

링 프로젝션 돌기의 용입정도가 ECV 조립공차에 미치는 영향

장희석^{*,†} · 원웅연^{*} · 최덕준^{**} · 김종호^{***} · 김진상^{***} · 남택현^{***} · 강희중^{***}

^{*}명지대학교 기계공학과

^{**}경기과학기술대학교 기계설계과

^{***}동일기계공업(주) 연구소

The Effect of Annular Projection Collapse on Tolerance of ECV Assembly

Hee Seok Chang^{*,†}, Woong Yeon Won^{*}, Duk Jun Choi^{**}, Jin Sang Kim^{***}, Jong Ho Kim^{***},
Tak Hyun Nahm^{***} and Hee Jong Kang^{***}

^{*}Dept. of Mechanical Engineering, Myongji University, Yong-in, 449-728, Korea

^{***}Dept. of Mechanical Design, Gyeonggi College of Science and Technology, Siheung, 429-792, Korea

^{****}Research Institute, Dong Il Machinery, Anseong, 456-933, Korea

[†]Corresponding author : hschang@mju.ac.kr

(Received January 9, 2012 ; Revised February 15, 2012 ; Accepted February 27, 2012)

Abstract

Due to the inherent dimensional uncertainty, tolerances accumulate in the final assembly. Tolerance accumulation has serious effect on the performance of ECV assembly. This paper proposes a method of tolerance accumulation analysis using Monte Carlo simulation, which includes welding process in assemble process. This method can predict the final tolerance distributions of the completed assembly with the prescribed statistical tolerance distribution of each part to be assembled. With the inclusion of welding, another dimensional uncertainties due to partial melting is to be accounted as well. Partial melting of projection height was included in the tolerance propagation analysis.

Verification of the proposed method was performed by making use of Monte Carlo simulation. Monte Carlo simulation results showed promising results in that we can predict the final tolerance distributions in advance before actual assembly process of precision machinery.

Key Words : ECV, Monte carlo simulation, Tolerance propagation analysis, Projection welding, Projection height

1. 서 론

국내 정밀기계산업의 심각한 문제점은 보통 TT로 통칭되는 공차기술(Tolerance Technology)이 아직 보편화되지 못한 것이다. 공차설계나 관리기술은 고도의 정밀도와 부품의 호환성이 요구되는 조립기계 분야에서 정밀가공기술 자체보다 선결되어야 과제이다. 도면상의 치수공차만으로는 불충분하며 공차설계전문 엔지니어에게 있어서 국제적으로 통용이 되고 있는 기하학적 치수공차방식(Geometric Dimensioning and Tolerance)을 적극 도입해야 한다¹⁻²⁾. ECV와 같은 정밀조립체의

경우에 치수공차 및 위치공차, 편심, 각도공차 등 여러 요인에 의해 기하공차가 누적되어 3차원 공간에서 각 부품의 상대위치가 설계상 요구되는 위치에서 벗어나는 경우가 많다. 이러한 경우에는 ECV의 성능이 떨어지고 수명도 짧아지게 된다. 이와 같은 정밀가공 된 부품의 조립체에서 공차누적문제를 해결하기 위하여 설계자가 공차누적에 관한 분석을 체계적으로 할 수 있는 방법이 제시되어야 하며, 또한 최종 조립체에서 누적된 공차분포를 확률적으로 예측할 수 있어야 한다³⁻⁴⁾.

보통 용접이 수반되는 정밀기계 조립공정에서 최종 조립체의 공차는 용접공정과 관계없이 주어진다. 즉, 용접은 당연히 완벽하게 수행된다고 간주하고 최종 공

차는 조립되는 각 부품의 치수공차만 누적된 결과라고 생각하기 쉽다. 그러나 용접시 발생하는 잔류응력으로 인한 변형이 발생한 경우 그리고 프로젝션 돌기높이가 완전히 녹은 경우와 부분적으로 녹은 경우 최종 조립체의 공차는 크게 달라진다. 이렇게 용접상태에 따라 최종 조립공차가 달라짐을 분석하기 위하여 용접변형이나 돌기가 녹는 정도를 공차누적 분석과정에서 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 ECV(External Control Valve) 조립시 각 부품의 공차가 주어질 경우 최종 조립체에 나타나는 공차누적을 계산하는 Monte carlo 시뮬레이션⁵⁻¹⁰⁾ 기법을 이용하여, 녹지 않고 남아있는 돌기높이를 입력하여 이에 따라 달라지는 최종 공차역을 계산하였다. 이를 바탕으로 정밀기계의 부품설계 시 용접이 포함된 최종 조립공정에서 발생할 수 있는, 용접상태에 따라 변하는 최종 공차역을 예측하는 기법을 제시하였다.

