

## 승용차 차체에 대한 점용접부 피로수명의 해석

주석재 · 주영우  
기계자동차공학부

### <요약>

Belgian Road 주행시험에 대한 승용차 차체 점용접이음의 피로수명을 예측하였다. 본 논문에서는 점용접이음을 한 개의 강체 요소로 표현하여 문제의 크기를 상당히 많이 줄였다. 대표면 너깃 가장자리에서 스트레인 이력은 강체요소를 통하여 전달되는 힘과 모멘트로 추정하였다. Rainflow Counting 방법을 불규칙 스트레인 이력에 적용하고 표준 점용접 시편에 대한 피로시험 결과를 사용하여 피로수명을 예측하였다.

## Analysis of Fatigue Life of Spot-Welded Joints in Passenger Car Body

Seok-Jae Chu · Young-Woo Chu  
Dept. of Mechanical Engineering

### <Abstract>

The fatigue life of spot-welded joints in passenger car body is predicted for Belgian Road test. In this paper, the spot-welded joint is modelled as a single rigid link to reduce drastically the size of the problem. The strain history at the nugget edge on the inner surface is estimated from the transmitted forces and moments through the rigid link. The rainflow counting method is applied for the irregular strain history. Using the fatigue test data for the standard spot-welded specimen, the fatigue life can be predicted by Miner's rule.

## 1. 서 론

승용차 1 대의 차체를 조립할 때 수천 개의 점용접이음이 사용된다. 승용차 주행 중 노면의 요철 때문에 발생한 불규칙 변동하중은 점용접이음에 전달되어 피로파괴를 초래한다.

점용접이음의 피로수명은 승용차의 주행거리로 200,000~300,000 km가 요구된다. 완성차 차체의 내구시험은 시험기간을 단축하기 위하여 Belgian Road라고 부르는 일반도로보다 요철이 심하게 만든 도로에서 실시한다. 일반 도로 200,000~300,000 km 주행 조건은 Belgian Road 2,000 km 주행 조건에 해당한다.

점용접이음의 피로파괴가 흔히 발생하는 부위는 wheel의 지지하중이 직접 전달되는 shock absorber housing panel(그림 1, 그림 2 참고)이나 차체가 뒤틀릴 때 취약한 radiator support panel이다. 요구수명에 미달된 점용접이음에 대하여 피로수명을 정량적으로 파악하는 체계적인 방법이 필요하다.

점용접부에서 피로균열은 내표면(2 장의 강판이 닿은 표면) 점용접 nugget 가장자리에서 발생한다. 접합된 부분과 접합되지 않은 부분의 경계인 이 부위는 파괴역학 관점에서는 날카로운 균열선단에 해당하므로 피로수명 평가는 주로 nugget 가장자리를 균열선단으로 취급하여 시도되었다. 한편 점용접이음의 피로수명은 내표면 점용접 nugget 가장자리 스트레인(주로 굽힘과 관련된 것임.)에 관하여 잘 정리된다(1). 본 저자는 점용접 시편의 피로시험과 유한요소해석을 통하여 점용접이음의 피로수명이 nugget 가장자리 스트레인에 관하여 잘 정리되는 것을 확인하였다(2).

그림 3(a)와 같이 점용접 nugget을 수십 개의 rigid link를 사용하여 표현하는 것은 소요 요소와 절점이 너무 많아져 비효율적이다. 이것보다는 점용접이음을 그림 3(b)와 같이 점용접 nugget의 중심 절점과 상대 nugget 중심 절점만 1 개의 rigid link를 사용하여 표현하는 방법이 실용적이다. 본 저자는 여러가지 점용접 시편에 대하여 그림 3(a)와 같은 방법으로 피로수명을 결정하는 내표면 너깃 가장자리 스트레인  $\epsilon_{in}$ 을 구하고 또 동시에 그림 3(b)와 같은 방법으로 rigid link를 통해 전달되는 인장력  $F_1$ , 전단력  $F_2$ , 굽힘 모멘트  $M_3$ 을 구하여 서로 다음과 같이 연관시켰다(3).(그림 4 참고)

$$\epsilon_{in} = 78.2340 \times 10^{-6} F_1 / t^2 + 3.92364 \times 10^{-6} F_2 / t + 18.8327 \times 10^{-6} M_3 / t^2 \quad (1)$$

여기서  $t$ 는 강판의 두께이다.

