

## 드릴가공시 버 형성에 관한 등가 2차원 모델을 이용한 유한요소해석

이정구\*, 고성림#, 고대철\*\*

### Finite Element Analysis using Equivalent 2D Model for Exit Burr Formation in Drilling

Jing Koo Lee\*, Sung Lim Ko# and Dae Cheol Ko\*\*

#### ABSTRACT

The formation of exit burr in drilling metals is analyzed by finite element method. The simplified burr formation model is suggested for the complex mechanism of burr formation in drilling on the basis of experimental data. Using the model the magnitude of burr is predicted and the effect of material properties of workpiece and cutting condition on burr formation is analyzed in the present study. The suggested model is verified by comparing simulation results and experimental ones. The predicted size and shape of burr are in good agreement with those observed by experiment.

**Key Words** : Drill(구멍가공), Burr Formation(버 형성), Finite Element Method(유한요소법), Equivalent 2D model(등가 2차원모델)

#### 1. 서론

드릴가공은 절삭가공 공정 중에서 약 30% 이상을 차지하는 중요한 공정으로 자동차 부품, 항공기 부품, 전자제품 및 프린트 기관 등의 구멍가공에 널리 적용되고 있다. 드릴가공에서 드릴주위의 재료가 소성 변형할 때 입구면에 생성되는 버를 입구 버(entrance burr)라 하며, 피삭재의 출구면에 생성되는 버를 출구 버(exit burr)라 한다. 이와 같이 드릴가공에서 발생하는 버는 가공 후 치수정밀도와 생산공정의 자동화에 있어서 많은 문제를 야기하므로 효율적인 버 제거 및 버 발생 최소화를 위한 기술

은 상당히 중요하다고 생각된다. 특히, 드릴가공에서 출구 버가 입구 버에 비해 훨씬 크기 때문에 드릴가공에서 버와 관련된 대부분의 문제는 출구 버에 의해 야기된다. 따라서 드릴가공에서 발생하는 버에 관한 대부분의 연구는 출구 버에 집중되어 있다.

드릴가공에서 버 형성에 관한 이전의 연구는 많은 변수의 영향을 받는 버 형성의 복잡성 때문에 실험적 연구에 제한되어 있다. Haggerty<sup>1</sup>는 드릴형상에 대한 여러 가지 형태의 버 형상을 관찰하였다. Gillespie<sup>2-4</sup>는 드릴형상, 공정조건, 재료 물성치에 대한 영향을 실험하여 드릴 버 형성에 관한 기

\*\* 2002년 11월 19일 접수  
\* 경기공업대학 기계계열  
# 교신저자, 건국대학교 기계설계학과  
Email slko@konkuk.ac.kr Tel. (02) 450-3465  
\*\* 양산대학 메카트로닉스과

본적인 메카니즘을 제시하였다. Pande와 Relekar<sup>5</sup>는 버 높이 및 두께에 대한 드릴직경, 이송, 직경 대 길이비, 재료경도의 영향을 조사하였다. 그들의 연구는 앞서 언급한 변수들이 드릴 버 형성을 최소화 하는 최적의 범위가 있음을 밝혔다. Stein<sup>6,7</sup>은 스테인레스 강의 미세구멍 드릴가공에서 버 형성을 실험적으로 연구하였으며, 이송량이 크고 절삭속도가 크고 공구마모가 많을수록 버의 크기가 증가함을 입증하였다.

한편 드릴가공의 버 형성을 해석적으로 모델링 한 연구는 거의 없는 실정이다. Sofronas<sup>8</sup>는 드릴 버 형성의 해석모델을 최초로 제시하고 드릴 선단각 (point angle), 헬렉스각, 이송량, 전단강도, 드릴직경의 함수로서 버의 크기와 두께를 조사하였다. 여러 가지 실험조건하에서 Shikata<sup>9</sup> 등에 의해 비슷한 경향의 연구결과가 제시되었다. Miyake<sup>10</sup> 등은 드릴가공에서 버 형성에 관한 모델을 제시하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 제시된 모델의 검증에 위해 실험을 행하였다. Saunders와 Mauch<sup>11</sup>는 드릴 가공되는 재료를 원형 평판으로 모델링하여 드릴가공시 발생하는 출구 버를 해석하고 알루미늄을 이용한 실험결과와 비교하였다. Guo와 Dornfeld<sup>12</sup>는 드릴 설계를 위한 CAD 모듈과 드릴가공 버의 예측을 위한 유한요소해석 모듈을 통합한 시스템을 개발하였다. 최근에 Min<sup>13,14</sup> 등은 주어진 가공조건하에서 드릴가공 버의 예측과 제어를 위한 도구로서 실험결과를 토대로 드릴가공 버의 제어 흐름도를 개발하였으며, Ko와 Lee<sup>15</sup>는 드릴가공의 정밀도와 생산성 향상을 위해 새로운 개념의 드릴을 개발하고 이를 이용한 드릴가공시 발생하는 버 형성을 일반드릴을 사용한 경우의 버 형성과 비교하였다. 그러나 위에서 언급된 대부분의 연구들은 드릴가공 버의 형성이 많은 변수들에 의해 영향을 받는 복잡성 때문에 비교적 단순한 모델로서 버의 형성을 예측하였으므로 보다 신뢰성 있는 해석모델의 개발이 요구된다.

