

소재 물성평가를 위한 구형압입시험의 수치접근법 개발



이 형 일*



이 진 행**

1. 서 론

신뢰성 평가의 핵심인 재료의 물성치 평가기술은 다양한 재료 개발과 사용중 열화로 인한 지속적인 물성치 평가의 필요성으로 인해 새로운 시험법 개발이 끊임없이 요구되고 있다. 압입시험법은 인장시험법 등이 적용되기 어려운 부위의 물성측정에 사용된다. 즉 국부영역에서 재료성질이 연속적으로 변하는 부위, 균열성장 제어가 어려운 취성재료 또는 현재 사용부와 같이 기존 시험법이 적용되기 어려운 부위의 물성측정에 압입시험기를 사용할 수 있다. 압입시험법은 재료물성치들을 측정함에 있어 그 조작법이 간단함은 물론 비파괴적이라는 특징을 갖는다. 특히 최근에는 압입하부탄·소성응력장의 정량적 해석을 통하여 하중-변위곡선을 얻고, 이 곡선의 분석을 통해 재료의 다양한 물성치를 구하는 평가 방법에 대한 연구들이 이루어지고 있다. 그러나 압입시험 데이터 분석의 어려움으로 인해 실제 실효성에서는 아직 크게 못 미치고 있는 실정이다. 이는 대부분의 연구들이 갖는 이론적 한계성에서 비롯된 것으로, (1) 압입에 영향을 주는 다양한 매개변수에 대한 정량적 분석 부족, (2) Vickers 혹은 Berkovich 압입자가 가지고 있는 형상적 한계, (3) 실제 소성변형과 전혀 다른 양상을 갖는 탄성이론 내지 변형소성이론을 포함한 기존 이론의 한계 등에 기인한 것이다. 이 결과 국내외를 막론하고 물성치 측정에 대한 압입시험

기술은 사실상 영률 및 경도 이외에는 매우 부진한 실정이며, 보다 우수한 이론 정립과 검증이 조속히 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 상대적으로 변형률의 구배가 적으면서 동시에 큰 변형률값을 산출할 수 있으며 마찰계수의 영향도 적은 지점을 새롭게 선정하여 이를 기준으로 정교한 압입이론식을 도출하였으며, 아울러 유사한 방법을 통해 고무재료에 대한 물성평가 압입이론을 개발하였다.

2. 압입시험의 유한요소 모델링

구형압입자를 이용한 재료의 압입시험은 다음과 같이 간단화된 그림으로 표현할 수 있다(그림 1). 여기서 하중과 형상이 모두 축대칭임을 고려하여 그림 2와 같은 축대칭 유한요소모델을 형성하였다. 유한요소해석에는 J_2 증분소성이론을 따르는 등방성 탄소성 재료를 사용하며 대변형 이론을 적용한다. 하중과 형상이 모두 축대칭임을 고려하여 4절점 축대칭요소 CAX4 요소(ABAQUS Library, 2002)¹⁾를 사용한다. 요소크기가 바뀌는 경계에는 대개 MPC(Multi-Point Constraints, ABAQUS Library, 2002)¹⁾가 간편하게 사용되나, 이 경우 MPC 절점상의 응력과 변형률이 균일하지 않은 단점이 있다. 이 때문에 압입접촉부 근처의 요소크기 천이영역에는 사다리형 요소를 사용하였으며, 접촉부에서 충분히 떨어진 위치에서만 MPC 모델링을 하였다. 모재와 압입

* 서강대학교 기계공학과 교수

** 서강대학교 대학원 기계공학과

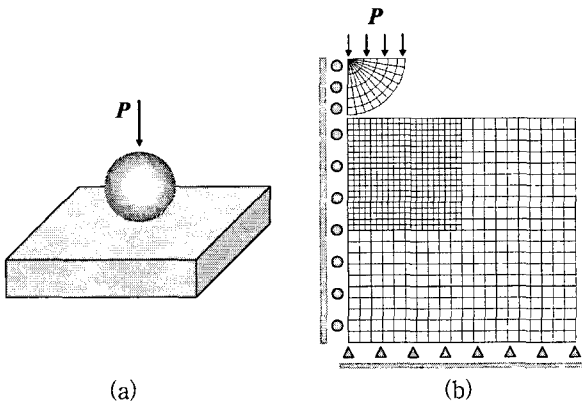


그림 1 (a) 구형 압입자를 이용한 압입시험의 가상도 및 (b) 유한요소모델의 경계조건

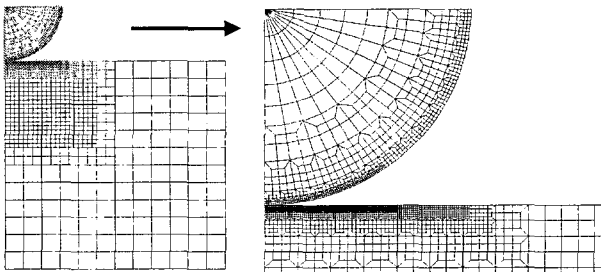


그림 2 실제 압입해석에 사용되는 유한요소망

표 1 유한요소해석에 사용되는 재료 물성치

모재 물성	사용 변수
마찰계수	0.0, 0.1, 0.2, 1.0
영률	100, 200, 400GPa
항복강도	200, 400, 800MPa
변형경화지수	3, 5, 7, 10, 13, ∞

자의 최종 유한요소모델은 각각 약 2300개와 630개의 사각형 4절점 축대칭요소들로 구성된다. 압입자와 모재의 접촉면에는 압입자와 모재쪽 모두 접촉요소면(Contact Surface, ABAQUS Library, 2002)¹⁾을 배치한다. 압입자와 모재의 대칭축상 절점들은 대칭축에 수직방향 변위성분을 구속하여 축대칭 조건을 만족시키고, 모재 밑면은 완전 구속시킨 후, 압입자를 하강시킨다. 압입자는 직경 $D=1\text{mm}$ 이고, 영률 $E=537\text{GPa}$, 푸아송비 0.24인 텅스텐카바이드 재료로 모델링하였다. 표 1은 해석에 사용된 대표적 모재 물성치들 및 그 값들을 나타내고 있다.

