

〈 논문 〉

용접변형을 고려한 효율적 공차해석 기법 개발

임현준[†] · 이동열* · 이재열** · 권기억*** · 신종계****
(2005년 5월 2일 접수, 2005년 9월 2일 심사완료)

Development of an Efficient Method to Consider Weld Distortion in Tolerance Analysis

Hyunjune Yim, Dongyul Lee, Jaeyeol Lee, Ki Eak Kwon and Jong-Gye Shin

Key Words : Welding Assembly(용접 조립), Tolerance Analysis(공차해석), Assembly Variation(조립 오차), Weld Distortion(용접변형)

Abstract

A general and efficient methodology has been developed to analyze dimensional variations of an assembly, taking into account of weld distortion. Weld distortion is generally probabilistic because of the random nature of welding parameters such as the welding speed, maximum welding temperature, ambient temperature, etc. The methodology is illustrated through a very simple example of two perpendicular plates fillet-welded to each other. Two steps comprise the methodology: establishment of a weld-distortion database, and tolerance analysis using the database. To establish the database, thermo-elasto-plastic finite element analyses are conducted to compute the weld distortion for all combinations of discrete values of major welding parameters. In the second step of tolerance analysis, the weld distortion retrieved from the database is used in addition to the dimensional tolerances of the parts. As a result of such an analysis, sensitivities of the assembly's dimensional variations to the part tolerances and weld distortion are obtained, which can be help improve the dimensional quality of the assembly.

1. 서 론

선박이나 자동차의 제조공정에서 금속부품은 수백에서 수천 번에 이르는 필렛용접(fillet weld), 맞대기용접(butt weld), 점용접(spot weld)공정을 거쳐 완제품으로 조립된다. 따라서 완성품의 치수 품질은 부품들의 크기오차와 조립공정에서 발생하는 수많은 변수들에 의해 좌우되므로, 그 해석이 간단하지 않다.⁽¹⁻⁵⁾

부품들의 치수와 공차가 주어졌을 때 이들의

† 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
E-mail : hjyim@hongik.ac.kr

TEL : (02)320-1489 FAX : (02)322-7003

* 홍익대학교 대학원 기계공학과, 현재 ㈜쌍용자동차

** ㈜노스

*** ㈜비투젠

**** 서울대학교 조선해양공학과

결함으로 이루어진 완제품 또는 중간제품(subassembly)의 치수오차(dimensional variation)가 어떤 값을 갖게 되는지를 분석하는 것을 보통 공차해석(tolerance analysis)이라 한다. 공차해석에 사용되는 전통적인 방법으로서 최악조건해석(worst case analysis), RSS(root sum squares)법, 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)법을 꼽을 수 있으며, 상용 소프트웨어 툴(tool)은 대부분 몬테카를로 시뮬레이션법을 사용한다. 그러나, 이들 상용 툴들은 모두 부품들을 강체로 가정하는 한계를 가지고 있고, 최근에 이르러서야 조립 중에 발생하는 부품의 변형을 고려할 수 있도록⁽³⁻⁵⁾ 프로그램을 개선시켜 나가고 있는 추세이다.

그러나 이러한 발전과 개선에도 불구하고 아직까지 용접에 의해 발생하는 열변형을 고려하여 공차해석을 수행할 수 있는 상용 툴은 없다. 그 이유는 문제의 복잡성에 기인한다. 본 논문에서

는 이 문제의 해결책으로서 미리 용접변형 값을 데이터베이스(database)로 구축하여 두고 이를 활용하여 공차해석을 수행하는 효율적인 기법을 제시하고자 한다.

2. 제안 기법의 개요

많은 인자가 용접변형에 영향을 미치는데, 그 중에서도 용접속도, 최고온도, 용접방향, 냉각속도, 판의 재질, 판의 두께 등이 중요하다. 실제 용접에 있어서 이들 변수들은 항상 일정하지 않으므로 확률분포(probabilistic distribution)를 갖는 임의변수(random variables)로 간주할 수 있고, 이들이 용접변형에 미치는 영향은 서로 상쇄되거나 또는 보강되어 나타난다. 따라서, 용접변형을 고려하여 공차해석을 수행하려면, 이들 용접변수들을 임의변수로 간주하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여야 한다.

