

## 금속소재 부품의 고장분석 사례

송진화\* · 홍기정\*\* · 장창환\*\* · 김영섭\*

\*포항산업과학연구원 신뢰성평가센터 신뢰성평가실 · \*\*포항산업과학연구원 신뢰성평가센터 특성분석실

Failure Analysis of Metallic Components

Jin-Hwa Song · Ki-Jung Hong · Chang-Hwan Chang · Young-Sub Kim

### Abstract

Failure analyses were conducted on a crank shaft and a chock liner by using X-ray diffraction, optical microscopy and SEM/EDS techniques. In the crank shaft, a crack developed where a maximum tensile stress coincided with band structure formed by hot forging. The maximum tensile stress was observed to originate from volume expansion during high frequency induction heat treatment and the band structure to develop between upper and lower dies during hot forging. In the chock liner, the wear mechanism varied with the chemical affinity and hardness of liner material relative to friction pair of housing liner. Brass of low chemical affinity and hardness compared to housing liner showed uniform adhesive wear. STS 304 and STS 420J2 of high chemical affinity showed galling and scoring respectively.

Key Words: Failure Analysis(고장분석), Crank Shaft(크랭크 축), Chock Liner(쇼크 라이너)

## 1. 서론

금속소재 부품은 기계, 자동차, 전자산업을 비롯한 각종 산업분야에서 가장 널리 사용되고 있다. 금속소재는 강도와 내구성이 우수하기 때문에 기능성보다는 부품의 기계적인 성능을 달성하는 요소로 사용되는데, 기계요소 설계 시 금속소재의 내구성이 설계변수로 반영된다. 따라서 금속소재 부품의 신뢰성 향상을 위해서는 금속소재의 고장분석이 필수적으로 요구된다.

금속소재 부품의 고장분석은 기구적으로 크리프, 피로, 마모, 그리고 부식으로 구분될 수 있으며, 국내의 경우 금속소재에 대한 고장해석기구에 따른 고장 데이터가 구축되어 있지 않다. 또한 고장분석을 위해서는 고도화된 표면분석, 구조분석, 조성분석 등의 요소분석기술이 종합적 요구되는데 아직 기초수준에 머무르고 있다.

본 논문에서는 국내 금속부품 업체의 요구로 실시된 고장분석 사례 중에서 균열파괴와 마멸에 의해 발생한 고장분석결과를 정리해서 보고한다. 균열파괴는 자동차용 크랭크 축에 관련된 것이고, 마멸고장은 열간압연기 라이나에 관련된 것이다.

## 2. 크랭크 축 고장분석

### 2.1 고장개요

고장이 발생한 크랭크 축의 겉모양을 그림 1에 나타내고 있으며, 균열은 프랜지부에서 발생되었다. 균열고장은 열간단조 후 소입소려(QT) 열처리된 크랭크 축을 기계가공 및 고주파 소입 및 템퍼링을 실시하고 최종 연마가공하는 공정 중에 발생되었다. 균열은 표면에서 중심방향으로 약 10 mm 깊이로 발생되었다.

### 2.2 분석 방법

시료는 고장 제품과 정상 제품에서 각각 채취하되 그림 2와 같이 균열이 발생한 프랜지 부를 절단해서 관찰되었다.

고장분석은 프랜지 부 잔류응력 측정, 광학현미경 조직 관찰, SEM 파면관찰을 통해서 실시되었다.

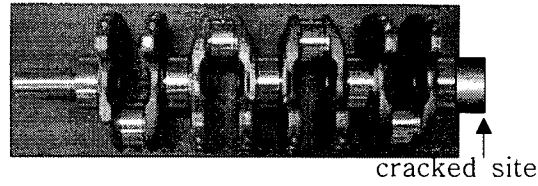


Fig 1. Crank shaft showing cracks.

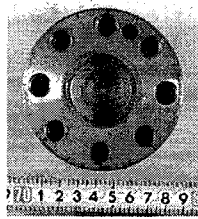


Fig 2. Detailed view of cracked flange part.

