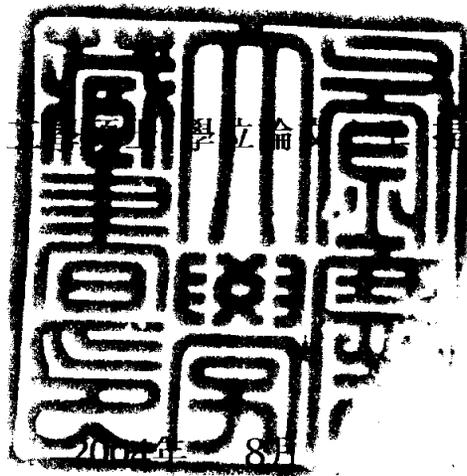


工學碩士 學位論文

有限要素法을 이용한 자동차용 튜브
연결부의 鍛造工程解析

指導教授 韓 圭 澤

이 論文을 2007年 8月 20日 學位論文 提出함.



釜慶大學校 大學院

機械工學部 設計生産自動化工學 專攻

朴 正 植

朴正植의 工學碩士學位論文을 認准함

2004年 6月 25日

主 審 工學博士 吳 明 錫



委 員 工學博士 陳 仁 泰



委 員 工學博士 韓 圭 澤



목 차

Abstract	iii
기 호 설 명	v
제 1 장 서 론	1
1-1 연구 배경	1
1-2 연구대상제품의 개요	2
1-3 연구의 목적	6
제 2 장 이 론	7
2-1 강소성 문제와 유한요소법	7
2-2 강소성 기본방정식의 유도	9
2-3 냉간단조를 위한 구성방정식	14
제 3 장 연결부 형상의 단조공정에 대한 유한요소해석 ..	15
3-1 금형의 설계	15
3-2 유한요소모델의 생성	17
3-3 해석조건 및 공정매개변수	19

제 4 장	호스 조립공정의 유한요소해석	21
4-1	호스 조립공정	21
4-2	유한요소 모델	21
4-3	재료물성 및 공정매개변수	23
제 5 장	튜브 성형 실험	26
5-1	실험내용	26
5-2	실험장치의 구성	28
제 6 장	결과 및 고찰	32
6-1	이중사두성형공정의 해석결과	32
6-2	실험결과와 해석결과의 비교	43
6-3	호스조립공정의 해석결과	45
제 7 장	결론	53
참고 문헌		54
감사의 글		56

Analysis of Forging Processes of Fuel Tube-End for Automobile using Finite Element Method

Jung-Sik Park

*Major of Design & Manufacturing Automation Engineering,
Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

In this thesis, the forming processes of the fuel tube-end for automobiles with single wall structure were simulated using the DEFORMTM-3D, commercially available finite element code. And its simulation results were reflected to the forging processes design for the fuel tube-end. The shape of the fuel tube-end was in agreement with the finite element simulation and the test results.

The optimal design results show the feasibility of the FEM for the forging process of the fuel tube-end.

Also the other purpose of this research is to investigate the relation of the joining situation and separation force in assembly process. It was

performed through the finite element simulation of the assembly process between the fuel tube-end and rubber hose using the MARC, finite element code.

Based on the simulation results, we proposed the design condition of forming process for achieving the optimal shape of the fuel tube-end.

기 호 설 명

V	volume
\bar{V}_D	velocity vector of die
F	contact force
σ	effective stress
σ'_{ij}	deviation stress tensor
σ_{ij}	stress tensor
$\bar{\sigma}$	effective stress
$\bar{\epsilon}$	effective strain
$\dot{\bar{\epsilon}}$	effective strain rate
$\dot{\epsilon}_{ij}$	strain rate tensor
$\dot{\epsilon}_V$	volume strain rate
μ	friction coefficient
f	friction force
C	material constant
\bar{n}	strain hardening exponent
m	shear factor
K	flow stress in shear
Δt	time increment

제 1 장 서 론

1-1. 연구 배경

금속재료에 어느 정도 이상의 외력을 가하면, 외력을 제거하여도 원상으로 복귀하지 않고 변형이 남게 되는 것을 소성변형이라 하고, 재료의 소성을 이용하여 필요한 형상으로 만드는 가공법을 소성가공이라 한다. 소성가공 공정은 주어진 가공재료의 변형 및 소재의 특성에 따라 크게 박판성형(sheet metal forming)과 체적성형(bulk metal forming)으로 나눌 수 있으며, 박판성형에는 굽힘(bending), 롤 포밍(roll-forming), 스피닝(spinning) 등이 속하고, 체적성형에는 압출(extrusion), 업셋팅(up-setting), 압연(rolling), 단조(forging) 공정이 속한다.¹⁾ 체적성형공정들 중에서도 정밀냉간단조 공정은 기계적 성질이 우수한 제품을 대량으로 생산할 수 있기 때문에 기계부품의 제조에 널리 사용되고 있으며, 특히 자동차 부품산업에서는 없어서는 안 될 필수적인 가공방법중의 하나이다. 그러나 대부분의 단조업체들은 아직 전통적인 가공방법에서 탈피하지 못하고 있고, 독자적으로 금형을 설계할 능력이 부족하기 때문에 일반적으로 경험과 비용이 많이 드는 시행착오에 의하여 제품을 생산하고 있다. 이러한 단조공정의 시행착오를 줄이기 위해서는 금형의 설계와 단조공정에 관한 선행연구가 필수적이며, 최근에는 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 통해 가상의 금형을 만들어 실제와 유사한 작업을 해봄으로써 실제 금형을 제작하지 않고도 시행착오를 최대한 줄이는 연구가 진행되고 있다. 유한요소법은 이러한 연구를 수행하기 위한 하나의 방법으

로써 성형공정의 해석에 일반적인 적용이 가능하고 응력이나 변형에 대하여 다양하고 신뢰할만한 정보를 제공하기 때문에 널리 사용되고 있다. Kobayashi와 Kim²⁾이 축대칭 관재가공문제에 강소성 유한요소법을 사용한 이래 유한요소법을 이용한 많은 연구가 행해져 왔으며, 최근에는 수송기계 부품의 경량화 및 고효율화 추세에 따라 부품의 무게를 감소시키기 위한 연구에 유한요소법을 많이 적용하고 있다.

1-2. 연구대상 제품의 개요

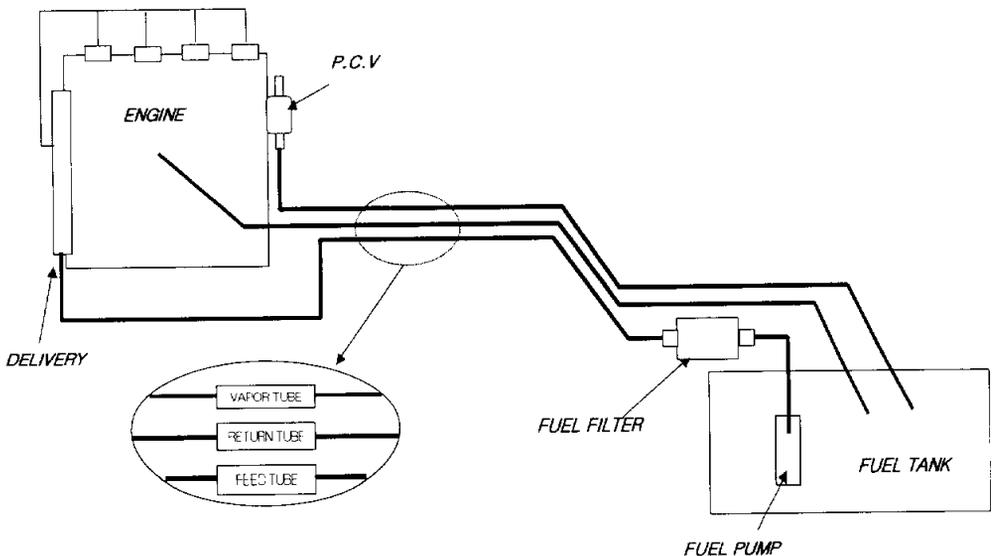


Fig. 1 Schematic diagram of fuel system for automobile

본 연구의 대상제품인 자동차용 연료라인은 연료의 이송을 담당하는 길이 4~5 m 정도의 연료계 부품으로 금속재질의 튜브와 합성고무재질의 호스가 조립되어 연료탱크에서부터 엔진룸까지 연료를 이송하거나, 엔진룸(engine room) 내에서 남은 연료를 다시 연료탱크로 리턴(return) 시킬 때 연료의 이송경로가 되는 부품이다. 차량에는 엔진연소에 사용되는 연료를 저장 및 공급하는 연료 장치가 구비되어 있다. 이러한 연료 장치는 연료를 저장하는 연료 탱크, 연료 중의 불순물을 제거하는 연료 여과기, 엔진에 연료 혼합 가스를 공급하는 기화기(연료 분사 장치), 기화기로 연료를 보내는 연료 펌프 등으로 구성되어지며, 연료 장치를 이루는 각각의 구성요소들은 연료 파이프를 통해 상호 연결되어 엔진의 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 설계되어 있다. 엔진에 사용되는 연료는 휘발성이 강한 탄화수소가 주성분을 이루고 있기 때문에, 연료장치의 구성요소들을 연결하는 연료 파이프는 연료가 누출되지 않게 완벽한 기밀이 유지되어야 한다. 연료 장치로부터 연료가 누출되면 화재의 위험이 있을 뿐만 아니라, 연료의 증발가스가 대기 중으로 방출되어 환경오염의 원인이 된다. 배기가스와 함께 자동차 배출 가스의 주요 요인이 되는 증발 가스는 차량에서 방출되는 탄화수소의 약 15%에 이를 정도로 주요한 대기 오염원의 하나이다. 따라서 대기오염에 대한 규제가 더욱 강화되고 있는 시점에서 연료 장치에 사용되는 연료 파이프는 연료가 외부로 누출되지 않도록 충분한 내구성과 기밀성을 유지하여야 한다.

일반적으로 사용되는 연료 파이프로서는 금속재 파이프와 합성 수지재 파이프가 있다. 금속재 파이프는 연료 장치의 각 구성요소에 구비되는 연료 유입구와 유출구에 주로 사용되며, 합성 수지재 파이프는 각 구성요소 사이를

인결하는 연결용 관으로 사용된다. 이러한 연료 파이프는 금속재 튜브와 고무호스가 조립되는 부위에 있어서 금속재 튜브의 단부를 일정한 형상으로 정밀성형한 후 고무호스를 조립하게 되는데, 금속 튜브의 형상정밀도에 따라 제품의 품질에 미치는 영향은 아주 크다. Fig. 1은 자동차내에서 연료라인이 하는 역할을 도식화한 것이다. 보통의 차량에서 연료라인은 3가닥으로 구성되며, 연료탱크에서 펌프의 압력으로 인젝터(injector)까지 연료를 이송하는 피드라인(feed line)과 발생한 증발가스를 이송하는 베이퍼라인(vapor line), 그리고 남은 연료를 다시 탱크로 돌려보내는 리턴라인(return line)이 있다. 연료라인의 규격은 보통 $\varnothing 8.0\text{mm} \times 0.7\text{t}$ 의 TSW Z13F¹¹⁾이며 근래에 와서는 차량경량화의 일환으로 금속소재에서 플라스틱 소재로 대체되고 있는 실정이다. 그러나 연료라인은 자동차의 안전과 직결되는 중요부품이므로 아직 대부분의 차량은 금속재 파이프를 사용하고 있으며, 다수개의 부품으로 이루어진 연료라인에 있어서 각 연결부의 체결상태에 따라 품질정도가 달라질 수 있다. 따라서 연료라인의 연결부에 대한 제조공정해석과 최적성형을 위한 금형의 개발은 자동차의 안전을 위해 반드시 필요하다.

연료라인은 차체의 연결부나 기관진동의 영향을 받지 않도록 설계되어야 하고, 기계적 손상을 입지 않도록 보호되어야 한다. 또한 시스템 내에서 기포가 발생하는 것을 방지하기 위해서는 가능한 연료라인이 고온부근을 통과하지 않도록 하고, 부득이한 경우에는 그 부분을 단열시켜야 한다. 연료라인은 보통 강관이나 동관, 또는 내유(耐油), 내화(耐火)의 합성재료 호스 등이 주로 사용된다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 연료라인이 자동차 하부에 장착된 사진과 연결된 부

분의 모습을 보여주고 있다.

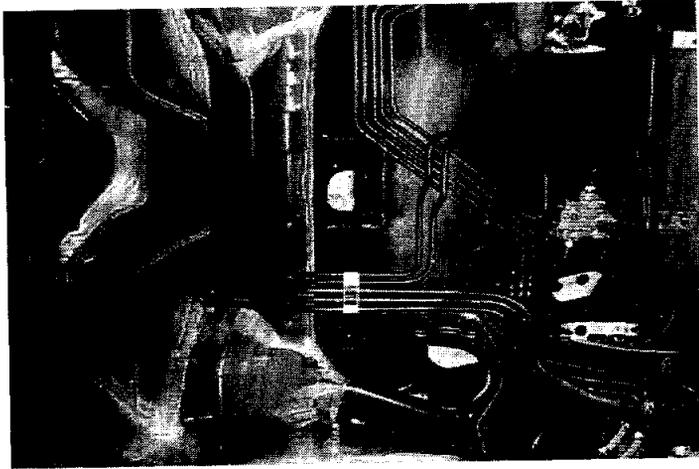


Fig. 2 Tube assembly on auto body

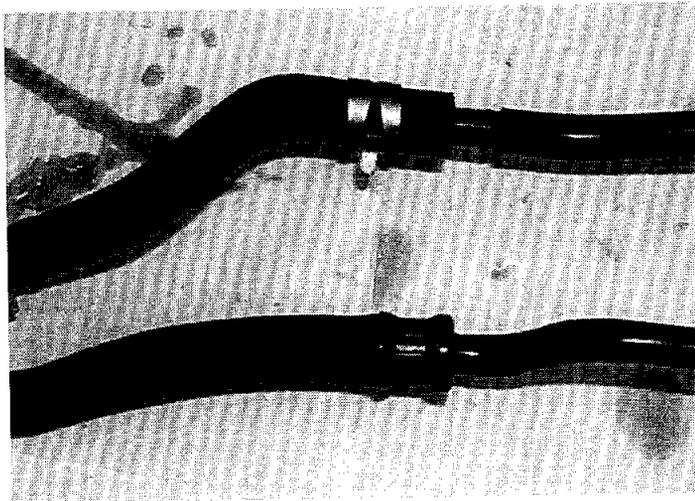


Fig. 3 TSW tube and hose assembly

1-3. 연구의 목적

본 연구에서는 자동차의 연료관으로 사용되는 SPCC 재질의 TSW(tube single wall) 튜브에 대하여 관단부의 단조성형공정을 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션 해보고, 원하는 제품의 성형이 가능하도록 금형을 설계하여 시행착오를 최대한 줄이는 데 그 목적을 두었으며, 부가적으로 성형된 연결부에 고무호스의 조립공정을 유한요소해석을 통해 시뮬레이션 해봄으로써 연결부의 결합상태와 호스의 이탈력 사이의 관계를 알아보고자 하였다.