그러나 이와 같은 몬테카를로 시뮬레이션의 케이스(case) 각각마다 용접변형을 구하여 공차해석을 수행하는 것은 실용적인 방법이 될 수 없다. 그 이유는, 용접변형을 구하기 위하여 매우 복잡한 열탄소성 유한요소해석(FEA, finite element analysis)을 수행해야 하는데, 수천 번의 몬테카를로 시뮬레이션 케이스 마다 이러한 해석을 수행하려면 많은 시간이 소요되기 때문이다.

본 논문에서는 이 문제를 해결할 목적으로 개발된 실용적 공차해석 방법(Fig. 1)을 제안하고자 한다. 우선, Fig. 1의 좌측에 보인 데이터베이스 구축에 대해 살펴보자. CAD 데이터의 형태로서 용접 조립문제가 주어지면, 이 문제에 대해 유한요소해석을 수행하여 용접변형을 구한다. 이때, 용접변수들 중에서 용접변형에 큰 영향을 미치는 몇 개의 주요 변수 각각에는 미리 인접한 이산값

(discrete values)들을 지정해 놓고, 이들의 모든 조합에 대해 유한요소해석을 수행하여 용접변형 데이터베이스를 구축하는 것이다.

데이터베이스가 구축되었으면 이를 활용하여 Fig. 1의 우측에 보인 공차해석을 수행하는데, 우선 주어진 CAD 모델에 대해 용접점과 측정점 및 공차를 정의한다. 일반적으로 조립품의 치수오차(dimensional variation)를 일으키는 원인이 되는 것을 오차원(誤差源, sources of variation)이라고 하는데, 본 연구에서는 용접변형을 고려하기 위하여 부품의 치수공차뿐 아니라 용접변형도 오차원으로 정의한다. 이제, 오차원들이 모두 특정한 확률분포를 갖는 임의변수(random variables)인 것으로 간주하여, 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한다. 이때, 용접변형 값은 미리 구축해 놓은 데이터베이스로부터 읽어 들여 공차해석에 반영하며, 이를 위해 간단한 인터페이스(interface) DLL (dynamic link library)을 개발하여 사용한다.

3. 적용 예제

본 논문에서는 위 2장에서 제안한 기법의 적용 방법을 설명하기 위해, Fig. 2의 필렛용접 문제를 살펴본다. 본 논문의 주목적은 용접변형을 고려하여 공차해석을 수행하는 효율적 방법을 제안하는 것이므로, Fig. 2와 같이 간단한 문제로 그 기법을 설명하기로 한 것이다. 물론, 복잡한 형상의 문제에도 동일한 기법이 그대로 적용되며, 다만 계산량이 많아질 뿐이다.

그뿐 아니라, Fig. 2의 문제는 조선 산업을 비롯한 여러 분야에서 볼 수 있는 대표적 문제이기도 하므로 본 연구에서 고려할 가치가 있다. 즉, 조선 산업의 경우에는 Fig. 2와 같이 바닥판과 보강판을 조립하고 계속하여 이음용접을 함으로써 배의 형태를 만들어 가는데, 때로는 용접변형이 매우

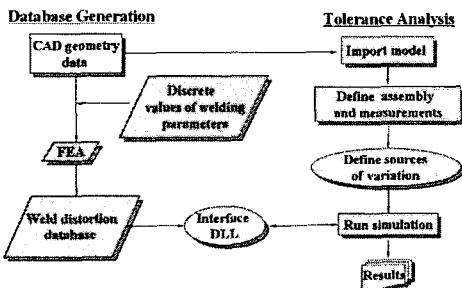


Fig. 1 Schematic diagram of proposed methodology

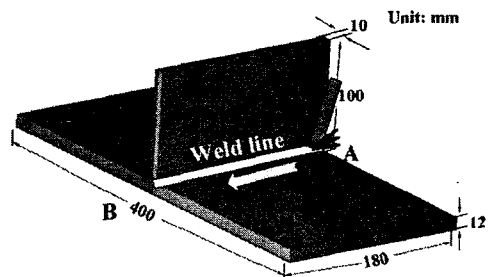


Fig. 2 Illustrative problem of fillet welding of two plates

커서 후속 조립공정이 어려워지는 일이 발생하기도 한다.

