

## 자동차공업에서의 피로 · 파괴예방

### Fracture Prevention in Vehicle Industry

이       역       섭\*  
O.   S.   Lee

#### 1. 머리말

지상차량의 유효수명에 영향을 주는 인자로는 피로, 부식, 마모등을 들 수 있으며, 이중 피로현상에 대한 대책을 가장 중요시 하는 경우가 많다. 피로를 방지하기 위해서는 하중 스펙트럼에 대한 정보가 필요하다. 또한 재료의 피로에 대한 반응, 설계응력이 피로에 미치는 영향, 제조공정, 부식과정, 마손(fret) 과정등에 대한 지식들도 필요하며 경량차에 대한 설계요구에 대응하기 위하여서도 피로설계의 과정이 현대화되어야 한다는 인식들을 하고 있다. 이러한 요구들을 충족시키기 위해서는 이제 더 이상 만족스러운 설계라고 생각할 수 없는 재래적인 설계방안을 보완하기 위한 새로운 방법론이 필요하다. 자동차공업에서의 재래적인 피로설계는 표준화된 재료, 표준화된 구조설계방안을 사용하여 설계한 경험에 기초를 두고 있는 경우가 많다. 여기에 주행시험의 결과와 사용자들의 반응을 고려하여 최종설계방안을 확정짓는 경우가 많다. 매년 생산되는 수백만대의 자동차를 상대로 수집한 파손데이터를 통계처리하여, 「하중에 의한 응력-변형률에 대한 상세한 해석을 행하지 않고」, 경험적으로 설계방안을 발전시켜 왔다. 이러한 과정들이 아직 이용되고 있

으나 최근 급속히 발전하고 있는 새로운 설계개념, 새로운 고강도재료의 출현과 자동차공업에의 새로운 제작과정의 도입때문에 신뢰성 있는 성능을 보증하는 데는 미흡하다. 다행스럽게도 몇몇 연구소에서 이러한 변화를 고려한 피로설계요구를 충족시키기 위한 새로운 설계과정들의 개발에 나서고 있다. 그러나 지금까지는 연구실에서 연구에 종사하는 연구자들과 실제 설계에 종사하는 설계자들 사이에 충분한 의견교환이 부족하였기 때문에 연구실에서 모아진 연구결과나 정보들이 실제 설계에 응용되는 예가 많지 않았다. 그러나 요즘은 고성능 컴퓨터 및 PC가 널리 보급되어서 여러가지 자동차 설계문제에 대한 해석이나 공식등을 서로 교환하기가 쉽게 되어 이러한 장애물이 제거되고 있다. 여기에서 최근 미국 Connecticut 대학의 McEvily 교수가 발표한 논문을 근간으로 자동차공업에서의 피로 · 파괴예방에 대하여 서술한다.

여기에서 주로 논의될 사항들은 피로설계과정과 설계를 위한 최신 피로해석의 기초 및 철합금의 피로제어에 대한 것들이다.

#### 2. 피로설계과정

바퀴 디스크(wheel disc), 부동(浮動)장치(suspension system) 및 조정장치 조립품들

\*정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

과 같은 외력에 민감한 부품들의 피로설계시 주요한 사항은 사용도중에 발생하는 최고하중에 의해서 응력집중 부위에 국부적으로 발생하는 소성변형을 인식하는 것이다. 이러한 경우에는 부품의 피로수명의 90% 정도가 모든 작용하중의 10%에 해당하는 상위하중을 감당하는데 소모된다. 따라서 탄성거동에 기초를 둔 응력-수명곡선 (S/N)을 사용해서 설계하는 재래식 방법을 사용하는 것은 합당치 않다. 이 경우에는 S/N 곡선 대신 변형률-수명곡선 ( $\epsilon/N$ )에 기초를 둔 새로운 설계과정과 소성변형의 영향이 피로수명에 미치는 영향도 고려한다. 그러나 많은 다른 부품들 즉, 크랭크 샤프트와 같이 상대적으로 낮은 응력에서 수백만 사이클이 필요한 것들의 설계에는 S/N 곡선의 사용이 아직 유용하다.

변형률에 기초를 둔 피로설계에 포함되는 기본적인 설계정보들은 다음과 같다.

