'98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

스테인레스강 벨로우즈의 피로 균열 진전 거동

Fatigue Crack Growth Behavior of Stainless Steel Bellows

맹완영, 강영환
한국원자력연구소

조대희, 김재훈
충남대학교

요 약

금속 벨로우즈의 피로 균열에 대한 파단전 누설 분석은 부품의 안전성 관점에서 중요하다. 스테인레스강재 금속 벨로우즈의 피로균열진전특성을 파악하고자 CT 시편을 이용하여 피로 줄무늬 분석, beach mark 형성 시험 및 one pitch 모델 벨로우즈 시편을 사용하여 피로균열진전 시험을 수행하였다. CT시편의 균열 선단에 작용하는 피로 응력 크기를 변화시키면 beach mark가 형성되고 이와 같은 beach mark 형성 방법에 의해 벨로우즈 시편에 균열성장 거동을 분석하는 것이 가능하였다. one pitch 모델 벨로우즈 시편의 초기 균열의 형태, 크기 및 위치에 따라 피로균열 진전 거동이 변화되어 벨로우즈의 수명을 좌우한다.

Abstract

The leak before break analysis for metal bellows is very important from the point of view of safety. In order to evaluate the fatigue properties of 316 stainless steel bellows, fatigue crack growth tests were carried out for CT and one pitch model bellows specimens. Fatigue beach marks were formed by the variation of fatigue stress. Fatigue crack length can be deduced by the artificially formed beach marks during the fatigue crack growth test. The fatigue life of the one pitch model bellows is dependent on the size, shape and location of initial surface notch.

1 . 서론

금속 벨로우즈는 스테인레스강재, 인코넬 합금강재 등으로 제조되는데 독특한 주름관 형태의 구조를 가지고 있으므로 높은 신축 특성을 가진다. 이와 같은 신축 특성 때문에 금속 벨로우즈는 연구용 원자로의 in-situ 조사 크립 캡슐(irradiation creep capsule)의 응력부과용 주름관[1] 및 액체금속로에서 열 응력 완화하기 위한 이음관[2] 등 원자력 관련 요소부품으로 다양하게 사용된다. 조사 크립 캡슐의 응력부과용 금속 벨로우즈는 중성자 조사 환경에서 탄성을 유지하고 높은 내부 압력을 견디어야 하므로 부품의 건전성을 확보하기 위해서는 벨로우즈의 거동[3~6]에 대한 이해가 필수적이다. 액체금속로에 사용되는 이음관용 금속 벨로우즈도 원자로 본체와 외부 관 사이의 높은 온도 편차를 완화해야 하므로

열 피로에 대한 이해가 선행되어야 한다. 또한 이들 원자력 관련 부품의 파단전 누설 분석은 장치의 안전성 관점에서 중요하다. 부품 재료의 피로균열진전 거동은 파단전 누설 개념에 따라 원자력 관련 부품 설계시 부품의 수명을 평가하는데 필수적인 자료이다. 본 연구에서는 스테인레스강재 금속 벨로우즈의 피로균열진전 특성을 파악하고자 CT 시편을 이용하여 피로 줄무늬 분석, 비치 마크(beach mark) 형성 시험을 수행하고 단일 피치 모델 벨로우즈(one pitch model bellows) 시편을 사용하여 피로균열진전 시험을 수행하였다.

2 . 시험방법

1) 시편

금속 벨로우즈의 피로균열 거동을 분석하기 위해서 그림 1과 같은 시편을 사용하였다. 금속 벨로우즈에서 하나의 피치에 해당하는 부분과 유사한 형태(one pitch model)를 가지는 시편으로 표면에 노치를 방전 가공 방법으로 형성시켰다. 표면 노치는 길이 4.5 ~ 13.5mm, 깊이 0.75 ~1 mm의 크기로 시편의 볼록한 부분의 중심부의 내외부 표면에 형성시켰다. 단일 피치 모델 벨로우즈 시편 재료는 316 스테인레스강 판재를 사용하여 제작되었다. 표준 시편으로 폭 25 mm인 CT(Compact Tension)시편을 사용한 피로균열 진전 시험을 병행하여 수행하였다.

