

플로우포밍 스플릿 공정 시 맨드릴의 응력 해석을 통한 파손 원인 분석

원권희¹ · 홍승우¹ · 박희수² · 이상철³ · 홍성진⁴ · 현승균^{5, #} · 김상열^{6, #}

A Study on Failure Analysis of Mandrel in the Flow Forming Split Process through Stress Analysis

K. H. Won, S. W. Hong, H. S. Park, S. C. Lee, S. J. Hong, S. K. Hyun, S. Y. Kim
(Received July 27, 2022 / Revised November 22, 2022 / Accepted November 23, 2022)

Abstract

The flow forming process consists of a split process, a divide process, and a forming process. The split process is a forming process in which rollers radially permeate a simple disc-shaped forging material and split it in both directions to form a top-bottom bidirectional cup. It is advantageous for post-processing to deepen the forming depth in the split process but this characteristic causes the failure near the edge of the mandrel during the actual process. The split process was analyzed using Rigid Plastic FEM, and the stress analysis of the mandrel was conducted to find the cause of the failure. It was found that the failure occurred due to fatigue accumulation damage caused by repeated residual stress.

Keywords: Flow Forming, Split Process, Rigid Plastic FEM, Stress Analysis, Compressive Stress

1. 서 론

최근 국내 산업뿐만 아니라 세계적으로 자동차 휠, 변속기, 수소고압용기 등 얇은 두께를 지닌 복잡한 형상의 튜브(tube) 또는 원통형 제품을 생산하기 위해 플로우포밍(flow forming) 공정을 적용하고 있다.

플로우포밍은 냉간 소성 가공에 속하며 스피닝(spining) 공정으로, 맨드릴(mandrel) 위에서 연속적인 단계를 거쳐 롤러(roller)가 회전하며 프리폼

(preform)을 압축시키고 늘어나게 하는 변형력을 통해 회전하는 부품을 성형하는 제조공정이다[1]. 플로우포밍은 기계적 특성이 향상된 정밀하고 정확한 생산, 효과적인 재료 활용, 칩 없는 생산, 짧은 공정 시간 그리고 탄력적인 생산 공정이라는 장점을 가지고 있다[2].

본 연구의 성형 제품은 습식 클러치 하우징(wet clutch housing)으로, 내주면에는 치형이 있고 중앙부에는 분리판이 있는 양방향 컵 모양이며 외주면에도 단이 있는 복잡한 형상이다. 단순 디스크 형상의 단조품 소재를 플로우포밍을 통하여 가공 시간과 절삭 손실량을 저감한다.

제품은 스플릿 공정(split process), 디바이드 공정(divide process), 포밍 공정(forming process)을 포함하는 플로우포밍 공정으로 생산된다. 스플릿 공정은 프리폼 반경방향으로 롤러가 세 공정 중 가장 깊게

1. 인하대학교 첨단소재공정공학, 석사과정

2. 인하대학교 첨단소재공정공학, 박사과정

3. 인하대학교 첨단소재공정연구소, 연구원

4. ㈜진명파워텍, 연구소장

Corresponding Author : Manufacturing Innovation School, Inha University

5. 인하대학교 신소재공학과, 교수

E-mail: skhyun@inha.ac.kr, ORCID: 0000-0002-3434-8465

6. 인하대학교 첨단소재공정공학, 연구교수

E-mail: skyfgh@inha.ac.kr, ORCID: 0000-0002-3132-9162

침투하며 맨드릴에 큰 손상을 주는 특징이 있다. 이러한 이유로, 실제 스플릿 공정 중 맨드릴에 균열이 발생하였고 서서히 진전하기 시작하여 공정 약 18,000 회 이후 파손까지 이르러 교체를 진행하였다.

본 연구를 통해 맨드릴의 파손 원인을 분석하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D 를 사용하여 스플릿 공정 성형 해석을 수행하였고, 결과를 바탕으로 맨드릴 응력 해석을 수행하였다. 파손의 원인을 분석하기 위해 맨드릴의 응력을 산출하여 평가하였다.

2. 플로우포밍 스플릿 공정

2.1 프리폼 및 금형

2.1.1 프리폼

프리폼은 플로우포밍을 통하여 완제품으로 성형되기 전, 환봉 형태의 모재를 열간단조한 것으로 형상은 외경 약 200 mm 의 Fig. 1 과 같다. 프리폼의 소재는 탄소강인 S20C 이며, 플로우포밍 산업에서 널리 사용되는 강종이다.

해석에 적용할 물성 확보를 위해 인장 시험을 진행하였다. 인장 시편은 KS B 0801 의 13 호에 맞춰 Fig. 2 의 도면에 따라 Fig. 3 과 같이 가공하였으며 KS B 5221 에 따른 시험기를 사용하였다. KS B 0802 에서 규정한 인장 시험 방법에 따른 시험 결과로서 기계적 물성은 Table 1 과 같고, 인장 시험 결과는 Fig. 4 와 같다.



