

경도분포 및 역설계 기법을 활용한 ERW 파이프 열영향부(HAZ) 물성 예측 연구

이상민¹ · 현대일² · 홍석무^{3, #}

Prediction Study of Heat-Affected Zone (HAZ) Properties in ERW Pipes using Hardness Distribution and Reverse Engineering Techniques

S. Lee, D. Hyun, and S. Hong

(Received August 11, 2023 / Revised November 18, 2023 / Accepted November 20, 2023)

Abstract

To ensure driver safety, high-strength steel pipes are utilized in the chassis and internal structures design of automobiles. ERW(electric resistance welding) pipes, fabricated through welding at joints using electrical resistance, form a Heat-Affected Zone (HAZ) during the welding process. Due to characteristics such as increased hardness and reduced ductility compared to the base material, HAZ poses challenges in finite element analysis (FEA) for pipe shapes. In this study, for FEA considering HAZ properties, mechanical properties were measured through uniaxial tensile testing and digital image correlation (DIC) techniques after specimen fabrication. These measurements were validated using reverse engineering methods. Furthermore, hardness measurements and gaussian functions were employed to ascertain the hardness distribution within the HAZ, serving as a basis for subdividing the HAZ and modeling the pipe shape. To validate the effectiveness of the HAZ modeling approach, models were interpreted incorporating only base material properties and models incorporating average-calculated HAZ properties. Comparative analysis was performed, revealing that the model subdividing the HAZ based on hardness measurements closely approximated experimental values. This validation offered a methodology for HAZ modeling in FEA.

Keywords : Digital image correlation, Finite element analysis, Heat affected zone, Reverse engineering, ERW pipe

1. 서론

자동차의 샤시(Chassis) 또는 내부 구조물들의 강도 및 강성은 운전자의 안전 직결되어 있는 중요한 설계 지표이다. 특히, 차량의 시트는 직접적으로 탑승자와 밀착되어 있는 중요한 구조물로서, 고강도강 파이프를 사용하여 프레임이 제작된다 심 파이프(seamed pipe)는 판재를 원형으로 변형시킨 후 이음매를 접합하여 만드는 파이프이며, 그 방법 중 하나

인 ERW (electric resistance welding) 파이프는 Fig. 1과 같이 판재를 원형으로 벤딩(bending) 후 판재 사이를 전기 저항 용접 및 롤러를 이용해 이음매를 접합하여 제작한다. 이때 용접 공정에서 발생하는 열에 의해 모재(base metal)에 열이 전달되어 기계적 특성이 변하게 되는데, 이러한 부분을 열영향부(HAZ, heat affected zone)라 한다. Fig. 2는 ERW 파이프의 단면으로, 용접 시간이나 속도 등의 조건에 열응력에 의해 조직이 변형되면서 모재에 비해 경도는 증가하고 연성은 감소한다[1-4]. 이러한 열영향부의 기계적 물성 변화는 제품의 성능 및 품질에 악영향을 미치며 결과적으로, 운전자의 안전을 저해하기 때문에, 열영향부의 정확한 물성예측이 중요하다.

1. 공주대학교 미래융합공학과, 석사과정
2. 공주대학교 미래융합공학과, 박사과정
3. 공주대학교 미래자동차공학과 · 그린카기술연구소, 교수
#Corresponding Author: Department of Future Automotive Engineering,
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr,
ORCID: 0000-0001-5569-6285

