

# 냉간 단조 공정의 유한 요소 해석에 기반한 WC-Co 초경 금형의 파손 위험 영역 평가

류성현<sup>1,2</sup>, 정선호<sup>3</sup>, 정현영<sup>4</sup>, 김경일<sup>5</sup>, 조규섭<sup>6</sup>, 노우람<sup>7,#</sup>

## Potential Damage Region Investigation of WC-Co Cemented Carbide Die Based on Finite Element Analysis of Cold Forging Process

S. H. Ryu, S. H. Jung, H. Y. Jeong, K. I. Kim, G. S. Cho, W. Noh

(Received October 16, 2022 / Revised November 15, 2022 / Accepted November 18, 2022)

### Abstract

The potential damage region of a WC-Co cemented carbide die is investigated for cold forging process of a wheel-nut by numerical simulation with its chemical composition considered. Numerical simulation is utilized to calculate internal stress, especially for the WC-Co die, during the forging process. Finite element model is established, in which the elasto-plastic properties are applied to the work-piece of bulk steel, and elastic properties are considered for the lower die insert of the WC-Co alloy. This stress analysis enables to distinguish the potential damage regions of the WC-Co die. The regions from calculation are comparatively analyzed along with the crack area observed in the die after repetitive manufacturing. Effect of chemical composition of the WC-Co is also evaluated on characteristics of potential damage region of the die with variance of mechanical properties considered. Derived from Mohr-Coulomb fracture model, furthermore, a new stress index is presented and used for die stress analysis. This index inherently considers hydrostatic pressure and is then capable of deducing wide range of its distribution for representing stress state by modification of its parameter implying pressure sensitivity.

**Keywords:** Cold forging, WC-Co cemented carbide, Die stress analysis, Potential damage region

## 1. 서 론

단조는 대표적인 금속가공 기술들 중의 하나로서 타 공정 대비 소재의 높은 회수율과 우수한 생산성을 이점으로 한다. 단조는 공정이 수행되는 작업 온도 구간에 의해 냉간, 온간 및 열간 단조 기술로 구

분되며, 소재 및 단조품의 특성 및 목적에 따라 적용을 달리한다.

냉간 단조는 단조품의 표면 거칠기 및 치수 정밀도 제어가 열간 단조에 비해 수월하고 비용이 적게 소모되어 공정 접근성이 높다. 또한, 피단조재의 소성변형에 수반되는 가공경화는 냉간 단조품의 기계적 강도 확보를 가능하게 한다. 이러한 냉간 단조 공정 및 단조품의 특성은 정밀 단조 부품을 대량으로 필요로 하는 자동차 부품 제조 산업에 매우 적합하여 다양한 소재 부품 영역에 사용 중이다. 그러나, 냉간 단조는 피단조재의 낮은 온도 및 큰 체적과 대변형으로 인해 높은 성형하중이 일반적으로 요구되며, 복잡한 형상의 성형에는 한계를 지니고 있다 [1~3].

1. 한국생산기술연구원 뿌리 산업소재공정연구부, 학생 연구원

2. 태양연마(주) 생산부, 주임

3. 한국생산기술연구원 뿌리 금형성형부, 포스트닥터

4. 풍강㈜ 기술개발1팀, 대리

5. 한국생산기술연구원 뿌리 산업소재공정연구부, 연구원

6. 한국생산기술연구원 뿌리 산업소재공정연구부, 수석 연구원

7. 한국생산기술연구원 뿌리 산업소재공정연구부, 선임 연구원

# Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology  
Industrial Materials Processing R&D Department

E-mail: wnoh@kitech.re.kr. ORCID: 0000-0002-0969-6441

다단 냉간 단조는 금형 부하 응력을 낮추고 단조품의 복합 형상 대응력을 높이기 위한 노력의 일환으로 고안되었다. 다단 성형은 소재의 투입부터 최종 형상까지 단계적/순차적으로 변형량을 제어하여 성형하는 기술이다. 각 단계마다 중간 형상들이 존재하며 이에 따른 금형 설계가 필수적으로 요구된다. 1단 금형에는 소재가 투입되며 이어지는 다음 단부터는 직전 단계에서 성형된 중간재가 투입되어 이를 순차적으로 반복하여 최종 단조품으로 성형한다.

다단 공정을 통해 금형에 부하되는 응력 집중을 완화함에도, 피단조재의 높은 변형량과 가공경화량은 금형에 높은 응력을 필연적으로 인가한다. 금형의 높은 응력 수준은 금형의 피로 파손 및 마모에 주요 원인으로 인식되고 있으며, 성공적인 단조품 제조를 위해서는 변형량 제어, 금형 설계 등의 단조 공정 최적화가 필수적이다. 특히, 제조 원가에서 높은 비중을 차지하는 금형개발의 경우, 금형에 부하되는 응력의 수준 및 분포에 따라 금형 파손을 예측하고 개선하기 위해 전산모사 방법을 활용한 수치해석의 적용이 늘어나고 있다 [4, 5].