- ㉑ 사용할려는 재료의 반복 응력-변형률곡선과 탄성 및 소성변형률로 나타낸 피로수명
- ㉒ 노치의 효과를 고려하는 방법
- ㉓ 국부적인 변형률과 하중과의 관계를 연관시키는 방법. 이렇게 하기 위해서는 유한요소해석 혹은 스트레인 게이지를 사용하여 부품을 보정 (calibration) 하는 작업이 필요할 것이다.
- ㉔ 주행시와 비주행시의 하중 스펙트럼과 운전자의 특성에 따르는 하중 스펙트럼에 대한 데이터
- ㉕ 하중 스펙트럼을 각각의 사이클 하중의 조합으로 분리시키는 방법
- ㉖ 각각의 사이클 하중의 상호작용 효과가 부품의 수명에 미치는 영향을 평가하는 방법
- ㉗ 하중 스펙트럼, 재료의 특성 및 제조공정에 대한 허용공차
- ㉘ 부식이나 운전도중에 발생하는 표면손상이 피로에 미치는 악영향 때문에 고려하여야 할 허용공차

위의 사항들을 면밀하게 검토하면 목적에 맞는 재료나 특수한 응용에 필요한 특성을 용이하게 결정할 수 있을 것이다. 설계의 타당

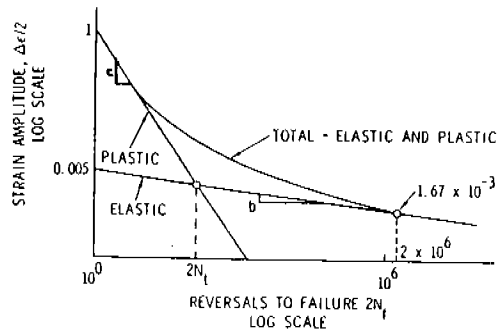


그림 1  $H_B = 200$  인 강에 대한  $\epsilon/2N$   
( $\epsilon$ : 스트레인,  $2N$ : 하중반복수)

성을 검증하기 위해서는 원형자동차의 운전시험 및 주행시험등에서 얻은 하중조건으로 각 부품들을 실험실에서 시험해 보아야 한다. 다음에 몇가지 예를 들어보자.

피로설계에서 Coffin-Manson 방법론은 그림 1에 보인 바와 같이 피로수명을 탄성변형률 범위 혹은 소성변형률 범위 혹은 두 변형률 범위의 합과 연관지우는 것이다.

임의의 불규칙적인 하중조건하에서 사이클 수를 쉽게 결정하기 위하여 횡축을  $N$ 대신  $2N$ 으로 택하였다.  $2N_T$ 에서 탄성스트레인과 소성스트레인이 일치되며 전스트레인 진폭 (total strain amplitude)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{4\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{\epsilon} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

여기서 소성변형률 범위와 탄성변형률 범위가 시험도중에 변화할 수 있다는 점에 유의하여야 한다.

어떤 주어진 전스트레인 (total strain) 범위내에서, 많은 재료들의 소성스트레인 범위가 (정상상태 혹은 포화조건에 이르기 전에) 증가 혹은 감소되는 경향이 있다. 만약 소성스트레인 범위가 초기에 증가한다면 반복하중에 의해서 연화되었다고 하며, 반대로 감소하였다면 반복하중에 의해서 경화되었다고 한다. 냉간가공한 재료는 연화되는게 보통이며, 풀림처리한 재료는 일반적으로 경화된다. 담금질 후 템퍼링한 마르텐사이트 강은 변태 때문에 발생한 전위 (dislocation)들이 반복하중

을 받는 동안 저위에너지 레벨을 가지도록 재 배열되기 때문에 연화된다. 그림 2 (a)에서 보인바와 같은 반복응력-스트레인 곡선은 안정된 히스테리시스 루우프를 이용하여 작성된 것으로서 다음식으로 나타낼 수 있으며 포화된 반복응력-스트레인 상태를 결정하는데 사용된다.

$$\Delta\sigma = K \left( \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \right)^n \quad (2)$$

그림 2 (b)에서는 반복응력-스트레인 곡선과 단순응력-스트레인 곡선을 비교하고 있다.

