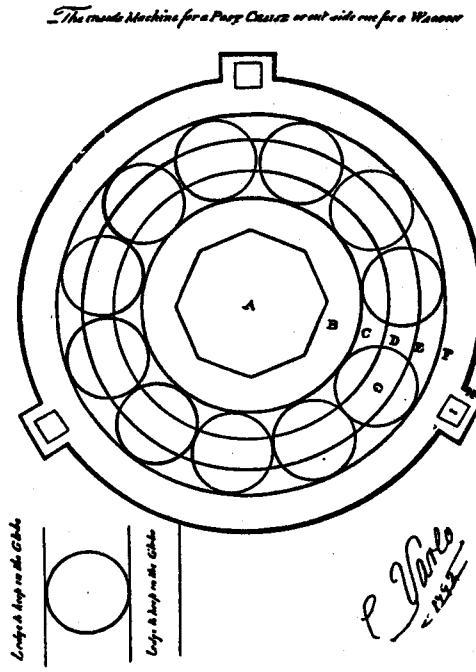

그림 13. 바퀴에서 마찰을 줄이기 위한 Varlo의 새로운 볼 베어링에 관한 그림

6.1 마차용 베어링

Varolo(1772년)는 18세기에 마차용 베어링에 관해 흥미있는 설명을 하였다. 그는 베어링이 마

찰없이 작동하고 또 그리스의 필요성에 관해 다음과 같이 주장하였다. "의심할바없이 모든 기계에 필요한 동력은 볼 베어링을 사용하면 1/3로 줄어들고 무게가 무거울수록 더욱 줄어든다"

마차 뒷 차륜에 부착된 볼베어링에 관한 Varlo의 스케치를 그림 13에서 보여준다. 이 베어링으로 장착한 마차는 1772년 1100km를 여행한후에도 베어링이 별로 마모되지 않았음을 보여주었다.

그림 14에서는 깊은 홈에 볼이 굴을 수 있도록 만든 축에 관한 Vaughan의 볼 베어링에 관한 그림이다. A부분에서 베어링을 넣은 후 밀봉하였고 분리기나 틀이 없는 것이 특징이다.

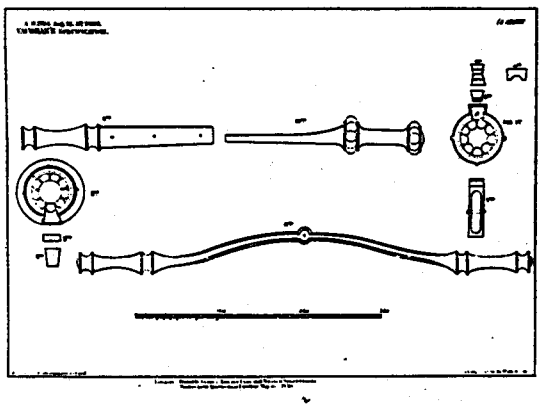

그림 14. Philip Vaughan의 마차 바퀴 뭉치에서 나무로된 축과 부속 장치 및 볼 베어링 (1749년)

6.2 풍향기

굴음베어링의 역사에서 풍향기는 중요한 기여를 했고 이것은 교회, 독립기념관등 건물의 꼭대기에 설치되었다(1770-1794년).

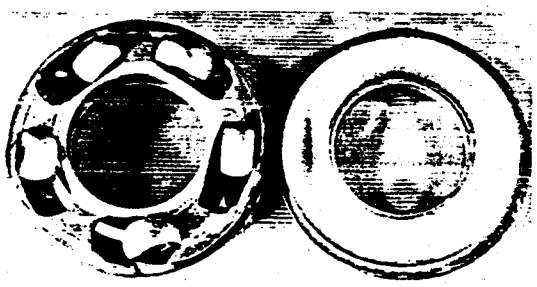

그림 15. 미국 독립 기념관의 풍향기에 설치한 초기 롤러 베어링

이들 풍향기는 구리로 된 롤러 트러스트 베어링에 의해 지지되었으며 독립 기념관에 설치된 베어링이 그림 15에서 보여주고 있다.

