



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2008년도 8 月

工學碩士學位論文

상용차 드럼브레이크 시스템의
S/CAM 샤프트 열간단조 성형 해석

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

全 榮 珉

상용차 드럼브레이크 시스템의 S/CAM
샤프트 열간단조 성형 해석

*Hot Forging Molding Analysis of S/CAM Shaft to the
Commercial Vehicle Drum Brake System*

2008 年 8 月 日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

全 榮 珉

상용차 드럼브레이크 시스템의 S/CAM
샤프트 열간단조 성형 해석

指導教授 車 龍 勳

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함.

2008 年 4月 日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

全 榮 珉

全榮珉의 工學碩士學位論文을 認准함

審査委員長 朝鮮大學校 教授 洪明錫 印

審査委員 朝鮮大學校 教授 崔秉起 印

審査委員 朝鮮大學校 教授 車龍勳 印

2008 年 5 月 日

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of figures	I
List of tables	IV
Abstract	V

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구방법	5
1.3 기대효과	6

제 2 장 관련이론

2.1 온도의 영향	8
2.2 변형 과정	13
2.3 가압 단조	17
2.4 유한요소 체적법	21
2.5 유한요소해석의 수식화	26
2.6 열전달 및 유효응력의 수식화	30

제 3 장 실험

3.1 실험준비	36
3.2 S/CAM 샤프트 생산 프로세스 및 금형설계	38

3.3 S/CAM 샤프트 해석 및 방법 53

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 Effective Plastic strain 해석 58

4.2 S/CAM 샤프트 온도의 영향거동 해석 64

4.3 재료거동 해석 70

4.4 유효 응력 해석 76

4.5 표면경도 결과 분석 82

제 5 장 결론 84

REFERENCES 86

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Energy of forging	19
Fig. 3.1 Drum brake structure	37
Fig. 3.2 Drum brake structure of internal expansion type	38
Fig. 3.3 Flow of forging process	39
Fig. 3.4 Process design of First step forging	40
Fig. 3.5 Design of S/CAM shaft	41
Fig. 3.6 Part design of first step process	41
Fig. 3.7 Upper and lower forging shape	42
Fig. 3.8 Separate holder	43
Fig. 3.9 Billet cutting machine	44
Fig. 3.10 Bar material of SM45C	44
Fig. 3.11 S/CAM shaft billet	45
Fig. 3.12 Billet heating machine	45
Fig. 3.13 Pull out of heating billet	46
Fig. 3.14 Output of heating billet	46
Fig. 3.15 Heating billet input	47
Fig. 3.16 Forging	47
Fig. 3.17 First step forging	48
Fig. 3.18 First step forging part	48
Fig. 3.19 Second step of 1300ton forging machine	49
Fig. 3.20 Second step 750ton of forging machine	50
Fig. 3.21 First step forging molding	51
Fig. 3.22 Second step process forging molding	51

Fig. 3.23 Third step process forging molding	52
Fig. 3.24 Trimming	52
Fig. 3.25 Last forging part	53
Fig. 3.26 Upper forging mold	54
Fig. 3.27 Lower forging mold	55
Fig. 3.28 S/CAM shaft forging setting	55
Fig. 3.29 S/CAM shaft	56
Fig. 4.1 Effective plastic strain of S/CAM shaft 20%	59
Fig. 4.2 Effective plastic strain of S/CAM shaft 30%	60
Fig. 4.3 Effective plastic strain of S/CAM shaft 40%	60
Fig. 4.4 Effective plastic strain of S/CAM shaft 50%	61
Fig. 4.5 Effective plastic strain of S/CAM shaft 60%	61
Fig. 4.6 Effective plastic strain of S/CAM shaft 70%	62
Fig. 4.7 Effective plastic strain of S/CAM shaft 80%	62
Fig. 4.8 Effective plastic strain of S/CAM shaft 90%	63
Fig. 4.9 Effective plastic strain of S/CAM shaft 100%	63
Fig. 4.10 Temperature of S/CAM shaft 10%	65
Fig. 4.11 Temperature of S/CAM shaft 20%	65
Fig. 4.12 Temperature of S/CAM shaft 30%	66
Fig. 4.13 Temperature of S/CAM shaft 40%	66
Fig. 4.14 Temperature of S/CAM shaft 50%	67
Fig. 4.15 Temperature of S/CAM shaft 60%	67
Fig. 4.16 Temperature of S/CAM shaft 70%	68
Fig. 4.17 Temperature of S/CAM shaft 80%	68
Fig. 4.18 Temperature of S/CAM shaft 90%	69
Fig. 4.19 Temperature of S/CAM shaft 100%	69

Fig. 4.20	Material flow of S/CAM shaft 10%	70
Fig. 4.21	Material flow of S/CAM shaft 20%	71
Fig. 4.22	Material flow of S/CAM shaft 30%	71
Fig. 4.23	Material flow of S/CAM shaft 40%	72
Fig. 4.24	Material flow of S/CAM shaft 50%	72
Fig. 4.25	Material flow of S/CAM shaft 60%	73
Fig. 4.26	Material flow of S/CAM shaft 70%	73
Fig. 4.27	Material flow of S/CAM shaft 80%	74
Fig. 4.28	Material flow of S/CAM shaft 90%	74
Fig. 4.29	Material flow of S/CAM shaft 100%	75
Fig. 4.30	Effective stress of S/CAM shaft 10%	76
Fig. 4.31	Effective stress of S/CAM shaft 20%	77
Fig. 4.32	Effective stress of S/CAM shaft 30%	77
Fig. 4.33	Effective stress of S/CAM shaft 40%	78
Fig. 4.34	Effective stress of S/CAM shaft 50%	78
Fig. 4.35	Effective stress of S/CAM shaft 60%	79
Fig. 4.36	Effective stress of S/CAM shaft 70%	79
Fig. 4.37	Effective stress of S/CAM shaft 80%	80
Fig. 4.38	Effective stress of S/CAM shaft 90%	80
Fig. 4.39	Effective stress of S/CAM shaft 100%	81
Fig. 4.40	Brinell hardness test	83

LIST OF TABLES

Table 3.1	Chemical composition of S45C	38
Table 3.2	Boundary conditions for the hat forging	56
Table 4.1	Brinell hardness test of S/CAM shaft (H_B)	82

ABSTRACT

Hot Forging Molding Analysis of S/CAM Shaft to the Commercial Vehicle Drum Brake System

By Young-Min, Jun

Adv. Prof. : Cha, Yong Hun

Major in Mechanical Engineering

Graduate School of Industry,

Chosun University

In the hot forging process, the forging faulty product due to strain and temperature should be controlled in order to obtain sound S/CAM forging products. The forging defects that are caused by metal were strain, temperate, and inclusion. But the control of forging defects has been based on the experience of the foundry engineers

In this paper, the computer simulation analyzed the effective plastic strain and temperature behaviors. The quantitative analyses which proposed the effective mold design of S/CAM shaft was executed. The parameters of forging shape that affected on the optimize conditions that was calculated with simple equation were investigated. it is expected that the developed analysis model and design technique would greatly contribute to the drum brake optimal design considering effective plastic strain and temperature affected behaviors.

From these test, we reached conclusion as followings ;

1. This paper study an analysis results of strain, stress, temperature change and flow behaviors of materials using S/CAM shaft produced with pressure forging by superforge2007, a computer applicative program. As a result, contact with die occurs first at upper die rather than lower die and as 80% of processing progresses, matching with die necessary for moulding occurs both upper and lower areas and residual processing is analysed as a necessary processing for moulding.

2. As a result of analysing strain in hot forging molding of S/CAM using superforge 2007, it was reported that strain rate occurring in the materials caused by pressure to the upper die may differ. As 50% of processing progresses, large strain at the contact of materials with mold appeared. When 100% of contact of die with material is achieved in forging, high rate of strain appeared in overall materials.

3. Through improvement of mold for production of S/CAM whose axis shaft length differs, various kinds of S/CAM can be produced with a single die, and after heating SM45C to 1100°C- 1300°C, not cutting shape techniques of moulding products were applied with a use of hot forging.

4. When a new molding technique of S/CAM shaft was applied, more than 95% of recovery rate was achieved while 62-68% of recovery rate was achieved when a existing techniques was used. For existing S/CAM production processing, four processing stages were used, but working hours were too long and productivity was low. According to the new molding technique of S/CAM shaft developed, such disadvantages were resolved and current conditions

centering on low-price policy could be improved through technological development. As a result, the effect of cost saving was achieved.

5. This development could save more than 20% of production cost and reduced failure rate to more than 30%. By improving the life span of mold from 15,000 to 25,000, financial difficulty of company imposed on a mold manufacture could be overcome.

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

브레이크는 차량의 감속 및 제동작용을 하는 장치로써 승객의 안전과 관련된 가장 중요한 장치중 하나이다. 브레이크는 차량 제동시 감속도에 따른 제동력을 요구하며, 현재 엔진, 서스펜션 기능의 진보, 도로환경의 정비와 더불어 차량이 고속화됨에 따라 브레이크의 요구되는 성능은 더욱 많아지고 있다. 그러한 요구성능의 증가와 더불어서 브레이크는 경량화, 저소음 등의 기술적 문제 등의 해결도 요구된다.

브레이크에는 드럼 브레이크(drum brake)와 디스크 브레이크(disc brake)로 크게 구분된다. 디스크 브레이크는 승용차에서 주로 사용되며, 드럼 브레이크는 중, 대형 상용차량에서 사용된다. 디스크 브레이크는 회전하는 원형의 디스크를 패드(pad)가 양쪽에서 밀착하여 제동력을 발생하는 구조이며, 드럼 브레이크는 밀폐형 내부 확장식(Internal expansion type)으로 2개의 브레이크 슈(shoe)가 확장하여 드럼에 접촉함으로써 제동력을 발생한다. 디스크 브레이크는 회전하는 디스크가 대기와 접촉하게 되어있어 열방출성이 우수하며 제동효력이 드럼 브레이크에 비해 안정적이다. 하지만, 상용 차량에서는 큰 제동력을 필요함으로 드럼 브레이크가 상대적으로 국내에서는 많이 사용되어지고 있다.

자동차는 국가산업에서 가장 비중이 높은 산업으로 자동차부품산업의 기술경쟁력은 국가 산업경쟁력을 좌우하는 중요한 분야이며, 국내시장에서의 비중은 25조5천억(96년)으로 총 생산의 10.13%, 부가가치의 8.67%, 수출의 8.02%, 세수의 15.7%를 차지하고 있으며, 생산액은 13조 1,891억원(98년), 업체수 1,127개사, 수출 7.2억불, 무역수지 7.8억불에 달하고 있다. 자동차부품산업은 전후방산업으로의 파급이 커서 고용창출의 효과가 매우 크며, 우리나라의 자동차 관련 고용 인력비율이 약 8.2%에 불과한 점을 감안하면 수요는 점차적으로 증가할 것을 예상된다. 따라서 세계시장의 확대에 힘입어 자동차 수출 증가는 더욱 호조를 보일 전망임을 고려할

때 차세대 산업확립에 필요 불가결한 전략산업이다.

최근의 자동차 산업은 경량화 및 생산 비용 절감을 목표로 다각도의 시도로 경쟁적으로 이루어지고 있으며, 이의 강화를 위해 개발 기간의 단축으로 급속히 진전되고 있어 부품 제조업에서는 이러한 개발 스피드에 따라가는 것이 가장 중요한 과제가 되고 있다. 그래서 자동차 산업은 첨단 기술과 결집체로서 철강, 비철금속, 플라스틱, 복합재료 등 다양한 소재 산업, 공장자동화, CIM/CAD/CAM, 산업용 로봇 등 광범위한 산업분야들과 직접으로 연관되어 자동차 부품공업을 중심으로 하는 산업체나 중소기업 육성효과는 매우 크다. 최근 들어 제조업에 대한 심각한 문제 중의 하나는 3D기피업종의 대표적인 산업으로 일 할 사람이 없다는 것이다. 기계가 첨단화, 자동화되더라도 기능면에서 고도의 숙련성과 자동차 부품 생산업계 종사하는 인원의 평균연령이 고령화추세에 있어 기존의 생산방식을 전환 할 필요가 있다.

단조 공법은 가장 오래된 금속성형 방법 중의 하나으로써, 다른 가공법에 비하여 생산성이 우수하며 고품질, 저 원가의 이점으로 전 세계적으로 널리 사용되고 있으며 앞으로도 점차 확대 적용되리라 생각되는 소성 가공법 중의 하나이다. 이러한 단조 공법은 작업 온도에 따라 냉간단조, 온간단조, 열간단조로 분류되어 진다. 2차 세계 대전이후 제품의 고정도화에 따라 상온 상태에서 성형하는 냉간단조가 널리 유행하였고, 냉간 단조의 발달과 함께 복잡한 형상과 고강도 재료에 대한 단조 가공의 필요성으로 가공물의 온도를 어느 정도 높여 가공물의 변형 저항을 낮추고, 공정을 단축하여 생산성을 높이며, 열간 단조에서 보다 치수 정도를 높이는 온간 단조가 현재 점차 적용되고 있는 실정이다.

냉간단조는 자동차 산업의 발달과 함께 많은 산업계에서 응용되고 있으며, 밀폐 단조의 일종으로 높은 압축 정수압 응력의 작용과 열처리 조건의 최적화 등에 따라서 가공 한계가 증가될 수 있다. 그러나 금속 재료가 상온에서 큰 소성 변형을 받을 경우 재료의 가공 한계에 의하여 변형 중 연성 파괴에 의한 균열 등이 발생하고, 높은 하중으로 금형 파손의 문제점도 발생한다. 단조품의 형상이 복잡하고,

높은 하중으로 금형 파손의 문제점도 발생한다. 단조품의 형상이 복잡화되고, 원가 절감의 지향화와 함께 이러한 냉간단조에서의 연성 파괴 및 금형 파손의 문제점은 생산성 저해 요인으로 큰 작용을 하고 있다.

온간 단조에서는 재결정 온도 범위에서 성형하여 가공성을 향상시키는 목적뿐만 아니라 가공 열처리에 의해 열처리 단독으로는 기대할 수 없는 성능을 기대할 수 있고, 가공성 향상을 위한 소누 처리나 열처리를 생략할 수 있기 때문에 더욱 연구 대상이 되고 있다. 특히 가공 열처리 기술의 도입에 의해 단조 등의 소성 가공 기술을 단순히 성형 기술로 보지 않고 재질 제어기술, 즉 새로운 재질을 개발하기 위한 수단으로 보게 있다. 소성 가공 시의 변형률, 변형률 속도, 온도 등의 가공 환경을 제어하여 재질 개선을 행하면 후가공 시간 및 원가 절감의 효과도 기대할 수 있다. 그러나 온간 단조에서는 금형의 열팽창 등을 고려하지 않을 수 없기 때문에 냉간 단조에 비해 정도 저하는 무시하지 못하며, 따라서 온간 단조 후 냉간 단조를 하는 복합 단조가 일반적이다. 그러므로 온간 단조 후 냉간 단조를 행하는 복합 단조에서는 재질 예측은 필수적이라 할 수 있다. 또한 재결정 온도 범위에서의 성형 공정을 금형 수명 저하에도 큰 영향을 미치며, 이러한 금형 수명의 예측은 초기 냉간 단조와 온간 단조의 공비 설정에 큰 영향을 미친다.

현재, 온간 단조에서의 금형 수명에 대한 연구는 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 금형 수명에는 금형 설계, 금형 재질, 열처리, 표면처리, 온간 윤활 등의 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하며, 온간 단조에서의 금형 수명 향상 없이는 냉간 단조에 비해 원가 측면에서 큰 이점을 발휘할 수 없다. 최근 국내에서는 냉, 온간 단조에 대하여 유한 요소법을 활용한 정량적인 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 유한 요소법을 이용한 공정 설계 및 공정해석은 종래의 방법과는 달리 실제 생산현장에 필요한 정보를 제공하고 있다. 그러나 아직 생산 현장에서는 숙련자의 경험이나 외국 자료 등에 많이 의존하고 있고, 따라서 유한요소법을 활용한 연구가 결실을 맺기 위해서는 산학협동을 통하여 실제 공정에 직접 이용 될 수 있어야 한다.

따라서, 자동차 부품 생산방식의 대표적인 방법중 열간단조를 이용하여 냉간 및 온간 단조방식을 보완하기 위하여 실 생산라인에 적용을 목적으로 연구하고자 한다. 본 연구에서는 자동차 부품 소재로 사용하고 있는 SM45C는 상용차 브레이크 시스템의 S/CAM 샤프트 제품에 적용 생산하고 있으며, 기존 금형의 문제점을 파악하고, 새로운 생산 금형을 개발을 토대로 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 검증과 생산에 적용하는데 있다. 개발된 금형을 이용한 부품생산의 전 단계 과정을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여, 제품에 정확한 성형상태를 예측하고 최적의 금형을 개발하고자 한다. 또한, 열간단조 수치해석을 통하여 단조품의 온도 분포도와 응력 분포도를 분석하고자 한다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 가압단조 공정에서 금형설계 및 공정해석을 위한 설계원리를 computer simulation을 이용한 거동 해석을 하였고, 성형이 이루어지는 주요한 응력과 성형과정에서의 온도 변화에 대하여 해석하고자 한다.

1. 상용 자동차 S/CAM 샤프트 소재를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 단조 공정 분석과 각종 실험을 실시하였다.

2. 자동차부품에 적용되는 열간단조방안에 대하여 단조 전용 상용 프로그램인 SuperForge2007를 이용하여 단조금형시 형상이 이루어지는데 지배적인 역할을 하는 응력, 변형을 및 형상을 이루는 동안 온도 변화에 대하여 중점적으로 분석 하였다.

3. 상용 자동차 S/CAM 샤프트 제작을 위한 최적의 성형조건을 입증하기위하여 현재 단조 공법으로 생산되고 있는 부품에 대하여 품질향상을 할 수 있도록 성형 해석을 실시 하였다.

4. 제품생산에 관련된 공정을 검토하고, 금형 구조를 개선하여 실 생산라인에 적용 가능 하도록 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한 후 그 결과를 토대로 사용 현장에서 개발된 금형에 의하여 고정밀 열간단조를 실시하였다.

1.3 기대효과

최근 세계 자동차 산업은 생산 능력 확장 및 세계 자동차 수요가 증가함에 따라 각 자동차 회사들의 경쟁력 확보 및 환경 규제에 대응하는 부품 개발에 투자를 아끼지 않고 있다. 또한, 생산라인의 최적화를 통하여 개발비용 절감, 성능 및 품질향상, 개발기간의 단축 및 생산원가의 저감 등의 효과를 원하고 있다.

최근들어 일본의 한국부품 수입은 기존에도 있었지만, 대기업들이 대규모로 한국산 부품 조달을 추진하는 것은 최근의 두드러진 현상이다. 일본이 워낙 부품산업의 강국인데다 자국내의 수직 계열화된 협력업체로부터 대부분의 부품을 조달하는 일명 '풀세트(full set)경제의 전통이 강했기 때문이다. 일본의 대기업들이 이런 전통을 깨고 해외로 눈을 돌리기 시작한 것은 불황이 10년 넘게 계속되면서 경영사정이 악화됨에 따라, 비용절감 필요성이 절박해졌기 때문이다. 근자에 한국·중국에서 자동차부품을 조달하겠다고 발표했던 자동차회사 스즈키의 경우 코스트 30% 절감책을 추진하고 있다. 아이에이치아이는 2001년부터 3년간 조달비용을 20% 삭감한다는 목표를 세우고 조달관리본부를 신설해 해외조달을 강화하고 있다. 일본 대기업들이 다른 나라보다 우선적으로 한국 부품에 관심을 갖는 이유는 가격 대비 품질이 우수하기 때문이다. 한국이 일본에서 가장 가깝다는 점도 물류비용 절감이라는 면에서 매력적인 부분이다. 그러나 국내의 생산현장은 매우 열악하고 단점인 부분이 너무나 많아 어려움을 토로하고 있다.

단조 및 주조산업의 심각한 문제중의 하나는 3D기피업종의 대표적인 산업으로 일할 사람이 없다는 것이다. 기계가 첨단화, 자동화되더라도 기능면에서 숙련이 되지 않으면 안 된다는 것과 제조업계에 종사하는 인원의 평균연령이 50세 전후로서 기타 제조업종에 비해 10년 이상 고령화추세에 있는 것은 또 하나의 어려움이다. 이러한 현실은 국내제조업계의 전망을 어둡게 하고 있다. 중소 제조업체 종업원의 10명중 2명은 '3D 업종'으로 불리는 기피직무에 종사하고 있는 것이다. 전문기관의 조사에 따르면 기피직무에 종사하고 있는 종업원은 전체 고용인원의 19%에 이르

는 것으로 나타났다. 기피직무에 종사할 인원을 고용하지 못해 발생하는 기피직무 인원 부족률은 20.7%로, 중소기업업체 평균 인원부족률(9.35%)보다 훨씬 높았다.