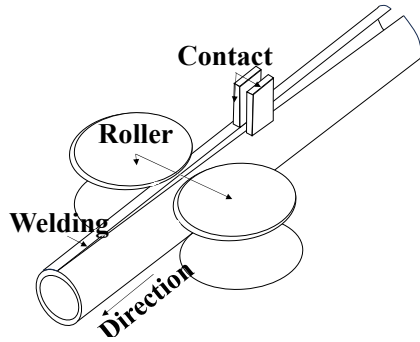


Fig. 1 Pipe manufacturing process

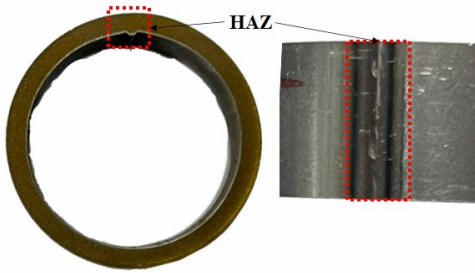


Fig. 2 Heat affected zone of ERW pipe

이러한 문제를 해결하기 위해 Kim[5]은 크로스 멤버 제작용 HF440 소재의 파이프의 하이드로포밍 해석에 적용할 물성 측정을 위해 레이저 용접으로 가공된 파이프에서 직접 시편을 추출하여 물성을 획득하였다. 그리고 이를 이용하여 성형해석 결과의 예측 정확도를 높였다. Park[6]은 인장시험 시, 시편의 물림부에서 발생하는 과단 문제를 해결하기 위해 파이프에 지그를 삽입하는 새로운 인장시험 방법을 제안하였다. Lee[7]는 [6]에서 제안한 시험방법을 통한 시편의 물성 측정 결과와 SEM 이미지 촬영을 통해 열영향부를 분리하여 모델링한 결과를 유한요소 해석을 이용하여 검증하였다. 그럼에도 불구하고, 앞선 연구에서는 파이프의 인장시험 및 열영향부를 고려하여 물성을 예측했을 때 시편 단위 해석에서는 근사한 결과가 나왔지만 파이프 원형 해석에서는 오차가 발생하였다.

본 연구에서는 해당 오차의 감소를 위해 선행연구에서 측정했던 SAPH-440소재의 물성을 동일한 조건으로 시험을 진행하였고, 기존의 열영향부를 평균적으로 분석하여 진행하던 방법으로 유한요소해석 모델링 및 역 해석 기법을 진행하였다. 이때, 파이프의 열영향부의 세분화 및 용접부를 별도로 고려하였고, 이를 위해 경도 측정 및 Gaussian Function을

Table 1 Chemical compositions of SAPH-440 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Al
0.074	0.014	1.254	0.012	0.004	0.028

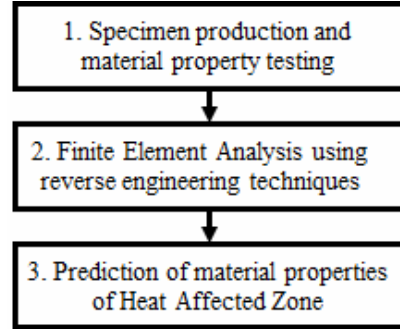


Fig. 3 Flow chart for the prediction method of material properties of HAZ

이용한 해석 및 모델링 방법을 제안하였다. 이때, 경도 분포를 세분화하여 모델링함으로써 열영향부 영역 및 용접부를 고려한 파이프의 물성 예측 정확도를 향상시켰다.

본 논문의 연구 순서는 Fig. 3과 같으며 구성은 다음과 같다. 2절에서는 직경 25.6 Ø인 ERW 파이프에서 추출한 시편 및 지그를 이용한 단축인장시험과 경도 측정을 통해, 자동차 구조용 열간압연 강판 중 하나인 SAPH-440 소재의 기계적 물성을 측정하는 내용을 다루며, 조성은 Table 1과 같다.

3절에서는 시편 단위의 모델과 역설계 기법을 활용하여 유한요소해석(FEA, finite element analysis)에 적용하는 물성의 값 중 탄성계수 및 응력비를 변수로 지정하여 기존 실험결과와 근사한 결과를 도출하는 최적의 변수를 찾아 열영향부의 물성 값을 예측하였다. 이후 파이프 원형에 이를 적용하였고, 또한 2절에서 측정된 경도분포를 적용한 모델, 일반 모재 물성만 적용한 모델을 이용하여 유한요소 해석을 진행하였다. 그리고 4절에 해석 및 비교 결과를 나타내어 열영향부 모델링 및 물성 예측방법의 유효성을 확인하였다.