튜브의 관단부 성형공정은 일종의 냉간단조 공정으로써 반밀폐형 단조공정(semi-closed die forging)을 응용한 방법이며, 자동차용 연료관의 관단부 단조성형공정은 자동차 규격(SAE)에 만족하는 양호한 제품의 생산에 가장 적합한 공정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 상용 CAD 프로그램인 I-DEAS를 이용하여 Top Die, Middle Die, Bottom Die 및 Billet을 모델링 하였으며, 튜브 양 끝단의 성형부는 단조공정의 상용 유한요소해석 소프트웨어인 DEFORMTM-3D¹²⁾를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 고무호스의 조립공정에 있어서는 범용 유한요소해석 코드인 MARCTM를 이용하여 고무호스와 성형부의 결합상태를 알아보았으며, 접촉수직력과 접촉마찰력을 토대로 이탈력을 구해 보았다. 또한 상기와 같은 공정해석을 바탕으로 최적의 성형공정 설계의 조건을 제시하였으며, 이를 통해 양질의 제품을 얻고자 하였다.

제 2 장 이 론

2-1 강소성문제와 유한요소법

역학에서 다루는 자연법칙은 크게 두가지로 요약된다. 하나는 뉴톤의 운동법칙이고 다른 하나는 에너지 보존법칙이다. 단조에서 전자는 소재의 소성유동, 금형의 변형 및 응력분포를 지배하고, 후자는 소재와 금형의 온도분포를 지배한다. 따라서 단조공정의 유한요소해법은 궁극적으로 이 두가지 법칙을 푸는 문제이다.

유한요소법을 이용한 금속성형해석 방법에는 탄소성 해석(elastic-plastic analysis), 강소성 해석(rigid-plastic analysis), 유효변형률속도를 고려하여 열간가공해석에 이용할 수 있는 점소성 및 열점소성 해석(thermo-viscoplastic analysis) 등이 있는데, 탄소성해법은 보다 믿을 만한 응력과 변형률 분포를 얻을 수 있지만, 매 변형상태마다 요소가 항복상태에 도달했는지를 검사해야 하며, 비정상 상태문제 해석시 변형증분량을 한꺼번에 많이 늘릴 수 없는 단점이 있으나, 탄성과 소성변형도의 크기가 비슷한 구조물, 파괴역학 등의 해석에는 정확한 해를 준다. 그러나 단조나 압출과 같은 대변형 소성 문제에서는 탄성 변형량이 소성 변형량에 비하여 무시할 만큼 작기 때문에 강소성으로 다루는 것이 계산시간에 있어서 효과적이다.

유한요소법은 초기에는 구조해석에 주로 이용되었으나 속도 및 용량이 크게 향상된 컴퓨터기술의 발달로 복잡한 형상과 기하학적 및 재료적 비선형 문제, 접촉 및 마찰문제, 열 및 기계의 복잡한 문제 등이 포함된 금속성형

문제까지 해석을 가능하게 하였다. 이 분야의 금속성형을 위한 유한요소해석에 대한 연구는 1973년 Lee와 Kobayashi³⁾가 강소성 유한요소법의 기초가 되는 행렬방법(matrix method)을 수식화한 이후 비압축성 조건의 고려, 강체 영역의 처리, 마찰경계조건 처리기법 및 초기속도장 발생법 등이 개발되었으며, 문제적용의 범용성과 풍부한 데이터의 제공으로 인하여 다른 해석적인 방법에 비해 복잡한 금속성형문제의 해석에 가장 유용하게 사용되어 오고 있다. 이러한 유한요소기법은 많은 프로그램으로 개발되었는데, Marcal의 MARC⁴⁾, Bathe의 ADINA, Swanson의 ANSYS, Hibbitt의 ABAQUS 등은 비선형문제에 많이 이용되고 있는 상용코드들이다. 일반적인 단조 시뮬레이터는 강소성(rigid-plastic) 재료와 강체(rigid body) 금형에 바탕을 두고 있으며, 단조공정 중 소재의 유동해석기능과 온도해석기능, 금형의 온도해석기능, 금형의 구조해석기능 등을 갖추고 있다.

2-2 강소성 기본방정식의 유도

앞 절에서 언급한 일반적인 소성이론으로부터 강소성 유한요소법의 공식화를 유도할 수 있다. 이 경우 탄성변형은 소성변형에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다는 가정을 전제로 한다.

유동 법칙으로부터 응력-변형률 속도 관계식은 아래와 같다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} S_{ij} \quad (19)$$

강소성재료의 변형과정은 다음과 같은 경계치 문제가 된다. 즉 준정적상태의 변형과정의 초기단계에서 구조의 형태나 재료변수의 현 상태값들은 미리 구해져 있고, 그 다음 단계에서 변형률이 변위경계조건에서 주어지고 응력이 응력경계조건에서 주어질 때 얻어진 변형률이나 응력이 평형방정식, 적합조건(compatibility condition) 및 비압축 방정식을 만족시켜야 한다.

(1) 평형방정식(equilibrium equation) :

$$\sigma_{i,j} = 0 \quad (20)$$

(2) 적합방정식(compatibility equation) :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (V_{i,j} + V_{j,i}) \quad (21)$$

비압축성조건 :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = V_{i,i} \quad (22)$$

(3) 구성방정식(constitutive equation) :

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (23)$$

여기서 σ'_{ij} 는 편차응력이고, $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 유효응력과 유효 변형률이다.

(4) 경계조건(boundary condition) :

접촉력 F 가 정의된 표면 S_F 에서

$$\sigma_{ij} \cdot n_j = F_i \quad (6)$$

속도 \bar{V} 가 정의된 나머지 표면 S_V 에서

$$\bar{V}_n = (\bar{V}_D \cdot \bar{n}) \cdot n \quad (7)$$

여기서 \bar{V}_D 는 금형의 속도 벡터이고, $\dot{\epsilon}_V$ 는 체적변형률속도를 의미하며, \bar{n} 는 표면에서 바깥방향으로의 단위벡터이다. 경계값 문제를 풀기위한 방법으로 Weak 적분형을 이용하면, V 로 정의되는 체적내에서 식 (1)의 평형방정식은 임의의 속도변화에 대해 다음식을 만족한다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta V_i dV = 0 \quad (8)$$

텐서정리를 이용하면

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta V_i)_{,j} dV - \int_V \sigma_{ij} \delta V_{i,j} dV = 0 \quad (9)$$

가 된다.

발산정리(divergence theorem)와 응력텐서의 대칭성을 이용하고, 접촉력 F 가 정의된 표면 S_f 에서 $d\bar{V} = 0$ 라고 하는 경계조건을 고려하면

$$\frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} (\delta V_{i,j} + \delta V_{j,i}) dV - \int_{S_f} \sigma_{ij} \delta V_i n_j dS = 0 \quad (10)$$

가 된다.

미소 변형률 속도(infinitesimals train rate)와 접촉력의 정의에 의하여

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_{S_f} F_i \delta V_i dS = 0 \quad (11)$$

으로 쓸 수 있다.

응력텐서를 편차응력 σ'_{ij} 와 정수압 응력 σ_m 으로 분해하면 다음과 같이 된다.

$$\int_V \sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_V dV - \int_{S_f} F_i \delta V_i dS = 0 \quad (12)$$

<비압축성의 고려>

속도장이 비압축성조건을 만족해야 하기 때문에 이를 만족시키기 위해 벌칙함수(penalty function)를 도입하여 식 (12)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K^* \int_V \dot{\epsilon}_V \delta \dot{\epsilon}_V dV - \int_{S_f} F_i \delta V_i dS = 0 \quad (13)$$

<가공경화의 고려>

만약 가공경화율(work hardening rate) H' 이 $\bar{\sigma}$ 에 비해 매우 작다면 비정상상태 소성변형문제에 정상상태의 수식들을 적용할 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 해석의 수렴특성이 나빠지므로 가공경화를 고려하는 것이 좋다. 이때 속도장은 유동응력 $\bar{\sigma}$ 의 분포뿐만 아니라 시간간격 Δt 및 가공경화율 H' 에 의해서 결정된다. 가공경화를 고려한 변분식은 다음과 같다.

$$\int_V (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \cdot \bar{\epsilon} H') \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} (F_i + \alpha \Delta F_i) \delta V_i dS = 0 \quad (14)$$

<마찰의 고려>

소재와 금형이 접촉하는 면에서 속도가 금형이 움직이는 방향으로 주어지는 반면에 접촉력은 금형에 대한 소재의 상대운동의 반대방향으로 작용하기 때문에 경계부근에서 복잡성을 지니게 된다. 금속성형해석에 있어서 마찰에 대한 고려는 대체로 다음과 같은 두 가지 방법이 주로 사용되고 있다.

(1) 쿨롱 마찰(Coulumb friction)

$$f = \mu P \quad (15)$$

즉, 마찰력 f 는 접촉면에 수직인 법선압력 P 에 비례한다는 가정이다.

(2) 전단 마찰(shear friction)

$$f = mK = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

전단마찰력 f 가 전단 항복응력 K 에 비례한다는 가정이다. 쿨롱마찰은 이용하는데 있어서 법선압력 P 를 계산하는데 많은 반복시간이 필요하기 때문에 박판금속의 성형에 주로 사용되며, 상대적으로 계산시간이 적은 전단 마찰은 벌크금속성형(bulk metal forming)에 주로 사용한다. 본 연구에서는 원통형의 튜브를 벌크소재로 가정하여 전단 마찰식을 사용하였다.

여기서, m 은 shear factor, $\bar{\sigma}$ 는 flow stress, K 는 flow stress in shear를 나타내는 것으로, 윤활유를 사용한 냉간 성형공정에서의 m 값은 일반적으로 0.05에서 0.15이다.

2-3 냉간 단조를 위한 구성방정식

유한요소법을 이용하여 재료의 강소성 변형거동을 정확히 해석하기 위해서는 재료의 변형특성을 적절히 표현할 수 있는 구성방정식이 필요하다. 일반적으로 강소성체의 소성영역에서의 응력-변형률의 일반적인 관계는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^{\bar{n}} \quad (17)$$

여기서, C 는 강성계수이며, \bar{n} 은 가공경화지수 또는 변형률경화지수(work hardening or strain hardening exponent or index)라 불리는 값이다.

본 연구에서 사용된 소재는 SPCC 냉연강재이며, 상온에서의 응력과 변형률 관계식은 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma} = 45.505\bar{\epsilon}^{0.184} \quad (kg_f/mm^2) \quad (18)$$

해석을 위하여 사용된 편차와 소재사이의 마찰 조건은 식 (16)과 같은 전단 마찰식을 사용하였으며, m 값을 0.08로 하였다.

제 3 장 연결부 형상의 단조공정에 대한 유한요소해석

3-1 금형의 설계

단조공정은 다른 공정에 비해 소재의 많은 변형을 유발시킨다. 따라서 높은 하중에 의한 금형수명의 단축, 소재의 변형에 의한 금형의 기울어짐 및 이에 따른 이송의 문제점 등이 발생할 가능성이 있다. 이러한 문제점은 제품의 품질과 직결되므로, 사전에 예측가능한 문제점들을 찾아내어 금형설계에 반영하여야 한다. 또한 성공적인 단조공정의 수행을 위해서는 여러 가지 작업요건을 만족해야 하며, 소재의 강도와 연성, 변형속도와 마찰특성, 소재의 형상과 복잡성 등을 고려하여야 하고, 저항이 최소인 방향으로 재료를 이동시키는 것이 중요하다.

본 연구에서 수행하고자 하는 자동차용 연료튜브의 연결부위 성형작업은 일종의 반밀폐형(semi-closed type) 단조공정이라 볼 수 있으며, 1차 단계에서 Top Die가 성형을 위해 움직이고, 1차 성형이 끝난 Top Die가 Middle Die를 내리침으로써 2차 성형이 이루어지도록 설계하였다. Fig. 4는 연료튜브의 연결부 형상에 대한 성형이 이루어지는 과정을 도식화 한 것이고, Fig. 5는 연결부 형상을 얻어내기 위해 Top Die 와 Bottom Die 및 Middle Die를 설계한 자료이다. 1차성형을 위한 금형설계에서는 Bottom Die 끝에서 Top Die까지의 거리를 임의로 조정할 수 있도록 반밀폐형으로 설계하였으며, 2차 단계에서 Middle Die와 Bottom Die 사이의 간격은 2.2mm가 되도록 설계하였다.

3-2 유한요소 모델의 생성

본 연구에서 해석할 3D 모델은 Fig. 6~Fig. 8과 같다. Top, Middle, Bottom Die는 강체(rigid body)로 가정하였고, 소재는 강소성(rigid-plastic) 재료로 가정하였으며, 소재압연방향에 따른 이방성은 고려하지 않았다. 튜브의 형상은 외경 $\varnothing 8$, 내경 $\varnothing 6.6$, 길이 50mm로 하였으며, 해의 수렴정확도를 높이기 위해 메시(Mesh)의 수를 10만개로 하였다.

