

고속 파이프 절단기의 절단 조건 선정에 관한 연구

안성환*, 이춘만⁺, 신상훈⁺⁺

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 10. 8)

A Study on the Selection of Cutting Conditions in High Speed Pipe Cutting Machine

Sung-Hwan Ahn*, Choon-Man Lee⁺, Sang-Hun Shin⁺⁺

Abstract

This study presents the selection of cutting conditions in high speed pipe cutting machine for the better quality. A high speed pipe cutting machine which uses a rotary knife can make good quality products in short time. But, the machine is much sensitive by cutting conditions because of the complicated mechanism. In this reason, many experiments for cutting condition selection are necessary to improve quality of production. This study carried out cutting experiments with the three factors that are cutting RPM, cutting force and pooling force. 2-dimensional profile measuring instrument is used to measure which is represented by Δh , a sum of burr and collapse height. The effects of factors are analyzed by using MINITAB, the commercial software.

Key Words : Pipe Cutting(파이프 절단), Minitab(미니탭), Knife Cutter(나이프 절단), Cutting Experiment(절단 실험), Copper Pipe(동관)

1. 서론

동 파이프 및 기타 비철금속 파이프는 오늘날 여러 산업분야에서 중요 배관 자재로서 활용되고 있다. 파이프의 사용 특성상 다양한 형태로 가공되어져 사용되며 특히냉동, 공조 분야에 수요가 급격히 늘어나고 있는 추세이다. 이러한 파이프 제품들은 주로 다품종 소량 생산되며, 주로 절단 가공에

있어서 원형의 톱을 이용한 방식을 이용해 오고 있다. 하지만 이러한 현재의 톱을 이용한 절단 방법은 미세한 금속 분진이 많이 발생해 작업 환경을 악화시키고, 다량의 날카로운 버(Burr)가 발생하여 2차적인 버 제거 공정이 필요하다. 이러한 여러 이유들로 인해 매년 증가하는 파이프의 가공품의 수요에 대처하기 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 나이프를 이용한 다열 고속절단기가 필요하다.

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원
+ 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (cmlee@sarim.changwon.ac.kr)
주소 : 641-773 경남 창원시 사림동 9번지
++ 창원대학교 기계설계공학과

나이프를 이용한 다열 고속 절단기를 살펴보면 다음과 같다. 다품종 소량 생산에 대한 적합성의 측면에서는 기존의 1열 작업 방식에서 벗어나 여러 파이프의 종류를 동시에 작업할 수 있는 장점이 있으며, 이로 인해 공간의 절약과 작업 환경의 개선을 동시에 만족시킬 수 있다. 제품의 품질의 측면에서 볼 때는 원형의 나이프가 파이프 주위를 회전하며 절단하는 방식을 이용해서 버의 발생을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

반면에 기계가 복잡해짐에 따라 작업 조건에 따라 제품의 품질에 변화가 발생한다. 또한 버와 함몰의 발생이 일반 톱 절단에 비해 적지만 어느 정도 발생했다. 이러한 절단 조건이 잘못 설정된 경우에 Fig. 1과 같이 공구가 파손되는 경우 까지 발생했다.