6.3 피터 대제의 기념비 건립

Carburi(1977년)는 피터 대제의 말을 탄 모습의 기념탑을 만들기 위해 길이 12.8m, 폭 8.2m 그리고 높이 6.4m인 1360톤의 돌을 옮기는데 그림 16과 같은 베어링을 사용하였다. 이때 사용된 베어링은 직경이 5 inch(127㎜)로써 황동합금으로 만들었고 나무 레일위에 구리홈을 만들어 그 위로 굴러가도록 하였다.

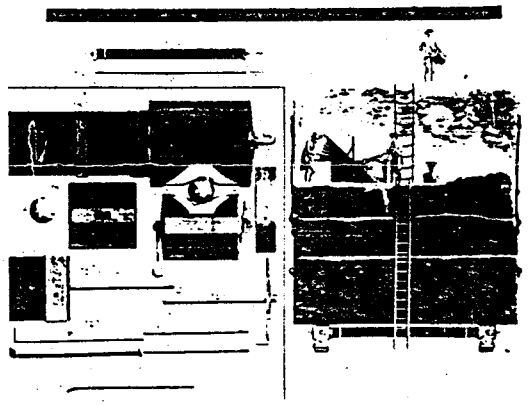

그림 16. 피터대제 동상을 만들기 위한 돌을 운반하는데 사용된 선형 볼 베어링 장치

6.4 놀으웨이의 풍차(1780년)

놀으웨이의 풍차인 Sprowston에 설치된 Post-mill에 붙어 있는 베어링이 그림 17에서 보여주고 있다. 링은 주철로써 내경이 0.61m 외경이 0.86m이며 직경이 57㎜인 볼 베어링이 40개가 들어있다.

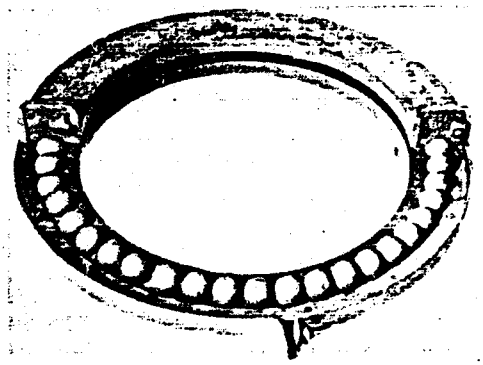

그림 17. Sprowston 풍차에 정착한 볼 베어링

6.5 굴음 마찰에 관한 연구

1780년에 쿠롬(Coulomb)이 제출한 논문에 의하면 굴음 마찰은 하중에 비례하고 미끄럼 마찰보다 훨씬 적으며 롤러의 반경에 반 비례한다고 결론을 내렸다. 1839년에 Dupuit는 구름의 마찰과 하중과의 관계에는 쿠롬 이론에 동의하였으나 단지 굴음마찰이 회전체 직경의 제곱근에 역비례한다고 주장하였다. 이것은 현재의 이론과 비슷하다.

7. 정밀 볼 베링의 탄생

굴음 베어링의 현재와 같은 형태는 1850—1925년 사이에 만들어 졌다. 그후에 설계, 제작 및 분석등의 세련이나 정교함은 20세기 중반에 이루어지게 되었다.

일반적인 산업에의 응용은 닻을 감는 기계, 축음기, 차축, 철도차량, 방앗간, 제재소, 분세기, 기중기, 선박 추진축, 왕복엔진의 베어링 등 수없이 많다. 그러나 볼 베어링의 발전을 실제로 자극한 것은 하찮은 자전거의 개발에서 부터 나왔다.

