

미소 전단 띠 형성에 의한 톱니형 칩 생성 예측

임성한* · 오수익**

Prediction of Serrated Chip Formation due to Micro Shear Band in Metal

S. H. Rhim, and S. I. Oh

Abstract

Adiabatic shear bands have been observed in the serrated chip during high strain rate metal cutting process of medium carbon steel and titanium alloy. The recent microscopic observations have shown that dynamic recrystallization occurs in the narrow adiabatic shear bands. However the conventional flow stress models such as the Zerilli-Armstrong model and the Johnson-Cook model, in general, do not predict the occurrence of dynamic recrystallization (DRX) in the shear bands and the thermal softening effects accompanied by DRX. In the present study, a strain hardening and thermal softening model is proposed to predict the adiabatic shear localized chip formation. The finite element analysis (FEA) with this proposed flow stress model shows that the temperature of the shear band during cutting process rises above $0.5T_m$. The simulation shows that temperature rises to initiate dynamic recrystallization, dynamic recrystallization lowers the flow stress, and that adiabatic shear localized band and the serrated chip are formed. FEA is also used to predict and compare chip formations of two flow stress models in orthogonal metal cutting with AISI 1045. The predictions of the FEA agreed well with the experimental measurements.

Key Words: Metal cutting, Hardening and thermal softening, Size effect, Finite element analysis, Shear localized and serrated chip formation, Prediction of flow stress

1. 서론

절삭공정은 드릴링, 그라인딩 등을 포함하는 가장 널리 사용되는 전통적인 제조 기법 중 하나로써, 지난 수십 년 간 이론적으로나 실험적으로 다양한 방법에 근거하여 수많은 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 지금까지의 연구에도 불구하고 절삭공정과 같이 매우 높은 변형률 속도와 큰 변형률이 매우 미소한 영역에 집중되어 발생하는 현상들을 실험과 검증을 통해 설명할 수 있는 이상적인

기구 및 모델은 제시되지 못하고 연구의 범위가 간단하게 해석할 수 있는 영역에 한정되어 있었다.

이렇듯 어려운 공정 모델링을 해결하기 위해 1980년대부터 절삭공정에도 유한요소해석 방법을 이용한 연구가 도입되어 많은 연구 성과를 내고 있다. 그 중에서도 절삭공정 중 발생하는 칩 생성과 관련하여 많은 연구 결과들이 발표되었으나 대부분 연속형 칩에 국한되어 있다. 이는 연속형 칩 생성 기구의 이론적인 설명과 유한요소해석이 용이하고 많은 해석 조건들이 단순하기 때문이다.

연속형 칩은 이상적인 조건에서 발생하며 대부

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

** 서울대학교 기계항공공학부

본 실제 절삭 과정에서는 다양한 형태의 칩이 발생하므로, 최근엔 다양한 형태의 칩 생성을 설명할 수 있는 연구들도 진행되었다. 그러나 이 중에서 미소전단띠의 형성을 예측하여 톱니형 칩의 생성 기구와 형상을 예측한 모델은 없었다.

본 논문에서는 그 동안 이론적인 한계로 인해서 활발하지 않았던 톱니형(전단 변형) 칩 생성에⁽¹⁾ 대한 연구를 수행하였다. 유한요소해석을 통해서 절삭 조건들이 절삭 과정에 미치는 영향들에 대해서 고찰한 결과와⁽²⁾ 여러 문헌들로부터 톱니형 칩의 생성 기구를 유추하고, 미소전단띠 부근에 작용하는 유동응력의 크기효과(size effect)로 인한 응력 증가 현상과 동적재결정 발생으로 나타나는 열적 연화(thermal softening)로 인한 응력 감소 현상을 혼합한 새로운 형태의 유동응력을 제안한다. 이상의 연구를 유한요소해석에 적용하여 톱니형 칩의 생성, 칩과 피삭재의 응력 분포들을 살펴보고 새로운 연구 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 직교 절삭 기구 모델링

2.1 톱니형 칩 생성 기구

일반적으로 높은 속도로 금속 재료를 절삭할 때 거시적인 관점에서 톱니형 칩(Fig.1)의 생성은 두 가지로 구분된다.