2. 기계적 물성 측정

2.1 파이프 시편 단축인장시험

시험에 사용된 인장 시편은 Fig. 4(a)와 같이 KS B 0801 13B 규격에 따라 설계하였고, 열영향부 유무에

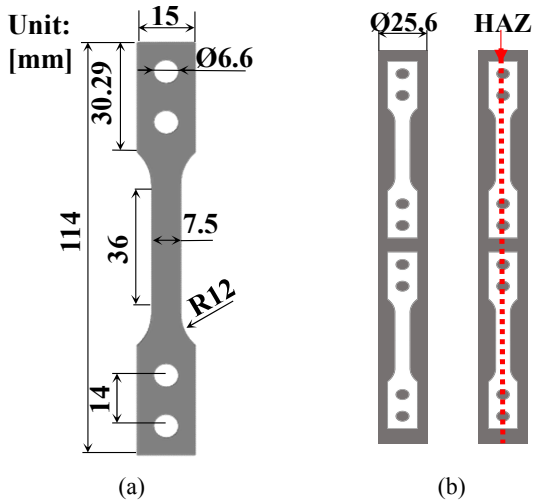


Fig. 4 Proceed with the specimen uniaxial tensile test: (a) Tensile test specimen drawing; (b) Sample fabrication position in pipe

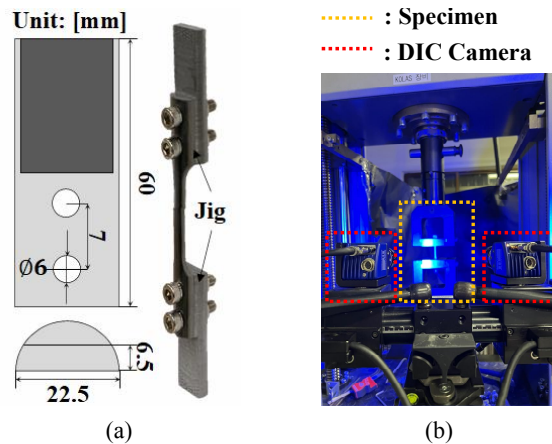


Fig. 5 Setup for uniaxial tensile test: (a) Shape of jig and specimen fixing; (b) Uniaxial Tensile and DIC setup

따른 기계적 성질을 비교하기 위해 Fig. 4(b)와 같이 모재 • 열영향부 물성 측정용 시편 두 가지를 제작하였다. 이때 시편은 와이어 커팅을 이용하여 판재가 아닌 파이프를 직접 가공하여 제작되었다.

앞서 제작한 시편의 단축인장시험 진행을 위해 Fig. 5(a)와 같이 지그를 제작하여 시편을 시험기에 연결하였고, Fig. 5(b)와 같이 DIC 카메라를 Setup하여 시험을 진행하였다. 이때 시험의 경우 Table 2과 같이 진행하였다.

사용된 시편과 하중-변위(FD, force-displacement) 곡선을 Fig. 6에 제시하였고, Table 3에 세부 결과를 제

Table 2 Test information

Equipment	Zwick Z100 (100kN)
Test Speed	5.00 mm/min
DIC Sensor	GOM ARAMIS 6M (3Hz)

Table 3 Results for base & HAZ metal specimen

Material	Model	F _{max} [N]	EI [%]
SAPH-440	Base metal	6569.8	30.6
	HAZ	7788.1	19.7

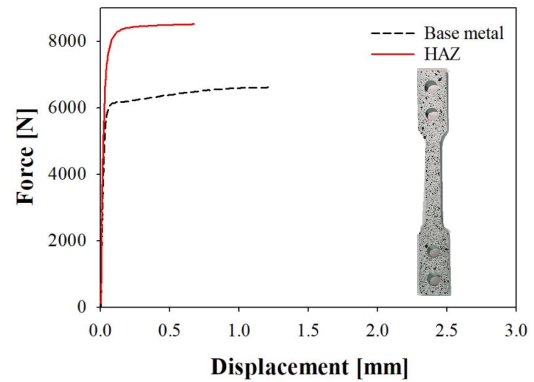


Fig. 6 Comparison between FD curves according to HAZ portion presence or absence SAPH-440

시하였다. 인장시험 결과, SAPH-440의 최대하중 (F_{max}, maximum force)은 18.5% 증가하였고, 연신율 (EI, elongation)은 35.6% 감소하였다. 이를 통해 용접 열에 의하여 경도는 증가하고, 연신율은 감소하는 경향을 보여주었다. 이때, 사용된 계산식은 식 (1)과 같다.