따라서 이러한 3D업종이면서 취약한 생산현장을 개선하는 것은 시급한 실정이며, 유독 이러한 업종에서 인력을 확보하기는 앞으로 더욱 어려울 전망이다.

현재 자동차산업과 항공기사업을 비롯하여 여러 산업에서 최적의 공정 개발 및 공정 단축을 하고 있으며, 환경문제에 대해서도 많은 관심을 가지고 연구하고 있다.

단조금형은 공정의 단순화와 기계적 성질이 우수하여 2차 가공 공정등을 줄이고 공정 시간을 단축 하므로 생산성 및 제품에 원가를 낮출 수 있어 경제적인 측면에서 이익을 가져다 주며, 용융 단조나 주조에서 발생하는 기타 가스 발생율이 적으므로 환경문제에 도 많은 도움을 줄 것이다. 또한, 지금까지 금형설계에 있어 숙련된 기술자의 경험에만 의존 하여 금형제작에 많은 어려움을 가져다주었다. 그러나 유한 요소법으로 응력, 소재의 거동, 온도 변화 등을 상용화 프로그램으로 해석하므로 금형 설계에 있어 많은 비용을 줄이게 된다.

제 2 장 관련이론

2.1 온도의 영향

열간단조에 있어서 성형성에 대해서는 그것에 관련되는 인자가 상당히 많다. 즉 가열온도의 부적당, 스케일제거의 불충분, 단조온도의 저하, 윤활제 피막의 불균일과 단조소재의 금형에의 밀착 등 단조작업 그 자체가 직접적으로 영향을 미치는 이외에 제품설계, 형설계, 그 외에 소재형상치수와 가공방식과의 관련 등에 의한 재료의 흐름의 문제와 서로 더욱 복잡하게 관련해 있어 결코 간단하지는 않다. S/CAM 샤프트 자동차부품에 대한 금형을 실행 하는데 있어 열간단조의 온도에 의한 성형의 영향과 성형에서 자주 문제가 되는 업세팅 혹은 압출 가공에서의 채움성에 대해서 서술 한다.

2.1.1 변형성과 변형 저항

열간성형성은 냉간소성 만큼 심하게 재료성분에 따라서 영향을 받지 않고 일반적으로 보통의 열간 변형온도 범위 내에서는 성분에 따라서 극히 조금 변화할 뿐이다. 그 영향의 정도는 물론 온도에 따라서 다르고 온도가 저하함과 함께 점점 증대한다. 그러나 그때 온도의 영향에 따라서 일어나는 변형저항의 차이는 대부분의 경우 성분의 차이에 의해서 일어나는 변화보다 크다.

열간 변형 때의 변형강도는 주로 가공온도에 좌우되고 온도가 증가함에 따라 처음은 빠르게 그 후는 완만하게 감소한다. 즉 S45C의 변형강도는 변형률의 0.4, 온도 1100℃에서 변형률속도가 0.01에서 10/sec로 변화 하면 약 3kg/mm²에서 12kg/mm²으로 된다. 800℃에서는 이 똑같은 변형률 속도변화에 대해서 16kg/mm²에서 32kg/mm²으로 되고 1100℃에서는 4배, 800℃에서는 2배 변화한다. 이결과 온도의 저하와 변형률 속도의 상승이 대응하고 또 그 역도 올바르다. 850℃에서 변형률 속도 0.01/sec의 가공을 하려면 1100℃에서 10/sec의 가공을 하는데 필요한 일과 같은 일을 요한다. 온도범위 전반에서 경화는 상당히 일어나고 있고 변태점에 가까

이까지 급하다. 단 변형률 속도가 상당히 작지만 온도가 높은 경우에는 변형중의 연화량이 커지므로 소성곡선은 최대치를 갖고 그 후 변형률이 변화해도 변형강도는 그다지 변하지 않고 안정된 값이 된다. 변태점 아래에서는 소성곡선의 기울기는 변형률 속도범위 전반에서 실제상은 작다. α 상 영역의 상부에서는 열적인 변화가 γ 상 하부에 있어서보다 크고 여기서는 일어난 경화는 곧 회복해 버리는 것이다. 다른 많은 재료에 대해서도 곡선의 경향은 비슷하다.

탄소함유량이 다른 성분은 동일한 강재사이에서는 낮은 변형온도(약900℃까지)범위내에서 만 변형저항에 심한 영향을 미치지만 950℃사이가 되면 탄소함유량이 다른 강재의 변형저항의 값은 점점 접근해간다. 첨가 성분 중 규소, 망간 및 인 등은 그다지 나쁜 영향을 미치지 않는다. 인의 양이 증가하면 강재의 열간 변형성은 오히려 좋아진다. 유황의 함유는 특별한 역 할을 하여, 그 양이 많아지면 특히 망간 량이 적은 동시에 규소 및 비소가 존재하면 강재의 열간 변형성은 현저히 저하해서 700~ 1100℃의 온도범위에 있어서 온갖 적열취성을 수반한다. 그림2는 열간 인장시험에서 파단변형을 조사하기 위한 예인데 γ - α 변태역에서는 이 변형률이 작기 때문에 이온도영역에서는 될 수 있으면 피하는 쪽이 좋다고 말할 수 있다.

그러나 이것은 실제의 가공법과는 다른 시험법이며 그 외에도 가공법에 종속되지 않는 시험으로 써는 인장시험, 압축시험, 비틀림 시험 등이 있다. 이들 결과의 신용도는 각각 다르며 얻어진 결과를 항상 비교할 수 있다고는 할 수 없다. 1.3% C의 탄소강에 대해서 -200℃에서부터 1300℃의 범위에서 정적과 동적으로 하중을 건 경우에 대해서의 변형거동을 비틀림 시험으로 구한 결과인데 2가지의 경우의 주된 차이는 변형률 속도가 큰 경우의 하중과 작은 경우의 최대치에서, 특히 변형률속도가 작으면 열간 변형의 경화가 시험편의 파 단 전에 회복하는 것이 명백하다.

따라서 정적 비틀림 시험에서는 동적 비틀림 시험 때보다 파단 전의 변형률은 크게 취해지지만 900℃에서 1200℃라는 통상의 열간영역 변형에서의 이 시험에서의 값은 일반적 가공에서의 이온도에 있어서 변형성을 명확하게 나타내는 것은 아니

다.

실제로 열간가공에 있어서 재료의 상태는 일반적으로 변형성과 변형강도로 표현된다. 이 경우 변형성은 성형가능성을 나타내는 양이고 채용되는 변형법에 대해서 의미가 있는 것이다. 변형강도는 소요력을 구하는데 쓰인다. 적정한 열간가공영역을 정하려면 변형성과 변형 강도와 함께하고 가공 중 혹은 가공 후에 있어서 요망되는 재질, 가공 중에 생기는 응력상태 도 인자가 된다. 이들의 2차원요인에 따라서 변형성과 변형강도도 가장 적합하지 않은 변형 조건이 때때로 선택된다.

즉, 바른 가공조건을 선택하는 간단한 방법은 없다고 말할 수 있다. 특히 열간에 있어서 변형성에 대해서는 약간의 것밖에 말할 수 없고 현재까지 아직 확실한 법칙성도 나오고 있지 않다.

본질적으로 또 통계적으로 조사되고 있는 것은 변형강도의 거동뿐이다. 따라서 변형성 등 다른 변형특성을 곡선표시하고 있는 것은 대부분의 경우 간접적인 것으로 소성가공의 과정에 적용하는 경우 그 상당의 유보를 붙여야 할 것이다.

상온에서 재료의 강도가 40, 60, 80 및 100kg/mm²의 탄소강의 각 온도에 있어서 변형 강도를 200~300℃에 있어서 가장 크며 그 후는 저하한다. 따라서 가공온도가 높을수록 가공성이 늘어나는 것은 정상적이라고 말할 수 있다.

단 크랭크프레스의 가공과 같이 변형속도가 시험기 등에서의 가공보다 커지면 200~300℃에 보여 지는 최대치는 고온 측으로 벗어나는 일은 잘 알려져 있다.

실제로 변형성과 변형저항으로부터 열간 단조가 공의 온도를 정하는 것은 가공에 있어서 각 인자가 얽혀서 그렇게 간단하지 않다. 일반적으로 너무 낮은 가공온도에서는 세로 갈라짐과 단조 갈라짐이 발생하기 쉽다. 재료의 균열과 단조 갈라짐은 가열이 불충분할 때에도 잘 일어난다. 따라서 가공온도는 보통 가능한 한 높게 해야 할 것이다.

그러나 다른 한편 모든 재료는 과열과 땀질에 대한 민감성에 따라서 최고온도가 제한된다. 철강은 또 고온에 탈탄의 위험이 증대한다. 그런데다가 가공온도가 높으면 세정립조대화가 일어나기 쉽고 특히 서서히 냉각시킬 때에는 심하다. 그 결과

자주 각부에 횡갈라짐이 생긴다. 이들의 관계에서 실제로 열간가공을 행할 온도범위는 당연히 제한된다. 따라서 반드시 재 결정온도이상의 열간가공범위에서 임의로 온도를 선택할 수는 없고 각 재료에 상응한 온도 범위를 정해야 한다. 거기에 열간 단조에 적용될 온도는 어느 정도 가공품의 크기, 또 사용기 계의 종류에 더 관계한다. 이 때문에 지정할 온도에는 조건에 따라 심한 차이가 있는 것을 인식해 두어야 할 것이다.

2.1.2 단조시 온도 변화

냉간소성 변화에 있어서 변형의 크기, 적용되는 변형속도, 재료의 종류 및 변형저항에 따라 서 부분적으로 심한 발열이 생긴다. 비철금속을 냉간 업세팅 할 때에는 변형열과 마찰열에 의해서 발생한 온도는 높아져 낮은 재결정 온도를 갖는 재료에서는 이미 부분적으로 강도의 저하가 일어나서 이미 좁은 의미에서의 냉간가공이 아닌 경우도 있을 수 있다. 열간변형에 있어서도 또 변형열을 발생하고 변형조건에 따라서 많거나 적거나 온도 상을 수반하는데 통상 냉각의 영향이 중복되므로 그 작용은 두드러지지 않는다. 그러나 다단계 열간가공공정에 있어서는 최초와 최후의 온도차를 가능하면 적게 유지하는데 이 냉각작용은 극히 유용하다.

강의 단조 에 있어서 100℃의 온도변화는 25%의 힘의 변화에 상당하는 것을 고려하는 편이 좋다. 가열된 소재가 보통 차가운 금형과 접촉할 때 많건 적건 온도 차이가 있으므로 변형 과정중 소재는 열을 끊임없이 빼앗긴다. 그때의 열 손실의 크기는 소재와 공구사이에 온도차 뿐 아니라 가공품형상과 소재체적에 대한 접촉 표면적의 비율, 또 공구의 냉각면적과의 접촉시간 및 이 장소에 있어서 열의 전달 방식에 영향 받는다.

속도가 느린 프레스에서의 가공에 있어서는 소재와 공구와의 사이의 접촉면적 및 접촉시간 이 크므로 상당히 큰 열량이 운반되어 사라진다. 그 때문에 소재의 온도는 어느 일정 시간 후 에 전체 또는 예를 들면 리브, 플렌지, 소돌기 등의 소단면에서 완전한 변형에 필요한 값 이하로 저하한다. 이와 같은 경우 가공을 계속하기

전에 소재는 다시 가열되지 않으면 안된다. 이것은 특히 좁은 가공범위를 갖는 재료의 가공의 경우 중요하다. 이런 이유에서 소재의 냉각을 방지하는 것은 중요한 문제이다.

단조중의 소재가 금형에 압축되어있는 부분은 금형에 압축되지 않은 부분보다 17배나 열전도계수가 크다.

최고냉각속도는 초기온도가 높은 만큼 또 소재의 공구의 온도차의 크기만큼 크다. 냉각성, 따라서 또 냉각손실은 소재초기온도와 공구온도와의 사이의 온도차(ΔT)에 비례해서 직선적으로 증대한다. 예를 들면 평평한 압축사이에 좁혀진 원주상의 소재의 최대냉각속도

$$V_{max}=0.0567\Delta T(^{\circ}C/초) \quad (2.1)$$

의 간단한 식으로 나타낼 수가 있다.

이러한 것에서 열손실은 초기온도의 절대치에는 무관하고 소재와 공구사이의 온도차에만 좌우되는 것으로 밝혀졌다.

따라서 가열된 공구를 사용함에 따라서 상당한 이익이 기대된다. 즉, 예를 들면 초기온도 1000 $^{\circ}C$ 의 소재의 최대냉각속도는 150 $^{\circ}C$ 로 예열한 공구를 사용하면 약 13%감소하고 300 $^{\circ}C$ 로 예열하면 약 28%감소한다. 경합금의 가공의 경우에는 형과 재료는 달라붙기 쉽지만 특별한 수단에 따라서 이를 피할 수 있다면 공구를 열간가공온도까지 가열 하는 편이 유효하다. 그러나 보통의 연속가공을 행할 경우에는 형온도는 상승해 소정온도이상이 되기 때문에 복잡형상 부품을 온간, 열간단조할 때에는 소재에 윤활제막과 함께 형공구의 냉각을 겸한 윤활제의 분사가 필요해진다. 고탄소 함유의 공구강을 사용하는 경우 급열급냉의 반복에 의한 열적피로와 충격에 의한 형공구 파손의 위험이 있어 이 문제는 중요하다. 구체적으로는 사용중 형의 온도는 항상 100~150 $^{\circ}C$ 로 유지하는 것이 가장 바람직하다고 생각된다.

2.2 변형 과정

2.2.1 성형 효율

형단조에 있어서 변형과정중의 재료의 이동 방법을 대별하면 업세팅 "확대" 및 "채움"의 3종류로 대별된다. 즉 그 거동을 보면, 업세팅은 큰폭확대와 현저한 미끄러짐 없이 채움의 높이를 감소시키는 것을 주로한 변형이고, 확대는 큰 미끄러짐 거리를 수반한 재료의 주로써 측면에의 흐름변형, 채움은 금형의 깊은 오목부를 재료의 채움 높이의 국부적인 증대에 따라 이루어지는 변형 이들 3가지의 각 프로세스는 대부분 자유업세팅 설치과정에서 시작되고 다시 업세팅으로 끝난다. 이때 필요한 두 개의 플래쉬가 생기도록 나머지 여분의 재료는 측방으로 흐른다. 플래쉬의 형상은 발생하는 응력을 광범위하게 걸쳐서 결정한다. 플래쉬의 폭 b 가 크고 플래쉬의 두께 s 가 작은 즉, 플래쉬비 b/s 를 크게 선택하면 플래쉬홈 내에 마찰에 의해 생긴 흐름저항, 또는 직각방향 압력 q 가 커진다. 즉 변형강도를 K_f 로 하면 수직방향압력 $p = K_f + q$ 이며 따라서 수직방향압력 p 는 커진다.

평면금형에 의한 단순업세팅에서의 평균변형강도 K_{fm} 과 필요압력 p 의 비를 보이는 업세팅 효율은 $\eta_c = K_{fm}/p$ 는 스케일, 기타의 인자에 의해 0.95~0.6의 사이가 된다. 업세팅 $\varepsilon_h < 0.67$ 에서 약 0.92 또는 $\eta_c = 0.6$ 은 최종지수에 있어 d/h 가 약 6~8의 경우의 값이다. 그러나 실제의 금형으로 성형하는 경우에는 성형효율 η_F 를 알고 있을 필요가 있고 특히, 복잡하고 갈래가 많은 부품의 경우에는 형상 및 플래쉬에 의한 영향이 있으므로 단순 업세팅의 효율 η_c 를 그대로 적용하는 것은 의미가 없다. 따라서 η_f 는 경험으로 선택하지 않으면 안된다. 실험결과에 따르면 간단한 형상으로 플래쉬를 내지 않을 경우에는 η_F 는 비교적 작은 것이 나타나있다.

2.2.2 재료의 흐름

가) 허용 업세팅 비

업세팅에 의한 머리부업세팅에서의 제한사항인데 업세팅작업의 기본이 되는 것이다. 업세팅길이의 긴 가공품을 열간 변형 할 때 한 공정으로 업세팅하는 업세팅 용적에 상당하는 소재길이는 그림 13(a)와 같이 직경의 3배까지 하는 것이 보통이다. 그 이상 업세팅 길이가 길면 재료는 업세팅 과정에서 축 방향으로 좌굴된다. 그러나 일반적인 허용업세팅비는 3.0 으로 되어있음에도 불구하고 열간가공에 있어서 완전한 결함이 없는 업세팅을 행할 수 있는 실제의 한계는 이보다 낮은 값이다. 양호한 flow line을 갖는 완전한 업세팅과정은 약 2.3까 지의 업세팅비에 있어서만 얻어진다. 소재를 임의의 윤곽의 요청부를 갖는 업세팅편치내에 끼우면 업세팅비는 약 2.5까지 높일 수가 있다. 재료의 전주위를 업세팅편치내에 유지하면 자유업세팅 길이를 더욱 높일 수가 있다.

원추상으로 업세팅하면 되돌림 공정에 있어서 편치가 빠지기 쉽고 재료가 균일하게 가공되어서 최종성형에 필요한 각부의 재료를 모을 수가 있으므로 상태가 좋다. 열간업세팅시에도 상입의 허용업세팅비를 얻으려면 일정한 전제조건이 필요하다. 특히 재료는 가능한 한 축에 직각으로 평활하게 절단되지 않으면 안 된다. 이때 비스듬히 절단되면 업세팅시의 재료가 측방에서 미끄러지거나 좌굴이 생기는 경과가 되어 허용업세팅비의 현저 한 저하를 초래한다. 따라서 이점에 관해서는 열간 업세팅의 경우 업세팅 되는 소재길이는 업세팅 다이의 직경이 소재경보다 현저하게 커지거나 또 오토동안 사용한 후 그 상단이 원추 상으로 마모한 경우는 짧아진다.

그러나 열간업세팅이 약3.0에 가까운 큰 업세팅비가 실제의 작업에 사용되고 있다고 하는 것은 업세팅이 엄밀한 합리적인 표준에 따라서 행해지지않고 flow line내에 있는 정도의 굽힘이 일어나는 것을 허용해도 설치품이 더욱 사용적성을 갖추고 있다고 인정되기 때문이라고 간주해야 할 것이다. 업세팅 제품의 외형이 깨끗하게 한번에 성형되어있기만 하다면 완전 하게 외형에 따라서 flow line이 흐른다고 하는 전제가 반드시 만족되어있지 않아도 많은 경우 충분하다. 실제로는 내부의 flow line에 불균일한 휘어짐이 있는 일이 자주 발견된다.

나) 채움성

재료를 주로 확대하는 것에 의해서 형상을 완전하게 충만시킬 수 있는 열간단조품에 있어서는 일반적으로 큰 어려움이 없다. 이에 반해서 부가적인 재료의 채움을 필요로하는, 예를 들면 돌기, 귀 또는 높은 리브 등에는 특별한 배려를 필요로 한다. 사용재료의 충분한 채움성 뿐만 아니라 소재형상과 치수도 극히 중요하며 경우에 따라서 적당한 예비성형을 추가해서 만들지 않으면 안된다.

모든 변형에 있어서 재료는 우선 확대, 일부는 플래쉬로 흐르기 시작한다. 그리고 공구가 충만되고 그 플래쉬가 어느 정도에 달해서 재료가 일찍 어디에도 도망갈 수 없게 된 후 본래의 채움이 시작된다. 따라서 소재의 용적을 늘리면 채움성이 높아지게 된다. 그러나 이러한 방법은 대개 경제적 이유에서 채용되지 않고 부가중량이 가능한한 적게 하는 다른 방법에 의해서 소정의 채움의 높이를 얻는 것이 올바르다.

금형내에 있어서 유동, 즉 패임의 형상에 재료가 충만하는 것은 큰 필렛바깥, 금형에서 용이하게 들어올리기위한 충분한 경사각 및 완만하게 서서히 변화하는 단면형상으로 함에 따라서 상당히 용이해진다.

설계자는 이들의 조건을 받아들여 최종형상을 결정하는 경우에는 다른 기준을 준수하는 이상으로 신중하게 주의하는 것이 필요하다. 예를들면 양호한 채움성은 업세팅비를 증대시킴에 따라서 얻어진다. 길이와 지름의 비가 1 이 될 때까지 채움성은 업세팅비와 함께 상승한다. 이것은 소재의 높이가 클때는 채움성이 좋다는 것보다 오히려 소재의 형구멍에 닿는 부분은 넓히지 않고 원래대로 남기고 그 주위의 재료가 눌러 내려가서 넓어지는 것이다.

