

단조강의 수명평가를 위한 유한요소해석방법에 관한 연구

허 선 철¹⁾ · 박 영 철²⁾ · 이 동 화³⁾

경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소¹⁾ · 동아대학교 기계산업시스템공학부²⁾ · 동아대학교 기계공학과 대학원³⁾

A Study on FEM Analysis Method for Life Evaluation of Forging Steel

Sunchul Huh¹⁾ · Youngchul Park²⁾ · Donghwa Lee³⁾

¹⁾Institute of Marine Industry, School of mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University,
Gyeongnam 650-160, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

³⁾Graduate School of Dong-A University, Busan 604-714, Korea

(Received 31 December 2003 / Accepted 26 March 2004)

Abstract : In plastic working, as working becomes speedy, automatic and working condition deteriorates, the increase of forging working has been remarkable. Therefore, we need the estimation of mold life in detail, in order to counterplan of effective mold life extension. In this study, on the SKH51, mold steel which is forged by cold working and the KCW1, tool steel of low alloy, we estimated mold life on the base of FEM analysis and investigated mold life by low cycle fatigue test. Also, this paper suggested a new method of estimation of mold life.

Key words : Low cycle fatigue test(저사이클피로시험), Strain controlled condition(변형률 제어조건), Axial strain control(축방향변형률제어), Hysteresis loop(히스테리시스 루프), Forging mold(단조금형)

1. 서 론

단조금형의 수명은 종래에는 마모가 지배적이었으나, 제품의 형상이 복잡해지고 작업속도가 향상됨에 따라 기계적·열적 부하가 가혹해짐으로 금형면의 균열이 금형수명을 지배하는 경향이 증가하고 있다. 따라서 효과적인 수명연장 대책을 위해서는 금형수명을 정도있게 예측하는 방법을 구축하고, 수명연장 대책의 효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 냉간단조품의 공정설계 및 금형형상 설계 등에 관한 연구들이 국내외에 부분적으로 연구되고 있으며¹⁻³⁾ 특히, 최근에는 컴퓨터 성능과 수치해석 기법의 발전으로 컴퓨터를 이용한 성형공정 설계

및 금형설계가 많이 적용되고 있다.⁴⁻⁵⁾ 한편, 응력집중부인 노치저부의 피로거동은 변형률 제어조건 하에서 저사이클 피로시험을 행하여 얻은 결과로서 비교가 가능하다. 즉, 피로하중이 작용하는 노치저부의 응력-변형률 이력을 재현하여 저사이클 피로실험을 행하고, 여기서 얻은 결과를 누적손상이론에 적용함으로서 노치저부에서의 미소균열 발생에 근거한 수명을 예측할 수가 있다. 이러한 피로수명 평가 및 예측에 관한 실험방법으로 국부변형율 방법을 이용한 저사이클 피로수명 예측방법이 많이 연구되고 있다.⁶⁻⁹⁾ 이와같이 금형강에 대한 수명평가에 대한 연구로서 해석적 방법¹⁰⁾과 실험적 방법¹¹⁾이 많이 연구되고 있으나 모두 부분적인 연구에 국한되어 있고, 이론해석과 실험해석을 병행한 수명 평가에 대한 연구는 국내외적으로 거의 없는 실정

* To whom correspondence should be addressed.
schuh@nongae.gsnu.ac.kr

이다. 현재, 사용중인 자동차 등속 조인트 외륜의 냉간단조금형은 사용중에 단조금형의 인서트 부분의 응력집중부에 균열이 발생하여 사용상에 많은 문제가 발생하고 있으므로 이에 대한 수명평가가 이루어진다면 재질의 개선과 설계변경을 통한 단조금형의 수명을 크게 개선할 수 있으며, 또한 사용중인 금형수명을 정량적으로 평가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 냉간단조금형으로 사용중인 SKH51과 고온단조강으로 사용되는 저합금 공구강인 YXR3, 그리고 냉온간 겸용 저합금 고속도 공구강인 KCW1 재료에 대하여 단조금형의 유한요소 해석을 기초로 저사이클 피로실험을 통한 단조금형의 수명평가법을 제시하고, 현재 사용중인 금형의 정량적인 수명을 예측하고자 한다.

