

엔드밀 형상에 따른 가공특성 분석을 이용한 형상설계 S/W 개발

한창규*, 고성림+, 유중학++, 서천석***, 김경배***

Development of Geometry Design S/W using Analysis on Machining Characterization considering EndMill Geometry

Chang-Kyu Han*, Sung-Lim Ko+, Joong-Hak Yoo++ Cheon-Seok Seo***, Kyoung-Bae Kim***

Abstract

The tool geometry parameters and cutting process have complex relationships. Until now, various cutting test were needed to acquire optimal design of end mill for the purpose of high speed machining, due to the insufficient knowledge about cutting process in high speed machining. Using various tools with different geometry, relationships between tool geometry parameter (rake angle, clearance angle, length of cutter) and cutting process (cutting force, surface accuracy, surface roughness) have been studied. Acquired data can be used to design optimal tool for high speed machining and developed tool geometry design S/W.

Key Words : Tool geometry (공구 형상), High speed machining (고속 가공), Cutting force (절삭력), Rake angle (공구 경사각), Clearance angle (공구 여유각), End mill (엔드밀)

1. 서론

엔드밀은 산업현장에서 정밀금형이나 다이 제조 시 넓게 사용되는 절삭 공구이며 공작기계의 향상에 따라 발전을 함께 거듭해 왔다. 공작기계의 고속화에 따라 공작기계의 측면에서는 강성 증가, 열변형의 억제와 동적 안정성의 개선 및 응답성 개선을 통해 정밀도를 개선시키고 이송속도와 절삭속도의 증가를 통하여 생산성을 증대시키고 있다. 공구의 측면에서는 새로운 재종 및 코팅기법의 개발을 통해 공구수명의 향

상을 달성하고 있다. 또한 공구형상의 최적화를 통해 동적 안정성을 확보하고 가공 정밀도를 개선하고자 하는 다양한 시도가 이루어지고 있다.

기존의 연구에서는 엔드밀의 여유각과 경사각 형상의 변화가 절삭 성능에 중요한 영향을 미치는 것에 대해 연구하였다. Kaldor는 여유각의 차이가 공구의 수명에 영향을 미치며 절삭조건에 따라 최적 형상이 존재함을 실험을 통해 확인하였다[1,2,3]. Melkote는 엔드밀 가공 시 여유각과 경사각에 따라 표면 조도에 미치는 영향과 런아웃에 대한 error를 보정하여 가공면 형성을 모델링 하였다[4]. 선삭가공시 공구

* 발표자, 건국대학교 대학원 기계설계학과 (launchhan@empal.com)
주소: 서울시 광진구 화양동 건국대학교 공과대학 기계설계학과
+ 건국대학교 기계설계학과 (slko@konkuk.ac.kr)
++ 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부
+++ 한국야금(주)

직경에 따라서 적정 여유각이 결정됨을 알 수 있었다[6]. 국내에서는 다양한 설계변수에서의 절삭성능의 관계를 연구하였다[7,8].

절삭전용 FEM S/W AdvantEdge로 FEM해석을 수행하여 FEM결과와 실제 실험 결과를 비교하였다.[9,10]

본 연구에서는 다양한 피삭재에서 밀링가공 시 고속 가공용 엔드밀의 여유각과 경사각의 변화에 따른 절삭 성능의 변화와 고속 가공 시 미치는 영향을 연구하였다. 이 결과를 이용하여 엔드밀 형상설계 S/W를 개발하였다.[11]