3. 새로운 압입이론 전개

3.1 유효변형률 관측지점

그림 3은 변형경화지수 $n=10$, 마찰계수는 각각 $f=0$,

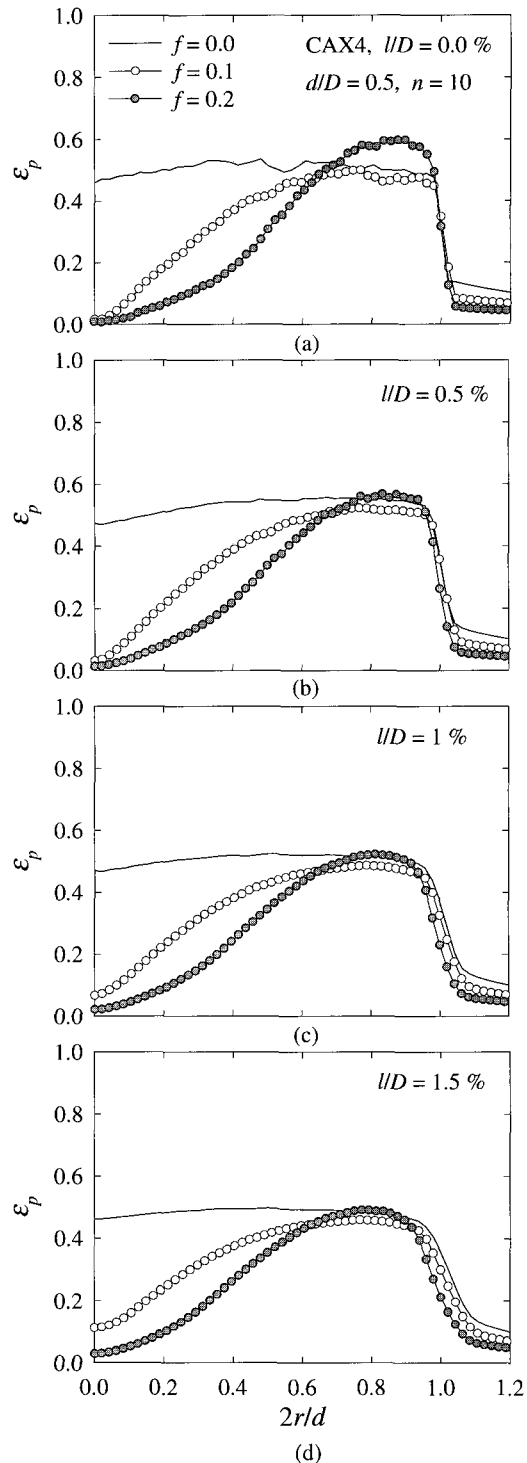


그림 3 표면으로부터 (a) $l/D = 0.0$, (b) $l/D = 0.5$, (c) $l/D = 1.0$, (d) $l/D = 1.5$ 깊이에서 등가소성변형률의 분포

0.1, 0.2인 경우에 대해, $d/D=0.5$ 로 압입시 재료 표면으로부터 지정깊이 (l/D)에서 반경방향 r 에 따른 소성변형률 ϵ_p 의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 r 은 변형 후 재료의 축대칭 중심으로부터의 거리, l 은 재료표면으로부터 표면하부의 관측 깊이를 나타내며, d/D 는 압

입직경과 압입자 직경의 비를 의미한다. 그림이 보여주듯 접촉문제에 의해 표면에서는 변형률이 진동하고 압입하부로 갈수록 진동과 마찰계수의 영향이 줄어든다. 본 연구에서는 접촉 영향이 적으면서 압입표면에 가까운, 압입표면으로부터 압입자 직경의 1% 되는 곳($l/D=0.01$)을 응력-변형률 관측지점으로 선택하였다.

그림 3으로부터 변형률의 분포는 마찰계수에 의해 큰 영향을 받을 수 있다. 또한 기존 압입이론에서 Tabor²⁾의 변형률 예측지점은 $r/(d/2)=1$ 인 곳으로, 변형률의 구배와 마찰계수의 영향에 따른 변화가 심하여 정확한 응력-변형률 관계를 얻기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 압입중심으로부터 $0.4d$ 만큼 떨어진 점을 변형률 측정점으로 선택하였다. 이 위치는 i) 마찰계수의 변형률에 대한 영향이 적고 ii) 변형률의 기울기도 작으며, iii) 같은 압입에 대해 Tabor의 변형률 예측지점보다 5배 정도 큰 변형률이 측정되는 장점을 갖는다. 압입시 재료의 유효응력과 유효변형률은 각 지점과 압입깊이에 따라 변하지만 이와 같이 유효응력-소성변형률 관측지점을 임의로 선택할 수 있는 이유는 어느 지점의 유효응력과 유효변형률도 단축 응력-변형률 곡선상에 놓여야 하기 때문이다.

