< 기술논문 >

몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 ECV의 공차누적분석

왕 상¹⁾ · 강 은 지¹⁾ · 장 희 석^{*1)} · 이 수 진¹⁾ · 최 덕 준²⁾ · 국 무 성³⁾ · 홍 태 호³⁾ · 강 희 종³⁾ · 안 영 재³⁾

명지대학교 기계공학과¹⁾ · 경기과학기술대학교 기계설계과²⁾ · 동일기계공업 연구소³⁾

Tolerance Accumulation Analysis of ECV by Monte Carlo Simulation

Xiang Wang¹⁾ · Eunji Kang¹⁾ · Heeseok Chang^{*1)} · Soojin Lee¹⁾ · Dukjun Choi²⁾ · Musung Guk³⁾ ·
Taeho Hong³⁾ · Heejong Kang³⁾ · Youngjae Ahn³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

²⁾Department of Mechanical Design, Gyeonggi College of Science and Technology, Gyeonggi 153-712, Korea

³⁾Research Institute, Dongil Machinery, 330-1 Deokbong-ri, Yangseong-myeon, Anseong-si, Gyeonggi 456-933, Korea

(Received 4 April 2013 / Revised 1 August 2013 / Accepted 12 August 2013)

Abstract : Tolerance accumulation has serious effect on the performance of an assembled body. This paper proposes the method which analyzes tolerance accumulation using Monte Carlo Simulation. This method can predict tolerance distribution of fully assembled body using the dimensional tolerance distribution of each part to be assembled. In this analysis, it is assumed that the tolerance of each part has the nominal distribution or uniform distribution. This analysis method is applied to ECV(External Control Valve), and the accumulated tolerance of the fully assembled ECV is obtained from the analysis. The results show that initial tolerance given to each part do not meet the design requirement of ECV. Hence, the tolerances of each part are modified and the additional analysis with the modified tolerances yields the results which satisfy the design requirements of ECV.

Key Words : ECV(External Control Valve, 외부 제어밸브), Monte carlo simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Tolerance accumulation analysis(공차누적분석), Normal distribution(정규분포), Uniform distribution(균일분포)

1. 서 론

제품개발과정에서 공차분석이 상당히 중요한 단계가 됨에 따라서 국내 정밀기계산업에서 공차분석에 대한 관심도가 높아지고 있다. 전통적인 공차분석은 조립될 각 부품의 치수공차와 기하공차를 기반으로 각 부품사이에 조립될 가능성을 분석하는 방법이고 각 부품이 조립될 때 생기는 누적공차가 조립품의 성능에 미치는 영향을 통일성있게 분석하지 못한다. 그러므로 국제적으로 통용 되고 있는 기하학적 치수공차방식(Geometric Dimensioning and Tolerance)을 적극 도입하고 더욱 완전한 공차분석

모델을 이용하여 조립품의 공차를 분석해야할 필요성이 있다.^{1,2)}

ECV는 냉매 토출량을 조절하기 위하여 가변 용량 압축기 크랭크실의 압력이 변하도록 제어하는 가변 용량 압축기용 제어밸브이다. 정밀가공 시 각 부품이 치수공차 및 위치공차, 편심, 각도공차 등 여러 요소가 부여되므로 기하공차가 누적되는 조립품에서 각 부품의 상대위치가 설계상 요구되는 위치에서 벗어나는 경우가 많다.

이런 경우에 ECV(External Control Valve)의 성능이 떨어지고 수명도 짧아지게 된다. 조립품에서 공차누적문제를 해결하기 위하여 설계자가 공차누적에 관한 분석을 체계적으로 할 수 있는 방법이 제시

*Corresponding author, E-mail: hschang@mju.ac.kr

되어야 하며, 또한 최종 조립품에서 누적되는 공차 분포를 확률적으로 예측할 수 있어야 한다.³⁻⁵⁾ ECV 각 부품의 공차값을 정확히 규제하지 못하면 ECV의 조립성과 기능성에 심각한 영향을 미치고 결과적으로 가변용량 압축기가 정상적으로 동작하기 어렵다.

