

講 座

金 屬 強 化 法 (4)

이종남* 한상우**

4. 가공에 의한 강화

금속의 대부분은 큰 延性を 나타내지만 변형이 진행함에 따라 변형을 계속시키기에는 보다 큰 응력을 필요로 하게 된다. 이와 같은 현상을 加工硬化(work hardening) 또는 變形硬化(strain hardening)이라 한다. 이때 변형의 각 단계에 있어서의 降伏應力은 變形應力(또는 유동응력 flow stress)이라 불리운다.

Al, Cu와 같은 변심입방점 금속의 단결정의 應力-變形曲線은 그림 33에 나타낸 바와 같이 변형경화에 있어서 명확한 I, II, III의 단계가 나타난다. 제 I 단계는 슬립이 잘 일어나는 區域(easy glide region)이라 부르고 전단응력성분이 가장 높은 방위의 슬립계(一次 glide 계)가 작용해서 변형하는 過程으로서 變形硬化가 적다. 제 2 단계는 변형경화가 가장 크고 응력이 變形과 직선적 관계로 상승하는 区域으로서 직선경화구역(linear hardening region)이라 부른다. 이 단계에서는 一次 slip계와 교차하

는 slip계에서도 slip은 일어난다. 소위 다중 슬립(multiples slip)이 일어나서 전위 밀도가 증가하고 이것이 불균일한 분포로 되어 서로 균형을 이루어 세포상의 cell 조직(cell structure)을 형성하게 된다. 변형이 다시 증가하게 되면 cell의 크기는 감소하고 전체의 전위밀도는 증가하며 cell 벽의 전위밀도가 한층 높아진다. 제 II 단계에서는 전위의 반응에 의해서 생긴 不動轉僞, 雙晶境界에 전위가 차례 차례로 쌓여서 내부응력은 증가하거나 혹은 형성된 cell벽에 의해서 전위의 운동이 억제되어 변형경화(Strain hardening)가 커진다. 제 III 단계에서는 응력이 가해진 상태에서 나선전위는 교차슬립을 일으키고 edge 전위는 上昇運動을 하여 障害物을 迂回하든가 혹은 뛰어넘든가 하여 운동하게 된다. 이 때문에 변형경화는 다시 작아지는 단계로 되며 이를 抛物선 경화구역(parabolic hardening region) 또는 동적회복 구역(dynamic region)이라 부른다. Fe나 Nb과 같은 體心六方晶金屬의 單結晶에서도 이와 비슷한 應力-變形曲線을 나타내지만 이들의 金屬에서는 面心六方晶金屬에 比해서 變形開始應力은 一般的으로 높고 제 II 단계의 加工硬化는 작아진다. 그리고 Mg나 Zn과 같은 精密六方晶金屬에서는 거의 底面슬립만으로서 변형하기 때문에 슬립이 잘 일어나는 区域(제 I 단계)이 대단히 길어지고 가공경화도 작다.

