



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



工學碩士 學位論文

선박용 대형저속 디젤엔진용 화이트 메탈 베어링 본딩력 검증에 관한 연구

A study on verification of bonding strength of white metal bearing applicable to large sized slow speed diesel engine

指導教授 趙 權 回



2012年 6月

韓國海洋大學校 海事產業大學院

機關시스템工學科

文 炳 喜

工學碩士 學位論文

선박용 대형저속 디젤엔진용 화이트 메탈 베어링 본딩력 검증에 관한 연구

A study on verification of bonding strength of white metal bearing applicable to large sized slow speed diesel engine



指導教授 趙 權 回

2012年 6月

韓國海洋大學校 海事產業大學院

機關시스템工學科

文炳喜

本 論文을 文炳喜의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 崔 在 星 (印)

委 員 金 宗 箔 (印)

委 員 趙 權 回 (印)



2012年 6月

韓國海洋大學校 海事產業大學院

목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 내용 목적 및 내용	4
제 2 장 선박용 베어링	6
2.1 메인 베어링	6
2.2 베어링의 필요조건	7
2.3 베어링 메탈의 재료	7
2.3.1 주석계 화이트 메탈	8
2.3.2 납계 화이트 메탈	10
2.3.3 Cu계 베어링 합금	11
2.3.4 카드뮴계, 아연계 합금	11
2.3.5 함유 베어링	11
2.4 메인 베어링의 손상	13
제 3 장 베어링 접착력 검사 및 시험	16
3.1 화이트 메탈 베어링 제작기법	16
3.2 재료의 확산	17
3.3 접착력 검증 방법	21
3.3.1 결합력 확인을 위한 파괴검사	21

3.3.2 비파괴 검사	23
제 4 장 실험 결과 및 고찰	30
4.1 파괴 검사 결과	30
4.2 미세구조 분석	32
4.3 초음파 탐상 검사	43
제 5 장 결론	49
참 고 문 헌	50



– Table List –

Table 2.1 Standard for white metal	4
Table 2.2 Chemical composition of oil lite bearing	12
Table 3.1 Welding Parameter	17
Table 3.2 Basic formula for ultrasonic principle	28
Table 4.1 Bonding strength of casting and welding	30



– Figure List –

Fig. 1.1 Example taken from a main bearing	3
Fig. 1.2 Dove tail	3
Fig. 1.3 White metal breakout during operation	4
Fig. 2.1 Split bearing	6
Fig. 2.2 Micro structure of white metal(HM07)	9
Fig. 2.3 Micro structure of white metal(11R)	9
Fig. 2.4 Micro structure of white metal(S172)	9
Fig. 2.5 Micro structure of white metal(WJ2)	9
Fig. 2.6 Linear flaw on bearing surface	14
Fig. 2.7 Surface flaw by improper lubrication	14
Fig. 2.8 Cavitation marks	15
Fig. 2.9 Damaged by embedded foreign particle	15
Fig. 3.1 Process flow of casting	16
Fig. 3.2 Process flow of auto-welding	16
Fig. 3.3 TIG welding machine for white metal	17
Fig. 3.4 Diffusion area of Sn & Fe before heat treatment	19
Fig. 3.5 Atoms of Sn and Fe in diffusion before heat treatment	19
Fig. 3.6 Diffusion area of Sn & Fe after heat treatment	19
Fig. 3.7 Atoms of Sn and Fe in diffusion after heat treatment	19
Fig. 3.8 Concentration of Sn and Fe by diffusion	20
Fig. 3.9 Equilibrium diagram of welding diffusion	20
Fig. 3.10 Test specimen for Charmel test	22
Fig. 3.11 Test equipment for Charmel test	22
Fig. 3.12 Penetrant testing	26

Fig. 3.13 Near Field Zone	29
Fig. 4.1 Test specimen(before)	31
Fig. 4.2 Test specimen(after)	31
Fig. 4.3 Test specimen(sampling position and design of specimen)	33
Fig. 4.4 Test specimen(cross sectional field)	33
Fig. 4.5 Cross sectional view of A-2 micro structure	34
Fig. 4.6 General view of A-2 micro structure	35
Fig. 4.7 General view of B-2 micro structure	36
Fig. 4.8 Cross sectional view of B-2 micro structure	37
Fig. 4.9 Micro structure of A-2(un-etched)	38
Fig. 4.10 Micro structure of A-2(etched)	39
Fig. 4.11 Micro structure of B-2(un-etched)	40
Fig. 4.12 Micro structure of B-2(etched)	41
Fig. 4.13 SEM image and EDS analysis of B-2	42
Fig. 4.14 Mechanized UT testing(good bonding)	44
Fig. 4.15 Mechanized UT testing(good bonding)	44
Fig. 4.16 Sectional views showing a large crack formed just above the bond layer(a)	45
Fig. 4.17 Sectional views showing a large crack formed just above the bond layer(b)	45
Fig. 4.18 UT Apparatus USM 35	46
Fig. 4.19 Probes, MB4S and MSEB4	46
Fig. 4.20 Reflected echo of straight beam from bottom	47
Fig. 4.21 Decreased echo by small defect	47
Fig. 4.22 Reflected Echo by dual probe	48
Fig. 4.23 2mm Crack found by dual probe	48

A study on verification of bonding strength of white metal bearing applicable to large sized slow speed diesel engine

Byung - Hee Moon

Department of marine system engineering graduate
school of maritime industrial study,
Korea Maritime National University Busan, Korea

(supervisor : Prof. Kwon - Hae CHO)

Abstract

Recently domestic heavy industries, shipbuilding companies become to be interested in a developing long life cycle for the vessel and marine structures with effective maintenance rate and endurance properly. Especially, bearing requires special bonding strength control because they tend to be exposed to extreme harsh environment during engine operation. Most of the main bearing are bonded with white metal through centrifugal casting method so far for optimized a mechanical and chemical property and condition for engine operation.

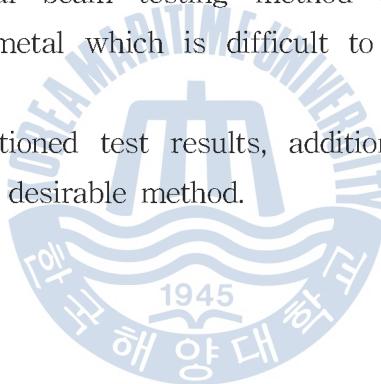
However, bearing manufacturers have to improve their manufacturing process of white metal bearing satisfying customer's delivery requirement and also more economical way. Currently welding method for matching those requirements is underdeveloped and it can make shorter process steps of manufacturing white metal bearing; however, as a special character of welding method, the soundness of bonding layer between

white metal and base metal needs to be verified by specific testing and inspection methods.

In this study, mainly the improvement of testing and inspection methods which has not been applied to engine makers' requirement yet are focused. In addition, this study intends to give a direction of optimized testing method to improve the detecting level of internal indications as void and crack.

At first, Charmel test according to ISO4386-2 is chosen to check bonding strength of white metal lining. Additionally, micro structure, metallic composition are implemented to refine the characteristic of internal condition of the layer of white metal and base metal. Finally Non Destructive Testing, Ultrasonic Testing is conducted with additional testing method as Dual beam testing method to detect sub-surface induction in the white metal which is difficult to be found by straight beam itself.

Based on above mentioned test results, additional testing method of Dual beam is applied as desirable method.



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

선박 주기관이나 육상용 발전기로 널리 이용되고 있는 최근의 대형저속 디젤 엔진의 배어링은 정비유지, 내구성 향상, 고하중에서의 윤활성능의 개선을 목적으로 배어링 메탈과 하우징을 별도로 분리하여 제작, 가공할 수 있는 박판형 메탈 배어링을 일반적으로 채용하고 있다. 종래에는 배어링 메탈과 하우징을 일체로 주조하여 제작되는 후판형 배어링을 많이 사용하여 왔으나 연료유의 저질화, 기통당 출력증가, 저속화 추세에 따라 배어링의 내구성과 정비유지를 크게 개선시키기 위해 최근에 개발되고 있는 대형엔진에서는 박판형을 채용하고 있다. 이와 같이 박판형 배어링은 대형 디젤엔진이나 터빈의 가장 중요한 핵심 부품의 하나이다.

박판형 배어링의 메탈은 중소형 엔진의 경우 메탈두께가 배어링 외경의 1/30 ~ 1/20 정도 이지만 대형엔진의 경우 1/30 이하이고 치수가 크다. 따라서 원심주조, 표면처리 및 제작 조립이 매우 어렵고 양호한 윤활상태를 유지하기가 어려워서 내구성 문제로 사용을 기피하여 왔으나, 성능이 우수한 화이트 메탈과 표면처리 도금액의 공급이 가능하고 정밀제작 또는 설계기술의 발달로 1990년대 초부터 실용화가 가능하게 되었다.^[1]

저널 배어링은 연소압력과 크랭크 기구의 복잡한 동력학적 하중을 받으면서 마찰열이나 윤활유에 혼입된 이물질이 존재하여도 적절한 유막을 형성하여 회전축과 배어링이 접촉하지 않고 축의 하중을 지지하고 저널과 배어링의 손상을 방지할 수 있어야 한다. 저널 배어링을 기능별로 분류하면 크랭크축의 저널을 지지하는 메인베어링, 연접봉과 크랭크 펀을 연결하는 크랭크 펀 베어링, 피스톤과 연접봉을 연결하는 크로스헤드 펀 베어링 및 가이드 슈 베어링과 추력을 지지하는 스러스트 베어링을 들 수 있다.

최근에 들어와 각 선박용 엔진 메이커에서 화이트 메탈과 베이스 메탈의 접착력 향상으로 인해 접착면의 도브 테일(Dove tail)¹⁾ 을 삭제하고 제작

1) 베이스 메탈과 화이트 메탈의 접착력을 보증하기 위하여 베이스 메탈에 그루브를 만드는 작업

할 수 있도록 설계를 변경하였다.

이로 인해 각 베어링 제조사는 베어링에 화이트 메탈의 본딩 방법이 계속적으로 개발되었으며 기존의 중력 주조 및 원심 주조법 외에 용접으로 화이트 메탈을 접합 시키는 방법이 개발되어 주조법에서 요구되는 라이닝 전처리 공정에 따른 시간 및 비용 측면에서 상당히 효율적인 결과를 얻었지만 특수공정인 용접법²⁾에 따른 예상되는 결함 및 접착력의 보증을 위한 파괴 검사 및 비파괴 검사의 개선 방안의 수립이 요구되었다.



2) 용접법에 의한 화이트 메탈 본딩 방법은 개발단계이며, 현재 까지는 MAN, Wartsila 선박용 엔진에 적용되지 못하고 있다.

Fig.1.1은 도브 테일의 신,구 디자인에 의한 형상을 보여주고 있다. Fig.1.2는 실제 도브 테일의 모습을 사진으로 보여주고 있다.

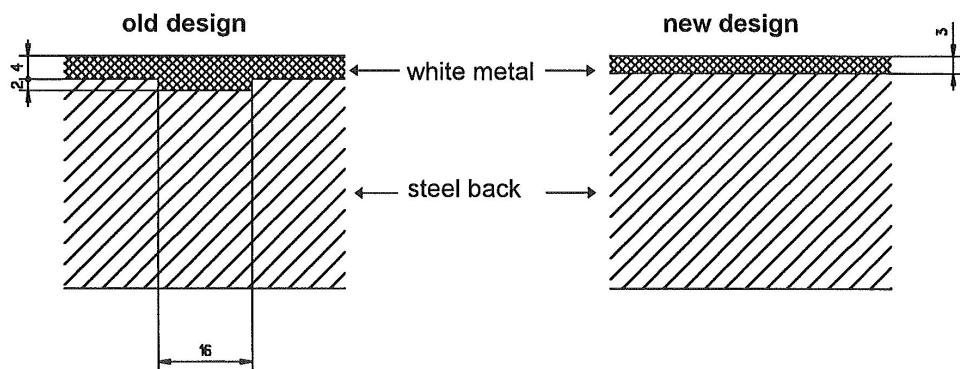


Fig. 1.1 Dove tail

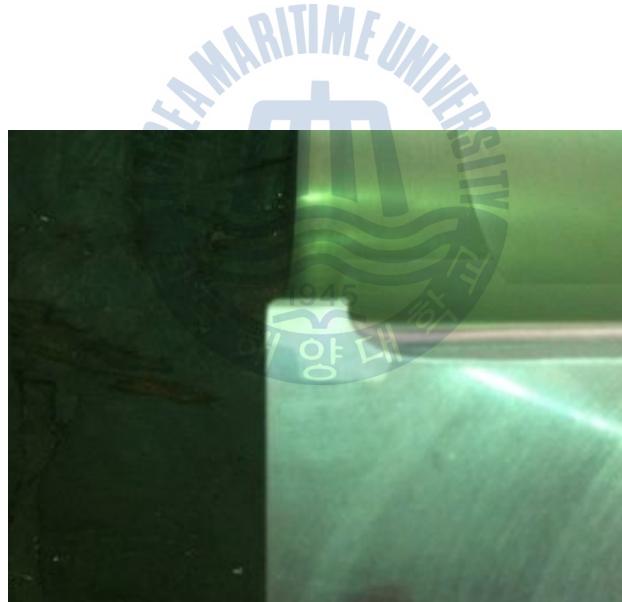


Fig. 1.2 Example taken from a main bearing

1.2 연구목적 및 내용

용접법의 도입으로 인해 용접방법이 만들어 낼 수 있는 각종 결함 및 본딩력의 보증을 위하여 여러 가지 방법의 검증방법이 요구 되었다.

본 연구에서는 이 추가된 공정으로 기존 접착(bonding)의 전전성이 확보될 수 있는지 ISO 4386-2에 따른 Chalmer test를 통해 화이트메탈의 결합 강도를 비교하고 조직분석 사진을 통하여 부분적으로 발생할 수 있는 박리 현상 및 충간 기공 등을 정확하게 해석하고자 한다. 또한 엔진 탑재 후 발생할 수 있는 배빗 메탈의 박리 현상 및 화이트 메탈 파손 등에 대한 품질을 미연에 보증하고자 기존의 엔진 메이커에서 요구하는 방식인 기본 초음파 탐상 기법 중 straight beam 외에 dual probe를 적용하는 방법을 채택하여 배어링 배빗 메탈의 접착력 상태에 대한 더욱 확실한 전전성 확보 방법을 확인 하고자 한다.

Fig. 1.3 (a),(b),(c)는 선박용 엔진 가동 중 부적절하게 접착된 화이트 메탈의 박리현상을 보여주고 있다.