3.2 새 압입이론

같은 압입깊이에 대해 최대변형률을 얻을 수 있고 마찰계수의 영향을 무시할 수 있는 $0.4d$ 지점 표면하부 ($l/D=1\%$)의 변형률을 바탕으로 새로운 압입이론을 전개하였다. 먼저 압입직경의 계산에 있어 강체 구형압입자로 가정하여 pile-up과 sink-in을 고려한 압입시 실제접촉압입직경은 구의 기하형상으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$d = 2\sqrt{hD - h^2} = 2\sqrt{c^2 h_t D - (c^2 h_t)^2} \quad (1)$$

여기서 h 는 압입시 pile-up sink-in 등의 영향으로 인해 실제 접촉이 일어난 압입깊이를 의미하고 h_t 는 기준표면으로부터 압입된 깊이를 의미하며, c^2 는 다음과 같이 정의된다.

$$c^2 \equiv \frac{h}{h_t} \quad (2)$$

Tabor²⁾는 Brinell 및 MicroVickers 압입자를 이용하

여 압입 가장자리에서 유효변형률이 다음과 같이 표현될 수 있다는 실험적 결론에 도달했다.

$$\epsilon_p = 0.2(d/D) \quad (3)$$

압입하중 P 가 가해질 때 압입자와 시험재료간의 평균접촉압력 p_m 은 $p_m \equiv 4P/(\pi d^2)$ 로 정의된다. 압입시 평균접촉압력 p_m 과 변형률에서의 대표유효응력 σ 값으로 나눈 것을 구속인자 (constraint factor) ψ 로 정의하며, ψ 는 유효변형률의 함수이다.³⁾

$$\psi(\epsilon_p) \equiv p_m/\sigma \quad (4)$$

따라서 유효응력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2 \psi} \quad (5)$$

변형률과 응력 사이의 관계는 다음과 같이 Rice와 Rosengren⁴⁾이 제안한 piecewise power law 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_o} = \begin{cases} \frac{\sigma}{\sigma_o} & \text{for } \sigma \leq \sigma_o \\ \left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^n & \text{for } \sigma > \sigma_o; \quad 1 < n < \infty \end{cases} \quad (6)$$

여기서 σ_o 는 인장항복강도, $\epsilon_o = \sigma_o/E$ 는 항복변형률이고 n 은 변형경화지수이다. 총변형률 ϵ_t 는 탄성변형률과 소성변형률로 분해된다 ($\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p$). 기존 시험법의 재료상수 결정을 제거하기 위하여 물성치 상호간의 연관성으로부터 항복강도를 계산한다. piecewise power law 재료모델식(6)은 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\sigma = \sigma_o \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_o}\right)^{1/n} = K \epsilon_t^{1/n} \quad (7)$$

이 식은 $\sigma = \sigma_o$ 일 때에도 성립해야 하므로, 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\sigma_o = \left(\frac{K^n}{E}\right)^{\frac{1}{n-1}} = E \left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (8)$$

따라서 변형률 예측식을 적용하여 압입깊이에 따른 정확한 변형률과 응력을 예측할 수 있다면 이들 관계

로부터 식 (7)을 통하여 n 과 K 를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 항복강도 σ_0 를 계산할 수 있다.

3.3 변형경화지수 변화에 따른 압입수식

실제 압입시험에서 압입접촉직경을 직접 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 FEM 해석을 통해 얻어지는 c^2 을 회귀분석한 후 식(1)에 대입하여 압입접촉직경을 구하는 방식을 택하였다. $f=0.1$ 일 때 식(2)의 실제압입깊이와 이상적 압입깊이 비로부터 c^2 을 계산하여 압입깊이의 변화에 따른 c^2 변화추이를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 얇은 압입에 대해 변형경화지수가 일정한 경 c^2 이 불변량이라는 Matthews⁵⁾와 Hill⁶⁾의 기존이론과 달리 압입깊이의 함수로 나타내어야 함을 확인할 수 있다. 이는 압입초기영역은 탄성변형이 지배적인 영역이므로 이론값 0.5⁶⁾에 수렴하며, 압입깊이가 증가할수록 탄소성 천이영역을 지나 완전소성영역으로 접어들면서 c^2 의 값이 증가하기 때문이다. 따라서 초기 탄성영역의 존재로 인해 c^2 이 일정하다는 기존의 이론은 수정되어야 하며, c^2 은 변형경화 지수의 함수일 뿐만 아니라 압입깊이의 함수로 나타내어야 한다. 변형경화지수가 증가할수록 c^2 이 증가하는데, 이는 기존의 Matthews,⁵⁾ Hill⁶⁾ 그리고 Norbury와 Samuel⁷⁾이 주장한 경향성과 일치한다. 이는 변형경화지수가 증가할수록 같은 압입깊이에 대해서 실제 접촉압입직경이 증가하여 실제압입깊이와 이상적 압입깊이의 비가 증가함을 의미한다. 식(9)는 c^2 을 변형경화지수와 압입깊이의 함수로 나타낸 것이다.

$$c^2 = f_0^c(n) + f_1^c(n) \ln(100 h_t/D)$$

$$f_i^c(n) = a_{ik}^c n^{-k}; \quad i = 0, 1; \quad k = 0, 1, 2 \quad (9)$$

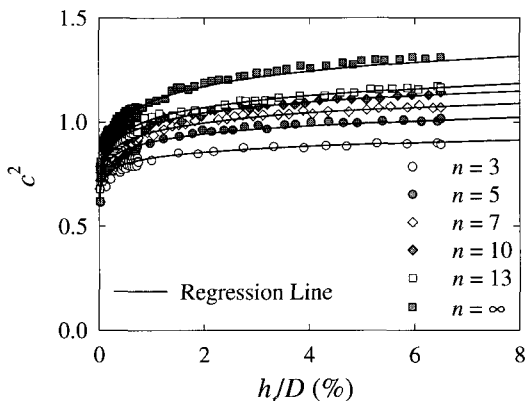


그림 4 변형경화지수에 따른 c^2 와 압입깊이 회귀곡선

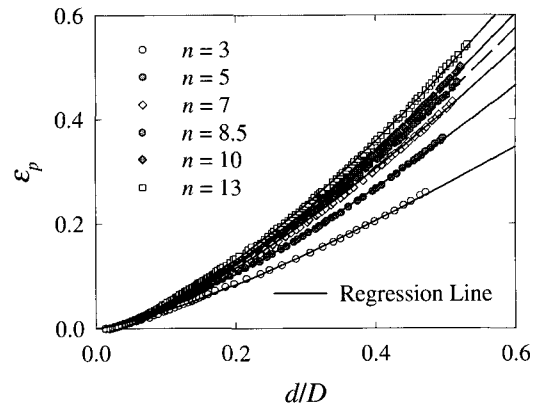


그림 5 변형경화지수에 따른 등가소성변형률과 압입깊이 회귀곡선

그림 5는 압입직경이 변화할 때 재료표면으로부터 하단 $l/D=1\%$ 인 $0.4d$ 지점에서 변형률 변화 추이를 본 곡선으로, 마찰계수는 0.1, 재료의 항복강도와 영률은 각각 400MPa, 200GPa로 설정하였다.