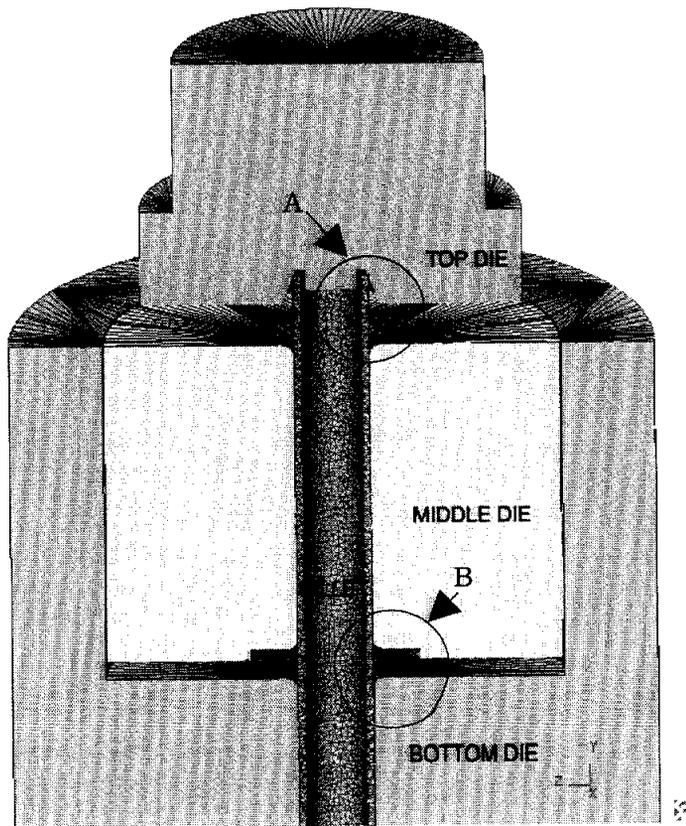


Fig. 6 Finite element model for double flare forming

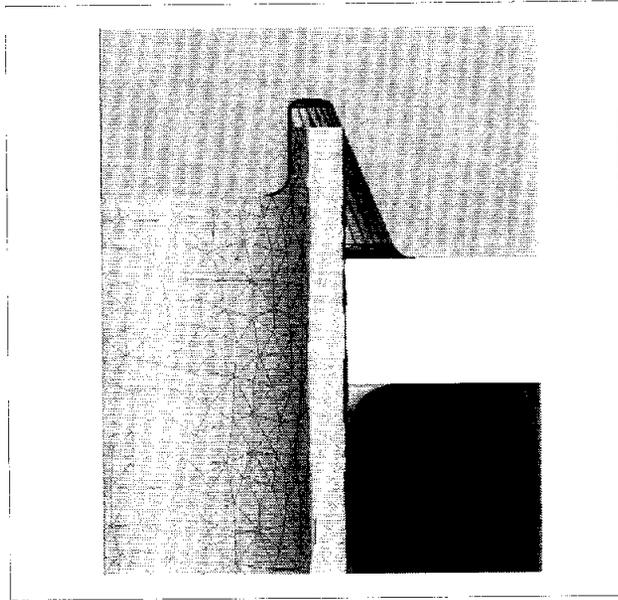


Fig. 7 Enlarged section "A" on finite element model

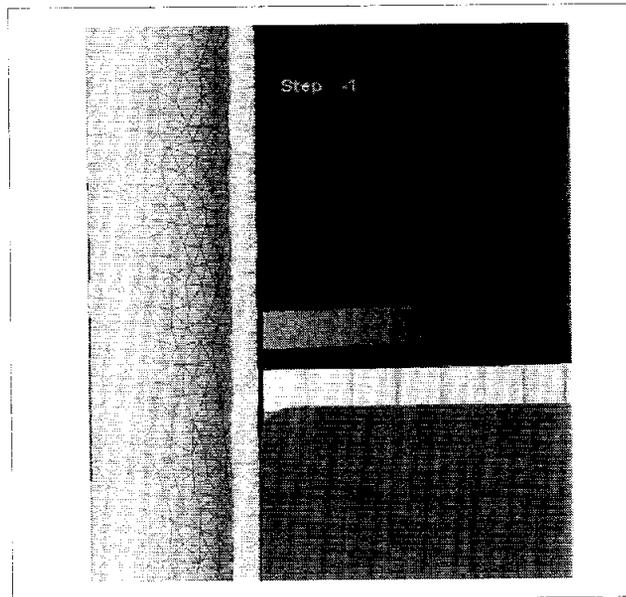


Fig. 8 Enlarged section "B" on finite element model

3-3. 해석조건 및 공정매개 변수

2단 금형을 이용한 연료튜브 연결부의 성형공정에 있어서 1차적으로 정밀한 머리부분을 얻기 위해서는 예비형상(Preform)에 대한 선정이 중요하다. 예비형상은 일반적으로 재료가 금형을 완전히 채울 수 있도록 하고, 금형의 마모를 감소시켜 금형의 수명을 연장시켜 줄 뿐만 아니라, 재료의 유동과 조직성질을 개선시켜 기계적 성질을 좋아지게 한다. 또한 플래시(flash)로 나가는 재료의 양을 줄여주며, 성형하중을 감소시켜 준다. 본 연구에서는 튜브 연결부의 머리 형상에 대한 최적의 예비형상을 찾기 위해 Bottom Die 끝에서부터 재료가 돌출된 길이를 각각 5.0, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0mm로 총 6회에 걸쳐 유한요소 해석을 실시하였다. 재료의 물성치에 대한 값은 SPCC 냉간압연강판의 물성치를 그대로 적용하였다. Table 1과 2는 각각 성형해석에 사용된 재료의 물성치와 사용된 공정 매개변수를 나타낸 것이다.

Table 47 Mechanical properties of SPCC

Tensile Strength (kg_f/mm^2)	Yield Point (kg_f/mm^2)	Elongation (%)	Hardness (HRC)
Min. 30	Min. 18	Min 25 (Gauge length : 50mm)	Max. 60

Table 48 Process geometries and simulation conditions

Parameter	Unit	Value					
Workpiece material	-	SPCC					
Die material	-	Rigid body					
Inner diameter	mm	Ø6.6					
Outer diameter	mm	Ø8.0					
Temperature	°C	20					
Protrusive length	mm	5	6	6.5	7	7.5	8
Stroke per step	mm	5/100	6/100	6.5/105	7/110	7.5/115	8/120
Friction coefficient	-	$\mu = 0.08$					

제 4 장 호스조립공정의 해석

4-1 호스조립공정

Fig. 3에서 보인 바와 같이 성형이 끝난 연료튜브의 연결부에 고무호스를 조립하고, 체결을 용이하게 하기 위해 그 위에 클램프를 결합하여 최종 제품으로 만들게 된다. 이러한 체결작업은 성형부의 형상과 호스의 재료, 클램프의 체결력 등에 의해 결합상태가 크게 달라질 수 있다.

일반적으로 체결력은 실험을 통하여 측정하기는 불가능하므로, 완제품 상태에서 호스와 성형부의 이탈력을 측정하여 요구사양의 만족여부를 판단하고 있다.⁹⁾ 그러나 이러한 이탈력은 호스와 성형부 사이의 접촉수직력(체결력)에 직접 비례하는 것이 아니므로, 이탈력으로 체결력을 정확히 추정하기는 곤란함을 밝혀둔다.

4-2. 유한요소 모델

Fig. 9는 연료관의 연결부 조립공정의 해석에 있어서 해석 전의 초기 유한요소모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 초기 요소의 수는 2,889개이며, 절점의 수는 3,259개이다.

사용한 유한요소 모델은 이중성형부가 호스의 중심축에 대해 대칭인 형상을 가지고 있으므로 축대칭모델로 구성하였으며, 요소의 종류는 MARC™에서 축대칭요소인 [element type 10]을 사용하였다. 이 요소는 사각형, 등매개 요소로써 일반적으로 접촉문제에서 고차의 요소(higher order element)보다 더 선호되고 있으며, 강재뿐만 아니라 고무등과 같은 비압축성재료의 구성 방정식에도 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다.

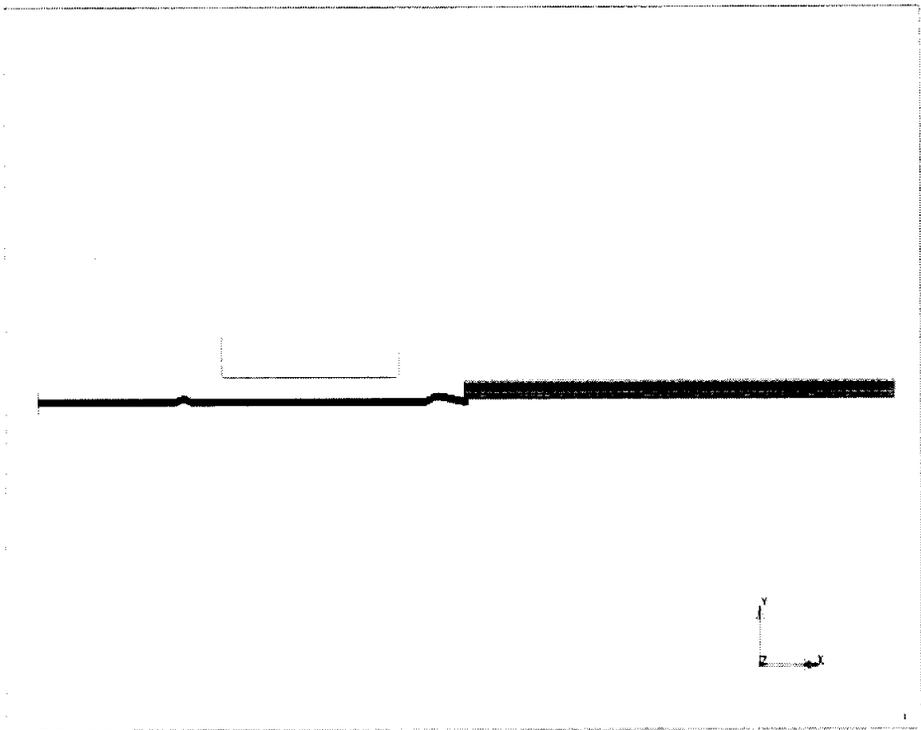


Fig. 9 Finite element model for hose assembly process

4-3. 재료물성 및 공정매개변수

본 연구에서 강재인 성형부의 물성치는 연결부 성형해석시 사용된 SPCC의 물성치를 그대로 적용하였고, 고무 재료의 물성치는 KIM⁽⁹⁾등에 의해 연구된 바 있는 조향장치용 고압호스에 사용되는 내면고무의 물성치를 적용하였다. Fig. 10은 해석에 사용된 고무재료의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 실험에서 구한 응력-변형률관계를 통해 다음 식(19)과 같은 2차 불변량 Mooney-Rivlin 모델(2nd order invariant model)을 적용하였다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (19)$$

Fig. 10의 응력-변형률선도로 부터 계산된 상수들은 Table 3과 같다.

Table 3 Calculated material constants of generalized Mooney-Rivlin model

C_{10}	C_{01}	C_{11}	C_{20}
0.242896	-0.0803997	0.00459959	0.0515058

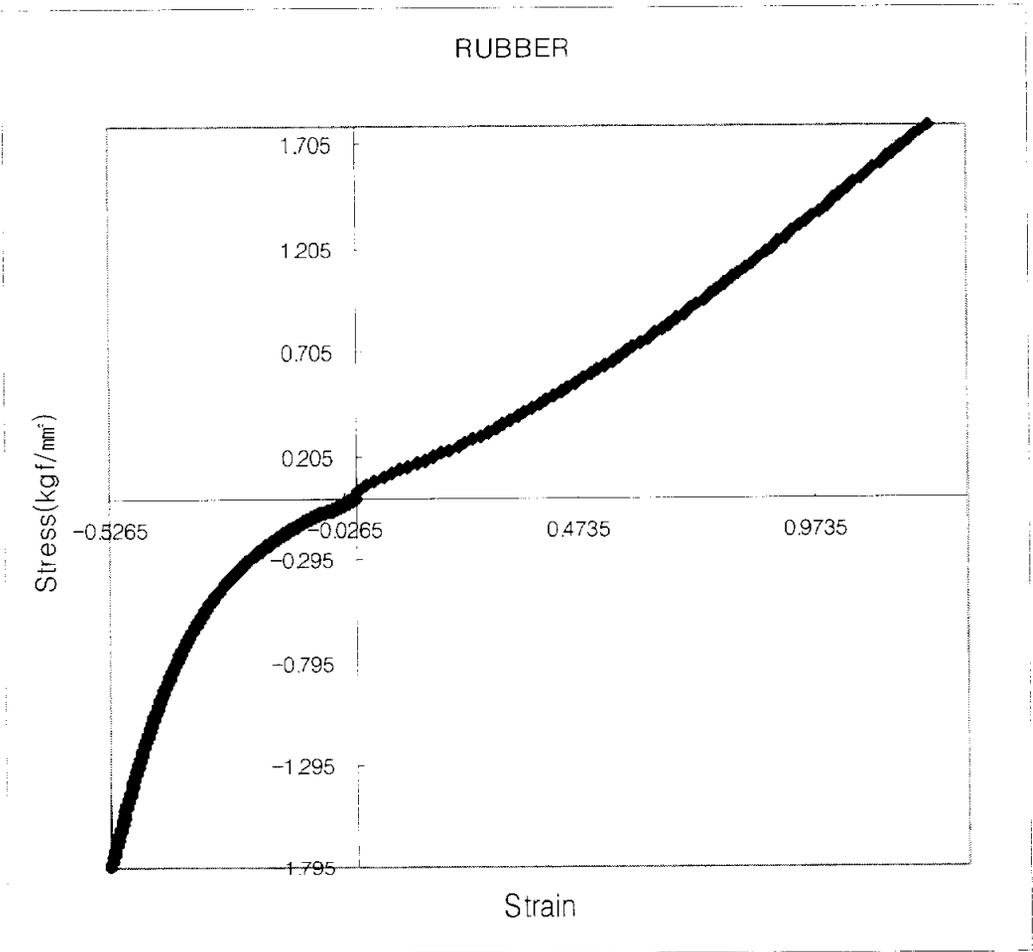


Fig. 10 Stress-Strain curve of rubber

Table 4는 호스조립공정해석에 사용된 공정매개변수를 나타내고 있다.

Table 4 Process geometries and simulation conditions

Parameter	Unit	Value	
workpiece material	-	tube	hose
		SPCC	rubber
clamp material	-	rigid body	
No. of nodes	ea	3259	
No. of elements	ea	2889	
temperature	℃	20	
No. of steps	-	1st	2nd
		120	80
friction coefficient	-	$\mu = 0.2$	

본 해석에서는 튜브의 마찰계수 μ 가 0.2일 때 접촉 수직력과 접촉 마찰력을 유한요소법으로 해석하였으며, 그 결과를 이용하여 고무호스의 이탈력을 추정하였다.

제 5 장 튜브 성형 실험

5-1 실험 내용

본 연구에서는 유한요소 해석의 결과를 검증해 보기 위해 실제 성형공정과 유사한 실험장치를 구성하고, 유한요소해석의 공정변수를 적용하여 실험을 실시하였다. Fig. 11과 Fig. 12에서는 자동차용 연료튜브의 연결부 성형형상을 나타내었으며, Fig. 13은 중요 관리치수를 나타낸 것이다.