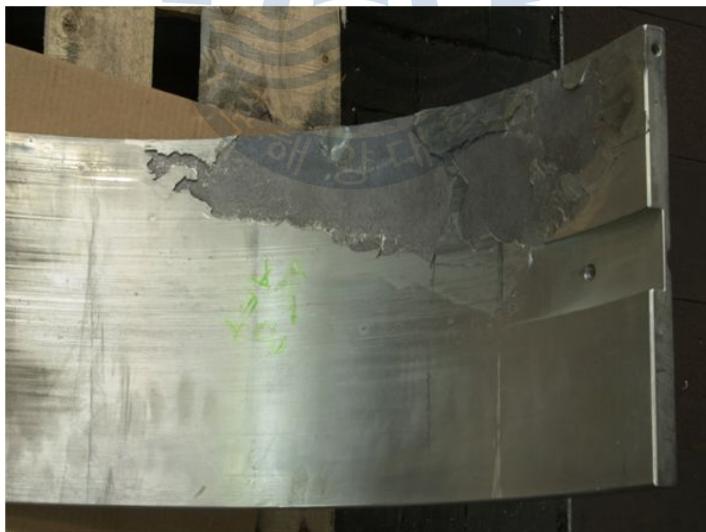


Fig. 1.3 (a) White metal breakout during operation

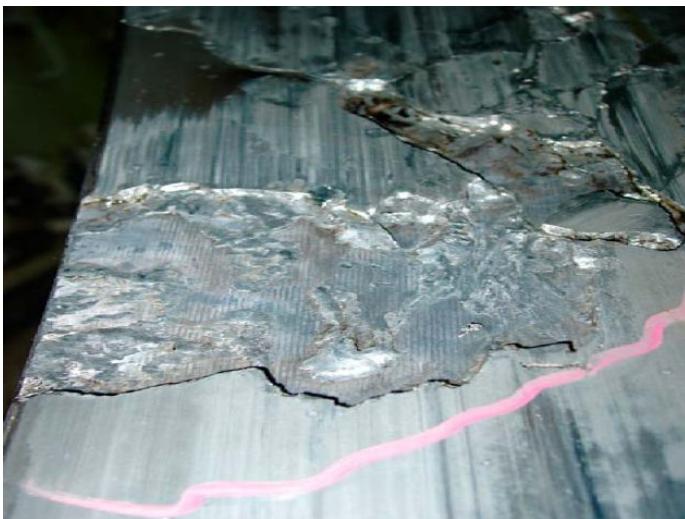


Fig. 1.3 (b) White metal breakout during operation

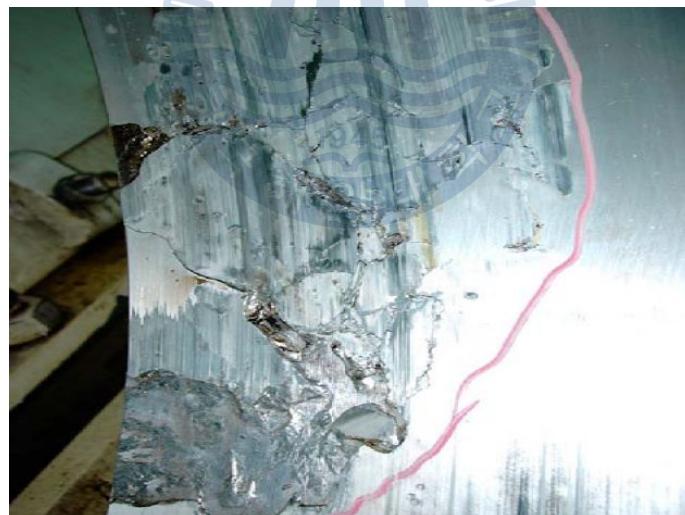


Fig. 1.3 (c) White metal breakout during operation

제 2 장 선박용 베어링

2.1 메인 베어링(main bearing)

메인 베어링은 크랭크축(crankshaft)을 지지하고 회전중심을 잡아주는 베어링이다. 육상용 소형기관에서는 볼베어링(ball bearing)이나 롤러 베어링(roller bearing)이 일부 사용되는 경우가 있으나, 보통 육상용 및 선박용 기관에서는 대부분 Fig. 2.1과 같은 상, 하 두 개로 나누어진 분할형 베어링(split type bearing)이 사용된다.

메인 베어링의 하반부(lower bearing shell)는 베드 플레이트(bed plate)에 취부되며 크랭크축을 떼어 내지 않고 교환이 가능한 구조로 되어 있으며, 상반부(upper bearing shell)는 주철제의 베어링 캡(cap)을 씌워 볼트로 죄고 캡의 상부에서 주유하도록 되어 있다.

베어링 메탈은 강철제의 베어링 셀(bearing shell)에 백색합금을(white metal) 얇게 입혀(lining) 만든다.^[3]

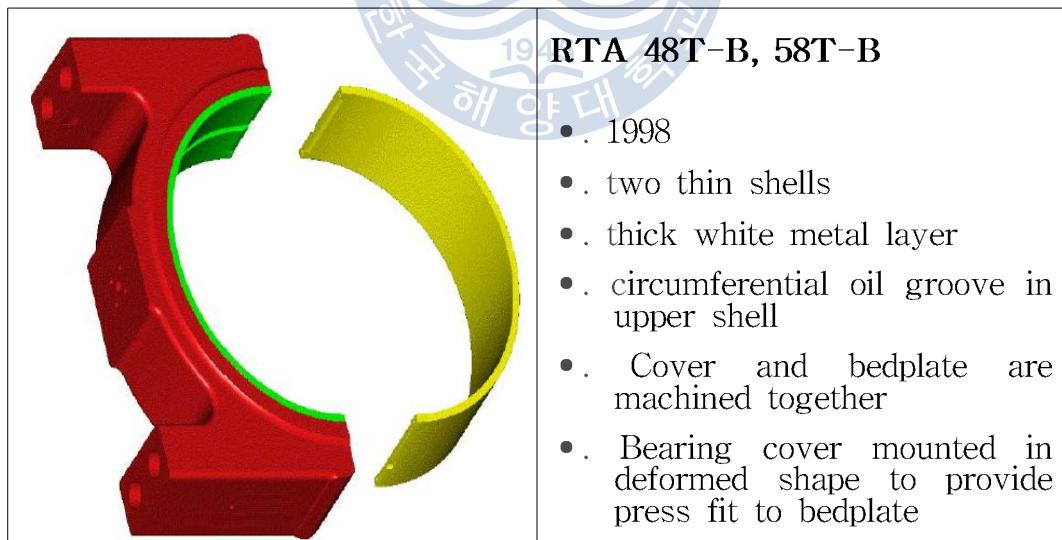


Fig. 2.1 Split bearing

2.1.1 베어링의 종류

- 1) 이중금속형(bi-metal type): 두 가지의 서로 다른 금속을 가지고 2층으로 만든 것이다. 일반적으로 전면은 Satco가 사용되고, 뒷면은 청동(bronze) 혹은 철(steel)이 사용된다. Satco는 Pb 98%, Sb 1%, 기타 1%로 된 합금이다.
- 2) 삼중금속형(tri-metal type): 세 가지 금속이 층을 이루는 베어링 메탈을 3중금속형이라고 한다. 이것은 뒷면은 철, 중간은 주석(tin), 표면은 백색합금으로 되어 있다. 표면층으로서 백색 합금의 두께는 2-5mm 정도이다.
베어링의 수명은 베어링 메탈(bearing metal)의 두께의 감소와 더불어 증가하는 반면에 이물질(異物質)을 매몰(埋沒)하는 능력은 감소된다.

2.2 베어링의 필요조건

엔진베어링(engine bearing)으로서 갖추어야 될 필요조건은 다음과 같다.

- 1) 높은 하중에 견딜 수 있는 충분한 기계적 강도를 가져야 한다.
- 2) 베어링은 일정하지 않고 끊임없이 변화하는 반복응력이 걸리므로 이것을 견딜 수 있는 충분한 내피로성을 갖추어야 한다.
- 3) 적당한 경도(hardness)를 가져야 한다.
- 4) 축의 중심(alignment)이 틀렸거나 축의 변형에 대해 베어링이 이에 맞추어 져 가는 금속적인 유동성이 있어야 한다.
- 5) 내식성(耐蝕性)과 내마모성이 커야 한다.
- 6) 열전도성이 우수해야 한다.
- 7) 이물질에 대한 매몰성이 커야 한다.
- 8) 경계윤활 상태에서도 마찰계수가 적어야 한다.

2.3 베어링 메탈(bearing metal)의 재료

베어링의 표면에 입혀지는 금속재료를 베어링 메탈이라 한다. 베어링 메탈로 사용되는 것에는 Pb 또는 Sn을 주성분으로 하는 베어링 합금의 총칭인 화이트

메탈(white metal, 백색합금)과 Cu-Pb 합금, 주석 청동, Al 합금, 소결합금, 주철 등이 있다.

베어링으로서 필요한 조건은 축속도, 하중의 대소, 사용 장소 등에 따라 다음과 같은 조건을 갖추어야 한다.

- 1) 하중에 대한 내구력을 가질 수 있을 정도의 경도, 내압력을 가질 것
- 2) 축에 적응이 잘 될 수 있을 정도로 충분한 점성과 인성이 있을 것
- 3) 주조성, 페가공성이 좋고 열전도율이 클 것
- 4) 마찰계수가 적고 저항력이 클 것
- 5) 소착에 대한 저항력이 클 것
- 6) 내식성이 좋고 값이 찰 것

이상의 성질을 구비한 합금으로서 주석 바탕 또는 Pb 바탕의 화이트 메탈, Cu-Pb 합금 등이 널리 사용된다.

2.3.1. 주석계 화이트 메탈

이 계의 합금을 흔히 배빗메탈(babbit metal)이라고 하며, 주로 Sn-Sb-Cu계 합금이며, 성분 범위는 Sn 75-90%, Sb 3-15%, Cu 3-10%이고 Sn의 일부를 Pb로 치환한 것도 있다. Sb 및 Cu %는 많아짐에 따라 경도, 인장강도, 항압력이 증가하며 해로운 불순물로서는 Fe, Zn, Al, Bi, As 등이 있다.

배빗 메탈의 장점은 다음과 같다.

- 1) 경도가 Pb를 주성분으로 하는 것보다 크고, 큰 하중에 견디며 바닥은 인성이 있어서 축과 잘 어울리고 충격과 진동에도 잘 견딘다.
- 2) 축에 놀아붙는 성질이 없고 열전도도가 크므로 고속도, 큰 하중의 기계용에 적합하다.
- 3) 높은 온도에서도 성능이 크게 나쁘지 않으며 유동성과 주조성이 좋으므로 큰 베어링으로 만들기 쉽다.

Fig. 2.2-2.5는 현재 선박용 베어링 메탈로 많이 사용되는 재질들의 조직 사진이다. **Fig. 2.2**와 **Fig. 2.5**는 일본에서 많이 사용하는 재질로 **Fig. 2.2**는 경도가 강한 조직으로 HB 30 이상의 경도를 가지며 **Fig. 2.5**는 경도가 HB 28이하로 주조가 용이한 재질이다. **Fig. 2.3**과 **Fig. 2.4**는 선박용 엔진에 가장 많이 쓰이는 재질로서

Fig 2.4는 W사와 일본 M사에서 사용되며 Fig 2.3은 M사와 H사에서 주로 사용된다.

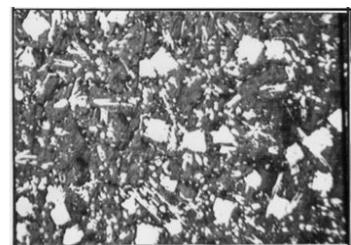
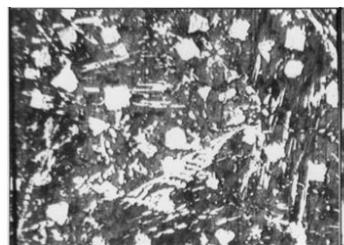
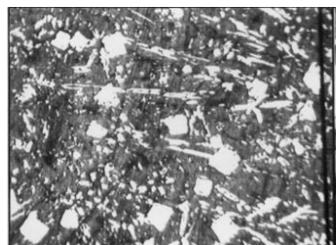


Fig. 2.2 HM07

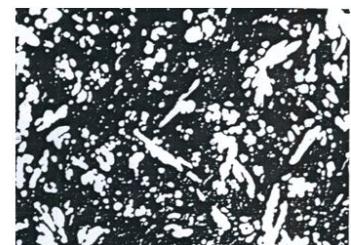
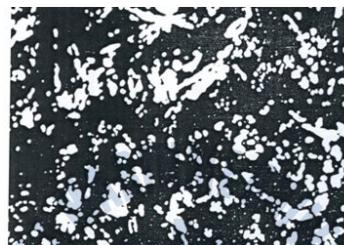
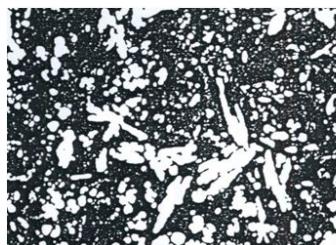


Fig. 2.3 11R

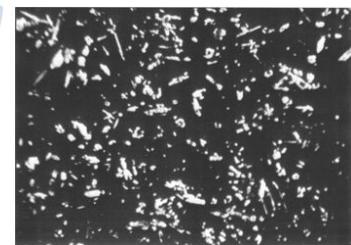
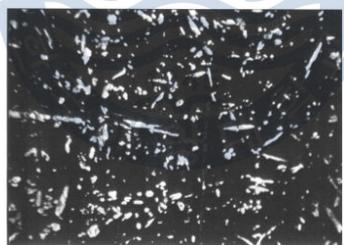
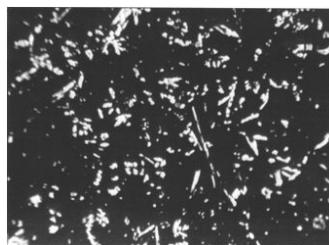


Fig. 2.4 S172

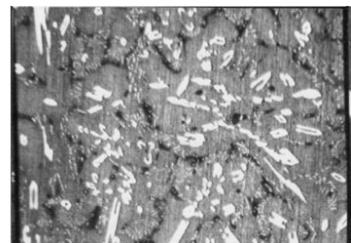
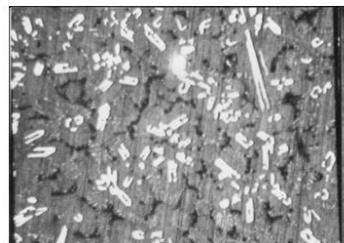
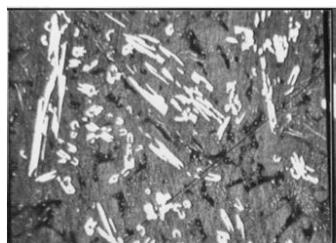


Fig. 2.5 WJ2

2.3.2. 납계 화이트 메탈

1) Pb-Sb-Sn계 합금

이 계의 합금은 Sb, Sn의 성분함량이 높을수록 항압력이 커진다. Sb 성분함량이 너무 많아 Sb 고용체나 화합물 양이 많아지면 단단해지고 취약해진다. Sn 성분함량이 낮은 합금에 As를 1% 이상 넣으면 소지가 미세화하여 경화된다. As 첨가에 의해 고온에서의 기계적 성질이 좋아지고 100-150°C정도로 오래 가열되어도 연화를 억제할 수 있다.

납계와 주석계 화이트 메탈을 비교하면 내소착성의 차이는 별로 없고, 희로 강도는 납계가 약간 나쁘지만 값이 저렴하여 많이 사용되고 있다.

아래 Table 2.1은 화이트 메탈의 KS 규격을 나타낸 것이다. 선박용 메인 베어링에 사용되는 화이트 메탈은 WM1 또는 WM2에 해당된다.

2) Pb-Ca-Ba-Na 합금

이 종류의 합금에 Lurgi metal(Pb, 0.4% Ca, 2.8% Ba, 0.3% Na 합금), bahn metal(Pb, 0.4% Ca, 0.6% Na, 0.05% Li 합금) 등이 있다. Ca 등과 같이 산화하기 쉬운 원소를 포함하므로 내식성이 좋지 않으나, Pb₃Ca 등과 같이 산화하기 쉬운 원소를 포함하므로 내식성이 좋지 않으나, Pb₃Ca 등이 공정조직 중에 미세하게 존재하므로 철도 차량용 등에 쓰인다.