본 연구에서는 ECV 각 부품의 공차가 주어질 경우에 Monte Carlo 시뮬레이션⁶⁻¹⁰⁾ 기법을 이용해서 조립된 ECV의 성능에 영향을 미치는 간극에서 발생하는 누적공차를 계산하고자 한다. 또한 계산된 결과가 설계요구조건을 만족하는지 평가하고 만족되지 못할 경우 각 부품의 공차값을 수정하여 설계요구조건을 만족시키는 방법을 제시한다. 그리고 Monte Carlo 시뮬레이션기법을 이용하여 공차를 분석할 때 두 종류(정규분포, 균일분포)의 공차분포방식을 도입해서 누적공차를 계산함으로써 어느 분포방식이 더 큰 누적공차를 만드는지 분석한다.

2. ECV 작동원리 및 공차문제점

2.1 ECV 용도

차량의 공조장치에 이용되는 무클러치 형식의 압축기는 엔진의 구동에 의하여 동작하므로 차량의 냉방 능력이 엔진의 회전수에 의하여 결정되어서 냉방능력을 제어하는 것이 어렵다. 이를 극복하기 위하여, 엔진의 회전수에 제약을 받지 않고, 냉매의 토출 용량을 가변해서 적절한 냉방 능력을 얻기 위한 가변 용량 압축기(Fig. 1)의 제어밸브 ECV가 개발되었다.

Fig. 1 ECV installed on a variable-displacement-swash-plate-type compressor

2.2 ECV와 압축기 내부의 연결관계

Fig. 2에서 포트1(port1)은 차량의 가변 용량 압축

Fig. 2 Section of ECV

기의 크랭크실과 연결된다. 크랭크실의 압력은 P_c 로 표시되고 P_c 의 압력에 따라서 압축기의 압축용량이 결정된다. 포트2(port2)는 가변 용량 압축기의 토출실과 연결된다. 흡입된 냉매를 압축한 후 토출실을 통하여 자동차의 응축기측으로 토출하고 토출실의 압력은 P_d 로 표시한다. 포트3(port3)은 가변 용량 압축기의 흡입실과 연결된다. 흡입실은 자동차의 증발기에서 냉매를 흡입하고 흡입실의 압력은 P_s 로 표시한다.

ECV 제어밸브가 흡입실의 압력 P_s 와 크랭크실의 압력 P_c 을 조절함으로써 압축기의 압축용량을 제어한다.

2.3 ECV 작동원리

코일에 전원이 공급되지 않을 때는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 P_d 와 P_c 가 서로 연결되도록 보장하기 위하여 챔버와 바디 사이에 Y방향의 간격 B가 반드시 존재해야 한다.

코일에 전원이 공급되면 Fig. 4에서 보는 바와 같이 챔버와 바디가 붙어서 P_c 와 P_d 사이의 연결을 차

Fig. 3 Pressure distribution chart before the coil is energized

Fig. 4 Pressure distribution chart after the coil is energized

단하고 Pc와 Ps가 연결된다. Pd와 Pc사이의 연결차단을 보장하기 위하여 챔버와 바디사이의 Y방향 간격 B가 반드시 없어져야 한다.

두 경우에 Pd와 Ps사이의 연결차단을 보장하기 위하여 챔버와 바디사이의 X방향 간격 A는 충분히 작게 유지되어야 한다.

2.4 ECV에서 해결할 공차문제점

Fig. 5에서 A로 표시되는 부분은 챔버와 바디사이의 X방향 간극이다. 압력 Pd와 압력 Ps가 서로 연결되지 않도록 하기 위하여 이 간극은 0.008mm를 넘지 말아야 한다. 그림에서 B로 표시되는 부분은 챔버와 바디사이의 Y방향 간극이고, ECV에 전원이 공급되지 않을 때 Y방향 간극의 요구범위는 0.03~0.25mm이다.

다음 장에서는 A와 B 지점에서의 누적공차가 간극에 대한 설계사양을 만족하는지 분석하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션 분석을 적용하고자 한다.