多結晶體에서도 그림 34¹⁵⁾에 나타낸 바와 같이 가

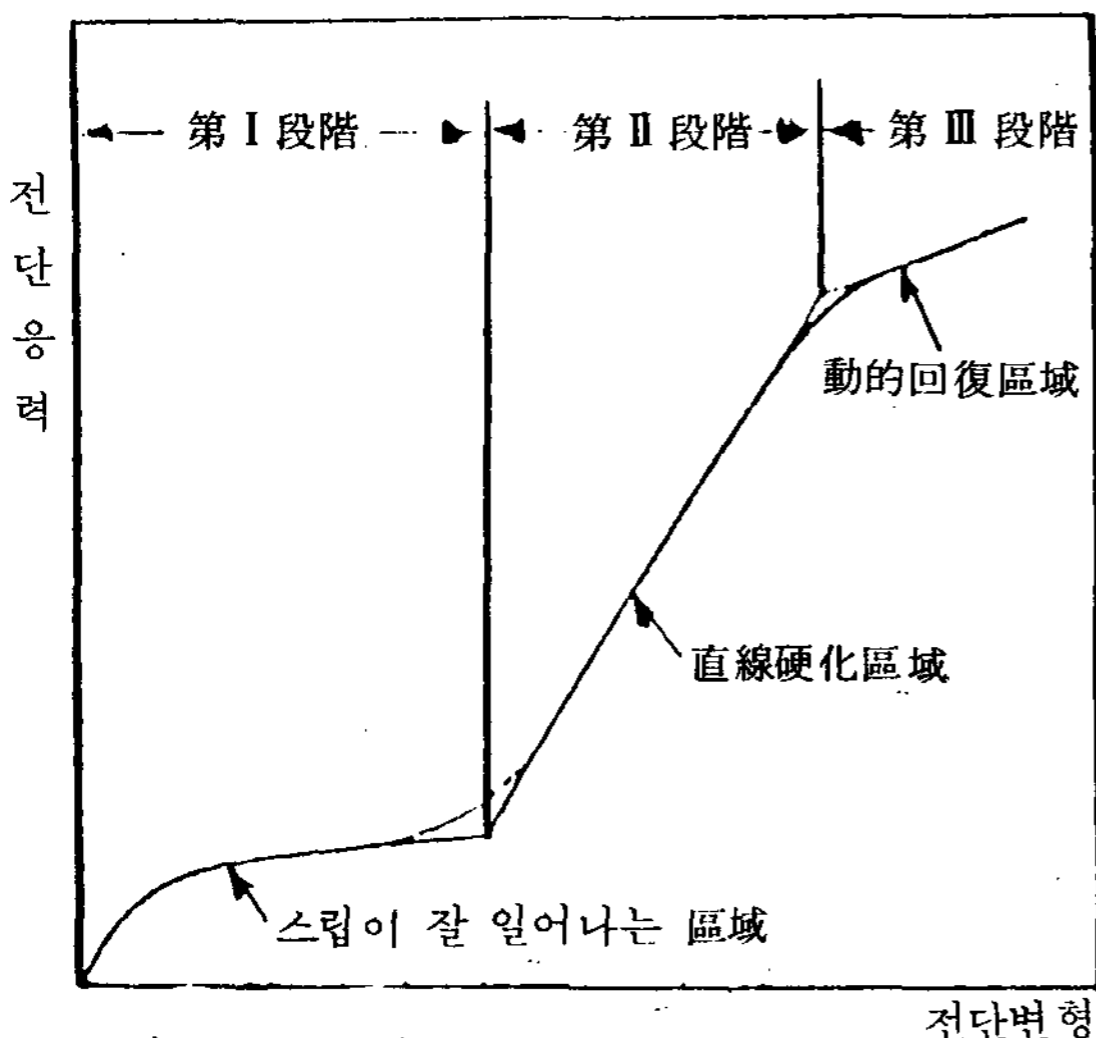


그림 33 單結晶의 應力-變形曲線

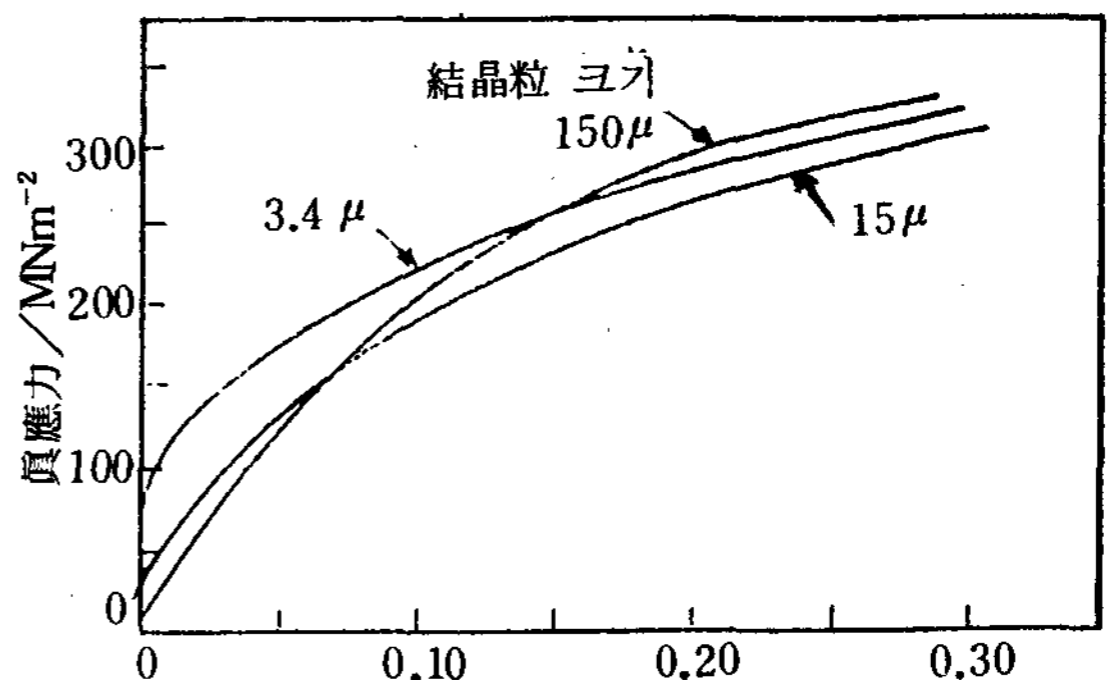


그림 34 多結晶鋼의 應力-變形曲線

* 高麗大學校 工科大學教授
** 高麗大學校 大學院

공경화가 현저하게 크고 응력-변형곡선은 제 II, 제 III 단계만으로 된다

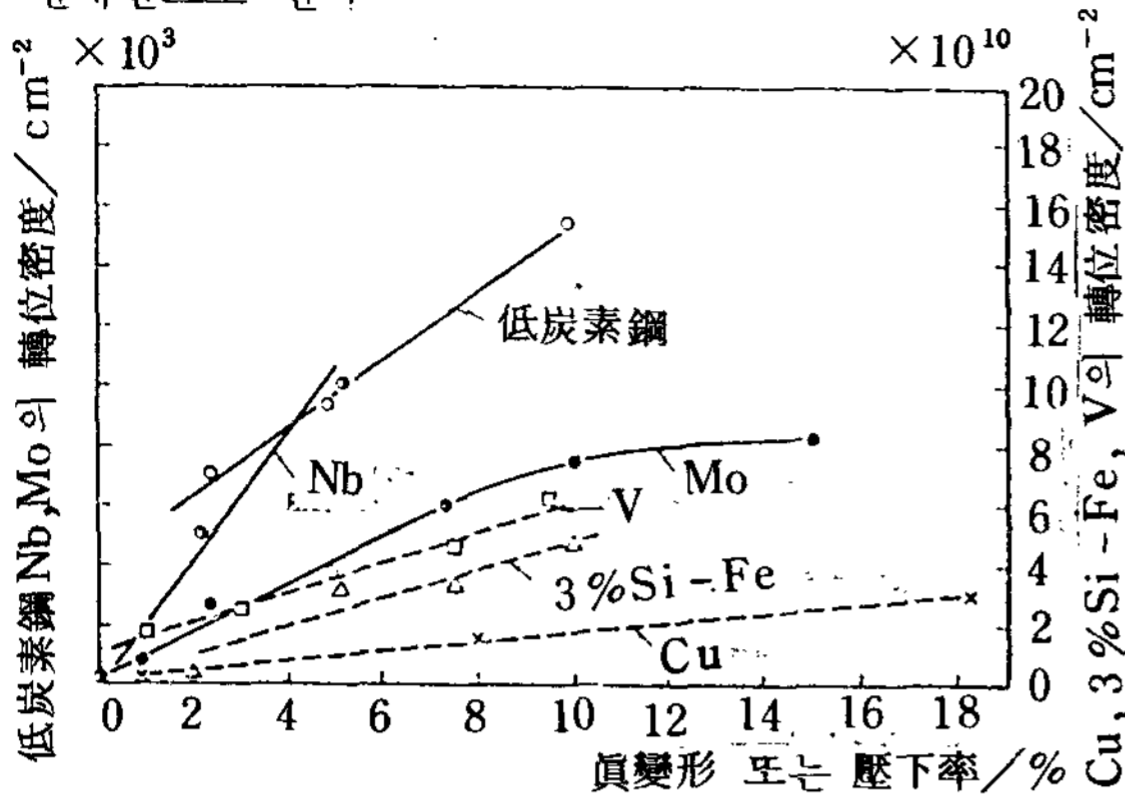


그림 35 塑性變形에 의한 轉位密度的變化

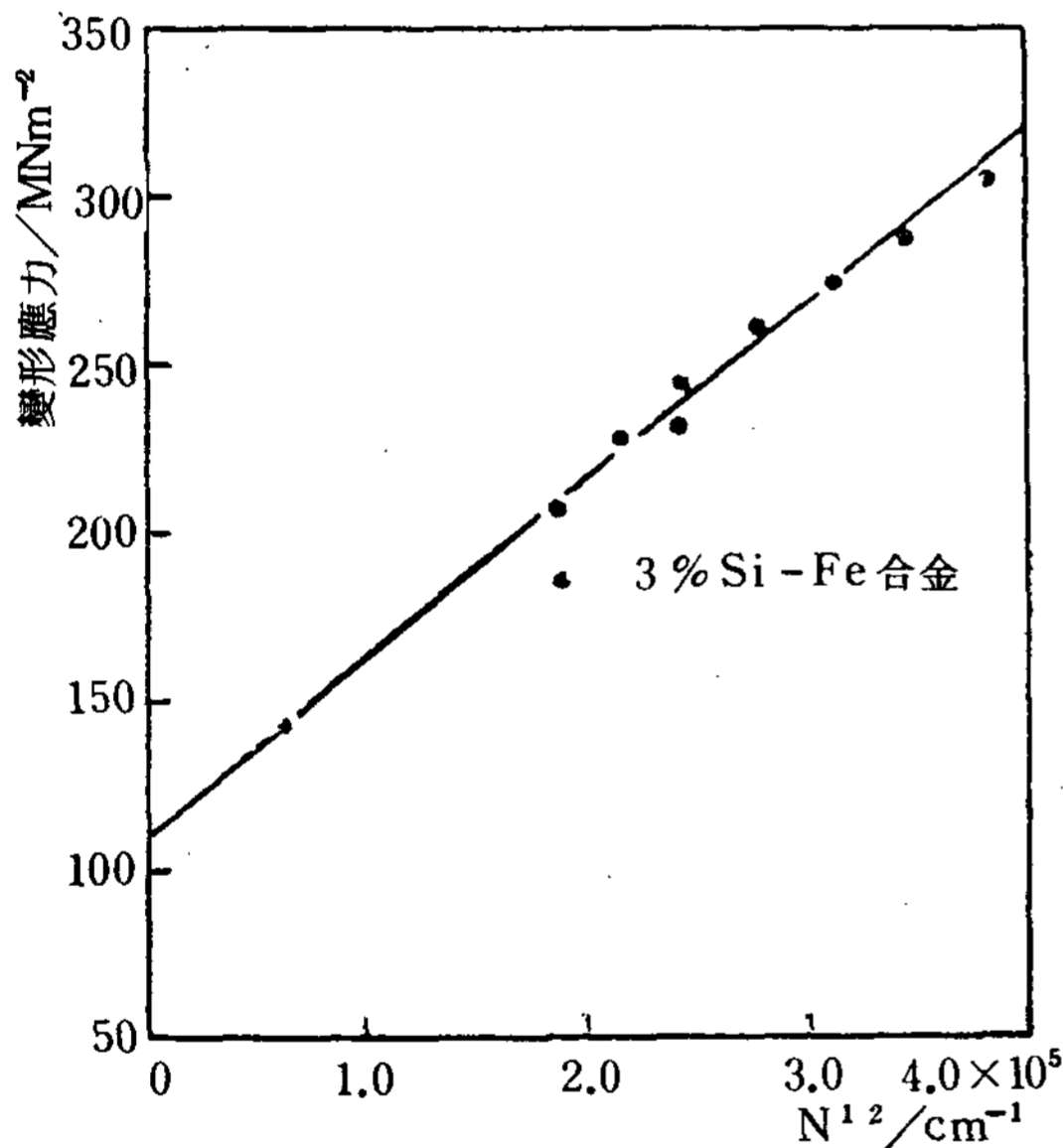


그림 36 轉位密度와 變形應力の關係

이와같이 변형의 진행과 함께 전위밀도가 증가해가지만 변형에 의한 전위 밀도가 변화하는 모양을 그림 35에 나타내었다.

cell 조직을 나타내는 경우 cell 벽과 내부의 평균치로서 나타낸다. 전술한 바와 같이 전위와 cell 벽은 운동하는 전위에 대하여 장애가 되어 가공경화가 일어나지만 그림 36¹⁶⁾는 전위밀도와 변형응력과의 관계를 나타낸 것이다. 변형응력 τ 와 전위밀도 N 의 사이에도 다음의 관계가 성립한다.¹⁷⁾

$$\tau = \tau_0 + \alpha Gb\sqrt{N}$$

여기에서 τ_0 는 전위의 운동에 대한 마찰력, G 는 강성을, b 은 burger's vector의 크기이다. α 의 값은

로서 Fe에서는 약 0.4, Mo에서는 0.36, Nb에서는 0.44, V에서는 0.43이 얻어진다.

