

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

발전소용 배관의 용접 잔류응력 평가를 위한 톱절단법과
연속압입시험법에 관한 연구

A Study on the Saw-cutting and Indentation Methods
for Evaluation of Welding Residual Stresses of Pipes in Power
Plants

이상국, 길두송, 손석만, 이육륜, 이선기, 이준신
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

최근 발전설비의 용접부에서 발생하는 사고유형은 용접결함으로 인한 손상은 거의 발생하지 않고 있으나 용접 열영향부와 용접 재질의 물성이 부적절하여 발생하는 것이 대부분이다. 특히 잔류응력은 용접구조물의 파괴에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 그러므로 용접부를 다량으로 포함하고 있는 발전설비에서는 잔류응력의 분포와 크기가 정확히 파악되어야 한다. 본 연구에서는 원자력발전설비에 사용되는 박판 및 후판의 용접배관의 잔류응력을 파괴적 방법인 톱절단법과 비파괴적인 방법인 연속압입시험법으로 측정한 후 이를 비교함으로써 측정법의 적절성을 검토하고자 하였다.

Abstract

It is widely recognized that the residual stress of weldment affects steel construction and causes fracture initiation of welded structures. It is necessary to know since the power plants adopt a variety of welding processes distribution and magnitude of residual stresses. Therefore the purpose of present study is to investigate the validity of the saw cutting method and the indentation method to measure residual stresses of steel plates by the comparison of residual stresses measured from the specimens of hot reheater pipes, cold reheater pipes and feed water lines used in power plants.

1. 서 론

현재 금속기술이 매우 발달했음에도 불구하고 강 용접 구조물의 용접은 건전성을 확보하기 위해서 가장 주의를 기울여야 하는 대상이다. 국내외 제강기술이 상당한 수준에 도달하였기 때문에 모재의 기계적 성질 보다 용접부의 기계적 성질을 효율적으로 측정하고, 평가할 수 있어야 한다. 특히 발전소 용접부 품질은 건설 중 용접시공 정도에 따라 결정되게 되므로 양호한 용접품질을 확보하기 위해서는 용접으로 인한 결함을 방지하고, 용접 재질의 적절한 물성관리가 이루어져야 한다. 최근 발전설비 용접사고 유형은 용접결함으로 인한 손상은 거의 발생되지 않고 있으나 용접 열 영향부와 용접 재질의 물성이 부적절하여 발생하는 것이 대부분이다¹⁾.

각종 배관 용접부의 손상 조사결과 용접방법과 부적절한 후열처리가 주요 원인인 것으로 밝혀지고 있어 용접 시공과정에서 이러한 부적절한 요소를 발견하여 사전 조치하는 것이 용접사고를 방지할 수 있는 최선책이라 할 수 있다^{2,3)}. 발전설비의 운전 특성상 높은 신뢰도가 요구되는 배관 용접부에서 특히 잔류응력이 인고 있는 문제점은 매우 크기 때문에 그것의 분포와 크기에 대한 명확한 정보를 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 화력 발전소에 사용되는 hot reheater, cold reheater, feed water의 배관 용접부와 동일한 시편을 제작하여 열처리 전, 후의 잔류응력 분포의 변화를 비교하고자 하였다. 잔류응력의 측정법은 톱 절단(saw cutting)법과 연속압입시험법(indentation method)을 사용하였으며, 이들 방법을 일반배관 및 후육배관에 적용하는데 있어서의 적절성을 판단하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 발전소의 배관용 재료로서 Table 1에 운전조건에 따른 배관의 명칭과 크기를 나타내었다. 이 재료들은 발전소의 고온, 고압배관 재료로 많이 사용되고 있으며, 사용 위치에 따라 hot reheater pipe, cold reheater pipe, feed water pipe로 나눌 수 있다. Feed water pipe의 재질에 따른 기계적 성질 및 화학 조성은 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 시편의 두께에 따라 hot reheater와 cold reheater pipe는 일반배관으로, 비교적 후판에 속하는 feed water pipe는 후육 배관으로 구분하였다.

