

발포 스티로폴의 절삭기구 및 특성

김 한섭*, 박 규열**

Cutting mechanism and characteristics of polystyrene foam

Han-Seob Kim*, Kyu-Yeol Park**

ABSTRACT

In this paper, the cutting characteristics and cutting mechanism of polystyrene foam was experimentally investigated. It was found that polystyrene foam has different cutting characteristics and cutting mechanism comparing with that of normal metal materials. By using the experimental results, the optimal cutting tool was designed and examined for approving the cuttingability of polystyrene foam.

Key Words : Polystyrene foam(스치로폴), Cutting characteristics(절삭특성), Cutting mechanism(절삭기구), Multi-blade cutter(다인커터), Cutting force(절삭저항)

1. 서 론

최근에 제조업 분야에서는 다양한 소비자의 욕구와 기호의 변화에 신속하게 대응하기 위한 일환으로서 시작품 제작기간의 단축과 금형 및 주형의 정밀 제작을 통한 제품의 성능향상에 많은 관심이 집중되고 있다. 이와 같은 추세 하에서 복잡한 형상을 갖는 구조물의 정밀 주조법으로서 소실모형주조법(Lost Foam Process)이 다양한 용도로 적용되고 있다. 이 경우, 모형(Pattern)재료로는 스티로폴(Polystyrene foam)이 일반적으로 사용되며 모형의 제작은 금형을 사용하는 방법과 절삭가공에 의한 방법으로 분류된다. 절삭가공에 의해서 스티로폴의 모형을 제작할 경우, 복잡한 형상과 비교적 큰 부피를 갖는 제품의 제작이 용이하며 따라서 제품의 개발과정에서 시작품의 제

작기간을 단축시킬 수 있다는 장점을 갖는다. 이외에도 각종 제품의 모델(Mock-up)제작 등에 스티로폴이 사용되며 이와 같은 작업에 절삭가공의 적용이 요망되고 있다. 그러나 스티로폴을 포함한 플라스틱 재료의 경우, 재료의 유동적 특성은 절삭가공 중에 발생하는 열로 인하여 소재의 심한 변형을 초래하게 되며 이로 인하여 표면상태를 포함한 전반적인 가공정도의 불량은 물론 안정된 가공상태를 유지하는 것이 곤란하다. 특히, 본 연구에서 대상으로 하는 스티로폴의 경우, 일반 금속재료에 비하여 극단적으로 낮은 탄성계수를 갖음으로써 일반 금속가공용 공구를 사용해서는 효과적인 절삭가공이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 스티로폴의 효과적인 절삭가공을 실현하기 위하여 회전공구의 외주부에 다수의 절삭날을 형성시킨 다인공구를 사용하여 스티로폴의 절

* 울산대학교 기계공학부 대학원

** 울산대학교 기계공학부

삭기구 및 절삭특성에 관하여 실험적으로 조사하였다. 또한 일련의 실험결과를 통하여 스티로폴의 절삭에 적합한 최적의 공구형상을 설계하여 스티로폴의 양호한 절삭성능 및 가공의 안정성이 얻어짐을 확인하였다.

2. 실험방법 및 사용재료

Table. 1은 실험에 사용한 각종 장비의 사양을 나타낸 것으로써 절삭실험에는 국내 화천공업사

Table. 1 Specifications of the experimental set-up

Machine tool	Machining Center(M/C):SIRIUS-2 type [HWACHEON HEAVY INDUSTRY Co., Ltd.]
Cutting Tools	30mm HSS standard type ball end mill, 30mm Al2024 multi-blade type cutter
Work piece	Polystylen foam block [HYOP SEONG Chem. Co. Ltd.] Density : 25Kg/m ² Thermal Conductivity: 0.03Kcal/m.h.C Compressive Strength :1.7Kgf/cm ²
Others	Strain gage type tool dynamometer

의 머시닝 센터 SIRIUS-2형을 사용하였다. 절삭 공구는 30mm의 직경을 갖는 볼엔드밀로써, 고속도강(HSS)으로 제작된 두날의 표준형과 외주부에 다수의 절삭날을 성형시킨 알루미늄(Al)제의 다인공구를 사용하였다. 피삭재로는 주조용 모형 및 모델 제작용으로 사용되는 스티로폴로서 기계적, 열적 특성은 Table. 1에 나타낸 바와 같다. 스티로폴의 원소재가 되는 폴리스티렌은 열가소