그 결과로써 높은 돌기가 얻어지는 것을 의미하고 있다. 거기에 플래쉬로 흐르기 시작하는 손실체적은 감소하므로 회전대칭형의 경우 가능한 한 길고 가는 소재를 이용 하면 대개는 양호한 결과를 얻을 수 있다. 양호한 채움에는 가능한 높은 변형온도가 유효하다. 마찬가지로 변형속도도 중요해서 빠른 속도에서 가공하면 냉각이

적으므로 상당히 양호한 채움을 얻을 수 있다. 더욱이 당연한 것이지만 공구구조도 영향을 미친다.

공구측 벽을 비스듬히 하면 좋은 결과가 얻어지는데 그 최적의 기울기는 1 : 5이다. 게다가 일량을 같게 하면 채움의 높이는 구멍지름에 근사적으로 비례한다.

단 이것은 구멍지름이 소재지름의 약 50% 작을 때에만 전변형 단계에 걸쳐서 말할 수 있는 것이고 사용재료의 직경에 대한 구멍지름의 비가 이것보다 크면 업세팅 거리를 한층 크게 해도 그렇게 두드러진 채움이 없고 많은 재료는 플래쉬로서 흘러나온다.

2.3 가압 단조

단조란 금속재료를 소성이 용이하도록 일정한 온도로 가열하여 외력을 가해서 주조조직을 파괴시켜 재질의 향상으로 기계적 성질을 개선시키고, 필요로하는 형상과 치수로 가공하는 두가지 목적으로 수행하는 소성 가공법의 일종이다.

단조품은 주조 품에 비하여 조직이나 기계적 성질이 우수하여 강도를 향상시킬 수 있어 주요 부품들은 단조품을 사용하는 경향이다. 그러나 단조품은 적당한 재료에 한정되어있고, 경제적으로 고가이다. 가압단조로 알루미늄 합금을 하면 가장 좋은 점은 응고시 과냉효과를 가져다줄 수 있는 것이다. 과냉효과로 주물에 조기이 치밀해져 조직에 기계적 성적이 우수하여진다.

다음 두 가지를 들 수 있다.

첫째는 금형과 주물의 접촉면이 개선되어 열전달 향상 효과에 따른 과냉 현상이다. 금형과 주물에 열전달식은 식 2.2에 의해 나타난다.

$$-K_s \frac{\partial T_s}{\partial X} = -K_M \frac{\partial T_M}{\partial X} = h(T_s - T_M) \quad (2.2)$$

위 식에서 가압됨에 따라 금형-주물간의 열전달 계수가 증가하므로, 주물에서 금형으로의 열 전달이 빠르게 진행되어 급냉효과를 얻을 수있게 된다.

둘째로 가압에 따라 용탕의 용점이 상승하여, 이 또한 과냉 효과를 나타낸다. 가압에 의한 용점 상승효과를 나타낸다. 가압에 따른 용점 상승효과는 식 2.3 Clausius-Clayperon 방정식을 보면, 쉽게 알 수 있다.

$$\frac{dQ}{dP} = \frac{T_f \Delta V}{H_m} \quad (2.3)$$

과냉효과와 결정립 미세화등이 촉진되며 재료의 특성을 향상시킬 수 있고 치밀한 제품을 얻는 장점을 가진다. 가압단조에 제품의 품질, 단조 결함, 주형설계 및 생산성등에 지배적으로 관여 하는 것이 줄어 응고 과정이다. 응고 과정을 지배하는 지배 방정식으로는 금형과 주물 내의 온도분포를 결정 짓는 열에너지 보존 법칙, 주물의 응고시 자연 대류에 의한 유동에 관련된 운동량 보존의 법칙 및 질량 보존의 법칙을 들 수 있다. 단조 가공은 외력의 부가에 따라 반응용 압연의 경우와 같은 모양으로 빌렛의 내부에서의 액상성 단독의 유동과 표면에서의 일부 유출이 일어나기 쉽다. 유출한 액상성분은 빌렛의 표면에 직접하며, 빌렛과 함께 변형*유동하여 금형 매에 충만하게 냉각되고 응고하여 제품이 된다.

내부조직에도 불균일성이 일어나기 쉬워, 통상 표층부에는 액상성성분이 응고한 조직이 많이 된다. 액상성 유동 특성을 이용하여 제품에 내부에서 표층에 향해 경사 분포하는 기계적 특성을 대어하는 것도 가능하다.

단조물이 변형할 때 자유단조에서는 소재가 가압면과 마찰을 하면서 유동하고, 형단조에서는 소재가 형(型; die) 내에서 가압면 및 형의 벽과 마찰을 하면서 유동하나, 기계공작법의 수준에서는 전자인 자유단조(open-die forgig)에서 4각주(四角柱) 또는 원주(圓柱)를 단조할 때 소재와 가압면간에 마찰이 없는 것으로 가정하고 단조 energy를 구해 본다.

Fig. 2.1과 같이 초기 높이 및 단면적이 각각 h_0 , A_0 인 4각주 또는 원주를 압축하는 경우의 단조 energy를 구해 본다.

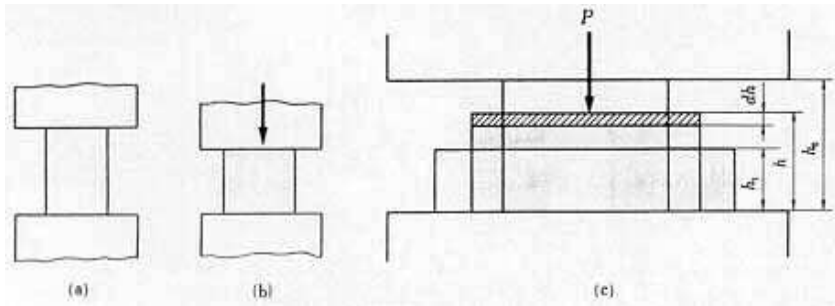


Fig. 2.1 Energy of forging

dh를 변형시키는 데 요하는 energy 식SBUNG은 다음과 같다

$$dE = pdh = \frac{pVdh}{Ah} = V\frac{Pdh}{Ah} \quad (2.4)$$

단 소재를 비압축성 재료로 생각하면(실제에서 체적 변화는 무시할 수 있을 정도로 적다)

$V=A \cdot h=A_0 \cdot h_0 = A_1 \cdot h_1$ 와 같이 쓸 수 있다. 변형 중 소재의 압축저항을 K_f 라 하면 윗식에서 P/A 를 K_f 로 대체할 수 있고, K_f 에 저항하면서 높이 dh만큼 감소하므로 윗식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dE = - V^* K_f^* \frac{dh}{h} \quad (2.5)$$

다라서 h_0 에서 h_1 까지 변형시키는 데 요하는 에너지는 다음과 같다.

$$E = - \int_{h_0}^{h_1} V^* K_f^* \frac{dh}{h} = V \int_{h_0}^{h_1} K_f^* \frac{dh}{h} \quad (2.6)$$

전 변형 과정에 대한 K_f 의 평균값을 K_{fm} 이라하면

$$E = - V^* K_{fm} \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = V^* K_{fm} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (2.7)$$

이며, 이 식으로부터 단조 기계의 능력을 계산할 수 있다.

2.4 유한요소 체적법(FVM - Finite-Volume Meth)

유한요소법은 넓은 범위의 공학 문제를 수치적으로 해결할 수 있는 방법중 하나이다. 이 방법은 자동차, 항공기, 건물, 교량등과 같은 구조물의 변형 및 응력해석부터 열유속, 유체거동, 자기 유속, 침투와 다른 유동문제를 포함하는 계(field)해석에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있다,

이 해석 방법에서는 연속체를 정의하는 복잡한 형상을 유한요소라는 간단한 기하형상의 집합으로 이산화 시킨다, 재료 상수와 지배 방정식을 이산화된 유한요소들에 적용하기 위하여 이 방법은 요소의 여러 점에서 정의되는 미지수들을 이용하여 표현한다. 여기서 하중과 구속조건을 적절하게 고려하여 조합과정을 거치면 몇 개의 방정식을 얻는다. 이 방정식들을 풀면 연속체의 거동을 근사적으로 결정할 수 있다.

* 연속 방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

* Navi-stokes 방정식(Navi-stokes equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + g_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + g_z \end{aligned} \quad (2.9)$$

* 에너지 방정식(Energy equation)

$$pc \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

*Volume of Fluid

$$\left(\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial u F}{\partial x} + \frac{\partial v F}{\partial y} + \frac{\partial w F}{\partial z} \right) \quad (2.11)$$

*Governing Differential Equation(F,D,E)

$$\frac{\partial}{\partial t} (p\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (p u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + s_\varphi \quad (2.12)$$

유한체적법에서는 PDE를 미분형태로 풀기보다는 다음을 만족하는 해를 구한다고 할수 있다.

$$\iiint_{\text{physicalspace}} [PDE] dV = 0 \quad (2.13)$$

이러한 식(2.5)을 만족하는 해를 간혹 Weak solution이라고 부르기도 한다. 1차원 편미분방정식이 우리들에게 주어진 지배방정식이므로 이를 (2.12)의 PDE에 대입하면

$$\int_{\text{Ateach node } i} \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] dx = 0 \quad (2.14)$$

식(2.12) 혹은 (2.14)를 적분하기 위해서는 적분영역인 Finite volume(혹은, Control volume)이 정의 되어야 하는데, 식(2.14)의 x-방향으로의 1차원 문제에서는 보통 다음의 그림과 같이 정의한다.

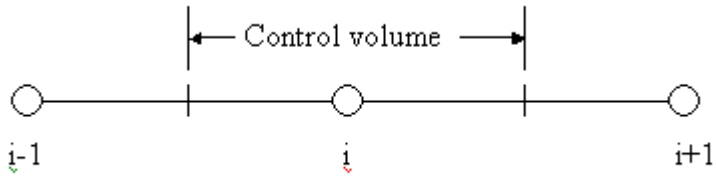


Fig. 3.1 F.V.M Control volume

이렇게 정의된 Control volume에 대해 식(2.14)를 적용하면

$$\int_{x_i - \Delta x/2}^{x_i + \Delta x/2} \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] dx = 0 \quad (2.15)$$

으로 되고 이때 i-번째 Node에서의 온도를 다음과 같은 Control volume에 대한 평균값, T_i 로 정의하면 다음과 같다.

$$T_i = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_i - \Delta x/2}^{x_i + \Delta x/2} T dx \quad (2.16)$$

이러한 정의를 이용하여 식(2.12)을 계산하기 위해 우선 식(2.16)의 첫번째 항을 계산해 보면,

$$Term\#1 = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_i - \Delta x/2}^{x_i + \Delta x/2} T dx \quad (2.17)$$

여기서 적분구간 $x_i \pm \Delta x/2$ 는 시간의 함수가 아니므로 식(2.17)의 적분과 미분의 순서를 다음과 같이 바꿀수 있다.

$$Term\#1 = \frac{d}{dt} \left[\int_{x_i - \Delta x/2}^{x_i + \Delta x/2} T dx \right] \quad (2.18)$$

식(2.17)의 []의 내부는 식(2.16)의 정의에 의해 $T_i \Delta x$ 로 쓸 수 있으므로 식(2.17)은 다시 다음으로 표현될수 있다.

$$Term \#1 = \Delta x \frac{dT_i}{dt} \quad (2.19)$$

식(2.12)의 두번째항을 계산해 보면,

$$Term \#2 = \int_{x_i - \Delta x/2}^{x_i + \Delta x/2} \left[\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] dx = \alpha \left[\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_i + \Delta x/2} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_i - \Delta x/2} \right] \quad (2.20)$$

그러므로, 식(2.19)와 (2.20)을 식(2.12)에 다시 대입하면

$$\Delta x \frac{dT_i}{dt} = \alpha \left[\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_i+\Delta x/2} - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_i-\Delta x/2} \right] \quad (2.21)$$

그런데 이 식에서는 $\frac{dT_i}{dt}$ 와 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 의 계산이 필요한데 이들을 위해 유한차분법에서 사용되어진 Taylor급수전개가 보통 널리 사용되는데 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{dt} &= \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} + O(\Delta t) \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_i-\Delta x/2} &= \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_i+\Delta x/2} &= \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \end{aligned} \quad (2.22)$$

식(2.22)를 다시 식(2.21)에 대입하면 최종적으로 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{\alpha}{\Delta x} \left[\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x} \right] \quad (2.23)$$

이렇게 유한 체적법에 의해 얻은 바로 위의 식은 유한차분법에 의해 얻어진 식(2.13)과 똑같은 결과 식을 얻었으나 일반적으로 항상 꼭 같은 결과 식을 얻지는 않는다.

식(2.22) 이후의 T_i^{n+1} 을 얻기위한 계산방법은 유한차분법의 식(2.13)의 이후 계산과 동일하다.

2.5. 유한요소해석의 수식화

강소성 유한요소법은 1973년 Lee와 Kobayashi가 강소성 유한요소법의 기초가 되는 행렬방법을 수식화한 후에 복잡한 금속성형문제의 해석에 이 방법이 많이 적용되어 왔다. 재료의 강체회전(Rigid Body Rotation)과 탄성변형을 무시한 강소성 재료의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (2.24)$$

이때

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad (2.25)$$

여기서 $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형속도(Rate of Effective Strain), $\bar{\sigma}$ 는 유동응력(Flow Stress), σ'_{ij} 은 편차응력(Deviation Stress)이다. 금속성형공정의 해석 시 가속도를 무시 하였을 때에 평형방정식(Equilibrium Equation)은 다음과 같이 주어진다

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (2.26)$$

식(2.26)에 변분정리(Variational Principle)를 적용하고 이를 정리하면 다음과 같은 변분방정식을 얻을 수 있다

$$\int_v \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_v \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_i} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (2.27)$$

식(2.27)에서 첫 항은 내부에너지(Internal Energy)를 대변하며 마지막 항은 외력

에 의해서 재료에 작용하는 외부일(External Work)를 나타낸다. 가운데 항은 소성 변형중에는 재료의 부피가 변하지 않는다는 비압축성조건(Incompressible Condition)을 만족시키기 위해서 벌칙 함수(Penalty Constraint)를 적용하여 파생되었다 $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$ 이고 K는 벌칙상수(Penalty Constant)로 매우 큰 양수이다. 벌칙함수를 적용함으로써 해는

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii} = 0 \quad (2.28)$$

이되는 구속조건하에서 구해진다. 이는 비압축성조건이 만족됨을 의미한다. 마지막항의 f_i 는 재료의 특정한 면 s t 상에 외부로부터 작용하고 있는 외력을 의미한다. 금속성형공정에서의 f_i 의 대표적인 예로 금형과 재료간의 마찰력을 들 수 있다. 금형과 재료사이의 접촉면에서 작용하는 마찰력을 표현하기 위해서 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$f = -\frac{2}{\pi}mk \cdot \tan\left(\frac{|V_s|}{u_0}\right)t \quad (2.29)$$

여기서 m은 마찰계수(Friction Factor), k는 해당 접촉점에 있는 재료의 국부적전단항복응력(Shear Yield Stress), u_0 는 $|V_s|$ 에 비해서 매우 작은 양의 상수 값이며 V_s 는 재료와 금형간의 상대속도의 벡터이고 t는 V_s 방향의 단위벡터(Unit Vector)이다. 식(2.29)은 접촉면에서 마찰력이 재료의 금형에 대한 운동방향의 반대로 mk의 크기만큼 작용한다는 가정 하에서 구성된 모델이다. 식(2.27)에서 적분형으로 묶여진 각 항을 각각 Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 로 표기하면 다음과 같이 간단히 표기할 수 있다.

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0 \quad (2.30)$$

식(2.29)을 유한요소 수식화하기 위해서 속도장 V_i 를 요소내에서 보간함수(Shape Function)를 적용하면 요소내의 임의의 점에서 속도장 V_i 는 각절점의 속도 V_j 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = \sum_{j=1}^{N_d} N_{ij} v_j \quad \text{or} \quad V_i = N_{ij} v_j \quad (2.31)$$

여기에서 N_{ij} 는 보간함수를 이용하여 적절히 구성된 행렬이며, N_d 는 요소내의 총 절점(Node)수 V_j 는 일반적으로 절점의 각속도 성분을 적절히 배열하여 구성한 벡터이다. 이때 N_{ij} 와 V_j 의 배열은 상호관계가 있다. 보간한 속도장을 미분하여 변형률 속도를 구할 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}_i = B_{ij} v_j \quad (2.32)$$

이때 $\dot{\varepsilon}_i$ 는 각 변형속도 성분을 배열한 벡터이고, B_{ij} 는 보간 함수의 미분을 이용하여 $\dot{\varepsilon}_i$ 의 배열에 적합하도록 구성된 배열이다. 이를 이용하여 유효변형률과 유효 응력등의 절점의 속도항으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} = \sqrt{\frac{2}{3} K_{\alpha\beta} v_\alpha v_\beta} & (2.33) \\ \dot{\varepsilon}_v &= Q_\alpha v_\alpha \\ \delta v_i &= N_i \alpha \delta v_\alpha \\ \delta \bar{\varepsilon} &= \frac{2}{3} \frac{K_{\alpha\beta}}{\bar{\varepsilon}} v_\beta \delta v_\alpha \end{aligned}$$

여기서 $K_{\alpha\beta} = B_{i\alpha} B_{i\beta}$ 이고, Q_α 는 체적변형률(Volumetric Strain Rate)와 절

점속도와 관계를 나타내는 행렬이다. 위의 관계식을 식(2.33)에 대입하고 정리하면

$$\sum_{m=1}^E \delta v_{\alpha} \left[\int_{V^{(E)}} \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} K_{\alpha\beta} v_{\beta} dV + K \int_{V^{(E)}} Q_{\alpha} Q_{\beta} v_{\beta} dV - \int_{V^{(E)}} N_{i\alpha} f_i dS \right] = 0 \quad (2.34)$$

과 같고, 이를 다시 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{m=1}^E [\Phi(m)1 + \Phi(m)2 + \Phi(m)3] = 0 \quad (2.35)$$

이때 식(2.35)는 속도에 대한 비선형방정식이므로 해를 쉽게 구할 수 없으므로 이를 선형화시켜 Newton-Raphson 반복방법(Iterative Method)를 이용하여 해를 구한다 이를 선형화 하면

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^E \left[\frac{\partial \Phi_1^{(m)}}{\partial v} + \frac{\partial \Phi_2^{(m)}}{\partial v} + \frac{\partial \Phi_3^{(m)}}{\partial v} \right]_{(n-1)} \Delta v(n) \\ &= - \sum_{m=1}^E [\Phi_1^{(m)} + \Phi_2^{(m)} + \Phi_3^{(m)}]_{(n-1)} \end{aligned} \quad (2.36)$$

과 같다 여기서(n-1)에 해당하는항은이전속도장으로부터계산된다.상기식을구성한후 일반적인선형방정식의해법을이용하여식을풀면현재해에서실제해로근접해가는해의변화량 $\Delta v (n)$ 을계산할수있다 이를이용하여다음과같이현재의해를개선한다

$$v_n = v(n-1) + \beta \Delta v(n) \quad (2.37)$$

이때 β 는 해의 발산을 방지하기 위해서도 입한감속계수(Deceleration Coefficient)로 0 보다 크고 1 보다 작거나 같은 값이다.

2.6 열전달 및 유효응력의 수식화

2.6.1 열간 온도방정식의 유도

열간 공정은 냉간과는 달리 열에 의한 효과가 크므로 이를 고려하기 위한 온도 해석이 필수적이다. 이온도의 해석결과에 의해 각 단계 마다의 재료의 거동 및 해석조건들이 달라지기 때문이다.