Y. B. Guo와 D. A. Dornfeld<sup>12</sup>는 드릴가공시 버 형성을 해석하기 위해 상용유한요소코드인 ABAQUS를 활용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 칩 및 버 형성을 위한 연성파단기준을 도입하여 드릴가공을 시뮬레이션 하였다. 이러한 유한요소해석은 3차원 해석이므로 워크스테이션과 같은 대용량의 컴퓨터가 필요하며, 이를 해석하기 위하여 수십시간이나 소요되는 특징이 있다. 또한 드릴가공에서 버 형성을 시뮬레이션하기 위해 3차원 유한요소모델과 연성파단기준을 도입하였으나,

칩 및 버 형성 단계에서 적용되는 연성파단기준의 기준값은 시행착오적으로 시뮬레이션 수행자에 의해 적절히 결정함으로써 해석결과 신뢰성에 약간의 문제가 내포되어 있다고 생각한다. 또한 3차원 드릴가공의 유한요소해석을 위해 피삭재의 영역을 정상상태의 드릴링이 행해지는 영역, 버의 생성 영역, 버 형성완료 영역, 기타 영역 등으로 임의로 나누어 모델링함으로써 버 형성을 정량적으로 예측하지 못하였으며 이에 따라서 상당히 많은 오차를 포함한 해석결과(버 형성의 정량적 예측)를 제시할 수 밖에 없다.

그러나 본 연구에서는 비록 2차원 유한요소해석을 수행하였으나, 실험을 근거로 도입한 합리적인 등가 2차원 모델로부터 드릴가공시 버 형성의 메카니즘을 파악하고 버 형성의 정량적인 예측이 가능하였다. 또한 드릴가공시 버 형성에 대한 가공조건과 피삭재 재질 등의 영향을 정량적으로 파악할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 유한요소프로그램은 Pentium III급 PC환경하에서 해석결과를 얻는데 약 30분정도 소요되며, 적용된 연성파단기준의 기준값은 실험을 통해 결정할 수 있었다. 따라서 기존에 수행된 3차원 해석방법에 비해 간단하며, 해석시간의 소요가 적고, 해석방법의 일관성이 유지되며, 해석결과 신뢰성 측면에서 우수하다고 판단되므로 드릴가공시 버 형성을 예측할 수 있는 적합한 모델이라 사료된다. 본 연구에서는 2차원 절삭가공의 버 형성에 적용된 방법<sup>16</sup>을 확장하여 드릴가공시 버 형성을 예측하고자 한다. 드릴가공은 복잡한 3차원 가공이므로 이를 효과적으로 시뮬레이션하기 위해 드릴가공의 실험결과를 근거로 2차원 등가모델을 개발하고자 한다. 2차원 등가모델을 활용하여 드릴가공시 형성되는 버에 관한 유한요소해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교하여 그 유용성을 검토해보고자 한다. 또한 절삭조건과 피삭재 재질의 변화에 따른 드릴가공시 버 형성의 영향을 관찰해보고자 한다.

## 2. 이론적 배경

강소성 유한요소법은 대소성 변형의 해석을 위한 가장 유용한 방법이므로, 본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 드릴가공의 해석을 수행하였다. 강소성 재료에 대하여 비압축성 조건을 고려한 일차 변분 범함수(functional),  $\delta\pi$ 는 다음과 같다.<sup>17,18</sup>

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta\dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률,  $K$ 는 비압축성 조건을 고려하기 위해 도입한 벌칙함수 (penalty function),  $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률속도이다. 위의 식(1)은 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우튼-랩슨법을 이용하여 해를 구한다.