전산모사를 이용한 금형 파손의 정밀한 예측은 소재의 물성 평가, 공정 조건의 구현뿐만 아니라, 손상을 평가할 수 있는 적합한 파괴 모델의 선정이 필요하다. 다양한 응력 기반 모델들이 금형의 파괴위험을 예측하고 평가하는 연구에 사용되었다. 단조 공정 해석을 통해 금형에 부하되는 응력을 분석하고, 이를 최대 주 응력 ( $\sigma_1$ ), 유효 응력( $\sigma_{vm}$ ), 절대 최대 전단 응력 ( $\tau_1$ ) 등의 스칼라 대푯값을 산출하여 금형의 잠재 파괴 영역을 식별하였다. 그러나, 개별 응력 기반 모델은 서로 다른 크기 및 분포를 나타내기 때문에, 실제 금형의 파괴양상과 비교하여 모델의 적합성 및 정확성을 분석 도출하고, 최선의 모델을 선정하여 해석에 적용 평가해야 한다.

또한, 단조 금형 파괴 예측의 신뢰성은 금형 소재의 기계적 물성 정량화와 그 정확도에도 의존할 수밖에 없다. 특히, 냉간 단조 금형의 핵심 소재로 사용되는 WC-Co계 초경(cemented carbide)은 강화재로서의 탄화물(WC)과 기지로서의 금속바인더(Co)가 사용되는 복합재료적 성격을 띠고 있어, 조성에 따라 확연히 다른 기계적 물성 값을 지니게 된다. 탄화물 입자 크기와 바인더(Co) 층의 평균 두께( $\lambda_{co}$ ) 등 초경의 미세구조 또한 초경합금의 기계적 특성을 변화시키는 요인들이다. 이러한 초경합금의 조성

및 미세 구조와 인장 특성의 상관관계에 대해 분석하고 평가한 연구도 보고된 바 있다 [6].

본 연구에서는 차량 휠 너트의 냉간 단조 공정에 적용 중인 WC-Co계 초경 다이 인서트의 잠재 균열 영역을 수치해석에 기반하여 평가하였다. 다단 공정 중 금형의 손상이 빈번하게 발생하는 3단 공정(Fig. 1)에 대해 유한요소해석 모델을 구성하고 단조 공정에 수반되는 금형 응력의 크기 및 분포를 계산하였다. 다이 인서트의 초경 및 그 외 조립 금형 소재인 공구강 및 피단조재인 연강의 기계적 성질은 인장 시험을 통해 분석하여 유한요소해석에 적용하였다. 다양한 조성의 초경과 그에 따른 다른 물성을 해석에 적용하여, 초경의 조성 변화가 금형 응력 분포 및 균열 가능 영역의 위치 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 일반적으로 사용되는 최대 주 응력 ( $\sigma_1$ ), 유효 응력( $\sigma_{vm}$ ), 절대 최대 전단 응력 ( $\tau_1$ )뿐만 아니라 정수압을 고려한 MC(Mohr-Coulomb) 응력을 지표로 사용하여 금형의 균열 가능 영역을 예측하고자 하였다. 개별 지표의 크기 및 분포 양상을 통해 잠재 균열 영역을 나타내고 실제 파손 금형과 비교 분석하였다. 이를 통해, 단조용 초경 금형의 파괴 예측에 적합한 지표를 도출하였다.

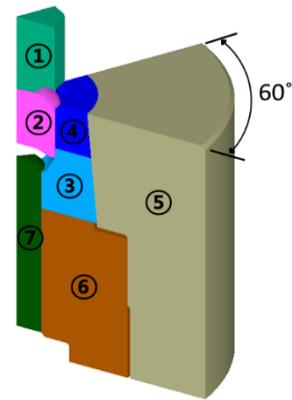


Fig. 1. A schematic diagram of the cold forging process.

## 2. 소재 물성 분석

### 2.1 다이 인서트재 초경의 인장시험

기지의 조성 변화에 따른 소재의 물성 변화를 분석하기 위해서 다이 인서트에 사용되는 WC-Co 초경의 바인더(Co) 비율이 다른 세 종류(12, 20, 22 wt%)의 초경을 대상으로 일축 인장 시험을 수행 하였다. 인장 시험용 시편은 ASTM E8M 표준을 준수하여 준

정적 속도에서 개별 조성의 초경에 대해 반복시험을 수행하였다 Fig. 2와 같이 측정한 응력-연신율 선도 분석으로부터 초경은 강도가 높은 반면 인성이 매우 낮은 특성, 즉 취성을 지님을 확인할 수 있었다. 연신율에 대한 응력의 기울기는 재현성이 좋지만, 파괴 연신율 및 최대 강도의 경우 편차가 크며 항복점도 명확히 구분하기 쉽지 않았다. 선형 탄성 거동을 가정하여 물성을 도출하였고, 최대 강도( $\sigma_{UTS}$ )와 탄성계수( $E$ ) 그리고 파괴 시점의 연신율( $\epsilon_f$ )의 평균과 표준 편차를 Table 1에 정리하였다.

