

# 金屬材料의 소성피로

<上>

李 慶 鍾  
(Braunschweig 工大)

## 1. 問題點과 그 實用的 意味에 對하여

繰返되는 變形振幅(Verformungsamplitude)이 塑性變形 범위까지 達하여 疲勞 繰返回數가 10<sup>4</sup> 보다 적은 경우, 이 疲勞現象을 low-cycle fatigue이라함(獨語로는 이에 해당하는 術語가 없었서, Plastoermüdung라는 用語를 本人이 제안했었음) Plastoermüdung(塑性疲勞) 關해서는 疲勞 抵抗性이나 疲勞強度(疲勞繰返回數가 10<sup>4</sup> 보다 큰 경우)에 비하여 아직까지 별로 연구되지 않았었는데, 近來에 와서 그의 實用的 意味로 因하여 Plastoermüdung이 많은 注目을 받게 되었음.

Plastoermüdung이 問題가 되는 實用的 例를 들면

- A) Hochdruckkesselban(高壓보일러)
- B) Gasturbinenban(가스터빈)
- C) Schiffban(造船)
- D) Luft-und Raumfahrttechnik(航空宇宙工學)
- E) Ofenban(爐生産)

Plastoermüdung은 上述한 實用的 意味外에 疲勞機構에 對한 근본적 해결을 위하여 큰 重要性을 갖고 있음. 그 理由로 지금까지 제안된 많은 疲勞機構는 疲勞現象은 늘 塑性變形(작은 범위에 制限된)과 關聯되어 있다는 전제下에 마련되

었기 때문임. 疲勞破壞面과 破壞機構내지 그의 損傷問題 해결에 이바지하는 역할에 對해서는 時間上, 다른 기회에 설명하겠음.

一般的으로 疲勞破壞의 判定조건으로 지금까지는 試片이 완전히 파괴될때까지의 繰返回數를 채용했음(Bruchlastspielzahl-Numbes of Cycles to fracture) 이 외에도 一定한 크기의 龜裂이 나타나기 까지의 繰返回數를 채용하기도 함. 勿論이 龜裂의 크기를 임의로 정함. 지금까지의 경험에 의하면 측정된 疲勞破壞繰返回數는 그 散布가 크고 하나의 確率의 問題가 되며, 따라서 精確한 繰返回數를 정하는데 많은 실험과 시간이 要하게됨 이러한 어려운점을 극복하기 위하여 Rie와 Stüwe가 새로운 評價法을 제안했음 이 강연의 목적은 이 評價法을 소개하고 이것을 사용함으로써 繰返變形時의 物性變化를 상세히 추구할 수 있으며 破壞繰返回數를 실험과 시간을 절약하여 精確히 정할 수 있음을 明示하는데 있음. 結論의으로 이 評價法이 實用的 應用的 例를 들겠음.

## 2. 一定한 變形振幅의 채용

지금까지 연구결과 塑性變形振幅이 증가함으로써 破壞繰返回數 Nb가 감소한다는 것이 알려졌는데, 다음과 같은 關聯性을 Orowan이 제안했음.

$$NB. pI=C\cdots\cdots(1)$$

pl : 塑性變形振幅

C : 常數

다시 말하면 이식은 塑性變形振幅의 크기에 관계없이 累積된 變形이 一定한 值를 達하면 疲勞破壞가 생긴다는 것을 의미함. 이 直覺的인 關聯性이 몇가지 例를 除하고는, 지금까지 시험 상 확인되지 않았음. : S.S. Manson과 L.F. Coffin은 後에 여러종류의 재료를 사용하여 실험한 結果, 다음과 같은 關聯性을 발견했음.

$$N_{Bz} \cdot \{pl = C \dots \dots \dots (2)$$

$$0.5 < \alpha < O.F$$

式(2)를 Manson-Coffin-Gesetz라고 함.  $\alpha$ 는 실험치인  $N_{Bz}$ 와  $\{pl$ 를 二重對數的으로 圖示함으로써 定할 수 있음. 例로서 지금까지 알려진  $\alpha$  值를 다음에 보여드림. (圖 1)

