

레이저 용접 테일러드 블랭크의 용접부 물성평가 및 박판성형 해석에 적용

Evaluation of Material Properties of Welding Zone in Laser Welded Blank and Its Application to Sheet Metal Forming Analysis

한양대학교 대학원 구분영
한양대학교 기계공학부 금영탁

ABSTRACT

The material properties of laser welding zone such as strength coefficient, work-hardening exponent, and plastic anisotropic ratio are analytically obtained from those of base metals based on the tensile tests. The finite element formulation is developed for predicting strain distributions and weld line movements in the forming processes of laser welded blank. The welding zone(WZ) is modelled with the several, narrow finite elements whose material characteristics are based on the experimental results and the analytical equations. In order to show an application of the developed weld element, the stamping process of auto-body door inner panel is simulated. FEM predictions are compared and showed good agreements with experimental observations.

KEY WORDS : Laser Welded Blank, Welding Zone(WZ), Weld Element, Sheet Metal Forming Analysis, Tailored Blank, Finite Element Method(FEM)

I. 서 론

본 연구는 레이저 용접 테일러드 블랭크의 용접부 강도계수(K), 가공경화지수(n) 및 소성변형률비(r)를 가정된 용접부폭에 따라 계산하는 수식을 정식화하고, 용접비드가 주인장축 방향과 평행한 인장시험 결과로부터 가정된 폭에 따른 용접부 물성값을 계산하였다. 또한, 용접요소의 수치적 안정성과 유용성을 검토하기 위해 내연적 방법을 이용한 3차원 유한요소 성형해석 프로그램에 개발된 용접요소를 도입하여 자동차 도어 인너 패널을 시뮬레이션하였다.

II. 용접부 물성

일반적으로 모재종류와 용접조건에 따라 열영향부 폭이 크게 변화하기 때문에 일률적인 방법으로 용접부 물성을 결정하는 것은 어렵다. 따라서, 본 연구는 가정된 용접부폭에 따라 용접부 물성값을 계산하는 수식을 유도하고, 대표적인 기계적 물성값인 강도계수, 가공경화지수, 그리고 소성변형률비 값을 계산하였다.

1. 강도계수(K) 및 가공경화지수(n)

시편이 Hollomon 가공경화 법칙을 따른다고 가정하고 각 변형단계에서 모재에 부가된 하중을 전체 하중에서 감하여 용접부가 받는 하중을 계산하였다. 모재1과 모재2에 부가되는 하중 P_1 과 P_2 는 각각 다음과 같다.

$$P_1 = \sigma_1 \times A_1 = A_{01} \cdot K_1 \epsilon^{n1} / \exp(\epsilon) \quad (1)$$

$$P_2 = \sigma_2 \times A_2 = A_{02} \cdot K_2 \epsilon^{n2} / \exp(\epsilon) \quad (2)$$

A조, B조, 그리고 C조의 인장시험 결과(Table 1 참조)로부터 식(1)과 식(2)를 이용하여 가정된 용접부폭에 따른 강도계수 및 가공경화지수를 계산하고 모재 평균값을 기준으로 백분율로 환산한 값을 Fig.1과 Fig.2에 각각 나타내었다.

Table 1 Values of strength coefficient(K) and work-hardening exponent(n) of the specimen.

Specimen		Thick (mm)	Work-Hardening exponent (n)	Strength Coefficient (K)
Base Metal	SPOC	1	0.244	511
	SPOC	2	0.215	489
A	AST SPOC: SPOC	1:1	0.213	528
	ADT SPOC: SPOC	1:2	0.204	508
Base Metal	EZ1	0.8	0.235	494
	SPOC	1.5	0.230	488
B	BST1 EZ1: EZ1	0.8: 0.	0.198	507
	BST2 SPOC: SPOC	1.5: 1.	0.210	485
	BDT Bare: Bare	0.8: 1.	0.185	488
Base Metal	SPOC	0.7	0.264	496
	SPOC	0.9	0.265	500
	SPOC	1.4	0.237	478
C	CDT1 SPOC: SPOC	0.7: 0.	0.235	520
	CDT2 SPOC: SPOC	0.9: 1.	0.224	523
	CDT3 SPOC: SPOC	0.7: 1.	0.228	528

2. 소성변형률비(r)

시편 전체의 폭방향 변형은 모재 폭방향 변형과 용접부 폭방향 변형의 합이라고 가정하면, 용접부 소성변형률비, r_{weld} 는 다음과 같다.

$$r_{weld} = - \left(\frac{\epsilon_y}{\epsilon_y + \epsilon_x} \right)_{weld} \quad (3)$$

여기서, ϵ_x 와 ϵ_y 는 각각 길이방향과 폭방향 변형률이다. D~H조까지의 인장시험 결과(Table 1 참조)로부터 식(3)을 이용하여 가정된 용접부폭에 따른 소성변형률비를 계산하고 모재 평균값을 기준으로 백분율로 환산한 값을 Fig.3에 나타내었다.

Table 2 Values of plastic strain ratio(r) of the specimen.

