스테인레스 강판의 가공특성과 성형성에 관한 고찰

김영석[#] · 박진기¹ · 안덕찬² · 김영환²

Review of Formability and Forming Property for Stainless Steel

Y. S. Kim, J. G. Park, D. C. Ahn, Y. H. Kim

Abstract

Because of its rustproof property, stainless steel is widely used in kitchen appliances, building materials, electronics, chemical plants and automobile exhausts. In addition, the utilization of stainless steel for fuel cell application is growing. As the demand for this material increases, it is necessary to study the basic properties of stainless steel such as corrosion resistance, heat transfer, formability, cutting or shearing ability and weldability. In this article, the mechanical properties, formability and press forming performance of stainless steel are reviewed. Since temperature and strain rate affect the press forming performance of STS304(austenitic) stainless steel, the influence of these parameters on the plastic behavior should be investigated. Moreover, measures for the prevention of ridging of STS430(ferritic) and delayed fracture of STS430, which respectively appear during and after press forming, should be considered. Recently, stainless steel sheets with a thickness lower than 0.2 mm have been widely used in applications for mobile phone, digital camera and fuel cell separator. Therefore, there is a growing interest of studying the grain size effect and plasticity at the crystal scale in order to understand the anisotropic behavior and micro forming ability of thin sheets. This review paper was written with the objective of helping engineers and researchers to understand the forming characteristics of stainless steel and to establish standards in plastic forming techniques.

Key Words : Stainless Steel, Press Forming, Formability, Yielding Behavior, Forming Limit Curve

1. 서 론

녹슬지 않는 특성을 가진 스테인레스 강재(stainless steel)은 현재 주방용품, 건축자재, 백색가전, 화학플랜트, 자동차 배기계 등 다양한 분야에서 사용되고 있으며 연료전지 부품 등으로 그 용도가 점차 확대되고 있다. 스테인레스 강재의 수요확대에 따라 내식성, 내열성, 성형성, 절삭성, 용접성 등의 기본적인 물성의 향상에 대한 연구가 주요 과제로 대두되고 있다[1~3].

스테인레스 강재는 크롬(Cr)이 11.5% 이상 함유되어 강의 표면에 산화 크롬(Cr_2O_3)의 부동태 피막이 형성되어 내식성을 갖는 강재를 말한다. 스테인레스 강재는 마르텐사이트계(α' 계), 페라이트

계(α 계), 오스테나이트계(γ 계), 오스테나이트/페라이트의 이상계(Duplex계) 및 석출경화계로 구분된다. Table 1은 스테인레스 강판의 KS 규격에 의한 분류이다. 스테인레스 강재는 KS에서는 STS***, JIS에서는 SUS***, ASTM에서는 TP***, DIN에서는 1.***으로 분류된다.

스테인레스 판재 중에서 프레스 성형에 의해 제품의 형태를 갖추는 것은 주로 STS430으로 대표되는 페라이트계와 STS304로 대표되는 오스테나이트계이다. 스테인레스 강판의 공업상 이용에 있어서 가공불량을 억제하고 최적의 가공기술을 확립하기 위해서는 스테인레스 판재의 제반 물리적 특성과 성형성에 대한 정보가 요구된다. 여기서는 프레스 가공에 이용되는 대표적인 스테인레

1. 경북대학교 공과대학 대학원

2. POSCO 기술연구소

교신저자: 경북대학교 기계공학부, E-mail: caekim@knu.ac.kr

Table 1 Classification of stainless steel for KS standard

	Class	Component	Structure	Specific character	Use
Ferritic	430 420L	18Cr-0.06C	BCC	Low cost, Good formability, Magnetic, Non quenching hardening	Construction material, vehicle, kitchen goods
Austenitic	301 304 304L 316L 316	17Cr-7Ni-0.1C 18Cr-8Ni 18Cr-9Ni-0.03C 18Cr-12Ni-2.5Mo-0.06C 18Cr-12Ni-2.5Mo	FCC	High corrosion/ thermal resistance Non-magnetic, Work hardening	Construction material, kitchen goods Chemical plant
Martensitic	410 420J 420J2	13Cr 13Cr-0.2C 13Cr-0.3C	BCC	Quenching hardening	Construction material, vehicle, kitchen goods
Ferrite/ Austenite	329J1	25Cr-4.5Ni-2Mo-0.06C	FCC/BCC	High corrosion resistance, Low cost against Austenitic	Chemical plant, Freshwater/seawater equipment,

스 강판의 재료특성, 가공특성과 성형성 등에 대해서 설명하여 스테인레스 판재를 이용하는 생산 현장에 도움을 주고자 한다.