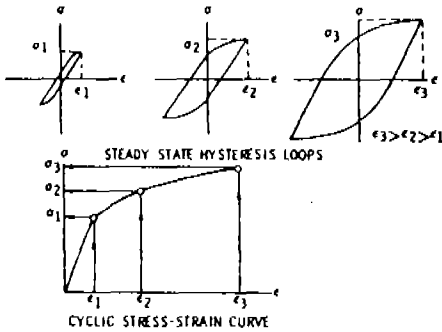


그림 2(a) 안정된 히스테리시스 루우프를 이용하여 반복응력-스트레인 곡선을 그리는 과정

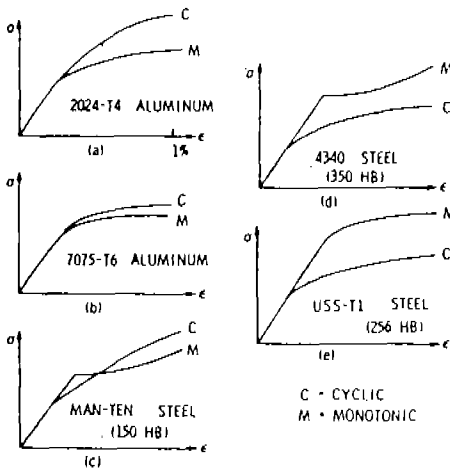


그림 2(b) 알루미늄 합금들과 저강도강들의 반복응력-스트레인인 곡선과 단순응력-스트레인 곡선의 비교

Coffin-Manson 방정식에서는 소성스트레인 과 소성응력의 포화값들을 사용한다. 어떤 경우 즉, 스트레인 진폭이 매우 큰 경우에는 재료가 피로 파괴되기전 안정상태 조건에 도달하지 않고 경화 혹은 연화된다. 이러한 경우에는 사용수명의 50%에서 일어나는 값들에 대응하는 피로특성값을 해석에 사용한다. 육상자동차공업에서는 재료의 반복응력-스트레인 특성 뿐만 아니라 스트레인 반복수와 파손관계 및 응력반복수와 파손관계들을 컴퓨터의 데이터뱅크에 입력시켜서 설계자가 재료선택을 할 때 필요한 자료로 사용하도록 한다.

피로균열은 일반적으로 응력집중되는 곳에서 성장을 개시하기 때문에 피로노치해석은 설계시 매우 중요한 사항이다. 노치의 효과를 고려하는 한 방법으로는 Neuber의 법칙이 있다. Neuber의 법칙에 의하면 이론적인 응력 집중계수,  $K_T$ 의 지승은 응력집중계수,  $K_\sigma$ 와 스트레인 집중계수,  $K_\epsilon$ 의 곱과 같다.(소성변형이 일어날 경우에만  $K_\sigma$ 와  $K_\epsilon$ 의 값이 크게 차이가 난다는 사실에 주목하라.)

따라서  $K_T, K_\sigma, K_\epsilon$ 의 관계는 아래식과 같다.

$$K_T^2 = K_\sigma K_\epsilon \quad (3)$$

소성변형이 국부적으로 일어날 경우에는 식 (2)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_T^2 = \frac{\sigma_{LP}}{\sigma} \cdot \frac{\epsilon_{LP}}{\epsilon} \quad (4)$$

이것을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$K_T^2 \sigma \epsilon = \sigma_{LP} \epsilon_{LP} \quad (5)$$

식(5)에서  $K_T^2$ 과  $\sigma$ 가 일정하면 쌍곡선의 식이 된다. 이 식은 다음과 같은 형태로 바꿔서 사용할 수도 있다.

$$K_T \sigma = (\sigma_{LP} \epsilon_{LP} E)^{1/2} \quad (6)$$

피로해석에서는  $K_T$  대신에 피로응력집중계수,  $K_F$ 를 사용한다.  $K_F$ 에 대해서는 다음 절에서 논의한다.

Neuber의 법칙이 항복이 일어난 후에 노치에서 응력-변형률 상태를 산정하는데 응용되

는 예를 그림 3에서 나타내었다. 여기에서 주목할 사항은 소성변형의 영향 때문에 작용값  $R$  과 국부적인  $R$  값이 동일하지 않다는 사실이다.

부품의 어느 부분에서의 피로수명을 산정하기 위하여는 식(6)의 우변의 양들이 피로수명이  $\sigma_{lp}$  와  $\epsilon_{lp}$  의 함수로 알려져 있는 노치없는 시편에 대한 것이라고 가정하여야 한다. 이 경우에는 반복응력-변형율의 관계가 이용되며  $(1/\Delta\epsilon_p/2)^{m+1}$ 의 함수로 피로수명을 표시하여 사용하기도 한다. 식(6)의 양변의 수치가 같아 질 때 동등한 수명으로 대응된다. 따라서 노치없는 시편에서 얻어진 데이터들을 사용하여 노치있는 시편의 피로수명을 예측할 수 있다.

