

인장 및 압축 등방 잔류응력 측정을 위한 누프 압입시험의 응력환산계수 결정

정민재 · 김영천[†]

안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터, 경북 안동시 경동로 1375
(2021년 12월 05일 접수, 2021년 12월 16일 수정, 2021년 12월 21일 채택)

Determination of Knoop Indentation Stress Conversion Factors for Measuring Equibiaxial Residual Stress

Min Jae Jeong and Young-Cheon Kim[†]

School of Materials Science & Engineering, Research Center for Energy and Clean Technology, Andong National University,
1375, Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do 36729, Korea

(Received December 05, 2021; Revised December 16, 2021; Accepted December 21, 2021)

Instrumented indentation testing has been widely used for residual stress measurement. The Knoop indentation is mainly selected for determining anisotropic mechanical properties and non-equibiaxial residual stress. However, the measurement of equibiaxial stress state and compressive residual stress on a specimen surface using Knoop indentation is neither fully comprehended nor unavailable. In this study, we investigated stress conversion factors for measuring Knoop indentation on equibiaxial stress state through indentation depth using finite element analysis. Knoop indentation was conducted for specimens to determine tensile and compressive equibiaxial residual stress. Both were found to be increased proportionally according to indentation depth. The stress field beneath the indenter during each indentation test was also analyzed. Compressive residual stress suppressed the in-plane expansion of stress field during indentation. In contrast, stress fields beneath the indenter developed diagonally downward for tensile residual stress. Furthermore, differences between trends of stress fields at long and short axes of Knoop indenter were observed due to difference in indenting angles and the projected area of plastic zone that was exposed to residual stress.

Keywords: Equibiaxial stress, Residual stress, Knoop indentation, Stress conversion factor, FEM

1. 서론

금속소재는 일반적으로 소성가공, 용접 등의 공정을 거치며 불균일한 변형으로 인하여 잔류응력이 발생하고, 잔류응력은 종류에 따라 피로, 응력부식균열 등 부품 및 구조물의 기계적 신뢰성에 다양한 영향을 미친다 [1,2]. 이를 측정하기 위하여 구조물에서는 Hole-drilling [3,4] 이나 Saw-cutting [5] 등의 기법이 주로 사용된다. 그러나 이러한 방법은 시편 준비 및 실제 시험에 많은 시간이 소요되고, 시편을 파괴하는 과정이 동반되는 등과 같은 단점이 존재한다. 최근 이러한 단점을 극복하고자 압입시험을 기반으로 한 잔류응력 측정 연구가 활발히 진

행되고 있다 [6-8].

한편, 누프 압입시험은 기존에 소재의 비등방 특성이나 잔류응력을 측정하기 위해서 주로 사용하여 왔다. Han *et al.*은 용접부와 같이 잔류응력의 주응력 방향을 알고 있는 경우, x축과 y축 응력크기의 비를 결정하기 위하여 누프 압입시험을 가로와 세로 방향으로 두 번 수행하였다 [6]. Fig. 1은 이러한 실험의 결과로 나타난 압입 하중-변위 곡선의 개략도이다. 각각의 압입 하중-변위 곡선을 무응력 상태의 시편에서 얻은 곡선과 비교하여 같은 압입깊이에서의 하중차를 주어진 수학적 모델링을 통하여 응력비로 환산하였다. Choi *et al.*은 주응력 방향이 주어지지 않은 시편에 대하여 누프 압입시험을 45°씩 회전하며 총 4번을 수행하였다 [7]. 각각의 결과를 무응력 시편에서 얻은 압입 하중-변위 곡선과 비교하여 하중차를 구하고, 제시한 모델을 통하여 평면