$\alpha$ -Werte des Hanson-Coffin-Gesetzes  
werkstoff  
(amerik. Bezeichnung)

Stähle	
4130 weich	0,627
4330 hart	0,596
4330 geglüht	0,538
304 hart	0,693
304 geglüht	0,415
52,100	0,653
52,100 X-hart	0,944
310	0,567
Vascomax 300 CVM	0,743
4130 X-hart	0,727
Rein-Aluminium	0,685
Aluminium-Legierungen	
5456-H311	0,667
2014-T6	0,649
2024-T4	0,578
7075-T6	0,732
Titan-Legierungen	
Ti 6 Al 4 V	0,738
Ti 5 Al 2.5 Sn	0,567
Beryllium	0,353
Inconel	0,708

圖 1.

### 3. 繰返應力-歪曲線 (WechselflieB kurve, —Cyclicstress-straincurve)

例로서 Torsion으로 繰返시험을 하는 것을 들음.

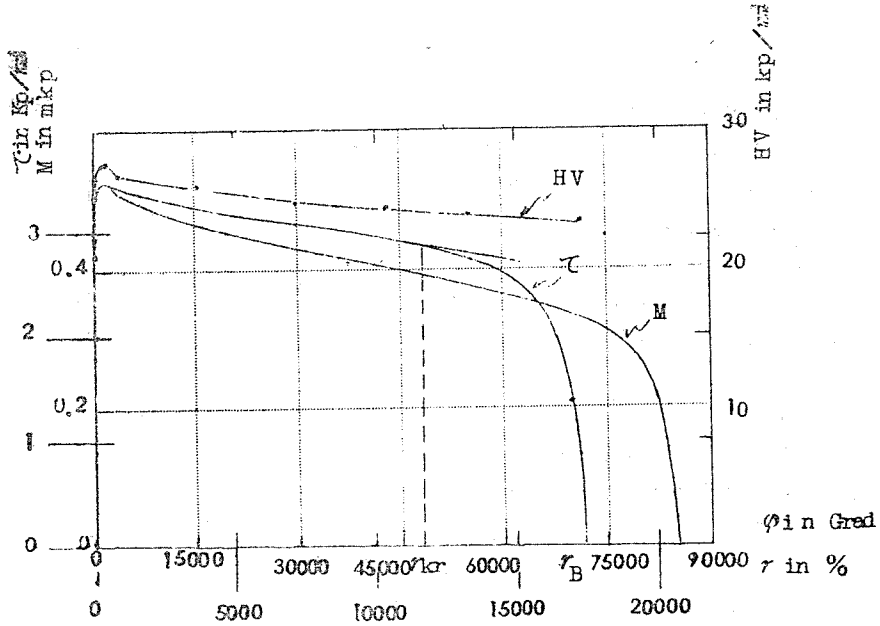
每應力 返回時의 最高應力(max. Drehmoment-max. twisting moment)  $\gamma_{ne}$ 을 연결함으로써, 全變形振幅(彈性變形과 塑性變形을 合한) 이  $\pm \gamma_a$ 인 경우, 每歪期(zyklus)當  $4 \cdot \gamma_a$ 의 變形이 생기며, 따라서 n回數때는 累積된 變形이  $n \cdot 4 \cdot \gamma_B = \sum |\pm \gamma_B|$ 이므로  $\sum |\pm \phi|$  대신 이 累積變形을 채용할 수 있음. 한편으로 Drehmoment(twisting moment)가 剪斷應力(Fließspannung-flow stress)  $\tau$ 에 비례되므로 이  $\gamma_{ne}$  대신  $\tau$ 을 채용함으로써 (圖 2)에 表示한것과 같은 曲線  $\tau$  對  $\sum |\pm \gamma_a|$ 를 얻음\*