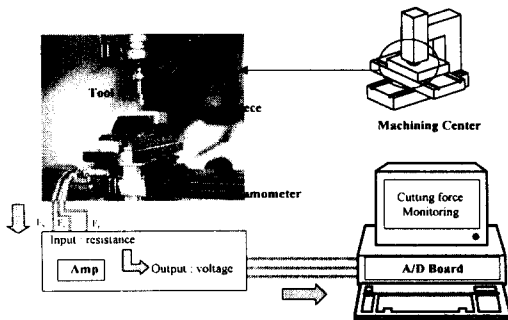


Fig. 1 Configuration of the experimental set-up

성 플라스틱으로서 특히 절삭가공 중에 발생하는 열에 취약한 성질을 갖고, 이로 인하여 가공정도는 물론 가공능률을 얻는 것이 곤란한 것으로 알려져 있다. 절삭가공 중에 발생하는 절삭력의 측정에는 스트레인게이지 타입의 공구 동력계를 사용하였다. 실험장치 및 절삭력 측정시스템을 Fig. 1에 나타내며, 본 연구에서는 주로 절삭날의 수와 공구의 기하학적 형상의 차이가 절삭결과에 미치는 영향에 관하여 가공 중에 발생하는 절삭저항, 칩의 형태 및 절삭면의 상태를 통해서 조사하였다. Fig. 2는 실험에 사용한 각종 공구의 형상으로서 날의 수와 경사각 및 여유각에 차이를 갖는다.

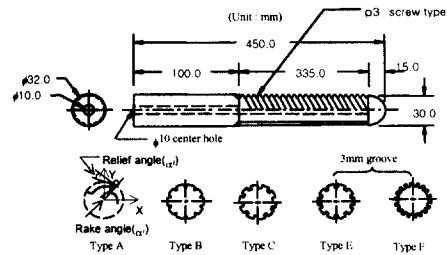


Fig. 2 Details of the cutter blade

Table. 1 Specifications of the experimental set-up

	Blade Number	Rake angle(°)	Relief angle(°)	Remarks
A	2	Standard	Standard type ball end mill	
B	10	-27.27	0	Special designed ball end mill
C	10	5.74	0	
D	10	5.74	25	
E	10	11.56	0	
F	18	11.56	0	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스티로폴의 절삭기구

스티로폴의 절삭기구를 조사하기 위하여 공구의 경사각과 여유각이 임의로 설정 가능한 단인공구를 사용하여 절삭가공을 수행하여 가공 중에 칩의 형성과정을 고속카메라를 사용하여 관찰하였다. Fig. 3은 스티로폴의 절삭과정 중에 예상되는 탄성변형을 조사하기 위한 실험결과로서, 임의의 물림깊이를 설정한 후에 동일부위를 4회 반복하여 공구를 통과시키면서 칩의 발생 형태를 관찰하였다. 공구의 1회전 시에 피삭재에 강한

압축응력이 가해지고 공구가 절삭 점을 통과한 후에 탄성 복원되어 물림깊이가 충분하게 제거되지 못한 채 상당분의 잔삭량이 존재하는 것을 확인하였다. 이후 2-4번째 동일 궤적의 회전에서도

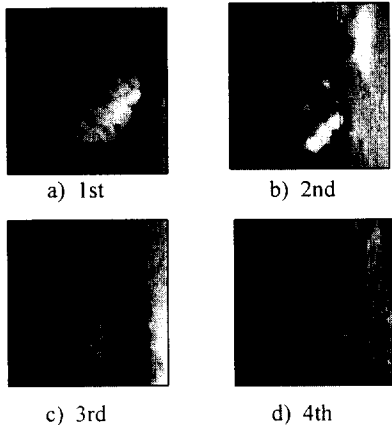


Fig. 3 Cutting characteristics of polystyrene foam

칩이 발생되며 회전수의 증가에 따라서 발생하는 칩의 크기가 감소되며 4회 가공 후에는 칩의 발생이 소멸되는 것을 알 수 있다. 동 결과로부터, 스티로폴의 절삭 과정은 일반 금속재료에 비하여 극히 많은 탄성변형을 동반하며, 이와 같은 현상

