

대형엔진 실린더 커버 스테드의 강도 평가

김병주[†] · 이재옥* · 박진수* · 김세락**

Strength Evaluation of the Cylinder Cover Stud for Low-Speed Marine Diesel Engine

Byung-Joo Kim, Jae-Ock Lee, Jinsoo Park and Se-Lak Kim

Key Words : Engine (엔진), Stud (스테드), Fatigue (피로), Notch factor (노치계수), Load factor (내외력비), Stress ratio (응력비), Stress concentration factor (응력집중계수)

Abstract

The cylinder cover stud for assembling the combustion chamber components of low-speed marine diesel engine is one of the main structural components in engine. To understand the structural behavior of the stud is quite important for safe and economic design of it. In this paper, the structural behavior and design adequacy of the stud have been evaluated through strain measurement and structural analysis for the world's two largest engine types. Moreover, a feasibility study for design modification was carried out based on fatigue test and calculation. The results showed that 1) the stud experiences very high stress ratio under normal operating conditions, 2) the fatigue strength of the stud is sufficient, and 3) results from strain measurement and structural analysis were quite close each other.

기호설명

E : 탄성계수 (GPa)
F_{0.2min} : 항복상태에 대한 볼트 하중
F_{Sm} : 평균 볼트 하중
HB : 경도
SCF : 응력집중계수
d : 볼트의 호칭경 (mm)
ε_f : 연신율 (%)
σ_{ASG} : 볼트의 피로강도 (열처리후 전조)
σ_{ASV} : 볼트의 피로강도 (전조후 열처리)
σ_f : 피로한도 (MPa)
σ_u : 인장강도 (MPa)
σ_y : 항복응력 (MPa)

1. 서 론

대형 상선의 주기관(main engine)으로 사용되는 디젤 엔진은 100 rpm 정도의 저속(low-speed)이면서 고효율, 고효율의 대형 구조물이다. 특히, 세계 최대 규모인 실린더 지름이 960~980 mm 인 엔진의 경우에는 출력이 최대 10 만 마력에 달하고 크기도 무게 2,500 톤, 길이 25 m 에 이른다. 이에 따라 각 부품의 크기도 대형인데 본 연구의 대상인 실린더 커버 스테드(이하 스테드)만 하더라도 무게가 최대 200 kg 이상인 대형의 구조 부품이다. 실린더 커버 스테드는 실린더 커버와 라이너를 엔진의 프레임에 고정하여 엔진의 연소실을 형성하게 하는 역할을 하고 있다. 스테드는 체결력과 실린더내의 폭발하중을 견딜 수 있어야 하며 손상이 발생하지 않도록 안전한 설계가 요구된다[1].

본 논문에서는 세계 최대 크기인 두 엔진에 대해 실린더 커버 스테드의 구조 거동 분석과 설계 개선에 대한 강도 평가를 실시하였다. 응력계측을 실시하여 스테드의 거동을 확인하였고, 구조해석으로 구한 값을 계측 결과와 비교하였다. 계산 결과는 원가절감을 위한 설계 변경의 중요한 자료로 활용되었다.

[†] 책임저자, 회원, 현대중공업 구조연구실
E-mail : bjkim5@hhi.co.kr
TEL : (052)202-4720 FAX : (052)250-9580

* 현대중공업 구조연구실

** 현대중공업 대형엔진설계부

2. 실린더 커버 스테드

검토대상이 된 엔진은 실린더의 직경이 각각 960, 980 mm 인 두 엔진 (A & B 엔진) 모델이다. 대형 디젤 엔진과 실린더 커버 스테드의 모습을 Fig. 1 에 나타내었다. 연소실의 폭발압력과 큰 열하중을 직접 받는 라이너와 실린더 커버에 비해 스테드는 열변형을 크게 받지 않는 반면, 스테드의 강도 부족은 대형 사고로 이어질 수 있으므로 상세한 강도평가를 실시하여 충분한 체결 강도와 피로에 대한 안전율을 가지도록 요구된다. 스테드의 한쪽 끝은 실린더 프레임에 가공된 탭홀에 고정되며 실린더당 8 개의 스테드가 체결된다. 스테드의 크기는 약 2,500×110 mm (길이×지름)이다.

