

# 복합조직 금속의 나노역학특성 vs. 매크로역학물성

석무영, 장재일

한양대학교 신소재공학부

## 1. 서론

일반적인 금속 구조재료에서는 강도가 증가하면 인성(또는 연성)이 감소하게 되므로, 금속 구조재료는 사용되는 환경에 따라, 높은 응력을 받는 부분에는 강도가 높은 재료가, 또 높은 인성이 요구되는 부분에는 인성이 높은 재료가 우선적으로 적용되어야 한다. 금속 구조재료의 강도와 인성은 합금설계 및 열/기계적 처리 공정과 그에 따라 정해지는 조성 및 미세조직으로부터 결정되기 때문에, 우수한 물성의 재료를 개발하기 위해서는 이들 각각을 조절함으로써 기계적 물성을 최적화 해야 한다. 따라서, 고성능의 구조용 금속 재료를 개발하는데 있어서 합금원소 성분과 미세조직이 기계적 물성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것은 필수적인 단계이다. 하지만, 기존의 연구에서는 경도를 제외하고는 각각의 미세조직 특성을 실험적으로 직접 평가하기에는 많은 한계점이 있어왔고, 최근들어 이를 극복하고 다양한 물성(예로 들면 응력-변형을 곡선 등)을 평가하고자 하는 연구들이 진행되

고 있다[1]. 이에 본 고에서는, 복합조직을 가진 구조용 금속재료의 가장 중요한 미세조직적 인자인 각 구성상(constituent phase) 및 결정립계(grain boundaries)의 나노역학특성을 직접적으로 평가하고 이를 통해 매크로역학특성을 예측하려는 최근의 연구들을 소개하고자 한다.

## 2. 나노역학특성으로부터 매크로역학물성의 예측 연구 사례

### 2-1 각 구성상의 나노압입시험 결과를 이용한 매크로 유동곡선 예측

일반적으로 서로 다른 강도를 가지는 상(phase)들로 이루어진 복합조직 금속은 단상조직을 가지는 금속 재료에 비하여 상대적으로 우수한 강도-인성, 또는 강도-가공경화능 등의 기계적 물성 조합을 가지는 것으로 알려져 있다[2-4]. 예를 들어, Ishikawa 등[2]은 복합조직을 가진 구조용 강재가 단상조직의 강재에 비하

여 강도가 크게 저하되지 않으면서도 훨씬 뛰어난 변형특성을 나타낸다고 보고한 바 있다. 이러한 복합조직 금속의 매크로 역학특성(macroscopic mechanical properties)을 예측할 때, 각 구성상의 물성을 알 경우 매우 유용하게 활용할 수 있다고 알려져 있지만 [2,4,5], 지금까지의 연구 대부분은 그 물성이 정도에 한정되어 있었고, 유동곡선(응력-변형률 곡선)과 같이 역학적으로 직접 활용할 수 있는 정보를 얻는 데에는 한계가 있었다. 하지만, 이러한 어려움은 나노압입시험을 수행할 경우, 어느 정도 극복할 수 있다.

계장화 나노 압입 시험 (instrumented nanoindentation test)은 일반 경도 시험법과 다르게 압입자를 시험 재료에 압입하면서 연속적으로 측정된 하중-변위(load-displacement) 자료로부터 재료의 물성을 측정하는 시험법으로써, 1980년대 중반 이후 그 실험장비가 상용화되고 물성 측정 절차가 정립되면서 아주 작은 대상의 재료 변형거동을 규명하고 정량적으로 측정하는 데에 가장 중요한 시험 방법 중의 하나로 각광받아 왔다.

압입시험시, 재료는 압입하중에 의해 소성변형이 발생하게 되며, 특히 압입자 하부를 중심으로 소성영역이 발생한다. 이때, 압입시험에서 일반적으로 많이 사용되는 벌코비치 압입자(Berkovich indenter) 등의 삼각뿔 형태의 첨단압입자(sharp indenter)의 경우(그림 1(a)), 압입되는 깊이가 증가할수록 소성영역의 크기는 커지지만 압입자와 접촉면의 각도가 계속 일정하게 압입되기 때문에 그 형태가 유지되고 압입 하중에 관계없이 일정한 평균접촉응력값(mean contact pressure)과 압입자 하부의 대표압입변형률(representative indentation strain)을 가진다. 이와 같은 현상을 압입자의 기하학적 자기 유사성(geometrical self-similarity)이라고 한다[6,7]. 따라서, 이론상으로는 하나의 첨단압입자만을 사용할 경우, 하나의 특정 응력-변형률 상태만을 나타낼 수 있기 때문에 응력-변형률

관계를 얻기 힘들다.

