

선형적인 가공경화현상을 갖는 FCC 재료의 압입유동특성 평가

전은채 · 김성훈 · 박주승* · 유용재* · 권동일

서울대학교 공과대학 재료공학부
*산업자원부 기술표준원

Evaluation of Indentation Tensile Properties for FCC Linear Hardening Materials

Eun-chaee Jeon, Sung-Hoon Kim, Joo-Seung Park*, Yong-Jae Yu* and Dongil Kwon

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Korea Agency for Technology and Standards, Ministry of Commerce, Industry and Energy, Gwacheon 427-716, Korea

Abstract : General methods of evaluating indentation tensile properties using instrumented indentation techniques are aimed at power-law hardening materials. However, some FCC materials with low stacking-fault energy, such as austenitic stainless steels, show linear hardening behavior. In this study, in order to reflect linear hardening behavior, a sine function was adapted in the definition of true strain instead of tangent function. The true strain of sine function was proved to be more suitable to describe linear and high hardening deformation pattern due to its own mathematical features. Accordingly, accurate indentation flow curves were successfully derived with the new true strain definition and a linear constitutive equation. The indentation yield strength and indentation tensile strength were determined as the corresponding true stresses to the yield point and the necking point on the indentation flow curve, respectively. It was found that the indentation yield strengths were within a 10% error range, and the indentation tensile strengths were within a 5% error range, when compared to tensile test results.

(Received September 1, 2005)

Key words : Linear hardening, Instrumented indentation test, Indentation tensile property, True strain

1. 서 론

기존 압입경도시험법을 개선한 계장화 압입시험법은 특정 형태의 압입자로 재료에 하중을 인가하면서 이에 따른 압입자의 변위, 즉 재료의 변형을 연속적으로 측정하여 얻어지는 그림 1과 같은 압입하중-변위곡선을 분석함으로써 다양한 기계적 특성을 평가할 수 있다. 비파괴적이며 기기의 소형화를 통한 높은 현장적용성을 갖고 있어 인장시험, 충격시험 그리고 파괴시험 등의 현장 적용성이 매우 떨어지는 기존 기계적 물성 평가법을 대체할 수 있는 시험법으로 각광받아 왔다. 외국에서는 주로 경도 및 탄성계수 평가에 연구의 초점이 맞춰진데 반해 국내에서는 인장시험을 대체할 수 있는 압입인장물성 평가에 관한 연구 [1-4]를 수행하여 왔다. 이를 바탕으로 2002년에 세계 최초로 국내 표준 규격 [5]이 제정되었고, 국제 표준 기구인 ISO(International Organization for Standardization)에서 한국의 주도로 관련 규격 제정이 추진 중이다.

현재 일반적인 압입인장물성 평가는 그림 2와 같은 과정을 통해 이루어진다. 그림 2에서 보는 바와 같이 압입 하중-변위곡선에서 계산된 진응력(σ)과 진변형률(ϵ)을 소성변형양상을 반영할 수 있는 구성방정식에 대입하여 최종적으로 압입항복강도와 압입인장강도를 구하게 된다. 기존 연구와 표준 규격에서는 이 구성방정식이 식 (1)과 같은 형태를 갖는 것으로 가정하였다.

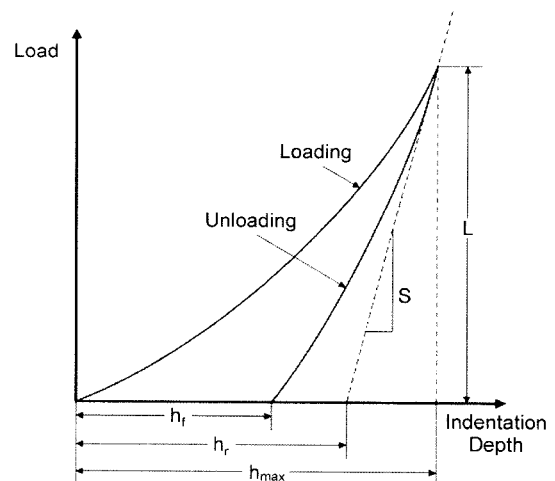


Fig. 1. A schematic diagram of indentation load-depth curve.