2. 실험 및 해석방법

2.1 해석방법

금형의 수명평가를 위한 flow chart를 Fig. 1에 나타내고 있다. 수명평가는 이론적 해석을 통한 응력집중부의 $\Delta\epsilon$ 을 계산하고 계산되어진 $\Delta\epsilon$ 을 기준으로해서 LCF 시험을 통한 $\Delta\epsilon \rightarrow N_f$ graph를 통하여 균열의 발생수명을 정량적으로 평가한다. 단조금형의 모델링은 3차원 구조물의 모델링이 용이한 Pro-E를 이용하여 금형의 모델링을 수행하고 모델링된 금형의 소성해석을 위하여 강소성 해석 프로그램인 DEFORM을 사용하여 성형해석을 수행하였다. 그리고, DEFORM에서의 해석결과를 기초로하여 실제 사용상의 조건과 일치된 금형의 변형 및 응력해석을 위하여 ANSYS를 사용하여 구조해석을 하였다.

2.2 실험방법

시험편의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다. 고온실험에서 시험편은 분할형 전기로를 이용하여 가열하였 다. 전체 고온실험은 실험을 시작하기 전에 전기로 안의 분위기 온도를 안정시키기 위해 550°C에서 1시간(soaking time) 이상 유지시켰고, 실험중에 온도는 자동 온도 조절 장치를 이용하여 550°C의 실현온도를 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내로 유지시켰다. 사용된 gage length는 25%이고, gage length 범위이내에서 전변형률 범위

$\Delta\epsilon$ 를 3단계로 구분하여 실험하였으며 고온변위계를 이용하여 축방향 변형률 제어(axial strain control)로 실험하였다.

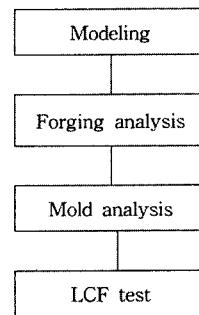


Fig. 1 Flow chart of fatigue life estimation

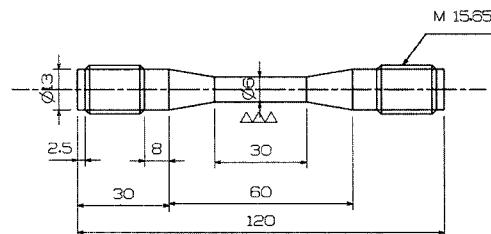


Fig. 2 Shape and dimensions of LCF specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장실험결과

각 소재의 상온 및 550°C의 고온인장시험결과는 Table 1과 같다. KCW1의 경우 상온에서의 인장강도는 2570 MPa이고, 550°C에서의 인장강도는 1979 MPa이다. 또한, 상온에서의 SKH51의 인장강도는 2002MPa이며, 550°C에서의 YXR3의 인장강도는 1928MPa이다. 냉온간 겸용인 KCW1의 경우 현재 사용중인 YXR3에 비해 상온 고온 모두 우수한 기계적 특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 1 Results of tensile test

Materials		Spe.	Condition	σ_{UTS} (MPa)	Elong. (%)
KCW1	cold	KCW1	RT	2570	4.6
	hot	KCW1	550°C	1979	6.8
SKH51	SKH51	RT	2002	0.98	
YXR3	YXR3	550°C	1928	6.9	

3.2 냉간단조 해석 결과

3.2.1 DEFORM 해석 결과

성형해석은 단조전용 해석 프로그램인 DEFORM을 사용하여 해석을 수행하였다. 성형해석은 성형소재의 초기 모델에 편치가 닫는 순간부터 편치가 완전히 내려왔을 때까지의 과정을 해석하였고, 단조해석에 사용된 요소는 4면체요소이고 금형은 강체로 인식하여 강소성 해석을 실시하였으며 성형소재는 1046M이다.

Fig. 3은 단조공정 해석을 위한 공정모델을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와같이 금형틀의 보강 링안에 단조금형을 삽입하고 편치로 압력을 가해 단조품을 성형하는 공정을 나타내고 있다. 해석은 모델이 원통형인기 때문에 대칭성으로 인하여 전체 모델의 1/6 모델에 대하여 해석을 하였다.

Table 2는 step number에 대한 stroke를 나타내었다. 표에서 나타난 것과 같이 스트로크는 0부터 23.785까지 나타나 있으며, step number는 스트로크에 대해서 순차적으로 1부터 101까지 나타내었다.