Table 1 Types of specimen and their operating conditions

Type of pipes	Material	Dimension(mm)	Operating Conditions	
			Pressure(kg/cm ²)	Temperature(℃)
Hot reheat pipe	A335-P91	Ψ722 × T21	40.8	541
Cold reheat pipe	A335-P12	Ψ710.2 × T17.9	40.7	292
Feed water pipe	A106-C	Ψ400 × T63	288.6	286

Table 2 Mechanical properties

Material	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Elastic modulus 70°F(×10 ⁶)
A335-P91	min 415	min 585	min 13	30.9
A335-P12	min 220	min 415	min 14	29.7
A106-C	min 275	min 485	min 16.5	29.3

Table 3 Chemical compositions

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	N
A335-P91	0.12	0.50	0.60	0.02	0.01	0.40	9.50	1.05	0.25	0.07
A335-P12	0.15	1.15	0.30	0.025	0.025		1.25	0.64		
A106-C	0.35	0.10	1.06	0.035		0.40	0.40	0.15	0.08	

2.2 용접조건

시편의 용접조건은 발전소 건설시 용접작업에 사용되는 용접절차 사양서를 그대로 적용하였다. 용접방법은 GTAW(gas tungsten arc welding)이고, 각각의 시편에 따른 용접조건을 Table 4에 나타냈다.

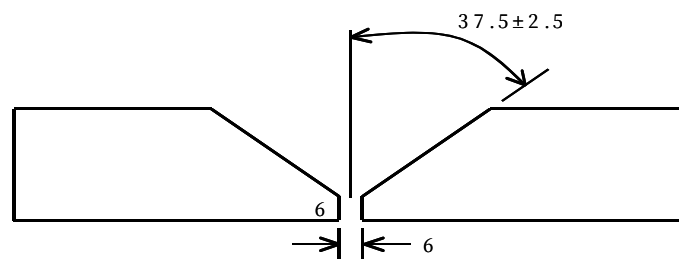


Fig. 1 A schematic presentation of the welded joint

또한 사용된 시편이 후판이기 때문에 Fig. 1과 같이 그루브 가공 후 용접을 실시하였다. 후 열처리에 의한 잔류응력의 이완 효과를 측정하기 위하여 Table 5와 같이 후열처리를

실시하였다.

Table 5 Conditions of PWHT

Pipe	Temp.(℃)	Heat rate(℃/h)	Cooling rate(℃/h)	Heating time(min)
Hot reheat	760	140	180	90
Cold reheat	750	140	180	60
Feed water	650	140	180	180
Hot reheat	600	140	180	90
Cold reheat	600	140	180	60
Feed water	500	140	180	180

2.3 잔류응력 측정

2.3.1 톱절단 시험

기계적 측정방법으로는 크게 톱절단(saw cutting) 방법과 홀드릴링(hole drilling) 방법으로 나눌 수 있는데, 이 두가지 방법 모두 잔류응력을 완화시키면서 발생하는 변형률의 변화를 스트레인 게이지로서 평가하고 이로부터 구속되었던 잔류응력을 구한다는 공통점을 가지고 있다. 하지만 스트레인 게이지의 부착과 절단 방법상의 차이로 인해 홀드릴링 방법은 비교적 균일한 재료의 가공잔류응력에 측정이 용이한 반면, 톱절단 법은 용접열영향부와 같이 불균질한 재료를 포함한 경우에도 비교적 측정이 용이하다는 차이가 있다^{4,5)}. 시험편에 스트레인 게이지를 응력방향에 대한 변형률을 측정할 수 있도록 배치한 후 스트레인 게이지 방향과 수직방향으로 주위 부분을 톱으로 절단하게 되면, 스트레인 게이지로부터 읽히는 표점거리의 변형률 ε 를 읽을 수 있게 되며 변형률에 영률 E 를 곱하여 잔류응력을 평가할 수 있다. 용접부 잔류응력측정을 위해서는 용접부상에 스트레인 게이지를 평가하고자 하는 응력방향에 대하여 변형률을 평가할 수 있도록 배치한 후 스트레인 게이지 방향과 수직방향으로 주위 부분을 톱으로 절단하게 되면 스트레인 게이지로부터 읽히는 표점거리의 변화율, 즉 변형률 ε 를 읽을 수 있게 된다. 이때 얻어지는 변형률에 영률 E 를 곱하는 다음의 간단한 식(1)로부터 잔류응력을 평가할 수 있다.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

2축으로 잔류응력을 평가하고자 할 때는 2축 스트레인 게이지를 활용하여 용접선 방향의 변형률(ε_x)와 그 수직 방향의 변형률(ε_y)를 평가한 후 다음의 관계를 이용하면 된다.