피로해석에서 중요한 관심은 전피로수명 동안에 발생하는 변동진폭하중의 영향이다. 시험자동차에 계기들을 부착하여 각각의 부품들이 운전중에 받는 실제 하중들의 모양을 확인해야 한다. 설계시 실제하중을 잘못 추정하여 문제가 야기될 위험이 있는 부위에는 반드시 실제하중들을 측정하도록 해야 한다. 계기를 부착하여 실제하중을 기록할 경우에도 측정오

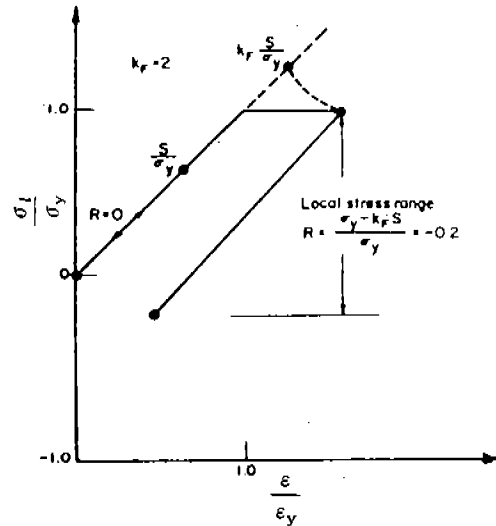


그림 3  $K_F=2$  인 노치뿌리에서의 응력-스트레인 거동(작용하중  $R=0$ , 작용응력 =  $5/8$  함복능력)

차를 최소화 시켜야 할 것이며 시험조건이 실제운전조건들과 유사하도록 조정해야 한다.

실계를 목적으로 하중이력(load history)을 해석하기 위하여 매우 복잡한 하중이력을 개개의 반복하중으로 나누는 과정이 필요하다. 이 과정의 한 예를 그림 4에 나타내었다.

이 방법을 쓰면 하중 스펙트럼을 스트레인 범위와 평균 스트레인의 집합(compilation)으로 나타낼 수 있다. 다음의 과정에 준하여 스트레인 시간 이력을 싸이클로 변환시킨다.

① 최대 스트레인이 최초 혹은 최후의 피크가 되게 하든지, 최초 혹은 최후의 골(valley)이 되도록 하중이력을 도시(plot)한다. 이렇게 하면 1/2 싸이클이 없어진다.

② 빗물흐름(Rain flow)은 각 피크에서 시작되어 하방으로 흐름을 계속한다. 단, 각 피크점보다 큰 피크점을 만나면 빗물흐름은 멈춘다(예: 피크 B 점에서 흐르기 시작한 빗물흐름은 피크 D 점에서 멈춘다). C, E, F 점에서 빗물흐름이 시작될 경우에도 같은 룰(Rule)을 적용시킨다.

③ 빗물흐름이 상류로부터 내려오는 빗물을 만날 경우에는 빗물흐름이 멈추게 된다(예: C에서 D로 흐름 때).

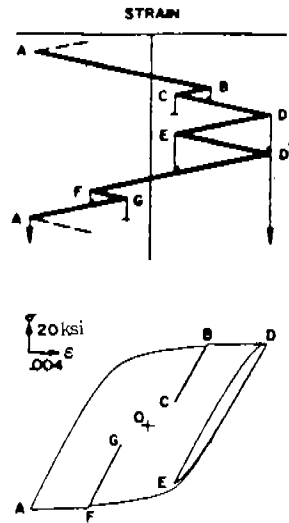


그림 4 빗물흐름(Rain flow) 계수(Counting) 과정

이러한 과정으로 데이터를 추출하여 전피로 수명동안에 작용되는 변동진폭하중의 영향이 피로에 미치는 영향을 해석할 수 있다. 피로 수명에 미치는 평균응력의 영향을 나타내고 있는 Goodman의 해석법을 따라 추출된 데이터(범위)를 등가완전반복 범위로 전환시킬 수가 있다. 피로수명을 산정하기 위해서는 다음과 같은 Miner의 식을 사용하기도 한다.

$$\sum_{i=1}^{i=i} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (7)$$

식(7)과 같은 간단한 관계식을 사용할 경우에는 피로과정에서 발생하는 몇가지 사항들이 간과될 위험도 있다. 즉, 피로한도보다 낮은 응력들은 피로에 아무런 영향을 미치지 않는다는 사항이다. 그림 5에서는 높은 응력레벨에서 균열이 개시되는 경우에는 피로한도보다 낮은 응력들도 피로파손에 영향을 미치는 것을 나타내고 있다.

