

# Spherical Indentation Testing 에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강의 기계적 물성 평가

이종민\* · 남영현\*\* · 남승훈\*\* · 이승석\*\* · 이억섭\*\*\*

## Spherical Indentation Testing to Evaluate Mechanical Properties In 1Cr-1Mo-0.25V Steel

J. M. Lee, Y. H. Nam, S. H. Nham, S. S. Lee, and O. S. Lee

**Key Words :** Indentation(압입), Cyclic loading(사이클릭 하중), Flow properties(유동물성), Yielding strength(항복강도), Brinell hardness(브리넬 경도), Strain-rate(변형률 속도), 1Cr-1Mo-0.25V Steel(1Cr-1Mo-0.25V 강)

### Abstract

Spherical indentation technique was developed to evaluate the flow properties of metallic materials in carbon steel, stainless steel and alloys, etc. Through the spherical indentation test, differently degraded 1Cr-1Mo-0.25V steel's mechanical properties were observed and compared with conventional standard test data. The flow properties of 1Cr-1Mo-0.25V steels were estimated by analyzing the indentation load-depth curve. To characterize the flow property, we used material yield slope and constraint factor index rather than strain-hardening exponent because the variation of strain-hardening exponent was very little and the data showed irregularly. And the constraint factor's effect was small when the material yield slope was taken into account.

### 기호설명

- $\alpha_m$  : 구속인자지수 (Constraint Factor Index)  
 $\beta_m$  : 재료항복기울기 (Material Yield Slope)  
 $\psi$  : 구속인자 (Constraint Factor)  
 $\sigma_t$  : 진응력 (True Stress)  
 $\epsilon_p$  : 진소성변형률 (True-Plastic-Strain)  
 $n$  : 변형경화지수 (Strain-Hardening Exponent)  
 $K$  : 강도계수 (Strength Coefficient)  
 $A$  : 항복인자 (Yield parameter)

### 1. 서론

가장 보편적으로 사용되고 있는 기계적 물성 평가 방법은 일축인장시험으로 재료의 탄성 및 소성 성질 전반에 관한 정보를 제공해 주므로 설비의 안정성 평가에 필수적으로 수행되고 있다. 그러나 시험 가공의 제약 또는 국부적인 물성평가가 요구되는 경우 경도시험법을 이용한 기계적 물성 평가가 이루어지고 있다. 그러나 이러한 시험법은 일반적으로 강도의 상대적 변화량을 비교하는데 그치고 있어 역학적 계산에 기초한 인장시험 결과 적용에는 한계가 있다. 따라서 이를 보완한 다중 압입시험법이 개발되었으며 압입하중에 따른 연속적인 압입깊이의 변화를 측정하여 다양한 기계적 물성을 평가할 수 있게 되었다. 특히 고온·고압

\* 인하대학교 대학원

\*\* 한국표준과학연구원

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

하에서 장시간 사용되는 내열강은 재질의 열화를 수반하게 되는데 이를 평가하는 방법으로 초음파 방법, 전자기 방법 등이 있으나 인장시험에 준하는 다양한 기계적 물성을 얻기는 어렵다. 따라서 본 실험에서는 터빈로터에 많이 사용되고 있는 ICr-1Mo-0.25V 강의 기계적 물성을 다중압입시험법을 적용하여 알아보고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 압입 시험

다중압입시험법을 통해 얻어질 수 있는 기계적 물성은 탄성계수, 항복강도, Lüders strain, 변형경화지수, 진응력-진소성변형률 곡선, 브리넬 경도, 잔류응력 등이 있으며<sup>(1,2)</sup> 이를 통하여 파괴인성을 예측할 수도 있게 된다.

Fig. 1 은 압입에 의한 시편의 단면형상 변화를 나타낸 것으로 하중시 직경  $d_t$  와 하중제거시 재료의 탄성변형에 의한 직경  $d_p$  의 차이가 발생하는 것을 나타내고 있다.