필렛용접 모델의 치수는 Fig. 2 에 보인 바와 같고 (단위: mm), 용접은 A 점에서 시작하여 B 점에서 끝나는 데, 조선소에서 흔히 볼 수 있듯이 보강판(수직판)의 아래쪽 변을 따라 앞, 뒤 모서리가 동시에 로봇으로 용접되는 것으로 가정한다. 따라서, Fig. 2 의 모델은 보강판을 중심으로 대칭인 문제가 된다. 이제 Fig. 1 에서 보인 공차해석 기법을 Fig. 2 의 문제에 적용하는 과정을 순차적으로 설명한다.

4. 데이터베이스 구축(적용 예)

Fig. 1 에서 보인 바와 같이 용접변형 데이터베이스를 우선 확보하여야 하며, 이를 위해 유한요소 해석을 수행해야 한다. 앞에서 살펴본 바와 같이 Fig. 2 의 문제는 대칭성을 가지고 있으므로, Fig. 3 과 같이 문제의 반만 해석하면 충분하다. Fig. 3 의 문제에 대한 유한요소 모델은 3 차원 솔리드(solid) 요소를 두께 방향으로 3 층으로 쌓아 만들었으며, 해석의 정확성을 높이기 위해 용접 부위는 더욱 세밀한 메쉬(mesh)로 모델링 하였다. 유한요소해석을 위한 경계조건으로서는, Fig. 3 의 모델에서 좌측 수직면을 따라 대칭조건, 즉 x 방향 변위가 없다는 조건을 적용하였고, 바닥판의 우측 아래 끝점을 단순지지 하였다.

유한요소법으로 용접변형을 구하기 위해 흔히 사용하는 방법은 실제 문제를 (1) 용접에 따른 열전달의 문제와, (2) 그 결과로 발생하는 온도 분포에 따른 열탄소성 변형의 문제로 분리하여 해석하는 것이다. 즉, 실제로는 동시에 일어나는 이 두

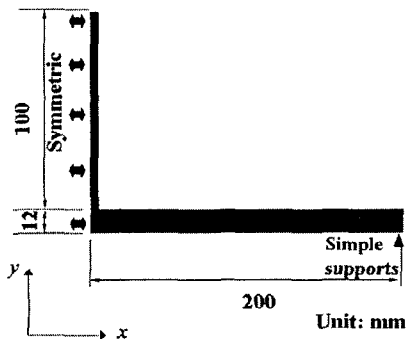


Fig. 3 Model and boundary conditions for finite element analyses

문제 사이에 연성(coupling)이 없는 것으로 가정함으로써 문제를 단순화 시켜 열전달 해석과 열변형 해석을 순차적으로 수행하는 방법이며, 본 논문에서도 이 방법을 적용하여 다양한 용접조건에 대한 용접변형 데이터베이스를 구축한다. 앞에서 설명한 바와 같이 용접속도, 최고온도, 용접방향, 냉각속도, 판의 재질, 판의 두께 등 중요한 용접변수가 많이 있지만, 본 연구에서는 용접속도와 최고온도만을 변수로 간주하여 그 기법을 설명하고자 한다.

4.1 열전달 해석

우선 열변형이 없는 것으로 가정하고 열전달 문제를 풀어 온도분포를 구하는 과정으로서, 물체 내에는 열원이 존재하지 않으므로 지배방정식은 다음과 같은 열전도방정식이 된다.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = \rho C_p \dot{T}$$

여기서, T 는 절대온도(K), k 는 열전도 계수(W/m²·K), ρ 는 밀도(kg/m³), C_p 는 정압 비열(J/kg·K)이다.