이러한 경우를 막고, 더욱 향상된 제품을 얻을 수 있는 절단 조건을 선정하기 위해서 공구의 회전 속도, 공구에 가해

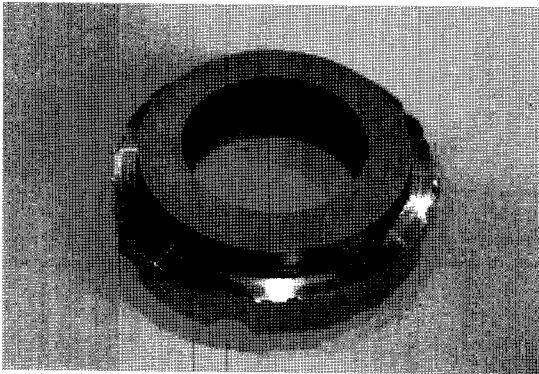


Fig. 1 A knife fracture by improper cutting conditions

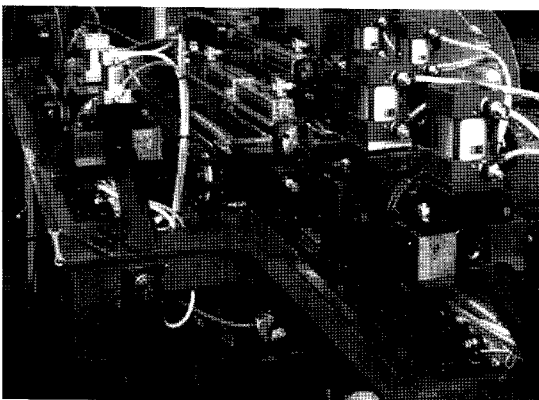


Fig. 2 The multi high speed knife cutting machine

지는 힘, 파이프를 당기는 힘 등의 인자를 변화시켜 실험을 하고 상용 통계 프로그램인 MINITAB®을 이용해서 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

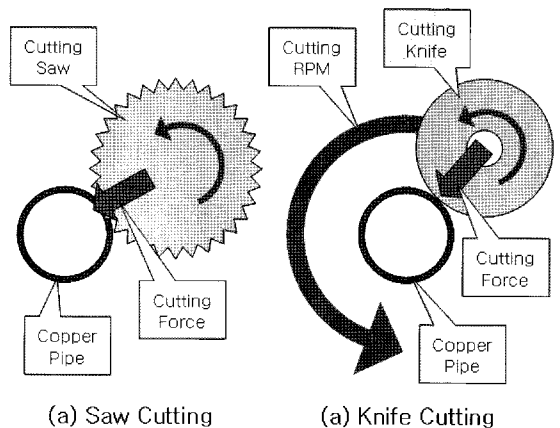
Fig. 2는 본 실험에 이용된 고속 파이프 절단기다. 기존 원형톱을 이용한 절단 방법과 나이프 커팅 장치의 차이는 Fig. 3에 도식화 되어 있다. 원형톱을 이용한 절단 방법과는 달리 나이프 자체가 파이프 주위를 회전하며 절단력을 가해 파이프를 절단하게 되고, 절단 속도 향상을 위해 한쪽을 고정하고 반대편에서 인장력의 주며 파이프를 절단한다.

길이의 조절은 수치제어로 조정되며 $\pm 0.15\text{mm}$ 의 정도를 가지고 있다. 작업 범위는 직경 15.88mm, 두께 1t까지 작업할 수 있다. 기계는 총 3열을 갖추고 있으며 모든 실험은 2번째 열에서 이루어졌다.

2.2 실험 시편 및 공구

본 실험에서 사용된 시편은 배관 자재로 가장 보편적으로 사용되는 소재인 직경이 15.7mm이고 두께가 0.7mm인 일탈산동(Phosphorus Deoxidized Copper)재질의 파이프이다. 그 선행 실험의 절단작업으로 인해 뒤쪽의 시편이 영향을 받는 것을 최소화하기 위해 시편의 절단 길이는 100mm로 하였다.

절단에 사용된 공구는 Fig. 3와 같은 형태의 주문 제작된 직경 34.45mm의 원형의 커팅나이프이다.



(a) Saw Cutting

(a) Knife Cutting

Fig. 3 A Difference of Saw and Knife Cutting

2.3 실험 계획 및 방법

파이프의 절단 품질을 평가하기 위해서 Fig. 4와 같이 내측으로 성장하는 버와 함몰의 양을 합한 Δh 의 값을 측정하였다. Δh 가 커지면 타 부품과의 결합이 어렵게 되고, 유체를 흘렸을 때 파이프 내부의 마찰이 증가하게 된다.

또 이러한 버와 함몰이 매우 심한 경우에 이를 제거하기 위한 2차 가공이 별도로 필요하기 때문에 이를 최소화하기 위해 Δh 을 특성치로 정하였다.

실험 인자로는 나이프 공구가 파이프의 주위를 회전하는 절단 RPM(Cutting RPM), 회전하는 공구를 파이프 방향으로 밀어 넣어주는 절단력(Cutting force), 파이프를 당기는 인장력(Pulling force)으로 선정 하였고, 수준은 일반적인 작업 조건을 기준으로 상, 중, 하 3단계로 설정하였다. 구체적인 값은 Table 1과 같다.

