

크로스 롤러가이드의 다단형상인발공정 패스 스케줄에 관한 연구

이태규¹ · 이찬주¹ · 이상곤² · 이선봉³ · 김병민[#]

A Study on the Pass Schedule of Multi-Pas Shape Drawing Process for Cross Roller Guide

T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim

(Received August 31, 2009 / Revised October 16, 2009 / Accepted October 20, 2009)

Abstract

In the multi-pass shape drawing process, the pass schedule that includes the determination of reduction ratio and intermediate die shape is very important. This study used the equal reduction, equal load, and electric field analysis method for pass schedule of the multi-pass shape drawing. The reduction ratio was calculated by the equal reduction and equal load method. And the intermediate die shape was determined by the result of the electric field analysis and the calculated reduction ratio. The proposed pass schedule method was applied to a shape drawing for producing cross roller guide. Finally, FE-analysis and shape drawing experiment were performed to verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Multi-Pass Shape Drawing, Pass Schedule, Equal Reduction, Equal Load, Electric Field Analysis

1. 서 론

인발가공은 봉재, 선재 및 관재 등의 제품을 생산하는데 널리 사용되는 소성가공 방법으로 일정한 단면을 가지면서 길이가 긴 제품을 생산하는데 주로 이용되고 있다[1].

축대칭 인발공정과 달리 단면형상이 복잡한 이형인발공정은 인발하중, 단면감소율, 생산효율 등을 고려하여 일반적으로 최대 3 패스 내로 행해진다. 이형인발공정에서는 단면형상이 복잡하기 때문에 적절한 중간 다이설계와 각 패스 별 단면감소율을 설정하는 것이 중요하다[2]. 그러나 실제 현장에서는 작업자의 경험에 의해 반복적인 시행착오를 거쳐 설계가 이루어지고 있는 실정이다.

따라서, 보다 정확하고 효과적인 이형인발공정 설계가 요구되며, 현재까지 이형인발에 대한 연구들은 다양하게 이루어져 왔다.

Yoshida 등은 스테인레스강에 대한 다단 인발실험을 통해 가공조건을 평가하였고[3], Steuff 등은 각형 단면의 인발 시 설계방법에 따른 치수정도와 진직도를 평가하였다[2]. Basily 등은 원형봉에서 정다각형 형상의 인발공정에 대한 상/하계해를 이용하여 최적의 금형형상을 제시하였다[4]. 그러나, 다단형상인발공정에 대한 패스 스케줄, 즉 단면감소율 설정 및 중간 패스 다이단면형상 설계에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다단이형인발공정의 단면감소율 및 중간다이 단면형상 설정방법을 제안하였다. 등

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
2. 부산대학교 PNU-IFAM JRC
3. 계명대학교 기계자동차공학부
교신저자: 부산대 기계공학부, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

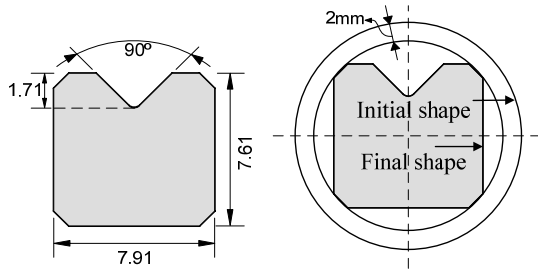


Fig. 1 Application shape of Cross roller guide

단면감소를 및 등하중 이론을 적용하여 단면감소율을 설정하고, 전기장해석을 통한 등선위선을 이용하여 중간다이 단면형을 설계하였다. 본 연구에서 제안한 패스 스케줄방법에 대하여 대표적인 이형인발제품인 크로스 롤러 가이드 생산을 위한 이형인발공정에 적용하였으며, 3차원 성형해석 및 이형인발실험을 통하여 본 연구에서 제시한 패스 스케줄 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

본 연구에서 적용한 크로스 롤러 가이드 생산을 위한 형상인발은 총 2패스 공정이며 현장 노하우를 기초로 초기소재 직경은 최종제품의 최소 외접원을 2mm 오프셋 하여 결정하였다. Fig. 1에 최종형상과 초기소재를 나타내었다.