각 부품의 설계상 요구된 위치와 방향을 보장하고 조립기준점에 대한 위치와 방향에 관련된 공차의 통계적인 분포를 규명하기 위해, Fig. 1에서 보는 바와 같이 3개의 위치좌표 X, Y, Z와 3개의 회전좌표 θ_x , θ_y , θ_z 를 가지는 6개의 자유도(degree of freedom)를 도입하였다. 이 6개의 자유도에 관련된 위치나 각도의 공차는 공차가 0인 공차기준점(nominal position)으로

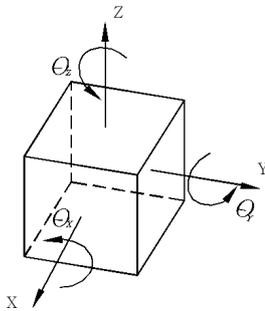


Fig. 1 Six degrees of freedom associated with a three dimensional body

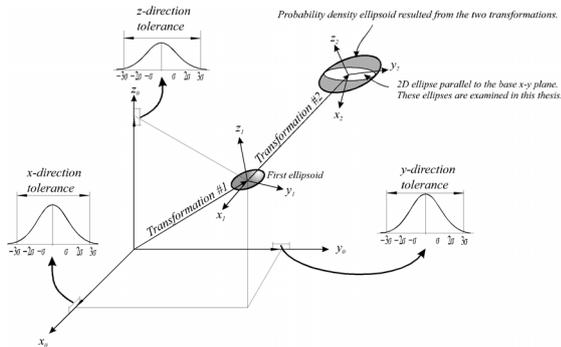


Fig. 2 Schematic diagram of tolerance propagation

부터 정규 분포한다고 가정한다. 이와 같은 공차분포가 조립이 진행됨에 따라 누적되어 최종 공차분포가 얻어진다. 이렇게 계산되는 공차누적에 대한 개념을 도식적으로 표현한 것이 Fig. 2 이다. 그림에서 최초 공차기준점인 원점(x_0, y_0, z_0)에 첫 번째 부품(#1)이 놓일 경우 이 부품의 공차기준점(x_1, y_1, z_1)에서의 공차분포는 확률분포를 가지며 그 분포는 부품의 치수공차에 따라 결정된다. 첫 번째 부품에 두 번째 부품(#2)이 조립되면 공차기준점(x_2, y_2, z_2)에서의 공차분포는 부품 #1과 부품 #2의 치수공차가 누적된 결과로 얻어진다³⁻⁴⁾.

이상과 같이 부품을 조립할 때마다 최초 공차기준점에서 좌표변환이 일어난다고 생각한다. 여기서 3차원 좌표값은 부품의 3차원 공칭치수(공차가 0일 경우의 치수)로 정해진다. 이 과정을 반복하면 최종 조립체에서 공차분석이 필요한 임의의 3차원 위치의 치수공차누적결과를 계산할 수 있다. 이러한 계산과정을 반복하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 ECV가 정상작동 하기위한 내부 부품간 간극(clearance)을 보장하기 부품의 치수를 설계하였다. 또한 조립과정의 일부인 링 프로젝션 용접에서 프로젝션 돌기높이가 완전히 용입된 경우와 반 만 녹은 경우에 대한 ECV 내부 부품간 간극을 결정하는 공차분포를 분석하였다.

2. 실험 및 해석

2.1 ECV 구조와 기능

ECV의 부품구조는 Fig. 3과 같으며, ECV의 기능은 가변 사판식 압축기(Fig. 4)의 압력조절 기능으로서 사판의 축에 대한 경사각은 제어실의 압력에 의해 결정되는데, 제어실의 압력이 높고 낮음에 따라 사판의 경사각이 감소/증가 하여 이에 따른 압축기의 용량 역시 감소/증가 한다. 여기서 제어실의 압력을 조절하는 것이 ECV의 역할이다.