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (3)$$

한편, 스트레인 게이지로부터 얻어지는 정보는 저항선 변형률계(data logger 등의 기기) 등으로 측정한다. 실험은 제작된 4가지 시편을 열처리 전과 후로 나누어 실행하였다. Fig. 2와 같이 게이지 부착이 용이하도록 용접부 표면을 가공한 후 절단선에 맞추어 일정한 간격으로 게이지를 부착한다. 절단선을 따라 시편을 절단하게 되면 응력이 이완되어 모재가 변형을 하게 되는데 이때의 변형율을 잔류응력에 의한 변형율이라고 가정하여 잔류응력을 계산하게 된다. 잔류응력의 측정방향은 용접부와 수직한 방향이고, 모델명이 KFG-120-D19- 11N10C2인 게이지를 사용하여 실험하였다. 모재의 절단 시 일반적인 기계적 절단 방법은 절단 중에 발생하는 열에 의하여 응력이 이완될 수 있기 때문에 정확한 잔류응력 측정이 불가능하여 발열을 최소화하는데 중점을 두었으며, Fig. 3은 절단된 후의 시편을 보여주고 있다.

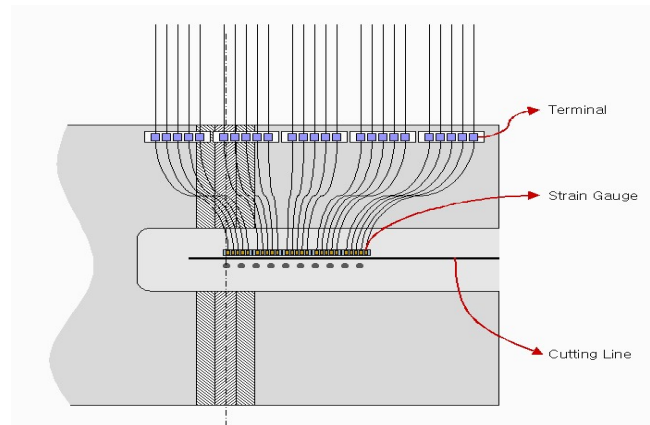


Fig. 2 A schematic of the Saw Cutting Method to measure residual stress

2.3.2 연속압입시험

본 실험에 사용된 시편은 일반 배관에 속하는 cold reheater와 feed WTR 배관, 후속배관인 feed 의 2가지이고, 열처리 전과 후로 나누어 실험하였다. 이 실험에서도 앞의 톱절단 시험과 마찬가지로 용접부와 수직인 방향의 5 mm 간격으로 측정하였고, 압입조건은 최대하중 50 kgf, 압입속도 0.5 mm/min, 하중유지시간 500 ms로 설정하였다. 잔류응력을

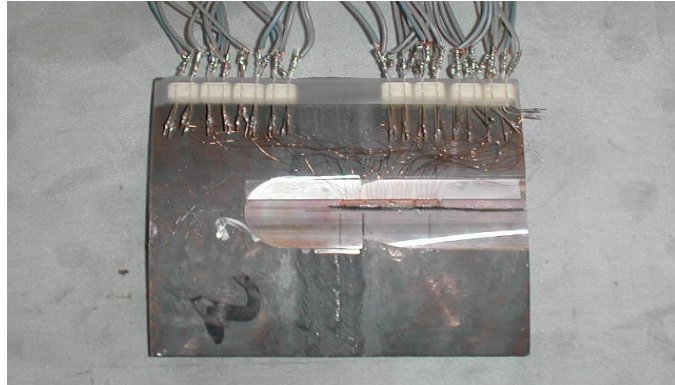


Fig. 3 Photo of the specimen after testing

구하기 위하여 응력이 완전히 이완된 상태의 기준값이 필요하기 때문에 압입시험을 실시한 후 톱 절단방법의 절단방법과 동일하게 절단하여 잔류응력이 이완되었다고 생각되는 절단면 부근의 3 mm지점에 같은 방법으로 압입시험을 하였다.