드릴가공에서 버 형성 중에 일어나는 파단의 발생과 전파현상을 시뮬레이션하기 위해 연성파단기준과 요소제거기법을 도입하였다<sup>16</sup>. 버 형성 중에 일어나는 파단의 예측을 위해 수정된 Cockcroft-Latham의 연성파단기준식을 이용하였다. 즉,

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{\sigma^*}{\sigma} \right) d\bar{\epsilon} = C \quad (2)$$

여기서  $\bar{\epsilon}_f$ 는 파단시 유효변형률,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률,  $\sigma^*$ 는 주인장응력의 최대치,  $C$ 는 재료상수이다. 가공공정동안 주인장응력의 최대치와 유효응력의 비가 일정하게 유지된다고 가정하면 위의 식(2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} d\bar{\epsilon} = C_1 \quad (3)$$

따라서 식(3)으로부터 변형경로를 따라 누적된 유효변형률이 피삭재의 파단변형률에 도달하였을 때 파단이 발생하는 것으로 고려하였다. 파단발생 이후 버 형성 중에 일어나는 파단의 전파를 고려하기 위하여 요소제거기법을 도입하였다. 식(3)에 의해 특정 요소의 유효변형률 값이 재료의 파단 유효변형률에 도달하면 그 요소의 강성 값에 감속계수 (reduction factor)를 곱하여 강성 값을 매우 작게 함으로써 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하게 하였다. 즉,

$$r_f \mathbf{K}_e \Delta \mathbf{v} = \mathbf{L}_e \quad (4)$$

여기서  $r_f$ 는 감속계수,  $\mathbf{K}_e$ 와  $\mathbf{L}_e$ 는 요소수준의 강성행렬 및 로드벡터,  $\mathbf{v}$ 는 절점속도벡터이다. 이상

에서 언급된 연성파단기준과 요소제거기법을 연계한 강소성 유한요소법을 활용하여 드릴가공시 버 형성을 시뮬레이션 하였다.

### 3. 드릴가공시 버 형성의 유한요소해석

드릴가공은 복잡한 3차원 가공이므로 효과적인 시뮬레이션을 위해 드릴가공 실험을 수행하였다. 실험결과와 관찰을 통해 드릴가공시 발생하는 버 형성의 메카니즘을 파악하고 이러한 결과를 근거로 2차원 등가모델을 개발하였다. 2차원 등가모델을 활용하여 드릴가공시 형성되는 버에 관한 유한요소 해석을 수행하여 버의 크기를 예측하고 이를 실험 결과와 정량적으로 비교해 보았다.

#### 3.1 드릴가공 실험

드릴 선단각이 140°, 드릴 코너부의 반경, R이 0.1mm인 SHD 드릴을 사용하여 Al6061-T6 재료의 드릴가공 실험결과는 Fig. 1과 같다. 단계별로 드릴의 진행 중에 정지후 단면을 EDM에 의해 절단하여 관찰하였다. 드릴가공시 버 형성의 메카니즘을 관찰하기 위하여 Fig. 2와 같이 피삭재 형상에 4가지의 파라메타를 설정하고 이를 측정하였다. 여기서 L은 드릴 외측 모서리와 피삭재 끝면과의 거리, T는 캡의 두께, W는 버의 두께에 해당하는 변형부까지의 거리, r은 피삭재 외측의 반경을 각각 나타낸다. Fig. 1과 Table 1의 #1과 #2에서 보는바와 같이 드릴이 0.1mm씩 진행함에 따라 피삭재의 출구까지의 거리, L이 0.1mm를 남겨두기까지는 캡 두께가 절삭에 의해서 현저하게 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 Fig. 1의 #3 ~ #8에서 드릴 모서리 위치가 피삭재 출구면과 거의 일치되는 상태부터 드릴이 관통하여 버 형성이 완료되고 캡이 탈락된 후까지 캡의 두께는 감소되지 않고 거의 일정함을 볼 수 있다. 이는 Fig. 2에 나타낸 파라메타 값을 측정한 Table 1에서 정량적으로 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 드릴가공시 버 형성의 메카니즘을 파악할 수 있다. 즉, 드릴 모서리 위치가 피삭재 출구면과 거의 일치되는 상태까지 절삭이 진행되고 그 이후부터는 절삭상태가 멈추고 드릴이 캡을 밀고 나가면서 일어나는 소성변형에 의해 버가 형성되기 시작하여 캡이 완전히 탈락함으로써 버의 형성이 최종적으로 완료되는 것으로 생각할 수 있다. 이는 앞 연구의 결과로서 캡(cap)이 형성되는 type B 버형성시 소성변형이 구멍주위에 집중됨으로써

인장과 파단에 의한 균일한 형태의 버를 생성한다.<sup>15</sup>

### 3.2 드릴가공의 유한요소 모델링

복잡한 3차원 드릴가공에 대한 등가의 2차원 모델을 개발하기 위해 3.1절의 실험결과로부터 드릴 모서리 위치가 피삭재 출구면과 일치되는 상태 이후부터는 칩 형성이 멈추고 이송방향으로 드릴공구의 진행에 따른 소성변형의 결과로 버가 형성된다고 가정할 수 있다. 따라서 Fig. 1에서와 같이 칩 형성이 멈추고 소성변형이 시작하는 단계인 #3을 3차원 드릴가공에 대한 등가 2차원 모델로 선정하고 Fig. 2와 Table 1에 나타난 파라메타 값을 정량화하여 시뮬레이션에 이용하였다. 피삭재 바깥부분의 반경, r은 0.228mm이다.

