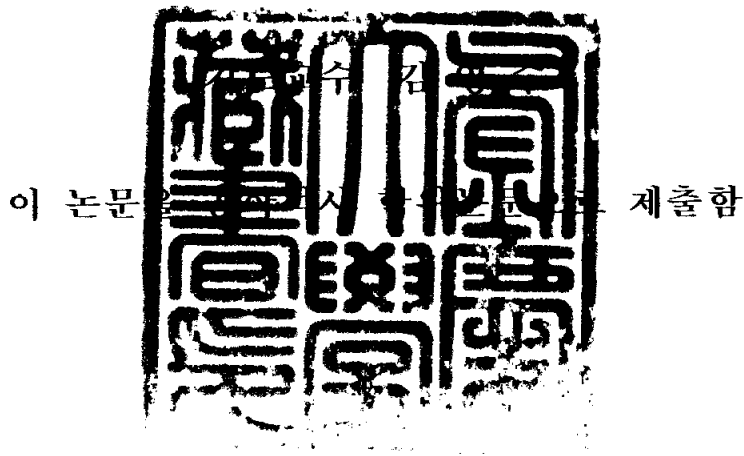


공학석사 학위논문

인서트몰딩을 이용한 볼조인트 개발에 관한 연구



2003년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

김 상 우

김상우의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 26일

주	심	공학박사	김	중	수
위	원	공학박사	김	영	수
위	원	공학박사	윤	정	인



목 차

1. 서론	1
2. 본론	4
2.1 비선형해석	6
2.1.1 비선형 정적해석의 이론	7
2.1.2 Newton-Raphson법	8
2.2 T-type ball joint 이탈력 해석	10
2.2.1 재료의 물성	12
2.2.2 Load case	14
2.2.3 해석 결과	15
2.3 이탈 하중 시험	20
2.3.1 FEM해석과 이탈 하중 시험 결과 비교	21
2.4 R-type ball joint	22
2.4.1 R-type ball joint의 유한요소해석	22
2.4.2 해석결과	23
2.5 성형해석	27
2.5.1 선형점탄성 이론	27
2.5.2 성형해석의 일반적 이론 고찰	31
2.5.3 성형 해석	34
2.6 성형 실험	40
2.6.1 PA(Polyamide)의 수축	41
2.6.2 인서트 몰딩을 이용한 ball seat 성형 실험	42
3. 결론	45
참고문헌	

A study of ball joint development using insert molding

Kim Sang Woo

Department of Refrigeration Engineering & Air Conditioning
Graduate School,
Pukyong National University

ABSTRACT

Ball joint is a important part used as link parts in an automotive suspension and steering system. The ball joint consists of body socket, ball stud, plug and ball seat. In these part, ball seat is a major automotive produced by engineering plastic. As increasing importance of engineering plastic, the technique of manufacture method related in plastic products has been developed quickly and continuously.

This study is about ball joint using plastic ball seat of insert molding type. This insert molding type can reduce badness from

assembling process between ball stud and ball seat, and designs highly mechanical efficiency of the ball joint.

A new model ball seat was analyzed by a FEM and compared with the experimental data. For increasing analytic accuracy about ball joint, the model needs to consider every kinds of nonlinearities arise in the finite element analysis, which are geometric nonlinearity due to large displacement and small strain, materially nonlinearity and nonlinear boundary condition. So in the study, the deformation behavior of the ball joint was analysed using the commercial finite element program MARC. This program could solve accurately these nonlinear analysis problems. The Finite element model of the ball joint was considered as 2-dimensional axisymmetric model to reduce solving time. And also the finite element type was chose as QUAD(4 nodes) for enhancing accuracy of analytic result. Material properties were got form tensile test of each material.

Ball seat mold was designed by consideration with location and density of weld line. The position of weld line was found by the Moldflow, the computer software for melt flow analysis.

Finally, this study present a chance of new production method about the ball joint and the result of FEM analysis should be a useful data to design of the ball joint.

1. 서론

Ball joint는 자동차의 진행방향을 조절하는 조향장치와 차체 중량을 지지함과 동시에 노면 불규칙 등에 의한 바퀴의 상하 진동을 완화하고 흡수하는 현가장치의 핵심부품으로 현 국내 자동차 부품산업에서도 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

자동차 산업과 관련된 기술의 연구개발에 대한 중요성은 우리나라 제조업 총 생산액의 9.17%, 제조업 총 부가가치의 7.8%, 제조업 총 수출액의 5.4%를 점하고 있다는 사실과 자동차 산업이 가지는 특성 즉, 광범위한 관련산업, 기술총화산업, 기술파급 효과가 큰 산업, 노동집약적 장치산업, 규모의 경제 효과가 큰 산업 등의 산업적 특성을 가지고있어, 자동차 및 자동차 부품산업에 대한 기술개발은 우리나라의 기술선진국 진입에 있어 필수적인 산업이라고 할 수 있다.

Ball joint는 자동차 부품으로 없어서는 안될 중요한 부품이나 비교적 용이하게 제작 할 수 있어 국내 많은 기업에서 ball joint를 생산하고 있다. 그에 발맞추어 ball joint에 관련된 많은 연구가 이루어져, ball joint에 관련된 기술은 세계적으로도 우수하여, 유럽을 제외한 일본과 미국 ball joint 시장의 40%이상을 우리나라가 차지하고 있다.

최근 이러한 큰 시장에 가격경쟁력을 높여 더 많은 이익을 획득하기 위하여 많은 기업들이 ball joint의 원가를 낮추는데 주력하고있는 실정이다. 그리하여 ball joint 부품의 단순화 및 공용화에 관한 연구부터 시작하여, 소재 개발, 경량화, 제작 방식 및 제조 공정 등의 원가를 절감하기 위한 많은 연구들이 새로이 진행 되고 있다.

Ball joint는 우선적으로 차체하중을 지지하는 연결구(joint)로서 upper arm 및 lower arm에 장착되며 요동 및 회전이 가능하도록 설계된 주요 현가 부품이다. ball joint는 Fig. 1.1과 같이 스틸 소켓(Steel socket)안에 NYLON 또는 POM 소재의 ball seat가 ball stud를 감싸고 있고, 먼지나 물 등의 외부 이물질 침투를 막는 dust cover로 상부가 쌓여 있다.

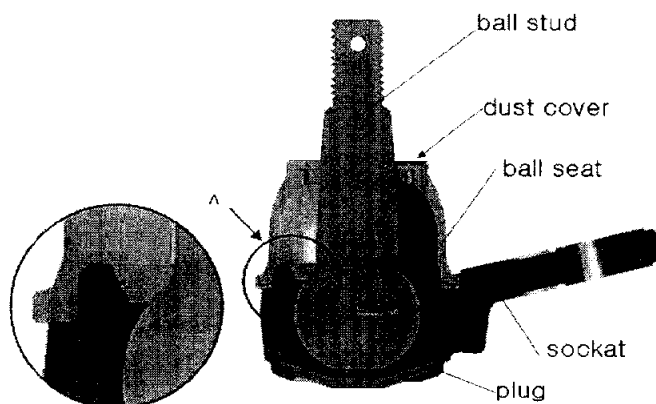


Fig. 1.1 Schematic of ball joint

현재 ball joint를 조립하는 공정을 살펴보면, 먼저 ball stud에 ball seat를 압입하는 제 1공정, 그 조립품을 바디소켓에 안착시키는 제2공정, 그리고 ball seat가 아래로 빠지는 것을 방지하도록 socket 하단부를 plug로 고정하는 제3공정, 그리고 마지막으로 ball joint 내부에 이물질이 들어가지 않도록 dust cover를 씌우는 제4공정으로 크게 나눌 수 있다.

본 연구는 ball seat 성형 시 Fig. 1.2와 같이 ball stud를 금형에 인서트 한 상태로 사출성형하는 방법으로 ball seat와 ball stud의 조립 공정이 필요 없이, ball seat 성형품이 ball stud에 조립된 상태로 이젝팅된

다.

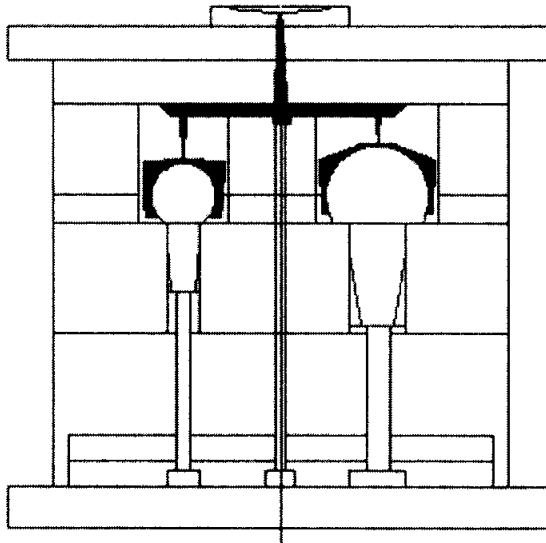


Fig. 1.2 A ball seat using insert molding

따라서 ball seat를 사출하는 하나의 공정으로 기존에 ball stud와 ball seat를 조립하는 공정을 삭제시킬 수 있다. 이로써 기존에 ball stud와 ball seat 조립 시 강제 압입하며 발생하던 불량률을 줄일 수 있으며, 압입 시 ball seat가 파손되는 것을 방지하기 위하여 두꺼웠던 ball seat의 살 두께를 줄일 수 있고, 그에 따라 ball seat의 두께를 줄여 상대적으로 ball joint socket의 목 부위(Fig.1.1의 A부분)의 두께를 키워 압발하중도 상당히 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 주행 중 차체의 과도한 부하변동을 흡수하고 안전 조향을 장기간 확보하기 위해 ball joint의 압발 하중 즉 이탈하중의 증대는 매우 중요한 부분이다.

본 연구 과정에서는 인서트 몰드 방식을 이용한 ball joint 개발에 관

한 총체적 과정을 다루었다. 새로운 제품의 개발이라는 관점에서 CAE를 최대한 활용하여, 모든 실험에 앞서 컴퓨터를 통한 시뮬레이션 과정을 거쳤다. 그러한 시뮬레이션 결과는 실제 실험을 통하여 다시 한번 검증됨으로 본 연구를 통해 얻어진 결과는 향후 ball joint 설계에 있어 시행착오법에 의한 손실을 줄일 수 있는 중요한 데이터 베이스가 될 것으로 사료된다.

2. 본론

아래는 본 연구의 전체적 진행 과정을 나타낸다.

