



주조손상 및 사례 Casting Failure and Case Study

Report No. RB-FA-G008

R&B INC.

본 자료는 한국표준과학연구원 및 강릉대 최 병학 교수님 자료를 바탕으로 만들어진 자료임

주조 및 성형 가공결함

1. 주조결함

1.1 주조 결함의 개요

주조 시 발생될 수 있는 결함은 응고시의 수축 결함 (Shrinkage cavity and crack), 용탕의 급냉에 따른 급냉조직 형성과 응력 균열, 용탕의 불충진 및 용탕과 세라믹 몰드와의 반응에 따른 기포와 기공 형성 등을 들 수 있는데, 이러한 결함들이 주조품 사용 시 파손의 원인을 제공하게 되므로 건전한 주조품의 제조를 위해서는 주조 공정상의 결함 제어가 필수적이다. 주조 공정에 있어서 주요한 공정변수는 용탕의 온도 및 분위기 조절, 몰드 예열 온도 및 시간, 주입 속도를 들 수 있으며, 이러한 공정변수 외에도 몰드 설계와 제작이 주조 결함 제어를 효과적으로 하는데 중요한 관건이 된다.

1.1.1 Mold 조건

Mold는 압탕의 크기와 주입구 위치, 몰드 두께에 따라 용탕의 주입 속도와 흐름 및 용탕 충전 그리고 각 부분에서의 냉각 속도를 좌우하게 되므로 주조 결함 제어에 결정적인 역할을 한다. 즉 압탕의 크기가 클수록 용탕 중력이 커져서 몰드 내의 용탕 유통 속도가 빨라져 얇은 지역에도 충진이 잘 된 건전한 주조품을 얻을 수 있는 가능성이 높다.

주입구 위치에 따라서도 결함 생성 요건에 큰 영향을 미치는데, 일반적으로 시행되는 상부 주입의 경우 몰드 내로 용탕이 주입되는 속도가 빨라서 급속 냉각에 따른 불충진의 발생이 적으나 용탕 유동에 따른 기포 형성의 가능성이 크게 된다. 이에 대하여 하부 주입의 경우 용탕이 채워 올라가는 속도가 늦기 때문에 냉각 속도가 클 경우 몰드 끝까지 용탕이 충분히 채워지지 못할 가능성이 크나, 용탕의 냉각 속도가 완만하고 흐름이 좋은 경우 용탕의 안정적 흐름이 유지되고 건전한 주조품을 만들 수 있는 장점이 있다. 주조품에 따라 얇은 모서리부분을 아래로 향하게 하는 것이 급속 냉각에 의한 용탕 불충진의 결함을 막는 몰드 설계의 요령이 된다. 몰드 두께에 따라서 용탕의 냉각 속도가 좌우되며 수축 결함 (Shrinkage), 불충진 등의 결함이 제어된다. 이외에도 Mold Runner 설계 등이 주조품 건전성에 영향을 미치게 되어 제품의 수축율을 결정하므로 경제적 손익에 영향을 준다.

1.1.2 주조 변수

주조 공정상의 용탕의 온도, 몰드 예열 및 주입 속도도 주조 결함의 형성과 제어와 중요한 역할을 한다. 용탕의 주입 속도는 일반적으로 급속의 용탕 온도보다 50-100℃ 높게 하는데 주입온도가 높으면 용탕의 유동성이 증가 되는 것에 반하여, 몰드와의 반응성과 Turbulent 흐름이 크게 되어 기포 형성 가능성이 높다. 이에 비하여 주입온도가 낮으면 용탕의 안정성은 크나 유동성이 떨어져 용탕 불충진의 우려가 있다.

몰드는 가능하면 적절한 온도에서 예열해주는 것이 유리하다. 특히 고급 정밀 주조품의 경우 몰드 예열을 통한 급냉응고 방지, 용탕 유동성 유지 및 용탕 응고 시 응력 해소와 주조품 건전성에 좋은 영향을 미친다. 그리고 몰드 충분한 예열에 따라 몰드 내의 수분 건조가 동시에 이루어지는 효과도 동시에 얻을 수 있다. 주입 속도는 빠를수록 상변화가 있는 일반 탄소강의 경우 응력 균열이 발생될 수 있으나 상변화가 없는 Austenite강의 경우 용탕 충전의 충분한 요건을 만들어 건전한 주조품을 만들 수 있으므로, 용탕을 일시에 뒤집어 몰드에 주입하는 Roll over 공법과 같은 빠른 주입 공정법이 개발되어 있기도 하다.

1.1.3 화학 성분의 영향

탄소강의 주조에 있어서 화학 성분은 주조성 향상과 주조 결함 및 주조품의 기계적 특성을 결정하는 중요한 요인이다. 화학 성분상의 Si는 응고성을 향상시켜 주게 되어 주조품에는 일정량이 함유된다. Mn의 경우 Fe 탄화물을 안정화시키며 수축 결함 (Shrinkage, Cavity) 형성을 조장한다. S는 철의 용탕의 유동 점착성을 증가시켜 Shrinkage, 냉각 응력-균열의 생성을 유발시킨다. P의 경우 철의 유동성과 내마모성을 증진시키는 장점이 있으나 어느 양 이상에서는 청열 취성을 일으켜 이에 주의해야 한다. 모든 탄소강의 강도나 기계적 특성을 결정짓는 탄소 함유량에 있어서 그 양이 증가할수록 강도는 증가하나 노치 효과에 의한 취화 경향이 높아져 P, S 함량에 따른 적절한 탄소 함량이 결정되어야 한다. 주조의 화학성분 조정에서 탄소 당량 (Sc)은 P와 Si의 첨가량에 따라 다음과 같이 계산되는데, Sc<1 일때 아공석강 (Hypoeutectic steel)으로 Sc>1 인 경우 과공석강 (Hypereutectic steel)으로 명명된다.

$$Sc = (C / 4.23) - 0.75 P - 0.312 Si$$

이외에도 주조에는 주조 후 응고 시 발생하는 급속과 주형의 수축, 팽창률이 고려되어야 하며, 미세조직의 제어를 위하여 접종제나 방향성 응고를 유도시켜 미세한 결정립자 및 응력 방향으로의 응고 성장을 하게 하여 기계

적 특성을 향상시키는 방안도 강구되고 있다.

1.2 주조 결함의 사례

다음에는 주조품에서 주입 속도, 냉각 속도 등에 따라 발생할 수 있는 주조 결함에 대하여 사례별로 언급하였는데, 대표적인 주조결함은 최종 응고 부분에 형성되는 응고 수축 결함이나 개재물 및 주조 후 급냉 조건 형성에 따른 균열을 들 수 있다.

사례

Fan rotor

그림1은 탄소강 주조품 Fan rotor의 파단 양상과 주조품의 전형적인 내부 주조 결함 형태의 응고 수축결함 (Shrinkage cavity)을 보여주는 것이다. 이러한 수축결함은 주조시의 용탕이 응고하여 생성되는 부피 수축현상과 내부 가스 발생에 기인하는 것으로서 최종 응고되는 두꺼운 부분에 주로 발생한다. 이러한 결함의 방지를 위해서는 Hot top 등의 라이저 주입구에 대한 고려와 최종 응고 부분을 예상하여 보안을 할 수 있는 몰드 설계 시부터의 주조 결함 보완이 필요하다.

최근에는 컴퓨터 모사를 통하여 응고 시 몰드 내의 용탕 온도를 주입 후 시간별로 예측할 수 있고 이에 따라 수축결함의 발생 가능성이 가장 큰 최종 응고뿐만 아니라 열 및 수축 응력 분포까지 예측할 수 있다. 이러한 모사법을 이용하는 것이 건전한 주조품을 얻을 수 있는 몰드 설계의 효과적인 방안으로 제시되고 있다.

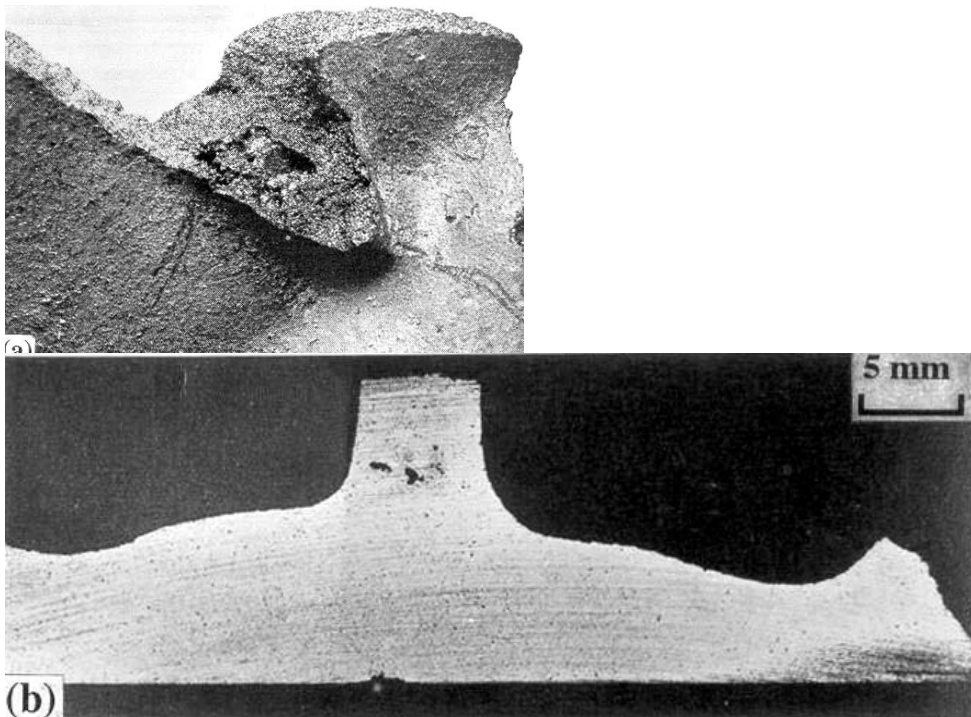


그림1. 탄소강 주조품 Fan rotor의 파단 양상과 응고 수축결함

사례

Cast iron cam-shaft

주철로 만들어지는 Cam-shaft가 주조 후 냉각과정에서 유발될 수 있는 균열을 그림2에 나타냈다. 균열은 Cam-shaft의 급속한 냉각에 의해 발생하는 것으로서 부품의 표면으로부터 내부를 향하여 전파한다. 특히 균열은 응고 조직상의 공정 조직을 통하여 진전하여 미세조직 상에서도 공정 조직 부분은 취약한 것을 알 수 있다. 이와 같은 급냉에 의한 열충격 균열의 형성은 부품의 용해 응고 시 서냉조건을 유지하는 것이 중요한데, 이를 위하여 몰드 두께를 증가시켜 보온하거나 몰드 예열 온도와 시간을 적절히 선택하여 냉각속도를 낮춤으로써 예방할 수 있다.