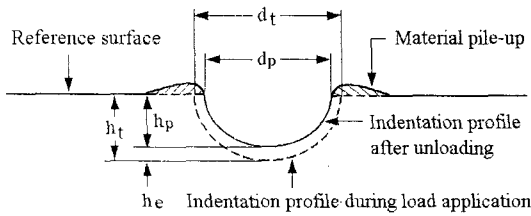


Fig. 1 Indentation geometries before and after loading application

### 2.2 진응력-진소성변형률 곡선

진응력-진소성변형률 곡선은 구형 압입자의 압입에 의해 생기는 압흔의 압입깊이와 힘을 측정하여 하중-변위곡선을 그리게 되며, 이를 응력과 변형률의 관계로 변환하여 다음과 같은 Tabor<sup>(3)</sup> 관계식을 통하여 진응력 값을 얻게 된다. 여기서  $D$  는 압입자의 직경,  $d_p$  는 하중제거시 압입직경이다.

$$\epsilon_p = 0.2d_p/D \quad (1)$$

구형 압입자를 이용한 실험에서 압입 하중  $P$  에 따라 시험재료는 탄성영역, 탄소성영역, 소성영역으로 구분되며, 따라서 소성 변형에 대한 저항 정도를 구속인자(Constraint Factor)로 정의하게 된다.

$$\psi = P_m/\sigma_0$$

탄소단계에서 구속인자  $\psi$  는 선형적으로 증가하여 소성변형이 일어나는 시점에서 약 1.12 가 되며, 탄소성 단계에서는 일정 값까지 증가하게 된다. 완전소성 단계에서는 일정한 값을 유지하며 이는 재료상수  $\alpha_m$  에 의하여 결정된다. 구속인자는 탄소성모델에서는 1~3, 완전 소성모델에서는 2.8~3.1 의 범위에 속하는 것으로 알려져 있으며,<sup>(4)</sup> 이를 통한 진소성변형률은 다음 식으로 표시된다.

$$\sigma_t = 4P/\pi d^2 \psi \quad (2)$$

균일 소성변형의 특징을 나타내는 진응력-진변형률 곡선은 주로 다음과 같은 멱경화법칙(Power law of hardening)을 이용하여 나타내며, 이를 통하여 강도계수  $K$  와 변형경화지수  $n$  을 얻게 된다.

$$\sigma_t = K \epsilon_p^n \quad (3)$$

### 2.3 항복 강도

압입자의 직경  $D$ , 하중시 압입직경이  $d_t$  인 경우 다음과 같은 관계로부터 소성압입직경을 구한다.

$$d_t = 2\sqrt{h_t D - h_t^2} \quad (4)$$

한편 Mayer 법칙<sup>(5)</sup>으로부터 다음 식을 얻는다.

$$P/d_t^2 = A(d_t/D)^{m-2} \quad (5)$$

이때  $d_t/D=1$  에 해당하는  $P/d_t^2$  의 값을 항복인자  $A$  로 정의하며, 항복강도  $\sigma_y$  는 다음 식을 통하여 얻어진다.

$$\sigma_y = \beta_m A \quad (6)$$

여기서  $\beta_m$  은 재료상수로 일반 강재의 경우 약 0.229 정도, 스테인레스 강의 경우 약 0.191 정도의 값으로 알려져 있다.

### 2.4 Brinell 경도

구형 압입시험에 의한 Brinell 경도는 압입 최대 하중  $P_{max}$ , 하중제거시 압입직경  $d_p$ , 압입자직경  $D$  를 사용하여 다음과 같은 ASTM 규정에 의한 식에 의해서 결정된다.

$$HB = 2P_{max}/[\pi D(D - (D^2 - d_p^2)^{0.5})] \quad (7)$$

### 3. 시험방법

#### 3.1 재료 및 시편

시험에 사용된 재료는 1Cr-1Mo-0.25V 탄소강으로 실제로 열화 된 재료의 미세 조직과 유사한 미세 조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도 583°C 보다 높고, 재결정 온도보다 낮은 630°C에서 가속 열화처리가 된 시편을 사용하였다. 이때 소요되는 열화시간은 Fe의 자기확산(self diffusion) 이론에 근거하였으며, 실제 사용 온도와 비교한 열처리 시간은 Table 1에 나타내었으며, Table 2에는 기계적 물성을 나타내었다.