2. 단면감소를 설정

다단 인발공정 시 각 패스의 단면감소율 설정은 매우 중요하다. 현재까지 다단 이형인발공정의 경우 대부분 현장 작업자의 노하우에 의존하여 각 패스의 단면감소율이 설정되고 있으며, 체계적인 기준이 마련되어있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 등단면감소율 및 등하중이론을 적용한 단면 감소율 설정방법을 제안하였다.

2.1 등단면감소율 설정

등단면 감소율에서는 모든 패스의 단면감소율을 일정하게 설정한다. 패스 수가 n 인 다단 인발공정 시 등단면감소율의 평균 감소율은 식 (1)로 계산되면 계산된 평균 감소율을 이용한 각 패스의 단면적은 식 (2)와 같이 계산된다[5].

$$r_{ave} = 100 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{A_f}{A_o} \right)^{1/n} \right\} \quad [\%] \quad (1)$$

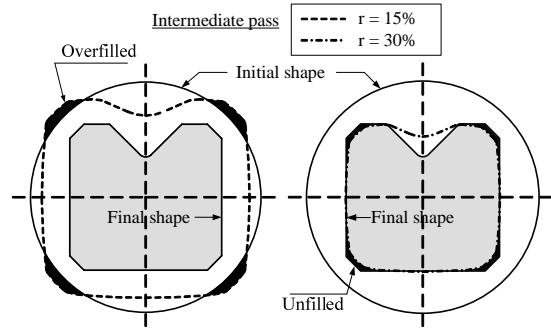


Fig. 2 Size of the intermediate pass according to reduction ratio(r)

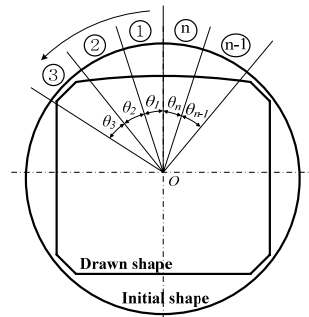


Fig. 3 Cross section method for drawing load

$$A_i = \left(1 - \frac{r}{100} \right) \cdot A_{i-1} \quad [\text{mm}^2] \quad (2)$$

여기서, r_{ave} 는 평균 단면감소율, A_o 는 초기 단면적, A_f 는 최종 단면적, n 은 총 패스 수 i 는 패스 번호이다.

Fig. 1의 크로스 롤러 가이드의 경우 평균 단면 감소율은 29.88%이고, 첫 번째 패스의 단면적은 79.29mm^2 이다.

2.2 등하중 단면감소율 설정

본 연구에서는 각 패스의 인발하중이 일정하게 유지되는 등하중을 적용한 단면감소율 설정방법을 제안하였다. 먼저 등하중 이론을 적용하기 위해 적용 가능한 단면감소율 범위를 설정하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 중간패스 단면감소율이 15% 이하인 경우 중간패스 단면형상이 초기소재보다 커 인발이 불가능하다. 또한, 단면 감소율이 35% 이상인 경우 중간패스 단면형상이 최종제품보다 작아져 인발이 불가능하다. 따라서, 본 연구

에서는 중간패스의 단면 감소율 범위를 20~30%로 설정하였다.

본 연구에서는 1 패스와 2 패스의 하중이 같아지는 단면감소율을 미리 예측하기 위하여 Lee 등이 제안한 단면 요소분할법(CSM)을 적용하였다[6].

단면요소분할법이란 Fig. 3 에서 보듯이 단면을 유한개의 요소로 나누어 각 요소에 대하여 축대칭 하중 예측 모델을 적용함으로써 이형인발하중을 간단히 예측할 수 있는 방법으로, A. Geleji 식을 응용한 분할 요소 i 의 인발하중은 다음의 식 (3)으로 계산된다.

$$Z_i = k_{m,i}(F_i + Q_i \cdot \mu_i) + 0.77 \cdot k_{fm} \cdot f_{2,i} \cdot \alpha_i \quad (3)$$

여기서 Z_i 는 인발하중, $k_{m,i}$ 는 재료의 평균변형저항, k_{fm} 은 재료의 평균변형강도, F_i 는 다이 입구부와 출구부의 단면적 차이, Q_i 는 소재와 다이 접촉면 길이, μ_i 는 다이와 소재 사이의 마찰계수, $f_{2,i}$ 는 다이 출구부 단면적, α_i 는 다이반각이다.

