

제조 공정에 따른 베어링메탈의 결함발생 및 피로파괴거동

Defect Genesis and Fatigue Failure Behaviour of Bearing Metal in Manufacturing Processes

김민건*
Kim, Min-Gun

Abstract

A study has been made on defects which are formed in manufacturing processes of engine bearing and also on fatigue crack growth behavior in each step of bearing metal manufacturing. After the first step (sinter brass powder on steel plate ; Series A) many voids are made on brass surface and its size is decreased at the second step (rolling process of sintered plate ; Series B). After the third step (re-sintering step of brass powder and rolling ; Series C) the number of voids is decreased and its type shows line. The time of fatigue crack initiation and the growth rate of fatigue crack are in order of Series A, Series B, Series C. These reasons are that void fosters the crack initiation and growth, and residual stress made by rolling process affects on the crack growth rate in Series B, C. In forming and machining processes by use of final bearing metal, crack was observed at internal corner of flange and peeling off was observed at interface between steel and brass. Owing to the above crack and peeling off, it is considered that there is a possibility of fatigue fracture during the application time.

키워드 : 엔진베어링, 피로균열전파, 제조공정, 결함

Keywords : engine bearing, fatigue crack growth, manufacturing process, defect

1. 서론

엔진베어링은 사용 도중에 피로파괴를 일으키는 일이 가끔 있으며, 또한 사용 전이라도 내부에 발생한 결함 때문에 불량처리 되는 일이 있다. 이것은 베어링 메탈의 제조 및 성형으로 이어지는 일련의 처리공정에서 발생한 결함이 사용중 피로균열으로 발전하거나 부적절한 처리공정으로 인하여 크게 확장하기 때문이다.

엔진베어링용 강-황동 베어링 메탈의 제조과정은 다음 세 가지 공정으로 이루어진다.

제 1공정 : 강판에 황동파우더를 소결한다.

(시험편 명칭 : Series A)

제 2공정 : 소결한 판을 압연한다.

(시험편 명칭 : Series B)

제 3공정 : 압연한 판에 황동파우더를 2차로 소결하고 압연한다. (시험편 명칭 : Series C)

그리고 성형공정은 다음 3가지 공정으로 이루어진다.

제 1공정 : 베어링 메탈을 프레스로 반원형으로 벤딩 한다.

제 2공정 : 양단에 플랜지를 성형한다.

제 3공정 : 기계가공으로 여분의 살을 제거한다.

이상과 같은 공정에서, 각 공정마다 미소한 결함들의 발생 가능성이 예상된다. 이러한 각 단계에서 발생한 결함들은 베어링의 내구성에 당연히 영

* 강원대학교 기계의용공학과 교수, 공학박사, 책임저자

향을 미칠 것으로 생각된다. 그러나 여기에 대하여 체계적으로 고찰된 연구는 찾아보기가 어렵다.

강석춘[1]의 엔진베어링의 마모특성에 관한 연구와 오성환[2]의 베어링에 대한 응력해석의 연구가 있고, 옥순영[3]의 베어링메탈의 기계적 성질에 따른 피로수명을 고찰한 연구가 있으나, 베어링메탈의 제조공정에 따른 결합발생이 피로특성에 미치는 영향에 관하여 조사된 연구는 없으며, 또한 결합제어를 위한 연구노력이 기업 자체에서 이루어진 바도 없다.

따라서 본 연구에서는 제조 및 성형의 각 단계에서의 결합발생 메커니즘, 결합의 분포, 결합의 형상 등의 제반사항을 조사함과 아울러, 형성된 결합이 각 공정마다 어떻게 변화하며 또한 실제 사용 중에 어떻게 피로균열로 발전하는가를 상세히 조사하고자 한다. 나아가서, 이렇게 조사된 결과를 바탕으로 하여 결합을 어떻게 제어할 것인가에 대한 방안도 제시하고자 한다.

2. 시험편의 준비 및 실험방법

본 실험에 사용한 강관(두께=2mm)은 자동차 엔진 베어링에 널리 사용되고 있는 KS D 3512 SCP 1종이며, 화학성분과 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 제조 공정별로 시험편을 제작하였으며, 시험편의 형상은 그림 1과 같다. 시험편 한쪽 가장자리에 길이 2mm의 슬릿을 와이어 컷 가공으로 도입하였으며, 시험부를 연마한 후 Alumina Powder로 버핑하였다. 피로시험은 유압서보식 피로시험기를 사용하여 응력 120MPa, 응력비 R=0.1, 30Hz에서 실시하였다.