2.엔드밀 가공에서의 여유각과 경사각의 영향

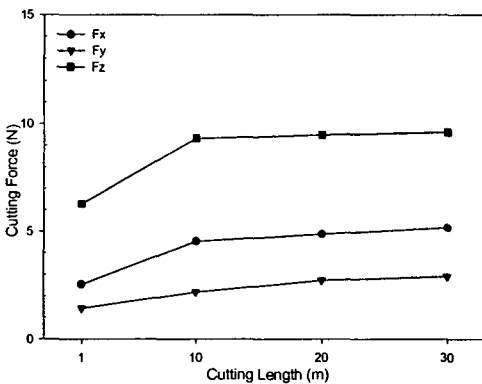
2.1 절삭조건 및 장비

본 연구에서는 공구 형상과 절삭 공정과의 관계에 대한 분석을 위하여 피더스 RFM-760 고속가공기를 이용하여 주어진 Table 조건하에서 한국야금에서 생산한 볼엔드밀을 이용하여 피삭재 STD61(Hrc52)을 하향 절삭 가공을 수행한 후, Kistler 9254 공구 동력계와 NI I/O Board를 이용하여 Scale을 1V 에 50N으로 설정하여 각 구간별 절삭력을 측정하였으며 SomeTech Vision 현미경을 이용하여 공구마모를 측정하였다.

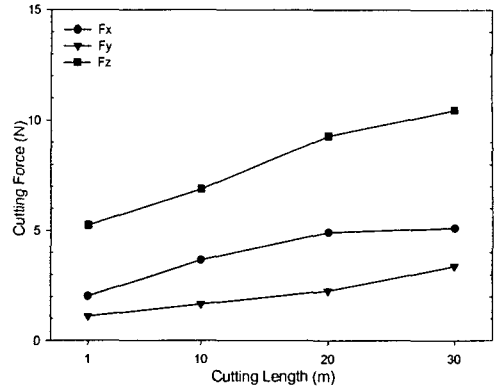
2.2 볼엔드밀 $\phi 1$ 인 경우

Table.1 Cutting Condition for $\phi 1$ End milling

D[mm]	AD[mm]	Pf(Cusp)[mm]	fz[mm/tooth]	RPM	V[m/min]	F[m/min]
1	0.15	0.05(0.00063)	0.02	37500	118	1500



(a) Ball EndMill $\phi 1$ (-30R 10C)



(a) Ball EndMill $\phi 1$ (-30R 25C)

Fig.1 Comparison of Cutting Forces in Ball EndMill $\phi 1$ with Different Tool Geometry

절삭력 측정 결과 3가지 경우 모두 Fz방향의 값이 가장 크고, Fx방향, 그리고 Fy방향의 값은 상대적으로 가장 작았다. 이는 실험조건이 Ad의 값과 Radial 방향의 Pf의 값에 대해 볼 엔드밀의 바닥면의 절삭저항(Fz방향)이 상대적으로 큰 것으로 판단된다.

그래프를 비교해 볼 때 두 엔드밀 모두 절삭력이 크게 차이가 나지는 않지만 (-30R 10C)의 형상을 가진 엔드밀이 절삭력이 더 낮았다. (Fig.1)

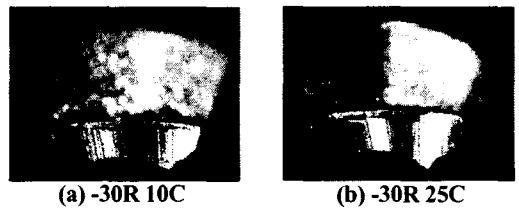


Fig.2 Illustration of Tool Wear in Ball EndMill $\phi 1$ with Different Tool Geometry

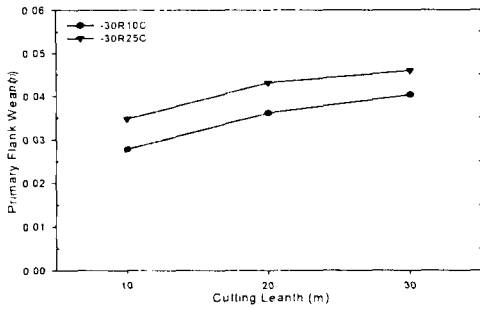


Fig.3 Comparison of Tool Wear in Ball EndMill $\phi 1$ with Different Tool Geometry