초기형상에서 중간형상, 중간형상에서 최종형상에 대해 하중계산식을 이용하여 평가한 결과 중간 패스의 단면감소율이 27%인 경우, 1, 2 패스의 인발하중은 각각 3.05ton, 3.09ton 이었다. 또한, 단면 감소율이 27%인 경우 중간패스의 단면적은 82.55mm²이다.

3. 중간패스 단면형상 설계

각 패스별 단면감소율이 설정 되면, 중간패스 단면형상이 설계되어야 한다. 본 연구에서는 Shin 등이 제안한 등전이론을 이용하여 중간패스 단면형상을 설계하였다[7]. 이러한 방법을 이용하여 Lee 등은 스플라인 이형인발을 위한 중간패스 단면형상 설계 방법을 응용하였다[8].

두 도체 사이에 서로 다른 전압을 걸어주면 두 도체 사이에 서로 겹치거나 중복되지 않는 등전위면이 형성된다.

본 연구에서는 중간패스 단면형상 설계를 위해 범용 유한요소해석 S/W인 ANSYS Ver.10을 이용하여 2차원 전기장 해석을 수행하였다. Fig. 4는 초기형상과 최종형상에 각각 10V와 0V를 걸어 형성되는 등전위면을 나타낸 것이다. 0V에 가까울수록 최종형상에 가까워 지는 것을 알 수 있다.

Table 1 은 전기장 해석결과 전압에 따른 등전위면 형상을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 중간패

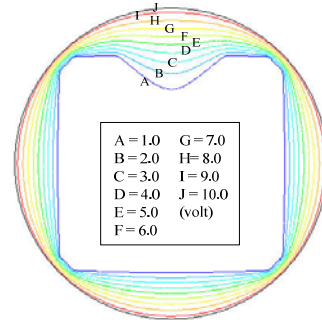


Fig. 4 Equipotential lines generated between initial and final shape of cross roller guide

Table 1 Output shape from ANSYS analysis

1V	2V	3V	4V

스 단면형상을 설계하기 위하여 Table 1 에 나타난 4 가지 형상을 활용하였다. Table 1 의 단면형상들에 대하여 등단면감소율 및 등하중단면감소율로 설정된 단면감소율을 갖도록 식 (4)의 스케일계수를 이용하여 각 단면형상들을 확대/축소하였다.

$$SF_i = \sqrt{\frac{A_i}{A_i}} \quad (4)$$

여기서, A_i 는 등단면감소율 및 등하중단면감소율 적용 시 요구되는 중간패스 단면적, A_i 는 Table 1 에 나타난 단면들의 면적이다. 단면 도심을 기준으로 스케일계수로 확대/축소할 경우 각 추출된 단면의 형상은 유지되고 단면적은 요구 단면적과 같아진다.

등단면감소율과 등하중감소율의 최적의 중간 단면형상은 유한요소해석으로 결정하였다.

4. 이형인발공정 성형해석

등단면감소율과 등하중 감소율 및 전기장 해석을 이용해 확보된 다양한 단면형상들에 대하여 성형해석을 수행하여 가장 우수한 중간패스 단면형상을 결정하였다. 또한, 본 연구에서 제시한 두 가지 설계방법의 타당성을 검증하기 위해 현재