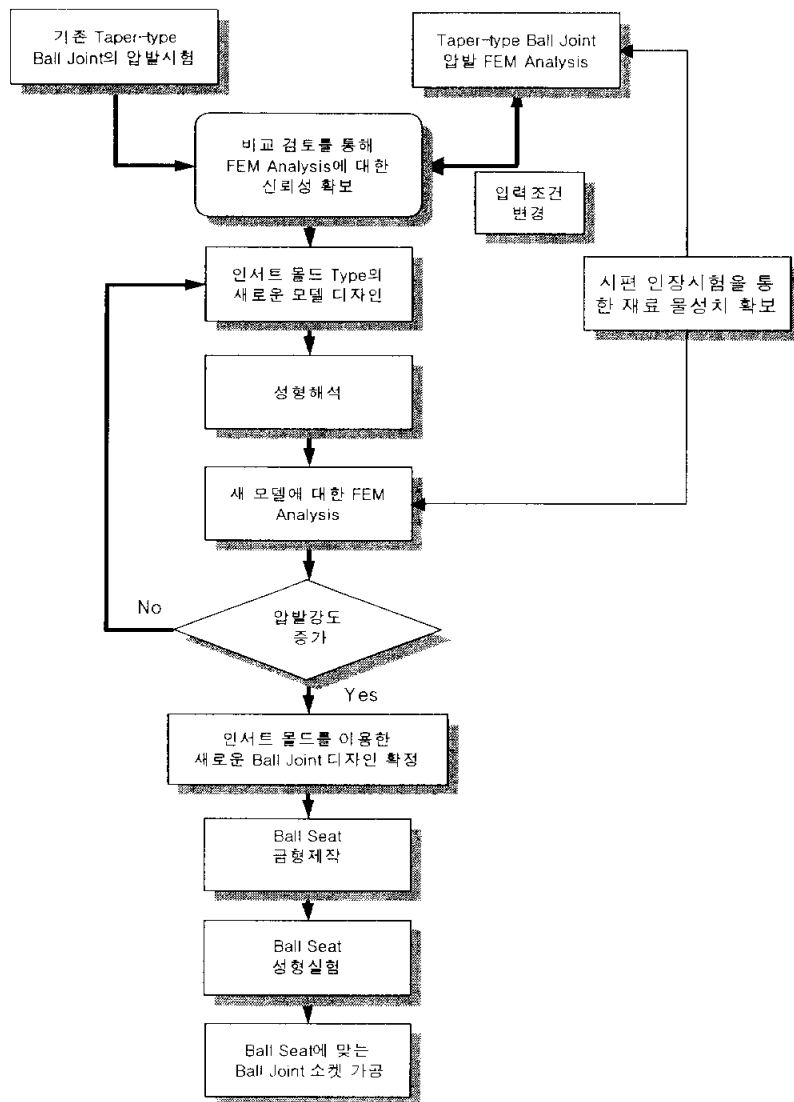


Fig. 2.1 A research of process for a new type ball joint development

위의 Fig.2.1에서 보는 것과 같이 인서트 몰딩을 이용하여 조립공정의 개선으로 인한 원가 절감뿐만 아니라 기능면에서도 기존의 모델보다 더욱 우수한 모델을 개발하기 위하여, 먼저 기존 모델에 대한 기초적인 Test를 시행하여 기능향상의 기준으로 정하였다. 본 연구에서는 ball joint 성능 평가의 가장 기초가 되는 압발에 의한 이탈력 시험을 수행하였다. 이탈력 시험을 수행과 동시에 동일한 조건에서의 FEM 해석을 수행하여 각각의 결과를 비교하였다. 이것은 새로운 모델 설계에 있어서, FEM 해석에 의한 data를 기준으로 설계하기 위하여, FEM 해석의 신뢰도를 평가하기 위함이다.

FEM 해석의 신뢰도가 평가된 이후 새로운 모델은 FEM 해석의 data를 최대한 활용하여, 시행착오법에 의한 개발비 손실을 최소화하였다. 인서트 몰딩을 이용한 ball seat 성형품을 생산하기 위한 금형 제작 및 성형 조건에 있어서도 마찬가지로 FEM 해석 data를 이용하였다.

2.1. 비선형 해석

실제 시험을 통한 현상을 FEM을 이용하여 해석하기 위해서는 기본적으로, 기하학적 비선형, 재료 비선형, 경계비선형의 복합적 비선형성이 고려되어야 한다. 비선형 해석은 증분과 반복계산 과정을 수행하므로 선형 해석에 비하여 상당히 긴 해석시간을 필요로 한다. 또한 해석시간은 요소(element)수에 크게 영향을 받으며, ball joint와 같이 다수의 접촉경계를 갖고, 대변형과 소성을 동반하는 경우는 element의 형상과

물성치의 정확도에 따라 해석의 수렴성이 영향을 받으므로 해석을 효율적으로 하기 위해서는 element의 수와 형상, 그리고 물성치의 정보에 신중을 기해야 한다. 본 연구에서의 ball joint 이탈력 FEM 해석은 일정한 압발하중을 가해 ball stud가 socket에서 이탈하기까지 과정을 재현한다. 대상물에 작용하는 하중은 일정하지만, ball stud가 이탈하면서, socket은 비선형적인 소성변형을 일으킨다. 이러한 상태의 해석을 비선형 정적 해석이라고 한다.

2.1.1 비선형 정적 해석의 이론

비선형 정적 해석은 정적하중하에서의 구조의 비선형적 거동에 대한 해석을 말한다. 비선형성은 재료비선형(Material Nonlinearity), 기하학적 비선형(Geometric Nonlinearity), 경계비선형(Boundary Nonlinearity)가 있다.

여기서, 재료비선형(Material Nonlinearity)은 구성방정식이나 응력-변형률 관계식이 응력, 변형률 또는 변위들에 의존하며 주로 소성(Plasticity), 크립(Creep), 점소성(Viscoplasticity)문제들이 이에 속한다. 탄소성재료 모델의 경우는 여러 가지 형태의 항복조건 식(Yield Criteria)과 가공경화(Hardening)가 고려되고, Hyperelastic이나 고무와 같은 재료의 모델의 경우에는 여러 가지 형태의 변형을 에너지 함수가 사용된다.

그리고, 기하학적비선형(Geometric Nonlinearity)은 대변형(Large Displacement and Large Rotation)과 관련있으며, 버클링이나 메탈포밍(Metal Forming)이 발생하는 대변형들이 여기에 속하며, 경계비선형

(Boundary Nonlinearity)는 재료와 변형율은 선형거동이며 오직 경계조건의 변화로 인해 발생하는 비선형만 고려한다.

이러한 비선형 문제에 대한 비선형 방정식은 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$K_t \Delta u^{(i)} = {}^{t+\Delta t}p - {}^{t+\Delta t}f^{(i-1)} \quad \dots \dots \dots 2.1$$

그리고

$${}^{t+\Delta t}u^{(i)} = {}^{t+\Delta t}u^{(i-1)} + \Delta u^{(i)} \quad \dots \dots \dots 2.2$$

여기서

K_t	시간 t 에서의 법선 강성 행렬
$\Delta u^{(i)}$	iteration (i)의 절점변위의 증분
${}^{t+\Delta t}u^{(i)}, {}^{t+\Delta t}u^{(i-1)}$	(i)와(i+1)에서의 시간 $t+\Delta t$ 에 대한 절점 변위 벡터
${}^{t+\Delta t}p$	시간 $t+\Delta t$ 에서의 외부에서 작용하는 절점 하중 벡터와 열 과 크립 의 영향에 의한 가(pseudoi)하중
${}^{t+\Delta t}f^{(i-1)}$	시간 $t+\Delta t$ 와 (i-1)에서의 내부 절점 하중 벡터로 치환된 요소 응 력

각각의 증분에 대해 법선 강성 행렬 K_t 는 반복 시마다 Newton-Raphson Method 에 의해 계속 Update된다.

2.1.2 Newton-Raphson 법

Newton-Raphson법은 $f(x)$ 의 미분을 이용하여 빠르게 x 를 계산할

수 있는 방법이다.

식 2.3의 미분 $f'(x_n)$ 의 정의는 식 2.4와 같이 표현할 수 있다.

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad \dots \dots \dots 2.3$$

$$f'(x_n) \approx \frac{f(x_{n+1}) - f(x_n)}{x_{n+1} - x_n} \quad (\Delta x \rightarrow \epsilon) \quad \dots \dots \dots 2.4$$

반복 계산에서의 현재 근사 해를 x_n 이라고 두고 x_{n+1} 을 구할 때, $f(x_{n+1}) \approx 0$ 이라고 볼 수 있다. 따라서, x_{n+1} 을 계산하는 식은 2.5와 같다.

$$x_{n+1} \approx x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad \dots \dots \dots 2.5$$

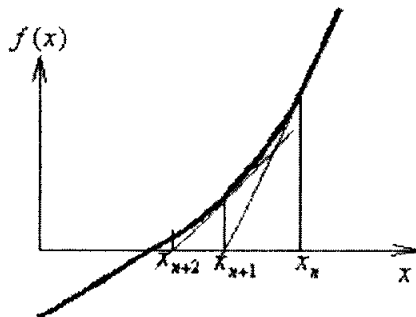


Fig. 2.2 Newton-Raphson method

Fig. 2.1.1 에서 보는 바와 같이, 위의 과정을 반복하여 근사해 x_n 에서 출발하여, $f(x) = 0$ 의 근을 구할 수 있다.

수렴판정은 아래의 식 2.6를 이용한다.

$$|f(x_{n+1}) - f(x_n)| < \varepsilon \quad 2.6$$

2.2 T-type ball joint의 이탈력 해석

본 연구의 ball joint 모델은 Fig.4와 같이 ball stud 축을 중심으로 축대칭을 이루고 있다. 해석의 시간을 단축시키고, 모델링에 대한 오차를 줄이기 위하여 해석의 모델은 아래의 Fig.5와 같이 2차원 축대칭으로 모델링하였다. T-type ball joint란 socket의 내부가 일정한 taper를 유지하며 가공된 기존의 ball joint를 말하는 것으로, 새로 개발될 모델과 구분하여 부르기 위해 임의로 명명한 것이다.

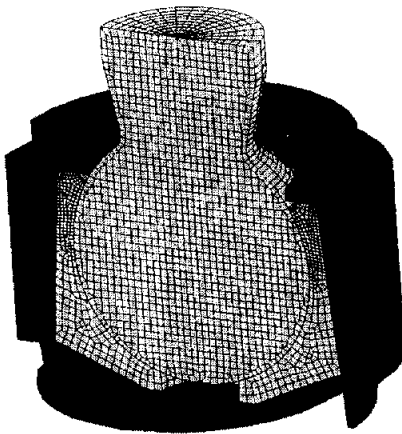


Fig. 2.3 3-dimensional finite element model

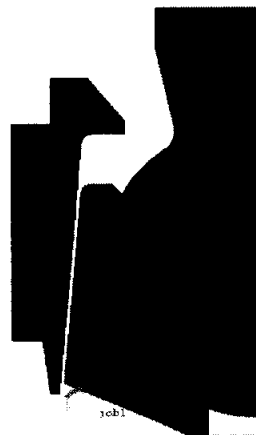


Fig.2.4 2-dimensional
FE model

NODE	1564
NODE PERIOD	
ELEMENT	1379
ELEM. CONNECTED	
POINT	51
CURVES	35
SURFACES	0
SOLIDS	0

Fig. 2.5 Information of FE model

위의 Fig.2.5.2와 같이 2차원 축대칭 모델은 초기 상태를 Fig.2.5.1의 3차원 모델과는 달리 socket과 ball seat가 분리되어있는 상태로 모델링을 하였다. 이것은 본래 ball seat의 외각 치수는 socket의 내부 치수보다 10/100mm 이상 커서 ball seat를 socket 에 조립하고 plug를 덮고 코킹을 할 경우 ball seat는 항상 일정한 압축력을 받게 된다. 이러한 socket 과 ball seat사이의 비선형적 경계요소를 사실적으로 표현하기 위하여 ball seat의 외경이 socket 내경보다 10/100mm 크게 모델링하였고, 그림처럼 조립이 되지 않은 상태로 모델링하여 해석 조립에 의한 압축력까지 계산가능 하도록 하였다.

