

역해석과 소형편치 시험에 의한 발전설비 용접부의 소성유동특성 평가

백승세[†] · 권일현* · 김회현** · 이동환* · 양성모* · 유효선*

An Evaluation of Plastic Flow Characteristic for local structure of Weldment in Power Plant using SP test and Inverse FEA

Seung-Se Baek, Il-Hyun Kwon, Hoi-Hyun Kim,
Dong-Hwan Lee, Sung-Mo Yang, and Hyo-Sun Yu

Key Words: Base Metal(모재), Finite Element Analysis(유한요소해석), HAZ(열영향부), Inverse FEA(역해석), Small Punch(소형편치, SP), Weld Metal(용착금속), X20CrMoV121

Abstract

SP test has been confirmed the availability, however the application of SP test is hampered because the relation of stress-strain and load-displacement is not determined definitely. This study suggested an evaluation technique of plastic flow characteristic for X20CrMoV121 steel weldment through inverse analysis using SP test and finite element analysis(FEA). From the result, good agreement was found in load-displacement curves obtained from SP test and FEA. Also, The behavior of load-displacement curve from FEA show a rule that load is increase with increasing K(strength coefficient) and displacement is increase with increasing n(work hardening index). From the inverse analysis, true stress-strain curve could be obtained for each local structure of weldment. And the CGHAZ and WM, which showed lower load- displacement behavior, have smaller work hardening index, while FGHAZ have the largest index.

1. 서론

발전소 구조물의 제작 시 필수적으로 도입되는 용접부에 대한 평가는 구조물의 강도와 신뢰성을 결정하는데 중요하게 고려되는 항목이다. 이들 용접부의 파괴특성은 용접공정중에 발생하는 미세조직의 변화, 부하의 작용 상태 혹은 용접부가 처한 환경 등 다양한 인자들의 영향을 받게 된다. 따라서, 이러한 용접부에서 야기되는 여러 가지 구성조직들의 기계적 특성과 같은 기초적인 설계 데이터의 확

보는 매우 중요한 공학적 선결사항임에도 불구하고, 기존의 평가들은 주로 B.M 이나 W.M 조직과 같은 적용이 용이한 일부 조직들의 물성을 기초로 하여 경험적 그리고 거시적 측면에서 수행되어 왔다.⁽¹⁻³⁾ 그 이유는 용접열에 의해 F.L(fusion line)로부터 거리에 따라 구성된 다양한 조직과 결정립 크기의 구배에 기인하여 용접부 국부부위에서 종래 ASTM, ASME에서 권장하는 크기의 표준 인장-크리프 시험편의 채취가 상당히 어렵기 때문이다. 이러한 이유로 용접부에 대한 평가는 cross-weld 시험편을 이용하여 수행하여 왔으나,^(4,5) 실험결과는 시험편의 G.L(gauge length)표점거리 및 직경의 크기에 따라 HAZ가 차지하는 구성비의 차이가 존재하므로 크리프 데이터 상에 많은 편차가 존재하는 문제점을 가지고 있다.

이러한 이유로 보다 소형화된 시험편을 사용하여

[†] 전북대학교 정밀기계공학과 대학원,
E-mail : baekse@chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-3684 FAX : (063)270-3688

* 전북대학교 기계항공시스템공학부

** 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

Table 1 Chemical compositions of X20CrMoV121 steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Fe
0.19	0.19	0.48	0.011	0.003	0.66	10.40	0.86	0.26	bal.

Table 2 Mechanical properties of X20CrMoV121 steel

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Y/T ratio (%)
572	798	19.4	72

Table 3 Strengthening, preheat, and postweld heat treatment conditions

Normalizing	1050°C, 15min, AC	Preheat	120°C, 2hr 20min
Tempering	760°C, 90min, AC	PWHT	750°C, 5hr 51min