2. 프레스 가공의 분류와 성형성의 평가

프레스 생산라인에서 판재가 받는 가공모드는 딥드로잉(deep drawing), 장출(stretching), 장출플랜징(stretch-flanging)/버링(burring), 굽힘(bending) 등 크게 4가지 모드로 구분할 수 있다. Fig. 1에 프레스 가공된 싱크대를 대상으로, 위치 별로 이들 변형모드를 개념적으로 나타내었다. 그림에서 사각 컵 형상의 싱크대의 대부분은 딥드로잉 가공에 의해 형성되지만 펀치 밑바닥에서는 장출 가공, 펀치와 다이의 코너부에서는 굽힘 가공 그리고 배수구에서는 버링 가공되고 있음을 알 수 있다. 따라서 제품에 따라서는 이들 변형모드가 개별적으로 존재하기도 하지만 통상은 복합적으로 존재하는 것이 일반적이다.

프레스 성형성을 평가하기 위한 방법으로는 실제 판재가 받는 변형모드를 개념적으로 잘 재현한 모사 실험방법(simulative test)과 인장실험에서 얻어진 기본적인 재료특성에 의해 평가하는 방법이 있다. 대표적인 모사 실험방법으로는 딥드로잉 성형성에 대해서는 Swift의 컵드로잉 실험에 의한 LDR(limit drawing ratio, 한계드로잉비) 평가, 장출 성형성에 대해서는 Erichsen 실험에 의한 Er(Erichsen value,

(a)

(b)

Fig. 1 (a) Sink and (b) Deformation mode for forming of sink

에릭센값) 평가, 장출플랜징/머링 성형성에 대해서는 홀확장 실험에 의한 HER(hole expansion ratio, 홀확장비) 평가 등이 있다. 한편 재료특성으로서 항복응력(σ_{YS}), 인장강도(σ_{TS}), 과단연신률(El), 가공경화지수(n), 랭크포드의 이방성계수(R) 등으로 판재의 성형성을 간접적으로 평가하기도 한다. 재료의 가공경화특성을 나타내는 n 값과 이방성을 나타내는 R 값은 연 강판에서와 같이 스테인레스 강판의 경우에도 성형성과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 즉, n 값은 판재의 장출 성형성과 그리고 R 값은 딥드로잉 성형성과 상관성이 높다.

3. 연 강판과 비교한 스테인레스 강판의 프레스 가공특성

스테인레스 강판에 적용되는 프레스 가공기술은 기본적으로는 연 강판과 알루미늄 등, 기존의 판재성형에 적용되는 기술과 동일하다. 그러나 Fig. 2a, 2b와 Table 2에 나타난 것과 같이 다른 재료와의 기계적 성질과 물리적 성질이 차이가 나고 이에 따라 스테인레스 판재의 프레스 가공에서 다음과 같은 점에 주의하여야 한다[4].

(1) 스테인레스 강판은 항복응력과 인장강도가 높아 스프링백에 의한 형상 불량과 형금힘(galling)에 의한 금형 손상이 생기기 쉽기 때문에 강성이 우수한 프레스 기계 선정 및 금형 표면의 개질(PVD, CVD 표면처리 등)이 중요하다.

(2) 열전도율이 작고 열팽창계수가 크기 때문에 재료의 소착이나 형금힘이 쉽게 발생하고 이에 대한 대책으로 냉각성능이 우수한 에멀전 계통의 수용성 윤활유를 채용하는 것이 좋다.

(3) 표면광택이 중요한 제품의 경우는 프레스

가공 중의 표면손상 방지를 위해 비닐코팅 강판이나 윤활처리강판이 이용된다.

(4) 스테인레스 강판의 성형성은 온도와 속도에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 100°C 전후의 온간 성형에서 딥드로잉 성형성이 크게 증가한다.

(5) Fig. 3에서 알 수 있듯이 BCC 구조를 갖는 페라이트계 스테인레스 강판은 n 값은 거의 일정하지만 R 값은 크게 변하고 있음을 알 수 있고 반면 오스테나이트계 스테인레스 강판은 그 반대특성을 가진다. 이에 따라 스테인레스 강판의 프레스 성형성은 오스테나이트계에서는 n 값의 영향이 강하고 페라이트계에서는 R 값의 영향이 강한 특징이 있다. 따라서 성형성을 향상시키기 위한 대책도 각각 다른데 페라이트계 스테인레스 강판은 집합조직의 제어에 기초하여 R 값을 향상시키고 오스테나이트계 스테인레스 강판은 성분조정에 의해 n 값을 향상시키는 방법이 강구되고 있다. 또한 페라이트계 스테인레스 강판은 프레스 가공 중에 딥드로잉 모드를 적극적으로 도입하며 오스테나이트계 스테인레스 강판의 경우는 장출모드를 최대한 이용하도록 공정을 설계하는 것이 바람직하다.

4. 오스테나이트계 스테인레스 강재의 재료특성과 성형성

4.1 성형성을 지배하는 인자

4.1.1 오스테나이트 안정도

γ 계 스테인레스 강판은 FCC 결정 구조를 갖고 있기 때문에 변형 초기부터 주 슬립계 뿐만 아니라 부 슬립계도 활동하여 높은 가공경화특성을 나타낸다[5].