**Table 1** Determination of aging at 630°C for equivalent microstructure serviced at 583°C

Specimen	Aging time at 630°C, hr	Time served at 583°C, hr
A	0	0
B	453	25,000
C	933	50,000
D	1,322	75,000
E	1,822	100,000
F	3,640	200,000
G	5,460	300,000

**Table 2** Mechanical properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel

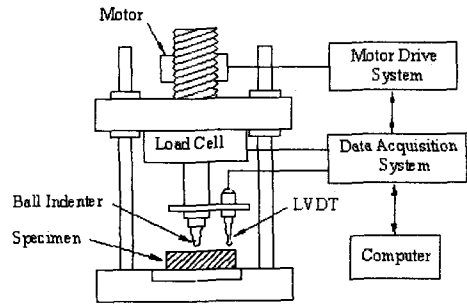
Specimen (A)	Temperature	
	24 °C	538 °C
Yield Strength	665.2 MPa	533.5 MPa
Tensile Strength	823.1 MPa	580.6 MPa
Elongation	18.8 %	22.7 %
Reduction of area	59.4 %	55.5 %

#### 3.2 시험장치 및 방법

시험장치는 미국 ATC 에서 개발한 압입시험기인 Stress-Strain Microprobe system (SSM)을 사용하였으며 Fig. 2에 시험장치의 형상을 나타내었다.

시험은 동일 위치에 대한 다중 압입 사이클에 기초하며 각 사이클마다 압입-하중제거-재하중의 과정을 통해 이루어지며 이러한 절차를 통해 하중-변위 곡선을 실시간으로 얻게 된다. 직경 1.574 mm 구형 압입자를 이용하였으며 각각의 시편에 대하여 7회의 다중압입시험을 행하였다. Load Cell의 최대 하중은 약 4440N이며 압입하중 증가에 따른 압입깊이의 변화는 LVDT(linear variable displacement transducer)를 이용하여 측정하였으며,

각 사이클에 대한 하중제거는 부가된 하중의 40%로 하여 완전 하중제거시 나타나는 비선형적 특성을 제거하였다.



**Fig. 2** Apparatus of the indentation system and schematic diagram

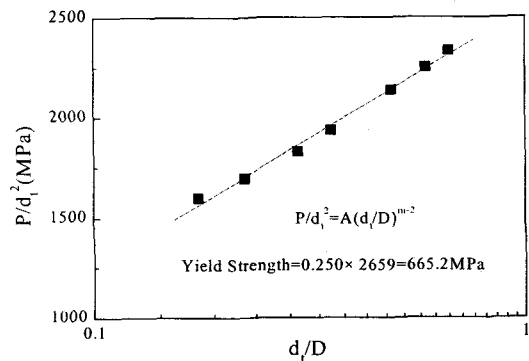
### 4. 시험결과 및 고찰

#### 4.1 재료항복기울기 (Material Yield Slope)

항복강도는  $\sigma_y = \beta_m A$ 에 의하여 결정되므로 재료 상수  $\beta_m$ 는 항복강도 결정에 있어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 이를 구하기 위한 Pre-test를 하였으며 시험조건으로는 일반 강에 대하여 적용되는  $\alpha_m = 1.0$ ,  $\beta_m = 0.229$ 을 사용하였다.

압입시험 및 인장시험을 통해 얻은 항복응력과 약 8% 정도의 오차가 있었으며 이를 보정하기 위하여 수정된  $\beta_m$ 을 구하였다.

Fig. 3은 시편 A에 대한 시험 평균값을 통한  $d/D - P/d_i^2$ 의 관계를 나타내었다. 항복인자 정의로부터 A를 구하였으며 이를 통하여 새로운  $\beta_m$ 값으로 0.250을 얻었다.



**Fig. 3** Relationship between  $P/d_i^2$  and  $d/D$  From load-depth curve

한편 재료상수  $\beta_m$  은 재료의 가공법 또는 조사 (irradiation) 등에 관계없이 적용 가능한 상수로 알려져 있으므로 본 시험에서는 모든 시편에 대해서도 동일한 값을 적용하였다.

#### 4.2 구속인자지수 (Constraint Factor Index)

시편에 부과되는 변형률속도는 응력-변형률 곡선의 모양에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 변형률속도에 따른 유동응력의 변화를 알아보기 위하여 0.001mm/s, 0.002mm/s, 0.01mm/s, 0.017mm/s, 0.025mm/s 의 변형률속도에 대한 유동응력의 변화를 Fig. 4 에 나타내었으며, 변형률속도의 증가에 따라 유동응력이 증가함을 보여주고 있다.