\*(繰圖應力時, Torsion의 경우는 試料의 길이 가 變하기도 하므로 이것을 참조하여  $\tau$ 를 계산하면  $\gamma_{ne}$  對  $\phi$  曲線과  $\tau$  對  $\gamma_a$  曲線間에 差가 있게됨)

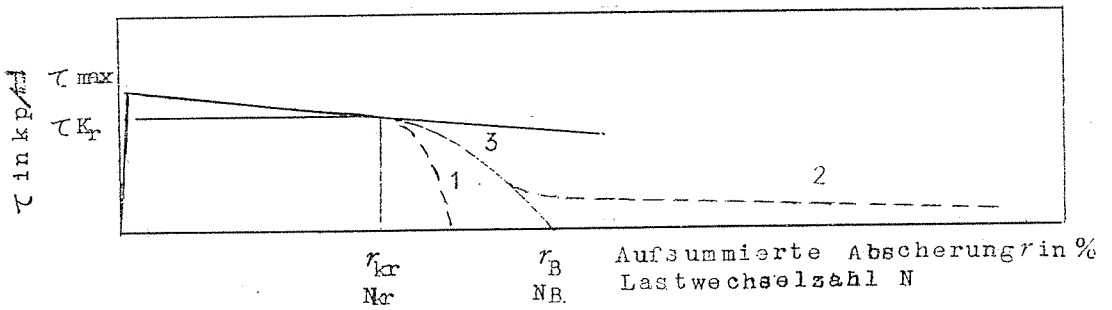
第一部分에서는 材料가 급속히 硬化됨.  $\tau$  max에 도달한 후에 軟化되는데(第二部分), 때로는 定常的인 또는 弱한 硬化의 현상을 보이기도 한 一般的으로 이 部分은 直線的인 경향이 있음.  $\gamma_{kr}$ 로 表示한 歪에서 이 線의 方向이 급작히 變함 다시 말하면 應力이 조급하게 低下됨.  $r_B$ 에서 試料가 파괴됨. 이 部分을 第三部分이라함.

이곳에서 특별히 설명해야 할것은 硬度시험 結果임. 硬度를 측함으로써 第一部分이 硬化와 第二部分의 軟化가 材料의 物性變化를 表示함을 알 수 있음. 이와는 반대로, 第三部分의 軟化는 物性變化에 依한것이 아닌것을 알 수 있음. 이 軟化現象은 龜裂의 成長에 依한 應力의 低下를 의미함. 다시 말해서 第三部分에서는 龜裂이 成長되어 一定한 크기에 達해서, Drehmoment가 감소되는 것으로  $\gamma_{kr}$ 는 龜裂에 依하여 試料의 支應力이 현저하게 低下되는 累積變形度를 의미함

特別히 重要한 것은 第三部分에서의 試料의 舉動임. 첫例로서 曲線 2를 들면 이 曲線은 試料의 正常的인 舉動을 表現한다고 할 수 있음.



(圖 2)에 表示한 曲線을 얻음(Drehwinkel-twisting angle을 사용).



Häufig auftretende "Wechselflie Bkurve".  
Schematisch dargestellt τ: Höchste  
Schubspannung Jedes Belastungszykluses

Häufig auftretende "Wechselflie Bkurve". Schematisch dargestellt τ: Höchste Schu  
bspannung Jedes Belastungs zykluses

繰返應力一週曲線은 一般的으로 三部分으로 組成되었음(圖 3)

그와는 반대로 試料가 급작히 파괴되는 경우도 있음(曲線 1). 이것은 一般的으로 刻目(Kerb, notch)에 의한 것임(試料제조시 우연히 생긴 刻目). 때로는 應力이 一部 低下되었다가 이值에 머물러서 많은 繰返回數를 持續하는 경우도 있음(曲線 3). 이런 曲線 3은 試料內에 縱龜裂이 생겨 應力繰返時마다 開方내의 締閉하는 경우 나타남.

