

변형 조립체 공차해석 기법을 이용한 판재 용접용 치구 및 용접 점의 위치결정

이동열*, 소현철**, 임현준***, 지해성****

Determination of Fixture Locations and Welding Points Using Tolerance Analysis of Compliant Assembly

Dongyul Lee*, Hyunchul So**, Hyunjune Yim*** and Haeseong Jee****

ABSTRACT

All manufactured parts and tooling have unavoidable variations from their nominal shapes. During assembly, compliant parts are further deformed by relatively rigid assembly tooling. Lack of Knowledge regarding variations and deformations often results in expensive problems. Most current computer-aided design systems are based on ideally sized, ideally located and rigid geometry. This paper proposes a model for the assembly of compliant, non-ideal part. We start by defining tolerance analysis as the process of simulation the variation of a product or a subassembly when given the tolerance of required parts. Analysis is then done by finite element analysis and using the material properties of the actual parts to be assembled. Using the result, estimate the weld process.

Key words : Compliant Assembly, Tolerance Analysis, Welding Fixtures

1. 서 론

조립 제품은 하나의 부품만으로 완제품의 기능을 완벽히 구현하지 못하고 여러 부품들의 조합을 통하여 특정 메커니즘을 구현하므로 구성부품의 조립공차가 매우 중요하다. 그러므로 부품제작과정에서 공차의 범위를 적절하게 제어하지 못하면 최종 조립단계에서 문제가 발생할 뿐만 아니라 완제품의 품질에도 영향을 준다^[1,2]. 공차의 범위를 합리적으로 정하기 위해서는 제품을 구성하고 있는 부품의 치수오차가 최종제품에 미치는 영향을 정량적으로 분석해야 한다. 부품의 치수오차(dimensional variation)를 분석하는 것은 조립 후의 생길 수 있는 문제를 최소화하고, 제품 설계와 생산 공정의 강건성(robustness)을 증가시킬 수 있다. 이는 최종 조립품에 대한 요구조건을 만족시

키는 동시에 단품의 공차를 최대화하여 생산비 절감을 가져오기 때문에 중요한데 특히 2만여 개의 부품으로 구성되어 있는 자동차 차체의 경우에는 수백 개의 얇은 판재가 점용접(spot welding)공정을 거쳐 조립되므로 이들 부품의 작은 오차라도 누적되면 차체에 큰 오차를 발생시킬 수도 있으므로 치수오차의 분석이 필수적이다. 완성차체의 치수 품질은 부품의 치수오차(dimensional variation) 뿐만 아니라 조립공정 중 발생하는 변수, 즉 조립 공정에서의 공정 오차(manufacturing variation)로 인해서도 부품의 변형이 발생할 수 있는데^[3] 이에 따라 최근 각 부품의 정밀도 및 조립공정에서 발생하는 오차를 제어하는 공차해석(tolerance analysis)과 조립오차해석(assembly variation analysis) 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

공차해석에 사용되는 방법으로는 최악조건해석(Worst Case Analysis), RSS(Root Sum Squares), 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 대표적인 방법으로 꼽을 수 있으며^[4], 이를 위한 소프트웨어 툴로서 Dassault Systemes의 TAA 모듈, EDS의 visVSA, DCS의 3DCS 등이 있다. 이들 상용 패키지들은 해석 대상인 부품들을 모두 강체(rigid

*쌍용자동차 CAE팀

**홍익대학교 대학원 기계공학과

***중신회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

****교신저자, 중신회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

- 논문투고일: 2007. 04. 18

- 심사완료일: 2007. 07. 04

body)로 가정하고 오직 기하학적 관계에만 근거하여 결과를 얻어낸다. 그런데 자동차 차체는 조립과정에서 많은 부품들이 용접 건이나 클램프의 하중으로 인해 변형이 발생할 수 있는 변형체이기 때문에 실제 최종 조립품의 오차 결과는 강제이론에 근거하여 개발된 공차해석 소프트웨어를 이용하여 얻은 오차 해석 결과와는 상이하게 얻어진다.

그러므로 부품을 강체가 아닌 변형체로 가정하는 공차해석법이 필요한데 Hu 등은^[5] 이미 오래전에 실제 부품의 물성치를 반영한 유한요소해석을 이용하여 최종 조립품의 오차를 예상하는 공차해석 기법을 제안하였다. Hu의 방법에서는 부품의 오차원(誤差源, Sources of Variation)이 최종 조립품의 오차에 얼마나 영향을 주는지가 민감도 행렬(sensitivity Matrix)의 형태로 구해지며 이때 민감도는 부품의 치수오차와 치구(Fixture)의 오차로 표현될 수 있다.

본 논문에서는 이와 같은 연구사례의 결과에 기반을 두고 다음과 같이 좀더 응용된 연구방법을 시도하고자 한다.

첫째, 치구의 위치가 공칭위치(normal position)로부터 벗어난 경우 그 오차에 의한 조립파트로의 영향을 최소화하기 위해 다수의 치구를 가정한 후에 비선형 계획법(nonlinear programming algorithm)을 이용, 치구의 최적위치를 계산하는 방법을 시도하고자 한다.

둘째, 공차영향계수법(Method of Tolerance Influence Coefficients)을^[6] 이용하여 변형체 모델에 대한 민감도를 구하고 이를 용접 조립 공정 시 부품들간의 영향을 파악하여 효과적인 용접점의 위치와 개수를 설계하는 방법을 시도하고자 한다.

또한 열거된 기법들의 적용사례들을 간략하게 논문에서 제시하고 이를 논의하고자 한다.

2. 공차해석의 접근방법

2.1 공차영향 계수법

본 절에서는 공차영향계수법에 대하여 간략히 소개를 하고자 한다. Fig. 1은 조립 전 부품오차(part variation)가 주어지면 조립 후의 조립품의 오차(assembly variation)를 계산하는 과정을 서술하기 위하여 변형체로 가정한 박판용접 조립 과정을 이상화하여^[7,8] 도식한 것이다. 그림을 좀더 상세히 설명하면 Fig. 1(a)는 조립 치구에 부품을 올려 놓는 부품 이송(Place) 단계이며, 각 부품은 일정 오차(V_p)을 갖는다. Fig. 1(b)는 이송된 부품을 고정하는 클램프(Clamp) 단계인데 이때 부품은 용접 건 혹은 클램프의 힘 F_U

에 의해 고정(Fasten)된다. 그 후 고정된 부품에 대하여 Fig. 1(c)와 같이 용접이 행해지고, 용접이 완료된 후에는 Fig. 1(d)와 같이 용접결과물인 조립품을 치구에서 이탈(Release)시키게 된다. 이 때 초기 부품 오차를 가지고 있던 제품은 스프링 백(spring back) 되는데 이러한 과정에서 용접 전 부품오차와 용접 후 조립품의 오차 사이의 선형관계를 규정하는 방법이 공차영향계수법(Method of Influence Coefficients)이다.