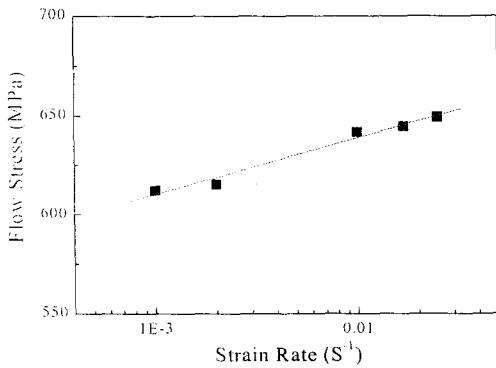


Fig. 4 Relationship between flow stress and strain rate

구속인자지수  $\alpha_m$  은 변형률속도에 비례하므로 인장시험에서의 0.017mm/s 변형률속도와 압입시험에서의 0.002mm/s 변형률속도 차이에 따른 보정을 하였다. Fig. 4 에 의하면 압입시험에서 구한 유동응력은 인장시험에서 구한 유동응력보다 약 3% 정도 크게 나타나며, 따라서 구속인자지수  $\alpha_m$  를 1.03 으로 보정하였다.

#### 4.3 1Cr-1Mo-0.25V 강의 기계적 물성

Fig. 5 는 0 hr, 50,000 hr, 300,000 hr 3 가지 시편에 대한 구형압입시험의 하중-변위 그래프를 나타낸 것으로 하중에 따른 깊이의 변화를 통하여 각 사이클마다의 하중, 총압입깊이, 소성압입깊이 등을 구하게 된다. 시편의 종류에 따라 동일 하중에 대한 압입깊이는 서로 다르게 나타나며 이를 통하여 시편의 기계적 물성을 평가하게 된다. Table 3 은 각각의 시편에 대한 실험 평균값을 나타낸 것이다.

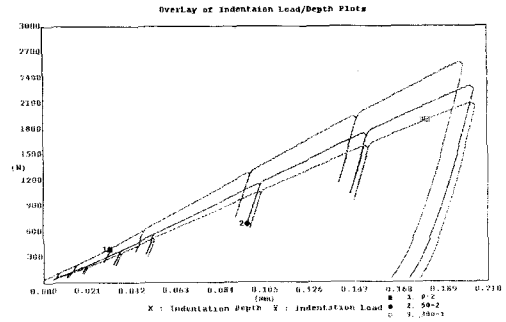


Fig. 5 Comparison between load-depth curves for test conducted on 1Cr-1Mo-0.25V steel

#### 4.4 열처리 시간에 따른 기계적 물성의 변화

Fig. 6 은 구형압입시험의 이론적 해석에 의한 0 hr (A), 50,000 hr (C), 300,000 hr (G) 3 가지 시편의 진응력-진소성변형률 곡선을 나타낸 것으로 0 hr 시편에 대하여 시간이 경과할수록 열화시편의 진응력값은 점차 감소하고 있다.