[†]Corresponding author: kimyc@anu.ac.kr

정민재: 석사과정, 김영천: 교수

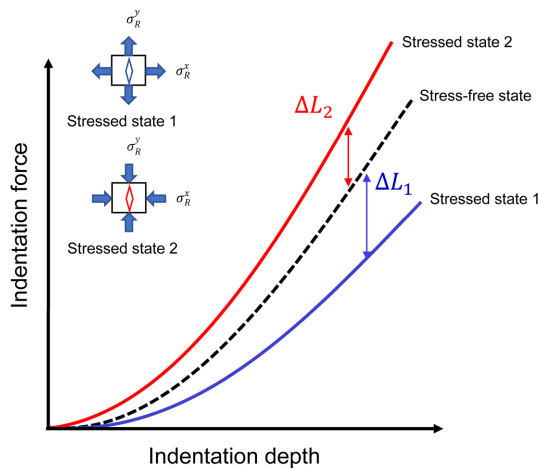


Fig. 1. Schematic of Knoop indentation force-depth curve of stressed specimen

잔류응력의 주응력 방향과 주응력비를 산출하였다. Kim *et al.*은 추가적으로 누프 압입시험에서의 접촉면적을 보정하여 결정하였고, 응력환산계수의 물리적 의미를 도출하여 모델링 함으로써, 잔류응력의 크기를 산출하였다 [8].

그러나 기존 연구에서는 잔류응력이 등방 또는 비등방으로 발생하는지에 대한 여부를 확인하거나, 특정 소재 및 부품에 발생한 잔류응력의 상태를 확인하기 위해서 누프 압입시험을 이용하는 경우, 등방 잔류응력의 산출에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 또한 압축 잔류응력일 때, 누프 압입시험의 적용 가능성 여부에 대해서는 논의된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 등방 잔류응력을 인장 및 압축으로 가한 시편에 누프 압입실험을 실시하고, 이에 따른 압입 하중-변위 곡선으로부터 하중차를 산출하여 잔류응력 측정을 위한 응력환산계수를 산출하였다. 또한 압입자 하부에서 발생하는 응력장의 변화를 관찰하여 적용성 여부를 확인하였다.

2. 유한요소해석 모델링

유한요소해석을 이용하여 응력환산계수를 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 압입자와 시편을 모델링하였다 [9]. 압입자는 잔류응력의 방향성을 확인하기 위해 비등방 압입자인 Knoop 압입자를 사용하였다. Knoop 압입자는 Vickers 압입자 모양과 비슷한 사각뿔 형태를 지니고 있으나, 중심각이 각각 172.3°, 130°로 장축과 단축이 7.11 : 1의 비율을 가지도록 디자인되어 있다. 시편의 압입 깊이를 고려하기 위해 가로, 세로, 높이를 10, 10, 3 mm로 설정하고 해석의 편의를 위해 절반인 가로, 세로, 높

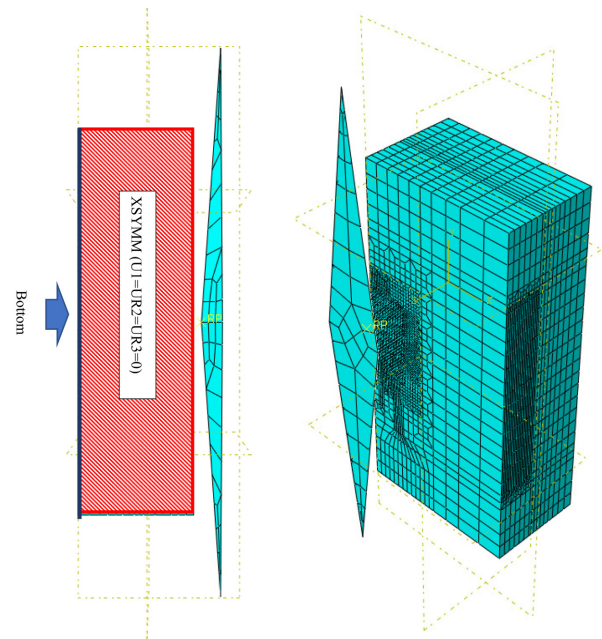


Fig. 2. Modeling for FE analysis: Knoop indenter and specimen

Table 1. Mechanical properties of copper for FE analysis [9]

Elastic Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Poisson's ratio
105.5	247.7	0.3