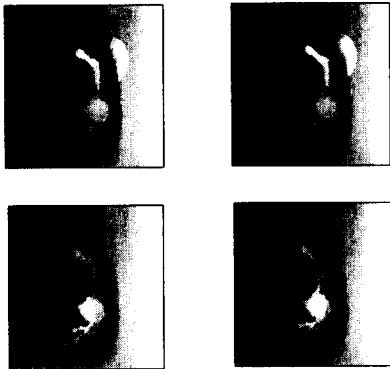


Fig. 4 Abnormal chip formation process



Fig. 5 Chip formation with rake angle

으로 인하여 안정된 절삭상태를 유지하는 것이 어려움을 예측할 수 있다. **Fig. 4**는 스티로폴의 절삭과정 중에 발생하는 이상형 칩의 발생과정을 관찰한 결과이다. 일반적으로 금속재료와 같은 재료의 절삭가공에서는 칩이 공구의 경사면상에서 발생하는 반면, 스티로폴의 경우에는 칩이 공구의 경사면뿐 아니라 공구가 절삭점을 통과한 후에 공구의 여유면에 의해서 압축된 부위에서 칩이 발생됨을 확인하였다. 이는 공구의 인선부위를 기준으로 공구의 전방에서는 심한 압축력이 작용하고 인선부위가 통과한 후방에서는 급격한 인장응력이 작용하여 스티로폴의 비드 간의 결합력을 해제시키는 현상에 기인한 것으로 사료된다. **Fig. 5**는 공구 경사각의 차이에 따른 칩의 발생형태를 관찰한 결과이다. 동 결과에서 나타난 바와 같이 경사각이 커질수록 발생하는 칩의 크기가 커짐을 알 수 있다. 여기서 칩의 크기는 절삭에 의해서 제거되는 제거 체적을 나타내며, 일반적으로 금속재료를 대상으로 하는 절삭역학에서는 공구의 경사각이 커지면 마찰각은 작아지고 전단각은 커지게 되어 절삭력이 감소되는 현상이 스티로폴에서도 적용되는 것으로 추정할 수 있다. 일련의 결과로부터, 스티로폴의 절삭가공은 일반 금속재료에 비하여 극심한 탄성변형을 동반하며 효과적인 절삭가공을 구현하기 위해서는 전용공구의 적용이 불가피함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 스티로폴의 절삭과정 중에 발생하는 탄성변형을 억제하기 위한 수단으로 절삭부위에서 스티로폴에 전달되는 응력을 분산시키기 위하여 다수의 절삭날을 갖는 다인공구의 적용에 착안하였다. 이하 다인공구를 이용한 스티로폴의 절삭특성에 관하여 기술한다.

3.2 다인공구에 의한 스티로폴의 절삭특성

[a] 표준형 볼랜드밀에 의한 절삭성능

Fig. 6은 두개의 날을 갖는 30mm의 표준형 볼랜드밀 공구를 사용하여 축 방향 절삭깊이 (Axial depth of cut)가 150mm, 분당 이송속도가 3,000 mm/min로 일정한 조건하에서 반경방향 절삭깊이(Radial depth of cut:Rd)의 변화에 따른 절삭저항의 차이를 나타낸다. 절삭력의 결과에서 나타난 바와 같이 Rd의 증가와 더불어 절삭저항

이 증가하지만 적용된 절삭조건을 고려하면 일반 금속재료에 비하여 절삭저항의 절대치가 매우 작은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 일반절삭가공에서 배분력에 해당하는 공구 반경방향의 절삭력:Fr에 비하여 주절삭력에 해당하는 Fc의 값이

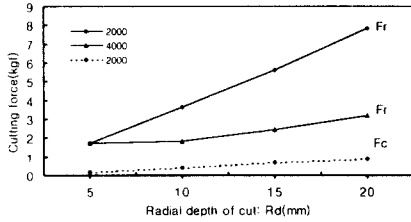


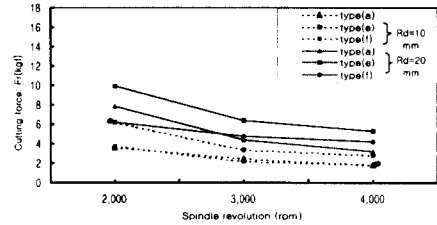
Fig. 6 Cutting force using standard type ball end mill

현저하게 작은 것으로 나타났다. 일반적으로 금속 재료의 절삭가공의 경우에 절삭력비 (Fr/Ft)가 1보다 작은 값을 갖는 점을 고려하면, 이와 같은 결과는 경도 및 강도가 극히 낮은 스티로폴의 소재특성에 기인한 것으로서 스티로폴의 절삭가공은 많은 양의 탄성변형을 동반한다는 사실을 시사하는 것으로 판단 할 수 있다. 또한 주절삭력의 성분이 극히 작은 값을 갖는 사실로부터 스티로폴의 절삭가공에 소요되는 절삭력이 일반 금속재료에 비하여 극히 작으며, 따라서 스티로폴의 경우에는 금속재료의 절삭가공에 비하여 상대적으로 큰 절삭능률을 얻을 수 있는 것으로 예측할 수 있다.