표 1 화학성분 및 기계적 성질, KS D 3512 SCP1

Chemical composition, wt%	C	Mn	P	S	Si
	0.12	0.5	0.040	0.045	0.35
Mechanical properties	Ultimate Strength, MPa	Yield Strength, MPa	Elongation, %	Hardness, (HR30T)	
	300<	180<	25<	65>	

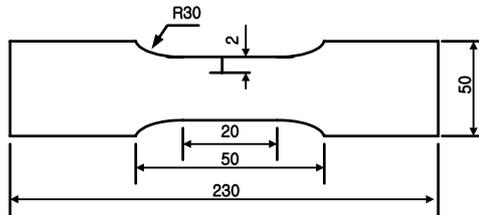


그림 1 시험편의 형상, mm

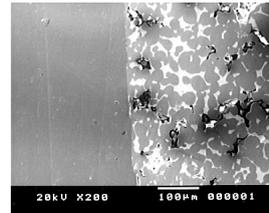
3. 실험결과 및 고찰

3.1 제조공정에 따른 접합부 및 황동소결층의 변화

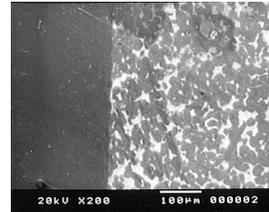
(1) 강-황동 베어링메탈 내부상태의 고찰

강-황동 베어링 메탈에서, 강-황동 접합부의 각 공정에 따른 조직상태를 그림 2의 (a), (b), (c)에 나타내었다. (a)는 제 1공정의 상태로, 즉 강관에다 황동분말을 1차 소결한 시료의 경계면 사진으로, 왼쪽조직이 강이다.

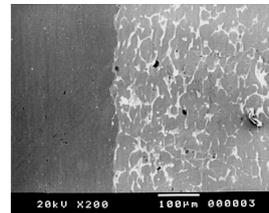
(b)는 제 2공정의 상태로, (a)를 압연한 후의 경계면을 보여주고 있다. (c)는 제 3공정의 상태로, (b)를 2차 가열 소결하고 압연한 것이다. (a)를 보면, 강관 위에 1차 소결된 황동의 조직상에 편상의 결합들이 다수 분포하고 있음을 알 수 있다. 그 결합들의 평균길이는 약 0.1 mm 이다. 따라서, 제 1공정의 상태로는 베어링 메탈로서 부적합하여, 사용 중에 편상결합을 기점으로하는 피로균열이 발생할 가능성이 매우 크다.



(a) Series A



(b) Series B



(c) Series C

그림 2 각 공정에 따른, 강-황동 접합부 및 내부상태의 변화

접합경계부에는 결합이 발견되지 않으며, 접합라인은 직선상을 보이고 있다. (b)를 보면, 편상결합들이 압연에 의하여 거의 소멸되어 있다. 따라서, 압연공정은 황동조직에서 결합을 제거하는 유효한 방법임을 알 수 있다. 접합라인은 (a)와 별반 다르지 않는 직선상을 유지하고 있다. (c)를 보면, 2차 소결에 의하여 조직상에 달라진 점은 없으나, 주목할 점은 접합라인이 직선상에서 곡선상으로 변화했다는 점이다. 이것은 2차 소결에 의하여 강-황동 경계면이 서로 융착하면서 조직의 이동이 있었기 때문이라 생각된다. (a)의 1차소결에 의해서도 융착이 일어나겠지만 불충분하며, 2차소결에 의해서 비로소 가시적인 조직의 이동 및 확산이 이루어졌다고 볼 수 있다. 이러한 곡선상의 접합라인은, 접합면의 면적을 증가시켜 접합력을 상승시키는 효과를 거둘 수 있다. 이 사실은, 통상 이중 접합재의 파괴가 접합면의 분리로부터 야기되는 것이 대부분이라는 점을 고려한다면, 제 3공정이 베어링메탈 제조상 중요한 공정이라는 점을 말해주고 있다.

이상의 결과를 종합하면, 최종 공정을 거친 강-황동 베어링메탈의 경계면을 포함한 내부에는, 사용도중 피로균열발생의 핵이 될만한 유의 결합은 존재하지 않으며, 특히 제 3공정은 접합면의 접합강도 향상에 이바지하고 있다고 할 수 있다.