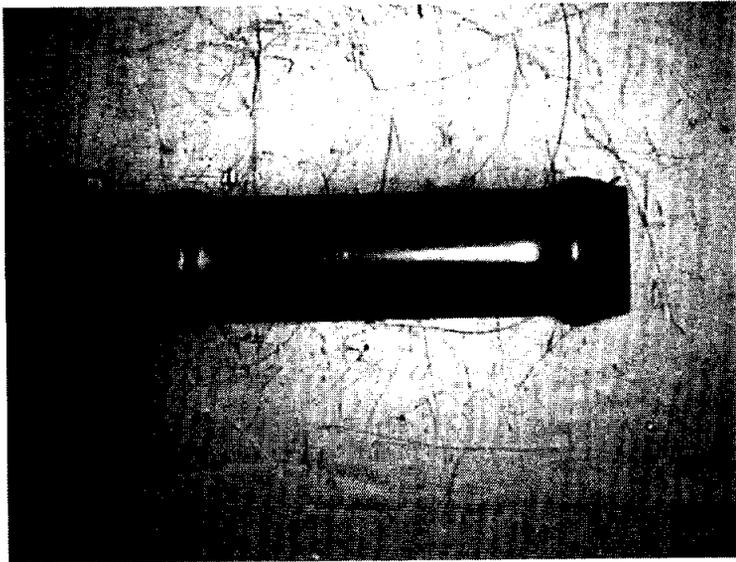


Fig. 11 Photo of tube with double flare

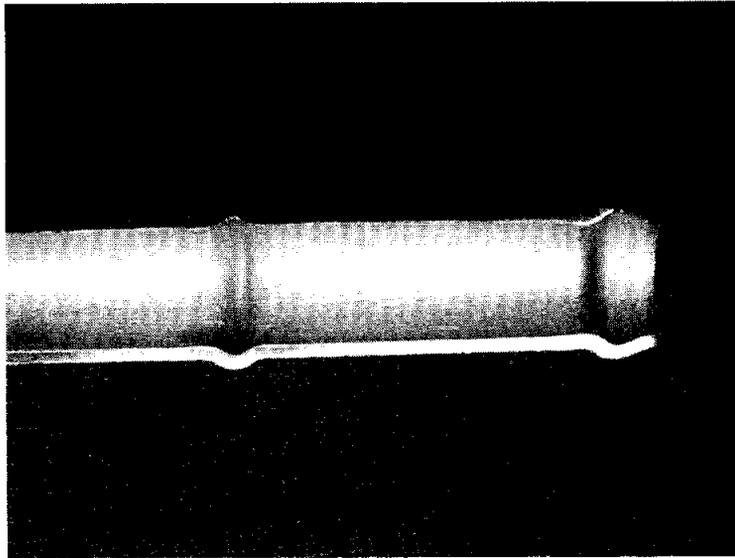


Fig. 12 Cross section of tube with double flare

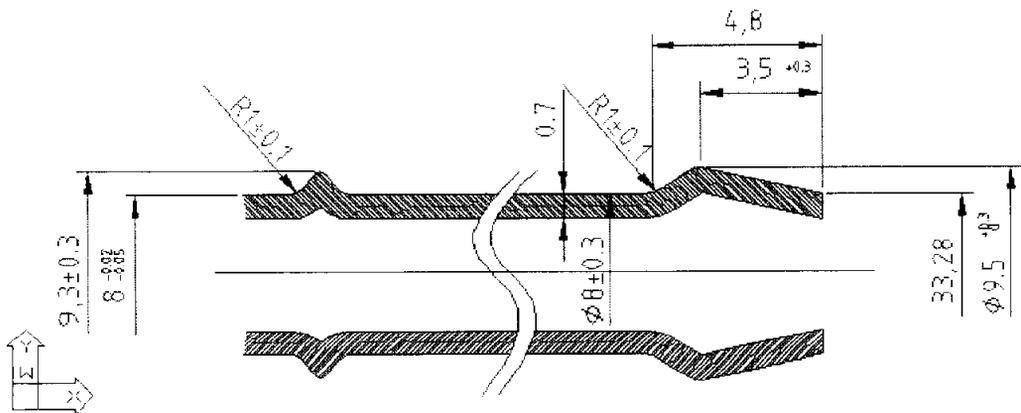


Fig. 13 Dimensions of double flare

5-2. 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 14와 같이 구성하였으며, 공압 실린더의 끝에 Top Die를 부착하여 Billet을 성형할 수 있도록 하였고, Top Die의 형상은 유한요소 해석에서 설계하였던 치수대로 금형을 제작하였다. Fig. 15와 Fig. 16은 실제 제작된 Top Die와 Bottom Die금형의 단면사진이다. Middle Die는 Bottom Die에 결합되어 있으며, 스프링의 힘으로 정위치를 찾을 수 있도록 하였다. 또한 Billet의 끝에 Load cell을 부착하여 Top Die가 Billet에 미치는 하중을 측정할 수 있도록 하였으며, 결과값을 해석치와 비교해 보았다.

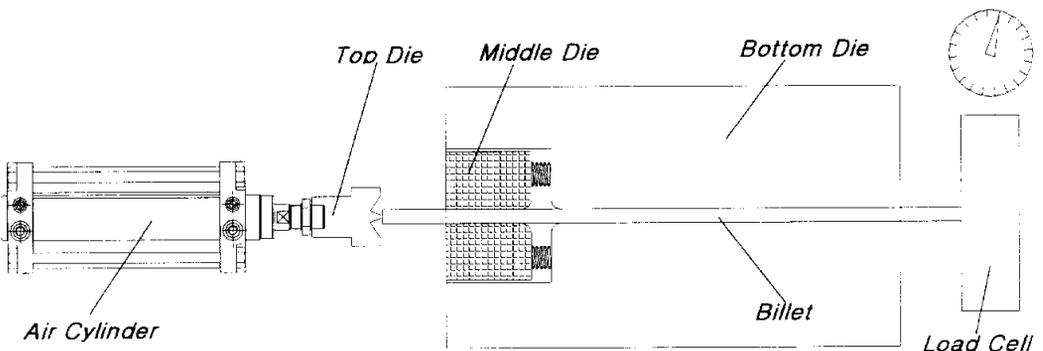


Fig. 14 Schematic diagram of double flare forming system

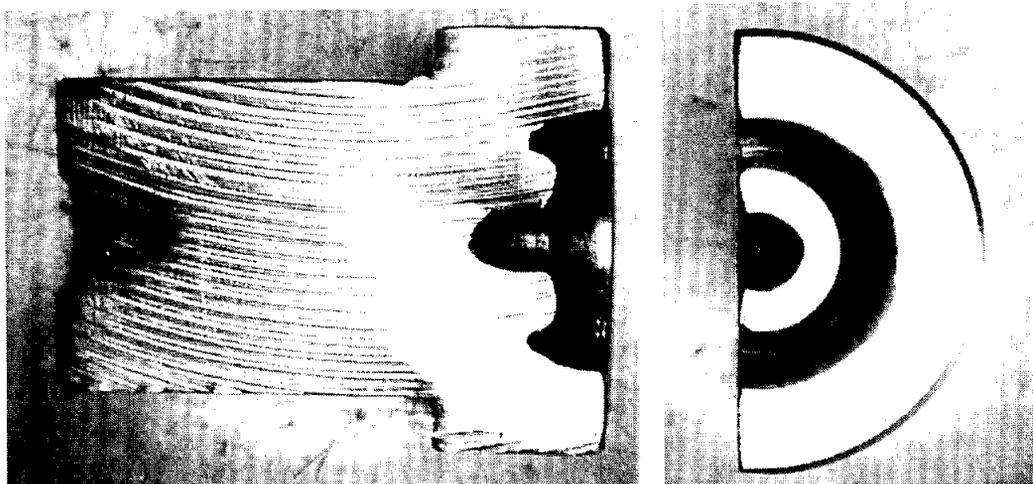


Fig. 15 Cross section of top die

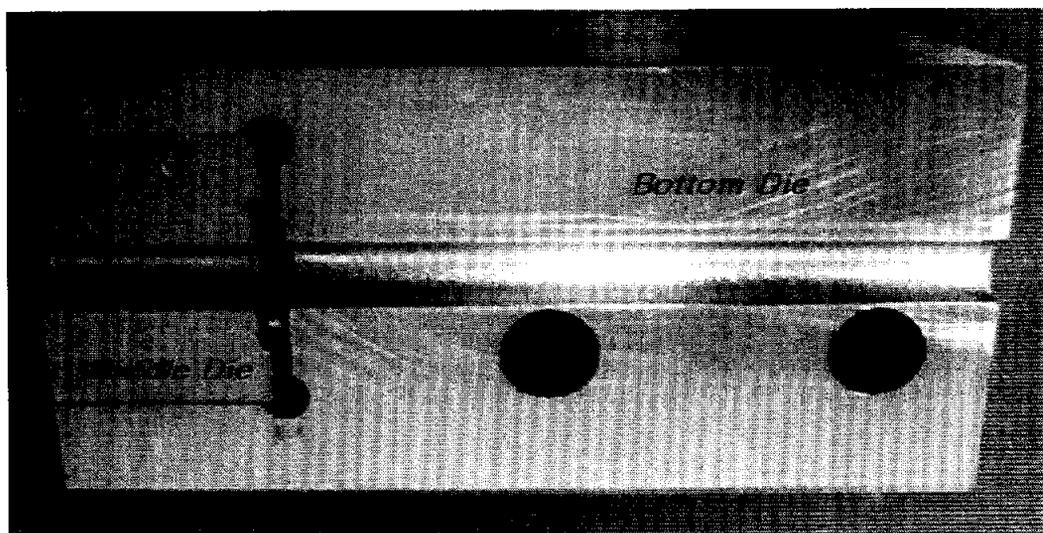


Fig. 16 Cross section of bottom and middle die

본 실험에 사용된 장비는 휠(Wheel)의 작동에 의해 램의 왕복운동이 이루어지는 휠 타입 성형기를 사용하였다. Fig. 17은 실험에 사용된 수평식 휠 성형기의 사진이며, Fig. 18은 성형기에 금형이 부착된 모습을 나타낸 것이다. 튜브가 Bottom Die 외부로 돌출되는 길이를 정확하게 제어하기 위해 다이의 앞부분에 길이조정용 센서를 부착하여 돌출길이를 제어하였다.

사용된 금형은 소재와 접촉하는 성형부가 허용공차 이상으로 마모될 때까지 파손되지 않아야 하므로 냉간 단조용 금형 재료로 일반적으로 사용되는 SKD11종을 사용하였으며, HRC 60 정도로 열처리 하였다. Bottom Die는 \varnothing 8mm 튜브 소재를 정확하게 클램핑(clamping) 하기 위해 반경 3.97mm의 홈을 방전가공 하였으며, 중앙부에 \varnothing 12mm가이드 핀을 조립하여 정확한 클램핑을 유도하였다.

튜브의 밀림을 방지하기 위해 홈의 중간에 0.05mm의 턱을 가공하였고, 돌출길이를 5.0~8.0mm까지 0.5mm 간격으로 변화시키면서 각각의 과정마다 3회씩 반복 실험하였다.

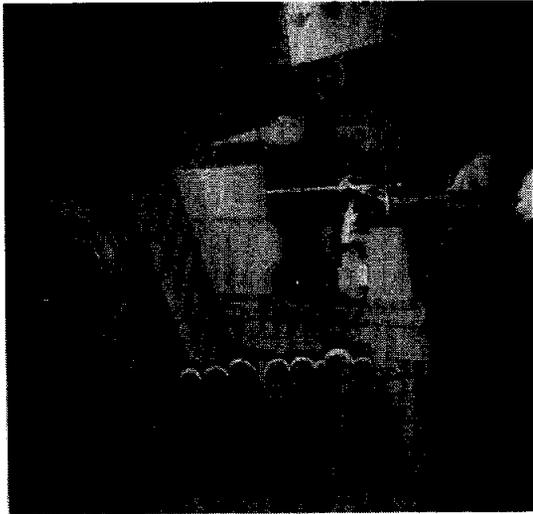


Fig. 17 Photo of wheel type press

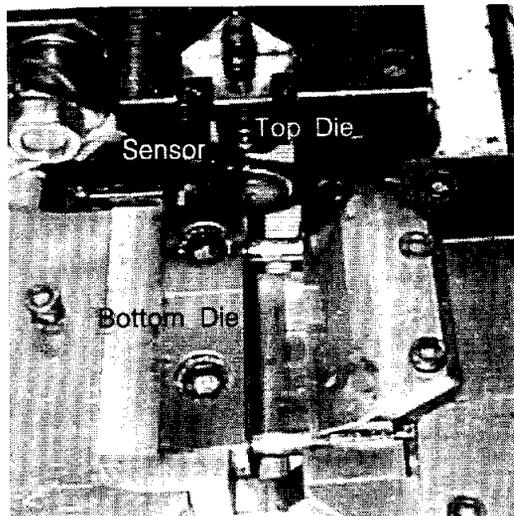


Fig. 18 Photo of experimental system

제 6 장 결과 및 고찰

6-1. 이중사두 성형공정의 해석결과

최적의 예비형상을 찾기 위해 유한요소해석을 통해 재료의 돌출길이를 변화시키면서 해석을 해 본 결과 1차 성형공정에서는 다음과 같은 형상과 응력분포를 얻을 수 있었다. Fig. 19 ~ Fig. 24는 다이 끝에서 재료의 돌출길이를 5.0, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0mm로 변화시키면서 Top Die가 Middle Die에 닿을 때까지의 1차 공정을 해석한 결과이다.

머리부 형상의 중앙부에서 응력이 가장 많이 발생함을 볼 수 있으며, 돌출길이 8mm의 경우 돌출길이의 과다로 높은 응력이 발생하고 플래시(flash)를 형성함을 알 수 있었다. 돌출길이 5mm의 경우에는 성형형상이 제대로 형성되지 않았다. 성형된 사두형상의 최대 직경크기를 이용하여 최적의 돌출길이를 얻기 위한 작업으로써 식 (20)과 같은 선형 보간식을 써서 해를 구해 보았다.

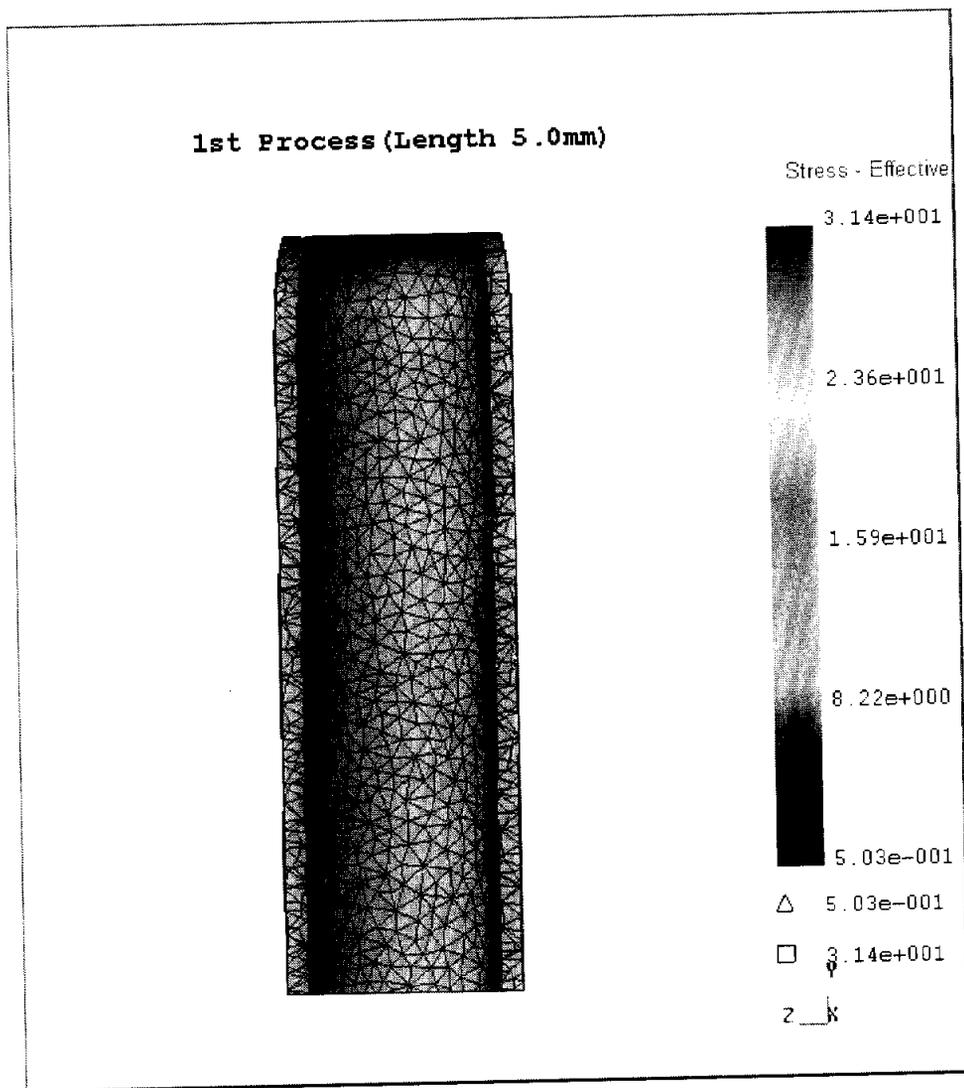


Fig. 19 Distribution of effective stress after the 1st process
(Protrusive length : 5.0mm)