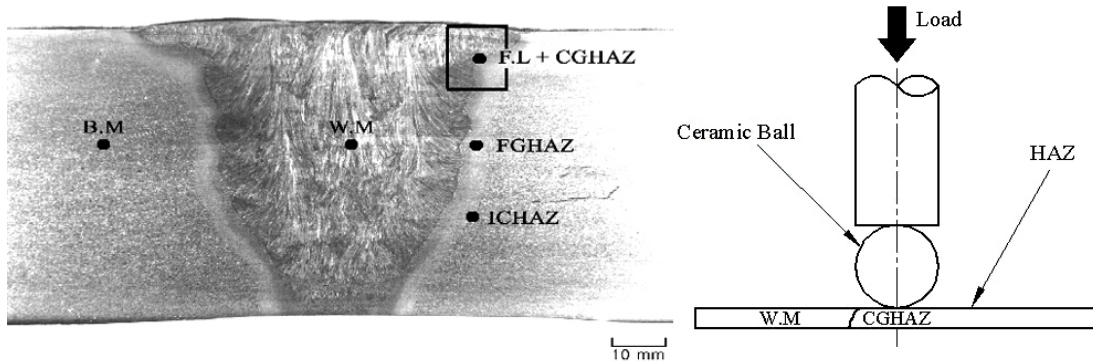


Fig. 1 Schematic illustration for X20CrMoV121 steel weldment, machining position and orientation of SP specimen, and loading method for CGHAZ specimen

국부영역을 평가하고자 하는 연구가 진행되어왔으며, 그 중 하나가 소형편치시험이다.^(6,7) 소형편치시험은 10×10×0.5mm의 박판형시험편과 볼을 이용하여 수행되는 시험으로써 그 동안 수많은 실험결과로부터 그 유용성이 확인되었다. 그러나 소형편치(SP) 시험에서 얻어지는 결과는 하중-변위의 관계로만 해석되어지고 또한 재료의 평가 역시 상대적인 비교에만 그쳐 적용의 한계를 보여왔다.

따라서, 본 연구에서는 용접부 미세조직들의 고유한 기계적 물성 평가에 그 유용성이 확인된 SP 시험법과 유한요소해석을 병용한 역해석 기법을 이용하여 이들 용접부 조직들의 역학 물성인 소성유동 특성 즉, 진응력-변형률(true stress-strain)을 평가하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 시험편과 실험 및 해석방법

2.1 SP 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 발전설비의 보일러 헤더에 사용되는 X20CrMoV121 강 of 모재와 용접부이다. 모재의 화학적 조성 and 기계적 성질은 각각

Table 1 및 Table 2와 같으며, 강화열처리 조건과 후열처리 조건은 Table 3에 나타내었다.

준비된 X20CrMoV121강의 모재와 용접블록으로부터 고온 소형편치-크리프 시험을 위한 SP 시험편을 제작하였다. 이때 시험편의 크기는 10mm×10mm×0.5mm이며, 시험편 두께의 오차범위는 ±0.01mm로 하였다. 그리고 용접부의 국부조직에 대한 고유한 크리프 특성 평가를 위해 고려된 조직은 ①모재(BM) ②용착금속(WM) ③조립역(CGHAZ) ④ 미세결정립역(FGHAZ) ⑤ 부분변태역(FGHAZ)이다. Fig. 1은 X20CrMoV121강 용접부의 거시사진 및 CGHAZ 시험편에 대한 채취 위치와 방향, 그리고 하중부하 방식을 나타내고 있다.

한편, 통상적으로 사용되고 있는 SP 시험의 볼과 하부다이 구멍의 직경은 각각 2.4mm 및 4mm이다. 그러나 HAZ의 국부조직은 그 영역이 매우 협소하므로, 본 연구에서는 보다 정확한 각 조직의 고유한 특성을 얻기 위해, 볼과 하부다이 구멍의 직경을 각각 1.5mm 및 3mm로 하여 SP 시험을 수행하였다.⁽⁸⁾ SP 시험에 사용된 시험기는 Instron 8516 만능시험기를 사용하였으며, 하중부하속도는 분당 2mm로 하