소성변형률이 처음 발생하는 지점은 원점부근으로, 얇은 압입에 의해서도 소성역이 발생함을 보여준다. 또한 변형경화지수가 증가할수록 소성변형이 용이하기 때문에, 소성변형률이 증가함을 볼 수 있다. Tabor가 제안한 변형률식은 최대측정 가능한 유효소성변형률이 반구가 재료에 완전히 접촉한 상태에서 최대 유효소성 변형률값 0.2를 얻을 수 있지만, 측정시 반구를 완전히 압입할 수 없으므로 실제 얻어지는 최대변형률값은 이보다 상당히 작다. 이에 비해 새 압입이론은 그림에서 보는 바와 같이 d/D 의 비가 약 0.5일 때 유효소성변형률은 약 0.5 이상의 값을 준다. 따라서 본 연구의 새 압입이론은 기존 이론보다 작은 압입깊이에서도 큰 변형률을 구할 수 있어, 압입시 작은 하중으로 보다 넓은 구간의 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있는 장점이 있다. 식(10)은 해당하는 회귀결과식이며 그림 5에 회귀 곡선을 나타내었다. 회귀식(10)에 $n=8.5$ 를 대입하여 얻어지는 회귀곡선과 유한요소해석으로부터 얻어지는 데이터를 그림 5에 비교하여 나타내었으며, 이를 통하여 회귀식(10)이 변형경화지수에 따른 특성을 잘 나타냄을 알 수 있다.

$$\epsilon_p = f_1^\epsilon(n) \left(\frac{d}{D} \right)^{f_2^\epsilon(n)}$$

$$f_i^\epsilon(n) = a_{ik}^\epsilon n^{-k}; \quad i = 0, 1; \quad k = 0, 1, 2 \quad (10)$$

그림 6(a)는 n 의 변화에 따른 구속인자 ψ 의 변화를 나타낸 그림이다. 이를 통해 ψ 는 n 의 함수임을 알 수 있으며, 압입초기영역은 비선형적으로 증가하다가 일정영역을 지나면서 선형적인 관계를 유지한다. 또한

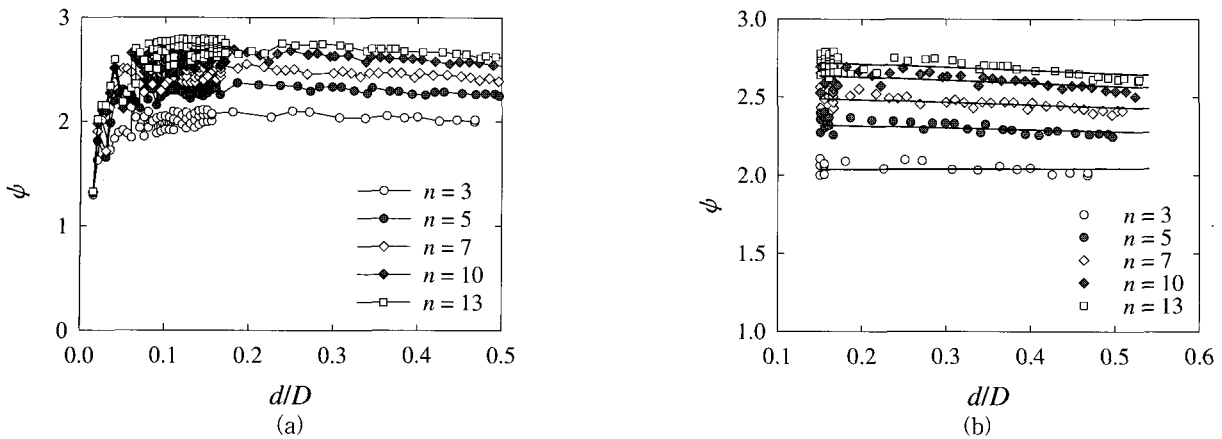


그림 6 변형경화지수의 변화에 따른 (a) 구속인자 ψ 와 압입접촉직경 관계곡선 및 (b) 회귀곡선

n 이 증가함에 따라 ψ_{max} 가 증가하는데, 이는 기존의 Matthews⁵⁾나 Tirupataiah⁸⁾가 관찰한 경향성과 동일하지만 n 의 변화에 따른 변화의 폭이 크다. 그러나 그림 6(a)를 보면 ψ_{max} 영역을 상수로 가정하기보다는 압입직경에 따라 변화하는 직선으로 보는 것이 타당하다. $d/D \geq 0.15$ 인 구간에 대해서 ψ 를 선형회귀한 식은 다음과 같으며, 이를 그림 6(b)에 나타내었다.

$$\psi = f_o^\psi(n) + f_1^\psi(n) \left(\frac{d}{D} \right), \quad (d/D \geq 0.15)$$

$$f_i^\psi(n) = a_{ik}^\psi n^{-k}; \quad i=0, 1; \quad k=0,1,2 \quad (11)$$

3.4 항복변형률 변화에 따른 압입수식

항복변형률 변화에 따른 수식전개를 위하여 유한요소해석을 실시하였으며, 앞 절에서 수행하였던 과정을 통하여 다음과 같은 통합함수를 유도하였다.