Fig. 5 The need for the positions of tolerance propagation analysis of ECV

3. 누적공차분석법

3.1 공차분석법

Fig. 6은 공차분석을 위한 기준좌표로서 위치 X, Y, Z와 회전각도 θ_x , θ_y , θ_z 을 가지는 6 자유도 좌표계이다. 이 좌표계에서 위치나 각도의 공차는 공차가 0인 공차기준점(nominal position)으로부터 정규분포 또는 균일분포 형태로 분포한다고 가정한다. 그러면 조립이 진행됨에 따라 공차분포가 누적되어서 최종 공차분포가 얻어진다. 이런 공차누적과정을 도식적으로 표현한 것이 Fig. 7이다. 그림에서 첫 번째 부품(#1)이 원점(x_0, y_0, z_0)에 놓일 경우 이 부품의 공차는 공차기준점(x_1, y_1, z_1)에서 확률분포를 가진다. 첫 번째 부품에 두 번째 부품(#2)이 조립되면 공차기준점(x_2, y_2, z_2)에서의 공차분포범위는 부품 #1과 부품 #2의 치수공차 분포가 누적된 결과로 얻어진다. 그러므로 부품의 조립과정을 최초 공차기준점에서 최종 공차기준점까지의 좌표변환으로 간주한다. 그러면 최종 조립품에서 위치 치수공차 누적결과를 계산할 수 있다. Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하면 이와 같은 반복 계산을 수행할 수 있다. Monte Carlo 시뮬레이션기법은 확률 통계적인 이론에 근거한 계산방법이고 해석적 모델을 구하기 어려운 공학적 문제에 적용될 수 있다.

Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 이용한 공차분석과정을 상술하면 다음과 같다. 조립에 사용되는 각 부품의 공차범위내에서 무작위로 공차를 선정하여 조립하는 경우의 수를 1000 개로 설정한다. 1000 번의 조립 경우에서 누적된 공차를 각 좌표계 방향에 따라 계산하면 공차기준점(공차가 0인 위치)으로부터 벗어난 각 방향의 최종누적오차가 구해진다. 무

Fig. 6 Six degrees of freedom associated with a three dimensional body

Fig. 7(a) Schematic diagram of tolerance propagation with nominal distribution

Fig. 7(b) Schematic diagram of tolerance propagation with uniform distribution

작위로 추출한 공차에 의해 계산된 결과이므로 무작위 추출횟수를 충분히 크게 하기 위해 1000번의 조립횟수에 대해 최종누적오차를 계산한다.

3.2 2단 조립부품의 공차누적해석 예

Fig. 8과 같이 2개의 단순부품을 세로로 조립하는 경우에 대하여 누적 공차 계산방법을 설명한다.

Fig. 8의 F0점 (0,0)에서 2번 좌표변환해서 F2점 (80,80)을 얻고 X, Y방향으로만 공차가 발생한다고 가정하여 F2점에서의 최종 누적공차를 계산한다. 첫 번째 변환은 F0점에서 두 부품이 만나는 지점(F1)으로 평행이동하고(X, Y방향으로 각각 20과 50씩 이동), 공차는 각각 X, Y방향으로 0.05와 0.04를

Fig. 8 The dimension and tolerance of two-parts

가정하였다. 두 번째 변환은 F1점에서 F2지점으로 60(X방향)과 30(Y방향)만큼 평행 이동하였고 각각 공차는 X, Y 방향으로 0.05와 0.04를 가정하였다.

각 부품의 치수 및 공차 데이터를 C언어로 작성된 Monte Carlo Simulation 프로그램에 입력하여 최종적으로 누적된 공차 결과를 Fig. 9와 같은 형태로 얻는다. Fig. 9에서 각 점은 1000개로서 1000회 조립 누적공차를 나타낸다.

본 연구에서 누적공차 분석을 계산하기 위하여 이용한 공차분포형식은 설계자들이 누적공차를 분석할 때 많이 이용하는 정규분포와 균일분포¹⁰⁻¹²⁾를 사용한다. 본 연구에서 사용된 Monte Carlo 시뮬레이션 기법의 신뢰도는 확률분포 이론에 근거한 연구결과³⁻⁵⁾를 이용한다. 즉 Fig. 9에서 각 누적공차의 경계선(타원, 직사각형)은 99.3% 신뢰도를 가지는 경계로서 1000개의 점들 중 7개정도가 제외된 경계선이다.

Fig. 9(a)의 타원에서 주축의 장경과 단경의 길이는 각각 X, Y방향의 최종누적공차 범위를 의미한다. 정규분포로 계산되는 F2점(80, 80)의 X, Y방향의 최종 공차범위는 각각 -0.068~0.068과 -0.06~0.06

(a) Nominal distribution (b) Uniform distribution
Fig. 9 Tolerance propagation of two-parts -assembly

이며 각 부품의 공차분포를 정규분포로 가정했을 때 99.3%의 최종누적공차를 포함하는 범위이다. 또한 Fig. 9(b)의 사각형에서 주축의 장경과 단경의 길이는 각각 X, Y방향의 최종누적공차 범위를 의미한다. 균일분포로 계산되는 F2점(80, 80)의 X, Y방향으로의 최종 공차범위는 각각 $-0.09 \sim 0.09$ 과 $-0.075 \sim 0.075$ 이며 각 부품의 공차분포를 균일분포로 가정했을 때 99.3%의 최종누적공차를 포함하는 범위이다.