$$Rate(\%) = \frac{HAZ\ value - parent\ value}{parent\ value} \times 100 \quad (1)$$

2.2 파이프 원형 단축인장시험

추후에 예측된 열영향부 물성을 검증하기 위해 시편 단위가 아닌 파이프 원형의 인장시험을 진행했고, 원형 시편의 경우 KS B 0801 규격에 맞춰 제작했다. 그리고 KS B 0401 규격을 참고하여 공차를 주어 Fig. 7과 같이 지그를 설계했고, 그림부에 가공 경화를 일으키는 억지끼워맞춤 방법을 통해, 파단이 그림부가 아닌 시편 중심에서 발생하도록 하였다[6, 7].

Fig. 8(a)와 같이 세팅하여 시험을 진행하였고, DIC

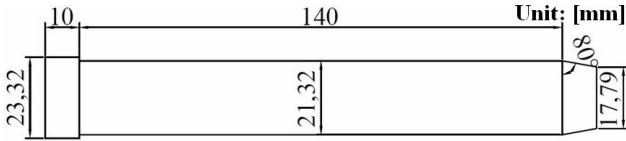


Fig. 7 Drawings of the designed jig

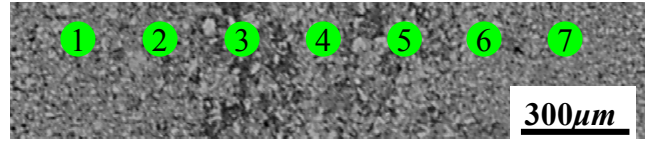


Fig. 9 SEM image data

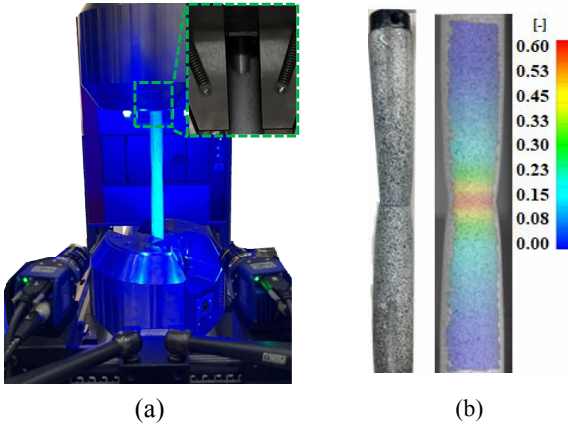


Fig. 8 Result of uniaxial tensile test of the pipe: (a) Setup of uniaxial tensile test; (b) Measurement results of uniaxial tensile test

Table 4 Test information

Equipment	Zwick Z100 (100kN)
Test Speed	5.00 mm/min
DIC Sensor	GOM ARAMIS 6M (3Hz)

Table 5 Results for pipe tensile test

Material	F _{max} [N]	Elongation [%]
SAPH-440	66233.5	30.0

기법을 통해 분석된 변형률은 Fig. 8(b)와 같다. 이때 진행한 시험 조건을 Table 4에 나타내었으며, 시험 결과는 Fig. 8(a)에 나타난 것처럼 파이프 외경을 잡아 시험을 진행하여 그립부의 손상 없이 시편 중심에서 파단 발생 및 Table 5의 결과를 얻을 수 있었다.

2.3 열영향부 경도 측정

파이프 열영향부의 세부 모델링을 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 파이프의 열영향부를 촬영한 결과, Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 열영향부와 모재부의 경계가 뚜렷하게 나타나지 않다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해, 비커스 경도계를 이용하여 0.3mm 간격으로 지정된 포인트에서 경도

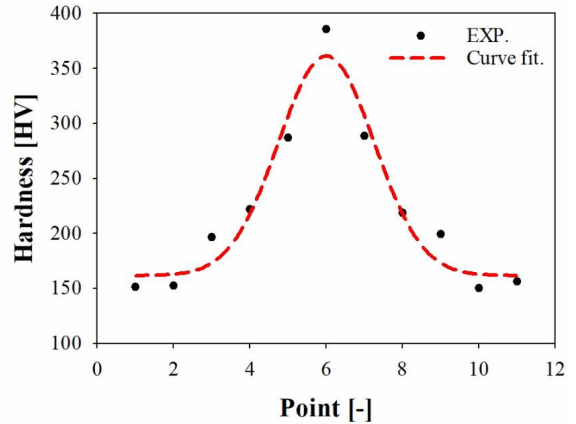


Fig. 10 Hardness measurement results

Table 6 parameters of gaussian function

a	199.6
b	1.3
x ₀	6.00
y ₀	161.7

측정을 진행하여 Fig. 10에 결과를 도시하였다.

