

프레스다이용 코일스프링의 신뢰성평가 및 고장분석 사례 발표

고세현, 박상용, 장진만, 이원식

ABSTRACT

프레스다이용 코일스프링은 자동차 및 전자제품의 외형생산에 필요한 금형 내에 장착되는 금형용 스프링으로서 녹아웃 및 스트리퍼 등에 사용되고 있다. 프레스다이용 코일스프링이 사용 중 파손 시에는 고가인 금형의 손상 및 생산성에 영향을 미칠 수도 있기 때문에 사용 환경에서의 신뢰성확보가 요구되어지고 있다. 특히 重하중 및 極重하중용 스프링은 과거 현장에서 파손사례가 자주 발생함으로 인해 외산을 선호하는 경향이 있는 형편이다. 이에 국산 스프링의 신뢰성검증 및 확보를 위해 신뢰성기반구축사업을 통해 신뢰성평가기준(RS D 0014)가 제정되었으며, 이 평가기준에 의거하여 국내 업체의 제품에 대해 신뢰성평가를 실시하였다. 프레스다이용 코일스프링의 파손원인은 주로 반복하중에 의한 피로파손과 일정한 변위의 변형으로 발생하는 코일스프링 자유높이의 축소로 크게 구분되어질 수 있다. 시험결과 주 파손양상은 피로에 의한 균열발생이었으며, 코일 끝단부와 끝단부 직하부의 코일과의 마찰에 의한 균열발생이 주원인이었다. 즉, 코일의 끝단면과 직하면 코일이 연속적으로 부딪침으로써 발생한 변형 및 마모에 의해 표면균열이 발생하고, 표면균열에서 반복적인 부하하중이 가해짐으로써 피로균열 진전을 통해 점차적으로 파손이 진행되어졌음을 알 수 있었다. 본 발표에서는 기준에 의거하여 重하중용 프레스 다이용 코일스프링을 평가한 신뢰성평가 시험 결과에 대해 보고하고, 파단면 관찰과 외산제품과의 미세조직 및 조성 등의 비교분석결과 등을 기초로 파손원인을 분석한 결과에 대해 보고하고자 한다.

1. 서론

최근 자동차를 비롯한 수송기계, 전기·전자, 통신기기 등의 산업발전과 더불어 제품의 고급화 및 고부가가치화와 생산성의 향상이 요구되어, 프레스 금형에 대해서도 그 기술의 발전에 따라 고신뢰성, 고정밀화, 고속화에 대한 요구가 가속화되어지고 있다. 프레스 다이용 코일 스프링은 그 수요가 증가추세에 있는 고속프레스의 생산성을 좌우할 뿐만 아니라, 사용 중에 파손이 일어나는 경우에는 부품교체로 인한 생산성의 저하와 고가인 금형의 파손을 야기 시키기도 한다. 국내에서는 국산제품과 외산제품이 혼용되어 사용되어지고 있으나, 보수적인 업체에서는 경험을 통해 신뢰성이 확보되어져 있는 외산제품을 선호하고 있는 실정이므로 외산제품의 수입대체 및 수출증대를 위해서는 국산제품의 신뢰성검증 및 향상이 요구되어지고 있다.

프레스 다이에 이용되는 코일 스프링이 파손되어진다는 것은 그 사용기간 중에 초기의 특성을 유지하지 못하게 되는 것을 의미한다. 프레스 다이용 코일 스프링의 파손 기구는 하중이 가해지는 형태에 따라 크게 정적인 원인과 동적인 원인으로 구분되어질 수 있는데, 이는 반복적인 동작에 의해 발생하는 동적인 피로파괴 및 금형의 보관 및 동작 중에 일정 변위가 가해짐으로 발생하는 정적인 영구변형을 들 수 있다. 단성 범위 내에서 설계되어진 스프링의 경우에도 동적인 반복응력 하에서 사용하는 과정에

한국생산기술연구원 금속소재신뢰성평가센터
충청남도 천안시 입장면 흥천리 35-3

* 본 연구는 산업자원부 2005년도 부품소재신뢰성평가기반구축사업으로 수행되었습니다.

