

인장 실험 데이터를 이용한 피로한도 결정에 관한 연구

김태훈 · 김학운 · 오홍국* · 진억용*

아주대학교 기계공학과 대학원

*아주대학교 기계 및 산업공학부

Determination of the Fatigue Limit by Using a Tensile Testing Data

Tae Hun Kim, Hak Yun Kim, Hung Kuk Oh* and Eog Yong Chin*

Dept. of Mechanical Eng. Ajou University

*School of Mechanical & Industrial Eng. Ajou University

(1999년 1월 14일 받음, 2000년 1월 11일 최종수정본 받음)

초 록 고주기 피로조건에서 응력진폭은 항복점이하의 응력이므로 변형은 일반적으로 탄성적이다. 만약 변형이 완전히 탄성적이라면 피로는 생겨나지 않을 것이다. 그러나 이는 항복점의 개념과 항복점 아래에서의 순수탄성변형의 가정을 과도하게 단순화한 것이다. 인장실험 시 시편 전체가 파괴 절차를 따르는 반면, 고주기 피로실험에서는 국부적 영구 슬립띠가 파괴절차를 따른다. 그러나 두 경우에서 파괴 전변형영역의 단위체적 당 변형의 축적은 두 재료가 동일하기 때문에 국부적으로 동일하다. 미소 소성변형이나 Lüders band, 탄성영역에서의 인장실험곡선의 기울기변화는 재료속에 포함된 경도가 높은 침입형 또는 침탄형 원자의 구름에 기인한다. 이들이 구름운동(Rolling movement)을 일으켜 다음 격자로 이동하면 소성변형이 발생하는 반면, 완전히 구르지 못하고 제자리로 되돌아오는 운동을 반복하는 경우가 바로 피로한계이다.

Abstract Microstructural processes during high cycle fatigue are investigated according to plastic-strain hardening, crack formation, crack propagation and fracture. It is shown that the fatigue test resembles the uniaxial tensile test. The logarithm of the number of cycles to failure is proportional to the elongation in the tensile test. Under high cycle fatigue test, the strain is normally elastic. If the strain is absolutely elastic, fatigue could not result. But this is over simplification. Nearly all metals undergo a minor amount of plastic strain even at low stress. Damage accumulation leading to crack formation can continue in the persistent slip bands at very low average plastic strain amplitude. In the tensile test the overall specimen follows the failure procedure whilst in the high cycle fatigue test the local persistent slip band follows the failure procedure. However accumulations of strain per unit volume in the deforming region before failure in both cases are equal locally.

Key words : Fatigue, Rolling Back Movement(되구름운동), Tensile, Plastic strain, Lüder's band

1. 서 론

고사이클 피로는 탄성한도 내의 하중을 가하기 때문에 일반적으로 피로 진행 중 소성변형이 일어나지 않는 것으로 알려져 왔다. 그러나 공업용 재료에서 쓰이는 금속재료는 일반적으로 방향성을 갖는 다수의 미소한 결정으로 된 집합체로서, 각 결정은 임의의 방향으로 배열되어 있다. 따라서 그것을 거시적으로 보면 등방등질로 생각되지만 현미경으로 보면 반드시 그렇지 않다.

다결정구조의 결정립은 피로과정 동안 회전하는 것으로 나타난다.⁴⁻⁶⁾ 입자의 회전에 의한 미소변형은 많은 결정경계에서 균열을 만들며 이 균열이 진전되어 파단이 일어나게 된다.

고주기 피로에서 응력진폭은 항복점이하의 응력이므로 변형은 일반적으로 탄성적이다. 만약 변형이 완전히 탄성적이라면 탄성변형은 가역적이라는 정의에 따라 피로는 생겨

나지 않을 것이다. 그러나 이는 항복점의 개념과 항복점 아래에서의 순수탄성변형의 가정을 과도하게 단순화한 것이다. 위에서 설명한 것과 같이 거의 모든 금속은 작은 응력에서조차도 미소량의 소성변형을 수반한다. 피로하중을 받는 재료를 정밀하게 관찰하면 미소변형이 불균일하게 나타나며, 모든 변형은 몇 개의 고립된 슬립띠에 집중됨을 알 수 있다. 변형은 상당히 불균일하므로 영구 슬립띠내의 소성변형의 크기는 평균변형률(전체 재료에 대한 평균값)의 크기에 비해 상당히 크다. 따라서 크랙을 형성하는 손상축적은 영구 슬립띠내에서 소성변형의 크기가 작을 때에도 계속된다.