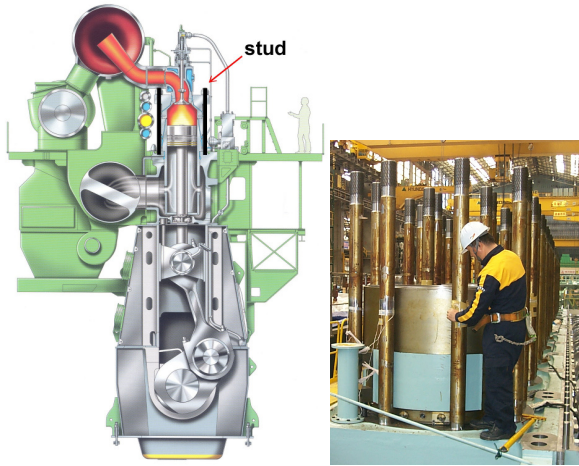


Fig. 1 Marine diesel engine and cylinder cover stud

스테드의 재질은 고강도강인 SNCM439 이며 재료의 기계적 특성치를 유사 재질인 SCM440 과 함께 Table 1 에 정리하였다. 스테드는 압연(rolling)으로 만들어진 원소재를 황삭과 열처리(Q/T), 정삭 및 전조를 거쳐 제작된다.

스테드 재료에서 시험편을 채취하여 인장시험 및 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 평활재 및 노치재에 대해 회전굽힘 시험을 실시하였다. 노치 시험편의 형상을 Fig. 2 에 나타내었고, 시험 결과는 Table 2~3 에 나타내었다. 시험결과를 보면 모든 특성치가 SNCM439 가 우수함을 알 수 있다.

Table 1 Required mechanical properties

	σ_y	σ_u	ϵ_f	HB
SNCM439	883	981	16	293~352
SCM440	834	981	12	285~352

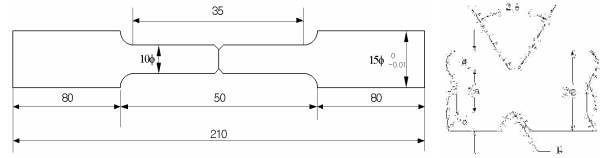


Fig. 2 Notched test specimen

Table 2 Tensile properties from test

	σ_y	σ_u	ϵ_f	E
SNCM439	991	1,071	32	207
SCM440	873	1,002	30	211

Table 3 Fatigue properties from test

	σ_f , smooth	σ_f , notched	
		SCF=2.9	SCF=3.9
SNCM439	486	209	178
SCM440	442	181	170

3. 응력계측과 강도평가

3.1 체결 상태 응력

응력계측은 엔진 조립과 시운전때 스트레인 게이지를 사용하여 정적 및 동적응력을 계측하였다. 스테드는 너트를 이용하여 유압으로 체결하는데 이로 인해 스테드에 비틀림에 의한 전단응력은 유발되지 않는다. 유압으로 스테드를 인장시킨후 너트를 고정하고 유압을 제거하여 체결과정이 끝나는데, 이때 유압을 제거한 너트 체결 상태에서는 주변부와의 응력 재배치(elastic recovery)로 인해 유압으로 발생시킨 체결력이 조금 감소하게 된다. 볼트당 설계 체결력은 약 400 톤이다.

계측결과 유압체결 상태에서 발생하는 계측점의 평균 축응력은 약 560 (A), 320 (B) MPa 이고, 너트 체결 상태에서 발생하는 평균 축응력은 다소 감소하였다. 볼트마다의 응력의 차이는 거의 없었으며, 굽힘응력도 2~3 % 수준으로 거의 발생하지 않았다.

유압이 제거되며 너트체결로 바뀔 때 체결력은 약 4~7 % 감소하는 것으로 나타났다. 평균 축응력은 수계산값과 3 % 정도 차이를 보였는데 이는 탄성계수 사용의 차이와 계측 및 체결의 오차로 여겨졌다. 체결응력은 최소 지름위치에서 항복응력 대비 40~70 % 정도이고, B 엔진의 경우에 상대적으로 작게 나타났는데 이는 O-ring 삽입과 관련한 것으로 판단된다. 나사산 부위 이외의 노치 위치들에서는 모두 항복응력을 초과하지 않는 것으로 나타났다. Fig. 3 에 유압 및 너트체결과정에서

계측된 변형률을 나타내었다. 전체 폭발하중에 대한 체결 안전율은 2.5~3.0 이었다.