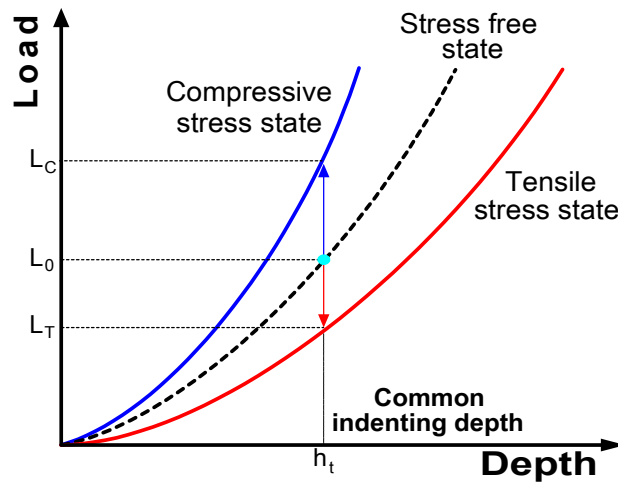


Fig. 4 Comparison with residual stresses according to load and depth

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 재료에 인장응력이 존재하는 경우에는 무응력 상태와 비교할 때 완만한 기울기를 갖고, 압축응력에서는 좀 더 급한 기울기를 갖게 된다. 이러한 곡선의 변화양상과 압입자 하부의 응력상태를 비교하면 재료에 존재하는 잔류응력을 정량적으로 판단할 수 있으며, 이러한 두 조건에서 얻어진 하중인가곡선의 비교를 통하여 잔류

응력이 계산된다^{6~8)}.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 톱 절단법에 의한 잔류응력의 분포

두께가 21 mm와 18 mm로 비교적 얇은 경우인 hot reheater와 cold reheater pipe에 대한 잔류응력 측정결과가 Fig. 5와 Fig. 6에 나타나 있다. 두 가지 경우 모두 열처리 전의 잔류응력 분포는 일반적으로 용접부에서 나타나는 양상으로 나타나고 있지만 인장과 압축이 천이하는 지점은 두께가 두꺼운 쪽이 용접선에 가깝게 나타났다. 열처리 후의 측정 결과는 열처리 전과 비교할 때 매우 낮게 나타나 열처리의 효과가 있었음을 알 수 있다.

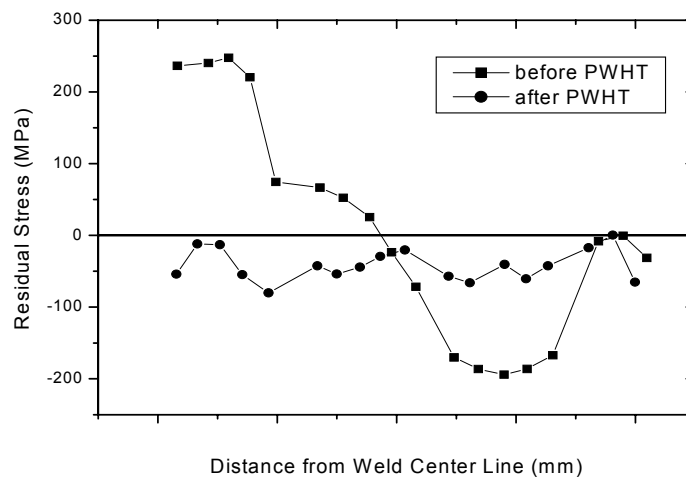


Fig. 5 Distributions of residual stresses measured by the saw cutting method on the hot reheater pipe specimen before and after PWHT