Fig. 1 Hot forged S20C preform

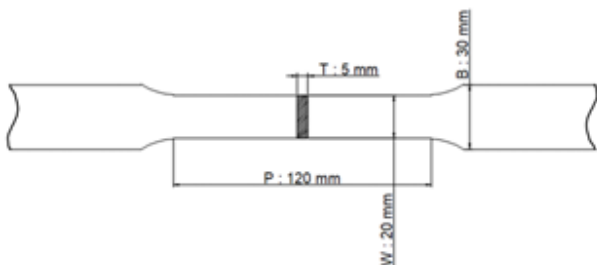


Fig. 2 Drawing of tensile test specimen of preform



Fig. 3 Tensile test specimen of preform

Table 1 Mechanical properties of preform

Elastic Modulus	213.62 GPa
Tensile Yield Strength	280.53 MPa
Tensile Ultimate Strength	488.33 MPa

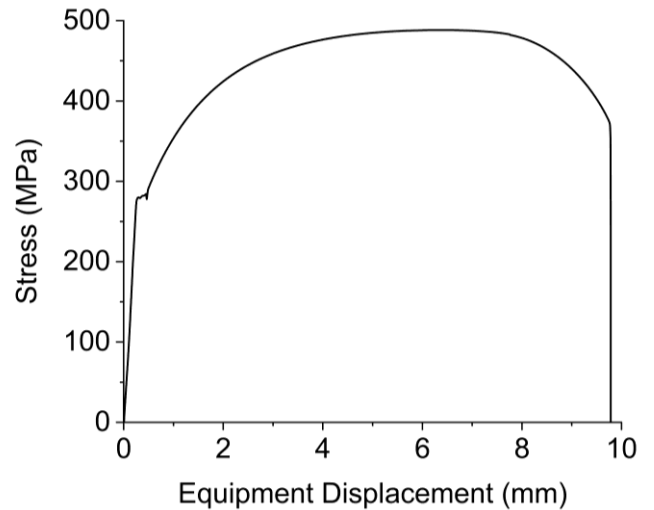


Fig. 4 Tensile test result of preform

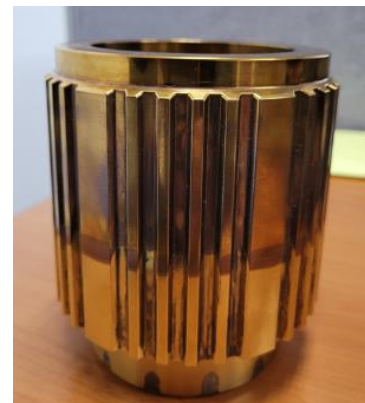


Fig. 5 SKD11 splined-mandrel

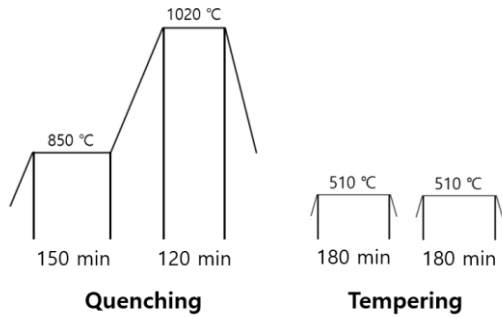


Fig. 6 Vacuum heat treatment process of SKD11



Fig. 7 Hardness test specimen of mandrel

2.1.2 맨드릴 및 롤러

맨드릴의 소재는 냉간 금형 합금 공구강인 SKD11이며 Fig. 5 와 같은 스플라인 맨드릴(splined-mandrel)이다. 내부적으로 얇은 벽의 원통형 금속을 단일 성형 공정으로 생성할 수 있다는 점에서 플로우포밍에 스플라인 맨드릴을 적용하는 것이 비용 절감 등에 유리하다[3]. 하지만, 복잡한 형상을 가지고 있어 취약부가 많아 교체주기가 짧은 단점을 가지고 있다. 따라서, 맨드릴은 Fig. 6 과 같이 2 단 가열 후 1020 °C에서 담금질한 후, 510 °C에서 뜨임을 2 번 진행 하는 진공 열처리를 실시한다.

열처리 후 K S D 3753 에 명시된 58 HRC 이상의 경도 범위에 포함되는지 평가하기 위해 Fig. 7 과 같이 마운팅(mounting)한 시편을 연마하여 경도를 측정 한 결과, 59.2 HRC 로 규격의 조건을 만족하였다. 이러한 맨드릴의 경도값을 통해 형상 정확도를 유지할 수 있고 실제 플로우포밍 공정에서 프리폼 하중 및 탈거로 인해 발생할 수 있는 스크래치를 방지할 수 있다[4].