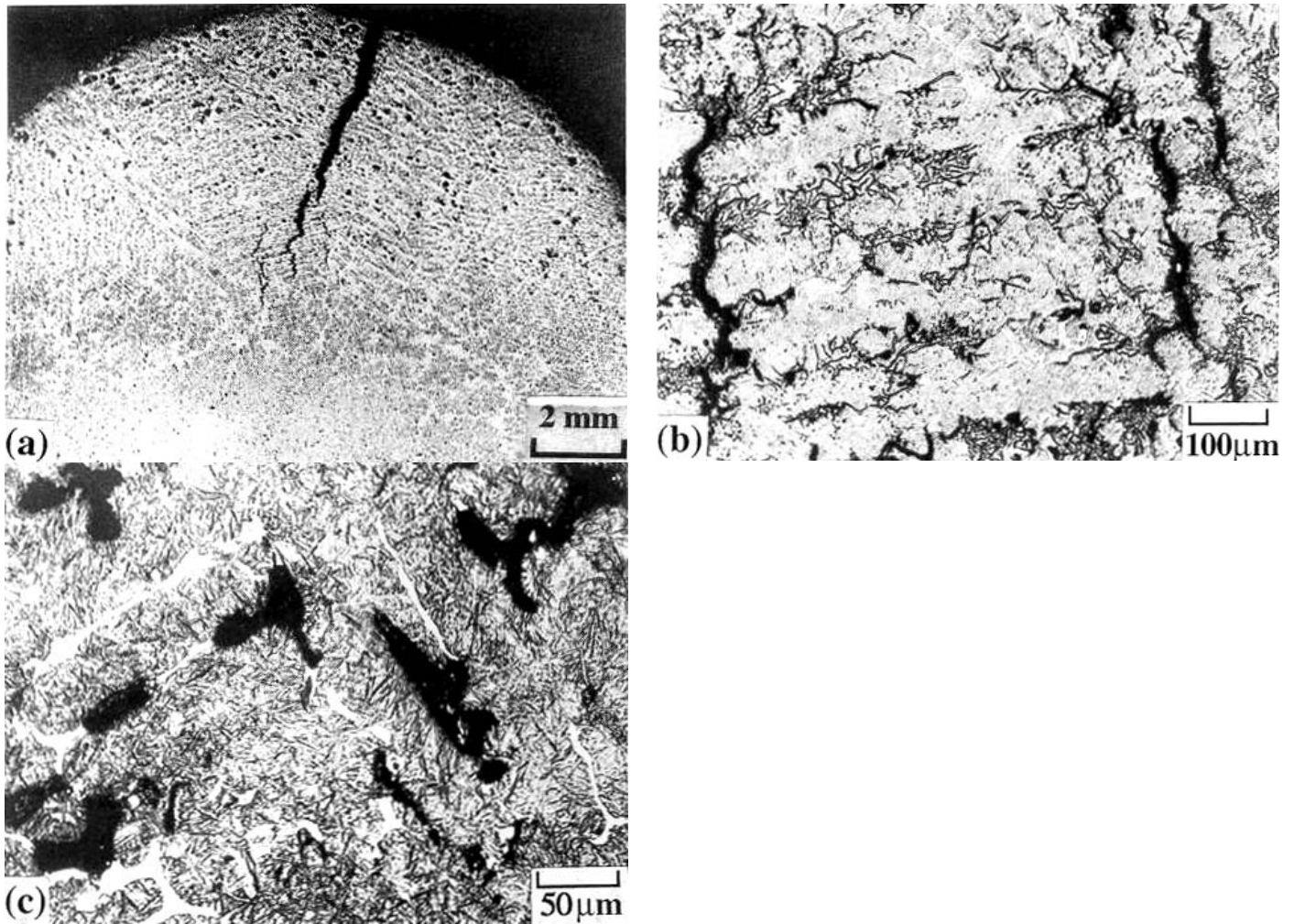
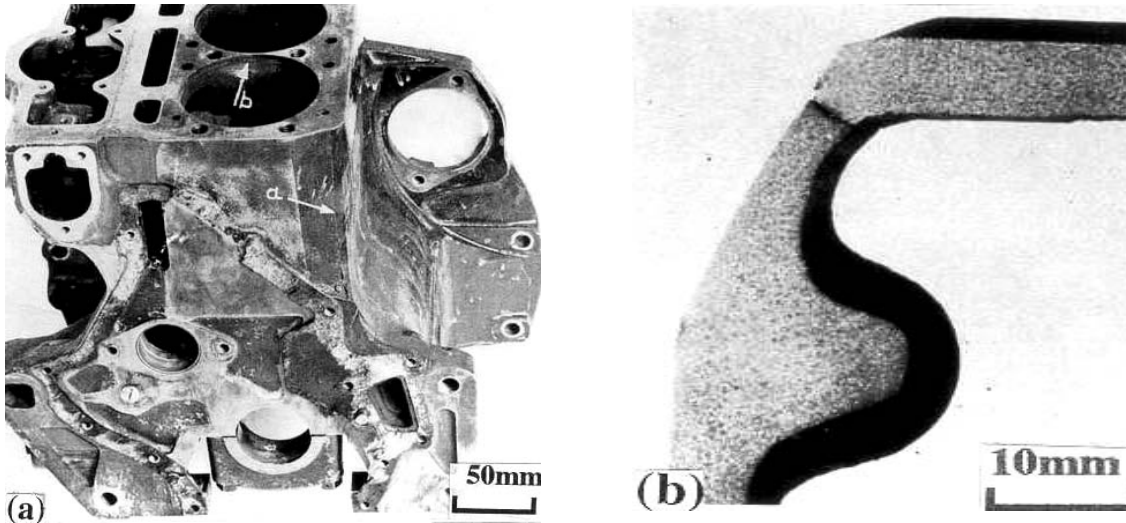


그림2. 주철 Cam-shaft의 주조 후 냉각과정에서 유발되는 균열

사례

크랭크 케이스

그림3은 주조 크랭크 케이스에 유발된 주조 수축결함에 의한 균열을 보여주는 것이다. 균열은 일반적으로 그림3(c), (d)와 같이 응고가 최종적으로 일어나는 두꺼운 부분에 형성되는데, 이 부분에 발생하는 수축 결함과 냉각시의 열응력에 의해 주조에 의한 균열이 유발되는 것이다. 이러한 주조 수축결함과 균열 손상은 그림3(b)의 얇은 벽 부분에도 응고 및 사용 응력의 복합적인 작용에 의해 균열과 파손이 발생할 수 있음을 보여준다.



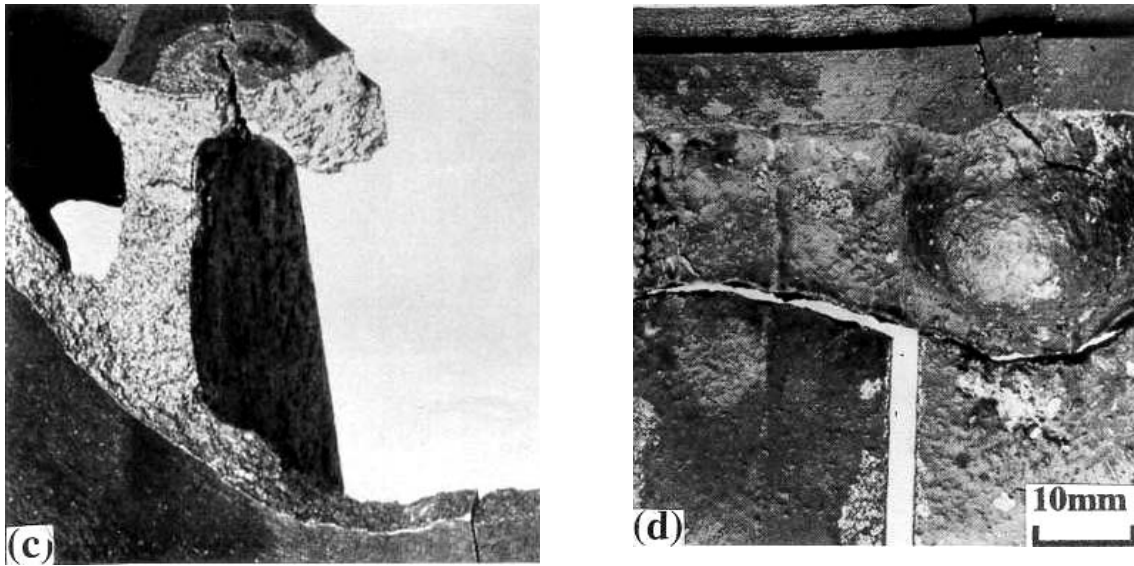
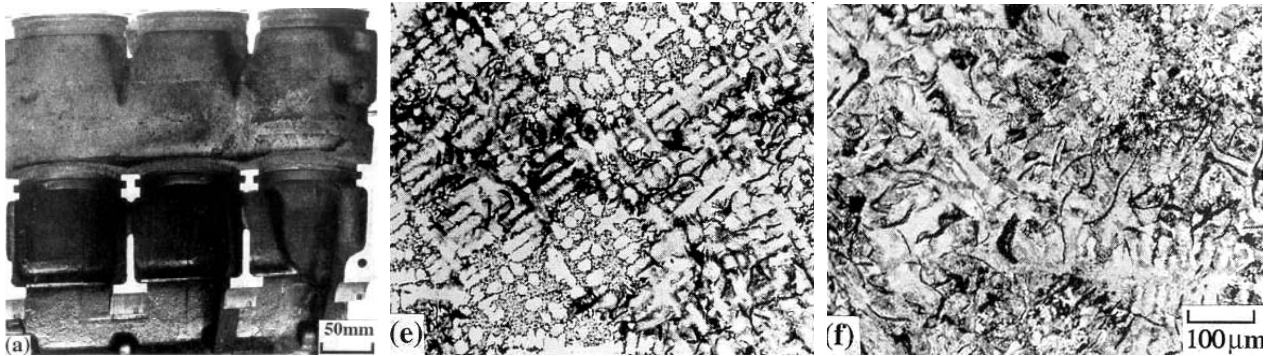


그림3. 주조 크랭크 케이스의 주조 수축결함 균열

사례

실린더 헤드 블럭

그림4와 같은 실린더 헤드 블럭에는 얇은 벽 부분에서 주조 균열이 발생하였다. 이것은 실린더 헤드 블럭 부분에 적용되는 급냉의 조건으로 과냉된 내충격성이 저하되는 미세조직이 이 부분에 형성된 것에 기인한다. 즉 응고 과정 중 수축결함이 발생하는 후속 부분의 균열 생성과는 다르게 헤드 블럭 얇은 부위의 균열은 급속 냉각에 따른 급냉의 미세조직 형성 그림4 (e), (f)과 이 미세조직이 열충격에 약화되어 균열이 생성하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 과냉 조건에 의한 주조 결함의 발생은 그림4 (c), (d)와 같이 얇은 벽 부분을 두껍게 새로 설계함으로써 미세조직 변화와 열응력-충격에 의한 균열 발생 조건을 어느 정도 완화할 수 있다.



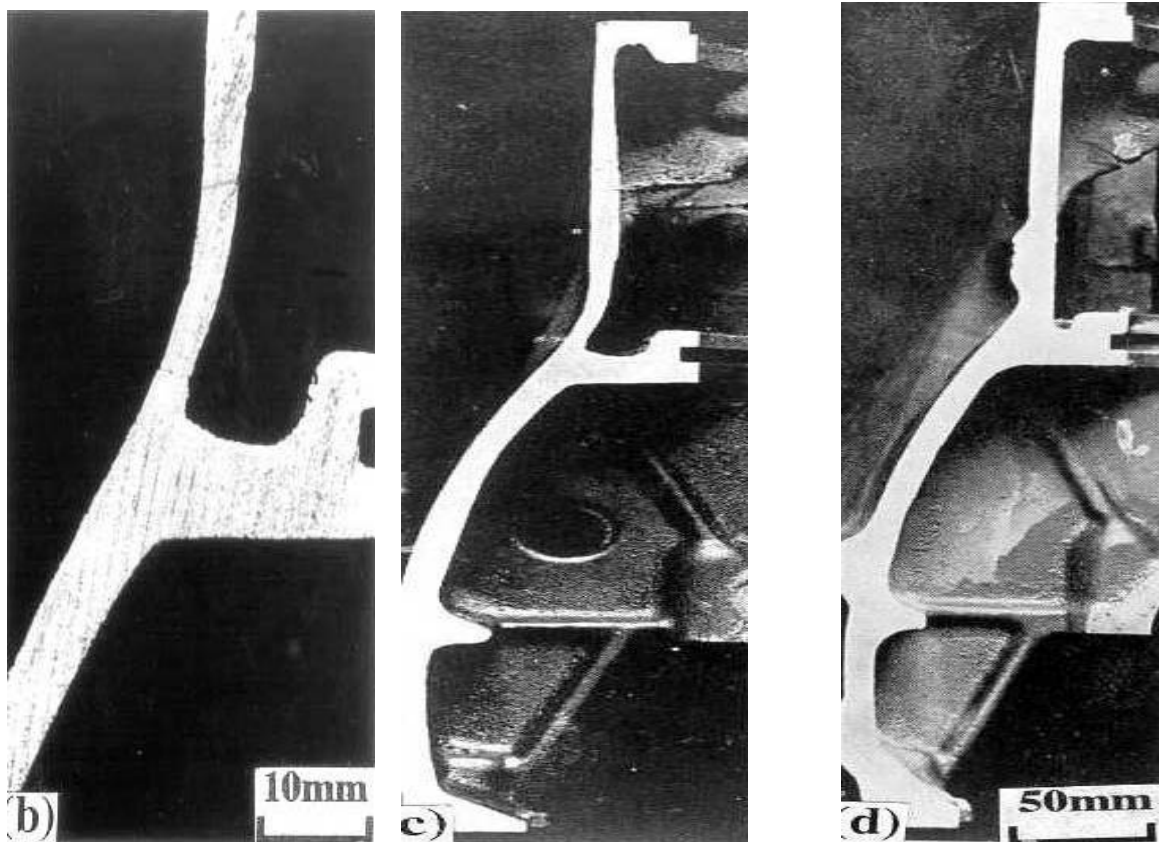


그림4. 실린더 헤드 블록의 급냉 균열

사례

베어링 캡 (Bearing cap)

그림5의 베어링 캡에 있어서 주조 후 균열은 설계상의 노치 부분에서 발생한다. 이러한 균열의 발생요인은 노치 부분에 응력집중부가 형성되고 주조 후 냉각 때 발생하는 열응력이 이곳에 집중하는 요인과, 균열 생성 부분이 두께가 얇은 벽으로써 응고 후 냉각 시 과냉 조건이 형성되어 열충격에 불리한 급냉된 미세조직에 의해 균열이 유발될 수 있는 두 가지의 요인으로 나눌 수 있다.

