

변형시효처리한 탄소강의 소성역 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Plastic Zone in Carbon Steel after Strain Aging

손세원(건국대), 이진수(성남기능대)*, 장정원(일진 전기연구소)
Se-Won Sohn(Kon-Kuk Univ.), Jin-Soo Lee(Sung-Nam Tech. College),
Jeong-Won Jang(ILJIN Electric & Machinery R&D Lab.)

ABSTRACT

In this paper, the behavior of plastic zone in the notch tip was studied under Loye's Micro Vickers Hardness Measurement Method. The direction forming maximum plastic zone was estimated by finite element analysis. In the experiments, cold rolling sheet SGCD3, SK5 and hot rolling sheet SS41, S45C was used to study the influence of carbon contents on plastic zone. The standard hardness test specimen and the notch hardness test specimen was made and loaded cyclically. The specimen was aged to stabilize the hardness. After aging treatment, the notch specimen was made and simple tension load of 50% yield strength was applied. The hardness test at the notch tip until the hardness data of standard hardness specimen was checked was performed.

Key Words : Prestress(프리응력), Prestrain(프리변형), Notch(노치), Isoparametric Element(등매개요소)

1. 서 론

최근에 많이 사용되고 있는 선박, 압력용기, 항공기 등의 구조물에 박판재의 사용이 점차 늘고 있으며, 에너지 절감, 생산단가의 절감이라는 관점에서 볼 때 더욱 널리 이용될 것으로 생각된다. 박판구조물의 사용시, 부재내의 결함이 존재하는 경우가 많고, 부재나 판재의 흠, 미세한 결함등이 원인이 되어 항공기나 선박의 파손사고가 발생하는 경우가 많다. 따라서, 평면응력상태에서 박판구조물의 설계 및 안전성 평가에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Loye가 제시한 마이크로 비커스 경도(Micro Vickers Hardness) 측정법을 이용하여 노치 선단에서 소성역이 최대가 되는 각도와 소성역의 크기를 측정하였고, 탄소강의 탄소함유량, 냉간·열간압연 차이, 하중조건등을 달리하여 이들이 소성역에 미치는 영향을 연구하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 최대소성역 방향을 예측하였다.^(1~3)

2. 실험

2.1 실험재료

탄소강의 소성역 거동을 해석을 하기위해 Table 1과 같이 냉간압연강판 SGCD3, SK5와 열간압연강판 SS41, S45C를 사용하였다. 실험에 사용한 탄소강의 기계적 성질 및 화학적 성분은 Table 2와 같다.

2.2 소성역거동 해석시험

탄소강의 소성역 크기를 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 과정을 통해 실험을 수행하였다. 노치선단에서 소성역을 측정하기 위해 Fig. 2~4와 같이 표준경도시편과 노치경도시편을 제작하였다. 반복인장에 따른 소성역 거동을 해석하기 위해 Table 3과 같이 표준경도시편과 노치경도시편에 프리응력과 프리변형을 가하였다. 경도치의 안정화를 위해 50일동안 시효처리후 CNC Wire Cutting Machine을 이용하여 Fig. 4와 같은 노치경도시편을 제작하였다. 노치가공후 시편에 항복강도의 50%로 응력을 가하였다. 노치선단에서 경도분포를 알아보기위해 마이크로 비커스 경도시험기를 이용하여 표준경도시편과 노치경도시편의 경도시험을 수행하였다. 노치경도시편의 경도시험은 Fig. 5와 같

이 노치선단에서 0.1mm간격으로, 0~100°까지 반시계 방향으로 10°씩 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 실험을 수행하였으며, 모재의 경도치와 일치하는 점이 될때까지 경도시험을 행하였으며 신뢰할 수 있는 경도 데이터를 얻기 위해 동일조건 경도시험을 10회 반복시험하여 이의 평균치를 데이터로 처리하였다. 한편 최대소성역의 크기가 나타날 것으로 예상되는 60°~70° 사이에서 정확한 방향을 구할 수 없기 때문에 이 부분을 다시 2°씩 세분하여 경도시험을 수행하였다.