서 외부표면에 미소균열이 발생하게 될 수 있으며, 원재료에 존재하거나 가공 중에 형성된 균열들이 점진적으로 확대 또는 전파됨에 따라 결과적으로는 파손에 이르게 된다. 피로파괴에 영향을 미치는 인자로는 재료와 열처리, 표면결함과 크기, 응력형식과 응력상태, 환경 등을 들 수 있으며, 이러한 인자들이 단독 또는 복합적으로 영향을 미치기도 한다. 또한, 코일 스프링에 일정한 하중이 장시간 부하 되어지면, 부하된 하중이 스프링의 탄성한도 이내라 하더라도 스프링의 영구변형을 초래하기도 한다. 이러한 현상은 크리프에서 일어나는 현상과 유사하며, 고온일수록 현격하게 나타나나 설계응력이 큰 스프링의 경우에는 상온에서 일어나기도 한다. 부하하중 또는 부하변형량이 증가할수록 스프링의 치수의 변화를 가져오며, 스프링 특성의 퇴화를 야기시켜 본래의 특성을 유지하지 못함으로써 스프링으로서의 특성을 저하시키게 된다. 이러한 영구변형의 발생은 스프링 제조 공정 중에 스프링에 형성된 인장 잔류응력이 주요 원인으로 생각되어지고 있으며, 재료의 본질적인 탄성계수, 열처리 조건, 잔류수소, 사용환경 등에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 프레스다이용 코일스프링의 신뢰성평가기준(RS D 0014)에 근거하여 기존에 생산되어지고 있는 국산 중하중용 프레스다이용 코일스프링의 신뢰성평가를 수행한 결과 및 신뢰성평가 중에 발생한 파손원인의 분석 결과에 대해서 보고하고자 한다.

2. 시험방법

본 연구에서는 규격 H 30×70(중하중용, 바깥지름 30mm, 안지름 15mm, 자유높이 70mm)의 2종류 국산 프레스다이용 코일스프링제품(제품A, 제품B)에 대해서 다음과 같은 평가가 수행되어졌다.

2.1 치수정밀도

프레스 다이용 코일 스프링의 치수정밀도는 바깥지름, 안지름, 자유높이 등의 표준치수에 대한 제품의 정밀도와 직각도를 포함하며, 내구수명 전·후의 모든 시험편에 대해 평가를 수행하였다. 바깥지름, 안지름 및 자유높이는 버어니어 캘리퍼스로 서로 직교하는 2곳의 지름을 측정 후 평균을 구하였으며, 직각도는 무하중의 상태에서 공구현미경을 사용하여 스프링의 끝면에 각각 직각인 축에 대하여 코일 바깥쪽 면의 최대 기울어짐을 측정하였다.

2.2 기초물성시험

프레스 다이용 코일 스프링에 요구되는 기초물성은 스프링 특성 및 피치의 부동으로써, 스프링의 수명에 직접적인 영향을 미치지 않으나 스프링의 기능을 유지하기 위해서는 사용수명 중에 반드시 유지되어야 하는 물성이다. 스프링 특성은 지정변형을 스프링에 부가하였을 때 발생하는 하중을 측정하거나, 지정하중을 스프링에 부가하였을 때 얻어지는 변형을 측정할 수 있는데, 본 연구에서는 신뢰성 기준에 근거하여 사용가능 최대 변형량의 20~80% 범위에서 3점을 지정하고 각 변형량에서의 하중을 측정 후, 각 측정값을 기준값과 비교하였다. 또한 프레스다이용 코일 스프링과 같은 등피치 스프링의 경우에는 사용 중에 양단의 첫 번째 코일을 제외하고는 코일간의 접착이 발생하여서는 안 되며, 이러한 특성을 평가하기 위하여 피치의 부동시험을 행한

다. 이는 스프링의 최대 변형량의 80%를 압축하였을 때, 양 끝부를 제외한 코일의 밀착여부를 육안으로 판단하여 평가하였다. 스프링특성 및 피치의 부동시험은 내구수명시험 전·후의 모든 시험편에 대해 수행되어졌다.

