

# 단조공정설계에서 시뮬레이션의 활용

久保田 智<sup>1</sup> · 山本 忠司<sup>1</sup> · 山中 雅仁<sup>1</sup>

## Forging Process Design Using by the Computer Simulation

S. Kubota, T. Yamamoto, M. Yamanaka

### 1. 개요

단조가공에서는 일반적으로 소성변형이 탄성변형보다도 아주 크다. 따라서 탄성변형의 영향이 작다는 가정을 바탕으로 한 강소성 유한요소법으로 단조 시뮬레이션을 하였다. 최근에 계산기의 성능향상을 배경으로 높은 해석정밀도를 목표로 한 탄소성변형 및 온도연성해석을 적용한 결과도 있다[1]. 한편에서 복잡형상을 대상으로 한 3 차원 단조 시뮬레이션의 필요성이나 계산시간 및 하드웨어 제약 등을 고려하고 종합하여 강소성 변형해석은 현재에도 폭넓게 쓰이고 있다. 특히 냉간단조 분야는 사용자의 저비용성, 에너지 절감, 단담기화 등이 요망되는 가운데 온열간 단조품이나 절삭에 의한 가공되고 있던 부품, 복잡형상부품 등을 냉간단조에 의하여 제조하는 예가 늘어나고 있으며, 시뮬레이션 소프트웨어를 도입하여 활용하는 기업이 늘어나고 있다.

현장에 있어서의 단조 시뮬레이션의 실정으로서 단조품의 설계나 공정변경에 따른 예비검토 또는 단조 부조화 검증 및 대책안의 평가방법으로서 쓰여지는 예가 적지 않다. 이것은 학회, 연구회에서 발표되는 정보의 축적이나 재료 데이터의 충실도 향상, 모델링 기술의 향상, 소프트웨어의 개량으로 이제까지의 실적이 축적된 힘의 영향이 크다. 이 뿐만 아니라 단조 시뮬레이션 기술이 제품개발자를 지원, 시뮬레이션의 도입으로 비용절감, 납기 단축의 효과로서 나타난 것에 기인한다고 생각된다.

여기서는 강소성 유한요소법을 사용한 단조 시뮬레이션의 활용에 대하여 서술하는 것과 동시에 현장에서의 적용사례로서 단조로 만들어지는 복잡형상부품의 변형에 관한 예비검토를 소개하고 더 나아가서 성형시에 금형에 걸리는 응력부하의 평가에 대하여 서술하였다.

### 2. 단조 시뮬레이션 의 도입

#### 2.1 현재의 단조공정 검토

일반적으로 종래의 제품개발에 관한 단조공정설계는 그림1에 표시한 것과 같은 경로를 거친다. 구체적으로 공정 검토의 초기에 있어서는 제품도에서 단조도면을 작성하기 위하여 후 공정의 유무, 가공설비를 배려하여 단조품의 형상, 치수법 설정하고 또 목표가 되는 치수 정밀도를 달성하여 최소의 공정수가 될 수 있는 소성유동을 얻는 공정 layout의 고안 및 금형도면의 작성이 필요하게 된다[2].

이 단계에서 나타나는 문제는 많은 경우 설계자의 과거 경험이나 know how, 유사의 사례를 기초하여 검토하고, 공정설계에 관한 정보의 축적 데이터를 활용하거나 숙련자에 의한 충고가 가장 중요시 되었다. 참고되는 예가 없을 경우에도 과거의 사례에서 유추하여 그 시점에서 최선안이 선택되었다.

이와 같이 결정되는 단조도면이나 공정 layout 및 금형도면들을 기본으로 금형의 제작 및 시작품을 만드는 것으로 되지만 반드시 금형수정→

1. (株)ヤマナカコーキン (우) 285-0802 佐倉市大作 2-11-2, Japan  
기술해설: 소성과 가공(일본소성가공학회지) 제47권 제 542호 pp.  
190-194(2006.3)  
번역자: 박정서(자유번역가), 김인수(금오공과대학교 신소재시스템공학부, 교수)