열량은 온도에 따라 계속 변하므로 정확하게 계산하기 쉽지 않다. 따라서 용접 부위가 용융상태의 온도에 도달할 때까지 일정 크기의 열 유속이 정해진 시간 동안 유입된다고 가정하였다. 대류 경계조건으로는 철판이 상온의 공기에 의해 자연 냉각된다고 가정하였으며, 복사열에 의한 냉각은 고려하지 않았다. 또, 용접 부위는 순간적으로 온도가 상승하면서 액화 상태에 이르며, 연강의 용융점인 1450 ℃ 에서 상변화가 발생한다고 가정하였다. 상변화가 일어나는 동안에는 열원이 유입되어도 온도가 상승하지 않으므로, 엔탈피 값을 이용하여 재료의 상변화 과정을 계산하였다.

열전달 해석 결과 결과로부터 시간에 따른 두 평판의 온도분포를 알 수 있고, 이들의 냉각속도와 온도분포가 서로 다른 것을 알 수 있다. Fig. 4

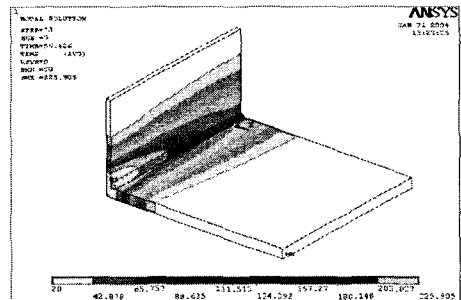


Fig. 4 An example of temperature distribution obtained from FEA

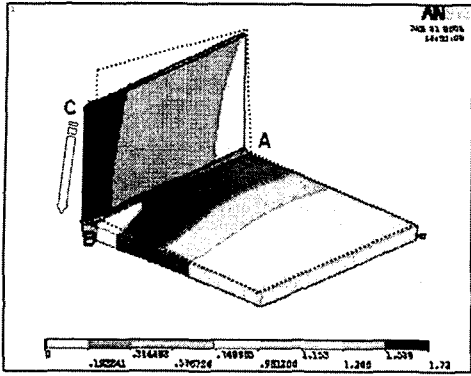


Fig. 5 An example of displacement field and deformed shape obtained from FEA

는 하나의 계산 예를 보이고 있는데, 최고온도가 1600℃, 용접속도가 4.0 mm/sec 일 때 용접 직후의 온도분포이다.

4.2 열변형 해석

4.1 절의 결과로서 온도분포가 구해지면 이를 이용하여 열변형 해석을 수행한다. Fig. 5는 Fig. 4에 보인 온도분포에 따라 발생하는 변위장 (displacement field) 및 변형된 모습을 나타내고 있다. 이 그림에서 변형 전의 모델(점선)과 비교해보면 x 축을 중심으로 뒤틀리는 변형이 발생하였고, 특히 용접이 끝나는 B 점에서 아래 방향으로 가장 큰 변위가 발생한 것을 알 수 있다.

4.3 데이터베이스

앞에서 언급한 같이, 본 연구에서는 다양한 용접변수 중 최고온도 및 용접속도 만을 임의 변수 (random variables)로 고려하여, 용접변형 데이터베이스를 구축하였다. 즉, 최고온도는 1400℃~3200℃ 범위 내에서 200℃간격으로 10 개의 값을, 용접속도는 3.5 mm/sec ~ 7.0 mm/sec 범위 내에서 0.5 mm/sec 간격으로 8 개의 값을 고려하여, 이들의 모든 조합(총 80 개 조합)에 대해 용접변형을 구해 데이터베이스로 저장하였다.