최근에 발표된 연구 결과에 의하면 고사이클 피로에서도 피로변형이 일어나 피로 사이클이 진행되는 동안 재료의 기계적 물성값들이 변화 하는 것으로 밝혀 졌다.^{1,13)} 그러므로 이러한 피로변형은 각종 피로하중을 받는 부분들의 설계 시에 중요한 인자로서 고려가 되어야 할 것이다.

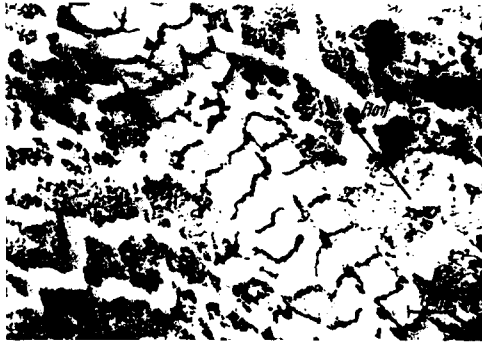


Fig. 1. 단결정 구리의 영구 슬립띠 구조

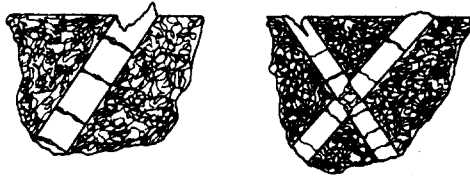


Fig. 2. 영구 슬립띠의 개략적 구조와 표면의 Intrusion과 Extrusion

본 연구에서는 고주기 피로실험을 통하여 피로강도를 구했고, 이를 인장실험에 의한 데이터를 이용한 피로강도와 비교하였다.

2. 인장과 피로의 연관성

특정 응력단계에서의 S-N곡선은 영구 슬립띠의 형성, 영구 슬립띠의 변형경화, 크랙형성, 단계적인 크랙진전을 나타낸다. 그러나 인장실험에서 시편 전체는 응력이 증가함에 따라 소성적으로 변형하며, 변형경화도 균일하다. 변형경화의 마지막 단계에서 네킹이 발생하고 국부적 네킹은 결과적으로 파괴를 유발한다.

인장실험에서는 시편 전체가 파괴 절차를 따르는 반면, 고주기 피로실험에서는 국부적 영구 슬립띠가 파괴절차를 따른다. 그러나 두 경우에서 파괴 전변형영역의 단위체적당 변형의 축적은 두 재료가 동일하기 때문에 국부적으로 동일하다. 이를 도식화한 것이 그림 3에 나타나 있다. 인장곡선은 통상적으로 탄성영역에서의 기울기가 일정한 직선으로 표현되어 왔으나 실제적으로는 탄성영역 내에서 몇 번의 기울기의 변화가 나타나는 것을 볼 수 있다. 미소 소성 변형이나 Lüder's band, 탄성영역에서의 인장실험곡선의 기울기변화는 재료 속에 포함된 경도가 높은 침입형 또는 침탄형 원자의 구름에 기인한다. 탄소나 질소원자가 이에 포함되며, 이들이 구름운동(Rolling movement)을 일으켜 다음 격자로 이동하면 소성변형이 발생되고 이것이 축적되어 파괴에 이르는 반면, 완전히 구르지 못하고 제자리로 되돌아오는 운동을 반복하는 경우가 바로 피로한도이다. 뒤구름운동(Rolling back movement)이란 한 격자내의 Fe 사이에 끼인 침입형 원자가 금속의 탄성 변형 중 다음 격자로 옮겨가지 않고 원래의 위치로 되돌아 오는 과정을 말한다. 피로강도는 탄소의 뒤구름운동(Rolling back movement) [그림 4] 때문에 미소 소성변형이 축적되지 않는다. 따라서 이 아래 응력범위에서는 파괴가 일어나지 않는다.^{1~3,7)}