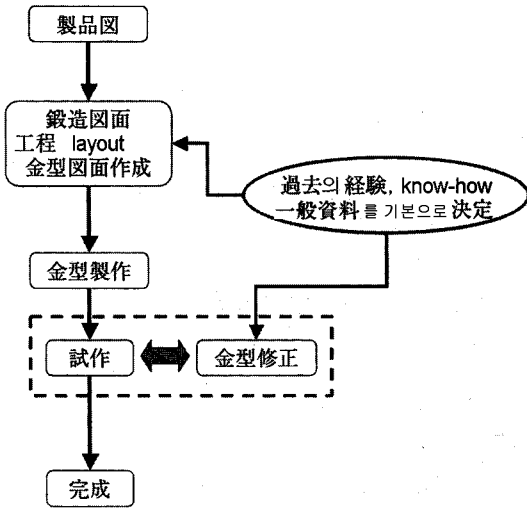


그림 1 종래의 공정검토 흐름

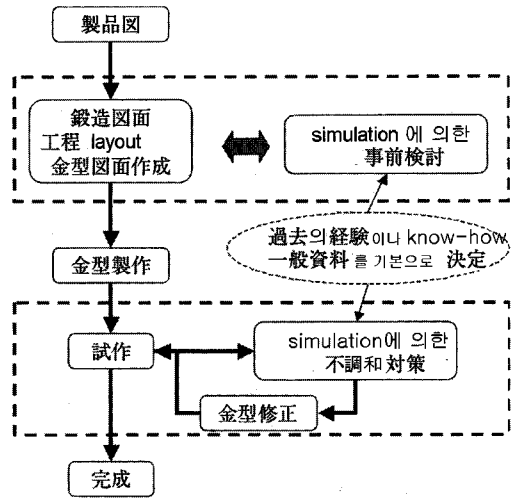


그림 2 시뮬레이션을 활용한 공정검토의 흐름

시작품→완료로서 순조로이 진행되는 일은 없고 금형수정→시작품...과정을 되풀이 하는 것이 많았다. 시작품 회수의 증가는 개발비용이나 개발기간에 직접영향을 미치는 것이므로 사례 검토로서 문제점의 도출과 적절한 처리가 필요하다고 말할 수 있다.

또 충분히 사전 검토를 했다고 하여도 가공 중에 일어날 수 있는 문제들을 모두 고려할 수 있는 것이 아니기 때문에 시작품의 부조화가 발생하는 경우가 적지 않다. 이와 같은 단조품 또는 금형의 부조화에 대해서는 부조화 부위를 파악하여 적절하다고 생각되는 대책을 세우지 않으면 문제해결까지의 길은 멀어지게 된다.

### 2.2 단조 시뮬레이션에 의한 공정 평가

공정검토에 있어서 애로사항을 아주 적게 하기 위해서 유효한 수단으로 단조 시뮬레이션이 활용되게 되었다. 그림 2는 단조 시뮬레이션을 도입한 경우의 공정설계의 흐름이다.

제 1 단계는 설계초기의 문제점을 해결하는 것이며 이 단계에서 어떻게 문제를 유출하는가가 중요하다고 할 수 있다. 단조 시뮬레이션을 쓰는 일로 실제의 가공조건에 가까운 상태에서 사례검토가 가능하나 과거의 사례에 얽매이지 않고 공정평가를 할 수 있다는 장점이 기대된다.

제 2 단계에서는 부조화가 발생한 경우 대책 방법을 검토하는 것이며 원인조사와 부조화 대책을 결정하는 것이 목적이다.

여기서는 단조 시뮬레이션의 역할로서 부조화 현상을 재현하고 그 원인을 명확하게 하는 것과 대책으로서 나오게 된 안을 이용하여 부조화 현상을 해소할 수 있는가를 검증하는 것이며 부조화 대책의 방침을 정하기 위해서 유용한 정보를 제공하기로 한다. 또 각 단계에 있어서 얻어진 단조 시뮬레이션 결과는 구체적인 사례와 같이 데이터로 축적할 수가 있으며, 경험이나 노하우라는 공유화 하기 어려운 것을 끌어들이어 폭넓게 기술로서 활용할 수 있는 기회를 넓힐 수 있다고 생각 할 수 있다.

