

조관 공정의 수치 시뮬레이션을 이용한 UOE 파이프의 기하형상 예측

Prediction on the Geometric Shape of UOE Pipe Using Computational Simulation of Forming Process

1. 머리말

파이프라인은 유정, 플랫폼, 저장소 등 사이의 긴 거리를 잇는 연속적인 강관 시스템으로서 석유 및 가스 자원을 이송하는 효율적인 방식 중 하나이다. 최대 수 천 km까지의 길이를 갖는 파이프라인은 주로 12 m 정도의 파이프를 용접 연결하여 구성한다. 그 중 16인치 이상의 직경을 가지는 해저용 후육 파이프의 제조에는 여러 조관 방식 중 UOE 조관이 특히 효율적인 것으로 알려져 있다 (Kyriakides and Corona, 2007). 이 UOE 조관 공정에서는 단계적인 소성가공을 통해 후판을 원통형으로 변형시킨 후 LSAW(Longitudinal Submerged Arc Welding)를 통해 파이프를 완성한다. 기존에 해저용 파이프로서 보편적으로 사용되어온 SEAMLESS 파이프와 비교했을 때, UOE 파이프는 생산 가능한 직경의 폭이 넓고 생산 단가가 저렴하기 때문에 지난 수십 년에 걸쳐 사용량이 증가되어 왔다.

UOE 조관 방식은 후판을 원통형으로 만들기 위해 U-forming, O-forming 등 여러 세부 공정을 단계적으로 거치기 때문에 각 세부 공정별로 원하는 형상을 만들어 낼 수 있어야 한다. 만약 형상 예측이 정확하게 이루어지지 않아서 후판이 가공 장비에 들어맞지 않을 경우, 원인 파악과 장비 교체, 반복적인 시도로 인한 시간 및 금전적 손해가 발생한다. 또한 용접 직전 단계에서 양단 모서리 사이의 폭(Welding gap)이 넓거나 좁을 경우 용접성이 좋지 않고 파이프의 품질이 저하될 수 있다. 일반적으로 파이프 외경의 2~3% 정도를 적절한 Welding gap의 범위로 판단하는데, Welding gap이 이보다 넓으면 모서리를 맞게 하기 어려워 용접을 할 수 없거나, 용접이 가능한 경우에도 파이프의 벽면에 과도한 잔류응력을 유발하여 용접부 균열에 대한 우려가 높아진다. 반대로 Welding gap이 이보다 좁으면 윤활유, 분진 등 잔여물의 청소가 원활하지 않아 우수한 용접성을 기대하기 어렵다. 한편, 완성된 파이프 단면의 기하학적 결함인 진원도(ovality) 역시 품질 평가의 중요한 지표가 된다. UOE 파이프는 가공 특성 상 SEAMLESS 파이프에 비해 높은 진원도를 갖게 되는데, 특히 해저용 파이프의 경우 진원도가 높으면 외부 압력에 대한 붕괴 압력이 크게 낮아질 수 있으므로 가급적 낮은 진원도를 목표로 설계해야 한다.

위와 같은 이유로 UOE 파이프의 정확하고 효율적인 설계를 위해서는 각 조관 단계별 후판의 형상 변화를 예측할 수 있어야 한다. UOE 조관은 소재의 큰 변형을 동반하는 현상으로서 대변형 소성 해석을 요구한다. 또한 각 세부 공정은 후판의 소성 변형 및 하중 제거에 따른 그 탄성 회복 메커니즘으로 이루어지기



고 현 무

서울대학교 건설환경공학부 교수



강 수 창

포스코 철강솔루션마케팅실 책임연구원



이 지 운

서울대학교 건설환경공학부 박사과정

때문에, UOE 조관 전반에 걸쳐 소재는 복잡한 변형 이력을 갖게 된다. 그렇기 때문에 정확도 높은 형상 예측을 위해서는 반드시 수치적인 방법이 동원되어야 한다. 이 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 UOE 조관 공정에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하고, 그로부터 파이프의 기하 형상 변화를 예측하였다.