따라서 설계상 예리한 각도의 가공이 변경될 수 없는 요건이라면 주조 시 이 부분에 충분한 몰드 두께 형성과 보온으로 응고 후 서냉 조건을 유지하는 것이 균열 발생을 억제하는 한 방법이 될 수 있으며, 화학 성분을 조절하여 과냉조직을 보이는 미세조직의 불균일성을 억제할 경우에도 효과적인 균열 발생 억제 방법이 될 수 있다. 이러한 베어링 캡의 주조상의 균열을 억제하기 위해서 급냉의 미세조직을 열충격에 대해 강화한 합금화를 꾀할 수도 있다. 다음은 베어링 캡의 주조 방안을 그대로 하고 단지 소재를 열충격에 강하게 탄소 당량 (Sc)을 감소시킨 경우를 나타낸다.

균열 발생의 주조재의 화학 성분을 탄소나 그레파이트양을 감소시키고 P와 S의 양을 어느 정도 증가시켜, 공정 탄소 당량 (Sc) 기준으로 과공석강 (Hypereutectic steel, $Sc > 1$)을 아공석강 (Hypoeutectic steel, $Sc < 1$)으로 조절할 경우 균열 발생이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 과공석강의 경우 그림5 (b)에서와 같이 냉각 속도가 큰 표면이나 Edge부분과 냉각속도가 작은 내부의 미세조직 상에 있어서 불균일한 조직이 형성되어 그림5 (c), (d)와 같은 주조품 외, 내부의 조직상 차이가 발생되지만, 아공석강은 그림5 (e)에서와 같이 주조품 전체에 걸쳐 균일한 미세조직을 갖게 할 수 있기 때문이다. 그림5 (f)는 이와 같은 아공석강의 부품 전체적으로 균일한 미세조직을 보여주는 것으로써 이와 같이 미세조직상의 균일성을 향상시켰을 때 열충격에 의한 국부적인 응력집중과 균열발생을 억제할 수 있게 되는 것이다.

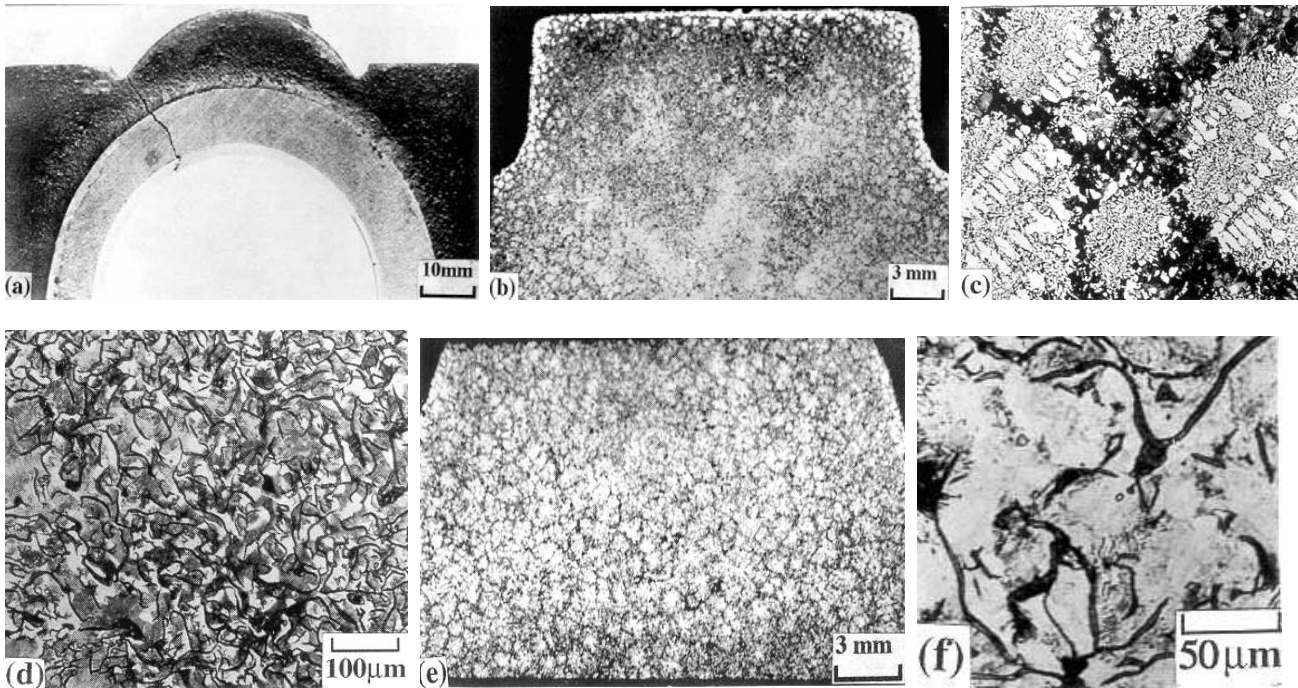


그림 5. 베어링 캡의 주조 균열

사례

과공석강 ($Sc=1.07$)이 사용된 상수관

과공석강 ($Sc=1.07$)이 사용된 상수관에서 그림6과 같은 표면 손상과 파손이 발생하였다. 손상의 원인은 그림6 (b)의 미세조직을 갖는 과공석강의 부식 분위기 하에서 Graphite corrosion과 물의 유동에 따른 마식 손상이 복합적으로 작용하여 표면에 부식 손상의 결함과 균열이 유발이 그 원인인 것으로 보여진다.

이와 같은 상수관의 손상을 방지하기 위해서 최근에는 부식 손상의 영향이 큰 지역에는 원심주조법에 의한 주철관으로 대체 하였는데, 미세조직상 탄화물의 적절한 분포와 수압을 받은 방향으로의 방향성 응고를 유도함으로써 손상 저항을 크게 하고 수명의 안정성을 높였다.

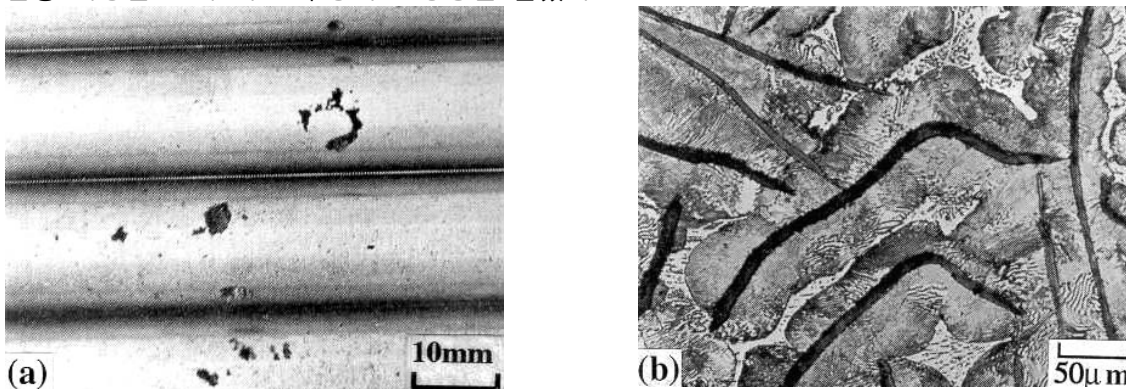


그림6. 원심주조법에 의한 과공석관의 균열손상

사례

Impeller

그림7은 주강으로 만들어진 Impeller의 주조 후 기공에 의한 결함을 보여주는 것이다. 이러한 응고 결함은 주조시 응고가 최종적으로 이루어지는 부분에서 발생하며 사용할 때 부식이나 피로 손상의 시작점으로 작용한다.

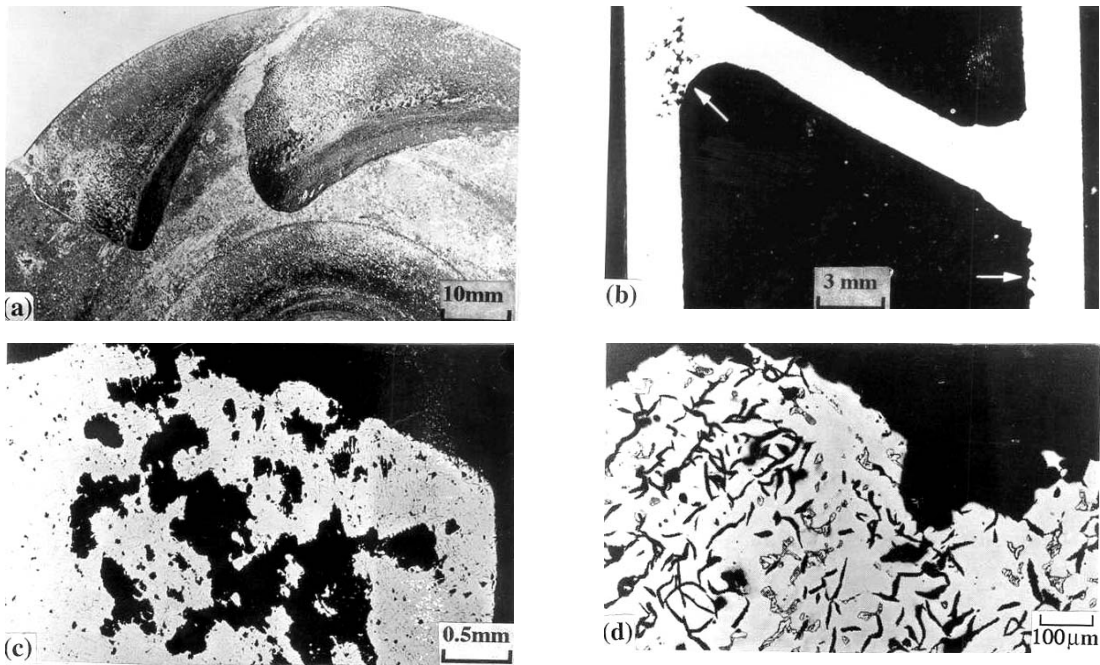


그림7. 주강 Impeller의 주조 결함

사례

Full lift disk of a safety valve

황동의 다이 케스트로 만들어지는 안전 밸브에서 승강의 역할을 하는 Full lift disk가 파손되었으며, 그림8은 디스크의 파단면을 보여주는 것이다. 이 디스크의 단면조직을 관찰한 결과 그림8 (c)에서와 같이 디스크 내부에는 수많은 기공들이 존재하는 것을 알 수 있다.

이러한 기공이나 균열부에는 산화 개재물이 존재하는데 알루미늄 산화물이 주종을 이룬다. 다이 케스트에서 기공과 산화개재물은 어느 정도 남아 있게 마련인데, 용탕의 불충진이나 가스의 용탕 내 갇힘으로써 발생되며 특히 용탕 흐름 방향이 바뀌는 지점이나 가스 버블 함유가 많은 와류(Turbulent) 흐름에서 잔존할 가능성이 크므로 금형제작이나 용해 및 용탕공급 체계에서부터 수정 보완해야 한다. 그림8 (d)는 기공지역의 산화개재물과 건전 부위의 황동 미세조직인 $\alpha+\beta$ 의 침상 구조를 보여주는 것이다.

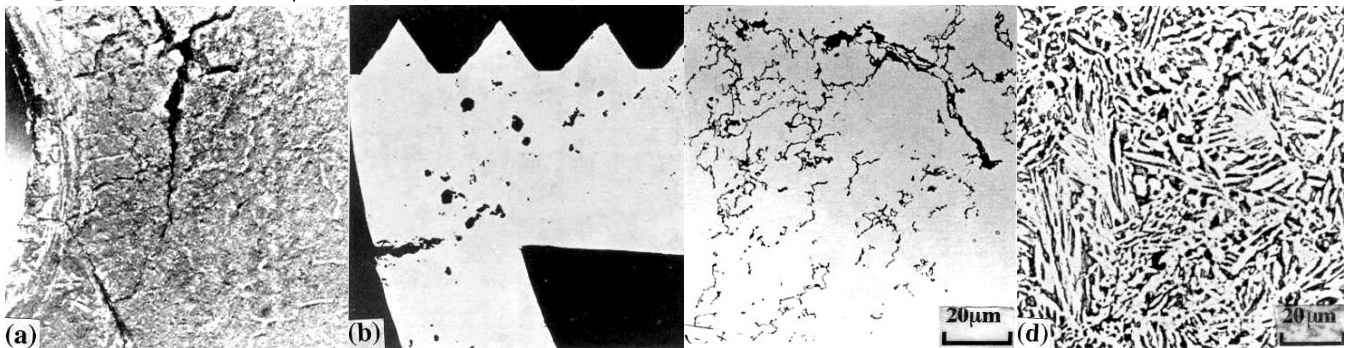


그림8. 황동의 다이 케스트 Full lift disk의 주조 결함

사례

터빈 로터

항공기용으로 사용되는 부품은 사용상의 충분한 안전성을 고려하여 엄격한 품질과 결함 관리를 받는다. 그림9의 항공기 엔진용 터빈 로터에 있어서도 여러 가지 결함에 대한 검사를 통해야 하는데 로터 표면상의 개재물이 그

림과 같이 발견되며, 이것에 의해 사용 불가능한 부품으로 판정되었다.