## 3. 단조 모델링과 결과의 평가

### 3.1 모델링 파라미터

단조현상을 시뮬레이션하기 위해서는 재료, 단조기, 공정 등 계산대상이 되는 것을 모두 수치화(수식화)할 필요가 있으며 일반적으로 이와 같은 수치화 작업을 모델링이라 부르고 있다[3]. 그림 3은 입력하는 항목의 일례이며 시뮬레이션의 목적에 따라 조합하여 사용하고 있다. 이들 중에는 형상 데이터나 실험 데이터 등 수치적으로 다루기 쉬운 것이 있는 반면, 주어지는 수치가 불명확하거나 모델링 곤란한 상태를 포함하는 것도 있다. 시뮬레이션에 의해 얻어지는 결과는 대상이 되는 단조공정을 적절하게 모델링 되는가 아닌가에 의해 크게 좌우되기 때문에 계산오차나 실험오차 외에 그림 4에 표시하는 것과 같이 따로 떨어졌

거나 오차 등의 문제를 포함한 결과의 검토를 수행해야 한다.

### 3.2 재료 모델의 선정

많은 금속재료에서는 재료에 힘이 가해지면 탄성변형 생기고 더욱 더 커다란 힘이 걸린다면 소성변형을 일으킨다. 그 후 힘을 제거하면 재료는 변형방향에 따라서 탄성변형분만 원래 형상으로 되돌아간다. 시뮬레이션에 있어서 이와 같은 거동을 고려한 재료 모델을 탄소성체로 부르며 주로 변형량이 작은 가공이나 스프링 백, 잔류응력을 구하는 경우에 적용된다. 한편 탄성변형보다 충분히 큰 변형으로 스프링 백, 잔류응력을 고려할 필요가 없는 경우에는 소성변형만을 대상으로 한 재료 모델인 강소성체가 쓰여진다. 그림 5에 표시하는 것과 같이 탄소성체와 강소성체의 차이는 탄성변형의 유무이며 통상 시뮬레이션의 대상이 되는 가공방법, 재질, 형상 등에 의해서 적용하는 모델을 결정한다. 단조에 있어서는 대변형의 가공이 중심이 되기 때문에 재료 모델로서 강소성체를 이용하는 사례가 많다.

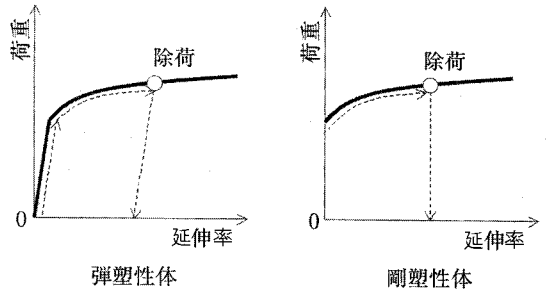


그림 5 탄소성체와 강소성체의 하중-연신율 곡선

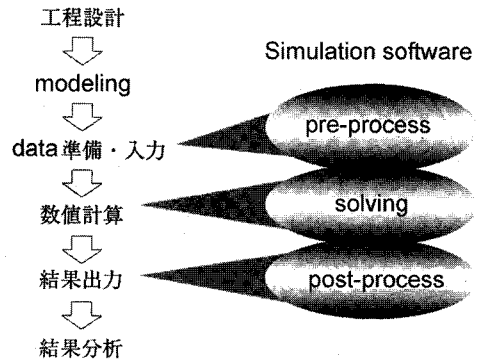


그림 6 시뮬레이션 작업의 흐름

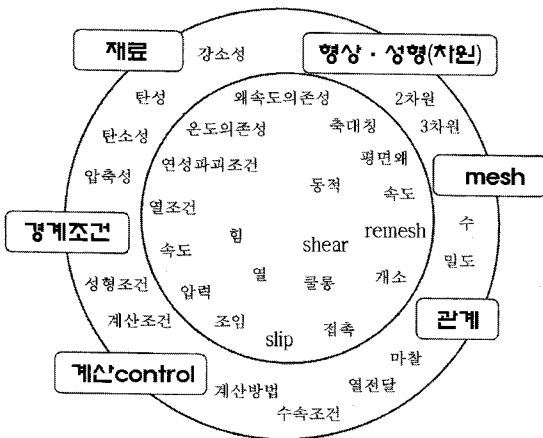


그림 3 단조 모델링 파라메타

金 型	材 料	鍛造条件
• 寸法誤差	• 寸法誤差	• 潤滑狀態
• 加工精度	• 加工精度	• 裝置剛性
• 素材不良	• 素材不良	• 加工精度
	• 前處理狀態	