2. UOE 파이프의 조관 공정

UOE 조관법은 그것을 구성하는 주요 세부 공정인 U-forming, O-forming, Expansion의 머리글자를 따서 명명한 것으로서, 다음과 같은 과정을 거쳐 파이프를 제작한다. 먼저 전체적

인 가공에 앞서 그림 1과 같이 모서리 부분의 부드러운 성형을 위한 Crimping을 한다. 다음 U-forming 단계에서는 후판과 장비의 표면에서 발생하는 마찰을 최소화하기 위해 윤활제를 바르고, 그림 2와 같이 후판의 양단을 지지하며 가운데 부분을 편치로 눌러 바깥으로 벌어진 V자 모양을 만든다. 그 후 편치를 고정된 상태에서 직전 단계의 지지대 역할을 했던 Side Pusher를 안쪽으로 눌러 U자 모양을 완성한다. Side Pusher 제거 후 탄성 회복에 의해 형상이 바깥으로 벌어지면 다음 공정이 원활하게 이루어질 수 없다. 따라서 이것을 고려하여 조관 변수들을 적절히 조절해야 한다. 다음 O-forming 단계에서는 그림 3과 같이 전 단계에서 성형된 후판을 반원 모양의 틀에 놓고, 마찬가지로 마찰을 줄

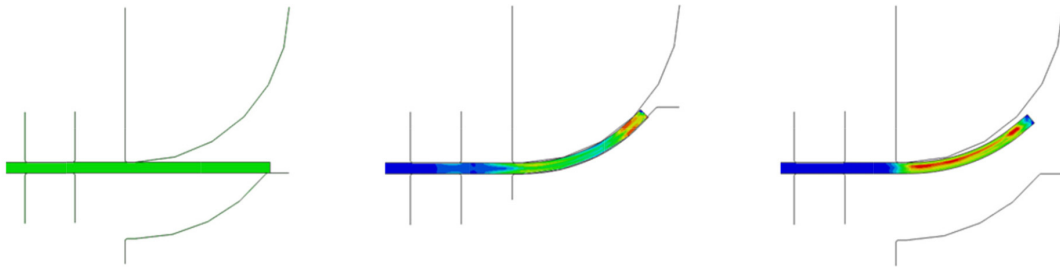


그림 1 Crimping 공정의 단계별 도식화

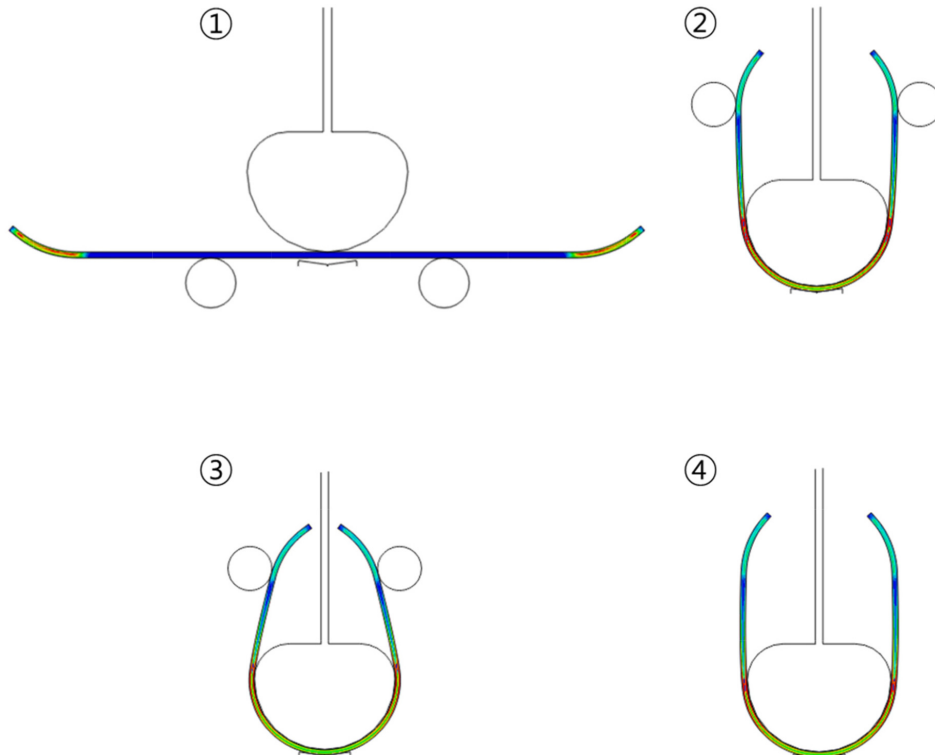


그림 2 U-forming공정의 단계별 도식화

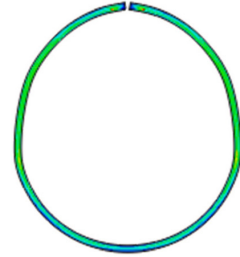
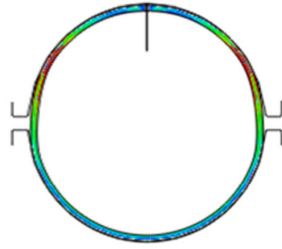
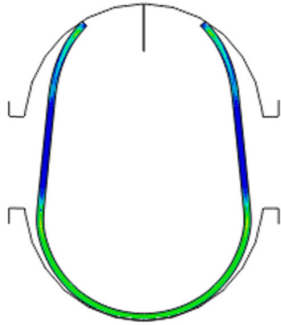