또한, 유한요소 해석 시 경도 조건 입력을 위해, 가우스 함수(Gaussian Function)를 기반으로 도출한 식 (2)를 활용하여 열영향부 경도 분포 모델링을 수행하였고 Fig. 10에 도시하였다. 이때, SigmaPlot 소프트웨어에서 제공하는 4-parameter method를 이용하여 계산된 각 파라미터 값은 Table 6에 제시되었다.

$$f = y_0 + a * \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x - x_0)^2}{b} \right] \quad (2)$$

3. 열영향부 물성 예측 및 해석

3.1 구성방정식

유한요소해석에 적용한 SAPH-440의 물성은 앞선 단축인장시험에서 측정된 결과를 기반으로 식 (3)을 이용하여 공칭 응력(σ_e) 공칭 변형률(ε_e) 그래프를 구

Table 7 Voce parameters of SAPH-440

σ_y [MPa]	390.0
R_{sat} [-]	85.9
C [-]	64.3

하였고, 시편의 단면적 변화를 고려한 진 응력(σ_t)과 진 변형률(ϵ_t) 곡선을 구하기 위해 식 (4)를 이용하여 변환하였다.

$$\sigma_t = \sigma_e (1 + \epsilon_e) \quad (3)$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (4)$$

하지만, 최대인장강도(UTS, ultimate tensile strength) 지점에서 네킹이 발생하여 단면적의 변화를 예측하기 어렵기 때문에 네킹 이후의 값은 식 (5)의 Voce식을 사용하여 외삽 후 해석에 이용하였다. 식 (5)에서 사용한 주요 파라미터 값은 Table 7에 제시하였다[13-15]. 이때 σ_y 는 항복응력을 의미하는 파라미터이고, R_{sat} 과 C 는 가공 경화 거동을 나타내는 파라미터이며, ϵ_p 는 소성 변형률을 의미한다.

$$\sigma_{voce} = \sigma_y - R_{sat} \left(\exp(C \cdot \epsilon_p) \right) \quad (5)$$

3.2 모재 물성 검증

앞서 측정된 SAPH-440의 모재 물성 검증을 위해, ls-dyna explicit 소프트웨어를 사용하여 유한요소해석을 진행하였다. 경계조건의 Fig. 11(a)와 같이 시편 상단부 고정 및 하부에 변위를 적용하였고, mesh size는 1.0 mm, 육면체 요소를 사용하여 모델링을 진행했다. Fig. 12는 모재 시편의 해석모델 및 결과와 실험값을 도시하여 비교한 하중-변위 곡선이며 그 결과, 앞서 측정된 모재의 물성이 유효함을 확인하였다.

3.3 열영향부 물성 예측을 위한 역설계 기법

열영향부 물성 예측을 위해 역설계 기법을 활용하였으며, 진행한 역설계 기법 방식은 탄성계수(E)와 3.2절에서 검증한 모재 물성의 응력에 scale factor를 변수로 지정 후, 해석 결과가 실험값과 근사할 때까지 변수들의 수정을 반복하여 열영향부 물성을 예측하였다. 이때의 변수들은 Table 8에 나타냈었고,