본 논문에서는 점용접이음을 1 개의 rigid link로 표현하는 방법을 사용하여, Belgian Road에서 주행 중인 차체 점용접이음의 피로수명을 평가하여 보았다. 여기서 차체에 전달되는 변동하중은 rainflow counting method를 사용하여 처리하였다.

## 2. 유한요소해석

그림 1은 점용접이음 피로파괴가 잘 발생하는 전륜 shock absorber housing panel assembly를 위에서 본 것이다. 승용차의 무게는 shock absorber cover에 실리고 이것은 shock absorber, coil spring을 통하여 wheel이 지지한다. 그림 2는 shock absorber housing panel assembly에 대한 유한요소모델이다. 5 개의 부품이 점용접된 것이고 모델링 영역을 넘어 절단한 부위는 완전히 고정된 것으로 처리하였다.

shock absorber cover에 전달되는 하중을 측정하여 사용하는 것이 정확하지만 이 부위에 load cell을 넣기 어려워 wheel center에서 측정한 하중을 대신 사용하였다. 하중은 wheel center에서 측정한 하중이 shock absorber cover에 전부 전달된다고 가정하였다.

그림 5에 wheel center에서 측정한 하중 성분 중 가장 중요한 z방향(지면에 수직방향) 성분  $F_z$ 만 그려보았다. 횡축은 시간(단위 sec)을 가리키며 Belgian Road 왕복주행(1.6 km) 소요시간 200초에 해당한다. 종축은 하중을 가리키며 평균하중(산술평균)은 281.7 kgf로 승용차 4 바퀴에 나눠진 정적하중이다. 소형승용차의 무게가 1,000 kgf 이내인 것을 참고하면 후륜보다 전륜에 하중이 약간 집중된 것으로 나타났다.

수평면과 약간 어긋난 shock absorber cover 윗면의 수직방향은 (0.0577, -0.0808, 0.9951)으로 shock absorber cover 윗면의 수직방향으로 작용하는 하중 100 kgf의 성분은 (5.77, -8.08, 99.51)이다. x, y, z 각각의 하중 성분의 영향을 구하기 위하여 하중 100 kgf의 성분을 각각 작용하여 점용접점이 전달하는 인장력  $F_1$ , 전단력  $F_2$ , 굽힘 모멘트  $M_3$ 를 구하였다.  $\varepsilon_{in}$ 이 가장 높아 파단이 처음 발생하는 것으로 예측된 점용접점(그림 2에 ○로 표시)에 대한 결과는 다음 Table 1과 같다.

Load (kgf)	$F_1$ (kgf)	$F_2$ (kgf)	$M_3$ (kgf)
(5.77, 0.00, 0.00)	0.0523	0.1455	0.0987
(0.00, -8.08, 0.00)	0.0353	0.1862	0.0958
(0.00, 0.00, 99.51)	1.8520	16.290	3.216

Table 1 점용접점이 전달하는 인장력  $F_1$ , 전단력  $F_2$ , 굽힘 모멘트  $M_3$  (점용접점 #26)

Table 1를 이용하여 wheel center에서 측정한 하중성분  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 의 영향을 각각 구하여 모두 더하면 어느 특정 점용접점이 전달하는 인장력  $F_1$ , 전단력  $F_2$ , 굽힘 모멘트  $M_3$ 를 얻는다. 그리고, 식(1)을 이용하여 인장력  $F_1$ , 전단력  $F_2$ , 굽힘모멘트  $M_3$ 를 점용접점 내표면 너깃 가장자리 스트레인  $\varepsilon_{in}$ 을 구한다.

### 3. Rainflow Counting Method

그림 6의 데이터는 꼭대기(peak)와 골짜기(valley) 이외에도 이것 사이에 데이터가 많이 포함된 것이다. 피로현상에 유효한 사건(event)를 세는 rainflow counting method는 꼭대기와 골짜기 데이터만을 사용하므로 필요 없는 데이터는 지우는 것이 필요하다.