온도해석에 있어서는 연속체역학(Continuum Mechanics)에 몇 가지 열역학 이론을 도입하여 사용되어져 왔으나 실제로 일반적인 문제에 적용하여 해석하는데 어려운 점이 많았다. 그래서 순수 열역학적인 이론에 기초하여 소성변형에 의해 발생하는 재료내부의 온도분포를 해석하는 방법이 제시되었다. 이는 1980년에 Rebelo와 Kobayashi에 강점소성 유한요소법에 도입되어진 이후 지금까지 발전되어 왔다. 열역학적인 과정은 에너지보존법칙과 Clausius-Duhem의 부등조건을 만족해야 한다. 어떤 시간 t 에서 물체의 열역학적상태는 내부에너지(Internal Energy), 엔트로피(Entropy), 엔트로피유입량(Entropy Influx), 열(Heat) 등의 조합으로 정의되므로 이것들을 질량보존(Mass Conservation), 운동량보존(Momentum Conservation)원리와 같이 수식화하면 에너지방정식은

$$\sigma_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} + q_{i,j} + \rho r_s - \rho \dot{e} = 0 \quad (2.38)$$

과 같다. 위식에 Helmholtz 자유에너지의 표현식(2.39)을 대입하면 열역학 제1법칙에 의한 에너지방정식은 다음과 같아진다.

$$\Psi = e - T\eta \quad (2.39)$$

$$\sigma_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} + q_{i,j} + \rho r_s - \rho(\Psi + T\dot{\eta} + T\dot{\eta}) = 0 \quad (2.40)$$

여기에 열역학 제2법칙에 의한 엔트로피 부등조건인 아래의 조건을 대입하면 다음의 식(2.41)으로 표현 되어 진다. 여기서 q 는 열유동벡터(Heat Flux Vector), ρ 는 밀도 T 는 절대온도, Ψ 는 단위질량당 Helmholtz 자유에너지, η 는 단위질량당 엔트로피, r_s 는 단위질량당 열공급량 이다.

$$-\Psi - T\eta + \frac{\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}}{\rho} + \frac{q_i T_i}{\rho T} \geq 0 \quad (2.41)$$

온도는 주로 소성변형과 주위로의 열손실(Heat Loss)에 의해 변화 한다. 재결정(Recrystallization) 및 상변화(Phase change)가 없다고 가정하면 자유에너지의 변화는 전위 밀도만으로 고려된다. 그리고 열전도계수(Thermal Conductivity)가 등방성이고 온도에 관계없이 일정하다고 가정하면 이에 의해 위의 식(2.40), (2.41)은 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$\sigma'_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} + K_1 T_{ij} + \rho r_s - \rho cT - vA\bar{\varepsilon} + vBa \exp\left[-\frac{D}{k_0 T}\right] = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{K_1 T_i T_i}{\rho T} + \frac{\sigma'_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}{\rho} - \frac{vA\bar{\varepsilon}}{\rho} + \frac{vBa}{\rho} \exp\left[-\frac{D}{k_0 T}\right] \geq 0 \quad (2.43)$$

으로 간주 된다. 여기서 A , B 는 재료상수, c 는 비열, D 는 자체확산(Self Diffusion)에 의한 에너지, k_0 는 볼츠만 상수, a 는 전위밀도, v 는 단위전위 길이당의 에너지를 각각 나타낸다. 여기서 (2.41)식을 여러 이론에 의한 결과 및 가정을 도입하여 단순화 시키면 아래와 같이 표현할 수 있게 된다.

$$K_1 T_{ij} - \rho cT + k^* \bar{\sigma} \bar{\varepsilon} = 0 \quad (2.44)$$

여기서 k^* 값의 범위는 다음과 같으며 해석 시에는 일반적으로 중간값인 0.9를 도입 하면 적절하다고 보고되어 진다. ($0.85 \leq k^* \leq 0.95$) 응력변형률 관계식에서 유효응력이 실험적인 자료로부터 얻어진 변형률, 변형률속도 온도의 함수로 가정하고 열평형방정식의 약적분형(Weak Integral Form)을 이용하면 다음과 같다

$$\int_v (K_1 T_{ij} - \rho c T + k^* \bar{\sigma} \bar{\epsilon}) \delta T dV = 0 \quad (2.45)$$

이를 텐서정리 및 발산정리(Divergence Theorem)와 경계부근에서 유량을 고려하면 아래의식(2.46)처럼 정리 된다.

$$\begin{aligned} \int_v K_1 T_i \delta T_i dV + \int_v \rho c T \delta T dV \\ - \int_v k^* \bar{\sigma} \bar{\epsilon} \delta T dV - \int_{S_q} K_1 q_n dS = 0 \end{aligned} \quad (2.46)$$

여기서 경계조건을 이용하여 풀면 온도장(Temperature Field)을 구하게 된다. 경계조건은 아래와 같다.

$$\text{대류열유량(Convection Heat Flux)} : q_n^c = h(T_a - T_s)$$

$$\text{복사열유량(Radiation Heat Flux)} : q_n^r = \sigma \epsilon (T_a^4 - T_s^4)$$

$$\text{전도열유량(Conduction Heat Flux)} : q_n^d = h_{lub}(T_1 - T_2)$$

$$\text{마찰열유량(Friction Heat Flux)} : q_n^f = m_f k_y v$$

여기서 h 는 대류 열전달 계수, T_a 는 금형과 소재의 주위온도, T_s 는 금형과 소재의 표면온도를 각각 나타내며 h_{lub} 는 윤활로 인한 열전달계수, k_y 는 재료의 전단항복계수, m_f 는 마찰 상수이다.

2.6.2 온도방정식의 유한요소 수식화

열평형방정식에서 유도된 온도방정식의 약적분형(Weak Integral Form)을 연속체를 n 개의 절점과 m 개의 요소로 이산화 시킨 계에 대하여 적용시키면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_v K_1 T_i \delta T_i dV + \int_v \rho c T \delta T dV \\ - \int_v k^* \bar{\sigma} \bar{\epsilon} \delta T dV - \int_{S_q} q_a \delta T dS = 0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

이식을 형상함수를 이용하고 미소온도 변화 δT_β 를 소거하면 전 요소에 대한 계의 방정식(System of Equation)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta T_\beta \left[\int_{v^{(m)}} K_1 M M^T T dV + \int_{v^{(m)}} \rho c N N^T dV \right. \\ \left. - \int_{v^{(m)}} k^* \bar{\sigma} \bar{\epsilon} N dV - \int_{S_q^{(m)}} q_a N dS \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.48)$$

여기서 M 은 N_{α_i} 를 나타낸다. 위의 식을 간단히 벡터형으로 나타내면 다음과 같다.

$$KT + CT - Q - Q_n = 0 \quad (2.49)$$

여기서 Q_n 은 경계조건을 나타내는 열유동 벡터이며 아래의 식(2.50)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
Q_n = & \int_{S_r} \sigma \varepsilon (T_a^4 - T_s^4) N dS + \int_{S_c} h (T_a - T_s) N dS \\
& + \int_{S_i} h_{lub} (T_d - T_w) N dS - \int_{S_f} q_f N dS = 0
\end{aligned} \tag{2.50}$$

위의 식으로 전달되는 열유량을 통해 온도를 계산해 낼 수 있고 이 계산된 온도를 통해 열간 점소성 해석에 이용 한다.

2.6.3 유동응력의 수식화

단조가공시 하중은 $F = \bar{\sigma} \cdot (\mu) \cdot (c)$ 로 표현되는데 $\bar{\sigma}$ 는 유동응력이며 $f(\mu)$ 는 공구와 재료 표면에서의 마찰에 대한 표현이며 $g(c)$ 는 형상에 대한 항목이다. 유동응력은 온도 변형률속도 변형률의 함수인데 일반적으로 다음과 같은 형태로 표현 된다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n \dot{\bar{\varepsilon}}^m \tag{2.51}$$

여기서 n 은 가공경화지수 m 은 변형률속도 지수이다. 이때 변형속도가 유동응력에 미치는 영향을 살펴보면 실온에서 대부분의 금속은 m 의 값이 0~0.03으로 대단히 작다. 하지만 열간가공의 경우 m 의 값이 0.1~0.3까지 증가하며 반대로 n 값이 거의 0으로 감소하므로 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^m \tag{2.52}$$

대부분의 금속은 온도가 증가하면 가공경화 지수가 급격히 떨어지므로 일정한 변형률속도에서 측정된 유동응력과 인장강도가 감소한다. 그러나 이러한 감소가 연속적인 것이 아니고, 어떤 온도범위에서는 유동응력이 온도에 따라 별로 변하지 않고 어떤 경우에는 온도의 상승에 따라 유동응력이 커지기도 한다. 유동응력의 온도의

존성은 유동응력의 변형속도의 존성과 밀접한 관계가 있다. 변형속도의 민감도가 유동응력에 미치는 영향은 온도상승이 유동응력에 미치는 효과와 같다. 따라서 단조하중을 구하기 위해서는 소재와 금형의 온도를 알아야 하고, 이 온도에서의 유동응력과 변형속도를 알아야 한다. 또한 플래시가 있는 경우에는 플래시의 폭과 길이도 알아야 한다. 하중을 구하는 방법에는 크게 두 가지로 나뉘는데 경험적인 방법과 해석적인 방법이 있다. 실험적인 방법은 단조작업 현장에서 실행된 작업의 자료 수치들을 같은 형상에 적용시켜서 이러한 수치들을 실험식으로 만든 방법이고, 해석적인 방법은 컴퓨터를 이용한 슬래브방법(Slab method)이다. 슬래브방법의 경우 여러 가지 하중 계산식이 제안되었는데 그중 Von Mises 식과 Tresca 식이 가장 일반적이다.

Von Mises의식은

$$F = \bar{\sigma} \pi \left[\frac{a^2}{4} + \frac{d_c^3}{12\sqrt{3}s} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{8s} (a^3 - d_c^3) \right] \quad (2.53)$$

이며 Tresca 식은

$$F = \bar{\sigma} \pi \left[\frac{a^2}{4} + \frac{d_c^3}{24s} + \frac{\mu}{12s} (a^3 - d_c^3) \right] \quad (2.54)$$

이다.

제 3 장 실험

3.1 실험준비

본 실험에 사용된 강은 S45C로 현재 S/CAM 샤프트 양산에 사용되는 강으로 합금 조성은 Table 3.1과 같다. Fig. 3.1에서와 같이 대형 상용차에 주로 사용되는 S/CAM 드럼 브레이크의 구조이며, S/CAM 드럼 브레이크는 회전하는 드럼, 실제 드럼과 마찰하는 라이닝(lining)이 부착된 슈, 챔버(chamber)로부터 발생한 공압으로 슈를 밀어주는 S/CAM, 라이닝의 간격을 조절하는 슬랙 어드저스터(slack adjuster) 등으로 구성되어 있다. S/CAM의 회전에 의하여 슈가 확장하면 슈에 부착된 라이닝이 드럼에 확장, 접촉함으로써 마찰력이 발생한다. 드럼 브레이크의 가장 큰 특징은 자기작동 작용이다. 회전중인 드럼을 제동시키면 회전방향으로 확장되는 슈에는 마찰력에 의해 드럼과 함께 회전하려는 회전토크가 추가로 발생하게 되어 확장력을 증대시키게 된다. 확장력이 증대되면 결국은 마찰력이 증대되는 결과가 된다. 실제로 S/CAM에서 공급된 확장력에 의한 마찰보다 실제로 발생된 마찰력이 크다. 이와 같은 작용을 자기작동(self-energizing)작용이라 한다.

드럼브레이크는 제동압력에 의해 마찰재를 휠(Wheel)과 함께 회전하는 드럼에 밀착시켜 자동차를 정지 혹은 감속시키는 장치로 큰 압력이 작용하므로 강성 및 강도내구설계가 필수적이다. 장착차량에 맞는 드럼브레이크를 신속히 개발하기 위해서는 강도 및 진동소음을 고려한 설계기술이 필요하며 구조 응력해석 기술을 사용하여 부품설계로부터 시스템설계에 이르기까지 체계화된 해석을 통해 설계의 신뢰성을 높이고 표준화된 설계기술을 확보하는 것이 중요하다. 해석에 적용되는 브레이크는 Fig. 3.1과 같은 상용 브레이크의 공기식(Full Air Type) 브레이크이며, 구체적인 형상은 다음과 같다. 드럼(Drum)은 차량의 Wheel과 같이 반시계 방향으로 회전하며 원통형 형상이다. S-Cam은 S자 형상으로, 작용력인 공기압(Air Pressure)에 의해 반시계 방향으로 회전하여 슈(Shoe)를 확장시키는 확장자이다. 라이닝(Lining)은 회전하는 Drum을 정지시키기 위한 마찰재이며, Shoe는 림(Rim)

과 웹(Web)의 결합품으로 Lining이 Drum과 마찰 할 수 있도록 지지하는 구조물이다. Fig. 3.2에서와 같이 좌측은 리딩 슈(Leading Shoe)이고 우측은 트레일링 슈(Trailing Shoe)이다. 롤러(Roller)와 롤러 핀(Roller Pin)은 Shoe에 결합되어있고, S/CAM의 작용력을 Shoe에 전달하는 매개체이다. 앵커 핀(Anchor Pin)은 Shoe를 고정하는 구조물로 Hinge 역할을 한다. 특히, 구성부품 중에서 S/CAM 샤프트는 헤드부와 축부로 나누어져 있으며, 헤드부의 형상이 기하학적 형상이어서 생산과정이 복잡하고 상용차의 특성상 대형차이므로 브레이크 시스템이 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 따라서 부품의 강도 및 수명이 매우 중요하여 제작상 어려움이 많고 품질 규정이 까다로워 생산업체들이 매우 어려움을 토로하고 있다.

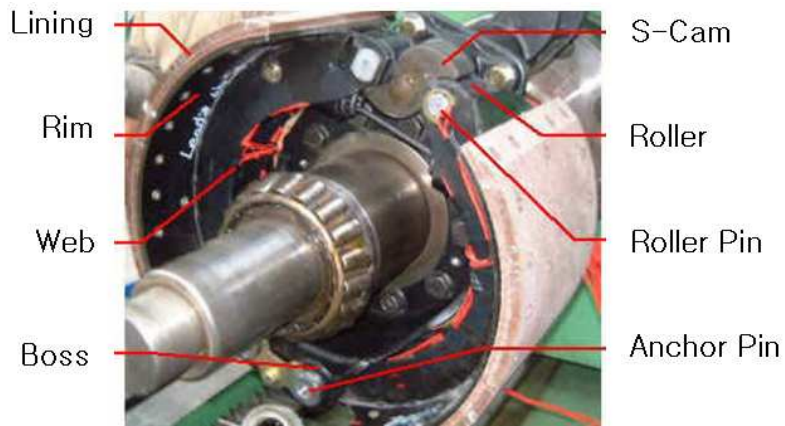


Fig. 3. 1 Drum brake structure

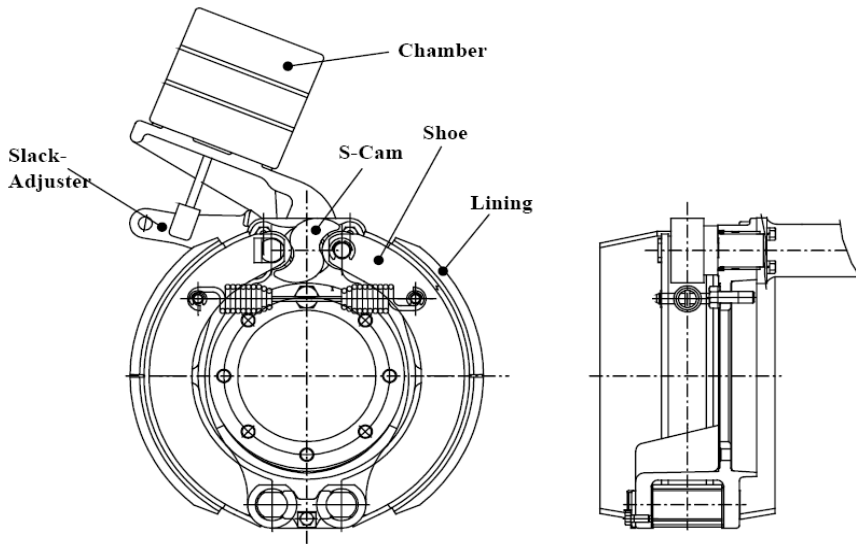


Fig. 3. 2 Drum brake structure of internal expansion type

Table 3.1 Chemical composition of S45C

(Wt.%)						
	C	Si	Mn	Cu	S	P
S45C	0.43	0.21	0.71	0.16	0.009	0.025

3.2 S/CAM 샤프트 생산 프로세스 및 금형설계

Fig. 3.3에서와 같이 S/CAM 샤프트 단조공정의 생산 프로세스이며, 소재입고에서 제품 출하까지 매우 많은 공정을 거쳐 제품이 생산되고 있다. 그림에서와 같이 소재입고시 기계적성질 및 화학적성질 등의 영향이 품질에 매우 큰 영향이 미치고 있으며, 소재절단시에는 절단면과 절단면의 크랙이 발생하면 단조를 실시하더라도 제품에 하자가 발생한다. 또한 절단작업시 이혼재 혼입에 따른 결함요인도 무시 못하는 부분이다. 본 논문에서는 단조과정을 위하여 가열하는 온도는 1100℃~1300℃ 범위에서 이루어지며, 단조시에는 미성형 및 금형마모가 발생하여 생산비용이 추가되는 현상이 발생할 수 있어 가열과정과 단조과정에서 매우 심열을 기울여 생산을 해야 한다. 또한 단조 시 필히 발생할 수밖에 없는 트림부분이 발생함으로 트림링 과정을 필히 거쳐한다.

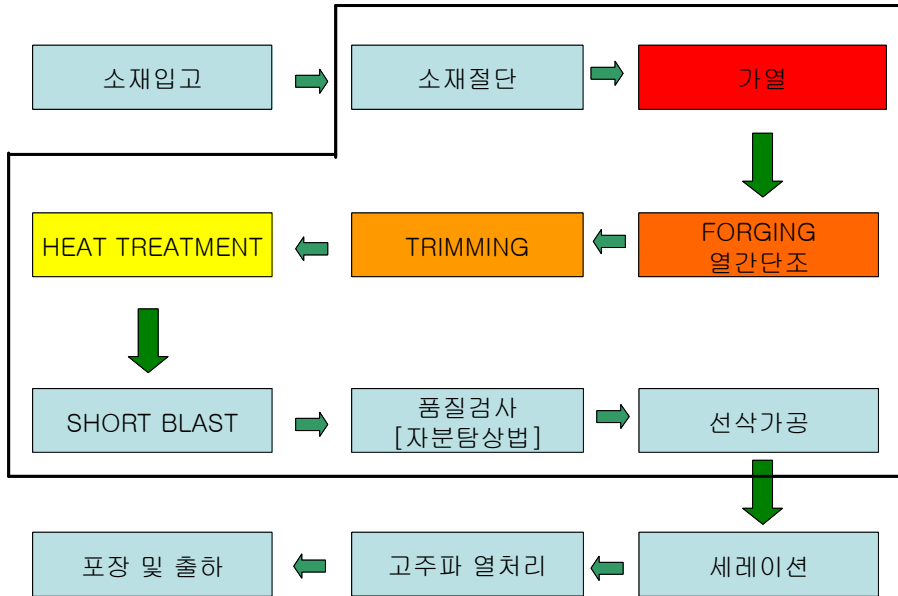


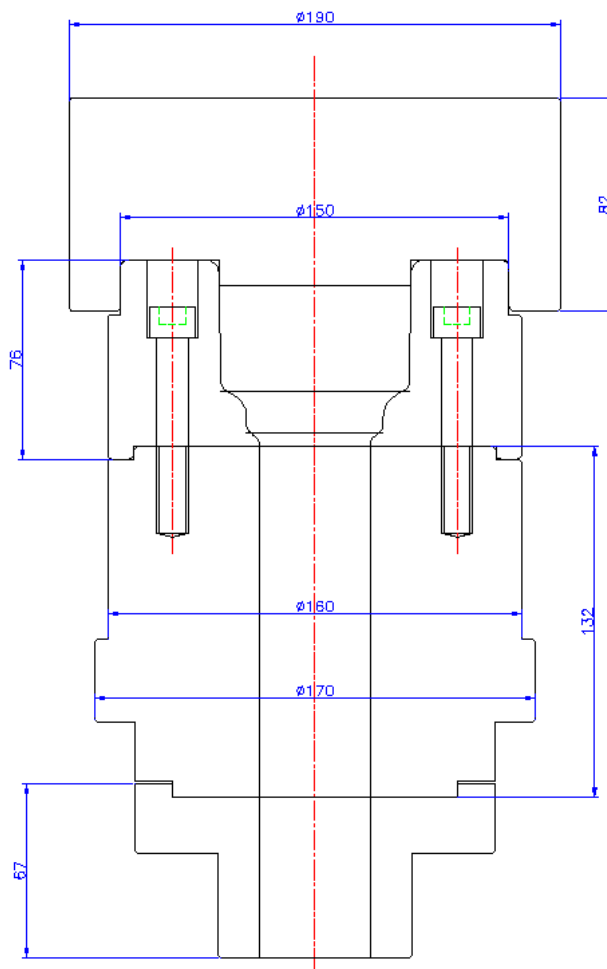
Fig. 3.3 Flow of forging process

상용차용 캠 샤프트의 단조금형은 생크부와, 생크부의 단부에 설치되며 반경방향으로 상호 대응되며 소정 곡률의 외주면이 형성된 제1, 2캠부를 가진 헤드부를 포함하는 것으로, 캠 샤프트의 생크부의 규격에 따라 상호 결합부에 의해 적층 및 분리 가능하며 각각 상하방향으로 생크성형부를 가지는 금형들과 단위금형들 중 선택된 하나와 결합되며 헤드부를 성형하기 위해 상하방향으로 헤드 성형부가 형성된 헤드 성형금형과 헤드 성형금형과 결합되어 헤드 성형공간을 구획하는 커버금형을 포함한다. 이 단조금형의 하나의 성형금형을 이용하여 규격이 다른 동일 형상의 캠 샤프트를 단조할 수 있어 단위 생산원가를 줄일 수 있다.