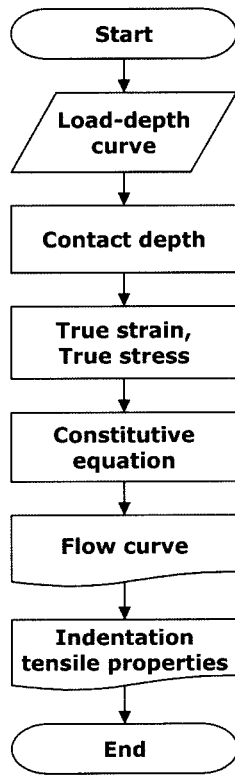


Fig. 2. General algorithm of indentation flow curve derivation.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

여기서 K 는 응력계수, n 은 가공경화지수이다. 대부분의 금속재료가 이러한 구성방정식을 따르는 것으로 알려져 있으나 [6], 일부 재료의 소성변형은 이 식과는 상이한 양상을 나타낸다. 특히 산업계에서 널리 사용되고 있는 오스테나이트 계열의 스테인리스강은 power-law 형태의 식이 적용될 수 없음이 널리 알려져 있으며 [7,8], 일부 FCC 구조를 갖는 비철금속에서도 유사한 현상이 발견되었다 [9]. 이러한 재료들의 소성변형양상은 Ludwigion에 의해 식 (2)와 같이 제안되었다.

$$\sigma = K_1\varepsilon^{n_1} + \exp(K_2 + n_2\varepsilon) \quad (2)$$

여기서 K_1 , n_1 , K_2 그리고 n_2 는 모두 재료 상수이다. 그러나 이 식을 구성하기 위해서는 지나치게 많은 상수를 결정하여야 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 이들 재료의 압입인장물성을 구하기 위해서는 상이한 가공경화특성을 반영할 수 있는 새로운 진응력, 진변형률에 대한 정의와 더불어 간단한 형태의 구성방정식의 제시가 필요하다. 이에 본 연구에서는 오스테나이트 계열의 스테인리스강을 중심으로 압입인장물성 평가에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 재료는 오스테나이트 계열의 스테인리스강 중 일반 산업에서 가장 많이 사용되는 STS303, STS304 그리고 STS316 3종이다. 이들 재료에 대해 각각 계장화 압입시험과 결과 검증을 위한 인장시험을 수행하였다. 계장화 압입시험은 Frontics Inc.에서 제작한 AIS3000 기기를 사용하였다. 기기의 컴플라이언스 효과를 최소화하기 위해 압입자 홀더와 일체형으로 제작된 지름 0.5 mm의 구형압입자를 사용하였다. 재현성있는 실험 결과를 얻기 위해 각 시편에 대해 완벽하게 중첩되는 5개의 압입하중-변위곡선을 얻을 때까지 실험을 수행하였다. 정확한 접촉깊이 보정을 위해 실험 중간에 하중 제거단계를 두었으며 각각의 하중제거 위치는 진변형률이 최대한 일정하게 분배될 수 있도록 선정하였다. 인장 시험은 Instron 5582를 사용하여 관련 ASTM 규격에 따라 수행하였다. 각 재료에 대해 5개의 시편을 1 mm/min의 속도로 인장시험을 하였으며, 각 인장곡선의 중첩성이 매우 뛰어났다. 각 재료의 인장물성은 표 1에 나타내었다.

3. 결과 및 토의

소성변형 시 가공경화현상의 상이성

그림 3은 STS303과 유사한 항복강도를 갖으며 식

Table 1. Mechanical properties of tested materials

Materials	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Uniform elongation (%)
STS303	264	1050	47.0
STS304	399	1085	44.7
STS316	357	909	40.7

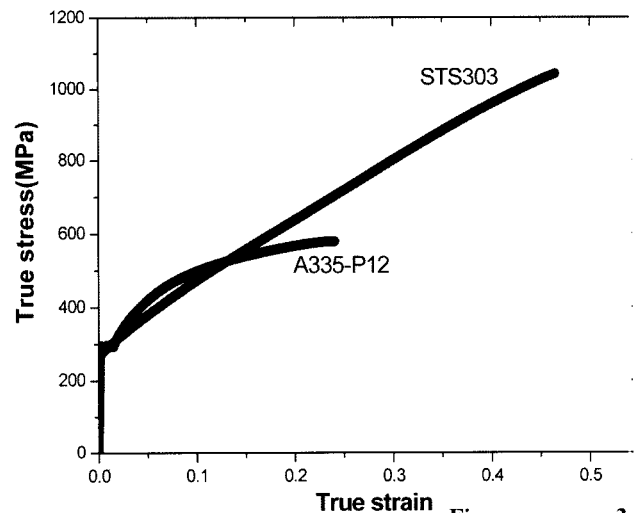


Fig. 3. Comparison of uniaxial tensile curves of STS303 and A335-P12.

(1)과 같은 가공경화특성을 나타내는 A335-P12 재료의 인장곡선을 비교한 것이다. 두 재료는 유사한 항복강도와 탄성계수를 갖고 있기 때문에 항복 이전에는 유사한 양상을 나타낸다. 그러나 항복 이후에 A335-P12는 초기에는 높은 가공경화현상을 나타내지만 변형률이 높아짐에 따라 점점 가공경화가 약화되는, 즉 $(d\sigma/d\epsilon)$ 가 지속적으로 감소하는 전형적인 power-law 형태의 소성변형을 나타낸다. 그러나 STS303은 necking점까지 가공경화정도인 $(d\sigma/d\epsilon)$ 가 거의 일정하며 그 값이 A335-P12에 비해 높은 양상을 나타낸다. STS304와 STS316에서도 이와 유사한 양상이 관찰되었고, 이는 기존 연구에서 보고되었던 [7-9]결과 동일하다.