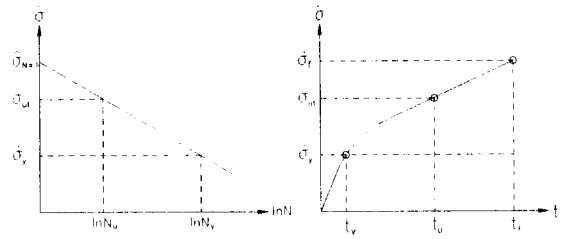


Fig. 3. S-N곡선과 인장실험곡선(진응력 이용)과의 관계

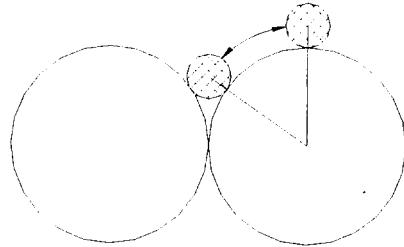


Fig. 4. Rolling Back Movement

3. 인장실험과 피로실험

인장실험은 Instron사의 인장시험기를 이용하여 실험을 했다. 각각의 인장실험결과는 PC의 A/D변환기를 시험기에 연결하여 얻었으며, 보다 정밀한 결과를 얻기 위해 여러 번의 실험을 되풀이하였다. 이 연구에서는 정적실험을 이용하였으며 변위제어(Stroke Control)에 의해 수행되었고 10000lb(4536Kg)의 Load Cell을 사용하였다. 각각의 재료에 대해 균일한 결과가 나오도록 동일한 조건에서 몇 회에 걸쳐 실험을 행하였다.¹²⁾

그림 5는 Instron사의 시험기에 의해 수행된 인장실험의 그래프를 나타낸 것이다. 곡선의 탄성영역을 보면 기울기의

Table 1. 시험기의 특성

	하중변환기	변위변환기
감도(Sensitivity)	2mv	0.3v
선형도(linearity)	0.2%	0.5%
여기(Excitation)	10v	6v

Table 2. 인장실험시편의 규격

시 편 명	치 수(mm)		
	L	T	W
SPHC	50.0	4.0	25.0
SAPH370	50.0	2.9	12.5
SAPH440	50.0	2.6	18.5

변화를 관찰할 수 있다.

피로실험방법은 응력제어와 변위제어 두 종류가 있다.⁹⁾ 응력제어는 일정한 응력을 유지시키는 것이고 변위제어는 변형률을 일정한 크기로 제어하는 것이다. 이 연구에서는 하중제어를 중심으로 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 관재 시편과 같은 기하학적으로 완전한 대칭이 아닌 시편에 대해 응력비를 $R=0.1$ 인 평균응력을 고