## 2.3 분석 결과

### 2.3.1 잔류응력 측정 결과

잔류응력 측정은 프랜지부 표면에 대하여 X선 회절법을 이용해서 측정하였다. 측정위치는 그림 3에 나타낸 두가지 면으로 구분되는데, 하나는 고주파 경화된 프랜지의 원주면이고, 다른 하나는 축의 길이방향에 수직한 프랜지의 측면이다.

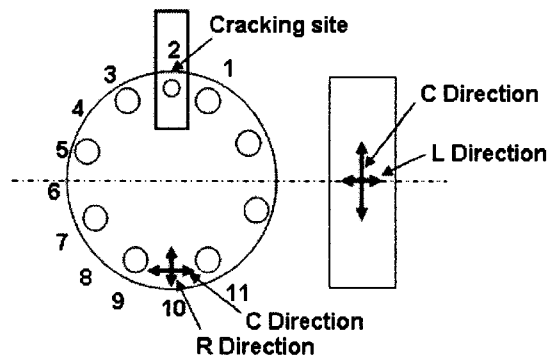


Fig 3. Measurement positions for residual stress by X-ray diffraction.

그림 4는 프랜지 원주면 위치별로 C 방향과 L 방향의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로 방향에 관계없이 모두 압축응력이 작용되고 있다. 이와 같은 압축 잔류응력은 고주파 열처리에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 변태를 일으키면서 팽창될 때 내부 조직에 의해 구속되

기 때문에 초래된 것이다.

원주면 C 방향의 잔류응력 중에서 정상시편의 잔류응력은 위치에 따라 유사하지만, 크랙발생 시편의 압축응력은 위치 2에서 급격히 증가되어 있다. 원주면 L 방향의 잔류응력 중에서 정상시편은 위치 3에서 균열발생 시편은 위치 2에서 높은 압축응력을 나타내고 있다. 한편 C 방향보다 L 방향의 압축응력이 전체적으로 더 높게 나타나고 있다.

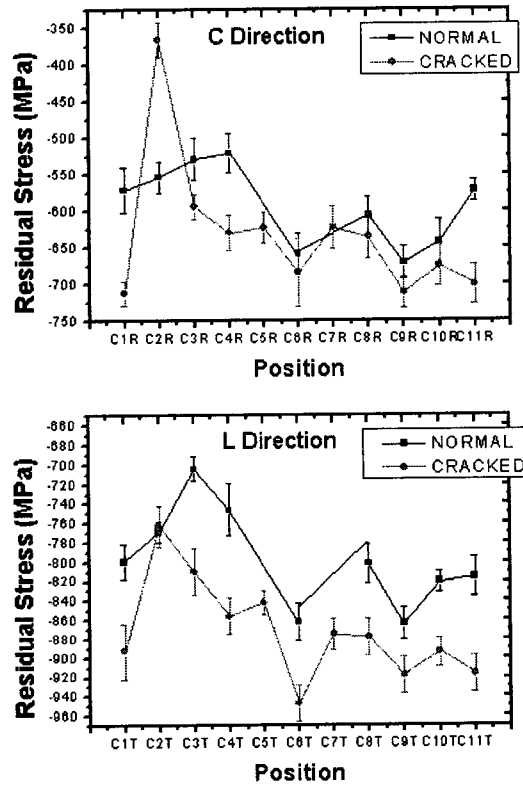


Fig. 4. Distribution of residual stress on circumferential surface.

그림 5는 플랜지 측면 위치별로 C 방향과 R 방향의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로 방향에 관계없이 모두 인장응력이 작용되고 있다. 플랜지 측면의 잔류응력 분포에 있어서 주목할 점은 균열발생 시편의 경우 C방향에서는 위치 1과 2에서 높은 인장응력을 나타내고, R방향에서는 위치 1과 2의 인장응력이 급격히 감소된다는 것이다. 이로부터 C 방향 위치 1과 2에 형성된 높은 인장응력에 의해 균열이 발생되었고, 균열발생에 의해 R 방향 위치 1과 2의 잔류응력이 급격히 감소된 것으로 고려된다.