맨드릴 응력 해석을 수행하는데 앞서, 물성 확보를 위한 인장 시험을 진행하였다. 맨드릴의 길이 및 두께 제약으로 인해 도면 Fig. 8 을 적용하여 Fig. 9 의 인장 시편을 제작하였다. K S B 0802 인장 시험 방법

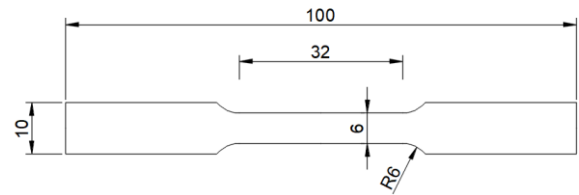


Fig. 8 Drawing of tensile test specimen of mandrel (Unit : mm)



Fig. 9 Tensile test specimen of mandrel

Table 2 Mechanical properties of mandrel

Hardness	59.2 HRC
Elastic Modulus	206.75 GPa

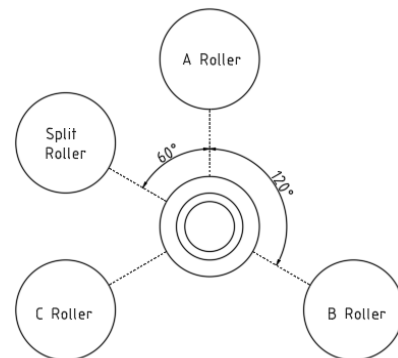


Fig. 10 Positions for each roller

에 따라 시험을 진행하였으며, 그 결과로 맨드릴 응력 해석에 필요한 206.75 GPa 의 탄성 계수를 얻었다. 측정된 SKD11 의 경도와 탄성계수를 Table 2 에 나타내었다.

플로우포밍용 롤러는 Fig. 9 와 같이 A, B, C 및 스플릿(split) 롤러 총 4 가지이며 소재는 맨드릴과 같은 SKD11 이다.

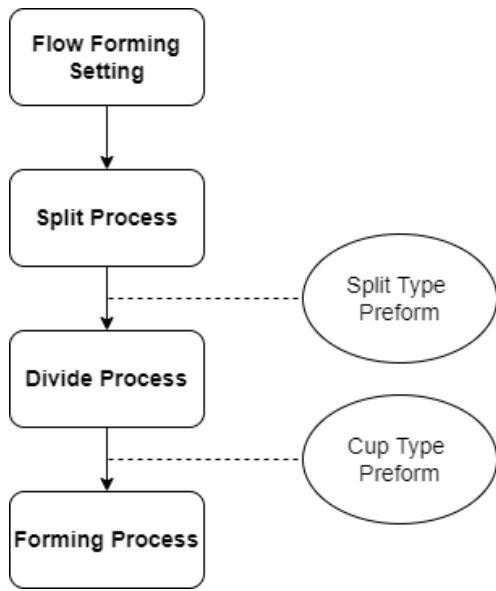


Fig. 11 Flowchart for the flow forming of wet clutch housing

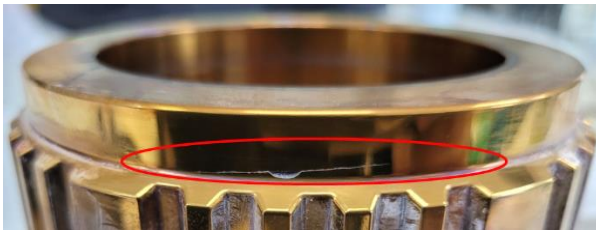


Fig. 12 Crack shape near the edge of mandrel



Fig. 13 Crack shape on the cross section of mandrel

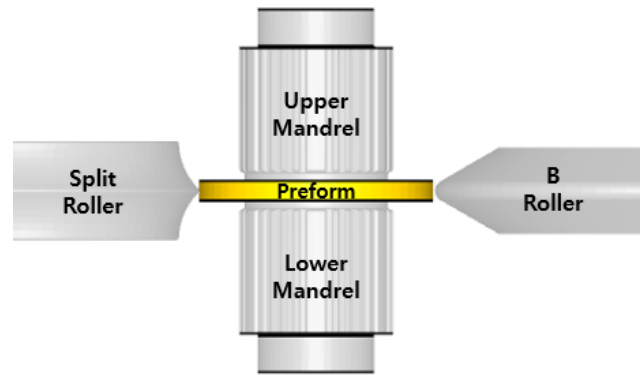


Fig. 14 Assembly and definition of each part

2.2 스플릿 공정 성형 해석

본 연구의 전반적인 습식 클러치 하우징 플로우포밍은 Fig. 11 과 같이 이루어진다.

스플릿 공정은 B 롤러와 스플릿 롤러만 사용하는 양방향 플로우포밍이며 롤러가 프리폼의 반경 방향으로 침투하며 분할시킨다. 공정 중에는 스플릿 롤러가 프리폼의 형상에 직접적인 영향을 주며, B 롤러는 프리폼이 축 대칭 형상을 가질 수 있도록 보조하는 역할을 한다. 스플릿 공정에서 롤러의 가공 깊이를 최대한 늘려야 후공정에 유리하다.

디바이드 공정은 스플릿형 프리폼(split type preform)을 성형하여 컵형 프리폼(cup type preform)으로 변환시키는 공정이다. 디바이드 공정은 A, B, C 및 스플릿 롤러를 사용하며 반경 방향으로 롤러가 침투하는 스플릿 공정과 달리, 스플릿 공정이 완료된 스플릿형 프리폼을 축 방향 가공을 통하여 컵형 프리폼

으로 변형시킨다.