이러한 결함은 그림9 (c)에서와 같이 로터 중앙부에 형성되어 있으며 단면상의 미세조직 관찰에 있어서 그림9 (d)의 긴 형상의 표면 결함으로 밝혀진다. 이것은 비금속 개재물에 의한 유발된 결함으로써 주조 시 소재 내부에 잔존하게 된 개재물이 터빈 로터의 단조 시 그림과 같이 단조 방향으로 길게 변형된 것으로 판단된다.

터빈 로터의 표면에 형성된 이러한 균열은 항공기 엔진 구동에 따라 걸리게 되는 고온에서의 반복 하중이나 열피로 조건에 의하여 피로 손상과 파괴를 일으킬 가능성을 높게 하므로 특히 주의하여 제조해야 한다.

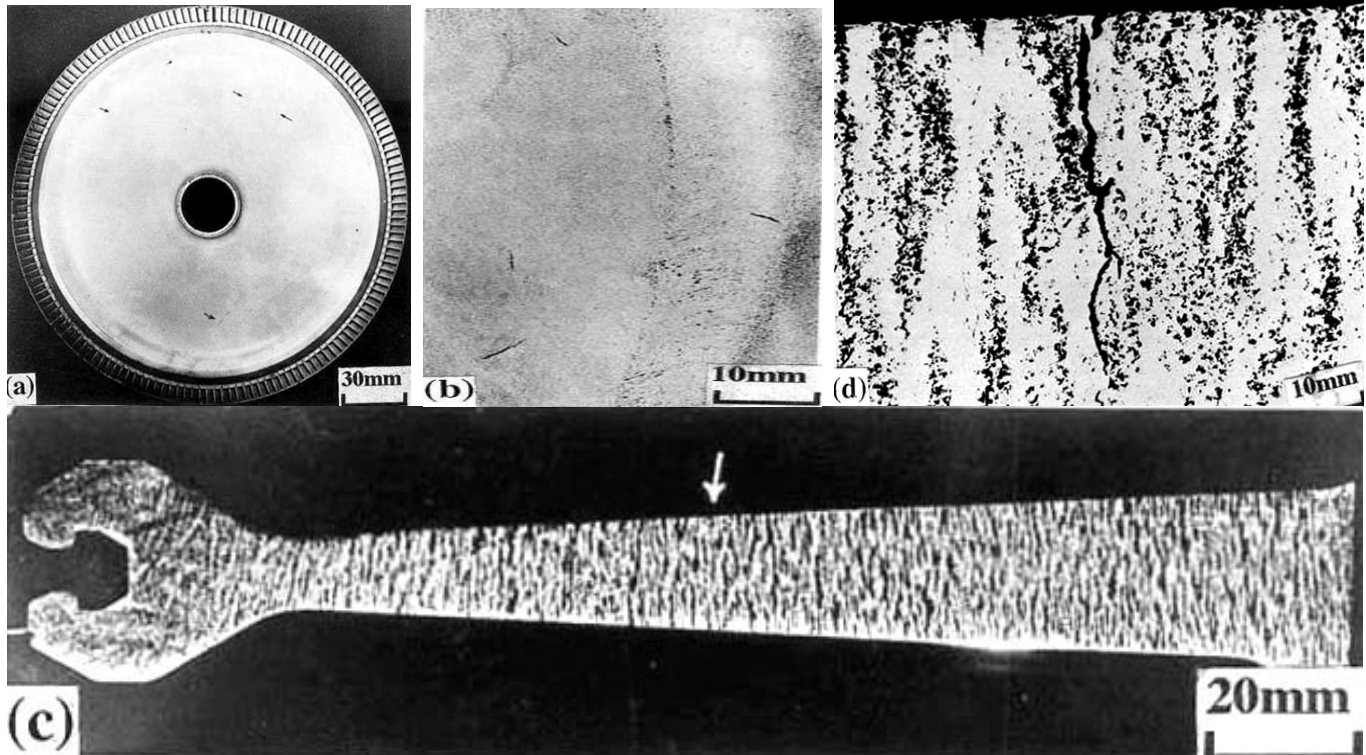


그림9. 터빈 로터 디스크의 표면 개재물 주조 결함

사례

Centrifugally cast pipe

내열주강의 파이프는 조직내의 기공을 줄이는 치밀성 향상과 두께방향의 방향성 응고를 유도하여 고온에서의 크리프 특성을 향상시키고자 원심주조법이 이용된다. 이렇게 원심주조로 만들어지는 내열주강 파이프의 주조결함을 다음에 나타냈다. 그림10은 원심주조 파이프 내면에 형성된 수축결함 (Shrinkage cavity)을 보여주는 것으로서 미세조직 상 수지상정 조직의 수지상간 (Inter-dendrite) 지역에 이 결함이 형성된 것을 알 수 있다. (그림10 (b)). 파이프 내면에 집중적으로 수축 결함이 발생한 것으로 볼 때 이 부분이 최종적으로 응고한 것을 알 수 있으며, 파이프 내면의 몰드 가열 조건이나 냉각속도를 제어하면 이러한 수축결함의 생성을 억제할 수 있을 것으로 보여진다. 원심주조 내열주강의 고온 사용시에는 Fig. 10과 같은 미소공공이 발생한다. 이러한 미소공공 (Micro cavities)의 형성은 고온 사용조건에서 파이프나 튜브 내에 높은 압력이 걸리지 않더라도 자기 무게의 타중 조건만으로도 크리프 손상조건이 되며, 고온 변형이 입계 지역에 집중함으로써 결정립계 1차 탄화물 주위에 미소공공이 형성되는 것이다. 미소공공이 서로 연결될 때 균열로 발전하여 파단에 이르게된다.

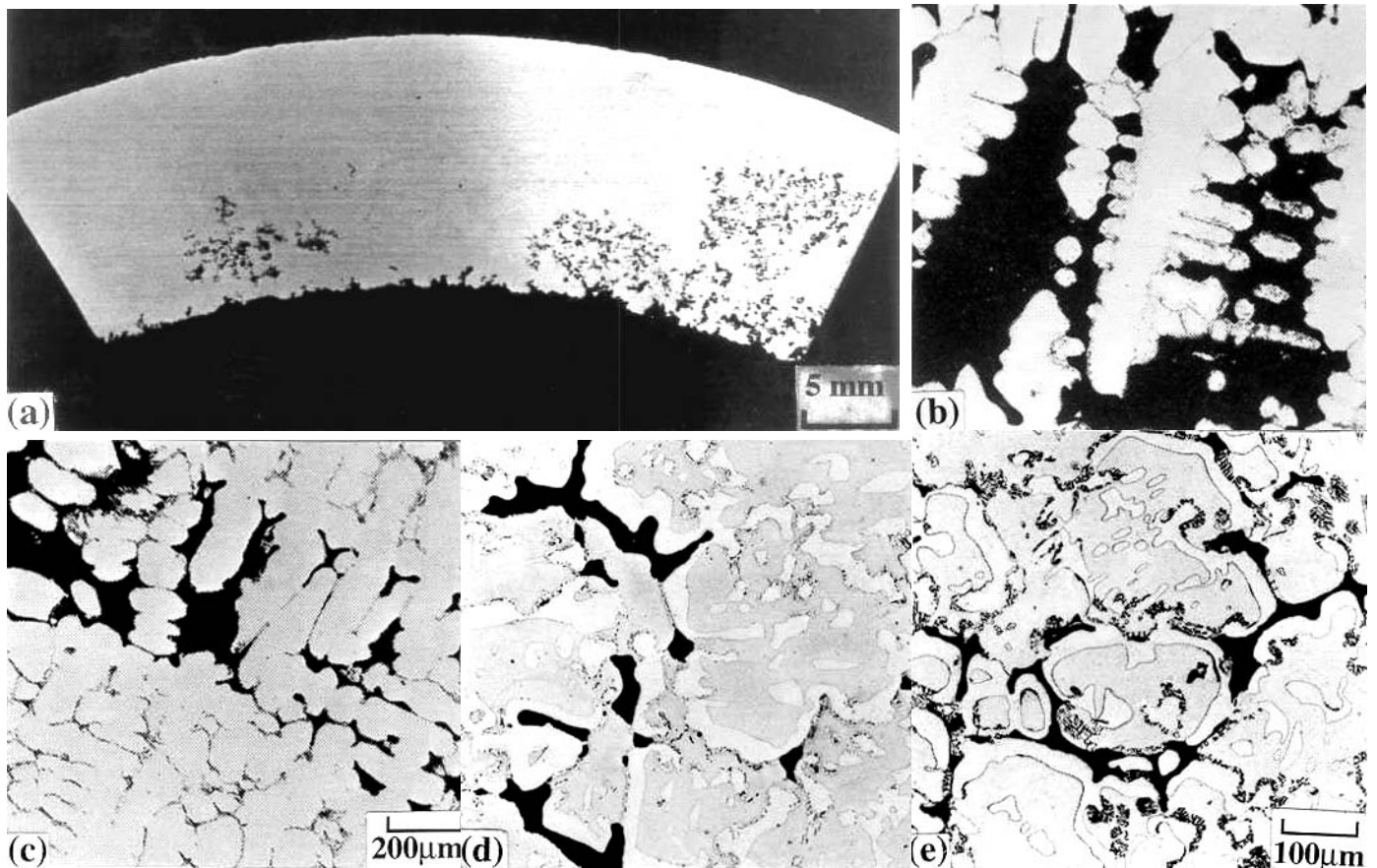


그림10. 내열주강 파이프의 주조 수축결함

사례

펌프 케이스

고 규소 주철로 제작된 펌프 케이스가 파손되었으며, 케이스로부터 회수된 그림11과 같은 파단 조각을 가지고 손상원인 분석을 분석하였다. 그림의 파단면은 비교적 평탄한 면과 반짝거리는 특성을 나타내어 일단 취성파괴의 양상을 확인 할 수 있으며, 이것을 주사전자현미경으로 확대 관찰한 그림12에서 파단 형태는 바위가 깨지듯 파손된 벽개 파괴를 보이며, 파손 단위가 입자에 물린 듯한 형상으로 볼 때 입계 파괴인 것으로 보여진다.

파단면 근처의 미세조직을 관찰한 결과 그림13과 같이 거의 1mm 크기에 이르는 기공이 존재하는 것이 확인된다. 이러한 기공은 주조 시 응고가 최종적으로 이루어지는 부분에 응고 수축공이 발생함으로써 만들어지는 것인데, 결국 펌프 케이스는 주조결함을 제품 안에 이미 가지고 있던 것으로 판단된다. 주조방안을 개선하여 응고 수축공을 라이저 부분으로 이동시켜 건전한 제품을 만드는 것이 중요하다.

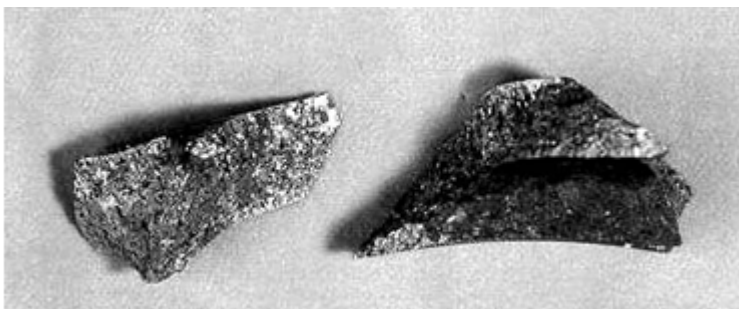


그림11. 고 규소 주철로 제작된 펌프 케이스의 취성파단면

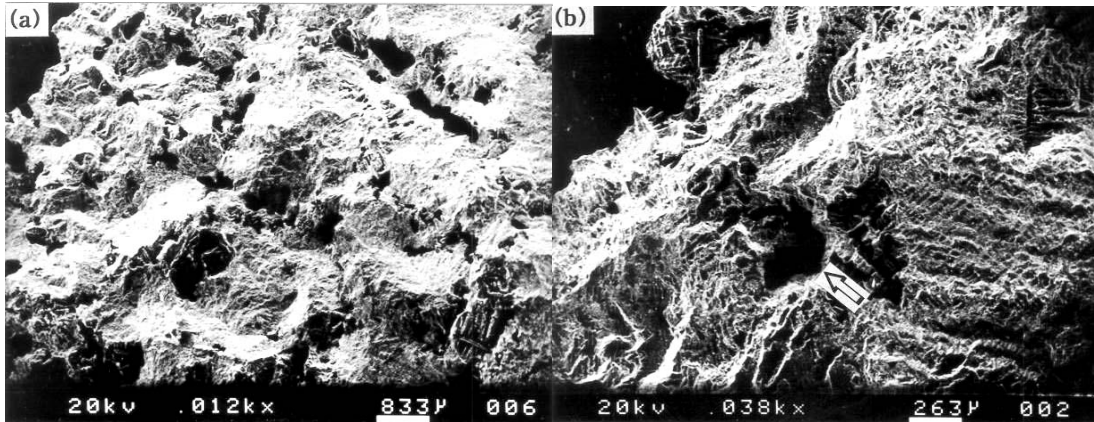


그림12. 취성파단면의 주사전자현미경 관찰

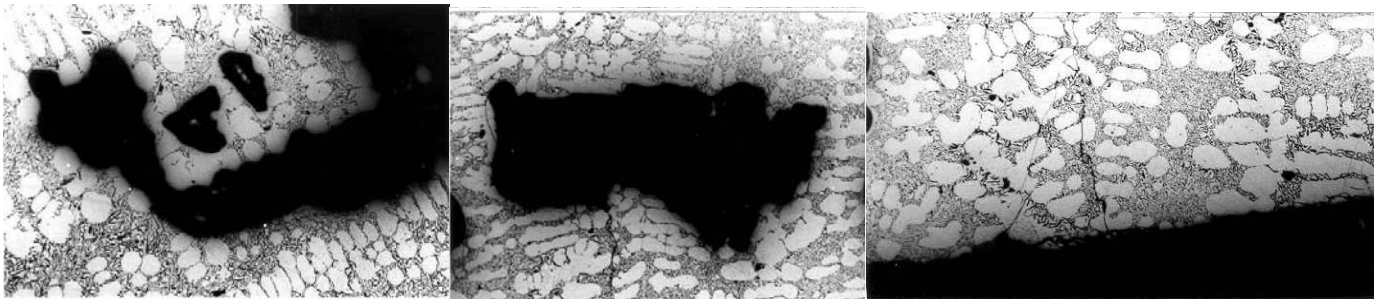


그림13. 펌프 케이스 취성파단면 근처의 응고 수축결함

2. 열, 냉간 가공결함

(1) 열간 가공결함(Hot working defect)