ECV의 작동원리로는 제어실의 압력이 상승하였을 때

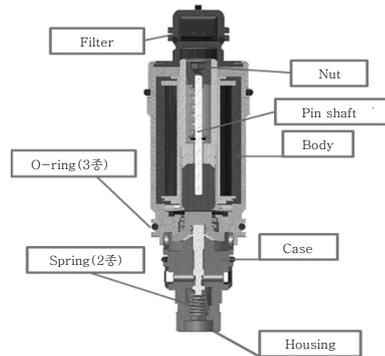


Fig. 3 ECV cross-section

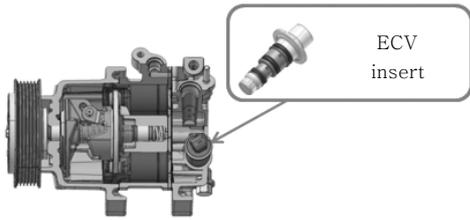


Fig. 4 ECV installed on a variable-displacement-swash-plate-type compressor

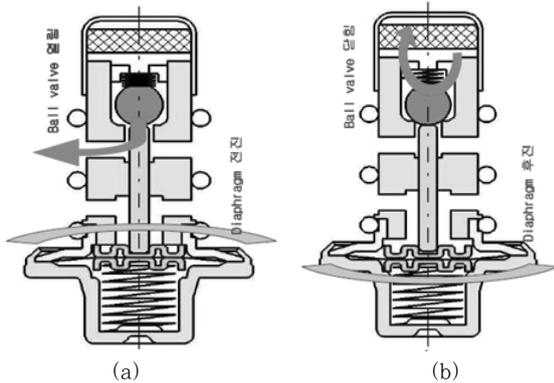


Fig. 5 Schematic functional diagram of ECV operation

(Fig. 5(a)) 흡입압력의 설정치보다 낮아지고 diaphragm이 전진하여 제어밸브를 개방하면 토출가스가 제어실에 공급된다. 제어실 압력이 상승하면 사판 경사각이 감소하여 토출용량이 감소한다. 이와 반대로 제어실 압력이 하강할 경우(Fig. 5(b)) 흡입압력이 설정치보다 높아져 diaphragm이 후진하여 제어밸브를 차단한다. 그 때 토출가스 제어실 공급이 차단되어 제어실 압력은 자연스럽게 하강하게 된다. 그러면 사판 경사각이 증가하여 토출용량이 증가하게 된다.

2.2 프로젝션 용접

Fig. 6에 도시된 프로젝션 전극을 사용하여 Fig. 7과 같은 구조를 가진 서보가압식 DC저항 용접 시스템을 사용하였다. 용접은 특수 제작한 진공챔버 속에서 진행되었다. 하부 전극에 Fig. 3의 하부에 도시된 case, diaphragm, housing 순서로 결합한 3 겹 재료(SUS 304, 두께 조합 : 0.8mm+0.1mm+0.8mm)를 올려 놓고 상부전극이 하강하여 용접된다. 초기 가압력은 150kgf, 용접 가압력은 200kgf, 단조 가압력은 300 kgf로 다단계가압을 적용하였고 용접시간은 80msec, 전류는 24kA로 하였다. 고리(링) 형상의 너깃이 형성되며 housing과 diaphragm으로 형성된 공간에서 진공로

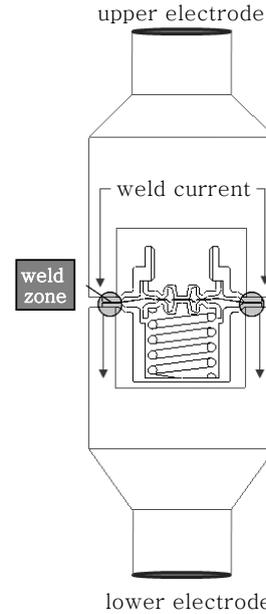


Fig. 6 Electrodes for projection welding

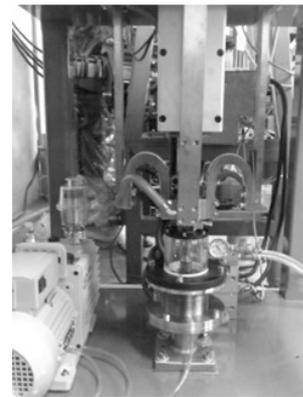


Fig. 7 DC servo projection welding system

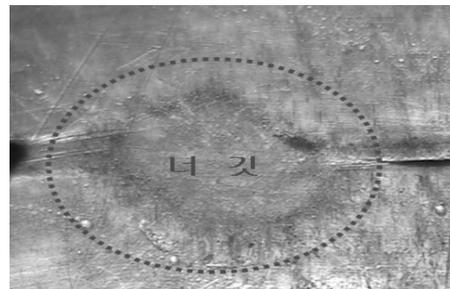


Fig. 8 Cross-section of nugget

내부의 진공(10^{-4} mmHg)이 완벽하게 유지됨을 확인하였다. 링 너깃의 종단면 사진(양쪽 두 장이나 여기서는 한 쪽만 도시됨)이 Fig. 8에 도시되어 있다. Fig. 9에는 프로젝션 용접을 위한 돌기형상이 이등변 삼각형 모양으로 높이가 0.2 mm 로 도시되어 있다.