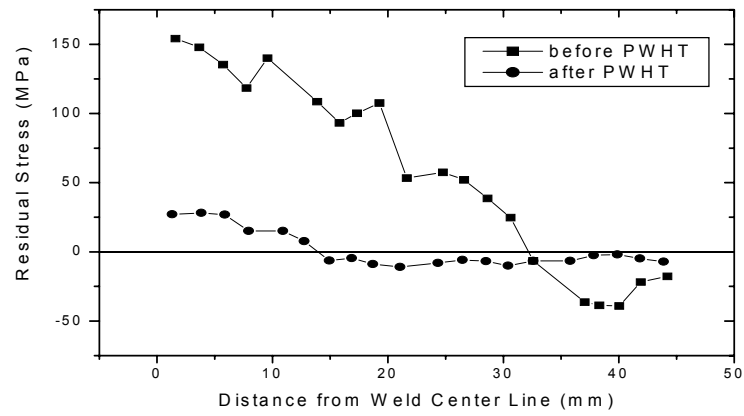


Fig. 6 Distributions of residual stresses measured by the saw cutting method on the cold reheater pipe specimen before and after PWHT

3.2 연속압입시험에 의한 잔류응력의 분포

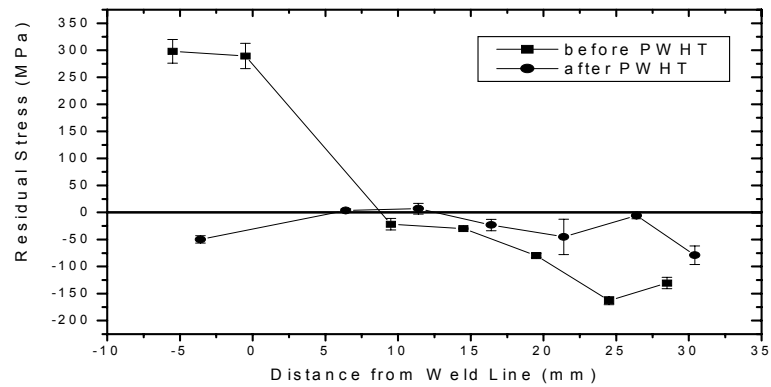


Fig. 7 Distribution of residual stresses measured by the indentation methods on the cold reheater pipe specimen before and after PWHT

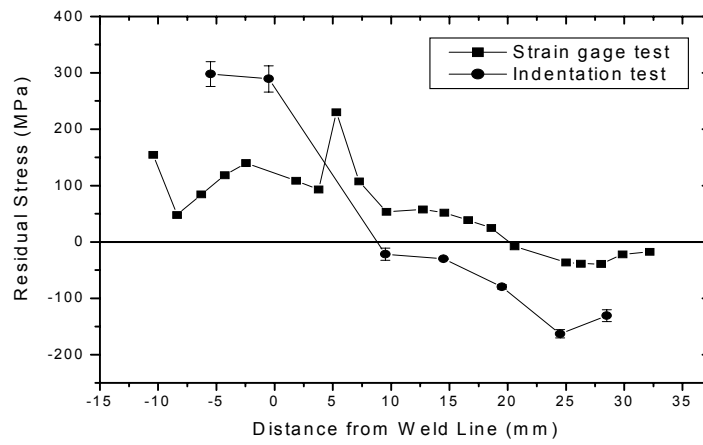


Fig. 8 Comparison of residual stresses measured by the saw cutting and the indentation methods on the cold reheater pipe specimen before PWHT

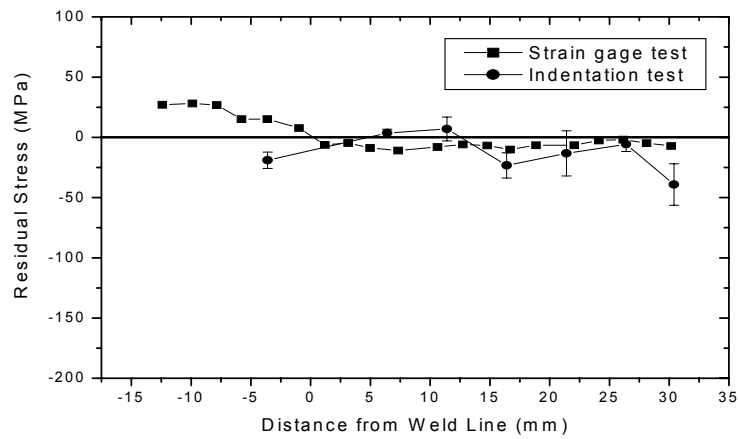


Fig. 9 Comparison of residual stresses measured by the saw cutting and the indentation methods on the cold reheater pipe specimen after PWHT

