

유한요소해석을 이용한 리테이너 전단 금형 수명예측

이인규^{1,2} · 이성윤¹ · 이상곤[#] · 정명식¹ · 서판기³ · 이경훈⁴ · 김병민⁴

Prediction of Shearing Die Life for Producing a Retainer using FE Analysis

I. K. Lee, S. Y. Lee, S. K. Lee, M. S. Jeong, P. K. Seo, K. H. Lee, B. M. Kim

(Received December 18, 2014 / Revised January 5, 2015 / Accepted January 15, 2015)

Abstract

In the current study, a method was proposed to quantitatively predict the wear and fatigue life of a shearing die in order to determine an effective replacement period for the die. The shearing die model of a retainer manufacturing process was used for the proposed method of quantitative life prediction. The retainer is produced through shearing steps, such as piercing and notching. The shearing die of the retainer is carefully controlled because the dimensional accuracy of the retainer is critical. The fatigue life for the shearing die was predicted using ANSYS considering S-N curves of STD11 and Gerber's equation. The wear life for the shearing die was predicted using DEFORM-3D considering the Archard's wear model. Experimental shearing of the retainer was conducted to verify the effectiveness of the proposed method for predicting die life. The fatigue failure of the shearing die was macroscopically measured. The wear depth was measured using a 3D coordinate measuring machine. The results showed that the wear and fatigue life in the FE analysis agree well with the experimental results.

Key Words : Retainer, Fatigue Life, High Cycle Fatigue, S-N Curve, Wear Life, Wear Coefficient, Shearing Die, FE Analysis

1. 서론

최근 자동차 업체는 시대적 요구를 충족시키기 위해 자동차 부품의 경량화, 성능 및 안전도 향상 등을 충족 시키는 방안에 대해 지속적으로 연구를 수행하고 있다. 특히, 고강도 강판을 사용한 자동차 부품 개발 연구는 지속적으로 증가하고 있는 추세이다[1,2]. 고강도 강판의 경우 높은 강도 및 낮은 성형성으로 인하여 많은 문제들이 발생하고 있다. 특히, 고강도 강판 소재의 전단공정은 금형에 상대적으로 높은 면압을 발생시키기 때문에 금형 수명

이 짧은 문제점을 가지고 있으며, 산업현장에서 효율적인 금형 교체시기 선정이 어려워 생산성, 품질, 경제성 확보에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 금형 수명의 정량적 예측이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 고강도강판 소재의 전단공정 금형의 효율적인 교체시기를 선정하기 위해 금형 결함의 주요 원인이 되는 마모(Wear) 및 피로(Fatigue)에 의한 수명을 정량적으로 예측하는 방법을 제시하고자 한다[3].

제시된 방법을 이용하여 자동차 변속기 부품인

1. 한국생산기술연구원 극한제조기술연구실용화그룹

2. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템 전공

3. ㈜신영 기술연구소

4. 부산대학교 기계공학부

Corresponding Author: Ultimate Manufacturing R&BD Group, KITECH, E-mail: sklee@kitech.re.kr

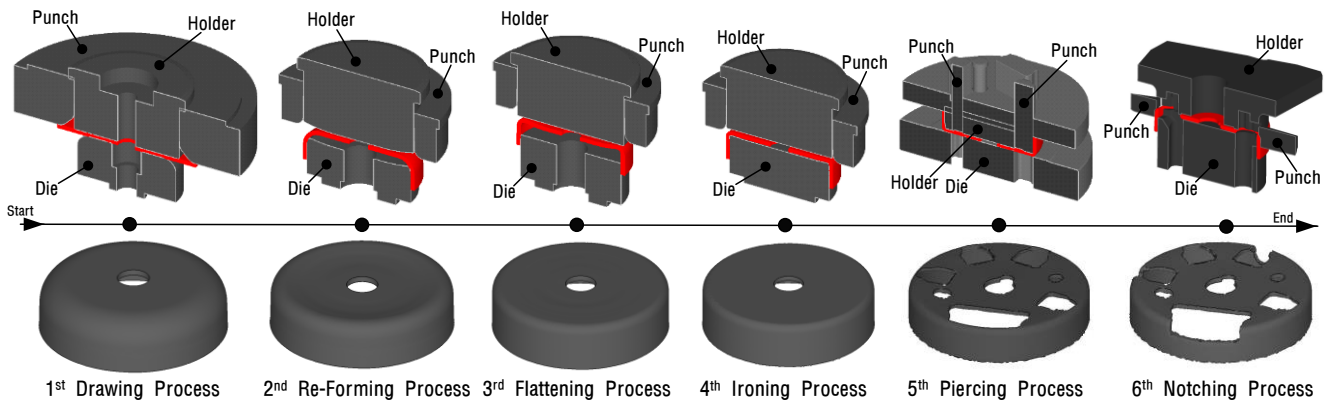


Fig. 1 FE Analysis model for retainer forming process

리테이너(Retainer) 제조공정의 노칭(Notching) 금형에 대한 수명을 평가하였다. 리테이너는 Fig. 1과 같이 고강도강판 SPFH590 소재를 사용하여 기초 형상을 성형하기 위한 드로잉(Drawing) 및 리-포밍(Re-forming) 공정, 성형 정밀도 향상을 위한 플래트닝(Flattening) 및 아이어닝(Ironing) 공정 그리고 전면부와 측면부의 전단가공(Shearing)을 위한 피어싱(Piercing) 및 노칭의 전단공정을 거쳐 제조되며 치수정도가 매우 중요하기 때문에 금형 관리가 엄격하게 요구되는 정밀부품이다.

