

3. 해설기사

프로펠러 손상 및 수리

Failure and Repair of the Propeller



이 운 호

Woon-Ho Lee

- (사)한국선급 의장업무팀장
- E-mail: whlee@krs.co.kr

1. 서 론

선박이 항해하기 위하여는 주기관에서 발생한 동력을 유효하게 추진력으로 전환시키는 장치가 필요하며, 이러한 수단으로 여러 장치가 고려될 수 있으나 나선형 프로펠러를 회전시켜 추진력을 얻는 방식을 채택하는 경우가 대부분이다. 나선형 프로펠러는 선체 외부에 노출되어 있는 회전체로 여러 하중이 작용할 뿐만 아니라 전해질의 해수에 잠겨 있으므로 부식 손상이 발생할 확률이 높다. 프로펠러는 선박의 안전운항에 직접적으로 영향을 미치므로 선급 규칙에서 설계, 제작 및 검사에 관련된 규정이 상세하게 규정되어 있어 까다롭게 관리되고 있음에도 불구하고 여러 가지 손상이 발생하고 있다.

따라서 이 기사에서는 나선형 프로펠러에 발생하기 쉬운 손상사례와 손상 방지 대책 및 손상 수리 방안 등을 고찰해 봄으로써 유사한 손상사례의 재발을 방지하고 또한 손상이 발생한 경우 적절한 수리방안에 대한 지식을 공유하여 선박 안전과 관련분야의 기술발전에 조금이라도 도움이 되기를 희망한다.

2. 프로펠러 손상 사례 및 대책

2.1 프로펠러의 분류

프로펠러는 재질, 구조, 피치제어 방법 등에 따라 다음과 같이 분류할 수 있으며 프로펠러의 특성에 따라 발생하는 손상유형 및 수리방안에 차이가 있다.

- 주철, 주강, 동합금 주물, 스테인리스 강
- 일체형, 조립형
- 고정 피치, 가변 피치

주철 또는 주강재 프로펠러는 현재 거의 없고 스테인리스 강재도 특수한 경우에만 제작되고 있으며 대부분의 프로펠러는 동합금 주물로 제작되고 있으므로 손상 및 수리 방안은 동합금 주물의 경우에 대하여 주로 고찰하며, 가변 피치 프로펠러는 피치제어 기구에서 손상이 발생하는 사례에 대하여도 살펴보고자 한다.

2.2 손상 유형 및 원인

프로펠러에 발생하는 손상의 형태는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 균열, 변형 및 절손
- 침식과 부식(Erosion & Corrosion)
- 프로펠러 피치제어 기구의 손상
- 기타 손상

구체적인 손상 형태에 대하여는 별도로 실례를 들어가며 살펴볼 것이나 손상원인은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 설계 결함, 강도 부족
- 제작 결함, 재질 결함
- 부유물, Rope 등과 충돌 및 접촉
- 캐비테이션
- 화학적 및 전기 화학적 부식 환경

2.3 손상 원인 및 대책

프로펠러 블레이드에 작용하는 물리력으로는 추력에 의한 굽힘 응력과 및 원심력에 의한 인장응력 등 정상운항 상태의 복합응력이 발생하는 한편 블레이드 진동 및 부유물과 충돌 등에 의한 변동응력 및 우발적 응력도 작용한다. 따라서 이러한 응력에 의하여 블레이드가 손상되며 특히 변동응력은 피로파손을 유발한다.

이러한 응력에 더하여 프로펠러가 산이나 알카리 성분이 포함된 해수중에 오래 잠겨 있을 때 화학적 부식 현상이 발생하며 외항선보다는 화학공장 등이 있는 항만이나 하천을 항해하는 선박에서 많이 발생하는 특성이 있다.