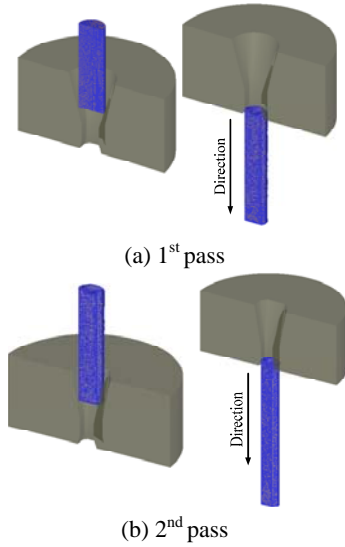


Fig. 5 FE-analysis of the shape drawing process for cross roller guide

Table 2 Condition of shape drawing

Condition	Value
Diameter(mm)	12.0
Bearing length(mm)	8
Friction factor(m)	0.1
Material	AISI1020
Velocity(mm/sec)	200

현장 작업자의 노하우로 설계된 공정에 대한 해석도 함께 수행하여 그 결과를 비교하였다.

성형해석은 DEFORM-3D Ver.5.0 을 이용하여 수행하였다. 적용된 소재는 AISI1020 이며, 성형해석을 위한 소재의 유효응력-변형률 곡선은 인장시험을 통해 확보하였으며 식 (5)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 948.53\epsilon^{-0.23} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

성형해석은 Fig. 5 에서 보듯이 대칭성을 고려하여 1/2 단면에 대해 수행하였으며, 인발다이는 다이 입구와 출구에서 소재의 도심이 일치하도록 설계 하였다. 초기소재의 길이는 해석시간을 고려하여 60.0mm 로 하였고, 직경은 실제 실험으로 고려하여 모두 12mm 로 설정하였다.

다이각도는 모든 공정에 있어서 1pass 는 15°, 2pass 는 8°로 설정하였다. 그리고 첫 번째 패스를

Table 3 Unfilled rate according to cross section shape

Shape	UR (%)	
	Equal reduction	Equal load
1V	1.962	2.214
2V	1.906	2.190
3V	2.461	2.254
4V	2.117	2.414
Industrial design	2.207	

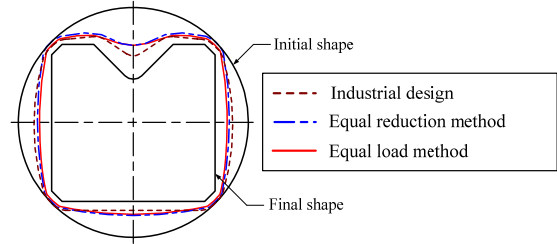


Fig. 6 Comparison of intermediate pass

완전히 빠져나온 소재에 대해 변형이력을 고려하여 두 번째 패스에 대한 해석을 연속적으로 수행하였다. 이상의 조건을 Table 2 에 나타내었다.

총단면 감소율은 50.84%이며, 첫 번째 및 두 번째 패스의 단면감소율은 등단면 감소율의 경우 모두 29.88%이며, 등하중감소율의 경우 각각 27%, 32.64%이다. 그리고 현장적용 공정의 경우 각각 24.58%, 34.81%이다.

본 연구에서는 다양한 중간패스 형상에 대하여 성형해석결과로부터 최종제품의 단면 치수정도가 가장 우수한 형상을 중간패스 형상으로 설정하였다. 단면 치수정도는 식 (6)과 같이 미충만율(unfilled rate: UR)로 평가하였다.

$$UR = \left(1 - \frac{A_{analysis}}{A_{final}} \right) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (6)$$

여기서, A_{final} 은 최종제품의 요구 단면적, $A_{analysis}$ 는 성형해석에 의한 단면적이며, 미충만율이 낮을수록 치수정도가 우수함을 의미한다. Table 3 에 각 경우에 대한 미충만율을 나타내었다. 그 결과 2V 의 단면형상이 치수정도가 가장 우수함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 2V 의 단면형상을 중간패스로 설정하였다.