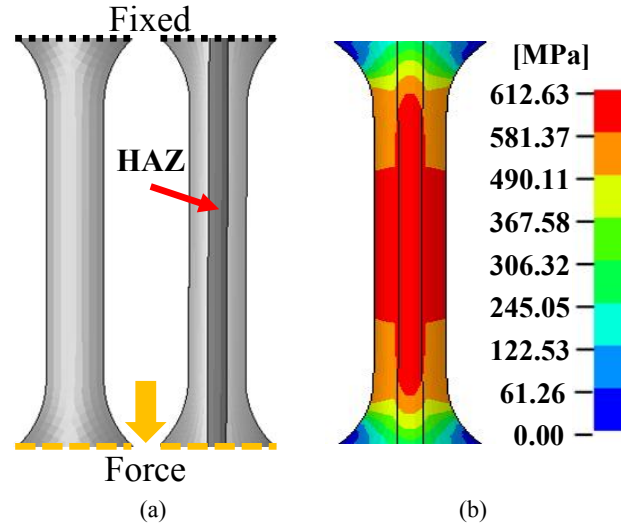


Fig. 11 FEA model: (a) Original model & HAZ model; (b) Eq. stress of HAZ model

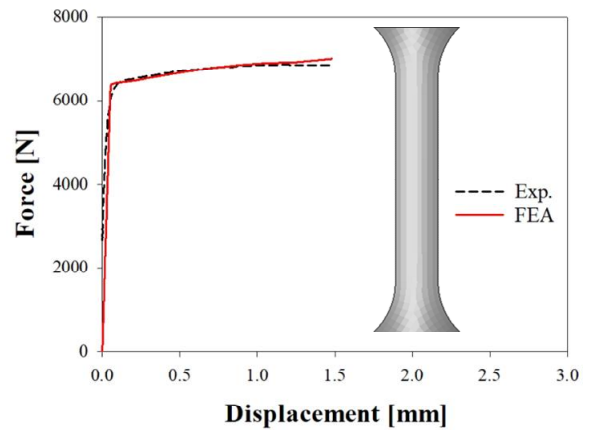


Fig. 12 Comparison between experimental and FEA of base metal of SAPH-440 with FD curve

Table 8 Parameters of reverse engineering

E [GPa]	225.0
Scale factor [-]	1.4

열영향부의 경우 Fig. 11(b)와 같이 시편 중심에 2.5 mm의 폭으로 모델링하였으며, Fig. 13에 해석 결과를 도시하였다.

3.4 파이프 열영향부 해석

3.2절의 시편과 마찬가지로 2.5 mm의 영역에 열영향부를 모델링 하고 경계조건은 Fig. 14와 같이 상부를 고정하고 하부에 변위를 설정했다. 이후 3.3절에

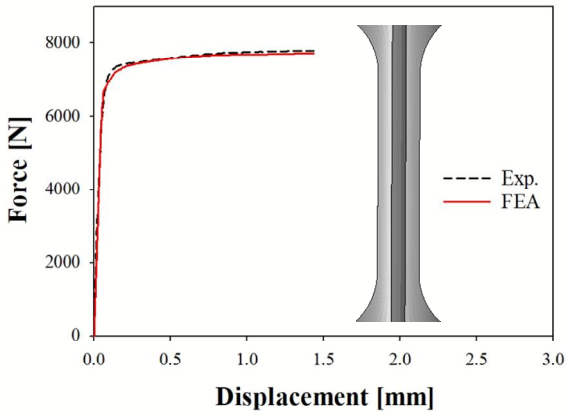


Fig. 13 Comparison between experimental and FEA of HAZ material of SAPH-440 with FD curve

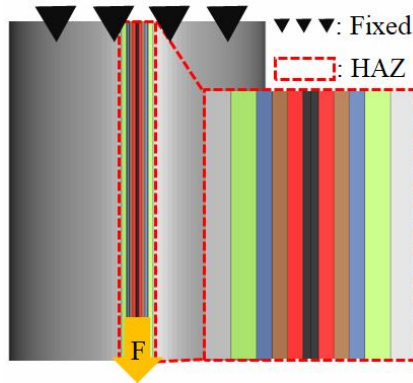


Fig. 14 Boundary conditions of FEA

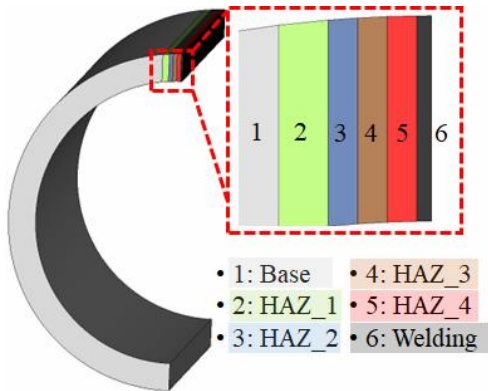


Fig. 15 Design of pipe FEA model including HAZ part

서 예측한 열영향부 물성을 적용하여 해석한 모델인 HAZ(Avg.) 모델의 해석 결과 실험값과 1.6%의 차이가 발생하여 모델을 수정하였다. 경도 측정 데이터를 기준으로 Fig. 15과 같이 HAZ_2~6 위치의 경

