

폴리우레탄폼 절삭에서 절삭력을 고려한 공구 오프셋이 가공정도에 미치는 영향에 관한 연구

민 세 흥* · 김 희 송**
(2000년 4월 8일 접수)

A Study of an Effect of Tool Offset on Cutting Precision Considering Cutting Force in Polyurethane Foam Cutting

Se-Hong Min and Hei-Song Kim

Key Words : Polyurethane Foam(폴리우레탄폼), Cutting Force(절삭력), Tool Offset(공구보정)

Abstract

It is possible to shorten developing process by making model using polyurethane foam in the area of automobile developing process, etc. However, this skill is too difficult to be of practical use because machining is not easy due to characteristic of polyurethane foam. Domestic and foreign automobile company use clay, polyurethane foam, etc., those are easy to handle and to make model after completing design sketch. But these materials is difficult to be machined and be worked by human's hand. There are so many difficult problem for machining by making model using polyurethane foam since cutting of elastic body like polyurethane foam has never been studied. Therefore, in this study, it is investigated to measure cutting force that is generated in case of polyurethane foam machining, and to make systematize tool compensation of polyurethane foam cutting work on automobile model by modification of tool offset method on existing steel.

1. 서 론

자동차 등의 개발과정에서 폴리우레탄폼(polyurethane foam)을 사용하여 모델을 제작하므로써 개발과정을 대폭 단축할 수 있으나, 폴리우레탄폼 특성상 기계가공이 난해하여 실용화단계에는 못 미치고 있다. 국내·외 자동차회사들이 디자인 스케치가 완료된 후 모델을 만들기 위해서는 클레이(clay), 폴리우레탄폼 등 손으로 작업하기 쉬운 재료를 사용한다. 이러한 재료들은 기계가공이 불가하여 수작업에 의존하므로써 자동차 등

의 개발기간을 단축하는데 장애가 되고 있다.

기존의 기계가공에 관한 연구들은 대부분 금속 재료와 같은 가공이 양호한 부분에 대해서 연구되어 왔다. 郝 등⁽¹⁾은 오프셋(offset)법에 대해 연구를 진행하였고, Zhang 등⁽²⁾은 오프셋법 설정에 있어 이를 기어가공에 적용방법을 연구하였으며, Lee 등⁽³⁾과 Chuang 등⁽⁴⁾은 일반 금속가공에 오프셋의 접근을 시도하였다.

또한 Gu 등⁽⁵⁾은 절삭력을 유추하는 방법에 대해 연구를 진행하였고, 김 등⁽⁶⁾은 직교좌표 배열법에 의해 일반 금속의 칩처리성에 대한 평가에 대해 연구하였으며, Yeh 등⁽⁷⁾은 CAD와 CAM간의 인터페이스 방법의 설정에 대해 연구하였다.

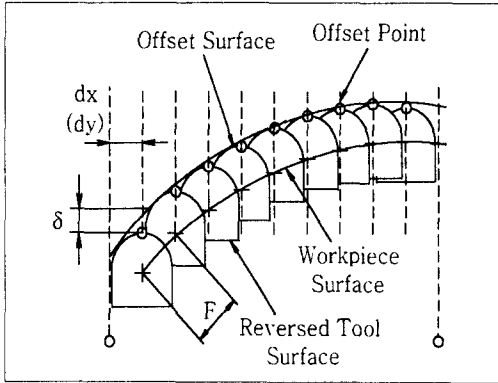
그러나 폴리우레탄폼과 같은 탄성체의 절삭가공은 연구된 바가 없어 폴리우레탄폼을 모델로 기계가공을 적용할 경우 여러 가지 어려운 점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 폴리우레탄폼을 기계가공할 경우에 발생하는 절삭력을 측정하여