Specimen		Thick (mm)	Work-Hardening exponent (n)	Strength Coefficient (K)	Plastic Anisotropic Ratio (r)
Base Metal	SPOC	0.8	0.222	546	1.402
	SPOC*	0.8	0.224	529	1.758
	SPOC	1.5	0.221	543	1.462
D	DST SPOC: SPOC*	0.8: 0.	0.188	585	1.607
	DDT SPOC*: SPOC	0.8: 1.	0.186	564	1.615
Base Metal	SPOC (Bare)	0.8	0.206	473	2.017
	SPOC (GA)	0.8	0.242	519	1.536
	SPOC (Bare)	1.5	0.239	525	1.557
E	EST Bare: Bare	0.8: 0.	0.186	541	1.880
	EDT Bare: Bare	0.8: 1.	0.195	532	1.769
F	FST Bare: Bare	0.8: 0.	0.174	527	1.976
G	GST Bare: GA	0.8: 0.	0.193	530	1.890
	GDT GA: Bare	0.8: 1.	0.222	543	1.598
H	HST Bare: GA	0.8: 0.	0.193	531	1.929

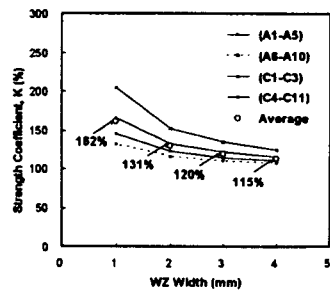


Fig.1 Percentage value of K associated with assumed welding zone(WZ) width.

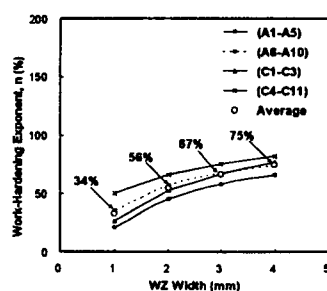


Fig.2 Percentage value of n associated with assumed welding zone(WZ) width.

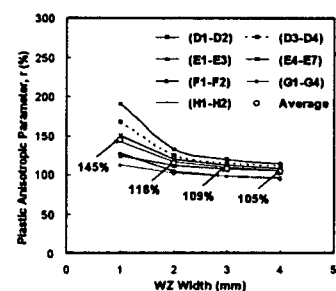


Fig.3 Percentage value of r associated with assumed welding zone(WZ) width.

III. 수학적 모델링

1. 유한요소 수식화

수직 이방성 재료에 대해서, Hill은 평면응력상태하에서의 재료의 거동을 예측할 수 있는 새로

은 항복이론[1]을 제시하였다. 이에 따르면 유효변형률 속도, $\bar{\epsilon}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} [2(1+r)]^{\frac{1}{M}} [|\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2|^{\frac{M-1}{M}} + (1+2r)^{\frac{-1}{M-1}} |\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2|^{\frac{M-1}{M}}]^{\frac{M-1}{M}} \quad (4)$$

박판의 강·점소성을 모델링하기 위하여 실험으로부터 결정되는 떡가공경화법칙을 도입하였다. 미소시간 동안에 시스템의 내부 가상일 증분과 외부 가상일 증분이 같다는 가상일의 원리로부터 다음과 같은 힘평형 방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \bar{\sigma} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial \Delta u} dV_0 = \int_{A_c} f_c dA_c \quad (5)$$

접촉절점에서 힘평형 방정식과 기하학적 구속조건을 포함하는 완전한 시스템 방정식을 구성하기 위하여 기하학적 구속조건을 포함하는 미지의 종속벡터 r 을 도입하고, 시도증분 Δr^* 에 관하여 테일러 급수로 전개한 후, 선형화시키면 다음과 같이 행렬형태로 표현되는 유한요소 기초 뉴턴-랩슨 방정식을 얻을 수 있다.[2]

$$\begin{bmatrix} K & F \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_c - F_i \\ D^p \end{bmatrix} \quad (6)$$

2. 용접요소

내부에서 8개의 선형 삼각형 요소로 분할되는 2개의 선형 사각형 요소를 용접요소로 정의하였다. 용접요소의 물성은 용접부폭이 4mm인 경우를 기준으로 정의하였다. 즉, 용접부 강도계수와 가공경화지수는 모재 평균값에 비해 강도계수의 경우 15% 높고, 가공경화지수의 경우 25% 낮은 값이다. 그리고, 소성변형률비의 경우는 모재 평균값보다 5% 높은 값이다.

IV. 적 용

임의조건을 갖는 레이저 용접 테일러드 블랭크 성형에 대한 개발된 프로그램의 수치적 안정성과 유용성을 검토하기 위해 자동차 도어 인너 패널 스탬핑 공정을 시뮬레이션하였다. Fig.4는 해석에 사용된 금형 형상이다. Fig.5은 시뮬레이션으로 구한 판재의 최종 성형형상이며, 약한 모재의 Region A에서 최대 변형률이 약 42%로 관찰되었다. Fig.6은 단면 B-B에서의 두께변형률 분포이다. 전반적으로 약한 모재에서 변형률이 큰 것을 볼 수 있다. 성형이 완료된 후, 용접선 이동량을 Fig.7에 나타내었다. 다이캐비티 내부에서는 용접선이 약한 모재에서 강한 모재 방향으로 이동하였지만, 플랜지부에서는 강한 모재에서 약한 모재 방향으로 이동하였다.