두께가 18 mm인 cold reheater 배관의 용접부에 대하여 후 열처리 전과 후의 잔류응력을 연속압입시험을 통하여 측정한 결과 Fig. 7과 같이 나타났다. 그래프에서 압입 위치는 각 용접부마다 weld metal의 넓이, 즉 용접 비드의 넓이 차이가 많아서 정확한 HAZ 및 모재의 위치를 판단하기가 어렵기 때문에 용접 중심선에서의 거리 대신 용착 금속과 모재의 경계면으로부터의 거리로 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 열처리 후의 잔류응력이 큰 폭으로 완화되어 후열처리가 매우 효과적이었다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8, Fig. 9는 톱 절단법과 연속압입시험법을 이용하여 얻은 결과를 비교한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 결과값의 절대값은 다소 차이를 보이고 있지만 존재하는 잔류응력의 경향은 거의 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 후육 배관인 feed water 배관의 열처리 전 잔류응력을 두 가지 방법으로 측정한 결과이다. 그래프에서 나타난 결과는 두 가지 실험방법 모두에서 이론적인 분포와 매우 다르게 나타난 것을 알 수 있다. 톱 절단법에 의한 결과는 대체로 응력이 전구간에 걸쳐 이완되어 응력이 작아진 모습이고, 연속압입법에 의한 결과는 매우 다른 양상으로 얻어짐을 알 수 있다.

이러한 결과를 보이는 이유는 후육 배관에서 응력 이완을 위한 절단작업을 수월하게 하기 위하여 사전에 두께 하부를 절단하게 되는데, 이 과정에서 두께방향의 구속 응력이 이완되면서 전체의 잔류응력이 재분포 되기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 후판의 잔류응력 측정에는 절단작업이 요구되는 톱 절단법은 부적합하고, 연속압입시험법은 무응력 상태의 기준값이 설정되어야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전소에 사용되는 용접배관의 잔류응력을 열처리 전과 후로 구분하여 측정한 후 열처리 효과를 알아보았고, 기존의 톱 절단법을 이용한 잔류응력의 측정 결과와 최근 개발된 연속압입시험의 결과를 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 발전설비 주요배관 용접부의 잔류응력을 측정한 결과 열처리에 의해서 잔류응력의 완화를 확인할 수 있었다.
- (2) 후육 배관의 경우, 기존의 절단실험을 통해서 잔류응력을 평가하기에는 실험과정의 난이도로 인하여 많은 어려움이 있음을 확인하였다.
- (3) 연속압입시험을 통하여 발전설비 주요배관 용접부의 잔류응력을 평가할 수 있었으며, 일반 두께의 배관에서 비교적 정확한 잔류응력의 측정이 가능하였다.
- (4) 기준값이 준비된다면 시편의 절단과정이 필요 없게 되므로 스트레인게이지 방법으로 측정이 어려운 후육배관의 잔류응력도 압입시험을 통하여 더욱 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단 된다.

참고 문헌

1. R.D. Stout, Weldability of Steel, Forth edition, Welding Research Council, pp. 104, 1987
2. T. Yamamoto, and H. Kayano, "Nuclear Mater," Vol. 18, pp. 219-227, 1996
3. API RP 579, Recommended Practice for Fitness-for-Service, First Edition, American Petroleum Institute, 2000
4. J. Mather, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformations Around Drilled Method," United Engineering Center 345 East 47 Street New York, N.Y. 10017, ASME pp. 249-254, 1936
5. W. R. Delameter, and T. C. Mauraros, "Measurement of Residual Stresses by hole Drilling Method," Sandia Laboratories Report pp. 77-83, 1985
6. F. M. Haggag, R. K. Nanstad, and R. Swain, "Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Property Fracture Toughness in Metallic Materials," ASTM STP 1092, pp. 188-208, 1990
7. J. H. Ahn and D. Kwon, "Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentation," J. Mater. Res., Vol. 16, pp. 3170-3178, 2001
8. W. C. Oliver, and G. M. Pharr, "An Improved Technique for Determination Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," J. Mater. Res., Vol. 17, pp. 1564-1583, 1992