Fig. 4에서 Fig. 6은 deform 프로그램을 사용하여 성형품을 해석한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 4의 왼쪽은 단조성형품의 전체응력분포를 나타내고, 오른쪽 상부는 단조성형품의 단면 strain을 나타내고 있으며, 오른쪽 아랫부분은 load-stroke 선도를 나타내고 있다. Fig. 5는 단조성형품의 전체 strain분포, 단면응력분포, load-stroke선도를 나타내고 있으며, Fig. 6은 성형속도분포를 나타내고 있다.

응력해석 결과에서는 최종상태로 후방압출된 부분의 전반적인 응력 상태가 높게 나타나며, 변형률분포는 길이방향으로 일정하게 나타남을 알 수가

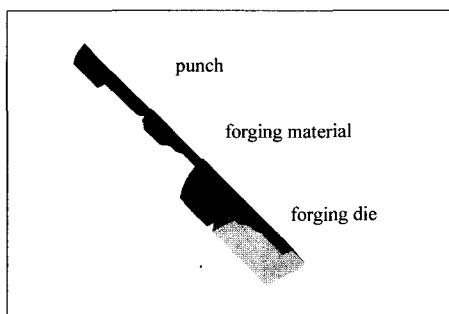


Fig. 3 Model of forging process

있다. 또한, 속도분포는 각 스텝마다 비슷한 경향을 나타내고 있다. DEFORM에서 해석을 수행한 후 금형에서의 절점력을 각 단계 별로 추출하여 ANSYS로 넘겨 해석을 한다.

Table 2 Stroke displacement by step number

No.	Stroke	No.	Stroke
1	0.23572E+00	41	0.96645E+01
2	0.47144E+00	42	0.99002E+01
3	0.70716E+00	43	0.10136E+02
4	0.94288E+00	44	0.10372E+02

77	0.18128E+02	98	0.23078E+02
78	0.18364E+02	99	0.23314E+02
79	0.18599E+02	100	0.23550E+02
80	0.18835E+02	101	0.23785E+02

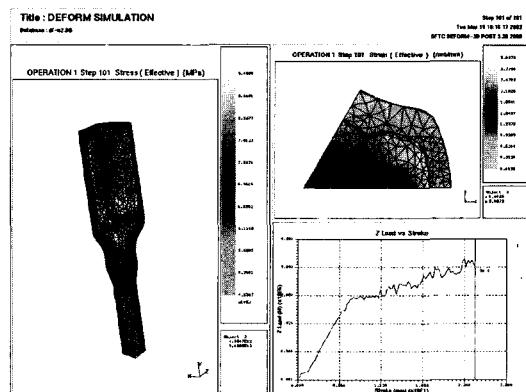


Fig. 4 Results of deform analysis at step101 (Strain)

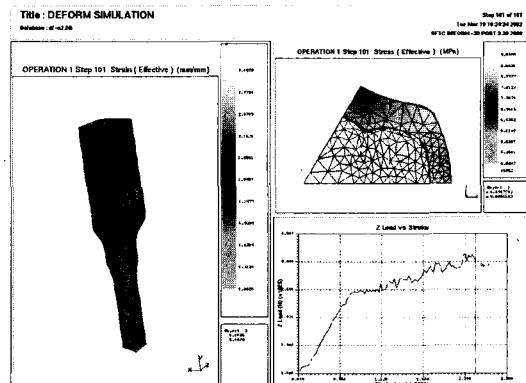


Fig. 5 Results of deform analysis at step101 (Stress)

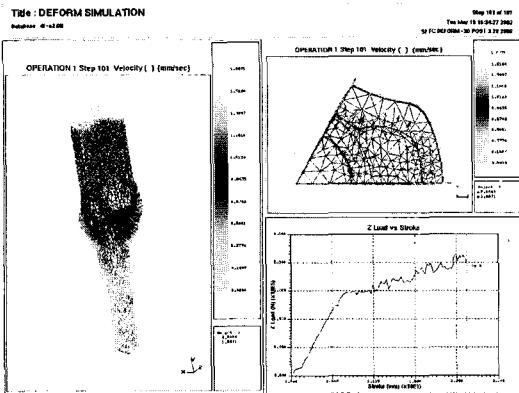


Fig. 6 Results of deform analysis at step101 (velocity)