$$c^2 = f_o^c(n) f_2^c(\epsilon_o) + f_1^c(n) f_3^c(\epsilon_o) \ln(100h_t/D)$$

$$f_i^c(n) = a_{ik}^c n^{-k}; \quad i = 0, 1; \quad k=0,1,2$$

$$f_j^c(n) = a_{jk}^c \epsilon_o^k; \quad j=2, 3; \quad k=0,1,2 \quad (12)$$

$$\epsilon_p = f_o^\epsilon(n) f_2^\epsilon(\epsilon_o) \left(\frac{d}{D} \right)^{f_1^\epsilon(n) f_3^\epsilon(\epsilon_o)}$$

$$f_i^\epsilon(n) = a_{ik}^\epsilon n^{-k}; \quad i=0, 1; \quad k=0,1,2$$

$$f_j^\epsilon(n) = a_{jk}^\epsilon \epsilon_o^k; \quad j=2, 3; \quad k=0,1,2 \quad (13)$$

$$\psi = f_o^\psi(n) f_2^\psi(\epsilon_o) + f_1^\psi(n) f_3^\psi(\epsilon_o) \left(\frac{d}{D} \right)$$

$$f_i^\psi(n) = a_{ik}^\psi n^{-k}; \quad i=0, 1; \quad k=0,1,2$$

$$f_j^\psi(n) = a_{jk}^\psi \epsilon_o^k; \quad j=2, 3; \quad k=0,1,2 \quad (14)$$

3.5 압입시험을 통한 영률 결정

압입시험을 통한 영률계산에는 Sneddon,⁹⁾ Pharr,¹⁰⁾ 그리고 Francis³⁾의 수식 등이 사용되며, 이 때 영률은 해중시 하중-변위 곡선의 기울기나 탄성회복량으로 계산되어진다. 본 연구에서는 유한요소해석으로부터 초기 해중기울기를 이용한 영률 결정법을 제시하고자 한다.

그림 7은 항복강도와 영률을 고정하고 변형경화지수만 변화시킬 때의 해중 기울기 S 를 나타낸다. 그림에서 가로축 $r_s = (P_{max} - P)/P_{max}$ 은 해중곡선의 선형회귀에 사용되는 부분을 나타낸다. 이 기울기는 회귀영역 r_s 가 증가하면 감소하며, $r_s < 0.1$ 이면 일정값에 수렴함을 볼 수 있다. 따라서 이 수렴하는 값이 해중시 기울기라고 할 수 있으며, 보다 정교한 기울기를 구하기 위해서는 기울기 값이 수렴범위인 $r_s < 0.1$ 이내에서 측정해야 한다.

Pharr 등¹⁰⁾은 해중시 하중-변위 곡선은 본질적으로 비선형이며, 초기 해중 기울기 S 는 영률과 밀접한 관계가 있다고 보았다. Pharr 등은 다음과 같은 영률식을

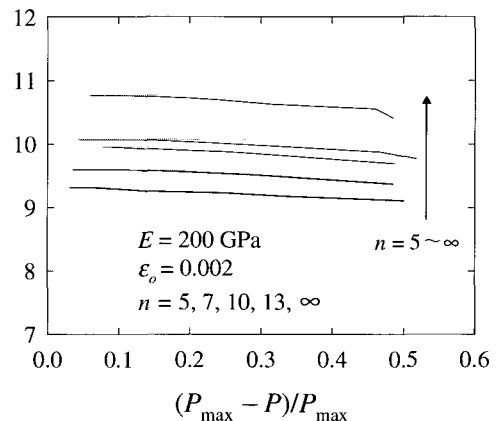


그림 7 해중 기울기 영역 변화에 따른 기울기의 변화

제안하였다.

$$E = \frac{(1 - \nu^2)}{d/S - (1 - \nu_I^2)/E_I} \quad (15)$$

이때 d 는 실제 압입직경을 나타낸다. 그러나 식(15)는 강체 원통형 압입자를 탄성시편에 압입할 때를 가정하여 얻어진 이론식으로, 실제 변형 압입자와 탄소성 변형과 음의 반경을 갖지 않는 실제 재료에서는 적용될 수 없다. 따라서 아래 식과 같이 식(15)에 수정계수 k 를 도입하였다.

$$E = \frac{(1 - \nu^2)}{d/kS - (1 - \nu_I^2)/E_I} \quad (16)$$

이 식을 k 에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$k = \frac{d}{S} \left\{ \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_I^2}{E_I} \right\}^{-1} \quad (17)$$

그림 8(a)는 항복변형률은 고정시킨 상태에서 다양한 영률에 대해 변형경화지수에 따른 k 값의 변화를 보

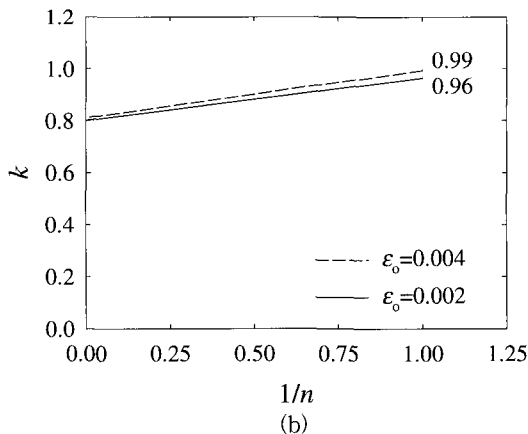
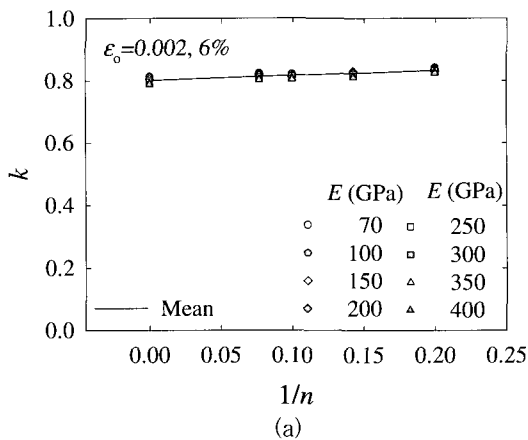