V. 결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 용접부 강도계수, 가공경화지수 및 소성변형률비를 구하는 수식을 정식화하고 테일러드 블랭크의 용접부 물성을 계산하였다.
- 2) 테일러드 블랭크의 유한요소 해석에 효율적으로 이용할 수 있는 용접요소를 개발하고, 용접요소의 물성을 가정한 폭이 4mm인 경우의 용접부 물성값으로 정의하였다.
- 3) 개발된 용접요소를 내연적 3차원 성형해석 프로그램에 도입하여 자동차 도어 내부 패널의 성형공정을 시뮬레이션하였다. 해석된 변형률 분포와 용접선 이동량은 실제 패널을 관찰한 결과와 잘 일치하였고, 용접요소는 수치적 안정성을 보였다.

VI. 참고 문헌

- [1] R. Hill, "Theoretical Plasticity of Textured Aggregates", Math. Proc. Camb. Phil. Soc., 85, pp.179-191, 1979.
- [2] B.Y.Ghoo, S.J.Back, Y.T.Keum, and S.Y.Kang, "Finite Element Analysis of Tailored Sheet Forming Processes Considering Laser Welding Zone", Metals and Materials, Vol.4, No.4, pp.862-870, 1998.
- [3] F. I. Saunders, "Forming of Tailor Welded Blanks", Ph.D. Dissertation, Ohio State University, 1994.
- [4] N. Nakagawa, S. Ikura, F Natumi, and N Iwata, "Finite Element Simulation of a Laser-Welded Blank", SHEET METAL AND STAMPING SYMPOSIUM, pp.189-197, 1993.
- [5] 박승우, 구본영, 금영탁, 강수영, 류석중, "레이저 합체박판의 성형한계평가 실험에 관한 연구", 한국소성가공학회, '97 추계학술대회 논문집, pp.72-75, 1997.

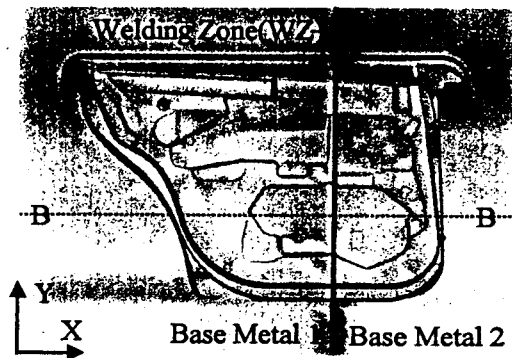


Fig.4 Surface model of the tool(punch and die) for door inner panel.

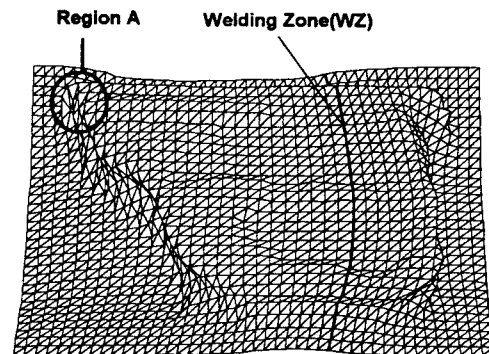


Fig.5 Formed mesh shape of door inner panel at the punch height of 150mm.

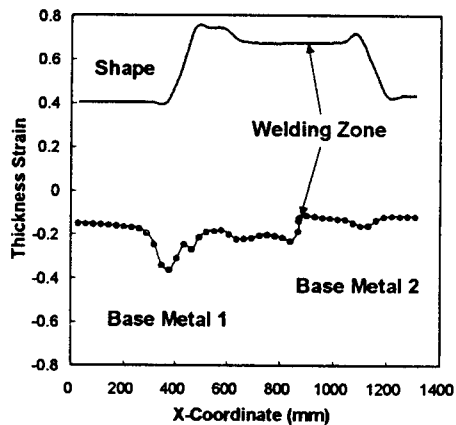


Fig.6 Finally-formed section shape and thickness strain distribution along B-B section.

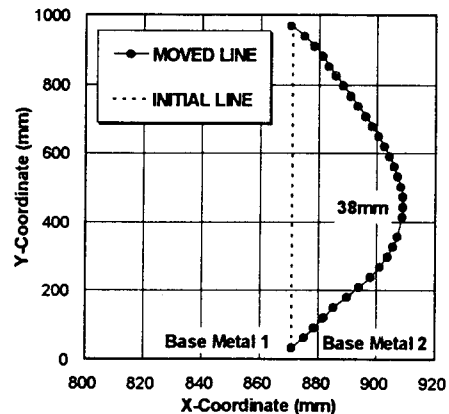


Fig.7 Prediction of the weld line movement at the punch height of 150mm.