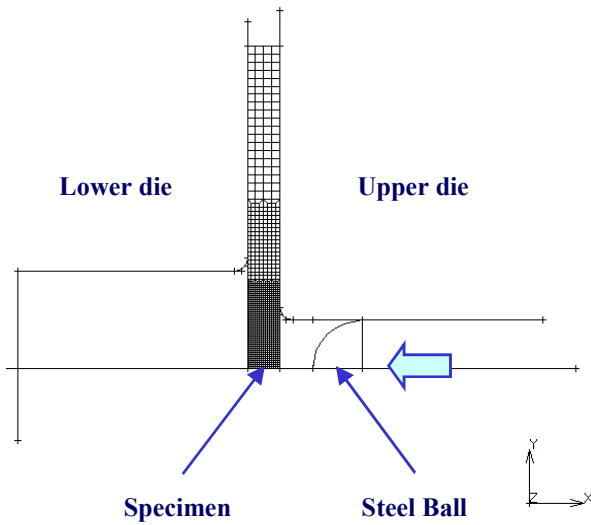


Fig. 2 Finite element model for SP test

였다.

2.2 유한요소해석(FEA) 모델 및 조건

유한요소해석에 사용된 S/W는 탄소성 해석에 많이 널리 이용되고 있는 상용 MARC K7.1을 사용하였다. 유한요소모델은 SP 시험편의 대칭성을 이용하여 시험편 형상의 1/2 만을 모델링하였고, axisymmetric 조건하에서 해석을 수행하였다. 모델링에 사용된 요소는 4-node quadrilateral element이고, $\phi 1.5\text{mm}$ 의 강구와 시험편을 지지하는 상·하부 다이들은 강체(rigid body)로, 시험편은 변형체(deformable body)로 정의하여 접촉되도록 하였다. 접촉부에서의 마찰계수를 고려하여, 일반적으로 사용되어지는 0.3의 쿨롱마찰계수를 사용하였다.

Fig. 2에 해석에 사용된 유한요소 모델을 나타내었다. 강구에 의한 부하 축을 x축으로 설정하였으며, 상부다이(upper die)와 하부다이(lower die)에 의하여 일정한 압력으로 체결되는 시험편의 구속상태를 반영하기 위해 해석모델에서 시험편의 y축 방향 최상단면과 x축 선상의 시험편 절점들은 y축 방향의 변위를 구속하였다. 또한 Fig. 2에 보인 바와 같이 해석결과의 정확성 향상을 위해 강구에 의하여 변형되는 SP 시험편의 실제적인 주변형 부위의 요소는 타 부위에 비하여 좀더 미세하게 분할하였다.