화학적 부식과는 다른 현상으로 전기화학적 부식이 있으며 이는 프로펠러 재료와 해수 사이에 형성된 국부전지현상(Galvanic action)에 의해 발생하며 프로펠러에서 발생하는 부식은 대부분이 전기화학적 것이 주원인이다. 이러한 현상의 원인은 조직이나 성분의 불균일, 금속과 접하는 부분의 온도 및 농도의 차이, 금속에 가하여지는 응력, 금속과 액체 사이에 상대속도가 있을 경우, 보스부근과 날개 끝에서 유속의 차이 등에 의하여 발생한다. 국부적으로는 적절한지 못한 용접보수 부 주변에 발생하는 경우도 있으며 탈아연 현상(Dezincfication)으로 망간황동에서 아연이 침식되어 심한 경우 동 성분만 남게 되어 프로펠러의 표면이 붉게 변한다.

전기화학적 부식의 방지 대책으로는 전기방식(Cathodic protection) 장치 부착을 고려할 수 있으며, 특히 국부 용접수리를 할 때는 적절한 절차에 따라 시공하여야 한다.

프로펠러 블레이드에 발생하는 침식(Erosion)은 캐비테이션 현상으로 발생한 기포가 붕괴할 때 충격압력에 의해 금속표면의 물리적 파괴작용으로 블레이드 표면에 곰보 모양의 함몰이 생기고, 여기에 국부전지작용으로 부식되는 현상이다. 침식 장소는 캐비테이션이 발생하는 장소보다 약간 하류쪽(Downstream)에 분포하고, 각 블레이드마다 블레이드 끝의 같은 위치에 같은 크기로 발생하는 특징이 있다. 특히 블레이드 끝(0.9R 부근)의 배면 중앙부로부터 후연에 발생하는 것은 배면 캐비테이션에 기인하며, 블레이드 끝(0.8R 부근)의 압력면 중앙부근부터 전연으로 발생하는 것은 압력면 캐비테이션에 기인한다.

다음 그림 1은 캐비테이션에 의하여 침식이 발생하는 개념을 보여주고 있다.

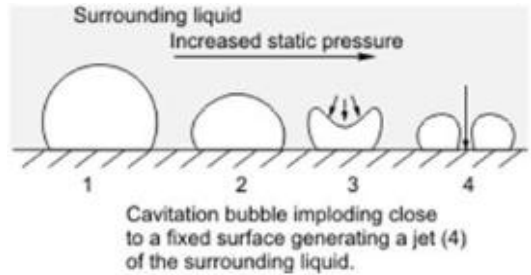


그림 1: 캐비테이션에 의한 침식 발생 개념도¹²⁾

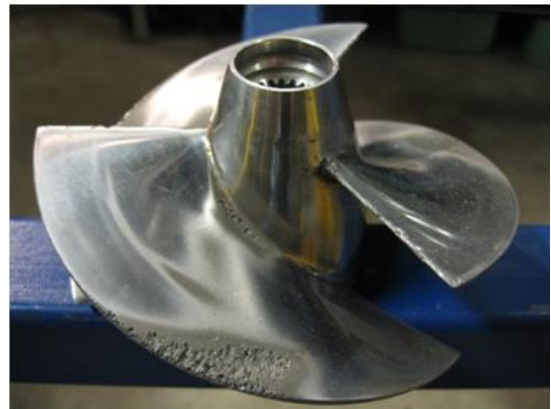


그림 2: 캐비테이션에 의한 블레이드 침식

일반적인 캐비테이션 방지 대책으로는 회전수와 블레이드 면적 등을 적절하게 선정하여 회피하고, 캐비테이션 도표를 활용하며 모형 프로펠러로 캐비테이션 실험을 시행하여 설계를 보완한다. 캐비테이션이 발생하면 부수적으로 침식이 발생하므로 침식을 방지하려면 캐비테이션 발생을 억제하여야 한다.

균열방생 방지 대책으로는 재질 및 주조 품질 향상이 무엇보다 중요하다. 또한 균열의 진전은 높은 응력부위에 존재하는 작은 결함으로부터 시작되는 경우가 대부분이므로 다음과 같은 점을 유의 하여야 한다.