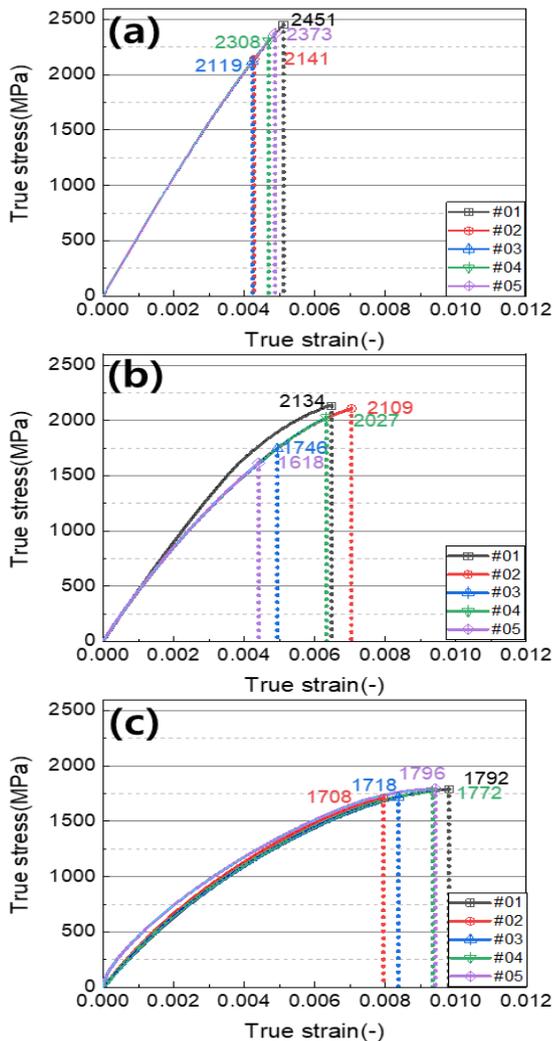


Fig. 2. Stress-strain curve of WC-Co cemented carbides with (a) 12wt%Co, (b) 20wt%Co, and (c) 22wt%Co.

최대 강도와 탄성계수는 바인더 함량이 제일 낮은 12 wt%일 때 평균 2268 MPa, 548 GPa로 가장 높게 나타났으며, 바인더 함량이 높아질수록 최대 강도와

탄성 계수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면에 최대 연신율은 바인더 함량이 증가할수록 서서히 증가하였다. 이는, 초경의 인성과 강도가 금속 바인더의 연성과 탄화물의 강도에 기인하며 복합재적인 특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

Table 1. Tensile properties of WC-Co cemented carbide.

WC-Co	$\sigma_{UTS}$ [MPa]	$E$ [GPa]	$\epsilon_f$ [%]
12 wt% Co	2268 ±143.4	548.7 ±4.7	0.464 ±0.038
20 wt% Co	1866 ±230.5	463.3 ±3.1	0.441 ±0.568
22 wt% Co	1732 ±38.9	362.8 ±3.1	0.887 ±0.086

## 2.2 피단조재 연강 선재의 인장시험

차량 휠너트 단조 공정에 투입되는 S25C 연강 선재의 기계적 물성 분석을 위해 앞선 초경의 시험과 동일 조건에서 일축 인장 시험을 수행하였다. 반복 시험결과를 Fig. 3에 도시하였다. 연성이 충분한 소재이므로 인장 선도의 재현성을 확보하였으며 재질 편차가 거의 없음을 확인하였다. 탄소성 모델을 활용하여 항복거동 등의 기계적 거동을 정량화하였다. 경화거동은 식 (1)의 Swift 모델 [7]을 적용하여 외삽을 통해 표현하였으며, 유한요소해석에 적용되는 물성 값은 Table 2에 정리하였다.

$$\sigma = K(\epsilon + \epsilon_0)^n \quad (1)$$

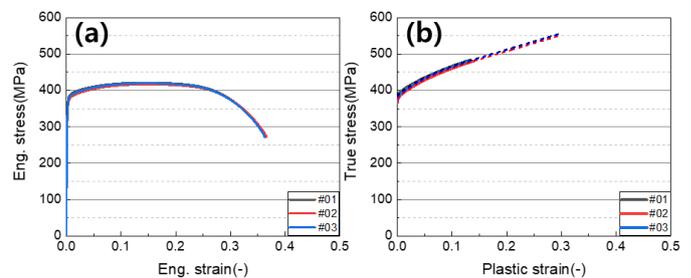


Fig. 3. Tensile properties of S25C: (a) stress-strain curves and (b) hardening curves.