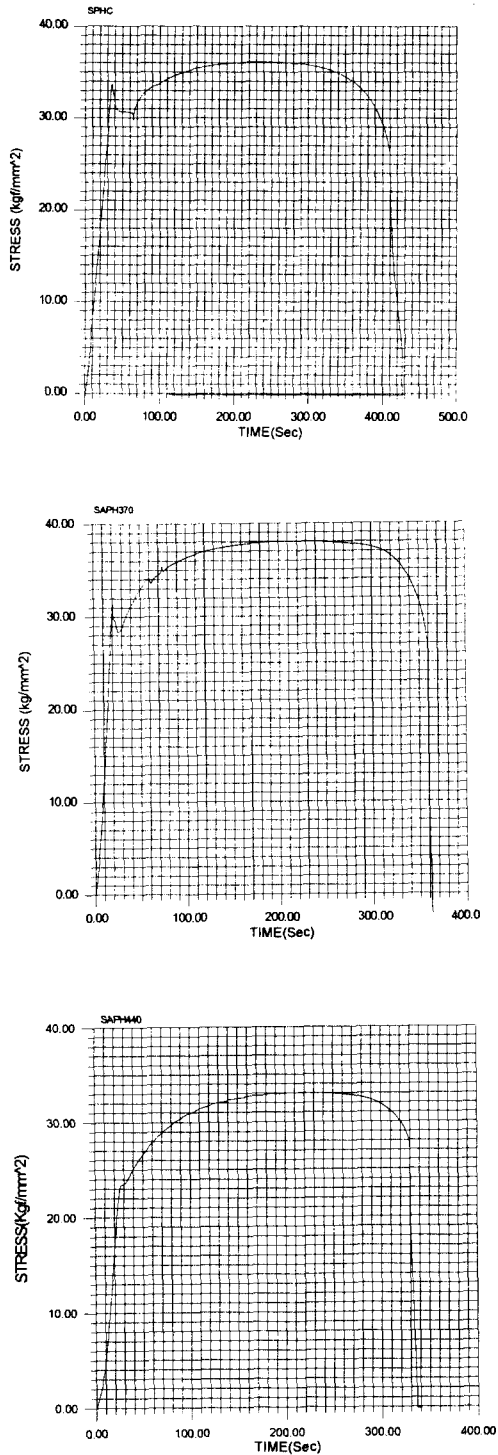


Fig. 5. 인장실험 그래프

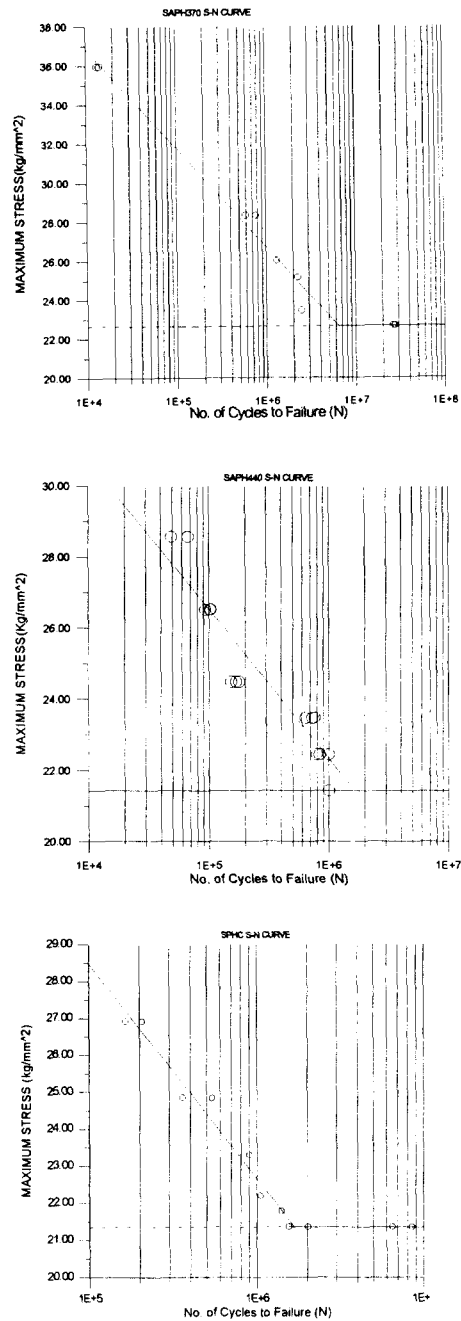


Fig. 6. 피로실험값을 이용한 S-N곡선

려한 피로실험을 수행하였다.

피로실험장비는 인장실험과 동일하며 피로실험의 조건은 20Hz, 25Hz Sin파의 형태로 주었으며, 응력비를 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.1$ 로 고정하고 최대응력 σ_{max} 를 조정하며 실험하였다. 재료의 수명이 $10^6 \sim 10^7$ 범위에서 피로강도인 평행부를 구하였다.¹²⁾

그림 6은 위의 조건하에서 수행된 피로 실험의 결과이다.