4. ECV의 챔버와 바디의 조립 공차누적 분석

3장에서 설명한 방법을 사용하여 Fig. 10의 ECV에서 A와 B로 표시된 부분의 누적공차를 분석한다.

Fig. 10 The coordinate system for tolerance propagation analysis of ECV

4.1 A부분의 누적공차 분석

4.1.1 각 부품에 부여된 공차를 이용하여 누적공차 분석

Fig. 11은 A부분의 누적공차를 분석하기 위한 좌표계를 보여주며, A부분의 누적공차를 계산할 때 Z축 방향의 위치공차 및 X Y Z 축에 대한 회전각과 회전각 공차는 없다고 가정한다.

바디의 F3'(3.254, 50.396)은 F0(0, 0)에서 세 번 좌표변환하여 구해진 점이고 챔버의 F''5(3.248, 50.396)는 F'0(F0점과 동일)에서 다섯 번 좌표변환하여 구해진 점이다. 각 경우에 좌표변환시 변위와 치수공차는 Table 1, 2 나와 있다.

이와 같은 입력 데이터가 C언어로 작성된 Monte Carlo 공차누적분석 프로그램에 입력되면 좌표변환으로 표현된 조립과정이 진행되며 공차누적 결과가 화면과 수치로 Fig. 12, 13과 같이 출력된다.

Fig. 11 Coordinate system for tolerance analysis of A part of ECV is separated

Table 1 Dimensional tolerance of body

Coordinate transform	F0→F1	F1→F2	F2→F3'
Distribution transform	(4.75, 14.55)	(2.86, 13)	(-4.356, 22.846)
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.025 , ± 0.025)	(± 0.00491 , ± 0.0166)	(± 0.00175 , ± 0.03006)

Table 2 Dimensional tolerance of chamber

Coordinate transform	F'0→F'1	F'1→F'2	F'2→F'3
Distribution transform	(0, 1)	(0.65, 9.25)	(0.35, 22.3)
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.005 , ± 0.00172)	(± 0.0025 , ± 0.0025)	(± 0.005 , ± 0.01)
Coordinate transform	F'3→F'4	F'4→F''5	
Distribution transform	(4.02, 1.6)	(-1.746, 16.246)	
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.0075 , ± 0.0067)	(± 0.00125 , ± 0.01832)	

Fig. 12 Tolerance propagation result in F0→F'3'

좌표변환시 각 부품의 치수공차가 누적되고 최종 지점의 공차분포는 공차기준 위치를 중심으로 Fig. 12, 13과 같이 일정한 형태를 보인다. Fig. 12에서 보이는 점들은 정규분포와 균일분포로 가정된 공차분

Fig. 13 Tolerance propagation result in F'0→F''5

Fig. 14 Super position of two tolerance propagation results

포에서 무작위로 추출된 공차를 사용하여 조립과정을 1000번 반복하는 Monte Carlo 시뮬레이션 결과로서 F0에서 F3'점까지 누적되는 공차를 나타낸다. Fig. 13에서는 F'0에서 F''5점까지 누적된 공차를 보여준다. 그리고 Fig. 14는 F''5지점과 F3'의 누적공차를 중첩한 것으로서 최종 누적공차를 나타낸다.

정규분포공차를 사용한 결과인 Fig. 14(a)를 보면 X축 방향의 최종 누적 공차범위는 -0.027~0.027mm (99.3%의 신뢰도)로 구해지고 Fig. 11에서 X방향으로 F''5와 F3'사이의 간극은 0.006mm이므로 공차가 반영되면 두 점 사이의 간극범위는 -0.021~0.033mm가 된다. 챔버와 바디 사이에 X방향으로 요구되는 최대 간극 크기는 0.008mm이므로 공차가 너무 커서 ECV를 장착한 압축기가 냉매를 압축하는데 영향을 미친다. 균일분포공차를 사용한 결과인 Fig. 14(b)를 보면 X축 방향의 최종 누적 공차범위는 -0.036~0.036mm(99.3%의 신뢰도)로 구해지고 간극범위는 -0.03~0.042mm가 되므로 역시 ECV를 장착한 압축기의 작동에 영향을 미친다. 두 공차분포를 이용하여 계산된 최종 누적공차결과가 설계사양을 만족하지 못하므로 각 부품에 부여된 X방향 공차값은 더

Fig. 15 Dimensional tolerance before modification

Fig. 16 Dimensional tolerance after modification

작은 값으로 수정되어야 한다. 그러므로 Fig. 15의 초기 공차값을 Fig. 16의 공차값으로 줄여서 설계사양을 만족하는지 다시 분석을 수행한다.