해석의 정확도를 높이기 위해 element 종류는 4-node로 1개의 element를 구성하는 QUAD type을 취하였다. 또한 analysis time를 줄이고 동시에 해석의 정밀도를 효율적으로 높이기 위하여 이탈해석 시 집중적으로 하중을 받는 부위를 조밀하게 meshing하였다. 이탈해석 시 ball stud가 축을 중심으로 위쪽으로 이동하므로 하부의 plug는 압발 해

석 상 아무런 영향을 받지 않는다. 그러나 plug는 조립시 ball seat를 밀어 올리는 역할을 함으로 plug는 rigid body로 설정하여 Fig.2.5.2 과 같이 curve로 표현하고 rigid body로 지정하였다.

2.2.1 재료의 물성

기존 T-type ball joint의 이탈하중 시험의 결과에서 보듯이 ball seat 및 socket이 소성변형을 한다. 소성은 경로 의존성에 의해, 각 재료의 Stress-Strain curve를 따르므로 무엇보다 각 재료에 대한 정확한 물성을 얻는 것이 중요하다. 본 해석의 software인 MARC에서는 Stress-Strain curve를 그대로 입력하여 물성 데이터로 사용한다. 아래의 물성치는 (주)센트랄로부터 물성치 시험결과 자료를 제공 받은 것이다.

Table. 1 Material properties

	Socket	Ball stud	Ball seat
Material	S45C	SCM435	PA66
E(N/mm^2)	68000	65225.98	867.38
Poisson'Ratio	0.29	0.29	0.43
Yield Stress (N/mm^2)	410.15	617.69	34.13

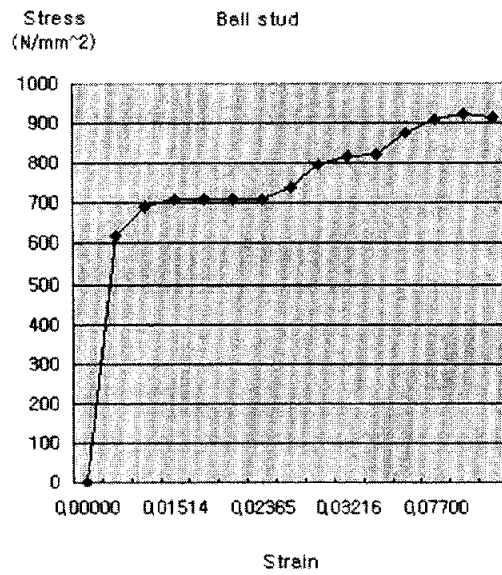


Fig.2.6 Stress-Strain curve of a ball stud

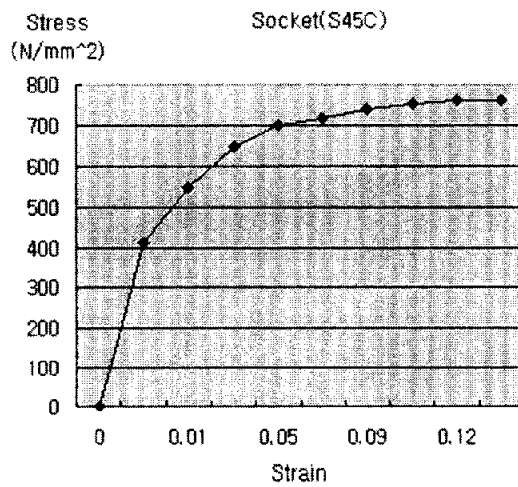


Fig. 2.7 Stress-Strain curve of a socket

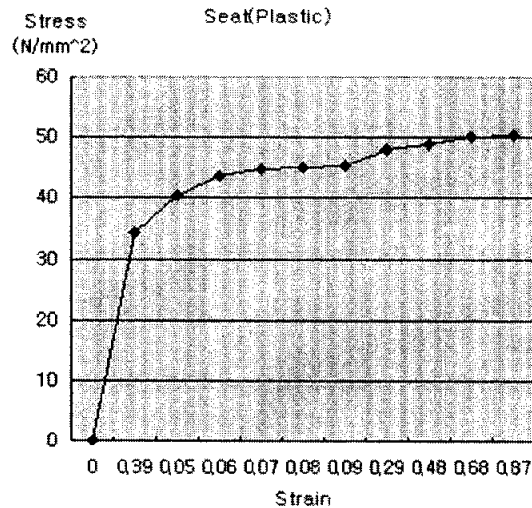


Fig. 2.8 Stress-Strain curve of a ball seat

2.2.2 Load case

본 해석은 크게 두 가지 과정으로 나누어진다. 첫 번째는 ball seat와 socket가 완전히 조립되는 과정이고, 둘째는 조립 후 ball stud가 상승하여 이탈하는 과정이다. 이 과정을 분리하여 load case를 2개로 분리하였다. load case 1은 rigid body인 plug로 ball seat를 밀어 올려 완전히 조립된다. 총 5mm의 변위를 10 step으로 나누어 1 increment에 0.5mm 씩 plug를 상승시켰다. 완전히 조립이 된 후 load case 2에서 ball stud가 +y 방향으로 이동하여 이탈하도록 하였다. load case 2에서는 총 변위 10mm를 50 step으로 나누어 1 increment에 0.2mm 씩 ball stud가 상승한다. ball stud 이탈력을 표현하는 데는 2가지 방식이 있다. 하중을 점점 증가시킴으로 이탈이 일어나는 순간의 하중을 측정하는 방식과 일정한 속도로 ball stud를 +y 방향으로 이동시키고 그에 대한 ball stud

끝단부의 반력을 구함으로 이탈하중을 계산하는 방식이 있다. 본 해석에서는 후자를 택함으로 최대하중이 발생하는 지점을 정확히 계산하도록 하였다.

2.2.3 이탈하중 해석 결과

아래의 Fig. 2.9 ~ Fig. 2.11는 위에서 설명한 load case1의 조립 해석결과를 나타낸 것으로 ball seat가 socket 내부에 조립되는 과정을 해석한 것이다. 앞서 설명한 것처럼 ball seat 외각 치수는 socket보다 커서 조립된 이후 ball seat는 항상 일정한 압축력을 받게 된다. 위의 해석결과 조립에 의해 ball seat가 받는 압축력은 9.054N/mm^2 로 나타났다.



Fig. 2.9 Increment 0

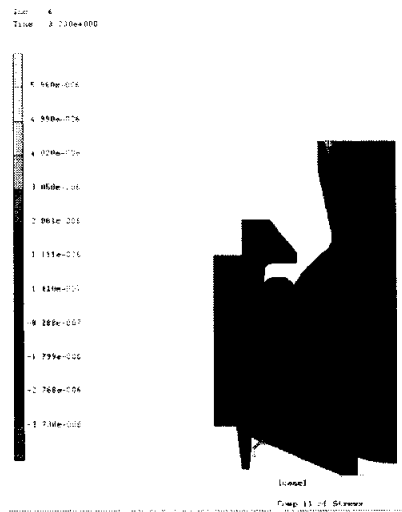


Fig. 2.10 12 Increment 6

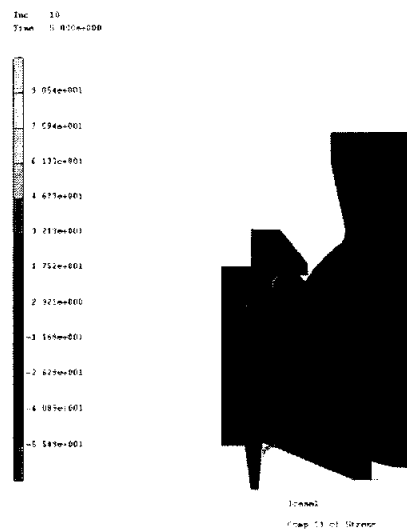


Fig. 2.11 Increment 10

아래의 Fig. 2.12 ~ 2.15는 load case 2로 압발에 의한 ball joint의 이탈하중을 구하기 위한 해석결과이다. 아래의 결과에서 보듯이 socket의

목 부위에서 상당한 하중으로 받으며, 결국 그 부위가 소성변형을 일으키며, ball stud가 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