3. 유한요소해석

본 논문에서는 PATRAN Advanced FEA를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 유한요소해석 과정은 Fig. 6과 같다. 본 논문에서는 노치시편에서 표점거리 50mm 내의 1/4 부분을 해석모델로 선정하였다. 요소분할에 사용된 요소는 2차 등매개요소이며, 균열 선단요소로는 $1/\sqrt{r}$ 의 특이성을 만족시키는 6-절점 삼각형요소를 사용했고, 그 외의 요소에서는 해의 수렴성이 우수한 8-절점 등매개요소를 사용했다. 경계조건은 실험을 통해 얻은 탄성계수 E, 포아송 비 ν , 응력-변형을 데이터를 재료특성 입력치로 사용하였다. 하중조건은 프리응력의 경우 항복하중의 90%, 프리변형의 경우는 항복하중의 110%에 해당하는 값을 사용하여 y 축방향으로 1/4 분할요소에 해당하는 하중을 가하였고, 노치선단 5mm를 제외하고 y축 변위를 0로 고정시켰다. Fig. 7~8는 SGCD3의 프리응력 및 프리변형에 대한 응력분포이다.(SK5, SS41, S45C는 지면 관계로 생략) 해석결과, 노치선단에서 Tuba의 소성역 이론과 일치되는 약 69° 방향으로 응력분포가 가장 크게 나타났으며, 이것은 대략 69° 방향으로 소성역이 최대가 될 것으로 예측이 된다. 이 결과는 Von Mises 항복조건에 근거하여 해석한 결과이다.^(4~9)

4. 결과 및 고찰

프리응력하에서 탄소강 SGCD3, SS41, S45C, SK5의 노치선단에서 소성역해석결과, 최대소성역이 되는 각도 θ 와 소성역 크기를 요약하면 Table 4와 같으며, Table 4의 좌측값은 10°간격으로 경도시험 결과이고 우측값은 보다 정확한 값을 얻기위하여 60~70° 사이를 2°간격으로 경도시험한 결과로서 최대소성역의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 반복하중 프리응력하에서 소성역 크기는 약 1.7mm였고, 최대소성역 방향은 약 62°였다. 반복하중 프리응력하에서는 탄소함유량과 냉간·열간압연차이로 인한 뚜렷한 변화는 보이지 않았다.

프리변형하에서 탄소강 SGCD3, SS41, S45C, SK5의 노치선단에서 소성역해석결과, 최대소성역이 되는 각도 θ 와 소성역 크기를 요약하면 Table 5와 같으며, Table 5의 좌측값은 10°간격으로 경도시험 결과이고 우측값은 보다 정확한 값을 얻기위하여 60~70° 사이를 2°간격으로 경도시험한 결과로서 최대소성역의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 반복하중 프리변형하에서 소성역 크기는 약 1.5 mm였고, 최대소성역 방향은 약 66°였다. 반복하중 프리변형하에서는 냉간·열간압연차이로 인한 뚜렷한 변화는 보이지 않았다.

탄소강 SGCD3, SS41, S45C, SK5의 노치선단에서 프리응력 회수에 따라 최대소성역이 되는 각도 θ 와 소성역 크기를 요약하면 Table 6~9와 같다. 반복하중 프리응력 회수별로 소성역거동을 비교하면, 탄소함유량, 냉간·열간압연차이로 인한 뚜렷한 변화는 보이지 않았다.

탄소강 SGCD3, SS41, S45C, SK5의 노치선단에서 프리변형 회수에 따라 최대소성역이 되는 각도 θ 와 소성역 크기를 요약하면 Table 10~13과 같다. 반복하중 프리변형 회수별로 소성역거동을 비교하면, 탄소함유량, 냉간·열간압연차이로 인한 뚜렷한 변화는 보이지 않았다.

종합적으로 고찰해보면 최대소성역의 크기가 프리응력하에서는 약 62° 근방에서 나타나고, 프리변형하에서는 약 66° 근방에서 나타남을 알 수 있었으며 이와같은 결과는 Rice와 Rosengren의 소성역이론($\theta=100^\circ$)보다 Tuba의 소성역이론($\theta=69^\circ$)에 접근하는 경향을 보였다.