Table 2.1 Standard for white metal(KS D 6003)

화이트 메탈 종류	기호	화학성분(%)								불순물				
		Sn	Sb	Cu	Pb	Zn	As	Pb	Fe	Zn	Al	Bi	As	Cu
								0.50 이하	0.80 이하	0.01 이하	0.01 이하	0.08 이하	0.10 이하	-
1종	WM1	나머 지	5.0~ 7.0	3.0~ 5.0	-	-	-	0.50 이하	0.80 이하	0.01 이하	0.01 이하	0.08 이하	0.10 이하	-
2종	WM2	나머 지	8.0~ 10.0	5.0~ 7.0	-	-	-	0.50 이하	0.80 이하	0.01 이하	0.01 이하	0.08 이하	0.10 이하	-
3종	WM3	나머 지	11.0 ~ 12.0	4.0~ 5.0	3.0 이하	-	-	-	0.10 이하	0.01 이하	0.01 이하	0.08 이하	0.10 이하	-
4종	WM4	나머 지	11.0 ~ 13.0	3.0~ 5.0	13.0~ 15.0	-	-	-	0.10 이하	0.01 이하	0.01 이하	0.08 이하	0.10 이하	-
6종	WM6	44.0~ 46.0	11.0~ 3.0	1.0~ 3.0	나머 지	-	-	-	0.10 이하	0.05 이하	0.01 이하	-	0.20 이하	-
7종	WM7	11.0~ 13.0	13.0~ 15.0	1.0~ 이하	나머 지	-	-	-	0.10 이하	0.05 이하	0.01 이하	-	0.20 이하	-
8종	WM8	6.0~ 8.0	16.0~ 18.0	1.0~ 이하	나머 지	-	-	-	0.10 이하	0.05 이하	0.01 이하	-	0.20 이하	-
9종	WM9	5.0~ 7.0	9.0~ 11.0	-	나머 지	-	-	-	0.10 이하	0.05 이하	0.01 이하	-	0.20 이하	0.30 이하
10종	WM10	0.8~ 1.2	14.0~ 15.5	0.1~ 0.5	나머 지	-	0.75 ~1.2 5	-	0.10 이하	0.05 이하	0.01 이하	-	-	-

2.3.3. Cu계 베어링 합금

Cu계 합금에는 켈멧(Kelmet)이라고 하는 Cu-Pb 합금 외에 주석 청동, 인청동, 함연청동 등이 있다.

Cu-Pb계 합금은 용고할 때 Pb의 진한 용융금속이 저온도까지 남아 편석하기 쉬우므로 좋은 조직을 얻으려면 냉각 조건을 적당히 하여야 한다. Pb함량이 많을수록 피로강도는 낮으나 마모 효과는 커진다. 또, Ni을 넣으면 편석이 억제된다. Cu-Pb계 베어링은 내 소착성이 좋고, 화이트 메탈보다 내하중성이 크므로 고속 고하중용 베어링으로 적합하여 자동차, 항공기 등의 주 베어링으로 쓰인다.

2.3.4. 카드뮴계, 아연계 합금

카드뮴(Cd)은 고가이므로 별로 사용되지 않으나, Cd에 Ni, Ag, Cu, 합금Ag 등을 넣어 경화한 합금은 고온에서의 경도와 피로강도가 화이트 메탈보다 우수하여 하중이 큰 고속베어링에 사용된다. Zn계는 고순도의 Zn 합금을 얻을 수 있게 됨에 따라 인청동과 비슷한 특성을 가지고 있으며, 화이트 메탈보다 경도가 높으므로 전차용 베어링 등에 사용된다. 오스트레일리아에서 개발된 것으로 Alzen 305가 있는데, 조성은 30-40% Al, 5-10% Cu, 나머지 Zn이며, 브리넬 경도(HB) 100-150, 비중 4.8이다.

2.3.5. 함유 베어링

다공질 재료에 윤활유를 품게 하여 항상 급유할 필요를 없게 한 것이다. 소결함유 베어링은 미국에서 오일라이트(Oilite)라는 상품명으로 시판된 것이 처음이며, Cu계 합금에는 Cu-Sn-C 합금이 가장 많이 쓰인다. 제조법은 5-100 μm 의 Cu 가루와 주석, 흑연가루를 혼합하고 윤활제 혹은 휘발성 물질을 가한 후 가압성형 하여 환원 기류 중에서 400°C로 예비 소결 후 800°C로 본 소결해서 만든다. 이렇게 얻어진 것은 10-40% 부피의 윤활유를 품게 된다. Table 2.2는 오일라이트 베어링의 조성 예를 나타낸 것이다.^[12]

Table 2.2 Chemical composition of oil lite bearing

종류		화학성분(%)							합유량 용량(%)	압축강도 (kgf/mm ²)
		Cu	Fe	Sn	Pb	Zn	C	기타		
Cu계	1종	나머지	-	8~11	-	-	3 이상	0.5 이하	18 이상	15 이상
	2종*	나머지	-	11 이하	3 이하	5 이하	3 이상	0.5 이하	18 이상	15 이상
Fe계	1종	-	나머지	-	-	-	3 이하	3 이하	18 이상	20 이상
	2종	-	나머지	-	3~15	-	3 이하	3 이하	18 이상	20 이상
	3종	3	나머지	-	-	-	3 이하	3 이하	18 이상	20 이상

2.4 메인 베어링의 손상

- 1) 베어링 면에 선형의 흠 발생: 윤활유 속에 금속가루나 고형물질이 있으면 크랭크 축이 회전함에 따라 선형의 흠이 생긴다.(Fig 2.6)
- 2) 베어링 메탈의 균열: 베어링 면이 윤활불량으로 경계윤활 상태로 되어 금속 접촉을 일으키면 국부적으로 온도가 올라가 균열이 생긴다.(Fig 2.7)
- 3) 부식마모: 윤활유 속에 불완전연소에 의한 탄소분이 용해되거나, 연료유가 누입 되거나, 장기 사용으로 열화(劣化)된 기름을 사용할 때 또는 캐비테이션에 의해 부식마모가 생긴다.(Fig 2.8)
- 4) 이상마모(異常磨耗): 정상적인 완전윤활 상태에서는 베어링 메탈의 마모는 거의 일어나지 않으며 반영구적으로 사용이 가능하다. 그러나 이물질이 들어가거나, 과부하 운전이 계속 되거나, 어떤 원인으로 과열 되어 유막이 깨져 경계윤활 상태로 되면 표면에 이상마모가 생기게 된다. (Fig 2.9)

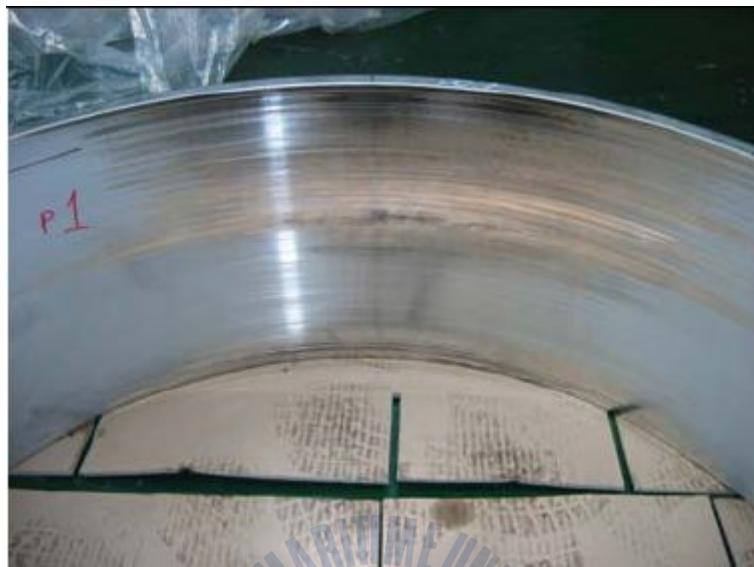


Fig. 2.6 Linear flaw on bearing surface^[11]

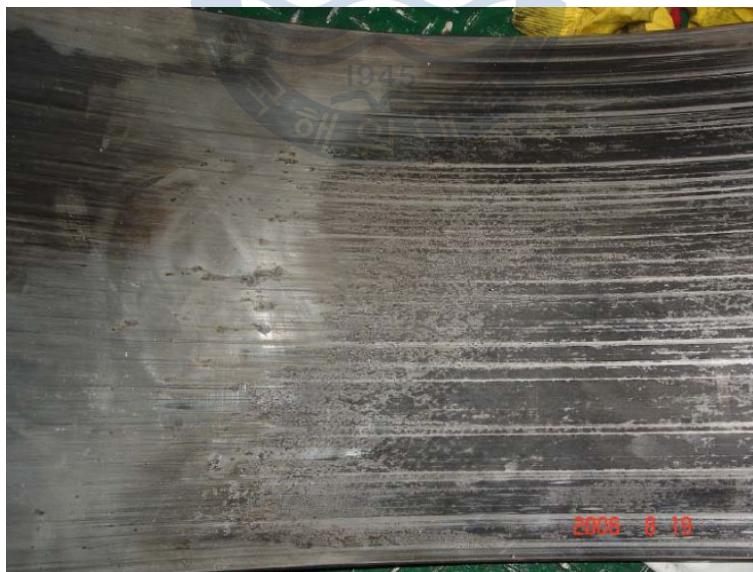


Fig. 2.7 Surface flaw by improper lubrication^[11]



Fig. 2.8 Cavitation marks^[11]



Fig. 2.9 Damaged by embedded foreign particle^[11]

제 3 장 베어링 접착력 검사 및 시험

3.1 화이트 메탈 베어링 제작기법

현재 화이트 메탈 베어링 제작기법은 크게 주조(casting)법과 자동용접(auto welding)법으로 구분되어 진다.

자동 용접법은 종래의 원심주조(centrifugal casting)와 중력주조(gravity casting)의 진행 공정의 축소 및 수리 보정 등이 용이하여 채택된 방식으로 주조법과 함께 화이트 메탈 베어링 제작 시 점점 많이 채택되고 있다.

아래 Fig. 3.1은 주조 방식의 화이트 메탈 베어링의 제작 공정과 Fig. 3.2에서 는 자동 용접 방식의 제작 공정을 설명하고 있다.

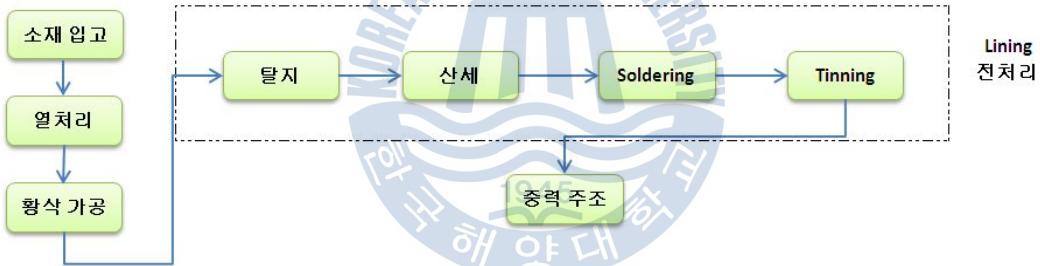


Fig. 3.1 Process flow of casting



Fig. 3.2 Process flow of auto-welding

위와 같이 자동 용접 공정으로 화이트 메탈 배어링을 제작 시에는 라이닝(lining) 전처리 공정이 필요하지 않으며, 접착이 완벽하게 되지 않은 배어링의 경우 용접 공정에서는 주조 공정에 비하여 수정 및 수리가 용이하여 시간적, 재료적 부분에서 많은 유리함을 가지고 있다.

그러나 오랜 시간 동안 시행착오를 거쳐 오며 개선된 주조 방식은 적절한 수냉(water cooling) 압력 및 타이밍, 그리고 전처리 단계에서 접착력의 향상을 위한 속 블라스팅(shot blasting) 또는 와이어 브러싱(wire brushing) 등^[3]의 방법이 고안되어 좀 더 안정적인 공정이 보증되는 반면, 특수공정으로 분류되는 자동 용접법에서는 용접 변수(welding parameter), 환경 조건 등에 민감하게 영향을 받아 주조 공정의 안정성에 비해서 화이트 메탈 배어링의 건전성(soundness)에 대한 신뢰도가 비교적 낮은 편이며 이를 검증하기 위한 많은 실험과 경험이 요구된다.^[4]



Fig. 3.3 TIG welding machine for white metal

Table 3.1 Welding Parameter

Welding Process	Filler Metal	Welding Parameter			Shielding gas
		Class / Size	Amp	Volt	
GTAW	107B / 4 mm	160-175	12-12.5	25-30	Ar / 20 L/Min

3) shot blasting과 wire brushing은 표면의 조도를 거칠게 하여 다른 물질과의 결합력을 향상시키기도 하고, 물리적인 영향을 미쳐 표면의 분자 운동을 활성화 (activating) 시켜 혼합력을 향상 시킨다.^[7]

3.2 재료의 확산

재료를 다루는 데 있어서 중요한 많은 반응이나 공정들은 특정 고체(보통 미세구조 수준에서) 내에서, 또는 액상과 기상이나 다른 고상으로부터의 질량의 이동에 따라 달라진다. 이것은 반드시 원자 이동에 의한 물질의 이동 현상인 확산(diffusion)에 의해 이루어진다. 확산 현상은 서로 다른 종류의 금속 막대가 서로 접합되어 두 면이 완전하게 접촉되어 있는 확산쌍(diffusion couple)에 의해 설명될 수 있다. 이런 확산쌍을 Fig. 3.4-5에 Sn과 Fe의 경우에 대해 나타내었는데 그림에서는 계면을 통한 원자 위치와 농도 분포를 개략적으로 보여 주고 있다. 이 확산쌍은 고온에서 장시간 가열하였다가 상온으로 냉각한 경우이다. 화학분석 결과는 Fig. 3.6-7과 같이 나타낼 수 있을 것이다. 즉, 확산쌍의 두 끝 부위의 고순도 Sn과 고순도 Fe 사이에서는 합금된 영역이 존재한다. Fig. 3.8에서 보는 것처럼 두 금속의 농도는 위치에 따라 다르다. 이 결과는 Sn 원자가 Fe로 Fe원자는 Sn으로 이동하였거나 확산되었음을 나타낸다. 한 종류의 금속 원자가 다른 종류의 금속으로 확산되는 과정을 상호 확산(inter-diffusion) 또는 불순물 확산(impurity diffusion)이라고 한다^[8].

확산에 큰 영향을 미치는 인자 중 가장 영향을 미치는 인자는 온도이다. 온도는 확산 계수와 확산 속도에 가장 큰 영향을 미친다. 예를 들어 A철에서 철이 자체 확산을 하는 경우 온도가 500°C에서 900°C로 증가하면 확산 계수는 대략 6승배(3.0×10^{-21} 대 $1.8 \times 10^{-15} m^2/s$)가 증가한다.