그림 7과 같은 과정을 거치는 rainflow counting method로 평균 스트레인  $\varepsilon_m$ , 스트레인 진폭  $\varepsilon_a$ 을 구하였다. 꺾어진 굵은 직선이 1 개의 event이다. 각각의 event에 대하여 range는 최대와 최소 차이이고 mean은 최대와 최소의 평균이다. event로 등록한 뒤 이와 관계된 하중 변동의 꼭대기와 골짜기를 지우는 과정을 되풀이한다. 그림 7 예제에서는 모두 4 개의 event가 발생하였다.

점용접 피로시험의 결과(S-N 곡선)는 점용접 피로시험편에 편진 반복하중을 작용한 것 이므로 이것을 이용하려면 그림 8과 같이 일반적인 하중 변동 상태는 편진 반복하중 상태 ( $R=0$ )로 환산하여 주어야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 환산식을 사용하였다(5). 그림 9가 환산한 결과이다. event는 3,292개,  $\varepsilon_{equiv}$ 의 평균은  $0.896 \times 10^{-3}$ 이었다.

$$\varepsilon_{equiv} = \varepsilon_{max} (1 - R)^{\lambda} \quad (2)$$

$$\text{여기서 } \varepsilon_{max} = \varepsilon_m + \varepsilon_a, \varepsilon_{min} = \varepsilon_m - \varepsilon_a, R = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{max}, \lambda = 0.5$$

그림 10에 SPCC, SPRC에 대한 인장전단(TS) 피로시험의 결과와 일본 보고서에 실린 피로시험의 결과를 비교하여 보았다. 차체 점용접 피로와 같은 고수명 피로 영역에서는 서로 크게 어긋나지 않았다. 그림 11(a)는 SPRC에 대한 결과 중 불량 데이터를 제거한 것이고 그림 11(b)는 피로수명 계산에 편리하도록 x축과 y축을 서로 바꾼 것이다.

손상계수 D의 계산은 다음과 같이 하였다.  $i$  번째 event에 대하여 편진( $R=0$ )에 대한 상당 스트레인  $\varepsilon_{equiv}$  (그림 9)을 SPRC에 대한 스트레인 진폭( $2a$ )과 피로수명의 관계 (그림 11)에 대입하여 피로수명  $N_i$ 를 구하고  $i$  번째 event에 대한 손상계수는  $D_i = 1/N_i$ 로 구한다. 각각의 event에 대한 손상계수를 누적하여 누적손상계수  $D = \sum_i D_i$ 가 1에 도달하면 피로파괴가 발생한 것으로 보았다.

그림 12가 Belgian Road 1회 왕복에 대하여 손상계수를 누적한 것이다. 1회 왕복 후 손상계수는 0.000755에 도달하였다. 이것은 1,324 회( $\approx 1/0.000755$ ) 왕복하여야 피로파괴가 발생하는 것을 가리킨다. Belgian Road 1 회 왕복 거리가 1.6 km이므로 2,118 km를 달려야 피로파괴가 발생할 것으로 예측되었다.

## 4. 결 론

점용접이음을 1 개의 rigid link로 표현하는 방법과 차체에 전달되는 변동하중을 처리하는 rainflow counting method를 사용하여 Belgian Road에서 주행 중인 차체 점용접이음의 피로수명을 예측하였다.

1. 점용접이음을 1개의 rigid link로 표현하면 nugget 부근에 거친 유한요소망을 사용하여 소요 절점과 요소의 갯수가 준다. 이 방법은 형상이 복잡하여 형상 자체의 표현에 이미 많은 절점과 요소가 소요되는 문제에 적합하였다.
2. rainflow counting method를 사용하여 Belgian Road 주행 중 점용접이음에 전달되는 변동하중에 대한 nugget 가장자리 스트레인 이력을 처리하였다. 여기서 얻은 많은 event(피로손상을 발생시키는 사건으로 각각 range와 mean으로 대표됨.)는 편진 피로시험의 결과인 S-N 곡선을 이용하기 위하여 편진에 상응하는 것으로 환산하는 것이 필요하였다.
3. 최초의 점용접 피로파괴는 Belgian Road 1,324 회 왕복주행(2,123 km) 뒤 나타나는 것으로 예측되었다. 같은 차종의 Belgian Road 내구시험 결과가 없어 정확히 비교하지는 못하였지만 여기서 예측한 점용접이음의 피로수명은 일반적인 Belgian Road 내구시험 결과와 비슷하였다.