2) 피로균열진전시험

피로균열진전시험은 앞서 언급한 바와 같은 벨로우즈 시편 및 CT시편을 사용하여 수행하였다. 벨로우즈 시편의 피로균열 진전시험은 피로 주파수는 0.1Hz ~ 1Hz에서 , 동일 시험에 대해서는 변위가 일정한 진폭을 가지도록 조절하면서 시편에 피로하중을 부과하였다. 변위 진폭은 -4.5 mm에서 +4.5 mm 사이에서 다양하게 변화시키면서 피로시험을 수행하였다. 벨로우즈의 균열 진전 길이는 피로시험 도중 비치 마크를 형성 시켜서 모니터링하였다. 비치 마크는 시험 도중 변위 진폭을 2/3로 변화시키고 일정 길이 만큼 성장하도록 조절하여 형성시켰다. 표준 시편에 대한 피로균열 진전 속도 데이터를 얻고 비치 마크 형성 거동을 파악하기 위해 폭 25mm인 CT 시편을 사용하여 피로균열진전 시험을 수행하였다.

3) 미세조직관찰

피로균열진전시험 후 파단면에 형성된 비치 마크는 입체 현미경을 사용하여 관찰하였다. 피로 줄무늬는 SEM을 이용하여 관찰하였다.

3. 시험결과 및 고찰

1) 피로균열에 의한 비치마크 형성 거동

벨로우즈 시편에 형성되는 비치 마크를 분석하기 위한 예비 시험으로서 CT시편을 이용하여 비치마크 형성거동 시험을 수행하였다. 시험 도중 피로균열 길이는 DCPD 방법을 사용하여 측정하였다. 피로 시험 조건은 1Hz, 하중비 0.2로 하였다. 비치마크가 형성되도록 하기 위해 처음에 일정한 하중 진폭으로 균열을 진전시키다가 하중을 2/3 정도로 줄인 후 일정시간 균열을 성장시켰다. 시험 결과를 그림 2에 보였는데 파면에 여러 개의 비치 마크가 형성된 것을 확인할 수 있다. 비치 마크를 형성시키기 위해 20번 피로 하중 진폭을 감소시켰으나 14개 정도의 비치마크가 관찰되고 몇 개는 입체 현미경 사진으로 관찰되지 않는다. 하중이 줄어들면 균열 진전 속도가 작아지고, 피로 싸이클에 수반하는 피로 줄무

늬의 간격이 작아져서 거시적으로 구분되는 파단면이 나타나고 이것이 비치 마크의 형태로 나타나는 것으로 보인다. 한편, 육안으로 판별할 수 있는 비치 마크를 형성하려면 측정 가능할 만큼 균열이 진전해야 하는 것으로 판단된다.

그림 3에는 DCPD방법과 비치 마크 형성 방법으로 구한 피로주기수에 대한 균열진전길이 변화 곡선을 보였다. DCPD방법으로 구한 균열진전길이가 비치마크를 통해 구한 균열길이와 비교적 잘 일치한다.

피로파면에 비치마크가 형성되어 거시적으로 분별할 수 있으려면 하중 진폭을 바꾼 조건에서 관측할 수 있는 만큼 균열이 성장해야한다. 그러나 비치 마크 영역이 너무 넓어지면 전체 시험 결과에 영향을 준다. 따라서 비치마크로 구분될 수 있을 만큼 최소한의 폭을 가지도록 하여야한다. 이러한 목적을 위해서는 비치마크에 의한 피로균열진전길이 측정방법을 DCPD방법과 병행하면 보다 효율적으로 피로시험 결과를 분석할 수 있는 것으로 판단된다.