그림 8 (a) 변형경화지수와 영률에 따른 k 의 변화 (b) 주어진 ϵ_0 에 대해 $n=1$ 까지 외삽한 k 의 변화

여주고 있다. 그림으로부터 k 는 n 이 증가하면 미세하게 감소하며 영률의 영향은 비교적 덜 받음을 볼 수 있다. 그림 8(b)는 항복변형률의 변화에 따른 k 값의 변화를 나타내며, 또한 k 와 n 의 관계를 $n=1$ 정도까지 외삽하여 표현하였다. 그림으로부터 항복변형률의 변화는 k 값과 약간의 상관관계를 갖음을 볼 수 있다. 본 연구에서는 k 값을 구하기 위하여 아래 식(18)과 같이 이를 변형경화지수와 항복변형률의 함수로 설정하였고, 이들 계수를 구하여 영률 계산에 이용하였다.

$$k = \frac{\alpha(\epsilon_0)}{n} + \beta(\epsilon_0)$$

$$\alpha = c_{11} + c_{12} \epsilon_0 + c_{13} \epsilon_0^2$$

$$\beta = c_{21} + c_{22} \epsilon_0 + c_{23} \epsilon_0^2 \quad (18)$$

3.6 새 압입이론에 준한 물성치 계산

이상의 사항들을 종합하여 압입시험에 의해 물성치 산정 프로그램을 작성하였다. 전체 흐름도는 그림 9와 같으며, 압입시험을 통해 측정되는 하중-변위 관계에 기초하여 최종적으로 재료물성치인 영률, 항복강도, 변형경화지수 등을 구하게 된다.

Haggag 등¹¹⁾의 기존 압입이론은 압입반복횟수 만큼의 응력-변형률 데이터점을 구하여 이들의 회귀를 통해 재료물성치를 구할 수 있었으나, 본 연구에서는 단 한번의 하중-해중을 통해 구해지는 모든 데이터들을 사용하여 재료의 물성치를 예측한다. 따라서 보다 정확한 물성치 예측이 가능해진다. 또한 기존의 압입이론에 포함되었던 재료상수들의 필요성을 배제하여 별도의 실험과정 없이 재료물성치를 구할 수 있다.

본 장의 유한요소해석에서는 압입자 직경의 6%에 해당하는 깊이만큼 1회 압입한 후 해중하여 하중-변위 곡선들을 생성하였다. 이어 생성된 하중-변위 곡선을 그림 9의 재료물성치산정 프로그램에 입력자료로 대입하여 해당 물성치들을 측정하였다. 초기에 임의의 변형경화지수와 항복강도를 대입하여 계산되어 나오는 각 물성치값들이 주어진 오차 이내에서 수렴할 때까지 반복 계산한다.

표 2에는 이렇게 측정된 물성치값들이 실제 재료 물성치와 비교되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 영률과 항복강도의 경우 평균 2%, 변형경화지수의 경우 평균 3% 정도의 오차를 나타낸다.

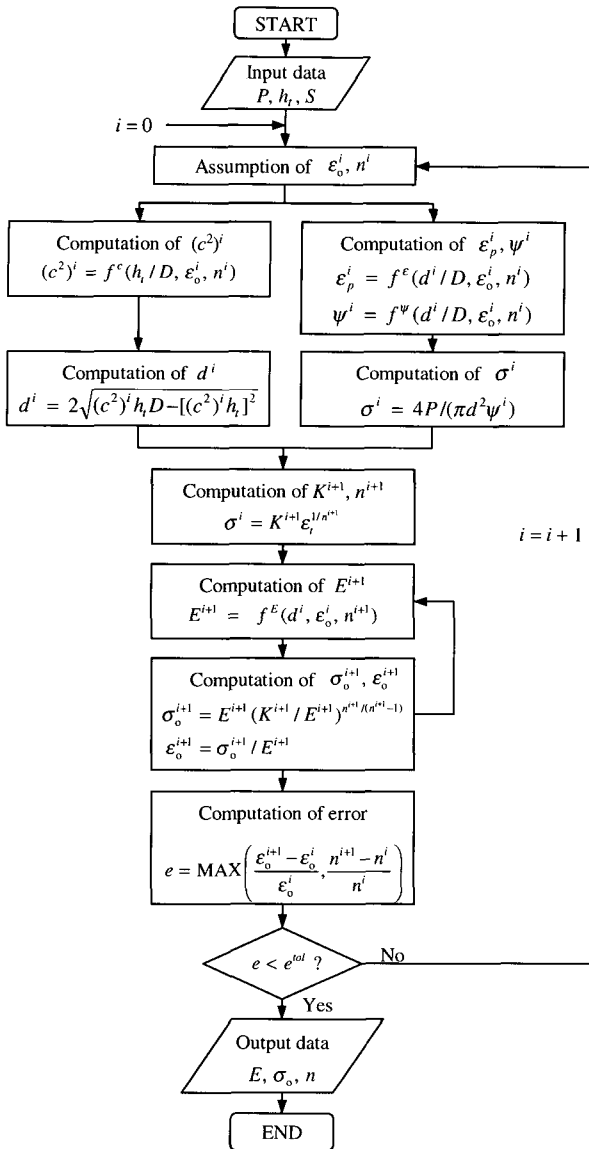


그림 9 E, σ_0 , n을 구하기 위한 새로운 흐름도

표 2 주어진 물성치와 계산된 물성치의 비교

σ_0/E ($\times 10^{-3}$)	n	계산된 σ_0/E ($\times 10^{-3}$)	Error (%)	계산된 n	Error (%)
400/200	5	429/198	7.3/1.0	5.44	8.8
	7	414/195	3.4/2.6	7.47	6.7
	10	404/202	1.1/0.8	10.4	4.0
	13	400/200	0.1/0.1	13.1	0.8
200/200	10	192/213	4.3/6.6	9.4	6.0
400/400		387/422	3.2/5.5	9.63	3.7
400/100		402/100	0.5/0.3	10.2	2.0
800/200		798/202	0.3/0.8	9.92	0.8