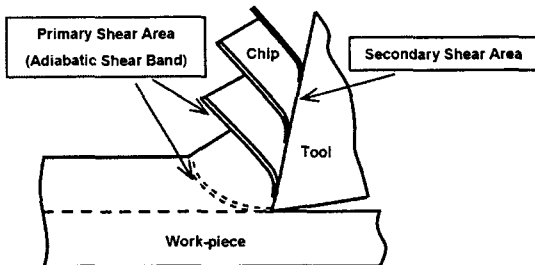


Fig.1 Schematic diagram of serrated chip

첫째, 주전단 영역에 응력의 집중이 생겨 단열 미소전단띠가 생성되어 파괴가 진행되는 경우이고, 두 번째가 공구면의 압력으로 시편의 표면에 파괴가 발생하는 경우로 이 경우는 대개 공구 경사각이 둔각에 가까울 때 발생한다.

본 연구에서는 미소전단띠에 의한 칩 생성을 대상으로 하였다. 미시적인 관점에서 AISI 1045의 경우 철계 재료의 특성상 미소 전단띠의 생성 (변

형률 집중) 기구는 다음과 같이 세 가지로 요약할 수 있다.⁽³⁾ (1) 황화합물(sulphide inclusion)인 황화망간(MnS)이 결정립 내부에 존재하는데, 만약 주전단 영역에 구형(열처리가 된 재료라면 황화망간의 형상은 구형이다. 아닐 경우 타원체 모양도 존재할 수 있다.)의 황화망간이 형성된다면 이것이 일종의 연성파괴에서의 기공(void)구실을 하게 되어 주전단 영역의 유동응력을 감소시켜 변형을 집중을 유도할 수 있다. (2) 황화철(FeS)이 결정립계에 생성될 수 있고 이 재료는 용점이 300°C 부근이므로 낮은 온도에서도 용융되어 결정립계의 강도를 약하게 하여 유동응력을 감소시킬 수 있다. (3) 공정 중 주전단 영역에 큰 온도 상승이 발생해 미소전단띠 부근에 상변태가 일어나고 이어 동적 재결정 현상에 의한 열적 연화가 유동응력을 감소시켜 변형을 집중을 야기하는 경우이다.

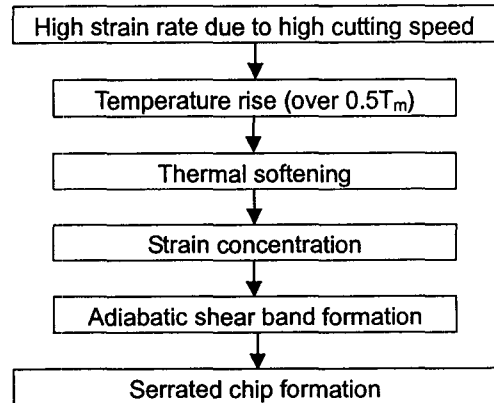


Fig.2 Serrated chip formation procedure (proposed)

그러나 생성 기구 (1)과 (2)의 영향은 미미한 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 주 생성 요인은 (3)과 같이 열적 연화 현상에 의해 미소전단띠가 생성되고 이어 유동응력의 감소가 있었기 때문이다. 실제로 최근의 연구 결과들에서 티타늄 합금이나 AISI 1045와 같은 중탄소강 등의 톱니형 절삭칩의 주전단 영역에서 공정 중 부위의 온도가 0.5T_m 이상으로 상승했었다는 상변태 증거와 재결정핵 혹은 재결정립으로 보이는 미세한 결정립들이 관찰되고 있다. (3)의 과정을 도표화 하면 Fig.2와 같다.

2.2 유동응력 모델

절삭공정과 같이 변형률 속도가 10^3 s^{-1} 이상인 변형에서 사용되는 유동응력 모델은 Zerilli-Armstrong(ZA)모델과 Johnson-Cook(JC)모델이 대표적이다. 그러나 일반적으로 전위거동모델⁽⁴⁾에 근거한 두 모델을 비롯한 기존의 모든 모델들은 고속 변형 중의 온도 상승과 이로 인한 상변태를 예측할 수 없다.