두 재료가 전혀 다른 소성변형양상을 보이는 이유는 결정구조 차이에 따른 적층결합 에너지의 차이 때문인 것으로 알려져 있다 [9]. 일반적인 철강 소재들은 페라이트 구조를 갖고 있기 때문에 BCC 구조를 기반으로 하고 있다. 이에 반해 오스테나이트 계열의 철강 소재는 FCC 구조를 기반으로 하고 있다. FCC 구조는 원자들이 가장 조밀하게 적층되어 있는 구조로 한 조밀면을 A라고 하면 이 면에 3개의 인접 원자 사이에 2종류의 골이 존재한다. 그 중 하나의 골에 원자들이 배치되어 새로운 조밀면 B가 생성되고 그 위에 다른 골에 원자들이 배치되어 조밀면 C가 생성되어 A-B-C의 적층구조를 갖게 된다. 그러나 실제로는 A-B-A와 같이 부분적으로 HCP 구조를 갖는 현상이 발생하며 이를 적층결합이라고 부른다. 이러한 적층결합은 평행한 두 부분 전위로 둘러싸인 영역에서 발생하는데, 적층결합 영역의 너비는 두 부분 전위의 척력과 적층결합 에너지의 증가량에 의한 인력의 평형식에 따라 적층결합 에너지와 반비례한다. 적층결합 영역이 넓을수록 두 전위가 합쳐지기 어려워져 전위의 다른 슬립면으로의 교차 슬립이 매우 힘들어지므로 높은 가공경화현상이 나타난다. 따라서 적층결합 에너지가 작을수록 높은 가공경화현상이 발생하게 되어 FCC 구조를 갖는 재료들 중에서 높은 적층결합 에너지를 갖는 Ni, Al 등은 식 (1)과 같은 낮은 가공경화현상을 보이고, 낮은 적층결합 에너지를 갖는 Brass나 오스테나이트 계열의 스테인리스강은 식 (1)이 적용되지 않는 높은 가공경화현상을 보인다. BCC 구조에서는 적층결합 에너지가 정의되지 않으나 1개의 슬립방향을 12개의 서로 다른 슬립면이 공유할 정도로 다양한 슬립계를 갖고 있어 전위의 교차 슬립이 비교적 자유롭다. 따라서 BCC 구조는 그림 3의 A335-P12와 같은 점차 가공경화정도가 감소하는 소성변형양상을 보이게 된다.

연구에 사용된 세 가지 오스테나이트 계열의 스테인리스강들의 인장곡선을 식 (2)에 적합화 하였으며 각 재료

Table 2. Mechanical properties of tested materials

Materials	K ₁ (MPa)	n ₁ (no unit)	K ₂ (no unit)	n ₂ (no unit)
STS303	1575	0.558	5.38	-20.8
STS304	1320	0.409	5.42	-27.3
STS316	1273	0.385	5.28	-26.6

에서 얻어진 상수 값들은 표 2와 같다. 그러나 미지수인 4개의 상수를 재현성있게 구하기 위해서는 매우 많은 개수의 진응력, 진변형률 점이 필요하다. 인장시험은 진응력, 진변형률 점의 개수가 매우 많으므로 그것이 가능하나, 압입인장물성을 구할 때는 10-20개 정도의 한정된 진응력, 진변형률 점을 얻게 되므로 불가능하다. 이를 해결하기 위해 새로운 구성방정식을 제시하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 본 연구에 사용된 재료들의 가공경화특성은 $(d\sigma/d\epsilon)$ 가 거의 일정하며 기존 논문에 제시된 유사 재료의 인장곡선도 같은 특징을 갖는다 [7-9]. 이는 소성변형 시 선형적인 가공경화특성을 나타내는 것으로 판단할 수 있으므로 이들 재료의 소성변형은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = A + E_T \epsilon \tag{3}$$

여기서 A와 E_T는 재료 상수이다. 일반적인 금속재료와 연구에 사용된 재료들의 항복변형률이 0.005 내외인 점을 감안하면 A는 재료의 항복강도와 거의 유사하며, E_T는 재료의 가공경화정도를 나타내는 것으로 tangent modulus라 한다. 각 재료의 소성인장곡선의 선형성 정도를 알아보기 위해 각 재료에 대한 linear fitting을 하였으며 그림 4에 STS303에 대한 결과를 나타내었다. 일반적으로 어떠한 곡선의 선형 정도는 상관계수 R 값으로 나타내는데 이 값의 절대값이 1에 가까울수록 높은 선