4. 이론에 의한 피로강도 결정

그림 7은 인장곡선에서 탄성영역을 과장하여 나타낸 그림이다. 앞서 이론적 배경에서 설명한 것과 같이 인장실험

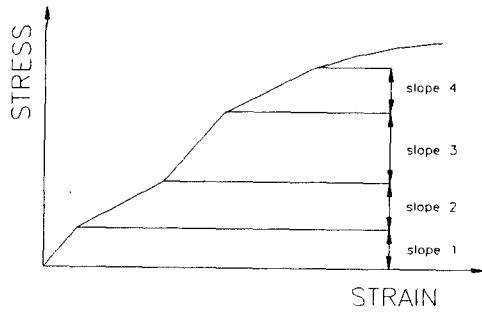


Fig. 7. 탄성부분에서의 기울기변화의 과장곡선

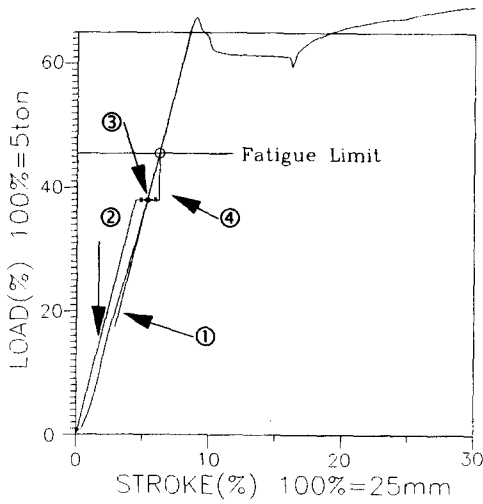


Fig. 8. 인장실험곡선을 이용한 피로강도의 결정방법

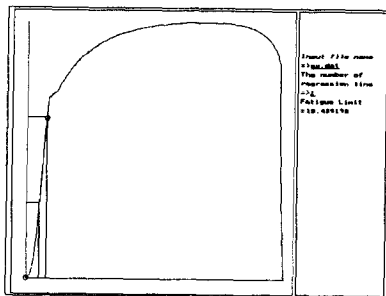
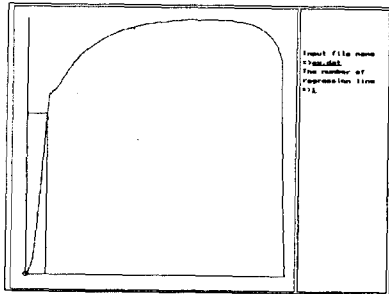


Fig. 9. 프로그램 실행 과정

의 탄성영역에서 기울기의 변화가 두 번 생길 때, 즉 slope 1에서 slope 2, slope 3로의 변화가 생길 때, 처음 기울기

를 보상하는 점을 찾는다[그림 7]. 그러나 많은 재료에서는 기울기변화가 한번 정도, slope 2에서 slope 3으로, 일어난다, 이 때문에 초기의 기울기(slope 1)를 위 부분의 기울기(slope 3)를 그대로 사용한다. 이는 slope 1이 나타나는 대부분의 재료에서 slope 1과 slope 3의 기울기가 일치하기 때문이다. 또 일부 재료는 slope 2, slope 3, slope 4가 나타나는 경우도 있는데 이때 생긴 slope 4는 다른 불순물, 즉 첨가원소에 의해 생긴 것으로 slope 4는 무시하고 slope 2와 slope 3을 사용하여 구한다.

침입원소의 구름운동은 탄성영역 하에서 임계점(그림 8의 ③)에 수평방향으로 구름움직임을 더해 기울기를 변화시킨다. 여기서 처음 기울기를 보상하는 점이 피로강도이며, 이 점을 찾는 방법을 그림 8에 나타내었다.

컴퓨터 프로그램을 이용하여 인장실험에서 재료의 피로강도를 찾는 경우에는 재료의 인장실험 결과값(Data File)을 입력해 주면 그래프가 화면상에 나타나고 커서를 움직여 기울기를 결정하면 피로강도를 찾아 준다.

그림 9는 위의 과정을 실행한 결과이다.

5. 실험결과비교

모든 피로실험은 평균응력을 고려하여 실험하였다. 여기서 얻어진 실험값을 평균응력을 고려하지 않은 경우로 변환하기 위해 Goodman의 식을 이용하였다.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{a0}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ut}} = 1$$

이때 σ_m : 평균응력

σ_a : 평균응력이 존재하는 경우의 응력진폭

σ_{ut} : 최대인장강도

σ_{a0} : 평균응력이 없는 경우의 응력진폭이다.

먼저 실험에서 얻어진 재료의 피로강도에서 최대응력(σ_{max}), 평균응력(σ_m)과 응력진폭(σ_a)을 구하고 이를 이용하여 구한 평균응력이 없는 경우의 응력진폭(σ_{a0})을 구하면 표 3과 같다.