공구마모(Flank Wear)도 공구현미경으로 찍은 공구마모 사진과 30m 절삭 후 측정값을 정리한 그래프를 이용하여 비교해 볼 때 모두 -30R 10C 의 형상을 가진 엔드밀의 성능이 더 우수하다는 것 알 수 있었다. (Fig.2,3)

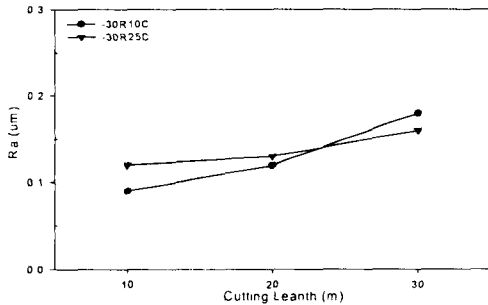


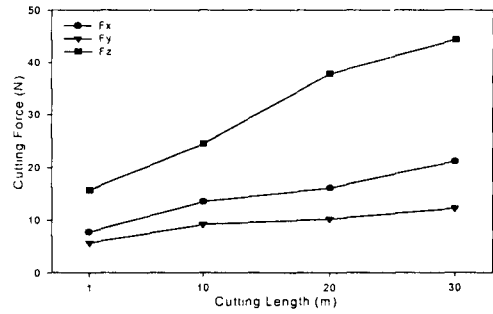
Fig.4 Comparison of Surface Roughness in Ball EndMill $\phi 1$ with Different Tool Geometry

피삭재 표면 거칠기의 측정값을 정리한 그래프를 비교해 보면 절삭초기에는 -30R 10C 가 -30R 25C 보다 Ra값이 작으나 절삭 말기로 갈수록 -30R 10C의 Ra 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 그 차이가 그리 크지 않기 때문에 전체적으로 볼 때 -30R 10C의 형상을 가진 엔드밀로 가공한 피삭재의 표면 거칠기가 좋다고 할 수 있다. (Fig.4)

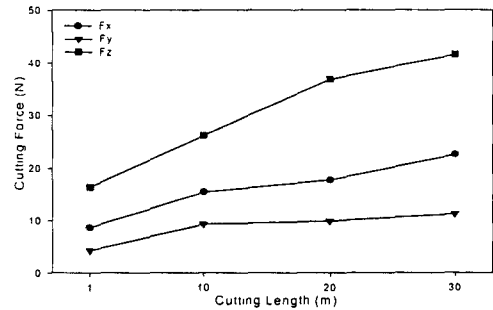
2.3 볼엔드밀 $\phi 3$ 인 경우

Table.2 Cutting Condition for $\phi 3$ End milling

D[mm]	AD[mm]	Pf(Cusp)[mm]	fz[mm/tooth]	RPM	V[m/min]	F[m/min]
3	0.45	0.15(0.002)	0.04	32000	302	2560



(a) Ball EndMill $\phi 3$ (-25R 10C)



(b) Ball EndMill $\phi 3$ (-25R 25C)

Fig.5 Comparison of Cutting Forces in Ball EndMill $\phi 3$ with Different Tool Geometry

$\phi 1$ 에서와 마찬가지로 절삭력 측정 결과 모두 Fz방향의 값이 가장 크고, Fx방향, 그리고 Fy방향의 값은 상대적으로 작았다. 이는 실험조건이 Ad의 값과 Radial 방향의 Pf의 값에 대해 볼엔드밀의 바닥면의 절삭저항(Fz방향)이 상대적으로 큰 것으로 판단된다.