그림 3 O-forming공정의 단계별 도식화

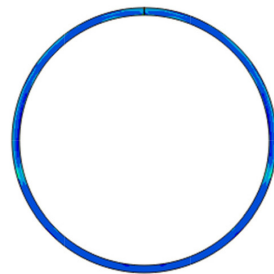
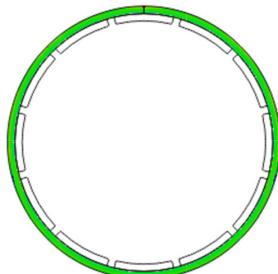
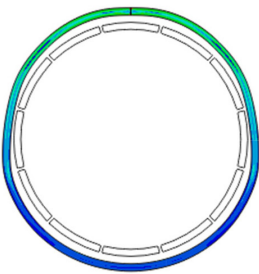


그림 4 확관 공정의 단계별 도식화

이기 위해 윤활제를 도포한다. 그리고 아래쪽 틀과 대칭인 반원 모양의 장비를 위에서 아래로 눌러서 후관의 바깥면과 장비의 내면이 완전히 맞닿을 때까지 성형함으로써 O자 형태를 완성한다. 만약 장비 제거 후 탄성 회복에 의해 Welding gap이 크게 벌어질 것으로 예상이 되는 경우에는, 이 상태에서 추가적으로 후프방향 압축을 가한다. 압축 정도에 따라 장비가 받는 하중이 크게 달라지고 Welding gap이 민감하게 영향을 받기 때문에 이 압축비(compression ratio) 역시 주요 설계 변수로 작용한다. 다음으로 택 용접(tack welding)으로 welding gap을 이어 붙인 후 LSAW 방식으로 파이프의 내, 외부를 용접한다. 완성된 파이프에 대해 진원도를 낮추고 벽면의 잔류응력을 저감시키기 위해 추가적으로 그림 4와 같이 확관을 할 수 있으며, 이 단계를 생략하는 경우는 UO 파이프로 지칭한다.

대표적인 소성 특성을 발현한다. 이와 같은 특성들로 인해 소재의 항복 응력이 달라질 뿐 아니라 응력-변형률 곡선의 형태 또한 변화하는데, 수치해석으로써 재료의 거동을 정확하게 모사하기 위해서는 이러한 현상을 반영할 수 있는 수치재료모델을 도입할 필요가 있다. 이 연구에서는 식 (1), (2)와 같이 등방경화모델과 이동경화모델로 재료의 소성 거동을 표현한 복합경화재료모델을 사용했다. 여기서 등방경화항(K)은 소성변형에 의한 항복면의 확장을, 나머지 이동경화항은 backstress 성분(α)에 의한 항복면의 이동을 표현한다. Chaboche and Rousselier(1983)는 반복하중 하에서의 재료 거동을 모사하기 위해서는 α 를 여러 하위 성분(α_i)들의 합으로 나타내고, α_i 를 현재소성변형률(present plastic strain, ϵ)과 누적소성변형률(accumulated plastic strain, p)에 관한 적분 함수로 표현하는 것이 효과적임을 밝힌 바 있다.

3. UOE 파이프의 기하형상 예측

3.1 복합경화(Combined hardening) 재료모델

앞서 소개한 바와 같이 UOE 조관을 거치는 동안 소재는 휨, 압축, 인장 등에 의해 변형률의 부호가 바뀌는 반복 하중(cyclic loading)을 받으며 소성 변형을 일으킨다. 이러한 하중 조건 하에서 금속은 가공경화, 마우싱거 현상과 같은

$$f(\sigma, K) = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma' - \alpha') : (\sigma' - \alpha')} - K = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ \dot{\alpha}_i = \frac{2}{3} A_i \dot{\epsilon}_p - C_i \dot{p} \end{cases} \quad (2)$$