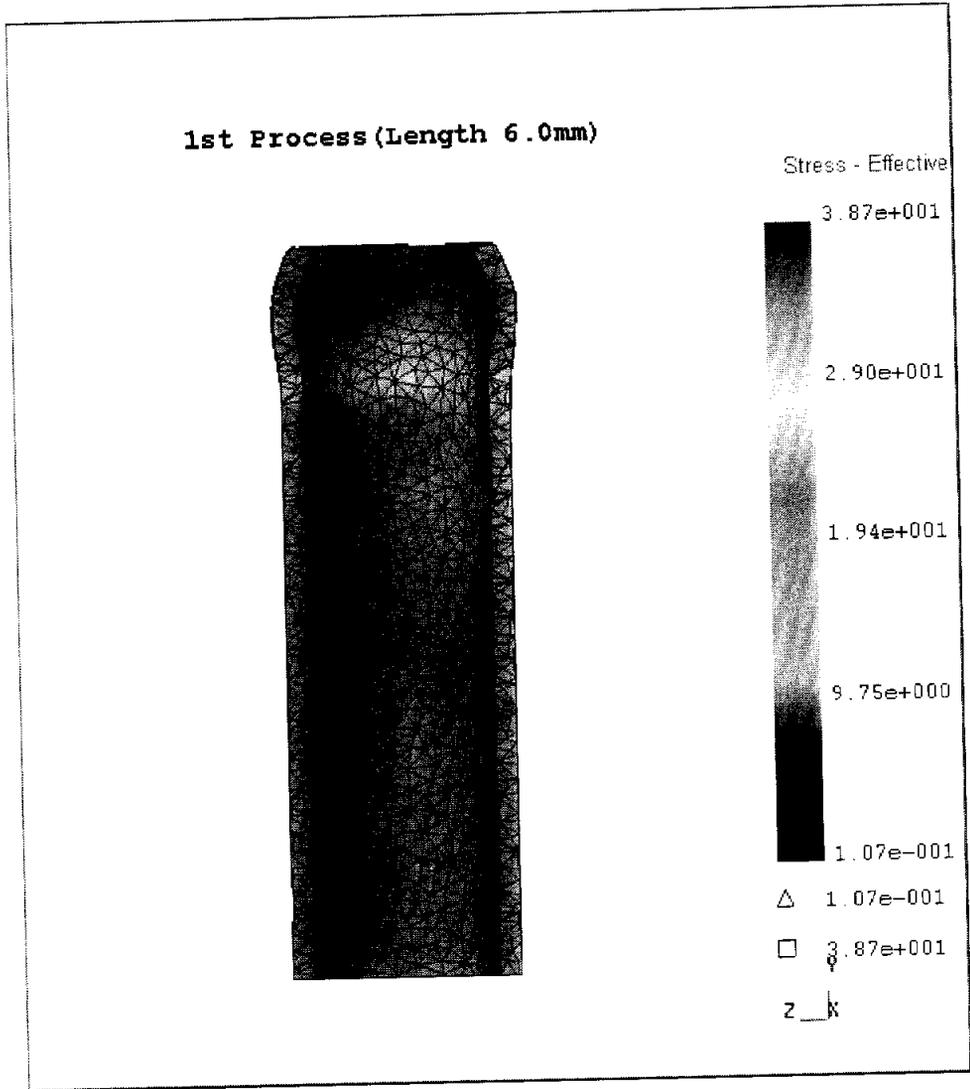


Fig. 20 Distribution of effective stress after the 1st process
(Protrusive length : 6.0mm)

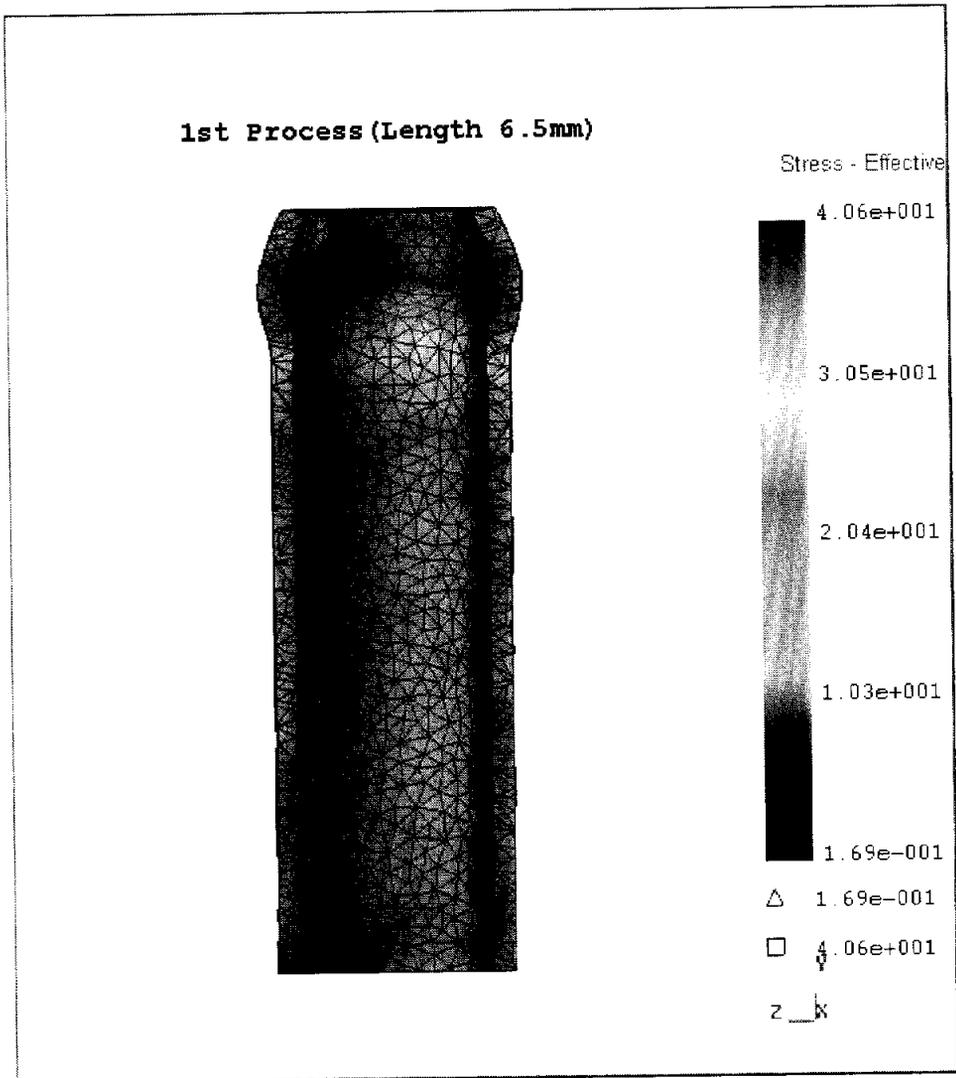


Fig. 21 Distribution of effective stress after the 1st process
(Protrusive length : 6.5mm)

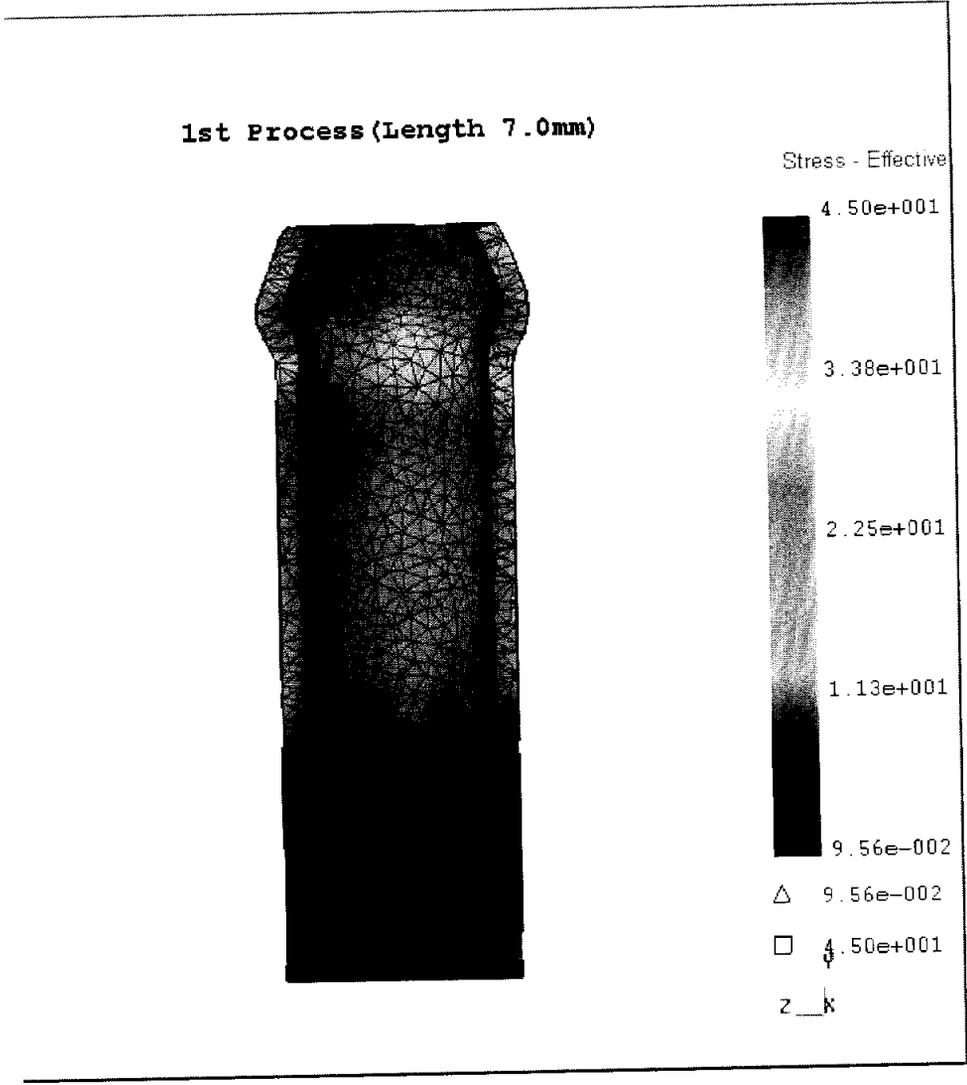


Fig. 22 Distribution of effective stress after the 1st process
 (Protrusive length : 7.0mm)

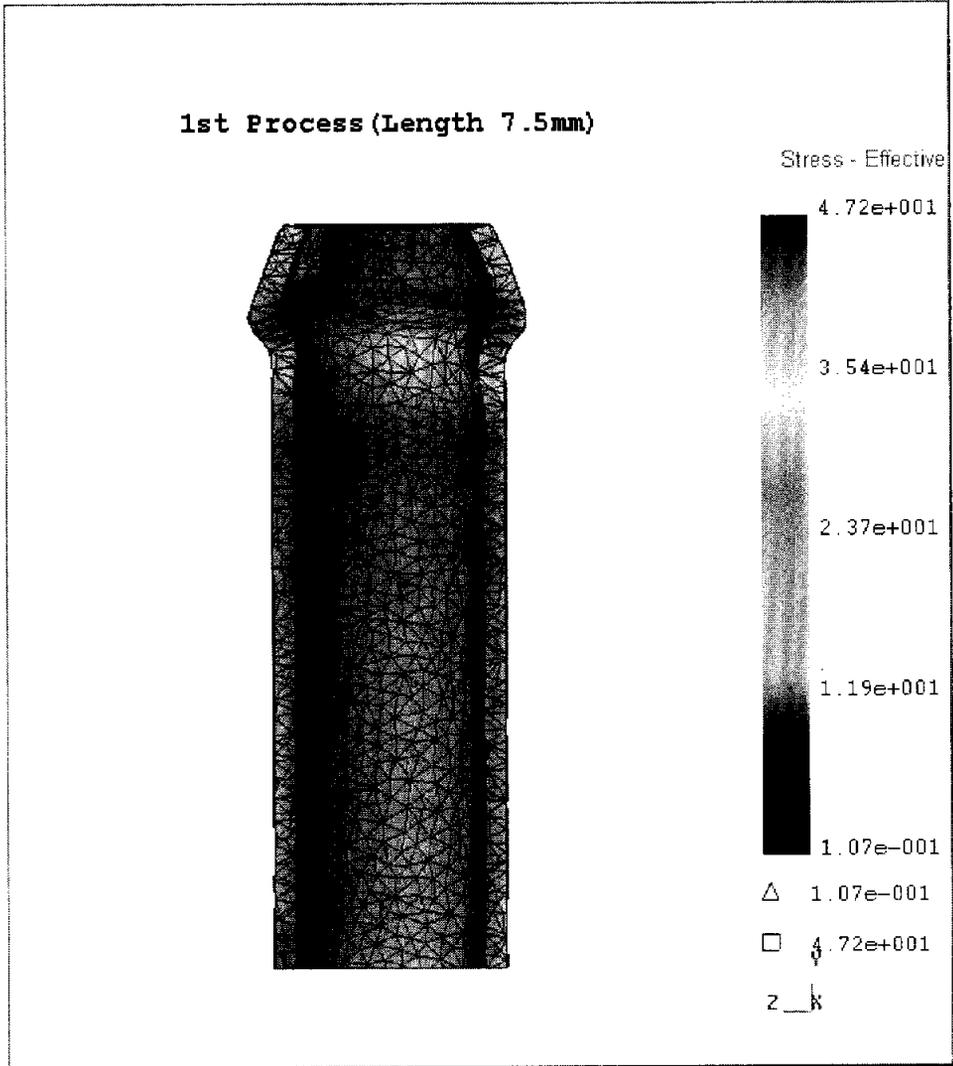


Fig. 23 Distribution of effective stress after the 1st process
(Protrusive length : 7.5mm)

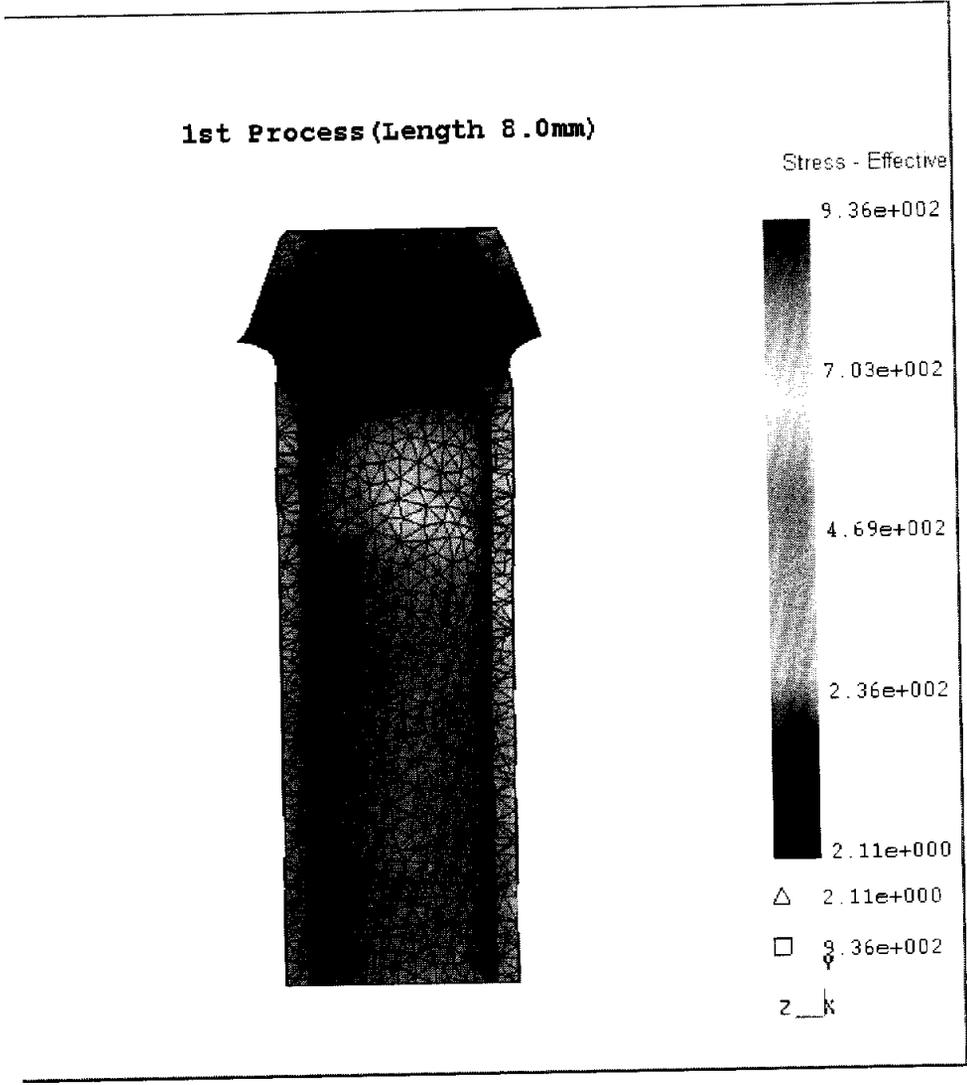


Fig. 24 Distribution of effective stress after the 1st process
(Protrusive length : 8.0mm)

Fig. 25는 1차 성형공정시 돌출길이변화에 따라 Top Die에 걸리는 최대 하중을 비교한 그래프이다. 보이는 바와 같이 5mm에서 7.5mm까지는 하중의 변화가 완만하나 8mm에서 갑자기 큰 하중이 걸리게 되므로 예비형상의 설계시에 1차 성형공정의 돌출길이를 7.5mm가 넘지 않도록 하는 것이 좋으며, 성형치수를 제외한 하중만을 감안했을 경우에는 7.0mm~7.5mm사이가 최적의 돌출길이라고 사료된다.