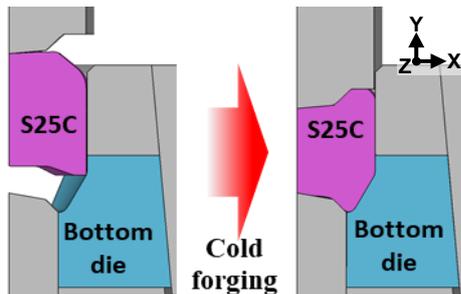
## 3. 유한요소해석 모델 정립

휠너트 냉간 단조의 3단 공정(Fig. 1)을 유한요소해석으로 구현하고 금형 응력을 분석하고자 하였다. 상용 프로그램(DEFORM 3D)을 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 금형과 피단조재가 모두 중심축

에 육각 거울 대칭이므로 1/6 모델을 구성하여 해석의 효율성을 높였다. 실제 단조에서 파괴가 관찰되는 다이 인서트 하부(③)의 응력 크기 및 분포 분석에 주안점을 두었다. 피단조재(②)와 하부 다이인서트(③)는 모델 내에서 탄소성체와 탄성체로 각각 설정하고 앞서 인장시험에서 도출한 물성을 각각 적용하였다. 이 외의 조립 금형 부품인 펀치(①), 상부 다이인서트(④), 케이스(⑤), 서포터(⑥) 및 핀(⑦)은 해석 내에서 강체(rigid body)로 단순화하여 해석의 계산 시간을 줄이고자 하였다. 하부 다이인서트와 피단조재는 각각 104,570 개와 74,790 개의 사면체 요소(tetrahedral element)를 이용하여 구성하였다. 객체들간의 마찰은 쿨롱(Coulomb)마찰 법칙을 사용하였으며 계수는 0.025를 가정하였다. 펀치 이동거리는 Y축 방향 7.27mm를 사용하여 Fig. 4와 같이 단조 공정을 모사하였다.

**Table 2. Mechanical model parameters for FE simulation.**

	S25C	WC-Co		
		12 wt% Co	20 wt% Co	22 wt% Co
Material type	Elastic-plastic	Elastic		
Poisson ratio	0.30	0.23		
E(GPa)	203.0	548.7	463.3	362.8
Swift type	K	643.1		
	$\epsilon_0$	0.047		
	n	0.170		



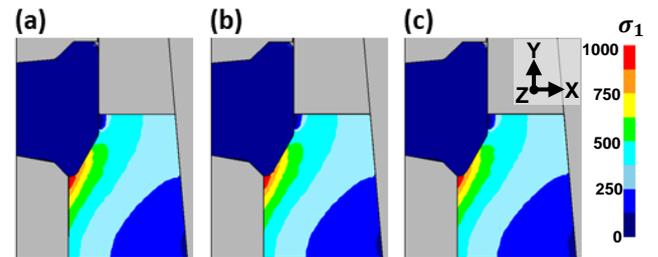
**Fig. 4. Cold forging process of wheel nut.**

## 4. 금형 파손 위험 영역 평가 및 고찰

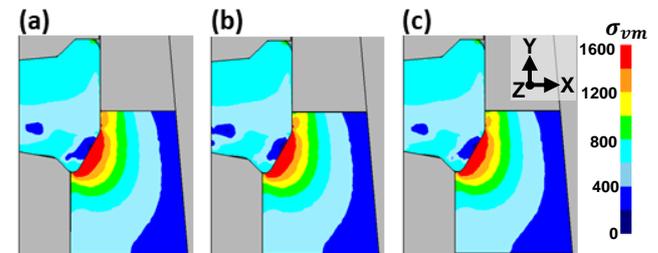
### 4.1. 금형 응력 분석

단조 공정 중 하부 다이 인서트에 부하되는 응력 크기 및 분포와 초경 조성의 상관관계를 규명하기 위해 단조 공정의 유한요소해석을 수행하였다. 단조 해석은 초경의 세 가지 조성(12, 20, 22 wt% Co)에 해당하는 기계적 물성을 적용하였고, 일반적으로 사용되는 세 종류의 응력 지표( $\sigma_1$ ,  $\sigma_{vm}$ ,  $\tau_1$ )로 단조 공정이 완료되었을 때의 응력 분포를 도시하여 Fig. 5~7에 각각 나타내었다. 도시된 응력 지표들의 크기와 분포로부터 초경의 조성 변화가 다이 인서트의 부하 응력에 미치는 영향이 매우 미비함을 확인할 수 있다. 즉, 금형 응력의 크기를 줄이거나 응력 집중 정도를 완화하는 것은 소재의 변경이 외에 금형설계 변경 등의 공정 변수 최적화가 요구된다.