2) 피로줄무늬 형성 거동

거시적으로 관찰되는 비치 마크는 피로 싸이클에 의해 피로 파면에 형성되는 피로줄무늬에 의해 형성된다. 하나의 피로 주기당 균열진전속도는 하나의 피로 줄무늬 간격에 해당하므로 피로줄무늬의 형성 거동을 측정하면 피로균열 진전속도를 간접적으로 측정할 수 있다. 이와 같은 점을 벨로우즈 피로균열진전 시험에 적용하고자 CT시편에 의해 피로줄무늬 형성 시험을 ΔK가 $20MPam^{1/2}$에서 $60MPam^{1/2}$ 범위에서 수행하였다. 그림 4에 ΔK가 $20MPam^{1/2}$ 및 ΔK가 $60MPam^{1/2}$에서 형성된 피로 줄무늬의 미세조직을 보였다. ΔK가 $20MPam^{1/2}$에서는 피로줄무늬의 간격이 0.3μm정도이고 ΔK가 $60MPam^{1/2}$에서는 피로줄무늬의 간격이 2μm정도 된다. 그러나 그림 4에 보인 바와 같은 피로줄무늬는 주로 응력이 높은 영역에서 뚜렷이 관찰되고 응력이 낮은 영역에서는 뚜렷하지 않고 간격도 일정하지 않다. 그림 5에는 ΔK에 따른 피로줄무늬간격 관계를 보였다. 이 관계는 거시적인 피로 균열 진전속도와 유사한 경향을 보이나 정확히 일치하지는 않는다. 피로 줄무늬 간격을 측정하면 피로균열진전속도를 간접적으로 유추할 수 있으므로 피로균열 진전 속도 분석의 보조적인 자료로 활용할 수 있는 것으로 보인다.

3) 벨로우즈 피로 균열 진전 거동

그림 1에 단일 피치 모델 벨로우즈 시편을 사용한 피로균열 진전 시험은 표면 노치의 크기가 상이한 두 시편에 대하여 수행하였다. 시험에 사용된 시편의 표면 노치는 폭 0.5mm, 깊이 0.75mm 이고 길이가 9mm, 13.5mm인 두 종류 시편을 사용하였다. 피로시험 주파수 0.1Hz로 하고 변위 진폭이 압축과 인장 방향으로 일정하게 4.5mm가 되도록 조절하면서 표면에 형성되는 균열의 길이를 일정 시간 간격으로 관측하였다. 그림 6에 시험 결과를 보였다. 그림은 피로 주기에 따른 노치 좌우로 진전되는 표면 균열 길이변화를 보였다. 초기 노치의 균열 길이가 13.5mm인 시편은 표면 균열의 길이가 30mm정도 성장하는데 약 18,000 싸이클 정도 소요되는데 비해 초기 노치의 길이가 9mm인 시편은 동일한 길이 성장하는데 40,000 싸이클 정도 소요된다. 초기 노치의 길이가 피로 수명에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

4) DCPD 적용성

단일 피치 벨로우즈 시편의 피로 균열 길이 측정에 DCPD 방법의 적용성을 검토하였다. 단일 피치 벨로우즈 시편의 초기 노치 정 중앙의 상단과 하단 3mm 위치에 전압 측정 선

을 연결하고 벨로우즈의 바닥 수평부에 정전류를 공급하면서 균열의 진전에 따른 전압 변화를 관측하였다. 시험 결과를 그림 7에 보였다. 표면 균열 길이 변화 곡선을 보면 비치 마크를 형성하기 위해 변위 진폭을 2/3로 줄인 10,000 싸이클에서 15,000 싸이클 영역은 균열의 진전이 거의 없는 수평한 영역이 된다. 이에 대응하는 DCPD 변화 곡선을 보면 이 영역이 역시 수평하여 전압 변화가 없다. 변위 진폭이 본래대로 커지면 표면 균열은 급격히 진전을 시작한다. 이에 대응하여 DCPD 전압값도 커진다. 전 피로 시험 과정중 이와 같은 관계가 일관되게 나타난다. 따라서 DCPD 전압 값을 단일 피치 벨로우즈 시편의 피로 균열길이로 보정한 관계식을 만들면 단일 피치 벨로우즈에 DCPD 방법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5) 균열 생성 및 진전거동

표면 균열은 반 타원형으로 볼 수 있고 균열에 작용하는 응력확대계수는 다음 식으로 표현된다.