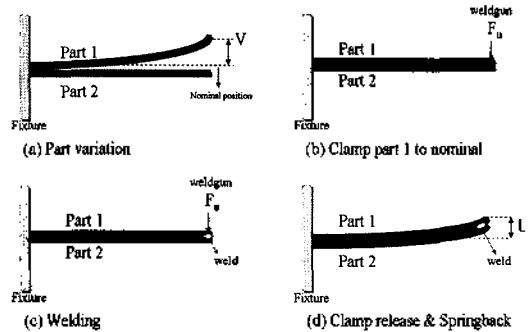


Fig. 1. Simple 2-D compliant part under weld process.

이 방법에서 공차영향계수(Sensitivity)를 구하는 단계는 다음과 같다.

Step 1: 처음 단계의 V 는 Part 1과 Part 2가 작업대에 고정될 때의 부품의 오차이다. Fig. 1(a)은 Part 1에서만 오차가 존재한다고 가정하였고 V_p 라고 정의하였다. 만일 여러 개의 초기 오차가 존재한다면 부품 오차는 벡터 $\{V_p\}$ 로 표현될 수 있다.

Step 2: Fig. 1(b)는 용접건으로 힘을 작용시켜 부품을 용접건의 공칭 위치(Nominal Position)에 이르게 하는 과정이다. 이때 작용시키는 힘이 여러 작용점에 위치한다면 벡터 $\{F_U\}$ 로 표현된다. 이 단계는 선형 탄성 범위에 있으므로 Hook's law를 적용시킬 수 있고 그 식은 다음과 같다.

$$\{F_U\} = [K_U]\{V_p\} \tag{1}$$

여기서, $[K_U]$ 는 유한요소해석에서 구해지는 용접건의 강성 행렬(Stiffness Matrix)이며 $\{V_p\}$ 는 각 측정점에서 부품 오차(Part Variation)이다.

Step 3: Fig. 1(c)는 Part 1과 Part 2가 공칭 위치에서 고정된 채 용접건에 힘이 가해져서 용접이 이루어지는 단계이다. 용접 후에는 이 두 Part가 같은 거동을 보이게 된다.

Step 4: Fig. 1(d)는 클램프가 풀리고 난 후 용접이 완료되어 서로 결합된 Part 1과 Part 2가 스프링백 현

상을 보이는 단계이다. 이 때의 스프링백의 변위에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\{F_w\} = [K_w]\{V_a\} \quad (2)$$

또는

$$\{V_a\} = [K_w]^{-1}\{F_w\} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 $\{F_w\}$ 는 용접 후, 스프링 백을 일으키는 힘 벡터로 용접전의 $\{F_U\}$ 와 반대방향이면서 크기는 동일하다. $\{V_a\}$ 는 용접 후 측정점을 기준으로 스프링 백이 발생한 변위이다. $\{F_U\}$ 는 Step 2에서 이미 계산되었는데 $\{F_U\}$ 와 $\{F_w\}$ 를 하나의 식으로

$$\{F_U\} = \{F_w\} \quad (4)$$

즉,

$$[K_U]\{V_p\} = [K_w]\{V_a\} \quad (5)$$

로 표현할 수 있다.

식 (5)를 용접이 완료된 후의 측정점의 변위 $\{V_a\}$ 에 대한 식으로 다시 기술하면 다음과 같다.

$$\{V_a\} = [K_w]^{-1}[K_U]\{V_p\} \quad (6)$$

이 때 식 (6)에서 $[K_w]^{-1}[K_U]$ 는 용접 전 측정점의 오차 $\{V_p\}$ 가 용접 후 측정점의 오차 $\{V_a\}$ 에 영향을 미치는 정도인데 이를 민감도(Sensitivity, S)라고 정의한다.

$$[K_w]^{-1}[K_U] = [S] \quad (7)$$

지금까지 서술된 공차영향계수법을 응용하여 본 논문에서는 치구오차로 발생하는 조립품의 오차를 계산하여 치구의 최적위치를 결정하는 방법과 용접 조립 공정 시 부품들간의 영향을 파악하여 효과적인 용접점의 위치와 개수를 설계하는 방법을 제시하고자 한다.

2.2 치구오차에 의한 조립품의 오차계산과 치구위치결정

전술한 공차영향계수법에 의거하여 식 (7)에 의해

민감도 행렬이 계산되면 식 (6)을 이용하여 조립품의 치수오차를 부품 오차로부터 바로 구할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 다루는 치구의 위치 오차는 식 (6)의 우변에 나타나 있는 부품오차와는 개념적으로 다르기 때문에 공차영향계수법을 이용하려면 별도의 가정이 요구된다. 우선 치구의 위치 오차로 인해 발생하는 현상은 유한요소법으로 모델링할 수도 있지만, 본 논문에서는 치구 위치오차가 조립과정 중 제3단계에서 부품의 변형을 유발시켜 마치 부품 오차와 같은 영향을 준다는 점에 착안하여 치구 오차를 부품오차의 하나로 가정하였다. 이와 같은 가정하에 식 (6)을 이용하여 치구의 위치 오차에 의한 조립품의 오차를 계산할 수 있고 이처럼 민감도법을 바탕으로 치구의 위치오차를 오차원으로 가정하여 평판예제의 문제를 고찰하고자 하는 것이 본 논문의 중심주제이다.