그래프를 비교해 볼 때 두 엔드밀 모두 Fx와 Fy는 크게 차이가 나지는 않으며 Fz는 -25R 25C의 형상을 가진 엔드밀이 절삭력이 더 낮았다.(Fig.5)

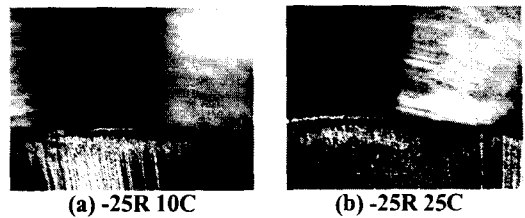


Fig.6 Illustration of Tool Wear in Ball EndMill $\phi 3$ with Different Tool Geometry

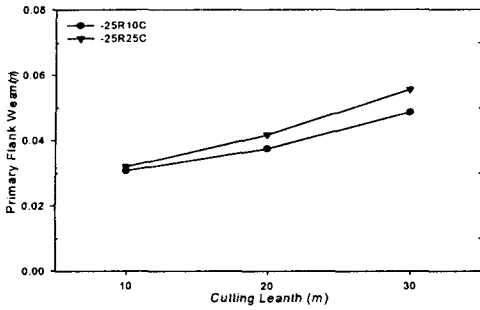
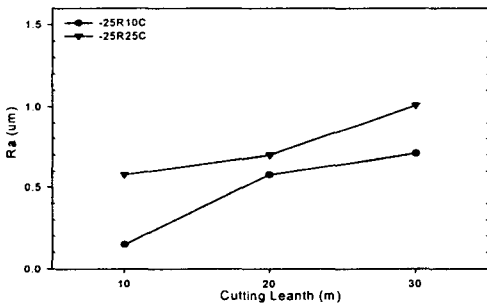
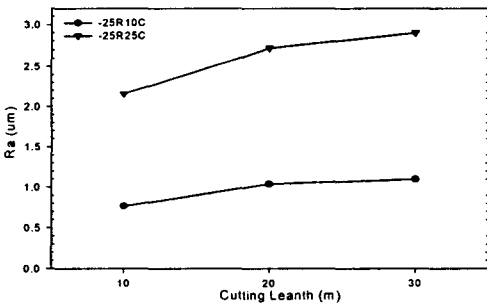


Fig.7 Comparison of Tool Wear in Ball EndMill $\phi 3$ with Different Tool Geometry

$\phi 3$ 에서 공구마모(Flank Wear)는 절삭력과 달리 공구 현미경으로 찍은 공구마모사진과 30m 까지 절삭 후 측정값을 정리한 그래프를 이용하여 비교해 볼 때 모두 -25R 10C의 형상을 가진 엔드밀이 절삭력은 약간 높지만 공구마모는 그리 큰 차이는 아니지만 조금 더 적다는 것을 그래프를 통해 알 수 있었다. (Fig.6,7)



(a) Feed Direction Ra



(b) Radial Direction Ra

Fig.8 Comparison of Surface Roughness in Ball EndMill $\phi 3$ with Different Tool Geometry

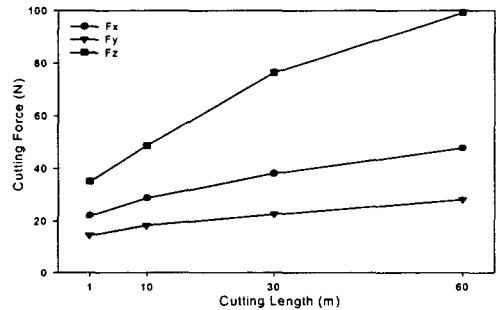
피삭재 표면 거칠기의 측정값을 정리한 그래프를 비교해 보면 $\phi 1$ 에서는 형상에 관계없이 거의 비슷했으나 $\phi 3$ 에서는 Feed 방향, Radial 방향 모두 -25R 10C 가 더 좋은 것으로 나타났다. (Fig.8)

전체적으로 볼 때 절삭력은 약간 높지만 Ra가 더 좋은 -25R 10C 형상의 볼엔드밀이 더 좋다는 결론을 얻었다.