반면 구형압입자의 경우, 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 압입깊이가 증가하면서 압입자와 재료 표면 사이의 접촉각도가 계속해서 증가하고, 따라서 응력과 변형률이 탄성 영역에서 탄소성 영역, 완전소성영역으로 발전하는 과정을 모두 나타낼 수 있다. 따라서 첨단압입자와 달리 하나의 압입자만을 이용하여 응력-변형률 거동을 평가할 수 있다. (자세한 과정은 참고문헌 [1] 참조)

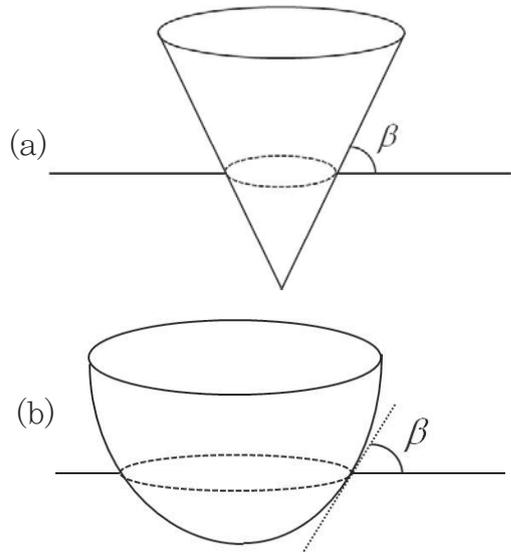


그림 1. (a) 첨단압입자 및 (b) 구형압입자의 표면접촉에 대한 개략도

주의해야할 점은 나노압입시험으로 구한 유동곡선의 경우, 실제 일축시험으로 얻은 유동곡선과 직접적으로 비교할 수 없다는 점이다. 왜냐하면, 나노압입시험을 통해 얻어진 결과에는 압입크기효과(Indentation size effect)가 포함되어 있기 때문이다. 첨단압입자의 경우 압입깊이에 따라서 압입크기효과가 나타나는 반면, 구형압입자의 경우 압입자 반경이 작아질수록 경도값이 증가하는 것으로 알려져 있다[8]. 따라서, 각 상이

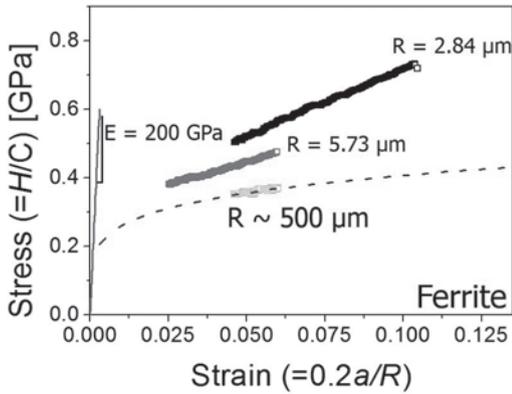


그림 2. 압입자 반경(R)이 다른 두 개의 구형압입자를 이용한 구성상의 유동곡선 예측 예[1].

나타내는 매크로한 유동곡선을 유추하고자 할 경우, 적어도 2개 이상의 압입자 반경이 다른 구형압입자를 사용하여 각 압입자의 유동곡선 결과를 얻은 후, 이 둘 사이의 관계로부터 매크로 한 영역으로의 확장시 예상되는 유동곡선을 예측하여야 한다. 그림 2에는 저탄소 강의 페라이트 상에 대하여 구형나노압입시험으로부터

구한 매크로 유동곡선 예를 나타내었다.

이렇게 구한 각 구성상의 유동곡선으로부터 복합조직 금속재료의 거시적 물성을 예측하는 방법으로는 등변형율 방법(Isostrain method)과 비등변형율 방법(non-isostrain method)이 있다[1]. 그림 3에서는 예측한 유동곡선과 실제 일축인장시험으로 얻은 유동곡선의 비교 예를 나타내었는데[1], 그림에서 볼 수 있듯이, 예측한 유동곡선이 일축인장시험 결과와 대체로 잘 맞게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 다만, 그림에서 실측치가 예측치에 비해서 같은 변형률에서 응력 값이 다소 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 다음 절에서 다룰, 결정립계의 영향이 배제되었기 때문이라고 판단된다.