4.1.2 수정된 공차를 이용한 누적공차 분석

수정된 각 부품의 공차를 사용하여 좌표변환을 하면 Table 3, 4와 같이 변위와 치수공차를 얻을 수 있다.

이 데이터를 Monte Carlo 공차누적분석 프로그램에 입력하면 좌표변환으로 표현된 조립과정이 진행되며 공차누적 결과가 Fig. 17,18에 표시된다.

Table 3 Corrected dimensional tolerance of chamber by Fig. 16

Coordinate transform	F'0→F'1	F'1→F'2	F'2→F'3
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.003 , ± 0.00172)	(± 0.00125 , ± 0.0025)	(± 0.00125 , ± 0.01)
Coordinate transform	F'3→F'4	F'4→F''5	
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.00125 , ± 0.0067)	(± 0.001 , ± 0.01832)	

Table 4 Corrected dimensional tolerance of body by Fig. 16

Coordinate transform	F0→F1	F1→F2	F2→F3'
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.0025 , ± 0.025)	(± 0.00123 , ± 0.0166)	(± 0.001 , ± 0.03006)

Fig. 17 Tolerance propagation result in F'0→F''5

Fig. 18 Tolerance propagation result in F'0→F'3'

Fig. 19 Superposition of two tolerance propagation results

그리고 Fig. 19는 F''5지점과 F'3'의 누적공차를 중첩한 것으로서 최종 누적공차를 나타낸다.

Fig. 19(a)에서 정규분포로 계산된 X축 방향의 누적 공차범위는 -0.004~0.004mm(99.3%의 신뢰도)로 구해지고 수정된 F''5와 F'3' 사이의 X축 방향 간극을 계산하면 0.004mm이므로 공차를 반영할 경우 두 점 사이의 간극범위는 0~0.008이 된다. 그러므로 챔버와 바디의 X방향 최대 간극의 크기는 설계사양(0.008mm)을 만족한다. Fig. 19(b)에서 균일분포로 계산된 X축 방향의 누적 공차범위는 -0.007~0.007mm(99.3%의 신뢰도)이고 공차범위가 반영된 X방향 간

극은 -0.003~0.011mm로서 설계사양이 만족되지 않는다. Fig. 19(b)에서 작은 사각형으로 표시된 경계선은 설계사양을 만족하는 공차범위를 나타내지만 너무 낮은 신뢰도(약 70%정도)를 보여 양산에 적용하기는 어렵다.

정규분포로 계산된 결과가 설계요구를 만족하지만 실제 가공할 때 부품이 어떤 공차분포방식을 가지고 있는지 알 수 없다. 그러므로 공차분포를 균일분포로 가정하고 계산한 결과가 설계요구를 만족하지 않는다면 공차를 다시 수정하는 것이 바람직하다. 그러므로 Fig. 20, Table 5, 6과 같이 각 부품의 공차를 재설정하여 다시 분석을 수행하면 Fig. 23과 같이 균일분포인 경우에 대해서도 설계요구를 만족하는 공차범위를 얻을 수 있다. 결과적으로 각 부품들이 Fig. 20과 같은 공차를 갖는다면 조립된 ECV 샘플이 정상적으로 작동할 것으로 판단된다.

Table 5, 6의 공차값은 현재의 가공방법(선반가공, 드릴링, 밀링, 그라인딩 등)으로 가공할 때 얻을 수 있는 최소의 공차범위와 가까운 값이다. 만약 현재의 가공방법으로 얻을 수 있는 최소의 공차를 사용해도 주어진 최종 공차조건을 만족할 수 없다면 고비용이 요구되는 정밀한 가공방법(브로우칭, 고속밀링, 리머가공 등)을 사용하여 공차범위를 줄일 수 있다.