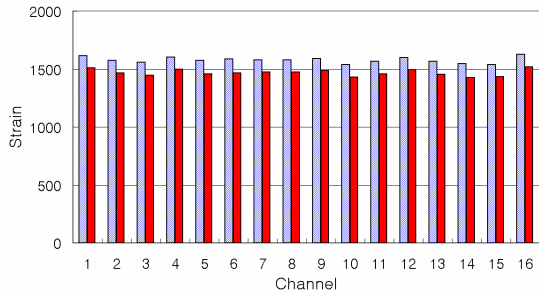


Fig. 3 Measured strains during tightening for B engine

3.2 운전 상태 응력

엔진의 시운전중에 계측한 운전상태 응력은 엔진의 부하를 증가시키며 계측하였다. 부하 조건은 정격 출력의 25~110 % 까지 단계적으로 증가시켰으며, 부하조건에 따라 엔진 회전수와 실린더내 연소압력이 변하게 된다. 동일 부하조건에서 시간 간격을 두고 2~3 회 계측을 실시하였다. 동일조건에서의 계측신호를 비교한 결과, 계측결과들간에 차이가 거의 없는 것으로 판단되었으므로 나중에 계측된 값을 사용하여 분석하였다.

엔진 운전중에 스테르드에 추가로 부여되는 동적 하중은 연소실내의 폭발압이 유일하다. 진동과 온도 변화에 의한 영향도 일부 포함되나 변동응력을 계측하는 목적에서는 계측되는 변형률값이 연소실내 폭발압의 변화에 모두 해당된다고 판단해도 좋다. 연소로 인한 폭발압이 규칙적으로 반복되므로 시간에 따른 응력의 변화를 최대값, 최소값, 변동 폭을 사용하여 정리하였다. Fig. 4 는 두 엔진에서 계측한 각각 3 지점의 100 % 부하(load)에서의 변형률 변화를 나타낸다. 규칙적인 신호를 볼 수 있으며, 다른 실린더에서 계측한 채널사이에서는 위상차가 나타남을 확인할 수 있다.

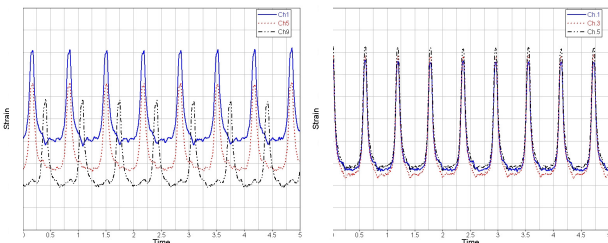


Fig. 4 Measured strain histories for two engines

Fig. 5 에는 변형률과 응력의 변동 진폭이 부하 별로 변하는 양상을 몇 개의 채널에 대해 정리하였다. 85~90 % 부하까지 변형률이 증가하고 그 이후에는 다소 감소하는 것을 볼 수 있다. 응력도

동일한 경향을 나타내는데, 그 크기가 작고 서로 다른 스테르드에서도 경향과 크기가 비슷하게 나타났다. 최대 변동응력의 크기는 10 MPa 정도 수준으로 크지 않았다.

연소실내의 폭발압에 의한 하중은 1,000 톤을 상회한다. 그런데, 스테르드의 변동응력이 대체로 작은 것은 외부하중이 전부 스테르드로 전달되지 않고 강성비에 따라 일부분만이 스테르드의 피로하중으로 작용하기 때문이다. 나머지는 체결에 의한 접촉압력을 이완시키는 것으로 기여하는데 이러한 메커니즘은 볼트 체결구조에 나타나는 고유한 특성이다. 전체 하중에서 스테르드로 전달되는 일부 하중의 비율을 나타내는 내외력비(load factor)는 볼트 설계에서 매우 중요한 개념이고, 본 경우에는 이 값이 15~20 % 수준이었다.

큰 체결력에 비해 변동응력이 작으므로 스테르드의 응력비(stress ratio)는 매우 크게 나타나는데, 응력비의 범위는 0.9 이상으로 나타났다.