Fig. 3.4는 열간단조 1차공정인 UPSETTER를 위한 금형 도면이고, Fig. 3.5~Fig. 3.6은 1차공정에서 생산되어질 S/CAM 샤프트이다. 이때 헤드부가 원형을 잡아주는 형상임을 알 수 있다. Fig. 3.7은 상하형 금형으로 정삭형, 황삭형의 두 번의 공정을 거치게 되는 금형임을 나타내었다. Fig. 3.8은 상하 분할형 홀더이다.

Fig. 3. 9~3.26은 S/CAM 샤프트 생산관련 사항을 개략적으로 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이 소재절단에서부터 제품 생산에 이르기까지 매우 다양한 공정

을 거치며 1차 UPSETER 공정을 거쳐 형상을 잡아주고, 2차 공정에서 S/CAM 부 형상을 성형하여 3차 공정에서 최종 마무리 성형을 한다. 또한 최종 3차공정이 끝나면 트리밍 과정으로 선삭과정 이전과정을 마무리하게 된다. 생산공정에서 알 수 있듯이 단조금형은 고 압축력을 이용하여 단조를 행하므로 제품의 강도가 좋아 자동차 부품은 대부분이 이방식을 이용하여 생산하고 있다.



(Unit : mm)

Fig. 3.4 Process design of Fist step forging

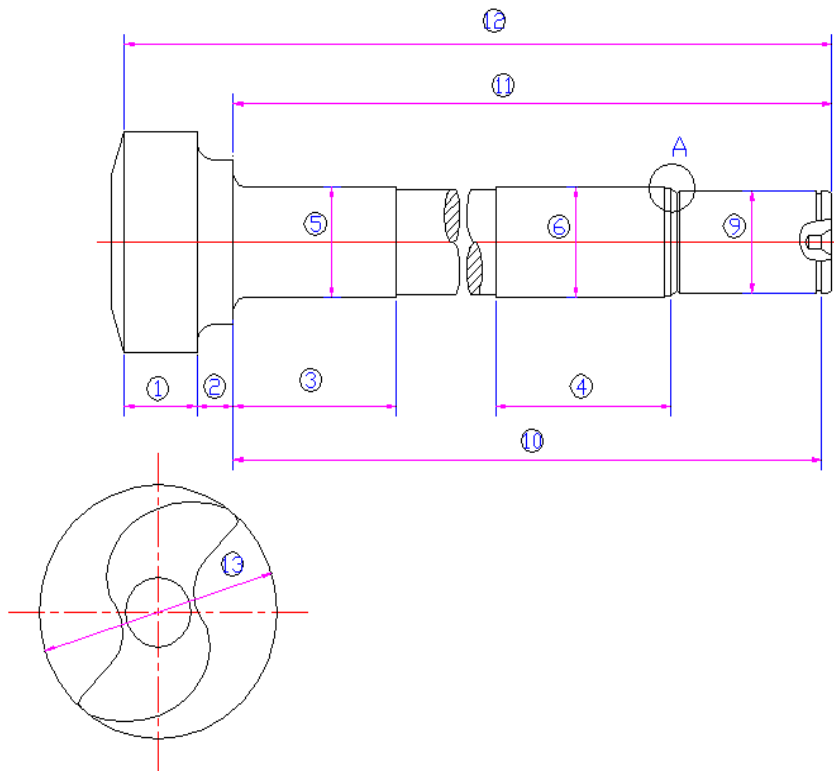
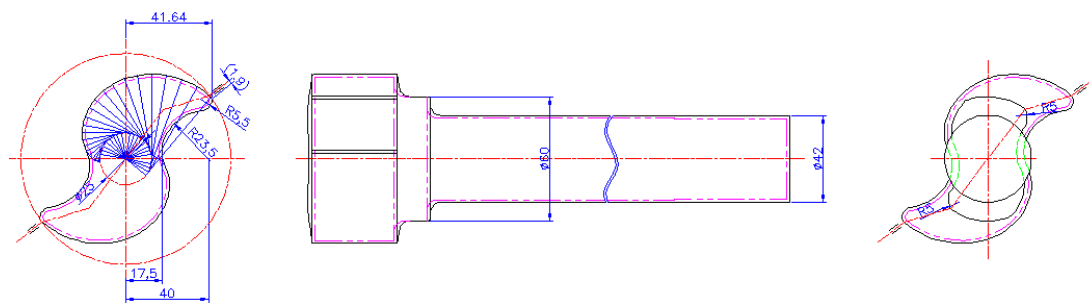
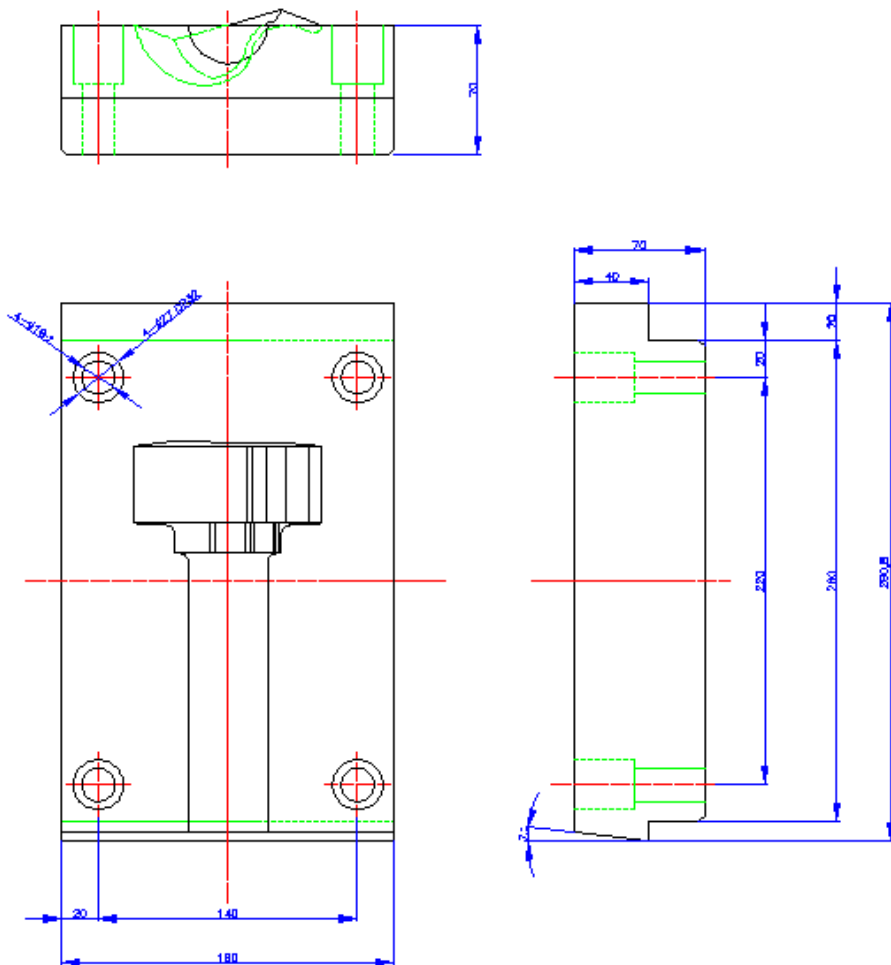


Fig. 3.5 Design of S/CAM shaft



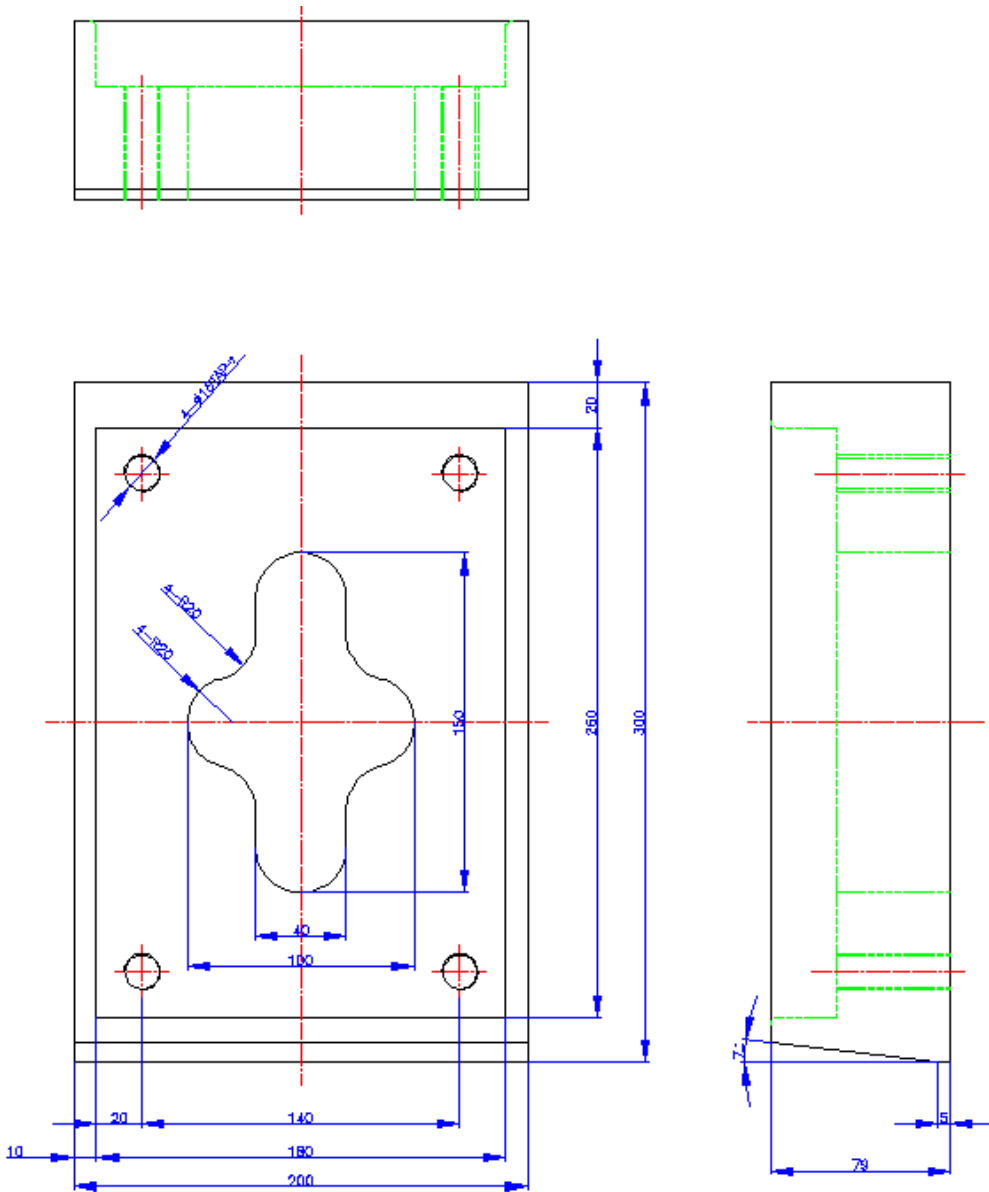
(Unit : mm)

Fig. 3.6 Part design of first step process



(Unit : mm)

Fig. 3.7 Upper and lower forging shape



(Unit : mm)

Fig. 3.8 Separate holder



Fig. 3.9 Billet cutting machine



Fig. 3.10 Bar material of SM45C



Fig. 3.11 S/Cam shaft billet



Fig. 3.12 Billet heating machine



Fig. 3.13 Pull out of heating billet



Fig. 3.14 Output of heating billet



Fig. 3.15 Heating billet input



Fig. 3.16 Forging



Fig. 3.17 First step forging



Fig. 3.18 First step forging part



(a) Forging machine of 1300ton



(b) Forging machine of 1300ton

Fig. 3.19 Second step of 1300ton forging machine



(a) Forging machine of 750ton



(b) Forging machine of 750ton

Fig. 3.20 Second step 750ton of forging machine



Fig. 3.21 First step forging molding



Fig. 3.22 Second step process forging molding



Fig. 3.23 Third step process forging molding



Fig. 3.24 Trimming



Fig. 3.25 Last forging part

3.3 S/CAM 샤프트 해석 및 방법

열간단조 공정에서 가장 중요한 것은 소재가 가열되고, 단조금형 내에서 정확한 형상을 만드는 것이 가장 중요하며, 형상이 이루어지는 동안 온도변화와 형상을 이룰 때 가장 많이 영향을 미치는 응력을 분석하는 것이 중요하다, 이를 분석하기 위하여 전산해석 프로그램인 Superfuge 2007를 이용하여 실시하였다.

Superfuge 2007는 단조 해석 프로그램중에서도 유한체적법과 유한요소법의 두 가지 솔버를 기반으로 3차원 적인 소재의 형상 변화 및 금형의 응력 분포를 정확히 표현할 수 있어 소재에 따른 성형과정을 빠른 시간 내에 검토 할 수 있다. 또한 냉간/열간 단조 해석 기능을 가지고 있으며, Forward/Backward Forging(전방/후방 압출 성형), Open/Closed Forging(자유단조/밀폐단조), Bending/Shape Rolling Forging(굽힘/형압연 단조), Material DB(열간/냉간 단조형 소재의 물성기능)등을 해석 할 수 있다.

주조전용 상용 code인 Superfuge2007의 전반적인 해석 과정은 전처리 과정(preprocessing), 요소분할 과정(enmeshment), 시뮬레이션 과정(simulation), 후처리 과정(postprocessing)으로 크게 4단계로 구분된다.

S/CAM 샤프트는 Open Forging으로써 유한체적법(F.V.M)으로 솔버를 선택하였으며, S/CAM 샤프트의 성형성에 대하여 최적의 열간단조 조건으로 해석을 하여 분석 하였다. 전산해석 프로그램을 사용하기 위해서는 2D에 도면을 3차원으로 만들어야 하며, 3차원 설계 프로그램인 UG NX5를 이용하여 상부 금형과 하부 금형을 각각 모델링하여 하였다.

Fig. 3.26은 S/CAM 샤프트 생산을 위한 상부금형이고, Fig. 3.27은 하부금형이다. Fig. 3.28은 상부 및 하부 금형을 이용한 S/CAM 샤프트 생산을 위한 열간 단조금형의 시뮬레이션을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 3차원 모델링화 하였으며, 이 모델링은 상부 금형과 하부 금형으로 나누어서 모델링을 하였다. 또한, Fig. 3.29는 열간 단조금형으로 생산되어질 상용차 브레이크 드럼 S/CAM 샤프트의 3차원 솔리드 모델링이다.

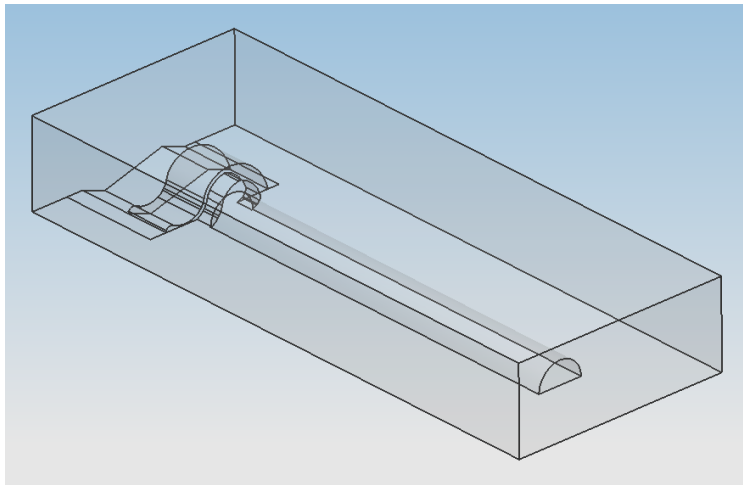


Fig. 3.26 Upper forging mold

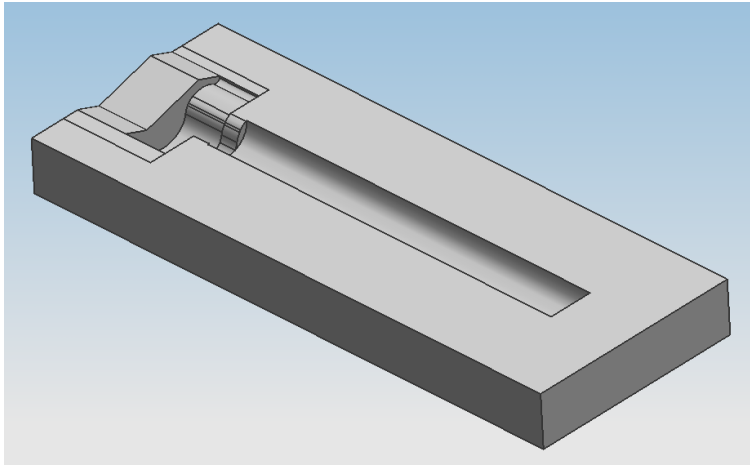


Fig. 3.27 Lower forging mold

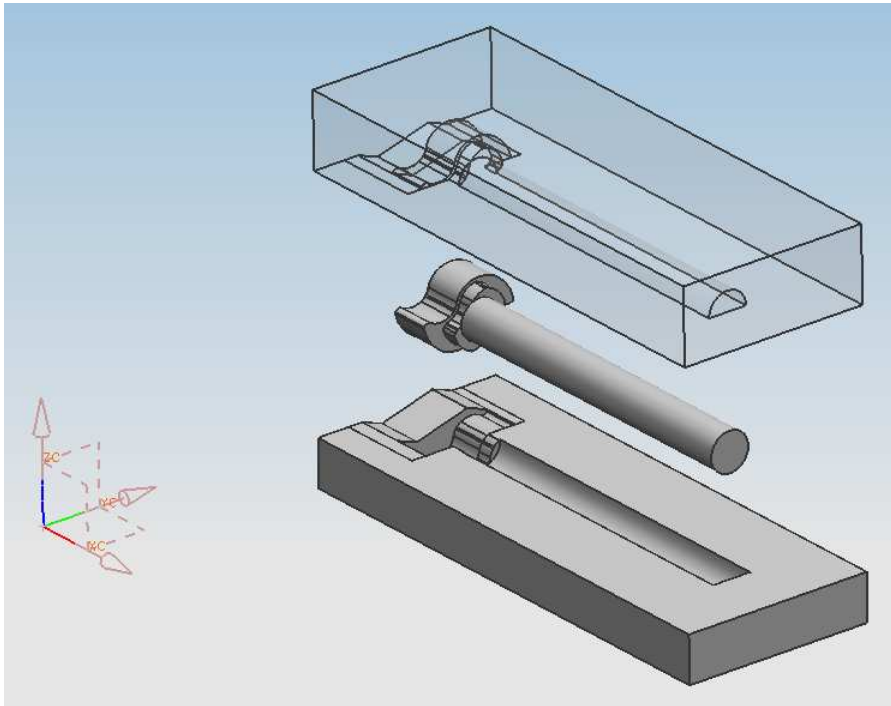


Fig. 3.28 S/CAM shaft forging setting

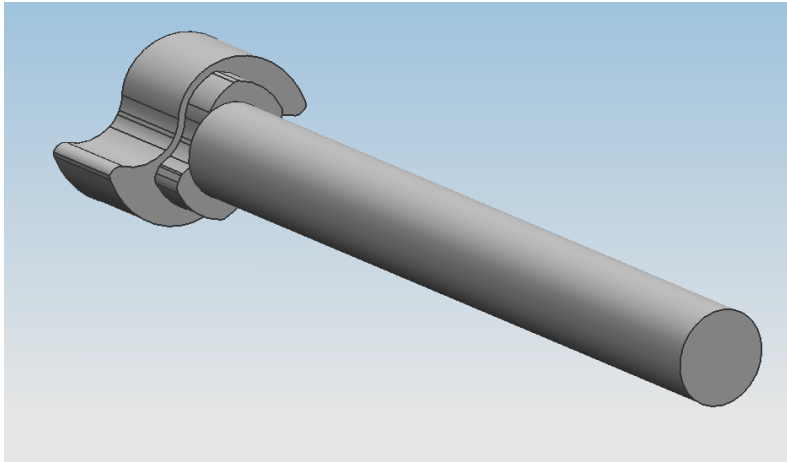


Fig. 3.29 S/CAM shaft

Table 3.2 Boundary conditions for the hat forging

No.	List	Process Value
1	Element size	2.0mm
2	Die temperature	250°C
3	Material temperature	1200~1300°C
4	Solver	F.V.M
5	Friction	0.1
6	Forging	Hot
7	Press	Hydraulic press
9	m/s	1

Superforge 2007에서 인식 가능한 STL (stereo lithography) 화일로 변환하여 각 재질군(material group)을 생성한 결과를 나타내었다. Superforge2007는 F.V.M계열로서 요소분할은 직교좌표 분할에 의하여 자동 요소분할을 수행하며, 요소크기에 해당하는 메탈 셀(metal cell)을 정의 하여 사용한다. 삼각형 요소분할을 사용하였으며, 엘리먼트 크기는 정확한 해석을 보기 위하여 2.5mm에 크기를 주었다. Table. 3.2는 열간 단조를 위한 구속 조건을 나타내었다. 단조를 위한 구속 조건으로 엘리먼트 사이즈는 2.5mm로 하였으며, 금형에 온도는 250℃로 하였으며, 워크피스에 온도는 1200~1300℃로 하였다.