이렇게 용접된 case와 housing 조립체는 Fig. 3에 도시된 나머지 부품들과 조립되고 여기에 슬레노이드 코일 ass'y가 삽입되면 ECV가 완성된다.

2.3 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)

Monte Carlo 시뮬레이션은 원래 변수가 주어진 범위 내에서 존재할 확률이 균일하다는 가정으로 출발한 계산법으로 수학적 이론이 뒷받침되지는 못하지만 해석적 모델을 구하기 어려운 공학적 문제를 반복계산을 통하여 해결할 때 자주 쓰이는 기법이다⁵⁻¹⁰⁾.

조립과정에서 누적된 공차의 최종영역을 구할 때도 역시 이 기법을 이용할 수 있다. 즉 각 부품의 치수 및 공차를 입력한 후 무작위 조립예를 1000가지 설정한다. 무작위 조립에서 주어진 각각의 공차값에 -1에서 1까지의 무작위수(random number)가 곱해져서 실제 공차가 계산된다. 이러한 무작위 조립예에서 공차누적을 모든 좌표계 방향에 따라 계산하면 조립작업에서 공차기준점(공차가 0인 위치)으로부터 벗어난 각 방향 최종누적공차가 구해진다. 무작위로 추출한 공차값에 의해 계산된 결과이므로 무작위 추출횟수를 충분히 크게 하기 위해 1000번 계산한다.

본 연구에서는 이와 같은 Monte Carlo 시뮬레이션으로 공차누적 결과를 계산하여 ECV의 조립공차 분석에 적용한다. 또한 Fig. 9에 도시된 프로젝션 돌기가 완전히 녹는 경우(3.1 절)와 반만 녹는 경우(3.2 절)에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 용접이 수반된 조립 공정에서 돌기 높이가 최종공차에 미치는 영향을 분석하였다.

3. ECV 공차설계를 위한 시뮬레이션 결과

3.1. 돌기가 완전히 녹을 경우

ECV가 정상작동 하려면 ECV 내부 각 조립체간의 반경방향 간극이 1.15 ± 1.15 mm, 축방향 간극이 $0.38 \pm$

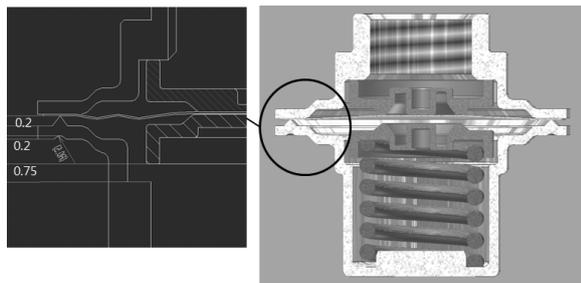


Fig. 9 Projection geometry for projection welding of ECV assembly

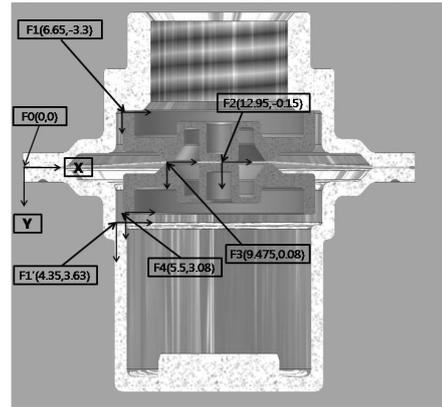


Fig. 10 Coordinate system for ECV assembly tolerance analysis

0.07 mm로 Fig. 12 와 Fig. 13에 각각 도시된 바와 같이 유지가 되어야 한다. 이 두 간극이 유지되지 못하면 ECV의 정상동작이 불가능하다.

공차누적을 해석하기 위한 좌표계가 Fig. 10에 도시되어 있는데 이 단면도는 ECV의 housing을 포함한 부분도면이다. ECV가 축대칭 구조이므로 Z축 방향의 공차는 고려하지 않았고 각 축의 회전방향 공차도 없다고 가정하였다. 여기서 위의 두 간극이 확보되는지 시뮬레이션으로 확인하는 과정은 다음과 같다.

ECV의 F1점(6.65, -3)은 case 내부에서 diaphragm을 받쳐주기 위한 상부 support와 맞닿는 가장 좌측지점을 나타낸다. 기준점 F0(0,0)에서 F1으로의 좌표변환과정을 통하여 case의 치수공차가 F1점의 위치공차로 변환된다. 즉, F0에서 F1으로의 첫 번째 좌표변환은 X, Y방향으로 case의 치수만큼 각각 6.65과 -3.3씩 이동하고 X, Y방향으로의 공차는 균일분포를 이룬다고 가정하며 각각 ± 0.025 와 ± 0.03 이다. 여기서 이 공차값은 각 부품에 대하여 공차설계시 부여한 공차값이다.