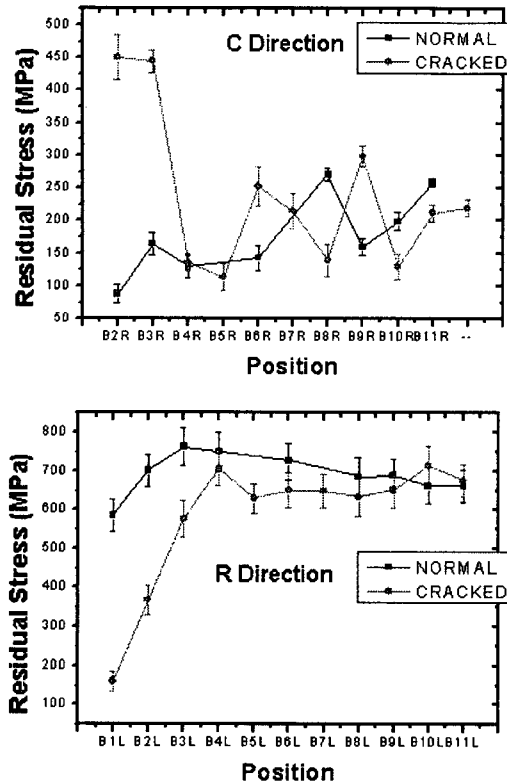


Fig. 5. Distribution of residual stress on flange side surface.

2.3.2 균열 및 미세조직 관찰 결과

기계연마 후 관찰된 균열발생 시편의 C 방향 단면을 그림 6에 나타내는데, 청색으로 표시된 부분에서 축 중심방향과 수직인 원주방향으로 균열이 분기되어 있다. 그림 7에 나타낸 에칭 후 관찰된 단면 조직과 비교해보면, 균열이 분기된 위치가 표면 경화층과 기지조직의 계면부 근임을 알 수 있다. 균열이 분기된 위치와 인장응력 분포를 관련지어 볼 때, 그림 5에서 균열 시편의 R방향 인장응력이 위치 1과 2에서 급격히 감소된 것은 원주방향으로 균열이 분기되면서 초래된 결과로 해석될 수 있다.

그림 7에서 고주파 열처리에 의해 표면에 수직인 방향으로 배열된 소르바이트(sorbite) 층상 조직이 정상시편보다 균열시편에서 조대하고 뚜렷하게 형성되어 있다. 웨라이트와 탄화물이 층상으로 배열된 경우, 그 계면이 취약하기 때문에 계면을 따라 균열이 전파된다고 알려져 있다.

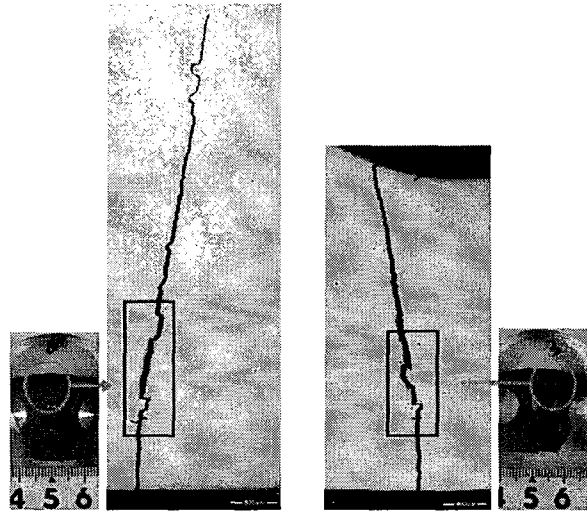
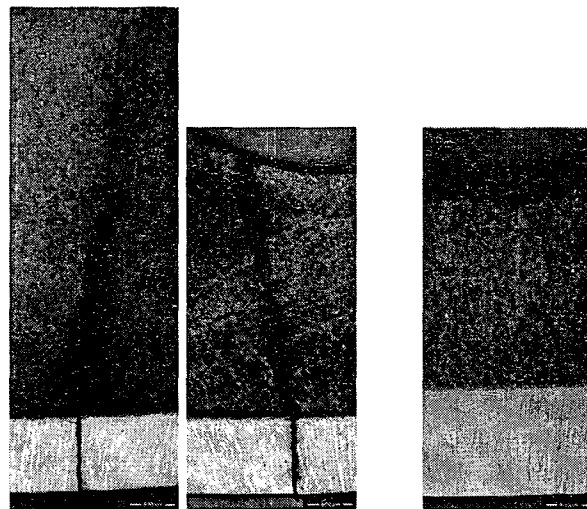