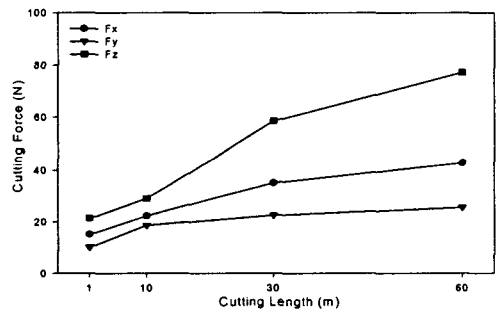
2.4 볼엔드밀 $\phi 6$ 인 경우

Table.3 Cutting Condition for $\phi 6$ End milling

D[mm]	AD[mm]	Pf(Cusp)[mm]	fz[mm/tooth]	RPM	V[m/min]	F[m/min]
6	0.9	0.3(0.004)	0.06	16000	302	1920



(a) Ball EndMill $\phi 6$ (-20R 5C)



(b) Ball EndMill $\phi 6$ (-20R 10C)

Fig.9 Comparison of Cutting Forces in Ball EndMill $\phi 6$ with Different Tool Geometry

$\phi 1$ 과 $\phi 3$ 에서와 마찬가지로 절삭력 측정 결과 모두 Fz

방향의 값이 가장 크고, Fx방향, 그리고 Fy방향의 값은 상대적으로 작았다. 이는 실험조건이 Ad의 값과 Radial 방향의 Pf의 값에 대해 볼엔드밀의 바닥면의 절삭저항(Fz방향)이 상대적으로 큰 것으로 판단된다.

그래프를 비교해 볼 때 두 엔드밀 모두 Fx와 Fy는 크게 차이가 나지는 않으며 Fz는 -20R 10C의 형상을 가진 엔드밀이 절삭력이 더 낮았다.(Fig.9)

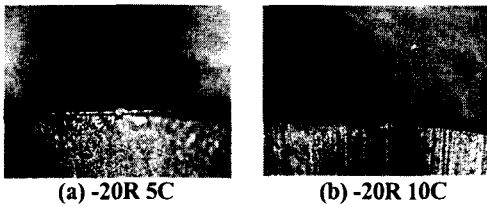


Fig.10 Illustration of Tool Wear in Ball EndMill $\phi 6$ with Different Tool Geometry

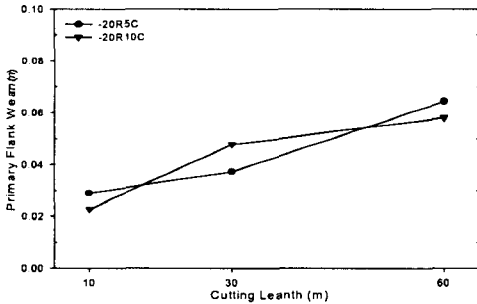
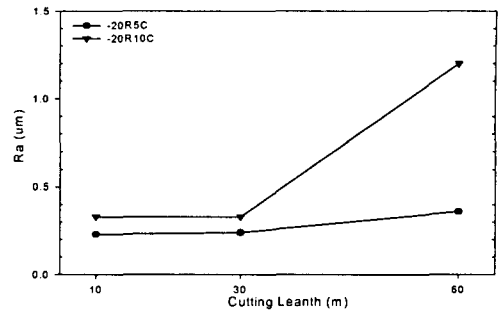
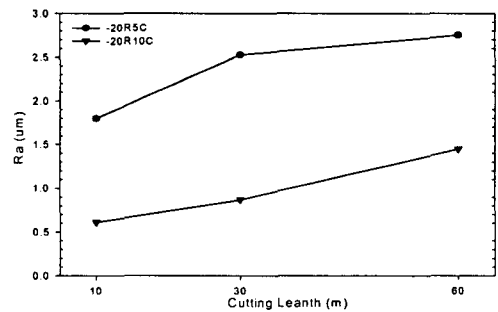