용접을 하여 확산이 발생하는 경우 용접 구간에 따른 온도에 따라 확산양(Fe-Sn)이 차이가 나며 이는 용접 속도 등을 고려한 입열 양에 따라서도 영향을 받는다. ^[5]

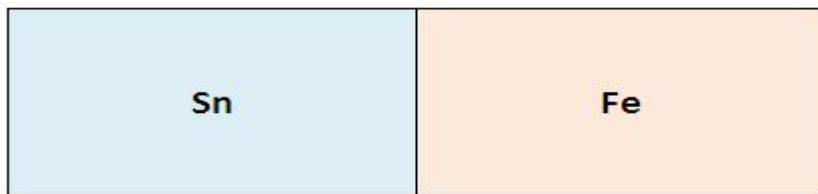


Fig. 3.4 Diffusion area of Sn & Fe before heat treatment

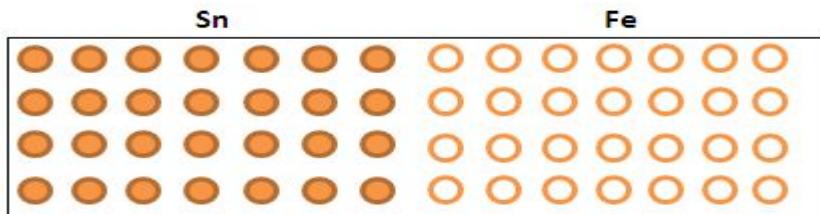


Fig. 3.5 Atoms of Sn and Fe in diffusion before heat treatment

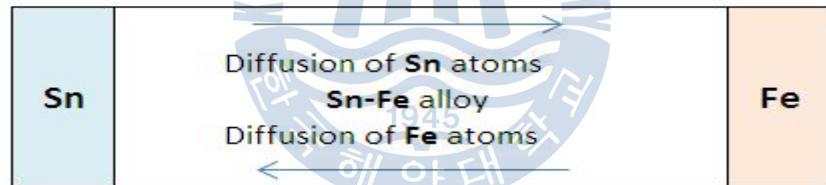


Fig. 3.6 Diffusion area of Sn & Fe after heat treatment

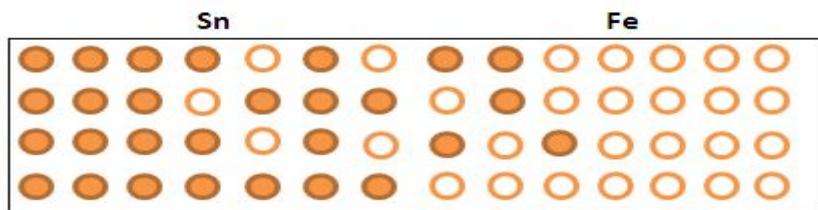


Fig. 3.7 Atoms of Sn and Fe in diffusion after heat treatment

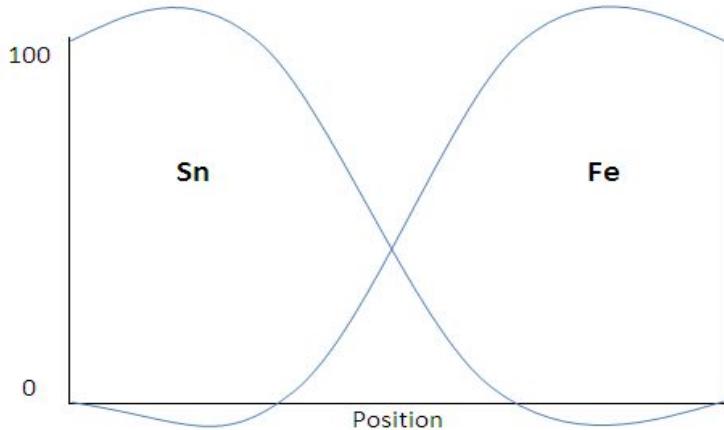


Fig. 3.8 Concentration of Sn and Fe by diffusion

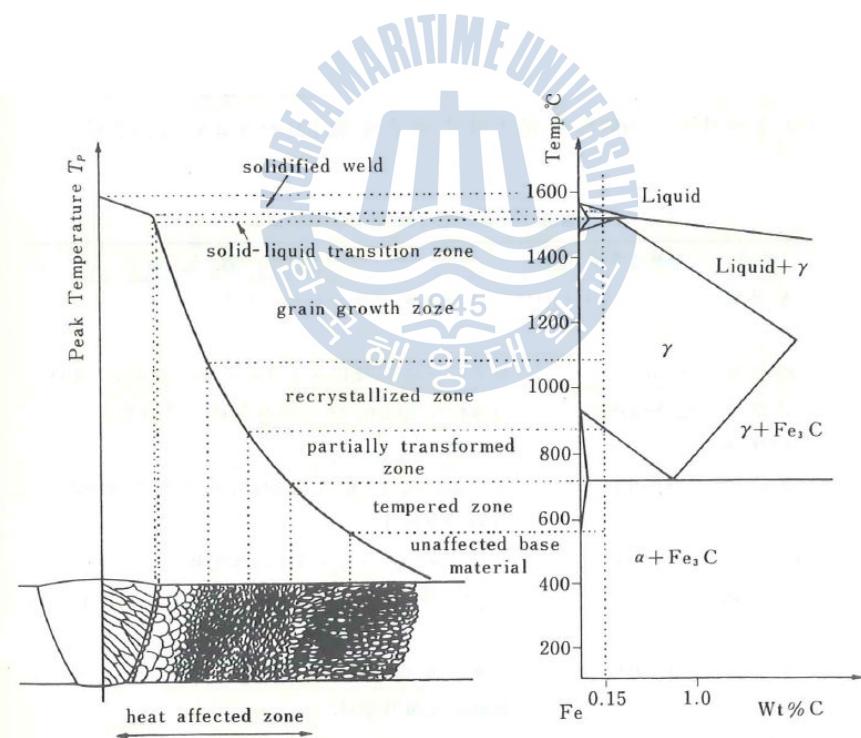


Fig. 3.9 Equilibrium diagram of welding diffusion

3.3 접착력 검증 방법

구조물의 건전성(Soundness)을 보증하기 위한 실험적 검증 데이터의 확보수단으로 파괴시험(破壞試驗, destructive testing: DT)과 비파괴시험을 이용한다. 파괴시험은 재료, 기기, 구조물을 직접 파괴하여 그것의 역학적 성질을 규명하는 것으로 인장시험, 충격시험, 크리프시험, 피로시험, 파면관찰 등이 있고, 비파괴시험은 시험 대상물을 직접 파괴하지 않고 그것의 물리적, 화학적 역학적 성질에 대한 정보를 얻는 것으로 육안시험, 초음파시험, 방사선시험, 자기시험 등이 있으며 시험 결과의 신속성, 적용의 용이성, 경제성 등의 이유로 파괴시험을 대신하여 급속히 보급되고 있다.

3.3.1 결합력 확인을 위한 파괴검사

베어링 메탈과 받침 사이의 결합부 강도를 결정하기 위한 시험 방법에 대하여는 ISO 4386-2을 따라 Charmel test를 실시한다. 이 시험은 강, 주철 또는 동합금으로 만든 받침과 층 두께가 2mm 이상인 납, 주석, 동 또는 알루미늄을 기반으로 한 베어링 메탈을 사용하는 다층 평 베어링에 적용할 수 있다.

이 시험은 다양한 공정과 재료 종류의 결합부 강도에 대한 영향을 비교하여 조사하는 것 뿐 아니라 생산제어에도 적합하다.

검사 방법은 아래 Fig. 3.11에서 보여주는 장치에 Fig. 3.10의 시편을 힘이 결합부 표면에 수직 방향으로 작용하도록 압축 시험기에 장착한다. 이어서, 시편이 장치에 고정되면 시편이 파괴될 때까지 꾸준히 힘을 증가하여 최대 힘을 시험 장치로부터 읽는다. 이때 응력은 약 초당 $10N/mm^2$ 으로 증가시켜야 한다.

Table 4.2 Size of test specimen and equipment

시편				시험장치		
d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
28.82	24	12.1	38	29	23.9	M12

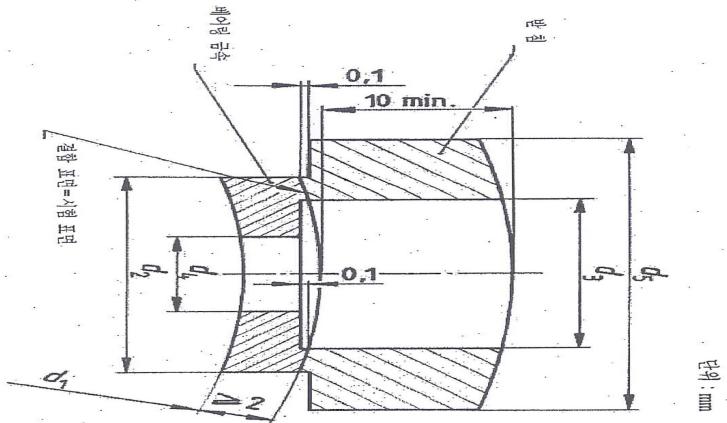


Fig. 3.10 Test specimen for charmel test^[6]

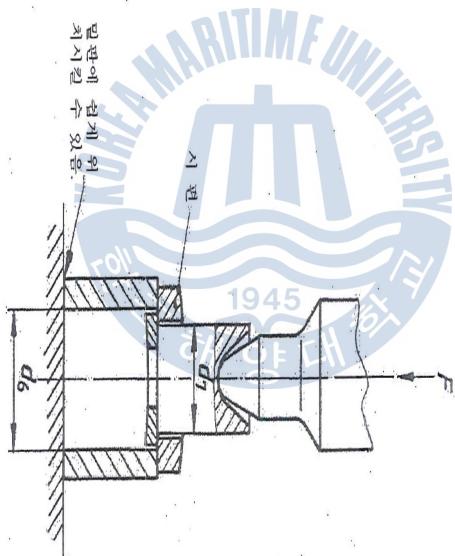


Fig. 3.11 Test equipment^[6]

3.3.2 비파괴 검사

비파괴시험, 검사는 시험 대상물의 빛, 방사선, 초음파, 전기, 자기 등에 대한 응답 특성이 내부조직의 이상이나 결함에 의해 변화하는 것을 원리로 하고 있다. 이러한 비파괴적 방법으로 재료, 구조물의 특성을 평가하는 것은 재료를 파괴시켜야만 재료 특성을 이해할 수 있는 재료시험과 크게 다른 점이다.

비파괴시험의 종류로는 육안검사(visual testing; VT), 방사선투과검사(radiographic testing; RT), 초음파탐상검사(ultrasonic testing; UT), 자분탐상검사(magnetic particle testing; MT), 침투탐상검사(liquid penetrant testing; PT), 와전류탐상검사(eddy current testing; ECT), 음향방출검사(acoustic emission testing; AE), 적외선열화상해석법(infrared thermographic test; IRT) 등이 있다. 이중에서 음향방출시험과 열화상해석법을 제외한 7종류의 비파괴검사는 현재 많이 사용되고 있으며, 어느 정도 시험의 목적을 달성하는 것이 가능하고 동시에 경제성, 휴대성, 조작성이 우수하여 일반적으로 이용되고 있는 시험법이라 할 수 있다. 이 외에도 실제로 사용되고 있는 비파괴시험의 종류는 매우 다양하다. 더구나 현장에서 이용되지는 않지만 연구실에서 이용 가능한 것이라든가, 일반적으로는 이용되고 있지는 않지만 매우 특수한 한정 분야에서 이용되고 있는 방법까지를 가산하면 그 수는 더욱 많아진다.

모든 비파괴검사는 물리적 현상의 원리를 이용하고 있으므로, 비파괴검사의 분류도 이러한 관점으로 분류하는 것이 가능하다.

- 1) 광학, 색채학의 원리를 이용한 검사방법: 육안검사, 침투탐상검사
- 2) 방사선의 원리를 이용한 검사방법: 방사선투과검사, CT 시험
- 3) 전자기(電磁氣)의 원리를 이용한 검사방법: 자분탐상검사, 와전류탐상검사
- 4) 음향의 원리를 이용한 검사방법: 초음파탐상검사, 음향방출시험
- 5) 열의 원리를 이용한 검사방법: 열화상해석법
- 6) 누설의 원리를 이용한 검사방법: 누설검사

이상은 원리적인 면에서 분류한 것이고, 그 시험대상 부위, 예를 들면 시험체의 내부나 표면 또는 표층부에 관한 정보를 얻는가하는 점에 따라 분류하는 것도 가능하다. 각각에 속하는 시험법의 예를 나타내면 다음과 같이 된다.

- 1) 표면 또는 표층부에 관한 정보를 얻기 위한 비파괴검사

- ： 육안검사, 침투탐상검사, 자분탐상검사 및 와전류탐상검사 등
- 2) 내부에 관한 정보를 얻기 위한 비파괴검사
： 방사선투과검사, 초음파탐상검사 등

이상은 시험 대상 부위에 따라 분류한 것이고, 가장 많이 사용되는 분류법이다. 이 중 표면에 관한 정보를 얻기 위한 비파괴검사에서는 어떠한 원인에 의해 그 결과가 얻어졌는가를 직접 육안으로 보고 확인하는 것이 가능하여 매우 확실한 정보를 얻을 수 있고, 그 정보로부터 단순히 표면에 관한 정보만이 아니라 내부와 연관된 정보를 얻는 것도 가능하다. 이에 비해 비파괴검사로부터 얻어지는 내부에 관한 정보는 표면에 관한 정보와는 달리 절단시험을 하는 것 이 외의 것으로 직접 확인하는 방법이 없어 고도의 정량적 결과를 얻기 어렵고, 동시에 그에 따른 표면에 관한 정보도 얻기가 어렵다. 이로부터 검사결과를 정량화 하는 정도에 따라 검사법을 분류하는 것이 가능하다.

비파괴검사의 신뢰도는 언제, 누가, 어디서 하여도 동일한 시험체에 대해서는 동일한 시험결과가 얻어지는 것을 말한다. 다시 말해 비파괴 검사의 결과의 재현성이 있어야한다는 것이다. 비파괴시험은 본래 특정의 물리적 에너지를 이용하여 그것의 투과, 흡수, 산란, 반사, 누설, 침투 등에 의한 변화를 특정의 검출제를 이용하여 검출하고 이상 유무를 조사하는 방법이다.

이상부분을 검출할 수 있는가의 여부는 시험체의 재질, 조직, 형상, 표면상태, 사용하는 물리적 에너지의 성질, 검출하려고 하는 이상(異常)부분의 상태, 형상, 크기, 방향성 그리고 검출제의 특성 등에 크게 영향을 받는다. 따라서 적절한 시험법을 이용하여 이상부분을 가능한 한 완전히 검출할 수 있어야 한다. 비파괴시험을 하여 무결함(無缺陷)이라고 판단되는 정보가 얻어져도 반드시 결함이 없는 것으로 판단해서는 안된다. 특히 비파괴시험에 의해 얻어진 이상 부분의 종류, 형상, 크기, 방향성 등에 관한 정보는 이용하는 시험법에 따라서 각각 다르고, 시험법의 특성과 이상부분의 성질의 조합에 의해 어떤 경우에는 매우 정밀도 높게 측정할 수 있지만 또 어떤 경우에는 큰 오차를 수반하여 측정될 수도 있다. 이것은 품질평가나 수명평가를 하는 경우에 비파괴시험을 하는데 있어 매우 중요한 부분이다.

비파괴검사를 실시할 때 중요한 것은 검사를 하는 제품의 사용조건, 설계수명, 제품/부품의 성질, 용도를 충분히 파악하고 제품이 기간 중에 기능을 충분히 다할 수 있는가 어떤가를 평가할 수 있는 비파괴검사의 기법을 선택/적용하는 것이다. 비파괴검사의 신뢰도를 높이는 요인으로는 ①비파괴검사를

하는 기술자의 기량 ②제품/부품에 대한 검사기법의 적응성 ③비파괴검사결과의 평가기준 등이다. 또 단일 검사수법에 의해서만 검사하는 것이 아니라 가능한 적용 가능한 비파괴검사의 기법을 중복 또는 조합하여 실시함으로써 비파괴검사의 신뢰도를 높일 수 있다.

비파괴검사는 신제품에 대해서만 아니고 제품의 내구성, 사용 환경 조건 등에 관해 정기적으로 검사함으로써 수명예측이나 보수기간의 판단을 가능하게 한다. 결국, 품질보증 수단의 하나로 정기적인 검사 프로그램을 작성하고 실시 및 관리하여 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 즉, 비파괴 시험 결과의 신뢰성이 시험방법과 그 시행방법, 장치, 기술자의 시험 기량 및 평가능력 등의 인자의 영향을 받기 때문에 이들을 포함하여 종합적으로 검토되어야 한다.