시뮬레이션에 이용된 재료는 실험에 사용된 재료와 동일한 Al6061-T6이며, 이의 기계적 성질은 Table 2와 같다. Fig. 3(a)는 유한요소해석을 위한 초기 격자시스템을 나타내며, 드릴가공을 축대칭형

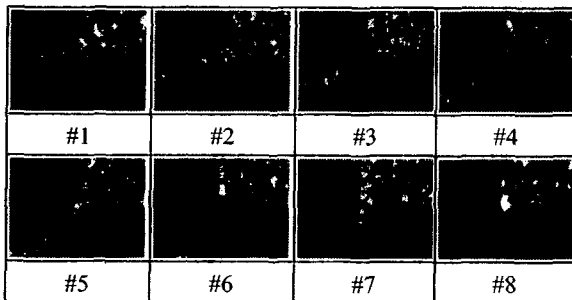


Fig. 1 Observation of burr formation in drilling Al6061-T6

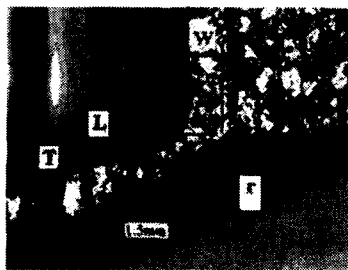


Fig. 2 Parameters(W, T, L, r) of workpiece at drill exit stage

Table 1 Variation of parameters in each step of drill exit stage(Al6061-T6)

No.(#)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
W(mm)	0.22	0.16	0.16	0.1	0.14	0.12	0.12	0.1
T(mm)	0.14	0.13	0.12	0.12	0.1	0.12		
L(mm)	0.2	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.3		

변형으로 가정하여 1/2단면에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 피삭재 출구부는 자유면으로 가정하였으며, 보편적으로 드릴로 가공되는 구멍의 크기에 비해 피삭재의 크기가 상당히 크므로 피삭재의 끝면은 고정하였다.

Table 2 Mechanical properties of workpiece

Property	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Fracture Strain
Workpiece	(kg/mm <sup>2</sup> )	(kg/mm <sup>2</sup> )	(%)	
Al6061-T6	28.1	25.7	17.6	0.65
Al2024-T4	40.2	55	10.3	0.14
SM45C	40.1	68.1	23.4	0.62
SS400	31.5	45.6	35.9	1.05

### 3.3 드릴가공시 버 형성의 시뮬레이션

Fig. 1의 #3에서 Fig. 2에 나타난 L, T, W, r값을 측정하여 유한요소해석의 초기조건으로 모델링한 후 버 형성에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 드릴에 의한 절삭대신에 피삭재의 출구부가 구속되지 않는 상태에서 블랭킹 공정과 유사한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3은 드릴의 진행에 따른 버 형성의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 3(b)에서 피삭재에 백킹이 발생한 후 파단이 시작되었고 백킹부에서 파단의 전파로 인해 캡이 탈락되어 Fig. 3(c)와 같이 버 형성이 완료됨을 볼 수 있다. Fig. 3(d)에서와 같이 시뮬레이션 결과로부터 예측된 버의 높이는 0.24mm이며, 레이저를 이용한 실제 버의 측정결과는 Fig. 4와 같이 0.27mm로 나타났다. Fig. 1의 #8에서와 같이 Al6061-T6의 최종 버 형상은 유한요소법으로 예측된 Fig. 3(d)의 버 형상과 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 이러한 오차는 시뮬레이션에서 초기조건 상태의 불확실성에 의해 초래된 것으로 생각된다. 초기조건 후에도 캡의 대부분은 절삭이 이루어지지 않으나 모서리부에서 국부적인

절삭이 계속될 가능성이 크기 때문이다. 이와 같은 오차는 공구 끝의 선단각이 크고 예리할수록 그 오차가 줄어들 것으로 예측된다. 이것은 등근 모서리나 챔퍼 모서리의 경우 모서리부의 피삭재 강성이 커져서 지속적인 절삭을 허용하기 때문이다. 실제로 Fig. 1의 #3이후에도 약간의 절삭이 드릴 코너부에 발생하여 #8과 같은 예리한 버가 형성된다. 그러나 Fig. 1의 #6에서 캡의 부분이 탈락하는 시점에서 Fig. 3(c), (d)의 캡 탈락부분의 단면형상은 아주 유사한 것을 관찰할 수 있다.