2.3 SP시험과 FEM에 의한 소성유동특성평가절차

먼저 적용이 용이한 B.M 조직에 대해 인장시험을 수행하여 얻어진 재료의 유동특성을 기준으로하여 일정한 규칙에 의해 물성값을 변화시켜가면서

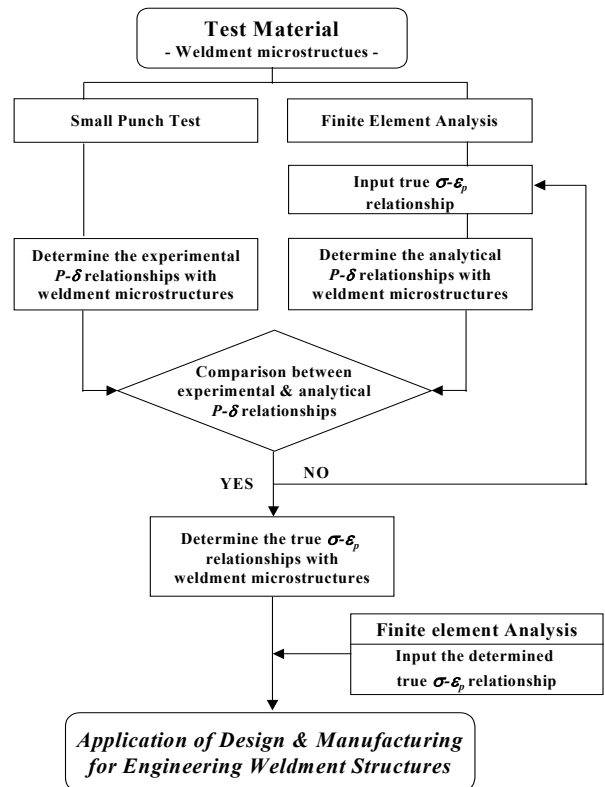


Fig. 3 Flow chart of inverse FEA technique

유한요소 해석을 수행하고, 해석결과로 얻어지는 하중-변위 해석곡선과 물성을 구하고자 하는 조직의 SP 시험으로부터 얻어지는 하중-변위 실험곡선을 비교한다. 이러한 비교 결과가 정해진 오차범위에 들 때까지 반복적으로 입력 물성 데이터를 변화시키면서, 해석 및 비교를 수행하게 된다. 이러한 반복법을 통해 최종적으로 대상 조직의 인장 물성 데이터를 얻는다. 이러한 역해석 기법의 절차는 다음과 같이 정리될 수 있으며, Fig. 3에 평가절차에 대한 흐름도를 나타내었다.

step 1) 시험대상 조직에 대한 ASP 시험을 수행하여 대표적인 하중-변위 곡선을 구한다.

step 2) 임의의 조직에 대한 아래와 같은 유동특성을 유한요소 해석모델에 임의로 입력하여 해석을 수행한다.

$$\sigma_t = K \cdot \epsilon_p^n \quad (1)$$

여기서, σ_t : 진응력

ϵ_p : 진소성변형률

K : 강도계수

n : 가공경화지수

step 3) 해석을 통해 얻어진 하중-변위 해석곡선을

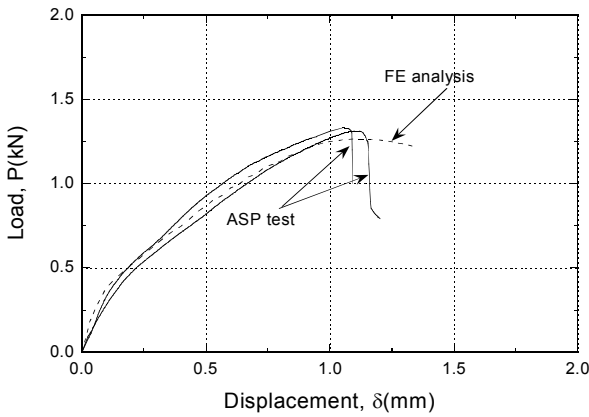


Fig. 4 Comparison of load-displacement curve from SP test and FEA.

위의 step 1에서 얻어진 ASP 시험의 하중-변위 실험곡선과 비교한다.

step 4) 해석과 ASP 시험의 하중-변위 곡선이 오차 범위 내에서 상호 일치할 때까지 유동특성을 변화시키면서 step 2 및 step 3를 반복한다.

step 5) 해석과 ASP 시험의 하중-변위 곡선이 오차 범위에 들어오게 되면, 최종 해석시 2단계에 입력된 임의의 유동 특성이 구하고자 하는 조직의 유동특성으로 결정된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파라미터 변화에 따른 하중변위곡선의 거동

Fig. 4는 BM을 대상으로 이상의 FEM으로부터 얻어진 하중-변위 해석곡선(점선)과 실제 SP 시험을 통해 얻어진 하중-변위 실험곡선(실선)을 함께 나타낸 그림이다. 해석곡선은 2차례의 실험결과 사이에 위치하여 상호 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며, 전반적으로 SP 시험의 고유한 하중-변위 거동, 즉 탄성굽힘, 소성굽힘, 소성막신장 및 소성불안정의 4 영역을 보이고 있음을 알 수 있어 유한요소 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었으며, SP 시험에서 얻어진 물성값과 기존의 인장시험을 통해 얻어지는 물성값은 상호 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 파라미터의 변화에 따른 해석곡선의 거동을 확인하기 K 와 n 을 변화시켜 얻어진 몇 가지 해석곡선을 나타내고 있다. 이로부터 다음과 같은 규칙성을 발견할 수 있었다.