고온 압연이나 단조로 대표되는 고온 소성가공 (Hot working)에 있어서 발생할 수 있는 결함으로는 금형과 단괴의 고온 Metal flow에 따른 접힘 현상(Fold, Lap)과 균열이 있다. 적절한 Metal flow 형성과 충진을 위하여 공정 단계 설정과 각 공정의 금형 설계가 중요한 요인이지만 소성 가공온도, 윤활제 선택, 금형 예열 등의 작업 조건과 가공 속도와 형태를 결정짓는 압연기나 프레스의 선정도 가공 후 발생할 수 있는 결함을 제어하는데 중요한 변수가 된다.

고온형 단조에 있어서 접힘 현상(Lapping)은 금형의 설계와 단조 시 Metal flow에 따른 부피 분포 (Volume distribution) 및 여분의 양 (Extra volume)이 에 따라 제어될 수 있는 중요한 요인이 된다. 특히 Extra volume은 단조품의 경제적 효율에도 영향을 미치게 되는데, 적정 단조양보다 크면 접힘 (Lapping)과 금형의 마모가 심해지며 단조의 적정 양에 못 미치면 균열의 우려가 있게 되므로 대략 25%의 Extra volume을 갖도록 조절하는 것이 필요하다.

소성 가공전의 초기 미세조직 조건이나 가공비, 소성가공 온도 및 최종 온도에 따라서 가공재의 기계적 특성이 영향을 크게 받게 되며, 가공재의 가열과정과 온도 유지 과정에 따라서도 가공성과 가공후의 균질성에 차이를 나타내게 되므로 이러한 모든 상황이 작업 공정 규격 상에 명시되어야 하며, 이로써 가능하면, 가공 결함이 없고 균일하고 건전한 고온 소성 가공품을 얻도록 해야 한다.

사례

Railroad car spring

그림14 0.45%C-1.7%Si의 중탄소강으로 제조된 Railroad car spring의 피로에 의한 파단면을 보여주는 것이다. 그림에서 파단면 상의 해안자국은 피로가 이 부품의 손상과정임을 나타내는데, 피로파괴의 시초 위치는 동심원의 중심점이 되는 파단면 상의 왼쪽 상부 화살표 지점인 것으로 판단된다. 이 부분에 대한 단면 조사 결과 스프링 표면에 그림14 (b)과 같은 2차 균열이 발견되었는데, 이것은 고온 단조 가공 시 발생할 수 있는 결함의 일종으로

써 전형적인 Compressive folding 균열인 것으로 판정된다.

부적절한 소성가공 형태나 과도한 가공비에 의해 생성되는 이와 같은 접힘 현상이 표면 균열 결함을 유발하였고 스프링의 반복하중 사용 시 이러한 표면 균열이 피로 균열로 작용하여 균열 전파에 의해 피로 파손에 이른 것으로 판단할 수 있다.

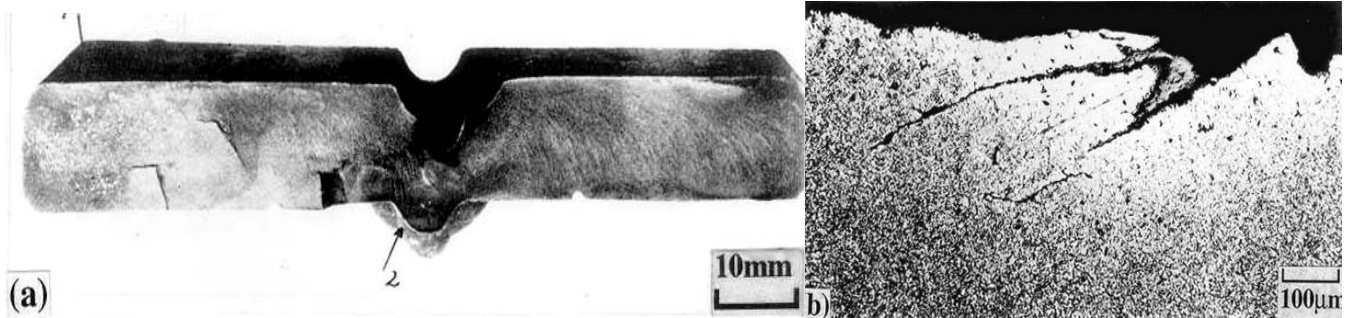


그림 14. 중탄소강으로 제조된 Railroad car spring의 피로에 의한 파단면, 단조 가공의 Compressive folding 균열

사례

볼트류

그림 15는 저탄소강 볼트의 Upsetting 과정 중에 생기는 균열의 벌어짐 (Open cracking)을 보여주는 것이다. 이러한 균열의 벌어짐은 단조 과정 중에 발생하는 접힘 현상 (Lapping)이 원인이 된다. 즉 그림 15 (b)와 같은 표면상의 단조 결함과 단면상에 확인할 수 있는 그림 15 (c)의 미세한 단조 접힘 균열이 발단이 되어 볼트의 균열의 벌어짐이 유발한 것으로 볼 수 있다. 그림 15 (d)는 이러한 단조상의 접힘 (Lapping)을 미세조직과 관련하여 자세히 보여주는 것으로써 단조 시 두 Metal flow 지역의 경계를 나타낸다.

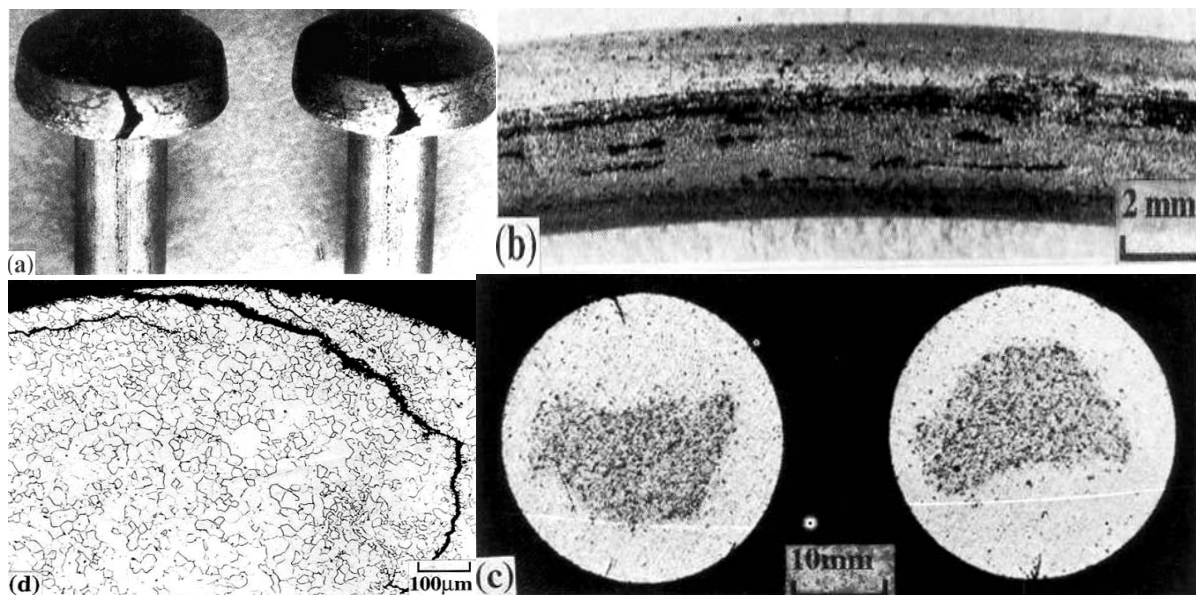


그림 15. 저탄소강 볼트의 Upsetting 균열의 벌어짐 (Open cracking), Lapping

사례

Hot rolled starting strip

Hot rolled strip에 그림 16 (a)과 같은 녹 형태 (Scale-like)의 표면 결함이 발생하였다. 결함 부분에 대한 단면의 미세조직 관찰 결과 그림 16 (b)과 같은 접힘 현상과 접힘에 의한 균열 발생이 관찰되었다. 따라서 이와 같은 압연 방향으로의 접힘 현상이 Strip에 거시적인 표면 결함으로 관찰되는 것임이 확인되었다.

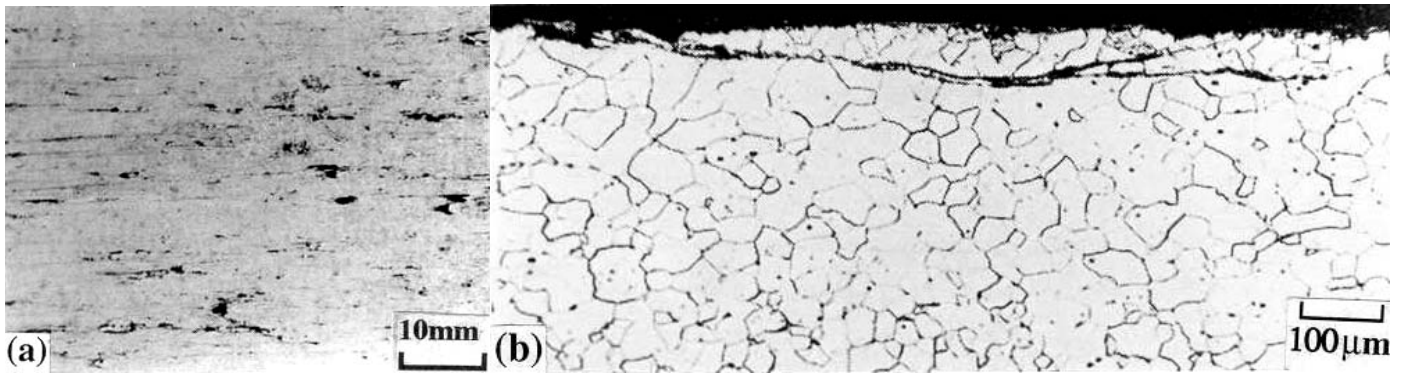


그림 16. Hot rolled strip의 압연방향 표면 결함, 접힘 현상 (Lapping)

사례

형단조재의 열간 가공결함(Failures in closed die drop forging)

형단조 (Closed die forging)에 있어서 가장자리 (Flash)나 중심 (Core) 부분은 단조 시 가공방향에 대한 가로 방향의 균열 생성의 가능성이 높다. 이는 단조 가공 시 상, 하부 금형 사이의 간극으로 빠져 나오는 Flash 부분은 반대 압력의 부재로 인하여 치밀한 조직을 갖지 못하게 되는 것과 단조 시 Core 부분이 금형과의 충분한 마찰력을 갖지 못함으로써 가공 효과가 적어 결국 단조 결함이나 균열의 생성 위치가 되는 것에 기인한다.

그림 17은 AISI 1025 탄소강의 형단조 균열 결함을 나타내는 것으로서 가공 방향에 대한 가로 방향으로 균열이 발생되었다. 이것은 형단조에 따른 부품 외면이 충분한 가공 응력을 받지 못함으로써 표면에 그림과 같은 찌김 현상이 유발된 것으로 분석된다. 그림 18은 위의 경우와 마찬가지로 Drop 형단조된 AISI 1023 탄소강의 deburred seam의 가장자리 끝 쪽에 형성된 균열을 보여주는 것이다. 균열은 전단응력에 의하여 길이 방향으로 찢겨지며 성장하였는데 이것도 형단조에 따라 부품 끝 부분까지 미치지 못하는 단조 응력에 기인하는 것으로 보여진다.