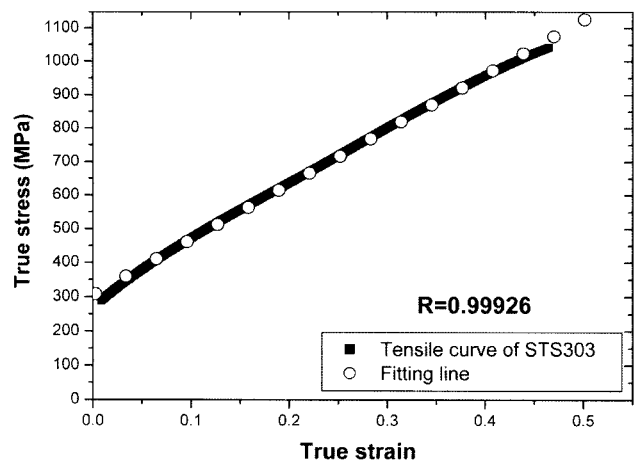


Fig. 4. Comparison of uniaxial tensile curve of STS303 and a fitting line of Eq. (3).

형성을 갖는다. 그림 4에서 보는 바와 같이 STS303의 경우 R 값이 0.99926으로 매우 높게 나왔으며, 다른 재료들도 0.995 이상의 높은 선형성을 나타내었다. 따라서 기존에 Ludwigson이 제안한 식 (2)로 표현되던 재료들의 소성변형양상을 식 (3)과 같은 간단한 선형식으로도 표현할 수 있음이 확인되었다. 또한 식 (3)을 사용할 경우에는 미지수인 상수가 4개가 아닌 2개가 되기 때문에 한정된 숫자의 진응력, 진변형을 점으로도 상수들을 쉽게 구할 수 있다. 이와 더불어 식 (2)의 상수들은 별다른 물리적 의미를 갖고 있지 않았으나, 식 (3)의 두 상수는 모두 물리적 의미도 갖게 되어 이론적 뒷받침을 받기에도 더 유리하다. 이에 본 연구에서는 연구에 사용된 재료의 가공경화 양상을 선형적으로 나타내어 압입인장 물성을 평가하였다.

재료 물성을 이용한 접촉깊이 보정

그림 2에서 보는 바와 같이 압입인장물성 평가 절차 중 실험 이후에 가장 먼저 해야 하는 것이 접촉깊이 보정이다. 압입하중 인가 및 제거 후 압흔의 크기를 광학적으로 관찰하는 기존의 압입경도시험과는 달리 계장화 압입시험은 하중이 인가된 상태에서의 물성을 평가하기 때문에 압입자와 재료 간의 접촉 양상을 직접 관찰할 수 없다. 또한 하중 인가 시 압입자 주변에서 발생하는 탄성굽힘 [10]과 소성축적 [11]에 의해 압입자와 재료 간의 접촉 양상이 복잡하게 나타나므로 이에 대한 보정이 필요하다. 접촉깊이 보정은 계장화 압입시험에서는 실험의 목적에 관계없이 꼭 이루어져야 하므로 다양한 연구 [10-13]들이 진행되어 왔다. 일반적으로 탄성굽힘에 대한 보정은 Oliver와 Pharr가 제안한 식으로 보정하는 것이 일반적이거나, 소성축적에 관한 보정식은 널리 사용되고 있는 것이 없다. 그 이유는 기존 연구들이 일부 재료에 대해서만 연구를 하였거나 구형 압입자에서의 압입깊이에 따른 변형을 변화 효과를 무시하였기 때문이다. 이에 본 연구에서는 다양한 재료에 대해 유한요소해석으로 얻어진 보정식 [14]을 사용하였다.

이 보정식은 재료의 가공경화지수와 압입자 반지름에 대한 압입깊이 비를 주요 인자로 선정하여 소성축적을 보정한다. 그러나 가공경화지수는 식 (2)의 변형을 항의 지수로 나타나는 n 을 의미하는 것으로 선형적인 가공경화현상을 나타내는 재료들에서는 정의가 되지 않는 물성이다. 기존에 일축 인장시험을 통해 가공경화지수를 평가하는 방법에 대해 제시되어 있는 표준 규격 [15,16]에서는 금속재료의 소성변형양상이 식 (2)와 같다고 가정하여 구하도록 하였다. 이에 본 연구에서는 압입경도시험을 통해 재료의 가공경화지수를 구하는 방법으로 널

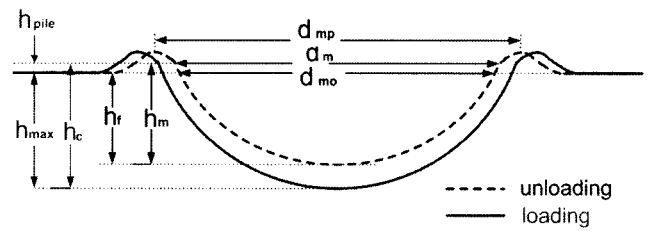


Fig. 5. Morphology around the indenter when loading and unloading [19].