K 증감 → 하중값 증감

n 증감 → 변위값 증감

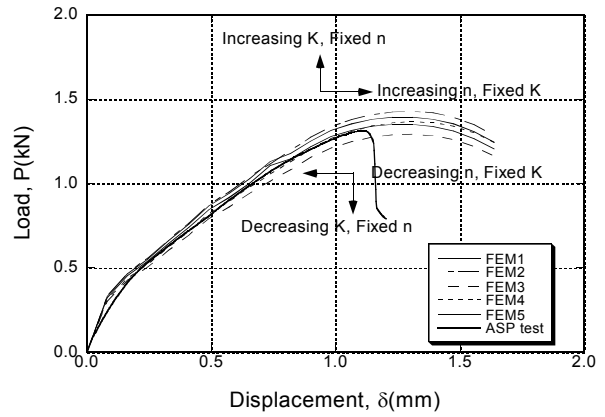


Fig. 5 Variation of FEA load-displacement curve according to parameter.

3.2 용접부 미세조직에 따른 SP 시험 및 역해석 결과의 비교

Fig. 6은 이상의 평가절차와 규칙에 따라 ASP 시험과 유한요소를 통한 역해석으로부터 얻어진 각 조직, 즉 WM, CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ에 대한 하중-변위 거동을 비교하여 나타낸 결과이다. 모든 조직에서 시험과 해석에서 얻어진 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상의 해석을 통해 얻어진 $\sigma_t - \epsilon_p$ 의 관계는 다음과 같이 정리된다.

$$WM : \sigma_t = 1145 \cdot \epsilon_p^{0.025} \quad (2)$$

$$CGHAZ : \sigma_t = 1132 \cdot \epsilon_p^{0.03} \quad (3)$$

$$FGHAZ : \sigma_t = 1660 \cdot \epsilon_p^{0.41} \quad (4)$$

$$ICHAZ : \sigma_t = 1132 \cdot \epsilon_p^{0.03} \quad (5)$$

Fig. 7은 역해석으로부터 각 미세조직별로 결정된 $\sigma_t - FEM$ vs. $\epsilon_t - FEM$ 의 관계를 나타낸 그림이다. 그림을 보면, 용접부의 미세조직에 따라 서로 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며, WM과 CGHAZ 조직의 $\sigma_t - FEM$ 값이 타 조직에 비하여 가장 높아 강도 측면에서는 상대적으로 우수함을 알 수 있는데, 이는 기존에 발표된 논문의 SP 시험과 경도 시험에서 나타난 결과와 동일하여 역해석의 신뢰성을 확인할 수 있다.⁽⁸⁾

Fig. 8은 Fig. 7을 로그 좌표로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 탄성구간과 소성구간은 뚜렷하게 구분됨을 알 수 있으며, 이러한 선도의 소성 영역에서의 기울기로 정의되는 가공경화지수 n 은 WM 조직과 CGHAZ 조직이 비교적 작은 것으로 나타나고 있다. n 이 작다는 것은 최대 응력까지의