데이터베이스에는 유한요소해석의 결과로 구해지는 모든 절점(node)에서의 용접변형 값이 저장된다. Fig. 6 과 Fig. 7 의 그래프에는 용접변수의 모든 조합에 대해 용접이 시작되는 A 점과 용접이 끝나는 B 점의 수직방향 변위가 나타나 있다. 이 그래프들로부터 용접속도가 느릴수록, 또한 최고온도가 높을수록 큰 변형이 발생하는 경향을 관찰할 수 있는데, 이는 용접에 사용되는 총열량이 커질수록 더 큰 변형이 발생함을 의미하는 것으로서 물리적으로 타당하다.

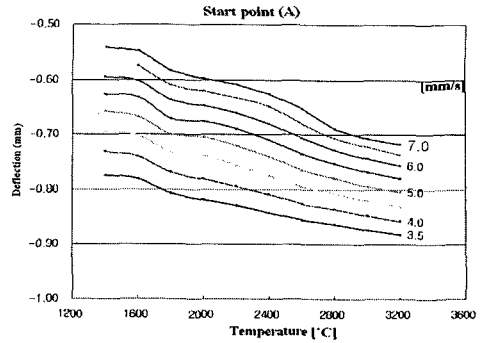


Fig. 6 Vertical displacements at weld starting point A

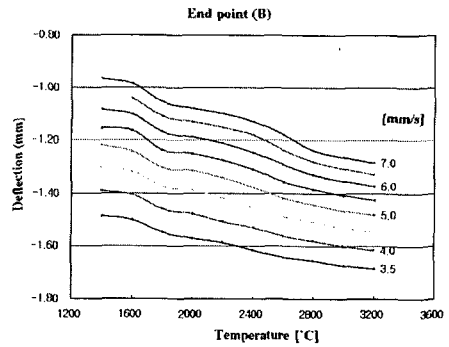


Fig. 7 Vertical displacements at weld ending point B

5. 공차해석(적용 예)

본 연구에서는 공차해석을 위해 상용 프로그램인 3DCS 를 사용하였다.⁽⁵⁾ 이 프로그램을 이용하여 공차해석을 수행하려면, (임의변수) 공차, 조립시 부품간의 이동위치 및 조립 위치(용접점), 조립 후 변위를 측정하려는 점의 위치 및 변위성분 등을 입력하여야 한다. 용접변형을 고려하기 위해 본 연구에서는 부품의 치수공차 뿐 아니라 용접 변형도 “사용자 공차(user tolerance)”로 지정하였다. 3DCS 에 이러한 입력이 완료되면 지정된 공차들을 임의변수로 하여 몬테카를로 시뮬레이션이 수행되며, 그 결과로서 측정 변위의 확률분포뿐 아니라 각 공차에 대한 측정 변위의 민감도 (sensitivity)도 구할 수 있다.

5.1 DLL 을 이용한 용접변형 DB 활용

2 장 (Fig. 1)에서 설명한 바와 같이, 본 연구에서는 공차해석 시뮬레이션 수행 중에 데이터베이스로부터 용접변형 값을 읽어 들여야 한다. 3DCS 에는 사용자의 용도에 따라 새로운 DLL (dynamic link library)을 추가할 수 있는 기능이 있으므로, 본 연구에서는 용접변형 데이터베이스와 3DCS 를

연계하기 위하여 C 언어로 새로운 DLL 을 개발해 사용하였다.

개발된 DLL 을 활용하여 용접변형을 구하는 방법이 Fig. 8 에 나타나 있다. 우선, GUI(graphic user interface)를 통해 용접변형을 사용자 공차로 정의하고 용접변형 데이터베이스의 컴퓨터 내 위치를 지정한다. 본 연구에서는 수직 보강판의 위와 아래 모서리에서 발생하는 용접변형이 중요하므로, 이 두 위치에서의 용접변형을 사용자 공차로 정의하였다. Fig. 9 는 아래 모서리의 용접변형을 사용자 공차로 정의하는 모습을 예로 보여주고 있다. 다음으로는 지정된 용접변형의 위치에 해당하는 절점들의 좌표값을 절점파일(node file)로부터 읽어 들여 그 좌표에서의 용접변형 값을 데이터베이스로부터 읽어 오게 된다.