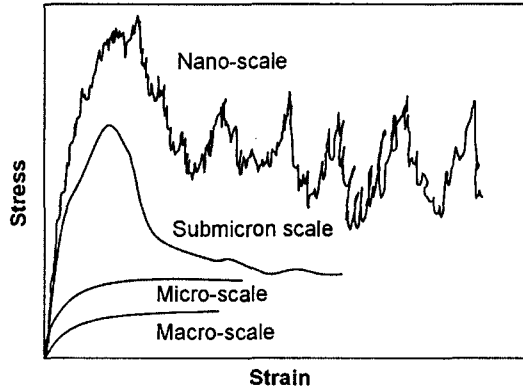


Fig.3 Schematic diagram of the stress-strain relation at different size scales⁽⁵⁾

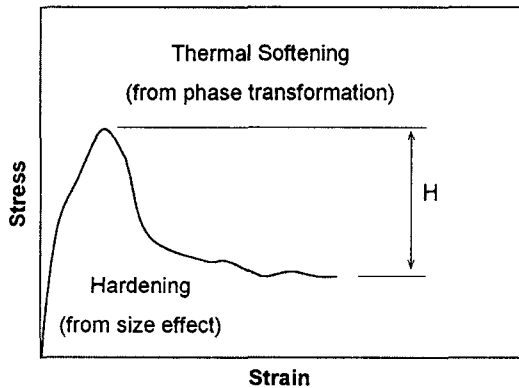


Fig.4 Schematic diagram of Hardening + Softening model for submicron scale stress-strain relation

이에 본 연구에서는 고속 변형 중에 동적재결정의 발생을 예측하고 열적 연화 현상을 표현할 수 있는 새로운 유동응력 모델⁽³⁾을 제안하였다.

그러나 일반적인 공정(변형률 속도 10^2 s^{-1} 이하)에서 동적 재결정은 재료의 녹는점(절대온도

기준)의 50%이상($0.5T_m$)에서 발생하는데 초기 해석 연구에서는 주전단 영역의 온도가 충분히 올라가지 못하였다. 이에 소재의 열적 성질 등과 같은 재료 상수와 마찰계수와 같은 공정 변수들을 변화시켜 보았으나 역시 온도는 충분히 상승하지 못했다. 또한 온도값이 해석에 사용된 요소의 크기에 의존하는 성질을 보여 이를 충분히 작게 해주었더니 약간의 온도 상승은 있었으나 역시 충분한 상승은 나타나지 않았다.⁽²⁾ 이에 주전단 영역에서의 실제 유동응력값이 기존 모델보다 큰 값이 아닌가를 검토하였다. 일반적으로 전단응력을 받는 영역의 크기에 따라 응력-변형률 관계는 Fig.3 과 같이 달라지게 된다. 기존에 사용했던 모델이 전위거동모델에 기초한 식으로 마이크로 스케일에 적합하였다면, 실제 미소전단띠의 크기와 파괴 부위가 더 작은 영역 안에 있다면 좀 더 큰 응력이 작용했으리라는 추정을 하였다.⁽³⁾ 이러한 추론에 근거하여 변형 초기에는 기존의 모델보다 경화(hardening)를 더 고려한 식을 사용하였다. 이상의 가정과 같이 초기 변형에 의해 온도가 충분히 상승하여 동적재결정이 발생하게 되면 Fig.4 에서 보듯이 열적 연화 현상이 일어나게 된다. 이 과정에서 최대 응력값과 열적 연화가 일어난 후의 최소 응력값과의 차이를 H 라 했을 때, 실제 톱니형 칩의 생성은 유동응력의 절대적인 크기보다 H 값의 크기에 따라 영향을 받는 것을 확인하였다.⁽³⁾

그러나 본 연구에서는 경화 현상과 연화 현상을 도입하여 새로운 유동응력모델을 제안하여 톱니형 칩 생성을 예측하는데 초점을 맞추느라 H 값의 유효 범위와 유동응력의 절대적 크기와의 관계 등을 심도 있게 조사하지 않았고, 이는 추후의 연구에서 보완하기로 하겠다.

전술한 바와 같이 온도가 상승하기 전에는 더 큰 유동응력이 작용하고 충분한 온도에 다다른 이후에는 동적재결정 발생에 따른 열적 연화를 가정하여 유동응력이 감소되는 모델(경화-연화 모델)을 도입하였고, Fig.5 는 제안된 모델 중 고온에서의 응력-변형률 관계를 기존의 응력식(JC 모델)과 비교하여 보여주고 있다.