모든 인자와 수준에 대해서 완전요인배치법을 이용하여 $3^3=27$ 회 실험했으며, 2회 반복 실험하여 총 54회의 실험을 실시하였다.

온도의 변화와 재료의 상태 등 기타 제어하지 못한 인자에 대한 영향을 최소화하기 임의의 순서대로 실행하였다. 이 실험은 MINITAB®을 이용하여 계획한 후 실행하였다.

파이프를 고정시키는 클램핑(Clamping)력은 공장에서 일정하게 유지할 수 있는 최대 압력인 7bar로 유지하였다. 실험 장소의 온도와 습도는 따로 제어하지 않았으며, 실험 시작시의 온도는 12℃ 였다.

2.4 시편의 측정

절단된 시편을 측정하기 위해 Mahr사의 2차원 형상측정기인 XR-2와 V블록을 이용해서 측정하였다. 이 측정기의 시편을 측정이 진행되는 x방향으로 0.1/mm, Δh 를 측정하기 위한 z방향의 0.04/mm의 분해능을 가지고 있다.

파이프 절단의 경우 한번의 절단으로 2개의 절단면이 발생하는데, 이 때 기계측에 잡혀 있는 절단면과 떨어져 나간 절단면이 다를 것으로 판단하고 Fig. 6과 같이 기계측에 고정된 시편을 H라 하고, 떨어져나간 부분을 T로 정리한 후 각각 구분하여 측정하였다.

또한 절단된 파이프에 방향성이 존재하였고, 그로 인해 마지막에 떨어져 나간 한 부분이 다른 형태를 보였는데, 절단의 형태가 다른 부분과 다르게 나타나는 지점을 1번으로 지

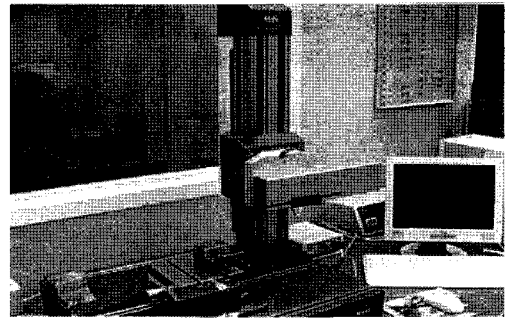


Fig. 5 The measurement system

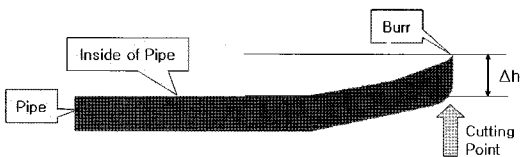


Fig. 4 The definition of Δh

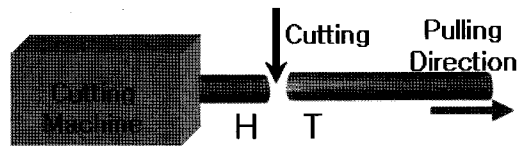


Fig. 6 A classification of cutting plane by position

Table 1 The Experiment Factor and Factor Level

factor	factor level
cutting RPM (RPM)	775
	571
	351
cutting force (bar)	6
	4
	2
pulling force (bar)	6
	4
	2

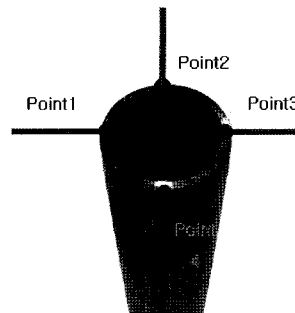


Fig. 7 A classification of Measure Points

정하고 90°간격의 시계방향으로 각각 2번, 3번, 4번으로 구분하여 측정하였다.

3. 분석

측정된 Δh 값의 전체 평균을 볼때 약 0.384mm의 값을 나타내었고, 동일한 소재의 원형톱에 의한 절단에 비해 크게 개선된 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 8은 원형톱날에 의한 절단과 나이프 절단에 의한 절단을 비교한 그림이다. 나이프를 이용한 파이프의 절단은 원형 톱을 이용한 것에 비해 전체적으로 버의 양이 매우 적을 뿐만 아니라 버의 형상이 일정한 것을 확인할 수 있다.