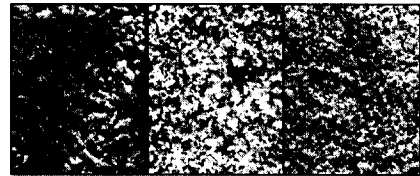
[b] 절삭날의 수에 따른 절삭성능의 차이

30mm의 표준형 볼엔드밀과 동일 직경을 갖는 봉상의 소재의 외주부에 나사절삭 방식을 이용하여 다수의 절삭날을 형성시킨 특수한 형상의 공구를 사용하여 날의 수가 스티로폴의 절삭성능에 미치는 영향을 조사한 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 단, 후자의 특수한 형상을 갖는 공구의 경우에는 동일한 공구 경사각(Rake angle):5.74과 여유각(Relief angle):0을 갖으며, 각각의 절삭날이 경사각(Inclination angle of cutting edge)이 없는 이차원 절삭상태를 이루고 있다. 동 결과로부터, 다수의 날을 형성시킨 공구의 경우에는 날의 수가 많을수록 절삭저항이 저하하며, 칩의 형태 또한 미세화하는 것을 알 수 있다. 일반적으로, 동

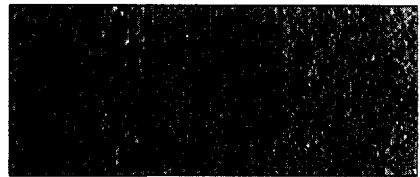
일한 절삭조건하에서는 날의 수에 따라서 공구와 피삭재와의 접촉면적 및 단위면적의 절삭에 작용하는 날의 수가 다르며 이로 인하여 단위 날당의 제거체적에 차이가 발생하게 된다. 따라서 전기의 결과는 Type E와 Type F의 기하학적인 차이로서 날의 수가 증가함에 따라서 공구의 단면상에서 공구 여유면이 감소하며, 이로 인하여 절삭저항의 감소와 더불어 단위면적의 제거에 사용되는 날수의 증가로 인하여 Fig. 7/ b), c)에서 나타난 바와 같이 칩의 크기가 작아지며 절삭면의



(a) Cutting force



(b) Chip condition



(c) Ground surface

Fig. 7 Cutting conditions with number of cutter blade

개선효과가 얻어진 것으로 판단된다. 또한 표준형 볼엔드밀은 Type E와 Type F의 공구에 비하여 다소 낮은 절삭저항을 갖는 반면, 칩의 크기가 증가하고 절삭면의 상태가 악화되는 결과로 나타났다. 이는 공구 Type E와 Type F의 여유각이 영(Zero)인 점을 고려하면 전술한 바와 같이 많은 탄성변형을 동반하는 스티로폴의 절삭가공에서 여유면과 피삭재와의 사이에 접촉면적이 Type E와 Type F에 비하여 상대적으로 감소함

으로써 절삭저항이 작아지는 반면, 날 당의 제거 체적은 증가하게 되어 칩의 크기가 증대하고 표면 거칠기는 큰 값을 갖게 되는 것으로 판단할 수 있다.

[c] 공구 경사각에 따른 절삭성능의 차이

Fig. 8은 다인공구를 사용한 스티로폴의 절삭가공에 있어서 공구 경사각의 차이에 따른 절삭상태의 차이를 조사한 결과이다. 공구 이송속도가 3,000mm/min의 일정한 조건하에서 음의 경사각:

