

비선형 고무 · 폼 재료 변형해석 프로그램

- HAnD-Rubber, HAnD-Seal

· 김 현 영 ■ 강원대학교 기계메카트로닉스공학부, 교수
e-mail : khy@cc.kangwon.ac.kr

이 글에서는 낮은 비용으로 해석시스템을 구축하고 사용상의 어려움을 배제하여 중소 고무 업체에도 적용이 용이한 고무 전용 해석 프로그램을 목적으로 개발된 HAnD-Rubber와 HAnD-Seal의 기능과 적용이론에 대하여 소개한다.

국내의 기계·자동차 관련 업체에서는 구조해석, 입체성형해석, 판재성형해석, 사출성형해석, 충돌해석, 고무·폼 재료의 변형해석 등을 위하여 나스트란(NASTRAN), 아바쿠스(ABAQUS), 마크(MARC), 디폼(DEFORM), 팜크래시(PAM-Crash), 팜스탬프(PAM-Stamp), 몰드플로(MOLD-FLOW) 등 많은 기계공학 관련 해석 소프트웨어를 사용하고 있으나, 이들은 대부분 외국에서 개발된 제품으로 소프트웨어 자체도 비교적 고가이며, 매년 정기적으로 지불해야 하는 비싼 유지보수비는 큰 부담으로 작용하고 있다. 외국에서 개발된 프로그램은 국내 기술자가 충분한 이해를 바탕으로 사용하기에 어려운 점이 있어 인력과 기술력이 부족한 중소기업에서는 투자효과를 기대하기 힘든 것이 사실이다. 또한, 범용으로 개발된 대부분의 프로그램

이 특정 제품의 전문 해석에 대해서도 최적의 결과를 줄 수 있는가 하는 것에는 의문의 여지가 많다. 따라서 매년 프로그램 구입과 사용료에 대한 외화의 지출과 고급 전문분야의 CAE 기술력 확보를 감안하여 중소기업에 투자 부담을 덜어 줄 수 있는 저가의 PC용 CAE 프로그램의 개발과 보급, 그리고 CAE 관련 해석기술의 지원이 절실히 요구된다. 특히, 기존의 상용 프로그램들이 많은 사용자를 확보하기 위하여 다목적용으로 개발되었기 때문에 실제로 특정재료나 공정으로 제조되는 제품의 설계에 적용하여 상세하고 정확한 결과를 얻기에는 어려운 점이 많을 것이다.

자동차나 기계류 부품의 탄성, 탄소성 변형에 대한 유한요소 해석은 적용된 역사가 길어 설계의 한 부분으로 자리를 잡고 있으나, 고무 부품의 설계과정은 재료의 특성상 유한요소 해석 적용이 어

려워 경험과 시험에 의존하는 것이 대부분이었다. 그러나 최근 들어 유한요소 해석을 이용한 설계 사례는 증가하고 있으며, 각 고무 업체나 부품 업체에서의 해석 요구가 늘어나면서 고무제품에 대한 유한요소 해석은 필수 항목이 되었다. 그러나 국내 고무업체의 상황은 몇몇 대형 업체를 제외하고는 유한요소 해석 시스템의 도입이 경제적으로 어려운 실정이며, 무엇보다도 운용할 인력이 부족하다는 데 문제가 있다. 이를 위하여 해석시스템의 저가화와 약간의 유한요소법에 대한 지식을 가지고도 충분히 운용할 수 있는 해석 소프트웨어의 보급이 필요하다.

HAnD-Rubber와 HAnD-Seal은 낮은 비용으로 해석시스템을 구축하고 사용상의 어려움을 배제하여 중소 고무 업체에도 적용이 용이한 고무 전용 해석 프로그램을 목적으로 개발되었다.

HAnD-Seal의 경우는 고무제품 중 자동차의 도어실 설계용으로 개발된 도어실 전용해석 프로그램으로서, 더욱 쉬운 사용법과 도어실의 설계에 필요한 인자와 결과 처리에 프로그램의 기능이 집중되어 일반 범용 프로그램에서는 힘든 작업 절차를 간소화하고 사용을 쉽게 하여 현장 설계자의 접근을 용이하게 하였다. 두 프로그램의 기능과 적용이론에 대하여 소개하고자 한다.