마모 및 피로수명을 예측하기 위해 먼저 노칭 시 금형에 발생하는 면압을 강소성 유한요소해석을 통해 평가하였다. 이후 평가된 면압을 이용하여 마모 및 피로수명 해석을 수행하였다.

마모수명을 예측하기 위해서 Archard 마모모델을 적용하였으며[4], Pin-on-disk 시험을 통해 노칭 금형의 면압 조건에 따른 금형소재(STD11)의 마모계수(Wear coefficient)를 도출하였다. 피로 수명을 예측하기 위해서 Gerber 선도를 적용하였으며[5,9], 회전굽곡피로시험을 통해 금형강의 응력-수명 선도(S-N curve)를 도출하였다. 각 도출된 값들을 DEFORM 2D&3D 및 ANSYS V14.5에 적용하여 마모 및 피로수명을 정량적으로 평가하였다. 최종적으로 실험을 통해 본 연구에서 제안된 수명 해석기법의 타당성을 검증하였다.

2. 리테이너 성형공정 해석

2.1 SPFH590 임계데미지 평가

전단공정이 고려된 리테이너 성형공정 해석을 위해서는 리테이너 소재인 SPFH590 및 금형 소재인

Table 1 Mechanical properties of SPFH590 and STD11

Properties	TS (MPa)	YS (MPa)	E (GPa)	n	K (MPa)
SPFH590	727	483	205	0.13	924.3
STD11	1736	1532	207	-	-

Table 2 FE analysis conditions of shearing process

Conditions	Value
Clearance (mm)	0.55
Holding force (kN)	20
Punch velocity (mm/s)	127
Punch radius (mm)	0
Friction factor (m)	0.12
Critical value	1.00~1.10

STD11[6]의 기계적 물성과 소성변형 일이 임계에 도달하면 파괴가 발생하는 연성파괴조건인 상수인 임계데미지 값(Critical value)이 요구된다[7].

SPFH590의 인장시험은 두께 5.8mm의 KS 5호 시험편을 적용하여 수행하였다. 시험을 통해 평가된 소재의 인장강도(Tensile-strength, TS), 항복강도(Yield-strength, YS), 탄성계수(Young's modulus, E), 가공경화지수(Hardening exponent, n), 강도계수(Material coefficient, K)는 Table 1과 같다.

전단공정 동안 발생하는 파괴를 예측하기 위해 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 일반화된 Cockcroft & Latham 연성파괴기준의 요소제거기법을 적용하였다. 일반적으로 임계데미지 값은 소재가 가

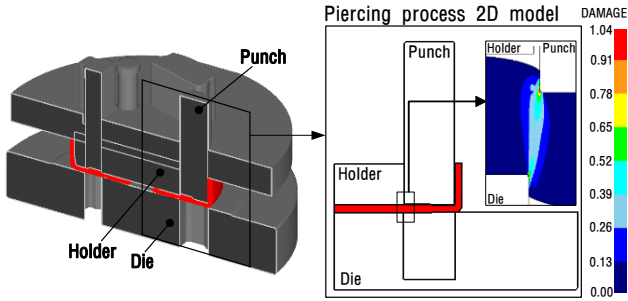
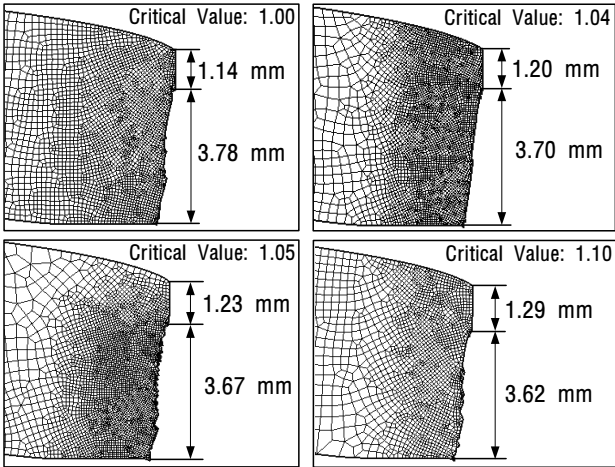
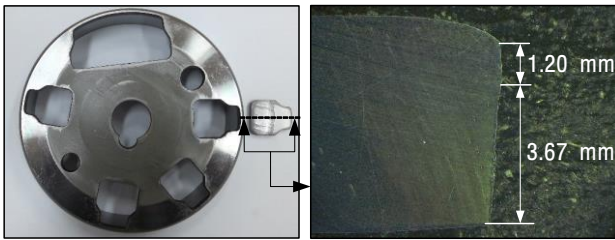