* 회원, 경원전문대학 소방안전관리과

E-mail : shmin@kwc.ac.kr

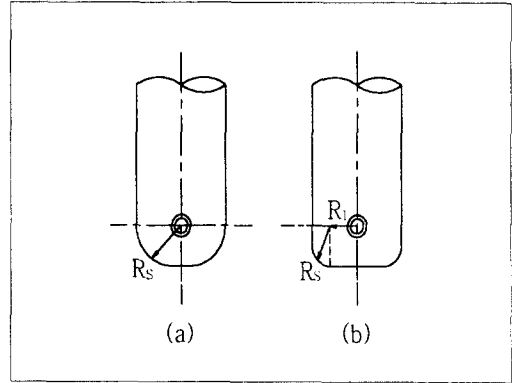
TEL : (031)750-8742 FAX : (031)750-8749

** 회원, 단국대학교 기계공학과



δ : Offset Error
 $dx(dy)$: Z-map Resolution
 F : Feed

Fig. 1 Concept in the inverse offset operation



⊙ : Center of Tool
 R_1 : Radius of Axis Right Angle Direction
 R_s : Radius of Cylinder Direction

Fig. 2 Tool model

기존 강재를 위주로 한 공구 오프셋법을 수정하므로써 자동차모델 가공에 필요한 폴리우레탄폼 절삭 가공시 공구보정을 체계화하고자 한다.

2. 폴리우레탄폼 가공오프셋의 개념

폴리우레탄폼은 탄성을 지닌 소재이므로 일반 금속을 가공할 때와 같은 공구보정으로 정의된 형상을 정확하게 가공하기란 쉽지 않다.

따라서, Fig. 1과 같은 폴리우레탄폼 가공시 역 오프셋개념을 도입하기로 한다. 가공형상의 상태, 특히 가공형상의 공차를 직접적으로 고려하려면 역전공구중심의 이동량 F를 오차 δ 에 따라 결정해야 한다.

즉, 오차 δ 를 어느 범위내에 한정을 두고 이 이동량 F를 설정하여 그 오프셋면을 따라 가공한 형상의 오차가 CAD에서 주어진 공차 범위내에 있어야 하며, 또한 폴리우레탄폼 특성상 탄성변형이 고려되어야 한다. 그러므로 기존의 오프셋 개념과는 다른 해법이 필요하다.

Fig. 2에서는 본 연구에서 사용한 폴리우레탄폼 공구형상을 (a)에 나타내었으며, 일반적으로

금속가공에 많이 사용하는 공구형상을 (b)에 나타내었다.

3차원 CNC공작기계로 가공물을 가공할 때 나타나는 공구형상과 가공형상의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 공구형상과 가공형상과의 접촉점을 P_0 로 정의하면 각각의 형상 높이 Z_s , Z_T 의 합이 최대가 된다.

이 경우 공구중심 O_T 가 접촉점 P_0 에 대한 오프셋면상의 점이 되며 그 높이는 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$Z_0 = \text{Max} (Z_s + Z_T) \quad (1)$$

여기서 Z_T 는 폴리우레탄폼의 탄성변형을 고려한 높이이다. 이것이 폴리우레탄폼 가공의 오프셋 생성법의 기본적인 개념이며, 이상의 기본개념에서 알 수 있듯이 이 오프셋법은 공구와 가공형상과의 접촉점을 산출하여 오프셋면을 구하는 것이다.

특히 접촉점을 구할 경우 형상의 법선벡터를 고려해서 계산하지 않고 각각의 현상 높이의 합 및 그 비교 등과 같은 간단한 계산에 의한 것이 특징이다.