기계에 고정되어 있는 절단면과 떨어져 나간 절단면 H와 T를 비교해 보았다. H와 T의 측정값 중 1번에서 4번까지 Δh 의 전체 평균값을 보면 H값이 전반적으로 작은 값을 나타냈다. 측정된 값의 평균값은 Table 3과 같다.

이 결과를 통해서 고정측의 절단면의 품질이 떨어져나간 절단면에 비해 약 30% 정도 양호하다는 것을 확인할 수 있으며 더 좋은 정도를 요구하는 경우나 다른 부품과의 결합이 필요한 경우는 기계측에 고정된 면을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이는 양측이 같은 힘을 받지만 고정된 쪽이 절단 공구에 의해 고정되는 효과가 있기 때문이라고 판단된다.

Table 2 The results of experiment

Run	Cutting RPM	Cutting Force	Pooling Force	H1	H2	H3	H4	T1	T2	T3	T4
1	531	2	4	0.369	0.131	0.349	0.299	0.240	0.535	0.585	0.300
2	531	6	4	0.134	0.237	0.503	0.464	0.104	0.560	0.802	0.552
3	885	4	6	0.387	0.341	0.258	0.243	0.325	0.075	0.504	0.205
4	177	6	6	0.251	0.258	0.512	0.545	0.211	0.640	0.882	0.365
5	531	2	4	0.089	0.192	0.290	0.344	0.239	0.170	0.553	0.361
6	531	4	6	0.308	0.121	0.462	0.332	0.197	0.564	0.724	0.379
7	177	2	6	0.260	0.186	0.430	0.351	0.204	0.224	0.648	0.411
8	885	6	2	0.079	0.385	0.586	0.574	0.102	0.399	0.601	0.507
9	885	2	2	0.100	0.173	0.232	0.377	0.260	0.273	0.487	0.311
10	177	6	4	0.266	0.399	0.534	0.497	0.126	0.545	0.876	0.362
11	531	2	6	0.283	0.100	0.261	0.305	0.140	0.350	0.713	0.588
12	177	2	4	0.106	0.155	0.367	0.497	0.251	0.542	0.653	0.461
13	531	6	2	0.394	0.190	0.376	0.475	0.180	0.112	0.437	0.517
14	531	2	6	0.321	0.125	0.326	0.246	0.336	0.199	0.564	0.457
15	177	4	4	0.299	0.261	0.545	0.471	0.140	0.264	0.655	0.392
16	177	6	6	0.241	0.314	0.489	0.554	0.222	0.654	0.895	0.356
17	531	4	2	0.119	0.269	0.442	0.519	0.222	0.765	0.778	0.402
18	177	2	2	0.086	0.284	0.472	0.473	0.089	0.545	0.826	0.559
19	177	4	6	0.202	0.260	0.487	0.480	0.151	0.523	0.930	0.489
20	885	4	4	0.136	0.250	0.244	0.149	0.230	0.282	0.543	0.341
21	531	2	2	0.138	0.191	0.371	0.462	0.132	0.640	0.638	0.383
22	885	6	4	0.143	0.178	0.320	0.386	0.230	0.353	0.615	0.421
23	177	2	4	0.066	0.166	0.418	0.469	0.179	0.552	0.783	0.405
24	531	4	6	0.130	0.090	0.418	0.434	0.335	0.367	0.712	0.562
25	177	2	2	0.115	0.236	0.479	0.579	0.075	0.506	0.763	0.509
26	531	4	4	0.143	0.178	0.320	0.386	0.230	0.353	0.615	0.421
27	177	4	4	0.117	0.237	0.552	0.508	0.112	0.729	0.951	0.420
28	885	2	2	0.109	0.130	0.224	0.393	0.291	0.370	0.454	0.378
29	885	4	2	0.331	0.188	0.305	0.412	0.166	0.690	0.874	0.356
30	885	2	6	0.469	0.082	0.238	0.171	0.413	0.235	0.444	0.141
31	885	6	4	0.184	0.183	0.338	0.348	0.285	0.541	0.601	0.353
32	177	4	2	0.143	0.414	0.597	0.582	0.148	0.770	0.966	0.473
33	531	4	2	0.215	0.232	0.475	0.488	0.215	0.751	0.763	0.393
34	531	6	6	0.185	0.143	0.433	0.472	0.168	0.640	0.788	0.345
35	531	6	4	0.144	0.199	0.534	0.563	0.128	0.689	0.187	0.714
36	531	2	2	0.062	0.160	0.363	0.410	0.095	0.634	0.719	0.494
37	177	6	2	0.321	0.412	0.469	0.562	0.251	0.945	1.023	0.518
38	177	6	2	0.270	0.395	0.512	0.572	0.226	0.696	0.956	0.514
39	177	2	6	0.328	0.138	0.387	0.441	0.140	0.539	0.894	0.602
40	885	4	2	0.062	0.159	0.315	0.397	0.246	0.514	0.578	0.514
41	177	4	6	0.175	0.191	0.225	0.569	0.321	0.523	0.895	0.456
42	531	6	6	0.314	0.934	0.788	0.410	0.148	0.563	0.712	0.492
43	885	6	6	0.241	0.314	0.489	0.554	0.222	0.654	0.895	0.356
44	177	4	2	0.154	0.342	0.539	0.592	0.138	0.670	0.878	0.621
45	885	4	6	0.426	0.081	0.288	0.270	0.338	0.265	0.468	0.244
46	531	6	2	0.368	0.226	0.464	0.580	0.191	0.733	0.883	0.460
47	177	6	4	0.308	0.323	0.549	0.504	0.158	0.675	0.921	0.332
48	885	2	6	0.421	0.124	0.264	0.210	0.327	0.265	0.440	0.223
49	885	6	2	0.098	0.199	0.333	0.330	0.093	0.671	0.607	0.277
50	885	6	6	0.383	0.569	0.394	0.261	0.182	0.350	0.592	0.32
51	885	2	4	0.481	0.061	0.199	0.259	0.197	0.235	0.473	0.329
52	531	4	4	0.143	0.191	0.356	0.493	0.249	0.574	0.773	0.37
53	885	2	4	0.322	0.227	0.049	0.349	0.185	0.411	0.438	0.278
54	885	4	4	0.134	0.118	0.184	0.296	0.259	0.443	0.481	0.377