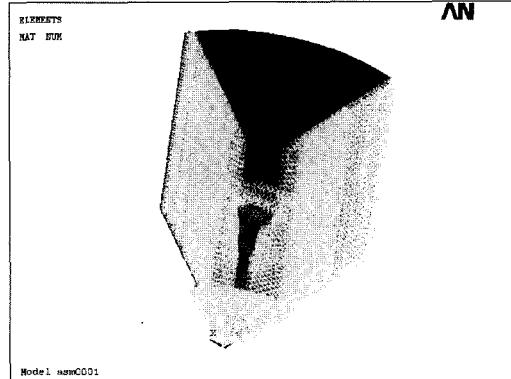


Fig. 7 FEM model of FEM analysis

3.2.2 ANSYS 해석결과

Fig. 7은 유한요소 모델을 나타내고 있다. 모델이 1/6 대칭 형상이기 때문에 1/6 모델의 경계부분에 대칭경계조건을 주었고 인서트의 아랫부분은 Y방향으로 구속을 주어 해석을 수행하였다. 초기단계에서는 보강링에 의한 열압입에 의해 발생하는 응력 분포를 구하기 위해 비선형 접촉해석을 수행하였고, DEFORM에서 구한 절점력을 각 단계별로 적용하여 해석을 하였다. 금형수명에 가장 영향을 주는 것은 금형을 윗쪽에서 보았을 때 원주방향으로 발생하는 변형률이 수명에 가장 큰 영향을 주므로 모든 결과는 원주 방향 즉, 접선방향의 변형률을 평가하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 SKH51 소재에 대한 해석 결과로서 마지막 단계인 step101에서의 결과를 나타내고 있다. 이 단계에서 보면 하부 인서트 금형의 변형률 분포가 아랫쪽으로 상당히 퍼졌음을 알 수 있다.

KCW1의 단조해석은 DEFORM에서 구한 절점력을 이용하여, 단조금형소재의 물성값을 SKH51의 물성값 대신에 KCW1의 물성값을 대입하여 해석을 수행하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 step101에서 KCW1의 결과를 나타내고 있으며, 여기서는 인서트 금형의 하부쪽에 아랫쪽으로 넓게 변형률 분포가 생기고 상부 다이의 변형률은 많이 회복되는 경향이 나타내며 금형의 인장력이 증가되는 경향을 나타낸다.

위의 결과로서 최대변형률 범위를 구하였다. 냉간단조의 스트로크선도에서 편치가 제일 아랫부분

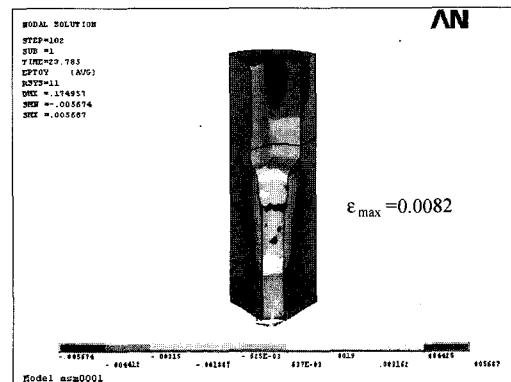


Fig. 8 Result of FEM analysis at step101 in SKH51(strain)

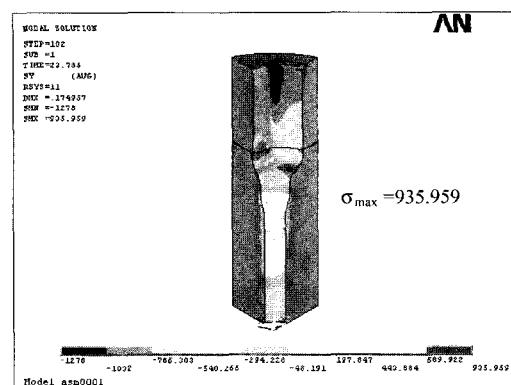


Fig. 9 Result of FEM analysis at step101 in SKH51(stress)

부터 직선거리까지의 거리를 해석상에서의 수직이동거리와 동일하게 하여 속도를 결정하고, 이 속도를 이용하여 시간을 구하고, 구해진 시간을 가지고 고 변형률을 나누어 변형률 속도를 결정하였다.