그림 4 모델링이 곤란한 인자

### 3.3 시뮬레이션 작업

공정이 결정되고 대상이 되는 단조의 모델링이 된 단계에서 시뮬레이션을 실시할 준비가 정리됐다고 말할 수 있다. 현재 시판되는 시뮬레이션 프로그램은 데이터의 입력, 계산 및 결과표시까지를 하나의 패키지로 제공하는 경우가 많으며 그림 6에 표시한 것과 같은 수순을 밟는 것으로 대강 한차례의 계산결과를 얻을 수 있다.

프리프로세서는 형상, 재료, 동작, 경계조건 등의 모델링 데이터를 입력하여 계산에 필요한 설정 파일을 생성하는 프로그램이다. 여기서 입력한 값은 계산결과에 크게 영향을 주기 때문에 가장 중요한 부분이라 말할 수 있다. 솔버는 프리프로세서로 정의된 조건에 따라서 계산을 실현하는 프로그램이며 정식화된 유한요소법 등을 써서 수치계산을 하는 부분이다. 포스트프로세서는 솔버에서 출력된 계산결과를 표시하는 기능을 갖고 있으며 여러가지 결과를 3차원 등고선도나 단면 슬라이스, 애니메이션 등을 써서 정보를 시각적으로 알기 쉽게 표시하는 프로그램이다. 또 목적에 맞추어서 CAD 소프트나 데이터처리 소프트 등 여

타의 적용법과 조합하면 데이터를 입력하는 부담을 경감하거나 계산 결과 검토를 진행하기 쉽게 한다.

### 3.4 시뮬레이션 결과의 평가

시뮬레이션 소프트웨어는 모델링 데이터로서 어떠한 값이 입력되어 있어도 컴퓨터에 의하여 계산을 실행하게 한다. 그 때문에 계산에 의해 출력된 시뮬레이션 결과는 반드시 타당성 확인하여야 한다. 실제와 크게 다른 값을 얻으면 입력 오류나 모델링의 부적합이라 생각할 수 있다. 그러나 설계와의 차이가 아주 조금이든지 그 절대값 정도에서 문제가 되는 경우에는 모델링 파라미터의 조율 즉 결과를 좌우 한다고 생각되는 복수의 설계조건 아래에서 계산을 실시하여 비교할 필요가 있다.

또 목적인 시뮬레이션 정밀도 달성을 위해서는 모델링 파라미터의 최적화뿐만 아니라 실제(단조품, 금형등)의 측정 평가기술도 동등하게 갖추어져야 한다.

이미 유사한 시뮬레이션 실시 예가 있는 경우 하중이나 변형률 등 여러가지 데이터와 상호비교가 가능하지만 시뮬레이션에 의한 사례가 적으면 과거의 사례나 경험만을 의지하지 않으면 안된다. 보다 유효하게 시뮬레이션을 활용하기 위해서는 시작품 결과를 대응시키고 시뮬레이션 사례의 축적이 필요하다고 생각된다.

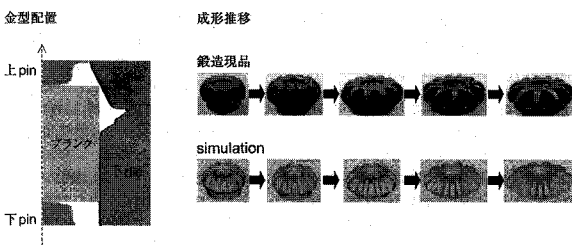


그림 7 베벨기어 금형배치와 성형추이

## 4. 단조 시뮬레이션의 적용사례

### 4.1 베벨기어의 성형 해석

당사에서는 베벨기어의 폐쇄단조장치 및 금형을 제작하고 있으며 시뮬레이션에 의한 사례검증도 행하고 있으나 실제를 행한 단조결과를 시뮬레이션에 피드백하는 것으로 사전검토에 적용하여 시뮬레이션 예측 정밀도 향상을 위하여 병행

