

디텐트 스프링 교정을 위한 해석적방법의 적용성 평가

김선호*, 권혁홍**, 박경택*, 정용현***

Evaluation of Analytical Method for Detent Spring Force Correction

SunHo Kim*, HyukHong Kwon**, KyoungTaik Park*, YongHun Jung***

ABSTRACT

A thin metal plate such as detent spring has the shape deformation due to the phenomenon of spring back after press machining and heat treatment process. This requires the correction of spring shape and force in final inspection process. To do correction of the shape deformation the impact force is manually applied to the bended part of detent spring after measuring the shape deformation and spring force. To develop the automatic spring force correction system, applied force of occurring plastic deformation must be derived from the experimental method. But frequent change of spring shape and material makes it difficult to accomplish the experimental method to be applied. This paper describes the analytical method for detent spring force correction system is to be substituted for the experimental method. FEM(Finite Element Method) is used to find the boundary value between elastic and plastic deformation in the analytical method. To confirm the validity of the analytical method, the result of two methods is compared each other at various applied force conditions. It shows that the simulation result of the analytical method is consistent with the result of the experimental method within the error bound $\pm 5\%$. The result of this paper is useful for development of the automatic spring correction system and reduction of the complicated and tedious processes involved in experimental method.

Key Words : Detent Spring(디텐트 스프링), Spring Force(스프링력), Applied Force(가압력), Correction System(교정시스템), Sheet Analysis(박판해석)

1. 서론

디텐트 스프링의 교정작업은 박판의 성형공정과 유사한 작업이다. 박판성형 공정은 현대산업에 필요한 부품을 대량생산하기 위한 매우 중요한 가공공정으로 인식되어 왔다. 이것은 박판성형품이 제품이 갖는 강도에 비해 무게가 가볍고, 표면처

리가 용이하며, 대량생산이 가능하다는 장점과 더불어 생산비용이 저렴하고, 최종제품의 형태에 가깝게 성형이 가능하다는 점에 기인한다.^(1,2,3)

본 연구에서 대상으로 하는 디텐트 스프링은 Fig. 1과 같이 소재로부터 스프링 형상을 잘라내는 전단공정, 스프링력을 만들기 위한 굽힘공정, 소재의 특성을 균일화하기 위한 열처리공정, 전단

* 한국기계연구원 자동화연구부(Automation Eng. Dept., KIMM)

** 대전대학교 기계설계공학과, 생산기술연구소(Daejin Univ.)

*** (주)한국과워트레인(KAPEC Co. Ltd.)

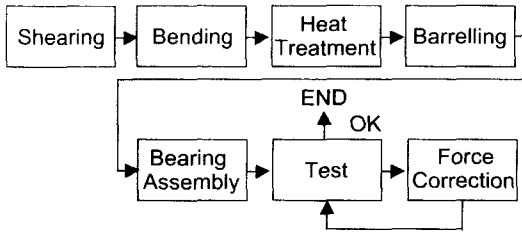


Fig. 1 Manufacturing process of the detent spring

공정에서 발생한 버(Bur)와 열처리면을 개선하기 위한 바렐링, 롤러 베어링 삽입을 위한 조립공정, 스프링력 시험, 스프링력 교정공정을 거치면서 제품이 완성된다. 공정이 비교적 많고 다양한 특징 때문에 공정이 진행되면서 後공정에서 前공정의 특성을 잃기 쉬운 점이 상존한다.

박판 스프링에서 스프링의 특성에 영향을 주는 인자로서는 재질, 가공조건, 열처리 환경 등이 있다. 박판성형에 의해 제조된 스프링들은 이러한 공정이 갖는 특성 때문에 설계자가 의도한 특성을 갖기 어렵다. 따라서 대부분의 박판 스프링 제조 공정에서는 스프링력을 시험하고 교정을 하는 작업을 필요로 하게 된다.^(4,5)

스프링력을 교정하기 위한 방법으로는 주로, 반복적인 수작업에 의존하고 있는 경우가 대부분이다. 이를 자동화하는 경우, 교정에 필요한 가압력을 실험적으로 구하고 이를 교정장치에 적용하는 방법이 있을 수 있다. 그러나 이 경우는 제품의 모델이 바뀐다든지 소재의 물성특성이 바뀌면 재실험이 필요하게 된다.