리 사용되어온 Meyer index [17-19]를 도입하여 가상의 가공경화지수를 구하였다. Meyer는 금속 재료의 압흔 관찰을 통해 압입하중(L)과 압흔의 지름(d_m) 사이에 식 (4)와 같은 관계가 성립한다고 하였다.

$$L = kd_m^m \quad (4)$$

여기서 k 는 계수이며, m 이 Meyer index로 여기서 2를 뺀 값이 가공경화지수와 일치한다. 여기서 중요한 것은 Meyer가 제시한 이 식은 하중이 인가된 상태에서 h_c 를 통해 계산으로 구해진 지름이 아닌 그림 5의 하중이 제거된 상태에서의 압흔의 지름(d_m)이라는 점이다. 따라서 계장화 압입시험에서는 압입하중-변위곡선에서 얻어진 압입깊이들을 이용하여 하중이 제거된 상태에서의 압흔 지름을 특정한 보정식을 통해 구하여야 한다. 이를 위해 기존 연구 [20]에서 제시한 보정식을 도입하였다.

$$dm = 2\sqrt{Dh_r\{f(n)+1\} - h_c^2\{f(n)+1\}^2} \quad (5)$$

$$f(n) = -0.85768n + 0.35768 \quad (6)$$

여기서 D 는 압입자 지름이다. 식에서 보는 바와 같이 보정식 안에 Meyer index를 통해 구하고자 하는 가공경화지수가 들어가 있으므로 가공경화지수를 알아야 가공경화지수를 구할 수 있다는 모순이 발생한다. 이 문제를 해결하기 위해 회귀 분석법을 사용하였다. 임의의 가공경화지수 값(예를 들어 0.3)을 식 (5), (6)에 대입하여 구해진 보정된 압흔의 지름을 식 (4)에 대입하여 얻어진 가공경화지수와 초기에 입력한 값을 비교하여 서로 같아질 때까지 분석을 반복하는 것이다. 컴퓨터 프로그램의 도움을 받게 되면 이러한 회귀 분석과정에 걸리는 시간은 수초에서 1분 이내이다. 이렇게 해서 얻어진 가공경화지수를 앞서 설명한 하중 인가 상태에서의 접촉깊이 보정식에 대입하여 실제 접촉깊이를 구하였다.

소성변형특성을 고려한 진변형을 정의

일반적으로 계장화 압입시험에서 제시된 진변형을 정의는 크게 두 가지로 다음과 같다 [1,21].

$$\epsilon = \alpha \frac{a_c}{R-h_c} = \alpha \tan \gamma \quad (7)$$

$$\epsilon = \beta \frac{a_c}{R} = \beta \sin \gamma \quad (8)$$

여기서 α , β 는 각각 적합화 상수, R 은 압입자 반지름, a_c , h_c 는 각각 압입자와 재료간의 접촉반지름과 접촉깊이 그리고 γ 는 압입자 접촉반각이다. 이 두 변형률의 가장 큰 차이는 기존 연구 [4]에 제시된 바와 같이 두 변형률이 나타내는 소성변형양상이 전혀 다르다는 것이다. 기존 연구에서는 압입깊이에 따른 진변형률의 증가량 비교를 통해 사인 함수에 기반한 진변형률이 소성변형이 심화될수록 높은 가공경화특성을 나타냄을 증명하였다. 앞서 설명한 power-law 형태와 선형적인 형태의 소성변형양상의 특징을 고려해볼 때 탄젠트 함수의 진변형률과 사인 함수의 진변형률은 각각 power-law 형태와 선형적인 형태의 소성변형양상에 적합함을 짐작할 수 있다.

이를 더 정량적으로 검증하기 위하여 STS303 재료에 대해 탄젠트 함수의 진변형률과 사인 함수의 진변형률로 유도된 압입유동곡선의 진변형률 증가에 따른 진응력의 증가량($d\sigma/d\epsilon$)을 그림 6에 비교하였다. 탄젠트 함수의 진변형률을 이용하여 압입유동곡선을 유도하는 방법은 Jeon 등의 연구 [4]를 따랐으며, 사인 함수에 기반한 압입유동곡선의 유도는 본 연구에서 개발한 방법을 사용하였다. 진응력-진변형률 점의 순서는 뒤로 갈수록 진변형률 값이 높아지는 것을 의미한다. 그림 6에서 보는 바와 같이 같은 재료에 대해 평가한 결과임에도 불구하고 탄젠트 함수로 얻어진 결과에서는 변형률이 커질수록 응력의 증가량이 점점 감소하는데 반해, 사인 함수로 얻어진 결과는 낮은 변형률에서부터 높은 변형률까지 비교적 일정한 증가량이 나옴을 알 수 있다. 이러한 양상들은 각각 power-law 형태의 가공경화현상과 선형 형태

의 가공경화현상에서 얻어지는 응력 증가량 양상과 일치한다. 따라서 선형적인 가공경화현상을 보이는 재료에서는 power-law 형태의 재료와는 달리 식 (8)과 같은 사인 함수에 기반한 진변형률 정의를 사용하여야 한다.