하고 있다. 그림 7 은 베벨기어 단조시의 금형배치와 단조형품 및 시뮬레이션에 의한 형상을 표로 나타낸 것이다. 현재는 단조 중의 소재 변형과정이 잘 재현될 때까지 이르렀다. 또 그림 8 에 표시한 바와 같이 성형에 필요한 하중 및 폐쇄력을 정확하게 견적할 수가 있게 되어 있다. 여기서는 베벨기어의 공정검토에는 시뮬레이션 적용 예를 소개한다.

현재 신규 성형상품에 대해서는 시뮬레이션에 의한 사전검토에 의해 공정설계를 행하고 있으며 시뮬레이션으로 주로 확인하는 사항은 성형하중, 폐쇄력 및 충전현상이다. 베벨기어의 성형조건을 결정하는데 있어서 1.단순원주, 2.머리부면, 3.머리부 팽창의 블랭크 형상에 대하여 행한 시뮬레이션 결과를 그림 9 에 표시하였다. 최종의 성형하중 폐쇄하중에 대해서는 어느 것이든 거의 같아 지지만 각 성형 과정을 확인하면 블랭크 형상의 차이에 의한 우위성에 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 블랭크 형상 1 은 베벨기어 상부에 다른 것보다도 형태에의 충전이 늦은 부분이 보여지는 것에서 결함이나 가스 모이는 곳이 생길 우려가 있다. 블랭크 형상 2 는 기어의 상부에서 순서대로 충전하고 있으며 단조 부조화로 판단되는 장소는 없었다. 또 블랭크 형상 3 에서는 큰 지름 축에서의 흐름이 비교적 크고 말려들 발생을 예측할 수가 있었다. 그림 10 은 소재가 덮어지는 모양을 표시한 것으로 실단조품에서는 말려들의 결함으로써 나타난다. 이것들의 세 종류의 블랭크 형상의 성형성을 비교하면 블랭크 형상 2 가 유리하다는 결론이다.

베벨기어의 성형검토로서 블랭크 형상의 비교평가를 소개 했지만 복수공정에 걸친 성형에 대해서도 같은 관점에서 시뮬레이션에 의한 성형검토를 진행할 수가 있다고 생각된다.