- 블로우 홀 등 주조 결함 방지
- 캐비테이션에 의한 침식부에서부터 발생하는 균열 방지
- 적절한 용접보수 절차에 따라 용접작업
- 변형된 프로펠러를 원상회복 작업시 적절한 가공방법 준수

특히 운항중인 선박의 프로펠러에서는 부유물과 충돌 등 우발적인 사고를 제외하고 가장 많이 발생하는 손상 사례로 피로파괴를 꼽을 수 있다.

피로파괴란 시간에 따라 변동하는 하중이 긴 시간 작용하게 되면 재료의 정적강도보다 훨씬 낮은 응력에서도 파괴되는 현상이다. 블레이드에 발생하는 응력은 블레이드의 진동, 부유물과의 충돌, 블레이드에 작용하는 추력의 변화 등으로 인해 운전중 계속 변동한다. 따라서 이러한 변동응력이 블레이드에 주조결함 등 작은 균열이 존재할 경우 이 결함이 성장하여 피로파손에 이르게 되도록 촉진하며, 부유물과 충돌에 의한 손상을 제외하고 프로펠러 블레이드의 절손사고의 대부분을 차지한다.

2.4 피로파손에 의한 블레이드 탈락

다음 그림 3은 부유물과 충돌 사고가 없었음에도 불구하고 블레이드가 절손 탈락한 경우를 보여주며 그림 4는 절손된 블레이드 단면의 매크로 시험 준비 상태를 보여준다.



그림 3: 블레이드 절손 탈락 파단면 상태



그림 4: 파단면 매크로 시험 준비 상태

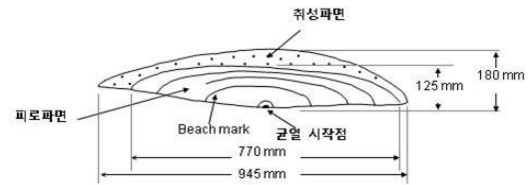


그림 5: 파단면 스케치

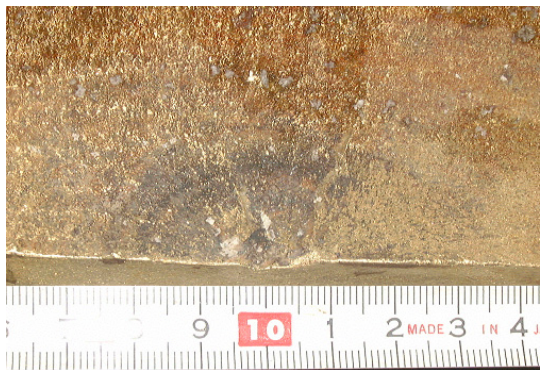


그림 6: 균열 시작점 확대 사진

이 손상은 블레이드가 0.2R 부근에서 절손된 경우로 피로파괴의 전형적인 파단면 상태를 보여

주고 있다. 블레이드 단면의 0.2R 부근은 가장 큰 변동응력이 작용하는 곳이다. 따라서 이러한 부위에 존재하는 사소한 결함이 균열의 시작점으로 역할을 하여 피로파괴가 진전되고 궁극적으로 프로펠러 블레이드가 절손되어 탈락하는 손상으로 이어지게 되었다.

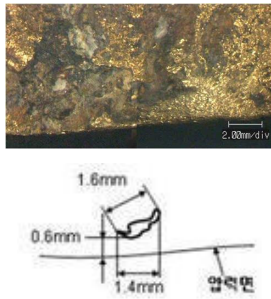


그림 7: 균열 시작점의 내부 결함 확대 사진

2.5 프로펠러 보스부의 균열

다음 그림 8은 스테인리스 강재의 프로펠러 보스부에 발생한 Honeycomb 형상의 균열을 보여주고 있다. 이러한 균열현상 발생원인은 표면의 부동태 피막이 파괴되어 Pitting 발생하고 균열로 진전된 경우이다. 균열의 깊이를 확인한 결과 3mm 이상 진행된 성장성 균열이고 용접육성 보수가 불가한 영역이라 새로 제작한 프로펠러로 교체하게 되었다. 참고로 주강재 프로펠러의 검사 및 용접보수에 대한 기준은 IACS UR W27³⁾의 규정을 적용할 수 있다.