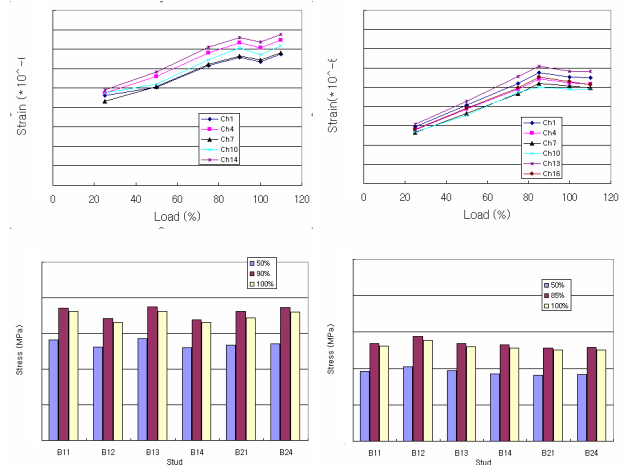


Fig. 5 Variations of strain and stress with load

볼트의 피로강도는 VDI2230[2]에서 제시하고 있는 식에 따라 구하였다. 볼트의 호칭지름 d 에 대해 피로강도는 제조과정에 따라 식 (1)과 같이 표현하는데, 고강도 재질인 가는 눈 나사의 경우 피로강도가 수식보다 최대 30 % 정도 감소할 수 있으므로 이를 반영하면 두 종류의 볼트에 대한 피로강도는 40 MPa 정도이다.

$$\sigma_{ASV} = 0.85(150/d + 45) \quad (1)$$

$$\sigma_{ASG} = (2 - F_{Sm} / F_{0.2min}) \cdot \sigma_{ASV}$$

또한, 볼트의 피로강도를 경험식을 사용하여 계산하였다[3~5]. 4 절의 구조해석에서 구한 스테르드의 응력집중계수를 사용하고 참고문헌으로부터 피로

노치계수(notch factor)를 구하였다. 볼트에 대해 구한 노치계수는 6.5~7.5 로 나타났고, 이로부터 볼트의 피로강도는 45~50 으로 계산되었다. 이 값은 식 (1)로 구한 값과 조금 차이를 보이나, 직접적인 비교에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 두 방법에서 사용한 파괴확률, 잔류응력과 평균응력의 효과 등이 다르기 때문이다.

운전상태에서 측정한 변동응력을 피로강도와 비교하면, 실린더 커버 스테드는 약 3.0의 안전율을 가지는 것으로 나타나 스테드는 충분한 안전율을 가지도록 설계되었음을 알 수 있다.

4. 구조해석

스테드의 응력집중 상태를 파악하기 위하여 2차원 축대칭 모델을 구성하여 구조해석을 수행하였다. 해석 모델은 스테드와 실린더 커버의 일부 및 너트를 포함하여 Fig. 6 과 같이 구성하였다. 체결상태 및 운전중 상태에 대해 응력집중계수를 쉽게 파악할 수 있게 해석조건을 설정하였다. 부품간의 접촉을 고려하였고 응력집중 현상을 잘 나타내기 위하여 관심부를 세밀히 모델링하였다.

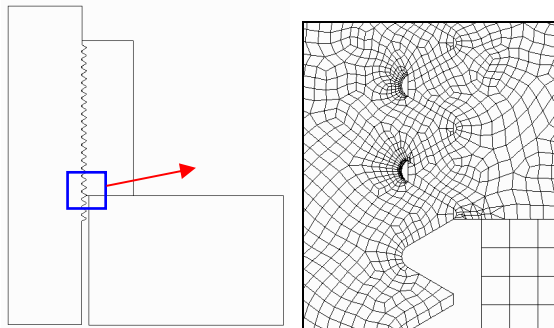


Fig. 6 Analysis model for SCF calculation

구조해석 결과 구한 응력의 분포를 Fig. 7 에 나타내었다. 스테드의 길이 방향으로 평균응력이 감소하고, 관심부(첫번째 접촉 나사산의 골 위치)의 응력집중이 극도로 심한 것을 알 수 있었다. 응력집중계수는 6~8 로 계산되었는데, 이 값은 참고문헌[5]의 결과보다 최소 20% 정도 작은 값이다. 관심부의 응력은 해석 모델의 구성, 요소의 크기, 마찰계수의 설정 등에 따라 많이 변하는데, 마찰계수가 크고 주변 구조의 변형이 작을수록 응력집중이 증가하였다. 따라서, 정확한 응력값의 계산을 위해서는 대표적인 치수나 조건에 대한 일반적인 계산이 아니라 해석 대상의 상태를 정확히 반영한 모델의 구성이 필수적임을 확인하였다.