진응력은 일반적으로 식 (9)와 같이 압입자에 의한 평균압력과 일정한 비를 갖는 것으로 알려져 있다 [21].

$$\sigma = \frac{1}{\Psi} \frac{L}{\pi a_c^2} \quad (9)$$

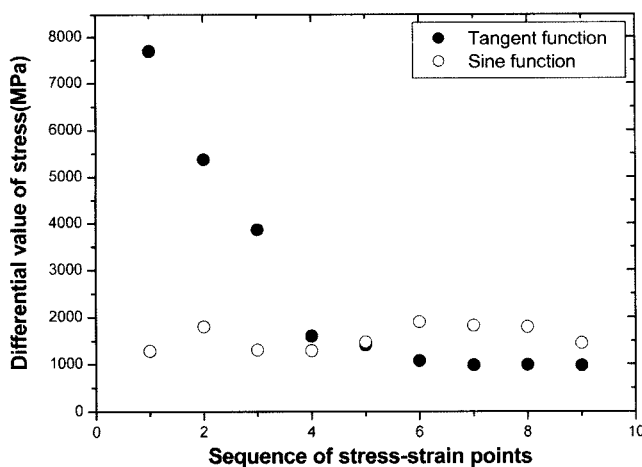


Fig. 6. Differential values of stress indentation flow curves derived by tangent function strain and sine function strain for STS303.

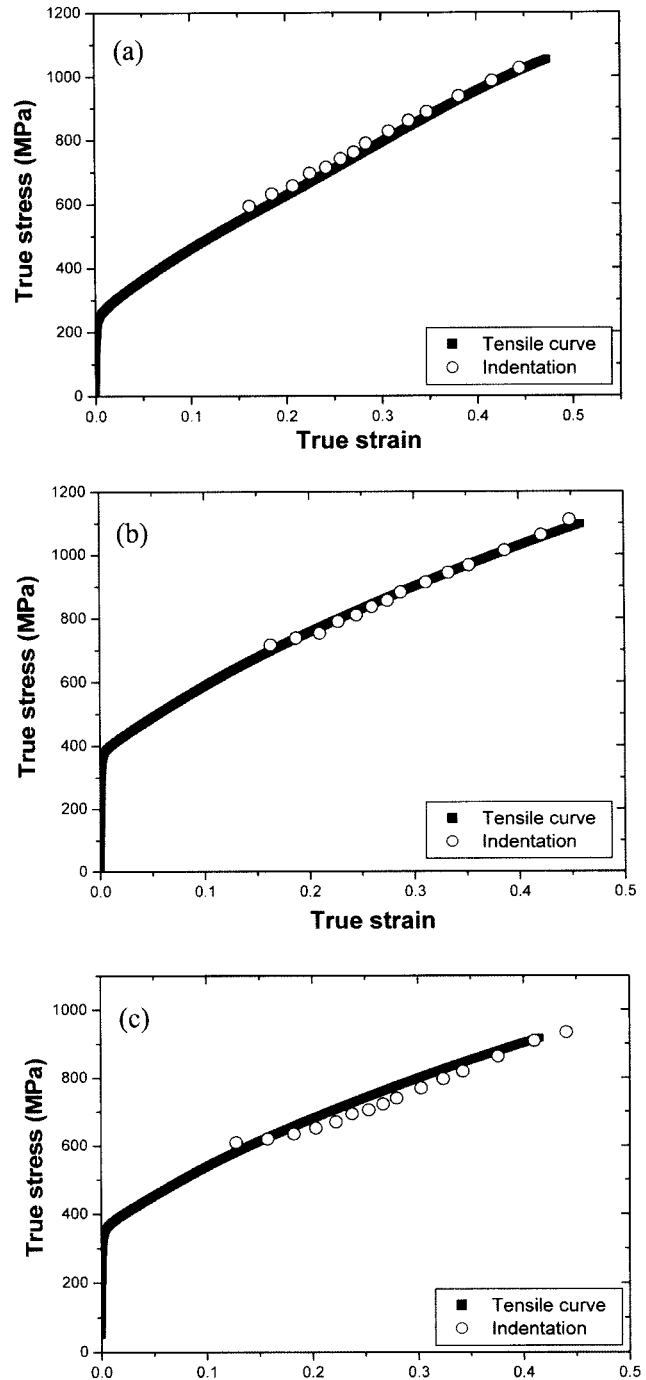


Fig. 7. Comparisons of True strain uniaxial tensile curves and indentation flow curves of (a) STS303 (b) STS304, and (c) STS316.