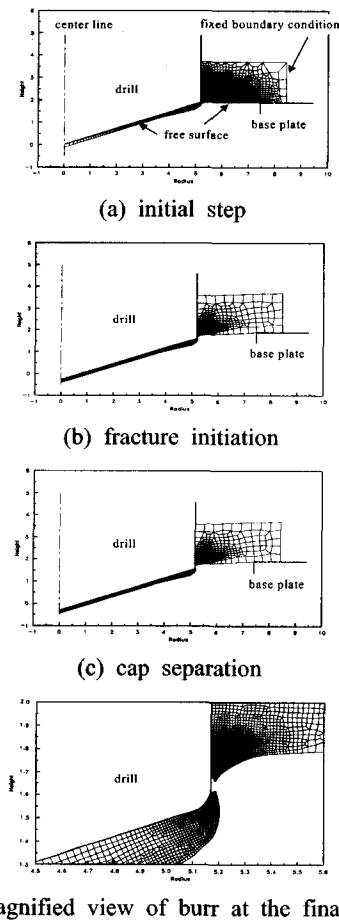


Fig. 3 FE-simulation of burr formation in drilling Al6061-T6

SHD 드릴의 선단각을 동일하게 유지하고 드릴 모서리부의 반경을 0.1mm에서 0.3mm로 변경하여 시뮬레이션해 보았다. 시뮬레이션 결과를 나타낸 Fig. 5에서 최종적인 버의 높이가 0.309mm로 예측

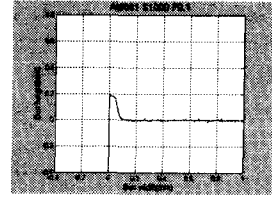


Fig. 4 Measurement of burr in drilling Al6061-T6

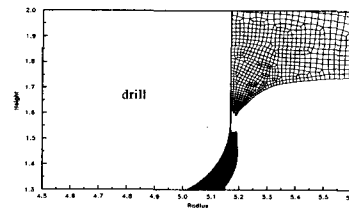


Fig. 5 FE-simulation of burr formation in drilling Al6061-T6 by drill with 0.3mm corner radius

되었다. 이러한 결과로부터 드릴 모서리부의 마모량이 증가하면 버의 크기가 커진다는 것을 정성적으로 예측할 수 있다.

#### 4. 피삭재 변화에 따른 드릴 버 형성

드릴가공에서 피삭재 변화에 따른 버 형성을 관찰하기 위해 Al2024-T4, SM45C, SS400 재료에 대하여 시뮬레이션과 실험을 병행하였다. 연성이 큰 재질과 취성을 나타내는 재료를 사용하여 가능한 모든 형태의 버 형상을 관찰하고자 하였다. 시뮬레이션과 실험에 이용된 재료의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

##### 4.1 Al2024-T4의 드릴가공

등가 2차원 모델을 선정하기 위해서 Al2024-T4에 대한 드릴가공 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 #3에서 보는 바와 같이 드릴 외측 모서리와 피삭재의 출구까지의 거리가 0.09mm에 이를 때까지는 칩 두께가 절삭에 의해서 현저하게 감소함을 볼 수 있다. 또한 #4단계를 거쳐 바로 버가 형성되는 것은 취성이 강하기 때문으로 생각된다. 따라서 칩 형성이 멈추고 소성변형이 시작하는 단계인 Fig. 6의 #3인 경우를 2차원 모델로 선정하여 시뮬레이션에 이용하였다. 측정된 파라메타 값은 Table 3과 같으며, 피삭재 바깥부분의 반경,  $r$ 은 0.31mm이다. Fig. 6의 #3단계를 초기조건

으로 하여 3절과 동일하게 버 형성과정을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 의해 예측된 최종적인 버 형상은 Fig. 7과 같다. 시뮬레이션으로 예측된 버의 높이는 0.09mm이며, Fig. 8의 실제 실험상의 버를 레이저에 의해 측정된 높이는 0.07mm로서 아주 작은 차이를 나타내고 있다. 이는 소성변형이 증가함에 따라 과단이 초기에 발생하여 버가 형성되므로 실제 모서리부에서의 절삭이 거의 일어나지 않기 때문에 해석 값이 측정결과와 유사하게 나타나는 것으로 생각된다. 특히, Fig. 6에서 캡의 탈락 단면 형상으로 보아 취성이 아주 강할 것으로 예측할 수 있으며 시뮬레이션으로 예측된 버 형성결과로부터도 소성변형중에 발생하는 과단에 의해서 버가 형성됨을 Fig. 7로부터 관찰할 수 있다.