포밍 공정은 디바이드 공정 이후 롤러가 반경 방향과 축 방향 모두 침투하는 공정으로, 복잡한 형상의 완제품을 만드는 데에 가장 중요한 공정이며 최종 공정이다. 이 공정에서는 스플릿 롤러를 제외한 나머지 A, B, C 롤러를 공정에 사용한다.

스플릿 공정 중에 맨드릴 모서리부에 균열이 발생하였고, 진전하기 시작하여 Fig. 12 과 같이 파손이 발생하였으며 파손 중심부의 단면을 확인한 결과, Fig. 13 과 같은 형상을 확인할 수 있었다.

따라서, 플로우포밍 스플릿 공정 성형 해석을 수행하여 프리폼의 형상과 응력 등 맨드릴 파손에 영향을 줄 수 있는 요소들을 평가하고자 한다. 성형 해석에 적용하는 프리폼, 롤러, 맨드릴의 도면 조립 형상과 각 부품의 명칭은 Fig. 14 에 도시하였다.

Table 3 Behavior of split process analysis model

Preform	Rigid-Plastic
Mandrel	Rigid
Split Roller	Rigid
B Roller	Rigid

Table 4 Mesh properties of preform

Method	Tetrahedron
Elements	227,272
Size	1.44 mm

Table 5 Boundary Condition of Dies

Die	Feed (mm/min)	Forming Depth (mm)	Coefficient of friction with preform
Split Roller	100	29.7	0.12
B Roller	100	28.5	0.12

2.2.1 스플릿 공정 성형 해석 조건

플로우포밍 공정은 점진성형의 일종으로 유한요소해석의 관점에서 보았을 때 해석 시간이 길다는 단점이 있다[5]. 이에 따라 해석 시간을 줄이기 위해 플로우포밍 공정 성형해석에서 널리 사용되고 있는 강소성체 유한요소법을 적용한다[6].

성형 해석은 상용 유한요소해석 프로그램이며 범용적으로 사용되고 있는 SFTC 사의 DEFORM-3D 를 사용한다. 플로우포밍 공정은 롤러가 고속으로 이동하여 접촉점이 빠르게 이동하고 공정이 길기 때문에 Explicit Solver 를 적용한다[7]. 해석 모델의 거동은 Table 3 과 같이 설정하며 해석 대상인 프리폼은 Table 4 와 같은 조건으로 메쉬(mesh)를 생성한다.

실제 이루어진 플로우포밍 스플릿 공정 모사를 위해 Table 5 와 같이 각 롤러의 피드 값, 가공 깊이, 윤활 작용 조건을 적용한 프리폼과의 마찰계수를 설정한다. 각 롤러는 원주방향으로 구속 조건을 주지 않고 맨드릴에 220 RPM 의 각속도를 적용한다.

맨드릴과 동일 방향으로 회전하는 프리폼의 반경 방향으로 각 롤러를 이송시켜 각속도를 부여한 회전체에 동기화되도록 설정한다. Fig. 15 는 각 롤러의 침투 방향, Fig. 16 은 맨드릴의 회전 방향과 그에 동기화된 롤러의 회전 방향을 가리킨다.