유한요소 정식화

고무와 포뮬 재료의 변형해석에 대한 유한요소 정식화는 기존의 변위 기준 유한요소법에 압력 변수를 추가하는 라그랑지 승수법(Lagrange multiplier method)을 이용하였다. 고무 재료 경우 큰 변형 구간에서도 탄성의 성질을 보이는 초탄성(hyperelastic)의 성질과 압축이 거의 일어나지 않는 비압축성의 성질을 가지고 있으며, 이를 위하여 초탄성 에너지식과 압력 포텐셜(pressure potential)을 적용하였다. 식 (1)과 같이 변위 기준 유한요소식에 쓰인 포텐셜 $\delta\bar{W}$ 에 변위뿐만 아니라 따로 보간된 압력의 함수인 포텐셜 δQ 를 더 한 포텐셜을 정의한다.

$$\delta W = \delta\bar{W} + \delta Q \quad (1)$$

압력 포텐셜 δQ 는 라그랑지 승수법을 이용하여 완전 비압축성과 거의 비압축성 두 가지 경우에 대해 각각 정의된다.

$$\delta Q = -\tilde{p}(\delta J_3 - \delta J), \quad \text{완전비압축성 재료} \quad (2)$$

$$\delta Q = -\tilde{p}(\delta J_3 - \delta J), \quad \text{거의 비압축성 재료} \quad (3)$$

위의 식에서 \tilde{p} 는 라그랑지 승수로서 별도로 구해지는 압력 변수이다. δJ_3 는 변형구배(deformation gradient tensor)의 행렬식(determinant)으로 전체 부피 변화율(V/V_0)의 의미를 가지는 라그랑지 승수 인자(parameter)에 해당한다. 식 (2)와 식 (3)의 포텐셜을 이용하여 완전 비압축성 재료와 거의 비압축성 재료 모두에 관하여 정식화를 수행하였으며, 완전 압축성에 대한 정식화 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{up} \\ K_{pu} & K_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{int}R \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_u \\ F_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (1)에서 압력에 관한 항을 제외한 에너지 포텐셜 δW 는 초탄성 에너지식을 나타낸다. 초탄성 소재의 거동은 전적으로 변형을 에너지식에 의해 표현이 되며, 이를 위해 잘 알려진 몇 가지의 에너지식을 정식화 과정에 포함시켰다. 적용된 에너지식은 표 1에 나타난 무니-리블린(Mooney-Rivlin),

제임스-그린-심슨(James-Green-Simpson), 오그덴(Ogden) 형태이다.

적용된 에너지식은 모델에 따라 몇 개의 계수로 표현된다. 소재의 거동을 제대로 표현하기 위해서는 고무의 재료 시험데이터로부터 에너지 식의 계수를 구할 수 있다. 적용된 초탄성 모델 중 무니-리블린과 제임스-그린-심슨 모델의 계수는 표준 시험 결과에 대해 일반 최소 자승법을 적용하여 최적의 계수들을 찾을 수 있고, 오그덴 모델에 대해서는 반복법(iteration)에 의해 최적의 계수들을 찾을 수 있다. 개발된 코드에 대한 검증으로 단축 인장 모델에 트레올라(Treloar)의 인장 시험 데이터를

표 1 적용된 초탄성 모델

Mooney-Rivlin	$\delta\bar{W} = C_1(\delta I_1 - 3) + C_2(\delta I_2 - 3)$ $\delta J_3 = 1$
James-Green-Simpson	$\delta\bar{W} = C_{10}(\delta I_1 - 3) + C_{01}(\delta I_2 - 3)$ $+ C_{11}(\delta I_1 - 3)(\delta I_2 - 3)$ $+ C_{20}(\delta I_1 - 3)^2 + C_{30}(\delta I_1 - 3)^3$ $\delta J_3 = 1$
Ogden N terms	$\delta\bar{W} = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3)$ $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$