그림 5에는 과스트레인(overstrain)이 없는 실험결과(1), 초기반복 과스트레인이 부가된 경우(2), 주기적인 과스트레인이 부가된 경우(3)들의 결과들이 나타나 있다. (1)과 (2) 경우에는 비교적 큰 스트레인 레벨에서 피로현상(Run out)이 발생되나 (3)의 경우에는 갈

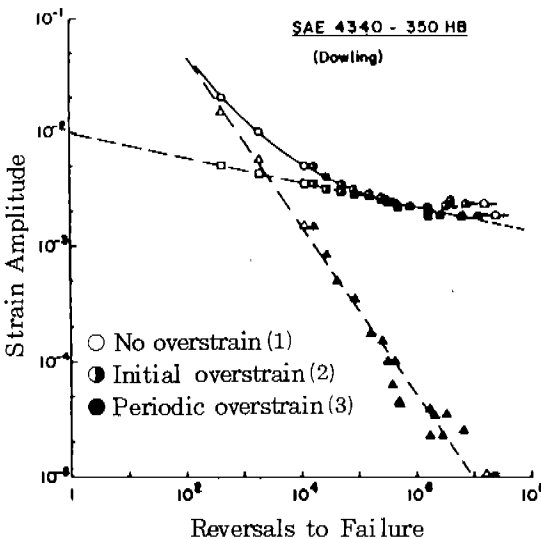


그림 5 강에 있어서 과스트레인(overstrain)이 피로수명에 미치는 영향

은 크기의 스트레인 레벨에서 피로현상이 발생하지 않는다. 따라서 스펙트럼 하중을 받은 경우에는 피로한도가 저하되는 사실을 알 수 있다. 실험실에서 실험코기의 부품을 시험할 경우에 이러한 현상과 연관되는 문제점이 발생한다. 즉, 시험시간을 단축시키기 위하여 높은 진동수의 최저하중은 부가하지 않는 경우가 많다. “이들이 피로에 미치는 영향을 잘 알지도 못하면서” 또한 하중들 사이에서 발생하는 상호작용을 무시하는 경우도 많다.

예를들면, 인장하중하에서 국부적인 소성변형이 발생하는 경우에는 하중제거시(unloading) 압축응력이 발생하여 실제 피로응력이 감소되는 효과가 발생하는 경우 등이다.

그러나 피로수명의 실험결과와 예측결과는 대체적으로 잘 일치하며 두 결과의 평균값의 차이는 2:1을 넘지 않는다. 부품의 피로수명을 산정하는데 고려해야 할 또 하나의 사항은 반복되는 소성하중이 쇼트피닝의 효과를 소멸시킬 가능성에 대한 것이다. 아직까지 이 분야에 대한 해석결과는 발표되고 있지 않다.

고강도재료는 생산과정에 대해서 매우 민감하다. 예를들면 담금이나 풀림처리를 하여 인장강도를 2배정도로 상승시킬 수 있다. 그러나 이러한 고강도강을 용접이 필요한 부품으로 사용하면 용접결합에서 피로균열이 쉽게 발생되어 설계사양을 만족시키지 못하는 경우가 많이 발생한다. 열처리후 마르텐사이트와 페라이트 상들이 공존하게 되는 2상강(dual phase steel)이 되도록 하면 전통적인 강재의 강도는 크게 증가된다. 그러나 원하는 미소구조를 얻기 위해서는 아주 엄밀한 생산관리를 해야 한다.

### 3. 균열의 성장 혹은 비성장

지금까지는  $\epsilon - N$  혹은  $\sigma - N$  곡선을 기초로 하여 수명에측을 행하였으며 균열개시나 균열성장과정에 대해서는 고려하지 않았다. 실제로 피로균열전파는 항공기산업과는 달리 자동차공업에서는 그리 중요하게 고려되지 않고 있다. 예를들면, 1982년 SAE 피로학술

대회의 24 편의 논문중 파괴역학에 관련된 것은 단 3편 뿐이었다. 그러나 용접구조물의 사용이 점점 증가하고 있고 이 구조물에서는 피로수명이 균열전파기간과 관련이 깊기 때문에 파괴역학적인 접근방법으로 균열전파과정을 면밀히 연구하여야 할 필요가 있다고 생각된다. 여기에서는 응력집중부분에서 전파되는 균열에 대한 허용응력레벨 결정에 대하여 주로 논의하고자 한다. 저사이클 피로설계하중인 노면충격하중보다도 거의 일정한 진폭으로 수백만 사이클 하중을 받는 경우에 대하여 고려해 보자.