Fig. 2 FE Analysis model for Predicting critical value



(a) FEA



(b) Experiment

Fig. 3 Comparing of the shear zone in the FE Analysis and experiment

지는 상수로써 공정에 따라 변하지 않으며, 인장 또는 압축시험을 통해 평가할 수 있다. 하지만 피어싱, 노칭 공정에서는 복합응력이 발생하기 때문에 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 전단 실험을 통한 소재의 전단면과 임계데미지 값을 변수로 수행한 전단 해석의 전단면을 비교하여 SPFH590의 임계데미지 값을 도출하였다[7].

전단 해석은 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 2D로 수행되었다. Fig. 2는 리테이너 성형 공정의 피어싱 공정 단면으로 전단 해석 모델을 나타낸 것이다. 성형 해석 조건은 Table 2와 같으며,

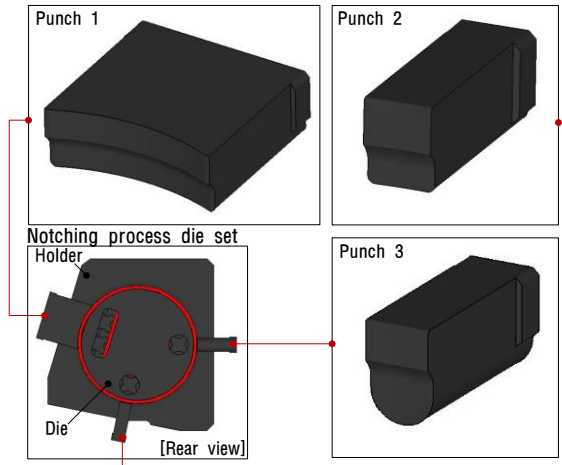


Fig. 4 Component of the notching process die set model for conducting FE analysis

전단실험 조건과 동일하게 설정하였다. Fig. 3에 실험과 해석에서 평가된 전단면을 나타내었다. 전단 실험에서의 전단면은 1.20mm, 파단면은 3.67mm로 평가되었으며, 전단 해석에서 임계데미지 값이 1.04일 때 전단면 1.20mm, 파단면 3.70mm로 가장 유사한 결과를 나타내었다.

2.2 성형공정 해석 및 결과

리테이너 공정 해석은 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM 3D로 수행하였다. 적용 소재의 두께는 5.8mm 후판이기 때문에 압연으로 인한 이방성 영향은 고려하지 않았으며, 등방성 소재로 가정하였다[8]. 리테이너 공정 해석은 Fig. 1과 같이 드로잉, 리-포밍, 플래트닝, 아이어닝 공정 이후 요소제거 기법이 적용된 피어싱, 노칭 공정 순서로 연속 수행하였다. 이는 Fig. 4에 나타낸 노칭 공정의 각 금형 면압을 평가 함에 있어서 각 공정에 따른 소재의 변형이력을 고려하기 위함이다. 해석에 적용된 조건은 Table 2와 동일하며, 임계데미지 값은 1.04로 설정하였다.

Fig. 5는 각 공정 해석에 따른 유효변형률 결과를 나타낸 것이다. 소재의 변형은 노칭 공정이 수행되는 부분에서 집중적으로 발생하는 결과를 보였으며 플래트닝 공정에서 변형량이 가장 크게 나타나는 결과를 보였다. 이는 노칭 공정 시 금형 면압 상승에 직접적인 영향을 미치게 되어 노칭 공정 금형의 수명 저하를 초래하게 된다.