2.2.1 치구위치이론

자동차 차체 조립과정의 첫번째 단계는 판재 형 재료를 용접하여 Body-In-White(BIW)를 만드는 데에서 시작된다. 이 용접과정에서 각각의 판재를 고정하기 위하여 치구가 판재에 힘을 가하게 되고 이 힘으로 인해 두 판재, 즉 부품에 변형이 발생되면 그로 인해 최종 조립품의 치수 오차를 야기한다. 따라서, 적절한 치구의 위치 설계는 이러한 변형을 줄일 수 있고, 최종 조립품의 치수 오차도 감소시킬 수 있다⁹⁾. 조립품의 오차는 치구의 오차로 인해 발생되기도 하는데 ‘3-2-1’ 치구 위치 이론은 부품을 고정할 때 발생하는 치구의 오차를 최소화하기 위해 개발되었고 많은 산업 현장에서 널리 쓰이고 있다. ‘3-2-1’ 치구 위치 이론은 첫 번째 데이텀(Primary datum), 두 번째 데이텀(Secondary datum), 세 번째 데이텀(Tertiary datum)이라 부르는 Datum Reference Frame을 규정하는 세 면과 관련이 있다. 첫 번째 데이텀은 세 개의 치구가 위치하는 면인데 통상적으로 Datum A라 칭하며, 두 번째 데이텀은 두 개의 치구가 위치하므로 Datum B라 부른다. 마지막으로 세 번째 데이텀은 하나의 치구가 위치하고 Datum C라 부른다. 이 세 개의 데이텀은 각각의 데이텀에 대하여 수직이다. 예를 들면 Fig. 2에서는 자동차 차체 루프의 Datum Reference Frame을 규정짓는 여섯 개의 지지 점을 보여주고 있는데 A1, A2와 A3 지지 점은 파트의 위 아래 방향을 구속하고 데이텀 평면 A를 규정한다. B1과 B2 지지 점은 전후의 방향을 구속하며 데이텀 평면 B를 규정한다. C1 지지 점은 좌우의 방향을 구속하며 데이텀 평면 C를 규정한다.

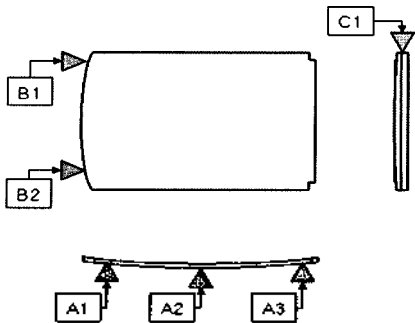


Fig. 2. 3-2-1 locating principle of automobile roof.

2.2.2 N-2-1 치구위치이론

얇은 판재 형 재료는 기존의 '3-2-1' 치구 위치 방식으로 자유도를 구속하기에 부족하다. 이는 두께가 얇은 재료일수록 작은 힘에 쉽게 탄성변형을 일으키기 때문이며 이에 따라 조립 공정에서 판재형 재료에 가해지는 힘에 의한 변형을 방지하기 위해서는 첫 번째 데이텀에 3개 이상, 즉 N개의 치구가 필요하게 된다¹⁰⁾. 여기서 N은 판재 형 재료의 치수 사항에 따라 결정되며 필요 이상의 치구는 판재 형 재료의 굽힘과 좌굴을 발생시키기 때문에 두 번째와 세 번째 데이텀의 치구는 각각 2개와 1개로 '3-2-1' 치구 위치 이론'에서와 같이 정해진다. 이 이론을 'N-2-1' 치구 위치 이론이라고 한다. Fig. 3은 '6-2-1' 치구 위치 설계 사례를 예를 들어 도시하고 있다.

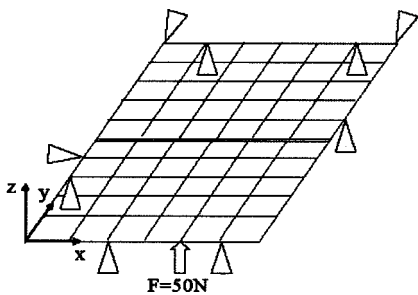


Fig. 3. An example of 6-2-1 locating principle.

2.2.3 비선형 계획 알고리즘

위와 같은 'N-2-1 치구 위치 이론'을 바탕으로 N개의 치구가 첫 번째 데이텀에 위치할 때, 각 치구의 위치는 재료의 공차에 매우 중요한 요소가 된다. 따라서, 최적 치구 설계는 재료의 처짐을 최대한 줄여주는 위치를 선정하는 것에 의의가 있다고 할 수 있다. 여기서 재료의 처짐을 계산하기 위해 유한 요소 해석(Finite Element Analysis)을 사용하게 되고 치구의 최적 위치를 산출하기 위해 비선형계획법(Nonlinear

Programming Algorithm)을 이용한다. 이에 대한 순서도는 Fig. 4와 같다.

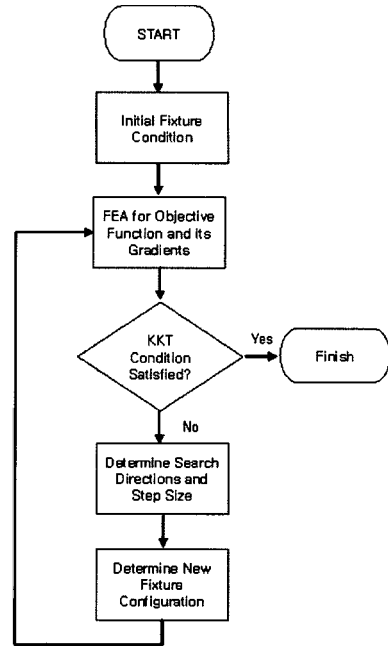


Fig. 4. Flowchart of nonlinear programming algorithm.

2.3 오차시뮬레이션에 의한 점용접 변형체 용접 공정 설계

부품변형의 민감도를 이용한 해석법은 공차해석뿐 아니라 용접 조립 공정 시 부품들간의 영향을 파악하여 효과적인 용접점의 위치와 개수를 설계하는데 이용될 수 있으며 본 절에서는 그 적용과정을 기술한다.

2.3.1 공차영향계수와 CAVA(Compliant Assembly Variation Analysis)

용접점이 N개가 존재할 경우 각 측정점에 해당하는 초기 오차는 $(V_1, V_2, V_3, \dots, V_{2N})$ 가 존재하게 된다. 두 개의 부품을 용접하게 되면 각각의 측정점이 쌍으로 존재하기 때문이다. 이에 따른 공차행렬 [S]은 FEA 소프트웨어(NASTRAN)를 이용하여 다음과 같은 단계를 거쳐 얻을 수 있다.