A_i, C_i : Hardening parameters

여기서 만약 소재가 초기 인장 및 압축에서 뚜렷한 항복점(yield plateau)을 발현하는 경우, 이를 반영하기 위한 수단이 필요하다. Zou 등(2016)은 식 (3)과 같이 등방경화항을 표현함에 있어 항복점의 길이(l_{pl})를 기준으로 두 개의 다른 함수를 사용하였다. 그 중 항복점 영역에서는 등방경화에 의한 항복면의 확장을 제한하는 항을 두어, 소성변형률이 증가하더라도 응력이 거의 일정하게 유지되는 현상을 반영할 수 있게 하였다.

$$K = \begin{cases} \sigma_0 + (\sigma_1 - \sigma_0)(1 - \exp(-\beta p)) & p \leq l_{pl} \\ \phi + Q(1 - \exp(-bp)) & p \geq l_{pl} \end{cases} \quad (3)$$

$\sigma_0, \sigma_1, \beta, Q, b$: Hardening parameters

위와 같이 구성한 수치재료모델의 경화 파라미터(Hardening parameter)를 결정하기 위해 소재 실험을 수행해야 한다. 이 연구에서는 파이프용 고강도강 API-X70에 대해 인장-압축 반복 시험을 수행하고 응력-변형률 곡선을 얻었다. 그 후 유전자알고리즘 등의 최적화 기법을 이용하여 실험 결과와 재료모델의 평균제곱근오차(root mean square error)를 최소화시키도록 경화 파라미터를 보정하면 실제 재료 곡선에 근접한 모델을 도출할 수 있다.

3.2 조관 공정 시뮬레이션

이 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 2차원 UOE 조관 공정 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 일반적인 UOE 파이프의 길이 대 직경 비는 10 이상이므로 길이 방향 변형은 무시할 수 있으며, 실제 파이프의 가공도 면내에서 주로 발생하므로 평면변형률(Plane strain) 조건을 가정할 수 있다. 실제 파이프 조관은 동적(dynamically)으로 이루어지지만, 장비의 구동 속도가 빠르지 않아 관성, 감쇠 등 동적 효과가 미미할 것으로 판단하여 준정적(quasi-static) 조건 하에 해석을 진행했다. 후판은 CPEG4R 요소를 사용해 메쉬를 하고, 가공 장비는 변형이 불가능한 강체 표면(non-deformable analytical rigid surface)으로 모델링했다. 용접에 의해 전체 형상 변화가 크게 달라지지 않을 것으로 판단, 용접 열해석 및 별도의 상세 모델링을 하지 않고 해당 연결부의 적합조건으로서 고려하였다. 3.1절에서 소개된 재료모델을 적용하기 위해 UMAT Subroutine을 이용하고, 재료 비선형, 기하 비선형 및 경계조건 비선형을 고려할 수 있는 대변형 해석을 수행했다. 장비와 후판 사이의 접선방향 움직임은 미소하기 때문에(small sliding) 해석 시간에서 이점을 보이는 절점-표면(node-to-surface)방식의 접촉 조건을 사용하고, 쿨롱마찰계수 0.1을 적용했다. 해석