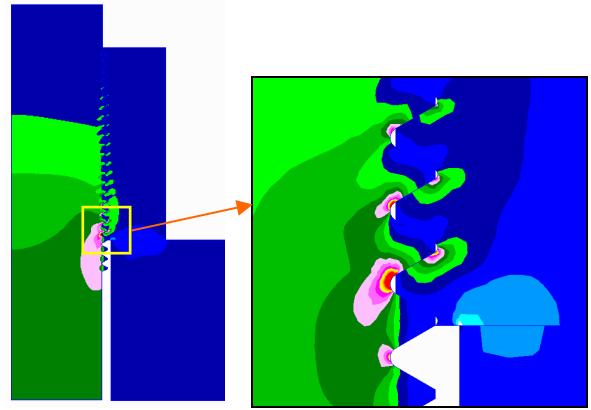


Fig. 7 Maximum principal stress distribution

엔진의 전체 체결구조내에서 스테드가 거동하는 특성을 파악하기 위하여 주변 구조의 모든 부품을 포함한 해석을 실시하였다. 실린더 커버, 너트와 함께 라이너(liner), 지지 링(supporting ring) 및 실린더 자켓(cylinder jacket)을 고려한 해석을 수행하였다. 해석모델은 평면내에서 구성되었으나 3차원적인 특성이 최대한 반영되도록 고려해주었다. 예를 들면 볼트는 평면 응력(plane stress) 요소를 사용하고, 냉각홀의 효과가 반영된 실제 라이너의 온도 분포를 구현하였다. 구조해석 모델을 스테드 주위를 확대한 그림과 함께 Fig. 8 에 나타내었다.

스테드의 체결, 온도 분포에 의한 열응력, 폭발하중에 의한 변동 응력 등 엔진의 작동상태를 고려하여 해석을 실시하였고, 각 하중이 작용하는 조건을 단계별로 해석하였다. 스테드가 초기 체결되고 너트로 고정되어 이후의 하중을 받는 거동을 모사하였다. 해석 결과 구한 체결때의 전체 응력 분포와 스테드에서의 폭발압에 의한 변동응력 분포를 Fig. 9 에 나타내었다. 스테드에서의 폭발압에 의한 변동응력과 내외력비, 응력비는 모두 측정결과와 잘 일치하였다.

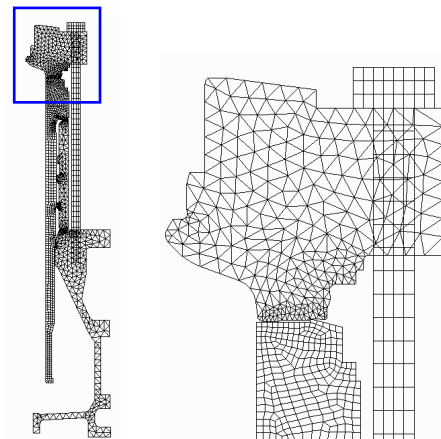


Fig. 8 Analysis model including all relevant components near the stud

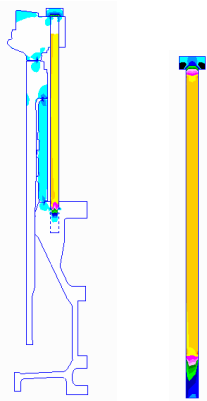


Fig. 9 Stress distributions at tightening and combustion load conditions

5. 설계 변경 검토

응력계측과 피로시험, 구조해석으로 파악한 스테드의 강도 및 거동 특성을 이용하여 설계변경을 모색하고 제조원가를 절감할 수 있는 방법을 검토하였다. 최근에 원자재 가격의 상승이 두드러지는데, 특히 고가의 니켈 때문에 스테인레스 강재의 가격도 함께 상승하고 있는 실정이다. 본 스테드도 니켈을 함유하므로 사용 재질의 변경 가능성을 검토하였으며, 또한 스테드의 크기 축소, 가공면의 축소 등을 함께 고려하였다.