Fig.11 Comparison of Tool Wear in Ball EndMill $\phi 6$ with Different Tool Geometry

$\phi 6$ 에서 공구마모(Flank Wear)는 공구현미경으로 찍은 공구마모사진과 60m 까지 절삭 후 측정값을 정리한 그래프를 이용하여 비교해 볼 때 절삭초기에는 -20R 5C 가 -20R 10C 보다 Ra값이 작으나 절삭 말기로 갈수록 -20R 5C의 Ra 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 그 차이가 그리 크지 않기 때문에 전체적으로 볼 때 -20R 5C의 형상을 가진 엔드밀로 가공한 피삭재의 표면 거칠기가 좋다고 할 수 있다. (Fig.10,11)



(a) Feed Direction Ra



(b) Radial Direction Ra

Fig.12 Comparison of Surface Roughness in Ball EndMill $\phi 6$ with Different Tool Geometry

표면 거칠기(Ra)값은 60m 절삭 후 평균값에서 Feed 방향은 -20R 5C 형상을 가진 엔드밀이 우수 했으며 Radial 방향은 -20R 10C 형상을 지닌 엔드밀로 가공한 피삭재 Ra가 더 우수한 것으로 나타났다.

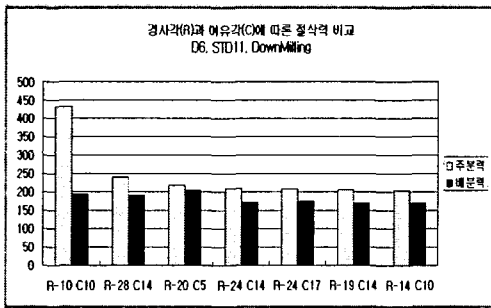
Feed 방향에서 -20R 10C 형상을 지닌 엔드밀로 가공한 피삭재의 Ra가 30m에서 갑자기 증가하는 것으로 보아 전체적으로 비교해 볼 때 -20R 5C 형상을 가진 엔드밀이 더 좋다고 판단할 수 있다. (Fig.12)

2.5 실험 결과

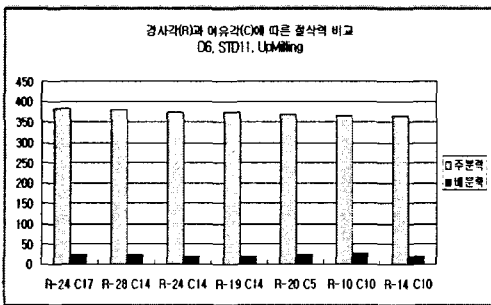
지금까지 분석한 실험결과를 분석하면 $\phi 1$ 에서는 -30R 10C, $\phi 3$ 에서는 -25R 10C, $\phi 6$ 에서는 -20R 5C에서 상대적으로 우수한 절삭성능을 나타낸다는 것을 알 수 있었으며 엔드밀의 각 직경별로 최적의 공구경사각과 공구 여유각이 존재한다는 것을 실험을 통해서 알 수 있었다. 이와 같은

실험결과는 적용된 가공조건에 관한 정보와 함께 데이터 베이스의 중요한 자료가 되어서 저장된다. 보편적으로 이와 같은 자료들을 모든 경우에 대하여 얻는다는 것은 불가능하기 때문에 효율적인 실험을 통하여 효과적인 데이터 베이스를 구축하는 것이 최적형상을 구할 수 있는 엔드밀 형상설계를 위한 프로그램 개발의 주요한 핵심이기도 하다.