6. 결 론

반복하중을 받은 탄소강 SGCD3, SS41, S45C, SK5의 소성역 거동을 경도시험 및 유한요소해석으로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 노치선단에서 마이크로 비커스 경도시험 해석결과, SGCD3, SS41, S45C, SK5 모두 프리응력하에서는 약 62° 근방에서 최대소성역이 나타났고, 프리변형하에서는 약 66° 근방에서 소성역 크기가 가장 크게 나타났다.
- (2) 최대소성역의 크기는 탄소함유량, 냉간 및 열간압연의 차이에 관계없이 프리응력하에서는 약 1.7mm였고, 프리변형하에서는 약 1.5mm로 대략 10%정도의 차이를 보였다.

(3) 경도시험을 통한 소성역의 해석결과는 Rice와 Rosengren의 소성역이론($\theta=100^\circ$)보다 Tuba의 소성역이론($\theta=69^\circ$)에 접근하는 경향을 보였다.

(4) 유한요소해석결과, 탄소함유량, 냉간 및 열간압연의 차이, 반복하중 및 회수에 관계없이 약 69° 방향으로 응력분포가 가장 크게 나타났다. 따라서, 이와 같은 방향으로 소성역의 크기도 동일하게 형성되리라 생각되며, 실험결과와의 차이는 재료내부의 기계적 성질의 결합에 기인한다고 여겨진다.

참 고 문 헌

1. T. L. Anderson, Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, 1991.
2. G. R. Irwin, Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness, Proc. 7th Sagamore Conf. 1960.
3. Tuba, A Method of Elastic-Plastic Plane Stress and Strain Analysis, J. Strain Analysis, 1, pp. 115-122, 1966.
4. Klaus-Jürgen Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, 1982.
5. R. S. Barsoum, "Triangular Quarter-Point Elements as Elastic and Perfectly-Plastic Crack Tip Elements", Int. J. Numer. Math. Eng. 11, pp. 85-98, 1981.
6. R.H. Dodds and L.A. Lopez, "Substructuring in Linear and Nonlinear Analysis", Int. Numer. Math. Eng. 15, pp. 583-597, 1980.
7. C.F. Shih, H.G. deLorenzi and M.D. German, "Crack Extension Modeling with Singular Quadratic Isoparametric Elements", Int. J. Fracture 12, pp. 647-651, 1976.
8. L. Banks-Sill and D. Sherman, "Comparison of Methods for Calculating Stress Intensity Factors with Quarter-Point Elements", Int. J. Fracture 32, pp. 127-140, 1984
9. L. Banks-Sill and Y. Bortman, "Reappraisal of the Quarter-Point Quadrilateral Element in Linear Elastic Fracture Mechanics", Int. J. Fracture 25, pp. 169-180, 1984

Table 1 탄소강의 기계적 특성

기계적 특성	SGCD3	SS41	S45C	SK45
인장강도(MPa)	280.3	539.2	590.2	557.4
항복강도(MPa)	168.7	386.1	321.8	394.8
탄성계수(GPa)	200	200	200	190
포아송 비	0.33	0.33	0.33	0.33
비커스경도(H _v)	72.4	124.8	140.2	144.2

Table 2 탄소강의 화학성분

SGCD3	SS41	S45C	SK5
0.004%	0.15%	0.46%	0.84%

Table 3 프리응력 및 프리변형

Cyclic Load	P _{min}	P _{max}
Prestress	Yield Load×70%	Yield Load×90%
Prestrain	Yield Load×90%	Yield Load×110%

Table 4 최대소성역 크기 및 각도(프리응력)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	r _{p(max)}	θ _{max}	r _{p(max)}	θ _{max}
SGCD3	1.6 mm	60, 70°	1.7	62, 64°
SS41	1.6 mm	60°	1.7	62°
S45C	1.5 mm	50, 60°	1.6	62, 64°
SK5	1.6 mm	70°	1.7	62°