피로균열전파가 개시되는 조건에 대한 연구도 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 어느

주어진  $R$  값에 대해서 (여기서  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ ) 피로균열이 전파개시하기 위해서는 응력진폭과 균열길이가 "어떤" 조합조건을 만족해야 한다. 이 조합은 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 로 나타낼 수 있다.

무한판 중앙에 길이  $2a$ 인 균열이 존재할 경우의  $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ 이다.  $\log \Delta\sigma$ 와  $\log a$ 를 도시(plot)해 보면 그림 6과 같이 기울기가  $-1/2$ 인 직선으로 나타난다 ( $R=-1$ ).

그림 6에서  $a=c+l$ 이며 점선은 반경이 다른 원공에 대한 것이다. 여기에서 나타난 응력범위와 균열길이 사이의 관계는 거시적인 균열범위에 대해서만 만족되나 그림 6에서 나타난 바와 같이 아주 작은 균열에 대해서는 피로한도가 제어계수(controlling factor)로 되며 이 범위에서 직선의 구배가 0으로 된다.

피로균열개시 레벨에서 균열단합과정도 피로균열개시에 중요한 영향을 미친다. 이 경우의 균열단합과정은 모드 II와 모드 I하중에 의한 균열전파 결과로 발생한 균열표면의 거칠기에 기인한다. 산화물이나 부식물들도 개시영역에서의 단합을 증가시킨다. 만약 사이클 하중동안 열린 부분만 고려한다면  $K_{max} - K_{op}$ 이 균열전파에 미치는 유효응력확대계수로 될 것이며 그림 6에서 곡선 B에  $\Delta K_{eff}$ 의 항으로 개시조건을 도시할 수 있다. 피로균열이

처음 노치나 결함에서 형성될 때에는 단합현상이 없다. 그러나 단합과정은 0.5mm 정도의 전파거리부터 빠르게 전개되므로 응력진폭이 증가되지 않으면 균열이 계속 전파되지 않을 것이다. 예로서, 강도가 중간레벨정도되는 강에서 피로균열이 계속 전파되는 조건들을 그림 7에 도시하였다. 이 그림에서는 균열전파에 필요한 응력레벨이 변화하는 모양을 나타내고 있는데 처음 응력레벨이 증가하다가 더 큰 균열에 대해서는 응력레벨이 작아지는 현상을 볼 수가 있다(그림 7의 C, D, E 점들).

균열단합의 증가에 의한 응력증가 때문에 비성장균열이 생겨날 수 있다. 이것은 그림

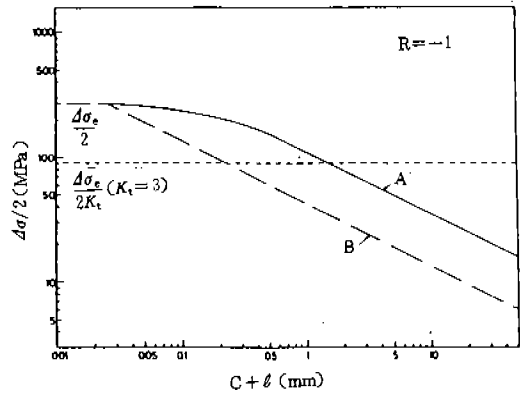


그림 6 응력진폭과 전균열길이(C+l)로 나타낸 균열전파조건

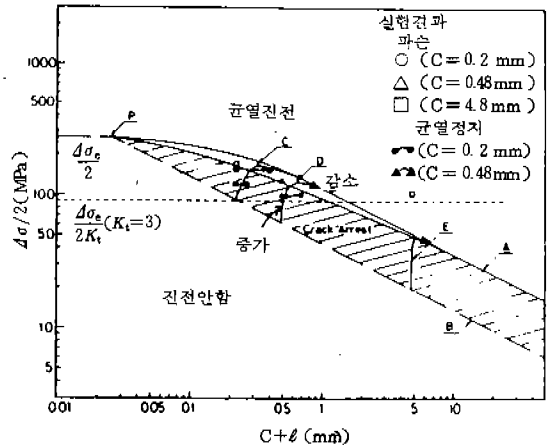


그림 7 균열단합이 피로균열전파에 필요한 응력에 미치는 영향(노치 혹은 결함 크기의 함수로 나타나 있다)

7의 C와 D 곡선을 보면, 작용응력은 노치나 결함에서 균열핵을 발생시키기에는 충분한 크기이나 균열단합에 의해서 생기는 벽(barrier)을 넘지 못하며 따라서 균열정지현상이 일어난다는 것을 알 수 있다. 강도가 중간 레벨인 강에 대한 균열전파응력은 C와 D 곡선인 경우, 전파개시응력보다 훨씬 크다. 따라서 이러한 경우에는 균열개시보다 비성장 균열에 대한 사항을 더 중요시하여 피로설계를 하여야 한다. 많은 반복하중을 받은 비파손 부품을 자세히 검사해보면 이러한 정지균열들을 자세히 검사해보면 이러한 정지균열들을 많이 발견할 수 있다.