이와같이 금속은 소성변형에 의해서 현저하게 강화되고 석출물이나 분산입자를 함유하는 경우 한층더 경화가 심하게 일어난다. 그러나 가공경화된 금속은 一般的으로 靱성이 低下하기 때문에 주의하지 않으면 안된다.

5. 結晶粒子的 微細化에 의한 강화

공업적으로 쓰이는 금속재료는 대부분 多結晶體이다. 多結晶體에서는 각 결정립은 그의 방위가 다르기 때문에 입체는 전위의 운동에 대하여 불연속적이고 장벽으로 된다. 따라서 단위 체적중에 포함되는 장벽이 많은가 또는 적은가에 따라서 전위가 받는 저항이 다르다. 다시 말해서 강도는 결정입의 크기에 좌우되게 된다. 그림 37¹⁸⁾은 결정입의 크기와 항복강도와의 관계를 나타내는 실험결과이다. 이 예에서 볼 수 있는 바와 같이 항복강도 σ 와 결정입자의 크기 d 와의 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

여기에서 σ_0 , k 는 결정입자의 크기에는 무관한 응력 및 상수이다. d 는 평균 結晶粒徑이다. 상기식은 처음으로 patch에 의해서 실험적으로 확인된 것으로서 patch의 관계¹⁹⁾(patch realation) 또는 Hall-patch관계라고 불리우며 오늘날까지 많은 금속 및 합금에 대해서 성립된다는 것이 나타나 있다. 또한 이 관계는 이론적으로 도출되어 있다. 이와같이 다결정 재료에서는 결정립의 미세화가 금속의 강화에 크게 기여하고 있다. 그리고 결정립자의 미세화에 의한 강화는 연성이나 인성을 해치지 않기 때문에 금속의 강인화법으로서 특히 중요하다.

전술한 바와 같이 금속의 가공경화의 제 II 단계에서는 cell의 조직이 형성되지만 이 cell 조직을 갖는 금속을 가열하면 cell의 벽이 서서히 좁아져서 입상을 나타내게 된다. 이러한 경계면을 亞粒界(sub-boundary)라 한다. 이 경계에 의해서 둘러 싸이는 구역을 亞結晶粒(sub grain)이라 한다. 이 아입계(sub boundary)도 전위의 운동에 대하여 장벽으로 되기 때문에 아결정입의 형성도 금속의 강화에 중요한 인자로 된다.

그림 38^{19,20)}은 아결정입의 크기와 항복강도와의 관계를 나타낸 것이다. 아결정입의 크기 l 과 항복강도 혹은 변형응력 σ 의 사이에는 다음의 관계가 있음을 알