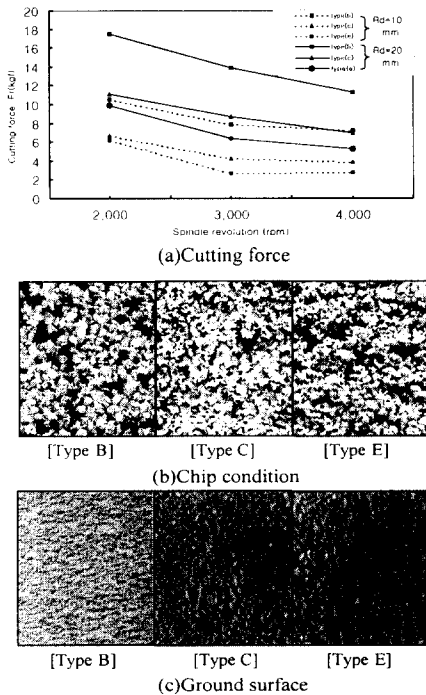


Fig. 8 Cutting conditions with rake angle

27.27을 갖는 Type D의 사용 시에 양의 경사각을 갖는 Type E와 Type F에 비하여 약 2배에 상당하는 커다란 절삭저항을 갖음과 동시에 칩이 커다란 형태를 갖게 되며, 절삭면의 상태 역시 다소 저하되는 것으로 확인되었다. 일반적으로 공구 경사각에 따라서 칩과 공구 경사면과의 사이에 마찰 상태가 결정되며, 이로 인하여 공구에서 피삭재로 전달되는 힘의 작용형태가 변화된다. 따라서 즉, 경사각의 감소는 마찰각의 감소를 유발하게 되고, 이로 인하여 절삭저항의 합력이 소재의 깊이방향으로 작용하게 된다. 따라서 일반 금속재료에 비하여 극히 낮은 탄성계수를 갖

는 스티로폴의 절삭 가공에서는 탄성변형을 증대시키며 이로 인하여 절삭저항의 증가를 초래한 결과로 판단할 수 있다.

[d] 여유각의 유무에 따른 절삭성능의 차이

Fig. 9는 10개의 절삭날과 경사각: 5.74° 를 갖는 공구를 사용하여 여유각에 따른 스티로폴의 절삭성능의 차이를 조사한 결과를 나타낸다. 여유각이 Zero인 Type C에 비하여 25° 의 여유각을 형성시킨 Type D의 경우에 절삭저항이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Table. 2의 결과에서 기술한 바와 같이 절삭가공 중에 많은 탄성변형을 동반하는 스티로폴의 소재특성에 기인하는 결과로 생각할 수 있다. 단, 절삭 후에 가공면은 여유각이 Zero인 경우에 여유각을 갖는 Type D에 비하여 절삭면의 상태가 미소하나마 개선되는 것이 육안으로 관찰되었다. 동 결과에 의하면, 여유각에 따라서 절삭 저항과 절삭면의 상태가 상관관계에 있으며, 양호한 절삭면을 얻기 위해서는 여유각을 작게 유지하고 절삭저항을 감소시키기 위해서는 여유각을 크게 하는 것이 유효한 것으로 사료된다.

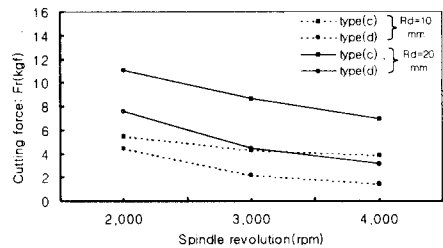


Fig. 9 Effect of relief angle

4. 결 론

본 연구에서는 스티로폴의 절삭기구 및 다인공구를 이용한 스티로폴의 절삭특성에 관하여 조사한 결과, Table. 3의 결과가 얻어졌다. 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 스티로폴의 절삭가공은 일반 금속재료에 비하여 극히 많은 탄성변형을 동반하며, 이상형 칩이 발생된다
- 2) 공구의 날수가 증가함으로써 칩의 크기가 미세화 되며 절삭면의 상태가 개선된다.

Table.3 Experimental results of cutting characteristics of polystyrene foam

	type A	type B	type C	type D	type E	type F	비고
Cutting force	◎	●	○	○	○	○	◎
Chip distribution	●	○	◎	◎	◎	◎	:Better ○
Chip dimension	●	○	◎	◎	◎	◎	:Well ●
Ground surface	●	○	◎	◎	◎	◎	:Worse

- 3)공구의 상면 경사각이 클수록 절삭저항이 감소하고 절삭면의 거칠기가 향상된다.
 4)양호한 절삭면을 얻기 위해서는 여유각을 작게 하고 절삭저항을 감소시키기 위해서는 여유각을 크게 하는 것이 추천된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 지역협력연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. Jone Wiley & Sons, Encyclopedia of Polymar Science and Engineering, vol. 9, A Wiley-Interscience. 1987.
2. 中山一雄, 切削加工論, コロナ社. 1979.
3. 박정환, 자동차 프레스 금형의 스티로폼 패턴 가공을 위한 전용 CAM 시스템 개발 및 활용. 한국 CAD/CAM 학회 학술 발표회 논문집, pp.123-128, 1998.
4. 森川龍一, ゴムの研削加工の研究, 日本機械學會論文集(第3部), 28卷 193号 1113.
5. 田中行雄외2명, ゴムの研削加工に関する研究, 精密工學會誌52/11/1986