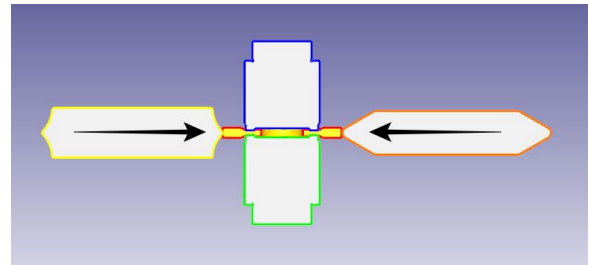


Fig. 15 Radial direction of rollers

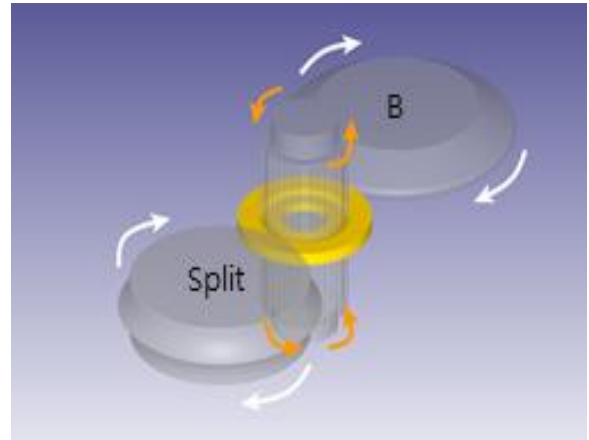


Fig. 16 Rotation direction of dies

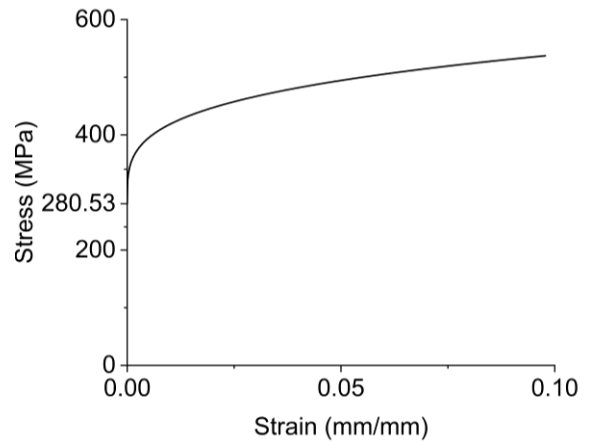


Fig. 17 Flow stress curve of preform

해석을 위한 프리폼의 물성은 인장 시험을 통해 확보한 Table 1 의 탄성 계수를 적용하며 포아송비는 기계구조용 탄소강의 보편적인 값인 0.3 을 적용한다. 밀도는 DEFORM-3D 에서 제공하는 S20C 의 7870 kg/m³을 적용한다. 유동 응력은 Ludwik[8]이 제안한

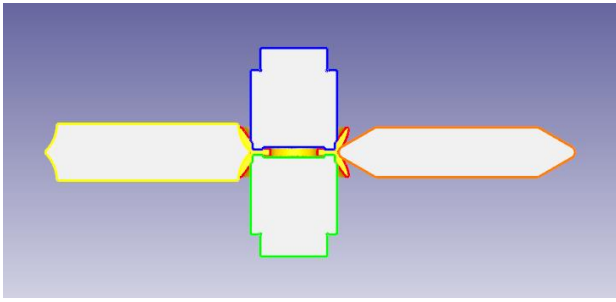


Fig. 18 Section shape result of split process analysis

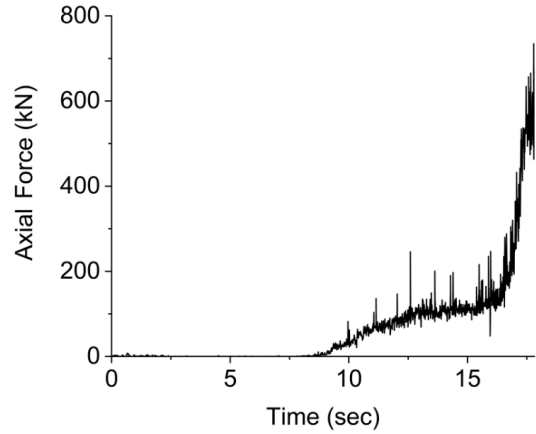


Fig. 20 Axial force diagram of mandrel

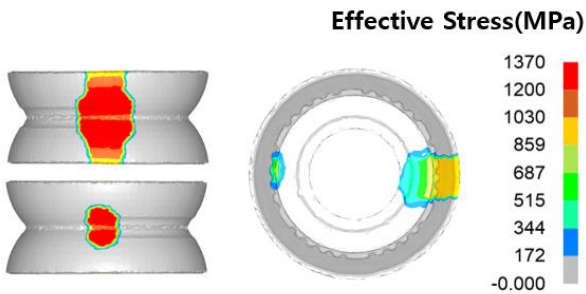


Fig. 19 Effective stress result of preform



Fig. 21 Section shape showing the contact area for each part at 16.893 sec

항복응력 항이 포함된 구성방정식, 식 (1)을 계산해 적용한다.

$$\sigma = \sigma_0 + K(\epsilon^p)^n \quad (1)$$

여기서, σ_0 는 항복응력이며 K 는 강도계수, ϵ_p 는 소성 변형률, n 은 변형률 경화지수이다. 항복강도와 인장강도를 적용하여 K 는 483.963, n 은 0.27244의 값을 얻었고, 이를 적용하여 Fig. 17의 유동 응력 곡선을 산출하였다.

플로우포밍 공정의 축 방향, 반경 방향, 원주 방향의 세 방향 힘은 다양한 재료 및 기하학적 조건 형성을 위한 제품을 설계하는 데 중요한 역할을 한다[9]. 양방향 공정인 플로우포밍 스플릿 공정의 맨드릴은 축이 고정되어 있고, 두 롤러가 프리폼을 분할하기 때문에 축 방향 하중이 나머지 방향 보다 높은 값을 보인다. 스플릿 공정에서 롤러의 가공 깊이를 최대한 늘려야 유리하지만, 설비 부하를 감안하여 선정해야 하므로 맨드릴의 축 방향 하중을 최소화시켜 결함을 방지해야 한다[10]. 그러므로, 맨드릴 파손 원인을 파악하기 위해 강제로 설정한 맨드릴의 축방향 하중을 평가하고자 한다.