전산해석에 솔버는 유한체적법(F.V.M)을 각각 선택하였고, 마찰력은 0.1을 각각 주었다. press는 Hydraulic press로서 가압 속도를 1m/s로 일정한속도로 가압을 하도록 조건을 주었다. 각 조건에 대한 해석결과 값은 %로 구분하여 10%씩 나누어서 결과 값을 산출하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 Effective Plastic strain 해석

상용차 S/CAM 샤프트 부품은 가압단조 공정에서 상부 금형에 가압으로 인하여 성형이 이루어진다. 상용차 S/CAM 샤프트의 가압단조 공정에 변형률을 해석함으로써 공정변화에 따라 변형률이 증가함으로 성형이 이루어지는 변화를 볼 수 있으며, 가압 단조 공정 설계와 금형 설계에 있어 많은 도움을 준다.

Fig. 4.1~Fig. 4.12는 상용차 브레이크 드럼의 S/CAM 샤프트 부품을 Effective plastic strain에 대하여 해석한 결과이다. 성형 공정시간과 상부금형과 하부 금형이 받는 힘도 알 수 있었다. 변형률 해석을 통하여 성형을 이루어지면서 공정 구간마다 얼마나 변형이 작용하고 있는지를 분석하여 변형률이 stress에 얼마나 영향을 주는지 알 수 있다. 성형을 이룰 때에 strain을 분석함으로써 성형이 시작되고 마치는 동안에 금형으로부터 균일하게 작용하는지 여부를 판단 할 수 있고, effective plastic strain은 성형을 이루는 동안에 금형과 소재에 온도에 영향을 주는 요인으로 effective plastic strain를 분석할 필요가 있다.

Fig. 4.1에서 알 수 있듯이 공정이 20%가 지날 경우 상부금형에서는 S/CAM 샤프트 헤드 부분에서 스트레인이 헤드부에서 작용하는 것을 보이며 이 부분에서 최대 변형률인 $1.847E-001$ 이 작용하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4.2에서는 공정에서는 약30%가 마쳤을 때 변형률이 $2.424E+001$ 로 나왔으며, 캠부의 하단에 스트레인이 집중하는 현상을 관찰 할수 있었다.

Fig. 4.6에서와 같이 공정 60%에서는 변형률이 $6.371E+001$, 70%에서는 $8.689E+001$ 로 측정되어 최대의 유효소성 스트레인 값을 나타내었다. 이는 캠 형상이 완성되는 단계이며, 많은 스트로크 및 형상에 따른 접촉압력을 많이 받기 때문인 것으로 관찰 되었다.

Fig. 4.7에서와 같이 공정 80%에서는 변형률의 최대 값이 $1.221E+001$ 이고, 최소

값이 $7.895E-005$ 로 측정 되어 70%~80%사이에 형상이 거의 완료되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4.8에서와 같이 공정 90%에서는 변형률의 최대 값이 $1.522E+000$ 이고, 최소 값이 $2.810E-003$ 로 측정 되어 형상이 거의 완료됨을 관찰할수 있었으며, Fig. 4.9에서의 100%공정에서만만 최대값이 $3.619E+000$ 로 측정되고 최소값은 0으로 측정 되었다. 이는 가압단조 프로세스가 오픈 금형으로 소재에 잔여 때문에 접촉이 먼저 되는 소재에 상부부터 성형에 변형률 값이 높게 나오고 점차 다운 스트로크가 커질수록 상부에 성형이 먼저 끝나고 하부에 성형이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 변형률을 해석으로써 S/CAM 샤프트 부품의 가압단조에 따른 대표적인 변형을 가져오면서 성형이 이루어짐을 볼 수 있다.

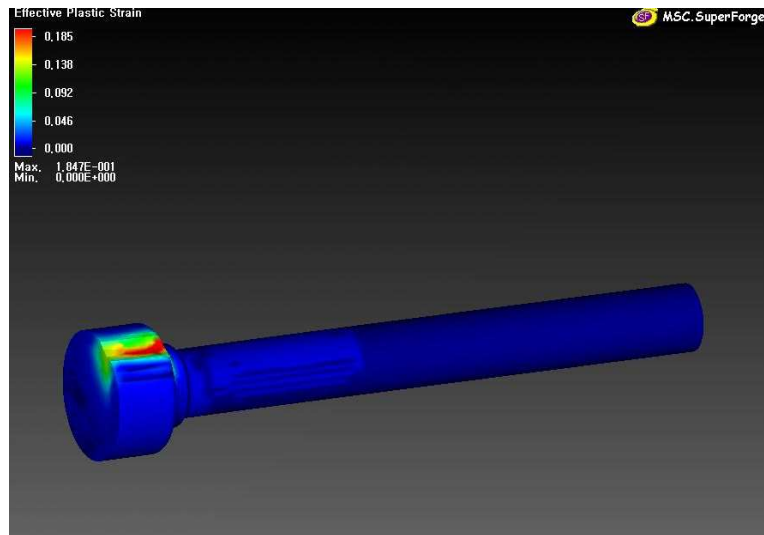


Fig. 4.1 Effective plastic strain of S/CAM shaft 20%

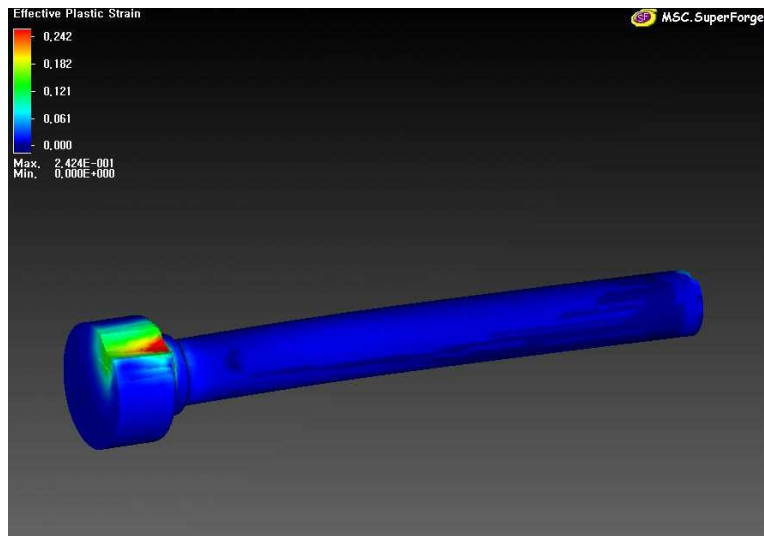


Fig. 4.2 Effective plastic strain of S/CAM shaft 30%

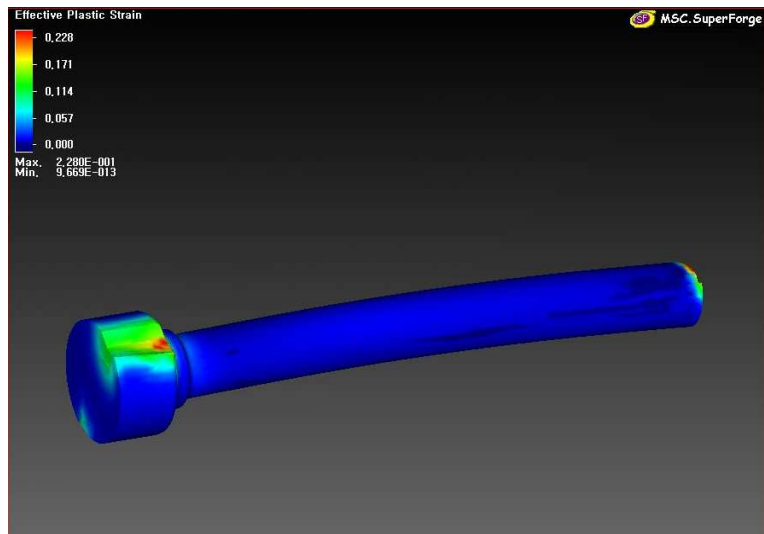


Fig. 4.3 Effective plastic strain of S/CAM shaft 40%

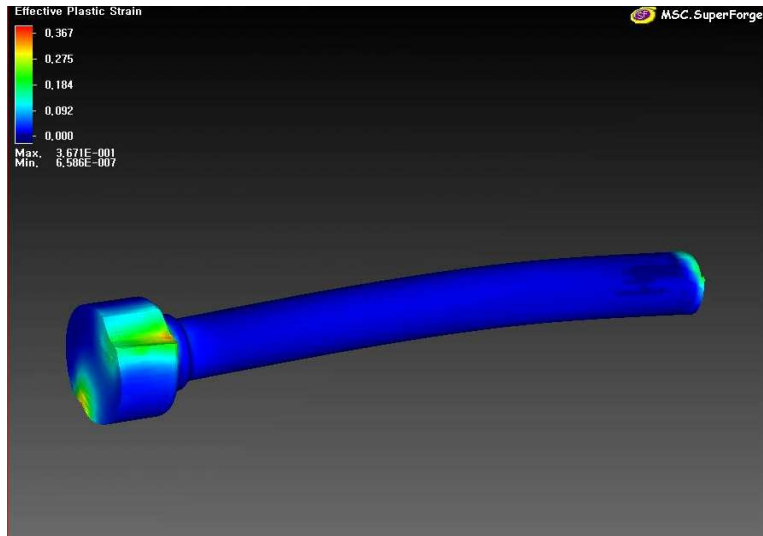


Fig. 4.4 Effective plastic strain of S/CAM shaft 50%

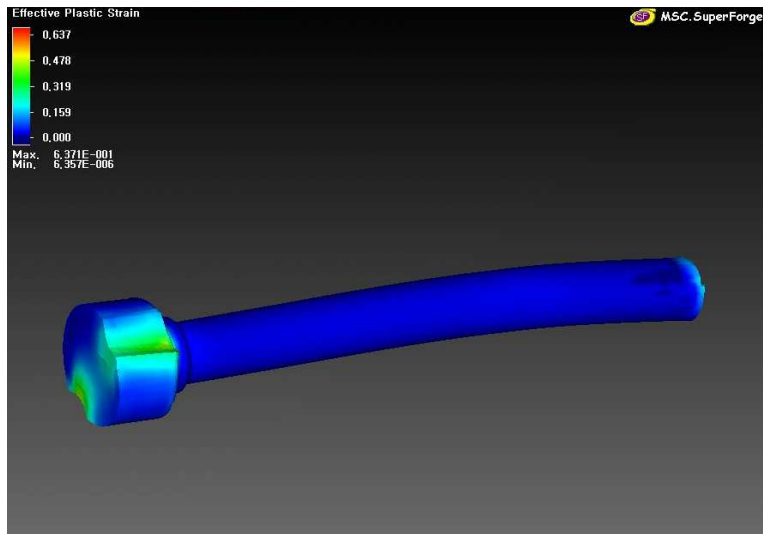


Fig. 4.5 Effective plastic strain of S/CAM shaft 60%

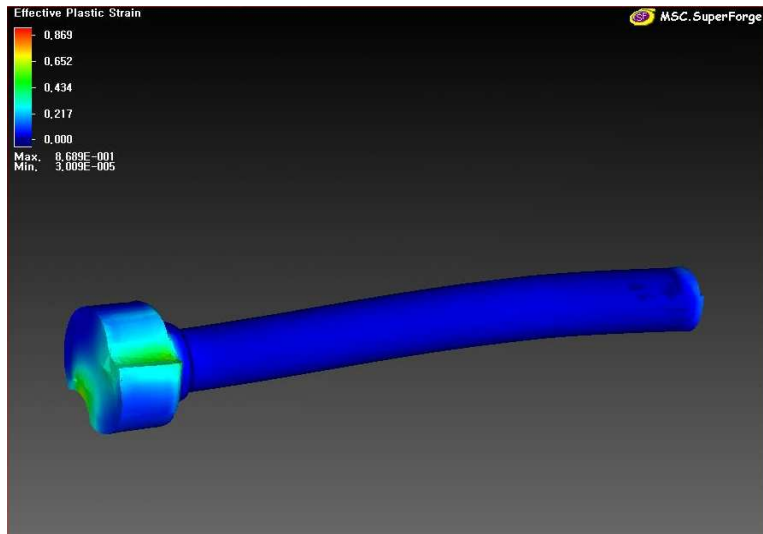


Fig. 4.6 Effective plastic strain of S/CAM shaft 70%

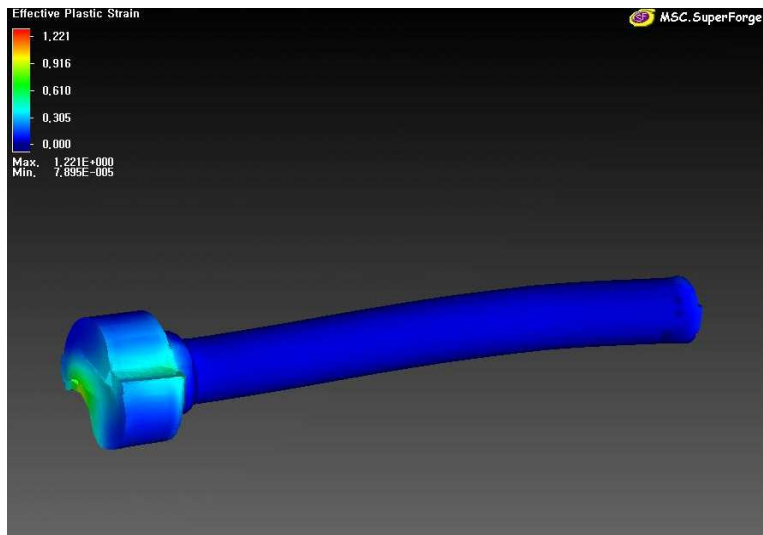


Fig. 4.7 Effective plastic strain of S/CAM shaft 80%

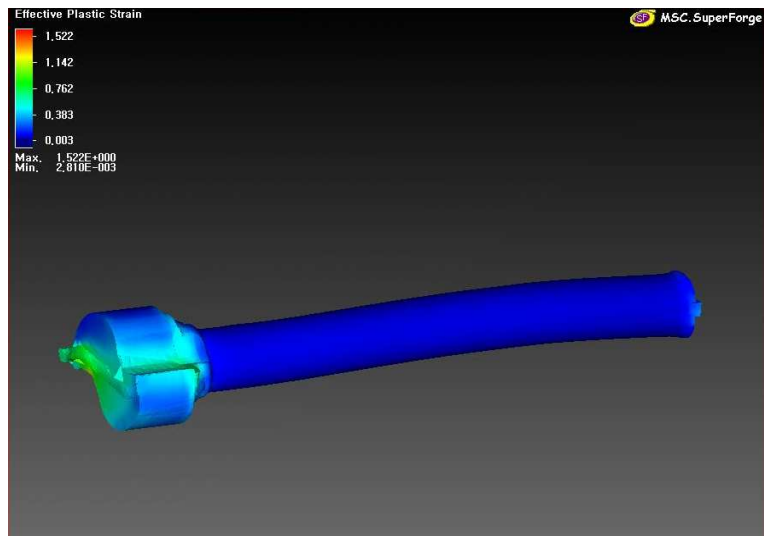


Fig. 4.8 Effective plastic strain of S/CAM shaft 90%

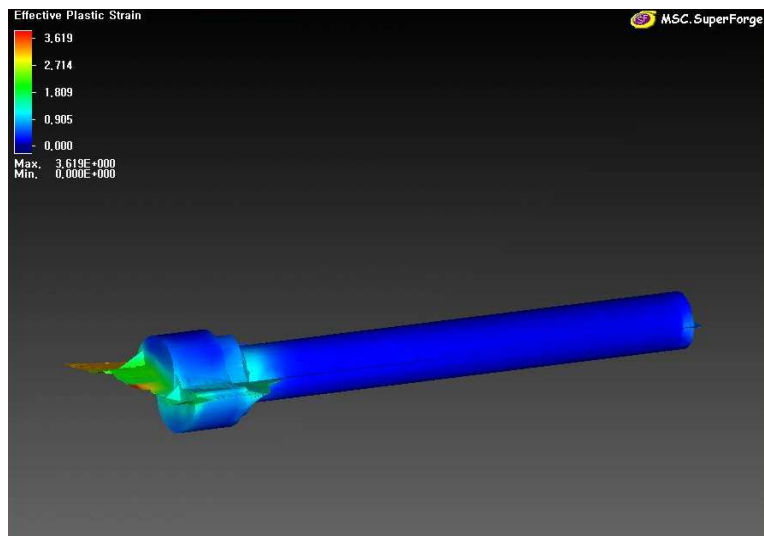


Fig. 4.9 Effective plastic strain of S/CAM shaft 100%

4.2 S/CAM 샤프트 온도의 영향거동 해석

성형 공정 중에 겉 표면 온도 및 내부온도에 대한 분석을 위하여 온도의 영향거동에 대하여 분석하여야 한다. 열간단조 공정에서는 온도 해석이 매우 중요하며, 내부 온도의 변화로 인하여 잔류응력의한 수축과 결정 조직 형성에 많은 영향을 주기 때문이다.

Fig. 4.10~Fig. 4.19는 S/CAM 샤프트 단조금형 시 내부온도의 변화를 전산 해석하여 분석한 결과이다. Fig. 4.10은 공정이 10%가 이루어진 초기에 S/CAM 샤프트 겉 표면의 온도이다. 금형과 처음으로 접촉하는 부분은 대략 27°C가 내려가는 것을 볼 수 있다. 이것은 금형의 온도 및 외부의 온도가 낮기 때문에 공정의 진행과정에서 급격하게 내려가기 때문인 것을 알 수 있다. 하지만 내부 온도는 변화가 없는 것으로 나타났으며, 공정이 20%가 진행되었 때는 내부온도와 외부 온도가 13°C정도 차이가 나는 것으로 측정 되었다. 또한 10%공정에서보다 최대 온도가 13°C올가간 것은 금형의 압축으로 인한 금형 구간이 폐구간으로 되어 온도가 밖으로 빠져나가지 못함으로 상승되는 것으로 역으로 해석할 수 있다. Fig. 4.12는 공정에 30%가 끝나 성형이 이루어지는 온도변화를 보여 주는 것이다. 온도가 910°C로 측정 되었으며, 20%공정에서 913°C보다 3°C 상승 되었음을 알 수 있다.

Fig. 4.13~Fig. 4.14에서는 공정에 40%~50%에서는 헤드부 형상이 어느정도 만들어 지고 있는 형상을 볼수 있는데 온도에는 큰 변화가 없으며 최대온도가 926°C정도로 관찰 되었다. 이 온도 변화가 급격히 내려가거나 올라가는 것이 아니라 약 827°C~927°C를 유지 하면서 성형이 이루어짐을 볼 수 있고, 내부 온도 변화도 가압으로 인하여 급격히 올라가거나 내려가는 현상은 보이지 않았다. Fig. 4.15~Fig. 4.17은 공정에 60%부터 80%까지에 온도변화를 보여주는 것이다. 60% 구간에서 소재의 온도가 950°C로 관찰되었으며, 80%에서는 997°C까지 상승 되었다.

Fig. 4.18은 공정이 끝날 때까지에 온도 변화를 보여 주는 것이다. 90%에 공정이 이루어지면서는 아직 잔여분에 성형이 이루어지는 곳에서는 약 1023°C를 유지 하는 것을 보였고, 100%공정이 끝났을 때는 소재의 온도가 1309°C로 안정화를 찾아가는 것을 볼 수 있다. 이것은 가열 온도와 가압으로 인한 마찰열에 의하여 순간적으로 초기에 부여한 온도 이상으로 상승하였다.