2.3 내구수명시험

프레스 다이용 코일 스프링의 수명은 제품의 내피로성과 내영구변형성에 의해 결정된다. 스프링은 반복되는 응력변화를 겪음으로서 피로균열이 생성·전파되어 파단에 이르게 되거나, 장시간 일정 하중 하에 놓이게 됨으로써 영구변형이 발생하여 스프링으로서의 특성을 잃어버리게 된다. 피로내구성시험은 신뢰도 확보를 위해 22개의 시험편을 사용하였으며, 신뢰성기준에서 제시하고 있는 기준 변형량(자유높이의 24%, 16.8 mm)에 대해 200 spm의 반복속도로 30만회 반복 변형한 후, 스프링에서의 균열 발생 여부 및 치수정밀도와 기초물성이 기준값을 만족하는가를 평가하였다. 영구변형시험은 피로내구성시험과 마찬가지로 22개의 시험편을 사용하였으며, 스프링의 실제 사용 최대 변형량(자유높이의 24%, 16.8mm)을 스프링에 부하하여 120시간 유지시킨 후, 치수정밀도와 기초물성이 기준값을 만족하는지 평가하였다.

3. 신뢰성시험(국산제품 A)

신뢰성평가결과 모든 기준을 통과한 국산제품A의 평가결과에 대해 보고하고자 한다.

3.1 피로내구성시험

자유높이 24%의 변형량에서 30만회의 반복 변형시험을 수행한 결과, 22개의 모든 스프링에 대하여 파손이 관찰되어지지 않았으며, 시험 전·후의 치수정밀도 및 기초물성의 변화는 다음과 같았다.

3.1.1 치수정밀도

치수정밀도에는 바깥지름, 안지름, 자유높이 및 직각도가 있으며, 바깥지름과 안지름의 경우에는 시험 전·후에 변화하지 않으나, 자유높이 및 직각도는 변화할 가능성을 가지고 있다. 22개의 모든 시험편에 대해 각각의 항목에 대해 평가한 결과를 Fig.1~Fig.4에 나타내었다. 그림에서 위아래의 표시선이 신뢰성기준의 허용범위에 해당한다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 자유높이는 시험 전·후의 값이 큰 차이 없이 동등한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 직각도도 Fig.4에서 볼 수 있는 것과 같이 피로내구성시험 전·후에 모든 시험편이 허용 기준값인 2도를 만족하는 결과를 나타내었으며, 시험 전·후는 직각도 변화는 뚜렷이 나타나지 않았다.

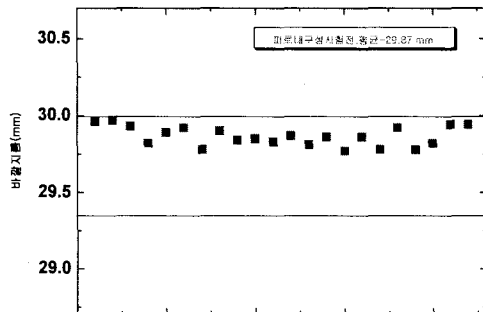


Fig.1 피로내구성시험 전의 바깥지름

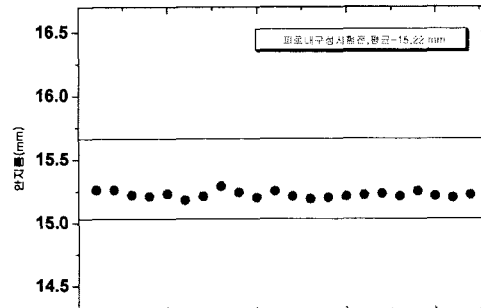


Fig.2 피로내구성시험 전의 안지름

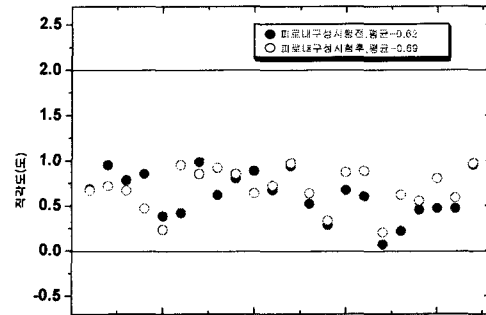
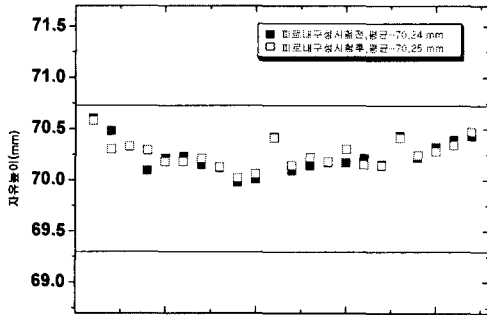