Fig. 22 Section shape showing contact area for each part at 17.039 sec

2.2.2 스플릿 공정 성형 해석 결과

플로우포밍 스플릿 공정 성형 해석을 수행한 결과, 스플릿 공정의 최종 결과로써 Fig. 18과 같은 단면 형상을 확인할 수 있다. 강소성체로 해석된 프리폼의 유효응력은 Fig. 19와 같이 나타났으며 스플릿 롤러 부근에서 B 롤러가 위치한 반대편보다 더 높은 유효응력을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

맨드릴의 축 방향 하중을 그래프로 나타낸 결과, Fig. 20과 같이 나타났으며 약 17초 이후에 하중이 급격하게 증가하여 최대 734.61 kN의 하중을 받는다는 것을 확인하였다.

급격한 하중 변화의 원인을 파악하기 위해 17초 전후의 맨드릴과 프리폼의 접촉에 대해 성형 해석 결과를 추적해보았다. 17초 전후 스텝인 해석 시간

16.893 초와 17.039 초의 부품별 접촉을 나타낸 단면 형상을 각각 Fig. 21 과 Fig. 22 에 나타내었으며 표시한 타원 구역은 프리폼과 맨드릴의 접촉 구역이다. 이를 통해, 공정 약 17 초부터 맨드릴과 프리폼의 접촉 면적이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으며 프리폼이 파손 발생 부위인 맨드릴 모서리부에 닿기 시작하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 맨드릴의 급격한 축방향 하중 증가로 이어짐을 확인할 수 있다.

3. 맨드릴의 응력 해석 및 파손 원인 분석

맨드릴의 소재인 SKD11 은 경도가 높아질수록 취성이 강해지는 성질이 있다[11]. 59.2 HRC 의 높은 경도를 지닌 맨드릴은 강한 취성을 띄며 소성변형이 거의 없이 곧바로 파괴가 이루어진다.

플로우포밍은 압축력만 적용하여 프리폼을 소성변형시키는 공정으로 DIN Standard 8583 에 명시되어 있으며 회전하는 부품인 맨드릴은 인장응력보다 압축응력을 많이 받는다[12].

이에 따라, 맨드릴의 압축응력을 평가하기 위해 압축피로수명과 함께 압축항복강도, 압축강도 등을 응력 해석 결과와 비교하여 파손 원인을 분석하고자 한다.

3.1 맨드릴의 응력 해석 조건

응력장은 DEFORM-3D 의 금형 응력 모듈(module) 을 사용하여 구한다. 금형 응력 모듈을 통해 맨드릴이 받는 하중에 따른 힘 보간으로 탄성 해석을 진행한다. 따라서, Fig. 23 과 같이 하중 영향을 받지 않는 맨드릴 하부 면을 고정하는 경계 조건을 세운다. 프리폼과 롤러를 제외한 맨드릴만을 대상으로 해석을 진행하며, 성형 해석에서 강체로 설정하였던 맨드릴을 탄성체로 설정하고 Table 6 의 조건으로 메쉬를 생성한다. 맨드릴 응력 해석의 경우, 정적해석을 진행하기 때문에 Implicit Solver 로 진행한다. 해석을 위한 맨드릴의 탄성계수는 인장시험을 통해 확보한 Table 2 의 값을 적용하며 포아송비는 냉간 금형 합금 공구강의 보편적인 값인 0.3 을 적용한다. 파손 부위인 맨드릴 모서리부 근처를 응력장 범위로 설정하여 시간 스텝(time step)당 맨드릴의 압축응력을 구한다.

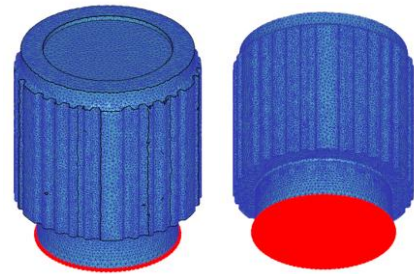


Fig. 23 Lower surface fixation

Table 6 Mesh properties of mandrel

Method	Tetrahedron
Elements	294,285
Size	1.19 mm

Table 7 Variables of compression fatigue life

Mean Stress		$\sigma_{min} / 2$
σ_m		
Stress amplitude		$ \sigma_{min} / 2 $
σ_a		
10 ³ cycles	σ_m / MPa	-1400
	σ_a / MPa	1400
10 ⁴ cycles	σ_m / MPa	-1360
	σ_a / MPa	1360
10 ⁵ cycles	σ_m / MPa	-1320
	σ_a / MPa	1320

3.2 맨드릴 응력 해석

응력 해석에 앞서, SKD11 의 압축피로수명에 대하여 조사하였으며 Table 7[13]과 같이 나타난다. 해석 결과의 압축응력은 주응력이 음의 값을 나타내므로 Fig. 24 에 맨드릴의 소재인 SKD11 의 경도 59.2 HRC 기준 압축항복강도 2150 MPa 과 압축강도 2950 MPa 또한 음의 값으로 표기한다[14].

또한, Fig. 23 에 압축피로수명이 100,000 사이클(cycles)일 때의 압축응력 2640 MPa 을 일점쇄선으로 표시하고 1,000 사이클일 때의 압축응력 2800 MPa 을 이점쇄선으로 Table 8 에 따라 표시한다. 스플릿 공정 시 맨드릴의 응력 해석 결과로 시간에 따른 응력장 범위 내 최소 주응력을 Fig. 25 에 나타냈다.