### [참고문헌]

- [1] (社)自動車技術會, “自動車車体スポット溶接構造の 疲労強度と壽命推定,” 1986.
- [2] 주영우 외 5인, 점용접 시편의 피로 수명 해석, 한국자동차공학회 논문집 (책), 1999.
- [3] 주석재 외 5인, 점용접점을 통하여 전달되는 힘과 모멘트를 이용한 점용접 시편의 피로수명 예측, 한국자동차공학회, 구조강도부문 학술강연논문집, pp.41-47, 1999.
- [4] J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 1990.
- [5] ASM Handbook, Vol. 19, Fatigue and Fracture, p.251.

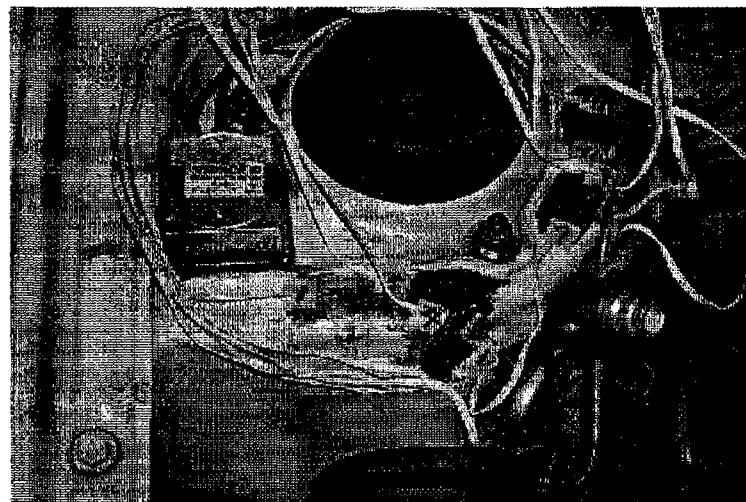


그림 1 전륜 서스펜션 마운팅부

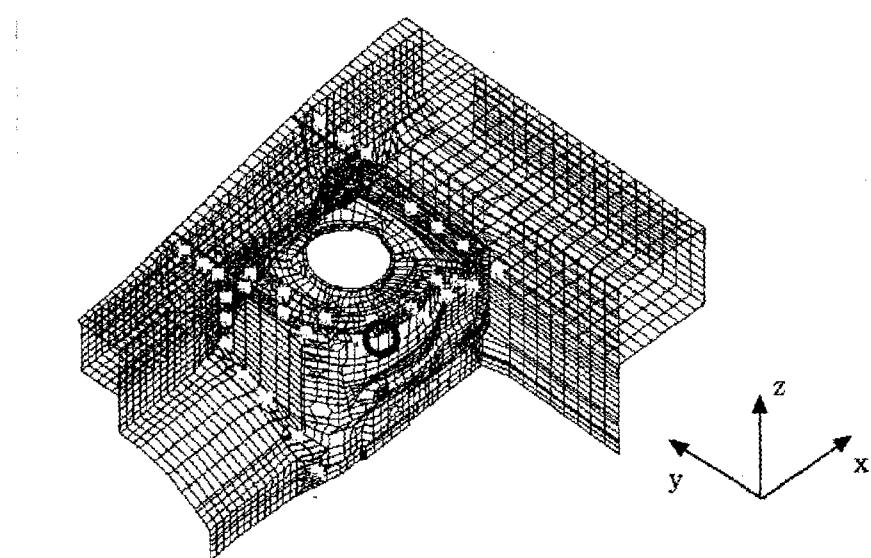


그림 2 전륜 서스펜션 마운팅부의 유한요소모델

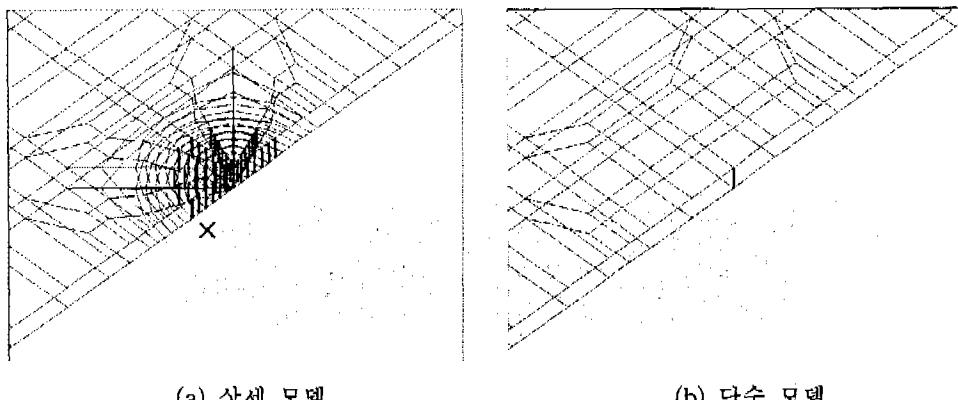
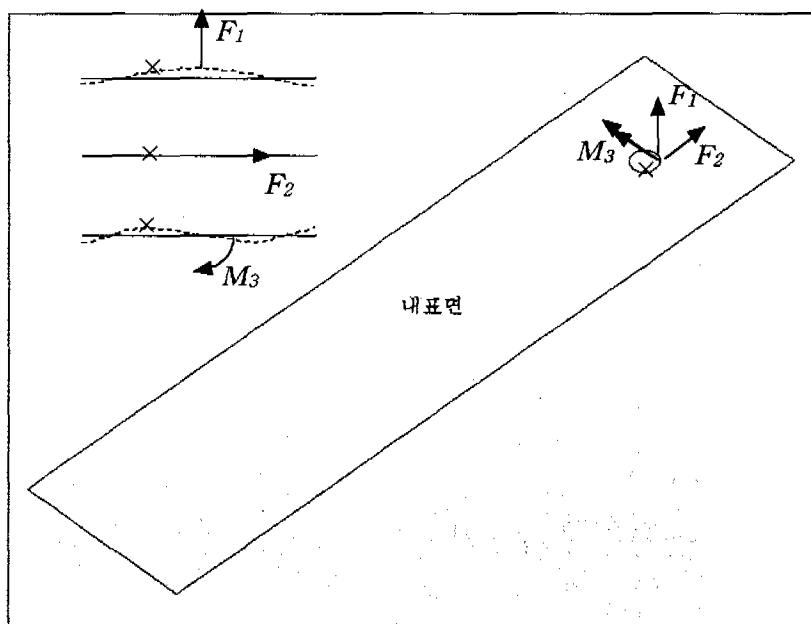