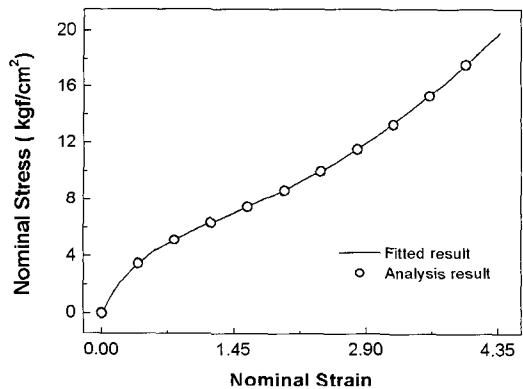


그림 1 Ogden 2항을 사용한 근사된 결과와 해석 결과 비교

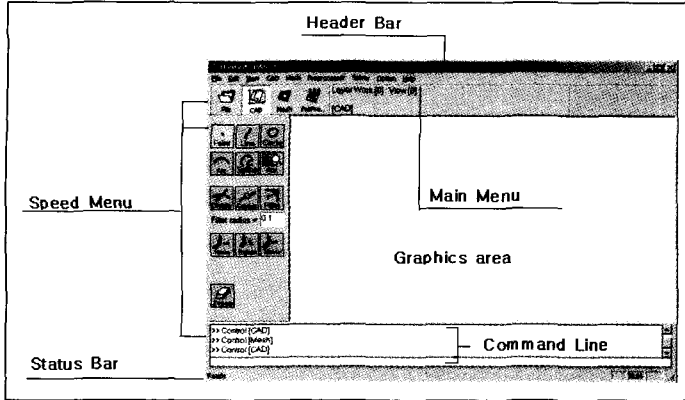


그림 2 HANd-2D 전처리기

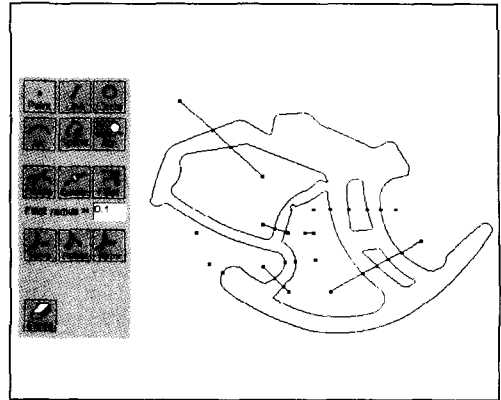


그림 3 형상 모델링 도구와 예

이용하고 계산된 해석 데이터와 시험데이터를 비교한 결과를 그림 1에 나타내었다. HANd-Rubber와 HANd-Seal에서 쓰이는 해석 코드는 위의 정식화 과정을 거쳐 개발된 코드이며, 각 프로그램의 특성에 맞게 개발되었다.

HANd-Rubber (고무, 폼 재료 전용 변형해석 프로그램)

HANd-Rubber는 크게 전처리기(pre-processor)와 솔버(solver), 후처리기(post-processor)의 구조로 되어 있으며, 전처리기

는 모델링과 경계조건 입력, 솔버는 해석, 후처리기는 해석 결과의 처리기능을 담당하고 있다. 전처리기의 형상과 구조는 그림 2와 같다.

전처리기는 크게 지오메트리 모델링(CAD), 메시 모델링(mesh), 경계조건 입력(boundary condition)으로 구분되며, 각각의 기능들은 그림 2의 빠른 메뉴(speed menu)에서 12개 이내의 큰 아이콘(large icon)의 형태로 구현되었다. 모델링은 캐드 기능과 자동메시생성기능을 내장하여 자체 모델링이 가능하며, 외부 입력 파일이 있는 경우 읽어

들여 모델 수정이 가능하다. 그림 3은 HANd-Rubber의 기능을 이용한 형상 제작 예이며, 그림 4는 유한요소망을 구성한 예이다.

경계조건으로는 변위, 압력, 집중하중, 접촉의 지정이 가능하며, 다양한 재료모델을 사용할 수 있게 하였다. 정확한 재료의 입력을 손쉽게 하기 위하여 곡선근사(curve-fitting)코드를 내장하였으며, 재료모델의 계수 입력은 경도값을 이용하여 에너지식 계수를 결정할 수 있으며 시험 데이터가 있는 경우, 시험 데이터를 이용하여서 계수를 결정할 수 있게 하였다. 시험 데이터를 이용하는