Fig. 6은 노칭 공정 해석에 따른 금형의 면압 분포를

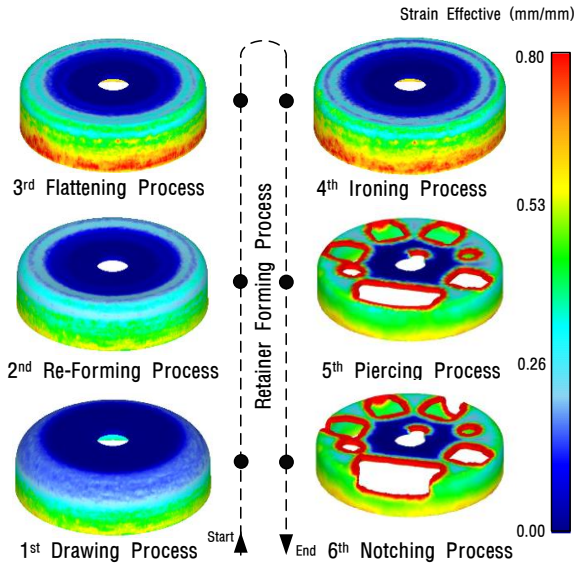


Fig. 5 Distribution of effective strain at each process

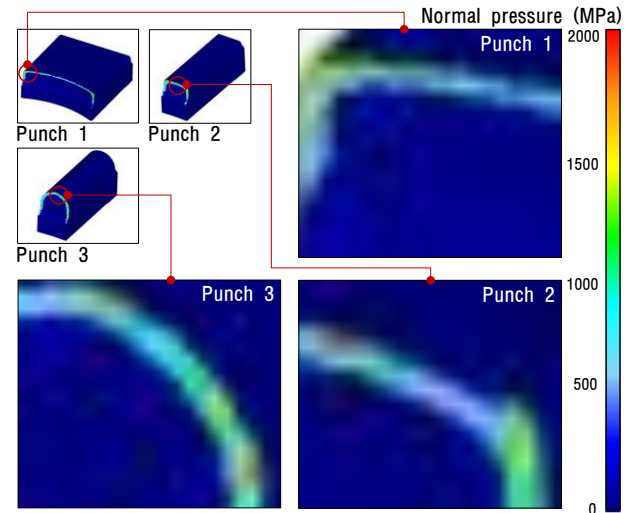


Fig. 6 Distribution of normal pressure at notching process die in the FE analysis

Table 3 Conditions of rotary bending fatigue test

Conditions	Value
Material	STD11
Stress ratio	-1
RPM	3000
Stress amplitude (MPa)	500 ~ 1000
Surface roughness (μm)	0.025

나타낸 것이다. 금형의 모서리부에서 면압이 집중적으로 높게 나타나는 결과를 보였다. 각 노칭 공정 금형의 최대 면압은 금형1(Punch 1)에서 1604MPa, 금형2(Punch 2)에서 1920MPa, 금형3(Punch 3)에서 1750MPa로 평가 되었으며, 상대적으로 금형2의 면압이 높게 나타났다.

3. 피로수명 예측

3.1 피로특성 평가

피로수명 평가에는 고 사이클 피로(High-cycle fatigue)와 저 사이클 피로(Low-Cycle fatigue) 방법이 있다. 고 사이클 피로는 작용응력이 재료의 항복응력보다 낮은 수준에서 수행되며 수명이 긴 경우에 적용된다. 반면 저 사이클 피로는 항복효과를 고려하여 수행되며 수명이 짧은 경우에 적용된다. 일반적인 금형에 작용하는 응력은 항복응력보다 낮기 때문에 본 논문에서는 고 사이클 피로시험을 적용



Fig. 7 Rotating bending fatigue machine testing machine for estimating S-N curve of STD11

하였다[9]. Fig. 7 에 고 사이클피로시험을 위한 회전 굴곡피로시험기 및 시험편을 나타내었으며, KS B ISO1143 규격으로 시험을 수행하였다. 피로시험 조건은 Table 3 에 나타내었다. 피로시험의 하중 범위는 피로시험편 STD11 의 항복강도 2/3 지점을 시작으로 피로한도(Fatigue limit, 10^7 회전)에 도달할 때까지 하중을 감소시켜 적용하였다. Fig. 8 에 고 사이클 피로 시험을 통해 도출된 응력-수명 선도(S-N curve)를 나타내었으며, 500MPa 응력 수준에서 피로한도를 보였다. 이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$S = 2622N^{-0.102} \quad (10^3 \leq N \leq 10^7) \quad (1)$$

여기서 S는 부하응력, N은 회전수를 의미한다.

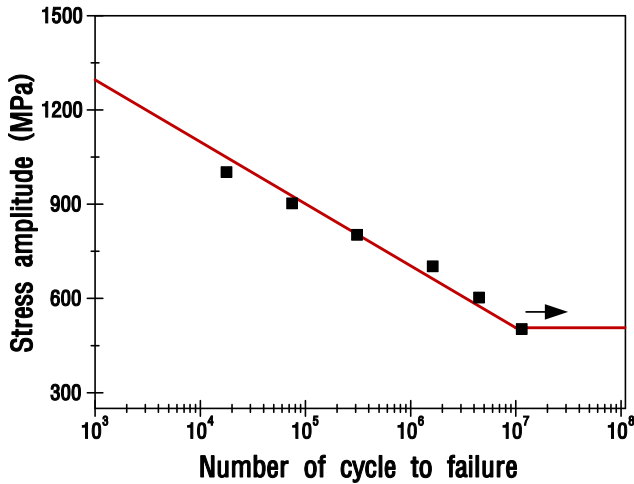


Fig. 8 S-N curve of STD11 for conducting fatigue analysis

Table 4 Conditions of fatigue analysis

Conditions	Value
S-N curve	$S = 2622N^{0.102} (10^3 \leq N \leq 10^7)$
Mean stress	Gerber
Stress component	Equivalent (Von mises)
Amplitude load	Zero-based

3.2 피로수명 해석 및 결과

응력-수명 선도는 단축하중 상태의 시험결과이다. 따라서, 조합하중 상태에 적용하기 위해 Von mises 상당응력(Equivalent stress) 및 상당평균응력(Equivalent mean stress)을 적용하였다[5].