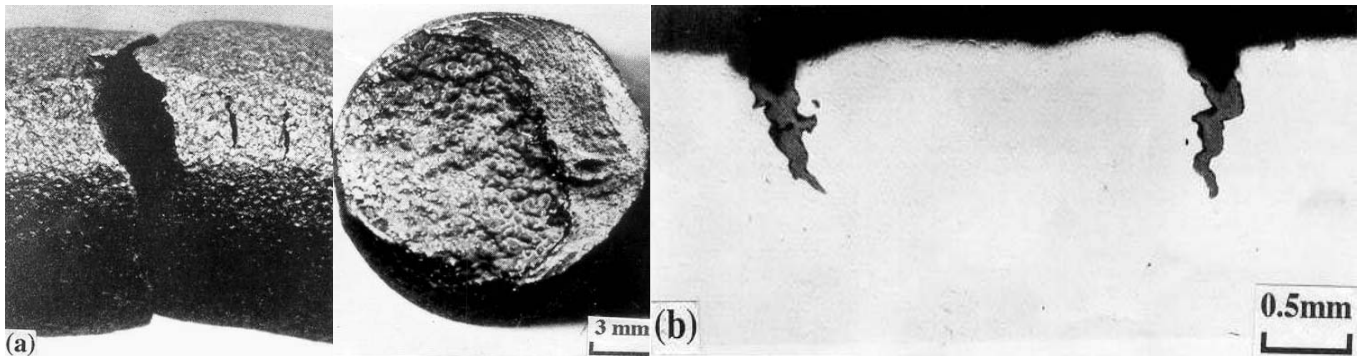


그림 17. AISI 1023 탄소강의 형단조 균열 결함, 찌김 현상

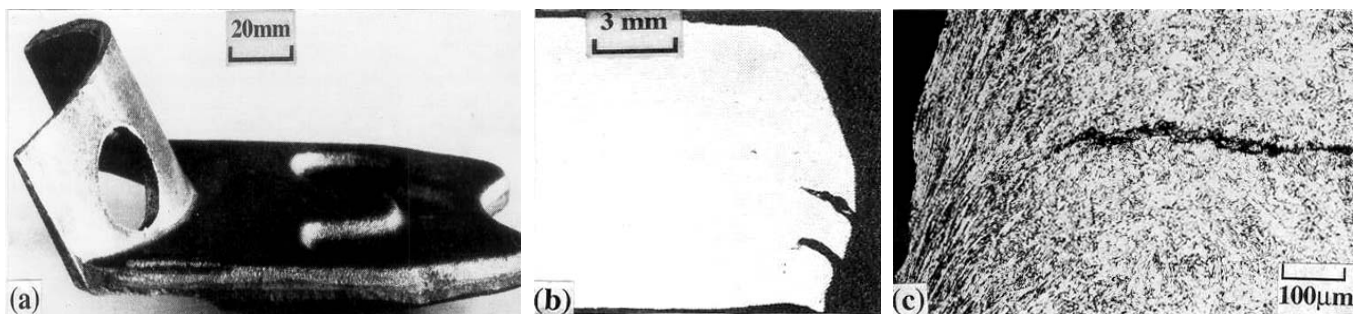


그림 18. AISI 1023 탄소강의 Deburred seam 형단조 균열

사례

Pipe elbow of hydraulic Installation

Oil hydraulic Installation 공정에 사용되는 St 35.29소재의 외경 70mm, 두께 10mm 파이프 엘보 파단을 다음에 나타냈다. 파단 균열은 벤딩된 파이프의 안쪽곡면에서 그림19와 같이 파이프 길이 방향으로 발생하였다. 고온으로 가열된 파이프를 벤딩할 때 차가운 공구가 맞닿는 부분에 형성될 수 있는 비정상적인 미세조직으로 인하여 표면결함이 유발될 수 있는데, 그림19 (c)의 차가운 공구와 접촉되는 a, b 지역에는 그림19 (d)와 같은 미세한 결정립의 Ferrite 및 Pearlite로 구성된다.

이에 비하여 다른 지역의 정상적인 어닐링 조직은 그림19 (e)와 같이 냉각지역보다 훨씬 조대한 결정립과 Ferrite 및 Pearlite의 미세조직으로 구성된다. 이와 같은 두 지역의 미세조직적인 차이가 벤딩 시의 응력과 가열 및 냉각 과정 중의 열 응력 발생 시 균열을 유발하게 되는 것이다.

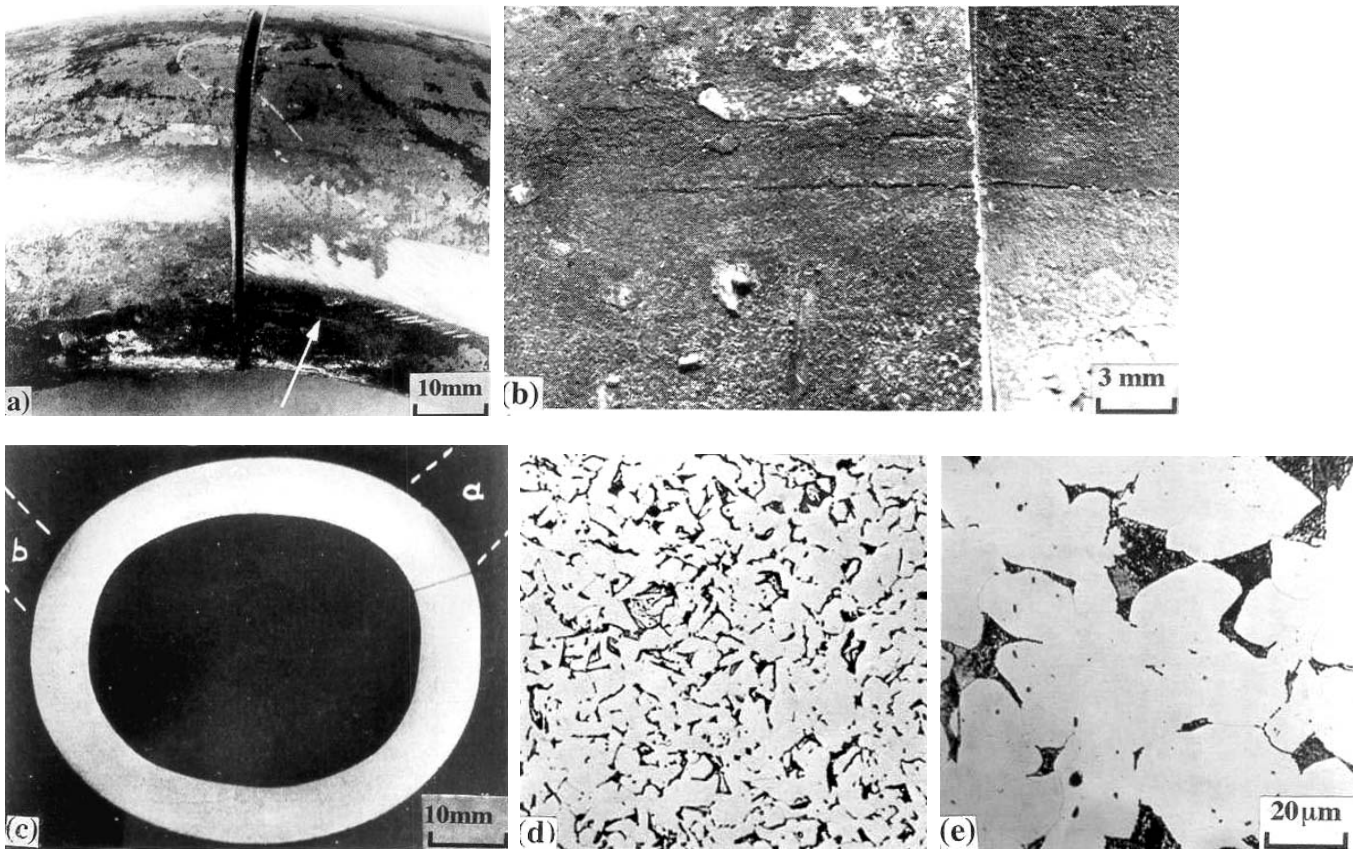


그림 19. 파이프 Elbow 파단

사례

Boiler Pipe

저탄소 내열강 (Fe-0.3Mo-0.5Mn-0.2Si-0.15C) 으로 만들어진 Boiler pipe에는 0.26%의 Cu가 주조 과정 중에 잘못 첨가되었다. 이러한 Boiler pipe를 벤딩하여 엘보 파이프로 제조할 때 그림20과 같은 표면 결함이 형성되었다. 결함부의 단면관찰에서 파이프 표면에는 산화층 (그림20 (b))과 산화층 직하에는 예기치 않게 첨가된 금속 구리의 석출이 형성되어 있다. 표면 아래 지역의 미세 조직상에는 Austenite의 결정립계를 통하여 산화가 진행된 것을 알 수 있다.

Boiler pipe의 벤딩 과정 중 발생한 균열은 벤딩부의 국부적인 과열의 가열에 의한 것으로 판단된다. 적절한 온도에서 벤딩 가공을 하는 것과 첨가 원소의 제어가 필요하다.

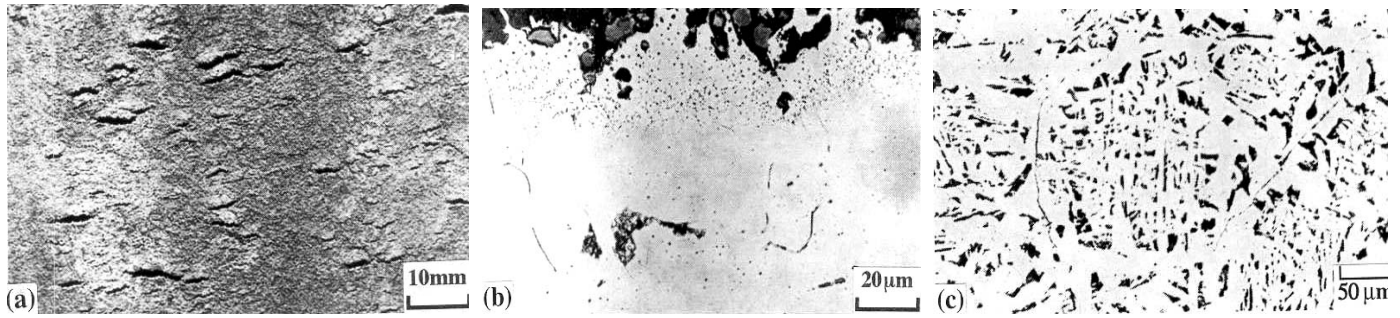


그림20. Boiler pipe 벤딩 엘보의 표면 결함

사례

Steel Rod

그림21은 구조용 철강봉의 찢겨진 형태의 균열을 보여주는 것으로써, 이는 단조 온도가 적절하지 못했을 때 발생할 수 있는 전형적인 찢김의 단조균열 결함이다. 균열의 발단은 그림21 (b)과 같이 강 중에 잔존하는 둥근 형태의 비금속 개재물에 의한 것으로 단조의 소성 변형 중에 이곳에 응력 집중과 균열이 생성하는 것으로 볼 수 있다.

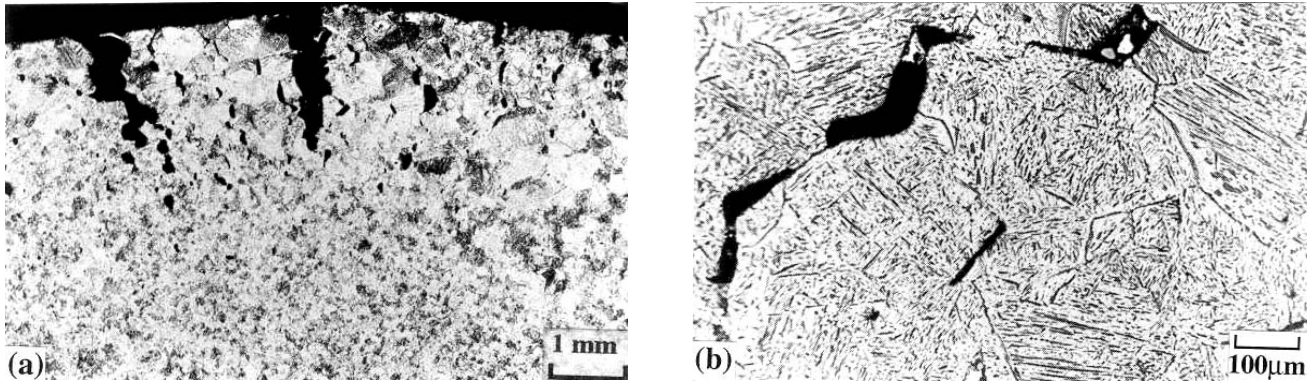


그림 21. 구조용 철강봉 단조균열 결함, 찢김 형태

사례

리 보일러 튜브

ASTM A179 저탄소강으로 제조된 리 보일러 튜브에 그림22와 같이 튜브 축 방향으로 균열과 Leak가 발생하였다. 균열 튜브 단면에는 그림23과 같은 접힘 균열과 이것으로부터 발달하여 튜브 내부로 진전하는 균열이 관찰된다. Seamless 튜브를 제조하는 공정은 Roll 방식의 Stretch reducing mill을 이용하는데, 이때 과도한 Reducing 과정에서 이와 같은 접힘 균열이 만들어 진 것으로 보여진다. 과도한 Reducing이 반복 될 때 접힘 균열 직하에는 고응력이 집중되고 이것으로부터 균열이 진전, 튜브 파손에 이른 것으로 판단된다.