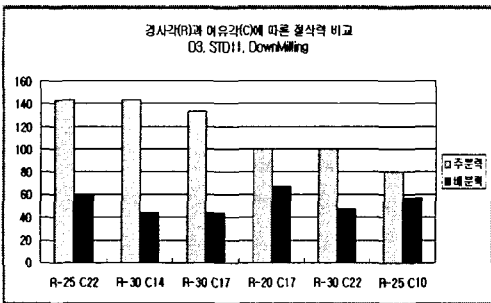
2.6 FEM 해석결과와 실험 결과의 비교



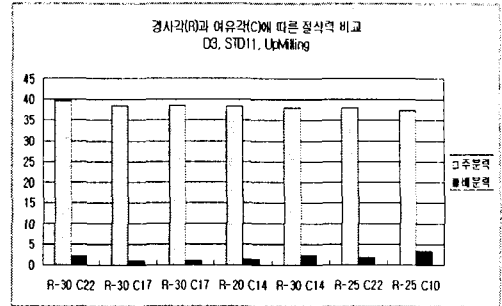
(a) $\phi 6$ DownMill FEM Result Comparison



(b) $\phi 6$ UpMill FEM Result Comparison



(c) $\phi 3$ DownMill FEM Result Comparison



(d) $\phi 3$ UpMill FEM Result Comparison

Fig.13 FEM Simulation of Burr Formation in Orthogonal Cutting

Fig. 13은 절삭전용 Fem 상용 S/W인 AevantEdge로 $\phi 6$ 과 $\phi 3$ 에 대해서 2차원 해석을 수행한 결과를 막대그래프로 표시한 그림이다. UpMilling에서는 공구의 형상에 관계없이 절삭력이 상당히 크게 나온 것을 그래프를 통해 알 수 있다.

DownMilling 에서는 $\phi 6$ 에서 -10R 10C 의 형상을 가진 공구를 제외하고는 절삭력이 모두 비슷하게 측정되어 있으며 굳이 가장 좋은 결과를 고르자면 -14R 10C에서 가장 절삭력이 낮았다. $\phi 3$ 에서는 경사각이 줄어들수록 절삭력은 낮아졌지만 여유각은 특별한 규칙을 찾을 수가 없었다. 굳이 가장 좋은 결과를 고르자면 -30R 22C에서 가장 결과가 좋았다. (Fig.13)

실험결과와 FEM 결과를 비교해 보면 FEM 결과가 실험결과에 비해 절삭력이 상당히 크게 나왔지만 전체적인 경향을 비교를 하게 되면 실험결과와 경향과 FEM 결과의 경향이 어느 정도 일치한다는 것을 각각의 값을 분석 후 알 수 있다.

단순히 다양한 형상의 전체적인 경향성만을 따진다면 굳이 직접적인 실험 없이 FEM 해석만으로도 어느 정도 신빙성 있는 결과를 얻을 수 있다는 것을 위의 결과비교를 통해 알 수 있었다.

3. 엔드밀 형상설계용 S/W 개발

현재까지 각각 직경과 형상을 달리해서 얻은 엔드밀 절삭 성능 결과를 기반으로 하여 DataBase를 구축하였으며 절삭 성능을 나타내기 위하여 절삭저항, 가공표면조도, 공구마모 특성 및 진동특성을 포함하고 있으며 또한 주어진 피삭재와 가공조건에 따른 특성을 나타내기 위하여 다양한 피삭재와 절삭조건에서 수행된 지표표를 포함하고 있다.

가장 단순화된 입력조건으로서 사용 피삭재와 공구직경 및 적용 및 절삭속도만을 입력함으로서 이를 가장 효율적으로 수행할 수 있는 추천절삭조건과 공구형상을 도출할 수 있도록 S/W를 개발하였다. (Fig.14)