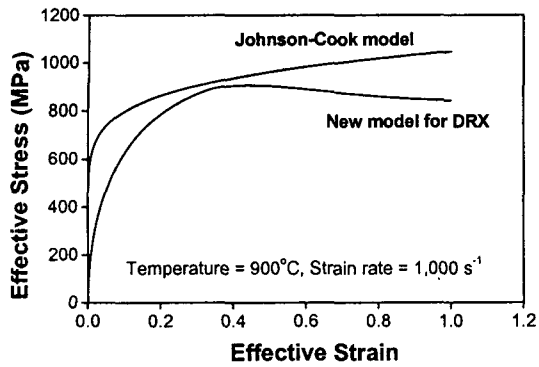


Fig. 5 Comparison of two flow stress models, new model and conventional model (Johnson-Cook model)

3. 유한요소해석

3.1 공정 해석 조건

상용코드인 DEFORM 2D⁽⁶⁾를 사용하여 절삭 공정 중에 발생하는 현상을 시뮬레이션하였다. 파괴와 높은 변형률이 발생하는 공정이므로 요소 제거와 자동격자 생성기법을 사용하였다. 소재는 AISI 1045 를 공구는 고속도강(H11)을 사용하였으며 두 재료의 특성은 Table 1.에 나타내었다. 소재는 요소에 의한 공정 변수 변화를 최소화하기 위해 Fig.6 과 같이 3 μ m 에서 5 μ m 의 범위에서 매우 작은 요소들을 사용하였으며 비교적 영향이 적은 절삭 공구의 경우는 강제로 가정하여 비교적 큰 요소를 사용하였다. 그 밖의 공정 변수들은 다른 문헌을 고려하여 가정하였다.

Table 1. Feature of the workpiece and tool

Workpiece (AISI 1045)	
Chemical Composition, 0.43C, 0.7Mn, 0.11Si	
Emissivity,	0.75
Heat capacity (N/mm ² /°C),	3.6
Thermal conductivity (W/m°C)	25 ~ 45
Cutting tool (High speed steel, H11)	
Emissivity,	0.45
Heat capacity (N/mm ² /°C),	4.6
Thermal conductivity (W/m°C)	34

Table 2. Orthogonal cutting conditions

Cutting Conditions	
Cutting speed, (m/min)	150 ~ 900
Feed, (mm)	1.5
Tool tip radius, (mm)	100
Rake angle, Clearance angle, (°)	11.3, 4.5

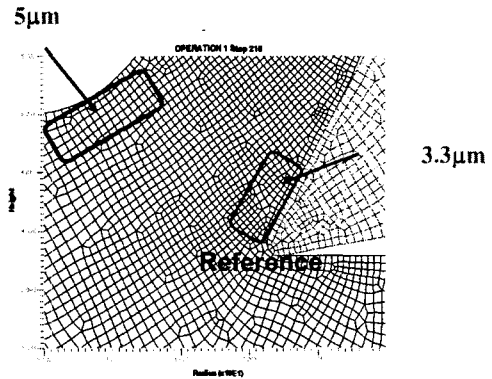


Fig.6 Used element size distribution in the FEA

3.2 유한요소해석 결과

기존의 유동응력 모델을 사용하여 해석을 수행한 경우, 역시 Fig.7 과 같이 주전단 영역에 변형을 집중 현상이 나타나지 않고 연속형 칩이 생성되었다.

반면 새 유동응력모델을 사용한 경우, Fig.8 과 같이 주전단 영역에 변형을 집중이 생기고, 이어 톱니형 칩의 생성을 예측할 수 있었다.