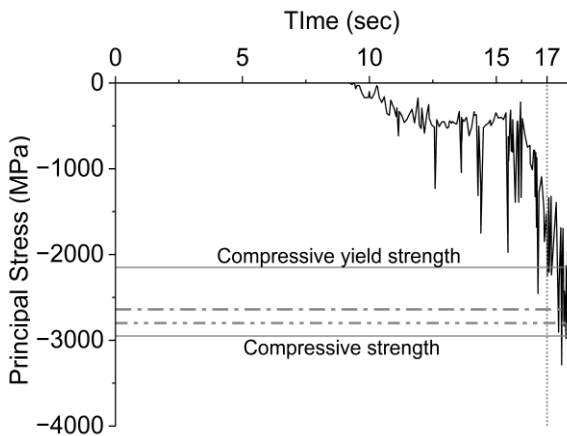


Fig. 24 Minimum principal stress diagram of the mandrel

Table 8 Line definition of principal stress diagram

Line Type	Definition	Principal Stress
Dash-single dotted line	Stress of Compression Fatigue life at 10^5 cycles	-2640 MPa
Dash-double dotted line	Stress of Compression Fatigue life at 10^3 cycles	-2800 MPa

공정 17 초 이후 맨드릴의 축 방향 하중이 급격하게 증가한 것을 Fig. 19에서 확인할 수 있는 것과 같이 Fig. 22의 주응력이 공정 17 초 이후 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 17.457 초에 산출된 압축강도 2950 MPa를 초과한 주응력 -3285.35 MPa를 제외한 공정 17 초 이후 대부분 구간에서 압축강도를 넘지 않는 주응력이 산출되었다. 또한, Fig. 25를 통해 공정 종료 시 맨드릴 주응력 분포가 파손 부위를 나타낸 Fig. 12와 동일한 부위인 맨드릴 모서리부에 나타난 것을 확인할 수 있다.

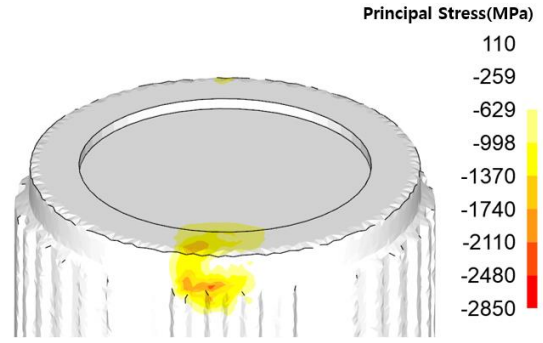


Fig. 25 Principal stress distribution of mandrel at the end of the process

3.3 응력 해석을 통한 파손 원인 분석

응력 해석을 실시한 결과, 공정 17 초 이후부터 압축항복강도를 초과하여 맨드릴이 소성영역에 진입하였으며, 공정 17.457 초에는 압축강도 2950 MPa를 초과하는 응력이 산출되기도 하였다. 이러한 이유는 Fig. 21과 Fig. 22에서 나타난 맨드릴과 프리폼의 접촉 면적의 변화로 인한 맨드릴의 급격한 축하중 증가가 공정 17 초 이후 급격한 응력 증가를 야기했다는 점을 통해 확인하였다. Fig. 24의 공정 후반부의 결과에서 실제 현장 조건을 완벽히 모사하지 못했다는 점을 감안하여 압축강도가 넘는 한 점을 제외하면 압축항복강도 이상의 응력 분포 구간의 스플릿 공정에서 맨드릴에 균열이 발생하였으며, 발생 지점은 Fig. 25를 통해 Fig. 12와 동일한 지점인 맨드릴 모서리부임을 알 수 있다.

실제 플로우포밍 공정에서 약 18,000 회를 진행한 후 맨드릴의 파손이 일어났으며, 이는 Fig. 24를 통하여 파손이 압축항복강도 이상의 응력 범위에서 발생하였음을 알 수 있다. 또한, 스플릿 공정 중 회전하는 맨드릴과 동기화되어 움직이는 프리폼과 롤러가 닿지 않는 구간에서 맨드릴의 압축항복강도를 넘은 압축응력으로부터 맨드릴이 탄성 구간으로 반복적으로 복귀거동을 하며 발생하는 인장잔류응력이 연속반복 공정으로 인해 누적피로손상으로 균열이 발생하였을 것으로 추정한다.

결과적으로, 맨드릴의 파손은 반복된 잔류응력으로 인한 균열의 발생 및 진전에 따른 피로누적현상에 의거하여 일어난 것으로 분석된다.