Fig.3 피로내구성시험 전·후의 자유높이 Fig.4 피로내구성시험 전·후의 직각도 변화

3.1.2 기초물성시험

피로내구성 전·후에 스프링의 최대변형 16.8mm의 80%인 13.44mm의 변형을 부하한 후 피치의 부동 여부를 측정된 결과, 모든 시편이 조건을 만족한 결과를 나타내었다. 신뢰성평가기준에 의거하여 자유높이의 16%, 20%, 24%의 변형량에서 하중을 측정하였으며, Fig.5~Fig.7에 피로내구성 전·후에 평가한 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 모든 시편의 스프링특성이 피로내구성시험 전·후에 큰 변화 없이 기준에 부합되는 결과를 보여주었다.

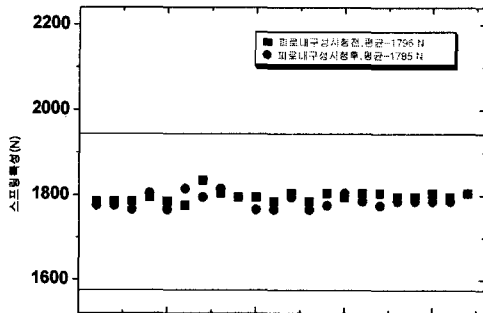


Fig.5 스프링특성 변화(변형율 16%)

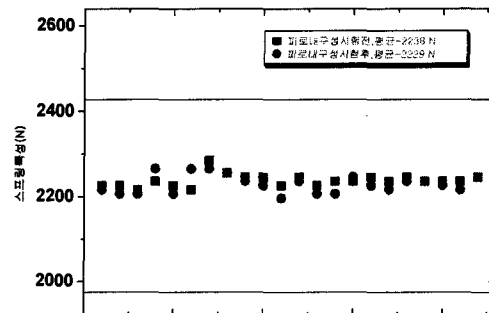


Fig.6 스프링특성의 변화(변형율 20%)

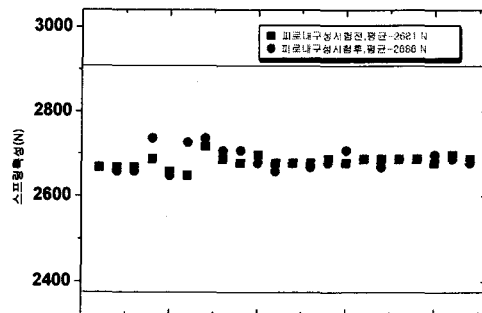


Fig.7 스프링특성의 변화(변형율 24%)

3.2 영구변형시험

최대사용 변형량인 자유높이 24%의 변형량에서 120시간을 유지한 후, 피로내구성시험에서와 같이 영구변형 전·후에 치수정밀도 및 기본특성에 대해서 평가를 수행하였으며, 시험 전·후의 측정값의 변화는 다음과 같았다.

3.2.1 치수정밀도

22개의 시편에 대해 평가한 결과는 Fig.8~Fig.11에서 볼 수 있는 것과 같이, 모든 값이 기준을 만족하는 결과를 나타내었다. 하지만 자유높이 및 직각도는 영구변형시험 후 다소 증가하는 양상을 나타내었다.