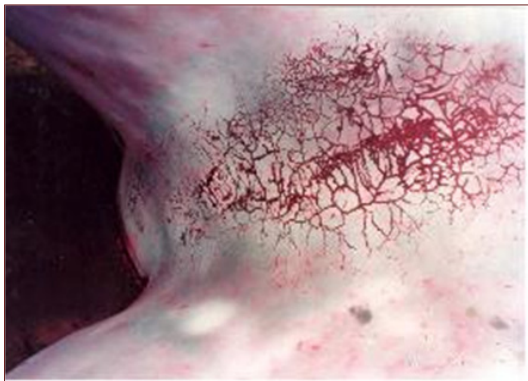


그림 8: 프로펠러 보스부의 균열

2.6 블레이드의 균열 및 결함

그림 9는 블레이드에 균열이 발견된 상태를 보여주고 있으며 부적절한 용접보수 부위에 손상이 발생한 경우이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 부적절한 용접보수는 균열 발생의 원인이 되는 경우가 많으므로 다음 3에 기술한 내용을 참고하여 적절한 절차에 따라 신중하고 완벽하게 보수작업이 시행되어야 한다.



그림 9: 부적절한 용접보수부의 균열

2.7 프로펠러 보스의 Slip

다음 그림 10 및 11은 프로펠러 보스의 Slip 손상사례를 보여준다. 키를 사용하지 않고 프로펠러를 추진축의 테이퍼 부위에 압입하여 부착한 축계에서 프로펠러와 축 사이에 Slip이 발생하였다. 신조후 5년만의 1차 정기 검사에서 추진축 발출검사를 위하여 프로펠러를 축에서 떼어내었더니 프로펠러 보스 내면과 축 표면 및 프로펠러 체결 나사부위에 손상흔적이 발견되었다. 프로펠러 블레이드 등 기타 부위에는 별다른 손상이 없어 선박 운항중에 블레이드가 부유물과의 충돌 등 충격적인 외력이 작용한 사고는 없었던 것으로 판단하였다. 프로펠러와 축 사이에 상대적인 Slip이 발생한 원인을 찾기 위하여 여러 가능성을 조사하여 추정된 사항은 다음과 같다.

- 프로펠러축의 나사부가 손상된 상황으로 판단하여 Slip이 발생한 것은 프로펠러 부착 너트가 풀리는 방향으로 움직인 경우이다.
- 따라서 프로펠러가 정회전 상황일 때는 너트

가 잠기는 상태이므로 Slip이 발생한 때는 역회전 상태인 것으로 판단된다.

- 결과적으로 유사한 사고사례¹⁰⁾의 경우와 같이 Crash Stop Astern 시험시에 과도한 토크 증가가 원인으로 추정된다.



그림 10: 프로펠러 Slip 손상(보스 내면)



그림 11: 프로펠러 Slip 손상(축)

프로펠러를 키 없이 압입하여 부착할 때는 통상 운항 상태의 토크보다 2.8배 정도의 안전율을 갖도록 설계하여 Crash Stop Astern 상황을 포함한 비정상 상태에서 과도하게 토크가 증가하는 경우에도 안전운항이 가능하다. 그럼에도 불구하고 이번과 같은 손상이 발생한 원인에는 제작, 시공 및 Crash Astern Stop 시험시 비틀림 진동과 공진 등의 상황이 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 추정된다. 특히 비틀림 진동과 공진에 의한 영향에 대하여는 그림 12에서 보여주는 특징이 참

고 될 수 있을 것이다.