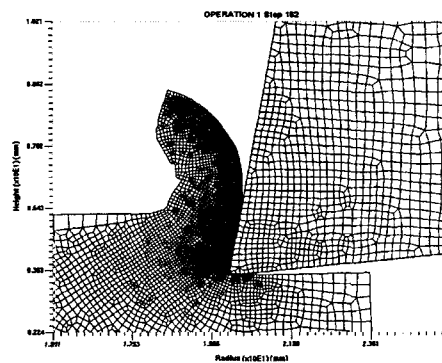


Fig.7 Continuous chip formation from the conventional flow stress model

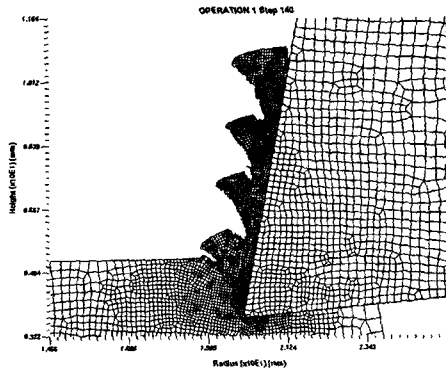


Fig.8 Serrated chip formation from the new conventional flow stress model

4. 유한요소해석 결과 고찰

크기효과에 의한 경화 작용과 동적재결정 현상에 따른 열적 연화 작용을 모두 고려한 유동응력식을 도입하여 유한요소해석을 수행한 결과 실험과 유사한 톱니형 칩 생성을 예측하였다. 이상의 결과와 기존 유동응력모델에 의한 결과를 비교하고, 간단한 응용의 예로 새 유동응력모델을 사용하여 절삭속도에 따라 톱니형 칩의 형태가 어떻게 변화하는 지를 살펴 보았다.

4.1 두 유동응력 모델의 비교

Fig.9 는 해석 결과 첫 번째 톱니형 칩이 생성된 직후 절삭공구 팁과의 거리에 따른 소재(피삭재)의 변형률 변화를 보여준다. 기존의 유동응력 모델은 JC 모델을, 새 모델은 본 연구에서 제안한 경화-연화 모델을 의미한다. 그림에서 보듯이 두 모델 모두 공구 팁에서 500 μ m 떨어진 지점에서 급격한 변형률 증가를 보이고 있다. 이는 두 경우 모두 수백 μ m 크기의 전단면 영역에 변형률이 집중되는 것을 잘 예측할 수 있음을 보여준다. 이러한 1 차 변이 구간의 예측은 JC 모델과 ZA 모델뿐만 아니라 전위거동모델에 기초한 모델에서는 모두 예측이 가능하리라 생각된다. 두 모델의 차이점은 공구 팁에서의 거리가 200 μ m 인 지점에서의 2 차 변이 구간에서 보인다. JC 모델의 경우 이 영역에서 변형률 값의 분포는 거의 일정하거나 감소하는 양상을 보이는데 반해, 새 모델에 의한 결

과는 1 차 변이 구간과 마찬가지로 변형률이 급격히 상승하는 현상을 보여준다. 이러한 변형률 집중 영역의 차이가 Fig.8 과 같이 톱니형 칩의 생성을 예측할 수 있는가를 결정한 것으로 보여진다. 기존 응력 모델이 아주 미소한 영역에 나타나는 변형률 집중을 예측하지 못했기에 같은 공정 조건에서도 Fig.7 과 같이 연속형 칩 생성을 모사할 수 밖에 없었던 데 반해, Fig.10 에서 보듯이 새 응력모델의 경우 더 미소한 영역에 변형률이 집중되어 파괴가 진행된 것을 알 수 있다.

Fig.11 과 Fig.12 는 각각 절삭공구 팁에서의 거리에 따른 소재의 유동응력과 변형률 속도의 변화를 보여주고 있다.

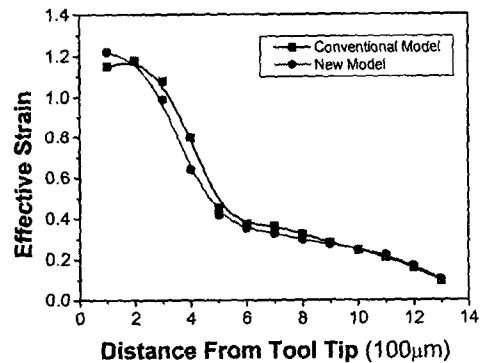


Fig.9 Comparison of effective strain distribution

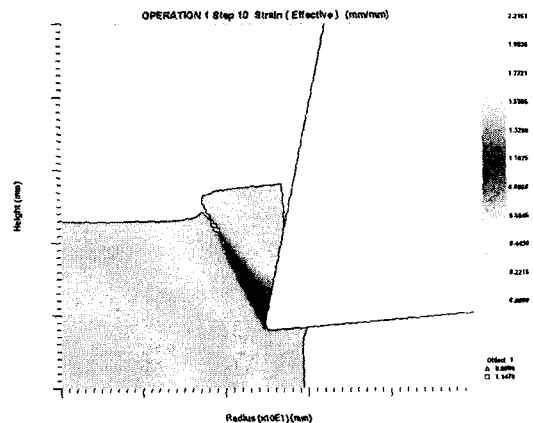


Fig.10 Effective strain distribution of the new flow stress model (hardening-softening model)