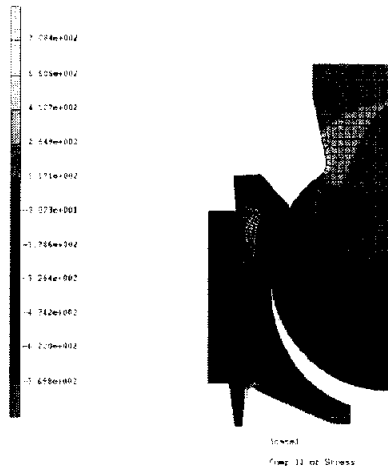


Fig. 2.12 Increment 30

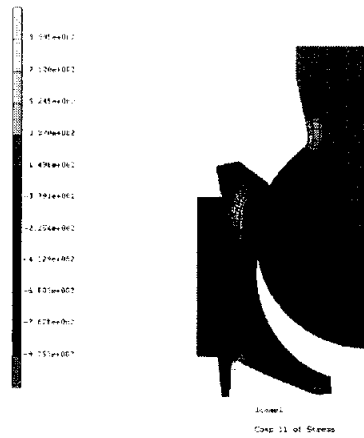


Fig. 2.13 Increment 40

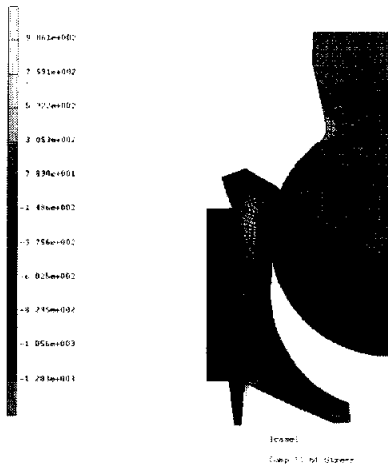


Fig. 2.14 Increment 50

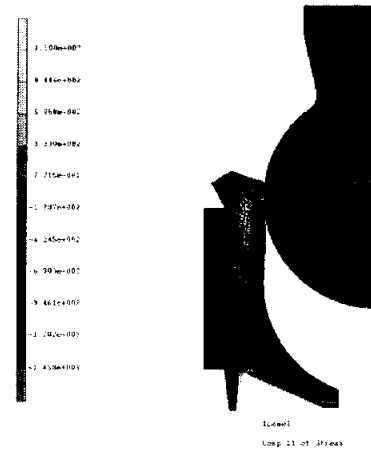


Fig. 2.15 Increment 60

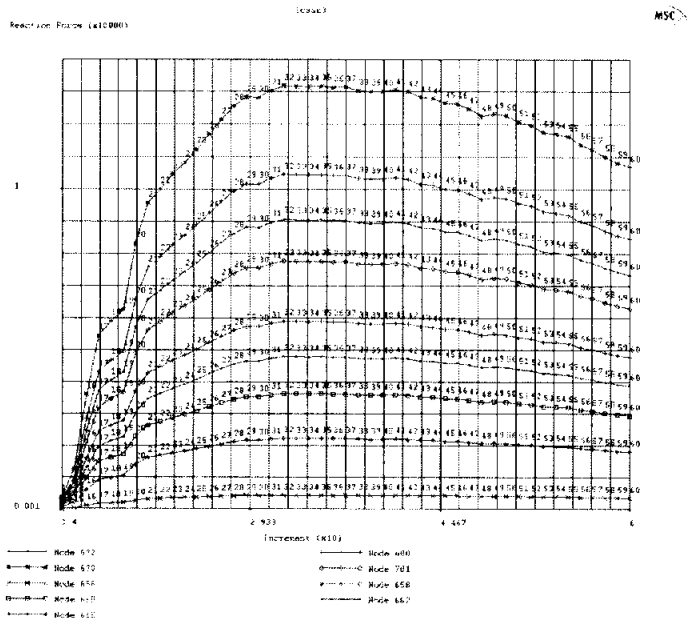


Fig. 2.16 Reaction force on the end of a ball stud

위의 Fig. 2.16는 ball stud 끝단에서의 각 node의 반력값의 변화를 나타낸 것이다. 그러므로 최대하중 값을 알기 위해서는 최대하중이 발생한 step 32의 반력값을 구하면 된다. 본 해석은 2차원 축대칭 모델로 해석하였으므로 1개의 node 값은 아래의 Fig. 2.17 과 같이 축을 중심으로 동심원 상에 있는 각 node에서의 반력값이다.

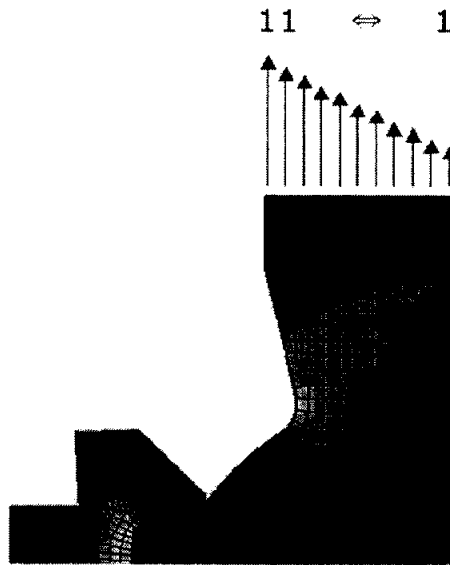


Fig. 17 Reaction force on the end of a ball stud

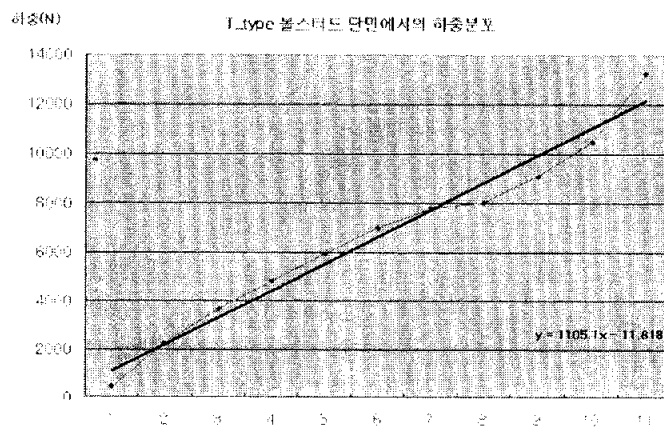


Fig. 2.18 Reaction force at the pick load

step 32에서의 전체 반력값은 각 node에서의 반력값을 Fig. 2.18의 그래프와 같이 연결하여 그것을 분포하중으로 보고 적분하여 얻을 수 있다. 적분결과 T-type의 기존 ball joint의 압발에 의한 이탈하중은

5310kgf로 해석되었다. 또 한 step에 대한 변위는 0.2mm로 최대 이탈 하중이 발생한 지점은 3.8mm로 해석결과 알 수 있었다.

2.3 이탈하중 시험

시험 결과는 (주)센트랄로부터 제공 받은 것으로 압발 시험에 대한 결과는 다음과 같다.

	Diameter In	Peak Load kN	Elong @ Pk Ld mm	Break Load kN	Elong @ Break mm
1	0.500	50.49	4.14*****		
2	0.500	50.70	3.71*****		
3	0.500	52.23	4.15*****		

Calculation Inputs:

Gage Length 2.00 In

Test Inputs:

Initial Speed 3.00 mm/Min

Secondary Speed 3.00 mm/Min

Load Limit HI 100 kN

Ext Limit HI 90.0 mm

Fig. 19 A result of a pull-out test

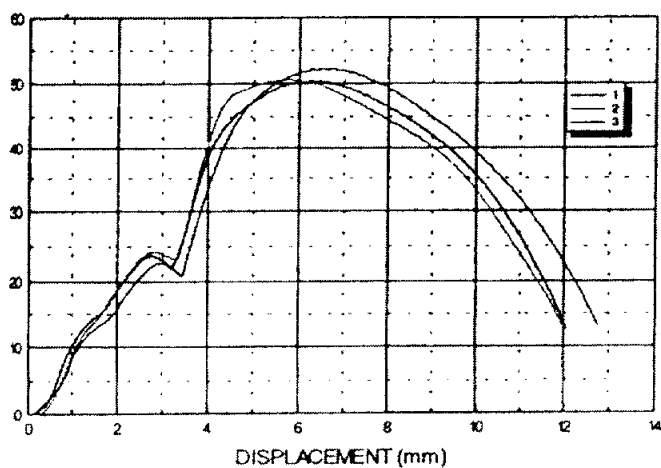


Fig. 20 Strain-stress curve by pull-out test

시험 결과는 시험을 시행할 때마다 약간의 차이를 보이고 있으나 전체적으로는 비슷한 양상을 갖고 있다. 최대 이탈 하중은 50.49 ~ 52.23kN 정도이고, 이때의 변위는 3.71 ~ 4.15mm 정도임을 위의 시험 결과표를 통해 알수 있다. 또한 그래프가 2.4kN 부근에서 굴절한 것은 ball seat의 소성변형이 일어난 것으로 판단된다. 위의 인발 시험에 대한 Graph는 display상의 error로 사료된다.

2.3.1 FEM 해석과 이탈하중 시험 결과 비교

Table. 2 FEM analysis compared with the experimental data.

	Pull-out Pick Load	Pick Load displacement	ball seat Yield load
FEM Result	5310kN	3.8mm	2500kN
Test Result	5100kN	3.9mm	2400kN
Error rate	4.1%	2%	4.1%

위의 결과에서 보는 것과 같이 본 이탈하중 Test에 대한 정적비선형 FEM 해석결과는 실제 시험결과와 매우 흡사하게 나왔다. 본 해석 결과를 기준으로 insert molding을 이용함으로 기존의 Taper-type의 ball joint보다 압발에 의한 이탈하중을 향상시키기 위한 모델로 R-type의 신규 모델을 design 하였고, 이에 대한 동일한 조건에서의 이탈하중 해석을 수행하였다.

2.4. R-type ball joint

기존의 T-type의 ball joint는 조립시 ball stud를 강제 압입 함으로 압입에 의한 파손을 고려하여, ball seat의 목 부위를 ball stud가 빠지지 않는 범위에서 가능한 크고, 두껍게 설계되어 있다. 그러나 인서트 몰드 방식으로 ball seat를 성형할 경우 외형에 대한 제약이 사라져 ball joint의 기능을 최대한 향상시키는 방향으로 디자인이 가능해졌다. 본 연구에서는 ball joint의 성능 중 가장 중요한 부분인 압발에 의한 이탈 하중을 증대시키는 방향으로 ball joint를 설계하였다. 그리하여 이탈하중시 가장 하중을 많이 받는 ball joint socket의 목 부위의 두께를 증가시키는 방향으로 아래와 같이 목부위에 Round를 줌으로 목 부위의 두께를 늘렸다.

기존의 Round가 없는 type과 새로운 모델을 구분하기 위하여, Round가 있는 형상을 R-type이라고 명명하였다.

2.4.1 R-type ball joint의 유한요소 모델

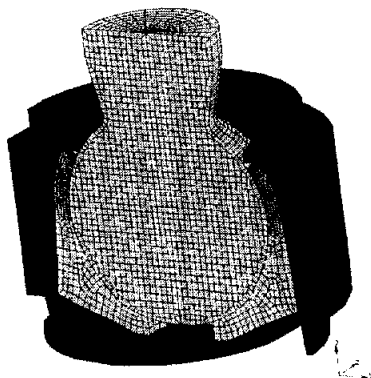


Fig. 21 R-type 3-dimensional FE model

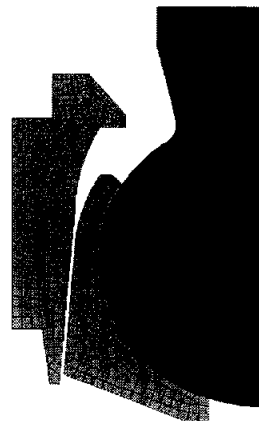


Fig. 22 2-dimensional axisymmetric model

Nodes	1555
Elements (Type 152)	
Elements (Type 151)	1171
Elements (Type 153)	
Elements	21
Nodes	35
Elements (Type 152)	0
Elements	0

Fig. 23 Information of R-type FE model

해석을 위한 물성치 및 경계조건은 기존의 T-type과 동일하게 적용하였다. 단 해석의 시간을 단축하기 위하여 총 변위 15mm를 30개의 increment로 1 step에 0.5mm 씩 ball stud가 이탈하도록 하여, 70 step의 T-type보다 해석 시간을 단축하였다.