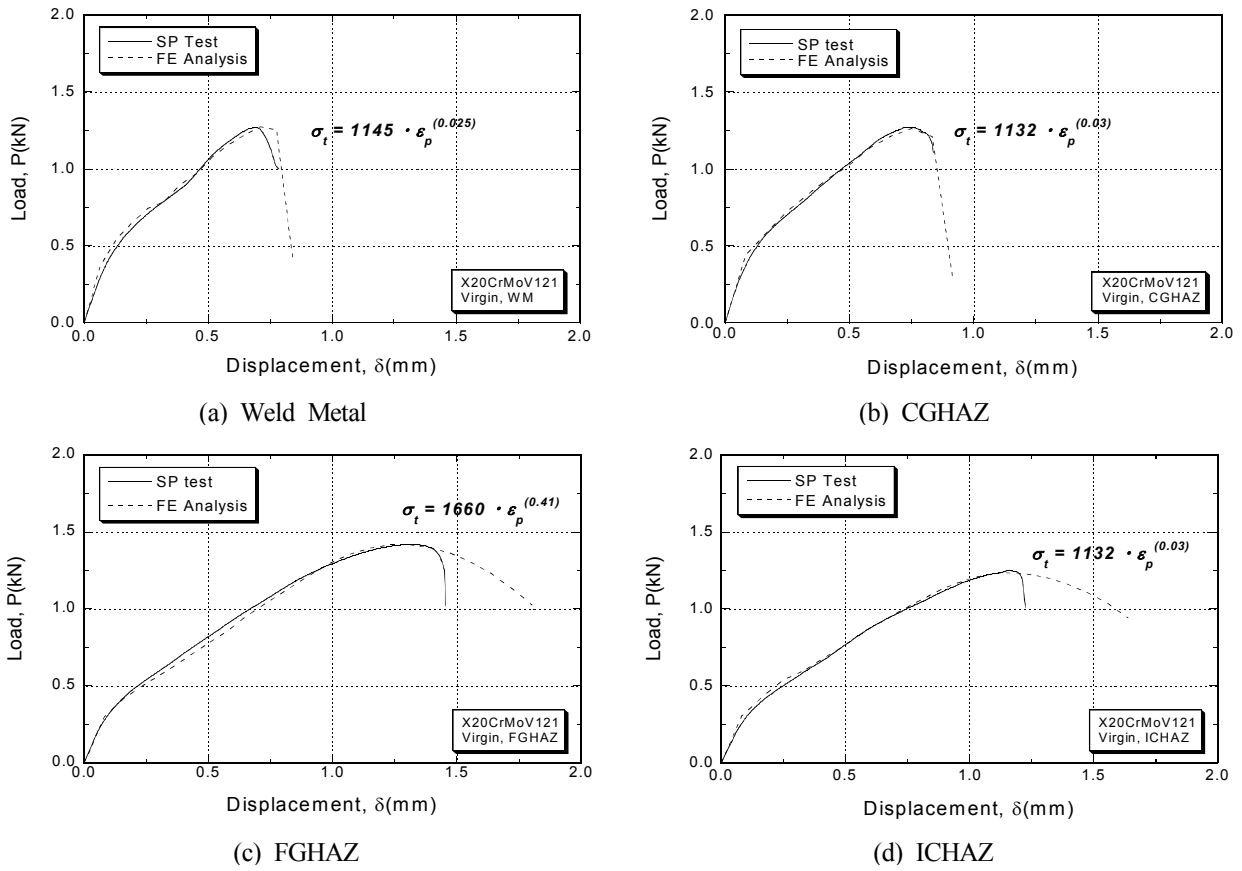


Fig. 6 Comparison of load-displacement curves for WM, CGHAZ, FGHAZ, and ICHAZ

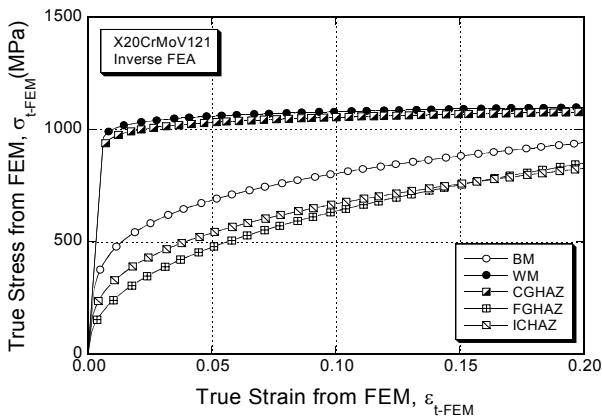


Fig. 7 True stress-strain curves from inverse FEA for various microstructures

변형률이 작다는 것을 의미하므로, 최대 응력이 동일할 경우, n 이 큰 재료가 소성 변형률이 더 크게 되어 파괴까지의 인성이 크게 나타난다. 따라서, Fig. 8에 보이는 바와 같이 FGHAZ 조직의 n 값이 가장 크게 나타나고, WM 및 CGHAZ 조직이 비교적 작게 나타난 결과는 Fig. 6의 SP 시험 거동과 동

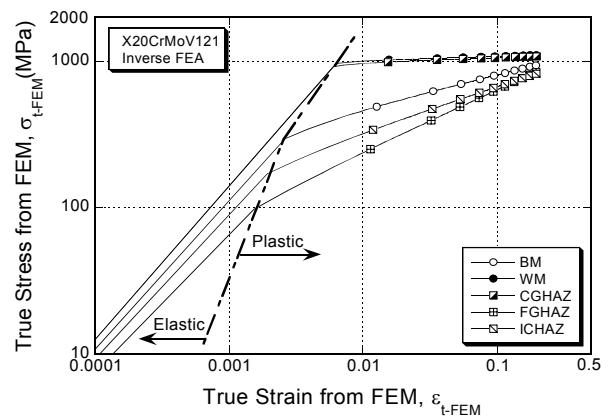


Fig. 8 True stress-strain curves in logarithmic coordinate from inverse FEA for various microstructures

일함을 알 수 있어 역해석의 신뢰성을 다시 한번 확인할 수 있었다.