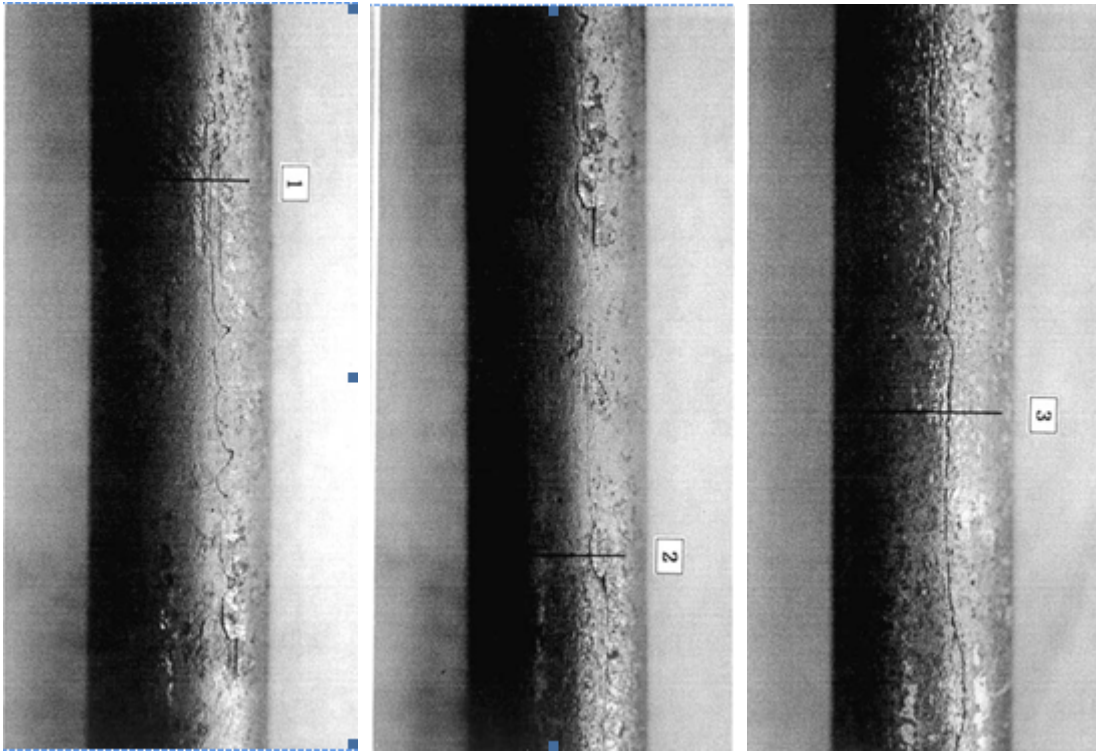


그림22. 저탄소강 리 보일러 튜브 축 방향의 균열과 Leak, 접힘 균열

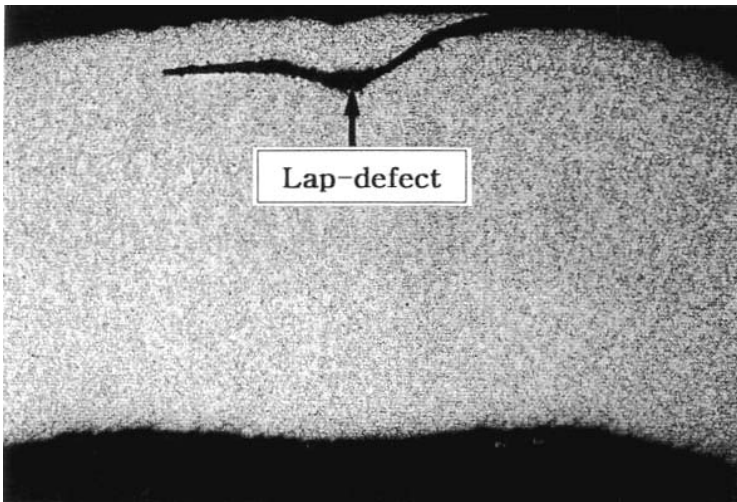


그림23. 접힘 균열

(2) 냉간 가공 결함 (Cold working defect)

낮은 온도에서 소성가공 시 발생할 수 있는 결함은 금형의 예리한 각도나 윤활의 불충분에 의한 요인이나 소성 한계를 벗어난 찢김 현상, 소성가공 시 마찰열 (Thermal friction)에 의해 생성되는 Martensite 층과 이로 인해 유발되는 균열의 발생 등을 들 수 있다. 이외에도 고온 소성 가공에서와 마찬가지로 금형의 예리한 R각 부분에서의 과도한 소성에 의해 발생하는 접힘과 찢김 현상이 냉간 가공에서 나타날 수 있는 균열 결함의 주요 유형이 된다. 또한 Shot peening이나 Riveting, Trimming과 같은 표면처리나 가공에 의한 결함이 제품 표면과 가공면상에 발생되기도 하는데 다음에 이에 대하여 사례별로 언급하였다

사례

Steel wire

과도한 단면 감소 비율로 가공하게 되는 철강의 인발 (Drawing)에 있어서 인발 입구 각의 예리한 정도나 불충분한 윤활 공급 시 표면 균열 생성에 의해 그림24 (a)와 같은 인발 찢김 (Drawing tear) 현상이 발생한다. 그림24 (b), (c) 인발 철사에 발생한 균열을 보여주는 것으로써 불충분한 윤활 효과에 의해 표면에 열과 마찰 응력이 발생하고 이것에 의해 그림24 (d)와 같이 철사 표면층에 Martensite가 유도 형성된 것을 나타낸다. 이러한 표면부의 Martensite 층은 경화되어 균열에 대한 취화 경향이 커짐으로 인하여 표면 균열을 유발하는 것으로 해석된다.

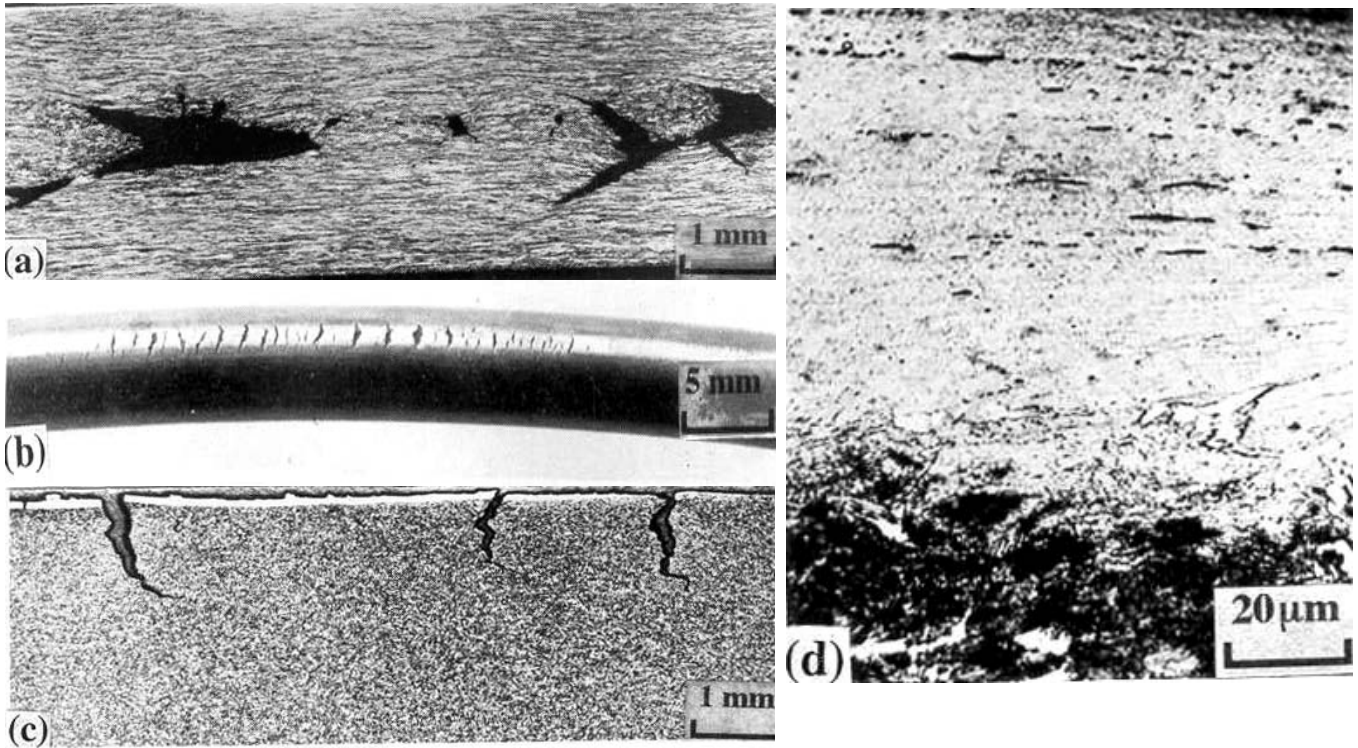


그림24. 철강의 인발 (Drawing) 균열 결함, 철사 표면층 Martensite

사례

Z-profile wire

그림25와 같은 Z-profile wire에 길이 방향의 균열이 유발되었다. 단면의 균열 형성과 미세조직 관찰에 의하여 균열은 연신된 결정립을 따라 진전한 것을 확인할 수 있다 (그림25(b)). 이 균열은 철사의 인발 시 과도한 냉각 가공량의 소성에 의해 발생한 것으로 보이는데, 대략 연신된 결정립계를 따라 균열이 진전된 것을 미루어 볼 때 인발량이 결정립의 소성 변형한계를 초과하였기 때문에 균열이 발생한 것으로 추정된다.

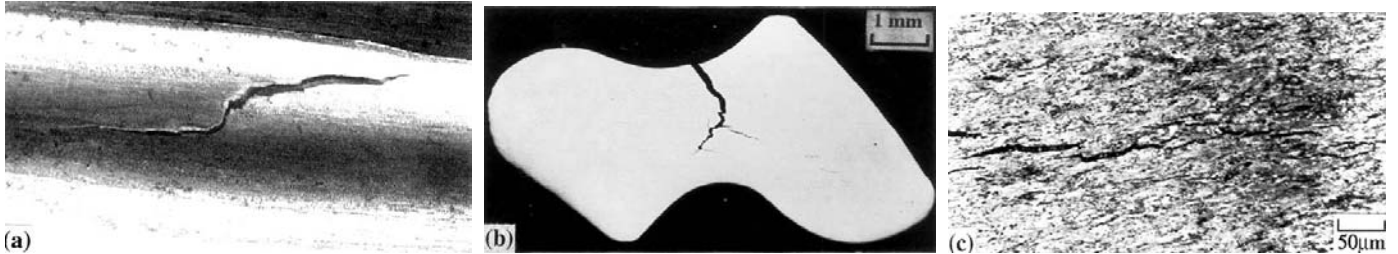


그림25. Z-profile wire에 길이 방향의 균열

사례

Metal flow 에 의한 결함

그림26은 Metal flow가 겹치는 금형 예리한 R각의 부분에 고온 소성 가공에서와 유사한 Laps와 Tears가 발생된 것을 보여 주는 것이다.