두 번째 좌표변환은 F1(6.65, -3.3)점에서 diaphragm 정중앙 지점인 F2(12.95, -0.15)점으로의 변환이고 X, Y방향으로 6.3과 3.15만큼 이동하고 공차는 각각 $\pm 0.1, \pm 0.03$ 이다. 세 번째 변환(F2→F3)은 X, Y방향으로 3.475와 0.23씩 이동하였고 공차는 각각 $\pm 0.05, \pm 0.01$ 이다. 네 번째 변환(F3→F4)은 X, Y방향으로 각각 3.975, 3만큼 이동하고 이에 상응하는 공차는 모두 $\pm 0.01, \pm 0.03$ 이다. 이상과 같이 간극을 결정하는 F4점의 좌표와 공차가 계산된다. F4점에 대응되는 다른 점 F1'은 F0을 기준으로 하여 F0에서 F1'으로의 좌표변환을 통하여 X, Y방향으로 housing의 치수만큼 각각 4.35와 3.46만큼 이동하였고 공차는 각각 ± 0.025 와 ± 0.03 이다.

이와 같은 입력 데이터가 C언어로 작성된 공차누적

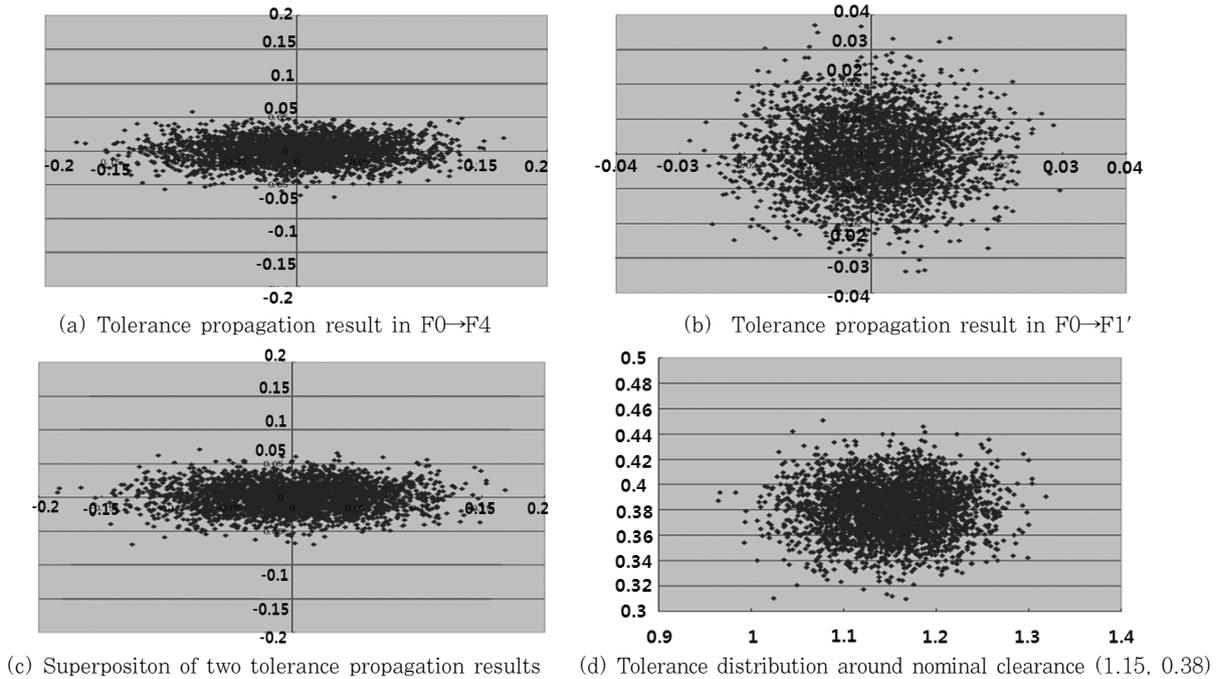


Fig. 11 Monte Carlo simulation results (projection height=0)

Table 1 Dimensional tolerances of each parts

Coordinate transform	F0→F1	F1→F2	F2→F3	F3→F4	F0→F1'
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	($\pm 0.025, \pm 0.03$)	($\pm 0.1, \pm 0.03$)	($\pm 0.05, \pm 0.01$)	($\pm 0.1, \pm 0.03$)	($\pm 0.023, \pm 0.03$)

분석 프로그램에 입력되면 좌표변환으로 표현된 조립과정이 진행되며 공차누적 결과값이 화면과 수치로 출력된다. 이 결과가 Fig. 11에 도시되어 있다. 각 부품의 치수공차(각 좌표계의 공차)는 표. 1에 나와 있다.