5.2 공차해석 수행

5.1 절에서 설명한 방법으로 용접 변형을 공차로 취급할 수 있게 되면, 3DCS 의 공차해석 시뮬레이션을 수행한다. 이를 위해 용접점(조립점) 및 측정점을 정의하고, 각 부품의 치수 공차와 형상 공차를 부여한다.

본 연구에서는 용접변형의 영향과 비교할 목적으로 Fig. 10 에 보인 세 가지의 치수 공차를 고려하였으며, 형상 공차는 없는 것으로 가정하였다. 즉, 각 평판의 가로와 세로 길이는 각각 ± 0.5 mm

의 공차를 가지고 두께에는 치수 공차가 없다고 가정하였다. 이러한 치수 공차들은 표준편차가 $0.5 \text{ mm} / 3 = 0.167 \text{ mm}$ 이고 평균이 0 인 정규분포를 갖는 것으로 가정하였다. 이 치수 공차들과 앞에서 데이터베이스를 이용하여 구한 용접변형을 모두 공차로 간주하고 몬테카를로 시뮬레이션을 함으로써 공차해석을 수행하였다.

5.3 공차해석 결과 고찰

공차해석 결과로서는 Fig. 5 의 B, C 점을 측정점으로 정하여 이 두 측정점에서의 x, y, z 방향 변위를 조립 오차로 간주하였다. 본 연구에서는 용접변형의 영향을 치수공차의 영향과 비교해 보기 위하여, 세 경우에 대해 공차해석을 수행하였다. 첫 번째(Case 1)는 크기공차만 있고 용접변형이 없는 경우, 두 번째(Case 2)는 용접변형만 있는 경우, 세 번째(Case 3)는 둘 다 있는 경우이다.

세 가지 경우 각각에 있어 1000 번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였는데, 그 결과는 확률분포도로 나타난다. 이러한 확률분포로부터 구한 각 조립 오차의 평균과 표준편차 값이 Table 1 에 요약되어 있다.

Table 1 에 x 방향 오차에 관한 결과는 없는데, 이는 지금 고찰하는 문제의 대칭면 상에 B 점과 C 점이 놓여 있어 x 축 방향의 변위가 0 이기 때문이다. 먼저 치수공차만 존재하는 Case 1 을 살펴보면, y 방향과 z 방향으로 B 점과 C 점 모두 평균 값이 매우 작은데 이는 몬테카를로 시뮬레이션 회수를 늘려갈수록 0 에 접근하는 값이다. B 점의 y 방향 표준편차는 0 이고 C 점의 y 방향 표준편차는 앞에서 정한 바와 같이 치수공차에 대한 정규분포의 표준편차($0.5 / 3 = 0.167 \text{ mm}$)와 일치함을 볼 수 있다. 이는 수직 보강판을 수평판에 조립할 때, 아래 모서리가 기준면(datum)이 되게 모델링하였기 때문이다. Z 방향으로로는 보강판과 수평판 모두 A 점 쪽 모서리를 기준면으로 하였으므로, B 점과 C 점의 z 방향 표준편차도 $0.5 / 3 = 0.167 \text{ mm}$ 정도로 나타난다.