스테드의 재료가 SNCM439 에서 SCM440 으로 바뀌는 경우를 검토하였다. 두 재료 모두 엔진의 부품용으로 많이 쓰이는 고강도 재질이다. VDI2230 에서는 볼트의 피로강도를 재료와 무관하고 크기에 따라서만 달라진다고 기준을 설정하고 있다. 단, 열처리후 전조 가공한 볼트의 경우에는 압축 평균응력의 효과가 있다고 보며, 재료의 항복응력이 피로강도에 영향을 조금 미친다고 보고 있다. 참고문헌 [3]의 피로 노치계수를 사용하는 방법에서는 재료 강도의 변화 효과가 노치계수와 평활재의 피로강도에 모두 영향을 미쳐 결국 다소간의 인장 특성치 변화는 피로강도에 영향을 미치지 않는 것으로 평가된다. 이러한 사실과 Table 3 의 피로시험 결과를 참고하면 재료 변경이 스테드의 피로강도에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예측할 수 있다. SCM440 으로 재료가 변경될 경우 정적강도와 피로강도는 10 % 내외의 안전율 감소를 나타내었는데, 현재의 안전계수 크기를 고려하면 재료 변경후에도 스테드의 강도는 충분할 것으로 판단되었다.

스테드의 나사부 크기를 다소 작게 하고 스템(stem)부의 치수도 함께 축소하는 방안과, 현재 가

공면인 스템부를 비가공 처리하는 설계 변경안의 영향도 평가하였다. 비가공일 경우의 노치효과가 나사산의 노치보다 영향이 작으므로 스템부의 비가공 처리는 스테드 전체의 피로강도에 변화를 주지 않는 것으로 평가되었다. 또한 스테드의 크기 축소는 체결응력의 증가로 인한 스테드의 피로강도 변화, 내외력비의 변화와 나사부의 변동응력 변화를 유발하는데 결과적으로 피로 안전율을 10 % 정도 감소시키는 효과가 있는 것으로 추정되었다. 결국, 모든 설계 변경안을 적용하는 경우에도 스테드의 피로강도 감소는 감내할만한 수준인 것으로 여겨졌으며, 이러한 설계 변경안을 적용하면 재료비를 절반으로 줄일 수 있고 전체 원가도 상당히 절감할 수 있는 것으로 평가되었다.

6. 결론

구조부재의 일차적인 목적은 안전이고, 이를 바탕으로 과도하지 않은 수준의 안전 여유를 가지는 설계 최적화가 이루어져야 한다. 실린더 커버 스테드의 구조 거동 분석과, 이를 이용한 설계변경을 목적으로 실시된 응력계측과 구조해석 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 스테드는 매우 높은 응력비 상태에서 외력을 받고 있으나 변동응력이 작은 수준이어서 충분한 피로 안전율을 가지는 것으로 나타났다.
- (2) 스테드와 주변 부품을 모두 포함한 구조해석 결과 응력계측과 매우 유사한 결과를 얻었다. 그러나, 응력집중계수를 구하기 위한 소형 상세 모델을 사용한 해석에서는 해석조건의 작은 변화가 결과에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타나, 해석 모델이 실제 조건을 잘 반영하도록 하는 것이 매우 중요함을 알 수 있었다.
- (3) 원가절감을 목적으로 실시한 설계변경 가능성의 검토 결과, 3 가지 개선방안의 적용에 무리가 없으며 개선효과는 클 것으로 예측되었다.

참고문헌

- (1) Kim, B.J., Lee, J.O., Park, J. and Kim, S.L., 2006, "Structural Behavior of the Cylinder Cover Stud of Marine Diesel Engine," *Procs. of KOSME*, pp. 267-268.
- (2) VDI, 2003, *Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints. Joints with One Cylindrical Bolt*, VDI2230, VDI Guidelines.

- (3) Son, S.Y., Shin, G.H. and Kim, Y.J., 1995, *Bolts and Nuts Technology*, Munundang.
- (4) Dowling, N.E., 1997, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall.
- (5) ASM, 1996, *Fatigue and Fracture*, Vol. 19, ASM International.