Table 2 Mechanical properties for each materials

Material	E (GPa)	σ_{YS} (MPa)	σ_{TS} (MPa)	El (%)	n	R _m	Conductivity (W/mK)	Coefficient of thermal expansion (mm/mK)	Melting temperature (°C)
AK steel	210	214	314	37	0.22	1.7	52	11.7	1,530
Al5454	69	193	360	26	0.26	0.8	174	23.6	660
AZ31B	45	197	259	11	0.17	2.5	77	26	630
Cu	116	186	250	33	0.59	0.5	331	16.8	1,083
Ti6Al4V	113	958	1023	10	0.07	3.6	6.5	8.8	1,540~
STS304	197	245	618	91	0.57	1.0	18.7	17	1,400~
STS430	209	356	509	27	0.19	1.3	24	11.2	1,400~

(a) Tensile behavior

(b-1) Microstructure

(b-2)

(b-3)

Fig. 2 (a) Tensile behavior and (b) Microstructure for each materials

$$Md30(^{\circ}C) = 551 - 462(C + N) - 9.2Si - 8.1Mn - 13.7Cr - 29(Ni + Cu) - 18.5Mo - 68Nb - 1.42(\nu - 1) \quad (1)$$

한편 준안정 오스테나이트 강재라고 알려진 STS304와 STS301은 상온에서 프레스 가공되면 오스테나이트 γ 상의 일부가 마르텐사이트 α' 상으로 변태한다. 이 가공유기변태에 의해 나타나는 연성의 향상은 변태유기소성(Transformation Induced Plasticity, TRIP)이라고 부른다. TRIP은 재료의 소성 변형 중에 α' 상이 생성되어 그 부분의 가공경화가 크게 되어 재료에 넥 발생을 억제하여 큰 균일 연신이 얻어지는 현상이다.

γ 상으로부터 α' 상으로의 가공유기변태가 일어나기 쉬운 정도는 구성요소의 조성에 따라 대체적으로 결정된다. 그 지표가 Md30 값($^{\circ}C$)으로 알려진 오스테나이트 안정도(stability of austenite)이며 Angel 의 식 등이 제안되어 있다.

Eq. (1)[6]에서 원소의 단위는 mass(%)이고, ν 은 ASTM 입도번호이다.

Md30 값은 재료에 0.3의 인장 진변형률을 가했을 때 조직의 50%가 마르텐사이트 상으로 변태하는 온도를 나타낸다. Md30 값이 커질수록 오스테나이트 γ 상이 불안정하고 마르텐사이트 α' 상으로의 가공유기변태가 생기기 쉽다는 것을 의미한다. 그 반대로 Md30 값이 작을수록 γ 상은 상대적으로 안정하여 α' 상으로의 변태가 일어나기 어렵다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 오스테나이트계 스테인레스 관재의 Md30값과 성형성의 관계를 나타낸 것이다. n 값은 Md30 값이 커질수록 선형적으로 증가하며 장출 성형성의 척도인 Er은 Md30 값이 $40^{\circ}C$ 정도에서 최대값을 갖는다. 한편 딥드로잉 성형성의 척도인 LDR과 훌확장성의 척도인 HER은 Md30 값이 작아질수록, 즉 오스테나이트 상이 안정할수록 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서 오스테나이트 계의

Fig. 3 The comparison between ferritic and austenitic stainless steel for n (a) and R value (b)

스테인레스 판재를 프레스 성형할 때는 성형모드에 부합하는 오스테나이트 안정도의 재료를 선정하는 것이 중요하다.

4.1.2 첨가원소의 영향

재료 내에서 강화작용을 하는 침입형 원소인 C와 N량이 작으면 프레스 성형성에는 유리하나 오스테나이트 상은 불안정해지기 때문에 Ni, Mn, Cu 등을 첨가하여 오스테나이트의 안정도를 개선시킨다. 또한 Cu의 첨가는 오스테나이트 상의 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)를 작게 하여 전위들이 쉽게 부분전위로 분해되도록 하여 전위의 교차슬립을 억제하여 전위의 집적에 의한 가공경화 증가에 기여한다[6].

4.2 프레스 가공상의 문제점

4.2.1 시효파괴

오스테나이트 스테인레스 강관은 높은 딥드로

Fig. 4 Relationships of between Md30 and formability for austenitic stainless steel

잉 성형성을 보이거나 그 가공도가 한계를 넘어서면 시효파괴(aging fracture)가 발생한다고 알려져 있다. 오스테나이트 스테인레스 강관을 딥드로잉 가공한 후 수분에서 수일이 지난 후에 Fig. 5와 같이 종방향으로 지연파괴(delayed fracture)가 일어나는 것을 시효파괴라고 한다. 시효파괴의 발생기구는 명확하지 않으나 그 발생 영향인자로는 오스테나이트 안정도, C와 N의 량, 컵입구 외주부의 잔류응력, 수소 함유량, 가공조건, 시효환경 등이 있다.