(2) 베어링 메탈 표면상태의 고찰

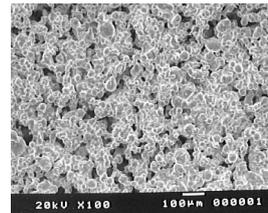
그림 3의 (a), (b), (c)에, 각 공정에 따른 강-황동 베어링메탈의 황동 표면층의 사진(배율100배)을 제시하였다. 또한, 자세한 관찰을 위해서 그림 4의 (a), (b), (c)에 확대사진(배율500배)을 제시하였다.

그림 3의 (a), 그림 4의 (a)로부터, 제 1공정 상태의 황동표면에는 황동입자 사이에 크고 작은 수많은 공동(micro void)들이 존재함을 알 수 있다. 그 보이드의 크기는 내부 보이드보다 더 큰 0.1mm를 넘는 것도 다수 관찰된다. 이것은 보이드 팽창의 구속이 강한 내부보다 약한 표면층에서, 공동의 팽창이 용이했기 때문이라 생각된다.

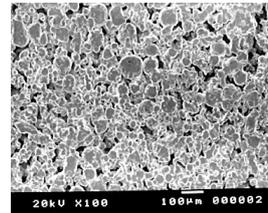
그림 3의 (b), 그림 4의 (b)로부터, 제 1공정에서 형성된 보이드들은 압연에 의해서 그 크기가 작아지는 한편, 그 형상이 선상화하고 보이드 선단이 첨예화(sharpening)하는 경향을 보이고 있다. 이것은 압연에 의하여 보이드가 변형한 때문이며, 보이드 변형에 압연의 방향성은 뚜렷하지가 않다. 따라서 압연의 방향은, 파괴역학적으로 안전한 베어링메탈 제조라는 관점에서 별로 유의하지 않아도 된다고 할 수 있다. 그런데 보이드의 형상이 선상 내지는 첨예화한다는 사실은 파괴역학적으로 중요한 의미를 지닌다. 보이드(제 2공정 후부터는 보이드라 하기보다는 결합이라고 부르는게 마땅함)로부터 피로균열이 발생할 역학적 상황은 결합의 길이와 결합선단의 첨예정도에 의해서 좌우되기 때문이다.

즉, 압연에 의해서 보이드가 한 방향으로 변형하면서 그 길이를 증가시키고, 그 선단을 예리하게 하여 응력집중을 증가시키게 되면, 그 결합으로부터 용이하게 피로균열이 발생하게 될 것이다. 따라서, 제 2공정을 거친 베어링 메탈은 피로응력을 받는 엔진베어링 소재로는 부적합할 것으로 예상된다.

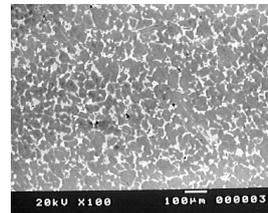
그림 3의 (c)를 보면, 제 3공정을 완료한 베어링 메탈에는 제 2공정 후에 관찰되었던 모든 결합들이 소멸한 것으로 보인다. 그러나 그림 4의 (c)의 확대사진을 보면, 제 2공정을 거친 결합들은 2차 소결처리에 의해서 극단적으로 선상, 첨예화되어 있음을 알 수 있다. 이것은 앞서 지적했듯이 피로 파괴의 측면에서 지극히 나쁜 결과를 초래할 수 있다. 즉, 결합이 선상화 되면 될수록, 그 선단이 첨예화하면 할수록, 그곳을 기점으로 하는 피로균열의 발생이 용이해지기 때문이다. 사진으로부터 또한 그 다수의 결합들은 서로 인접해 있음을 알 수 있다. 그러므로 한 결합에서 발생한 피로균열은 인접한 결합들과 연결 합체하면서 거시적 균열로 발전하게 되고, 최종적으로는 베어링을 파괴로 이끌 수 있다.