이 5, 5, 3 mm 모델링을 진행하였고 Fig. 2의 파란색 선인 Bottom 부분에 Boundary Condition $U3=UR1=UR2=UR3=0$ 로, 빨간색으로 빗금친 부분에서는 XSYMM ($U1=UR2=UR3=0$)로 Boundary condition을 설정하였다. 유한요소해석 소프트웨어로는 ABAQUS 2016으로 사용하였으며, input file은 ABAQUS CAE로 작성하였다. 요소는 압입자와 시편 각각 R3D4 (linear Quadrilateral elements), C3D8 (linear hexahedral elements) 타입으로 설정하였으며, 총 118개와 77880개의 elements를 이용하여 해석을 진행하였다. 응력환산계수의 깊이에 따른 결과를 살펴보기 위한 연구이므로, 해석의 편의상 시편의 특성은 항복 이후에 가공경화가 존재하지 않는 탄성-완전소성(elastic-perfectly plastic model)으로 가정하여 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 구리의 기계적 특성은 Kim *et al.*의 연구[9]에서와 같이 Table 1과 같이 설정하였다. 구리는 파이프 배관 등의 매크로 스케일에서도 사용되고, 마이크로 및 나노 단위에서도 박막 등의 형태로 많이 이용되기 때문에 연구의 범용성을 위하여 선택되었다.

실험 조건으로 최대 압입 깊이를 100 μm 로 설정하였고, 압입 하중-변위 곡선으로부터 5 μm 마다 분석을

실시하였다. 잔류응력은 장축과 단축 모두 인가하여 응력환산계수를 산출하였으며, 응력은 크기는 압축, 인장 응력 각각 100, 200 MPa로 가하여 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 2축 등방 잔류응력을 가하여 압입을 진행한 후 압입자 하부에 발생한 응력장 형태를 유한요소해석의 결과로 나타낸 그림으로서, legend의 범위를 일치시켜 각 조건별 응력장 분포의 비교를 실시하였다. Fig. 3a, b, c, d, e는 압입자 장축이 보이는 단면을, Fig. 3f, g, h, i, j는 단축이 보이는 단면을 나타낸 것이다. 잔류응력은 각 그림별로 -200 MPa에서 200 MPa로 100 MPa

씩 증가하며 가하였다. Fig. 3c와 h는 무응력 상태(Stress-free)로 응력이 가해진 상황과 비교하기 위하여 수행되었다. 각각 장축과 단축 모두 구형의 응력장 형태를 띠고 있다. 다만, 장축의 응력장이 단축의 응력장에 비해 수평방향으로 크게 확장하지 못하는 형태를 보인다. 이는 Knoop 압입자의 중심각이 단축보다 장축이 상대적으로 크고 180°에 가깝기 때문에(172.3°) 아래 방향으로 압입 하중을 잘 전달하는 반면, 수평방향으로는 전달하지 못하는 것으로 해석된다.

등방 잔류응력이 200 MPa인 Fig. 3a, f의 경우, 응력장의 형태가 장축의 경우 core 부분이 구형태를 띠고 있긴 하나, 그 크기가 상대적으로 가장 작으며 전체적으로 압입자 직하부에서 응력장의 변화가 주로 아래 방향으로 발달된 것을 확인할 수 있다. 이는, radial 방향으