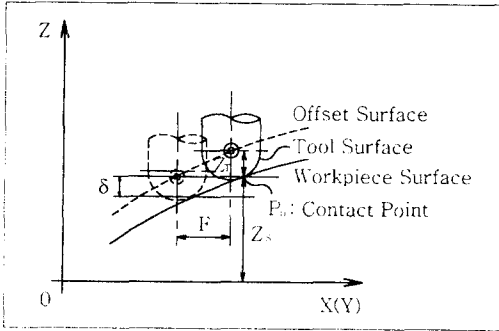


Fig. 3 Concept of the new offset method

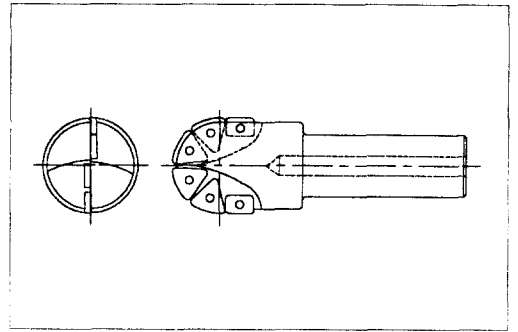
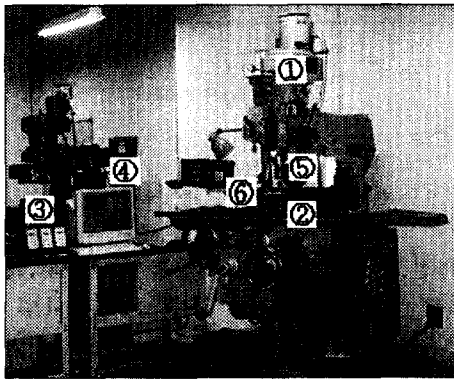


Fig. 5 Shape of tool for cutting of polyurethane foam



① Milling M/C ② Tool dynamometer
③ Amplifier ④ PC ⑤ Tool ⑥ Work

Fig. 4 Experimental system

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 기계가공장비는 밀링머신(테이블 650×500 mm)을 사용하였으며 공구동력계로는 키슬러(KISTLER)사 M-80형을 사용하였다.

절삭 저항을 측정할 실험장치를 Fig. 4에 나타내었다.

그리고 공구는 Fig. 5와 같이 특수한 공구를 사용하였다. 일종의 다인 볼 엔드밀로서 폴리우

Table 1 Mechanical property of polyurethane foam

Type	Density (kg/m ³)	Hardness (kg/(314/cm ²))	Elasticity Coefficient	Tear Strength (kg/cm)
A	40	25	1.2	0.60
B	33	22	1.0	0.50
C	22	15	0.8	0.40
D	15	11	0.6	0.35

레탄폼 기계가공을 위해 특수 제작하였다.

다인 볼 엔드밀의 팁으로는 QPKW120408을 사용하였으며, 전체 다인 볼 엔드밀의 직경은 $\phi 50$ 이다.

3.2 실험방법

실험에 사용한 폴리우레탄폼은 KS-M-3014, KS-M-667과 JIS K 6401에 의해 Table 1에서와 같이 4종류를 사용한다. 폴리우레탄폼을 두께 10 mm, 가로와 세로는 100×100 mm로 하여 공구동력계에 고정하고 엔드밀 가공하여 절삭력을 측정한다. 이때 공구동력계의 절삭력 신호를 증폭기에서 증폭시켜 PC로 보낸다. PC에는 A/D컨버터가 있어 절삭력 신호를 kg로 환산하여 표시한다.

Table 2 Cutting conditions

	Fixed conditions	Variable conditions
Case 1	Feed speed 50 mm/min	Rotation frequency (rpm)
	Cutting depth 5 mm	500, 1000, 1500, 2000
Case 2	Cutting depth 5 mm	Feed speed (mm/min)
	Rotation frequency 1000 rpm	30, 40, 50, 60
Case 3	Rotation frequency 1000 rpm	Cutting depth (mm)
	Feed speed 50 mm/min	3, 5, 10, 15, 20

또한, 실험조건에 대해서는 Table 2에 나타냈듯이 이송속도, 절삭깊이와 이송속도 등에 대해 각각 다음과 같은 다양한 조건을 설정하여 실험을 진행하였다.

먼저 이송속도는 50 mm/min, 절삭깊이는 5 mm, 회전수는 1000 rpm으로 이들 조건 중 2가지의 조건을 고정하고, 나머지 조건들을 설정된 범위에서 변화를 부여하여 가공을 진행하였다.