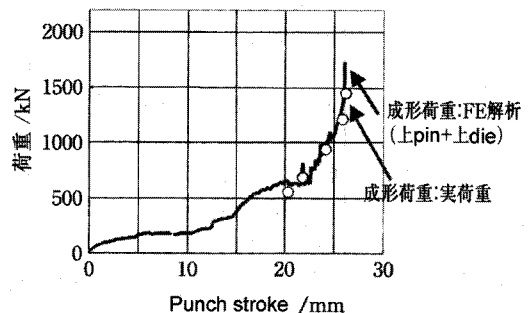


그림 8 베벨기어의 성형하중

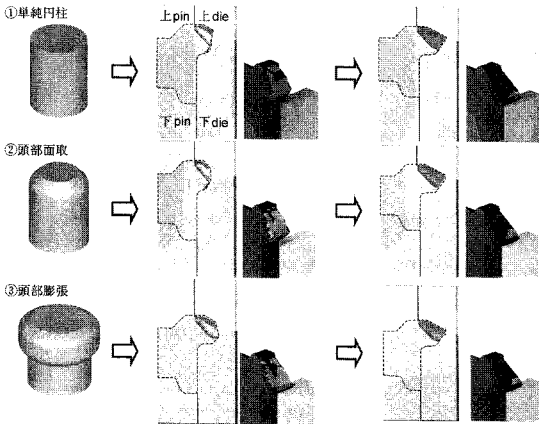


그림 9 베벨기어의 블랭크 형상검토

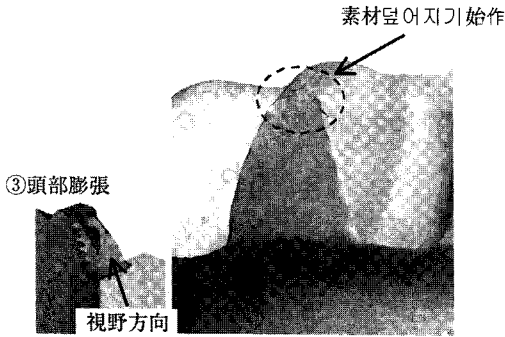


그림10 베벨기어 성형과정에 있어서의 말려들부 조화 예측

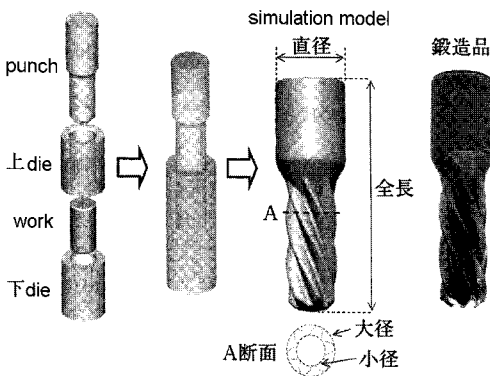


그림11 헤리칼기어의 형상 비교

#### 4.2 헤리칼기어의 성형응력 해석

단조에 의한 복잡형상품의 가공에서는 단조품의 성형상태나 성형하중만이 문제가 되는 것은 아니고 금형에 대해서는 부하상태에 대해서도 평가

할 필요가 있다. 여기서는 헤리칼기어의 성형 시뮬레이션에서 금형의 응력 시뮬레이션까지의 흐름을 소개한다.

그림 11 에 헤리칼기어의 단조품과 시뮬레이션모델의 외관을 표시하였다. 기어 도입부 형상이나 머리 부분 시뮬레이션에서는 잘 재현되고 있다. 또 표 1 은 헤리칼기어의 전장, 직경, 대경 및 소경을 비교한 것이지만 전장, 직경, 소경의 횡수 정밀도에 비해 시뮬레이션에 의한 대경측의 길이가 작게 견적되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 시뮬레이션 모델의 치선형상이 리메시의 되풀이 의한 영향을 받아 오차가 포함되었다고 생각된다.

표 1 헤리칼기어의 치수 비교

	全長/mm	直径/mm	大径/mm	小径/mm
鍛造品	79.337	24.055	17.664	10.470
simulation model	79.334	24.000	17.526	10.449
횡수 差	0.003	0.055	0.138	0.021

기타의 치수차는 금형 및 소재의 탄성변형분이 포함되어 있다고 생각된다. 그림 12는 시뮬레이션에 의하여 구한 변형률, 응력, 면압 및 절점속도 분포이다. 성형 중에 이것들의 각 성분 값을 확인 하면 기어 도입부에 상당하는 위치에 있어서 각각 높은 값을 표시하는 것을 알 수 있다. 금형의 부하를 평가하기 위해서 단조중의 형용력을 시뮬레이션하기에는 조합한 상태의 금형 블랭크에서의 성형력을 전사하는 것에 의하여 이루어진다. 그림 13은 헤리칼기어의 형용력 시뮬레이션모델이다. 체결에 의한 탄성변형과 성형 시뮬레이션에 의해 얻어진 성형력에서 금형의 변형을 구한다. 이때 금형에 나타나는 응력분포는 그림 14와 같이 되어 대경측에 응력이 집중하는 것을 알 수 있다. 이 장소에서는 응력성분은 주방향응력이 크고 이 위치에서 깨질 경우에 세로 분할이 일어나게 될 것을 시사 하고 있다.

이와 같이 강소성 유한요소법에 의한 단조 시뮬레이션에서 소재의 성형 상태를 확인할 수 있는 동시에 구한 결과를 이용하여 선형 탄성 유한요소법에 의한 시뮬레이션을 실시하여 금형에 대한 응력평가가 가능하다. 이 시뮬레이션 수법은 탄성 및 탄소성체의 연성과 비교하면 계산기에 높은 능력을 필요로 하지 않으며 계산시간도 대폭적으로 짧게 끝나는 장점도 있다.