- Md30: Fig. 6은 Md30값과 시효파괴 발생 때까지의 시간 관계를 나타낸 것이다. Cr, Ni 계에서는 Eq. (1)에서 알 수 있듯이 Cr, Ni의 증가에 따라 Md30 값이 낮아지고 따라서 오스테나이트 안정화와 더불어 시효파괴의 발생이 지연된다. C, N 계도 Md30 값이 20°C 이하에서는 Cr, Ni계와 동일한 경향을 나타내지만 Md30 값이 30°C 이상에서는 역으로 C, N량이 적어져 오스테나이트가 불안정해 질수록 시효파괴를 지연시킨다.

- 잔류응력: 잔류응력은 가공유기변태의 영향을 크게 받는다. 일반적으로 드로잉비(drawing ratio)가 클수록 또한 오스테나이트가 불안정한 재료일수록 가공유기변태에 의한 마르텐사이트 조직이 많아지므로 잔류응력이 커지고 시효파괴에 대한 감수성이 높아진다.

- 수소함유량: 대기 중에서 소둔처리한 재료는 수소함유량이 보통 1ppm 이하이지만 수소와 질소의 혼합가스 중에서 소둔처리한 BA(bright annealed) 재료는 수 ppm 정도의 수소를 함유하고 있다. 이런 재료는 시효파괴에 대한 저항력이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

(a)

(b)

Fig. 5 The example of delayed fracture (a) and its microstructures (b)

Fig. 6 Relationships between Md30 and crack initiation time of ageing fracture

4.2.2 귀발생

원형 판재를 원형 컵 형상으로 프레스 성형할 때 컵의 입구부에 발생하는 귀(ear)는 압연판재의 방향별 이방성계수 R 값의 차이, $\Delta R (= (R_0 - 2R_{24} + R_{90}))$

Fig. 7 Relationships between grain size before CR and earing ratio

Fig. 8 Relationships between CR reduction ratio and plane anisotropy

/2)에 기인한다. STS304 판재의 경우는 압연방향에 대해서 45° 방향의 귀가 발생한다. 이 귀의 발생은 냉간압연에서 발달한 $(112)\langle 111 \rangle$ 방위의 집합조직에 의해 R_{45} 가 R_0 과 R_{90} 보다 크기 때문이며 귀발생이 크게 되면 플랜지부의 형상불량과 재료의 수율(yield ratio) 문제를 야기한다. ΔR 이 작을수록 귀 발생률은 낮아진다.

• 열간압연-소둔조건: Fig. 7에 나타난 것 같이 냉간압연 전의 결정립경이 클수록 귀 발생은 적어진다. 그 이유는 열간압연에서 얻어진 결정립이 클수록 집합조직이 랜덤하게 형성되어 $(112)\langle 111 \rangle$ 방위의 집합조직 발달을 억제하기 때문으로 생각된다.

• 냉간압연공정: Fig. 8에 나타난 것 같이 냉간압

연률(cold-rolled reduction ratio)이 작을수록 또한 1회 압연보다는 2회 압연일 때가 ΔR 이 작아지고 귀 발생이 적어진다. 따라서 귀 발생이 문제가 될 때에는 통상 2회 냉간압연을 실시한다. 또한 냉간압연에서 가공유기변태가 일어나기 쉬울수록 귀 발생률은 적어지기 때문에 냉간압연 온도를 낮추거나 오스테나이트 상이 불안정한 성분계의 재료를 사용하는 것도 귀 발생을 억제하는데 효과적이다.

5. 페라이트계 스테인레스 강재의 재료특성과 성형성

5.1 성형성을 지배하는 인자

5.1.1 C, N량과 Ti, Nb, Cu첨가

페라이트계 스테인레스 강재의 장출 성형성의 지표인 n 값과 합금원소 성분량의 관계가 Eq. (2) [6]으로 제안되어 있다.

여기서 원소의 단위는 mass (%)이고

Ti/(C+N)<10 인 경우: [Ti]=0, [C+N]=(C+N)-Ti/10

Ti/(C+N)≥10 인 경우: [Ti]=Ti-10(C+N), [C+N]=0

이 식으로부터 알 수 있듯이 α 계 스테인레스 강의 연성향상을 위해서는 Si, Mn 등 목적 외 성분을 줄여서 고순도화 하는가에 달려 있다. 현재로서는 가공경화지수(n) 값의 향상에는 한계가 있어 딥드로잉 성형성 향상을 위해 이방성계수(R)의 평균값, 즉 $R_m (= (R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4)$ 값을 높이려는 연구가 진행되고 있다. Fig. 9는 제강공정에서 C, N을 최대한 줄인 후, Ti, Nb, Al 등을 추가로 첨가하여 고용된 C, N을 감소 시킴으로써, 연성을 향상시키고 R_m 값을 높여 딥드로잉 성형성을 개선한 예이다. 이와 같은 R_m 값의 향상은 집합조직적으로 {111}<112>와 유사한 {554}<225> 방위의 집합조직의 발달과 {100}<110> 방위의 억제에 기인한다. 이렇게 제조된 스테인레스 강재를 고순도 페라이트계 스테인레스 강재라고 부른다.