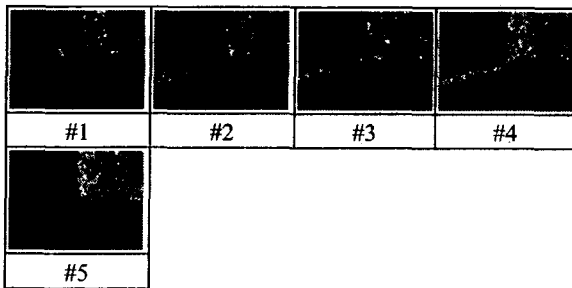


Fig. 6 Observation of burr formation in drilling Al2024-T4

Table 3 Variation of parameters in each step of drill exit stage(Al2024-T4)

No.(#)	#1	#2	#3
W(mm)	0.2		
T(mm)	0.51	0.1	0.11
L(mm)	0.14	0.09	0.04

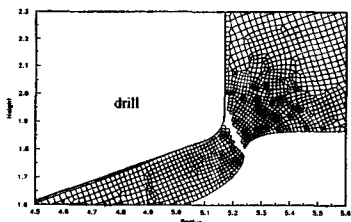


Fig. 7 Prediction of burr formation in drilling Al2024 by FE-simulation

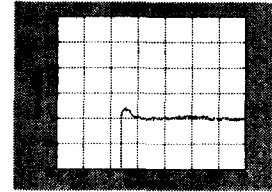


Fig. 8 Measurement of burr in Al2024-T4

#### 4.2 SM45C의 드릴가공

드릴가공시 버 형성의 모델을 선정하기 위해 SM45C에 대한 드릴가공을 실험하였다. Fig. 9에서와 같이 드릴이 0.05mm씩 진행함에 따라 #2인 경우 피삭재의 출구까지의 거리 L이 0.15mm를 남겨 두기까지는 캡의 두께가 절삭에 의해 현저히 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 #2에서부터 드릴이 관통하여 버 형성이 완료되어 캡이 탈락한 후에 #8까지는 캡의 두께가 감소되지 않고 Table 4에서와 같이 거의 일정하였다. 이것으로 보아 #2까지만 절삭이 진행되고 #3부터는 절삭상태는 멈추고 드릴이 캡을 밀고 나가면서 버가 형성되기 시작하여 #8에서 캡이 완전히 탈락하여 최종적으로 버의 형성이 완료되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 Fig. 9의 #2를 2차원 모델로 설정하여 버 형성과정을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 나타낸 Fig. 10에서 예측된 버의 높이는 0.17mm로 Fig. 11의 실제 버 높이를 측정된 0.18mm와 아주 작은 차이를 관찰할 수 있다.

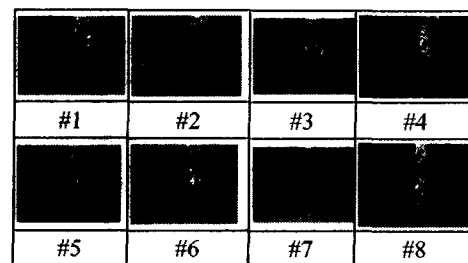


Fig. 9 Burr formation in drilling SM45C

Table 4 Variation of parameters in each step of drill exit stage(SM45C)

No.(#)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
W			0.18				
T	0.344	0.329	0.326	0.326	0.327	0.326	0.326
L	0.2	0.15	0.1	0.05			

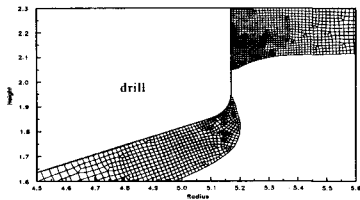


Fig. 10 Prediction of burr formation in drilling SM45C by FE-simulation

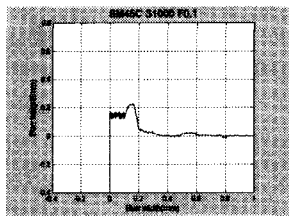


Fig. 11 Measurement of burr in drilling SM45C

### 4.3 SS400의 드릴가공

드릴이 0.05mm씩 진행함에 따른 SS400의 드릴 실험결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12의 #1인 경우에 드릴 모서리의 위치가 피삭재 출구면과 0.09mm인 상태에서부터 드릴이 관통하여 버 형성이 완료되어 캡이 탈락한 후의 #7까지는 캡의 두께가 감소되지 않고 Table 5에서와 같이 거의 일정하였다. 이것으로 보아 #1이후부터는 절삭상태는 멈추고 드릴이 캡을 밀고 나가면서 버가 형성되기 시작하여 #7에서 캡이 완전히 탈락하여 최종적으로 버의 형성이 완료되는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 12의 #1을 2차원 모델로 설정하여 버 형성과정을 시뮬레이션 하였다. Fig. 13에서와 같이 시뮬레이션 결과 버의 높이가 0.18mm로 예측되었으며, Fig. 14와 같이 레이저로 측정된 실제의 버 높이, 0.177mm와 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다.

본 연구에서의 버형성 시뮬레이션은 이전 연구<sup>15</sup>에서 Type B의 버형성 경우에만 제한된다. 이것은 주로 선단각이 큰 예리한 모서리의 드릴가공시 출구부 구멍주위를 Type C와 같은 파단형 버의 경우, 구멍주위에서의 소성 변형 중에 드릴 선단부에서 먼저 파단이 발생하기 때문에 구멍주위에서의 소성 변형에 따른 파단이 발생하는 경우에만 본 연구에서 제시된 모델이 적용된다.