Table 5 최대소성역 크기 및 각도(프리변형)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	r _{p(max)}	θ _{max}	r _{p(max)}	θ _{max}
SGCD3	1.6 mm	70°	1.6	70°
SS41	1.4 mm	50, 60, 70°	1.5	66°
S45C	1.4 mm	50, 60°	1.4	60°
SK5	1.4 mm	50, 60, 70°	1.6	66, 68°

Table 6 최대소성역 크기 및 각도(프리응력 1회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	r _{p(max)}	θ _{max}	r _{p(max)}	θ _{max}
SGCD3	1.5 mm	70°	1.7	64°
SS41	1.6 mm	60°	1.7	62°
S45C	1.5 mm	50, 60°	1.6	64°
SK5	1.6 mm	60°	1.6	60°

Table 7 최대소성역 크기 및 각도(프리응력 5회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}
SGCD3	1.6 mm	50, 60°	1.7	62°
SS41	1.5 mm	50, 60°	1.6	64°
S45C	1.5 mm	60°	1.6	62°
SK5	1.5 mm	50°	1.5	58°

Table 8 최대소성역 크기 및 각도(프리응력 10회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}
SGCD3	1.5 mm	50, 60°	1.6	62°
SS41	1.5 mm	60°	1.5	60°
S45C	1.4 mm	60°	1.5	62°
SK5	1.6 mm	60, 70°	1.7	62°

Table 9 최대소성역 크기 및 각도(프리응력 30회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}
SGCD3	1.5 mm	60, 70°	1.5	62°
SS41	1.4 mm	60°	1.5	66°
S45C	1.5 mm	60°	1.5	60°
SK5	1.4 mm	60°	1.6	62°

Table 10 최대소성역 크기 및 각도(프리변형 1회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}
SGCD3	1.6 mm	70°	1.6	70°
SS41	1.4 mm	60°	1.5	66°
S45C	1.4 mm	60°	1.4	60°
SK5	1.4 mm	60°	1.5	66°

Table 11 최대소성역 크기 및 각도(프리변형 5회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}
SGCD3	1.4 mm	60, 70°	1.5	68°
SS41	1.4 mm	60°	1.5	66°
S45C	1.3 mm	60°	1.4	66°
SK5	1.5 mm	60°	1.5	62°

Table 12 최대소성역 크기 및 각도(프리변형 10회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}
SGCD3	1.4 mm	60, 70°	1.5	66°
SS41	1.4 mm	50, 60, 70°	1.5	68°
S45C	1.4 mm	50, 60°	1.4	60°
SK5	1.5 mm	60°	1.6	66°

Table 13 최대소성역 크기 및 각도(프리변형 30회)

Materials	0~100° (Step : 10°)		60~70° (Step : 2°)	
	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}	$\Gamma_{p(max)}$	θ_{max}
SGCD3	1.4 mm	50, 60°	1.5	68°
SS41	1.4 mm	60°	1.5	66°
S45C	1.4 mm	60°	1.4	60°
SK5	1.5 mm	60°	1.6	68°

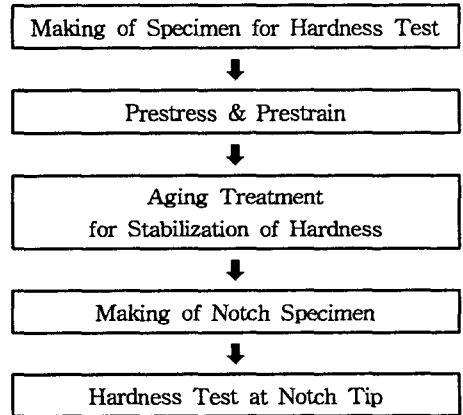


Fig. 1 소성역 해석 과정

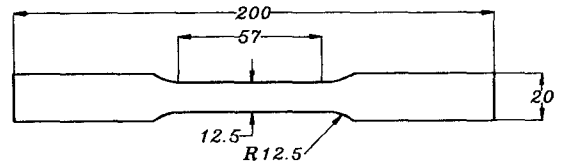


Fig. 2 경도시험용 표준시편(t = 2mm)