예를 들어 Case 1인 경우에 이송속도를 50 mm/min로 절삭깊이를 5 mm로 조건을 고정한 후에 회전수를 500, 1000, 1500, 2000 rpm로 변화를 주어 가공을 하였으며, Case 2인 경우에는 절삭깊이를 5 mm, 회전수를 1000 rpm으로 고정하고 이송속도를 30, 40, 50, 60 mm/min로 변화를 주어 가공을 하고, 마지막으로 Case 3인 경우에는 회전수를 1000 rpm, 이송속도를 50 mm/min로 조건을 고정하고 절삭깊이를 3, 5, 10, 15, 20 mm로 변화를 주어 가공을 진행하여 각각의 경우에 대한 데이터를 측정하는 방법을 적용하였다.

Fig. 6과 같이 CAD모델을 본 연구에 적용하였으며, 모델링은 CAD프로그램은 상용화된 소프트웨어를 사용하였다.

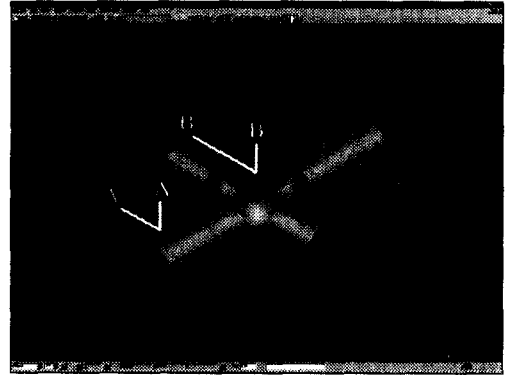


Fig. 6 CAD shape

4. 실험결과

4.1 폴리우레탄폼의 절삭력

폴리우레탄폼의 절삭성을 평가하기 위해 밀도가 각각 40, 33, 22와 15 kg/m³인 피삭재를 앞에서 설명한 실험방법에 의해 절삭력을 측정하였다.

피삭재가 탄성체이므로 절삭깊이를 5 mm로, 밀링 회전속도는 1000 rpm으로 일정하게 하여 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다. 절삭력 중 공구보정에 관계되는 추력만을 측정하였다. 밀도가 40 kg/m³인 피삭재는 5.0 kg, 밀도가 33 kg/m³인 피삭재는 3.5 kg의 추력이 발생하였으나, 밀도 22 kg/m³와 15 kg/m³는 절삭이 불가하여 절삭력을 측정할 수 없었다. 밀도가 낮은 폴리우레탄폼은 반발력이 생기지 않으므로 칩이 발생하지 못하는 절삭기구임을 알 수 있었다.

따라서 폴리우레탄폼의 절삭성 평가요소 중 폴리우레탄폼의 밀도는 중요하며 일정 이상의 밀도 이어야 절삭이 가능함을 알 수 있었으나, 본 실험에서 사용한 공구로는 폴리우레탄폼 중 밀도가 33 kg/m³ 이상의 피삭재에서 절삭가공이 가능하였다. 폴리우레탄폼 특성상 밀도를 다양하게 제조할 수 없어 제한적인 실험이 되었으나, 본 실험에 의해 밀도와 절삭성의 상관관계를 밝히는데 만족하고 앞으로 다양한 폴리우레탄폼을 제작하여 보다 폭 넓은 연구가 필요하다고 사료된다.