(a) Series A

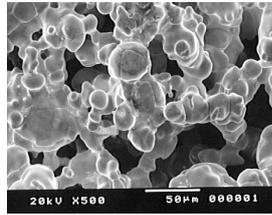


(b) Series B

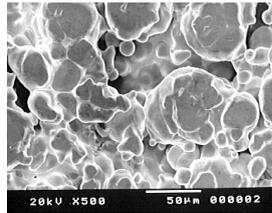


(c) Series C

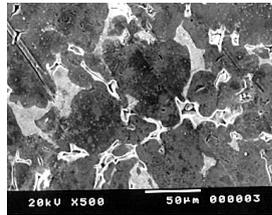
그림 3 각 공정에 따른, 베어링 메탈의 황동 표면상태의 변화 (저배율)



(a) Series A



(b) Series B

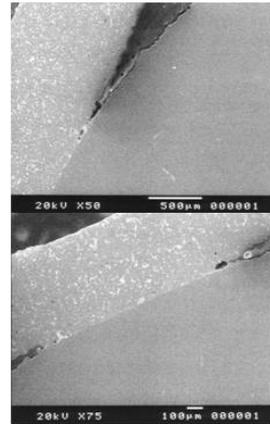


(c) Series C

그림 4 각 공정에 따른, 베어링 메탈의 황동 표면상태의 변화 (고배율)



(a) 플랜지 내면



(b) 플랜지의 외면
(강-황동 접합부)

그림 5 플랜지 성형 및 기계가공과정에서 발생한 결함

3.2 엔진베어링 성형과정에서 발생하는 결함

베어링 플랜지 성형과정에서 발생하는 결함을 그림 5의 (a), (b)에 보였다. (a)는 플랜지의 내면(슬라이드부)에 발생한 균열의 사진이고, (b)는 플랜지 외면의 사진으로서, 황동과 강 의 경계부분이 박리 되어 있음을 알 수 있다. a)로부터 플랜지 성형을 위한 수 차례의 프레스 과정에서 균열이 발생되어 있음을 알 수 있다. 균열은 정지과정의 흔적을 보이고 있으며, 또한 전파, 분지(branching)한 점으로 보아 프레스 공정 한 공정마다 균열이 전파했음을 알 수 있다. 이 균열은 베어링 사용 중에 플랜지의 피로파괴의 원인이 될 수 있다. 왜냐하면 플랜지 부분은 반복 추력 하중을 받는 부분이므로, 이 반복 하중에 의하여 균열은 전파를 할 수 있기 때문이다.

플랜지 성형 중에 결함 중에서 가장 치명적인 균열이 발생한다는 것은 매우 심각한 사항이다. 균열의 선단에는 아주 큰 응력집중이 생기기 때문에, 비록 추력이 작다 하더라도 사용 중 플랜지의 피로파괴는 면하기 어려울 것이다. (b)로부터, 플랜지 성형을 위한 프레스 밴딩과 여분의 살을 제거하기 위한 기계가공으로 인하여 플랜지 외면의 황동과

강의 경계부분은 박리를 일으키고 있음을 알 수 있다. 큰 소성변형을 수반하는 밴딩으로 인한 굽힘 응력과 기계가공시의 절삭저항으로 인하여 박리가 초래됐다고 볼 수 있다. 이러한 박리 역시 플랜지 파괴에 일조를 하게 될 것이다. 황동과 강 의 접합 부분을 따라 전파하던 박리에서 비롯된 균열이 황동 혹은 강 의 모재 쪽으로 침입해 올 가능성이 높다고 본다.

3.3 각 제조공정 후 채취한 시험편의 피로시험의 결과

(1) 피로균열 전파곡선의 관찰

제 1공정 후 채취한 시험편인 Series A, 제 2공정 후의 Series B 및 제3공정 후의 Series C에 대하여 실시한 피로균열 전파시험의 결과를, 각 Series의 균열 발생시기 및 전파속도를 비교하기 위하여, 그림 6에 각각 제시하였다. 엔진 베어링은 사용 중 반경 방향의 분포하중을 받게 된다. 그러면 베어링에는 이른바 hoop stress가 발생하게 되는데, 이 응력은 인장응력으로 반복하여 재료에 작용하게 된다. 따라서 본 실험에서와 같이, 소정의