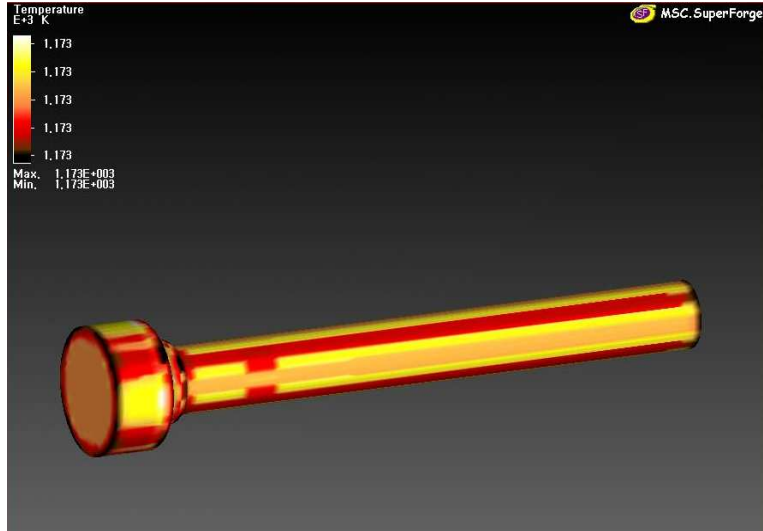


Fig. 4.10 Temperature of S/CAM shaft 10%

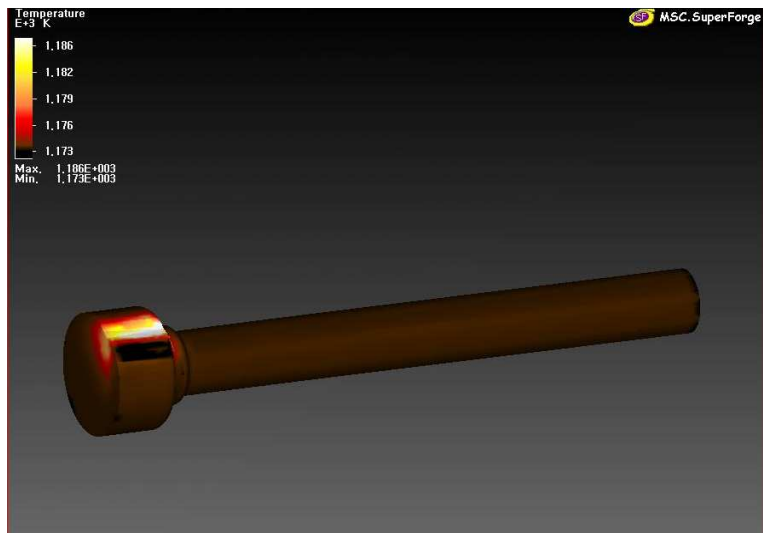


Fig. 4.11 Temperature of S/CAM shaft 20%

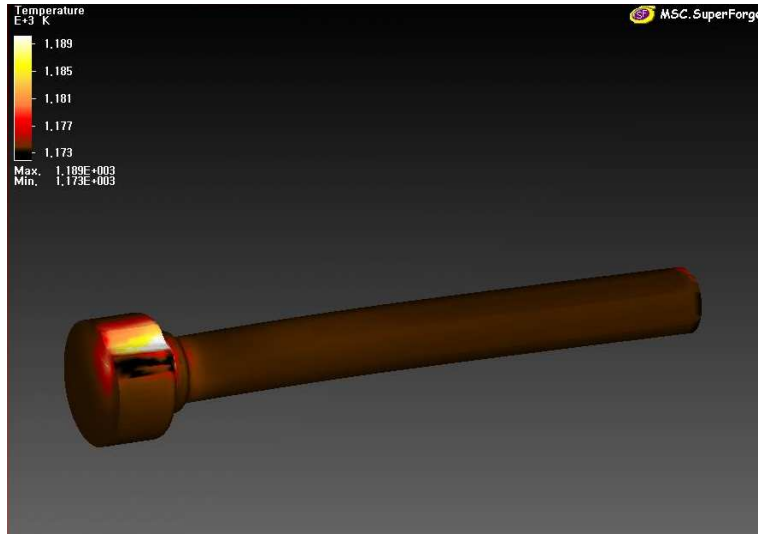


Fig. 4.12 Temperature of S/CAM shaft 30%

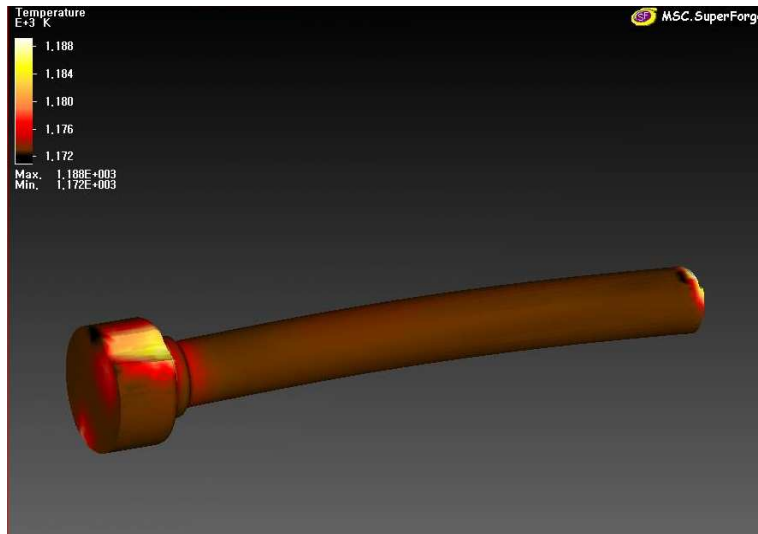


Fig. 4.13 Temperature of S/CAM shaft 40%

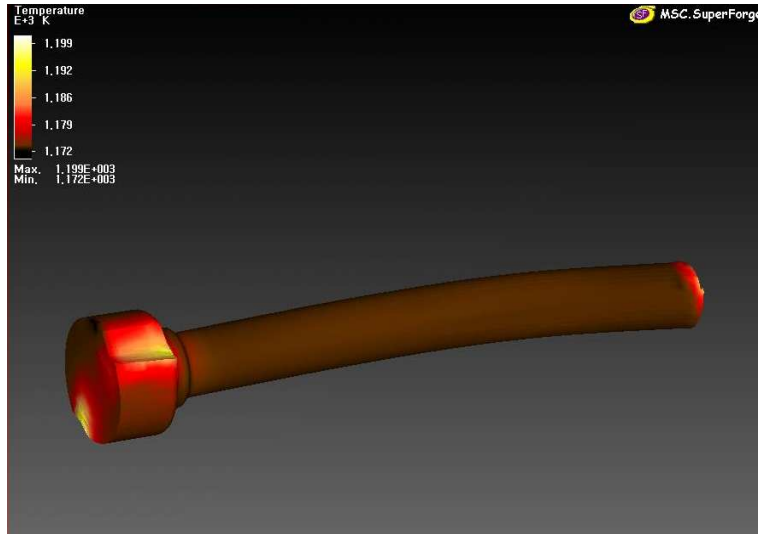


Fig. 4.14 Temperature of S/CAM shaft 50%

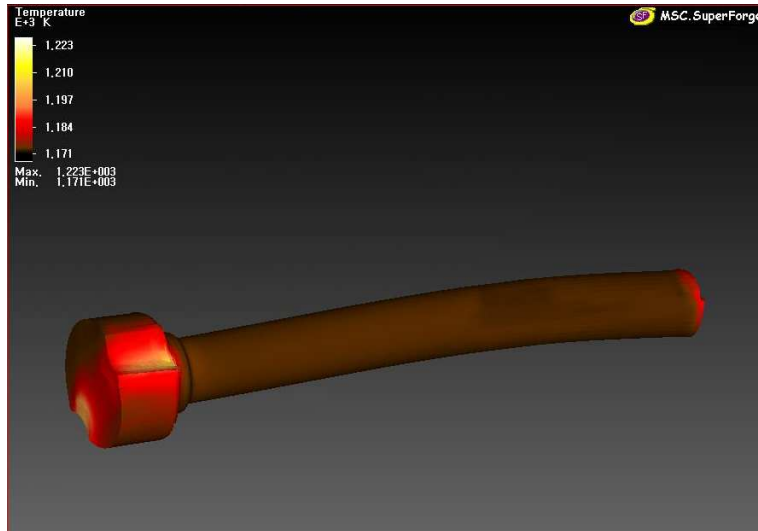


Fig. 4.15 Temperature of S/CAM shaft 60%

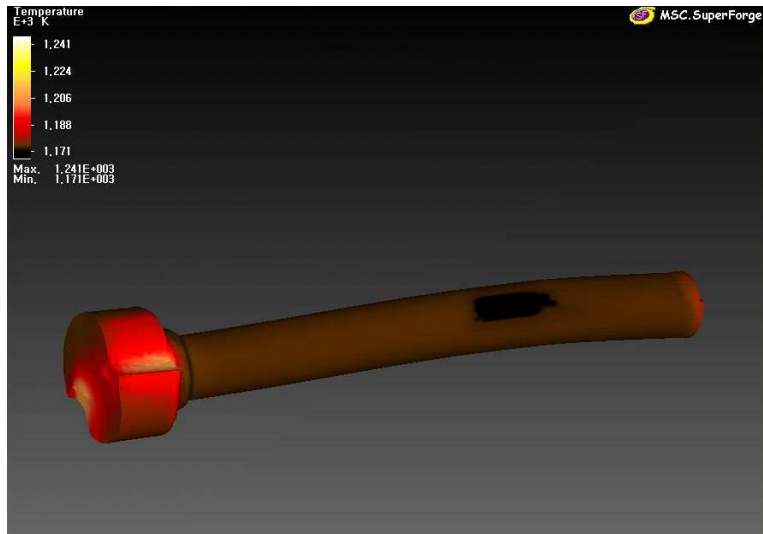


Fig. 4.16 Temperature of S/CAM shaft 70%

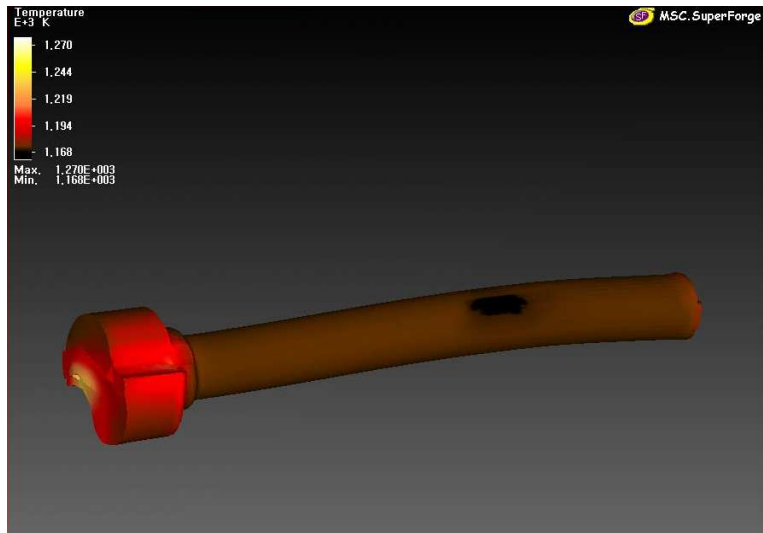


Fig. 4.17 Temperature of S/CAM shaft 80%

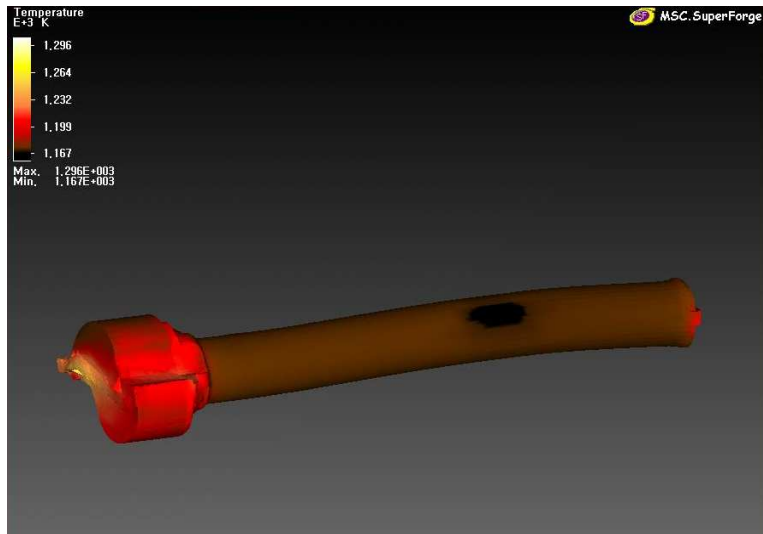


Fig. 4.18 Temperature of S/CAM shaft 90%

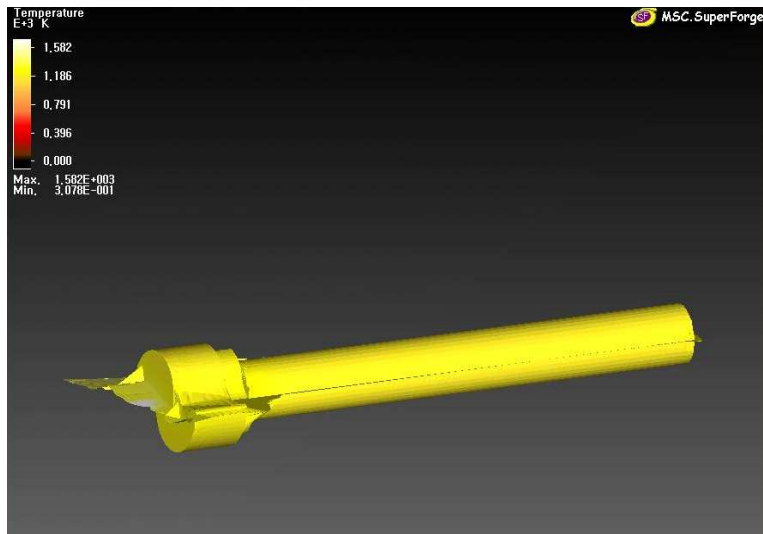


Fig. 4.19 Temperature of S/CAM shaft 100%

4.3 재료거동 해석

Fig. 4. 20~Fig. 4. 29는 열간단조에 따른 재료의 유동거동을 해석한 것으로 형상변화 관찰 및 불량 제품을 수정하기 위한 금형수정과정에서 유용하게 쓰이는 해석부분이다.

그림에서와 같이 공정 10%~50%에서 재료의 유동거동이 가장 활발히 이루어짐을 알 수 있으며, 60% 공정에서 빠르게 유동거동이 둔화되는 현상을 관찰할 수 있었다. 그림에서와 같이 헤드부 및 축부가 어느정도 형상이 형성되었음을 알 수 있다.

Fig. 4.24의 그림에서와 같이 공정 50%에서 물질 유동이 최대 9.299E-001, 최소 7.053E-002로 측정 되었으며, Fig. 4. 25의 공정 60%에서 물질 유동이 최대 1.009E-000, 최소 5.469E-002로 측정 되어 급격히 감소함을 알 수 있었다. 이것은 소재의 형상이 어느 정도 잡혀져가는 과정과 완성되어져가는 단계임을 알 수 있다.

Fig. 4.28~Fig. 4.29는 공정 90%~100% 되어지는 공정이며 이때 재료유동거동이 증가되는 현상을 관찰할 수 있는데 이것은 단조가 완성되어지는 과정에 피팅으로 인한 결과로 해석되며 결국 제품의 품질에는 영향을 주지 않으며, 최종 공정단계에서 트림금형에 의해서 제거되어지게 된다.