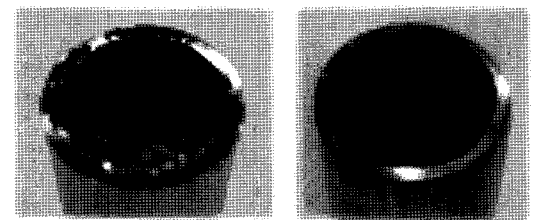


Fig. 8 Cutting planes of saw and knife cutting

Table 3 Δh of fixed and traveled cutting plane

	H (Fixed Cutting Plane)	T (Traveled Cutting Plane)	Difference
Value	0.318mm	0.450mm	0.132mm

Analysis of Variance for TOTAL, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Cutting RPM	2	0.124139	0.124139	0.062070	36.29	0.000
Cutting Force	2	0.079381	0.079381	0.039691	23.21	0.000
Pooling Force	2	0.023849	0.023849	0.011924	6.97	0.004
Cutting RPM*Cutting Force	4	0.001134	0.001134	0.000284	0.17	0.950
Cutting RPM*Pooling Force	4	0.004494	0.004494	0.001123	0.66	0.627
Cutting Force*Pooling Force	4	0.013390	0.013390	0.003348	1.96	0.130
Cutting RPM*Cutting Force*Pooling Force	8	0.010009	0.010009	0.001251	0.73	0.663
Pooling Force						
Error	27	0.046180	0.046180	0.001710		
Total	53	0.302636				

Fig. 9 The analysis of variance for total average Δh

Δh 값의 전체 평균값에 대한 인자들에 대한 영향을 분석했다. Fig. 9의 분석결과에서 적합성 결여 P값이 0.005이하인 것을 유효하다고 판단했을 때 절단 RPM, 절단력, 인장력 세 인자 모두 주효과에 대해 유효인자인 것으로 확인되었다. Δh 값의 전체 평균에 대한 교호효과는 유효인자가 아닌 것으로 판단되었으며, 이를 그래프로 표현한 것은 Fig. 10과 같다.