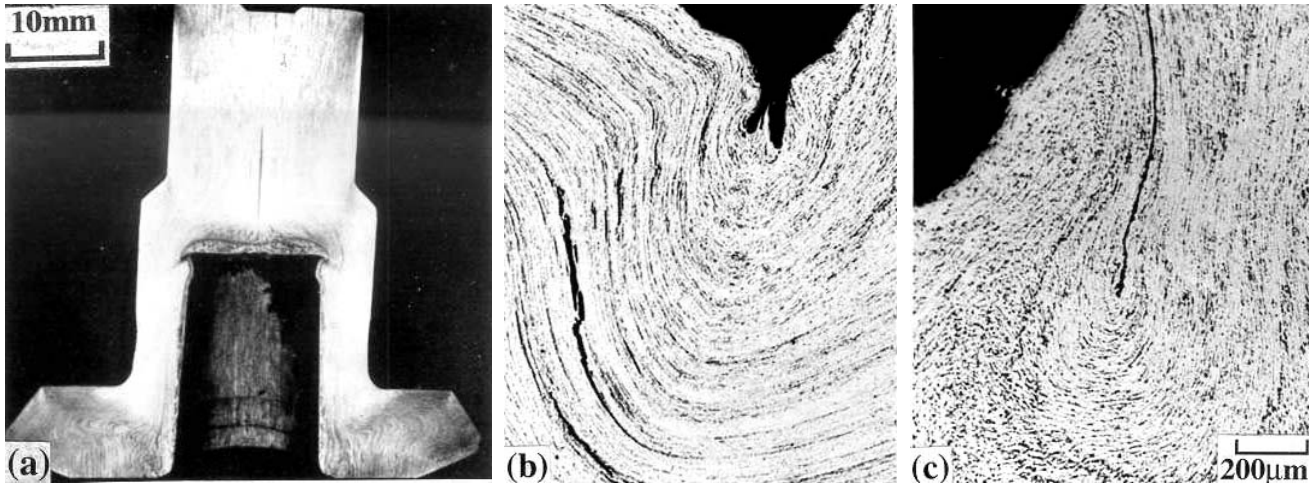


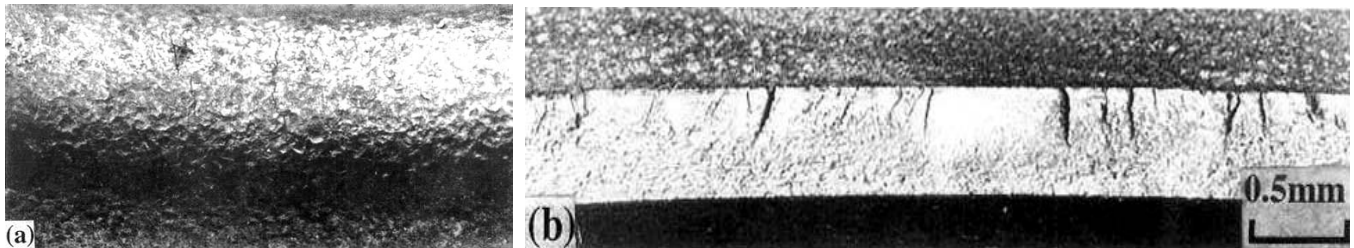
그림26. Metal flow가 겹치는 금형 예리한 R각의 부분에 Laps와 Tears

사례

밸브 스프링의 Shot peening

금속 표면에 Shot peening 처리는 금속 표면에 압축 잔류 응력을 형성시켜 피로 강도나 응력 부식에 대한 강화를 위하여 시행하는데, 적절하지 못한 조건에서 Shot peening을 할 경우 금속 부품 표면에는 냉간 소성변형 (Cold deformation)에 의해 유발되는 균열이 발생할 수 있다.

그림27은 밸브 스프링에서 표면 Shot peening 처리 시 유발된 균열을 보여 주는 것이며, 스프링의 표면에는 그림27 (c), (d)과 같은 미세조직 상의 국부적인 미소 접힘 현상이 관찰되었다. 이와 같이 표면에 균열이 생성하게 되면 피로 강도를 높이려고 일부러 시행한 Shot peening에 의해 오히려 피로 균열의 시작 요인을 제공하고 결국 피로강도를 극심이 떨어뜨리게 된다. 따라서 Shot peening 등의 표면 처리 시에는 반드시 건전한 표면 경화처리가 되도록 유의해야 한다.



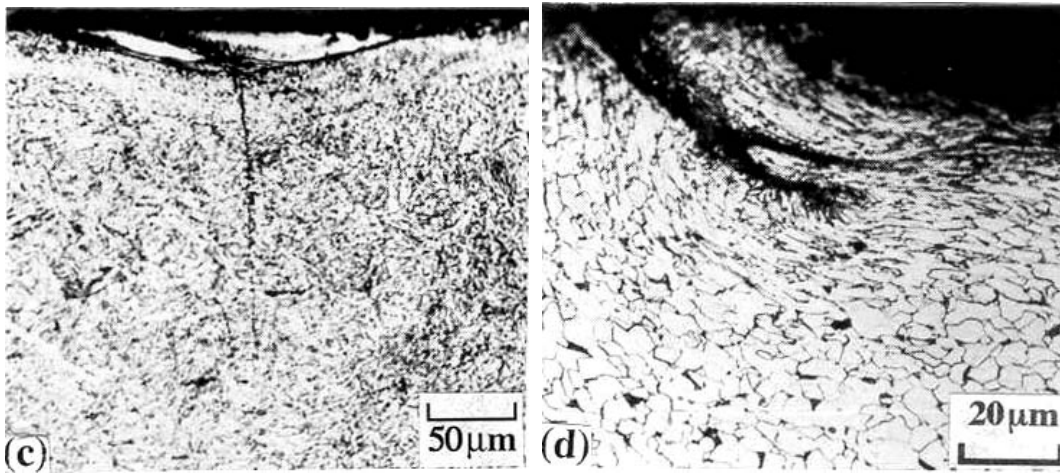


그림27. 밸브 스프링 표면 Shot peening 처리 시 유발된 균열

사례

Angle Bracket의 리베팅

트리밍 (Trimming), 펀칭 (Punching) 혹은 리베팅 (Riveting) 과정같이 금속에 가해지는 급속한 가공에 의해 균열이 야기되는 경우가 있다. 그림28은 Angle bracket의 리벳 홀에서 발생한 파단면을 보여주는 것인데 파단면의 형태상 해안자국 (Beach mark)이 육안으로 확인되는 피로 손상의 형태임을 알 수 있다. 이러한 피로파괴가 리벳 홀에서 그 균열이 발단하여 파단에 이른 것은 리벳 홀의 가공 과정과 관련이 있을 것으로 예상되었다. 이것의 검토를 위하여 리벳 홀에 대한 단면 미세조직을 관찰하였으며 그 결과 그림28 (b)과 같은 리벳 홀 표면의 가공 결함이 발견되었다.

이러한 가공 결함은 Angle bracket이 손상된 피로 손상과정에 있어 피로 균열의 시초로써 작용한 것으로 볼 수 있는데, 이 결함은 급속한 리벳 홀의 가공 속도에 의해 유발된 것으로 보여진다. 즉 리벳 홀을 펀칭으로 구멍을 뚫는 과정에서 냉간의 급속한 가공에 따른 금속재의 충분한 소성변형이 뒤따르지 못하여 균열이 발생하는 것으로 판단된다. 다시 말해서 리벳 홀 주위는 펀칭 가공의 급속한 가공에 의해 전위이동에 따른 충분한 소성이 어렵고 결국 균열이 발생하게 되는 것이다. 리벳 홀 표면에 형성된 이러한 균열에 주어지는 반복하중이 피로 균열 전파를 유도하였고 이로 인해 파단에 이른 것으로 판정할 수 있다.

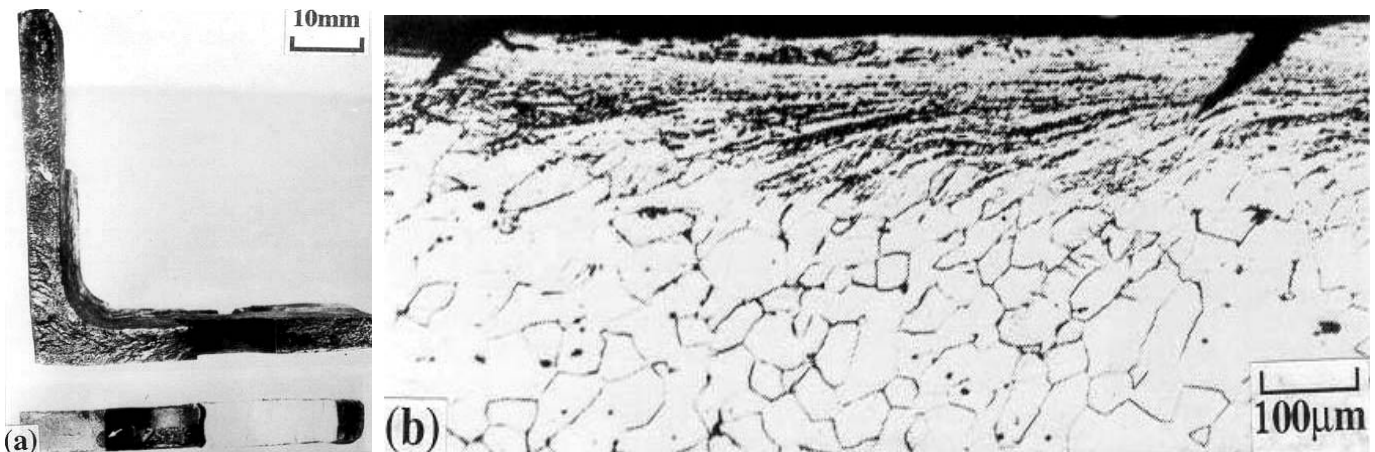


그림28. Angle bracket 리벳 홀 파단손상,

사례

Pre-stressed concrete steel cable

콘크리트 고가도로에 사용되는 Steel cable은 제조 시부터 일정량의 인장 응력이 가해져 $145-160\text{Kgf/mm}^2$ 에 달하는 고강도의 강으로 만들어진다. 파손된 케이블의 표면에는 그림29와 같은 Chafe zone과 이것에 의한 균열이 관찰된다. Chafe zone에는 케이블의 콘크리트 내에서 사용 중 심한 부식이 발생하였으며 그림29 (b)와 같이 케이블 표면 전 지역에서 유발된 부식 균열로 파단에 이른 것을 알 수 있다.

Chafe zone의 미세조직은 그림29와 같은데, 이 지역에 형성된 Martensite 조직은 케이블 내부의 일반 열처리 조직과 큰 차이를 갖는다. Chafe zone의 Martensite는 케이블이 연신되는 동안 발생하는 열과 응력에 의해 형성되는 것으로서 마찰 응력이 가장 큰 표면부의 일정두께에서만 유기될 수 있어 내부조직과 구별되는 경계를 갖는 것이다.

이러한 케이블 표면부의 Martensite는 케이블이 가공과 열처리 과정에서 구성되는 기본적인 열처리조직 (Tempered Martensite)과 미세조직적인 면에서 뿐만 아니라 기계적 경, 강도 면에서도 큰 차이를 보이는데, 훨씬 경, 강도가 높은 Chafe zone인 표면 Martensite층의 에너지 상태가 높아 부식손상이 쉽게 일어나고 결국 이곳으로부터 유발된 부식 균열이 케이블의 최종 파단을 일으키는 것으로 해석할 수 있다.

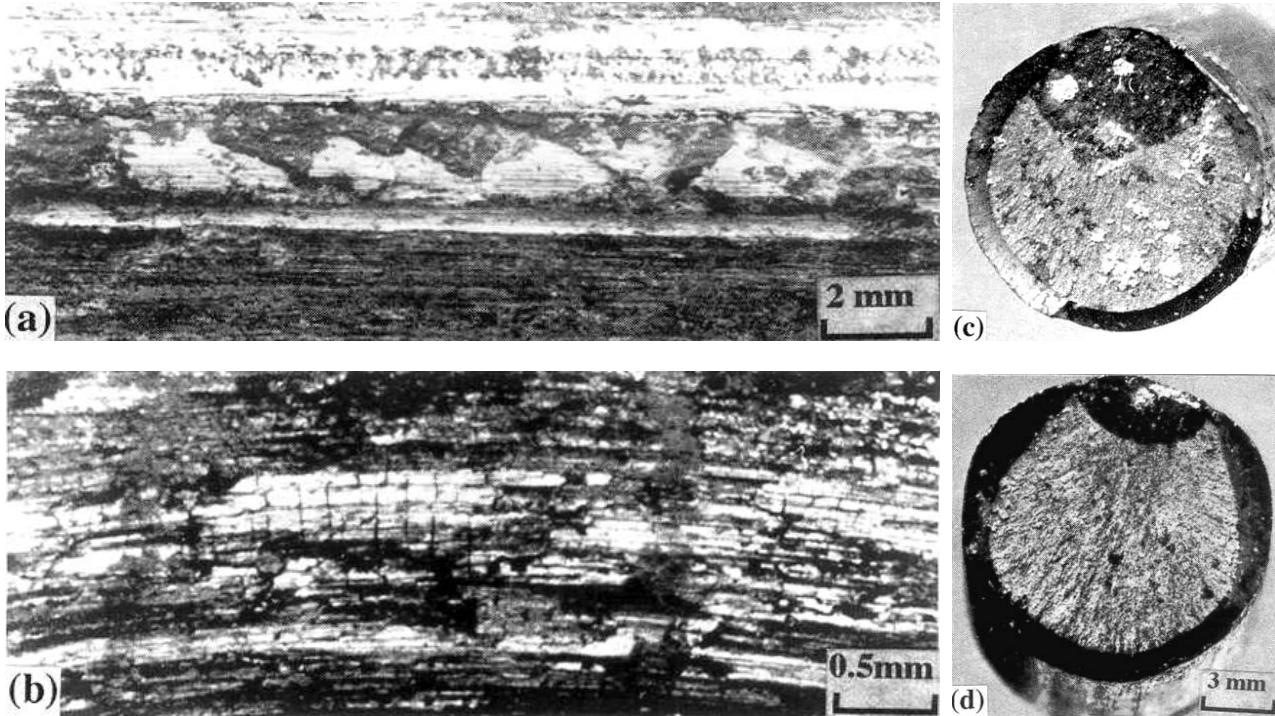


그림29. Pre-stressed concrete steel cable, Chafe zone인 Martensite