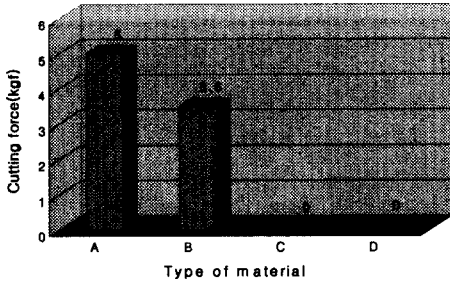


Fig. 7 Graph of measuring result

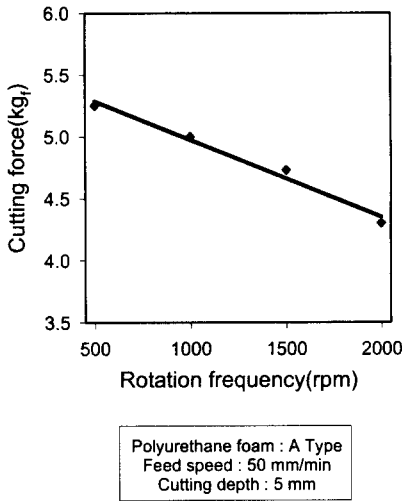
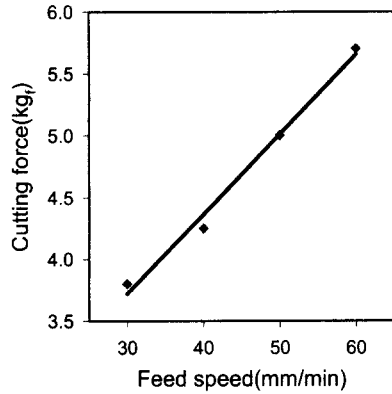


Fig. 8 Relation of rotation frequency and cutting force

실험에서 얻어진 데이터로부터 회전수, 이송속도와 절삭깊이를 각각 절삭저항과의 관계를 다음과 같은 결론을 구할 수가 있다. 먼저 회전수와 절삭저항과의 관계를 고찰하였는데, Fig. 8에는 밀도가 40 kg/m³인 폴리우레탄폼을 소재로 이송속도는 50 mm/min, 절삭깊이 5 mm로 절삭조건을 설정한 결과를 나타내었다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 회전수가 증가함에 따라 절삭저항은 감소하였는데 이는 일반강의 가공시 유사한 형태로 나타났다. 단, 회전수별 절삭력의 값 차이가 상당히 적은 것으로 나타나서 회전수의 변화에 따라 절삭저항의 영향은 크지 않은 것으로 보인다.



Polyurethane foam : A Type
Feed frequency : 1000 rpm
Cutting depth : 5 mm

Fig. 9 Relation of feed speed and cutting force

다음은 이송속도와 절삭저항과의 관계를 Fig. 9에 나타내었으며, 이때의 절삭조건은 밀도 40 kg/m³인 폴리우레탄폼을 소재로 회전수 1000 rpm, 절삭깊이는 5 mm 이다.

이송속도가 증가할수록 절삭력이 증가하며 절삭면적의 증가에 따라 절삭력이 증가한 것을 알 수 있었다. 이것은 회전수와는 달리 이송에 대해서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같은 다인공구를 사용하여 절삭날의 수가 많기 때문에 절삭력에 영향을 크게 미치는 것으로 판단된다.

마지막으로 절삭조건은 밀도 40 kg/m³인 폴리우레탄폼을 소재로 회전수와 이송속도를 각각 1000 rpm과 50 mm/min로 하여 절삭깊이와 절삭저항의 관계를 나타내었다.

Fig. 10에 나타낸 바와 같이 일반적으로 절삭깊이가 증가할수록 절삭저항값이 커지지만 절삭깊이가 15 mm 이상인 경우에는 가공시 절삭날이 탄성체인 폴리우레탄폼의 특성상 가공이 안되고 찢어지는 현상으로 인하여 절삭저항의 측정이 불가하였다. 또한, 절삭깊이가 10 mm인 경우에도 절삭면이 뜯겨지는 현상이 발생되어 절삭깊이 5 mm보다 절삭저항이 급격히 증가하였다. 따라서 폴리우레탄폼 가공시 적정 절삭깊이의 선정이 절삭면에 미치는 바가 크다는 것으로 나타났다.

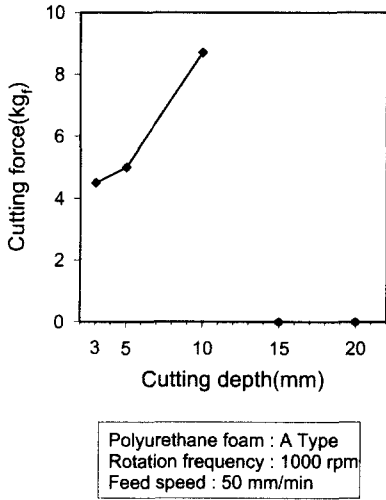


Fig. 10 Relation of cutting depth and cutting force

4.2 공구보정

폴리우레탄폼을 Fig. 5와 같은 볼엔드밀로 가공할 경우, 일반 공작물의 경우와 달리 폴리우레탄폼은 탄성체이므로 식 (1)과 같은 공구보정이 필요하다.