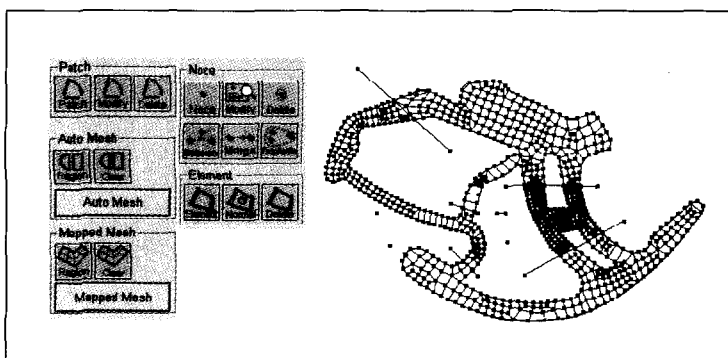


그림 4 유한요소 모델링 도구와 예

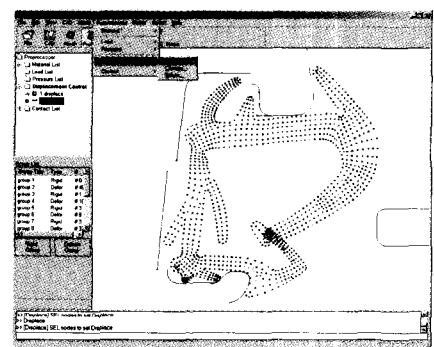


그림 5 변위 경계조건 적용

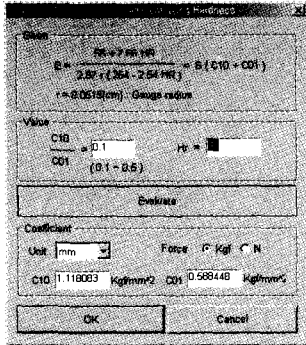


그림 6 경도를 이용한 에너지식 계수계산

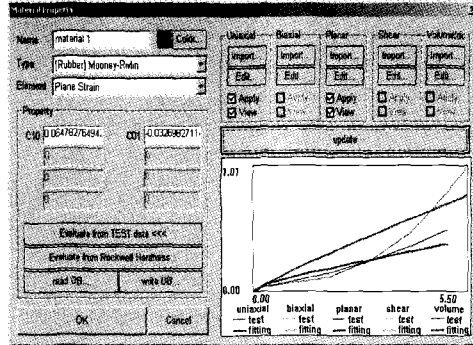


그림 7 시험데이터를 이용한 곡선 근사

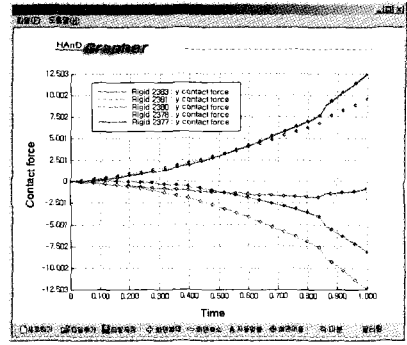


그림 9 HANd-Grapher

경우, 동시에 곡선 근사 결과를 확인할 수 있어 가장 정확한 에너지식을 결정할 수 있게 하였다. 경도를 이용한 에너지식 계수의 결정을 그림 6에 나타내었으며, 시험데이터를 이용한 경우를 그림 7에 나타내었다.

해석의 결과는 다양한 형태로 후처리기에서 확인할 수 있다. 출력 형태로는 변형 형상, 응력이나 변형률 분포, 반력 및 변위 그래프 등이 각각의 포맷에 대하여 다양한 옵션을 마련하여 사용자가 원하는 출력을 얻을 수 있게 하였다. 또한 2차원의 결과를 이용하여 3차원의 결과를 출력하게 하

는 가상 3D 기능이나 사용자 조작을 통하여 임의의 단계에서 변형단계를 확인하거나 변형 양상을 출력하는 기능을 통하여 사용자 편의성을 꾀하였다.(그림 8)

반력이나 변위와 같은 그래프의 형식으로 출력해야 하는 결과는 독립적인 프로그램인 HANd-Grapher를 이용하여 출력할 수 있다. HANd-Grapher는 HANd-Rubber내에 연계되어 수행되며, 선의 두께나 형태, 텍스트 포맷 등의 그래프 편집 기능 외에 필터링 기능을 내장하여 원하는 영역대의 결과나 거친 직선

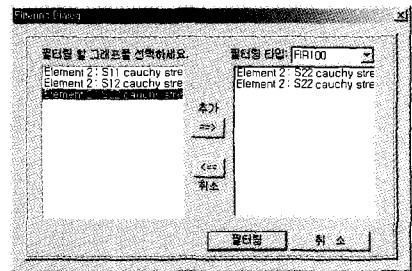


그림 10 필터링 다이얼로그 박스

의 그래프를 곡선으로 편집이 가능하다.(그림 9, 10)