Fig. 6. The crack shape of cross section after mechanical polishing.



(a) Cracked #6, #3

(b) Normal

Fig. 7. The crack shape and microstructure of cross section after etching.

### 2.3.3 파면 관찰 결과

그림 8에 나타난 균열시편 파면에서 주목할 점은 고온 산화스케일이 형성되지 않았다는 것이다. 이는 균열이 열간단조 후 실시되는 QT 열처리가 아니라 고주파 열처리에 의해 형성되었다는 것을 의미한다.

그림 8에 나타낸 파면에서 물결무늬를 이루면서 경화층 하부에 형성된 조대한 층상조직은 그림 6과 7의 경화층과 기지의 계면에서 발생된 균열과 관련되는 것으로 고려된다. 웨라이트와 탄화물이 교대로 적층된 소르바이트 조직의 계면이 취약하다는 점을 복합적으로 고려할 때, 그림 4에서 C방향의 인장응력이 가장 높은 위치 1과 2의 경화층과 기지의 계면에서 균열이 발생되어 전파된 것으로 추정된다. 특히 그림 6과 7의 경화층과 기지조직 계면에서 균열이 원주방향으로도 분기되었다는 것은 계면이 매우 취약하다는 것을 대변하고 있다. 원주방향으로 분기된 균열이 그림 8의 파면에서도 관찰된다(노란색 화살표로 표시). 이와 같이 경화층 직하의 층상조직 부위에서 균열이 다수 관찰된다는 것은 균열이 경화층 직하의 층상조직에서 발생되었다는 것을 의미한다.

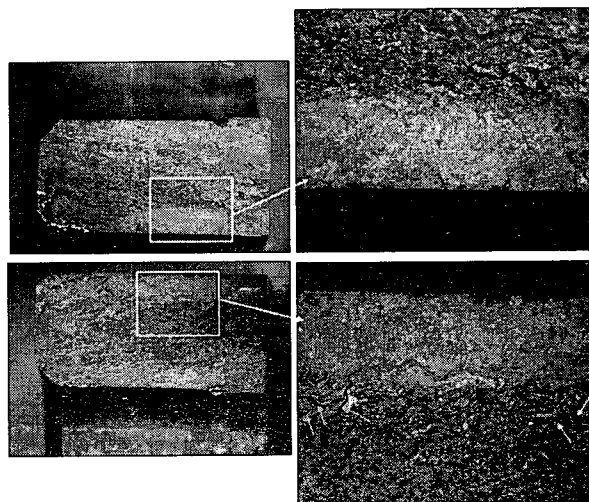


Fig. 8. SEM of cracked surface.

### 3. 열간압연기 라이나 고장분석

#### 3.1 고장개요

열간압연기 라이나는 그림 9에서 슬라브에 의해 가해지는 충격으로부터 롤과 베어링을 보호해주는 역할을 하는데, 하우징과 쇼크 라이나가 서로 마찰되면서 마멸된다. 라이나가 지나치게 마멸되면, 압연기의 제어성능이 저하되어 품질불량을 초래한다. 본 논문에서는 쇼크 라이나 시편에 대하여 고장분석을 실시하였다.

### 3.2 분석 방법

쇼크 라이나 시편에 대하여 경도시험, 마멸 표면형상 관찰, 광학현미경 조직관찰, SEM/EDS 분석을 실시하였다.