응력으로 인장-인장피로시험을 수행하더라도 실제 상황과 거의 부합하게 된다. 그림 6으로부터, Series A는 아주 이른 시기($N=4E+04$)에 슬릿으로부터 피로균열이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 빠른 속도로 전파하여 $N = 1.7E+05$ 에서 파단에 이르고 있다. Series B의 파단 사이클수는 $N = 3.6 E+05$ 이고, Series C는 $N = 1.3E+06$ 으로, 예상대로 최종 공정을 거친 Series C에서 가장 긴 수명을 보이고 있다. 피로균열 발생시기는 Series A가 가장 빠르고 Series C가 가장 느리며, Series B가 그 중간임을 알 수 있다. 이것은 그림 4의 황동 표면 조직으로부터 알 수 있듯이, Series A의 큰 보이드가 피로균열 발생을 조장했기 때문이라 생각되며, Series B, Series C쪽으로 갈수록 표면 결함이 작아지고 감소함에 따라 피로균열발생의 난이도도 점점 커졌다고 볼 수 있다. 한편, 압연은 재료 내부에 압축 잔류응력을 발생시켜, 피로에 대한 저항성을 증대시키는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서, 압연과정이 포함된 Series B, Series C가 Series A보다 피로균열 발생에 대한 저항이 높으며, 여기에 조직의 원인이 복합적으로 작용하여 전술한 결과를 낳았다고 생각된다. 다음은, 슬릿에서 발생한 균열이 초기 10 mm까지 성장하는데 소요되는 사이클수(N)에서부터 초기 균열전파속도를 알아 낼 수가 있다. 그림 6로부터 초기 균열전파속도는 $\text{Series A} > \text{Series B} > \text{Series C}$ 임을 알 수 있다. 또한 중기 이후의 균열전파속도(da/dN)를 나타낸 것이 그림 7이다. 중기 이후의 균열전파속도도 $\text{Series A} > \text{Series B} > \text{Series C}$ 임을 알 수 있다. 균열전파속도도 균열발생과 마찬가지로 조직과 잔류응력의 영향을 받는다[4]. 그러므로 균열발생시기에서와 같이, 보이드가 크고 잔류응력이 없는 Series A에서 가장 빠른 균열전파속도를 보인 것으로 이해된다. 특히 균열길이 작은 초기 전파구간에서는, 균열의 전파가 조직과 잔류응력의 영향을 민감하게 받는 것으로 알려져 있다[4][5]. 따라서, Series A의 경우에는 발생한 균열이 인접한 보이드를 따라 전파하고, 또한 그 보이드의 크기가 상대적으로 크기 때문에, 그 전파속도가 Series B, Series C보다 상대적으로 빨랐다고 볼 수 있다. 이러한 조직민감성의 균열전파 경향은 균열길이가 10mm를 넘어서면서부터 희석되고 있는데, 그 원인은 균열의 길이가 증가함에 따라 응력 확대계수(K)가 커져서, 균열은 무차별적으로 조직에 둔감하게 전파하기 때문이다.

앞에서 압연에 의해서 보이드가 선상(線狀)화하고 그 끝이 첨예화함을 지적하면서, 이러한 사항은 장차 피로균열의 발생 및 전파에 악영향을 끼칠 수도 있을 것이라고 지적한 바 있다. 그러나 Series B, Series C의 결과가 보여주듯이, 이러한 사항들이 피로균열 발생 및 전파에 크게 영향을

주지는 못하는 것 같다. 그것은, 이러한 사항들이 황동 표면층에 국한되어 나타나는 현상이기 때문에, 피로균열 전파의 우선경로로서의 역할을 제대로 수행했다고는 볼 수 없기 때문이 아닌가 사료된다. 오히려 압연에 수반되는 압축 잔류응력의 출현이 상술한 악영향을 상쇄하고도 남아서, 궁극적으로는 피로에 더욱 강한 특성을 보인 것으로 이해된다. 그러므로 제 2, 3공정으로 이어지는 베어링 메탈의 제조공정은 파괴역학적인 관점에서도 매우 유익한 공정으로, 베어링 메탈의 내피로특성을 향상시키는 유력한 공정이라고 할 수 있다.