이상의 시뮬레이션 결과에서 예측된 버의 높이는 실험결과와 상당히 유사한 결과를 나타내었으

나, 시뮬레이션으로 예측된 버의 최종형상이 대부분의 경우에서 약간 다르게 나타났다. 이러한 결과는 버형성 중에도 드릴의 회전으로 인하여 인장이 발생하는 드릴 모서리부에서 피삭재의 열적 연화에 의해서 좀더 크고 뾰족한 형상의 버가 형성되기 때문으로 생각된다.

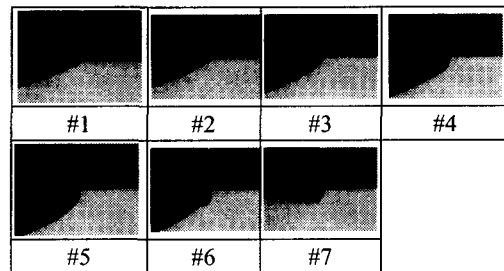


Fig. 12 Observation of burr formation in drilling SS400

Table 5 Variation of parameters in each step of drill exit stage(SS400)

No.(#)	#1	#2	#3	#4	#5	#6
W	0.105	0.09				
T	0.209	0.209	0.208	0.207	0.208	0.206
L	0.09	0.04	-0.01	-0.06	-0.11	

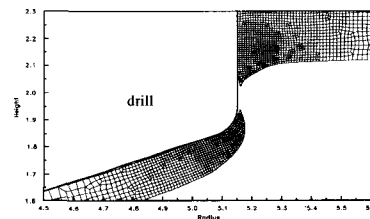


Fig. 13 Prediction of burr formation in drilling SS400 by FE-simulation

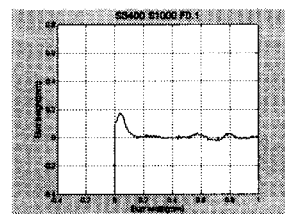


Fig. 14 Measurement of burr formation in SS400

## 5. 실험결과 분석

최종 버의 형상변화에도 불구하고 본 모델에 의한 비교적 정확한 버높이 예측은 연화에 의한 버높이 형성에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 시뮬레이션을 위한 초기조건을 설정을 실험에 의지하고 있는 점을 제외하면 본 모델은 비교적 정확하게 버형성을 예측하기 위하여 사용가능함을 알 수 있다. 또 모델의 적용성을 확대하기 위하여 드릴의 피삭재 끝면까지의 거리  $L$ 과 피삭재 외측의 반경  $r$ 을 변화시켜서 초기조건 요소들의 변화에 대한 민감도를 고려하는 것이 바람직하다.

이상의 여러 재질과 공구 형상에 따른 시뮬레이션 결과가 실험결과와 매우 잘 일치하는 사실로부터 전제되었던 버형성기구에 대한 가정들이 타당함을 알 수 있다. Type B와 같은 구멍주위에서의 소성변형의 발전에 의한 파단에 의한 버형성시 드릴이 구멍 이탈 전에 드릴에 의한 절삭 가공이 중지하고 이후에는 이송방향으로의 드릴의 진행에 따른 소성변형이 시작하는 지점이 존재함을 알 수 있다. 드릴의 출구버는 이 소성변형에 의한 유효 변형률의 증가와 재료의 파단 변형률에 의해서 파단위치가 결정되며 이 상태가 버로 남게 된다.

## 6. 결론

실험에 의한 버형성 메카니즘의 관찰을 통하여 3차원 드릴가공에 대한 2차원 등가모델을 개발하였다. 이를 활용하여 드릴가공에서 드릴이 피삭재를 관통할 때에 발생하는 버형성을 초기단계부터 최종단계까지 연속적으로 시뮬레이션 하여 버의 높이 및 형상을 예측해 보았다. 또한 드릴가공에서 버형성에 관한 절삭조건과 피삭재의 재질의 영향을 시뮬레이션 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피삭재별로 약간은 다르지만 드릴이 진행함에 따라 드릴 모서리부와 피삭재의 출구까지의 거리가 0~0.2mm정도 되는 부근에서 절삭상태는 멈추고 드릴이 캡을 밀고 나가면서 버가 형성되기 시작하여 캡이 탈락하면서 버의 형성이 완료되는 것을 실험적으로 관찰할 수 있었다.
- (2) 연성 재질에 대한 버형성의 시뮬레이션 결과는 실제 실험으로 관찰한 버형성과 캡의 탈락 과정이 아주 유사한 것을 알 수 있었으며, 대부분 실제 버형성의 크기가 예측크기보다 크다.