Step 1: 용접 전 n번째 측정점에 초기 오차 방향(한 점에 대해 세 방향(x, y, z))으로 단위 힘 \vec{F}_U (Unit Force, 1)을 부여하여 $(i=1, 2, 3, \dots, N)$ 용접전의 변위를 FEM 해석을 수행한다. 이 때 각 측정점 2N개의 초기오차들의 변위를 다음과 같은 한 점에 대한 행렬식 (8)로 나타낼 수 있는데 여기서 $\{\vec{V}_i\}$ 는 세 방향(x, y, z)에 각각 단위 힘 (\vec{F}_U) 을 주었을 때의 변위

벡터이고 이는 행렬 [C]의 각각 세 개의 좌표계 방향의 성분으로 위치하게 된다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{V}_{P1x} \\ \bar{V}_{P1y} \\ \bar{V}_{P1z} \\ \bar{V}_{P2x} \\ \bar{V}_{P2y} \\ \bar{V}_{P2z} \\ \vdots \\ \bar{V}_{P(2i-1)x} \\ \bar{V}_{P(2i-1)y} \\ \bar{V}_{P(2i-1)z} \\ \bar{V}_{P(2i)x} \\ \bar{V}_{P(2i)y} \\ \bar{V}_{P(2i)z} \\ \vdots \\ \bar{V}_{P(2N-1)x} \\ \bar{V}_{P(2N-1)y} \\ \bar{V}_{P(2N-1)z} \\ \bar{V}_{P(2N)x} \\ \bar{V}_{P(2N)y} \\ \bar{V}_{P(2N)z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1x}^{(2i-1)x} & C_{1y}^{(2i-1)y} & C_{1z}^{(2i-1)z} \\ C_{1y}^{(2i-1)x} & C_{1y}^{(2i-1)y} & C_{1y}^{(2i-1)z} \\ C_{1z}^{(2i-1)x} & C_{1z}^{(2i-1)y} & C_{1z}^{(2i-1)z} \\ C_{2x}^{(2i-1)x} & C_{2x}^{(2i-1)y} & C_{2x}^{(2i-1)z} \\ C_{2y}^{(2i-1)x} & C_{2y}^{(2i-1)y} & C_{2y}^{(2i-1)z} \\ C_{2z}^{(2i-1)x} & C_{2z}^{(2i-1)y} & C_{2z}^{(2i-1)z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{(2i-1)x}^{(2i-1)x} & C_{(2i-1)y}^{(2i-1)y} & C_{(2i-1)z}^{(2i-1)z} \\ C_{(2i-1)x}^{(2i-1)x} & C_{(2i-1)y}^{(2i-1)y} & C_{(2i-1)z}^{(2i-1)z} \\ C_{(2i-1)x}^{(2i-1)x} & C_{(2i-1)y}^{(2i-1)y} & C_{(2i-1)z}^{(2i-1)z} \\ C_{(2i)x}^{(2i-1)x} & C_{(2i)x}^{(2i-1)y} & C_{(2i)x}^{(2i-1)z} \\ C_{(2i)y}^{(2i-1)x} & C_{(2i)y}^{(2i-1)y} & C_{(2i)y}^{(2i-1)z} \\ C_{(2i)z}^{(2i-1)x} & C_{(2i)z}^{(2i-1)y} & C_{(2i)z}^{(2i-1)z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{(2N-1)x}^{(2i-1)x} & C_{(2N-1)y}^{(2i-1)y} & C_{(2N-1)z}^{(2i-1)z} \\ C_{(2N-1)x}^{(2i-1)x} & C_{(2N-1)y}^{(2i-1)y} & C_{(2N-1)z}^{(2i-1)z} \\ C_{(2N-1)x}^{(2i-1)x} & C_{(2N-1)y}^{(2i-1)y} & C_{(2N-1)z}^{(2i-1)z} \\ C_{(2N)x}^{(2i-1)x} & C_{(2N)x}^{(2i-1)y} & C_{(2N)x}^{(2i-1)z} \\ C_{(2N)y}^{(2i-1)x} & C_{(2N)y}^{(2i-1)y} & C_{(2N)y}^{(2i-1)z} \\ C_{(2N)z}^{(2i-1)x} & C_{(2N)z}^{(2i-1)y} & C_{(2N)z}^{(2i-1)z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{F}_{U(2i-1)x} \\ \bar{F}_{U(2i-1)y} \\ \bar{F}_{U(2i-1)z} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Step 2: 모델은 선형 탄성범위에 있다고 가정하였으므로, 해당 오차원(Source of Variation)은 초기부품오차(Part Variation)와 동일한 것으로 간주되며 측정점 2N개에 대해 이를 조합하면 각 용접점에 해당하는 측정점의 변위를 구할 수 있다. 이때 행렬 [C]의 용접점 수와 측정점 수의 선형조합을 공차영향계수(Tolerance Influence Coefficients) 행렬이라고 정의한다. 한편 행렬 [C]의 임의의 성분 C_{px}^{qy} 은 용접점 P에 x 방향으로 단위 힘을 가할 때 측정점 q에 y 방향으로의 변위를 나타낸다.

Step 3: 식 (8)의 공차영향계수 행렬 [C]를 역행하면 식 (9)와 같으며

$$\{\bar{F}_U\} = [C]^{-1} \{\bar{V}_P\} \quad (9)$$

식 (9)를 일반적인 부품오차 $\{V_P\}$ 에 대해 정리하면 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\{F_U\} = [K]\{V_P\} \quad (10)$$

[K]는 용접점의 강성행렬(Stiffness Matrix)을 의미하며 {F_U}는 오차 {V_P}가 있을 때 Part를 공칭 위치

(Nominal Position)에 고정시키는 힘을 의미한다.

Step 4: 용접 후 클램프 역할을 하는 용접건을 제거하면 용접된 조립품에 스프링백이 발생하는데 식 (10)에서 {V_P}에 단위 공차(Unit Variation, 1)가 존재한다면 각 용접점은 바로 측정점과 같으므로 측정점에 부여되는 힘 벡터 {F_U}를 직접 구할 수 있다. 한편 벡터 {F_U}가 작용할 때 이를 [K_a]⁻¹와 곱해주게 되면 스프링백으로 발생하는 부품의 변위를 구할 수 있다. 이를 다시 단위변위를 갖는 부품오차 {V_P}와 그것에 상당하는 조립오차 {V_a}의 관계로 정리하면 다음과 같다.

$$\{V_a\} = [S]\{V_P\} \quad (11)$$

이와 같은 일련의 FEA 해석과 매트릭스 계산은 프로그래밍 작업을 통하여 개발한 CAVA(Compliant Assembly Variation Analysis)를 이용하여 수행하게 되며, 이에 따라 민감도행렬 [S] (Sensitivity Matrix)를 최종적으로 얻게 된다. 용접 후 각 변위에 대한 용접점들의 민감도는 다음 식 (12)와 같으며 각 점들의 민감도 총합을 통하여 용접점의 순위를 정한다.

$$V_a = S_1 V_{1p} + S_2 V_{2p} + S_3 V_{3p} \dots \quad (12)$$

2.3.2 용접 강성 해석 및 평가

앞서 공차영향계수법을 통해 용접되는 조립체의 민감도 행렬 [S]를 얻을 수 있었다. 여기서 민감도 행렬 [S]의 물리적 의미는 현재 작업장에서의 용접점이 다음 작업장(Station)에서의 조립위치인 측정점에 영향을 미치는 정도를 의미하는데 민감도가 낮은 점들은 용접 조립에 있어서 고려해야 할 필요성이 낮다고 볼 수 있다. 그러므로 이런 조립점들은 조립대상 측정점에서 제외하거나 그 위치를 수정하여도 부품의 조립강성에 심각한 영향을 미치지 않으며 비록 조립 강성은 낮더라도 민감도가 큰 조립점을 찾아내면 용접 조립의 수를 감소시킴으로써 조립공정을 효율적으로 설계할 수 있다. 이와 같은 과정을 검증하기 위해 본 논문에서는 조립점을 수정한 모델을 대상으로 단위 힘을 가하여 조립 부품의 처짐량을 계산하는 방식으로 조립 강성을 계산하고 이를 분석하였다.