그러므로 공구 오프셋량을 구하기 위해 앞에서 절삭력을 측정하였으며, 각 폴리우레탄폼의 탄성계수를 고려하여 공구 오프셋량을 결정한다.

따라서 폴리우레탄폼 공구보정은 공구반경오프셋량과 탄성변형 공구오프셋량으로 정의되며, CAD 데이터로부터 NC 데이터를 생성시에 이러한 폴리우레탄폼 공구보정을 하여야 한다.

절삭력 측정이 가능한 밀도가 40 kg/m³와 33 kg/m³인 폴리우레탄폼에 대해 공구보정을 수행한 결과, 절삭력에 의한 공구보정값은 각각 4.17 mm와 3.5 mm로 나타났다.

Fig. 11은 밀도가 40 kg/m³인 폴리우레탄폼의 공구보정 전 형상데이터와 공구보정 후 형상데이터를 비교한 것으로 탄성변형 공구오프셋량은 4.17 mm로 하였다.

4.3 공구보정 후 가공정도

폴리우레탄폼을 공구보정한 후 NC데이터를 생성하여 머시닝센터에서 가공한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 그리고 가공된 폴리우레탄폼을 측정



Fig. 11 Tool offset for cutting by CNC

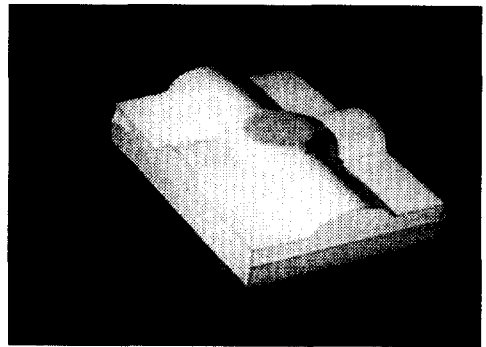


Fig. 12 Finished product of polyurethane foam cutting

하기 위해 비접촉식 3차원측정기를 이용하여 측정데이터를 얻는다. 이 측정데이터는 점데이터로 되어 있으므로 면데이터로 전환하여 3D 모델링한 후, CAD데이터와 비교하여 가공오차를 분석한다. 본 연구에서는 측정데이터와 CAD데이터를 비교 분석하는 소프트웨어를 사용하여 Fig. 13과 같이 폴리우레탄폼의 가공정도를 확인할 수 있었다.

Fig. 13에 나타낸 바와 같이 일반적으로 현재 사용되고 있는 폴리우레탄폼 모델에 허용하고 있는 공차 ±2 mm(폴리우레탄폼의 부분적인 요철부

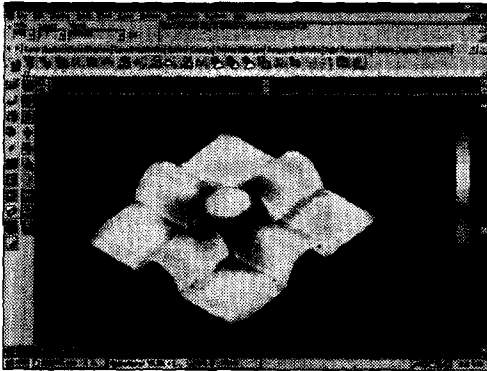


Fig. 13 Comparison of measuring data and CAD data by software

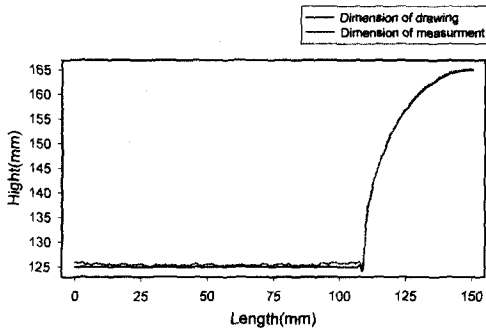


Fig. 14 Analysis of section A-A

분 포함)보다 작게 나타나 공구보정 후 폴리우레탄폼 가공의 정도는 폴리우레탄폼에 적용이 가능한 것으로 나타났다.