좌표변환시 각 부품의 치수공차가 누적되므로 최종점은 공차기준 위치를 중심으로 타원을 형성하게 된다. Fig. 11에서 타원의 중심좌표는 (0,0)으로 표시되어 있는데 이 점이 바로 공차기준점의 X, Y 좌표를 의미한다. 좌표에 지시된 수치들의 단위는 입력된 치수 및 공차 데이터와 같은 단위 mm이다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)에서 크기가 다른 타원분포는 누적된 공차의 범위가 상이함을 의미한다. Fig. 11(c)는 F4지점과 F1'지점의 공차분포를 합성하여 도시한 결과이다. 이 공차분포결과를 공차가 0인 경우의 공칭 간극값인 (1.15, 0.38)을 기준으로 도시하면 Fig. 11(d)가 구해진다.

그림에서 반경 방향(X축 방향) 간극 크기는 0.95mm에서 1.33mm 사이 값으로 판명되었다. Fig. 12에서 ECV의 정상동작을 보장하는 간극값이 1.4 미만이므로 각 부품의 치수공차가 표.1과 같이 관리되면 ECV가

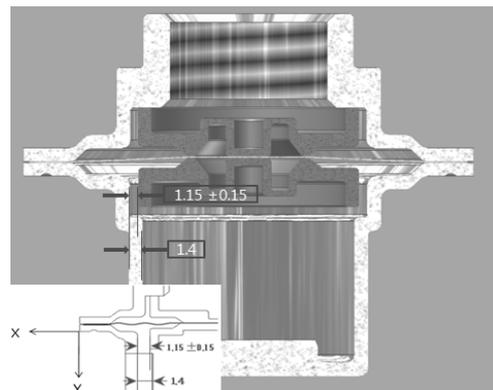


Fig. 12 Radial clearance required for normal ECV operation

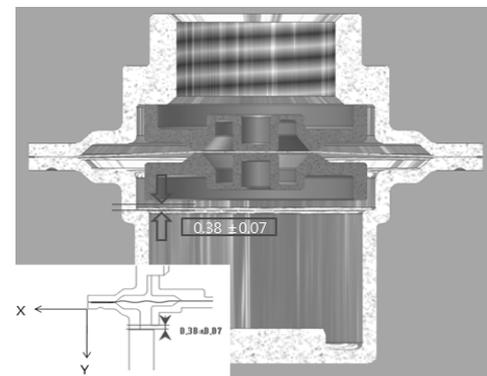


Fig. 13 Axial clearance required for normal ECV operation (full melting of projection)

정상동작 함을 알 수 있다.

또한 축방향 (Y축 방향) 간극크기는 0.31mm에서 0.45mm 사이 값으로 구해졌다. Fig. 13에 도시된 바와 같이 ECV의 정상동작을 보장하는 간극값이 0.38mm \pm 0.07mm 이므로 housing 부품의 치수공차가 표.1과 같이 관리되면 ECV가 정상동작 함을 알 수 있다.

한편 Fig. 11에 찍힌 점들은 각 경우 Monte Carlo 시뮬레이션을 1000회씩 수행한 결과이다. 여기서 본 연구에서 사용된 Monte Carlo 시뮬레이션 기법의 신뢰도는 확률분포 이론에 근거한 연구⁴⁾ 결과를 이용하면 99.3% 신뢰도 경계가 1000개 찍힌 점들이 차지하는 영역의 최외곽 경계이다. Monte Carlo 시뮬레이션 결과에서 99.3% 신뢰도에 못 미치는 데이터 점은 1000 회당 10개 내외이므로 여기서 제시된 기법은 충분히 실용적으로 활용할 수 있다고 판단된다.