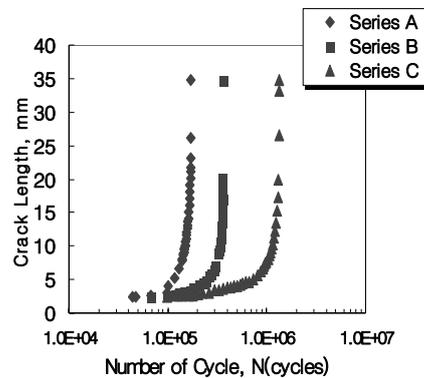


그림 6 각 Series의 피로균열 전파곡선

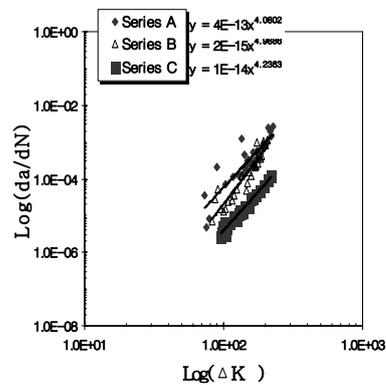
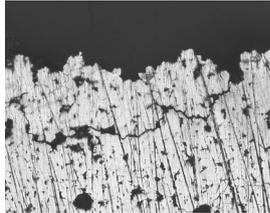


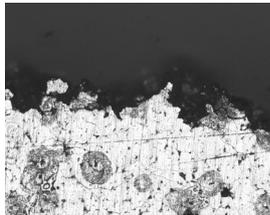
그림 7 중기 이후의 피로균열 전파속도

(1) 피로균열 전파경로의 고찰

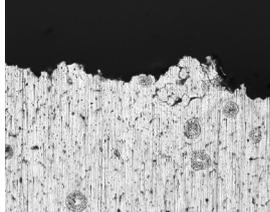
Series A, B, C의 피로균열 전파경로를 조사하기 위하여, 황동층 표면에서 촬영한 피로균열 파면의 측면 사진을 그림 8의 (a), (b), (c)에 각각 보았다. 이 균열사진들은 슬릿으로부터 5mm이내의 전파초기에서 촬영된 것이다. 따라서 앞서 지적했듯이, 균열들은 조직에 민감한 전파양상을 보일 것으로 예상된다.



(a) Series A(×100)



(b) Series B (×100)



(c) Series C (×100)

그림 8 피로균열의 전파경로를 보여주는 균열의 측면사진

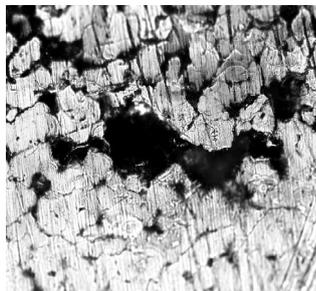


그림 9 황동표면에 보이드가 힘을 받아 팽창하는 모습

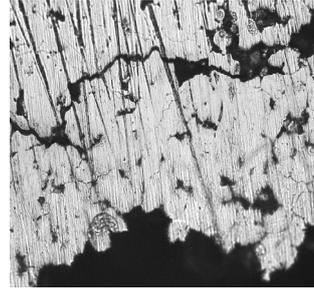


그림 10 피로균열이 팽창한 보이드를 따라 전파하고 있는 모습 (파면 윗 부분 균열)

Series A의 그림 8(a)로부터 균열경로는 거시적 미시적으로 톱니의 형상을 띄고 있으며, 이러한 경향은 Series B (b), Series C (c)쪽으로 갈수록 약화되어, Series C에서는 요철이 거의 사라지고 있다. 균열경로에 요철이 심하다는 것은, 조직의 영향을 많이 받아서 조직 중 응력집중부(여기서는 보이드, 결함)를 선택적으로 전파했다는 증거인 것이다. 황동층에 보이드가 가장 많고 또한 그 크기가 가장 큰 Series A에서 요철이 제일 심한 것은 이런 맥락에서 이해될 수 있다. 따라서, 베어링 메탈 제조과정 중에 형성되는 결함류(보이드, 선상결함, 미소 균열, 비금속 개재물 등)들은 피로균열 전파를 용이하게 하는 경로를 제공한다고 할 수 있다. 그러므로 제조공정은 이러한 결함을 줄여나가는 공정이 되어야 하고, 이런 점에서 본 베어링 메탈의 제조 공정은 적절하다고 하겠다. 다음은, 보이드가 균열의 우선 경로가 되는 과정을 좀더 자세하게 고찰해 보았다. 균열이 전파할 때 균열전방의 조직들은 집중된 응력을 받게 되는데, 이때 조직 중에서 보이드가 우선적으로 팽창한 상황을 그림 9에 나타내었다. 이렇게 팽창한 보이드는 바로 균열의 우선 경로가 됨은 두말 할 필요가 없다. 이렇게 하여 피로균열이 보이드를 따라 전파한 모습을 그림 10에서 확인할 수 있다.