HANd-Seal (도어실 전용 설계 프로그램)

도어실은 비바람, 먼지, 오물 등의 침입을 막아주고 차 외부로부터의 소음 진동의 차단 역할을 수행하는 고무류 기계 요소이다. 도어실의 요구 사항으로는 충분한 실(seal)성은 물론 작은 압축영구변형과 미려한 외관성을 가져야 하며, 도어의 닫힘에 최소한의 영향을 주어야 한다. 자동차 사이드 도어의 닫힘 성능은 여러가지

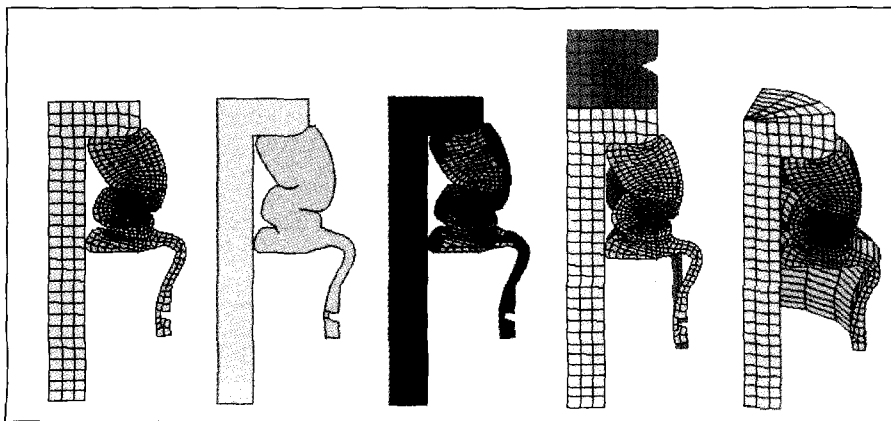


그림 8 다양한 변형 형상의 출력

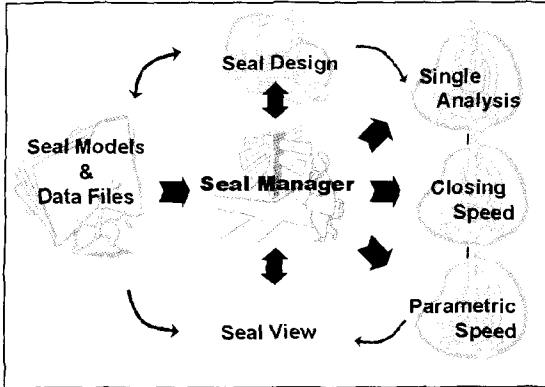


그림 11 HAnD-Seal 시스템의 구조

상품성 중에서도 사용자에게 주는 인상이 큰 성능 중의 하나이다. 닫힘 성능을 결정하는 요소로는 도어를 구성하는 부품 특성이나 레이아웃 조건, 사용 개시로부터의 경과시간 등 수 많은 인자로 구성되며, 특히 도어실에 대해서는 그 반력을 작게 하면 실 성능이 나빠지고, 높게 설정하면 도어 닫힘 성능을 저해하는 특성을 가지고 있다. 도어실의 설계에는 주로 시험적인 방법이 사용되며, 근래에는 해석적인 방법이 도입되어 사용되고 있으나, 고무나 포옴의 비선형 재료로 이루어진 도어실 제품의 해석은 재료적인 특성으로 많은 어려움을 갖고 있으며, 고무·포옴 재료의 해석이 가능한 기존의 소프트웨어는 범용이기 때문에 해석의 결과를 도어실의 설계에 반영하는 작업은 번거로움과 불충분한 지원으로 인하여 효율적이지 못하다. 설계에서 변형해석, 닫힘 속도까지의 과정이 쉽게 연결되지 않기 때문이다.

HAnD-Rubber를 응용하여 고무나 포옴에 대한 변형해석이 가능하고, 변형양상, 응력분포, 접촉면적 및 반력 등, 도어실의 설계에 필요한 데이터를 간단하고 빠르게 설계자에게 제시하며, 최저 닫힘 속도에 대한 해석이 가능한 도어실 전용 비선형 해석 프로그램 HAnD-Seal을 개발하였다. HAnD-Seal의 구조는 그림 11과 같다.