0.06% 정도의 Cu 첨가는 ϵ -Cu 석출상에 의해 {111} 집합조직을 발달시켜 R_m 을 높이는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

5.1.2 냉간압연조건

Fig. 10에 냉간압연율에 따른 R 의 평균값 R_m 과 차이 ΔR 를 나타내었다. R_m 는 압연률에 따라 증

가하지만 ΔR 은 압연률이 약 70%에서 최대가 된다. Fig. 10에서 보면 딥드로잉 성형성을 개선하기 위해서는 압연률을 증가시키는 것이 좋으나 압연률이 약 70%까지는 동반하여 ΔR 이 커지므로 귀 발생률이 높아진다.

실제 제조공정에서는 압연 공정에서 중간열처리를 포함하여 2회 이상의 냉간압연을 하거나 냉간 작업률을 크게 하거나 열간압연 온도를 낮추는 조치가 이루어지고 있다.

Fig. 9 The increase of R-value and C.C.V. for Ti solid

Fig.10 The difference of ΔR and R_m according to CR reduction ratio

$$n = 0.327 - (0.15Si + 0.003Mn + 0.560P + 0.004Cr + 0.05Al + 0.069[Ti] + 0.094[C + N])^{1/2} \quad (2)$$

Fig.11 Ridging phenomenon after cup drawing (a) and its wall (b)

5.2 프레스 가공상의 문제점

5.2.1 리징

리징(ridging)은 페라이트계 스테인레스 판재에 프레스 성형 등에 의해 인장변형이 가해질 때 압연방향에 평행하게 발생하는 표면 기복, 표면 불규칙 현상이다. 심한 경우는 냉간 압연된 상태 또는 소둔-조질압연 후에도 발견된다. 이 리징은 변형된 표면에 나타난 전체적인 모양을 나타낸 것으로, 미소한 조직내 형태변이와 변형으로 발생하는 기복을 나타내는 로핑(roping)을 포함한다[7].

Fig. 11(a), (b)에는 컵 드로잉 후와 25% 인장변형을 가한 후에 시편에 발생한 리징을 나타낸 것이다. 이 리징은 성형성에는 크게 영향을 미치지 않으나 성형품의 미관을 해치고 제거를 위한 연마부하를 증가시킨다. 리징의 원인으로는 연주 슬라브의 주상조직이나 열연조직으로부터 기인한 변형거동이 다른 조직이 냉간압연-소둔 이후에도 그대로 존재하기 때문인 것으로 알려지고 있다, 경제적으로 리징을 완전히 제거하는 방법에 대한 많은 연구가 행해지고 있다.

5.2.2 종방향 파괴

종방향 파괴는 페라이트계 스테인레스 판재가 딥드로잉 가공 후에 리스트라이크 등의 2차 가공을 받을 때 종방향으로 취성적 파괴되는 현상이다. 딥드로잉 가공도가 심할수록 또한 2차 가공온도가 낮을수록 발생이 심해진다. 이에 대한 대책으로는 강 중에 Nb 첨가가 유리하다고 보고되고 있다.

6. 스테인레스 강판의 항복거동

Fig. 12는 인장 성형속도에 따른 가공경화특성과 마르텐사이트 변태율을 나타낸다[8]. 그림에서 알

Fig.12 Martensitic transformation rate and work hardening for strain rate (a) and forming limit curves for strain rate (b)

수 있듯이 고속 성형에서는 소성변형 열의 발생이 많아져 마르텐사이트 변태가 늦어지고 가공경화율이 낮아진다. 가공경화율이 낮아지면 후술하는 성형한계선의 레벨이 낮아진다. 반대로 저속 성형에서는 성형한계가 높아지는데 특히 인장-인장 영역에서 그 영향이 두드러진다.

0.5mm 두께의 스테인레스 판재 STS301LN의 항복특성을 규명하기 위해 십자형 시편을 이용한 2축 인장실험을 수행한 결과를 Fig. 13(a), (b), (c)에 나타내었다[9]. 스테인레스 판재의 이방성계수 R은 거의 1.0에 가까운 값으로 항복곡면의 형상은

전체적으로 Hosford의 항복곡면(또는 Barlat-Lian의 항복곡면)으로 근사 가능하나 반시계 방향으로 약 10° 회전한 형상임을 알 수 있다. 1-사분면(응력비 ($\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$)가 양인 경우)에서 영구 소성변형률이 0.2%일 때의 항복응력은 십자시편을 이용하여 단축 인장실험, 평면변형 인장실험 그리고 등 2축 인장실험을 통해 구한다. 그러나 응력비가 음인 경우는 판재의 압축변형에 의한 좌굴발생 억제를 위해 판재 두께방향으로 적당한 힘을 가하는 누름판이 이용된다.