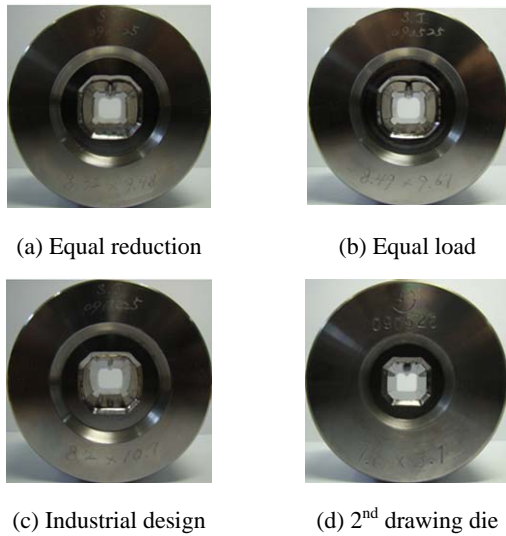


Fig. 7 Drawing dies for drawing experiment

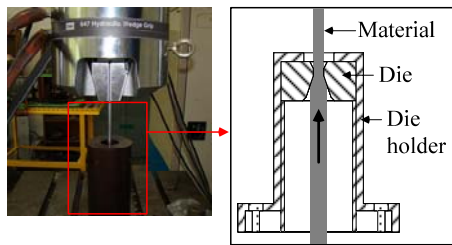


Fig. 8 Equipment for drawing experiment

Fig. 6 은 2V 의 단면형상들을 현장적용 형상과 비교하여 나타내었다. Fig. 6 에서 알 수 있듯이 흠이 있는 부분에서 형상의 차이가 다소 있으나, 세 형상모두 거의 유사함을 알 수 있다.

5. 이형인발 실험 및 고찰

본 연구에서 제시한 등단면감소율과 등하중감소율을 이용한 중간패스 설계방법에 대한 타당성을 검증하기 위해 이형인발실험을 수행하였다. Fig. 7 은 실험에 적용한 크로스 롤러 가이드 이형인발다이를 나타내었다.

실험에 사용된 초기 직경은 12.0mm, 길이는 700mm로 설정하였다.

실험은 MTS(25ton)를 이용하여, 제작된 다이를 Fig. 8 과 같이 인발다이 고정치구로 고정된 후 수행하였으며, 운환을 위해 소재에 인산염 피막처리를 하였다.

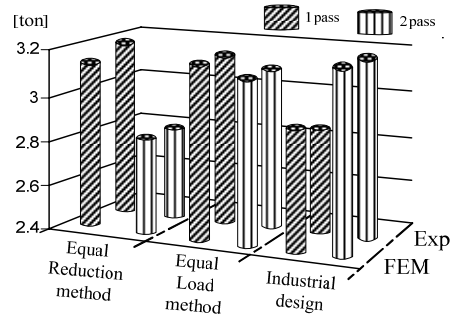


Fig. 9 Comparison of drawing load(ton)between experiment and FEM in cross roller guide

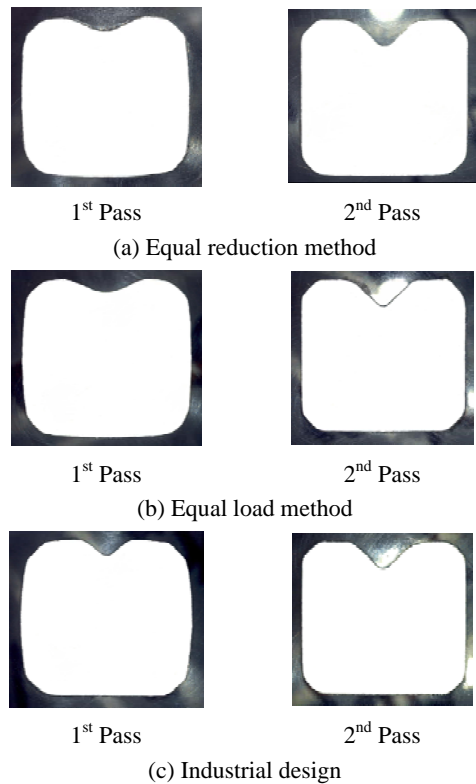


Fig.10 Cross sectional shapes of drawn cross roller guide

인발실험으로부터 각 패스에 대해 인발력을 측정하였으며, Fig. 9 에서 알 수 있듯이 실험결과와 해석결과 사이의 오차는 약 3% 정도로 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 10 은 각 패스별 인발된 소재의 단면형상을 나타낸 것이다. 최종 인발된 소재에 대해서는 3 차원 투영기로 단면적을 측정하고 후 도면의 단면적을