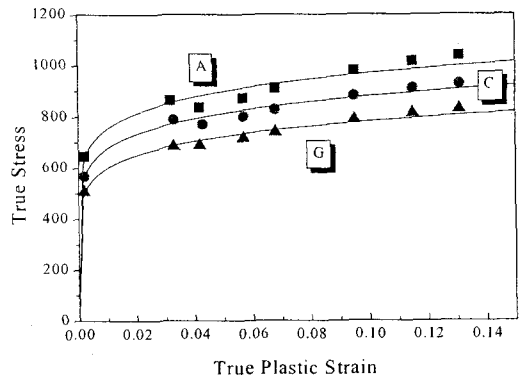


Fig. 6 True stress versus True-plastic strain for spherical indentation test

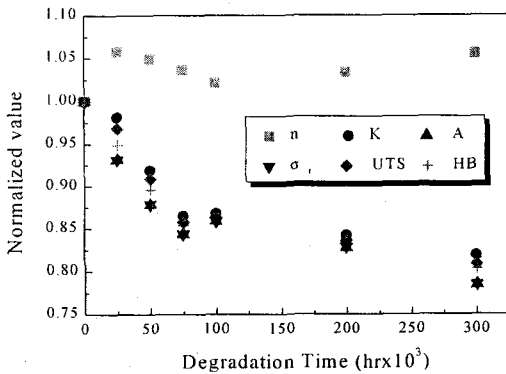
Fig. 7 은 시편에 따른 기계적 물성치의 변화를 0hr 시편을 기준으로 하여 나타낸 것으로, 5 가지의 물성은 거의 동일한 경향으로 변화하고 있으며 시간이 증가함에 따라 점차 감소하고 있다. 초기에는 변화의 폭이 크게 나타나고 있으나 점차 그 변화율이 감소하고 있으며, 이러한 결과는 기존의 인장 및 전자기시험 등에서 얻어진 특성과 잘 일치하는 것으로 보인다. 그러나 가공경화지수 n 은 다른 기계적 물성치에 비하여 열화에 따른 변화량이 매우 적게 나타났으며, 시편의 종류에 따른 특성 파악 인자로는 적절하지 못하였다.

**Table 3** Summary of spherical Indentation test results from 1Cr-1Mo-0.25V steel

Specimen	True Stress/ True-Plastic Strain	Yield Strength, MPa	Brinell Hardness, HB	Ultimate Tensile Strength, MPa
A	$\sigma_t$ (MPa) = $1246\epsilon_p^{0.109}$	646.9	256	877.5
B	$\sigma_t$ (MPa) = $1223\epsilon_p^{0.115}$	602.8	243	849.7
C	$\sigma_t$ (MPa) = $1145\epsilon_p^{0.114}$	568.3	229	797.2
D	$\sigma_t$ (MPa) = $1078\epsilon_p^{0.113}$	545.8	219	752.6
E	$\sigma_t$ (MPa) = $1082\epsilon_p^{0.111}$	555.7	222	757.9
F	$\sigma_t$ (MPa) = $1050\epsilon_p^{0.113}$	535.9	215	733.1
G	$\sigma_t$ (MPa) = $1020\epsilon_p^{0.114}$	507.9	206	709.2

일반 금속의 경우 가공경화지수는 0.1~0.5 사이의 값으로 알려져 있다. 따라서 항복응력을 가공경화지수  $n$ 에 의존한다는 이론<sup>(6, 7)</sup>으로부터 계산된 본 시험재료들의 항복응력은 최대값과 최소값이 약 7% 정도의 차이를 보였으며 또한 열화도에 따른 물성변화의 경향은 불규칙적으로 나타났다.

따라서 본 시험에서는 이상적인 직경을 근거로 한 압입이론을 적용하였으며, 특히 시편이 가공경화지수  $n$ 에 대한 의존성이 낮은 경우에 대하여 재료물성 인자로 재료항복기율기  $\beta_m$ 를 고려하였다. 이는 재료항복기율기  $\beta_m$ 을 알게 되면 보다 간단한 이론식을 전개함으로써 재료의 물성을 예측할 수 방법이 될 것으로 생각된다.



**Fig. 7** Normalized mechanical properties' tendency at a various simulated degradation specimen

Brinell 경도에 있어서 Pre-test 와 재료상수들의 보정이 이루어진 시험의 경우 이들간의 최대오차가 약 1.4%로 나타났다. 이는 식(7)과 구속인자  $\psi$ 의 정의를 고려할 때, 구속인자지수  $\alpha_m$ 이 재료의 기계적 특성에 미치는 영향이 적음을 나타내고 있다.

대부분의 금속재료에서는 HB 와 인장강도 사이에는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

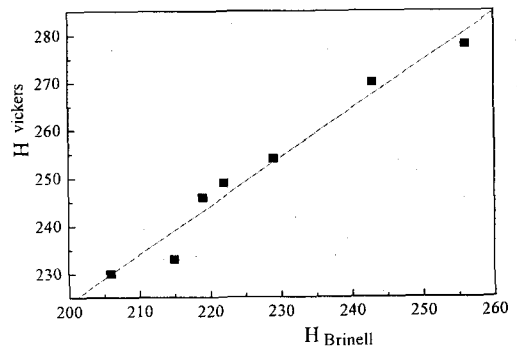
$$\text{인장강도 [MPa]} \approx 3.45 \times \text{HB}$$

그러나 본 시편의 경우 인장시험결과에 비하여 큰 인장강도가 추정되었으며 따라서 HB 계수는 약 3.2 정도로 보정되어야 할 것으로 판단된다.