다시 말하면  $\gamma_B$ 와  $N_B$ 의 值가 경우에 따라서는 (試料에 따라) 같은 振幅을 사용함에도 불구하고, 3~5倍의 差가 있을 수 있음.

간단히 지금까지의 설명을 종합한 繰返應力—歪曲線 利用하여 疲勞壽命을 定하는 評價法

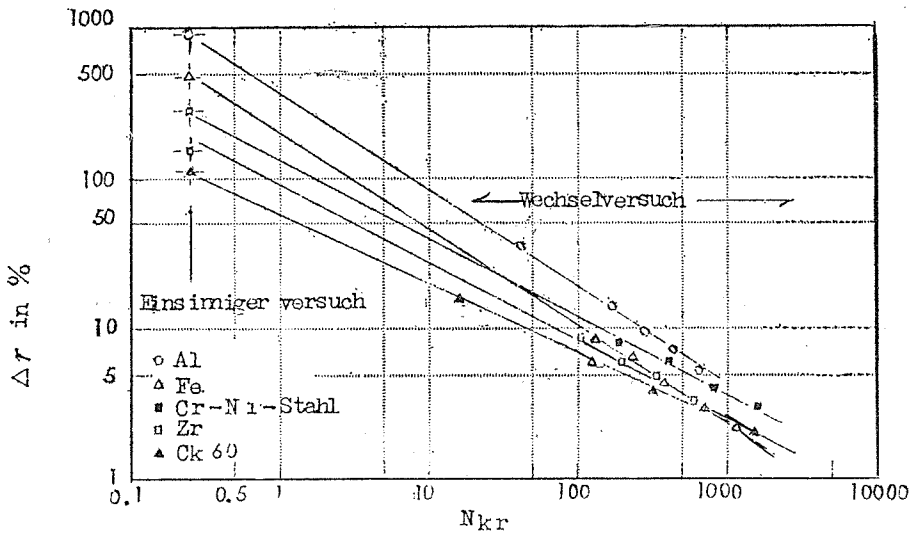
의 長點을 들면

A) 이 定義에 依하여 (臨界回數)를 정하면, 많은 試驗으로 統計적으로 平均壽命을 정하거나, 確率의인 해석이 필요없음.

B) 繰返應力時, 應力을 明白하게(현저하게) 低下시킬 수 있는 크기의 龜裂이 나타나는 臨界回數  $N_K$  를 材料의 壽命上, 機械的 破壞의 根本的原因으로 볼 수 있으며 따라서 소위 破壞回數인  $N_B$  에 비교하여 實用的 意義가 더 크다고 볼 수 있음.

C) 臨界回數  $N_{KV}$ 가 破壞回數  $N_B$ 에 비교해서, 疲勞現象의 理論의 추구에도 훨씬 적합한 크기라고 볼 수 있음.

(圖 4)에 振幅對 臨界回數 曲線의 例를 들음.



#### 4. 履歷現象(曲線型의 變化)

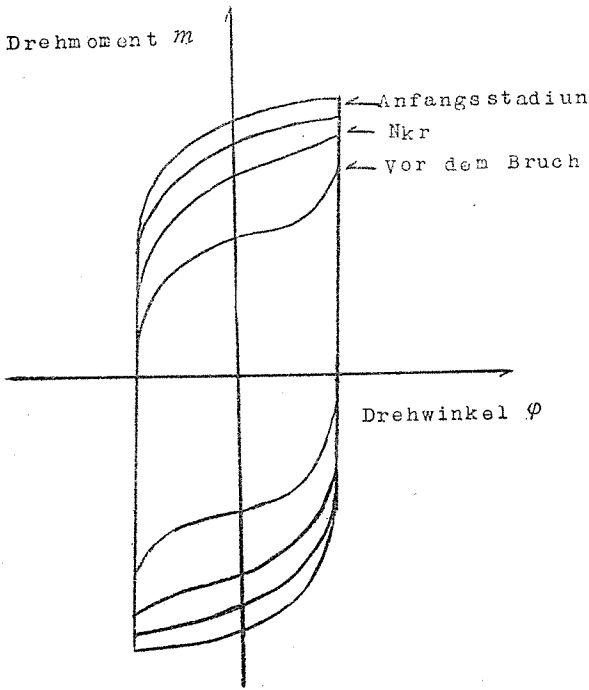
이곳에서는, 간단히 履歷現象을 추구함으로써 疲勞現象 회색에 이익이 되는점을 밝히려고 함.