3.3.2.1 침투탐상 검사

위에서 언급한 UT로써는 화이트 메탈과 베어링의 본딩 끝단부의 접착력을 검증하기에는 프로브의 불충분한 접촉 면적의 확보 및 모서리에서의 빔의 감쇠, 산란 및 분산 등으로 접착력 검증이 어려우므로 PT를 실시하여 확인 한다. 아래 Fig. 3.12은 박판 베어링의 끝단부 접착력 검증을 위한 PT 검사중 적절한 감도 및 편의성을 갖춘 용제 제거성 염색 침투 탐상 검사를 적용하였으며 검사 결과 라이닝 부에 블리딩아웃(bleeding-out)이 생기지 않는 것으로 보아 표층에는 경계면의 양호함을 보여준다.⁹⁴⁵

PT는 표면결함, 특히 균열과 같이 미세하게 개구된 표면의 결함 검출을 목적으로 하는 검사방법이다. 따라서 침투 특성이 좋은 침투액을 시험체 표면에 적용하여 불연속부에 침투시키고, 현상제를 도포하여 불연속부에 침투해 있던 침투액을 표면으로 스며 나오게 함으로써 열려 있는 표면 불연속을 검출한다. 이 검사는 사람의 눈으로 보이지 않는 미세한 폭을 가진 불연속도 확대시켜 발견하기 쉬운 상태에서 검출하는 우수한 방법이다. 이 검사는 금속, 비금속에 관계없이 거의 모든 재료에 적용되지만 목재, 벽돌과 같이 미세한 구멍이 많고, 흡수성이 좋은 다공질 재료에는 적용이 곤란하다. 또한 시험체의 체적 결함 등은 검출이 불가능 하여 이미 앞서 다룬 UT와 병행하여 검사를 진행 하여야 표면 및 체적 결함 모두 검출이 가능하다.



Fig. 3.12 Penetrate testing

3.3.2.2 초음파탐상검사

초음파탐상시험(ultrasonic testing; UT)은 초음파가 가지고 있는 물리적 성질을 이용하여 시험체 중에서 존재하는 결함을 검출하고, 검출한 결함의 성질과 상태를 조사하는 비파괴시험이다. 초음파에 의한 비파괴평가기술은 원자력 발전설비, 석유화학 플랜트 등 거대설비, 기기의 건전성 및 신뢰성 확보와 잔존수명 예측기술로 그 적용범위가 확대되어 가고 있다. 초음파 비파괴 평가기술은 파괴시험이나 다른 비파괴평가기술에 비해 간편한 측정, 높은 측정 절밀도, 시험결과 도출의 신속성, 검사 비용의 절감 등 많은 장점을 가지고 있다. 초음파탐상시험은 철강재료나 그 용접부의 비파괴 시험방법으로 압력용 기나 건축철골 및 각종 금속 재료 및 층간 격리 현상 등을 확인 하는데 주로 적용되고 있다. 재료 내부에 초음파 펄스를 입사시킬 때 반사파(에코)의 거동을 수신기의 브라운관상에 도식적으로 나타낸다. 재료 내부에 흠(flaw)등의 반사원

이 없으면, 송신펄스의 저면 반사파(backwall echo)는 표면과 저면에서 각각 반사를 반복하기 때문에 여러 개의 저면 에코만 관찰된다. 재료 내부의 음속이 일정하다고 가정하면, 저면 에코의 시간 간격은 빔 진행거리를 전파하는데 필요한 시간이고, 이는 다음 공식과 같은 관계를 가진다.

$$C = 2 \frac{T}{L} [2]$$

*C: 음속

*L: 빔 진행거리

*T: 저면 에코의 시간 간격

초음파가 물체내부를 전파할 때, 전파과정에서 에너지가 손실되기 때문에 수신강도는 저하되게 된다. 이론적으로는 $2L$ 의 전파에 대한 초음파의 크기 저하는 단위 길이로 나타내고, 감쇠계수(attenuation coefficient)를 측정할 수 있다. 음속이나 감쇠는 재료의 기본 물성치로서 재료의 종류, 상태에 의존하기 때문에 이러한 측정값의 변화로 조직이나 기계적 성질 등을 평가할 수 있다.

초음파탐상시험의 원리는 탐촉자로 부터 보통 1-10MHz의 초음파 펄스를 시험체에 입사시켰을 때 내부에 결함이 있으면 그곳에서 반사되어 되돌아오는 초음파가 탐촉자에 수신되는 원리를 이용하여 주로 내부결함의 위치 및 크기 등을 비파괴학적으로 조사하는 결함검출기법이다. 결함의 위치는 송신된 초음파가 수신될 때까지의 시간으로부터 측정되고, 결함의 크기는 수신되는 초음파의 에코높이 또는 결함에코가 나타나는 범위로부터 측정한다.

초음파는 결함에서도 반사되기 때문에 시험체에 결함이 있으면 건전재에서는 나타나지 않는 결함에코가 송신에코와 저면 에코사이에서 관찰된다. 재료내부의 음속이 일정하면 결함에코의 위치측정에서 결함의 깊이, 결함에코의 수신 신호의 크기에서 결함의 크기를 평가할 수 있다.

검사를 위한 피검체에 대해 먼저 많은 사항들이 고려되어야 하는데 반드시 고려해야 할 사항들은 아래의 표와 같다.

Table 3.2 Basic formula for ultrasonic principle^[2]

Wavelength	Reflection Coefficient	Near Field	Acoustic Impedance
λ : Wavelength V : Velocity F : Frequency	Z_1 : Acoustic Impedance of Medium 1 Z_2 : Acoustic Impedance of Medium 2	N : Near Field D : Transducer Diameter λ : Wavelength V : Velocity	Z : Acoustic Impedance P : Density V : Velocity

Fig. 3.13에서 설명하는 바와 같이 초음파가 발생하는 근거리 음장영역(near field)⁴⁾은 검사를 한다고 해도 검출력이 상당히 낮아 검사에 대한 신뢰성이 떨어지며 근거리 음장 영역은 다음 그림과 같이 설명되며 아래 공식에 의해 계산되어 진다.

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad [2]$$

N; 근거리 음장영역
 D; 송신자 크기
 λ; 파장의 길이

4) 일반적인 화이트 메탈 베어링의 화이트 메탈층 두께는 2-3mm정도가 일반적이다. UT 검사시 일반적인 Straight beam 중 2Mhz의 ø24를 사용하는 경우 근거리 음장영역은 약 25mm 정도이다.

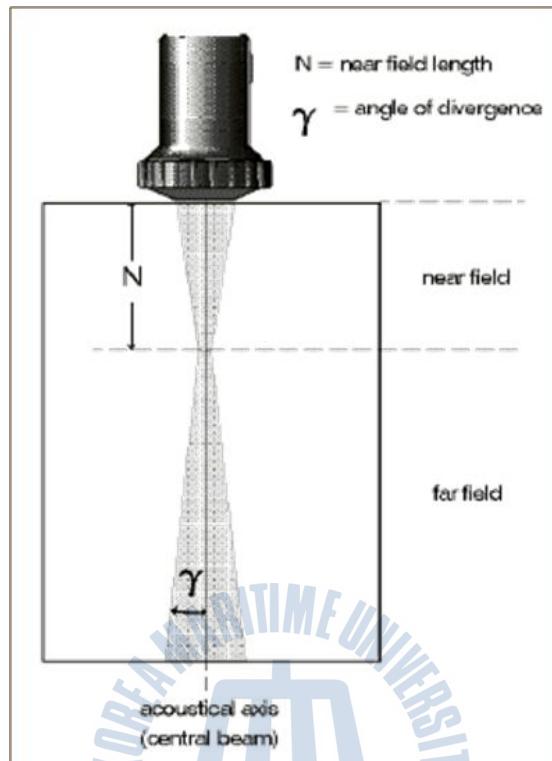


Fig. 3.13 Near field zone^[2]

제 4 장 검사 결과 및 고찰

4.1 파괴 검사 결과

앞에서 설명한 파괴 검사인 Charmel test를 사진 Fig 4.1, 4.2와 같이 시험편을 제작 하여 중력 주조 시험편과 자동 용접 시험편의 결합력을 실험을 통하여 비교 하였으며 결과는 Table 4.1과 같다.

Chalmer's test를 통한 결합력은 용접 방식이 중력 주조 방식보다 약 1.3배 이상 우수한 것으로 평가 되었다. 따라서 용접 방식에 의한 화이트 메탈 층의 시편으로 겹중한 결합력은 현재의 주조 방식의 수준을 만족 시키는 것으로 평가 되었다. 하지만 부분적으로 채취된 시편에 대한 결합 강도 만으로만 전반적인 결합부의 건전성을 평가하기에는 충분하지 않아 내부의 조직 구조 및 결함 등의 평가를 위해 추가적인 겹중 방법이 요구 된다.

Table 4.1 Bonding strength of casting and welding

구 분		최대 하중 (N)	실측 값 (Mpa)	결합강도 (Mpa)	참조
스 펙		-	-	> 75MPa	
주 조	1	8,451	43.1	81.2	ISO 4386/2
	2	8,341	41.5	78.2	
	3	7,713	38.4	72.3	
용 접	1	7,884	39.2	102.8	ISO 4386/2
	2	8,446	42.2	110.2	
	3	7,756	38.8	101.2	



Fig. 4.1 Test specimen (before)



Fig. 4.2 Test specimen (after)

4.2 미세구조 분석(microstructure analysis)

위에서 설명한 파괴 검사의 부족한 부분인 금속 내부 및 본딩부의 전전성 확인을 좀 더 확실하게 하기 위해 미세구조 분석 실험을 실시하였다. 미세구조 분석 사진을 통하여 화이트 메탈의 중간 층간의 구성요소인 Cu₆Sn₅이 형성된 모습과 베이스 메탈과 화이트 메탈의 본딩 디자인에 대하여 확인할 수 있으며 높은 경도와 취성(brITTLE)을 가지는 경계면의 Fe의 농후(rich)정도를 확인할 수 있다. 이 Fe Rich의 비율은 화이트 메탈 본딩 시 온도와 파라미터(parameter) 등에 영향을 받아 공정 진행시 Fe 확산량을 최소화 하는 공정 관리 역시 중요하다. 계면 또는 화이트 메탈 내부의 마이크로 크랙 및 기공(void, porosity)등을 미세구조 사진으로 확인하여 화이트 메탈 배어링 제조 후 운행 중 발전 가능성 있는 결함의 잠재성에 대해서 확인이 가능 하다.^[9]

Fig.4.3–Fig. 4.13은 각 시편에 대한 미세구조를 분석하여 실제 단면 내의 전전성을 확인하였다. **Fig 4.5–13**에서 보이는 바와 같이 화이트 메탈 내부에는 육안으로는 확인이 힘드나 실제로 존재하는 기공과 미세 균열(crack) 등을 보여 주고 있다.

Fig. 4.5와 같이 화이트 메탈 내부에 미세한 기공들은 다른 결함으로 진행될 가능성이 적으나 **Fig. 4.11과** 같이 화이트 메탈 배어링의 취약부인 경계면에 생겨나는 균열 등은 운행 중 결함이 발전할 가능성이 크므로 배어링 조립 이전 단계에서 프로세스(process) 검증 및 제품 검사 등으로 미연에 문제가 예방되어야 한다.

Fig. 4.15는 SEM(Scanning Electron Microscopy)으로 구조를 확인하고 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)로 부위별 화학분석 내용을 설명한다.

Fig. 4.3에서는 화이트 메탈 용접 후 시편을 채취하는 모습이다.

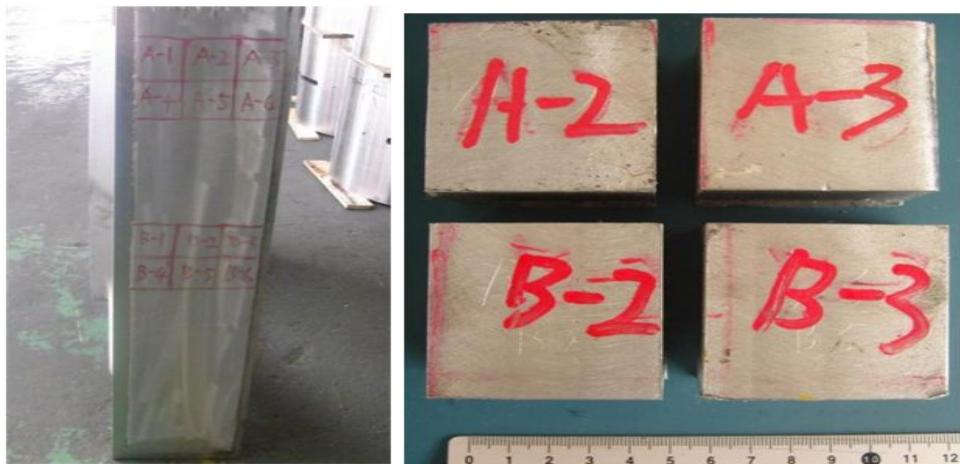


Fig. 4.3 Test specimen
(left: sampling position, right: specimen)

Fig. 4.4에서는 화이트 메탈이 용접된 시험편의 조직을 검사하기 위해서 용접이 된 시편의 절단 단면의 위치를 설명한다.

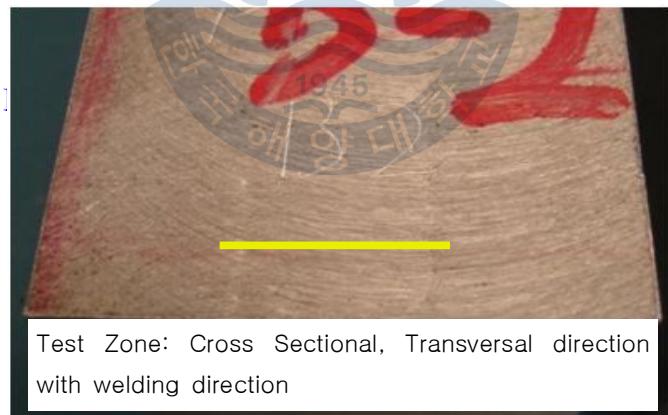


Fig. 4.4 General view of “A-2” microstructure, magnification 50X
(left: un-etched, right: etched condition)

Fig. 4.5과 Fig. 4.6에서는 "A-2" 시편의 원쪽은 일반적인 조직 내의 기공을, 오른쪽에서는 에칭을 한뒤 화이트 메탈 조직의 형상을 보여준다.