$$K(\sigma_m,\ \sigma_b,\ \varphi) = (\sigma_m + h*\sigma_b)(\pi a/Q)^{1/2}*G$$

여기서 K는 응력확대계수, σ_m은 멤브레인 스트레스, σ_b는 벤딩 스트레스, ϕ는 타원의 매개각, a는 균열의 깊이이다. Q, h, G는 균열의 크기, 시편의 크기 및 균열선단에서 ϕ에 의존하는 함수이다. 벨로우즈 시편에 작용하는 멤브레인 스트레스와 밴딩 스트레스는 다음 식으로 표시된다.

$$\sigma_m = F/Bt, \qquad \sigma_b = 3HF/Bt^2$$

여기서 F, B, H 및 t는 각각 작용하는 힘, 시편의 폭, 봉우리의 높이 및 시편의 두께이다. 단일 피치 벨로우즈 시편에서 초기 균열은 앞의 방법에 의해 계산된 응력이 균열 선단에 작용하여 시편 봉우리의 표면에 형성되어 있는 노치의 양단에서 생성되고 시편의 좌우 양단 쪽으로 진전한다. 한편, 시편 봉우리의 안쪽 표면에서도 균열이 생성되어 진전하는데 이것은 내측에 걸리는 인장력에 기인한다. 균열이 최종적으로 진행된 뒤 형성되는 파단면은, 단일 피치 모델 시편의 봉우리의 바깥 표면 및 안쪽 표면에 생성된 균열이 각각 성장하여 시편 두께의 중간 부근에서 만나서 두 개의 피로 균열 파단 영역으로 구성되는 형태를 가진다.

4 . 결론

피로 시험 과정 중 균열 선단에 작용하는 피로 응력 크기를 변화시키면 beach mark가 형성되고 이와 같은 beach mark 형성 방법에 의해 벨로우즈 시편에 균열성장 거동을 분석하는 것이 가능하였다. 비치 마크 형성 방법과 DCPD 방법을 병용하면 단일 피치 벨로우즈의 피로균열 진전 시험을 효과적으로 분석하는 것이 가능한 것으로 판단된다. 그리고 피로 균열 진전 과정 중 형성되는 피로 줄무늬의 간격으로부터 균열 진전 속도를 간접적으로 유추하는 것이 가능하여 단일 피치 벨로우즈 피로 균열 진전 시험의 자료로 활용할 수 있다. 단일 피치 모델 벨로우즈 시편의 초기 균열의 형태, 크기 및 위치에 따라 피로균열 진전 거동이 변화되어 피로 파단면의 형태 및 벨로우즈의 수명이 좌우된다.

후기

본 연구는 과기처에서 시행한 원자력연구개발사업의 결과입니다.

참고문헌

[1] D. R. Harries, Irradiation Creep in Non-Fissile Metals and Alloys, J. of Nucl. Mater., 65, 1977, pp.157 -173.
[2] M. Takenaka, Surface Crack Propagation and Stability of Through-Wall Crack of Bellows, ASME/JSME PVP Conference, 1989.
[3] Standards of the Expansion Joint Manufactures Association, Inc., 1980.
[4] K. Tsukimori et al., Fatigue And Creep-Fatigue Life Prediction of Bellows, ASME/JSME PVP Conference, 1989.
[5] K. Tsukimori et al., Buckling of Bellows Subjected to Pressure Loadings, ASME/JSME PVP Conference, 1989.
[6] E. A. Merrick et al., Replacement Options for Damaged Bellows, ASME PVP-Vol. 83, 1984, pp. 85-133.
[7] K. Walker, The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum, ASTM STP462, American Society for Testing and Materials, 1970, pp.1-14.