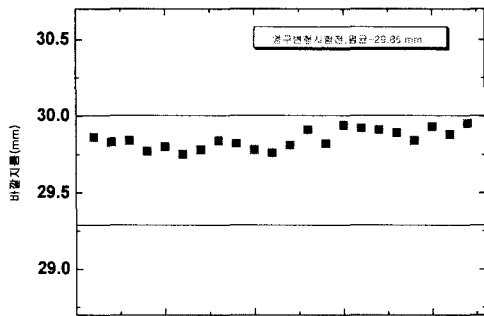


Fig.8 영구변형시험 전의 바깥지름

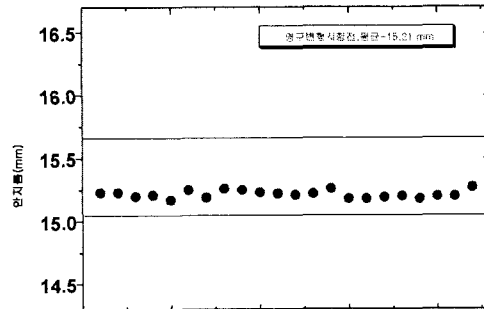


Fig.9 영구변형시험 전의 안지름

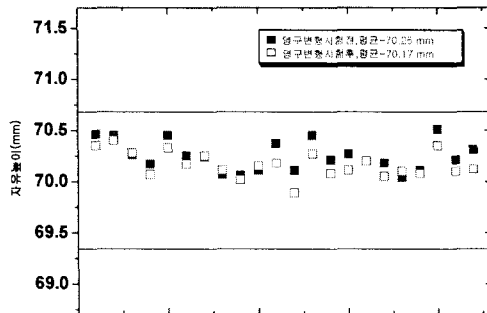


Fig.10 영구변형시험 전·후의 자유높이

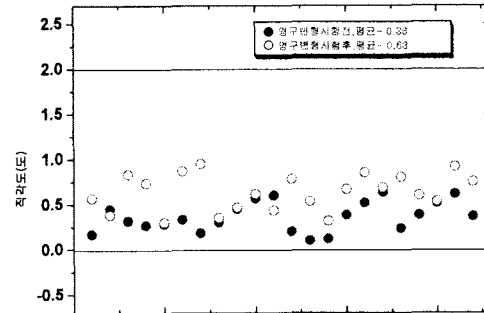


Fig.11 영구변형시험 전·후의 직각도

3.2.2 기초물성시험

영구변형시험 전·후에 스프링 최대변형량의 80%인 13.44mm의 변형을 부하한 후 피치의 부동 여부를 측정된 결과, 모든 시편이 조건을 만족한 결과를 나타내었다. 영구변형시험 전·후의 스프링 특성 결과도 Fig.12~Fig.14에서 볼 수 있는 바와 같이 큰 변화 없이 기준에 부합되는 결과를 보여주었다.

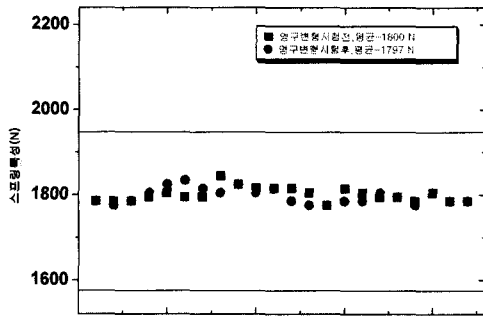


Fig.12 스프링특성의 변화(변형율 16%)

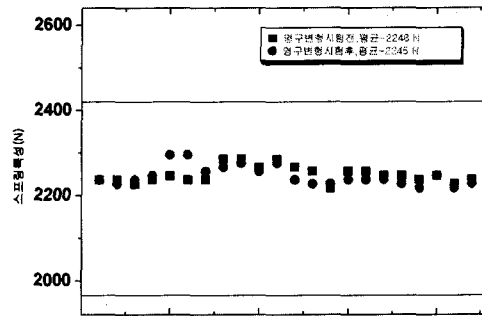


Fig.13 스프링특성의 변화(변형율 20%)