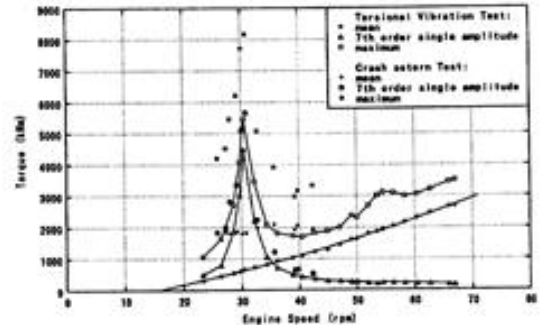


그림 12: Crash Stop Astern시의 비틀림 진동 공진 Torque 증가 경향¹¹⁾

2.8 CPP 피치제어 기구의 손상

CPP 축계는 프로펠러 블레이드뿐만 아니라 피치 제어기구에서의 손상 가능성이 높다. CPP의 피치제어 기구는 그림 14 및 15에 설명하고 있는 예와 같으며 Spindle Torque 가 중요한 하중으로 작용하고 있다. 이 Spindle Torque는 그림 13에서와 같이 맥동하므로 프로펠러 피치제어 기구의 관련 부재에 변동 응력이 발생하게 되고 이에 따라 피로 파손 현상이 발생한다.

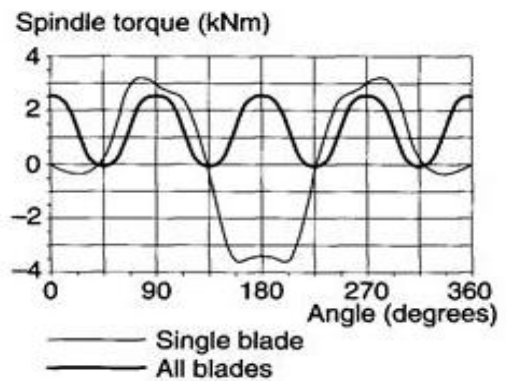


그림 13: Spindle Torque의 변화(예)¹²⁾

가변피치 프로펠러에서 피치제어기구에 작용하는 하중은 외부 충격에 의한 응력의 영향을 고려하여야 한다. 특히 대빙 구조 및 극지 운항선박의 경우에는 프로펠러 블레이드에 얼음이 접촉할 때 등의 충격하중이 Spindle Torque를 증가시키므

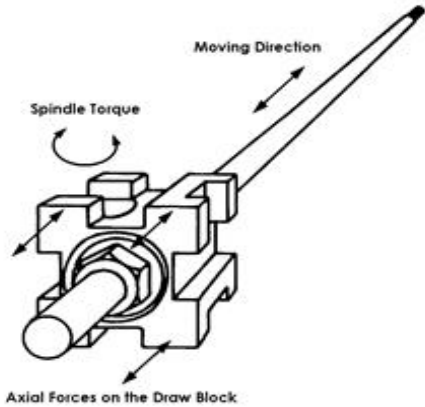


그림 14: 피치제어 기구(1)

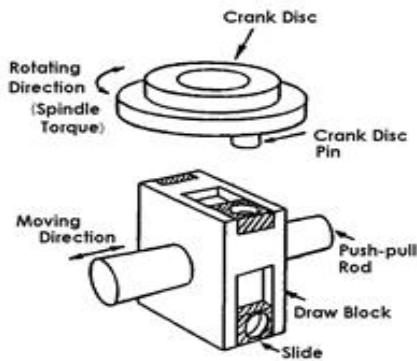


그림 15: 피치제어 기구(2)

로 이에 의한 영향을 고려하도록 선급 규칙⁴⁾ 등에 규정되어 있다. CPP 축계에서 블레이드에 작용하는 외부 충격하중은 피치제어기구의 응력 증가로 곧바로 작용하므로 손상발생 가능성이 따라서 증가한다고 볼 수 있다.