2.4.2 이탈하중 해석 결과

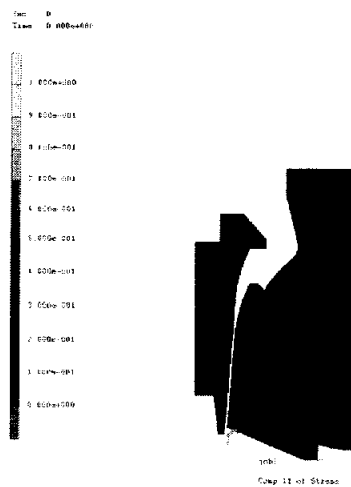


Fig. 24 Increment 0

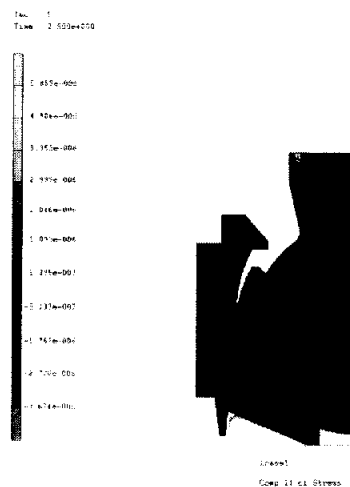


Fig. 25 Increment 5

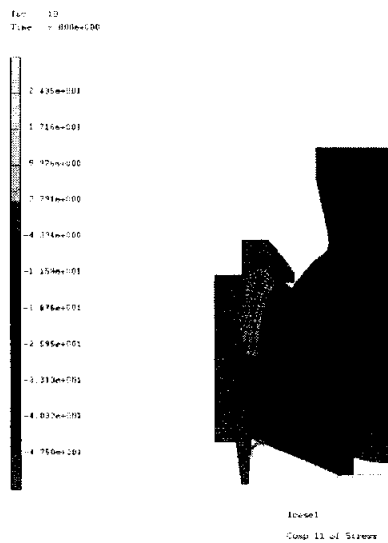


Fig. 26 Increment 10

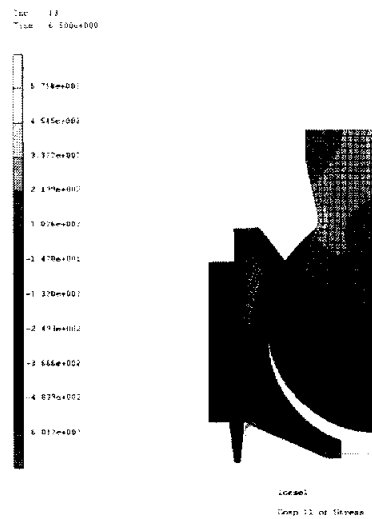


Fig. 27 Increment 13

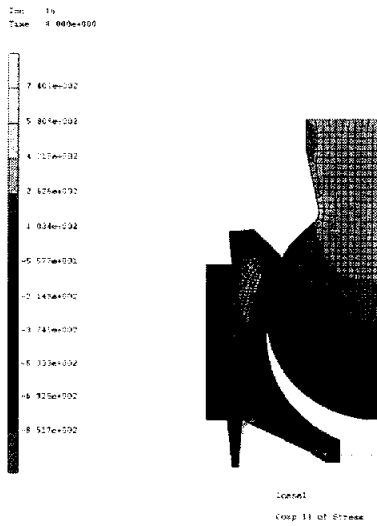


Fig. 28 Increment 16

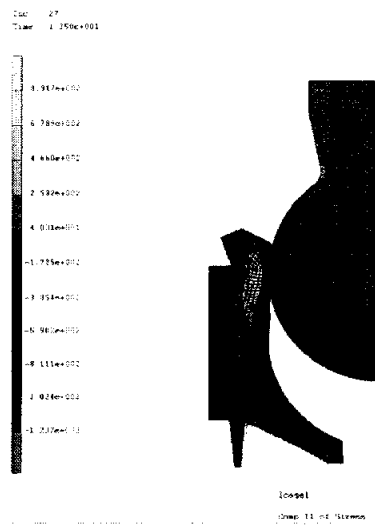


Fig. 29 Increment 27

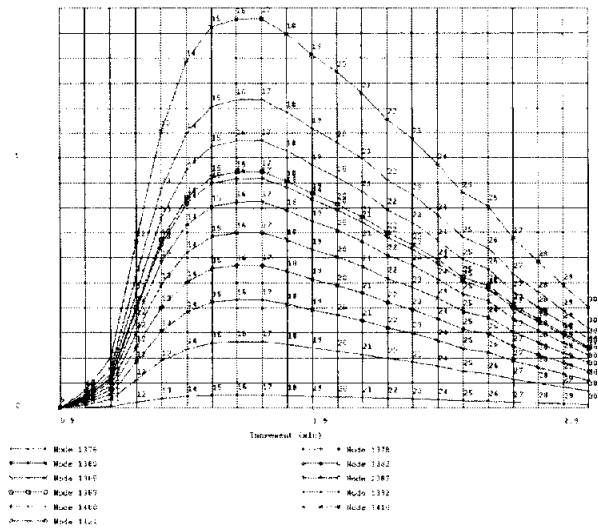


Fig. 30 A reaction force of the end of a ball stud

T-type의 이탈해석 결과와 마찬가지로 최대 이탈 하중이 발생했을 때의 각 node에서의 하중 값을 ball stud 단면 위에 옮기면 아래의 그림과 같다.

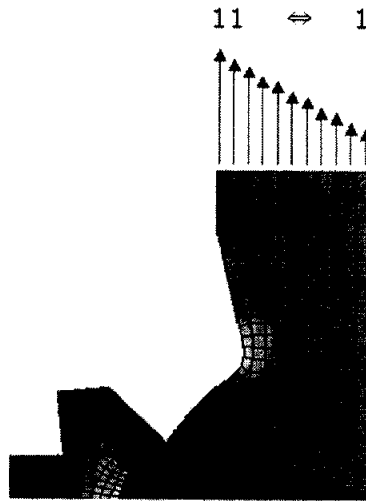


Fig. 31 A reaction force of the end of a ball stud

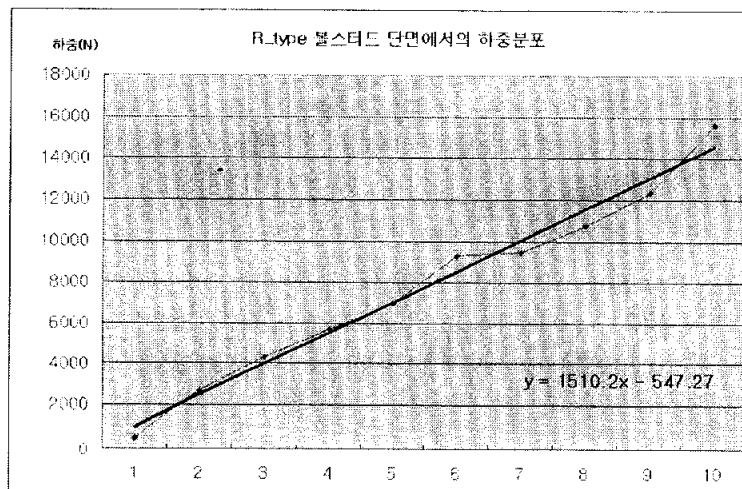


Fig. 32 A reaction force at the pick load

위의 그래프는 R-type의 ball stud 끝단에서의 각 node의 반력값의 변화를 나타낸 것이다. 그러므로 최대하중 값을 알기 위해서는 최대하

중이 발생한 step 17의 반력값을 구하면 된다. 본 해석도 T-type과 마찬가지로 2차원 축대칭 모델로 해석하였으므로 1개의 node 값은 축을 중심으로 동심원 상에 있는 각 node에서의 반력값이다. step 17에서의 전체 반력값은 각 node에서의 반력값을 Fig.32와 Fig. 33와같이 연결하여 그것을 분포하중으로 보고 적분하여 얻을 수 있다. 적분결과 R-type의 기존 ball joint의 압발에 의한 이탈하중은 6870kgf로 해석되었다. 이것은 기존의 T-type ball joint 보다 이탈하중이 1470kgf 증가한 값으로 기존의 성능에 28%가 증가한 값이다. 또 한 step에 대한 변위는 0.5mm로 최대 이탈 하중이 발생한 지점은 4mm로 해석결과 알 수 있었다.

2.5 성형 해석

성형해석은 플라스틱 제품 불량률의 가장 큰 원인이 되는 Weld line 및 Air trap 등을 해석을 통해 찾아내고 그것을 최소화하기 위한 성형 조건 및 금형제작에 앞서 최적의 게이트 위치를 찾아 내기 위해 금형 제작에 앞서 수행하였다.

2.5.1 선형 점탄성 이론

플라스틱 재료와 같은 고분자 물질에서의 해석시에는 여러 지배 방정식이 따른다. 대표적으로 사용되는 것 중의 하나가 바로 점탄성 이론이다. 대부분의 고분자는 응력이나 변형에 점성적으로 뿐 아니라 탄성적으로도 반응한다. 그래서 고분자는 보통 점탄성 물질이라 한다. 고분자 용유체의 물질 거동을 설명하기 위하여 탄성요소와 점성요소를 다양하게 조합하여 사용한다. 고분자 거동을 설명하기 위해서는 다음과 같은

다음 Fig. 33는 맥스웰 모델 (Maxwell model)의 응력-변형 거동을 보여준다.

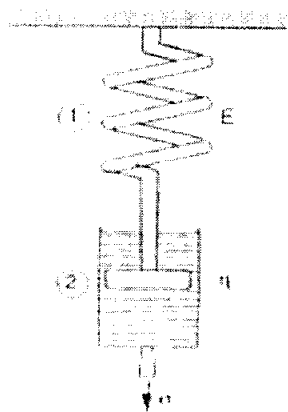


Fig. 33에서 응력-변형 거동을 유도해 보면, 전체 변형(ϵ)은 탄성부분의 변형(ϵ_e)과 점성부분의 변형(ϵ_v)을 가지고 있어서 다음과 같이 표현된다.

유사한 방법으로, 변형률을 사용하면

용수철이 훅의 법칙(Hook's law)을 따른다고 가정하면

위의 식을 조합해 보면 결과적으로

$$\dot{\epsilon} = -\frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \dots \dots \dots 4.1.4$$

이를 다시 써 보면

$$\sigma + \frac{\eta}{E} \frac{d\sigma}{dt} = \eta \frac{d\epsilon}{dt} \quad \dots \dots \dots 4.1.5$$

이것을 일반적으로 Maxwell 모델의 미분형 지배방정식이라 부른다.

만일 응력완화시험에서와 같이 물질의 변형을 일정하게 유지하면 식 4.1.5는 다음과 같이 간소화 되고

$$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = 0 \quad \dots \dots \dots 4.1.6$$

이를 적분하면

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda} \quad \dots \dots \dots 4.1.7$$

이 된다. 여기서 λ 는 완화시간이다. 일정한 변형을 가정한 맥스웰 모델의 완화거동은 Fig. 34에 나타내었다. 식 $\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$ 을 이용하면 $t = \lambda$ 가 지난 후의 응력이 초기값의 37%로 떨어지는 것을 알 수 있다. $e^{-1} = 0.37$. 응력의 완화를 측정하고자 할 때 보통 완화시간의 4배를 사용한다. 따라서, 식 $\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$ 에서 $t = 4\lambda$ 를 사용하면 응력은 원래값의 1.8%로 완화된다. 식 $\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$ 와 볼츠만(Boltzmann)의 중첩 원리를 사용하면 맥스웰 Maxwell 모델의 지배방정식을 적분형으로 표시할 수 있다.