그림 3 점용접부의 유한요소모델

그림 4 인장력  $F_1$ , 전단력  $F_2$ , 굽힘 모멘트  $M_3$ 에 대한 너깃 가장자리의 변형

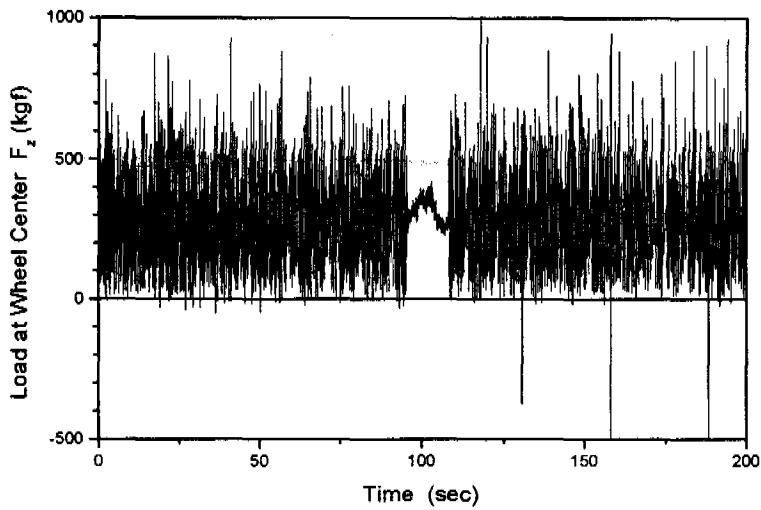


그림 5 Wheel Center에서 측정한 수직방향 하중 성분

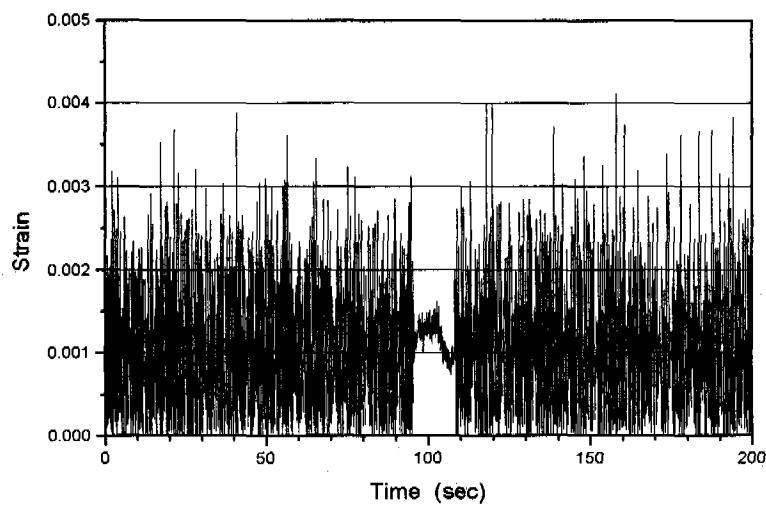
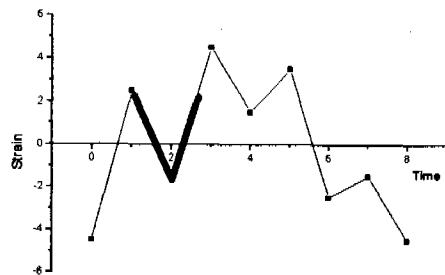
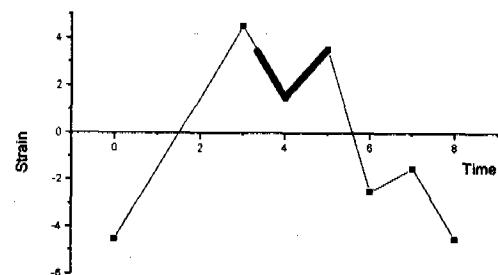


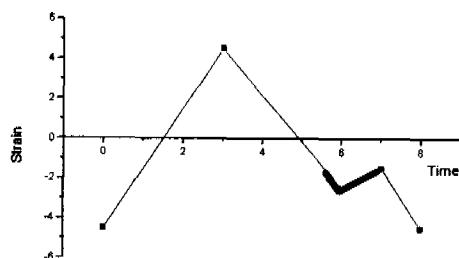
그림 6 접용점점(#26) 내표면 너깃 가장자리에 발생하는 스트레인의 변동