圖 5에 型式의으로 Hysteresis를 보임. 繰返回數가  $N_{Kr}$ 을 도달하면 Hysteresis 曲線의 型이 變함.

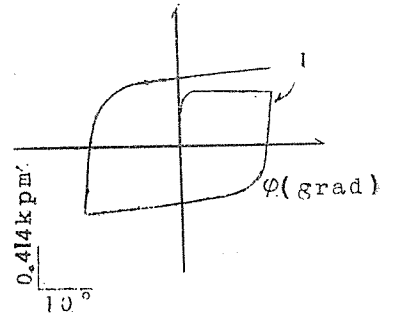
例로서 圖 6에 Zircaloy-2의 繰返回數에 따른

Hysteresis 曲線의 變型을 보임. 繰返回數가 臨界回數  $N_{Kr}$ 에 도달함으로써 龜裂이 成長되었는데 應力을 加하는 경우, 우선 龜裂이 締閉되어 이때는 적은 應力이 必要하며 이 현상이 曲線에 나타남.

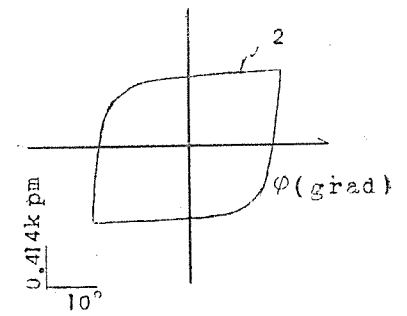
따라서 上記결과로 繰返應力—歪曲線外에 Hysteresis 曲線의 型도 臨界回數  $N_{Kr}$ 와 關聯이 있음을 알 수 있음.



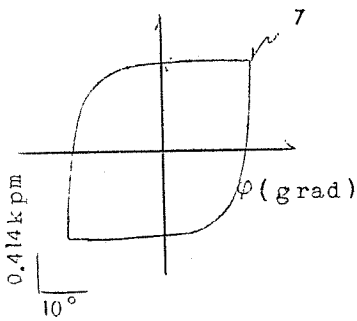
$m(kpm)$



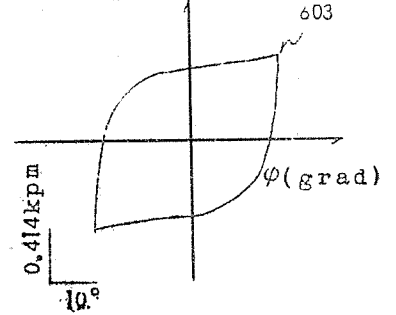
$m(Kpm)$



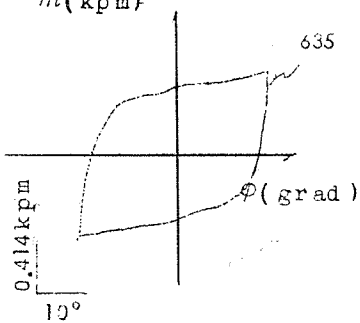
$m(Kpm)$



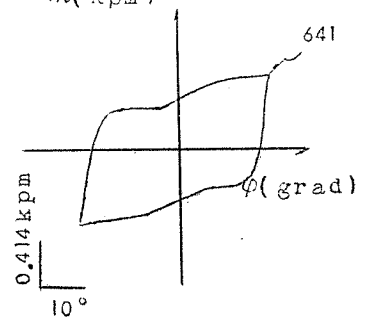
$m(kpm)$



$m(kpm)$



$m(kpm)$



### 5. Energie 曲線

Hysteresis 측정에 의한, 疲勞現象 연구上 또 하나의 利點을 간단히 설명함.