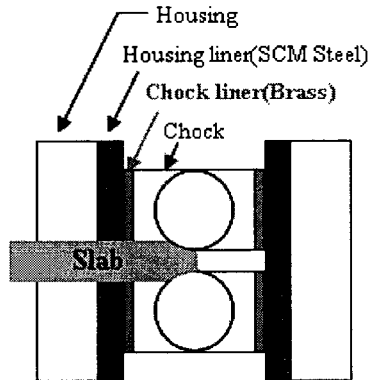


Fig. 9. Schematic diagram of hot rolling machine.

### 3.3 분석 결과

#### 3.3.1 경도시험

고장시편의 경도를 표 1에 재질별로 나타낸다. Brass와 비교해서 STS 304와 420J2의 경도가 2~3배 높다. 한편 하우징 라이나는 기계구조용 SCM 강으로 경도가 HV 545-580 수준으로 알려져 있다.

Table 1 Vickers hardness of chock liner according to material.

Material	Brass	STS 304	STS 420J2
Hardness(HV)	100	220	332

#### 3.3.2 마멸 표면형상

그림 10은 장기간 사용되면서 마멸고장이 발생된 열간압연기 쇼크라이나의 결모양 사진으로 재질에 따라 마멸 양상이 서로 다르다.

Brass의 경우 마찰상대재인 하우징 라이나보다 경도가 매우 낮기 때문에 화살표로 표시된 부분의 스크래치를 제외하면 전면에 걸쳐 점착마멸이 일어났음을 알 수 있다. STS 304의 경



우 전면에 걸쳐 점착마멸이 극심하게 발생된 이른바 갠링(Galling) 마멸의 전형적인 예를 보여준다. 마지막으로 STS 420J2의 표면은 대부분 평활하지만, 화살표로 표시된 영역에서 점착마멸이 마찰방향을 따라 국부적으로 발생된 이른바 스코어링(Scoring) 마멸이 관찰된다.

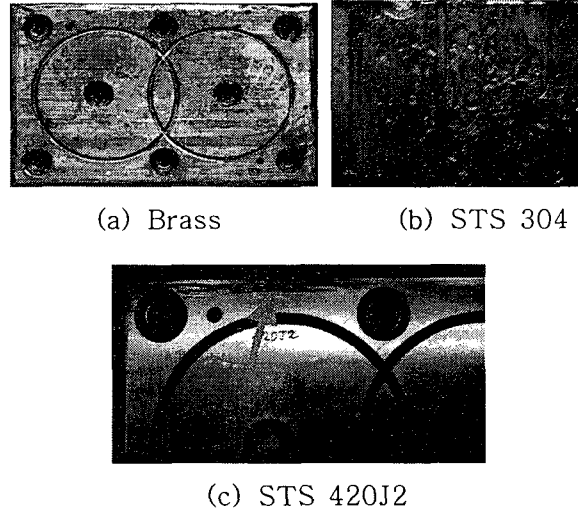


Fig. 10. Worn surfaces of chock liners with various materials.

### 3.3.2 광학현미경 관찰 결과

쇼크라이나 단면에 대한 광학현미경 사진을 그림 11에 나타낸다. Brass의 경우 화살표로 표시된 부분에 스크래치가 매우 낮게 형성되어있고, 표면 하부조직이 변형된 흔적을 전혀 보이지 않는 특징을 가지고 있다. STS 304의 경우에는 표면 하부층이 극심하게 변형되면서 표면에 평행하게 변형된 조직과 함께 일부분이 모재와 분리되어있다(화살표로 표시). 이러한 현상은 표면피로 마멸기구에 의해 일어나는 박리마멸(Delamination)의 전형적인 예이다. STS 420J2의 경우에도 표면 하부층이 변형되어 있으며, 화살표로 표시된 부분이 모재와 분리되어 탈락되는 형상을 보여준다.