피로수명 해석에 앞서 노칭 공정 금형에 발생하는 상당응력을 평가하기 위해 ANSYS V14.5를 활용하여 정적강도해석을 수행하였다. 이때 리테이너 공정 해석에서 도출된 금형의 면압을 보간하여 적용하였다. 일반적으로 회전굴곡피로 시험 시 교번하중에 대한 평균응력은 0 이된다. 하지만 실제 금형에 작용하는 응력에는 평균응력이 존재하기 때문에 이를 고려한 피로수명 해석이 요구된다. 평균응력 효과를 고려하기 위해 일반적으로 널리 적용되고 있는 선도로는 Goodman 과 Geber 가 있다. Goodman 선도의 경우 보수적인 설계 시에 적합하며, Geber 선도의 경우 실질적인 수명예측에 적합하다[5,9]. 따라서, 본 연구에서는 정량적인 수명예측을 위해 Geber 의 선도를 적용하였다. 피로수명 해석 모델은 Fig. 5 와 같으며, 해석조건은 Table 4 에 나타내었다.

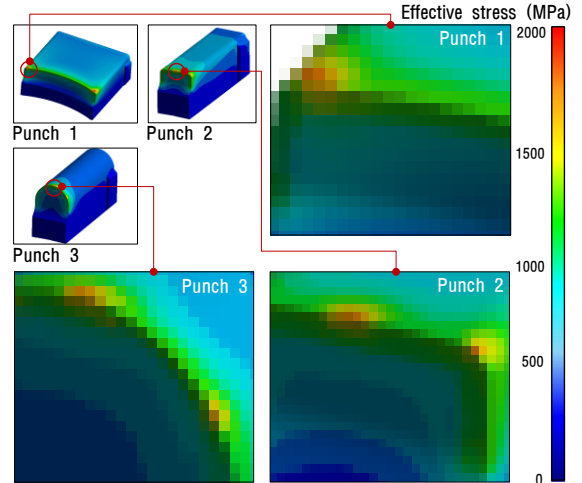


Fig. 9 Distribution of effective stress at notching process die

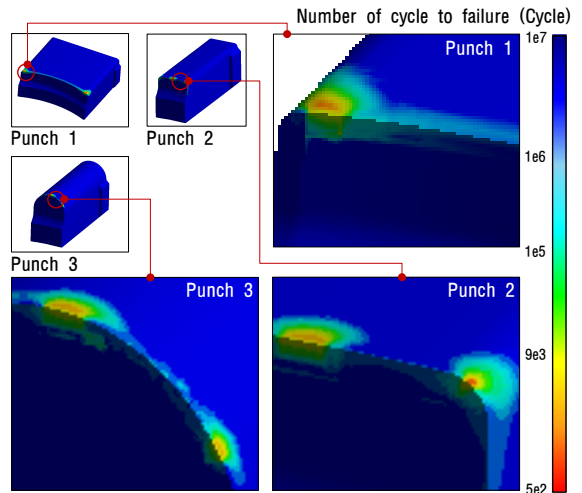


Fig.10 Distribution of fatigue life at notching process die

Fig. 9 는 정적강도해석에 따른 노칭 금형의 상당응력 분포를 나타낸 것이다. 상당응력은 대체적으로 모서리부에 집중되는 경향을 보였으며, 금형 1 에서 1842MPa, 금형 2 에서 1945MPa, 금형 3 에서 1781MPa 의 최대값을 보였다.

Geber 선도에 따른 피로수명 해석 결과는 Fig. 10 과 같이 금형1에서 1447타발, 금형2에서 563타발, 금형3에서 2503타발로 평가되었으며, 상대적으로 금형2의 피로수명이 짧은 결과를 보였다. 또한, 인장응력이 압축응력보다 높게 작용하는 부분은 그렇지 않은 곳보다 피로수명이 짧은 경향을 보였다. 즉, 인장응력의 감소 또는 압축응력의 증가를 통해 피로수명 향상을 기대할 수 있다.

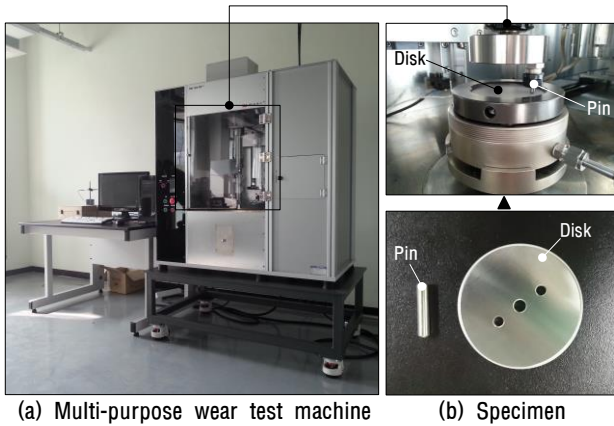


Fig.11 Wear testing machine for estimating wear coefficient

Table 5 Conditions of wear test

Conditions	Value	
Type	Pin on disk	
Material	Pin	STD11
	Disk	SPFH590
Vertical load (N)	320	
Sliding length (m)	500 ~ 7000	
RPM	53	
Lubrication	None	