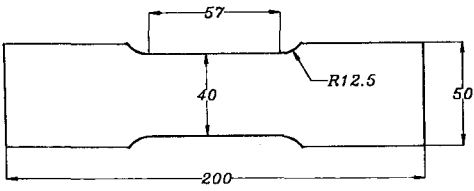


Fig. 3 노치가동전의 시편(t = 2mm)

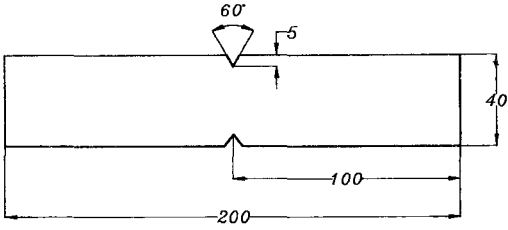


Fig. 4 노치가공후의 노치시편(t = 2mm)

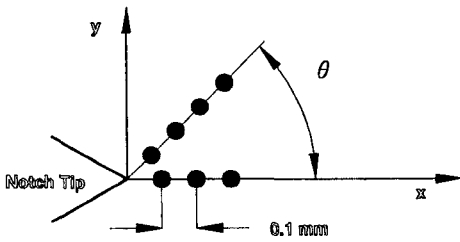


Fig. 5 노치선단에서의 경도시험

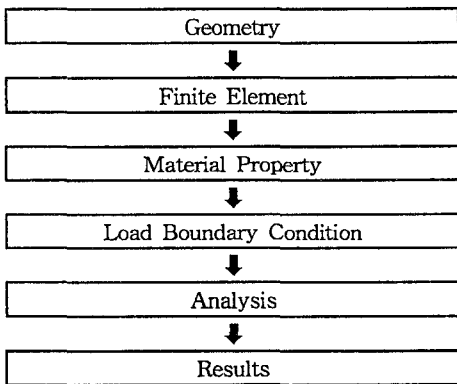


Fig. 6 유한요소해석 과정

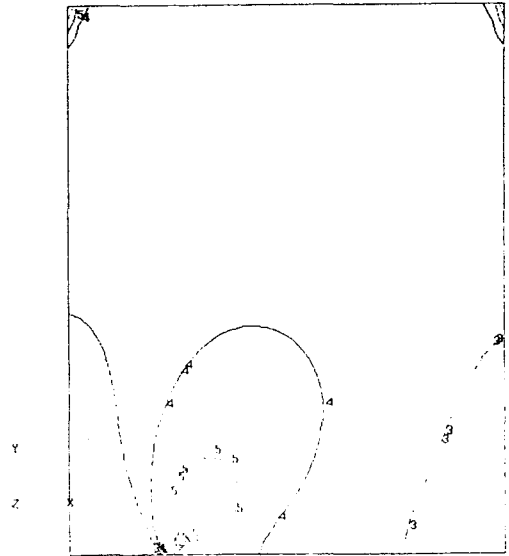


Fig. 7 SGCD의 응력분포(프리응력, Contour)

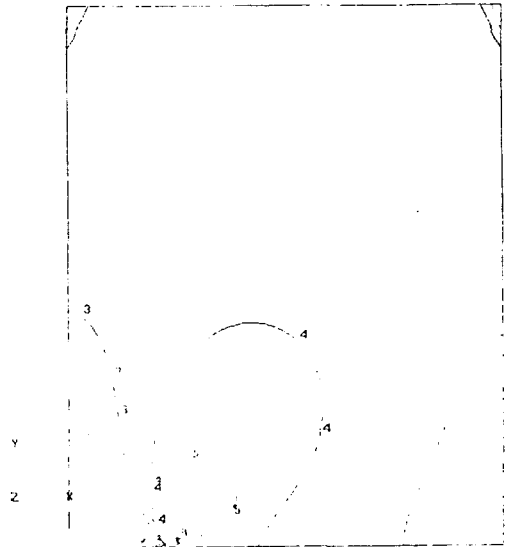


Fig. 8 SGCD의 응력변형(프리응력, Contour)