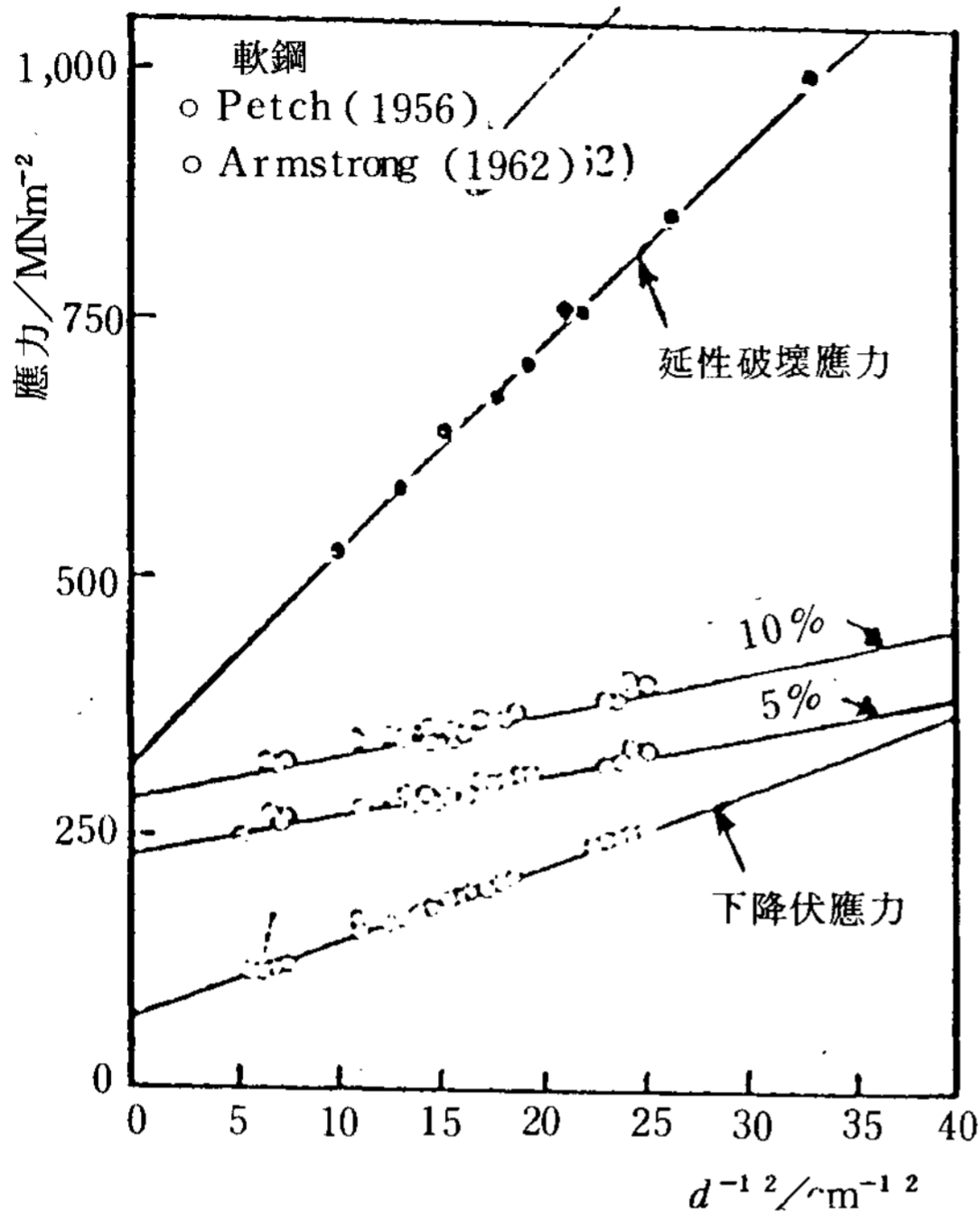
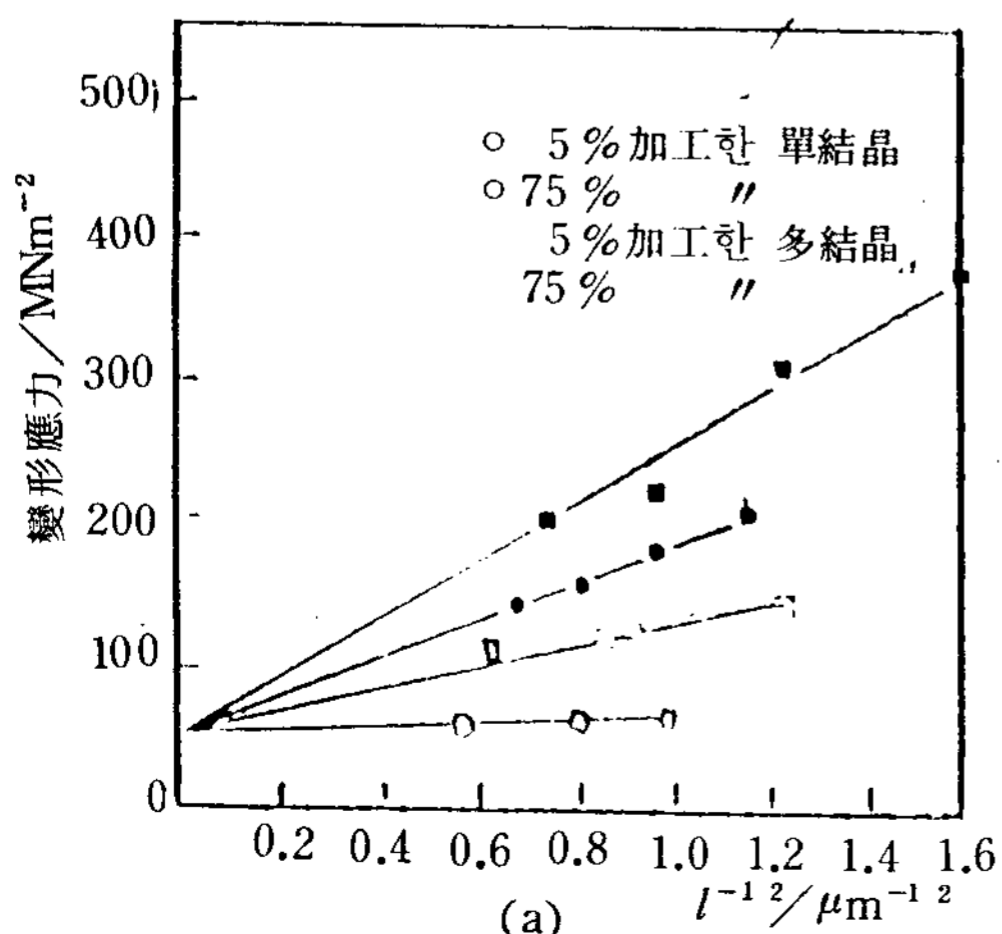


그림 37 結晶粒의 크기와 降伏, 變形 및 破壞 應力

수 있다.

$$\sigma = \sigma_0 + A l^m$$

여기에서 σ_0 및 A는 마찰응력 및 상수이고 sub grain의 크기에는 의존하지 않는 량이다. m의 값으로서 그림 38에서 보는바와 같이 -1/2과 -1의 경우가 보고되어 있다. m의 값에 따라 같은 아결정립의 크기라도 강도의 정도는 달라지지만 아결정립의 미세화도 역시 금속의 강화에 있어서 큰 인자이다. 아결정립의 경우 인접하고 있는 아결정립의 방위차가 작



(a)