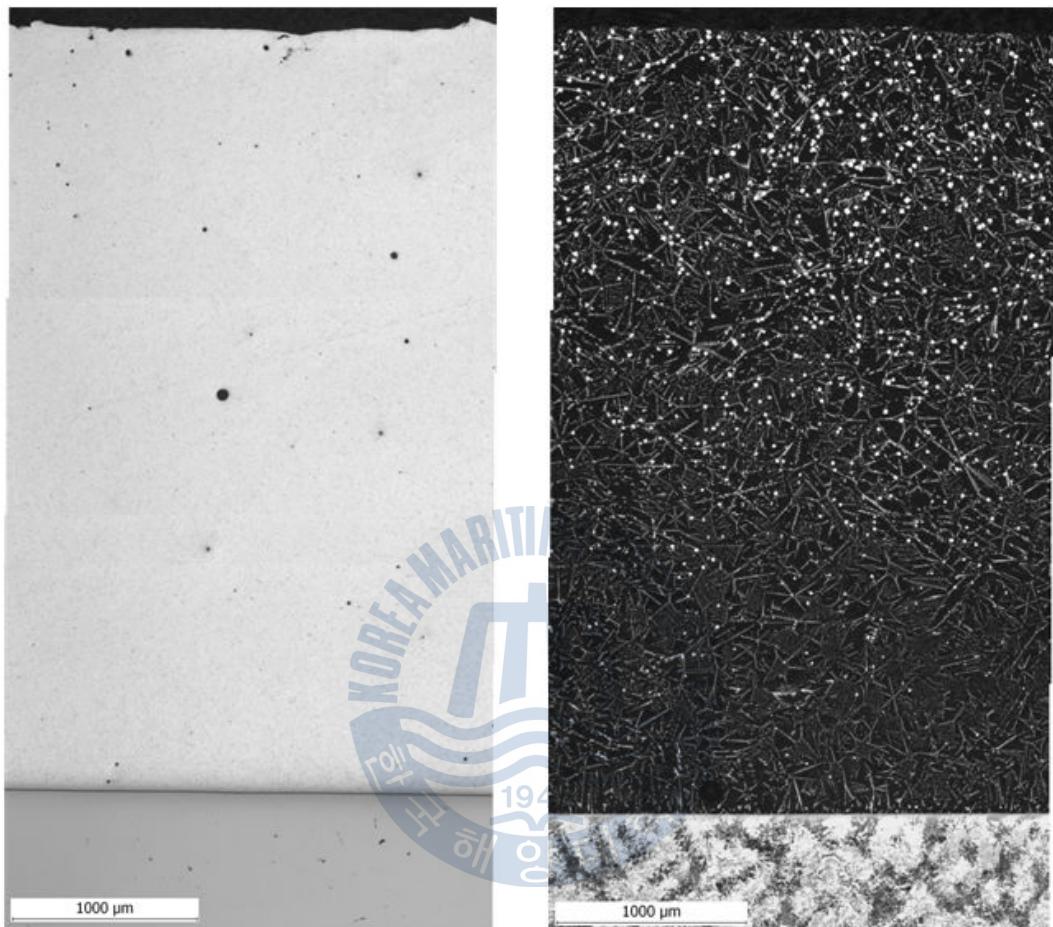


Fig. 4.5 Cross-sectional view of “A-2” microstructure, magnification 50X (left: un-etched, right: etched condition)

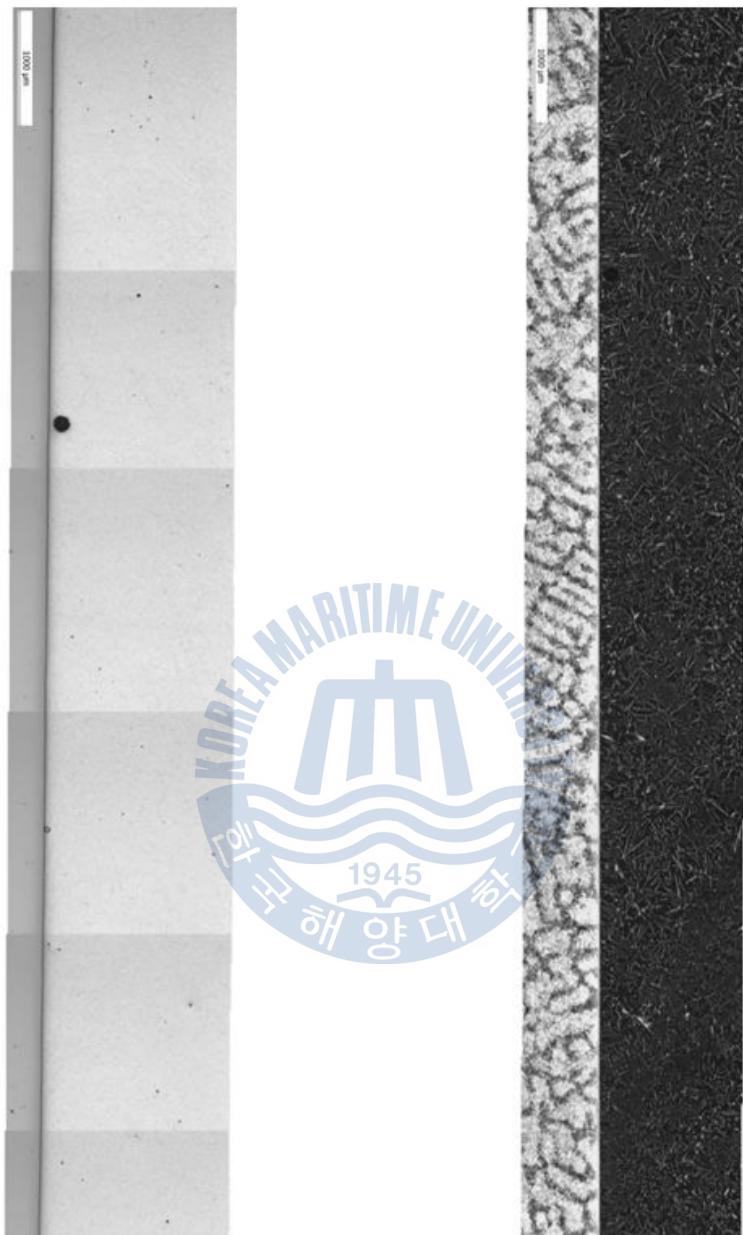


Fig. 4.6 General view of "A-2" microstructure, magnification 50X
(left: un-etched, right: etched condition)

Fig. 4.7과 Fig. 4.8에서는 "B-2"시편의 원쪽은 일반적인 조직 내의 기공을, 오른쪽에서는 에칭을 한 뒤 화이트 메탈 조직의 형상을 보여준다.

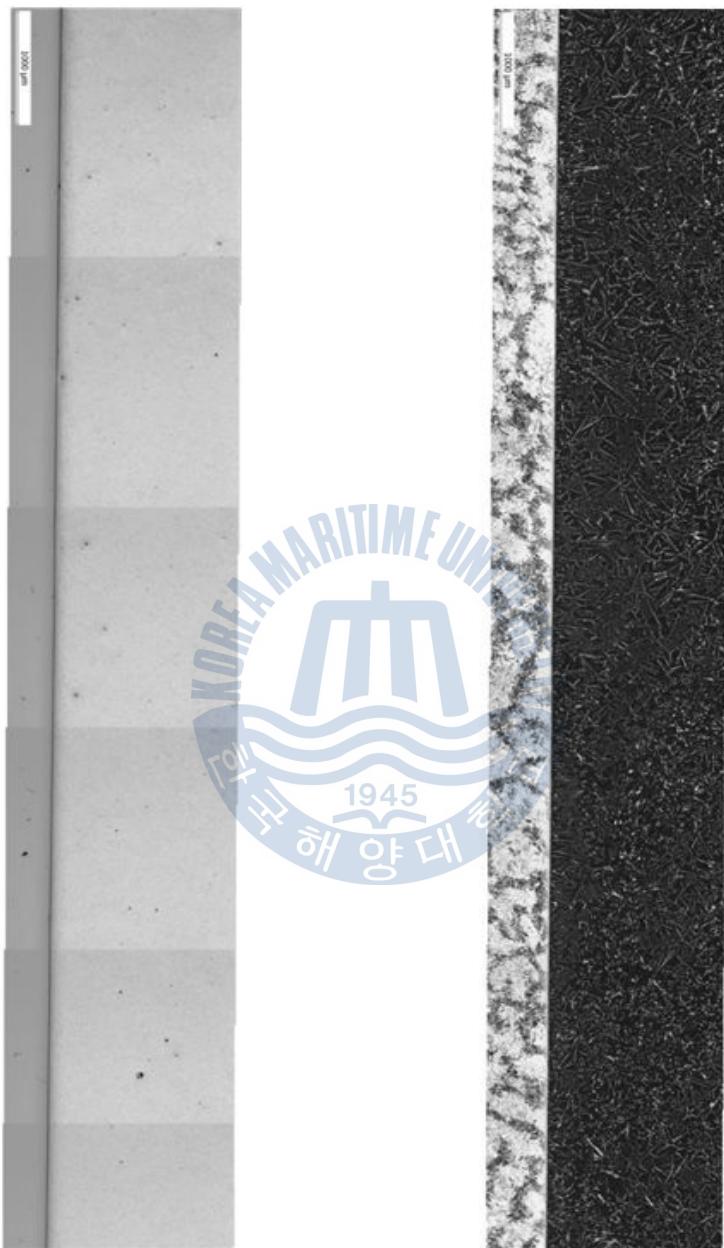


Fig. 4.7 Cross-sectional of “B-2” microstructure, magnification 50X
(left: un-etched, right: etched condition)

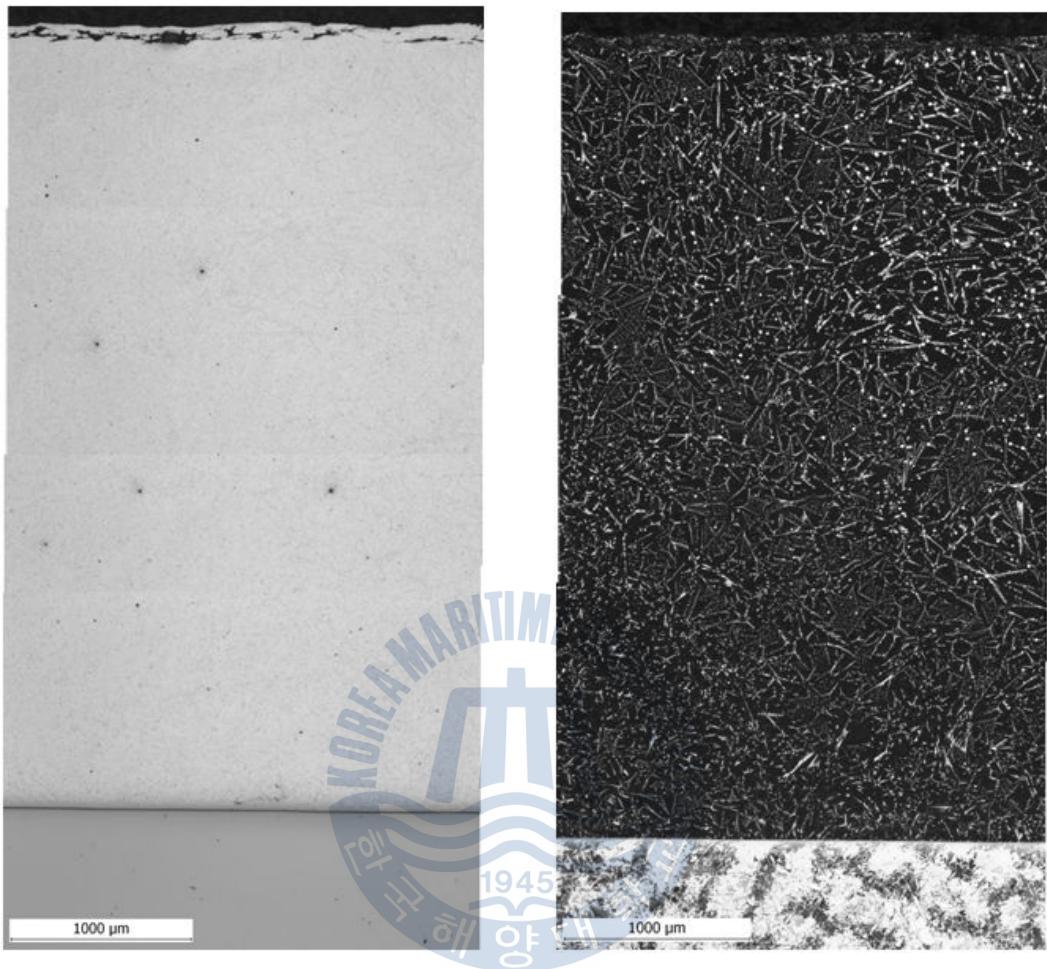


Fig. 4.8 Microstructure of "B-2"

Fig. 4.9에서는 A-2시편의 용접된 화이트 메탈 내부의 조직 구조에 미세한 기공형상을 보여 주고 있다.

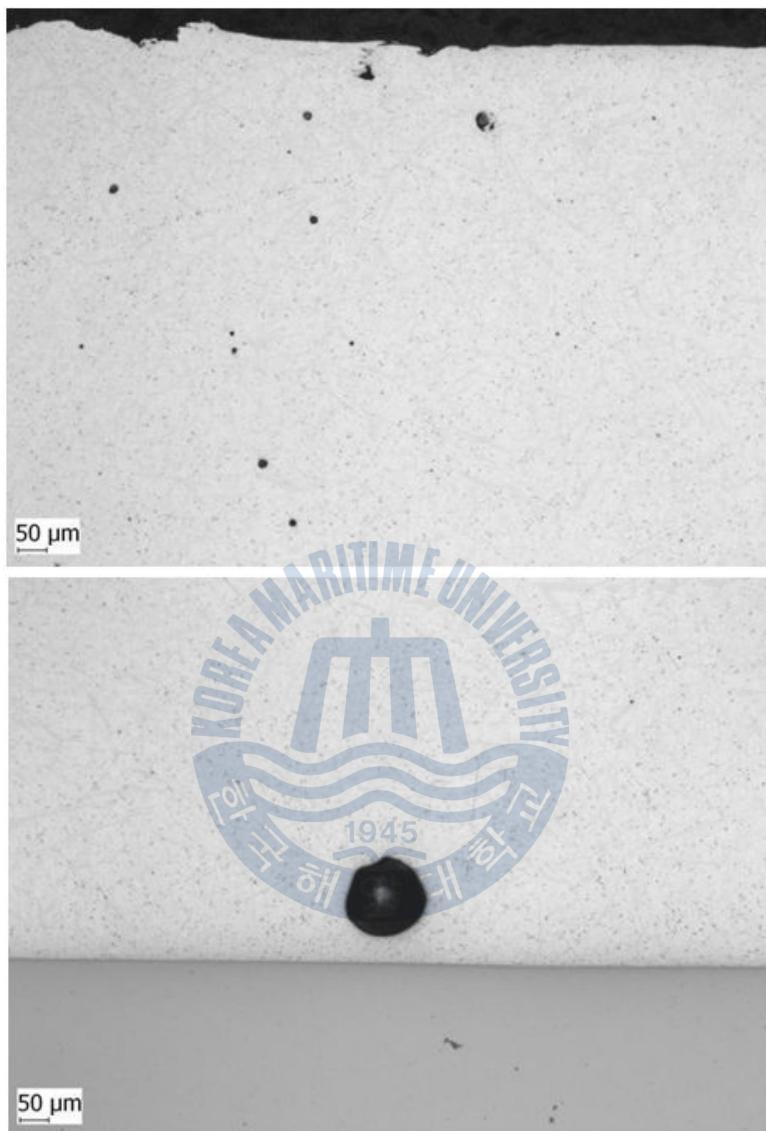


Fig. 4.9 Microstructure of "A-2"

Fig. 4.10에서는 B-2시편의 용접된 화이트 메탈 내부의 조직 구조의 화이트 메탈과 베이스 메탈의 접합부의 형상을 예칭한 사진으로 확인 한다. 베이스 메탈과 화이트 메탈의 경계면의 색이 상이한 것이 확인 된다.

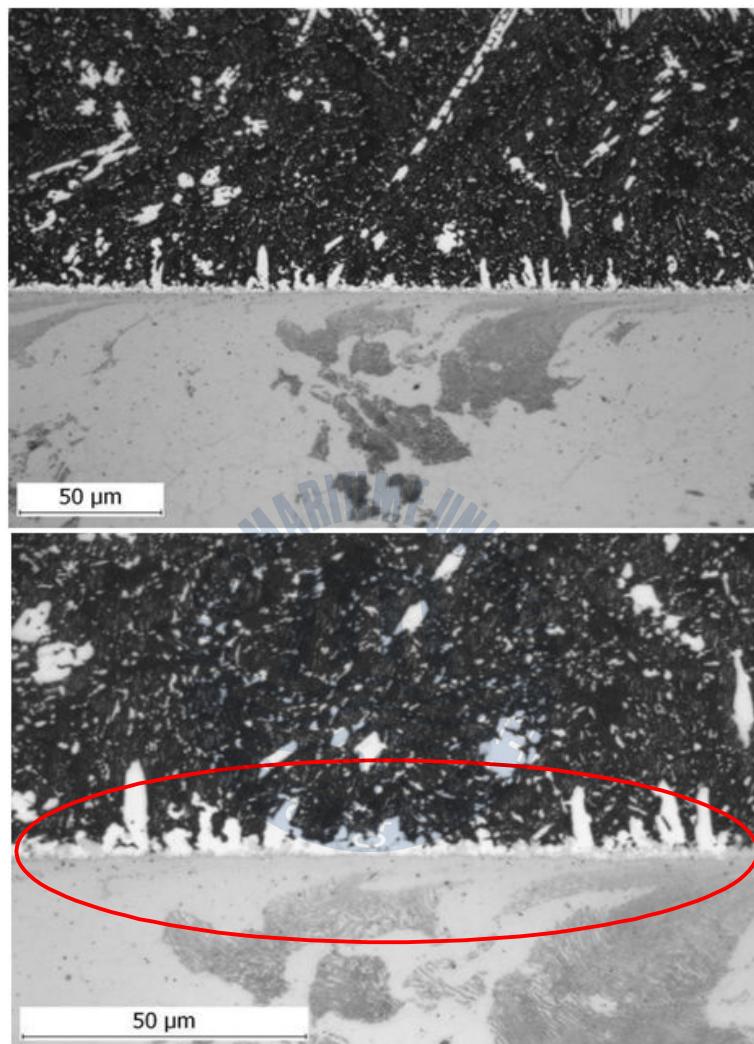


Fig. 4.10 Microstructure of "B-2"

Fig. 4.11에서는 B-2 시편의 베이스 메탈과 화이트 메탈의 경계면 부위에 마이크로 균열 형상을 보여준다. 앞에서 확인한 기공성보다는 **Fig. 4.11**와 같은 선형을 가지는 균열 형상이 향후 환경적인 요건에 의해 결함으로 진전 가능성 이 크다.