개별 응력 지표의 크기와 분포를 살펴 보면,  $\sigma_1$ 의 경우(Fig. 5), 다이 인서트의 최하단부의 협소한 영역에서 응력이 집중되며 최대값을 나타냈다. 반면,  $\sigma_{vm}$ 과  $\tau_1$ 은 휠너트소재가 미끄러져 내려오며 좁게 형성되는 다이 인서트의 경사부에 넓게 걸쳐 높을 값을 가졌으며, 최대값은 경사부의 끝단이자 최하단부가 시작되는 모서리에서 관찰할 수 있었다(Fig. 6, 7). 더하여, 다이인서트의  $\sigma_{vm}$ 과  $\tau_1$ 의 분포는 비슷한데 비해,  $\sigma_1$ 은 상이한 분포를 나타내는데, 이로부터 단조 공정이 다이 인서트에 부하되는 응력의 성격이 단축이 아닌 최소 2축이상의 다축(multi-axial)응력 상태임을 간접적으로 확인할 수 있었다.



**Fig. 5. Maximum principal stress contour of WC-Co lower die: (a) 12wt%Co, (b) 20wt%Co, and (c) 22wt%Co.**



**Fig. 6. Effective stress contour of WC-Co lower die: (a) 12wt%Co, (b) 20wt%Co, and (c) 22wt%Co.**

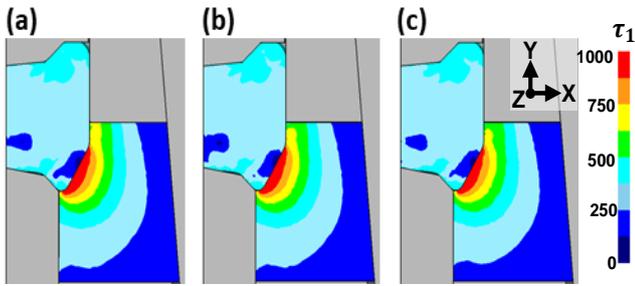


Fig. 7. Maximum shear stress contour of WC-Co lower die: (a) 12wt%Co, (b) 20wt%Co, and (c) 22wt%Co.

#### 4.2. 파손 영역 관찰 및 비교 분석

다이 인서트의 파손은 단조 공정의 반복으로 점차 진행되며, 작업자의 눈으로 확인할 수 있는 거시적 파손(300,000~ 700,000 타수)에 이르면 단조 제품인 휠너트의 형상 및 치수 불량을 야기한다. 실제 단조 공정의 반복 작업에 의해 파손에 이른 WC-20wt%Co 다이인서트의 형상을 다수 관찰하였고, 파손 위치는 Fig. 8 과 같이 특징적인 위치에서 나타났다. 다이인서트의 경사부와 최하단부가 만나는 모서리에서 그림과 같이 금형 소재가 뜯겨나간 파면(破面)이 관찰된 것이다. 이러한 방식의 파손은 금형 응력 해석 결과 중  $\sigma_1$ 의 크기와 분포로부터 예측이 가능했다. 실제 금형 파손 위치와 동일 지점에서 응력이 집중됨을 확인하였고 그 크기가 최대임이 나타났다. 이외에도 개별 응력지표의 파손 예측 가능성을 검토하기 위해, 해석의 계산결과로부터 응력지표들의 값을 다이인서트 최하단부의 중심부 쪽 모서리로부터 경사부의 초입에 이르기까지 아홉 개의 요소에 대하여(Fig. 9)추출하여 Fig. 10에 도시하였다. 최하단부의 내경에서부터 경사면의 경계까지의 영역은 요소 순번으로는 순차적으로 1~4로 표기했으며, 이 부위는 실제 단조 공정에서 파손이 관찰되는 그 곳이다.  $\sigma_1$ 의 집중 양상과 최대값은 실제 파손부위와 일치하는 곳에서 나타났으며(Fig. 10), 이로부터 금형 파손 부위를 예측하는 응력 지표로서 사용될 수 있음을 확인했다. 반면,  $\sigma_{vm}$ 과  $\tau_1$ 의 경우, 최하단부가 아닌 경사부(요소 번호 4~9)에 걸쳐 높은 값이 나타났고, 실제 금형에서는 건전한 부위인 곳을 파손 위험이 높게 평가하도록 오인하게 했다.

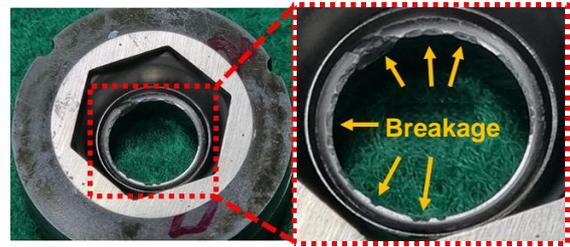


Fig. 8. Damaged lower die insert of WC-20wt%Co.

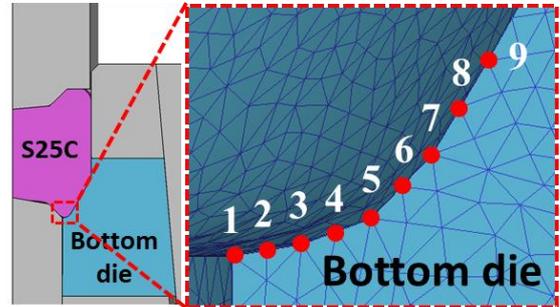


Fig. 9. Locations selected for investigation of potential fracture.