7. 스테인레스 강판의 온간 프레스 가공

STS 304 계 스테인레스는 내식성이 우수하고 딥드로잉 성형성이 좋은 반면 소성변형을 받으면 가공유기변태가 생겨서 가공경화가 매우 커져서 2차 가공성이 나빠지고 장기간 보관하면 시효파괴가 발생하는 등 다루기 어려운 재료로 알려져 있다. 따라서 다단 드로잉 가공공정이 요구되는 깊이가 깊은 용기의 가공에서는 드로잉 가공공정 도중 혹은 가공 후에 소둔공정(풀림처리)을 거치는 것이 필요하다. 최근에는 에너지 사용을 줄이는 그린제조기술(green manufacturing technology)의 하나로 소둔공정을 생략하고 딥드로잉 성형성을 향상시키는 방법으로 온간 프레스 가공(warm press forming)이 사용되고 있다.

온간 프레스 가공법은 블랭크 홀더(상하다이)를 100°C 전후로 가열하여 블랭크 홀더면 사이에 놓인 플랜지부에서 재료의 변형저항을 떨어뜨리고 한편 파단이 발생하기 쉬운 편치 코너반경 부에서 재료의 변형저항을 높이기 위해 편치를 5°C 이하로 냉각하여 드로잉 가공하는 방법이다. 이 기술은 최근 가전용품, 자동차부품, 2차 전지 케이스 가공 등에 널리 사용되고 있다.

Fig. 14는 STS 304 재료와 유사한 특성을 갖는 STS 301 재료에 대해서 인장변형에서의 마르텐사이트 변태량의 온도의존성을 나타낸 것이다. 인장변형률이 커질수록 또한 가공온도가 낮을수록 마르텐사이트 변태량이 커진다.

이 재료의 마르텐사이트 변태점 M_d 는 160°C 이고 이 이상의 온도영역에서는 재료가 큰 변형을 받아도 마르텐사이트 변태를 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 STS301은 이 M_d 근처 온도 영역에서 온간가공을 실시하면 마르텐사이트 변태는 거의 일어나지 않는다.

(a)

(b)

(c)

Fig.13 Biaxial tensile test machine (a), cruciform specimen (b), and yield loci of stainless steel (c)

Fig. 15는 STS 304 1.0T 과 STS 430 0.7T 재료의 온간 프레스 가공에 의한 원형 컵 성형결과이다. 편치 직경은 70mm, 편치 및 다이의 어깨반경은

Fig.14 Temperature dependence of martensite volume fraction for STS 301

Fig.15 Cylinder cup at warm temperature for STS 304 and STS 430

7mm, 금형재료는 동-알루미늄 합금, 윤활제로는 유성윤활유를 사용하였다. 펀치온도는 0~2°C 로 냉각하였고 다이온도는 실온~150°C 범위에서 변화시켰다. 두 재료 모두 90°C 전후에서 가장 높은 LDR을 나타내었고 특히 STS 304 재료는 상온에서는 보통 LDR이 2.3정도인데 반해 90°C에서는 LDR이 3.0정도 까지 높아졌다. 그러나 그 이상 온도가 올라가면 LDR은 낮아지고 있는데 이는 높은 온도에 의해 윤활유가 가열되어 점도가 낮아져 윤활유 효과가 없어지기 때문으로 생각된다.

8. 스테인레스 강판의 성형한계선

일반적으로 판재는 프레스 가공 중에 다양한 변형모드 -인장변형, 평면변형, 이축인장변형 등-를 경험하게 된다. 이런 다양한 변형모드 하에서의 재료가 파단되지 않고 변형될 수 있는 한계가

Fig.16 Comprehension of FLD and its measurement

재료의 성형한계(forming limit)이다. 이 변형한계를 주 변형률 ϵ_1 과 부 변형률 ϵ_2 선도 상에 나타낸 것이 성형한계선도(forming limit diagram, FLD)이다 [10]. 실험적으로 재료의 변형한계선(forming limit curve, FLC)을 구하기 위해서는 여러 크기의 형상으로 준비한 판재에 미리 적당한 크기의 그리드를 새겨 넣고 구형 단면 펀치(Hecker의 방법) 혹은 평평한 단면 펀치(M-K 방법)를 갖는 펀치장출 실험을 통하여 시편의 파단부위 근처의 변형률을 정밀하게 측정하는 방법이 사용된다(Fig. 16)[11].

한편 이론적으로 FLC를 구하기 위한 방법으로 Swift의 확산 넥 이론, Hill의 국부 넥 이론, Marciniak-Kuczynski(M-K)의 초기결함모델 이론, Storen-Rice(S-R)의 이론, Hora-Tong(H-T)[12]의 수정된 최대하중 이론 등 여러 해석모델들이 제안되어 있다. 이 중에서 M-K 모델은 다양한 이방성 항복조건식과 구성식 그리고 재료변수 등이 FLC에 미치는 영향을 검토하는데 가장 널리 사용되고 있다. H-T의 모델은 재료가 한계변형에 도달하면 평면 변형 상태가 되면서 국부 넥이 발생하는데 이 평면변형 모드에 의해 재료에 부가적인 가공경화가 일어나 재료의 파단을 지연시킨다는 것에 기초하고 있다.