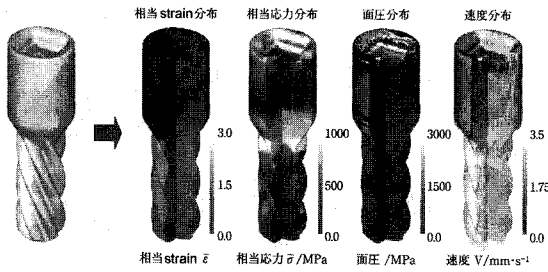
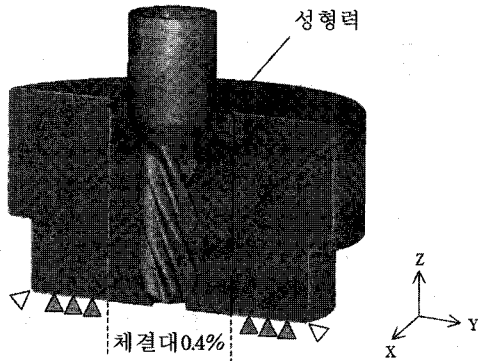


그림12 헬리칼기어 성형 중의 각 성분분포



- 下 die (탄성체) : YT7 (조정)    ▽ X, Y 구속
- case (탄성체) : SKD61        ▲ Z 구속

그림13 헬리칼기어 형응력 시뮬레이션 모델

### 5. 결론

본 원고에서는 단조공정설계의 지원 단조 시뮬레이션을 소개하고 시뮬레이션의 도입과 활용방법에 대하여 개략적 설명을 하였다. 또 단조 시뮬레이션의 적용사례로서 베벨기어, 헬리칼기어라 하는 복잡형상부품을 대상으로 한 사전검토 예를 들어 성형 및 응력 시뮬레이션에 의한 평가에 대하여 소개하였다.

재현성 및 계산정밀도에 대해서는 실단조품과 비교되는 결과가 얻어지기 시작했다고 말할 수 있는 수준이지만 이어 시뮬레이션에 의한 설계지원은 공정검토에 있어서 빠질 수 없는 기술로서

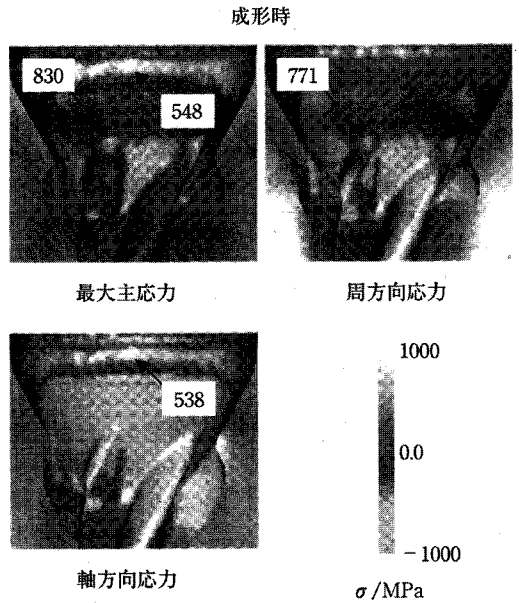


그림14 형응력 분포(도입부 확대도)

정착해가고 있다. 이후 복잡형상 부품의 성형법이나 새로운 공법에 적용하고 시뮬레이션의 용도가 넓어지는 과정이라 생각된다. 장래에 시뮬레이션을 이용하는 많은 개발자의 손에 의한 공정설계에 필요한 경험이나 노하우와 시뮬레이션 데이터의 축적에 의한 문제해결이 실현될 것으로 기대한다.

본 논문은 한국소성가공학회와 일본소성가공학회의 번역 게재협정에 의하여 저자의 허락을 생략하고 번역하여 게재합니다.

### 참고 문헌

- [1] 森謙一郎: 146 회 소성가공기술세미나, (2003), 1~5.
- [2] 松井井廣. 王欣: 소성과 가공, 39-453 (1998), 17~21.
- [3] 牟禮昌哉: 88 회 소성가공학 강좌 (2002), 19~25.