7.1 자전거 베어링

자전거의 역사는 19세기 이전으로 거슬러 올라가지만 평면 베어링의 심한 마찰 때문에 제한된 성능을 가지므로 크게 관심을 끌지 못했다. 자전거에서 볼 베어링의 첫 특허는 1862년 5월 16일 Thirion에 의해 출원되었고 그후 바퀴의 통(hub), 페달장치나 핸들 부위에 많은 실험적 연구가 영국이나 프랑스에서 진행되었다. 그림 19는 영국에서 바퀴의 볼베어링에 관한 특허 출원 횟수를 나타낸 것으로 19세기 후반에 가장 활발하였음을 보여준다. 이때 성능이 향상된 볼 베어링 덕분으로 마찰은 초기보다 1/5에서 1/10까지 감소되었고 이것은 매우 중요한 발전이었다. 따라서 최고 속도는 증가되고 유럽에서 자전거의 인기는 크게 높아지게 되었다.

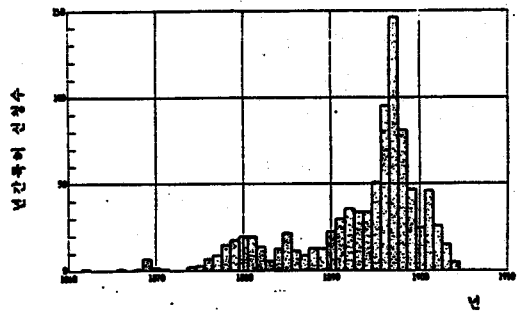

그림 18. 자전거용 볼 베어링에 관한 영국에서의 특허 신청

7.2 베어링의 재료와 제조

초기에는 주철로 만들었으나 너무 여리모로 다른 재료를 추구하게 되었다. 특히 소성변형이나 피로 저항이 강한것이 요구되어 특수강의 개발이 필요하게 되고 20세기 초에 재료 과학 발전에 많은 기여를 하였다. 볼의 제조는 초기에는 주물이나 긴 철봉등을 깍아 만들었고 선반작업에서 상당한 기술이 필요하였다.

수요가 늘자 작은 것은 강철 철사나 봉에서 냉간 절단과정으로 큰 것은 열간 단조과정으로 만들고 모서리나 긁힘같은 것은 연마과정을 거쳐 제조된다. 1890년대는 ±25㎛m의 정밀도를 갖었다가 1892년에 절반으로 줄었으며 현재는 특수베어링 등 요구 수준에 맞는 모든 베어링을 생산하고 있다.

7.3 정밀 볼 베어링 회사의 출현

첫 베어링의 제조회사는 1890년대 자전거용 베어링 생산을 위해 Barret의 이름을 가진 영국사람이 Preston Davis 베어링 주식회사를 설립하면서 시작하였으나 기술부족으로 미국 Hoffmann과 함께 Hoffmann회사를 1889년 다시 설립하였고 그림 19과 같은 선반으로 1908년에는 하루 100만개 이상의 볼을 생산하였다.

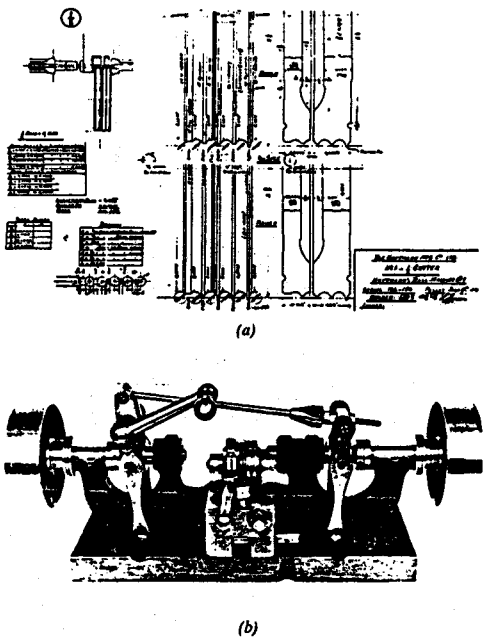

그림 19. Hoffmann볼 베어링 제작 기계(선반)

스웨덴에서는 Sven Wingquist가 베어링 결함을 개선시키기 위하여 그림 20과 같은 자기 정렬 베어링을 만들면서 SKF회사를 1907년에 설립하여 세계 각지에서 생산공장을 갖는 등 크게 번창하였다.