본 연구에서는 박판 스프링 제조공정에서 스프링력(Spring Force) 시험과 교정공정을 자동화하고자 했다. 이를 위해서는 스프링력의 교정에 필요한 가압력(Applied Force)을 구해야 하는데, 모델이 바뀌거나 작업환경이 바뀌는 경우, 반복적인 실험을 해야하는 번거로움을 해결하기 위해, 해석적인 방법을 적용하고자 했다. 해석적으로 구한 결과는 실험적으로 구한 결과와 비교하고 적용 가능성을 평가했다.

2. 실험에 의한 교정 알고리즘 추출

본 연구에서 대상으로 하는 디텐트 스프링의

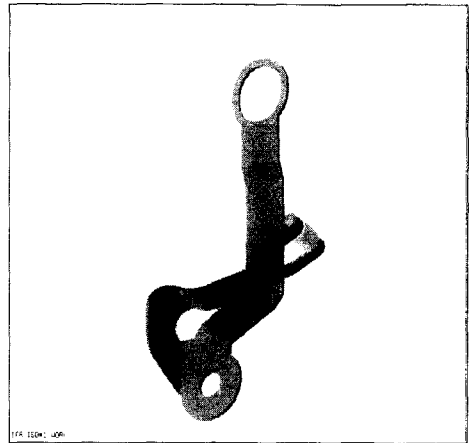
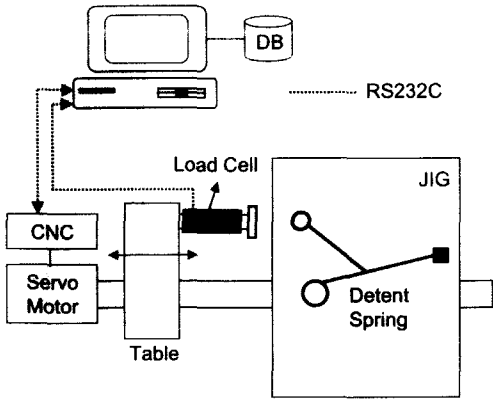


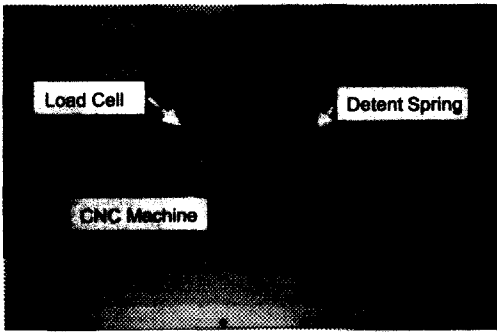
Fig. 2 The shape of the detent spring

형상을 Fig. 2에 나타내었다. 디텐트 스프링은 크게 몸체부와 롤러 베어링부로 구성된다. 본체부는 프레스 가공에 의해 제작되며 열처리를 거친 후 롤러 베어링과 조립된다. 이는 승용차의 자동 변속기 레버에 사용되는 부품으로서, 스프링력이 운전자의 변속감각에 영향을 미치게 된다. 따라서 제조공정에서 엄격한 허용오차 관리가 이루어 질 필요성이 있다.

디텐트 스프링을 교정하기 위한 가압력 알고리즘을 실험적으로 구하기 위해 측정 시스템을 구성했다. 스프링력 측정 및 교정 실험을 위한 장치는 위치제어가 가능한 CNC 밀링을 이용했다. CNC 밀링의 테이블 위에 스프링을 고정하기 위한 고정장치를 설치하고, 스프링력을 측정하기 위한 장치는 주축에 특별히 제작된 장치를 제작해 고정시켰다. 스프링력을 측정하기 위한 설계상 기준위치까지의 이동은 공작기계의 이동기구를 이용하고 스프링력 측정은 디지털 방식의 하중계(Load Cell)를 이용했다. 여기서 기준위치란 설계치에 의한 스프링력을 측정하기 위한 위치를 의미한다. 또한, 측정된 데이터의 효과적인 분석을 위해, 공작기계의 위치를 파악하기 위한 방법으로는, 공작기계와 실험장치가 구성된 PC를 RS232C를 이용해 연결했다. 또한 하중계로 부터 하중값의 전송도 RS232C를 이용하여 자동으로 스프링력을 수집하도록 구성했다. 구성된 시스템을 Fig. 3에 나타내었다.