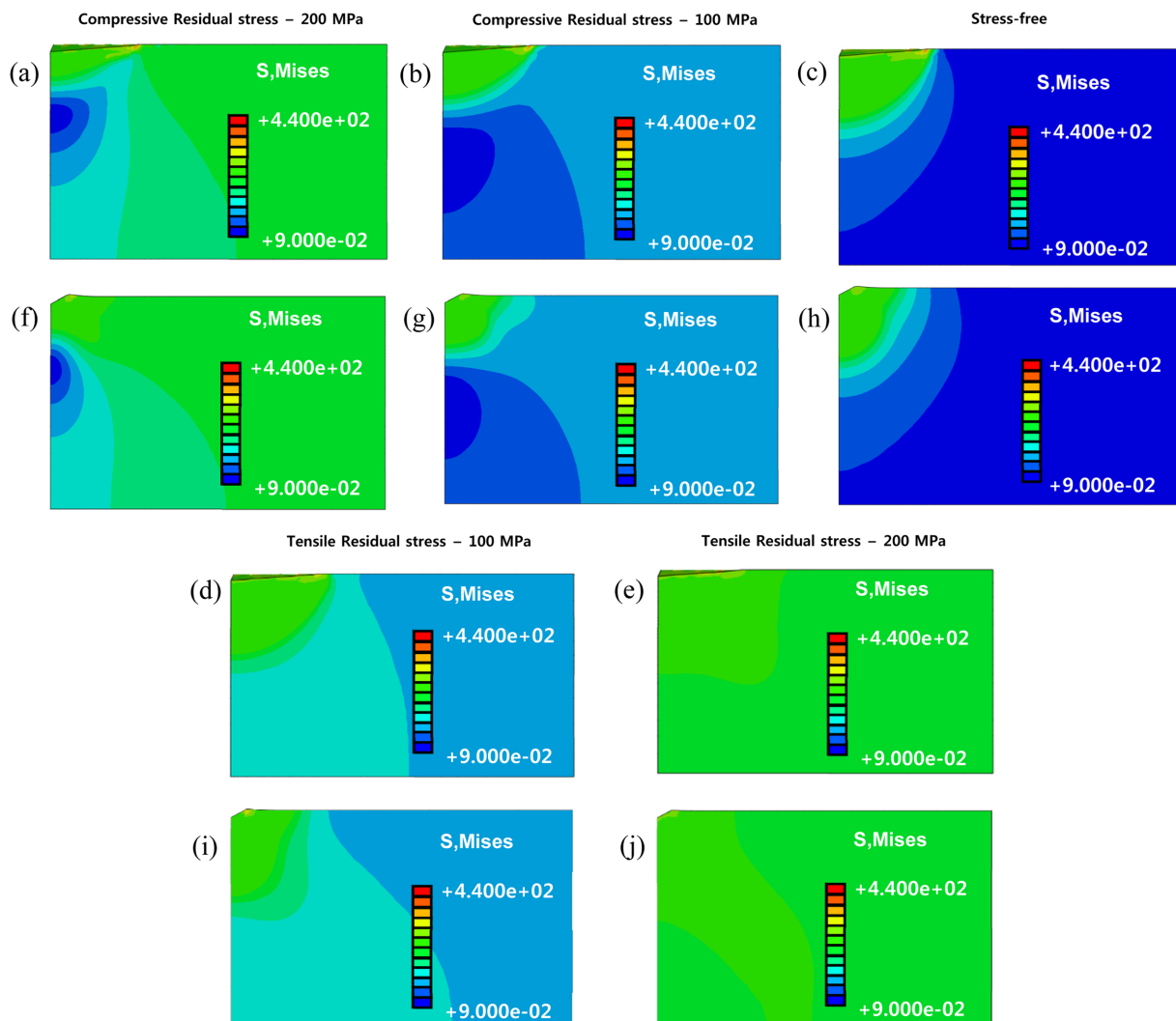


Fig. 3. Stress field cross-sections during Knoop indentation, with stresses of (a),(f) -200 MPa; (b),(g) -100 MPa; (c), (h) 0; (d), (i) 100 MPa; and (e),(j) 200 MPa

로 확장하려는 응력장이 압축 잔류응력의 영향으로 구속되어 있기 때문으로 보인다. 단축의 경우, 장축과 비슷하게 압입자 하부의 core 아래쪽으로 응력장의 변화가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었지만, 장축은 core 부분을 감싸는 듯한 형태로 응력장이 형성되어 있는 반면, 단축은 core와 거리가 있는 상태에서 아래쪽 응력분포가 이루어져 있다. 이는 앞서 언급한 압입자의 중심각 또는 압입각에 대한 영향으로 보인다. 즉, 장축 평행방향으로는 중심각이 180° 에 가깝게 크고 따라서 압입각이 매우 작아 아래 방향으로 압입 하중을 전달하는 능력이 우세하여 상대적으로 수평 방향으로의 힘의 전달이 쉽게 이루어지지 못한다. 반면, 단축은 중심각이 130° 이고(압입각은 35° 이므로) 압입자가 소재를 수평 방향으로 밀어내는 능력이 상대적으로 높다. 이러한 현상은 등방 압축 잔류응력 100 MPa를 가한 Fig. 3b, g에서도 마찬가지로 나타난다. 장축과 단축 모두 Fig. 3a, f의 경우와 비슷하게 압축 응력으로 인한 응력장 발달이 아래 방향으로 주도적으로 나타났고, 장축의 경우(Fig. 3b), 수평 방향으로의 응력장 확장이 압흔 끝부분에서 종료된 반면, 단축 평행방향(Fig. 3g)은 압입각의 영향으로 수평 방향으로의 확장이 상대적으로 많이 발생하였다. 다만 압축잔류응력의 크기가 감소한 만큼, 압입에 의한 응력장 발달이 잔류응력에 의하여 수평방향으로 구속되는 경향은 함께 감소하였다.