## 2-2. 나노압입시험을 이용한 결정립계 강화지수 (k) 평가

앞서 언급하였듯이, 일반적으로 복합조직 금속재료의 강도는 주로 구성상의 강도와 분율에 의해 크게 영향을 받지만, 그 다음으로 결정립계의 영향 또한 무

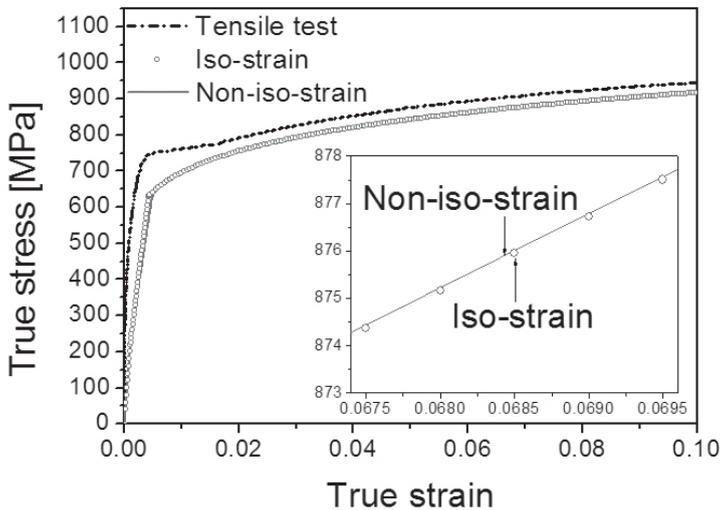


그림 3. 나노압입시험으로부터 예측한 유동곡선과 일축인장시험 유동곡선 비교 예[1]

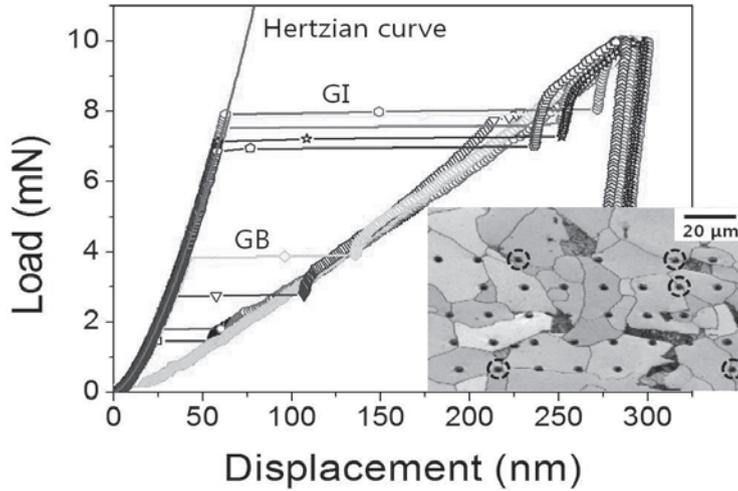


그림 4. 하중-변위곡선의 팝인 거동 관찰 예[13].

시할 수 없다. 1950년대에 Hall[9]과 Petch[10]가 독립적으로 강도와 결정립 크기(즉, 결정립계 분율)의 의존성을 다양한 금속재료에 대해 처음으로 평가를 하여, 다음과 같은 소위 Hall-Petch 관계식을 제안하였다.

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot d^{-\frac{1}{2}}$$

여기서  $\sigma$  는 재료의 강도,  $\sigma_0$  는 결정립계 영향을 받지 않는 마찰응력,  $k$ 는 결정립계 강화지수(Hall-Petch 또는 H-P 상수)이다. 이후 이를 적용하여 다양한 금속재료에 대해 결정립크기 영향을 평가한 연구가 많이 보고되어 왔다[9,11,12].

특정 재료의 결정립 크기 영향, 즉 위의 식에서 H-P 상수를 구하기 위해서는 다양한 열처리 공정을 통해 결정립 크기가 다른 많은 수의 시편을 제작하여 각각의 시편에 대해 인장시험을 수행해야 하므로 많은 시간과

비용이 소모된다. 이러한 복잡한 과정은 나노압입시험을 수행함으로써 간소화될 수 있음이 최근의 연구들을 통해 밝혀지고 있다.