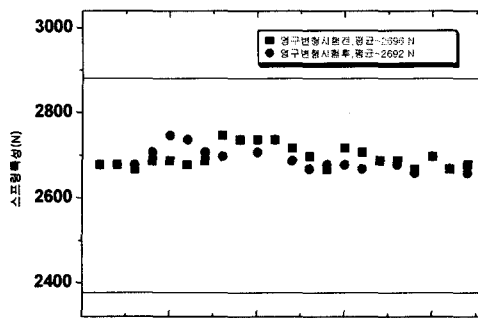


Fig.14 스프링특성의 변화(변형율 24%)

3.3 신뢰성시험결과

상기의 결과와 같이 모든 평가결과가 기준값을 만족하였으므로 신뢰성기준 RS D 0014에 의거하여 자유높이에 대한 변형률24%, 200spm의 부하속도조건에서 신뢰수준 90%로 B₁₀수명 30만회를 보장할 수 있다.

4. 고장분석(국산제품 B)

국산제품 B에 대해 신뢰성평가를 수행한 결과, 피로내구성시험 후 22개의 시험편 중 4개의 시험편에서 파손이 일어나는 결과를 보여주었으며, 파손된 제품에 대해 고장분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

먼저 파손이 발생한 스프링의 파손부위를 관찰한 결과, Fig.15와 같이 코일 끝단부의 바로 밑에 해당되는 코일에서 균열이 발생함을 알 수 있었다. 재료적인 특성을 알아보기 위해 신뢰성이 확보된 것으로 시장에서 인정받고 있는 외산 제품(동발, 일본)과 성분과 경도 및 조직을 비교 평가하였다. 스프링재질의 피로특성은 재질 내에 존재하는 Al₂O₃, (MnO, MgO, CaO)-Al₂O₃, SiO₂와 같은 비금속개재물의 밀도 및 크기에 크게 좌우되어지며, 이러한 비금속개재물은 재질의 산소농도를 측정함으로써 분석되어질 수 있다. 하지만 Table 1에 나타난 바와 같이 이번 실험에서 파손이 발생한 제품B는 외산제품과 비교하여 산소농도의 차이가 보이지 않았다. 또한 경도시험결과도 각 조직의 기계적 특성이 유사함을 나타내었으며(Table 1), 미세조직을 분석한 결과도 모든 재질에서 Tempered 마르텐사이트 조직이 나타나는 비슷한 양상을 보여주었

다(Fig.16),

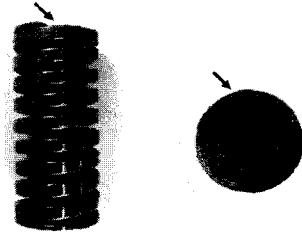


Fig.15 스프링의 파손 부위

Table 1 국산제품 B와 외산제품과의 산소농도 비교

	국산제품 B	외산제품(동발)
산소농도 (wt%)	0.002	0.002
경도(H _R C)	46.8	46.8

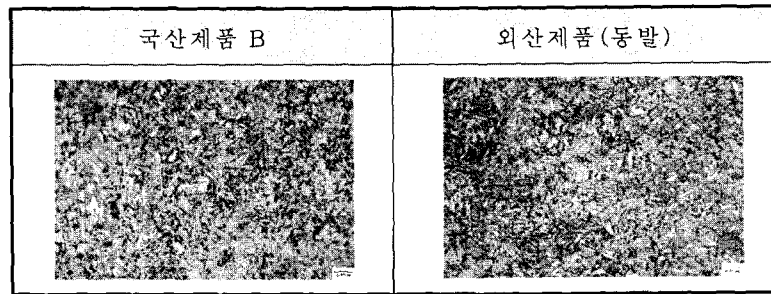


Fig.16 국산제품 B와 외산제품의 미세조직 비교

이상의 결과로부터, 파손의 원인이 재료 원소재로부터 발생할 확률은 매우 적음을 알 수 있다. 따라서 파손부위를 중심으로 파손 관찰을 실시하였다. Fig.17은 파손 부위를 중심으로 위아래의 코일을 절단하고 관찰한 결과를 보여준다. 사진에서 알 수 있는 바와 같이 크게 3부분이 윗 코일과의 접촉으로 인해 손상을 입은 상태를 나타내고 있다. 또한 손상을 입은 부위는 윗 코일의 끝단과 일치하는 결과를 나타내고 있다.