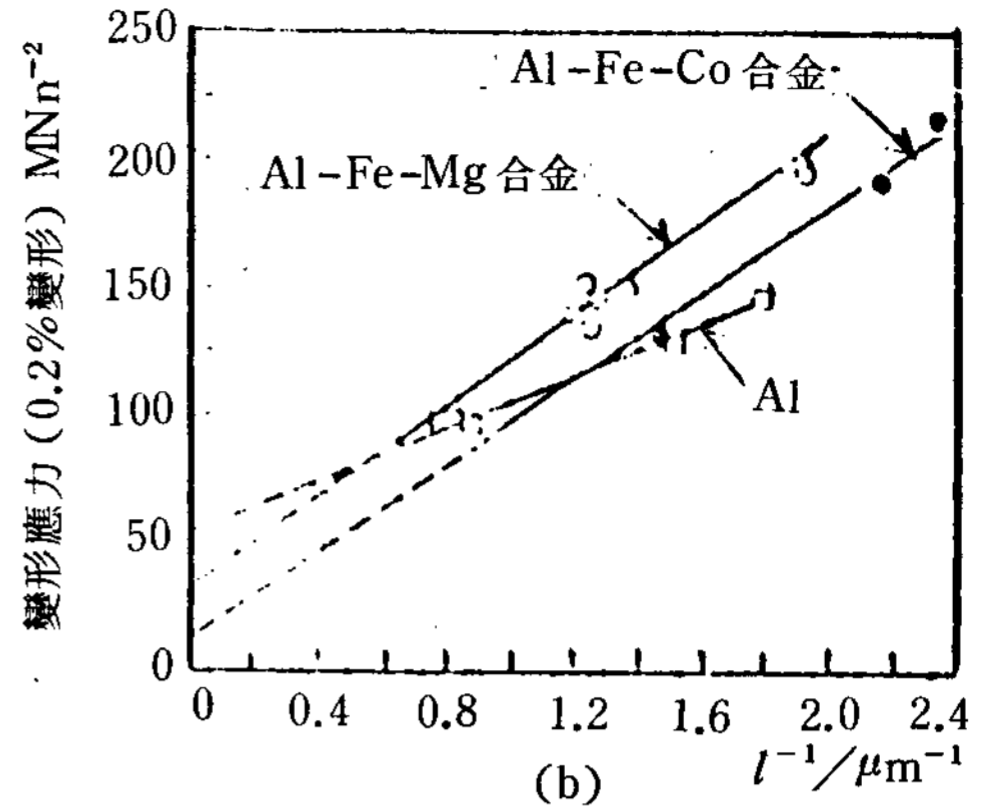


그림 38 아결정립의 크기와 變形應力의 關係

기 때문에 전위의 통과를 허용한다든가 혹은 장벽의 역할을 하므로서 경화와 동시에 靱性化에도 유효하다는 것이 나타나 있다.

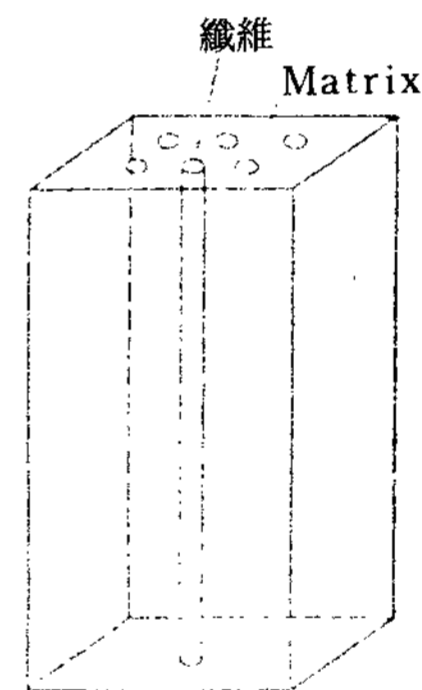


그림 39. 纖維強化金屬 (模型圖)

6. 섬유에 의한 강화

그림 39에 나타낸 바와 같이 금속중에 다 강력한 섬유를 매립하여 전체적으로 볼때 소재 단독으로서는 얻을 수 없는 성질을 발휘할 수 있도록 한 섬유강화 금속 (fiber reinforced metal) 이 있다. 이 원리는 부하된 응력을 매립된 섬유에 분담시켜 素地金屬은 다만 섬유를 고정하고 그의 계면에서 강력하게 적합하여 응력을 섬유에 전달하는 역할을 수행하도록 하는 것이다. 이것은 전술한 전위의 운동에 대한 장애물을 여러가지 형태로 배치한다든가 또는 증가시킨다든가 하는 강화법과는 원리적으로 다르다. 섬유는 연속적인 경우와 불연속적인 경우가 있는데 전자에는 금속 섬유가 있고 후자에는 whisker 결정이 있다. 표 2에 섬유강화금속으로 쓰이는 섬유의 강도 용점 등이 나

타나 있다. 소지 금속은 현재 Al, Cu, Ni 및 Ag 등이 사용되고 있다.

섬유강화 금속은 일반적으로 섬유의 방향에 응력이 가해질 수 있도록 이용하지만 소지와 섬유가 강력하여 접합되어 있는 경우 탄성계수나 인장강도에 대해서는 다음과 같이 혼합의 법칙이 성립한다.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

$$\sigma_c = \alpha_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

여기에서 E, σ 및 V는 탄성계수, 인장강도 및 체적률로서 첨자 c는 복합재료를 의미한다. f, m은 각기 섬유 및 소지의 값을 나타낸다. 그림 40²¹⁾에 다 복합에 의한 탄성계수의 변화를 나타내고, 그림 41²¹⁾에 항복강도의 변화를 나타내었다.

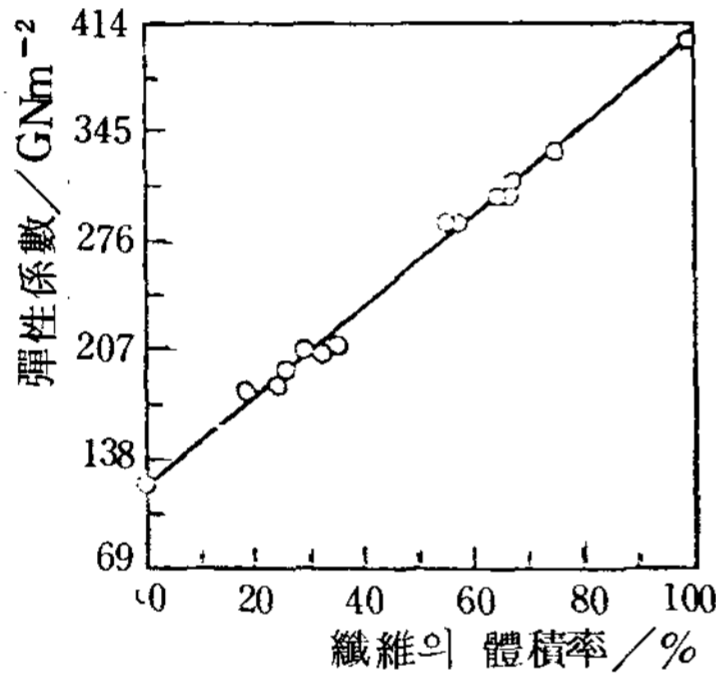


그림 40 Cu-W 복합材의 降伏强度와 W 纖維의 體積率 과의 關係

Al₂O₃ whisker, SiC whisker 혹은 Graphite 등의 섬유는 내열성이 우수하기 때문에 (그림 42²⁰⁾)