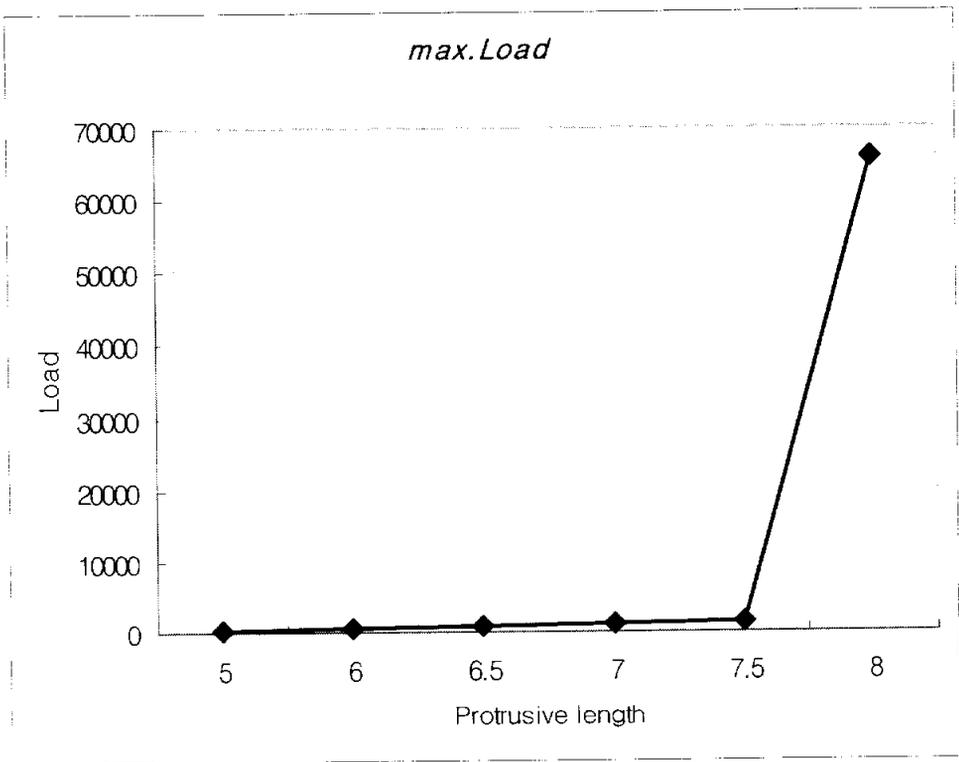


Fig. 25 Relation of the protrusive length and maximum load in the 1st process

Fig. 26은 1차 성형공정시 돌출길이 변화에 따른 최대 직경을 비교한 그래프이다. 도면상의 치수를 얻어낼 수 있는 최적의 예비형상을 찾기 위해 식 (20)과 같은 선형 보간식을 써서 계산한 결과 돌출길이를 7.41mm로 했을 경우 도면상의 직경치수인 9.5mm를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

$$f(x) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (20)$$

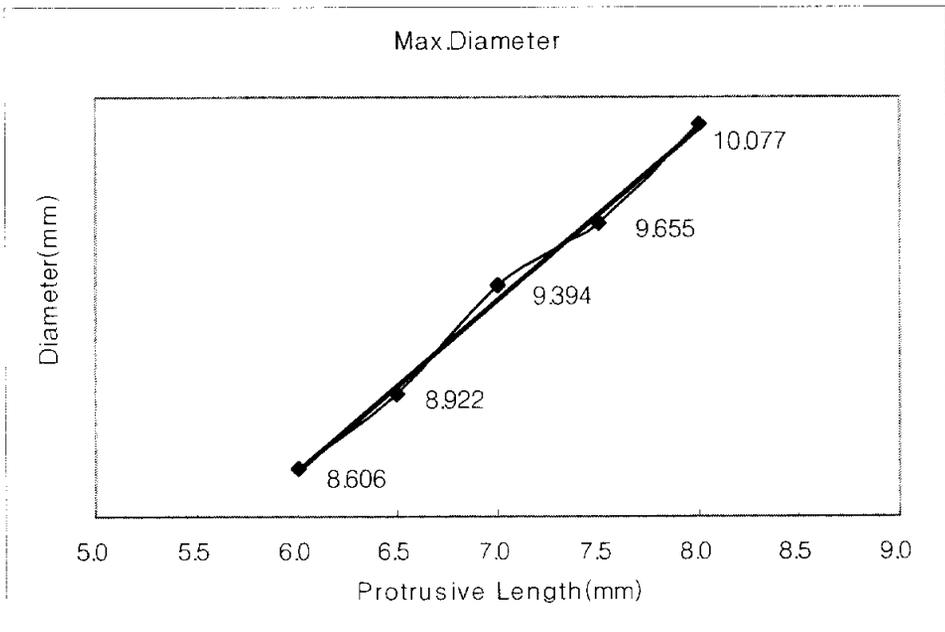


Fig. 26 Relation between maximum diameter and protrusive length

같은 방법으로 2차성형공정에서의 예비형상 즉, Middle die와 Bottom die

의 간격을 시뮬레이션으로 알아본 결과 2.1mm가 적당한 것으로 나타났다. Fig. 27은 예비형상 설계시에 계산된 최적의 돌출길이를 성형했을 경우 최종 공정의 완료 후에 나타나는 형상을 보여주고 있다.

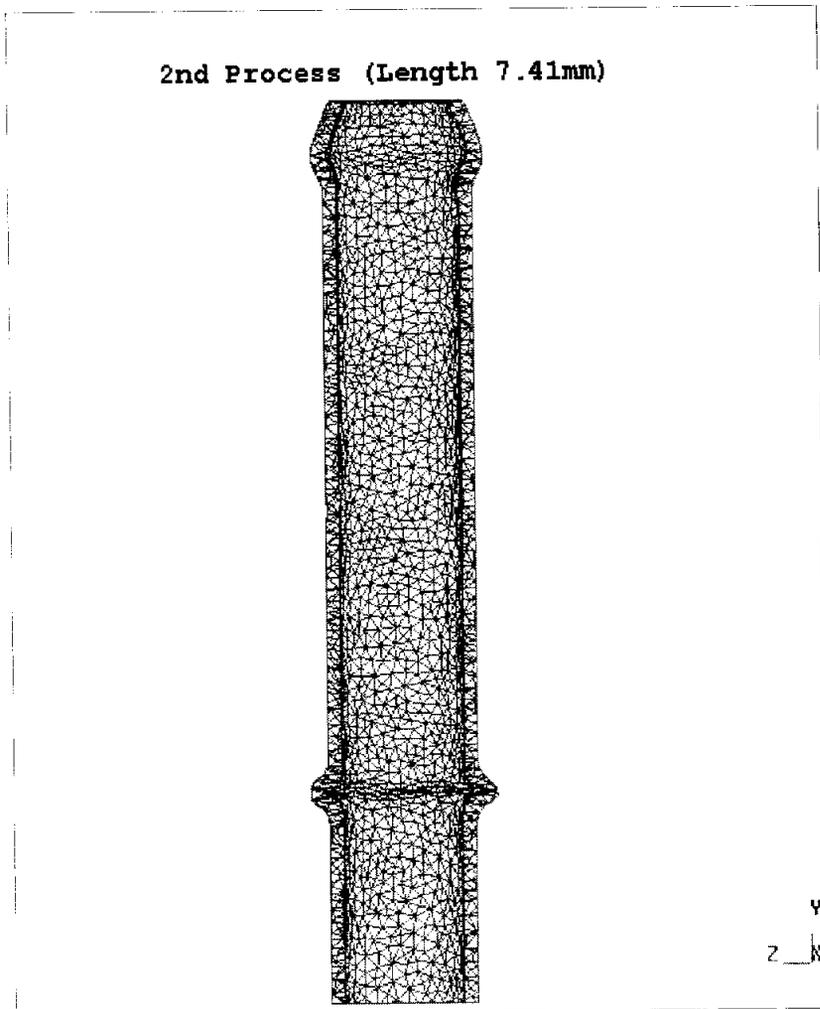


Fig. 27 Shape of double flare after the 2nd process
(Protrusive length : 7.41mm)

Fig. 28은 1차 성형과 2차 성형이 차례로 이루어질 때 Top Die 와 Middle Die에 걸리는 하중을 나타낸 그래프이다. Step 30부근에서 튜브 표면이 Middle Die에 닿아 Middle Die에 하중이 걸리는 것을 알 수 있으며, Step 70 부근에서 Top Die의 하중은 감소하고, Middle Die의 하중은 증가하는 것으로 보아 Top Die와 Middle Die의 접촉이 일어남을 알 수 있다. 이때 실험 초기에 예상하였던 것과는 달리 급격한 하중변화는 일어나지 않았다. Step 75 이후부터는 Top Die의 하중은 일정하게 유지되고, Middle Die의 하중만이 증가함을 볼 수 있다. 이 부근에서 1차 성형부의 성형이 끝나고, 2차성형이 이루어짐을 알 수 있다.

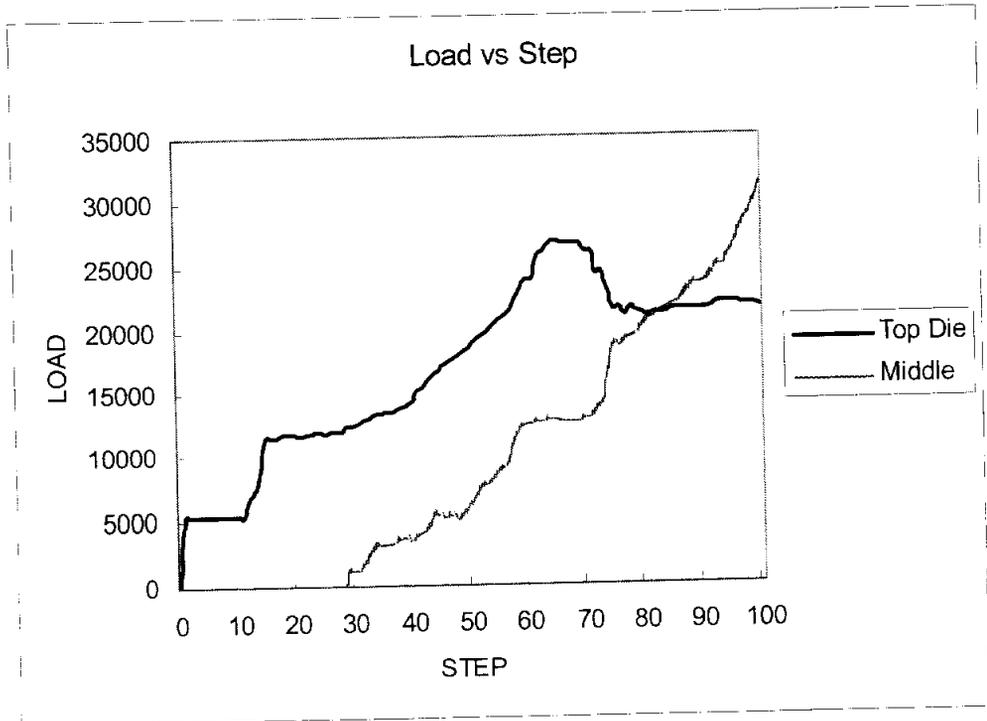


Fig. 28 Simulated load-step curve
(Protrusive length : 7.41mm)

6-2 실험결과와 해석결과와의 비교

실험 결과 유한요소 해석의 재료유동과 거의 흡사한 경향을 보이고 있으며, 유한요소해석시의 최적돌출길이인 7.41mm의 경우 역시 Fig. 29에서 보인 바와 같이 유사하게 나타났다. 이로써 유한요소 해석을 이용하여 실제 공정에 가까운 시뮬레이션을 해봄으로써 시행착오를 겪지 않고도 최적의 금형을 설계할 수 있었다.

2nd Process (Length 7.41mm)

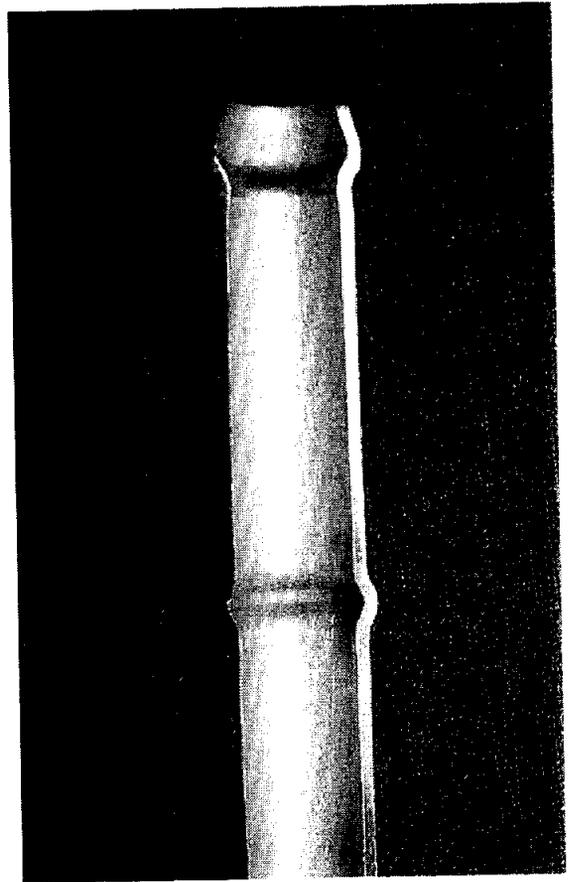
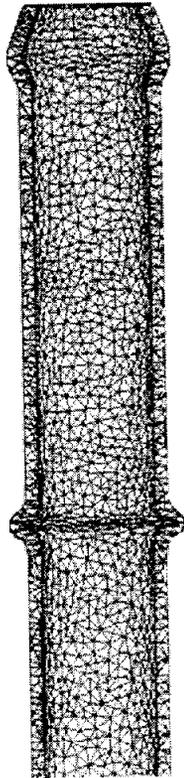


Fig. 29 Comparison of analysis result and experimental result

Fig. 30과 Fig. 31은 실제 휠 성형기를 이용하여 돌출길이를 각각 6.0mm와 8.0mm로 성형하였을 경우 실제 제품사진과 해석 후 재료의 변형결과를 비교한 것이다.