그림 10과 그림 11은 실제 재료물성치와 계산된 응력-변형률 곡선을 비교하여 나타내는 것이다. 여기서

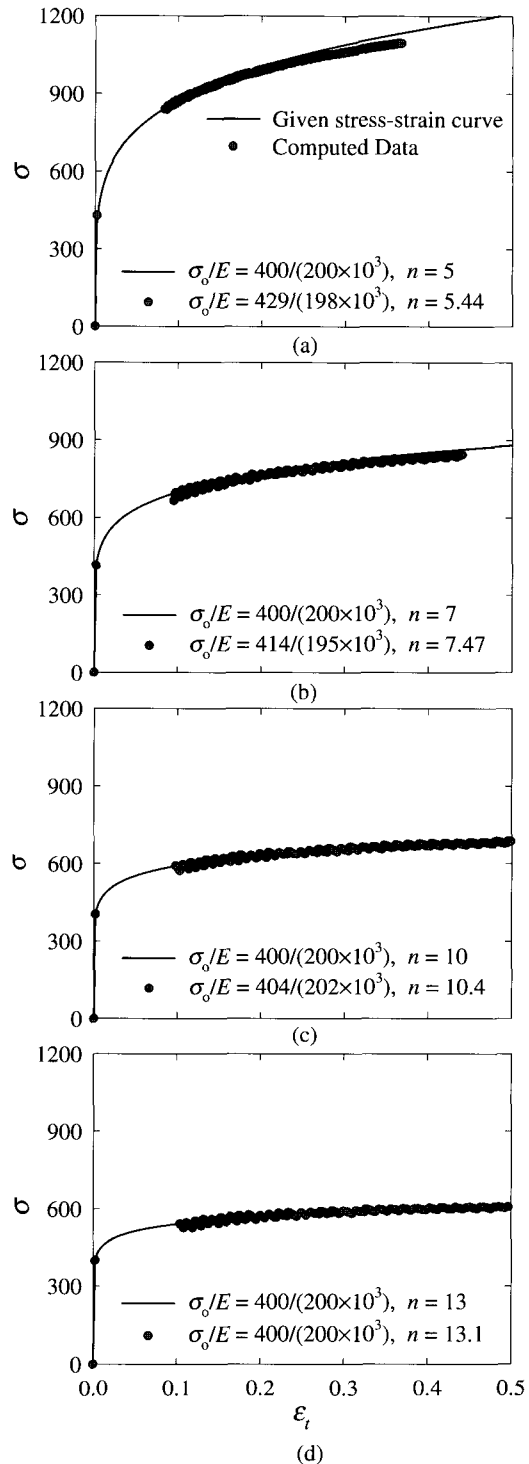


그림 10 주어진 물성치와 계산된 응력-변형률 곡선의 비교 ((a) $n=5$, (b) $n=7$, (c) $n=10$ and (d) $n=13$)

실선은 유한요소해석에 사용된 재료물성치이며, 각 점들은 물성치 예측프로그램으로부터 계산되어 나오는 응력-변형률 곡선상의 응력-변형률 예측지점을 나타낸다. 이로부터 기존 압입시험법과 동일한 압입으로도 기존의 최대변형률값보다 5배 확장된 응력-변형률 곡

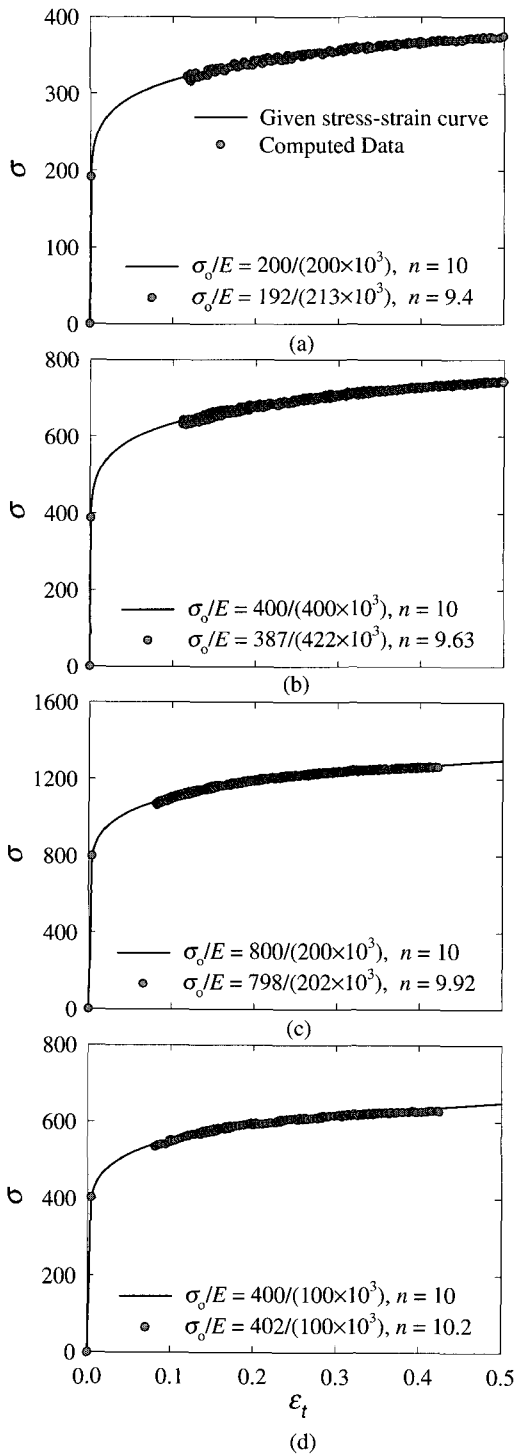


그림 11 $n=10, \epsilon_o=0.001$ [(a), (b)]과 $\epsilon_o=0.004$ [(c), (d)] 일 때 주어진 물성치와 계산된 응력-변형률 곡선의 비교

선을 얻을 수 있으며, 하중-해중시의 모든 데이터들을 사용하기 때문에 보다 정확한 회귀를 가능하게 한다.