Hysteresis 曲線이 포함하는 面積은 다름이 아니라 每 線返應力時에 要하는 任事(Arbeit)의 척도임. 이 Arbeit이 一部는(大部分) 熱로 소모되고, 一部는 潛熱로 남음. 이 Energie는 塑性變形에 必要한 Energie를 의미하며, 이 Energie對 累積變形을 圖示하면 (7圖)의 曲線을 얻을 수 있음. 이 曲線을 Energie 曲線이라 하며, 線返應力-歪曲線과 비슷함. 다시 말하면 Nkr 각 Energie 曲線에도 나타나.

### 6. 破壞現象(龜裂成長) 龜裂 曲線

이제까지는 疲勞現象을 應力과 塑性變形을 사

용해서 해석했음. 疲勞現象을 破壞力學(Bruchmechanik)과 聯關시키기 위해서는 龜裂成長을 취급해야함. 시간상 이곳에서는 龜裂測定方法은 略하고 다만 龜裂曲線을 설명하겠음. 龜裂曲線은 龜裂長-累積變形 또는 龜裂長-線返回數를 表示하는 曲線을 의미함. 이런 曲線으로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있음.

龜裂曲線은 처음에는 서서히, 後에는 加速的으로 上昇함. 이 曲線이 서서히 進行하는 部分에서 加速的으로 上昇하는 部分으로의 臨界點이 바로 線返應力-歪曲線上의 臨界圖數 Nkr에 해당함.

이상으로 臨界圖數 Nkr가 疲勞現象 연구에 큰 역할을 함을 알 수 있음. 다음에는 이 評價法의 實在的 응용을 線返應力當의 溫度 및 滯留期間을 고려함으로써 설명하려고함.

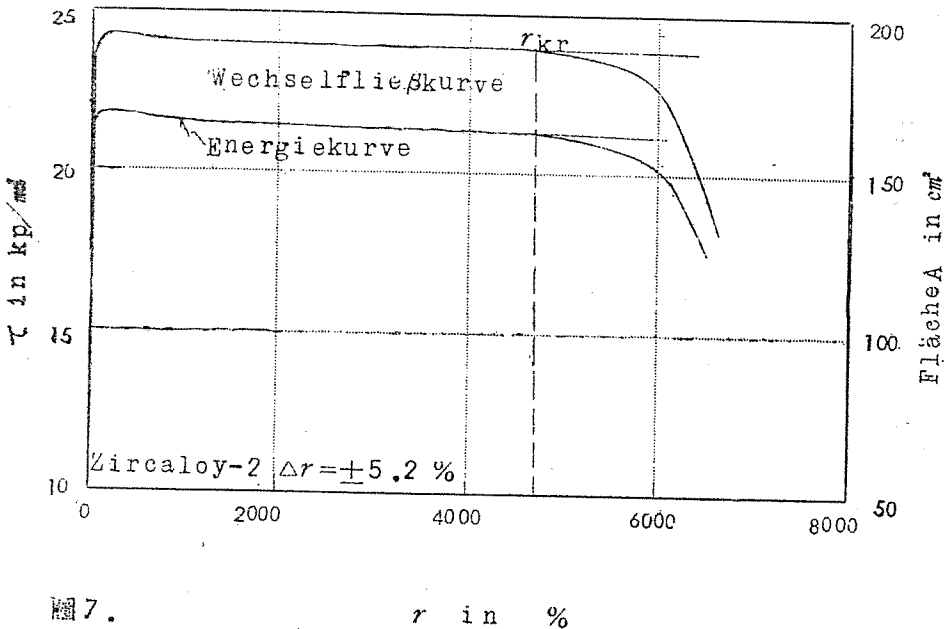


圖 7.

$r$  in  $\%$