4. 마모수명 예측

4.1 마모특성 평가

금속 간의 마모는 접촉면의 거칠기, 온도, 접촉상태, 경도, 수직하중, 미끄럼길이 그리고 윤활조건 등에 영향을 받으며 Archard 마모모델에 의해 수치적으로 용이하게 접근할 수 있다[4]. 따라서, 본 연구에서는 Archard 마모모델을 적용한 유한요소해석을 수행하여 노칭 금형의 마모수명을 평가하였다.

Archard 마모모델의 마모계수는 Pin-on-disk 마모시험을 수행하여 도출하였다. 마모시험장비 및 시험편은 Fig. 11에 나타내었으며, 시험조건은 Table 5와 같다. 이때 마모시험의 수직하중 조건은 Fig. 12와 같이 Pin과 Disk의 접촉 압력에 따른 수직하중을 탄소성 유한요소해석을 통해 도출하여 노칭 금형(Punch 2)의 최대 면압을 기준으로 선정하였다.

Fig. 13과 14에 Pin-on-disk 마모시험을 통해 도출된 마모체적 및 마모계수를 나타내었다. 약 700m 시점에서 마모체적 및 마모계수는 급격하게 증가하는

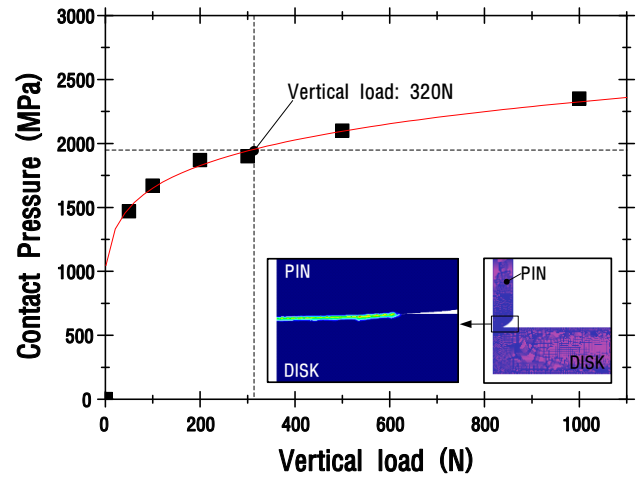


Fig.12 Normal pressure of the material according to different vertical load

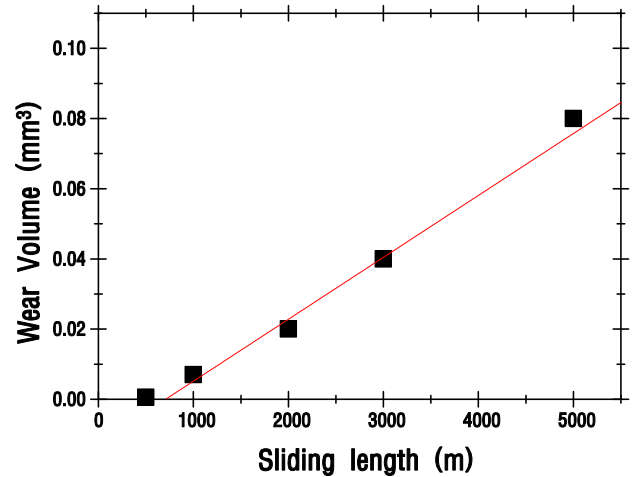


Fig.13 Wear volume of the pin(STD11) according to different sliding length

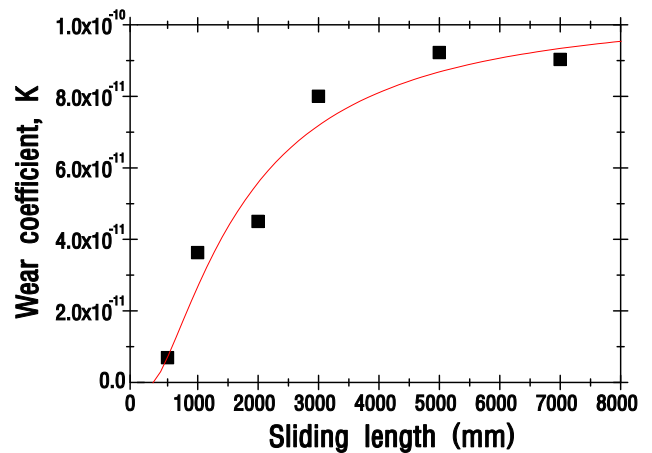


Fig.14 Wear coefficient between pin(SPFH590) and disk(STD11) for conducting wear analysis