균열단합과정은 재료의 항복응력과 미세조직에 관계가 깊다. 이러한 인자들은 저탄소강의 경우에는 매우 중요하며, 탄화 혹은 질화된 강에서는 덜 중요하다. 만약 균열개시가 임계스텝인 경우 즉, 곡선 A의 왼쪽편에 응력-노치크기조건이 위치한다면 균열개시도 매우 중요하게 취급되어야 한다.

단합과정에서 또 다른 하나의 중요한 사실은 피로노치감도와 피로노치크기 효과가 그림 7에서 보인 바와 같이 단합거동의 향으로 곧바로 이해될 수 있다는 것이다. 즉 직경이 각각 0.2, 0.4, 4.8mm인 원공들이 동일한  $K_T=3$ 의 값을 가진다는 사실이다. 노치없는 시험편과 노치있는 시험편의 피로강도비인  $K_F$ 의 예측값은 균열크기의 함수이며 그림 8과 같다.

그림 8에서 식(8)과 식(9)를 이용한 경험적인 관계들도 나타내었다.

$$\text{Kuhn-Hardrath } K_F = \frac{K_T - 1}{1 + \sqrt{\rho^T/\rho}} \quad (8)$$

$$\text{Peterson } K_F = \frac{K_T - 1}{1 + a_0/\rho} \quad (9)$$

노치감도는 보통 다음과 같이 나타낸다.

$$q = \frac{K_F - 1}{K_T - 1} \quad (10)$$

저강도재료에 대해서는 단합현상이 현저하고 따라서  $K_F$  값은 낮다. 반면에 고강도재료에 대한 단합현상은 감소되고  $K_F$ 는  $K_T$  값으로 접근한다. 따라서 재료의 피로노치 감도는

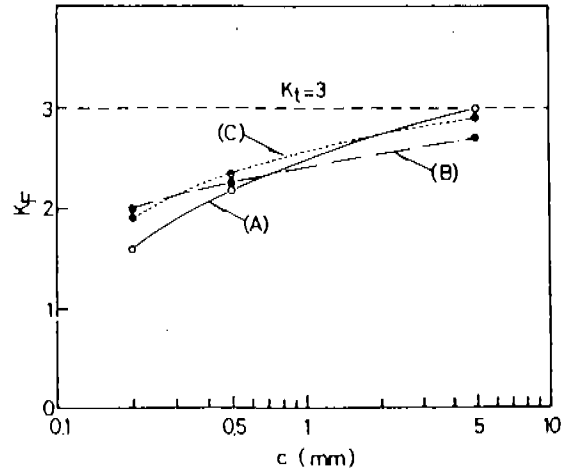


그림 8 원공의 크기의 함수로 나타낸  $K_F$  값 (A) 그림 7을 기준으로 한것 (B) 식(8)을 기준으로 한것 (C) 식(9) ( $\rho^T=0.4$  mm,  $a_0=0.25$  mm)을 기준으로 한것

단합에 직접적으로 연관된다. 단합은 평균응력이 증가함에 따라 감소하므로 이에 대응되는 결과가 노치감도에도 예측된다. 어떤 주어진 재료에 반경  $\rho$ 인 예리한 노치가 있을 때 이 노치로부터 균열전파가 개시되는 조건을 아래와 같이 쓸 수 있다는 연구 보고가 있다.

$$\Delta K_I / \sqrt{\rho} = \text{일정} \quad (11)$$

이것은 다음과 같은 Irwin의 응력확대계수 정의식에 근거를 두고 있다.

$$\Delta K_I = \lim_{\rho \rightarrow 0} \Delta \sigma_{\max} \sqrt{\frac{\pi \rho}{4}} \quad (12)$$

선단반경이 0이 아니고 매우 작은 값을 나타낼 경우에는 식(12)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Delta K_I}{\sqrt{\rho}} = \Delta \sigma_{\max} \quad (13)$$