3.2. 돌기가 절반만 녹을 경우

두 번째 계산은 ECV의 돌기가 절반만 녹는 경우이다. 이 때 초기 돌기의 길이는 0.2mm이며 프로젝션 용접시 반 만 녹은 0.1mm의 돌기 높이가 ECV 내부 간극에 영향을 미치게 된다. 나머지 계산과정은 3.1의 과정과 같으며 공차에 대한 결과값이 Fig. 14에 도시되어 있다. 축(Y축) 방향 간극에서 그림에서 최소 0.41mm, 최대 0.55mm로 계산되었다. Fig. 15에 이 경우 필요한 축방향 간극값이 도시되어 있다. 계산결과 제시된 최대/최소 간극값이 이 범위를 만족하므로 문제

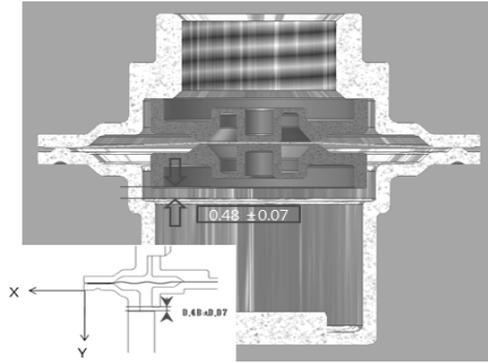


Fig. 15 Axial clearance required for normal ECV operation (partial melting of projection)

없이 작동 할 수 있다고 판단된다.

Fig. 16과 Fig. 17에는 조립된 ECV의 정상동작여부를 확인하기 위한 히스테리시스 시험결과가 도시되어 있다. Fig. 16은 ECV내부 간극이 규정치 이내 값인 경우의 샘플에서 얻어진 정상적인 히스테리시스 곡선을 보여주고 있다. Fig. 17은 부품의 치수가 불량이거나 프로젝션 용접불량 등의 이유로 내부 간극이 확보되지 못한 샘플에서 얻어진 비정상적인 히스테리시스 곡선을 보여준다.

이상의 결과에서 F0, F1, F2, F3, F4, F1' 점으로 규정되는 각 부품에 대한 치수공차 배분은 시뮬레이션 결과 적절함을 알 수 있고 프로젝션 용접공정에서 돌기가 충분히 녹은 경우와 반 만 녹은 경우 모두 ECV의 정상 작동을 보장함을 확인 할 수 있었다.

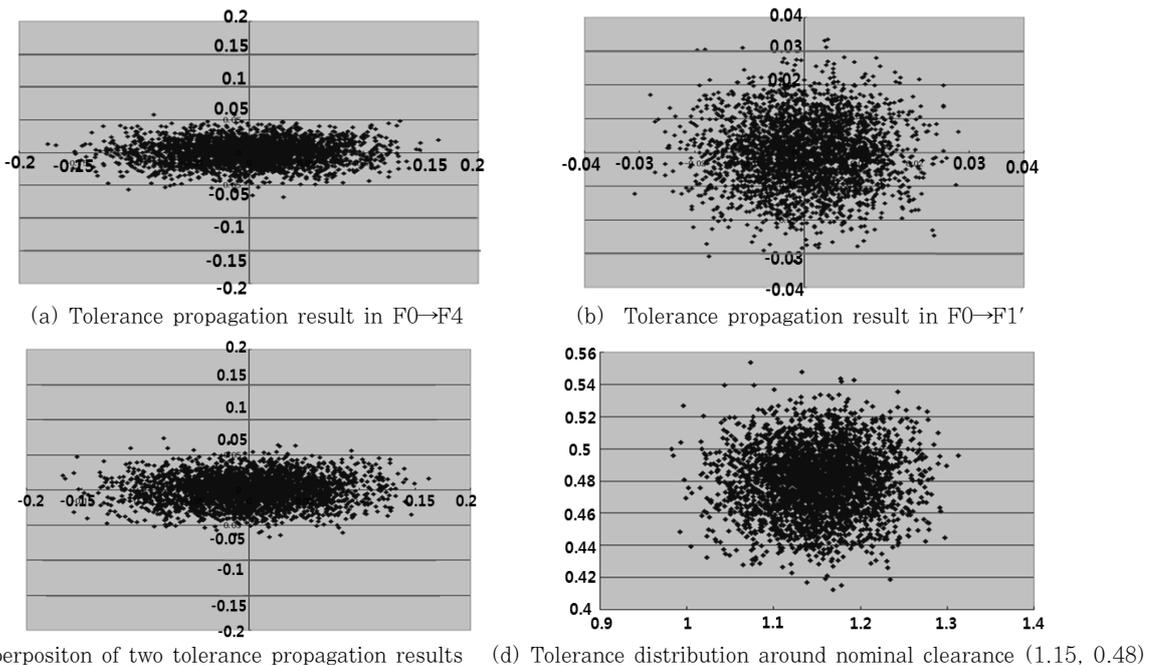


Fig. 14 Monte Carlo simulation results (projection height=0.1mm)