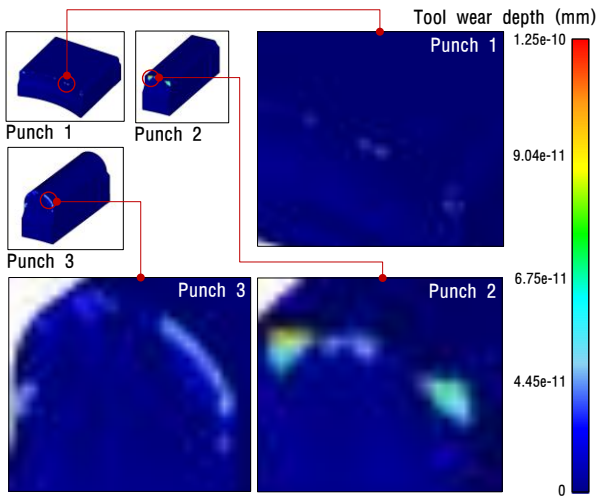


Fig.15 Distribution of the wear depth at notching process die in the FE analysis

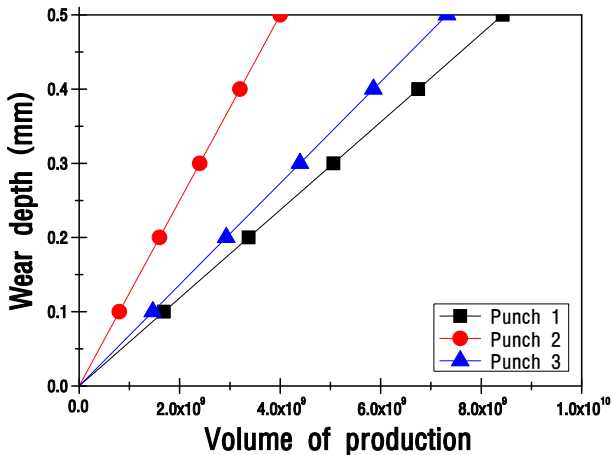


Fig.16 Wear life of notching process die according to the production

결과를 보였다. 마모체적은 마모깊이에 비례하여 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 유한요소해석의 1타발에 따른 마모깊이 결과를 기준으로 생산량에 따른 금형의 마모수명을 예측하는 것이 타당함을 의미한다. Archard 마모모델의 마모계수는 3000m 시점 이후 나타내는 9.0×10^{-11} 의 정상상태 값을 대표 값으로 선정하여 유한요소해석에 적용하였다.

4.2 마모수명 해석 및 결과

마모수명 평가는 Fig. 5의 노칭 금형 모델을 적용하여 DEFORM 3D로 수행하였다. 이때 마모계수는 마모시험을 통해 평가된 9.0×10^{-11} 를 적용하였으며,

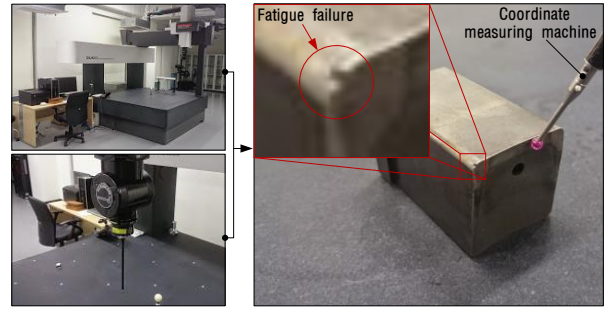


Fig.17 Measuring of the Wear depth and fatigue failure at the notching process die

측정된 금형강의 경도(HrC)는 57이다[6].

Fig. 15에 노칭 금형의 마모수명 해석 결과를 나타내었다. 마모는 면압이 가장 높게 발생한 부분을 중심으로 발생하였다. 1 타발에 따른 마모깊이는 금형 1에서 5.93×10^{-11} mm, 금형 2에서 1.25×10^{-10} mm, 금형 3에서 6.83×10^{-11} mm로 평가되었다. 따라서, 노칭 금형의 마모수명은 최대 허용 마모깊이가 0.5mm임을 고려할 때, Fig. 16과 같이 금형 1에서 8.4×10^9 타발, 금형 2에서 4.0×10^9 타발, 금형 3에서 7.0×10^9 타발로 평가되었다. 상대적으로 금형 2의 마모수명이 짧은 결과를 보였으나, 피로수명과 비교할 때, 마모수명에 의한 금형 교체는 발생되지 않을 것으로 판단된다.

5. 실험적 검증

본 연구에서 제안된 금형 수명 해석기법의 유효성을 평가하기 위해 리테이너 성형공정 실험을 수행하였다. 이때 피로 및 마모수명 실험은 시간적인 소요가 크기 때문에 수명이 짧게 예측된 노칭 공정 금형 2를 기준으로 수행하였으며, 100 타발을 주기로 피로 및 마모수명을 평가하였다. 피로수명 평가는 거시적인 관점으로 수행하였으며, 마모수명 평가는 Fig. 17(a)에 나타난 접촉식 삼차원 측정기(Coordinate measuring machine)를 활용하여 수행하였다.