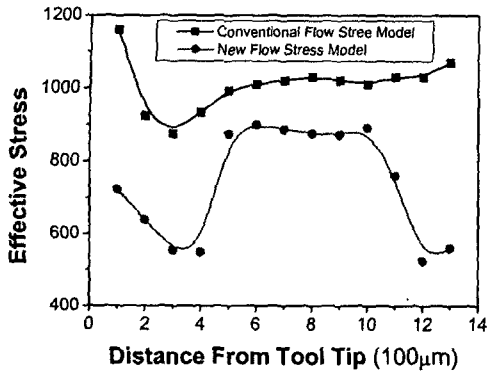


Fig. 11 Comparison of effective stress distribution

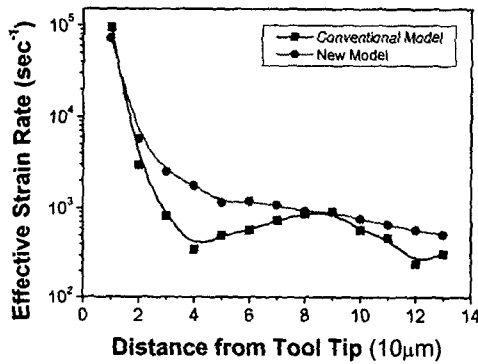


Fig. 12 Comparison of effective strain rate distribution

Fig. 11 에서 보듯이 두 응력모델 모두 공구 팁에 가까울수록 유효응력이 감소하다가 실제 주전단 영역의 파괴 범위 안에서는 유효응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 새 유효응력모델의 경우 온도 상승에 의한 연화 현상 발생으로 응력값의 감소폭이 크다는 것을 알 수 있다.

변형률 속도의 분포(Fig. 12)는 두 모델 간의 미세한 차이가 있으나 공구 팁 근처에서는 거의 유사한 양상을 보이고 있다.

이상의 비교·고찰로부터 절삭공정에서 톱니형 칩의 형성 과정이 Fig. 2 에서 가정한 칩 생성 기구와 같은 순서대로 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 톱니형 칩 생성의 주요 원인이 경화-열적 연화 유효응력모델에 따른 변형률 집중 현상과 유효응력 감소 현상에 있었다는 사실도 입증할 수 있었다.

4.2 절삭 속도에 따른 톱니형 칩 생성

톱니형 칩이 생성되는 절삭공정 조건하에서 일반적으로 절삭속도가 증가하면 톱니형 칩에 나타나는 전단파의 간격이 감소한다고 알려져 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 새 유효응력모델의 적합성을 판단하기 위한 하나의 근거로 동일한 공정 조건하에서 절삭속도만 증가시켰을 때 톱니형 칩의 생성 형태가 어떻게 변하는지를 조사하였다.

해석 결과 Fig. 13 과 14 에서 보듯이 절삭속도가 증가함에 따라 전단파의 간격이 감소하는 것을 확인하였다.

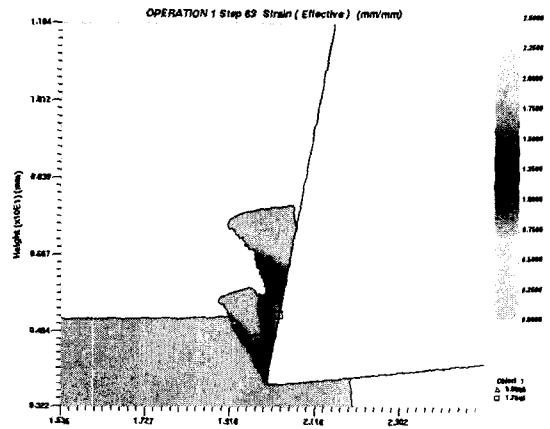


Fig. 13 Effective strain distribution at cutting speed, V=600m/min.