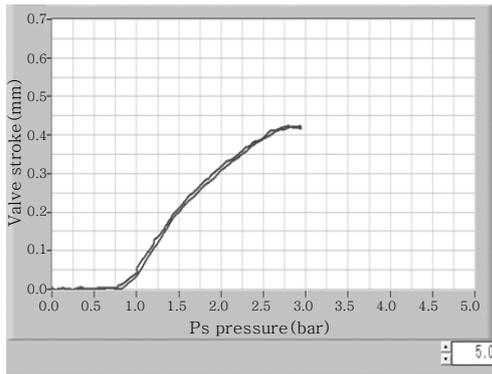


Fig. 16 ECV hysteresis chart for proper clearance

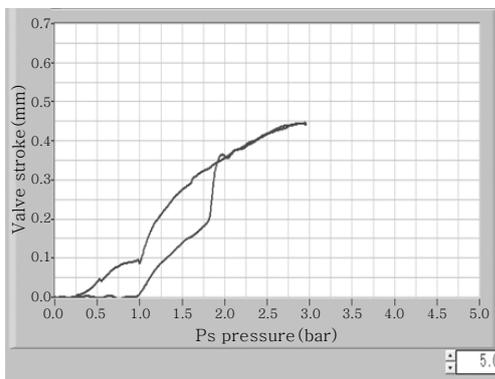


Fig. 17 ECV hysteresis chart for improper clearance

이러한 공차설계방법은 가공공차와 생산원가를 체계적으로 비교분석할 수 있으므로 본 연구에서 제시한 공차누적분석기법을 적절히 사용하면 ECV 부품설계단계에서 각 부품에 어느 정도 가공 정밀도를 줄 것인가를 미리 결정할 수 있으므로 생산성 향상과 원가절감에 상당한 파급효과를 기대할 수 있으리라 판단된다.

4. 결 론

높은 정밀도가 요구되는 정밀기계 조립체에서 치수공차누적을 분석하기 위하여 좌표변환을 이용한 공차누적의 무작위 조립 예를 다수 선정하며 반복 계산하는 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 최종공차범위를 공차기준점으로부터 도출할 수 있는 기법을 제시하였다.

또한 이 기법을 용접공정이 수반된 조립공정에 적용할 수 있음을 보였다. 용접공정 특성상 균일한 용접품질을 얻기 어려운 경우 용접상태에 따라 달라지는 최종 조립체의 공차누적을 미리 분석할 수 있는 기법을 활용

하면 정밀기계 조립체 설계시 각 부품에 어느 정도의 정밀도를 줄 것인가를 결정할 수 있으며, 조립공정에 포함된 용접공정을 관리하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 이러한 공차설계방법은 가공공차와 생산원가를 체계적으로 비교분석할 수 있으므로 용접이 포함된 정밀기계 양산공정에서 생산성 향상에 상당한 도움을 줄 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국산학연합회 2011년도 기업부설연구소 업그레이드 과제에 대한 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Duk Jun Choi : Fixture design and drawing. Ijinsa (1993) 50-55 (in Korean)
2. Ho Sun Choi : Theory of Tolerance. Seongandang. (1993) 40-149 (in Korean)
3. Duk Jun Choi, Byeong Cheon Son, Won Ho Seong and Hee Seok Chang : Study on accumulation of geometric tolerance using Monte Carlo simulation. Proceeding of KSME. **2-1** (1995) (in Korean)
4. Yong Woo Bang, Duk Jun Choi, Hee Seok Chang and Jin Seung Yang: Design of Plasma Cutting Torch by Tolerance Propagation Analysis. J. of KWJS **18-3** (2000) 122-130 (in Korean)
5. Jang Yong Lee : Tolerance Analysis of Spline Shaft Assembly. J. of Korea Society of Precision Engineering **27-12** (2010) 75-83 (in Korean)
6. Jin Ho Choi : Vehicle Analysis and Design considering Effect of Tolerance in the Process of Assembling and Manufacturing. Proceeding of Korea Society of Automotive Engineers. **2** (2004) 840-846 (in Korean)
7. Chang Yong Lee : Tolerance analysis of spline shaft. J. of Korea Society of Precision Engineering. **27-12** (2010) 75 -83 (in Korean)
8. In Soo Ye, Sun Hwan Chung, Seong Dae Choi and Dong Hoon Hyun : A study on improving assembly tolerance in mobile phone camera module. J. of Korean Machining. **9-5** (2010) 57-63 (in Korean)
9. Chan Hong Lee : Tolerance design of high-speed spindle bearings in view of contact angle changes. J. of Korean Manufacturing Systems. **19-5** (2010) 609-615 (in Korean)
10. Han Yong Yoon and Geon Wi Chang : Evaluation of fatigue life probability distribution of marine propeller using Monte Carlo simulation. J. of KSME **32-12** (2008) 1055-1062 (in Korean)