인장 등방 잔류응력을 가한 Fig. 3d, i의 경우는 radial 방향으로의 응력장의 확장이 두드러지게 나타났다. 전체적인 응력장의 분포는 무응력 상태보다 더 넓지만 비슷하다고 판단되며, 장축보다 단축의 응력장 확장이 좀 더 잔류응력의 영향을 많이 받은 것으로 보인다. 즉, 장축 평행방향(Fig. 3d)은 동심원 형태의 응력장이 무응력 상태와 비슷하게 유지되고 있지만, 단축 평행방향(Fig. 3i)의 잔류응력은 우측으로 발달하여 경향의 차이를 보였다. 이는 잔류응력에 노출되는 압입자 하부 소성역의 수직 단면적의 차이로 해석할 수 있다. Kim *et al.*에 따르면 압입시, 잔류응력은 압입자 하부 소성역의 수직 방향으로 영향을 미치는데, 누프 압입자는 장축과 단축의 소성역 단면의 차이가 존재하여 영향을 다르게 받는다[8]. 무응력 상태에서 단축의 수직단면 응력장은 장축의 평행방향이고 Fig. 3c와 같다. 장축의 수직단면 응력장(Fig. 3h)과 비교하였을 때, 장축의 영향으로 응력장 단면의 크기가 상대적으로 더 크기 때문에 잔류응력의 영향을 더 많이 받아 단축 평행방향의 확장(Fig. 3i)이 좀 더 우세하게 발생할 것을 예측할 수 있다. 이러한 경향은 등방 인장 잔류응력의 크기가 커질수록 더 강하게 발생한다. Fig. 3e, j의 경우, 우측 하단으로의 응력장 확장 경향이 너무 크게 나타나 응력장의 형태가

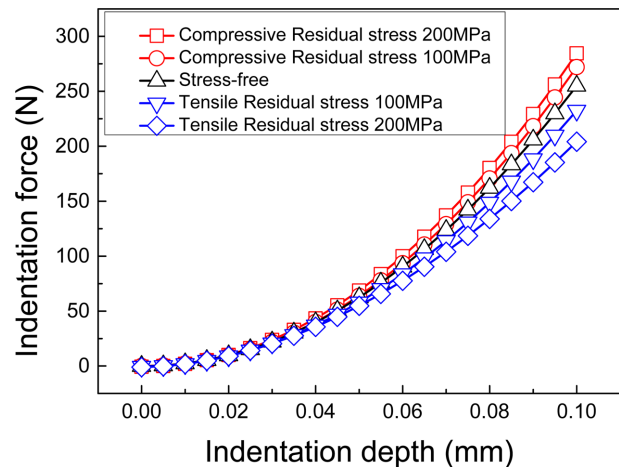


Fig. 4. Knoop indentation force-depth curves of stress-free and stressed specimens

보이지 않는 것으로 판단되며, 장축 및 단축 모두 비슷하게 응력장 형태가 너무 커 현재의 모델링에서는 나타나지 않으며, 이로 인해 경향을 확인하기 힘들 것으로 생각된다.