가변피치 프로펠러의 경우 피치 제어기구외에 블레이드의 조립부위에서 발생하는 손상으로 다음 그림 18에서 보여주는 바와 같이 블레이드와 크랭크 Disc가 일체로 제작된 구조에서 Disc 부위에서 균열 또는 절손되는 사례가 있다.



그림 18: CPP Blade Crank-arm Disc부위 손상⁸⁾



사진 16: 피치제어 기구의 Push-pull rod 절손 사례(1)



사진 17: 피치제어 기구의 Push-pull rod 절손 사례(2)

3. 응급조치 및 용접보수

3.1 응급조치

프로펠러 블레이드가 부유물과 충돌로 인하여 탈락 또는 Dent되는 경우가 프로펠러 손상의 대부분을 차지하고 있다. 부유물과 충돌하면 블레이드가 절손, 탈락되는 경우뿐만 아니라 블레이드 일부분에 국부적인 Dent 손상 등이 발생한다. 이러한 블레이드의 탈락 또는 Dent 손상은 용접수리가 가능한 정도인지를 검토하여 수리하거나 또는 새로 제작하여야 할지 여부를 판단하여야 한다.

다음 그림 19 및 20은 블레이드의 0.7R 부근에 크랙이 발견되어 용접수리를 하여 운항하던 중 약 1년 후에 0.65R 부위가 다시 절손 탈락한 사고 사례이다. 프로펠러를 새로 제작할 때까지 임시 운항을 계속하기 위하여 응급조치로 탈락된 블레이드의 반대측 블레이드를 프로펠러의 전체적

평형을 고려하여 절단하였다. 블레이드를 용접수리하여 운항하였으나 1년 남짓한 시간이 경과하여 다시 탈락된 손상 원인을 다음과 같은 관점에서 조사하였으나 명확한 원인이 밝혀지지는 않았다.

- 제작시의 재질결함 잔존
- 부유물과 충돌
- 용접수리시 균열을 완전하게 제거하지 못함
- 용접수리부의 적절한 응력완화 열처리 등이 부적절하여 용접부 취약

한편 그림 20에서와 같이 응급조치로 프로펠러의 평형을 맞추고 선속을 낮추어 운항하는 경우가 있다. 이 때 프로펠러 평형을 맞추기 위하여 손상된 프로펠러의 반대편 프로펠러 블레이드의 일부를 잘라내므로 인하여 추진축계 비틀림 진동 특성의 변화를 고려하여야 한다. 프로펠러 블레이드를 잘라내어 프로펠러의 회전관성 질량의 감소분과 부가수가 감소하는 질량에 의한 영향을 감안하여 기존에 추진축계 비틀림 진동 계산자료를 검토하여 연속사용 금지 회전수 범위가 설정되어 있다면 이 범위를 다시 조정할 필요가 있다. 통상 블레이드를 잘라내는 위치 및 질량에 따라 비틀림진동 고유 진동수에 미치는 영향이 다르긴 하지만 4개 블레이드를 갖는 프로펠러의 2개 블레이드 끝단에서 각각 직경의 10% 정도를 잘라낸다고 하여도 필자의 경험으로는 대체로 2행정 기관 직결 추진축계 시스템을 갖는 대형 선박에서는 기존의 비틀림진동 금지회전수 범위를 2-3% rpm 정도를 상향시키면 충분한 것으로 판단된다.