4. 결론

(주) 베스트 메탈위크에서 수행하고 있는 강-황동 베어링메탈의 각 제조공정에 따르는 황동층의 결함상태, 베어링메탈로부터 베어링이 성형되는 과정에서의 결함 발생에 대하여 고찰하였다. 또한 각 공정마다 시험편을 채취하여 피로시험을 수행함으로써, 제조 및 성형과정에서 발생한 결함들이 베어링메탈의 피로거동에 어떻게 작용하는지에 대하여 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 최종 공정을 거친 강-황동 베어링메탈의 접합면에는 사용도중 피로균열발생의 핵이 될만한 유의결함은 존재하지 않으며, 특히 2차 소결, 압연

에 의하여 접합라인이 곡선화하면서 접합면의 면적을 증대시켜, 두 금속 사이의 접합력을 상승시키는 효과를 거두고 있다.

2) 제 1공정에서 발생한 황동 표면층의 보이드들은 제 2공정에 의해서 그 크기 및 수가 감소하며, 제 3공정에 의해서 선상화(線狀化)한다.

3) 베어링 성형 및 기계가공과정에서 플랜지의 내면에는 균열이, 외면에는 황동과 강 접합면에 박리가 관찰되었다. 이러한 것들은 사용중 플랜지를 파괴로 이끌 가능성이 크다.

4) 피로균열 발생시기는 Series A가 가장 빠르고 Series C가 가장 느리며, Series B가 그 중간임을 알 수 있다. 이것은 Series A의 큰 보이드가 피로균열 발생을 조장했기 때문이라 생각되며, Series B, Series C쪽으로 갈수록 표면결합이 작아지고 감소함에 따라 균열발생의 난이도가 증가한 결과라 생각된다. 또한 압연과정이 포함된 Series B, Series C가 Series A보다 피로균열 발생에 대한 저항이 높은 것도 그 원인의 하나이다.

5) 균열전파속도는 Series A > Series B > Series C 의 순이었다. 균열전파속도도 균열발생과 마찬가지로 조직과 잔류응력의 영향을 받는다. 그러므로 균열발생시기에서와 같이, 보이드가 크고 잔류응력이 없는 Series A에서 가장 빠른 균열전파속도를 보인 것으로 이해된다.

6) 제 3공정에 의해서 보이드가 선상(線狀)화하고 그 끝이 첨예화하는데, 이러한 사항들은 피로균열의 발생 및 전파에 크게 영향을 주지는 못하는 것 같다. 오히려 압연에 수반되는 압축 잔류응력의 출현이 악영향을 상쇄하고도 남아서, 궁극적으로는 피로에 더욱 강한 특성을 보이게 한다. 그러므로 제 2, 3공정으로 이어지는 베어링 메탈의 제조공정은 파괴역학적인 관점에서도 매우 유익한 공정으로, 베어링 메탈의 내(耐)피로특성을 향상시키는 유력한 공정이라고 할 수 있다.

7) 베어링 메탈 제조과정 중에 형성되는 결합(보이드)은 피로균열 전파를 용이하게 하는 경로를 제공한다. 그러므로 제조공정은 이러한 결합을 줄여나가는 공정이 되어야 하고, 이러한 관점에서 본 베어링 메탈의 제조 공정은 적절하다고 하겠다.

참 고 문 헌

[1] 강석춘, “자동차 엔진베어링에 관한 고찰”, 한국자동차공학회 학술강연초록집, pp. 1-13, 1984.
[2] 오성환, “디젤엔진의 베어링 설계”, 한국자동차공학회 학술강연초록집, 4, pp.45-55, 1986.
[3] 옥순영, “베어링용 재료의 피로수명에 영향을 주는 재료적 요인과 최근의 주요 기술 동향”,

베어링기술, 15, pp.93-96, 1994.

[4] 石橋, “金屬の疲勞と破壊の防止”, 養賢堂, pp.162, 1967.
[5] 本田, 鳥居, “き裂材の疲勞き裂進展に及ぼす殘留應力場の影響”, 材料, 31-348, pp. 908, 1981.
[6] 本田, 鳥居, 態澤, “層狀不均質性と初期殘留應力を分離する立場からみた疲勞き裂進展舉動”, 日本機械學會論文集, 47-416, pp.376, 1981.