이하에서는 수식전개가 간단하고 적용이 쉬운 H-T의 수정된 최대하중 이론에 대해서 설명한다. H-T 모델에서 판재의 파단발생 한계는 다음 식으로 정의된다.

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \epsilon_1} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \epsilon_1} \geq \sigma_{11} \quad (3)$$

여기서 좌변 첫 번째 항은 재료의 응력-변형률 선도의 구배인 가공경화항의 기여, 두 번째 항은 국부 넥 근처에서 변형경로의 변화에 따른 부가적인 가공경화항의 기여이다. 또한 β 는 변형률 비로 $\beta = d\varepsilon_2 / d\varepsilon_1$ 이다.

한편 판재에 대한 항복조건식으로 Hosford의 항복조건식을 사용하여 등가응력 $\bar{\sigma}$ 를 정의하면 Eq. (4)와 같고 α 를 응력비 $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$ 로 두면 Eq. (4)는 Eq. (5)와 같이 된다.

$$\bar{\sigma}^a = \frac{1}{(1+R_m)} \{ \sigma_1^a + \sigma_2^a + R_m(\sigma_1 - \sigma_2)^a \} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_1} \right) = \left[\frac{1}{(1+R_m)} \{ 1 + \alpha^a + R_m(1-\alpha)^a \} \right]^{1/a} = f(\alpha) \cdot \bar{\sigma} = f(\alpha)\sigma_1 \quad (5)$$

a 는 항복곡면의 형상을 정의하는 지수로 통상 $a=6\sim 8$ 사이의 값을 가진다. $a=2$ 인 경우는 Hill의 1949년 이방성 항복곡면에 귀착하며 또한 $R_m=1$ 인 경우는 이방성이 없는 등방성 재료로 von Mises 항복곡면에 상당한다.

등가변형률 $\bar{\varepsilon}$ 을 등가 소성일의 원리로부터 Eq. (6)과 같이 나타내어진다.

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2}{\bar{\sigma}} = \frac{1+\sigma\beta}{f(\alpha)} d\varepsilon_1, \quad d\bar{\varepsilon} = g(\alpha) d\varepsilon_1 \quad (6)$$

여기서 $g(\alpha) = 1 + \sigma\beta / f(\alpha)$ 이다. 한편 Levy-Mises 구성관계식을 적용하면 Eq. (7)과 같이 나타내어진다.

$$\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = \frac{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_2} d\lambda}{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_1} d\lambda} = \frac{\sigma_2^{a-1} - R_m(\sigma_1 - \sigma_2)^{a-1}}{\sigma_1^{a-1} + R_m(\sigma_1 - \sigma_2)^{a-1}} = \frac{\alpha^{a-1} - R_m(1-\alpha)^{a-1}}{1 + R_m(1-\alpha)^{a-1}} \quad (7)$$

$$\beta = \beta(\alpha)$$

한편 재료의 가공경화특성은 다음 식으로 주어진다고 가정한다.

$$\bar{\sigma} = H(\bar{\varepsilon}) \quad (8)$$

상기의 Eq. (5)~Eq. (8)을 Eq. (3)에 대입하여 정리하면 Eq. (3)의 첫째 항과 둘째 항은 각각 Eq. (9)와 Eq. (10)이 된다.

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \bar{\sigma}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\varepsilon}} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \varepsilon_1} = \frac{1}{f(\alpha)} H' g(\alpha) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ \frac{1}{f(\alpha)} H \right\} \frac{1}{\beta'(\alpha)} \left\{ -\frac{\beta}{\varepsilon_1} \right\} \quad (10)$$

단, $\partial \beta / \partial \varepsilon_{11} \approx -\beta / \varepsilon_{11}$ 로 가정한다.
따라서 Eq. (3)은 최종적으로 다음 식으로 나타내진다.

$$\frac{1}{f(\alpha)} H' g(\alpha) \mp \frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ \frac{1}{f(\alpha)} H \right\} \frac{1}{\beta'(\alpha)} \left\{ \frac{\beta g(\alpha)}{\bar{\varepsilon}} \right\} \geq \frac{1}{f(\alpha)} H \quad (11)$$

$$H' \geq \frac{f(\alpha)}{g(\alpha)} \left[\frac{1}{f(\alpha)} \pm \left\{ \frac{-f'(\alpha)}{f(\alpha)^2} \right\} \frac{1}{\beta'(\alpha)} \left\{ \frac{\beta g(\alpha)}{\bar{\varepsilon}} \right\} \right] H \quad (12)$$

$\beta = -0.5 \sim 1.0$ 범위 내에서 주어진 변형률 비 β 에 대해서 $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{11} + \Delta \varepsilon_{11}$, $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{22} + \Delta \varepsilon_{22} (= \beta \Delta \varepsilon_{11})$ 가 Eq. (12)가 만족할 때의 변형률 (ε_{11}^* , ε_{22}^*)이 성형한계선을 정의하는 변형률이 된다.