이제, 용접변형만을 고려하는 Case 2 를 살펴보면, B 점과 C 점에서 y, z 축 방향으로의 평균값은

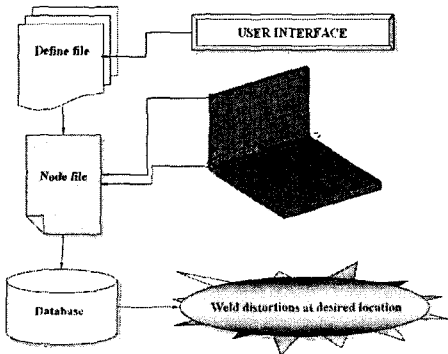


Fig. 8 Procedure to retrieve weld distortions from DB

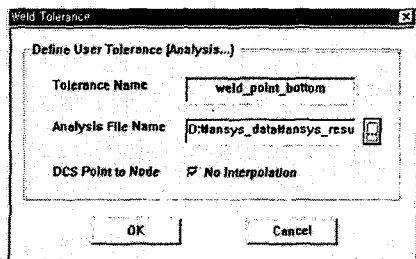


Fig. 9 Graphic user interface to define user tolerances of weld distortions

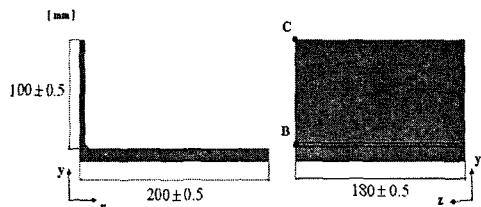


Fig. 10 Size tolerance and measure point

앞에서 살펴 본 용접변형의 대체적인 양상, 즉 아래 방향으로 처지면서 뒤틀리는 변형에 따른 것이다. 표준편차를 살펴보면 C 점에서 y 방향으로의 표준편차는 Case 1, 즉 치수공차에 따른 표준편차와 대등한 정도로 크지만 z 방향으로는 Case 1 의 약 1/3 정도인 것으로 나타났다. 한편, B 점에서 용접변형에 의한 표준편차는 y 방향으로는 적지 않은 값을 갖지만, z 방향으로는 거의 없는 것으로 나타났다.

마지막으로, 치수공차 및 용접변형을 모두 고려한 Case 3 의 경우를 살펴보면, 우선 평균값은 Case 2 의 경우와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 이는 치수공차에 의한 평균값(Case 1)이 거의 무시할 수 있을 정도로 작기 때문이다. 한편, Case 3 의 표준편차 값은 Case 2 와 Case 3 의 RSS(root sum square)값에 근사한 것을 알 수 있다. 이는 물론 치수공차와 용접변형 공차가 확률적으로 서로 독립적이기 때문이다.

공차해석을 통해 얻고자 하는 중요한 정보는 하나의 조립 오차의 편차를 줄이기 위해 어떤 부품의 어떤 공차를 줄이는 것이 가장 효과적인 가이다. 이를 위한 해석을 흔히 민감도해석이라 하는데, 이는 부품의 공차들이 상대적으로 하나의 조립 편차에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 나타내는 것이다. Fig. 11 및 12 는 한 예로서 C 점에서의 y 방향 및 z 방향 조립 편차에 대한 민감도 해석 결과(Case 3)를 보여주고 있다. Fig. 11 에서 볼 수 있듯이, y 방향 조립 편차의 59%는 C 점에서의 y 방향 용접변형(W_y^C)에 의해, 22.8%는 B 점에서의 y 방향 용접변형(W_y^B)에 의해 설명되며, 나머지 18%만 보강판의 y 방향 치수공차(S_y^S)에 의해 설명된다. 즉, C 점에서 y 방향 조립 편차는 약 82%가 용접변형의 편차에 의한 것이라 볼 수 있고, 따라서 이 조립 편차를 줄이려면 용접변형에 의한 편차가 적어지게 공정관리를 잘 하는 것이 부품의 치수공차를 줄이는 것보다 효과적임을 알 수 있다.

마찬가지로, Fig. 12 를 보면, C 점에서의 z 방향 조립 편차는 그 46.5%가 보강판의 z 방향 치수공차(S_z^S)에 의해, 19.1%가 C 점의 z 방향 용접변형(W_z^C)에 의해, 18%가 B 점의 z 방향 용접변형(W_z^B)에 의해, 나머지 16.4%가 A 점의 z 방향 용접변형(W_z^A)에 의해 설명됨을 알 수 있다. 따라서, 이 조립 편차를 줄이고자 한다면, 용접공정 관리보다는 치수공차를 줄여 치수관리를 보다 엄격히 하는 것이 효과적이라고 볼 수 있다.