Table 9 parameters of HAZ scale factor

HAZ_1, 2	1.1
HAZ_3	1.4
HAZ_4	1.9
Welding	2.23

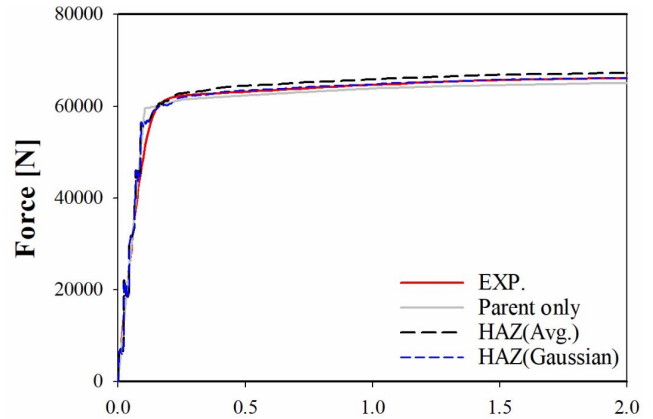


Fig. 16 Comparison of experimental and FEA of HAZ material of SAPH-440 with FD curve

우 0.1mm 간격으로 세분화하였고, 모재(Base)와 열영향이 가장 작은 HAZ_1 영역을 나누어 모델링 후 유한요소해석을 진행하였다.

경도분포를 고려하여 물성을 적용한 방법은 기존 모재 물성의 응력에 Table 9과 같이 열영향부 별로 scale factor를 적용하였다. 이후 해석 결과를 실험값(EXP.)과 비교하여 물성을 검증하였는데, 모델링 방법의 유효성을 확인하기 위해 HAZ 영역을 적용하지 않은 모델(Base only)을 추가로 해석하였고, 앞서 진행했던 HAZ(Avg.)모델과 함께 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

경도 분포 모델의 유효성을 확인하기 위해 실험 결과 및 세 가지 모델의 해석 결과를 Fig. 16에 함께 도시하였으며, 각 모델별로 실험값과의 오차를 비교하였고, Table 10에 각 오차를 기입하였다.

Table 10을 통하여 가우스 함수를 이용하여 보간한 경도 분포를 고려하여 모델링 된 HAZ(Gaussian) 모델이 다른 모델들에 비해 실험값과 가장 근사하게 계산됨을 확인할 수 있었고, 열영향부 물성의 예측 방법에 관한 유효함을 알 수 있었다.

Table 10 Error value for each FEA model

HAZ(Gaussian)	0.1%
Base only	3.9%
HAZ(Avg.)	1.6%

5. 결론

본 연구에서는 시편 및 지그 가공 후 단축인장시험을 진행하여 ERW파이프의 물성을 측정하였다. 그리고 측정 결과를 검증하기 위해 유한요소해석 및 역설계 기법을 활용하여 모재 및 열영향부 물성을 예측하였다.

이때 해석 정확도를 높이기 위해 경도 측정 데이터를 기반으로 열영향부를 세분화하여 모델링하였다. 그리고 열영향부 모델링 방법의 유효성을 확인하기 위해 일반 모재 및 평균값을 적용한 모델을 추가로 해석하여 비교한 결과는 다음과 같다.

(1) 모재 시편의 단축인장시험 해석을 진행하여 실험 결과와 비교 후 물성을 검증하였고, 이후 열영향부 시편을 역설계 기법을 활용하여 실험 결과에 근접하기 위한 변수 값을 예측하여 SAPH-440소재의 열영향부 물성을 예측할 수 있었다.