그런데 Eq. (12)는 α 의 함수이므로 β 값의 변화에 대해서 Eq. (7)에서 α 를 수치적으로 구해야 한다.

위의 식 (12)를 이용하여 재료의 가공경화특성이 다음과 같은 Voce[13] 식으로 표현되는 스테인레스 STS 4** 판재에 대해서 성형한계선을 예측한 결과를 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17에서는 계산결과를 Hecker의 펀치장출실험에서 얻어진 평면변형 모드에서의 성형한계변형률 $FLC_0 (=0.261)$ 과 일치시켜 나타내었다.

$$\bar{\sigma} = H(\bar{\varepsilon}) = 392 + 289.7 \{ 1 - \exp(-10.43\bar{\varepsilon}) \} \quad (13)$$

H-T 모델은 온도효과를 포함하는 식으로 쉽게 확장할 수 있으며 또한 응력 σ_1 대신에 Bridgman의

Fig.17 Comparison of analytic and experimental results

수정계수를 사용하여 넥 중심부에서의 응력 $\sigma_1(\rho, t)$ 으로 치환하는 것에 의해 재료의 두께가 성형한 계선에 미치는 영향을 파악할 수 있다[14].

9. 결 론

본 해설 자료에서는 대표적인 스테인레스 강판의 재료특성, 프레스 가공특성과 성형성 등에 대해서 기존의 자료를 중심으로 설명하였다. 오스테나이트계의 STS304 스테인레스 판재는 가공유기 변태특성으로 인해 프레스 가공시에 변형 속도와 온도에 따라 성형성이 크게 차이가 나는 점을 고려하여 성형조건을 설정할 필요가 있다. 또한 오스테나이트계의 STS304 스테인레스 판재는 프레스 성형후의 시효파괴에 대한 대책, 그리고 페라이트계의 STS430 스테인레스 판재는 성형 중에 발생하는 텃징에 대책이 요구된다.

최근 0.2mm이하의 얇은 스테인레스 판재가 휴대폰, 카메라 그리고 연료전지의 분리막 등에 널리 사용되고 있다. 이에 재료 두께의 감소에 따른 재료특성에의 치수효과에 대한 연구 및 박육화에 따른 소성이방성거동에 대한 결정소성학적 연구 뿐 아니라 박판재의 미세소성가공기술에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다. 이에 한정된 자료이지만 기존의 연구결과들을 요약, 정리하고 스테인레스 판재의 소성역학적 특성을 파악하는 것은 극 박판 소재의 소성가공 기술의 확립에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

이 논문은 POSCO의 극박용 STS강 성형특성 평가법 개발사업과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2010-0020089) 이에 관계자 제위께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Ishiyama, 1997, A study of forming strategy for stainless steel sheet, JSTP symposium, No.176, pp. 27~35
- [2] M. Takahashi, 2003, Development of high stretch steels for automobiles, Nippon Steel Report, Vol. 88, pp. 1~7
- [3] S. C. Chan, Y. H. Kim, Y. Y. Lee, 1998, Effects of S and Mn on the hot workability of STS 316L and 309S steels, J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 36, pp. 1590~1597
- [4] P. Hausild, P. Pilvin, M. Karlik, 2009, Mechanical behavior of a metastable austenitic stainless steel, ESOMAT 2009, 06016.
- [5] J. B. Nam, D. Y. Ryoo, Y. S. Kim, 1994, Press formability of austenitic AISI304 stainless steel, Trans. Mater. Process., Vol. 3, pp. 38~50.
- [6] T. Angel, 1954, Formation of martensite in austenitic stainless steel, J. Iron and Inst., Vol. 177, pp. 165~174
- [7] Web-page: <http://www.worldstainless.org/ISSF/Files/ISSF%20The%20Ferritic%20Solution%20Korean.pdf>
- [8] V. Talyan, R. H. Wagoner, J. K. Lee, 1998, Formability of stainless steel, Metal Mater. Trans. Vol. 29A, pp. 2161~2172.
- [9] Thesis: A. Olsson, 2001, Stainless steel plasticity-material modeling and structural applications, Lulea University of Technology, Sweden.
- [10] Y. S. Kim, 2010, Press forming and mechanics, KNU press.
- [11] ISO12004-1, 2, www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38369
- [12] J. Krauer, P. Hora, L. Tong, B. Berisha, 2007, Forming limit prediction of metastable materials with temperature and strain induced martensite

- transformation, AIP Conf. Proc., Vol. 908, pp. 1263~1268.
- [13] E. Voce, 1955, A practical strain-hardening function, Metallurgica, Vol. 51, pp. 219~226.
- [14] Y. S. Kim, S. Y. Won, and K. H. Na, 2003, Effect of material damage on forming limits of voided anisotropic sheet metals, Metal Mater. Trans. Vol. 34A, pp.1283~1290.