(a) Schematic arrangement



(b) Experimental apparatus

Fig. 3 The experimental setup

구성된 실험장치를 이용하여, 스프링 교정시스템을 만들기 위해 탄성영역에서 예비 실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. X축은 실제 스프링력을 검사하기 위한 기준위치의 변화를 나타내고 Y축은 측정된 스프링력을 나타낸다. 스프링력이 절대적인 차이는 가지지만, 변위에 대한 스프링력의 변화는 탄성영역에서 거의 직선적인 변화를 나타내고 있다.

Fig. 5는 소성 변형구간에서 동일한 실험을 수행한 결과이다. 그림에서 X축은 스프링의 형상을 소성변형 시켜 스프링력을 교정하기 위한 가압력이며, Y축은 교정된 스프링력을 의미한다. 그림에서 보이듯이 가압에 따른 스프링력 교정량은 거의 비례함을 알 수 있다. 실험은 설계도에서 제시하는 기준변위 위치에 스프링을 고정하고, 하중계에서 출력되는 스프링력이 합격 판정기준에 따라 2.5~3.5kg를 벗어나는 불량품들을 대상으로, 교

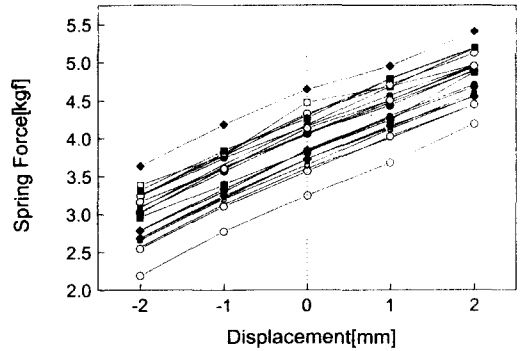


Fig. 4 Variation of spring force on elastic zone

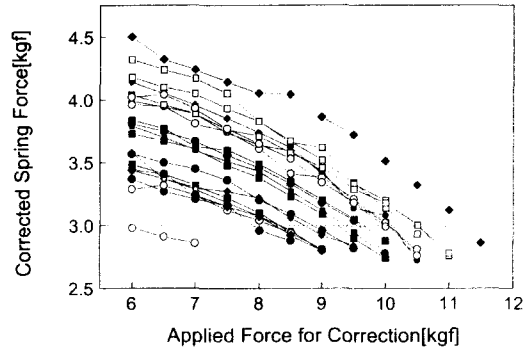


Fig. 5 Variation of corrected spring force on applied force

정 스프링력이 3.0kg이 될 때까지 가압력을 0.5kg씩 증가시키면서 실험을 수행했다. 그림에 보이듯이 시편들은 가압력으로서 교정시킬 때마다 디텐트 스프링은 탄성변형만이 있는 것이 아니고 영구 변형인 소성변형이 동시에 일어남을 관측할 수 있다. 소성변형에 대한 스프링 백(Spring Back)이 스프링력의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 시간별로 48시간 까지 스프링 백 변형량을 측정한 결과 $\pm 3\%$ 이내로 나타났다.

이러한 결과를 이용해 검사력을 기준으로 가압력을 구하기 위한 알고리즘을 구축했다. 시험공정에서 얻은 검사력(x)과 불량척 스프링을 교정하기 위한 가압력(y)과의 관계를 다항회귀분석(polynomial regression)에 의해 2차다항식을 도출하면 (1) 식과 같다.

$$y = -1.10507 x^2 + 12.0783 x - 21.217 \quad (1)$$

여기서 y 는 가압력을 나타내고, x 는 기준위치에서의 검사력을 나타낸다.

3. 유한요소법에 의한 교정 알고리즘 추출 및 실험결과 고찰

박판 형상을 갖는 디텐트 스프링은 하중을 가한 후 스프링백 현상에 의한 변형과 굽힘효과가 크기 때문에 이에 적합한 해석을 하기 위해, UNIX용 ANSYS 5.3^(6,7) 상용 패키지를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며 해석과정은 Fig. 6 과 같다.