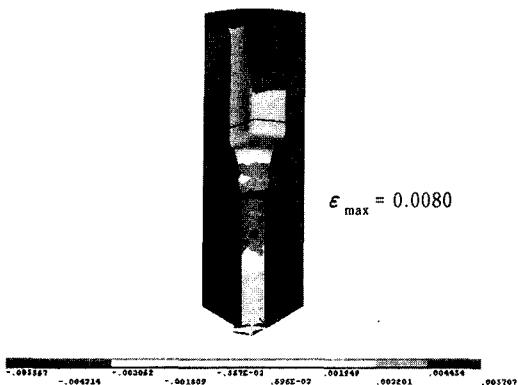


Fig. 10 Result of FEM analysis at step101 in KCW1(strain)

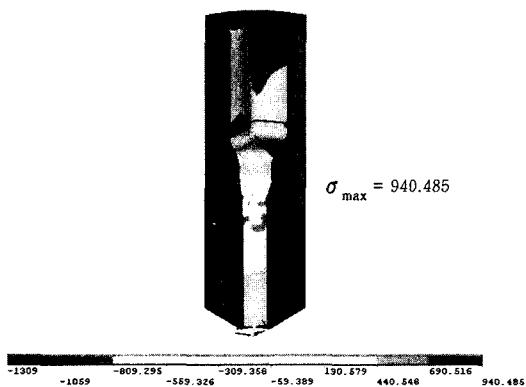


Fig. 11 Result of FEM analysis at step101 in KCW1(stress)

변형률은 인서트 윗부분의 요소를 선택하여 변형률을 범위를 구하였으며, 구해진 결과 변형률 범위는 Table 3에 나타내었다. SKH51의 변형률 범위는 0.0082(mm/mm)이고, KCW1의 변형률 범위는 0.0080(mm/mm)이다. 그리고 변형률은 시간에 따라 삼각파형의 모형을 형성하므로 한번 왕복으로 걸리는 시간은 1.25 sec이다. 따라서, SKH51의 변형률 속도는 5.6×10^{-3} (1/sec)이 된다. 그리고 KCW1의 변형률 속도는 6.4×10^{-3} (1/sec)로서 SKH51과 거의 유사한 값을 나타내었다.

Table 3 Strain range and strain velocity in cold forging

	Strain range	Strain velocity
SKH51	0.0082	6.56×10^{-3}
KCW1	0.0080	6.4×10^{-3}

3.3 온간단조 해석결과

3.3.1 온간단조시 DEFORM 해석결과

DEFORM을 이용한 성형해석은 냉간단조 해석과 동일하고 온도분포 및 물성치만을 달리하여 해석하였다며 성형소재는 S53C이다.

Table 4는 step number에 대한 stroke를 나타내었다. 표에서 나타난것과 같이 스트로크는 0부터 32.803까지 나타나있으며, step number는 스트로크에 대해서 순차적으로 1부터 101까지 나타내었다.

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14는 step101에서의 응력, 변형률, 소재의 속도를 나타내고 있다. 이 step은 성형해석 최종단계를 나타내고 있다. 편치와 접촉해 있는 부분에서 높은 응력상태를 나타내며 소재의 윗쪽 끝단을 보면 높이가 비슷하게 잘 성형된 것을 알 수 있다. 변형률 분포는 길이방향으로 비슷하게 나타나며, 편치의 굴곡부에 접촉한 부분에서 높은 변형률 분포를 나타내고 있다. 그리고, 소재하부에서

Table 4 Stroke displacement by step number

No.	Stroke	No.	Stroke
1	3.25650E-01	41	1.33500E+01
2	6.51300E-01	42	1.36750E+01
3	9.76950E-01	43	1.40010E+01
4	1.30260E+00	44	1.43270E+01

77	2.49870E+01	98	3.18260E+01
78	2.53130E+01	99	3.21510E+01
79	2.56380E+01	100	3.24770E+01
80	2.59640E+01	101	3.28030E+01