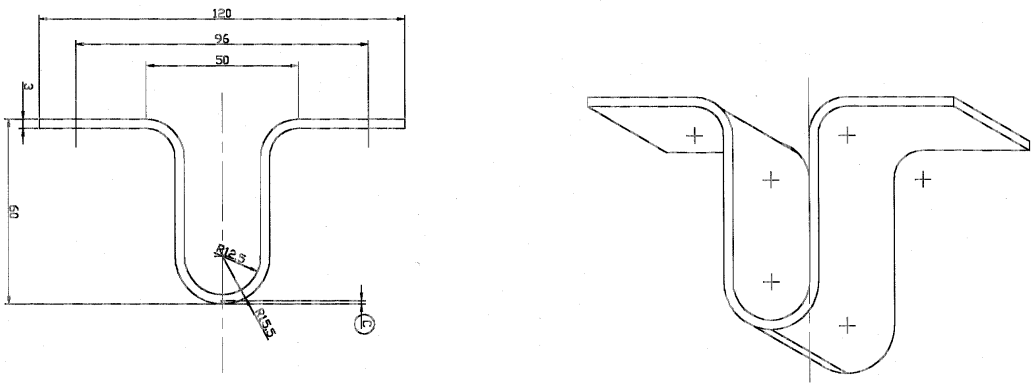

Fig. 1 One pitch model bellows specimen

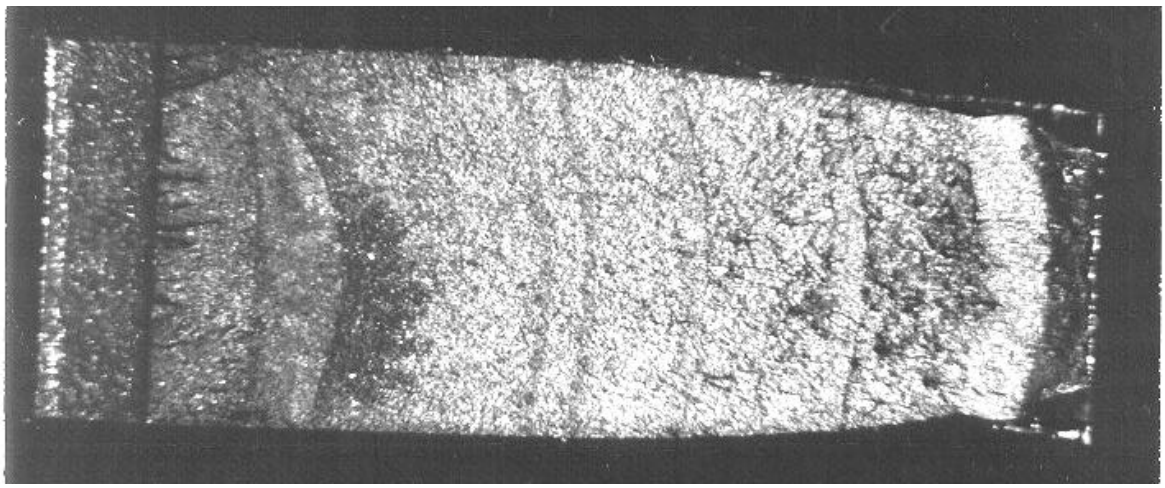

Fig. 2 Fatigue beach marks formed by the reduction of fatigue load amplitude

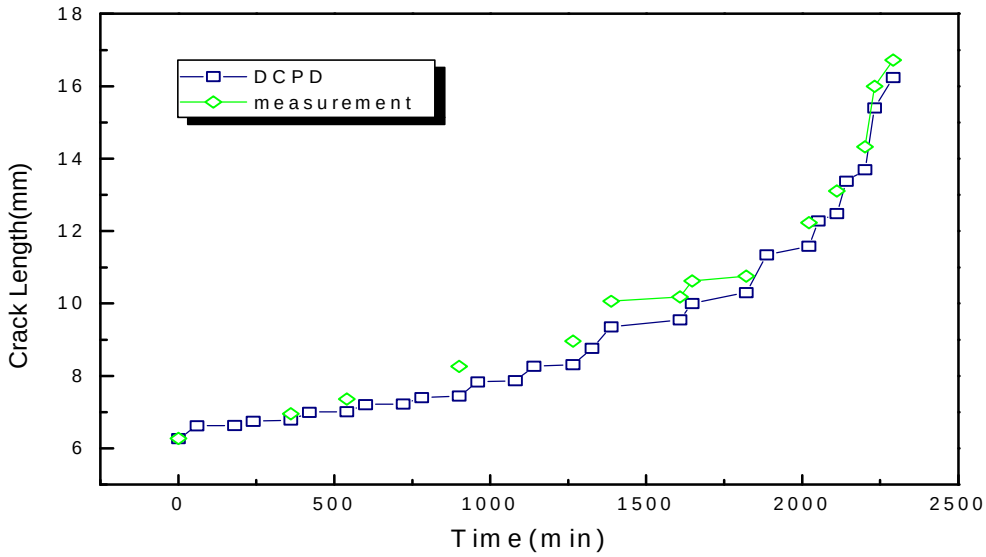