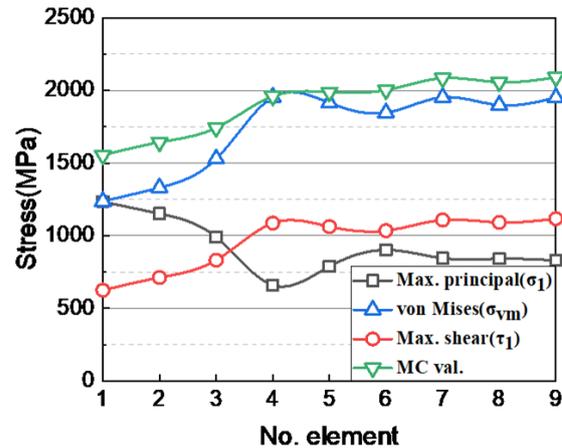


Fig. 10. Stress state indices across the potential damage region for the lower die insert of WC-20wt%Co.

#### 4.3. Mohr-Coulomb 파손 모델의 응력 지표 응용

지금까지 단조 금형의 잠재 파손 영역 분석을 위해  $\sigma_1$  및  $\sigma_{vm}$ ,  $\tau_1$ 을 지표로서 사용하여, 금형 응력의 크기와 분포를 분석하였다. 이러한 지표들은 단조뿐만 아니라 압출, 인발 등 다양한 소성 가공 공정의 최적화 및 제품의 건전성 검토를 위해 금형 및 제품의 응력 분석 시에 사용되는 일반적인 지표이다 [8, 9]. 그러나 일반적 지표를 이용한 단조 공정 금형 파손 예측은 정확성에 한계를 지닐 수도 있다. 앞서

다이인서트의 응력 집중 경향을 실제와 제일 비슷하게 예측했던 지표인  $\sigma_1$ 의 분포조차도 금형에 부하되는 다축 응력의 분포를 정확히 표현할 수 없으며,  $\sigma_{vm}$ 과  $\tau_1$  두 지표 역시 파괴 현상에 영향을 끼치는 주요인자인 정수압의 크기를 고려할 수 없기 때문이다. 소성 변형과는 다르게, 파괴 현상은 외력으로부터 소재가 흡수하는 탄성 및 소성 에너지를 모두 고려해야 하므로 정수압의 파괴 기여도 역시 분석해야만 한다 [10].

본 연구에서는, 정수압을 고려할 수 있는 지표로서 Mohr-Coulomb(MC) 파괴 모델 [11]을 이용하여 금형에 부하되는 다축 응력의 크기와 분포를 하나의 스칼라 값으로 도출하고, 이를 이용하여 실제 금형의 파손 부위 예측이 가능한지를 탐구하였다. MC 모델은 본래 취성 소재의 파단을 예측하기 위해 응력기반 파괴 준거(fracture criterion)로 개발되었는데, 질점(mass point)을 지나는 임의의 면 위에 있는 응력 벡터(traction vector)의 수직 요소의 값과 전단 요소의 값을 먼저 계산하고, 수직 요소 값과 전단 요소의 크기에 계수를 곱한 값의 합이 최대를 나타내는 면에서 그 값이 준거의 한계 값을 충족하면 파괴가 발생한다는 이론이다. 질점을 지나는 특정 면에서, 앞서 언급한 합값이 최대를 나타내는데, 그 최대값은 주응력의 세 가지 요소( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )를 사용하여 식 (2)와 같이 간단하게 정리할 수 있다 [12]. 즉, 식 (2)의 좌항에 있는 MC val.은 응력 벡터의 수직과 전단 요소를 인자로 하는 함수의 최대값을 나타낸다.

$$\text{MC val.} = (\sigma_1 - \sigma_3) + C(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$C = (\sigma_{CS} + \sigma_{UTS}) / (\sigma_{CS} - \sigma_{UTS}) \quad (3)$$

인장과 압축에 의한 파괴 시 동일한 MC val.가 산출되어야 하므로, 민감도 파라미터  $C$ 를 구하기 위한 방정식은 명시적으로 식 (3)과 같이 정리할 수 있다. 따라서, 초경 WC-20wt%Co의  $C$  값은 앞서 측정했던 초경의 최대인장강도( $\sigma_{UTS}$ ) 1,866 MPa와 압축 한계강도( $\sigma_{CS}$ ) -3,000 MPa [13, 14]를 식 (2)에 대입하여 0.233으로 도출할 수 있었다.

#### 4.4. 파손 영역 예측 적합성 평가

MC 지표는 최하단부의 내경 최근접부부터 점차 증가하여 금형의 경사부에서 가장 높은 값을 보였

다. 이러한 양상은 최대 전단 응력  $\tau_1$ 의 분포 양상과 매우 유사한 것으로 나타났다 (Fig. 10). 따라서 MC 지표는 냉간 단조 공정 시 금형 다이인서트의 하단 팁 끝 부분보다는 Fig. 7의  $\tau_1$  응력 분포에서 도시된 응력 집중 영역에서 파괴가 발생할 것임을 예측한다. 이렇게 MC 지표로부터 도출된 파손 위험부는 Fig. 8에서 관찰한 실제 금형의 파손 위치와 매우 상이하다.