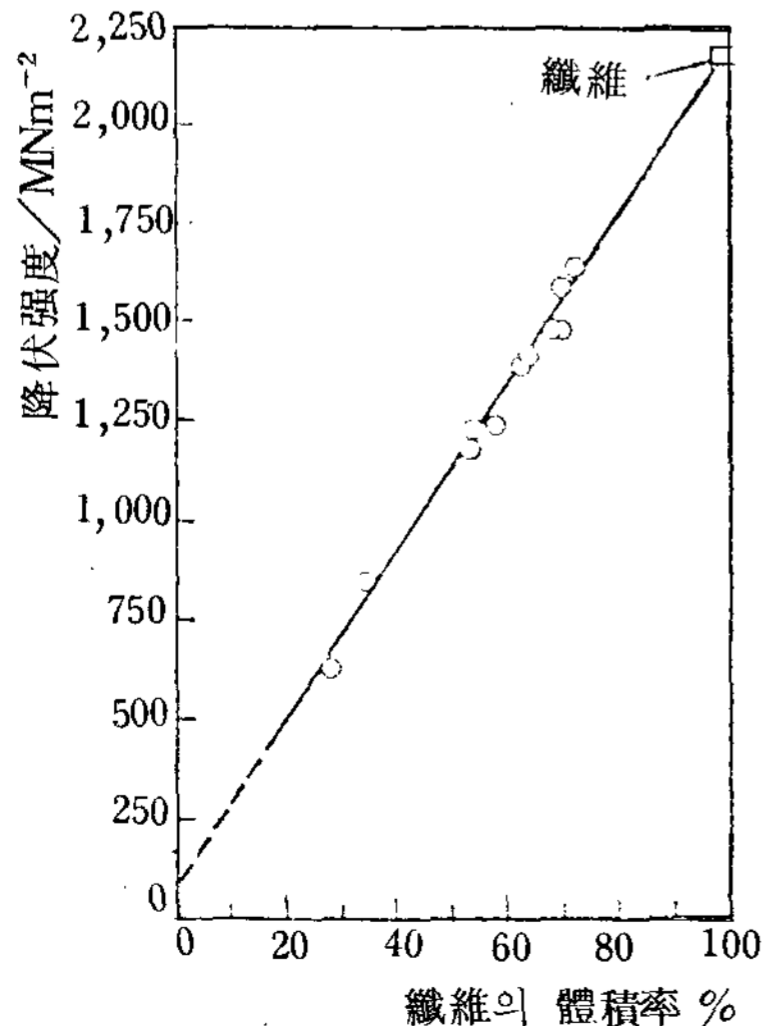


그림 41 Cu-W 纖維 - 複合材의 彈性係數와 纖維의 體積率의 關係

이들을 섬유로서 이용한 섬유강화 금속은 그림 43에 나타낸바와 같이 내열성이 우수하다.

표 2 纖維의 性質

纖 維	引張强度 GNm ⁻²	彈性係數 GNm ⁻²	融 點 ℃
휘 스 카 SiC	20.7	483~863	> 2200
Al ₂ O ₃	42.8	483~2277	2000
그 라 화 이 트 纖 維	20.7	1001	> 3000
호 소	2.07	455	2200
글 라 스	4.83	85.4	760 (軟質)
베 리 움	1.52	290	1285