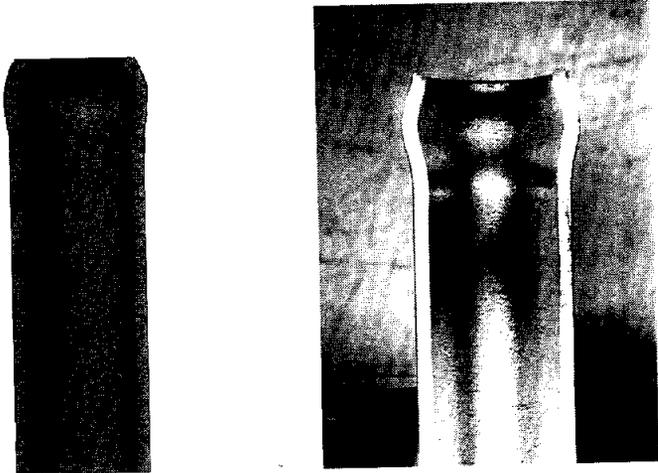


Fig. 30 Photo of tube with double flare after 1st process (5.0mm)

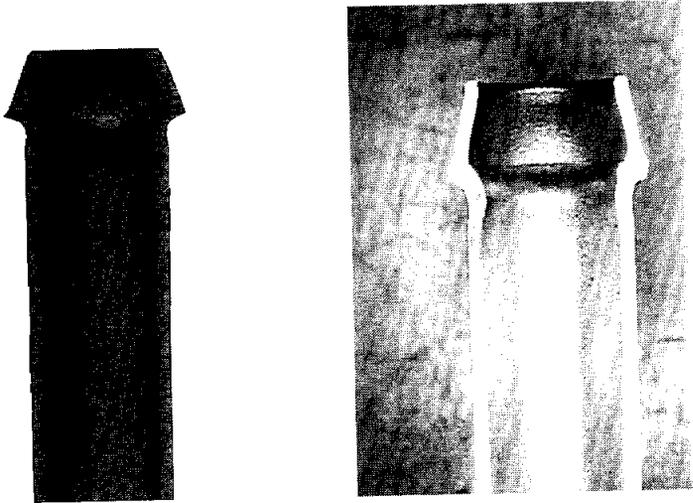


Fig. 31 Photo of tube with double flare after 1st process (8.0mm)

6-3. 호스조립공정의 해석결과

본 해석에서는 호스가 튜브에 조립되는 1차공정과 조립된 호스위에 클램핑을 하는 2차공정으로 나누어 해석하였으며, 1차공정의 스텝수는 120개, 2차공정에서는 80개로 나누어 총 200단계로 해석하였다. Fig. 32는 1차 공정의 마지막 단계인 Step 120에서 호스가 성형부에 삽입된 상태를 나타낸 것이고, Fig. 33은 2차 공정의 마지막 단계인 클램프가 고무호스를 누르고 있는 상태를 보여주고 있다.

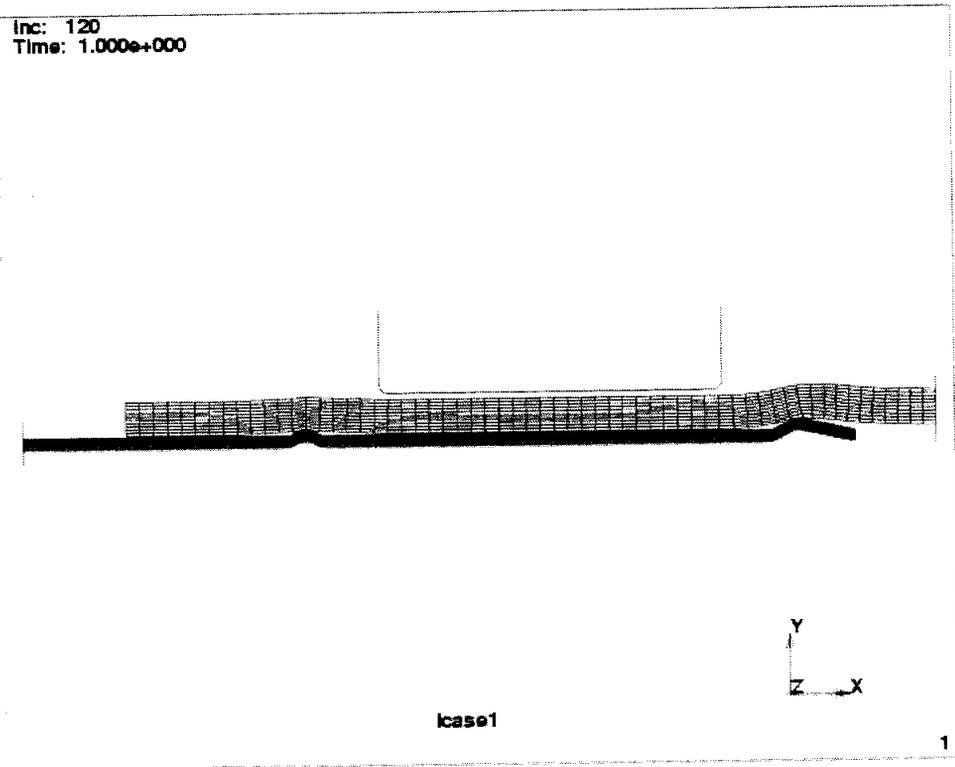


Fig. 32 Hose assembly condition at step 120

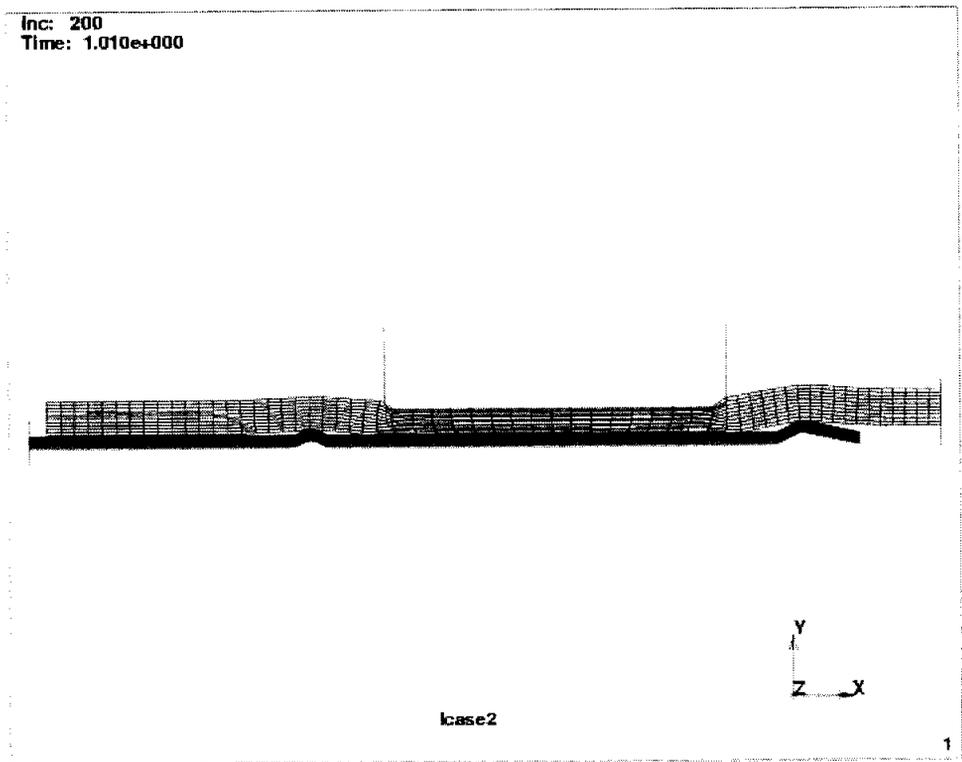


Fig. 33 Hose assembly condition at step 200

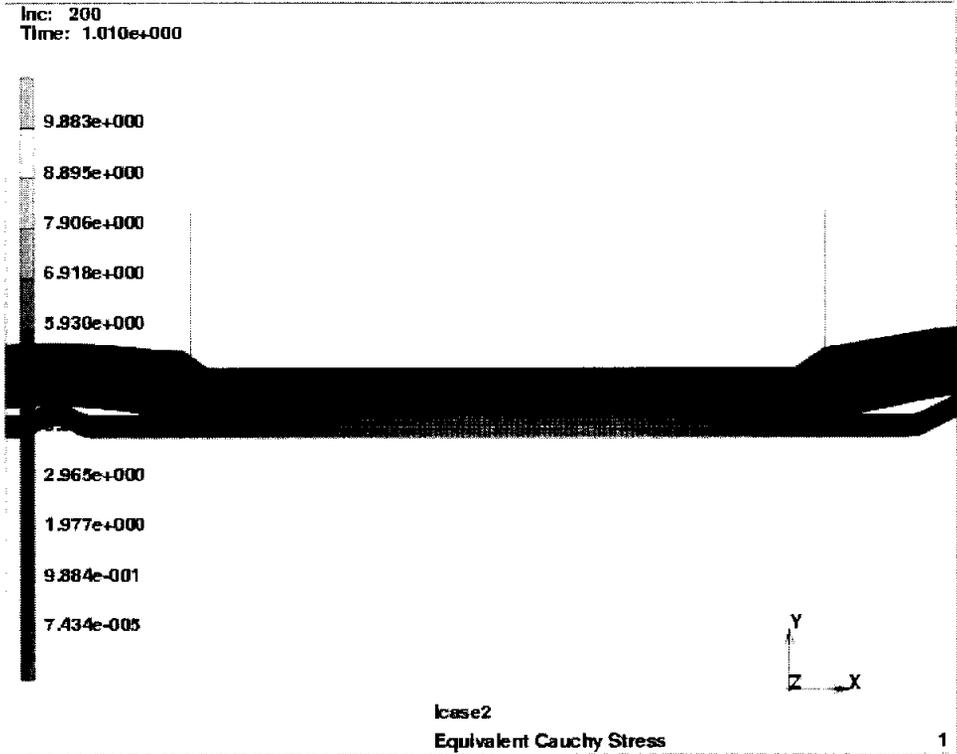


Fig. 34 Distribution of equivalent Cauchy stress in double flare

Fig. 34는 클램프의 최대전진 시점에서 성형부와 고무호스에 걸리는 응력을 나타낸 그림이다. 발생하는 응력을 살펴보면, 성형부에서 상당히 큰 응력이 나타남을 알 수 있으며, 그림상으로 명확하지는 않으나 최대응력이 발생하는 구역은 성형부 상에서 클램핑에 의해 힘이 걸리는 부분의 중앙부로 나타났다.

고무호스의 이탈력을 구하기 위하여 고무호스의 접촉부분에서 발생하는 접촉수직력과 접촉마찰력을 살펴본 결과 Fig. 36과 Fig. 37에서 보이는 바와 같이 나타났으며, Fig. 38과 Fig. 39는 접촉노드에서 발생하는 수직력 및 마찰력 수치를 그래프로 나타낸 것이다. 접촉 수직력의 최대치는 node 2660에서 $40.2kg_f$ 이며, 접촉면에서 발생하는 수직력의 총합은 $597kg_f$ 이다.

Fig. 39의 마찰력 그래프에서 마찰력이 음의 값을 보이는 이유는 클램핑력이 작용하는 중앙부에서 고무가 좌우로 밀려 나가기 때문이라 사료되며 따라서 마찰력을 이탈력으로 간주하지 않아도 되며 이탈력과 접촉수직력의 관계는 식(21)의 쿨롱의 마찰법칙에 의해 결정되어진다.

$$F = \mu N \quad (21)$$

여기서, μ 는 마찰계수이고, N 은 접촉수직력을 의미한다. 따라서 호스의 최대 이탈력은 $119.4 kg_f$ 이다. 같은 방법으로 머리부분에만 하나의 돌출형상을 가진 연결형상에 대하여 이탈력을 구해본 결과 $92.4kg_f$ 로 이중성형에 비해 이탈력이 현저히 적음을 알 수 있었다. 따라서 머리부 형상을 두개로 하는 것이 하나일 때 보다 안전하다는 것을 알 수 있었다.