그러나 MC 지표의 정확성이 떨어진다고 단정적으로 판단할 수는 없다. 본 연구의 단조공정 금형응력 해석은 아직 예압이 부하하는 금형 응력을 고려하지 않았기 때문이다. 다이인서트는 케이스와 서포터를 이용한 냉간 혹은 온간 예압을 통해 조립 금형으로서 완성된다. 즉, 예압을 통해 단조 공정 전부터 상당한 크기의 압축응력이 부하되어 있다. 예압이 부하되는 응력은 단조 공정 시 금형의 응력 분포에 영향을 미치므로 이를 고려한 해석을 기반으로 개별 지표의 파괴 예측 적합성을 판단하는 것이 보다 적절해 보인다.

또한 WC-20wt%Co 초경합금의 압축강도를 시험 장비의 한계로 인하여 시편으로부터 직접 측정하지 못했던 것도 MC 지표의 예측 정확성을 떨어뜨리는 인자로 볼 수 있다. 차용한 문헌 값에 해당하는 초경이 시험대상인 초경과 미세구조적 인자 및 기계적 특성이 일치하는지 파악할 수 없기 때문이다. 압축강도의 값의 변화에 따라, MC 지표를 결정하는 주요한 파라미터인  $C$  값이 달라진다. 민감도 파라미터인  $C$ 의 변화는 동일한 해석 조건(즉, 같은 응력 거동)에서도, MC 지표의 분포 양상까지도 변화시키게 된다. Fig. 11은 MC 지표의 분포 양상의 변화가 파라미터  $C$  값의 변화에 따라 분명하게 나타남을 보여준다.  $C$  값이 0에서 1에 가까워질수록, 즉 정수압의 크기에 민감할수록 MC 지표의 분포 양상은  $\tau_1$ 에서  $\sigma_1$ 으로 점점 그 양상이 가까워짐을 확인할 수 있다. 따라서, MC 지표를 활용한 금형의 파손 위험 영역 예측은 주요지표인  $C$  값을 정확히 분석하는 것이 선행되어야 한다. 추후 연구에서는 초경합금의 압축 및 인장 파괴강도를 정밀하게 분석할 수 있는 신뢰성 높은 방법론을 개발하고, 이를 기반으로 조립 금형의 예압력까지 고려한 단조 공정해석을 통해 더욱 높은 정확도의 파손 영역 예측을 하고자 한다.

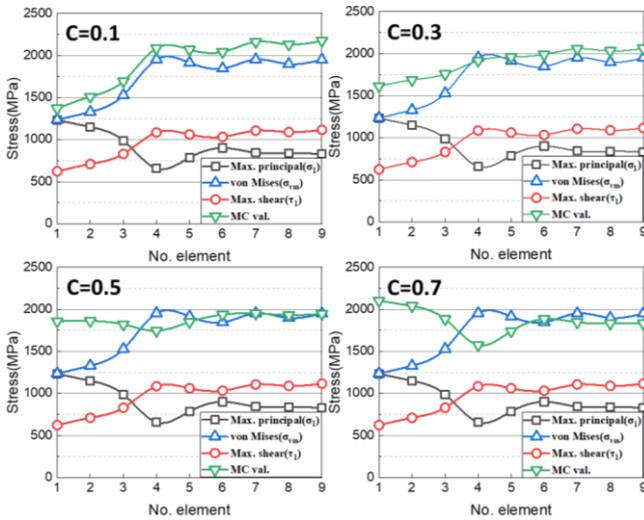


Fig. 11. Stress state indices comparison with variance of the parameter  $C$  for calculation of MC val.

## 5. 결론

본 연구에서는 자동차 휠 너트의 냉간 단조 공정을 유한요소해석으로 분석하고 응력 지표를 활용해 금형의 잠재 파손 영역을 평가하였다. 실제 공정에서 파손이 관찰되는 하부 다이인서트의 소재는 고강도 및 고강성의 WC-Co 계열 초경합금으로 Co 함량에 따라 기계적 거동의 변화가 매우 크게 나타났다. 초경의 Co 조성(12, 20, 22 wt%) 변화와 그에 수반되는 물성의 변화를 고려하여 해석을 수행하였다. 초경의 조성 변화에 따른 금형 응력 분포 및 집중 영역의 위치 변화를 분석하였고, 개별 응력지표로부터 파손 위험 영역을 도출하였다. 이번 연구의 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 초경합금의 Co 함량 변화에 따라 기계적 거동이 크게 달라짐을 확인하였다. 연질의 Co 함량의 증가는 강도 및 강성을 약화시켰다. 즉, 초경의 화학 조성은 그것의 기계적 거동을 결정짓는 주요한 인자이다.