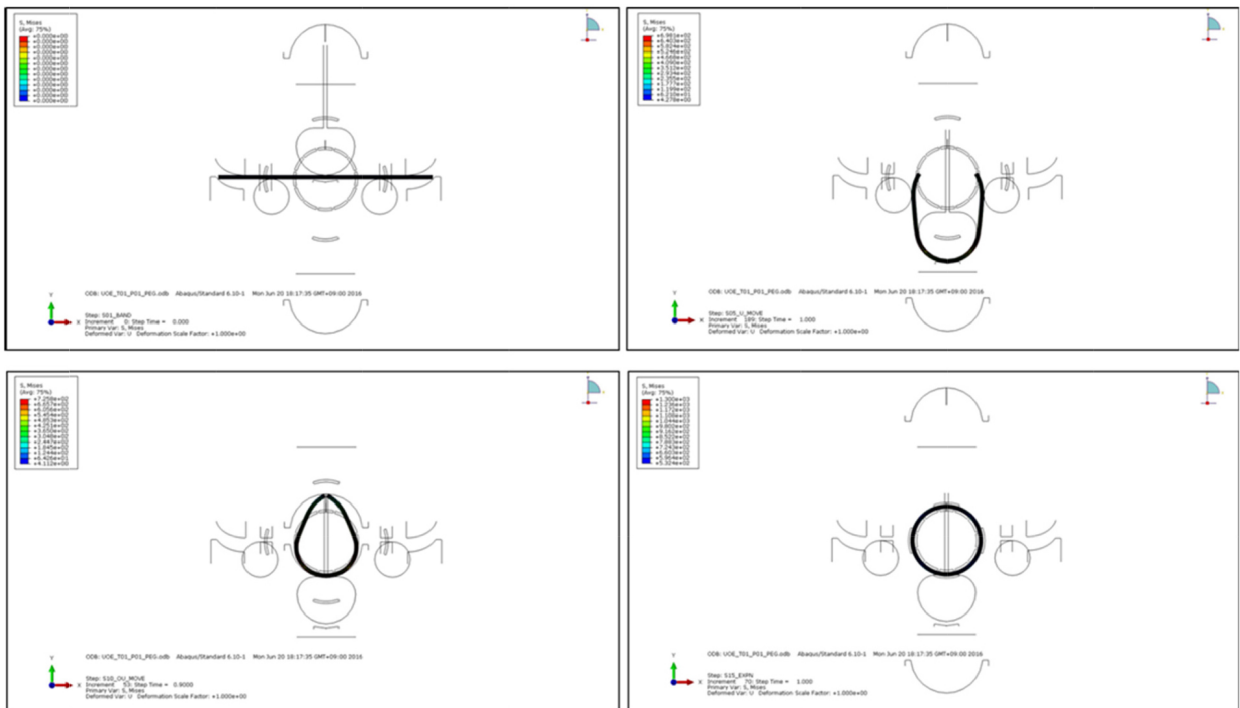


그림 5 유한요소해석을 이용한 UOE파이프의 조관 시뮬레이션

의 진행에 있어서는 실제 조관에서와 같이 장비의 움직임을 조절하는 변위제어 해석을 했다. 위 조건 하에서 그림 5와 같이 조관 시뮬레이션을 구동한 결과 **Welding gap**과 진원도를 포함한 각 세부 공정별 후판의 형상 변화를 예측할 수 있었다. 또한 각 공정에서 장비에 가해지는 반력을 도출할 수 있었다. 이는 파이프의 설계 단계에서 조관 가능성을 검토하는데 사용될 수 있다.

4. 맺음말

본 기사를 통해 UOE 파이프의 조관 공정을 소개하고, 수치 시뮬레이션을 이용하여 UOE 조관 중 후판의 형상 변화를 예측하는 방법에 대해 살펴보았다. UOE 조관은 해저용 파이프의 생산에 높은 효율성을 보여 그 사용이 꾸준히 증가하고 있지만, 기존의 해석적인 방법으로는 파이프의 형상 변화를 정확하게 계산할 수 없어 파이프의 용접성이나 생산 가능성 등에 대한 우려가 있었다. 이 연구를 통해 개발된 조관 시뮬레이션 프로그램은 **welding gap**을 포함한 각 세부 공정별 형상을 정밀하게 예측할 수 있도록 하여 설계의 정확도 및 효율성 향상을 가져올 수 있다. 또한 개발된 프로그램을 이용함으로써 신소재 개발, 설계 직경 및 두께의 다양화 등에도 신속하게 대응할 수 있다.

References

1. American Petroleum Institute (2012). Specification for line pipe. US: American Petroleum Institute.
2. Chaboche, J.L. (1986), Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of*

Plasticity, 2(2), 149-188.

3. Fusahito Y., Takeshi U., Kenji F. (2002), Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *International Journal of Plasticity*, 18, 633-659.
4. Jia, L.-J. & Kuwamura, H. (2014), Prediction of cyclic behaviors of mild steel at large plastic strain using coupon test results. *Journal of Structural Engineering*, 140(2), 04013056
5. Palumbo G. & Tricarico L. (2005), Effect of forming and calibration operations on the final shape of large diameter welded tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 1089-1098.
6. Ren Q., Zou T., Li D., Tang D. & Peng Y. (2015), Numerical study on the X80 UOE pipe forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 264-277.
7. S. Kyriakides, E. Corona. (2007), *Mechanics of offshore pipeline* Oxford, U.K.: Elsevier.
8. Y. Huang, D.-K.L. (1995), An elasto-plastic finite-element simulation of successive UO-bending processes of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 53, 643-661.
9. Yu WW. (2000), *Cold-formed steel design*. NY, US: Wiley.
10. Zou, T., Li, D., Wu, G. & Peng, Y. (2016), Yield strength development from high strength steel plate to UOE pipe. *Materials & Design*, 89, 1107-1122. 