이때 형상 모델링을 CAD/CAM/CAE 통합 패키지인 유니그래픽스(Unigraphics) 모델러를 이용하여 실제 형상에 가깝도록 이상화 했다. 디텐트 스프링의 구조는 몸체부와 롤러 베어링부로 구성되는데 스프링의 특성을 나타내는 스프링력은 박판 재료로 이루어진 몸체부의 형상에 의존한다. 몸체부는 재료가 균질하지 않고 열처리 조건이 달라질 경우 금속적인 특성이 달라져 정확한 해석을 위한 모델링을 했다 하더라도 실험치와 해석치가 오차를 가질수 있기 때문에 실제 사용된 시편을 이용해 재료시험을 수행했다. 냉간 압연강판인 SK5M을 사용한 몸체부는 UTM(MTS사, 10톤)를 이용한 인장시험 결과, 탄성계수는 21,000 kg/mm², 항복응력치는 100 kg/mm², 포와송 값은 0.33으로 나타났으며 이를 모델에 적용했다.

재료의 물리적 성질을 살펴보면 탄성계수는 탄소 함유량(C%) 및 정도에는 관계없고, 담금질

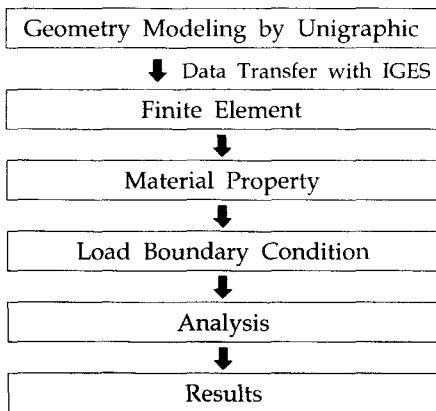


Fig. 6 The process of the Finite Element Analysis

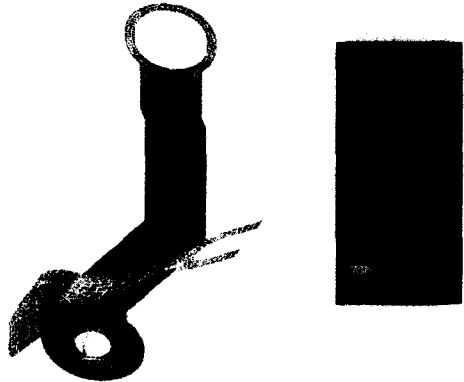


Fig. 7 Displacement distribution on 8kgf applied force

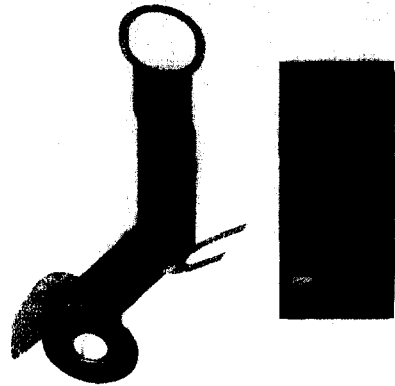


Fig. 8 Equivalent stress contours on 8kgf applied force

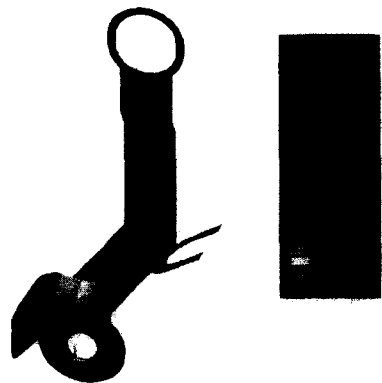


Fig. 9 Permanent deformation contours on 8kgf applied force

경화하면 탄성계수는 조금 저하한다. 그리고, 오스테나이트 조직은 탄성계수가 낮다. 여기서, 스프링 백 특성을 나타내는 주요 부분인 디텐트 스프링 몸체부는 퀴칭과 템퍼링한 후의 비커스 경도치가 $Hv\ 450_0^{+70}$ 을 요구하는데 이는 열처리한 후 비커스 경도치가 대략 2배 정도 증가한 수치이다. 이러한 특성을 고려 해 디텐트 스프링의 수학적 모델요소는 Bilinear kinematic hardening 성질을 지닌 Shell 43 요소로 했고 소성변형은 Prandtl-Reuss 식의 흐름 이론에 따라 일어난다고 가정하였다. 또한 항복여부는 Von-Mises식에 따라 등방적으로 일어난다고 가정하였다⁽⁷⁾.