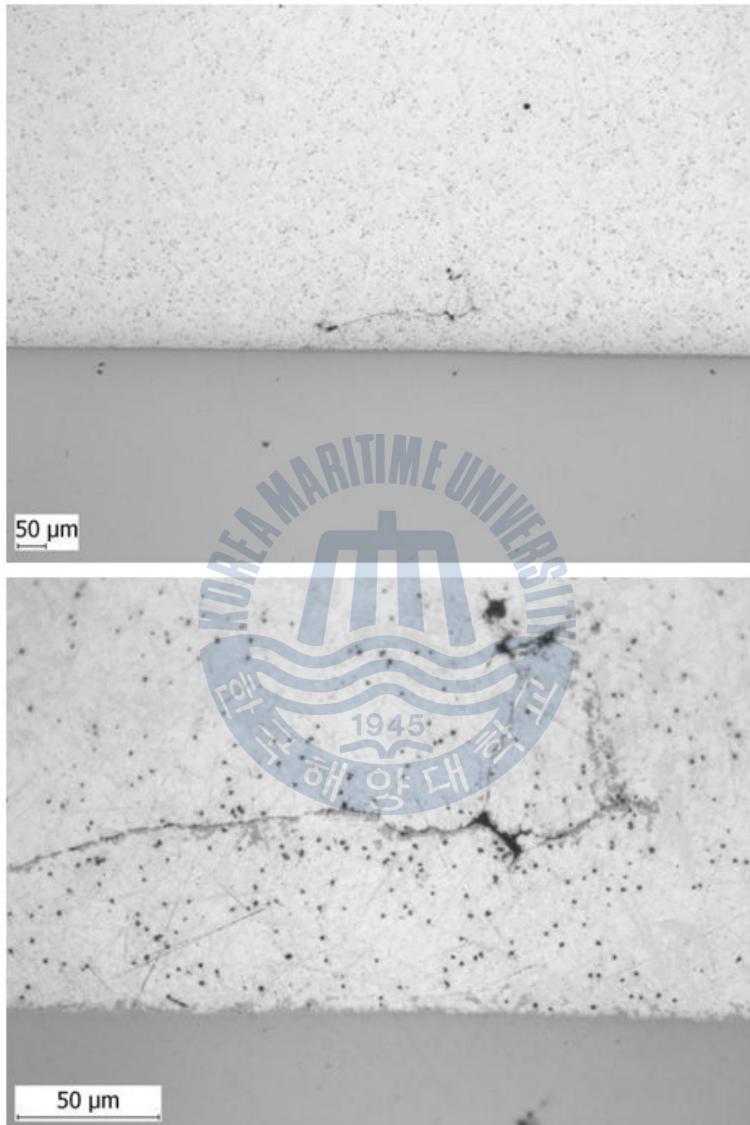


Fig. 4.11 Microstructure of "B-2"

Fig. 4.12에서는 A-3시편의 용접된 화이트 메탈 내부의 조직 구조의 화이트 메탈과 베이스 메탈의 접합부의 형상을 예칭한 사진으로 확인 한다. 위의 B-2 시편을 예칭한 모습과 같이 경계면의 색이 상이 한 것이 확인 된다.

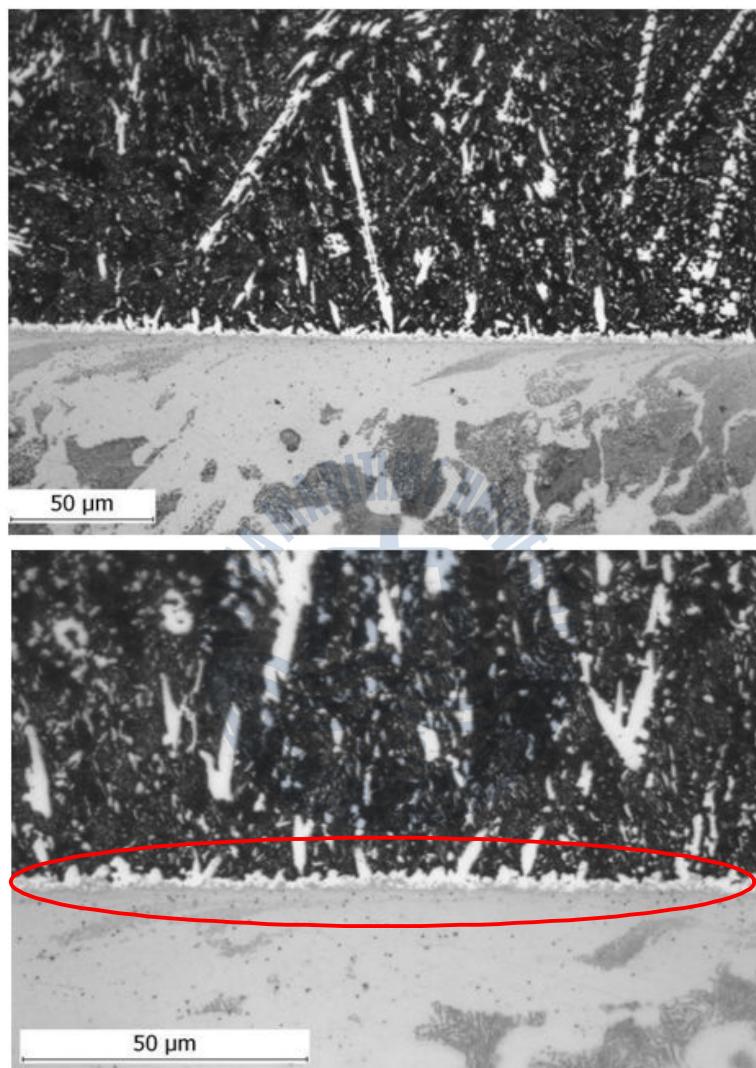


Fig. 4.12 Microstructure of A-3

Fig. 4.13은 경계면에서 발생한 기공의 형상을 보여 준다.

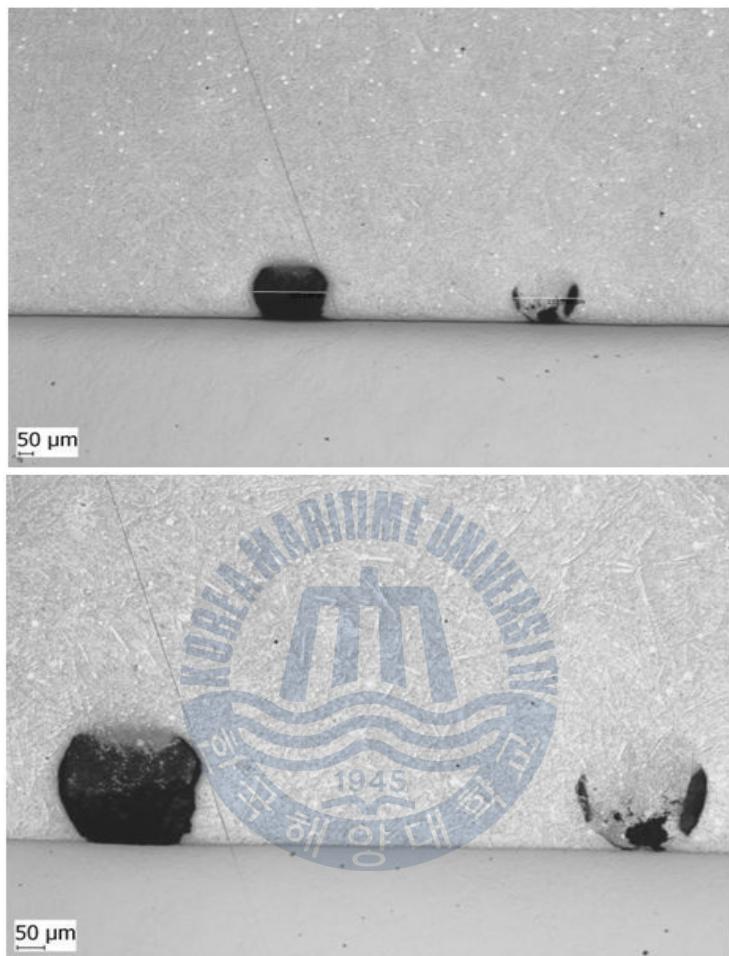


Fig. 4.13 Microstructure of B-3

Fig. 4.14는 SEM과 EDS를 활용한 모습으로 Fig. 4.10과 Fig. 4.12에서 의문을 가졌던 경계면의 자세한 형상 및 화학적 구성을 확인한다. 아래 사진에서 설명하는 내용은 경계면으로 내려갈수록 베이스 메탈의 철(Fe) 성분이 열에 의해 경계면으로 올라와 주석(Sn)이 풍부한 구성보다는 철의 함량이 많은 것으로 설명되어 강하지만 응력에 대해 쉽게 깨어질 수 있는(Brittleness) 성질을 설명한다. [10]

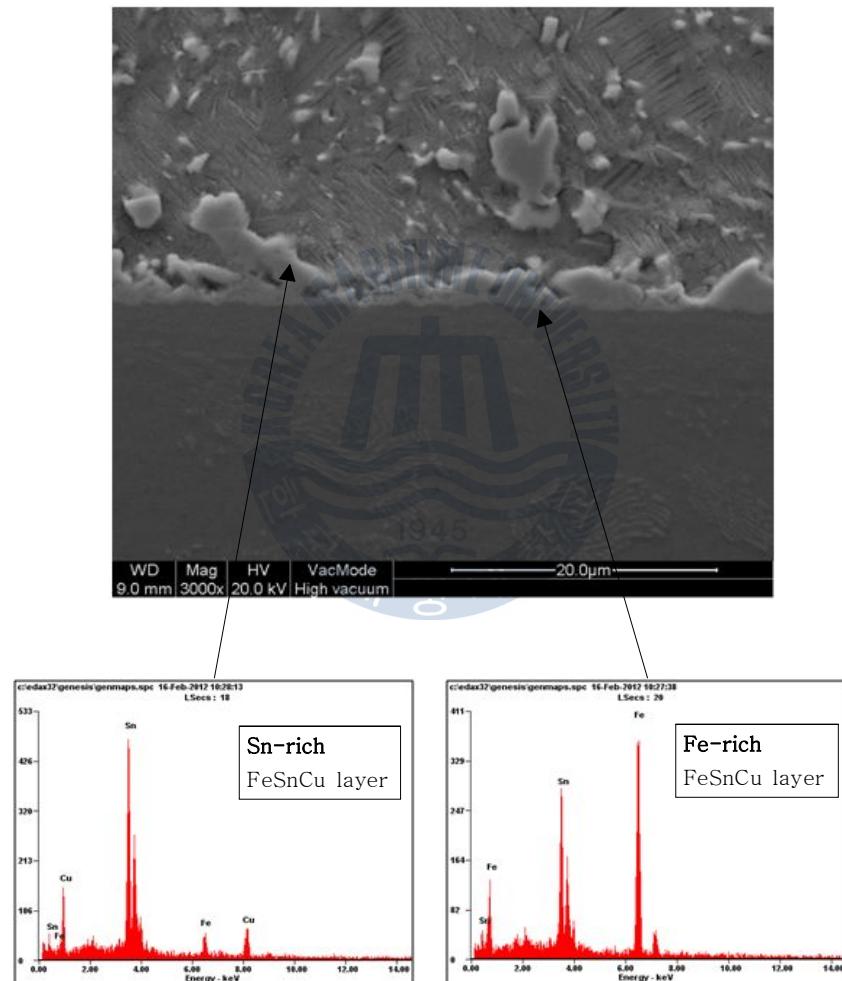


Fig. 4.14 SEM image and EDS analysis of “B-2”

4.3 초음파 탐상 검사

위의 미세 구조 분석을 통하여서 제품이 가질 수 있는 결함의 종류 및 지시들에 대해서 자세하게 파악 및 분석이 가능 하였으나, 실제로 미세 구조 분석이라는 파괴 검사를 통한 분석은 프로세스(process) 정립 및 로트(lot)별 검사를 하여 공정에 대한 검증 및 보증은 가능하나 각 제품의 품질보증은 파괴검사라는 맹점으로 인해 어려운 현실이다. 이에 대한 대안으로 개별 제품의 품질을 보증하기 위한 방법으로는 비파괴 검사가 있다.

비파괴 검사 중 베어링 결합 부의 체적 결함을 검출하기에 가장 적절한 검사법 중 하나는 초음파 탐상 검사법이다. 아래의 Fig. 4.15와 4.16은 엔진 메이커에서 베어링의 개발 제품 또는 시험품 등을 검사 할 때 적용한 mechanical ultrasonic testing으로 검출된 베어링 메탈 결합 부의 좋은 예와 좋지 않은 예를 보여준다.

Fig. 4.16에서 표시된 바와 같이 저면 에코 이전에 초음파가 적절히 결합되지 않은 부위에서 반사되어 돌아오는 에코는 결합부위가 견전하지 못함을 보여준다.