Fig. 4는 100, 200 MPa의 2축으로 압축 잔류응력, 같은 조건의 인장 잔류응력, 그리고 무응력 상태의 총 5가지의 경우의 압입 하중-변위 곡선 중 하중인가 부분의 유한요소해석 결과를 나타낸 그래프이다. 무응력 상태의 하중-변위 곡선보다 압축 잔류응력이 존재하는 하중-변위 곡선이 더 높은 하중을 가지고 있는 것을 확인할 수 있으며, 압축 잔류응력 200 MPa를 가한 상태(사각 형태의 붉은 곡선)가 100 MPa를 가한 상태(원 형태의 붉은 곡선)보다 같은 깊이를 압입을 진행할 때 더 높은 하중을 요구한다는 것을 알 수 있다. 또한 무응력 상태와 인장 잔류응력을 가한 곡선을 비교해 보았을 때 하중이 더 낮은 것을 알 수 있다. 인장 잔류응력을 100 MPa와 200 MPa 가한 2개의 곡선 또한 비교를 해 보았을 때, 인장 잔류응력 200 MPa를 가한 상태(마름모 형태의 푸른 곡선)가 100 MPa를 가한 상태(역삼각형 형태의 푸른 곡선)보다 같은 압입 깊이에서 더 낮은 하중을 요구한다는 것을 알 수 있다. 이는 압입 시험으로 잔류응력을 측정하는 기존 연구[6-8]와 같은 경향이다.

Fig. 5의 그림은 압입 깊이에 따른 하중차(ΔL)를 나타내는 곡선으로, 하중차는 무응력 상태와 등방 잔류응력 상태의 압입 하중-변위 곡선에서 같은 압입 깊이에서의 하중 차이를 의미한다. 무응력 상태에서 인장 잔류응력을 가한 상태의 압입 하중 차이는, 그 깊이 양수이고 압입 깊이가 깊어질수록 하중 차이 값이 크게 나타났다. 인장 잔류응력을 더 많이 가할수록 더 높은 하중의 차이 값이 나타난 것을 알 수 있다. 반대로 압축 잔류응

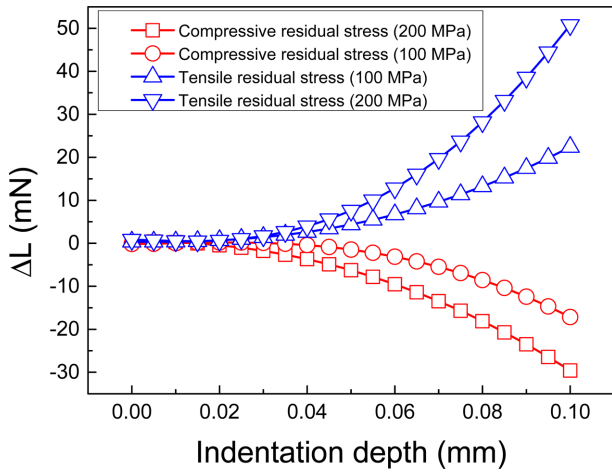


Fig. 5. Indentation force difference-depth curves of Knoop indentations

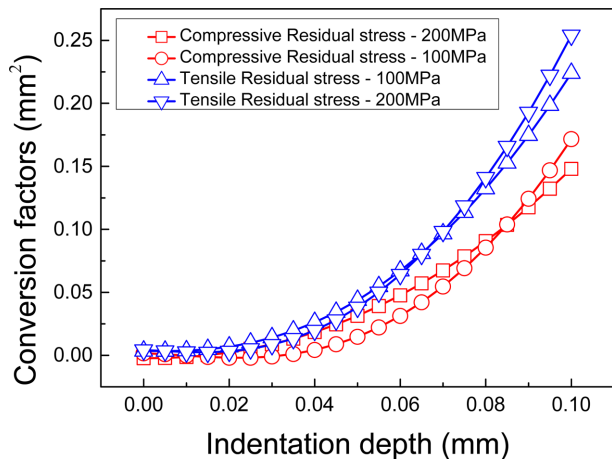


Fig. 6. Relationship between conversion factors and indentation depth for specimens stressed at -200 MPa, -100 MPa, 100 MPa, and 200 MPa

력을 가한 실험에서 하중차는 음수이고, 압축 잔류응력을 더 많이 가할수록 그 크기가 더욱 크게 나타났다. 이에 따른 결과 확인해보았을 때 인장 잔류응력을 가한 상태에서는 같은 깊이를 압입하더라도 더 낮은 하중으로 동일한 깊이를 압입할 수 있으며 반대로 압축 잔류응력을 가질 때는 더 많은 하중을 가하여야 한다는 것을 알 수 있다.