디텐트 스프링에 사용된 박판요소의 두께는 1mm의 철판으로 구성되게 했다. 또한 디텐트 스프링은 실제 조건과 동일하게 고정하여 이상적으로 설치된 것으로 했다. 그리고 해석시 실험과 동일한 하중조건을 부여하기 위해 Multi-load Step법을 적용하여 정적(Static) 해석을 수행하였다⁽⁷⁾.

이상과 같은 조건하에서 교정을 위한 가압력을 가하였을 때, 유한요소해석을 수행하여 스프링의 탄성량과 소성영역의 영구변형량을 시뮬레이션 해석결과로써 도출하고 이를 실험치와 비교·검토해 보았다.

Fig. 7은 설계에서 제시한 대로 롤러 베어링부에 8kgf 가압력을 가했을 때의 Y축으로의 변형된 변위를 나타냈다. 롤러 베어링부 끝단의 최대변위량이 -Y축 방향으로 17.658mm 변형이 발생했다. 이는 실험에서 10개의 시편에 대해 실험한 결과 각각 17.4, 17.4, 17.0, 16.6, 16.2, 16.2, 17.2, 16.7, 17.3, 16.5mm로 나타난 것과 근사한 값이다. Fig. 8은 Fig. 7과 같은 상황에서의 Von-Mises 등가응력치를 나타내고 있는데, 최대 등가응력치가 95kgf/mm² 정도의 수치는 소재의 항복응력치에 근접한 것을 알 수 있다. 실험을 통해 가압력을 제거하고 롤러 베어링 선단부의 초기위치를 측정된 결과 1.7mm 내외의 영구변형량이 발생했음을 알 수 있었는데, 이 수치는 6kgf 이내의 가압력까지는 영구 변형량이 나타나지 않다가 6kgf부터 8kgf까지의 누적 영구변형량을 나타낸다. 이를 해석적으로 구해보면 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 1.815mm가 된다. 해석결과와 실험치와 거의 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 롤러 베어링부에 10kgf 가압력을 가

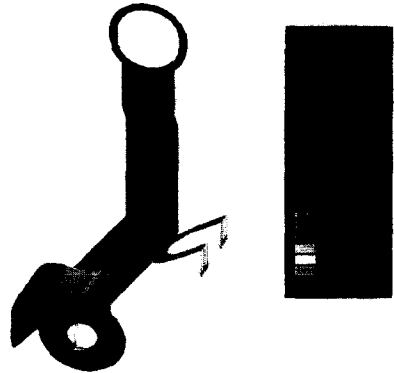


Fig. 10 Displacement distribution on 10kgf applied force

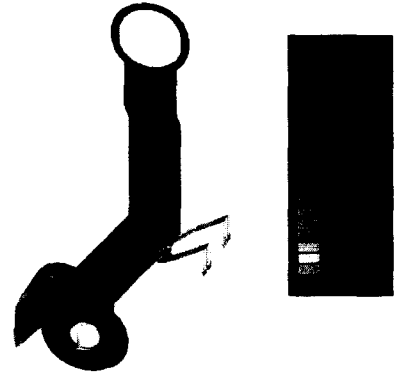


Fig. 11 Equivalent stress contours on 10kgf applied force

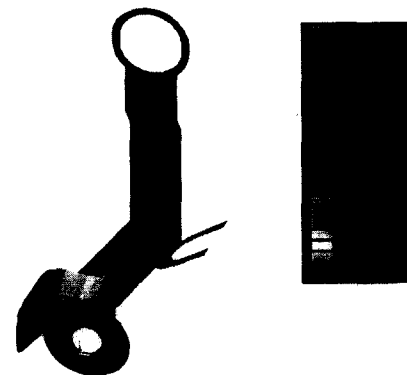


Fig. 12 Permanent deformation contours on 10kgf applied force

했을 때의 Y축으로의 변형된 변위를 나타냈다. 롤러 베어링부 끝단의 최대변위량은 23.144mm 변형으로 발생했다. 이는 실험에서 10개의 시편에 대해 실험한 결과 각각 23.2, 23.7, 22.7, 22.7, 22.6, 22.9, 22.7, 22.8, 23.6, 23.0 mm로 나타난것과 근사한 값이다. Fig. 11은 Fig. 10과 같은 상황에서의 등가응력치를 나타내고 있는데 최대값은 101.7정도의 값으로서 이는 소재가 항복을 일으키는 것을 알 수 있다. 실험을 통해 가압력을 제거하고 롤러 베어링 선단부의 초기위치를 측정한 결과 4.7mm이상의 영구변형량이 발생했음을 알 수 있었는데, 이 수치를 해석적으로 구한 결과를 Fig. 12에 나타 내었다. 해석결과 롤러 디텐트 선단부의 영구 소성변형량이 5mm정도로 나타났는데 이는 실험치와 거의 잘 일치하고 있다.