Table 4 Comparison of section area between drawing and experiment

	Die area [mm ²]	Experiment area [mm ²]	UR[%]
	1 pass		
Equal-reduction	79.29	79.186	0.131
Equal-load	82.55	82.312	0.288
Industrial design	85.29	84.996	0.344
2 pass			
Equal-reduction	55.60	54.417	2.157
Equal-load	55.60	54.276	2.381
Industrial design	55.60	54.189	2.573

이용하여 미충만을 계산하였다. Table 4 에 각 경우에 대한 패스별 단면적과 미충만을 나타내었다.

최종제품에 대한 미충만율은 등단면 감소율을 적용한 설계방법이 가장 좋았으며, 다음으로 등하중감소율을 적용한 설계방법, 마지막으로 현장 노하우 순이었다. 따라서, 본 연구에서 제시한 설계방법을 적용할 경우 현재 실현장에서 적용하고 있는 공정보다 최종제품의 치수정도가 보다 우수함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 다단이형인발공정 시 단면감소율 및 중간패스 형상설계방법을 제안하였으며, 이를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 다단 이형인발공정에 대하여 각 패스의 단면 감소율을 일정하게 유지하는 등단면감소율, 그리고 각 패스의 인발하중을 균일하게 하는 등하중감소율 이론을 적용하여 단면감소율을 설정하였다.

(2) 다단 이형인발공정의 중간패스 단면형상을 설정하기 위하여 전기장해석을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 크로스 롤러 가이드의 전기장 해석을 통하여 1V, 2V, 3V, 그리고 4V에 상응하는 형상을 중간패스 단면형상으로 추출하였다. 추출된 단면형상들에 대하여 앞서 두 가지 방법으로 계산된 단면감소율과 동일한 단면감소율을 갖도록 스케일계수를 이용하여 각각의 단면형상들을 확대/축소하였다.

(3) 확대/축소된 다양한 단면형상들에 대한 성형 해석을 통하여 그 타당성을 평가하였다. 해석결과 2V의 형상이 최종제품의 단면 치수정도가 가장 우수하였으며, 현재 현장에서 적용하고 있는 공정보다도 우수하였다.

(4) 마지막으로 이형인발실험을 통하여 이론해석 및 해석결과와 타당성을 검증하였다. 실험결과 성형해석결과와 동일하게 본 연구에서 제시한 방법을 적용할 경우 최종제품의 치수정도가 향상됨을 알 수 있었다.

이상으로, 본 연구에서 제시한 단면감소율 및 중간패스 단면형상 설계방법을 적용할 경우 이형인발공정 설계를 보다 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 사료되며, 신제품 개발 시 개발비용 및 개발 기간 단축에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 및 교육과학기술부의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] K. Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Company, 1985.
- [2] W. Steuff, R. Kopp, 1995, Estimation of designing methods for the drawing of section rods and wire, Wire J. Int., Vol. 28, pp. 104~109.
- [3] K. Yoshida, S. Tuihiji, 2002, Multiple drawing of rails for linear motion, Adv. Technol., Plast., Vol. 1, pp. 367~372.
- [4] B. B. Basily, D. H. Sansome, 1976, Some theoretical considerations for the direct drawing of section for from round bar, Int. J. Mech., Sci., Vol. 18, pp. 201~208.
- [5] JSTP, Drawing Process, Korona, 1990.
- [6] T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2009, Prediction of drawing load in the shape drawing process, Trans. Mater. Process. Vol. 18, No. 4, pp. 323~328.
- [7] H. K. Shin, S. R. Lee, C. H. Park, D. Y. Yang, 2002, The optimal design of preform in 3-D forging by using electric field theory, Trans. Mater. Process. Vol. 11, No. 2, pp. 165~170.
- [8] J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2008, Design of the cross sectional shape of intermediate die for shaped drawing of spline, Trans. Mater. Process. Vol. 17, No. 8, pp. 627~632.