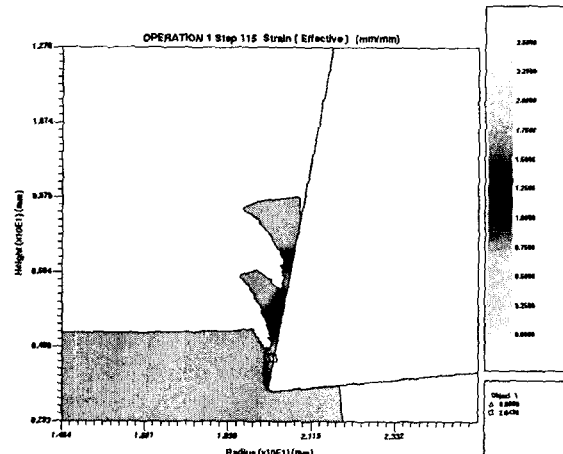


Fig. 14 Effective strain distribution at cutting speed, V=900m/min.

5. 결론

중탄소강인 AISI 1045 를 대상으로 높은 변형률 속도하에서 열적 연화 현상을 예측할 수 있는 유동응력 모델을 유한요소해석에 적용하여 절삭공정 중 미소전단파의 형성과 톱니형 칩의 생성을 모사할 수 있었다.

(1) 동적 재결정 현상이 일어날 수 있는 온도를 (재결정 온도, $0.5T_m$) 가정하고 주전단 영역의 온도가 $0.5T_m$ 이상으로 올라갈 수 있도록 여러 공정 변수들과 유동응력을 조절하였다. 이 때 다른 변수들보다는 유동응력의 영향이 가장 컸다⁽³⁾.

(2) 실험적으로 관찰이 어려운 미소 영역에 집중한 고속 변형 현상의 경우 실험적 결과로부터 유동응력모델과 유한요소해석기법의 적절한 사용을 통해서 실제 재료의 거동을 유추할 수 있었다.

(3) 동적재결정 현상을 가정하여 고속 변형 중 발생하는 열적 연화 현상을 예측할 수 있는 유동응력 모델을 제안하고, 이를 직교 절삭 공정에 적용하여 톱니형 칩의 생성을 모사할 수 있었다. 또한 절삭속도에 따라 톱니형 칩의 전단파 간격이 감소함을 확인하였다.

이상의 해석 결과에서 예상대로 새 유동응력모델을 사용하여 톱니형 칩을 얻어서 본 연구와 기존 연구의^{(2), (3)} 제안이 맞는다는 것을 확인할 수 있었지만, 생성 기구의 정확한 묘사와 기존의 연구에서 진행 중이었던 새 유동응력모델의 정식화, 절삭재료의 다른 물성치들 상호간의 매우 복잡한 영향 등을 더 고려해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. E. Ceretti, M. Lucchi and T. Altan , "FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation", Journal of Materials Processing Technology, V. 95, Issues 1-3, 1999, pp.17-26
2. S. H. Rhim, H.W. Park and S.I. Oh, "Simulation of serrated chip formation in metal cutting process by using a new flow stress model", CIRP January Meeting, Simulation of Metal Cutting and Forging Processes Using FEM, Paris, January 2002
3. S. H. Rhim and S.I. Oh, "Prediction of serrated chip formation in metal cutting", US-Korea Workshop on Advances in Metallic Structural Materials, Hawaii, January 2003
4. Meyers, M., Dynamic Behavior of Materials (Wiley and Sons, New York)
5. M. F. Horstemeyer, M. I. Baskes and S. J. Plimpton , "Length scale and time scale effects on the plastic flow of fcc metals", Acta Materialia, V.49, Issue 20, 2001, pp.4363-4374
6. S.I. Oh, W.T. Wu, J.P. Tang, and A. Vedhanayagam, "Capabilities and applications of FEM code DEFORM: The perspective of the developer", Journal of Materials Processing Technology, V.27, pp.25-
7. G. Sutter, L. Faure, A. Molinari, A. Delime and D. Dudzinski, Experimental analysis of cutting process and chip formation at high speed machining", Journal de Physique C3, p.33