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t E e^{-(t-t')/\lambda} \dot{\epsilon} dt' \quad \dots \dots \dots 4.1.8$$

보다 자세한 추정과 실제에 부합되는 해석을 위해서는 Maxwell 모델이 충분하지는 않다. 실험자료보다 보다 잘 설명하기 위하여 Fig. 34에 보

인 것처럼 여러 개의 용수철-대시콧이 나란한 모델을 사용하게 된다. 이런 배열을 일반적 맥스웰 모델이라고 한다. Fig. 34에서 보인 것은 분자량이 260,000인 폴리스티렌(PS)의 완화 및 지연실험자료(retardation data)를 4개 계수를 가진 모델로 맞춘 것이다. 이 물질의 용융체를 고온의 동공(cavity)속으로 사출할 때의 완화거동은 기준온도를 113℃로 볼 때 다음 식처럼 나타낼 수 있다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_a} = 0.25 \left(e^{-8.75 \frac{t}{\lambda}} + e^{-1.0 \frac{t}{\lambda}} + e^{-0.28 \frac{t}{\lambda}} + e^{-0.0583 \frac{t}{\lambda}} \right) \quad \dots 4.1.9$$

여기서 ϵ_a 는 완화후의 변형으로 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_a = \frac{l_a - l_0}{l_0} = \frac{S_0}{1 - S_0} \quad \dots \dots \dots 4.1.10$$

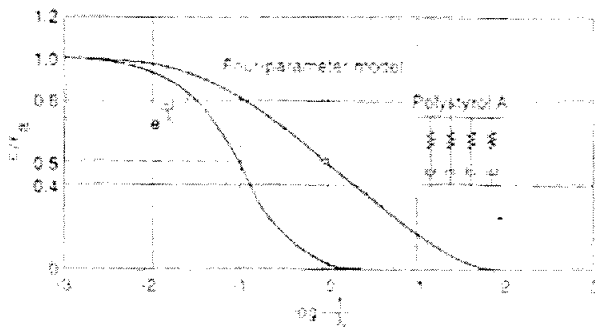


Fig. 34 Maxwell model & 4 Maxwell's retardation data

여기서 l_a 와 l_0 는 늘어난 시료와 완화된 시료의 길이를 나타내고 S_0 는 전체 수축을 나타낸다. $\lambda/8.75, \lambda, \lambda/0.28, \lambda/0.0583$ 는 위 폴리스티렌을 4개변수의 모델로 설명할 때의 4개의 개별적인 완화시간에 해당된다. 완화시간, λ 는 초기 변형이 완화에 의하여 절반으로 줄어드는데 소요되는 시간이다. Fig. 35의 여러 고분자의 경우에서 보다시피 이 완화

시간도 온도의 함수이다. Fig. 35을 보면 이 곡선 모양들이 단지온도축으로 이동하면 아주 비슷하다는 것을 알 수 있다. 모든 부정형 열가소성 고분자의 완화 및 지연 거동이 유사하다는 점을 알 수 있다.

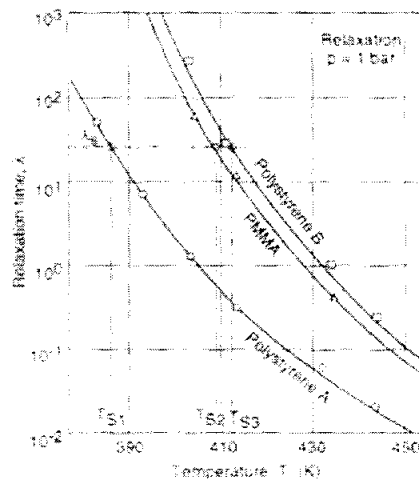


Fig. 35 Retardation test of
thermo-plastic(temperature function)

2.5.2 성형해석의 일반적 이론 고찰

일반적으로 사출성형에 의해 성형되는 제품은 얇은 두께를 갖는 경우가 대부분이기 때문에 평면방향의 유도에 비해 두께 방향으로의 유동은 상대적으로 무시할 수 있다. 따라서 두께방향의 압력변화를 무시한 이차원 해석이 가능하다.

Fig. 36의 경우와 같은 평면방향 유도의 경우에는 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식을 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

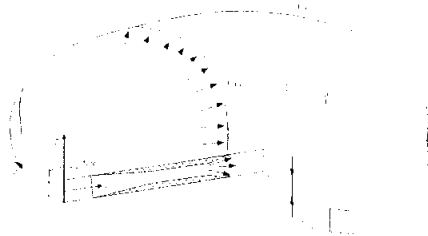


Fig. 36 Schematic diagram of 2-D flow

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot 4.2.1$$

x-방향 운동 방정식

$$\frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot 4.2.2$$

y-방향 운동 방정식

$$\frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial v}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot 4.2.3$$

에너지 방정식

$$\rho C_p (\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \gamma^2 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot 4.2.4$$

여기에서는 x, y는 평면방향, z는 두께방향의 좌표이며, u, v, w는 각각 x, y, z 방향으로의 속도이다. h는 캐비티 두께의 반, t, p, T는 각각 시간, 압력, 온도를 나타낸다. ρ 는 밀도로 여기에서는 압력과 온도의

함수이다. C_p , k , η 는 각각 비열(specific heat)과 열전도율(thermal conductivity), 전단 점성계수(shear viscosity)를 나타낸다. 또한 유효전단율속도(effective shear rate) $\dot{\gamma}$ 는 다음과 같이 간단히 나타내어진다.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad \dots \dots \dots 4.2.5$$

이때 두께방향의 경계조건은 다음과 같다.

$$u = v = w = 0 \quad ; \quad T = T_w \quad \text{at} \quad z = \pm h \quad \dots \dots \dots 4.2.6$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} + w = 0 \quad ; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at} \quad z = 0 \quad \dots \dots \dots 4.2.7$$

여기서 T_w 는 금형면의 온도이다.

런너나 스포루 내의 유동은 Fig. 6 에 나타낸 것과 같이 일차원 축대칭으로 가정하여 해석할 수 있고, 이 경우 연속방정식, 운동방정식, 에너지 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial y}(\gamma \rho v) = 0 \quad \dots \dots \dots 4.2.8$$

운동방정식

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma}(\gamma \eta \frac{\partial u}{\partial \gamma}) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \dots \dots \dots 4.2.9$$

에너지 방정식

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(k \gamma \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad \dots \dots \dots 4.2.10$$

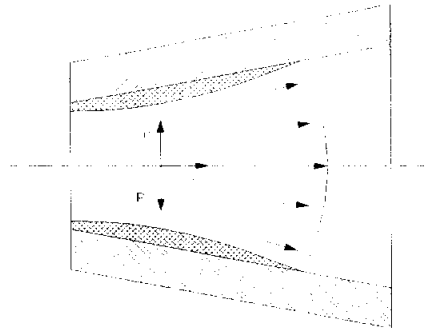


Fig. 37 Schematic diagram of 1-D flow

2.5.3 성형해석

성형은 수지의 유동, 온도변화, 성형압력, 형체결합력, 충전속도 등 여러 가지 조건이 복합적으로 작용하고, 이러한 최적성형 조건을 추출하기 위하여 성형해석전용 S/W인 Moldflow를 이용하여 사출성형 시 발생하는 불량을 예측하고 최적 성형조건을 얻기 위함이다. 성형해석 조건은 다음과 같다.

Table. 3 A condition of analysis process

Mold condition	Mold material	KP4
	Runner diameter	6Ø
	Gate type	side gate
	Gate size	2mm
Injection molding condition	Resin	POM
	Resin temperature	230℃
	Mold temperature	40℃
	Fill time	3sec
Machine condition	Max pressure	1400kgf/cm ²
	Clamping force	75 ton
	injection rate	7.2×10 ⁻⁵ m ³ /s

이탈력 해석으로 검증된 R-type의 ball seat 금형 설계와 최적의 성형 조건을 찾기 위하여 성형해석을 수행하였다. 해석은 기존의 T-type ball seat의 형상과 R-type을 각각 수행하여 비교하였다.

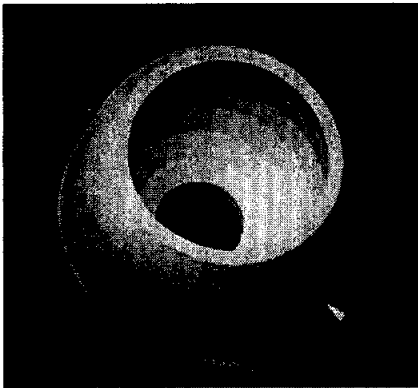


Fig. 38 R-type base model

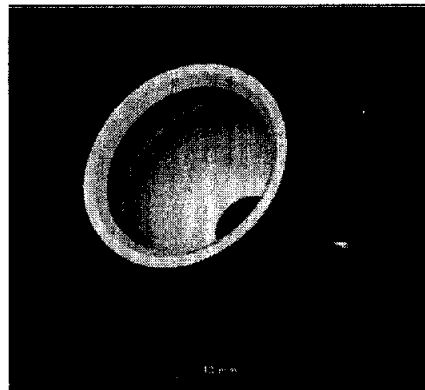


Fig. 39 T-type base model



Fig. 40 R-type Confidence of fill

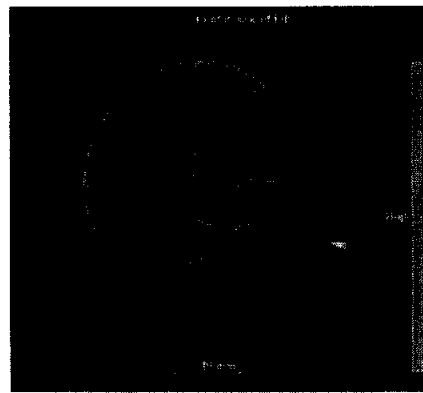


Fig. 41 T-type Confidence of fill

위의 Fig. 40, 41은 충전신뢰도를 나타내는 것이다. 초록색을 가지는 부분은 충전상에 아무런 문제가 없다. 이것은 단지 충전이 되어가는 형상과 전체적으로 미충진 없이 성형이 가능한가를 판단하는 근거가 된다.



Fig. 42 R-type weld line

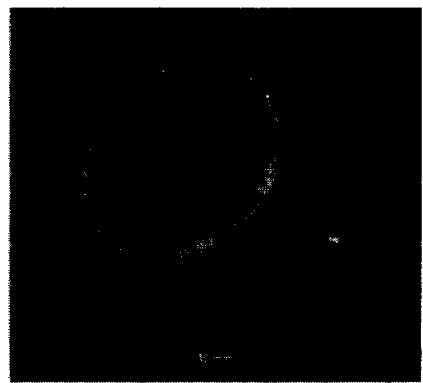


Fig. 43 T-type weld line

위 Fig. 42, 43은 Weld Line을 나타낸 것이다. Weld Line은 주로 서로 다른 유동이 만나서 발생하는 현상으로 온도가 낮아진 유동선단이 서로

만나 완전한 결합구조를 가지지 못하게 됨을 보여준다. weld line이 발생할 때에는 허용되는 한계에서 사출 속도를 높여주거나 금형온도를 상승시킴으로 해서 개선이 가능하다.