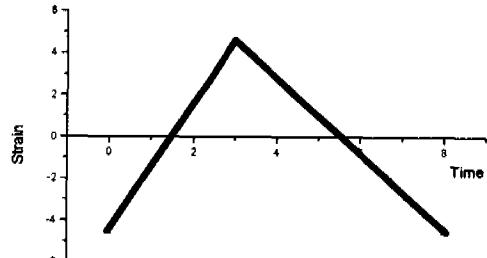
(a) Event 1 : Range = 4.0, Mean=0.5



(b) Event 2 : Range = 2.0, Mean=2.5



(c) Event 3 : Range = 1.0, Mean=-2.0



(d) Event 4 : Range = 9.0, Mean=0.0

그림 7 Rainflow Counting Method<sup>(4)</sup>

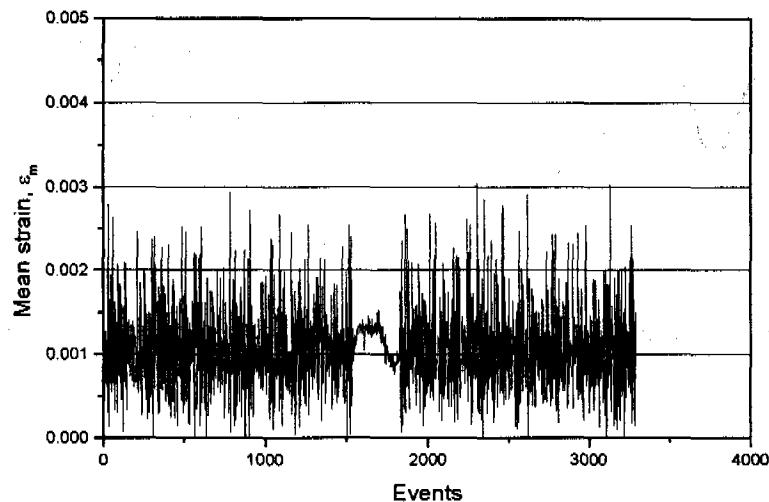