Seal-Manager는 프로그램의 관리자 역할을 한다. 자동차의 도

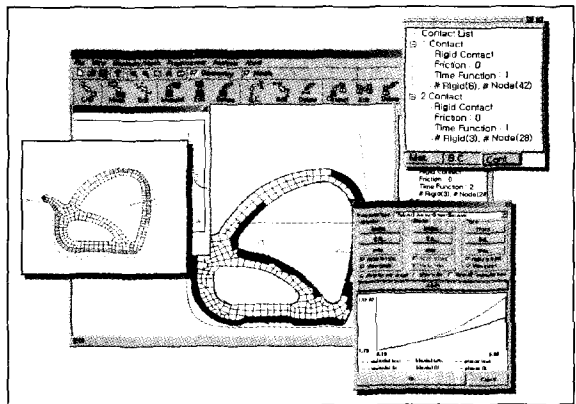
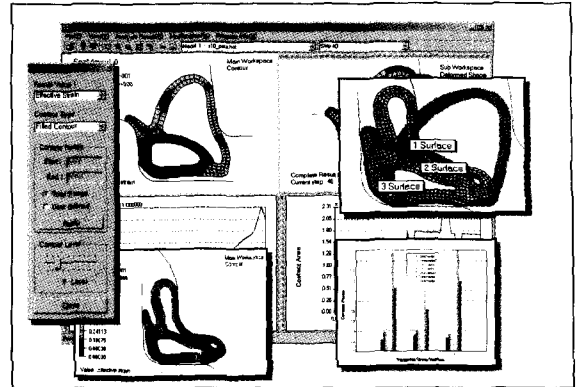


그림 12 Seal-Design & Seal-View

어실은 자동차의 도어와 밀접한 관계를 가지는 것을 고려하여 도어 단품을 프로젝트, 각 도어실을 파트라는 개념으로 관리하며, 도어에 관한 작업파일들의 삭제, 변경 등의 파일관리를 수행한다. 또한 그 작업 파일들을 전처리기인

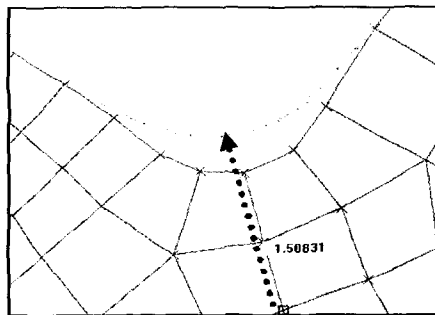


그림 13 두께에 대한 변수 연구

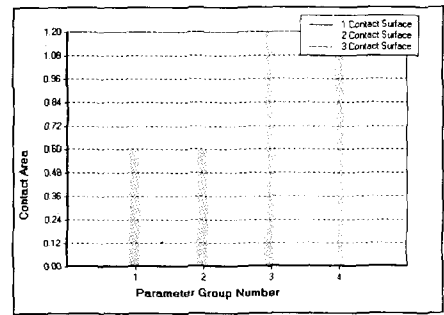


그림 14 접촉 면적의 변수 연구 결과

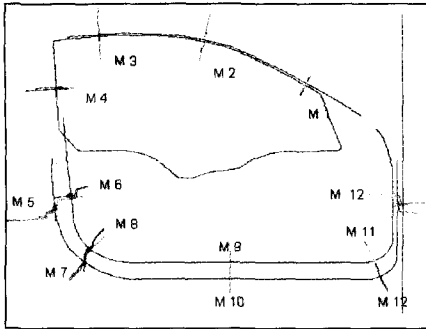


그림 15 도어모델

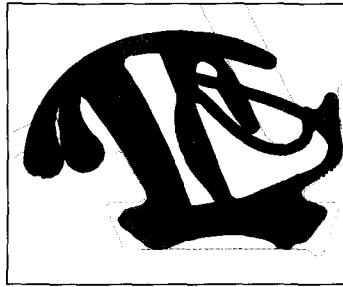
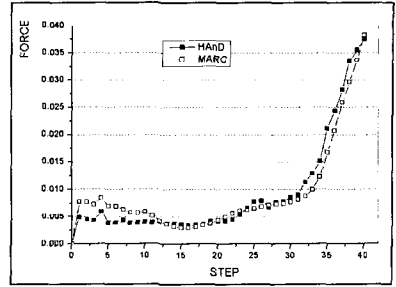


그림 16 실의 변형된 형상과 반력 그래프



Seal-Design과 후처리기인 Seal-View와 연결시켜주며, 닫힘 속도를 계산하기 위한 데이터를 생성 및 계산을 하는 중심적인 역할을 수행한다.