Table 5 The second corrected dimensional tolerance of chamber by Fig. 21

Coordinate transform	F'0→F'1	F'1→F'2	F'2→F'3
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.001 , ± 0.00172)	(± 0.001 , ± 0.0025)	(± 0.001 , ± 0.01)
Coordinate transform	F'3→F'4	F'4→F''5	
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.001 , ± 0.0067)	(± 0.001 , ± 0.01832)	

Table 6 The second corrected dimensional tolerance of body by Fig. 21

Coordinate transform	F0→F1	F1→F2	F2→F'3'
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.0025 , ± 0.025)	(± 0.00123 , ± 0.0166)	(± 0.001 , ± 0.03006)

Fig. 20 Dimensional tolerance after modification

Fig. 21 Tolerance propagation result in F'0→F'5

Fig. 22 Tolerance propagation result in F0→F3'

Fig. 23 Superposition of two tolerance propagation results

4.2 B부분의 누적공차 분석

A부분의 누적공차 분석방법과 동일하게 바디와 챔버 사이에 Y방향의 누적공차를 분석한다.

Fig. 24에 따라 바디의 F3(2.85,57.25)은 F0(0,0)에서 3번 좌표 변환해서 얻어진 점이고 챔버의 F'5(2.85,57.15)는 F'0(F0점과 동일)에서 다섯 번 좌표 변환해서 얻어진 점이다. 각 경우의 좌표변환에 대한 변위와 치수공차는 Table 7, 8과 같다.

이와 같은 입력 데이터를 Monte Carlo 공차누적 분석 프로그램에 입력하면 Fig. 25,26과 같은 결과가 출력된다. Fig. 25, 26의 두 누적공차를 더해서 Fig. 27

Fig. 24 Coordinate system for tolerance analysis of B part of ECV is separated

Table 7 Dimensional tolerance of body

Coordinate transform	F0→F1	F1→F2	F2→F3
Distribution transform	(4.75,14.55)	(2.86, 13)	(-4.76,29.7)
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.025 , ± 0.025)	(± 0.00491 , ± 0.0166)	(± 0.01188 , ± 0.05)

Table 8 Dimensional tolerance of chamber

Coordinate transform	F'0→F'1	F'1→F'2	F'2→F'3
Distribution transform	(0, 1)	(0.65,9.25)	(0.35,22.3)
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.005 , ± 0.00172)	(± 0.0025 , ± 0.0025)	(± 0.005 , ± 0.01)
Coordinate transform	F'3→F'4	F'4→F'5	
Distribution transform	(4.02, 1.6)	(-2.15,23)	
Tolerance ($\Delta X, \Delta Y$)	(± 0.0075 , ± 0.0067)	(± 0.0011 , ± 0.02594)	

과 같은 최종 누적공차를 얻을 수 있다.

정규분포의 공차를 사용하여 계산된 결과인 Fig. 27(a)에서 Y축 방향의 최종 누적 공차범위는 -0.068~0.068mm (99.3%의 신뢰도)이고 챔버와 바디사이의 요구 간극범위는 0.03~0.25mm이다. Fig. 24에서 F3과 F'5사이의 Y방향 간극은 0.1mm이므로 공차가 반영되면 간극범위는 0.0320~0.168mm로서 설계사양(0.03 ~ 0.25mm)을 만족시킨다.

균일분포의 공차를 사용하여 계산된 결과인 Fig. 27(b)에서 Y축 방향의 최종 누적 공차범위는 -0.1~0.1mm(99.3% 신뢰도)이다. 공차로부터 Y방향 간극 범위를 구하면 0~0.2mm이므로 설계사양(0.03~0.25mm)을 만족시키지 못한다. 간극이 0일 경우는 ECV 포

Fig. 25 Tolerance propagation result in F0→F3

Fig. 26 Tolerance propagation result in F'0→F'5

Fig. 27 Superposition of two tolerance propagation results

트1과 포트2 사이에 미세한 통로가 형성되어 ECV의 정상 작동에 영향을 미친다. 그러므로 B부분과 관련된 각 부품의 공차도 수정되어야 한다.