Fig. 17(b)는 400~500 타발 완료 이후의 노칭 금형 2를 나타낸다. 피로수명 해석과 동일하게 응력이 집중되는 모서리부에서 피로파손(Fatigue failure)이 발생되었으며, 최대 500 타발의 피로수명을 보였다.

노칭 금형 2의 마모는 1700 타발까지 발생되지 않는 결과를 보였다. 접촉식 삼차원 측정기의 최소 측

정 범위가 1.0×10^4 mm 임을 고려 할 때, 마모깊이는 그 이하로 예측 할 수 있다. 따라서, 최대 허용 마모깊이 0.5mm 를 고려할 때, 최소 9.0×10^6 타발의 높은 마모수명을 가지는 결과를 예측할 수 있다. 노칭 금형의 마모수명은 피로수명보다 매우 길기 때문에 마모에 의한 금형 교체는 발생되지 않을 것이라 판단된다. 이는 마모수명 해석과 일치하는 결과이다. 결과적으로 본 연구에서 수행한 금형 수명 해석기법은 피로 및 마모 수명을 예측하는데 상당히 유효하다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 고강도강판 전단 금형의 효율적인 교체시기를 선정하기 위해 피로 및 마모수명을 유한요소해석을 통해 예측하였다. 피로수명 예측을 위해 STD11 금형강의 S-N curve를 도출하였다. 또한 마모수명 예측을 위해 Archard 마모모델을 적용한 마모계수를 도출하였다. 최종적으로 금형의 마모 및 피로수명을 정량적으로 나타내었다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 금형에 발생하는 인장응력이 압축응력보다 높은 지점의 피로수명은 그렇지 않는 곳에 비해 짧은 결과를 보였다. 따라서 피로수명 향상을 위해서는 인장응력의 감소 또는 압축응력의 증가에 초점을 맞춘 설계가 이루어져야 한다.

(2) 노칭 금형에서의 마모수명은 피로수명에 비해 매우 높은 결과를 보였다. 따라서 금형 교체시기는 피로수명을 기준으로 선정하는 것이 매우 효율적이라 판단된다.

(3) 마모 및 피로수명 해석의 유효성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 피로수명은 해석에서 563타발, 실험에서 최대 500타발의 결과를 보였으며, 최대 11.1%의 오차를 보였다. 마모수명은 해석에서 4.0×10^9 타발, 실험에서 최소 9.0×10^6 타발의 결과를 보였으며, 해석 및 실험에서 마모에 의한 금형 결함은 미미한 결과를 보였다. 결과적으로 피로 및 마모수명 해석은 실험과 잘 일치하였으며, 금형 수명예측을 위한 해석방법으로 적절하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 및 지식경제부 산업융합원천기술개발사업 “금형 소재의 수명을 극대화하기 위한 열/표면처리 및 금형 제작 기술개발” 과제 지원으로 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] H. S. Choi, B. M. Kim, K. J. Nam, S. Y. Ha, S. H. Cha, C. G. Kang, 2011, Development of Hot Stamped Center Pillar using form Die with Channel Type Indirect Blank Holder, Int. J. Automot. Techn., Vol. 12, No. 12, pp. 887~894.
- [2] K. Kishida, 2000, High Stength Steel Sheets for Light Weight Vehicle, Nippon Steel Technical Report, No. 81, pp. 12~16.
- [3] J. C. Choi, B. M. Kim, 1994, Tool Life in Metal Forming Processes, Trans. Mater. Process., Vol. 3, No. 2, pp. 147~151.
- [4] J. F. Archard, 1953, Contact and Rubbing of Flat Surfaces, J. Appl. Phys., Vol. 24, No. 8, pp. 981~988.
- [5] Y. C. Song, E. G. Yoh, Y. S. Lee, 1999, A Study on the Prediction of Fatigue Life in Die, J. Korean Soc. Mach. Tools Eng., Vol. 8, No. 4, pp. 87~92.
- [6] S. prabhu, B. K. Vinayagam, 2011, Fractal Dimensional Surface Analysis of AISI D2 Toll Steel Material with Nanofluids in Grinding Process using Atomic Force Microscopy, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., Vol. 33, No. 4, pp. 459~466.
- [7] T. C. Lee, L. C. Chan, P. F. Zheng, 1997, Applcation of the Finite-element Deformation Method in the Fine Blanking Process, J. Mater. Process., Vol. 63, No. 1, pp. 744~749.
- [8] D. H. Ko, S. K. Lee, Y. N. Kwon, S. W. Kim, H. S. Lee, E. S. Park, B. M. Kim, D. C. Ko, 2011, Roll Die Forming Process for Manufacturing Clutch Hub in Automotive Transmission, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 2, pp. 154~159.
- [9] J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, 1990, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, New Jersey, pp. 232~238.