Seal-View와 Seal-Design은 각각 후처리기와 전처리기의 역할을 담당하며, HANd-rubber의 전처리기와 후처리기의 기능을 상당부분 이용하여 기능을 더욱 단순화하여 유한요소 해석에 전문적인 지식이 없는 현장 설계자가 간단한 교육으로 사용이 가능하다. 그림 12는 Seal-Design과 Seal-View의 개략적인 기능을 보여준다.

실제품을 위한 특별한 기능 중 하나는 변수연구기능으로, 실 단변을 구성하는 변수의 변화에 따른 실의 반발력이나 접촉면적의 변화를 파악할 수 있다. 그림 13과 14는 실 단면적의 일부분의 두께를 변화시킬 때 도어유리와 실의 접촉면적이 어떻게 변하는가를 파악하는 예이다.

도어실의 주요 설계 변수는 크게 접촉면적과 반발력으로 나뉘어진다. 접촉면적은 실 단품의 설계과정에서 도출될 수 있는 변수이나, 반발력은 도어를 구성하는

실 전체의 반발력을 고려할 필요가 있다. 이는 도어의 닫힘 성능과 밀접한 관련이 있기 때문이다. 최저 도어닫힘속도의 기준으로 평가될 수 있는 도어의 닫힘 성능은 실성과 상반된 성질을 가지고 있어 두 성능 사이의 절충이 필요하다. 도어를 닫는 과정에서 실, 래치, 에어타이트 등의 저항으로 인해 도어 닫힘 속도는 감속한다. 이 도어의 속도 변화는 식 (5)과 같이 도어의 관성력과 시일, 래치, 에어타이트 등의 반력에 의한 모멘트의 평형식에 의해 구할 수 있다.

$$\sum M_o + \sum M_i(\theta) + M_g = 0 \quad (5)$$

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + \sum M_i(\theta) + M_g = 0 \quad (6)$$

위 식에서 $\sum M_o$ 는 힌지점에 대한 모멘트의 합을 나타내며, I 는 도어의 관성모멘트이다. α 는 힌지점에 대한 각가속도, θ 는 도어의 열린 각도이다. M_i 와 M_g 는 각각 에어타이트에 의한 모멘트 반력과 도어 자중에 의한 모멘트를 나타낸다. 도어 개폐시의 실 라인상의 위치에서의 실 반력은 실의

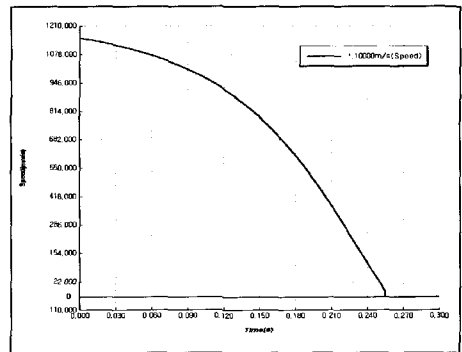


그림 17 최적 도어닫힘속도 계산 결과

붕괴량과 실 단품의 하중 특성으로부터 산출한다. 이에 따라 힌지 주변의 모멘트는 식 (7)과 같다.

$$M_w(\theta) = \int F_w(\theta, s) L_w(s) ds \quad (7)$$

실제 계산에서 실의 반력 F_w 는 변형해석 결과로부터 계산된다. 그림 15는 도어를 구성하는 각 실의 위치와 종류를 나타내는 예이다. 각 도어 실의 반력을 해석 상에서 산출하여 힌지를 중심으로 모멘트를 계산하며, 이를 닫힘 속도식에 입력하여 최저도어 닫힘 속도를 계산하게 된다. 그림 16은 임의의 단품을 해석한 결과이며, 그림 17은 닫힘 속도를 계산한 결과를 나타낸다. 단, 본 결과는 임의의 값을 이용하여 계산한 결과로 실제의 차량 데이터와는 무관하다.