2.3.3 변형체 공차해석 방법

공차해석은 대부분 변형체 조립을 다루며 이들은 점용접으로 조립된다는 점을 고려할 때 공차영향계수법을 통하여 구해진 민감도는 조립 부품의 기하학적

구조와 동역학적 관계에 따른 영향뿐만 아니라, 부품의 조립방식, 재료의 특성 등 다양한 요소에 영향을 받는다. 전술한 바와 같이 본 논문에서는 민감도를 부품의 조립 전 오차원(Sources of Variation)의 오차가 용접 후 측정점의 오차에 미치는 정도라고 정의하였으며 이때 초기 오차는 부품 자체의 오차(Part Variation)만을 고려한 것으로 가정하였다. 본 절에서의 변형체의 조립 오차 시뮬레이션의 순서도는 Fig. 5에 도시하였으며 다음과 같은 가정하에 수행되었다.

첫째, 변형체는 큰 하중을 받는 것이 아니므로 선형 탄성범위에 있다.

둘째, 재료는 등방성(Isotropic)이다.

셋째, 지그와 용접건은 강체(Rigid body)이다-용접 대상이 되는 얇은 판(Sheet Panel-Compliance part)은 지그(Jig)와 용접건(Weld Gun)에 비해 상당히 변형이 크기 때문이다.

넷째, 재료의 강성은 변형 전후에 일정하게 유지되고, 마지막으로 열변형은 없다-점용접에 의한 재료의 변형은 매우 작기 때문이다.

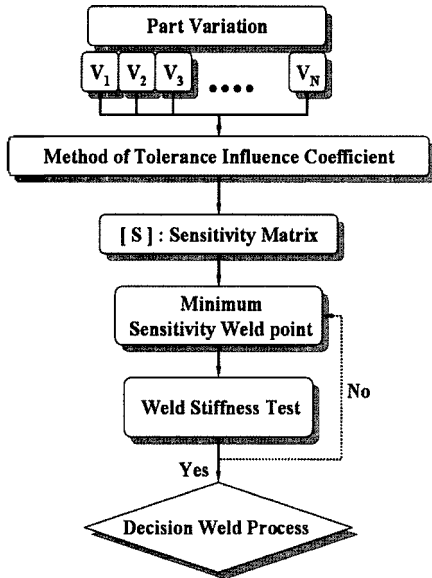


Fig. 5. Flowchart of tolerance analysis.

3. 공차해석기법의 적용결과

3.1 치구의 위치 결정

3.1.1 유한요소해석(FEA) 모델

본 절에서는 유한요소해석(FEA)을 수행하기 위해서 얇은 평판을 가정하여 사용하였다. 각 평판의 크

기는 모두 100 mm×100 mm×1 mm이다. 평판의 물성치는 탄성 계수 $E = 2.07 \times 10^5$ MPa, 포아송 비 $\nu = 0.3$ 이며 각 노드점의 간격은 10 mm가 되도록 QUAD4 요소로 구성하였다(Fig. 6). 평판은 변형체이므로 'N-2-1' 치구 위치 이론에 따라 $N = 4$ 로 정하였고 이에 따라 Part 1은 고정된 치구가 3개이며, Part 2는 4개의 치구 모두가 고정된 것으로 가정하였다. 이때 Part 1에서의 나머지 1개의 치구가 z 방향으로의 자유도를 구속받게 될 때 이 치구의 최적 위치를 계산하고자 한다.

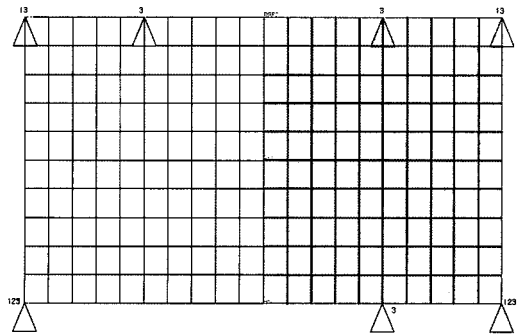


Fig. 6. Finite element model and boundary conditions.

3.1.2 목적함수와 제약조건

본 논문에서 사용된 알고리즘은 순차이차계획법(Sequential Quadratic Programming)이며, 치구의 최적 위치를 산출하기 위한 기본 형태는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize } F(z) &= \sum_{i=1}^n w_i (x_1, x_2)^2 \\
 \text{Subject to } &0 \leq x_1 \leq 100 \\
 &0 \leq x_2 \leq 100
 \end{aligned} \tag{13}$$

x_1, x_2 는 치구의 위치 좌표(x, y)이며, $F(x)$ 는 최적 치구 위치를 판단하는 목적함수이다. n 은 유한 요소의 노드 번호를, w_i 는 i 번째 node에서의 수직방향의 처짐을 의미한다. 본 논문에서 $F(x)$ 는 변수 x_1, x_2 에 관한 비선형 함수이며, 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$F(x) = \sum_{i=1}^m (\text{deflections at node } i)^2 \tag{14}$$

위의 목적함수 값은 각 node의 평판에 대한 수직 방향으로의 처짐을 제공한 값의 합이다.

목적함수 값을 구하기 위한 유한요소 해석 소프트웨어로는 MSC.NASTRAN을 사용하였고,

MATLAB의 FMINCON 함수의 목적함수 값을 구하기 위해서는 2.3.1절에서 전술한 바와 같이 CAVA_MFC v2.0(Fig. 7)을 개발하여 사용하였다. 이 해석 소프트웨어는 임의의 초기 치구 위치에서의 목적함수 값과 x_1, x_2 방향으로의 기울기를 계산한 뒤 KKT 필요조건(Karush-Kuhn-Tucker Necessary Condition)을 만족하는지의 여부를 확인한다. 이 때, KKT 조건을 만족하지 않으면 FMINCON 함수는 최적의 방향과 스텝 사이즈(Step Size)를 결정하여 다음 치구 위치 좌표를 산출하게 된다^[11]. 여기서 KKT 조건이란 비선형계획법 문제를 해결할 때, 원최적해가 존재하면 상대최적해의 존재를 보장한다는 것을 의미한다^[12].