중앙에 위치한 타원결함에 대해서는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\frac{\Delta \sigma \sqrt{C}}{\sqrt{\rho}} = \text{일정} \quad (14)$$

우리는 식(14)의 관계식을 그림(7)과 연관시켜서 설명할 수 있다. 지금  $C=5$ mm,  $\rho=$

0.25mm로 가정하자. 즉  $\sqrt{C}/\sqrt{\rho} = 14.14$ . 이 조건을 그림(7)에 맞추어 보면 응력진폭이 20MPa 일때 균열이 성장을 개시하나 균열이 전파되는 응력진폭은 50MPa를 넘어야 된다는 사실을 알 수 있다. 균열길이가 35mm이고  $C/\rho$ 의 값이 동일한 경우에는 응력집중을 나타내는 원공의 0.175mm이다. 이 경우에도 균열이 성장되는 응력은 역시 20MPa이고 균열전파 응력진폭도 20MPa이다. 따라서 예리한 노치에서 균열이 성장개시될 경우의  $\Delta K_T/\sqrt{\rho}$ 는 일정할 것이며, 균열성장과정과 아무런 관련이 없다는 사실을 알 수 있다. C가 35mm보다 큰 경우에는 균열들이 다음 조건하에서 타원형 노치로부터 성장개시후 성장된다.

$$\frac{\Delta \sigma}{2} K_T = \sigma_e \quad (15)$$

$C \gg \rho$ 인 경우에는

$$\frac{\Delta \sigma \sqrt{C}}{\sqrt{\rho}} \propto \sigma_e \quad (16)$$

혹은 근사적으로

$$\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}} \propto \sigma_e = \text{일정} \quad (17)$$

위의 관계식은 응력확대계수와 개시값을 고려해서 유도된 것이 아니라 응력집중계수와 피로한도를 고려한 것으로부터 유도된 것들이다. 만약 균열이 성장하는데 필요한 응력진폭을 안다면 그리고 만약 C와  $\Delta \sigma/2$  좌표점들이 그림 7의 곡선 A의 좌측에 있다면 위의 관계식으로부터  $\sigma_e$ 를 산정할 수 있다.

마지막으로 균열단합을 고려하여 재료를 선택하는 방법을 그림 9에 나타내었다.

만약 어떤 부품이 검사규격으로 정한 결함 크기보다 더 큰 결함을 가지고 있을 경우에는 사용하지 않아야한다. 작용응력의 범위가 내구한도(피로한도)보다 낮게 셋팅되어 있으므로 안전계수는 자동적으로 결정된다. 그러나 같은 크기의 결함이 존재하는 경우에는 저장도 재료가 고강도재료보다 우수하다. 따라서 피로거동에 미치는 결함과 균형단합의 영향등이

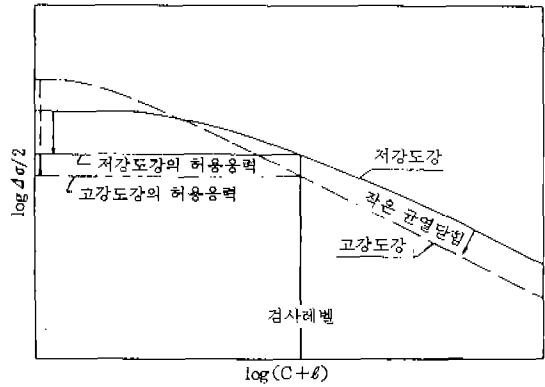


그림 9 (비성장 균열을 고려할 경우) 강도레벨과 균열단합이 허용능력 결정에 미치는 영향(비성장균열의 크기는 균열탐사능력에 관련된다)

재료선택시(특히 고강도재료일 경우) 주요한 인자로 고려되어야 한다.

#### 4. 결 언

본 해설에서는 육상자동차 분야에서 개발되고 있으며 또한 개발되어야 할 몇가지 파괴역학적인 피로문제를 기술하였다. 실험실에서 연구자료가 산업현장에서 잘 이용되도록 산학협동이 원활하게 이루어져서 효율적이고 경제적인 설계공정 및 설계방안이 강구되어졌으면 하는 바램이다.

어쨌던 본 해설에서 중점적으로 논의한 피로균열의 개시, 전파등에 관한 연구는 계속되어야 할 것이며 따라서 경험에 의존하는 설계%는 감소되어야 하며 피로저항을 증가시켜야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- A.J. McEVILY, "Fatigue and Fracture Prevention in the Motor Vehicle" Fracture Prevention in Energy and Transport System, Volume 1(1983).