4. 결론

이상의 결과로부터 SP 시험 및 역해석을 통해 발전소 용접부 미세조직들의 고유한 재질적 특성을 효과적으로 평가할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) X20CrMoV121강의 BM 조직을 대상으로 인장 시험을 통해 얻어진 물성 값을 이용하여 해석된 미소시험편의 하중-변위 해석곡선은 SP 시험의 하중-변위 실험곡선과 잘 일치하고 있어 유한요소해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

(2) 유한요소 해석으로부터 얻진 하중-변위 해석곡선은 K 의 증감에 따라 하중 값이 변화하였고, n 의 증감에 따라 변위 값이 변화하였다.

(3) SP 시험과 역해석을 통해 용접부 미세조직들의 고유한 소성유동특성인 $\sigma_t - \epsilon_p$ 의 관계를 구할 수 있었으며, SP 시험과 역해석을 통해 얻어진 용접부 각 조직별 하중-변위 거동은 극히 적은 오차범위에서 상호 일치하였다.

(4) 역해석으로부터 구한 가공경화지수 n 은 CGHAZ와 WM 조직에서 가장 낮은 값을 보였고, FGHAZ에서 가장 큰 값을 보여, 각 조직별 SP 시험 및 경도특성 거동과 잘 일치하였다.

향후 결과의 신뢰성을 확보하기 위해, 좀더 다양한 재질에 대하여 충분한 검증시험이 수행되어야 하며 아울러 자세한 금속야금학적 및 조직학적 분석이 병행되어야 되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구지원(R05-2001-000-01131-0)에 의해 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, Y. J., Seok, C. S., Chang, Y. S., Kim, J. O., Yang, K. M. and Ra, I. S., 1995, "Fracture Properties Evaluation of Carbon Steel Piping for Main Steam Line," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 158, pp. 241~251.
- (2) Olabi, A. G. and Hashmi, M. S. J., 1995, "The Effect of Post Weld Heat-Treatment on

Mechanical-Properties and Residual-Stress Mapping on Welded Structural Steel," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 55, pp. 117~122.

- (3) Singh, P. K., Chattopadhyay, J., Kushwaha, H. S., Tarafder, S. and Ranganath, V. R., 1998, "Tensile and Fracture Properties Evaluation of PHT System Piping Material of PHWR," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 271~280.
- (4) Zhang, Z. L., Hauge, M., Thaulow, C. and Odegard, J., 2002, "A Notched Cross Weld Tensile Testing Method for Determining True Stress-Strain Curves for Weldments," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 353~366.
- (5) Sterjovski, Z., Dunne, D. P. and Ambrose, S., "Evaluation of Cross-Weld Properties of Quenched and Tempered Pressure Vessel Steel before and after PWHT," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, pp. 465~470.
- (6) Lyu, D. Y., Yu, H. S. and Chung, S. H., 1992, "Fracture Strength Evaluation of Welded Steel Joint by Means of Small Punch Test," *Transaction of KSME*, Vol. 6, No. 2, pp. 73~80.
- (7) Misawa, T., Nogata, S., Aoki, N., Ishizaka, J. and Hamaguchi, Y., 1989, "Fracture Toughness Evaluation of Fusion Reactor Structural Steels at Low Temperatures by Small Punch Tests," *J. of Nucl. Materials*, Vol. 169, pp. 225~232.
- (8) Lee, D. H., Lee, S. I., Park, J. J. and Yu, H. S., 2003, "A Study on Advanced Small Punch Test for Evaluation of Material Degradation in Weldment Microstructures," *Journal of KWS*, Vol. 21, No. 1, pp. 99~106.