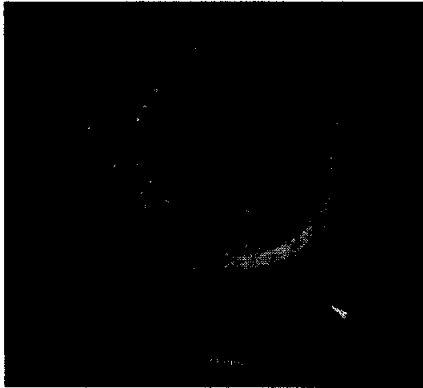


Fig. 44 R-type air trap

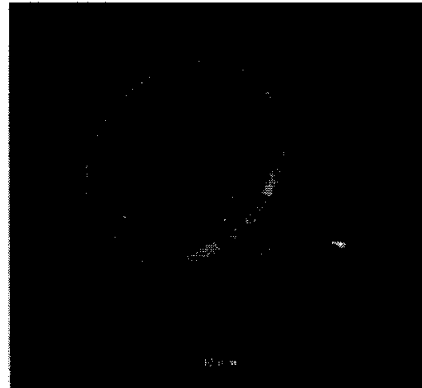


Fig. 45 T-type air trap

위의 Fig. 44, 45은 Air Trap을 나타낸 것이다. Air Trap 은 금형 내부에 있던 공기가 수지의 충전에 따라 배출되지 못하고 정체하여 있는 현상으로 국부적으로 집중이 되었을 때에는 불량을 발생시킬 수 있다. 성형 해석상 Air Trap이 여러 곳에서 발생하나, 위의 결과에서는 아무런 문제가 되지 않는다. 그것은 Air Trap이 주로 상부에 발생하는데 이곳에 볼의 인서트 부부인 parting 면을 이루는 곳이므로 자연적이 배출이 되는 구역이다.

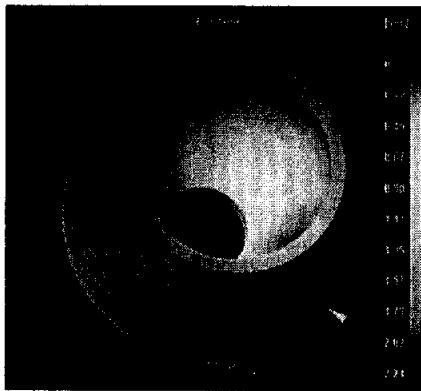


Fig. 46 R-type fill time

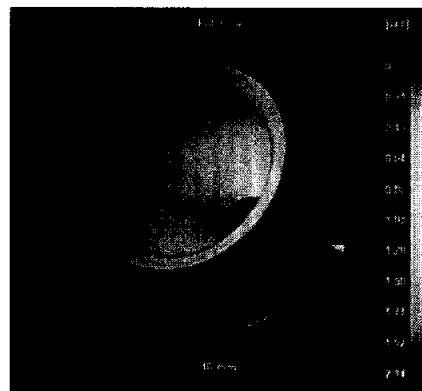


Fig. 47 T-type fill time

위의 Fig. 46, 47은 Fill time을 나타낸 것이다. Fill time은 충진을 시간 단위로 나타낸 것으로 이와 같은 단순 대칭의 경우에는 크게 문제가 발생하지 않으나 비대칭구조 또는 복잡한 구조에서는 충진 균형이 유지가 되는지가 중요한 성형 요소가 된다. 또한 비균형 충진이 이루어 졌을 때에는 온도분포의 불균일을 예상할 수 있으며 또한 이에 따른 휘어짐이나 이상 수축 등도 예측을 할 수 있다. 위의 결과에서는 두 model 에 대하여 2.5초 정도의 비슷한 충진시간으로 균일한 분포를 이루는 것을 확인할 수 있다.

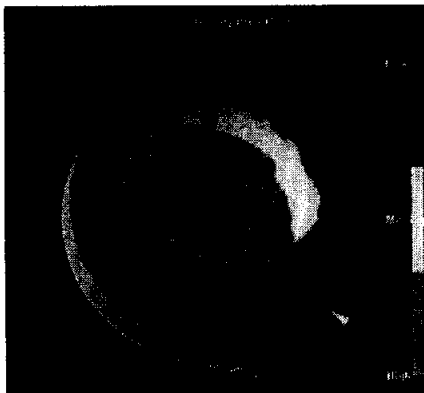


Fig. 48 R-type
injection pressure

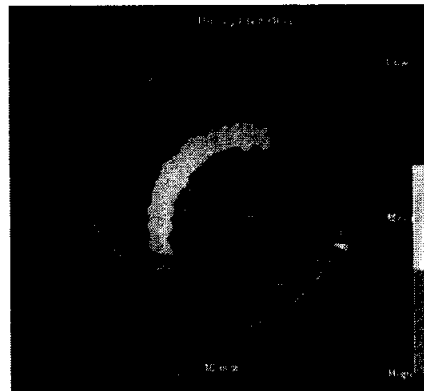


Fig. 49 T-type
injection pressure

위의 Fig. 48,49은 Injection Pressure을 나타낸 것이다. Injection Pressure 은 충전이 진행됨에 있어 각각의 위치에서의 압력을 나타낸 것이다. 이 또한 진행에 따른 이상 압력저하가 발생할 시에는 미충진등의 불량 발생 할 수 있고, 압력 감소의 폭이 클 경우 충전되는 속도 또한 감소함으로 해서 충전후의 조직이 불균일할 가능성이 있다. 위의 결과에서는 gate부에서 유동의 마지막 구간까지 대칭구조에 따른 균일한 압력 분포를 가지며 압력저하 또한 낮은 상태이다.

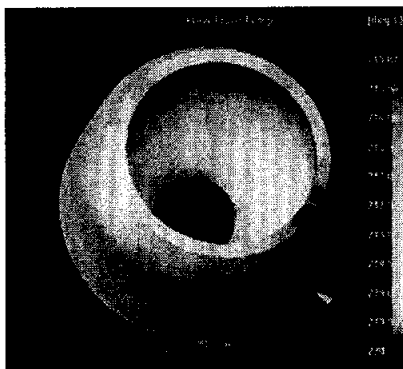


Fig. 50 R-type flow front
temperature

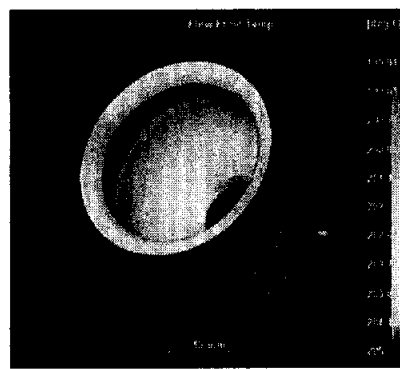


Fig. 51 T-type flow front
temperature

위의 Fig. 50, 51은 Flow Front Temperature를 나타낸다. 이 해석의 결과로 유동선단에서의 온도를 알 수 있다. 즉 선단부의 온도 저하를 시각적으로 확인을 할 수 있음으로 전술한 weld line의 발생을 온도의 개념으로 확인할 수 있는 결과이다. Weld line이 발생한 하부 gate 반대편의 곳에서의 온도저하가 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다.

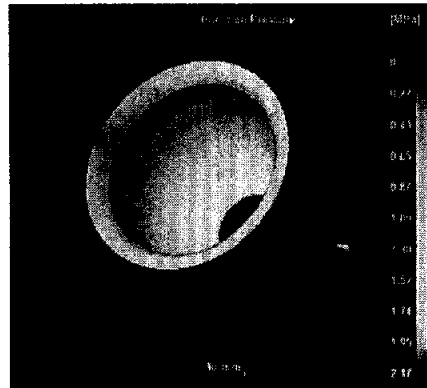
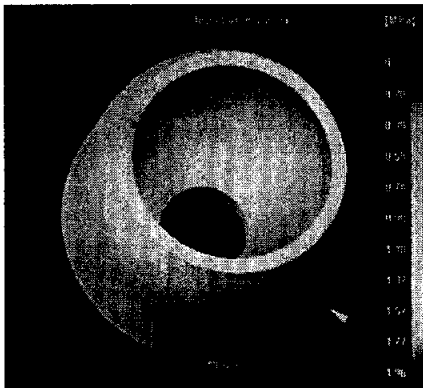


Fig. 52 R-type quality prediction Fig. 53 T-type quality prediction

위 Fig. 52, 53은 Quality Prediction을 나타낸 것이다. 전체적인 결과를 바탕으로 품질에 대한 신뢰도를 나타낸것이다. 아래의 노란 부분이 Midium을 나타내는 것으로 다른 부분에 비하여 두께가 두꺼워 발생하는 것이다.

2.6. 성형실험

사출성형을 위한 금형의 제작에 있어서 반드시 고려해야 할 것은 플라스틱의 수축이다. 플라스틱 제품이 금형 캐비티에서 떨어져 나오는 순간 사출이 완료된 것처럼 보이나, 금형에서 떨어져 나온 플라스틱 제

품은 나온 순간부터 수축하기 시작한다. 수축은 일반적으로 몇 분내에 완료되나 수지의 종류에 따라 수 시간, 며칠 혹은 몇 달이 걸리는 수가 있다. 이 수축이 장시간을 경과하면서 일어나는 경우 부품의 장착이후에 서서히 그 치수가 변하는 수가 있다. 그러므로 금형 가공에 있어 미리 수축을 고려하고 금형을 제작하여야 한다.

2.6.1 PA(Polyamide)의 수축

모든 플라스틱 성형품은 사출 후 서서히 수축하게 된다. 그 수축의 원인은 용융수지의 비체적이 온도가 내려가면서 감소함으로 발생한다. PA66의 경우 수분이 전혀 없는 상태(상대습도 0%)에서 시간이 지남에 따라 수축이 일어나 평형점에 도달 할 경우의 수축률은 20/1000이다. 그러나 PA는 다른 플라스틱과 달리 수분을 잘 흡수하는 특성을 가지고 있다. 공기중의 수분은 사출하기 전 원료에 들어와 문제를 일으키거나 사출 후 제품에도 영향을 미친다. 수지에 따라 흡수속도와 평형흡수율이 다르나 모든 플라스틱은 약간의 수분을 흡수한다. 수분이 플라스틱에 들어가는 것은 확산현상의 하나로 시간의 함수이며 충분한 시간이 지나면 평형점에 도달하게 된다. 수분이 부품에 들어가면 부품은 팽창하게 되며 그 팽창정도는 수분의 양에 비례한다. PA66(Nylon)의 경우 상온, 상대습도 50%에서의 평형점에서의 수분 함량은 2.5%이며 그에 따른 팽창은 6/1000 이다. 결국 PA66의 경우 상대습도 0%일때의 수축에서 상대습도 50%일때의 수분에 의한 팽창 값을 뺀 나머지 14/1000이 실제 수축률이다. 이러한 수축률을 고려하여 Fig. 54, 55와 같이 금형을 제작하였다.

2.6.2 인서트 몰딩을 이용한 ball seat 성형 실험

성형 해석을 바탕으로 ball seat 금형을 아래와 같이 제작하였고, 성형 조건 역시 성형해석을 바탕으로 하였다. 아래의 Fig. 56은 이동측 금형으로, 금형에 4개의 ball stud가 insert 되어 있는 것을 볼 수 있다.