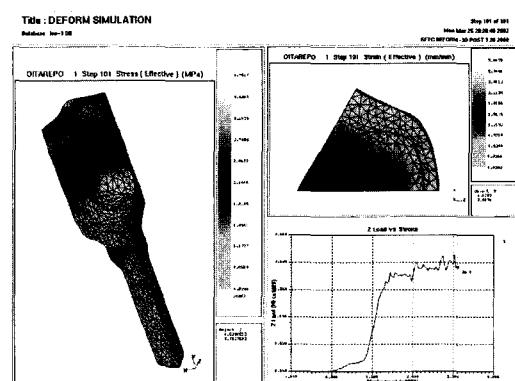


Fig. 12 Results of deform analysis at step101 (Strain)

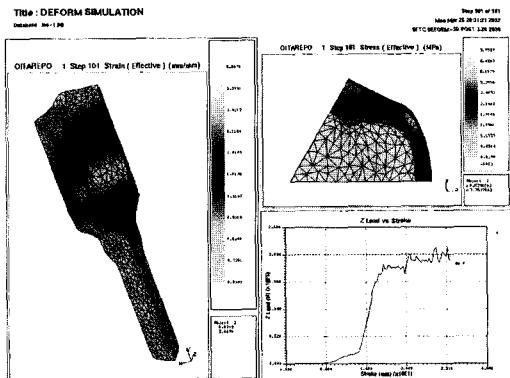


Fig. 13 Results of deform analysis at step101 (Stress)



$$\varepsilon_{\max} = 0.011$$

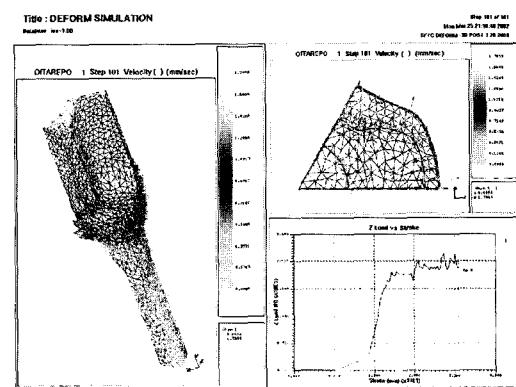


Fig. 14 Results of deform analysis at step101 (velocity)

는 아주 낮은 속도이므로 이동이 없고, 소재의 윗 부분에서는 확연히 후방으로 소재가 이동하는 것을 알 수 있다.

온간금형의 해석을 위해서 550°C 에서 실시한 기초 물성 평가의 자료를 이용하였으며 그 외 조건은 냉간단조 해석과 동일한 조건에서 수행하였다.

Fig. 15, Fig. 16은 YXR3에 대한 해석 결과를 나타내고, Fig. 17, Fig. 18은 KCW1소재의 온간금형 해석 결과를 나타내고 있다.

변형률은 인서트 다이의 윗부분의 요소를 선택하여 변형률 범위를 구하였으며, 변형률 범위는 Table5에 나타내었다. YXR3의 변형률 범위는 $0.011(\text{mm/mm})$ 이고, KCW1의 변형률 범위는 $0.010(\text{mm/mm})$ 이다.

변형률은 시간에 따라 삼각파형의 모양을 형성하므로 한번 왕복으로 걸리는 시간은 0.5 sec이다. 따

Fig. 15 Result of FEM analysis at step101 in YXR3(strain)



$$\sigma_{\max} = 492.888$$



Fig. 16 Result of FEM analysis at step101 in YXR3(stress)



$$\varepsilon_{\max} = 0.0010$$



Fig. 17 Result of FEM analysis at step101 in KCW1(strain)

라서 YXR3의 변형률 속도는 $2.2 \times 10^{-2}(1/\text{sec})$ 이고, KCW1의 변형률 속도는 $2.0 \times 10^{-2}(1/\text{sec})$ 가 된다.