Fig. 3 Comparison of fatigue crack length measured by beach marks and DCPD method

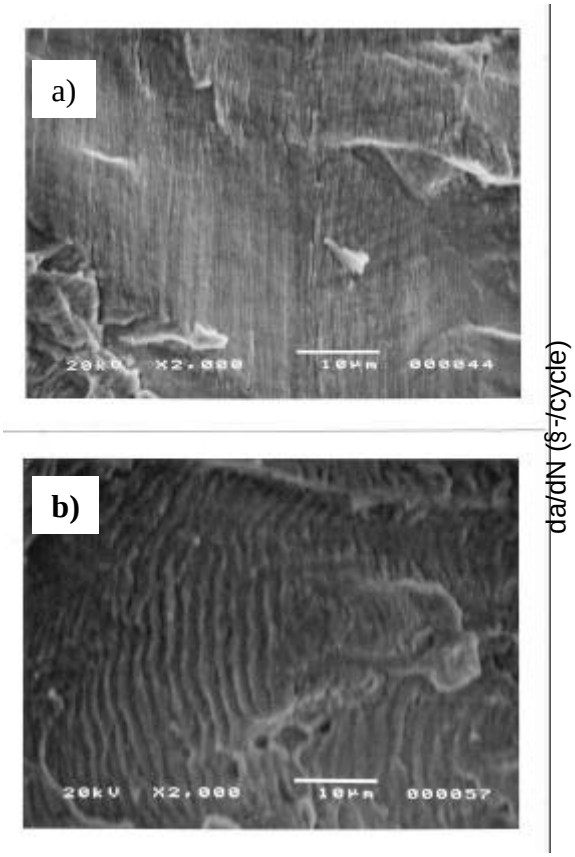

Fig. 4 Fatigue striation formed at different stress intensity. a) 20MPam$^{1/2}$, b) 60MPam$^{1/2}$