Table 3. 피로실험에서 구한 피로강도

(단위 : kgf)				
	σ_{mean}	σ_a	σ_{max}	σ_{a0}
SPHC	484	396	880	683
SAPH370	269.5	220.5	490	381
SAPH440	0	390	390	390

Table 4. 이론값과 실험값의 비교

(단위 : kg/mm ²)			
시편명	실험값	이론값	
		작도법	프로그램
SPHC	21.34	20.5	20.87
SAPH370	22.63	22.5	27.03
SAPH440	21.42	22.3	21.58

● 인장실험에서 구한 이론적 피로강도(작도법 기준)

SPHC Limit = 20.5kg/mm²

SAPH370 Limit = 22.5kg/mm²

SAPH440 Limit = 22.3kg/mm²

● 피로실험에서 구한 실험적 피로강도

SPHC Limit = 21.34kg/mm²

SAPH370 Limit = 22.63kg/mm²

SAPH440 Limit = 21.42kg/mm²

이며, 두 실험 결과를 비교했을 때 작도법으로 구한 값은 실험값과 0.84, 0.13, 0.88Kgf/mm²의 오차가 있으며, 프로그램에서 구한 값과의 차이도 매우 적다. 결론적으로 이론의 합당함을 실험을 통해 검증할 수 있었다.

6. 결 론

1) 인장실험을 이용하여 구한 피로강도와 실제 피로실험에서 구해진 결과를 비교해 본 결과 이론의 타당성을 입증할 수 있었다.

2) 본 연구를 통하여 인장실험자료를 이용해 피로강도를 구하는 프로그램 알고리즘을 구현하였다.

참 고 문 헌

- Hung-Kuk Oh, "Three-Dimensional Crystallizing Combined π -Bonding Orbitals And Computer Aided Material Testing System", Ajou University Press, 1995, page 119~138.
- Hung-Kuk Oh, "Behaviors of three dimensional crystallizing π -bondings in engineering sciences", Ajou univ. press 1995 ISBN 89-86161-03-793400, page 13~23.
- Hung-Kuk Oh, "Conventional metallic bonding and three-dimensional crystallizing π -bondings", Materials Processing Technology, **69**(1997), page 134~147.
- Hung-Kuk Oh, "Three-dimensional crystallizing combined π -bonding orbitals('O's' bonding) and plastic deformation by twins and dislocation", Journal of Materials Processing Technology, **65**(1997), page 127~133.
- Hung-Kuk Oh, "Three-dimensional crystallizing combined π -bonding orbitals('O's' bonding) and electrical and mechanical properties of alloy metals", Journal of Materials Processing Technology, **69**(1997), page 125~133.
- Hung-Kuk Oh, "Three-dimensional crystallizing π -bondings and uniaxial tensile deformation in polycrystalline metals", Journal of Materials Processing Technology, **69**(1997), page 120~124.
- Hung-Kuk Oh, "Some comments on three-dimensional crystallizing π -bondings, fatigue and fatigue limit", Journal of Materials Processing Technology, **66**(1997), page 153~157.
- George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, Mcgraw-Hill, 1988, page 382~387.
- Bela I. Sandor, Cyclic Stress And Strain, The Univ. Of Wisconsin Press, 1972, page 26~28.
- Nam P. Suh/Arthur P. L. Turner, Elements Of The Material Behavior Of Solids, Scripta Book Co., 1975, page 458~461, page 471~476.
- 이억섭, 차용훈, 유승원, 이종기, 재료파괴강도학, 원창출판사, 1993, page 122~128.
- 오길환, 채두병, 김학운, 연운모, 송건, 박종건, 재료시험법, 기전연구사, 1996, page 17~93, page 175~222.
- 윤웅기, 금속 재료의 피로 수명 방정식 유도와 그 응용에 관한 연구, 아주대학교 공학박사학위 논문, 1995, page 16~23.
- 황 혁, 인장시험에 의한 재료의 피로특성에 관한 연구, 아주대학교 공학석사학위 논문, 1997, page 16~18.