Table 4 는 각각의 시편에 대한 Vickers 경도 및 Pre-test 에서 얻어진 Brinell 경도를 나타낸 것으로 열처리 시간이 증가할수록 경도는 점차 감소하고 있다.

**Table 4** Hardness of 1Cr-1Mo-0.25V steel

Specimen	A	B	C	D	E	F	G
Vickers hardness, Hv	278	270	254	246	249	233	230
Brinell Hardness (Pre-test)	257	242	229	220	224	212	207



**Fig. 8** The relationship between Vickers hardness and Brinell hardness

Fig. 8 과 Fig. 9 는 압입시험을 통한 Brinell 경도에 대한 Vickers 경도 및 항복응력과 관계를 비교하였다.

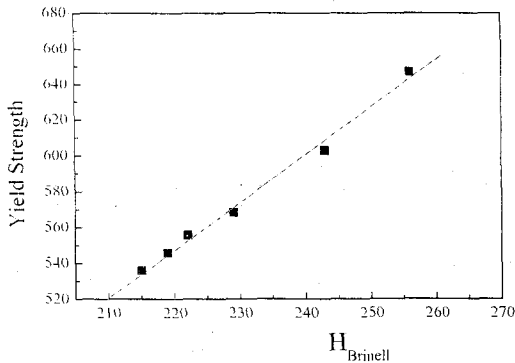


Fig. 9 The relationship between Yield Strength and Brinell Hardness

### 5. 결론

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V 강에 대한 구형 압입시험을 하였다. 이를 통하여 압입하중-변위곡선을 측정할 수 있었으며, 재료의 진응력-진변형률 곡선 및 기계적 물성을 얻었다.

(1) 압입시 하중-변위 곡선의 기울기가 증가할수록 재료의 항복강도, Brinell 경도는 증가함을 볼 수 있었다.

(2) 가공경화지수  $n$  의 변화량이 매우 적게 나타났으며 이에 따른 이론적 항복강도는 최대값과 최소값이 약 7% 정도의 차이를 보였으며 열화도에 따른 기계적 물성변화의 경향은 불규칙적으로 나타났다. 따라서 본 시험에서는 시편의 종류에 따른 기계적 물성을 평가할 수 있는 인자로서 적절하지 못하였다.

(3) 시편이 가공경화지수  $n$  에 대한 의존성이 낮은 경우에 재료물성 인자로 재료항복기울기  $\beta_m$  와 구속인자지수  $\alpha_m$  를 고려하였다. 이에 따른 시험결과, 열처리 시간에 따라 시편의 기계적 물성은 점차 감소하였으며 기존의 물성평가 시험결과와 유사한 경향을 나타내었다. 또한 구속인자지수  $\alpha_m$  은 재료항복기울기  $\beta_m$  에 비하여 기계적 물성에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

(4) 구형압입시험은 다축압입조건인 시험이므로 일축인장시험과의 상관도를 나타낼 수 있는 재료항복기울기  $\beta_m$  에 대한 데이터 베이스가 확보되어야 할 것이다.

- (1) 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 Materials and Stress", Nontraditional Methods of Sensing Strain, and Damage in Materials and Structures, ASTM STP 1318, pp. 85-98.
- (2) Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, K. L. and Swain, R. L., 1990, "Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials", Application of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing, ASTM STP 1092, pp. 188-208.
- (3) D. Tabor, The Hardness of Metals, Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, 1951.
- (4) Fransis, H. A., 1976, "Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation", Transactions of the ASME, pp. 272-281.
- (5) Mayer, E., 1908, Z. Ver. Dtsch. Ing. Vol. 52, pp. 645, 740 and 835.
- (6) Matthews, J. R., 1980, "Indentation Hardness and Hot Pressing", Acta Metallurgical, Vol. 28, pp. 311-318.
- (7) Tirupataiah, Y., 1991, "On the Constraint Factor Associated with the Indentation of Work-hardening Materials with a Spherical Ball", Metallurgical Transactions A, 22A, pp. 2376-2384.