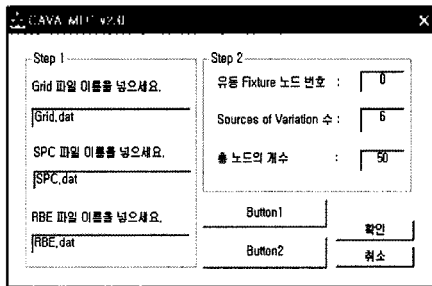


Fig. 7. Interface of CAVA_MFC v2.0.

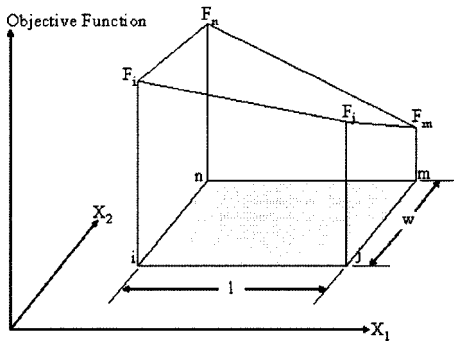


Fig. 8. Interpolation of objective function values.

KKT 조건을 만족하나 FMINCON에서 산출된 치구의 좌표가 FEM 모델 노드의 좌표와 일치하지 않는 경우가 있다. 이 경우에는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 주변의 4개의 node에서의 목적함수 값 F_i, F_j, F_k, F_l 을 구한 뒤 다음 식을 이용하여 목적함수의 근사값을 구하게 된다.

$$S_i = \left(1 - \frac{x_1}{l}\right) \cdot \left(1 - \frac{x_2}{w}\right)$$

$$S_j = \frac{x_1}{l} \cdot \left(1 - \frac{x_2}{w}\right)$$

$$S_m = \left(\frac{x_1 \cdot x_2}{l \cdot w}\right)$$

$$S_n = \frac{x_2}{w} \cdot \left(1 - \frac{x_1}{l}\right)$$

$$F_e = S_i \cdot F_i + S_j \cdot F_j + S_m \cdot F_m + S_n \cdot F_n \quad (15)$$

3.1.3 수행 과정

본 평판 예제에서는 총 5회의 서로 다른 초기 위치를 가정하여 시뮬레이션하였다. 이에 대한 초기 치구 위치의 좌표와 목적 함수의 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Initial position and objective function value

Model	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Initial Flxture Position	(40.0)	(50.0)	(40.20)	(30.50)	(80.50)
Initial Objective Position	11.6733	11.5508	11.6612	11.9923	11.9738

3.1.4 수행 결과

5회의 시뮬레이션에 대한 최적 치구 위치의 좌표와 목적 함수의 값은 Table 2에 나타내었는데 이 결과를 다시 Fig. 9~13에 각각 도시하였다. 해석을 통해 얻어진 결과인 최적 치구의 위치는 예상하였던 바와 같이 Part 1의 오른쪽 하단 부분으로 수렴하고 있으며 이 때 각 점 위에 쓰인 숫자는 최적 위치를 찾기까지 FMINCON 함수가 요구하였던 목적함수 값을 확인할 수 있다.

본 해석을 통하여 얻어진 간단한 평판예제에 대한 치구의 최적위치결정 결과는 예상하였던 직관적인 결과와 잘 일치하고 있으며 추후 좀 더 복잡한 경계형상을 갖는 평판 및 3차원 파트형상에 대해서도 제시된 해석기법을 적용할 계획이다.

Table 2. Optimal position and objective function value

Model	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Optimal Flxture Position	(100.10)	(90.0)	(80.0)	(100.30)	(90.0)
Optimal Objective Value	11.215	11.0641	11.0707	11.6359	11.0641

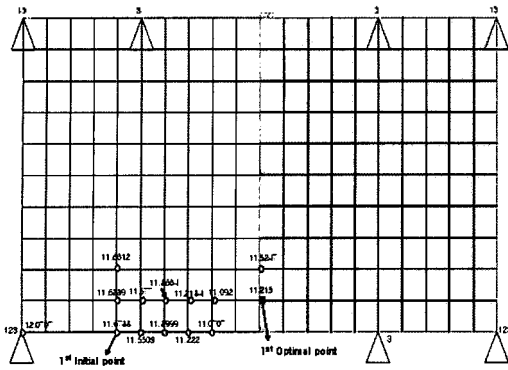


Fig. 9. Fixture location analysis on CASE 1.

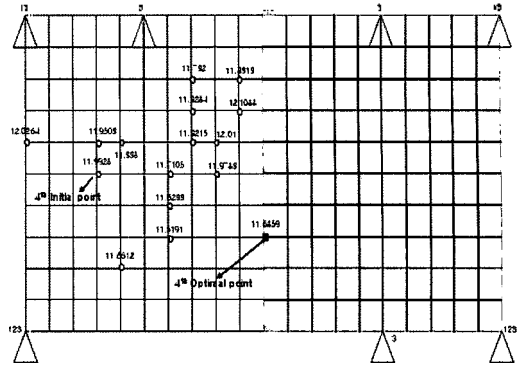


Fig. 12. Fixture location analysis on CASE 4.

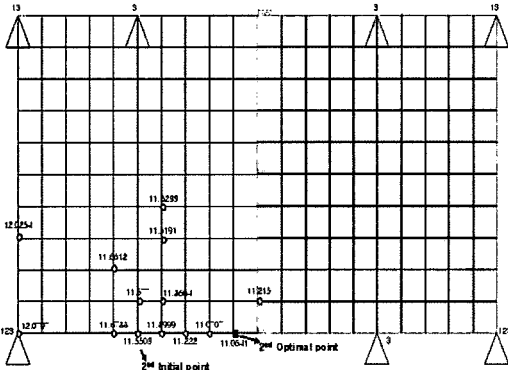


Fig. 10. Fixture location analysis on CASE 2.

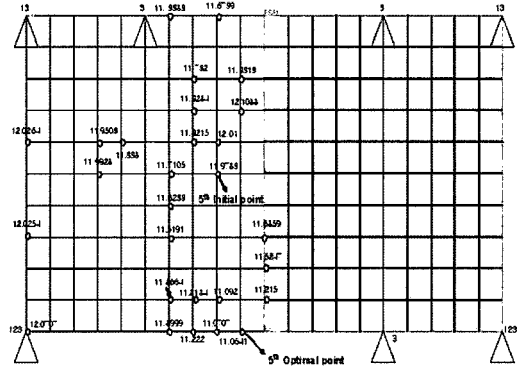


Fig. 13. Fixture location analysis on CASE 5.