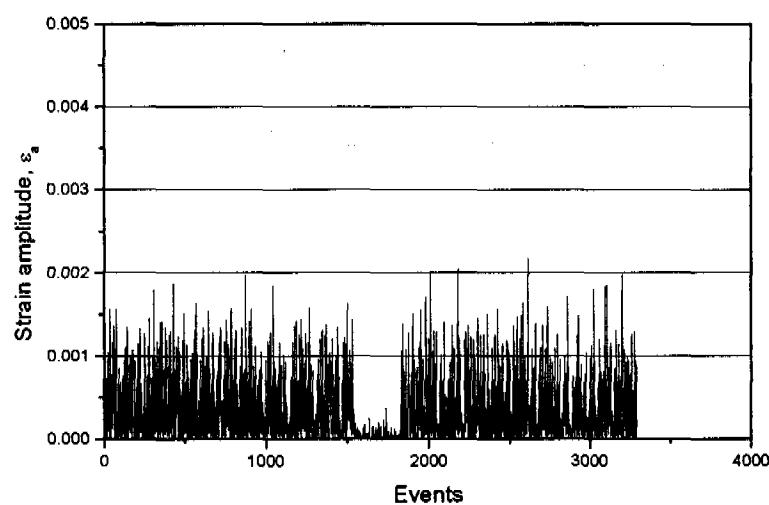
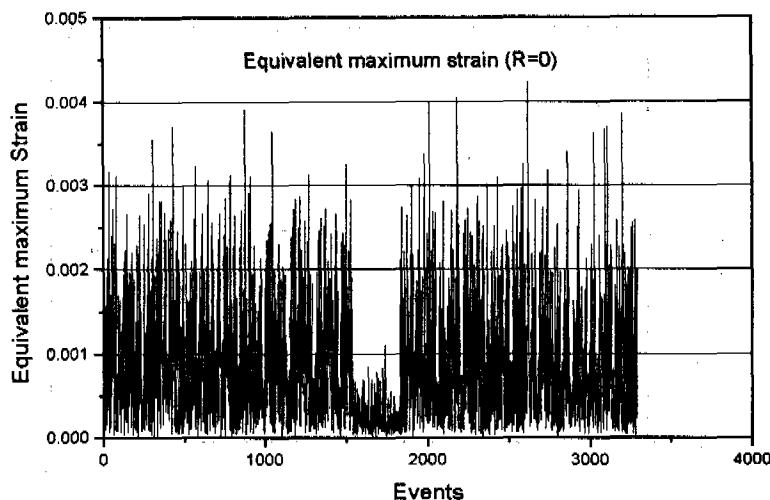
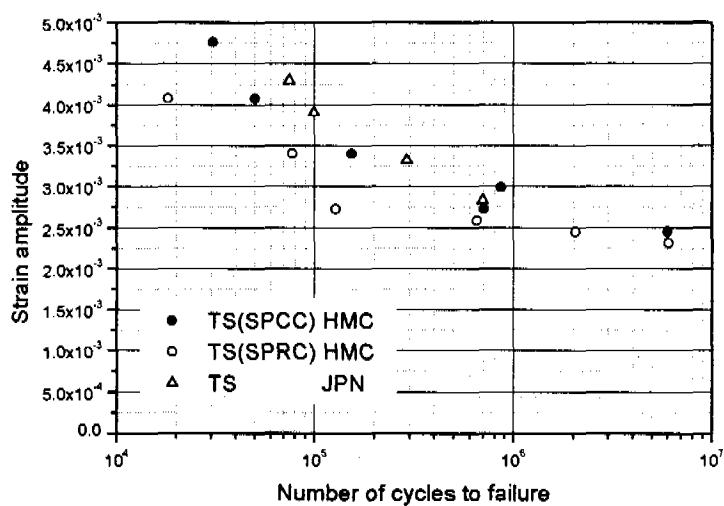
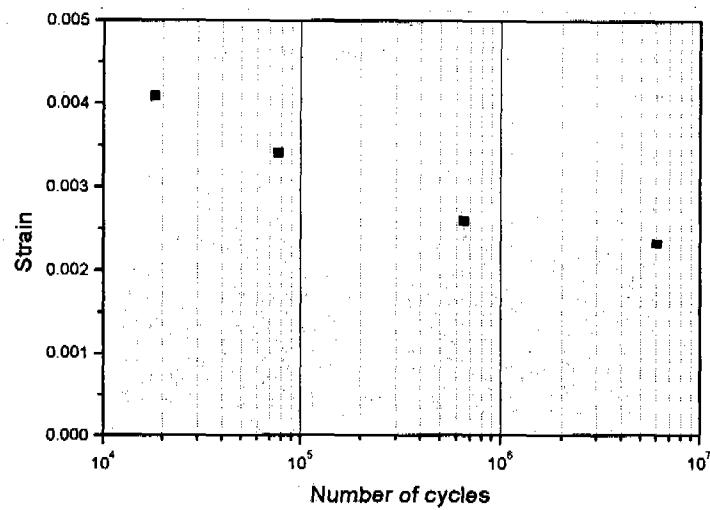
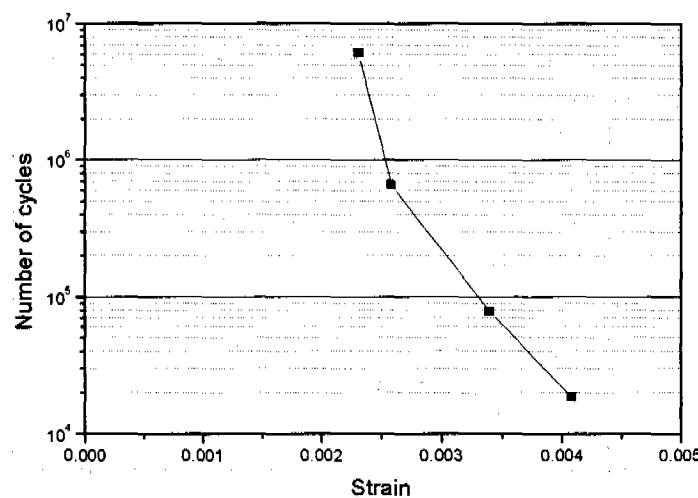
(a) 평균 스트레인  $\varepsilon_m$ 의 변동(b) 스트레인 진폭  $\varepsilon_a$ 의 변동