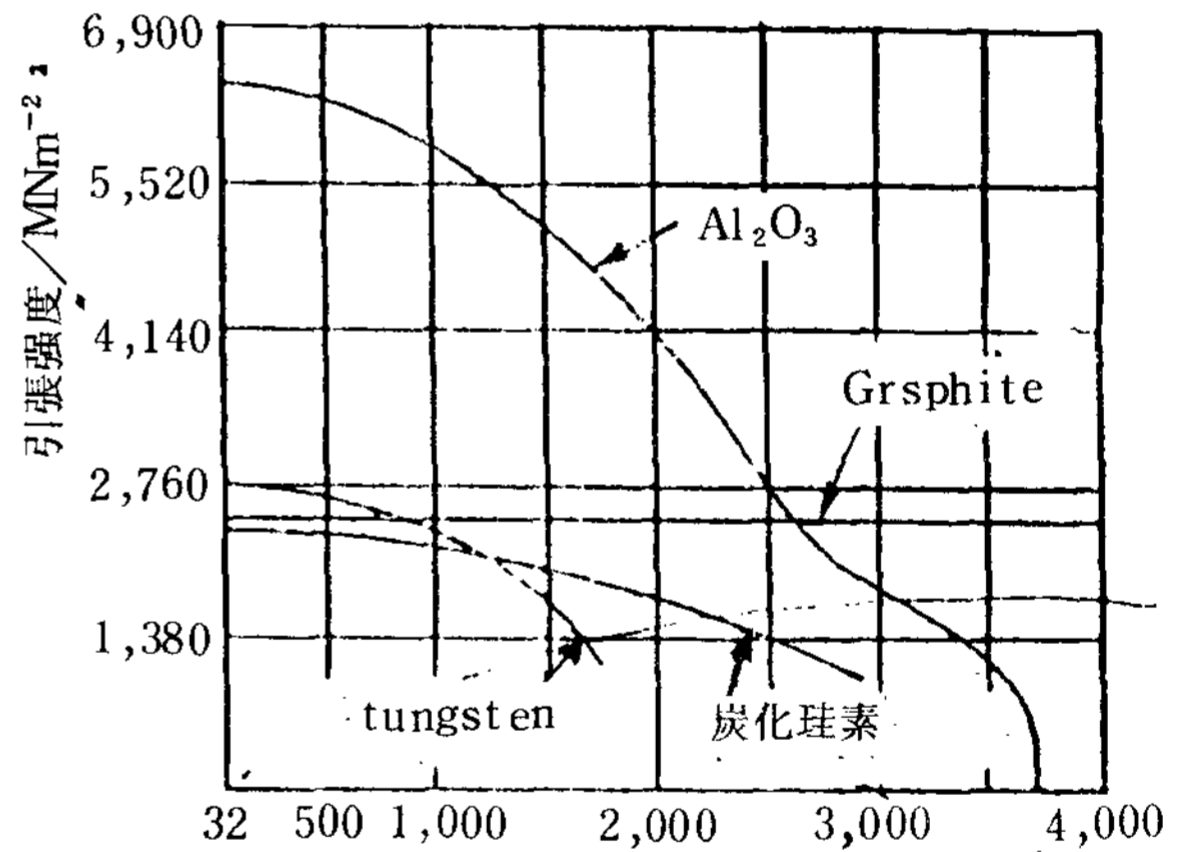


그림 42 纖維의 耐熱性

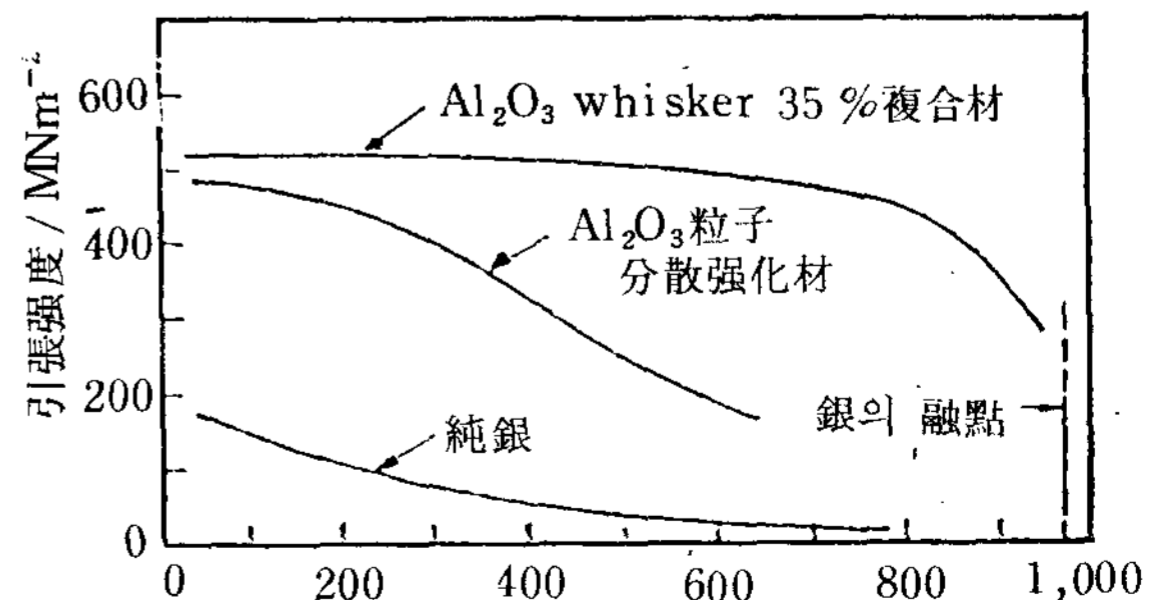


그림 43 銀을 Al₂O₃ whisker Al₂O₃ 粒子로서 強化한 複合材의 高溫에 있어서의 强度

參 考 文 獻

1. 鈴木秀次 : 物性物理學 講座, 9 (1958) p. 251, 共立出版
2. R.S. French, W.R. Hibbard: Trans. AIME, 188 (1950) p. 53.
3. N.P. Allen, H.T. Schofield, A.E.L. Tate: Nature, 168 (1951) p. 378.
4. E. Stephenson: Trans. A.S.M., 55 (1962) p. 624.
5. H. Suzuki: Sci. Rep. RITU, A4 (1952) p. 455.
6. V. Gerold: Z. Metalk., 45 (1954) p. 593.
7. J.B.M. Nuyten: The World through the Electron Microscope, Metallurgy IV (1968) p. 56, 日本電子
8. N.F. Moft, F.R.N. Nabarro: Proc, Phys. Soc., 52 (1940) p. 86.
9. E. Orowan: Symposium on Internal Stress in Metals and Alloys (1948) p. 451, Inst. Metals, London.
10. J.C. Fisher, E.W. Hart, R.H. Pry: Acta Met., 1 (1953) p. 336.
11. M. Gensamer: Trans. ASM, 36 (1946) p. 44.
12. E.S. Davenport, E.C. Bain: Trans. ASM, 47 (1959) p. 380.
13. R.O. Williams: Trans. AIME, 212 (1958), p. 497.
14. 日本鐵鋼協會, 日本金屬學會編 : 鐵鋼材料便覽 (1967) p. 610, 丸善
15. J.J. Gilman. J. Appl. Phys., 31 (1960), 2208.
16. S.S. Brenner, J. Appl. Phys., 27 (1956), 1484.
17. E. Orowan, Z. Krist., 89 (1934), 327.
18. A.A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc., A221 (1920), 163.
19. J.P. Berry, J. Folymer Sci., 50 (1961), 313.
20. E. Orowan, Trans. Inst. Engrs, Shipbuilders Scotland, 89 (1945), 165.
21. J.F. Knott, Fundamentals of Fracture Mechanics, (1973), Butterworth, 116.
22. B.A. Bilby, et al., Proc. Roy. Soc., A272 (1963), 304.



회 원 동 정

- 경신호 회원 : 한국오일레스공업(주) 부사장에 취임
- 강영기 회원 : 진주소재 동양금속공업(주) 로 전직
- 김병기 회원 : 국제종합기계(주) 에서 창원소재 창신산업(주) 로 전직
- 김정기 회원 : 태주실업(주) 에서 창신산업(주) 으로 전직
- 김태환 회원 : (주)대원사 포항공장에서 서울본사기획실로 전보발령
- 서우란 회원 : 인천제철(주) 에서 금남주철로 전직
- 안정현 회원 : 대한조선공사(주) 에서 현진공업(주) 로 전직