여기서 Ψ 는 소성구속인자로 3.0의 값을 갖는다 [22]. 본 연구에서 사용된 재료들에 대해 실험을 통해 평균압력, 즉 경도와 진응력 간의 비를 통해 소성구속인자를 구하였으며, 그 값이 3.0으로 기존의 power-law 형태의 재료와 유사하게 나옴을 확인하였다. 그림 7은 앞서 설명한 진변형률과 진응력 정의를 사용하여 본 연구에서 사용한 세 가지 재료의 압입유동곡선을 구한 결과이다. 세 가지 재료에서 모두 압입유동곡선이 일축인장곡선의 선형적인 소성변형양상을 잘 반영하고 있다. 이를 통해 앞서의 접촉깊이 보정 및 진변형률, 진응력 정의가 올바르게 되었음을 확인하였다.

압입 항복강도와 압입 인장강도의 평가

그림 7에서 보는 바와 같이 계장화 압입시험을 통해 얻어진 진응력, 진변형률 점들은 일축인장곡선의 항복강도와 인장강도에 정확히 위치하지 못한다. 특히 구형 압입자가 재료에 접촉하는 순간 소성변형이 발생하는 계장화 압입시험의 특성 상 항복강도를 직접적으로 얻는 것은 거의 불가능하다. 따라서 계장화 압입시험에서 얻어진 불연속적인 진응력, 진변형률 점들을 연속적인 하나의 선으로 만든 뒤 항복점과 네킹점을 그 선 위에 찍음으로서 항복강도와 인장강도를 구하게 된다. 연속적인 선을 만들기 위해 사용하는 것이 구성방정식이며, 본 연구에서는 앞서 설명한 바와 같이 식 (3)과 같은 선형식을 사용하였다.

항복점은 항복강도의 물리적, 현상적 의미를 고려하여 결정할 수 있다. 일반적으로 일축인장곡선에서 항복강도를 구하는 방법은 0.2% offset 법이다. 이는 탄성부분의 직선을 변형률 0.2% offset한 뒤 소성부분의 곡선과의 교점을 항복강도로 결정하는 방법이다. 초기 탄성부분의 기울기는 재료의 탄성계수인데, 계장화 압입시험에서도

탄성계수를 쉽게 얻을 수 있으며 [10] 그 정확도 매우 높아 국제 표준 규격 [23]으로 제정되어 있다. 계장화 압입시험을 통해 얻어진 탄성계수로 탄성 영역의 직선을 구성할 수 있으므로, 일축인장시험에서와 동일한 0.2% offset 방법으로 항복강도를 결정할 수 있다.

네킹점은 일반적으로 가공경화지수와 같은 값의 진변형률 점과 일치하는 것으로 알려져 [24] 있으며 기존 연구 및 표준 규격에도 이 개념을 사용하고 있다. 본 연구에서 사용한 재료들에서는 원칙적으로는 가공경화지수가 정의되지 않으나 앞서 접촉깊이 보정에서 설명한 바와 같이 Meyer index를 통한 간접 평가가 가능하다. 이에 본 연구에서는 Meyer index를 통해 얻어진 가공경화지수를 네킹점에서의 진변형률로 정의하였다.

최종적으로 평가된 압입인장물성과 일축인장시험을 통해 얻어진 인장물성을 표 3에 비교하였다. 세 가지 재료 모두 압입항복강도는 오차 범위 10% 이내의, 압입인장강도는 오차 범위 5% 이내에 위치하여 두 물성이 매우 높은 일치성을 보이고 있다. 이에 반해 power-law 형태의 가공경화를 가정하여 얻은 압입인장물성은 표 4에서 보는 바와 같이 매우 큰 오차를 나타냄을 알 수 있다. 특히 항복강도의 오차가 매우 크게 나타났다. 이는 Ludwigson이 자신의 연구 [9]에서 power-law 형태의 구성방정식을 사용할 경우에 항복점에 가까울수록 일축인장곡선을 잘 모사하지 못한다고 지적한 점과 일치한다. 따라서 계장화 압입시험을 이용하여 오스테나이트 계열의 스테인리스강을 비롯한 선형적인 소성변형양상을 나타내는 재료의 압입인장물성도 평가할 수 있음을 확인하였다. 추후에 선형적인 소성변형양상을 나타내는 다양한 재료들에 대한 추가적인 검증과 더불어 미지의 재료의 가공경화특성을 계장화압입시험만으로 판단할 수 있는 방법에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

Table 3. Comparisons of tensile properties and indentation tensile properties evaluated from linear hardening method (MPa)

Materials	Yield strength (tensile test)	Yield strength (indentation)	Tensile strength (tensile test)	Tensile strength (indentation)
STS303	264	285	1050	1067
STS304	399	397	1085	1110
STS316	357	337	909	941

Table 4. Comparisons of tensile properties and indentation tensile properties evaluated from power-law hardening method (MPa)

Materials	Yield strength (tensile test)	Yield strength (indentation)	Tensile strength (tensile test)	Tensile strength (indentation)
STS303	236	285	889	1067
STS304	255	397	1208	1110
STS316	244	337	868	941