(2) 가우스 함수를 이용한 정규화 된 경도 분포 적용한 HAZ(Gaussian) 모델의 유한 요소 해석 결과, 실험과 최대 하중 차이가 약 0.1 %로 근사하게 계산되어 Base only 모델 및 평균적인 열영향부 물성모델인 HAZ(Avg.) 모델에 비해 최대 3.9 %의 근사한 결과를 통해 HAZ부 모델링 및 유한 요소 해석에 대한 연구방법을 제시하였다.

후 기

이 연구는 2023년 산업통상자원부의 미래형 모빌리티 소재부품공정 혁신기술개발 기반 문제해결형 R&D 인재 양성 (P0023726) 연구비 지원에 의한 연구임.

REFERENCES

- [1] Y. Kim, 2021, Prediction of Welding Deformation in Thin Plates and Pipes Using an Equivalent Thermal Strain Method, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 45, No. 6, pp. 455~463, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2021.45.6.455>
- [2] M. Park, 2015, A Study on HAZ Softening Characteristics of Fiber Laser Weldment for High-Strength Steel, *J. Weld. Join.*, Vol. 33, No. 6, pp. 27~35, <http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.6.27>
- [3] J. Moon, 2017, An Investigation on the Microstructure Evolution and Tensile Property in the Weld Heat-Affected Zone of Austenitic FeMnAlC Lightweight Steels, *J. Weld. Join.*, Vol. 35, No. 1, pp. 9~15, <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.1.9>
- [4] C. A. Huang, 2005, A study of the heat-affected zone (HAZ) of an Inconel 718 sheet welded with electron-beam welding (EBW), *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 398, No. 1-2, pp. 275~281, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.029>
- [5] K. Kim, 2020, Mechanical Properties Evaluation of Automotive Cross Member Parts for Hydro-formed HF440 Materials, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 44, No. 7, pp. 507~512, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2020.44.7.507>
- [6] J. Park, 2022, Experimental Study on Tensile Test Method of Pipe with Jig, *J. Kor. Soc. Manu. Process. Eng.*, Vol. 21, No. 5, pp. 28~33, <https://doi.org/10.14775/ksmp.2022.21.05.028>
- [7] S. Lee, 2023, Acquisition of the Mechanical Properties of the Heat Affected Zone of the ERW Pipe Using Finite Element Analysis and Reverse Engineering, *J. Kor. Academia-Industrial coop. Soc.*, 24(3), 543-550.
- [8] M. Kim, 2020, Determination of Post-Necking Stress-Strain Relationship for Zirconium Low-Oxidation based on Actual Cross-Section Measurements by DIC, *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 34.
- [9] K. Eom, 2014, Evaluation of Tensile Properties of Alloy 690 690TT Steam Generator Tube at Room Temperature and 343oC, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 6, pp. 655~662, <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.6.655>
- [10] Y. Choi, 2021, Digital Image Correlation Technique and Estimation for Measuring Thermal Deformation of Electronic Package, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 45, No. 1, pp. 17~26,

- <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2021.45.1.017>
- [11] M. Kim, 2016, Analytical determination of forming limit curve for zirlo and its experimental validation, *J. Manuf. Process*, Vol. 23, pp. 122~129, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.006>
- [12] K. Yoo, 2022, Inverse Analysis Method for Material Property Prediction Using Pile-up and Indentation Depth Formed after Indentation Test, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 46, No. 4, pp. 329~339, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2022.46.4.329>
- [13] K. Yeom, 2015, Finite Element Analysis of Large Deformation of Fiber Metal Laminates Under Bending for Stress-Strain Prediction, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 10, pp. 963~970, <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.10.963>
- [14] ARAMIS. Manual Aramis Professional 2018; GOM-Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH: Braunschweig, Germany, 2018.
- [15] K. Lee, 2009 Acquirement of True Stress-strain Curve Using True Fracture Strain Obtained by Tensile Test and FE Analysis, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 10, pp. 1054~1064, <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2009.33.10.1054>
- [16] J. Christopher, 2011, Tensile flow and work hardening behavior of 9Cr-1Mo ferritic steel in the frame work of Voce relationship, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 528, No. 21, pp. 6589~6595, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.026>
- [17] Y. Kim, 2022, True Stress-True Strain Curve Fitting Methodology for Finite Element Analysis, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 31, No. 4, pp. 194~199, <http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.4.194>