그림 8 Rainflow Counting의 결과

그림 9 편진( $R=0$ )에 대한 상당 스트레인  $\varepsilon_{equiv}$ 그림 10 편진( $R=0$ ) 피로시험에 대한 스트레인 진폭( $2a$ )과  
피로수명의 관계



(a) 피로수명에 대한 스트레인 진폭(2a) (SPRC, 불량 데이터 제거)



(b) 스트레인 진폭(2a)에 대한 피로수명 (SPRC, 불량 데이터 제거)

그림 11 SPRC에 대한 스트레인 진폭(2a)과 피로수명의 관계

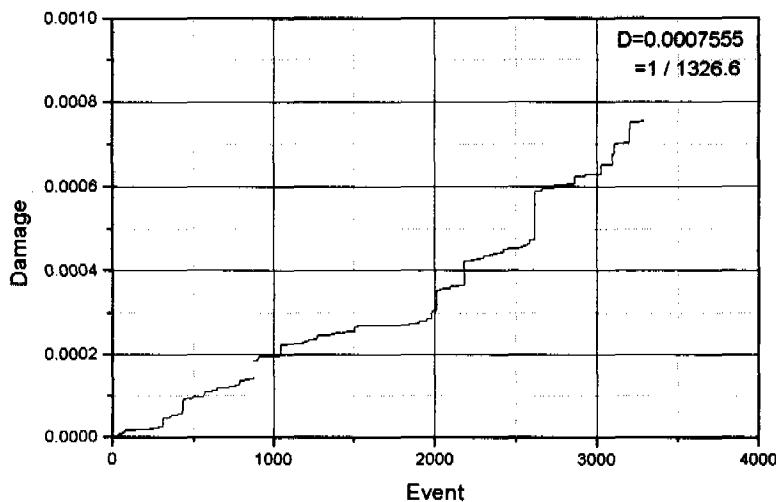


그림 12 Belgian Road 1회 왕복에 대한 누적손상계수