먼저, 소성구간에서 얻는 유동응력(flow stress)에 대한 H-P 상수는 나노압입시험을 다른 하중에서 수행함으로써, 결정립계를 포함하지 않는 압입시험의 경도와 결정립계를 다수 포함하는 압입시험의 경도값 차이를 구하고, 결정립계에 의해 증가한 경도값으로부터 H-P 상수 값을 유추하는 방법이다. (자세한 과정은 참고문헌 [13] 참조) 이 방법에서도 주의해야 할 점은 첨단압입자를 사용하여 저하중과 고하중에서 나노압입시험을 수행할 경우, 관찰되는 압입크기효과를 고려해야 한다는 점이다.

다음으로, 항복강도에 대한 H-P 상수는 구형압입자를 이용하여 결정립계에 직접적으로 나노압입시험을 수행함으로써 구할 수 있다. 구형압입자를 이용한 나노압입시험의 경우, 저하중 영역에서 탄성에서 소성으로 천이되는 구간이 발생하고, 이때 그림 4와 같이 '팝

인(pop-in)' 현상이 관찰되는데, 팝인의 개시부는 아직 탄성식을 적용할 수 있으므로, 이 팝인 하중에 대한 최대 전단응력을 구할 수 있고, 이를 임계 전단항복응력과 연관시킴으로써 H-P 상수 값을 유추할 수 있다. (상세내용은 [13] 참조)

### 3. 맺음말

이상에서 미세조직적 인자가 전체 강도에 미치는 영향을 나노역학적으로 분석한 사례를 소개하였는데, 이 외에도 다양한 미세조직 인자(결정방향, 석출물, 합금원소, 전위밀도 등)를 고려한 나노역학 시험 결과로부터 금속 구조재료의 매크로한 기계적 물성을 평가하고자 하는 많은 연구들이 해외에서는 활발히 진행 중이다. 이를 적극 활용할 경우, 새로운 구조용 금속재료를 개발하는데 있어서 시간과 비용을 획기적으로 절약할 수 있을 것으로 기대되므로, 향후 국내에서도 관련 연구가 적극적으로 이루어지길 것으로 예상된다.

### 4. 감사의 글

본 기고는 미래창조과학부의 선도연구센터지원사업(NRF-2015R1A5A1037627) 지원으로 작성되었습니다.

### 5. 참고문헌

1. M.-Y. Seok, Y.-J. Kim, I.-C. Choi, Y. Zhao, J.-i. Jang, *Int. J. Plast.* **59**, 108 (2014).
2. N. Ishikawa, M. Okatsu, S. Endo, and J. Kondo, *Proceeding of 6th International Pipeline Conference, IPC2006-10240*, Calgary, Canada (2006).
3. Endo and M. Nagaе, *ISIJ Int.* **36**, 95 (1996).
4. T. Hüper, S. Endo, N. Ishikawa, and K. Osawa, *ISIJ Int.* **39**, 288 (1999).
5. Y. Tomota, M. Umemoto, N. Komatsubara, A. Hiramatsu, N. Nakajima, A. Moriya, T. Watanabe, S. Nanba, G. Anan, K. Kunishige, Y. Higo, and M. Miyahara, *ISIJ Int.* **32**, 343 (1992).
6. A.C. Fischer-Cripps, *Nanoindentation, 3rd ed.*, Springer, NY (2011).
7. W.C. Oliver and G.M. Pharr, *J. Mater. Res.* **19**, 3 (2004).
8. J.G. Swadener, B. Taljat, and G.M. Pharr, *J. Mater. Res.* **16**, 2091 (2001).
9. E.O. Hall, *Proc. R. Soc. B* **64**, 747 (1951).
10. N.J. Petch, *J. Iron Steel Inst.* **174**, 25 (1953).
11. W.B. Morrison, *Trans. ASM* **59**, 824 (1966).
12. M.A. Meyers and K.K. Chawla, *Mechanical behavior of materials*, Prentice-Hall (1999).
13. M.-Y. Seok, I.-C. Choi, J. Moon, S. Kim, U. Ramamurty, J.-i. Jang, *Scripta Mater.* **87**, 49 (2014).