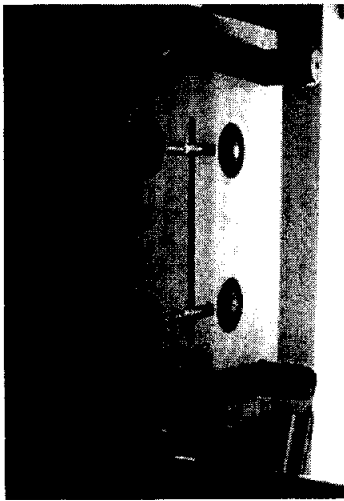


Fig. 54 bottom plate mold

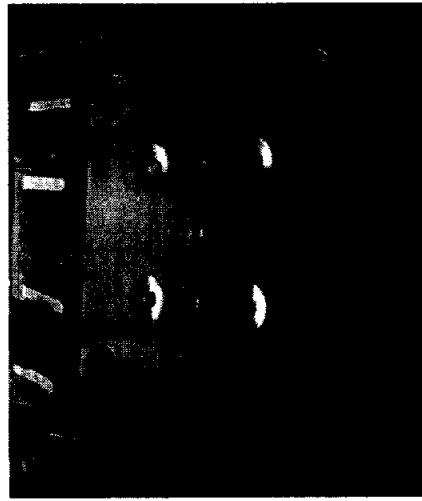


Fig. 55 Upper plate mold

Table. 4 A condition of injection process

Machine	LG-140ton (1400 kgf/cm ²)				
Grade	FM2020 (POM)				
Injection pressure	1 60	2 60	3 60	4	%
Injection time	3(보압시간 포함)				sec
Injection temperature	(HN)230	(H1)225	(H2)220	(H3)210	℃
holding pressure	45	45	45		%
holding time	1.5				sec
Cooling time	30				sec
Clamping force	100				ton
Mold temperature	80				℃

아래 Fig. 56은 위와 같은 조건으로 성형된 인서트 몰딩을 이용한.
R-type ball seat이다.

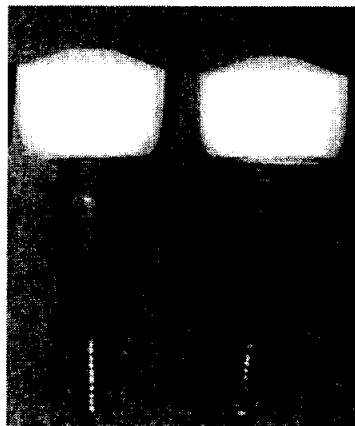


Fig. 56 a ball seat using insert molding

인서트 몰딩을 이용한 ball seat의

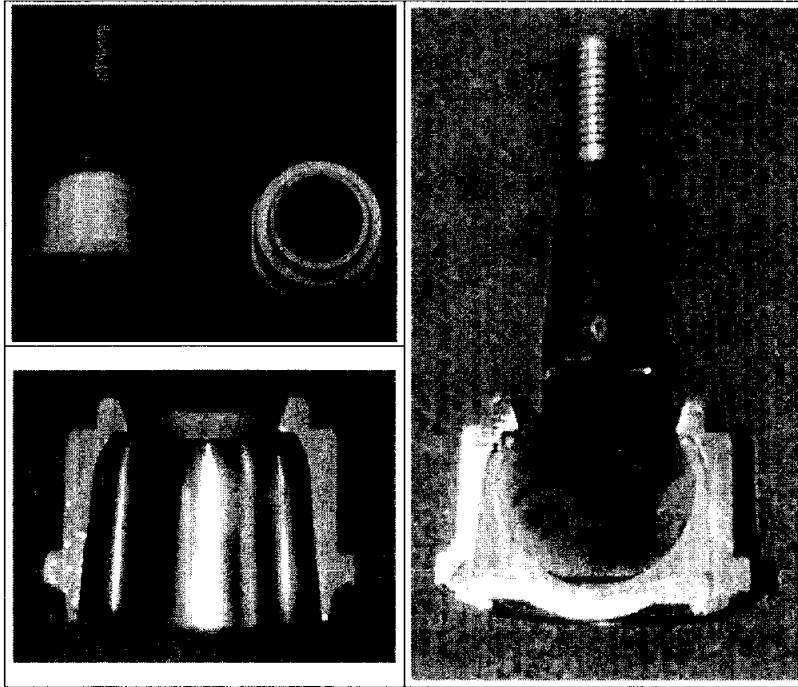


Fig. 57 R-type ball joint using insert molding

3. 결론

인서트 몰딩을 이용한 볼조인트 개발에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. FEM 해석을 통한 이탈하중 해석을 실제 시험과 비교함으로써 FEM 해석 결과의 신뢰성을 검증.
2. FEM 해석 결과의 데이터를 바탕으로 신규 모델인 R-type의 ball seat 형상 개발
3. 기존의 5320kgf의 이탈 하중을 가지던 T-type의 ball joint를 R-type의 ball joint로 변경하여 압발하중을 6780kgf로 약 28%증가.

인서트 몰딩 방식으로 새로 개발된 ball joint의 성능이 기존보다 월등히 증가한 것을 볼 수 있다. 기존의 T-type에서는 이탈력을 증가하기 위해서는 socket의 두께를 늘리는 방법으로 소재비의 증가를 가져왔다. 그러나 R-type의 ball joint를 사용할 경우 같은 이탈 하중일 경우 R-type이 기존의 T-type보다 얇게 socket을 제작 할 수 있어, 결국 소재비의 절감도 발생할 것으로 사료된다. 또한 기존의 ball seat는 성형 후 ball seat의 강제 조립시 강제 압입에 의한 ball seat 파손을 막기 위하여, 연성이 좋은 NYLON 계통의 수지를 사용하였다. 하지만, 인서트 몰딩을 이용할 경우 조립에 의한 ball seat 파손이 없으므로 ball seat의 재료 선정에 대한 폭도 넓어질 것으로 사료된다.

또한, 본 연구는 새로운 type의 ball joint 개발에 있어서 CAE를 최대한 활용하였다. 본 연구를 통해 얻어진 data는 앞으로도 새로운 모델의 개발에 있어서 시행착오에 대한 손실을 줄이고, 개발 기간의 단축에 상당한 도움이 될 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- 1) MARC Analysis Research Co., Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers, 1996
- 2) B. C. Lee and B. M. Kwak, "A Computational Method for Elasto-plastic Contact Problems", Comput. & Struct., Vol. 18, pp. 757~765 1984.
- 3) M. A. Crisfield, Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Vol.1, John Wiley & Sons, 1991
- 4) Bathe, K. J. and Chaudhary, A., "A Solution Method for Planar and Axisymmetric Contact Problems", Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 21, pp. 65~88
- 5) Tadmor. E. , Boryor. E. and Gutfinger. C. , 1974, "Flow Analysis Network(FAN) : "A Method for solving folw problem in Polymer Processing" polym. Eng. and Sci., Vol. 14, No. 9, pp. 660~665.
- 6) Kamal. M. R. and Kening. S. , 1972, "The Injection Molding of Thermoplastic, Part I : Theoretical Models". polym. Eng. and Sci, Vol. 12 , pp. 294~301.
- 7) Cox. H. W. and Mentzer. C. C. , 1986, "Injection Molding : The Effectof Fill Time on Properties", polym. Eng. and Sci. , Vol. 26, pp. 488~498.
- 8) Moy. F. II and Kamal. M. R, 1980, "Crystalline and Amorphous Orientations in Injection Molding", polym. Eng. and Sci. , Vol. 20, No. 14, pp.957~964
- 9) J. N. Reddy, "Finite Element Method(Second edition)",

- McGraw-hill international editions, 1997.
- 7) "Moldflow Training Manual", Release 9.1, 1996, Moldflow Pty. Ltd.
 - 8) T. J. Lardner and B. R. Archer, "Mechanics of Solids", McGRAW-HILL International Edition, 1994.
 - 9) 이 억섭, 한 민구, 1993, "복합재료 파괴역학", 원창출판사, pp. 162~180.
 - 10) 이 상관, 김 병선, 1996.7, "섬유강화 복합재료와 자동차", 자동차 공학회지, Vol. 18, No. 5.
 - 11) 이 우일, 엄 문광, 1994, "복합재료와 성형공정", 대한기계학회지 제 34권 제5호.
 - 12) CROUSE-ANGLIN, 1993, "AUTOMOTIVE MECHANICS" tenth edition, McGraw-Hill
 - 13) Friedle, C. F. and McCaffrey, N. J., "Crystallization Prediction in Injection Molding", SPE Technical Paper, Vol.5, pp.330-332, 1991
 - 14) Koita, Y. T., "Packing and Discharge in Injection Molding", Polymer Eng. & Sci., December, Vol.14, No.12, pp.840-847, 1974
 - 15) Mamat, A., Trochu, F. and Sanschagrin, B., "Shrinkage Analysis of Injection Molded Polypropylene Parts", SPE Technical Paper, Vol.4, pp.513-517, 1994
 - 16) Rubin, I. I., Injection Molding Theory and Practice, John & Wiley Sons, New York, pp.270~281, 1972
 - 17) 서영주, 플라스틱의 사출과 압출, 코플랜드, 1993

- 18) Georg Menges, Paul Mohren, How to Make Injection Molds,
Hanser Publishers, 1993
- 19) 유중학, 김희송, “사출성형에서 캐비티 압력과 인장강도에 관한 연
구”, 한국 자동차 공학회 논문집 제2권 제6호, pp.110~116, 1994
- 20) 최철주, 이호관, “사출성형 산업의 CAE 응용”, 대한기계학회지, 제
31권 1호, pp.60-67, 1991
- 21) I. N. Dontula, G. A. Campbell “An Approach Towards Molding
Parts With Constant Properties on Addition of Re grind”,
Antec'94, PP.1783-1788, 1994

감사의 글

이 논문이 나오기까지 많은 지도와 관심을 보여주신 분들에게 어떻게 감사의 말을 전해야 할지 모르겠습니다.

먼저 하나님께 감사와 영광을 돌리며, 학부시절부터 지금까지 아낌없이 지도를 해주신 김영수 교수님을 비롯하여, 오후규교수님, 김중수교수님, 윤정인교수님, 금중수교수님, 최광환교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

그리고 실험실 생활을 하면서, 항상 인간적으로 따뜻하게 대해 주시고, 후배의 부족한 점을 언제나 넉넉히 채워주신 인관이 형, 태호 형 너무 감사합니다. 그리고 언제나 부탁만 했던 재홍이 형, 병태 형, 수진이 형님께도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 그리고 만날 때마다 따뜻이 대해주신 정호 형, 준호 형, 근득이 형, 준업이 형, 돌이 형, 준영이 형, 대식이 형, 찬용이 형과 동기인 창기에게도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 저를 너무나도 사랑해 주시는 부모님과 누나, 매형, 그리고 사랑스런 동생 지현이와 나의 오랜 친구 해수, 재용이, 익문이, 세형이에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 특히 내가 너무 사랑하는 동산가족 수진이, 중희, 수영이, 재원이, 상헌이, 주연이 그리고 원철이에게도 고맙다는 말을 꼭 전하고 싶습니다.

이 논문이 지난 모든 일들에 대한 결실이기 보다 미래에 대한 귀중한 디딤돌이 되기를 간절히 소망하며, 격려해 주시고 사랑해주신 모든 분들에게 감사의 맘을 전합니다. 감사합니다.