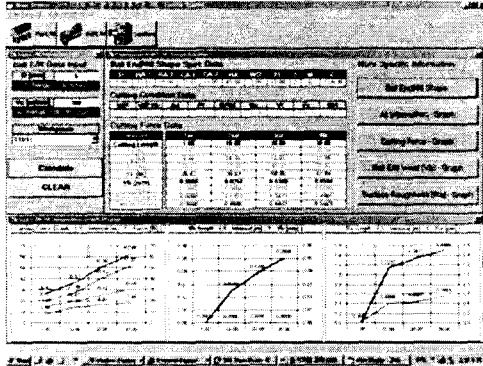


Fig. 14 EndMill Geometry Design S/W GUI

엔드밀 형상설계 S/W를 개발하는 목적은 직접적인 실험을 거치지 않고서도 다양한 직경의 엔드밀 최적 형상 정보를 예측이 가능하게 하기 위한 것이다. 그러나 현재 실험하여 얻은 값으로 구축한 DB의 양은 그리 많지 않아서 최적 조건을 다소 한정된 구간에서만 계산할 수 있지만 앞으로 다양한 피삭재와 공구를 이용하여 지금보다 더 많고 다양한 실험을 한 후 그 동안 수행한 볼엔드밀 실험결과를 포함한 Data를 다양하게 추가하여 DataBase를 더 크게 확장시켜 구축을 하면 추후에 평엔드밀링은 물론이고 볼엔드밀링을 포함한 가공을 위한 상당히 많은 종류의 피삭재와 공구의 최적 조건을 계산할 수 있을 것으로 기대 되므로 상당히 유용한 프로그램이 될 것임을 확신 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 여유각과 경사각의 영향을 알기 위해의실 다양한 여유각과 경사각의 형상을 지닌 볼엔드밀의 실험을 통해 실제 절삭 성능의 영향을 관찰 분석 하였다.

1. Hrc52인 STD11 피삭재로 절삭 실험을 하여 직경1, 3 그리고 6mm인 볼엔드밀에서 공구수명과 정밀도가 가장 우수한 최적 공구경사각과 공구여유각이 존재함을 실험을 통하여 확인하였다.

2. FEM 해석을 통하여 실제 실험결과와 비교 후 경향을

분석하였다.

3. 최적의 엔드밀 여유각과 경사각을 실험적으로 구하였으며 이 결과를 이용하여 DB를 구축 후 이를 바탕으로 하여 엔드밀 형상설계 S/W를 개발하였다.

참 고 문 헌

1. Kador, S., Trendler, P. H. H., and Hodgen, T., "Investigation Into the Clearance Geometry of End Mills," Annals CIRP, Vol. 33/1, p. 33, 1984.
2. Kador, S., Trendler, P. H. H., and Hodgen, T., "Investigation and optimization of the Clearance Geometry of End Mills," Annals CIRP, Vol. 34, p. 149, 1985.
3. Kador, S., " A Common Denominator for Optimum Cutting Tool Geometry," Annals CIRP, Vol. 35, No. 1, p. 41, 1986.
4. S. N. Melkote, A. R. Thangaraj, " An Enhanced End Milling Surface Texture Model Including the Effects of Radial Rake and Primary Relief Angles", Transaction of the ASME, Vol. 116, May, 1994
5. S.Kobayasi, E.G.Thomsen "The Role of Friction in Metal Cutting", Transaction of the ASME, pp324-332, 1960.
6. IM. A. El Baradie, "The effect of varying the workpiece diameter on the cutting tool clearance angle in tool life testing" Wear 195, pp. 210~105, 1996
7. 배승민, 고성림, 2001, "고속가공용 엔드밀의 형상설계에 관한 연구," 한국정밀학회 2001년도 추계학술대회 논문집 pp. 10~22
8. 강명창, 김정석, 2002. "고속가공용 엔드밀 형상변화에 따른 가공성 평가," 한국정밀학회 2002년도 5월 한국정밀공학학회지 pp. 133~138
9. Third Wave Systems, "AdvantEdge User's Manual Version 4.2"
10. Third Wave Systems, "AdvantEdge Theoretical Manual Verion 3.3"
11. 이석호, 2001, "데이터베이스 시스템과 SQL Server", 정익사 pp. 460~518