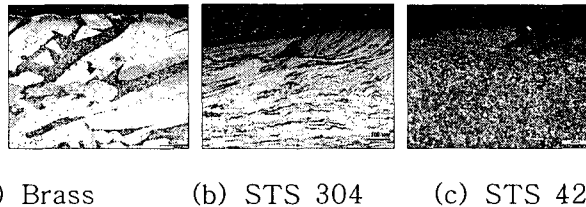


Fig. 11. Photographs of worn surface with various materials.

### 3.3.3 SEM/EDS 분석

그림 12에 STS 304 쇼크 라이나 단면의 BSI (Back Scattered Image) 사진을 보여준다.

화살표로 표시된 부분에 모재와 다른 재질이 접착되어 있음을 알 수 있다.

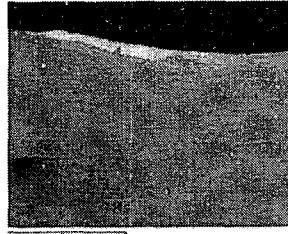
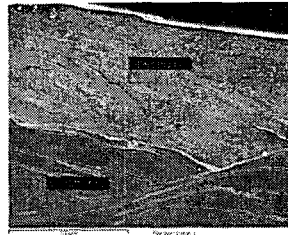


Fig. 12. BSI of STS 304 liner.

그림 13은 그림 12에서 화살표로 표시된 표면하부의 확대시야 BSI와 EDS 분석결과를 나타낸다. Spectrum 1의 화학성분은 하우징 라이나 재질로 사용되는 SCM 강에 대응되며, 이로부터 STS 304 초크 라이나 표면에 마찰 상대재인 하우징 라이나 재질이 접착되었다는 것을 알 수 있다.



	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1	-	0.35	0.78	89.99	-
Spectrum 2	0.35	17.96	1.13	69.56	8.07

Fig. 13. EDS analysis of surface area in Fig. 12.

그림 14는 그림 11 (c)에서 보여준 STS 420J2 초크 라이나의 표면 하부 층에 대한 BSI 사진으로 균열이 발생된 것을 보여주고 있다. STS 420J2 초크 라이나의 경우에도 표면피로 마멸기구에 의해 마멸이 일어난다는 것을 알 수 있다.

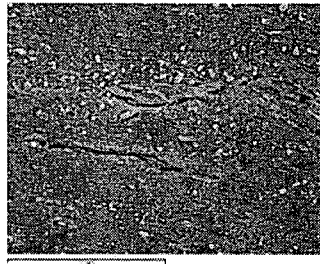


Fig. 14. SEM of subsurface area in Fig. 11 (c).

#### 4. 결 론

크랭크 축의 균열은 고주파 열처리 시 마르텐사이트 및 웨라이트 변태에 의한 부피 팽창에 의해 인장응력이 최대로 형성되는 경화층과 기지의 계면이 단조변형에 의해 형성되는 층상조직의 위치와 일치되면서 발생된 것으로 추정된다. 따라서 고주파 경화 깊이를 증가시켜 인장응력에 의해 균열이 쉽게 발생되는 물결무늬 층상조직을 제거한다면, 균열이 발생되지 않을 것으로 예상된다.

압연기 라이나 고장시편에 대한 분석 결과, 마찰 상대재인 하우징 라이나와 화학성분이 크게 다르고 경도가 현저히 낮은 Brass 의 경우 접착마멸을 일으키고, 하우징 라이나와 화학적 친화도가 큰 STS 304와 STS 420J2의 경우 갬링 또는 스코어링과 함께 표면 피로마멸이 복합적으로 발생된다.

#### 참고문헌

- [1] ASM Handbook, Vol. 11, Fracture Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002.
- [2] J. Cortes and L. V. Curran, 1999, "Wear- Resistant, Precision Flat Bearings for Rolling Mills", MPT International, pp.46~49
- [3] Nam P. Suh, 1980, "Update on the Delamination Theory of Wear", Fundamentals of Friction and Wear of Materials, Papers presented at the 1980 ASM Materials Science Seminar, 4-5 October 1980, Pittsburgh, PA, Edit by D. A. Rigney, ASM, Materials Park, Ohio. 1981.