(2) 단조 공정 중 다이인서트의 응력분포 양상은 그것의 원소재인 초경의 조성과 무관하게 유사한 분포를 유지하였다. 초경의 조성 변화와 그에 상응하는 물성을 적용하여 동일한 공정해석을 진행하였을 때, 개별 응력지표들의 분포는 초경의 조성과 무관하게 매우 유사하였으며, 응력 집중의 양상과 위치 역시 동일하였다.

(3) 다양한 응력 지표 중 최대 주응력  $\sigma_1$ 으로 표현한 값의 분포 및 집중 양상이 실제 금형의 파손 위험 부위를 가장 유사하게 예측하였다.

(4) 단조 공정에 의해 부하되는 금형의 응력은 다축응력임을 개별 응력지표들의 비교를 통해 확인하였다. 이는 금형에 부하되는 응력상태의 해석을 위해서는, 파괴 역학의 관점에서 다축 응력을 고려할 수 있는 지표가 필요함을 나타낸다.

(5) Mohr-Coulomb 취성 파괴 모델에 기반한 MC 지표의 경우 다양한 응력 분포 상태에 대한 대응이 가능하였다. 정수압 민감도 지표의 변화를 통해 금형에 부하되는 다양한 응력 분포 양상을 예측할 수 있었다. 추후, 신뢰성이 담보된 시험분석을 통해 민감도 파라미터를 정교하게 평가하고 이를 활용한다면, 예압 하중의 크기에 따른 파손 위험 영역의 변화 및 다른 부품의 단조 금형 위험도 분석에까지 그 지표의 적용을 확장할 수 있겠다.

## 후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (정밀 냉간단조의 지능화 및 스마트화를 위한 금형수명 사전예지 시스템의 개발 및 응용, 1415178141, 20003950, 산업통상자원부).

## REFERENCES

- [1] Fujikawa, S., Yoshioka, H., Shimamura, S., 1992. Cold and warm-forging applications in the automotive industry. *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 35, pp.317–342.  
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90325-M](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90325-M)
- [2] Ku, T.-W., 2020. A Combined Cold Extrusion for a Drive Shaft: A Parametric Study on Tool Geometry. *Mater.*, Vol. 13, pp. 2244.  
<https://doi.org/10.3390/ma13102244>
- [3] Hsia, S.-Y., Shih, P.-Y., 2015. Wear Improvement of Tools in the Cold Forging Process for Long Hex Flange Nuts. *Mater*, Vol. 8, pp. 6640–6657.  
<https://doi.org/10.3390/ma8105328>
- [4] Ku, T.-W., Kim, L.-H., Kang, B.-S., 2013. Multi-stage cold forging and experimental investigation for the outer race of constant velocity joints. *Mater. Des*, Vol 49, pp.

- 368–385.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.030>
- [5] Pang, H., Ngaile, G., 2019. Development of a non-isothermal forging process for hollow power transmission shafts. *J. Manuf. Process.*, Vol 47, pp. 22–31.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.034>
- [6] García, J., Collado Ciprés, V., Blomqvist, A., Kaplan, B., 2019. Cemented carbide microstructures: a review. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, Vol. 80, pp. 40–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004>
- [7] Jang, I., Bae, G., Song, J., Kim, H., Park, N., 2020. Fracture envelopes on the 3D-DIC and hybrid inverse methods considering loading history. *Mater. Des.*, Vol. 194, pp. 108934.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108934>
- [8] Sheu, J.J., Yu, C.H., 2008. The die failure prediction and prevention of the orbital forging process. *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 201, pp. 9–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.178>
- [9] Hwang, W.-S., Choi, J.-W., Jung, E.-E., Kang, M., 2021. Mold-design Verification of Ball Housing Insert Die in Non Processing Type Multi-stage Cold Forging. *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 20, pp. 8–15.  
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.12.008>
- [10] Noh, W., Kim, W., Yang, X., Kang, M., Lee, M.-G., Chung, K., 2017. Simple and effective failure analysis of dissimilar resistance spot welded advanced high strength steel sheets. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 121, pp. 76–89.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.12.006>
- [11] Labuz, J.F., Zang, A., 2012. Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 45, pp. 975–979.  
<https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>
- [12] Bai, Y., Wierzbicki, T., 2010. Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture. *Int. J. Fract.*, Vol. 161, pp. 1–20.  
<https://doi.org/10.1007/s10704-009-9422-8>
- [13] Okamoto, S., Nakazono, Y., Otsuka, K., Shimoitani, Y., Takada, J., 2005. Mechanical properties of WC/Co cemented carbide with larger WC grain size. *Mater. Charact.*, Vol. 55, pp. 281–287.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.06.001>
- [14] 河原淳二, & 小坂田宏造, 2012. 超硬工具の疲労破壊寿命の予測, *SOKEIZAI*, Vol. 53, pp. 37–43.  
<https://cir.nii.ac.jp/crid/1523388079593674368>