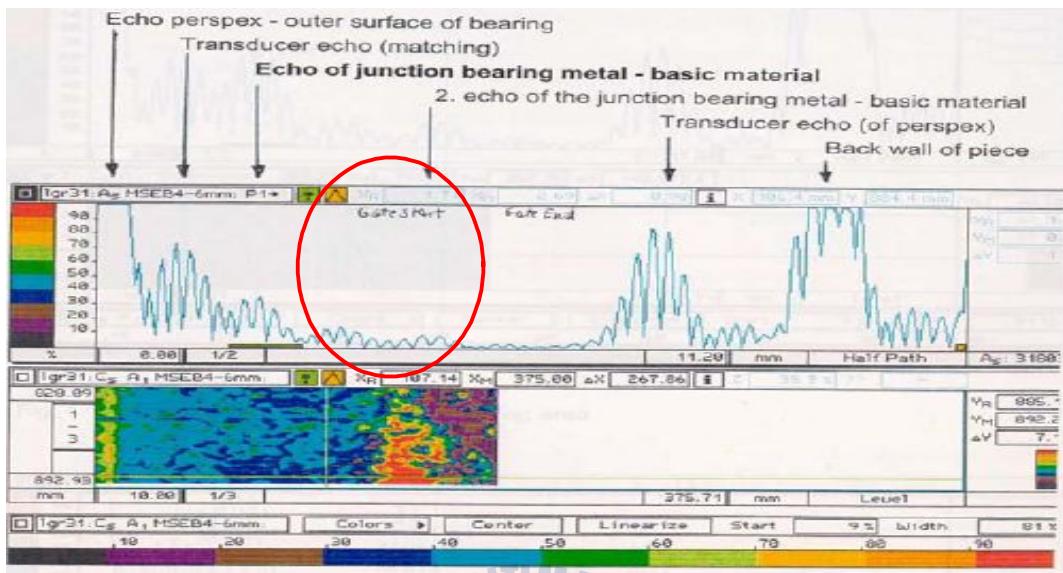


Fig. 4.15 Mechanized UT testing (good bonding)

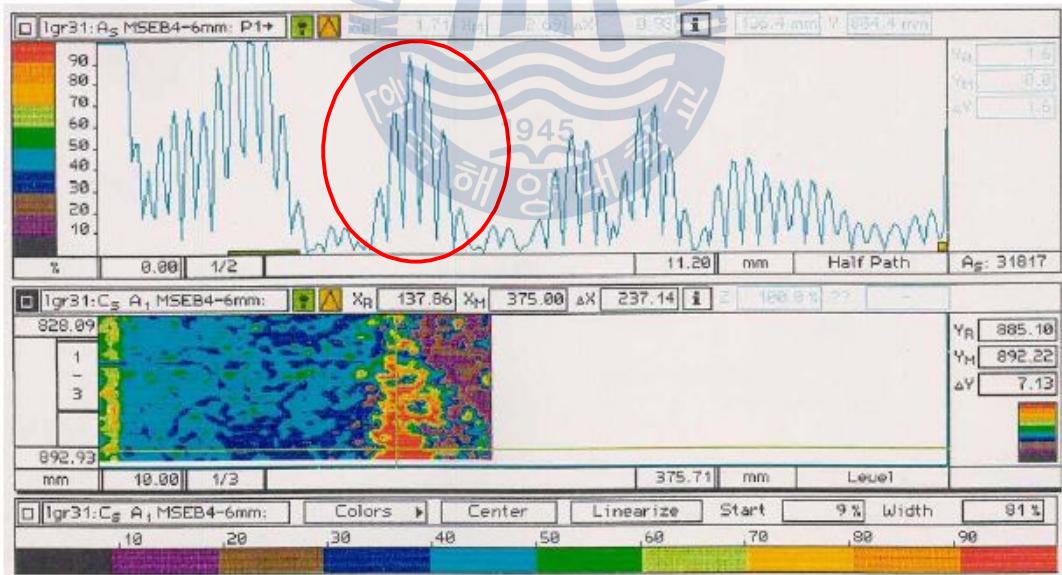


Fig. 4.16 Mechanized UT testing (bad bonding)

근거리 음장과 통칭 dead zone이라 불리는 initial echo 내의 결함, 즉 표면 직하에서 나타나는 지시등은 검출이 힘들며 조직사진으로 얻어진 Fig. 4.17과 Fig. 4.18에서 보이는 균열과 같이 화이트 메탈 내에서 발생된 결함은 실제로 straight beam으로 써는 검출이 거의 불가능 하다.

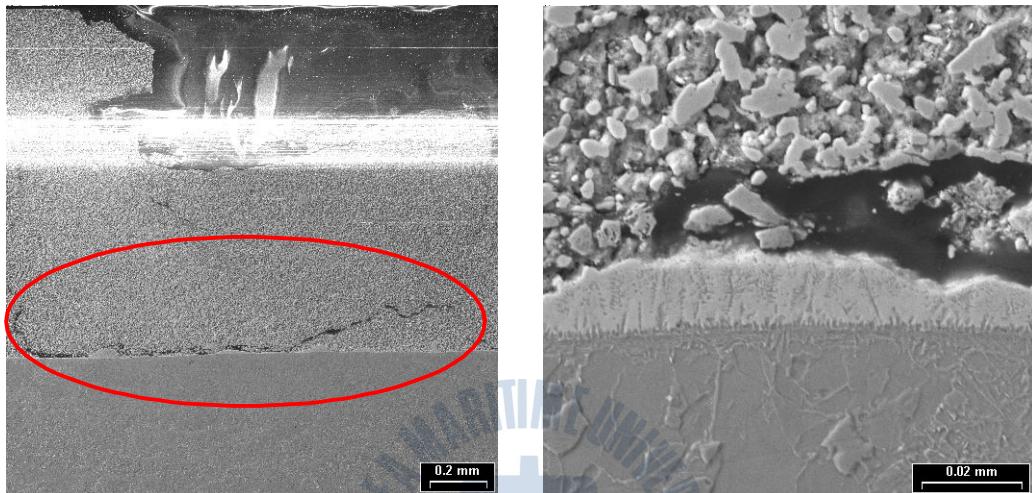


Fig. 4.17 Sectional views showing a large crack formed just above the bond layer

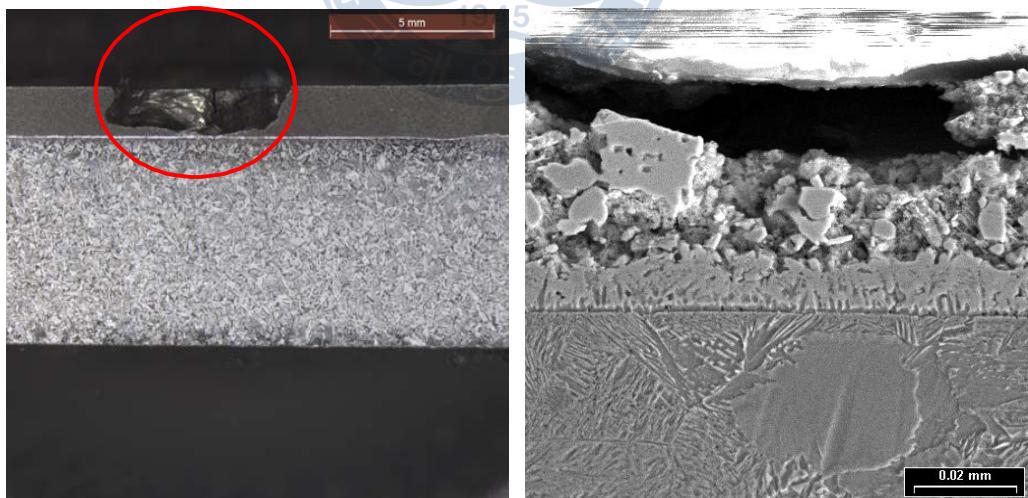


Fig. 4.18 Sectional views showing a large crack formed above the white Metal layer

현재 엔진 메이커인 W사 및 M사의 화이트 메탈 결합력에 대한 스펙(spec.), "White Metal Lining Testing Specification"에 따른 검증으로는 2-4MHz의 straight beam을 사용 하도록 되어 있으나 화이트 메탈에서 나타나는 크랙은 실제로 상기 방법으로는 위에서 설명한 바와 같이 검증이 어렵다. 이 검증을 위해 아래 Fig. 4.19에서는 본 실험에 사용된 독일 K사의 USM35 모델이 사용되었으며 Fig. 4.20에서와 같이 4MHz의 주파수를 가진 probe 중 Straight beam과 Dual beam probe를 각각 준비하였다.



Fig. 4.19 UT apparatus USM 35



Fig. 4.20 Probes, MB4S(Straight) and MSEB4(Dual)

아래 Fig. 4.22은 표면 직하의 결함에 대해서 Straight beam으로 검사 시 결함 부에서 beam이 initial echo에 묻혀 보이지 않으며 바닥에서 반사 되어 올라오는 back echo만이 Fig. 4.21에서 보이는 에코의 높이 보다 소량 줄어드는 모습을 보여준다.



Fig. 4.21 Reflected echo of straight beam from bottom

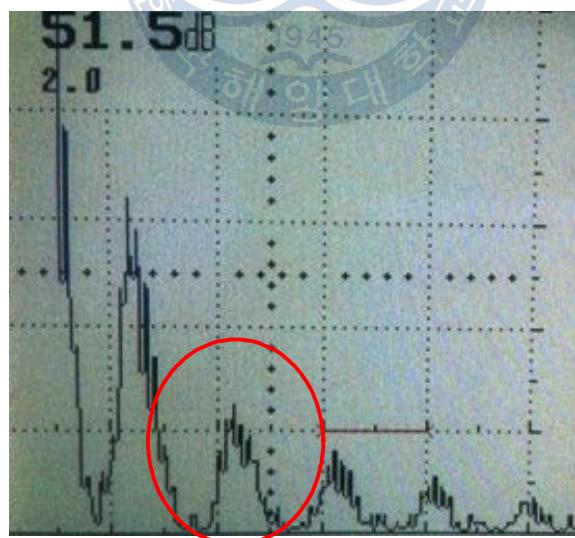


Fig. 4.22 Decreased echo by small defect

이에 대한 대안으로 dual probe를 채택하여 표면직하의 균열을 검출하는 시험을 진행 하였으며, Fig. 4.23와 같이 균열이 없는 시편에서 나타나지 않았던 에코가 Fig. 4.24에서는 보이는 바와 같이 dual probe의 사용으로 근거리 음장 영역 내에 들어있는 표면직하 결함에 대한 echo가 발견되었다.

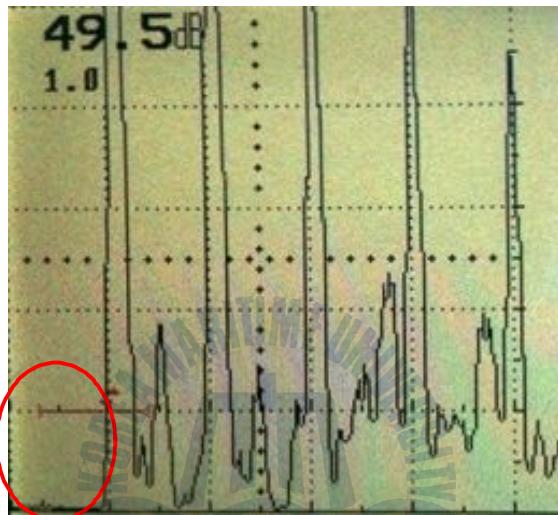


Fig. 4.23 Reflected echo by dual probe

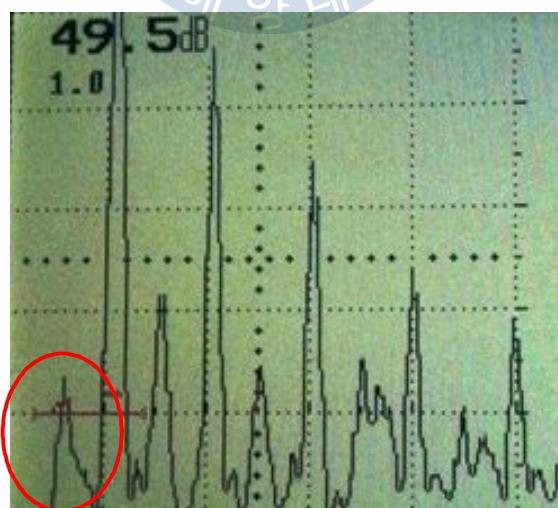


Fig. 4.24 2mm crack found by dual probe

제 5 장 결 론

'선박용 대형저속 디젤엔진용 화이트 메탈 본딩력 검증에 관한 연구'를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 주조 제품과 용접 제품의 결합력을 비교하기 위하여 파괴 시험인 Charmel test로 결합력을 확인하여 결합력은 용접 제품이 높았지만, 용접의 특성인 기공 또는 열에 의한 crack등이 미세사진 분석으로 확인 되었다. 따라서 현재 선박용 배어링 제작공정인 주조법의 대안으로 자동 용접법이 개발되어 시간 및 비용 층면에서 상당한 이점을 가지고 있으나 용접이라는 특수 공정의 특징으로 인해 제품의 견전성이 다소 부족한 것으로 판단되었다.
- 파괴 검사와 미세사진 분석의 단점인 제품을 파괴 하여야 한다는 부분을 보완하며, 공정 검사가 아닌 제품검사의 방법으로 비파괴 검사인 침투탐상 검사 및 초음파 탐상 검사가 실시되었지만 표면직하 결함 등에 대한 검증은 현재 요구되는 검사방법 이외에 dual probe의 추가 사용이 필요 하다고 판단되었다.
- Dual probe의 사용으로 표면직하의 결함에 대해서는 좀 더 확실한 검사결과를 얻을 수 있으나 dual probe의 특징인 제품 표면의 높은 조도 요구와 dual probe에서 만들어 내어 지는 노이즈는 검사결과를 판독하는데 어려움을 주어 초음파 탐상 검사자의 높은 기량과 집중력을 요구한다.
- 제품의 견전성 확보를 위하여 straight 와 dual beam 모두를 사용하면 높은 검출력이 확보되어 품질은 향상 되나 시간과 비용적인 층면 그리고 위에서 언급한 노이즈에 의한 검사 결과 판독 등에 대한 기술 향상이 요구 된다. 그러나 이 부분은 향후 비파괴 검사 기술 및 기계 등의 향상으로 해결 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 김영주, 조문제, 「대형저속 디젤엔진용 박판형 메탈 베어링의 국산화 개발에 관한 연구」, 한국기계연구원, 신아정기(주) p. 2, 1995
- [2] Gary L. Workman & Doron Kishoni, «Non-destructive test handbook», American Society of Non-destructive Testing pp. 201-237, 2007
- [3] 유춘식, «내연기관 공학개론», 연경문화사 pp. 130-135, 2004
- [4] 김영식, «최신 용접 공학», 형설 출판사 pp. 119-121, 1996
- [5] AWS education department, «Welding inspection technology», American Welding Society p. 2-1, 2000
- [6] International Standardization Organization, «ISO4386-2, Standard for Charmel Test», pp. 1-4, 2005
- [7] Borg, R. J. and G. J. Dienes, «An introduction to solid state diffusion», academic press, pp. 171-173, 1988
- [8] Glicksman, M., «Diffusion in solids», John Wiley & Sons, pp. 189, 2000
- [9] 김정근, 김기영, 박해옹, «금속현미경조작학», 도서출판 골드, pp. 78-82, 1999
- [10] H. Schumann «Metallographie», DVG, Leipzig, p. 68, 1991
- [11] A. Frost 「Judgement of Running Marks on Bearing」, Wartsila, pp.3-6, 2007
- [12] 남부민 «금속재료», 한국 산업 인력 공단, pp. 171-180, 2011

감사의 글

대학원에 처음 들어와서 학부전공과는 다른 기관시스템 공학에 대한 공부를 시작 할 때 새로운 학문의 시작에 대한 기쁨과 처음 접하는 학문에 대한 두려움을 안고 시작 한지가 엊그제 같은데 벌써 2년이라는 시간이 흘렀습니다. 지난 시간 동안 많은 분들의 도움을 받아 무사히 논문의 마지막 페이지인 감사의 글을 남기게 되었습니다.

학문의 바른 길과 자세를 보여주시고, 이 논문을 완성하기까지 부족한 제자를 항상 아낌없는 격려와 지도로써 이끌어 주신 조권희 교수님께 가슴 깊이 감사를 드립니다. 또한, 바쁘신 와중에도 귀중한 수업과 논문심사를 통하여 저를 지도해 주신 최재성 교수님, 김종호 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 전합니다.

학문의 길을 이어 갈 수 있도록 배려해주신 바르질라코리아, 안상군 차장님, 항상 형과 같은 따뜻한 마음으로 가르침과 격려로 이끌어 주신 이주환 차장님, 이 논문이 되기까지 귀중한 자료를 제공하여 주신 최의봉과장님께도 깊이 감사를 드립니다.

본 논문을 준비하면서 여려 면으로 많은 도움을 주신 박정규, 홍성준, 최원준, 박고룡 선배님과 최유희, 조경미, 조홍식, 이상은님께도 깊은 감사를 드립니다.

또한, 오늘이 있기까지 저를 바르게 키워 주신 소중한 아버지, 항상 저를 위해 기도하시며 사랑과 정성으로 큰 힘이 되어 주신 어머니께도 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 옆에서 격려 해주고 도와준 친구 김창용, 최성진, 박상현, 김태진 그리고 조영삼, 김태형, 오형조, 서원호, 문창준, 박준오, 송유득 형님께도 고마움을 전합니다.

끝으로, 어려운 환경에서도 본 논문이 잘 마무리 될 수 있도록 이해하고 배려해 준 저의 예비 신부 “장지연”에게 진심으로 사랑과 감사함을 전하며, 이런 기쁨들을 평생 같이 하고 싶습니다.

저를 아껴주신 이 모든 분의 도움이 될 수 있도록 더욱 힘차게 나아갈 것을 다짐 합니다.