Al2024-T4인 경우 취성이 강하기 때문에 시뮬레이션한 버의 높이가 실험결과에 비해 약간 크게 예측되었다.

- (3) Al6061의 경우 드릴 모서리부의 곡률을 0.1mm에서 0.3mm로 변경하여 시뮬레이션을 실시한 결과 버의 높이가 커졌으며, 이로부터 마모로 인해 드릴 모서리부의 곡률이 커지면 버의 높이가 증가함을 예측할 수 있었다.
- (4) 시뮬레이션 결과로부터 드릴가공의 실험결과를 근거로 개발된 등가 2차원 유한요소 모델은 이전 연구<sup>12</sup>에서 제시된 3차원 유한요소 모델에 비해 해석에 소요되는 시간측면에서 보다 효율적이며, 드릴가공시 버형성의 정량적 예측이 가능하며, 가공조건과 피삭재 재질에 대한 영향의 분석에도 용이하게 활용될 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 시뮬레이션으로 예측된 버의 높이는 실험결과와 상당히 유사한 결과를 나타내었으며, 이로부터 개발된 등가 2차원 유한요소 모델의 타당성을 입증할 수 있었다. 그러나 시뮬레이션으로 예측된 버의 최종형상은 대부분의 경우에서 약간 다르게 나타났다. 이러한 결과는 버형성 중에도 드릴의 회전으로 인하여 인장이 발생하는 드릴 모서리부에서 피삭재의 열적 연화에 의해서 좀더 크고 뾰족한 형상의 버가 형성되기 때문으로 생각된다.
- (5) 본 연구에서 제시된 드릴가공에 대한 2차원 등가 모델은 여러 가지 변수들에 대한 버형성의 영향을 파악하기 위하여 사용될 수 있을 것이며, 이를 위하여 초기 모델의 설정을 쉽게 할 수 있는 방법에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-304-002-3)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Haggerty, W. A., "Effect of Point Geometry and Dimensional Symmetry on Drill Performance," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 1, pp. 41-58, 1961.
2. Gillespie, L. K., Unclassified Topical Report, BDX-613-1248, Bendix Corporation, 1975.



3. Gillespie, L. K., Unclassified Topical Report, BDX-613-1502, Bendix Corporation, 1976.
4. Gillespie, L. K. and Blotter, P. T., "The Formation Properties of Machining Burrs," J. Eng. Ind., Vol. 98, pp. 66-74, 1976.
5. Pande, S. and Relekar, H., "Investigation on Reducing Burr Formation in Drilling," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, pp. 339-348, 1986.
6. Stein, J. M., Burr Formation in Precision Drilling of Stainless Steel, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1995.
7. Stein, J. M. and Dornfeld, D. A., "Burr Formation in Drilling Miniature Holes," Annals of the CIRP, Vol. 46, pp. 63-66, 1997.
8. Sofronas, A., The Formation and Control of Burrs, Ph. D. Dissertation, The University of Detroit, 1975.
9. Shikata, H., Devries, M., F. and Wu, S. M., "Experimental Investigation of Sheet Metal Drilling," Annals of the CIRP, Vol. 29, p. 85, 1980.
10. Miyake, T., Yamamoto, A., Kitajima, K., Tanaka, Y. and Takazawa, K., "Study on Mechanism of Burr Formation in Drilling," J. of the Japan Society of Precision Engineering, pp. 87-92, 1991.
11. Saunders, L. K. L. and Mauch, C. A., "An Exit Burr Model for Drilling of Metals," Proc. of the ASME MED, Vol. 8, pp. 187-192, 1998.
12. Guo, Y. and Dornfeld, D. A., "Intergration of CAD of Drill with FEA of Drilling Burr Formation," Trans. of NAMRI/SME, Vol. XXVI, pp. 201-205, 1998.
13. Min, S., Kim, J. and Dornfeld, D. A., "Development of a Drilling Burr Control Chart for Low Alloy Steel, AISI 4118," J. Mater. Process. Tech., Vol. 113, pp. 4-9, 2001.
14. Min, S., Kim, J. and Dornfeld, D. A., "Optimization and Control of Drilling Burr Formation of AISI 304L and AISI 4118 Based on Drilling Burr Control Charts," Int. J. Mach. Tools & Manufac., Vol. 41, pp. 923-936, 2001.
15. Ko, S. L. and Lee, J. K., "Analysis of Burr Formation in Drilling with a New-Concept Drill," J. Mater. Process. Tech., Vol. 113, pp. 392-398, 2001.
16. Ko, Dae-Cheol and Ko, Sung-Lim, "Development of a Module to Predict Burr Formation using the Finite Element Method," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 10, pp. 163-170, 2000.
17. Zienkiewicz, O. C., The Finite Element Method, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1977.
18. Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, 1989.