따라서, 이를 방지하기 위해 롤러의 가공 깊이를 최대한 늘려야 후공정에 유리한 스플릿 공정의 특성에 따라 롤러의 침투 깊이를 최대한 깊게 하고

피드 값을 높게 설정을 해야 하지만, 맨드릴의 수명을 늘리기 위해 압축항복강도가 넘지 않는 공정 17 초 이전까지 조건을 변경해야 할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 플로우포밍 스플릿 공정 시 맨드릴의 파손 원인을 DEFORM-3D 를 사용해 분석하였으며, 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

(1) 공정 성형 해석을 수행하여 17 초 이후 프리폼과 맨드릴의 접촉 면적이 크게 증가하여 맨드릴이 받는 축방향하중이 734.61 kN 까지 급격하게 늘어나는 것을 확인하였다.

(2) 맨드릴 응력 해석을 수행하여 압축응력을 평가하기 위해 주응력을 결과값으로 산출하였으며 공정 17 초 이후 압축항복강도 2150 MPa 를 넘어 응력이 급격하게 증가하는 것을 확인하였고, 압축강도에 가까운 응력이 산출되었다.

(3) 맨드릴에 압축항복강도를 넘은 압축응력이 가해지면서 공정 중에 반복으로 누적된 인장 잔류응력으로 인해 맨드릴 모서리부 균열이 발생하고 연속반복작업으로 진전되어 공정 약 18,000 회에 이르러 파손이 일어난 것으로 분석한다.

(4) 성형 해석 결과를 바탕으로 스플릿 공정은 프리폼과 맨드릴 모서리부가 닿는 공정 17 초를 기준으로 롤러 침투 깊이를 설정하거나 피드 값 조정이 필요함을 제시하였다.

(5) 플로우포밍 공정 성형해석을 진행할 경우, 오랜 해석 시간이 필요하다는 단점이 있으며 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로써 강소성체 유한요소 해석을 진행하여 프리폼의 성형해석을 진행한 후, 맨드릴의 응력해석을 진행할 것을 제안한다.

(5) 본 연구는 습식 클러치 하우징 플로우포밍 공정에 적용되는 스플릿 공정, 디바이드 공정, 포밍 공정 중 스플릿 공정에 대해 다루었으며, 플로우포밍을 적용하는 산업 분야에서 널리 활용될 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 2021 년도 산업통산자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20016425')

REFERENCES

- [1] Marini, D., Cunningham, D., Xirouchakis, P., & Corney, J., 2016, Flow forming: A review of research methodologies, prediction models and their applications, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, Vol. 7, No. 5, pp. 285~315.
- [2] B. Avitzur, 1983, *Handbook of Metal Forming Process*, John Wiley and Sons, Inc., Canada, pp. 73~148.
<https://doi.org/10.1007/s12046-018-0979-7>.
- [3] Haghshenas, M., Jhaver, M., Klassen, R. J., & Wood, J. T., 2011, Plastic strain distribution during splined-mandrel flow forming, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3629~3636,
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.014>.
- [4] Podder, B., Banerjee, P., Ramesh Kumar, K., & Hui, N. B., 2018, Flow forming of thin-walled precision shells, *Sādhanā*, Vol. 43, No. 12, pp. 1~16,
<https://doi.org/10.1007/s12046-018-0979-7>
- [5] J. G. Eom, S. M. Hong, M. S. Joun, 2017, Practical finite element analysis of a flow forming process, *Trans. Mater. Process*, pp. 201~202.
- [6] Cheong, W. C., Kam, H. K., Wang, C. C., & Lim, Y. P., 2013, Study of cold rotary forming by using rigid-plastic finite element method, Vol. 626, pp. 662~666,
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.662>
- [7] J. S. Sun, K. H. Lee, H. P. Lee, 2000, Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problem, Vol. 105, pp. 110~118,
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00580-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00580-X)
- [8] Ludwik, P., 1909, *Elemente der technologischen Mechanik*, Springer.
- [9] Bhatt, R. J., & Raval, H. K., 2017, Optimization of process parameters during flow forming process and its verification, *Mechanics*, Vol. 23, No. 4, pp. 581~587,
<https://doi.org/10.5755/j01.mech.23.4.15138>.
- [10] Kim, N., Kim, H., & Jin, K., 2013, Minimizing the axial force and the material build-up in the tube flow forming process, *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 2, pp. 259~266,
<https://doi.org/10.1007/s12541-013-0036-8>
- [11] Tang, L., Gao, C., Huang, J., Zhang, H., & Chang, W., 2013, Dry sliding friction and wear behaviour of

- hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels, *Tribol. Int.*, Vol. 66, pp. 165~173, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.05.006>
- [12] Quigley, E., & Monaghan, J, 2000, Metal forming: an analysis of spinning processes, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 103(1), pp. 114~119, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00394-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00394-0)
- [13] Wang, C., Kam, H., & Wang, X, 2018, Determination of shrink fitting ratio to improve fatigue life of 2-layer compound forging die by considering elasto-plastic deformation of outer ring, *Procedia Manuf.*, Vol. 15, pp. 481~487, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.256>.
- [14] ASSAB Global, ASSAB XW-42, 2021, <https://www.assab.com/en/product/tool-steel/cold-work/>