그림 19: 용접 수리부의 절손 탈락

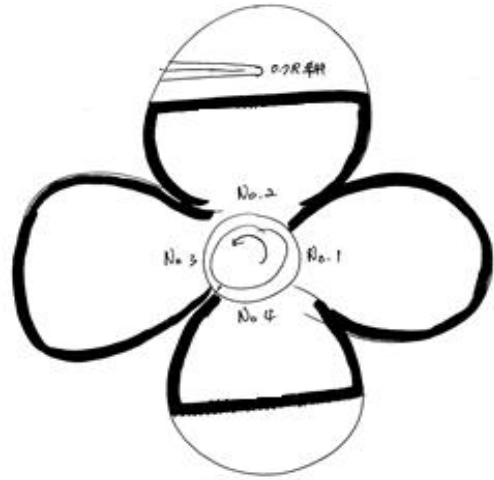


그림 20: 평형을 맞추기 위한 블레이드 절단 스케치

3.2 용접 보수

프로펠러에 결함이 발견되었거나 손상이 발생한 경우 용접보수 또는 날개교정(Straightening) 작업을 하여야 할 경우가 있다. 이러한 작업을 시행하기에 앞서 선급 규칙 등^{1,2)}에 따라 수리할 부분이 어떤 부위에 해당하는지를 조사하고 그에 따라 규칙의 요건을 적용하여 작업하여야 한다. 다음 그림 21은 용접보수영역을 구분하여 보여주고 있으며 보수범위의 제한은 다음과 같다.

- A 영역 : 용접보수를 하여서는 아니된다.
- B 영역 : 용접보수 방법에 대하여 선급의 승인을 받고 용접보수를 할 수 있다.
- C 영역 : 일반적으로 용접보수가 허용된다.

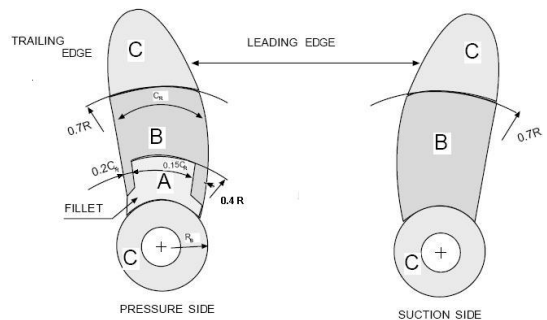


그림 21: 프로펠러의 보수 영역 구분(1)

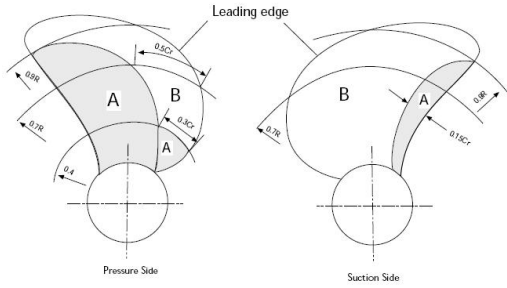


그림 22: 프로펠러의 보수영역 구분 (스큐우 각 25° 이상)

그림 23은 용접 보수의 여러 방법을 보여주고 있다. 1번의 경우는 탈락한 블레이드 대신에 Piece를 붙이는 방법이며, 2번은 육성으로 원래 형상을 복구하는 방법, 3, 4번은 균열 또는 결함 부위를 용접으로 보수하는 방법을 보인다.

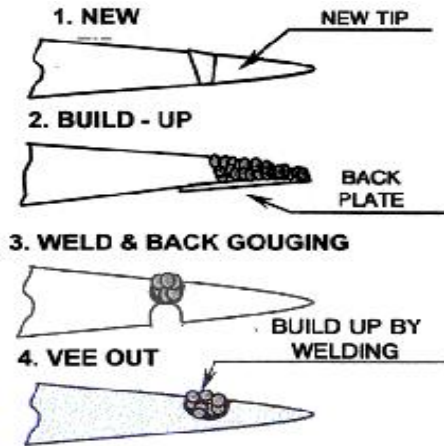


그림 23: 용접보수 방법의 예



그림 24 용접보수 전

그림 24 ~ 26은 프로펠러 블레이드 표면 및 Edge에 침식과 Dent 손상을 용접보수하는 과정을 각각 손상상태, 용접상태, 최종 연마상태로 나누어 보여주고 있다.