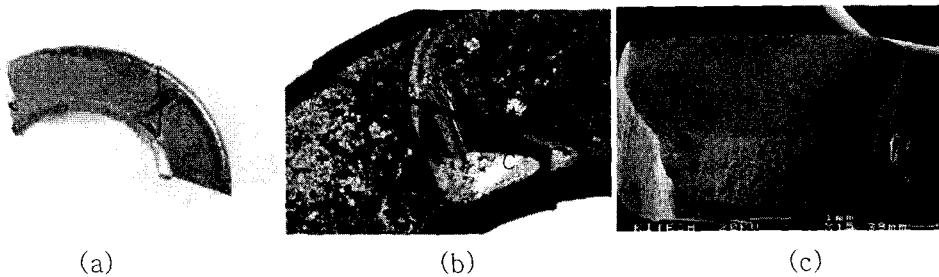


Fig.17 파손부위의 관찰 사진 ((a),(b):외면관찰, (b):단면관찰)

위의 결과에서 윗단부와 그 밑의 코일과의 접촉으로 인해 손상이 진행되었음을 알 수 있었으며, 좀 더 자세한 파면관찰을 위해 Fig.17 (c)의 5부분에 대해 파단면의 관찰을 수행하였다. Fig.18에서 볼 수 있는 바와 같이 A부분에 대한 파단면 관찰결과, 윗부분의 형상은 피로파괴의 기점으로 발생되었다기보다는 균열 발생 후 파단면끼리의 마찰에 의해 형성되어진 양상을 보여주었다.

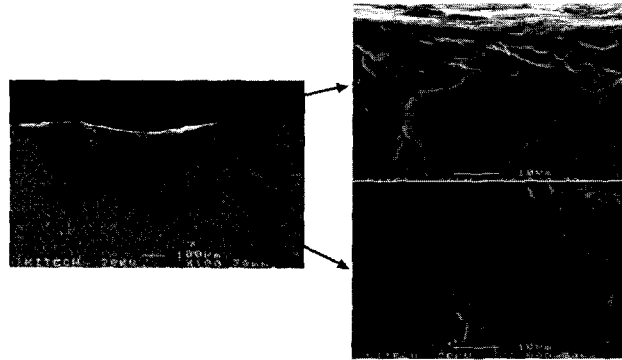


Fig.18 A부분의 파단면

한편 B부분에 대한 파면 관찰결과는 Fig.19에서 보여주는 것과 같이 주균열 발생기점으로 표시된 부위로부터 균열이 발생하여, 이를 중심으로 균열이 전파되고 있음을 알 수 있으며, B부분의 하부에 해당하는 D부분으로 균열이 전파되는 양상을 보여주고 있다.

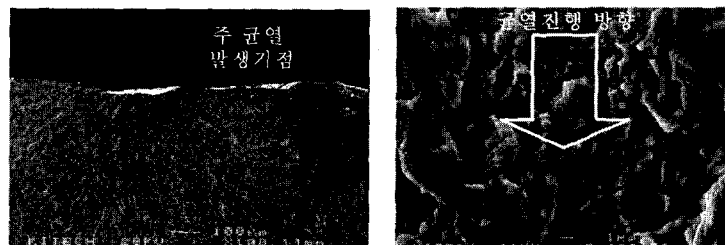


Fig.19 B 및 D부분의 파단면

이상의 분석결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 파손의 발생 원인은 스프링의 끝단면이 그 다음 면에 연속적인 충격을 가함으로써 변형 및 마모에 의해 표면균열이 발생하고, 표면균열에서 반복적인 부하하중이 가해짐으로써 피로균열 진전을 통해 점차적으로 파손이 진행되어졌다.
- (2) 균열의 발생 부위는 복수일 수도 있으며, 어느 정도 균열이 진행되어진 후에는 스프링 끝단면의 반복적인 부하하중에 의해 균열면 간의 마찰이 발생하기도 하였다.
- (3) 파손제품은 산소농도와 경도 및 조직은 외산제품과 비교 평가한 결과 유사한 양상을 보여주었으며, 파손의 원인이 재료적인 문제가 아님을 나타내었다.