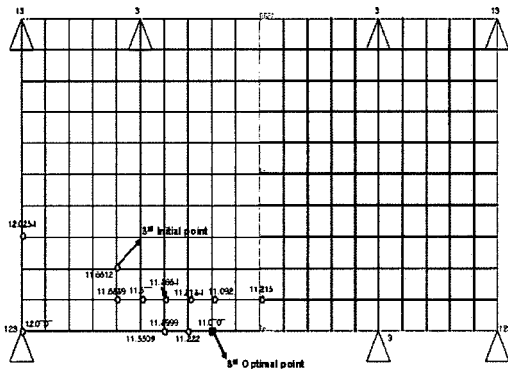
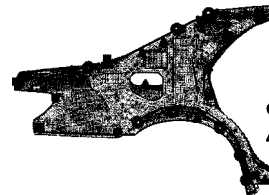


Fig. 11. Fixture location analysis on CASE 3.

3.2 용접위치의 결정

앞에서 설명한 방법을 Fig. 14와 같이 실제 자동차 쿼터패널(Rear Quarter Panel) 조립에 적용하였다. 쿼터패널은 두 부품만으로 점 용접된 후, 다음 작업장으로 이동된다고 가정하였는데 이와 같은 과정은 실제의 조립되는 공정과는 정확하게 일치하지는 않을 수 있으나 용접위치 및 클램핑 위치는 실제 용접되는 방



Rear quarter assembly model

Fig. 14. Rear quarter assembly model.

법을 최대한 같은 조건이 되도록 고려하여 적용하였다. 적용 대상파트에 대해서 Fig. 14에서 도시한 바와 같이 클램핑, 용접점, 클램핑 위치를 설정하여 모델링을 완성하였으며 용접점(Spot weld point)은 13개, 측정점(Measure point)은 9개, 그리고 치구에 의한 고정점은 13개로 가정하였다.

3.2.1 FE Model

본 논문에서의 조립품은 총 18,150개의 CQUAD4 와 CTRIA3 요소로 모델링되어 있으며 형상 모델은 2D 셸(Shell) 요소, 용접은 1D RBE2 모델이다. 또한 용접 순서는 고려하지 않고 모든 점이 동시에 용접되는 것으로 가정하였다. Part 1과 Part 2의 물성치로는 탄성계수(Young's modulus) $E = E = 2.07 \times 10^5$ MPa 및 포아송 비(Poisson's ratio), $\nu = 0.3$ 을 사용하였다.

3.2.2 민감도 해석(Sensitivity Analysis)

앞에서 설명한 것과 같이 조립품의 민감도(Sensitivity) 구하기 위해 전술한 CAVA를 이용하였으며 Fig. 15는 CAVA가 수행되고 있는 예를 보여주고 있다. 각 측정점에 대한 민감도를 해석하기 위해서는 용접점과 측정점이 고려된 조립전, 조립후의 유한요소해석(FEA) 모델이 있어야 하며 이 모델들은 용접 모델 요소인 RBE2를 제외하면 각 노드 번호들이 각각 일치한다. 용접전 모델을 통하여 $[K_{ij}]$ 을 구하고, 용접후 모델에서 $[K_{ij}]$ 을 구한 후에 이 두 강성행렬(Stiffness Matrix)을 식 (7)을 대입하여 조립 후 민감

도행렬을 계산하고 각 용접점들에 작용하는 민감도의 총합을 구하여 각 용접점의 크기를 평가하였다. 해석 결과 민감도의 최대/최소(MAX/MIN) 점의 위치는 Fig. 16에 도시하였다.

3.2.3 용접 강성 비교 분석

용접 강성을 비교/해석하는 과정은 우선 앞 절에서 얻어진 조립품의 민감도 결과로부터 상대적으로 낮은 민감도를 갖는 조립점을 찾은 후에 원래 모델과 용접 민감도가 낮은 용접점을 제거한 모델과의 상대적인 용접 강성을 비교하는 방식을 택하였다.

이를 위해 쿼터 외판(Quarter Outer Panel)은 클램프로 고정된 후 쿼터 내판(Quarter Inner Panel)에 용접조립 점을 구성한 후(Fig. 14) Inner Panel의 중심에서 단위 하중(1 kN)을 가하는 방법으로 용접강성을 구하여 비교하였다. 이때의 비교 모델은 실제 가공 조립 모델(CASE 1)과 민감도가 낮은 용접점을 제외한 조립모델(CASE 2) 그리고 민감도가 높은 용접점을 제외한 조립모델(CASE 3)의 3가지로 구분하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 결과를 간단히 분석해 보면 민감도가 낮은 용접점을 제거한 모델(CASE 2)은 기본 모델에 대하여 0.5% 정도 강성이 저하된 반면 민감도가 높은 용접점을 제거한 모델(CASE 3)의 강성저하도는 약 8%로서 상대적으로 크다는 점에서 민감도가 높은 용접점의 강성에 대한 영향도가 16배 높다. 이로서 용접점의 민감도가 용접강성에 미치는 영향이 매우 저대함을 확인할 수 있다.

Table 3. Stiffness comparison

Model	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Measure 1	20.6	20.7	22.3
Comparison (%)		-0.5	-8.0

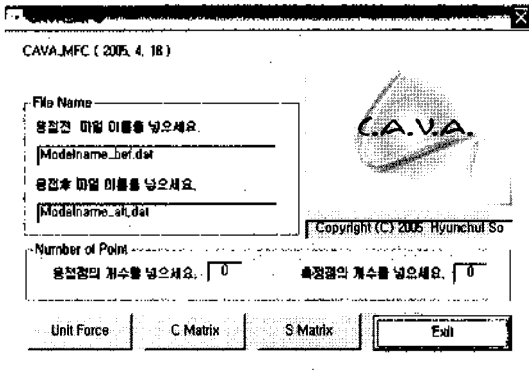


Fig. 15. An image capture of CAVA interface.