위의 결과에 대한 도면치수와 측정데이터를 비교하여 분석한 결과를 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 14는 Fig. 6의 단면 A-A, Fig. 15는 Fig. 6의 단면 B-B에 대한 도면치수와 비교 분석도이다. 여기에서도 알 수 있듯이 가공공차는 ± 2 mm보다 작게 나타났다.

5. 결론

이상과 같이 폴리우레탄폼 가공시 절삭력을 고

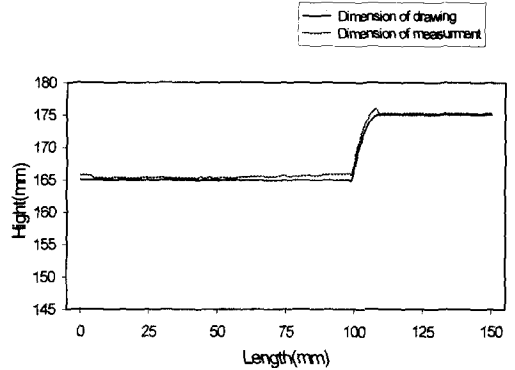


Fig. 15 Analysis of section B-B

려하여 공구오프셋을 한 경우, 가공정도에 관한 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었 수 있었다.

(1) 폴리우레탄폼의 기계적 성질 중 밀도에 따라 절삭력이 다르며, 본 연구에서는 폴리우레탄폼의 밀도가 33 kg/m^3 이상일 때에 절삭이 가능하며 절삭력을 측정할 수 있었다.

(2) 폴리우레탄폼 기계가공시 절삭저항은 회전수가 적을수록, 이송이 클수록 크게 나타났으며 일정 절삭깊이 이상이 되면 정상절삭이 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

(3) 폴리우레탄폼의 공구보정은 가공 특성상 공구반경오프셋과 탄성변형을 고려한 공구오프셋의 합으로 나타나며, 밀도가 40 kg/m^3 이상인 폴리우레탄폼은 탄성변형 공구오프셋량을 4.17 mm로 해야 한다.

(4) 폴리우레탄폼 가공 후 CAD데이터와 측정 데이터를 비교한 결과, 가공정도는 약 ± 1 mm 이내로 가공되어 폴리우레탄폼 모델에 적용이 가능하였다.

(5) 폴리우레탄폼을 사용하여 모델을 제작하였을 때, 설계, 제조, 검사의 일련의 과정을 컴퓨터를 이용하여 CIM화하므로써 폴리우레탄폼 모형 제작 시간을 크게 단축시키며 품질도 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

- (1) 萩明暉, 水垣善夫, 坂本正史, 1992, “擴張 Z-map 모델による測定支援システムの開發,” 日本精密機械學會 論文集, 58卷, 7号, pp. 111~116.
- (2) Zhang, Y., Wu, Z., 1997, “Offset Face Gear Drives-Tooth Geometry and Contact Analysis,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 119, No. 1, pp. 114~119.
- (3) Lee, B.K., Koc, B., 1998, “Ellipse-Offset Approach and Inclined Zig-Zag Method for Multi-Axis Roughing of Ruled Surface Pockets,” *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 12, pp. 957~971.
- (4) Chuang, S.H.F. and Kao, C.Z., 1999, “One-Side Arc Approximation of B-Spline Curves for Interface-Free Offsetting,” *Computer Aided Design*, Vol. 31, No. 2, pp. 111~118.
- (5) Gu, F., Kapoor, S.G., Devor, R.E. and Brandyopadhyay. P., 1997, “An Enhanced Cutting Force for Face Milling with Variable Cutter Feed Motion and Complex Workpiece Geometry,” *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, Transactions of the ASME, Vol. 119, No. 4, pp. 467~475.
- (6) 金南勳, 朱浩允, 玄東勳, 李用成, 1997, “직교 배열법에 의한 Chip처리성 평가,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 351~364.
- (7) Yeh, Z. and Ying, D., 1988, “An Automated Interface Between CAD and CAM,” *Computer & Graphics*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 349~357.