물론, 이 논문에서 다룬 문제는 본 연구에서 제

안하는 기법의 적용 방법을 설명하기 위해 고려해 본 것으로서, 해석 결과는 임의로 세운 가정에 따른 것일 뿐 일반적인 타당성을 갖지는 않음에 유의해야 한다.

Table 1 Mean and standard deviation values of assembly variations at two measurement points [mm]

		Point B	
		Y	Z
Case 1	Mean	0	0.004
	STD	0	0.165
Case 2	Mean	-0.721	0.0140
	STD	0.0465	0.00279
Case 3	Mean	-0.721	0.0142
	STD	0.0454	0.160
		Point C	
		Y	Z
Case 1	Mean	-0.0038	0.0039
	STD	0.170	0.169
Case 2	Mean	-1.65	0.591
	STD	0.142	0.0531
Case 3	Mean	-1.65	0.6
	STD	0.224	0.177

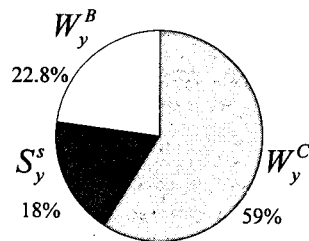


Fig. 11 Sensitivities of y-variation at point C to tolerances

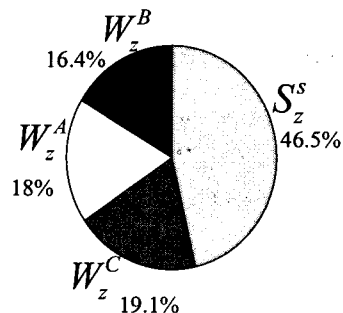


Fig. 12 Sensitivities of z-variation at point C to tolerances

6. 결 론

후 기

본 논문에서는 용접변형을 고려하면서 공차해석을 수행할 수 있는 효율적인 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 용접변수의 여러 조합에 대한 용접변형 값을 유한요소해석으로 구해 데이터베이스를 구축하는 단계와, 이를 사용하여 공차해석을 수행하는 단계로 나뉜다. 즉, 공차해석을 위한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하면서 미리 구축해 둔 데이터베이스로부터 용접변형 값을 불러다 쓸 수 있게 됨으로써 신속하게 공차해석을 수행할 수 있는 방법이다. 본 논문에서 살펴 본 간단한 필렛용접의 예에서는 부품의 치수오차가 용접변형에 의한 오차에 비해 무시할 정도로 작음을 알 수 있었다.

본 논문에서 소개한 방법의 가장 큰 한계는 용접변형 데이터베이스를 구축하기 위해 많은 컴퓨터 작업과 긴 해석 시간이 요구된다는 점이다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 용접변형을 등가의 모델트로 치환하는 방법, 또는 해석적 모델(analytical model)을 이용하는 방법 등이 개발되어야 할 것이다. 또한, 향후 부품의 변형도 고려할 수 있는 공차 해석 모델을 개발함으로써 조립품의 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-042-D00023)

참고문헌

- (1) Chase, K.W. and Parkinson, 1991, "A Survey of Research in the Application of Tolerance Analysis to the Design of Mechanical Assemblies," *Research in Engineering Design*, No. 3, pp. 23~27.
- (2) Juster, N.P., 1992, "Modelling and Representation of Dimensions and Tolerances: A Survey," *Computer Aided Design*, Vol. 24, No. 1, pp. 3~17.
- (3) Hu, S. J. and Wu, S. M., 1992, "Identifying Sources of Variation in Automobile Body Assembly Using Principal Component Analysis," *Trans. of NAMRI*, Vol. 20, pp. 311~316.
- (4) Hsieh, C.C. and Oh, K.P., 1997, "A Framework for Modelling Variation in Vehicle Assembly Processes," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 18, No. 5, pp. 466~473.
- (5) Liu, S.C. and Hu, S.J., 1997, "Variation Simulation for Deformable Sheet Metal Assemblies Using Finite Element Methods," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.119, pp. 368~374.
- (6) Dimensional Control System, 2003, *3DCS Analyst User's Manual*.