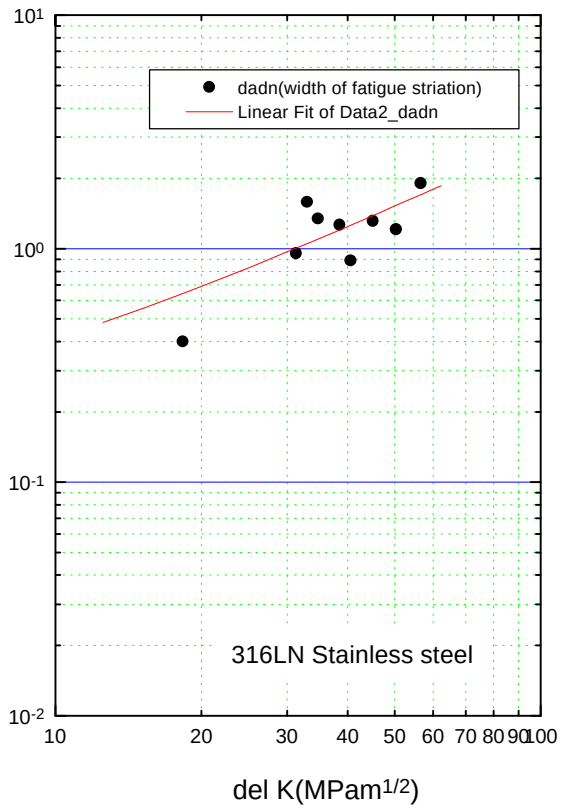

Fig. 5. Fatigue striation width as a function of del K

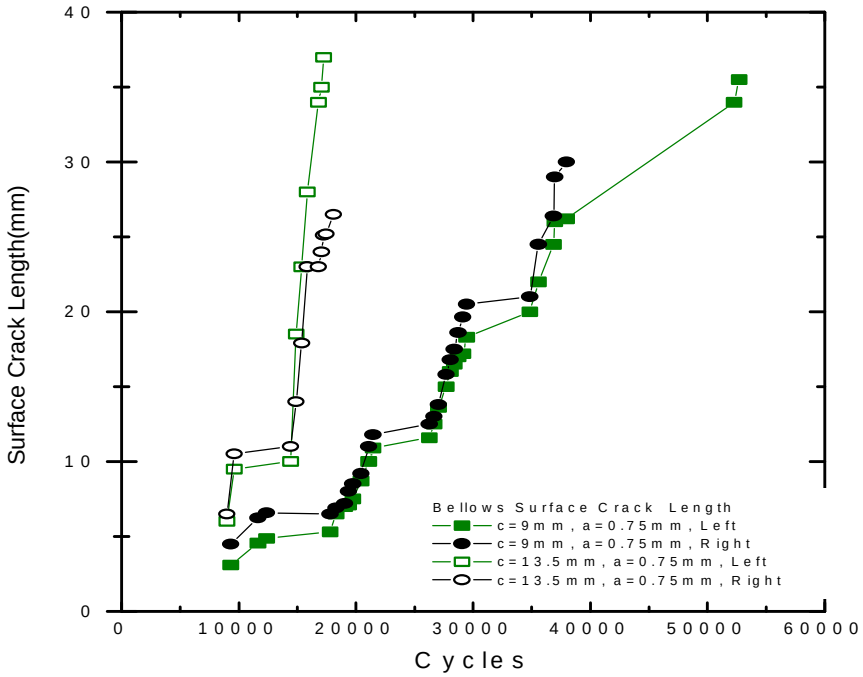

Fig. 6 Bellows surface crack growth as a function of cycles

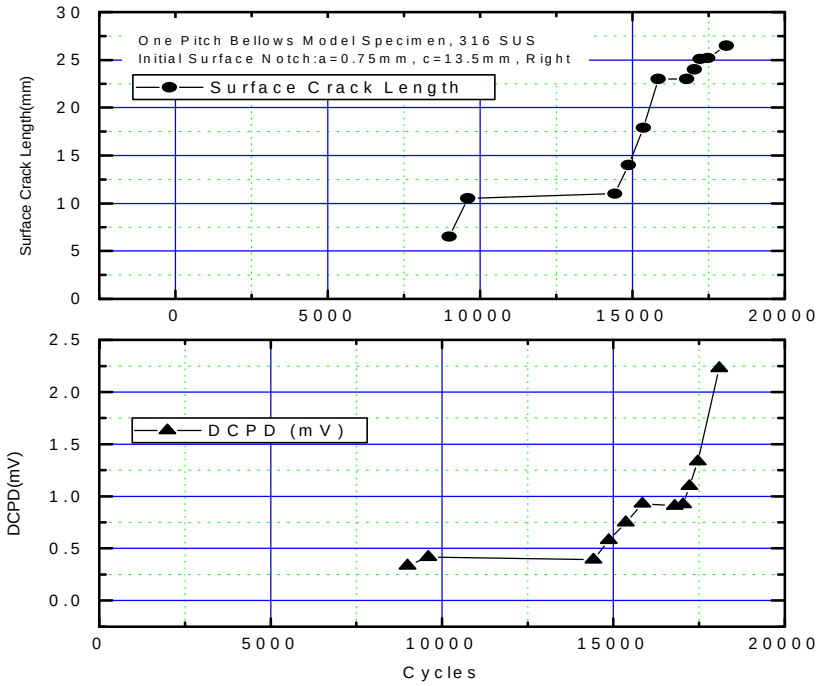

Fig. 7. Comparison of surface crack length and DCPD trend