같은 방법으로 고무에 대한 구형 압입시험의 유한요소 해석을 통해 고무 물성치들을 정밀 산정해 주는 관련 압입식들을 유도하였다. 그림 12에는 최종적으로 압

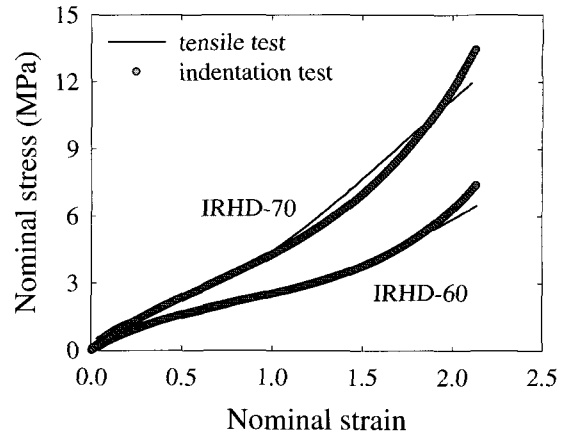


그림 12 압입시험과 인장시험으로 구한 고무의 응력-변형률 곡선

입시험과 인장시험에서 구한 응력-변형률 곡선이 비교되어 있다. 압입시험을 통해 얻은 고무 물성곡선이 인장시험곡선에 충분히 잘 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 사용한 압입시험의 전산모사를 통하여 각 물성치와 마찰계수, 소성이론 등에 따른 특성을 분석하였다. 또한 압입시험의 유한요소 해석 전산모사를 통하여 얻은 재료물성치 상호간의 연관성으로부터 재료물성치의 정밀 계측에 필요한 수식들을 도출하였다. 이상의 과정을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 마찰계수의 변화는 하중-변위곡선에 미치는 영향은 적으나 압입하부의 응력-변형률 분포와 밀접한 관련이 있다.
2. 압입 관측 지점에 따른 소성변형률의 변화와 마찰계수의 영향이 적으면서도 같은 압입깊이에 대해 최대 변형률을 얻을 수 있는 지점으로 압입 중심으로부터 0.4d만큼 떨어진 지점 표면하부에서 응력과 변형률을 관측하였다. 이를 통해 기존 압입시험법의 반정도에 해당하는 압입자 직경의 6% 압입으로 변형률 영역을 5배 내외로 증가시킬 수 있다.
3. 압입시험의 전산모사를 통하여 c^2, ϵ_p, ψ 세 변수를 회귀하였으며, 이로부터 압입시험에 영향을 주는 물성치는 크게 변형경화지수와 항복변형률임을 보였다.
4. 압입지점 0.4d에 대한 압입변수들의 회귀를 통해 재료 물성치 예측 프로그램을 작성하였다. 유한요소

해석을 사용하여 압입자 직경의 6% 압입을 1회 실시하고 해중한 경우 영률과 항복강도는 평균 2%, 변형경화지수는 평균 3% 정도의 오차범위에서 물성치가 구해진다.

5. 본 연구를 고무에 확장 적용하여 실제와 잘 일치함을 보였다. 아울러 본 연구를 활용하여 다층 구조로 이루어진 복합재 및 MEMS 재료 물성치 및 잔류응력 측정 등에 확장 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. ABAQUS *User's Manual*, 2002, Version 6.3, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI
2. Tabor, D., 1948, "A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness," *Proceedings of the Royal Society of London*, 192A, pp.247~274
3. Francis, H. A., 1976, "Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation," *Transactions of the ASME*, pp.272~281
4. Rice, J. R. and Rosengren, G. F., 1968, "Plane Strain Deformation Near a Crack-tip in a Power Law Hardening Material," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp.1~12
5. Matthews, J. R., 1980, "Indentation Hardness and Hot Pressing," *Acta Metallurgica*, Vol. 28, pp.311~318.
6. Hill, R., Storakers, B. and Zdunek, A. B., 1989, "A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test," *Proceedings of the Royal Society of London*, A423, pp. 301~330
7. Norbury, A. L. and Samuel, T., 1928, "The Recovery and Sinking-in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the Effects of These Factors on the Correlation of the Brinell with Certain Other Hardness Tests," *Journal of the Iron and Steel Institute*, Vol. 117, p.673
8. Tirupataiah, Y., 1991, "On the Constraint Factor Associated with the Indentation of Work-hardening Materials with a Spherical Ball," *Metallurgical Transactions A*, 22A, pp.2375~2384
9. Sneddon, I. N., 1965, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 3, pp.47~57
10. Pharr, G. M., Oliver, W. C. and Brotzen, F. R., 1992, "On the Generality of the Relationship among Contact Stiffness, Contact Area, and Elastic Modulus during Indentation," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, pp.613~617
11. Haggag, F. M., Wang, J. A., Sokolov, M. A. and Murty, K. L., 1997, "Use of Portable/In Situ Stress-Strain Microprobe System to Measure Stress-Strain Behavior and Damage in Metallic Materials and Structures," *Nontraditional Methods of Sensing Stress, Strain, and Damage in Materials and Structures*, ASTM STP 1318, pp. 85~98 