절단 RPM에 대해서는 빠를수록 Δh 값이 작아졌으며, 매우 선형적인 결과를 확인 할 수 있었다. 그러나 회전 속도가 약 1000RPM 이상에서는 절단이 정상적으로 이루어지지 않았다. 공구가 파이프 주위를 회전하기만 할 뿐 파이프를 절단하지 못하거나 많은 시간을 소요했다. 이는 파이프의 중심 방향으로 가해지고 있는 절단력이 원심력으로 인해 밖으로 나가는 힘이 서로 상쇄되기 때문에 때문이라고 판단된다.

절단력은 작을수록 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 특히 절단 RPM이 낮고, 절단력이 높은 경우 Δh 중 대부분을 차지하는 버 외에 파이프 자체의 함몰이 다량 발생하여 파이프의 품질이 악화되었다. 1mm 또는 그 이상의 두께의 파이프를 가공하는 경우에는 절단력으로 인한 Δh 값의 증가는 다소 감소하였다.

인장력은 약 4bar 부근에서 가장 좋은 결과를 나타내었다. 인장력이 너무 약한 경우 대부분의 절단이 절단력에 의해 일어나기 때문에 버가 더 심화되는 경향을 나타낸다고 보여지며 그 반대의 경우는 가장 마지막에 절단되는 부분에서 재료에 넥킹(necking)이 일어나며 파이프의 안쪽으로 함몰이 발생하기 때문이라고 생각된다. 인장력이 6bar 이상이거나 홀더에 이물질이 들어간 경우 그 이하에서 클램핑력이 인장력에 비해 부족해져 파이프의 절단이 끝나지 않은 상태

로 빠져나가 공구를 손상시키고 불량제품을 발생시키기 때문에 주의가 필요하다.

앞서 살펴본 바를 통해서 실험 조건 중 절단 RPM은 885RPM, 절단력은 2bar, 인장력이 4bar인 경우 가장 좋은 절단 조건임을 알 수 있다. 위의 조건에서의 2회의 실험에서 Δh 값은 1회에서 0.279mm 2회에서 0.328mm로 평균 0.303mm의 값을 나타냈다. 이는 Δh 의 전체평균값 0.384와 비교해 보았을 때 비례 약 25% 양호한 결과이다. 하지만 단순히 두 개의 측정값의 차이가 0.049mm로 편차가 클 것으로 예상할 수 있다. 주효과에 대한 그래프를 통해 위의 절단 조건에서 보다 나은 결과를 예상할 수 있다.

인장력에 의한 영향을 좀 더 깊이 살펴보기 위해서 마지막에 인장력의 영향으로 절단되는 지점인 H1과 T1을 분리해서 분석한 결과는 Fig. 11과 같다.

H1과 T1는 마지막에 절단이 일어나는 곳으로 절단력의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 이 지점의 절단은 절단 공구에 의해 일어나지 않고 인장력에 의해 지배적인 영향을 받았다고 볼 수 있다. 인장력이 증가함에 따라 1번 위치에서의 Δh 의 값이 매우 커지는 것을 볼 수 있다.

1번 지점에서의 대한 결과를 분리했을 때 교호효과가 나타나는 것을 Fig. 12의 그래프를 통해서 확인 할 수 있었다. 절단력 + 인장력과 절단력 + 인장력에 대해서는 어느 정도 교호효과가 존재하지만 큰 영향을 미친다고 생각하기 어려운 수준이었다. 그러나 절단 RPM + 절단력에서는 교호효과를 확인 할 수 있었다. 고속회전에서는 큰 힘이 그리고 저속에서는 작은 힘이 유리하다는 것을 알 수 있다. 이는 절단 RPM에 의한 원심력이 절단력에 직접적인 영향을 주고 있기 때문이다.