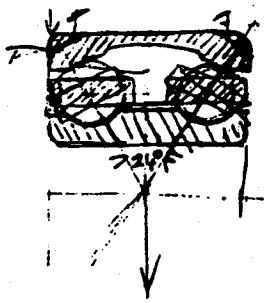

그림 20. Sven Wingquist의 혁명적인 2열 자기 정력형 볼 베어링의 첫 스케치

또 미국에서는 1898년 Timken Roller베어링 회사가 설립되었다. 1차 대전때 독일에서 Ransome & Marles베어링 회사가, 1911년에는 미국에서 특수 베어링 회사인 Fafnir 베어링 회사가 설립되었고 일본에서는 1916년 Nippon Seiko 베어링 회사가 설립되었다.

8. 볼 및 롤링 베어링의 접촉 기계학에 관한 연구

8.1 접촉 기계학

독일 Hertz라는 과학자는 23세 때인 1881년에 유명한 논문인 접촉 응력에 관한 연구결과를 발표하였다. 하중이 가해진 두개의 임의 형태를 가진 탄성 물체 사이에서 생겨나는 타원형의 접촉 변형의 변화와 접촉응력에 관한 Hertz(헬츠)의 수학적 표현은 볼 어링의 접촉 응력 해석에 기본이 된다.

8.2 볼 베어링의 연구

볼 베어링의 연구에서 Stribeck은 베어링 안전 하중이 소성변형 정도에 의해 좌우된다고 보았고 또 한계 하중은 베어링 볼의 직경 자승에 비례한다는 것을 발견하였다.(1910년).

Goodman은 베어링의 안전 하중의 능력이 속도증가에 따라 감소하고 반복응력에 의한 피로현상에 관한 연구를 하였으며 Stribeck의 수명 예상식에서 구한 베어링 안전 하중의 크기보다 상당히 감소되어야 함을 발견하였다.

8.3 굴음 마찰

굴음 마찰은 미끄럼 마찰보다 작지만 항상 존재한다. 굴음 마찰 저항의 성질은 많은 연구의 대상이었고 1875년 Reynolds는 굴음 과정에서 일어나는 국부적인 미끄럼 현상이 마찰 저항의 원인으로 결론을 내렸다. 1921년 Heathcote는 Hertzion 접촉에서 두 선은 미끄럼이 존재하지 않고 접촉선에서 서로 반대방향으로 상호 미끄럼이 일어난다고 주장하였다.

현재에는 윤활없는 굴음에서 회복현상(응력을 받았다가 원래로 되돌아 옴)이 더 중요한 역할을 하는 것으로 보고 있다. 그러나 모든 베어링은 윤활이 되고 이 경우에 탄성유체 윤활작용이나 유체 점성 저항 등이 굴음 저항의(마찰)원인으로 보고 있다.

9. 결 언

볼 베어링은 간단하지만 매우 용도가 넓고 정교하게 만들어진다. 현재는 20세기 기술의 산물로 보고 있으나 수백 혹은 수천년의 역사를 갖고 발전된 것이다. 그 개념은 로마시대에 시작되었다가 중세동안 사라졌었고 르네상스 시대에 다시 회생되었으며 17-18세기에 점진적인 발전이 이루어져 산업혁명 시절에 운반 기구의 베어링의 확고한 위치를 차지하였다.

19세기말 자전거를 위한 볼 베어링의 발전이 정밀한 볼 베어링의 생산을 촉진시켰고 처음에는 선반으로 만들다가 20세기에 들어오면서 재료개발과 함께 연마기술에 힘입어 대량 생산하는 제작 회사의 출현을 보게 되었다.

20세기에서 볼 베어링의 발전은 주로 재료와 제조기술의 발달과 함께 수명증진에 관심이 집중되었다. 또 베어링 기계학의 관점에서 분석도 최근에 상당히 향상하였고 그중 중요한 발달은 점접촉에서 탄성 유체 윤활의 연구에 의해 이론적인 결과를 볼 베어링 윤활 해석에 직접 이용할 수 있게 된 것이다.

적절한 윤활관리로 에너지절감효과 높입시다.

윤활유의 올바른 사용으로 기계수명 연장합시다.