4. 결 론

1. FCC 구조의 금속들 중 오스테나이트 계열의 스테인리스강 등의 적층결합 에너지가 낮은 재료들은 전위 이동이 제한되어 선형적이며 높은 가공경화특성의 유동곡선을 나타낸다. 이들 재료의 유동곡선의 구성방정식은 Ludwigson이 제시한 복잡한 형태의 수식으로 표현되어 왔으나, 본 연구에서는 아래와 같은 간단한 구성방정식을 제시하였다. 여기서 A는 항복강도와 거의 유사한 값을 가지고 E_T 는 가공경화정도를 의미한다.

$$\sigma = A + E_T \epsilon$$

2. 계장화 압입시험을 이용하여 압입유동곡선을 평가하는 기존의 평가법에서 사용한 탄젠트 함수의 진변형을 정의는 변형률이 증가함에 따라 가공경화정도가 낮아지는데 반해, 사인 함수의 진변형을 정의는 일정한 가공경화정도를 나타내었다. 따라서 일정한 가공경화정도를 나타내는 선형적인 가공경화특성을 갖는 FCC 재료에는 사인 함수의 진변형을 정의로 압입유동곡선을 평가하여야 한다.

3. 평가된 압입유동곡선에 외삽의 개념으로 항복점과 네킹점을 정의하여 각각에 대응되는 진응력 값으로 항복강도와 인장강도를 계산할 수 있다. 항복점은 물리적 의미에 기반하여 탄성계수의 기울기를 갖는 탄성영역의 직선과 압입유동곡선과의 교점으로 정의되며, 네킹점은 변형률이 Meyer index로부터 구해진 가공경화지수와 같을 때의 점으로 정의된다.

4. 소성변형특성을 고려한 진변형을 정의와 선형적인 구성방정식 그리고 외삽의 개념이 도입된 항복점과 네킹점의 결정 방법들을 이용하여 오스테나이트 계열의 스테인리스강의 압입인장물성을 평가하였다. 일축인장시험에서 얻어진 인장물성과 비교하였을 때 항복강도와 인장강도가 각각 10%와 5%이내의 오차를 나타내어 계장화 압입시험으로 선형적인 가공경화현상을 갖는 FCC 재료의 압입유동특성 평가도 재현성 있게 이루어짐을 확인하였다.

REFERENCES

1. J.-H. Ahn and D. Kwon, *J. Mater. Res.* **16**, 3170 (2001).
2. Y. Choi, J.-I. Jang, J. Park, D. Kwon, M. Gao and R. Kania, *Oil and Gas Journal*, **66** (2003).
3. E.-C. Jeon, J.-S. Park and D. Kwon, *J. Eng. Mater. Tech.*, **125**, 406 (2003).
4. E.-C. Jeon, M.-K. Baik, S.-H. Kim, J.-S. Park and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **42**, 965 (2004).
5. Korea Standard B0950, *Metallic materials - Instrumented indentation test for indentation tensile properties* (2002).
6. G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, p.71, McGraw-Hill Book company, Singapore (1988).
7. J. W. Simmons, *Acta Mater.*, **45**, 2467 (1997).
8. S. L. Mannan, K. G. Samuel and P. Rodriguez, *Scripta Metall.*, **16**, 255 (1982).
9. D. C. Ludwigson, *Metall. Trans.*, **2**, 2825 (1971).
10. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.*, **7**, 1564 (1992).
11. Y. T. Cheng and C. M. Cheng, *Phil. Mag. Letters*, **78**, 115 (1998).
12. R. Hill, B. Storåkers and A. B. Zdunek, *Proc. R. Soc. London.*, **A423**, 301 (1989).
13. H. Herrmann, N. M. Jennett, W. Wegener, J. Meneve, K. Hashe and R. Seemann, *Thin Solid Films*, **377-378**, 394 (2000).
14. S.-H. Kim, M.-K. Baik, B.-W. Lee and D. Kwon, *Mater. Sci. Eng.*, A submitted.
15. ISO 6892, *Metallic materials - Tensile testing at ambient temperature* (1998).
16. ASTM E 646, *Standard test method for tensile strain-hardening exponents (n-values) of metallic sheet materials* (2000).
17. E. Meyer, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, **52**, 645 (1908).
18. H. O'Neill, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **15**, 1 (1944).
19. D. Tabor, ASTM STP 889, *American Society for Testing and Materials*, 129 (1986).
20. S.-H. Kim, E.-C. Jeon and D. Kwon, *J. Eng. Mater. Tech.*, **127**, 154 (2005).
21. D. Tabor, *Hardness of Metals*, 2, Clarendon Press, Oxford (1951).
22. E.-C. Jeon, M.-K. Baik, S.-H. Kim, B.-W. Lee and D. Kwon, *Key Engineering*, accepted.
23. ISO 14577-1, *Metallic materials-Instrumented indentation test for hardness and materials parameters-Part 1: Test method* (2002).
24. G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 290, McGraw-Hill Book company, Singapore (1988).