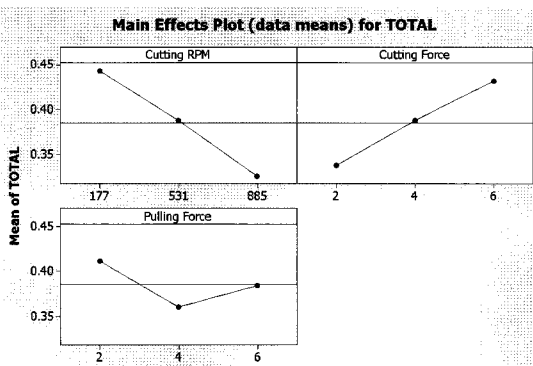


Fig. 10 The main effects plot for total average Δh

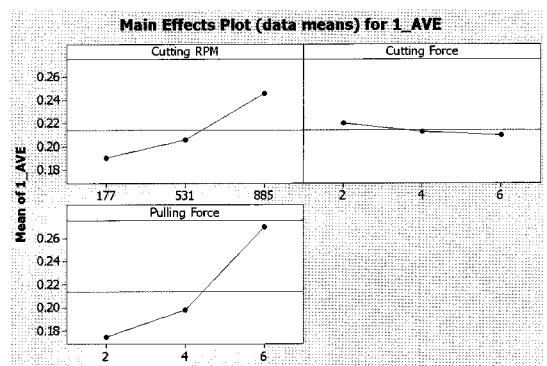


Fig. 11 Main effects plot for Δh of position 1

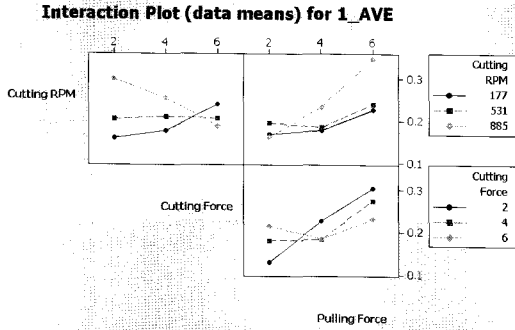


Fig. 12 Interaction plot for Δh of position 1

4. 결론

나이프를 이용한 초고속 파이프 커팅머신의 파이프 절단의 조건 선정을 위해서 직경 15.7mm, 두께 0.7mm의 동 파이프를 절단 RPM, 절단력, 인장력의 인자를 변화시키면서 실험 후 분석하였다. 본 실험에서 수행한 각 인자에 의한 영향 및 경향은 다음과 같다.

- (1) 절단 RPM이 증가할수록 제품의 품질이 양호해졌다. 그러나 약 1000RPM 이상에서는 정상적인 절단작업이 불가능했다.
- (2) 절단력은 낮을수록 제품의 품질이 양호해졌다. 그러나 절단력이 2bar 또는 그 이하에서 절단 속도가 떨어지므로 주의가 필요하다.
- (3) 절단력은 4bar 부근에서 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 마지막에 절단이 발생하는 1번 지점에 큰 변화가 오기 때문에 고른 절단면을 얻고자 한다면 절단력을 낮게 설정하는 것이 유리하다. 특히 6bar 이상은 공구 파손이나 불량품을 발생시키므로 피하는 것이 좋다.
- (4) 기계측에 고정된 절단면이 떨어져나간 절단면에 비해 30%정도 좋은 결과를 나타냈다. 양쪽이 절단된 파이프는 H면을 우선 이용하는 것이 좋다.

- (5) 절단면의 방향성으로 인해 1번 위치의 형상이 다른 지점과 상이하게 나타나며 이 지점의 정도 개선을 위해서는 절단 RPM과 절단력을 감소시켜야 한다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Park, S. H., 1984, *Modern Design of Experiments*, Min-yeong-sa, Seoul, pp. 9~11.
- (2) Shin, S. H., and Lee, C. M., 2005, "A Study on the Development of Multi-Way High Speed Pipe Cutting Machine," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 950~953.
- (3) Lee, S. B., 2002, *MINITAB User Handbook*, ERETEC, Korea, pp. 168~256.
- (4) Lee, C. M., Hwang, Y. G., and Jung, J. Y., 2004, "The Effect of Cutting Conditions on Surface Roughness in MQL Turning," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 28~33.
- (5) Kim, S. Y., Kim, H. I., Cho, S. G., Bae, B. G., Suk, C. S., Lee, J. G., Mo, J. Y., and Park, D. Y., 2005, "An Investigation of Tensile Specimen Appearance for Slender Tubular Products by Copper," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 2001~2005.
- (6) Kim, H. J., Lim, S. H., and Lee, C. M., 2005, "A Study on the Process for Precision forming by 3-dimension bending machine," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 1897~1900.