누프 압입시험으로 등방 잔류응력을 산출하기 위하여 응력환산계수를 산출한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 기존 연구[6]에서는 비등방 잔류응력을 측정하기 위하여 다음과 같이 응력환산계수(α)를 정의하였다.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\sigma_R^x} \quad (1)$$

이 때 σ_R^x 은 x축 방향으로 존재하는 잔류응력을 의미한다. 그리고 비등방 잔류응력이 존재하는 시편에 압입 시험 결과 발생한 압입 하중-변위 곡선으로 얻은 하중차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta L_1 = \alpha_{\perp} \sigma_R^x + \alpha_{//} \sigma_R^y \quad (2-1)$$

$$\Delta L_2 = \alpha_{//} \sigma_R^x + \alpha_{\perp} \sigma_R^y \quad (2-2)$$

α_{\perp} , $\alpha_{//}$ 는 각각 일축 잔류응력과 누프 압입자의 장축이 수직, 수평으로 압입하였을 경우에 산출한 응력환산계수를 의미한다. equation (2-1), (2-2)는 x와 y축 방향의 잔류응력이 서로 다른 경우에 적용하였지만, 서로 같은 경우에는 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta L = \alpha \sigma_R \quad (3)$$

이 때 σ_R 는 등방 잔류응력을 뜻한다. 기존 연구결과에 따른 비커스 압입시험을 이용한 잔류응력 측정 모델 [8,10]은 다음과 같다.

$$\sigma_R^x + \sigma_R^y = \frac{3}{\Psi A_c} \Delta L \quad (4)$$

이 때, 등방 잔류응력을 가정한다면 x축과 y축 잔류응력은 서로 같고, 위 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta L = 2 \frac{\Psi}{3} A_c \sigma_R \quad (5)$$

equation (3)과 equation (5)를 비교하면 등방 잔류응력 상태에서 누프 압입시험 분석시 정의된 α 는 소성구속계수와 접촉면적의 함수라는 것을 알 수 있다. 물론 equation (3)은 누프 압입시험, equation (5)는 비커스 압입시험에서 전개된 식이지만, 등방 잔류응력을 가정하고 두 압입자 모두 기하학적 자기유사성을 만족하는 압입자이므로 물리적 의미의 비교가 성립할 것으로 판단된다.

equation (3)으로부터 깊이 별 응력 환산계수를 산출한 결과를 Fig. 6에 정리하였다. 압입 하중-변위의 결과를 바탕으로 10 μm 마다 산출된 응력환산계수는 다음과 같은 4개의 식으로 구할 수 있다.

$$\alpha_{com-200}(\text{mm}^2) = 2.18226 + 21469.33 \times h^{1.88378} \quad (6)$$

$$\alpha_{com-100}(\text{mm}^2) = 2.70007 + 23016.46 \times h^{1.92334} \quad (7)$$

$$\alpha_{ten-200}(\text{mm}^2) = -1.82186 + 20349.09 \times h^{2.00054} \quad (8)$$

위 4개의 식에서 h 는 압입깊이를 의미하며, 두 계수는 압입 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향이 보인다. 인장 잔류응력을 가한 경우, $20\ \mu\text{m} \sim 60\ \mu\text{m}$ 까지 $200\ \text{MPa}$ 가한 경우 보다 $100\ \text{MPa}$ 가한 경우가 더 높은 응력환산계수를 가진 것으로 나타났으며, 압축 잔류응력을 가한 경우도 마찬가지로 $20\ \mu\text{m} \sim 80\ \mu\text{m}$ 까지 $100\ \text{MPa}$ 가한 경우보다 $200\ \text{MPa}$ 가한 것이 더 높은 응력환산계수의 값을 가진 것으로 나타났다. 이와 같은 응력환산계수의 상대적인 비교는 후속 연구에서 이루어져야 할 것으로 판단된다. 현재 해석의 결과는 모델링 파트에서 언급한 바와 같이 사용된 소재의 기계적 특성이 탄성계수, 푸아송비, 항복강도이기 때문에 항복 이후의 소성 변형에 대한 정보가 없는 탄성-완전 소성 변형을 전제로 하였다. 따라서 압입 하중-변위 곡선에서 하중 인가 부분을 완벽하게 모사하였다고 보다는 그 경향을 설명하고, 등방 잔류응력을 측정하는 방법론을 제시하였다는 측면의 의미가 있을 것으로 판단한다. 상기 수치들은 구리 시편의 유한요소해석 결과로서, 등방 잔류응력이 존재하는 시편에 누프 압입시험을 실시하였을 때 해당 응력을 결정할 수 있다. 소재의 종류가 다른 시편은 각 시편별 압입시험을 실시하여 압입 하중-변위 곡선으로부터 응력환산계수를 산출한 후, 잔류응력을 측정할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 등방 잔류응력, 비등방 잔류응력에 관계없이 적용하여 추가적인 시험이 불필요할 것으로 예상되고, 압축 잔류응력에도 적용됨을 확인하여 표면처리를 통한 응력 부가시, 검증 수단으로 활용할 수 있는 기반이 될 것으로 판단한다.