그림 25: 용접보수 중



그림 26: 용접보수 후

4. 결 론

프로펠러는 구조물이므로 어느 정도는 블로우 홀 등의 결함이 존재하게 되는데 이러한 결함을 제거하기 위한 수리방법에 문제가 있을 경우 또는 특히 응력이 크게 작용하는 부위에서 적절하지 못한 방법으로 수리할 경우 파국적인 손상으로 확대될 수 있다. 부유물체와 충돌 등 순간적으로 큰 충격하중을 받아 손상되는 경우를 제외하고 손상이 시작되는 시발점으로 구조결함, 보수용접 불량, 외력에 의한 작은 균열 등을 열거할 수 있다. 이 작은 균열이 높은 응력부위에서 피로 손상의 원인이 된다.

일반적으로 사형 구조(Sand casting)에서는

블로우 홀, 슬래그 혼입 등의 주조결함을 완벽하게 제거할 수는 없다. 따라서 주조 프로펠러에서 중요한 사항은 결함이 존재하지 않는 제품이라기 보다는 허용 가능한 정도의 결함만을 갖는 제품이여야 한다는 것이다. 이러한 관점에서 주조 프로펠러의 표면결함 존재여부를 확인하기 위한 선급 검사는 최종 기계가공을 완료한 후 실시하여야 한다. 그러나 어떤 프로펠러 제작자의 경우에는 액체침투 탐상시험을 시행하여 발견된 결함을 용접 보수방법으로 은폐하는 경우가 있다. 이러한 경우 선급 검사원이 육안검사와 액체침투탐상 검사를 다시 시행한다고 하더라도 결함을 용접보수로 은폐한 사실을 전혀 식별할 수 없다.

용접보수가 적절하게 시행되지 않은 경우에는 용접보수부위가 균열의 시발점이 될 수 있다는 점을 생각하면 프로펠러의 잠재적 손상원인을 제어하기 위해서는 무엇보다 프로펠러 제작사에서의 품질관리가 가장 중요하다고 할 수 있다.

후 기

이 해설 기사는 2010. 4. 23 우리 학회 2010년도 전기학술대회의 테마 세션 “기관고장 사례연구”에서 발표한 자료에 기초하여 추가 자료를 보완하여 작성된 것임을 밝힌다.

참고문헌

- [1] 한국선급, “부록 2-6 동합금재 프로펠러주물의 액체침투 탐상검사 및 결함 보수기준”, 선급 및 강선규칙, p. 59, 2010.
- [2] IACS, “W24 Cast Copper Alloy Propellers” Unified Requirements, 2004.
- [3] IACS, “W27 Cast Steel Propellers”, Unified Requirements, 2004.
- [4] 한국선급, “20장 대빙구조”, 선급 및 강선규칙, p. 113, 2010.
- [5] 전효중, “선박동력전달장치”, 태화출판사, pp. 415-430, 1986.
- [6] 隈元 士, “船用プロペラと軸系”, 成山堂書店, 1985.
- [7] 日本海事協會會誌 No.288, (II&III 合併号), 2008年度の損傷のまとめー(6)プロペラ, p.63, 2009.
- [8] 日本海事協會會誌 No.256, 2001(III), 2000年度の損傷のまとめー(3.4.5)プロペラ, p.34, 2001.
- [9] ナカシマプロペラ(株)技術部, マリンプロペラ”, ナカシマプロペラ(株), pp. 401-418, 1981
- [10] 宋 玉中 等, “キーレスプロペラの壓入量の計算に用おいるトルク”, 日本船用機關學會 第33卷 第10号, pp. 752-758, 1998.
- [11] M.Takagi, S.Sakai, “Some Consideration for the Behavior of Propulsion Diesel Engine in Transient Condition”, Proceedings of ISME Yokohama, Vol II. pp. 43-50, 1995
- [12] Product Information-CP Propeller Equipment, MAN B&W Diesel A/S, Alpha Diesel.