4.3 간극변화에 따른 ECV 문제점

차량에서는 냉방부하에 따라 ECV의 전류를 상승시키거나 하강시키면서 각 포트의 압력을 제어한다. ECV에서 각 포트의 압력이 정상적으로 제어되기 위해서는 실험결과인 Fig. 28과 같이 전류의 상승

Fig. 28 ECV hysteresis chart for proper clearance

Fig. 29 ECV hysteresis chart for improper clearance

(UP) 및 하강(DOWN)시에 발생하는 각 압력변화의 히스테리시스가 크지 않아야 한다. 그러나 A와 B지점의 공차설계가 제대로 되지 않을 경우의 실험결과인 Fig. 29와 같이 전류변화에 따른 압력변화 히스테리시스가 크게 발생하여 ECV가 정상적으로 동작하지 못한다.

ECV에서 요구되는 간극조건을 만족하지 못하는 ECV의 비정상적인 작동을 상술하면 다음과 같다. Fig. 29에서 Pc와 Pd 압력이 감소하여 0.4 MPa 근처가 되었을 때 두 압력은 비슷한 값을 갖는다. 이 경우는 ECV 챔버와 바디사이의 X방향 간극이 확보되지 못한 경우로서 Pd 압력이 흡입실로 유입되어 Ps 기압을 상승시킨다. Ps기압이 상승하면 Ps와 Pc 사이의 압력차이를 줄이고 그로인하여 압축된 냉매량이 떨어진다. ECV가 정상적으로 동작하지 못하면 자동차 에어컨의 냉방 초기에 예상된 냉방효과를 얻지 못한다.

5. 결 론

확률과 통계적인 방법을 바탕으로 좌표변환과 두 종류의 공차분포(정규/균일)를 이용한 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 최종누적공차를 분석하는 방법을 제시하였다. 또한 제시된 방법을 ECV의 조립 품에 적용하여 누적공차를 분석함으로써 각 부품의 공차 정밀도를 결정할 수 있었다.

실제 기계가공에서 각 부품이 가지는 공차분포방식은 다양할 수 있으므로 본 논문에서 사용한 정규 분포와 균일분포 외에 포아송 분포(Poisson distribution), β 분포 등 다양한 분포를 포함하여 공차를 분석하면 더욱 정확한 누적공차범위를 구할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국산학연합회 '2012년도 기업부설 연구소 업그레이드 과제' 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) D. J. Choi, Fixture Design and Drawing, pp.50-55, Iljinsa, Seoul, 1993.
- 2) H. S. Choi, Theory of Tolerance, pp.40-149, Seongandang, Gyeonggi, Korea, 1993.
- 3) H. S. Chang, W. Y. Won, D. J. Choi, J. S. Kim, J. H. Kim, T. H. Nahm and H. J. Kang, "The Effect of Annular Projection Collapse on Tolerance of ECV Assembly," J. of KWJS, Vol.30, No.1, pp.78-84, 2012.
- 4) D. J. Choi, B. C. Son, W. H. Seong and H. S. Chang, "Analysis of Geometric Dimensioning & Tolerancing Propagation using Monte Carlo Simulation," Proceeding of KSME, Vol.2, No.1, pp.850-855, 1995.
- 5) Y. W. Bang, D. J. Choi, H. S. Chang and J. S. Yang, "Design of Plasma Cutting Torch by Tolerance Propagation Analysis," J. of KWJS, Vol.18, No.3, pp.122-130, 2000.
- 6) T. W. Park and H. S. Sohn, "Quality Improvement of Vehicle Drift Using Statistical Six Sigma Tools," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.6, pp.625-633, 2005.
- 7) C. Y. Lin, W. H. Huang, M. C. Jeng and J. L. Doong, "Study of an Assembly Tolerance Allocation Model Based on Monte Carlo Simulation," J. of Materials Processing Technology, Vol.70, Issues 1-3, pp.9-16, 1997.
- 8) J. K. Tahk, "Accumulated Tolerance Analysis for Optimal Tolerance Design," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1743-1752, 2005.
- 9) J. Y. Lee, "Tolerance Analysis of Spline Shaft Assembly," J. of Korea Society of Precision Engineering, Vol.27, No.12, pp.75-83, 2010.
- 10) K. W. Chase and W. H. Greenwood, "Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis," Manufacturing Review, ASME, Vol.1, No.1, pp.50-59, 1988.
- 11) R. Cvetko, K. W. Chase and S. P. Magleby, "New Metrics for Evaluating Monte Carlo Tolerance Analysis of Assemblies," Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, 1998.
- 12) J. K. Patel, "Tolerance Limits - A Review," Communications in Statistics - Theory and Methods, Vol.15, Issue 9, pp.2719-2762, 1986.