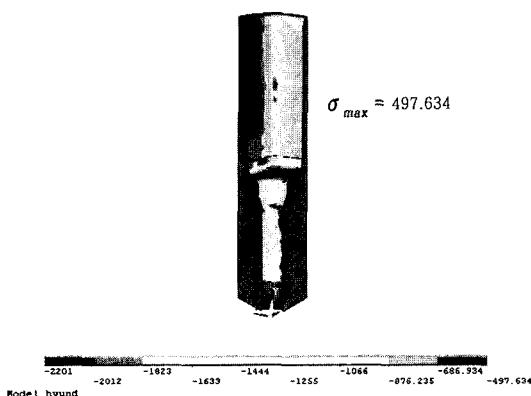


Fig. 18 Result of FEM analysis at step101 in KCW1(stress)

Table 5 Strain range and strain velocity in warm forging

Specimen	Strain range	Strain velocity
YXR3	0.011	2.2×10^{-2}
KCW1	0.010	2.0×10^{-2}

3.4 LCF 실험결과

피로파형은 단조성형 중 전후방 압출공정을 고려해서 삼각파형을 이용하였으며, 상온과 고온에서의 저사이클 피로시험에 적용된 변형률 속도는 Table 3과 Table 5와 같다.

상온의 변형률 속도는 SKH51의 경우 6.56×10^{-3} (1/sec), KCW1의 경우 6.4×10^{-3} (1/sec) 그리고 온간 단조의 경우는 변형률 속도가 YXR3의 경우 2.2×10^{-2} (1/sec), KCW1의 경우 2.0×10^{-2} (1/sec)으로 나왔으며, 주파수는 단조 압축 공정이 한번 시행되는데 0.5 sec가 소요되므로 2Hz로 해석을 행하였다.

피로수명으로 표시한 $N_f(3/4)$ 는 히스테리시스 루프(hysteresis loop)에서 인장응력이 안정상태 크기에서 25% 감소 했을 때에 해당하는 사이클로 정의하였다. 이렇게 완성된 $\Delta\varepsilon - N_f$ 에서 y축에 해당하는 $\Delta\varepsilon$ 값을 커브피팅하면 graph의 회귀직선식과 만나는 점에 해당하는 N_f cycle수가 단조성형된 소재의 균열이 생성되는 시점으로 한다.

Fig. 19는 KCW1과 SKH51의 사이클에 대한 전변형률범위를 함께 나타낸 그림이다. 실험결과 전체적인 경향을 살펴보면, 전변형률범위가 증가하면 수명은 감소함을 알 수 있다. 그리고 동일한 변형률 범위에서도 SKH51보다 KCW1이 피로수명이 커지

고 있음을 알 수 있다.

Fig. 20은 고온 550°C에서 YXR3와 KCW1의 사이클에 대한 전변형률 범위를 함께 나타낸 그림이다. 실험결과 전체적인 경향을 살펴보면, KCW1과 YXR3과의 수명은 비슷한 양상을 띠고 있음을 알 수 있다.

냉간단조의 경우 실제 현장에서 2000 cycle에서 금형에 균열이 생성되고, 온간단조의 균열생성 수명은 20000 cycle 정도가 된다. 해석결과의 변형률 범위를 적용해서 냉간단조 선도에서 사이클을 구하면, SKH51의 경우 2000 cycle 정도 나오는 것을 알 수 있다.

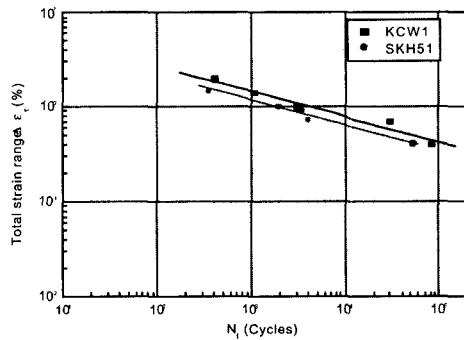


Fig. 19 Fatigue test results of SKH51 and KCW1 in R.T.

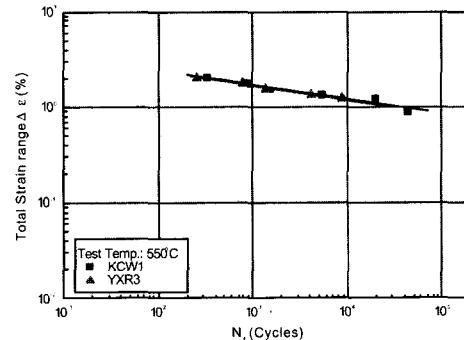


Fig. 20 Fatigue test results of YXR3 and KCW1 in 550°C

이는 현재 단조강의 제조과정중에 발생하는 균열의 생성시점과 잘 일치하고 있다. 그리고, 온간단조 장인 YXR3 경우는 20000 cycle 정도임을 알 수 있다. 따라서 차후에 이와 동일한 작업 조건일 경우 해석에 의해 응력 집중부의 $\Delta\varepsilon$ 값을 계산한다면 본 선도

를 이용해 단조성형품의 수명을 간단하게 추론할 수 있다.