4. 해석적방법의 적용가능성 평가

실험적으로 구한 가압력과 해석적방법으로 구한 가압력을 비교한 데이터를 Fig. 13에 나타 내었다. 그림에서 x축은 기준위치에서의 검사력을 나타내고 y축은 교정을 위한 가압력을 나타낸다. 또한, 점선은 해석적방법에 의해 도출한 결과이며 실선은 실험적방법으로 얻은 결과이다.

해석적으로 얻은 결과를 이용하여 다항회귀분석(polynomial regression)에 의해 2차 다항식으로 표현하면 (2) 식과 같다.

$$y = -1.20464 x^2 + 13.0147 x - 23.0945 \quad (2)$$

그림에서 탄소성 유한요소해석으로부터 얻은 가압력값이 실험으로부터 구한 가압력보다 약간 높은 교정용 가압력을 요구하고 있음을 나타내고 있다.

두가지의 해석결과를 통계적으로 비교 해본 결과 $\pm 5\%$ 오차범위내에 들었다. 일반적으로 박판 스프링력의 허용오차 범위가 $\pm 10\text{-}15\%$ 인 점을 고려하면 양호한 결과로 판단된다. 이상의 결과는 박판 스프링 교정 시스템에서 해석적방법의 결과를 적용 할 수 있다는 결과를 제시하고 있다는 점을 시사하고 있다.

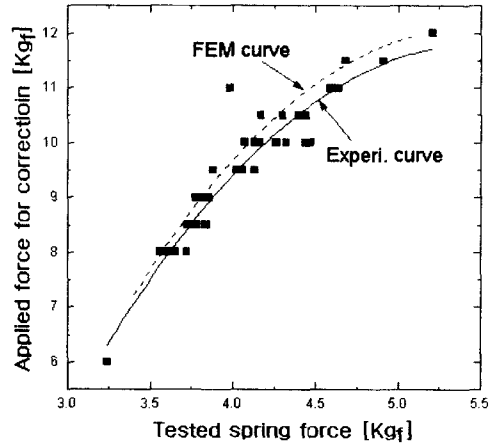


Fig. 13 The comparison of the correction and applied force at reference point

5. 결론

본 연구에서는 박판 스프링 교정 공정에서 실험적인 방법에 의해 구하고 있는 가압력을, 해석적인 방법으로 구하는 방법을 적용하고 이의 가능성을 평가 했다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 유한요소법을 이용한 박판해석을 이용해 스프링 교정 알고리즘의 구현이 가능했다. 이러한 방법의 적용을 통해 실험식을 구하기 위한 많은 노력의 절감이 가능하다.
- Multi-load step을 이용한 정적해석을 통해 디텐트 스프링의 영구변형량을 도출하였으며, 실험치 비교한 결과 $\pm 5\%$ 이내의 정확도를 나타냈다.
- 이러한 연구 결과는 많은 유사분야에 적용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. 김기찬, 박판금속의 성형 -이론과 실제-, 반도출판사, 1993.
2. Serdar S. "Estimation and Control of Drawbead Force in Sheet Metal Forming," SAE '94, pp.

- 153-162, 1993.
3. Aita, S, "Industrial Product Formability Analysis Using 3D Metal Forming Simulation," Numerical Method in Ind. Forming Process, pp. 571-579, 1992.
 4. 박경택, 김선호, 권혁홍 외, "유연성조립 및 측정검사 기술개발에 관한 연구," 연구보고서, 한국파워트레인, 1997.
 5. 권혁홍, 김선호, 박경택, 정용현, "디텐트 스프링 교정시스템 구축을 위한 박판해석," 한국정밀공학회 '97년도 추계학술대회논문집, pp.1150~1153, 1997.
 6. Sunsga, H. and Makinouchi, A., "Elastic-Plastic Finite Element Simulation of Sheet Metal Bending Process for Auto Body Panels," 3rd ICTP, pp.1525~1530, 1990.
 7. ANSYS User's Manual Revision 5.3, Swanson Analysis Systems, Inc., 1997.