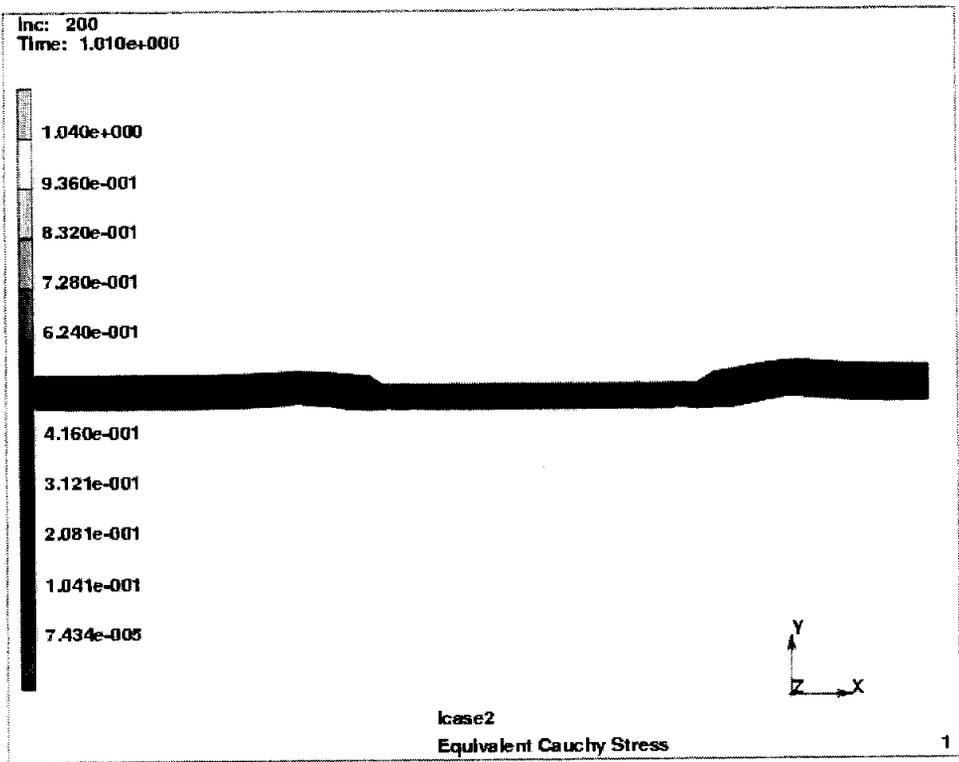


Fig 35 Distribution of equivalent Cauchy stress in hose

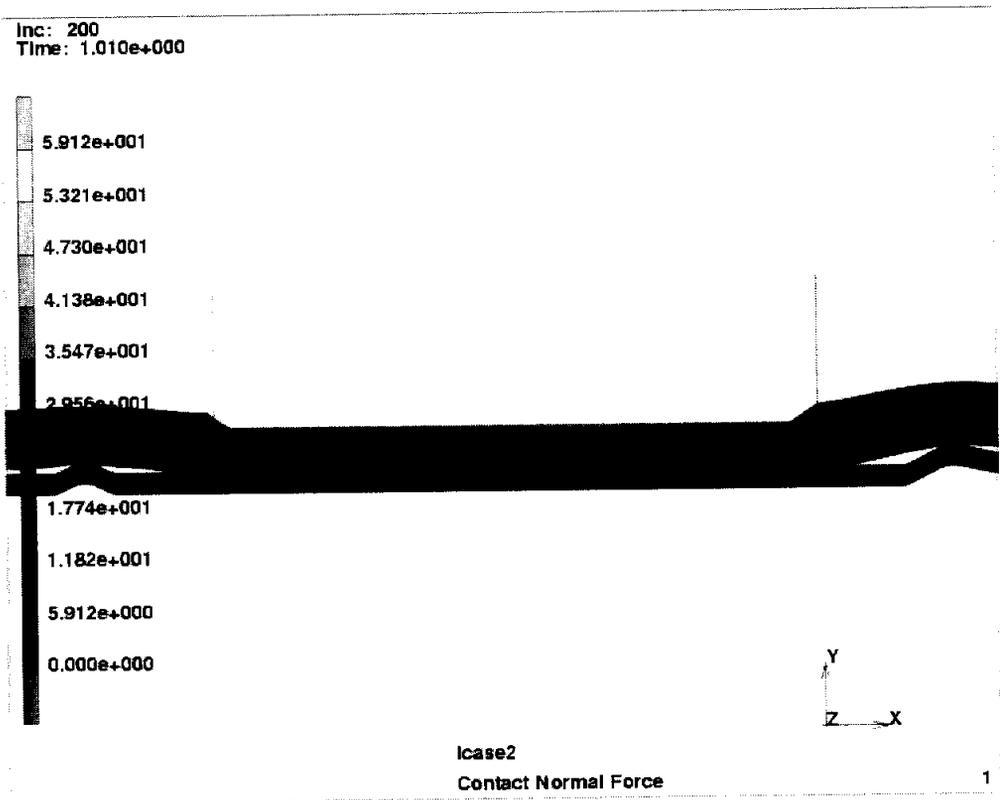


Fig. 36 Contact normal force on double flare

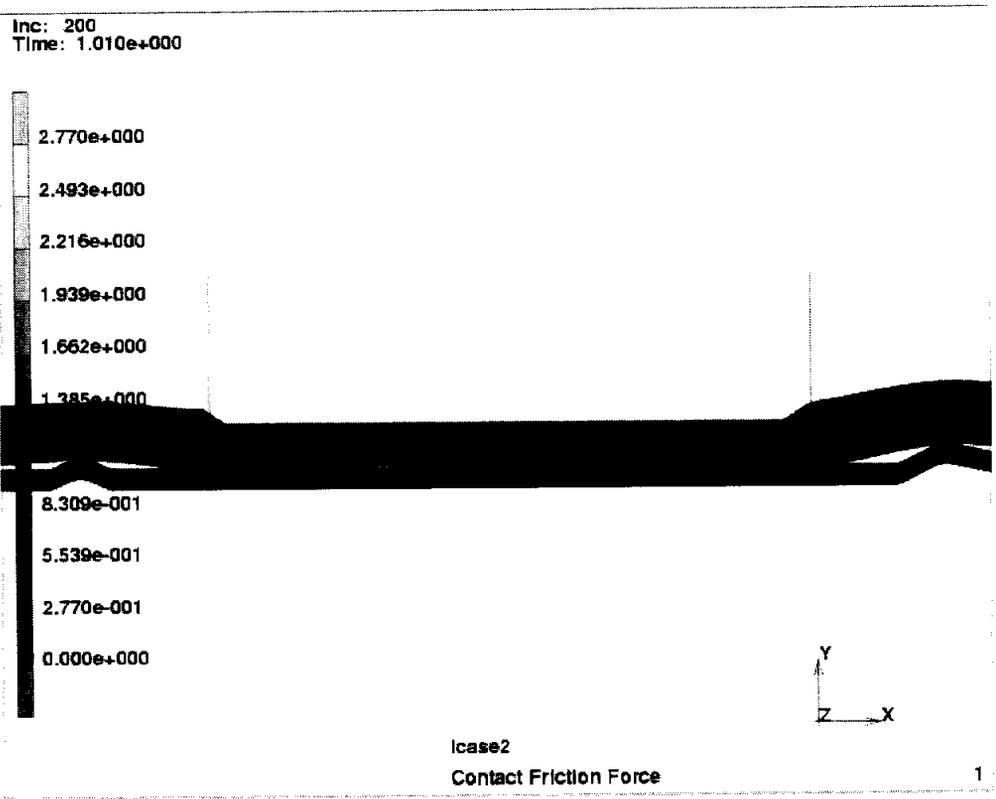


Fig. 37 Contact friction force on double flare

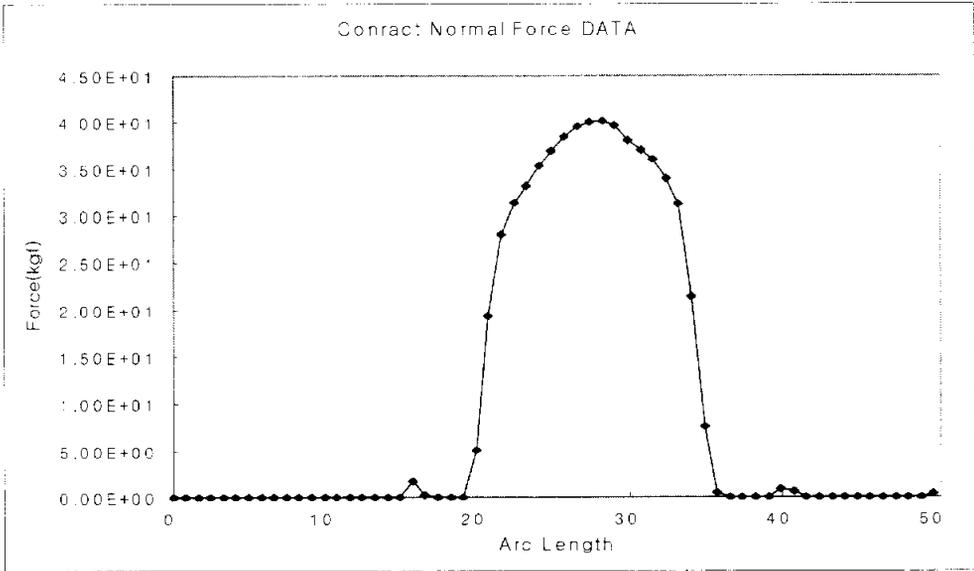


Fig. 38 Distribution of contact normal force between double flare and hose

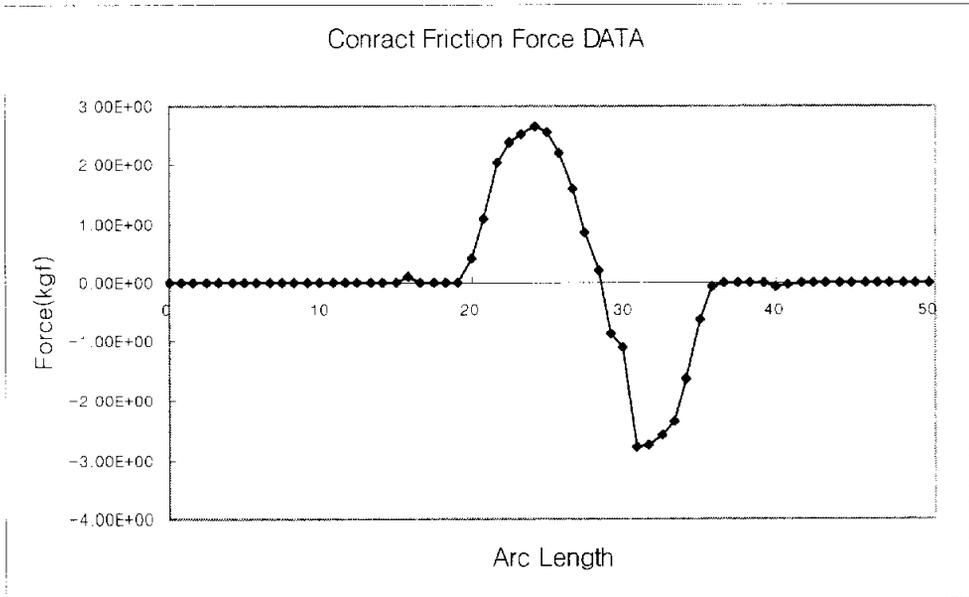


Fig. 39 Distribution of contact friction force between double flare and hose

제 7 장 결 론

본 연구에서는 자동차 연료 시스템에 사용되는 스틸튜브의 연결부 제조공정에 있어서 연결부 형상의 성형을 위한 냉간단조공정을 상용 유한요소해석 코드인 DEFORM™-3D를 이용하여 해석하였고, 해석결과를 활용하여 최적의 형상을 성형할 수 있는 금형을 개발하였으며, SPCC강재 실험시편의 성형 실험을 통하여 해석결과를 검증해 보았다. 또한 성형된 형상과 고무호스의 조립과정을 범용 유한요소해석코드인 MARC™를 활용하여 해석해보고, 이를 통해 이탈력을 추정해 보았다. 상기와 같은 실험과 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 자동차용 연료튜브 연결부의 이중성형 형상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 결함을 예측하고, 성형을 위한 최적의 금형을 설계할 수 있었다.
- 2) 1차 공정에서의 돌출길이 즉, 예비성형부의 크기는 7.41mm가 가장 적합하고 2차성형부의 높이를 결정하는 Middle Die와 Bottom Die의 높이는 2.2mm가 적당하며 1차 성형부의 중앙부에서 가장 큰 응력이 발생함을 알 수 있었다.
- 3) 연결부의 이중형상과 호스의 조립공정을 해석하여 호스의 이탈력을 추정할 수 있었으며, 일반형상과 이중형상의 이탈력을 비교해 본 결과, 이중형상에서의 이탈력이 크게 나타남으로써, 이중형상이 호스의 이탈측면에서 안전함을 입증하였다.

참 고 문 헌

- 1) Taylan Altan, S.I. Oh, and Harold L. Gegel., "Metal Forming: Fundamentals and Applications", ASM Serise in Metal Processing, 1983.
- 2) S. Kobayashi, and J. H. Kim, "Deformation Analysis of Axisymmetric Sheet Metal Forming Process by Rigid-Plastic Finite Element Method", Mechanics of Sheet Metal Forming(Edited by D.P. Koistinen et al.), Plenum Press, pp,341-365., 1978.
- 3) C.H. Lee. and S. kobayashi. "New Solutions to Rigid Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method", Trans of ASME, J. of Eng. for Industry, pp.865-876, 1973.
- 4) MSCsoftware "MSC. MARC Volume A: Theory and User Information", MSC Software Corporation, U. S. A., 2000.
- 5) 전만수, "단조시물레이션 기술의 이론 및 응용사례", 단조시물레이션기술의 현재와 미래 워크숍, 1998.
- 6) D. R. Yang, "A study on the Computer Aided Design of Dies and Forming Process for Precision Cold Forging", 과학기술처, 1998.
- 7) 김동원, "塑性學", 청문각, 1986.
- 8) 조영석, "유한요소법을 이용한 자동차용 브레이크 튜브 관단부의 단조공정 해석", 공학석사 학위논문, 2003.

- 9) 김형제, 김병탁, “마찰계수가 호스의 이탈력에 미치는 효과”, 한국기계가 공학회 2003년 춘계학술대회논문집, pp.206-212.
- 10) D. K. Min, M. E. Kim, A study on precision cold forging process improvements for the steering yoke of automobiles by the rigid-plastic finite-element method”, Journal of Materials Processing Technology 138, pp.339-342, 2003.
- 11) 한국공업규격 KS R 2028
- 12) Jeffrey Fluhrer, “DEFORMTM3D Version 4.0 User’s Manual”, Scientific Forming Technologies Corporation, 2002.

감사의 글

한편의 논문을 마무리하면서 연구자로서 걸음에 도움을 주신 여러분들께 감사의 마음을 전합니다. 여러 해 동안 논문을 지도해 주시고, 연구자의 자세를 가르쳐 주신 한규택 교수님께 감사드리며, 논문이 나오기까지 교정 및 심사를 하시느라 고생하신 오명석 교수님, 진인태 교수님께도 고마움을 금할 길이 없습니다. 그리고 학교 생활동안 많은 지도와 도움을 준 찬용과 영석에게도 고마움을 전합니다. 일과 공부를 병행할 수 있도록 도와주신 부국산업 오현옥 차장님, 바쁘신 와중에도 시간을 내시어 논문에 대해 많은 조언을 주신 최형태 연구원과 부국산업 직원들께도 감사드리며, 실험을 도와준 ICAMS 후배들에게도 고마움의 인사를 드립니다. 그리고 논문의 완성에 많은 도움을 주신 CASA Lab. 김병탁 교수님과 김형제님께도 감사드립니다. 항상 애정으로 지켜봐주신 정영득 교수님의 제자사랑에 감사드리며, 성실성을 존경합니다. 동거동락하며 힘이 되어준 원식, 잦은 심부름도 묵묵히 잘 해줬던 석태와 소원, 현란한 입담과 춤으로 학교생활에 즐거움을 준 정민, 실험실 생활을 잘 따라준 동규, 민수, 효운, 기태, 주환, 때로는 가까이서 때로는 멀리서 힘이 되어 준 친구 언중, 종선 모두 고맙다. 그리고 이름을 나열하지는 못하지만, 묵묵히 뒤에서 지켜봐 주신 선배님, 후배님들 모두 고맙습니다.

부모님 대신으로 아껴주고 보살펴 주신 누님들, 자형들 그리고 삼촌이라고 잘 따라준 조카들에게 오늘에 영광을 돌립니다. 비록 멀리 떨어져 있어 자주 만나진 못하지만, 사랑하는 맘으로 내 일을 자기일처럼 챙겨주고 지켜봐준 예쁜 영아! 사랑합니다.

마지막으로 오늘에 내가 있는 원동력이 되었으며, 항상 바른 길을 갈 수 있도록 천상에서 지켜주시는 아버지. 어머니 영전에 삼가 이 논문을 바칩니다. 짧지 않은 기간 동안 많은 분들의 도움으로 작은 결실을 맺게 되었음에 다시 한번 모든 분들께 감사의 인사를 올립니다.

주어진 일에 최선을 다하며, 항상 바른 길을 걷도록 노력하는 사람이 되겠습니다.