4. 결 론

단조금형강으로 사용되는 SKH51과 저합금 공구강인 YXR3, 그리고 개발된 냉온간 겸용 저합금 고속도 공구강인 KCW1의 재료에 대해서 FEM 해석 결과 도출된 최대변형량을 기준으로 저사이클 피로시험을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 냉간단조 금형의 해석결과 $\Delta\varepsilon = 0.008$ 정도로 나타났으며 이를 기초로 해서 LCF 실험 결과 수명이 2000 cycle 이었고, 온간단조 금형의 해석결과는 $\Delta\varepsilon = 0.011$ 이 나타났으며, 이 값을 기준으로 LCF 실험결과 수명이 2×10^4 cycle이 나왔다. 이 결과는 실제 단조 성형시 균열이 생성되는 시점과 비교적 잘 일치한다.
- 2) 상온에서 LCF 실험결과 SKH51에 비해 개발된 KCW1의 경우가 수명이 향상되었으므로 개발된 소재의 피로강도가 우수하다.
- 3) 고온에서 LCF 실험결과 기준에 사용하던 YXR3에 비해 개발된 KCW1의 경우 수명이 거의 동일하다.
- 4) 금형설계시 FEM 해석에 의해 응력집중부의 변형률을 계산하여 $\Delta\varepsilon - N_f$ 비교함으로써 수명을 정량적으로 예측하였다.

후 기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) D. C. Ko., B. M. Kim, J. C. Choi, S. W. Oh, "Process Sequence Design in Cold Forged Part of Hub," Journal of KSME, Vol.20, No.11, pp.3387-3397, 1996.
- 2) D. J. Kim, T. H. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, "Die Shape Design for Cold Forged Products Using the Artificial Neural Network," Journal of KSME, Vol.21, No.5, pp.727-734, 1997.
- 3) J. S. Jae, J. H. Kang, S. S. Kang, "A Study on Working Limit of Cold Forging of Carbon Steel," Journal of KSME, Vol.21, No.7, pp.1081-1088, 1997.
- 4) K. Sevenler, P. S. Raghupati, T. Altan, "Fogming Sequence Design for Multistage Cold Forging," J. of Mech. Work. Tech., Vol.14, pp.121-135, 1987.
- 5) Y. C. Park, D. P. Yun, S. C. Huh, D. B. Jin, B. J. Lee, "The Study of Safety Evaluation of Improvement on Lower Arm(Ⅱ)," Transactions of KSAE, Vol.6, No.3, pp.18-25, 1998.
- 6) K. O. Sakada, T. Kado, Yang, G. B. Yang, "Application of AI-Technique to Process Planning of Cold Forging", Annals of the CIRP, Vol.37, No.1, pp.239-242, 1988.
- 7) P. Bariani, W. Knight, "Computer Aided Cold-Forging Process Design: A Knowledge Based System Approach to Forming Sequence Generation," Annals of the CIRP, Vol.37, No.1, pp.243-246, 1988.
- 8) K. R. Vemuri, S. I. Oh, T. Altan, "BID:A Knowledge Based System to Automate Blocker Design," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.29, No.4, pp.505-518, 1989.
- 9) S. K. Koh, R. I. Stephens, "Fatigue Life Prediction of an Autofrettaged Thick-walled Pressure Vessel with an External Groove," Journal of Pressure Vessel Technology, American Society of Mechanical Engineers, Vol.113, No.3, pp.368-374, 1991.
- 10) S. K. Koh, R. I. Stephens, "Improved Fatigue Life of an Autofrettaged Thick-walled Pressure Vessel with an External Groove," Int. J. Pressure Vessel and Piping, Vol.58, No.2, pp.131-145, 1994.
- 11) S. H. Hong, D. W. Lee, S. B. Lee, S. S. Cho, W. S. Joo, "A Study on Failure Analysis of Turbine Blade Using Surface Roughness and FEM," Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.170-177, 2001.