4. 결론

본 연구에서는 누프 압입시험으로 등방 잔류응력이 존재하는 금속 시편의 응력을 측정하기 위하여 등방 잔류응력에서의 응력환산계수를 정의하고 깊이별로 산출하였다. 유한요소해석 결과, 등방 압축 잔류응력에서 압입자 하부 응력장은 수직 아래방향으로 발달하였고, 인장 잔류응력에서는 우측 하단으로 확장하는 경향이 나타났다. 또한 단축과 장축 방향의 경향도 서로 차이를 보였는데, 이는 압입자의 중심각으로 인한 압입각의 차이와 잔류응력에 노출되는 소성역의 수직 단면적 차이로 인하여 설명할 수 있었다. 무응력 상태와 응력 상태의 압입 하중-변위 곡선으로부터 인장과 압축 응력상태 모두 하중차와 응력환산계수를 성공적으로 산출하여 누프 압입시험으로부터 비등방 및 등방 잔류응력을 모두 측정할 수 있다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

1. Jongsoo Kim, Heesan Kim, Effects of Organic Additives on Residual Stress and Surface Roughness of Electroplated Copper for Flexible PCB, *Corrosion Science and Technology*, **6**, 154 (2007). https://www.j-cst.org/open-source/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=C00060400154
2. Kang Yong Seok, Lee Kuk Hee, Shin Dong Man, Factors Affecting Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Alloy 600 MA Steam Generator Tubes, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 22 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.1.22>
3. G. S. Schajer, Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurements, *Experimental Mechanics*, **50**, 159, (2010). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9228-7>
4. W. Woo, G. B. An, E. J. Kingston, A. T. DeWald, D. J. Smith, M. R. Hill, Through-thickness distributions of residual stresses in two extreme heat-input thick welds: A neutron diffraction, contour method and deep hole drilling study, *Acta Materialia*, **61**, 3564 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.02.034>
5. W.-D. Choi, D.-S. Gil, S.-G. Lee, Y.-H. Lee, A Study on the Comparative Evaluation of Welding Residual Stresses of Pipes in Power Plants using Saw-cutting and Indentation Methods, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **23**, 328 (2003).
6. J. H. Han, J. S. Lee, Y. H. Lee, M. J. Choi, G. J. Lee, K. H. Kim, D. Kwon, Residual Stress Estimation with Identification of Stress Directionality Using Instrumented Indentation Technique, *Key Engineering Materials*, 345-346, **1125** (2007). Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.345-346.1125>
7. M.-J. Choi, S.-K. Kang, I. Kang, and D. Kwon, Evaluation of nonequibiaxial residual stress using Knoop indenter, *Journal of Materials Research*, **27**, 121 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.335>
8. Y.-C. Kim, H.-J. Ahn, D. Kwon, J.-Y. Kim, Modeling and experimental verification for non-equibiaxial residual stress evaluated by Knoop indentations, *Metals and Materials International*, **22**, 12 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5515-2>
9. W. J. Kim, Y. J. Kim, and Y.-C. Kim, Stress Conversion

Factor Penetration Depth of Knoop Indentation for Assessment of Nano Residual Stress, *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, **26**, 95 (2019). Doi: <https://doi.org/10.6117/kmeps.2019.26.4.095>

10. Y.-H. Lee and D. Kwon, Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters, *Acta Materialia*, **52**, 1555 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.12.006>