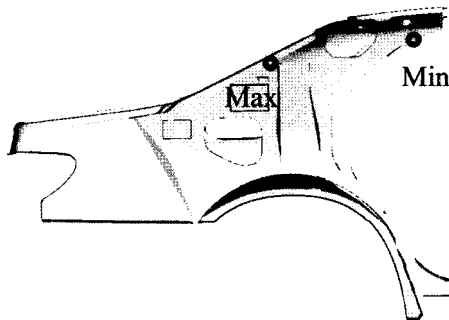


Fig. 16. Weld points with maximum and minimum sensitivity.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법과 민감도법을 이용하여 판재용접에 있어서 위치오차의 영향이 최소화될 수 있는 치구의 최적위치계산과 용접조립 공정 시 부품들간의 영향을 고려한 용접점의 위치와 개수를 설계하는 기법에 관하여 각각 논하였다.

제한된 방법의 타당성을 검증하기 위해 우선 간단한 사각평판의 용접에 있어서의 치구의 최적위치를 계산하고자 하였으며 이를 위해, 유한요소해석(FEA)을 통해 민감도 모델을 구축하고 치구의 오차로 인한

변형 조립체의 치수 오차를 최소화하는 치구의 최적 위치를 계산하여 보였다. 또한 공차영향계수법을 이용하여 실제 자동차 파트 모델에 대한 민감도를 구하고 이를 용접 조립 공정 시 부품들간의 영향을 파악하여 바람직한 용접점의 위치와 개수를 결정하여 보았다. 본 논문에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 본 논문은 새로 제안된 공차계수영향법(Method of Tolerance Influence Coefficients)을 이용하여 변형체의 조립과정에서 생기는 조립오차를 시뮬레이션하여 보다 효과적으로 민감도 행렬(Sensitivity Matrix)을 구성하였다. 치구의 위치가 최적화되면 조립오차를 최소화할 수 있으며 용접점의 개수가 적어지면 공정의 시간을 단축시킴으로써 용접에 소요되는 비용의 절감효과를 기대할 수 있을 것이다.

둘째, 구성된 민감도 행렬을 이용하여 용접 공정을 평가할 때 부적절한 위치의 용접 조립 공정을 제거하여 최적의 용접조건을 만족시키고자 하였다. 즉 치구 오차로 발생하는 조립품의 오차를 계산하여 치구의 최적위치를 결정하는 방법과 용접 조립 공정 시 부품들간의 영향을 파악하여 효과적인 용접점의 위치와 개수를 결정하는 방법을 제시하였다. 그 결과로 실제 용접공정에서 불필요한 용접점을 제거하기 보다는 그 조립 부위의 용접 간격을 넓히는 방법으로 공정을 진행하는 것이 효율직임을 제시하였다.

추후 연구방향에 대한 제안으로서는 첫째, 본 논문에서는 주어진 파트에 대한 유한요소해석(FEA)을 통하여 강성평가를 수행하였으나 추후 연구에 있어서는 실제 실험 데이터를 바탕으로 보다 다양한 조립파트들에 대하여 제안된 기법의 적용이 수행되어야 할 것이다. 특히 부품의 오차와 치구의 오차를 함께 고려하는 방법과 N-2-1 방법에서의 N, 즉 치구의 개수를 결정하는 문제가 시급하게 해결되어야 할 과제이다. 둘째, 실제 용접에서는 용접건(Weld gun)과 용접 클램프(Clamp)에 의한 강제 거동이 있으므로 이와 같은 공정을 모두 고려한 민감도 해석에 관한 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문에 관한 연구는 2006 서울시 산학연 협력사업과 홍익대학교 학술연구비의 공동지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Chang, M. and Gossard, D. C., "Modeling the Assembly of Compliant, Non-ideal Parts", *Computer-Aided Design*, XXXIX (1997), pp. 701-708, 1997.
2. S. Charles Liu, S. Jack Hu, "Compliant Assembly Variation Analysis Using Components Geometric Covariance", Proceedings of the 2002 International Mechanical Engineering Conference and Exposition, New Orleans, LA, 2002.
3. Hu, S. J. and Wu, S. M., "Identifying Sources of Variation in Automobile Body Assembly Using Principal Component Analysis", *Transactions of NAMRI*, XX (1992), pp. 311-316.
4. Craveling, C. M., *Tolerance Design*, Addison-Wesley, 1996.
5. S. Charles Liu, S. Jack Hu, "Variation Simulation for Deformable Sheet Metal Assemblies Using Finite Element Methods", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 368-374, 1997.
7. 김국생, "용접 조립되는 변형체의 스프링 백 해석", 홍익대학교 석사학위논문, 2005.
8. Jaime A. Camelio, "Modeling and Diagnosis of Dimensional Variation for Assembly Systems with Compliant Parts", Doctor of Philosophy in the University of Michigan pp. 44-75, 2002.
9. L. Shelly Xie, Ching hseih, "Clamping and Welding Sequence Optimization for Minimizing Cycle Time and Assembly Deformation", *Int. J. of Materials & Product Technology*, Vol. 17, Nos 5/6, 2002.
10. Rearick, M. R., Hu, S. J. and Wu, S. M., "Optimal Fixture Design for Deformable Sheet Metal Workpieces", *Society of Manufacturing Engineers*; (1993), *NAMRC XXI*, Vol. 0000137562, pp. 407-412.
11. Cai, W., Hu, S. J. and Tuan, J. X., "Deformable Sheet Metal Fixturing : Principle, Algorithms, and Simulation", *Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 118, pp. 318-324, 1996.
12. Venkataraman, P., *Applied Optimization with Matlab Programming*. WILEY-INTERSCIENCE, 2002.
13. Bazara, M. S., Shcraill, H. D. and Shetty, C. M., *Nonlinear Programming Theory and Algorithms*, WILEY, 1993.

이 동 열

2001년 홍익대학교 기계공학과 학사
2005년 홍익대학교 대학원 기계공학과 석사
현재 쌍용자동차 CAE 팀 근무

소 현 철

2004년 홍익대학교 기계공학과 학사
2006년 홍익대학교 대학원 기계공학과 석사

임 현 준



1984년 서울대학교 공과대학 기계공학과 학사
1986년 서울대학교 대학원 기계설계학과 석사
1993년 미국 MIT 대학원 기계공학과 박사
1993년~1995년 미국 MIT 공과대학 기계공학과 Lecturer

1995년~현재 홍익대학교 기계공학과 교수
관심분야: Digital Manufacturing, Tolerance Design, Ultrasonics

지 해 성



1986년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 학사
1988년 서울대학교 대학원 기계설계학과 석사
1996년 미국 MIT 대학원 기계공학과 박사
1988년~1992년 한국과학기술연구원 (KIST) CAD/CAM 연구실 연구원

1996년~1997년 미국 상무성산하 국제표준연구소 (NIST) 연구원
1997년~현재 홍익대학교 기계공학과 부교수
관심분야: CAD, Digital Manufacturing, Tolerance Design, Rapid Prototyping