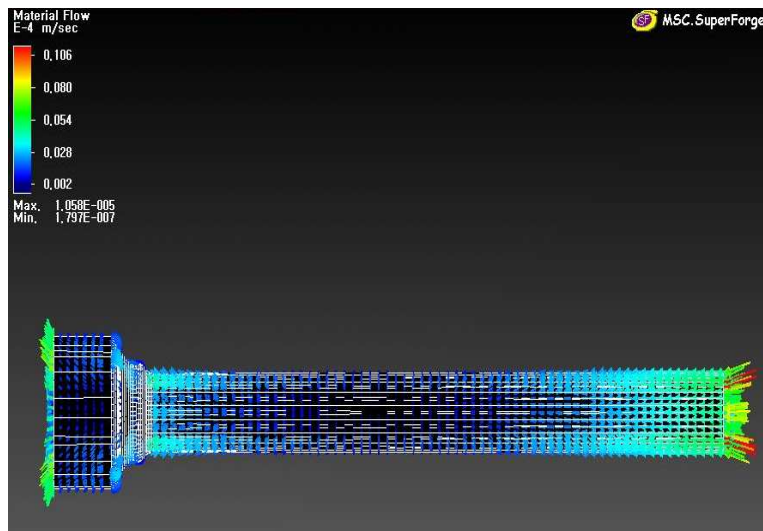


Fig. 4.20 Material flow of S/CAM shaft 10%

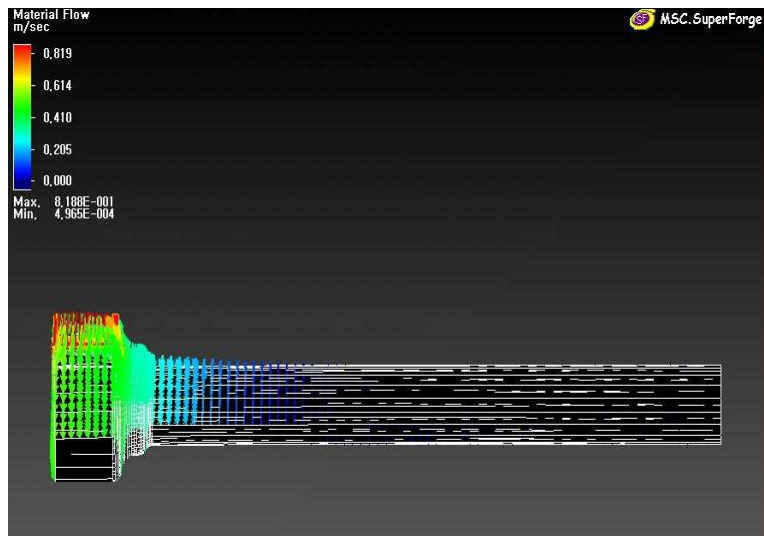


Fig. 4.21 Material flow of S/CAM shaft 20%

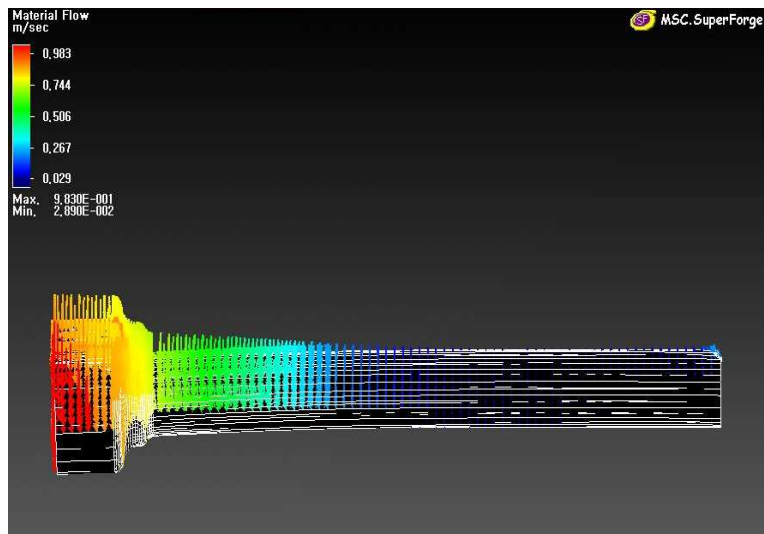


Fig. 4.22 Material flow of S/CAM shaft 30%

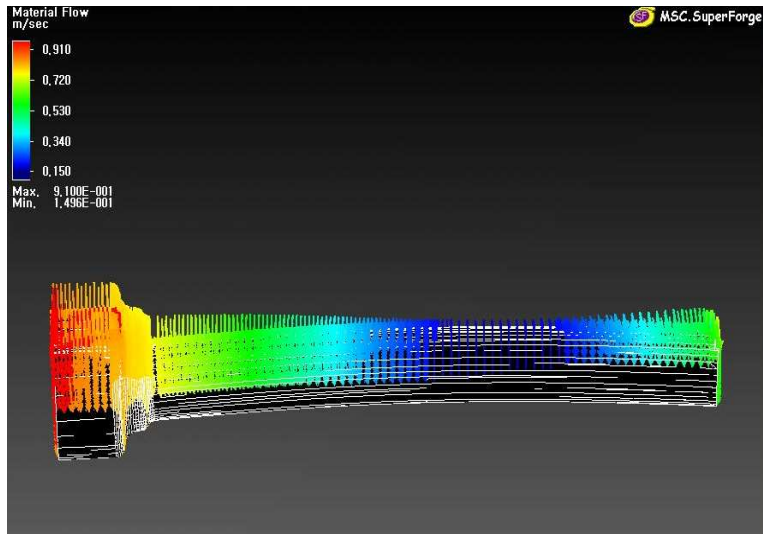


Fig. 4.23 Material flow of S/CAM shaft 40%

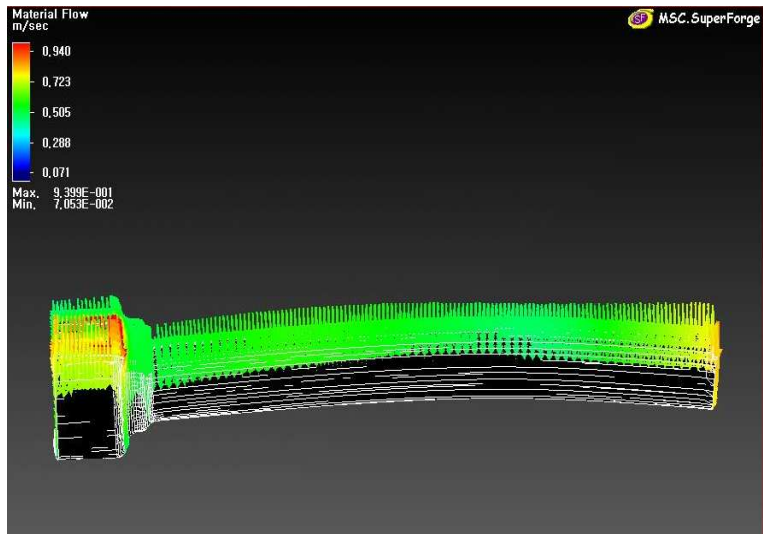


Fig. 4.24 Material flow of S/CAM shaft 50%

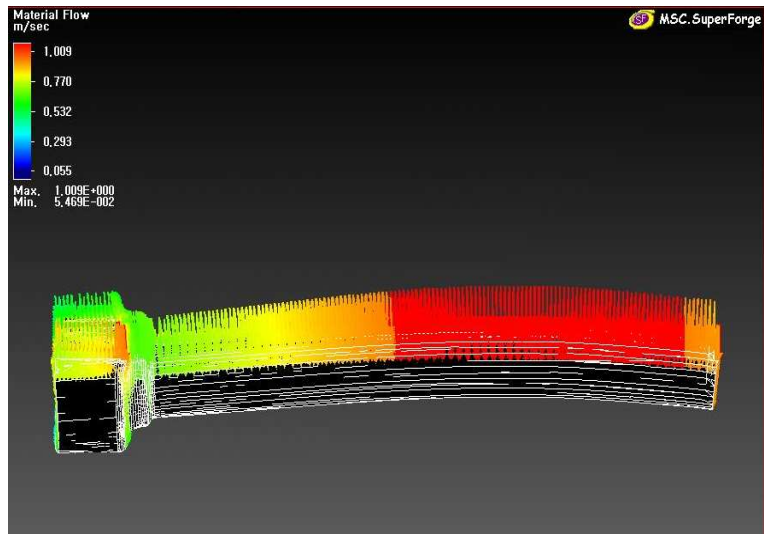


Fig. 4.25 Material flow of S/CAM shaft 60%

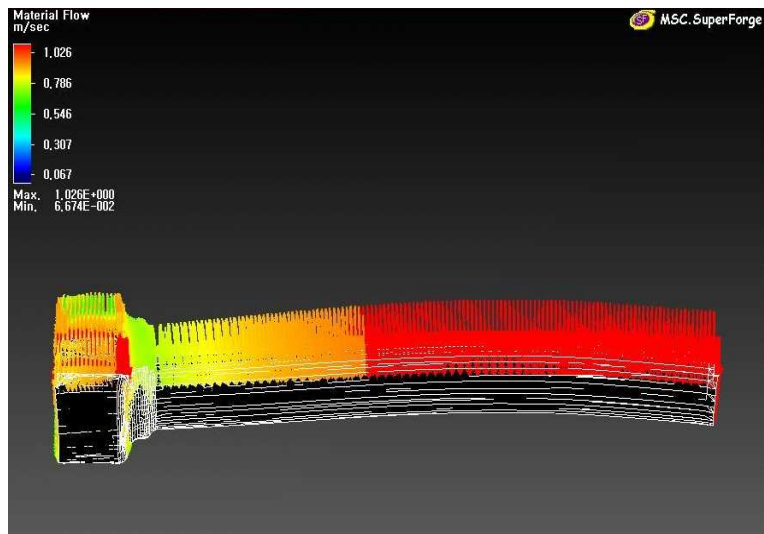


Fig. 4.26 Material flow of S/CAM shaft 70%

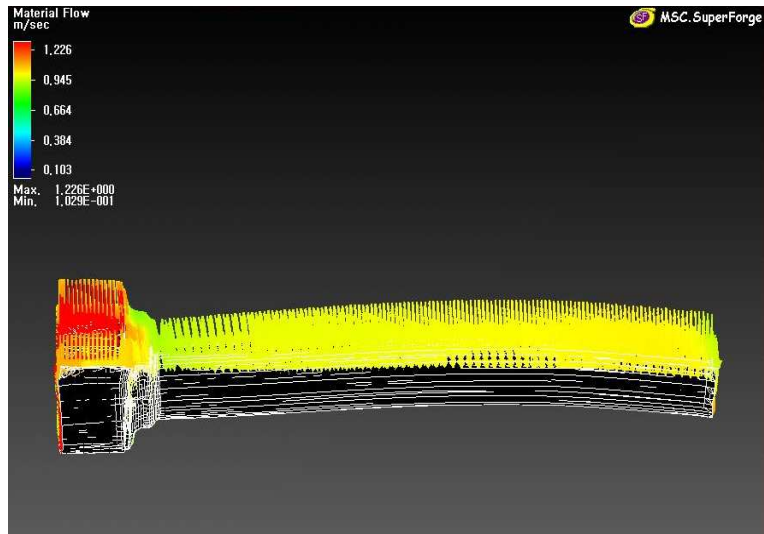


Fig. 4.27 Material flow of S/CAM shaft 80%

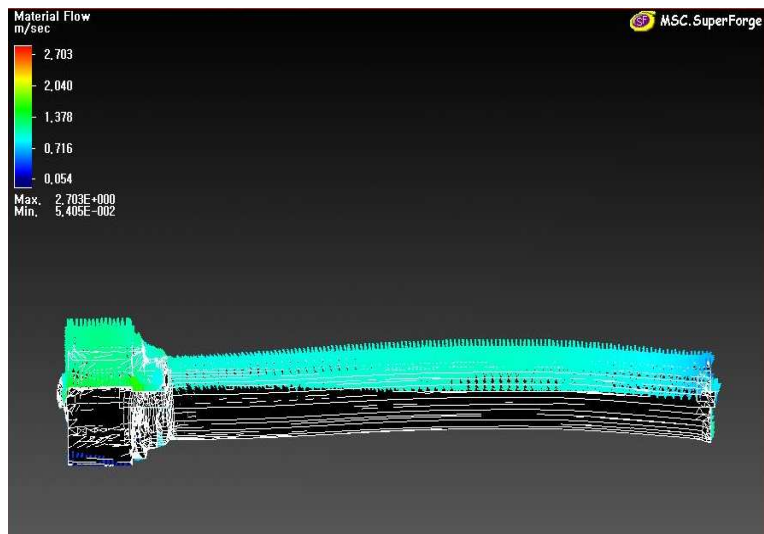


Fig. 4.28 Material flow of S/CAM shaft 90%

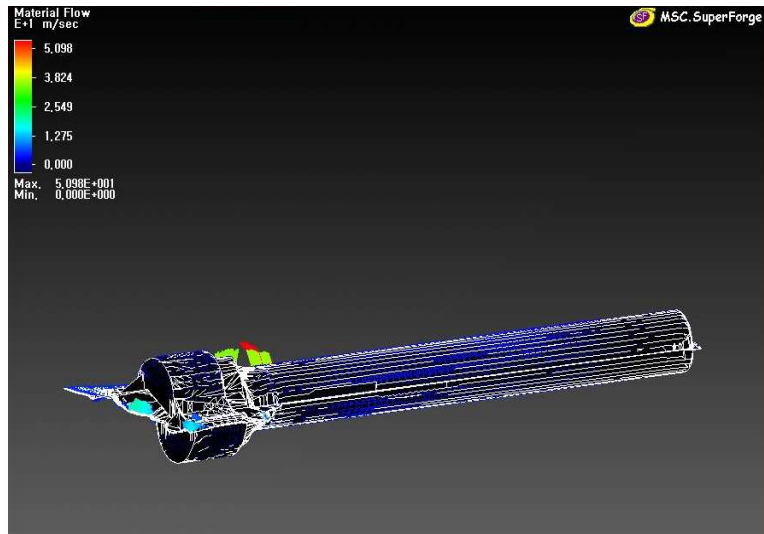


Fig. 4.29 Material flow of S/CAM shaft 100%

4.4 유효 응력 해석

Fig. 4. 30~Fig. 4. 39는 열간단조에 따른 응력상태를 해석한 것으로 형상변화 따른 응력의 집중도를 관찰하여 불량 발생 가능성이 있는 부위를 관찰할 수 있었으며, 응력의 집중도를 피하고 내부 잔류응력을 최소화 하는데 유용하게 사용할 수 있었다.

그림에서와 같이 S/CAM 샤프트 특성상 헤드부에서 헤드부 형상에 많은 응력이 집중되어 캠 모양으로 형성되어지므로 불량이 발생할 수 있는 요소가 다분히 발생할 수 있다. 공정 10%~50%에서 재료의 유동거동이 가장 활발히 이루어짐을 알 수 있으며, 60% 공정에서 빠르게 유동거동이 둔화되는 현상을 관찰할 수 있었다. 그림에서와 같이 헤드부 및 축부가 어느 정도 형상이 형성되었음을 알 수 있었다.

Fig. 4.30~Fig. 4.37의 그림에서와 같이 공정 10%~80%까지 응력이 계속해서 상승하는 것을 관찰할 수 있었으며, 최대 $3.592E+008$, 최소 $3.844E+006$ 로 측정 되었으며, Fig. 4. 38의 공정 90%에서 최대 $3.586E+008$, 최소 $5.110E+007$ 로 다소 낮게 측정되었음을 관찰할 수 있었다.

Fig. 4.39는 공정률 100%이며 이때 최대 $4.972E+008$ 로 측정 되었으며, 최소치는 0으로 측정 되었다.

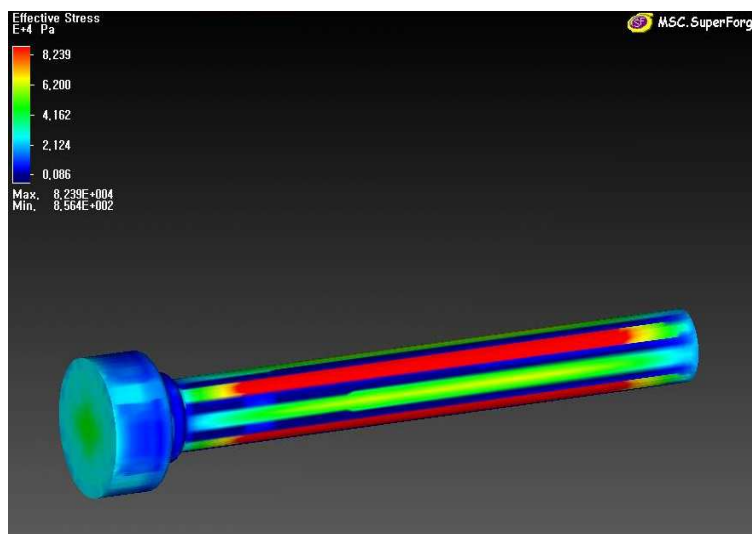


Fig. 4.30 Effective stress of S/CAM shaft 10%

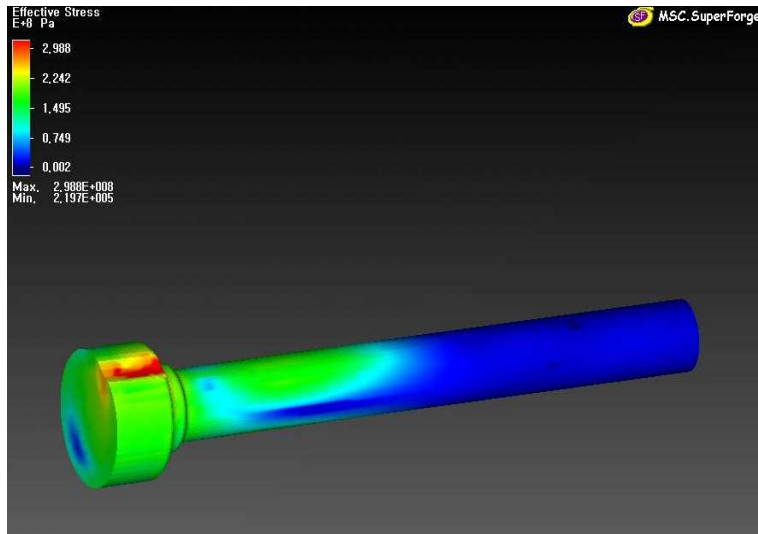


Fig. 4.31 Effective stress of S/CAM shaft 20%

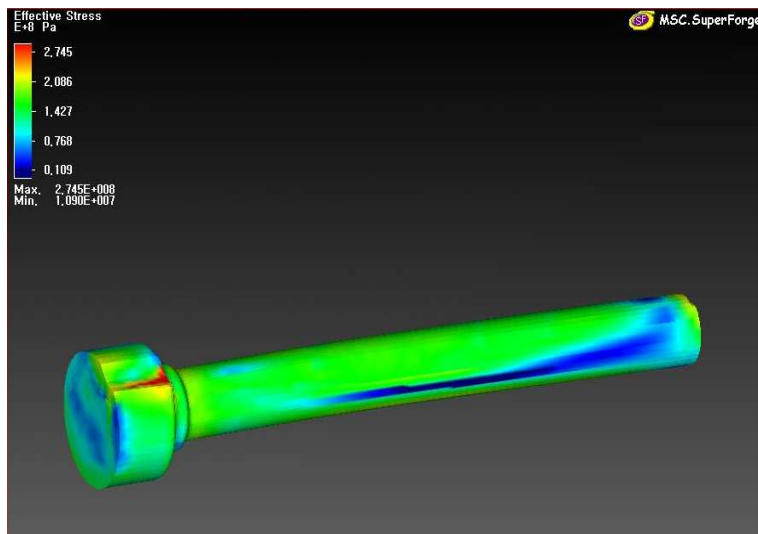


Fig. 4.32 Effective stress of S/CAM shaft 30%

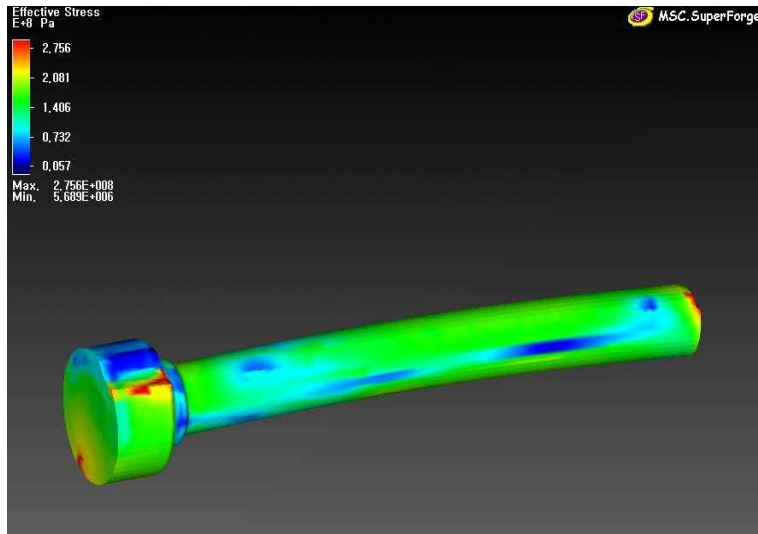


Fig. 4.33 Effective stress of S/CAM shaft 40%

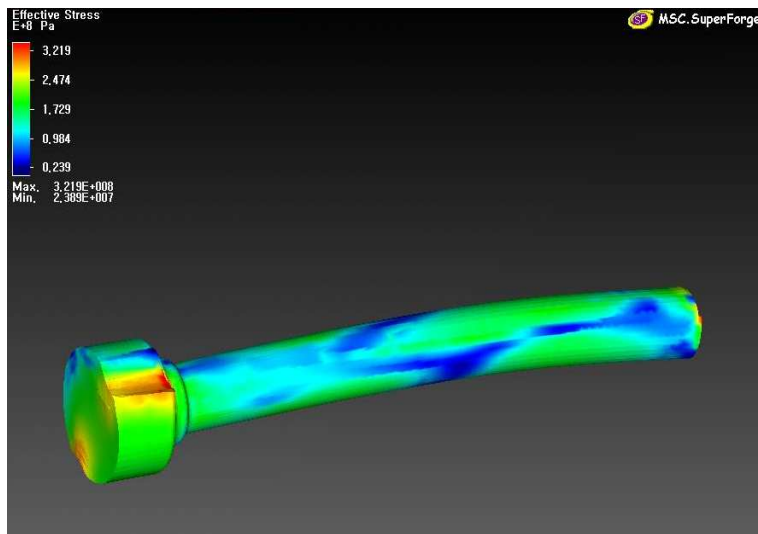


Fig. 4.34 Effective stress of S/CAM shaft 50%

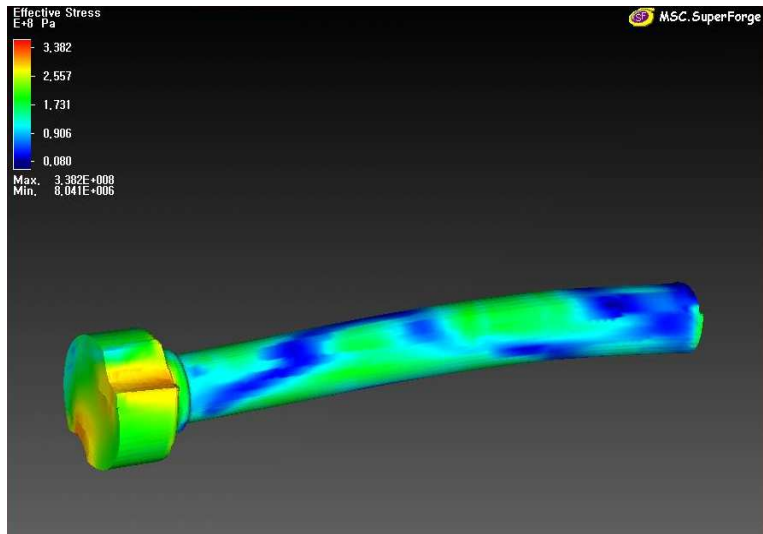


Fig. 4.35 Effective stress of S/CAM shaft 60%

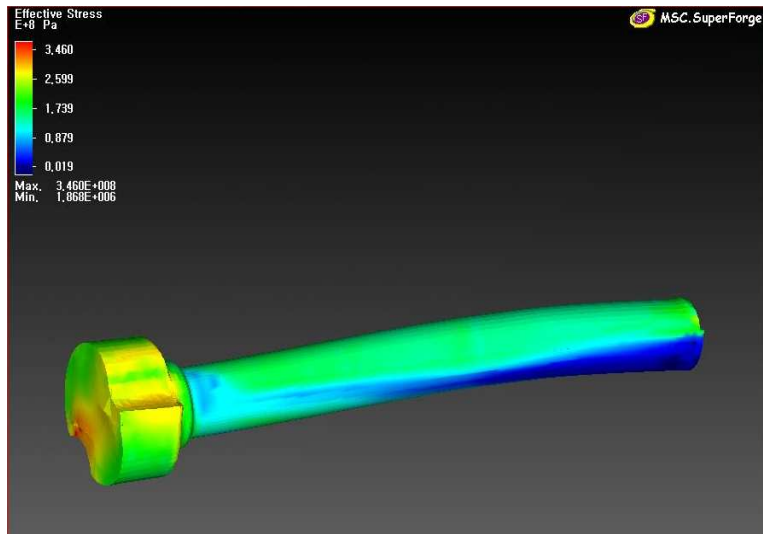


Fig. 4.36 Effective stress of S/CAM shaft 70%

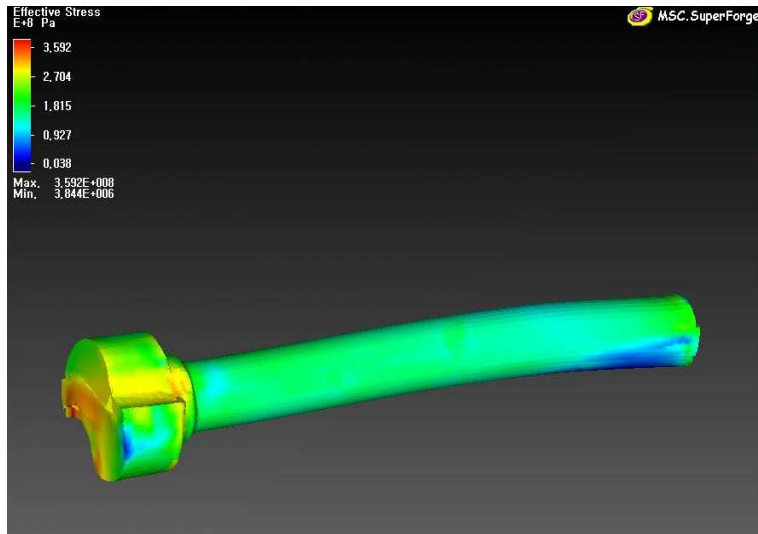


Fig. 4.37 Effective stress of S/CAM shaft 80%

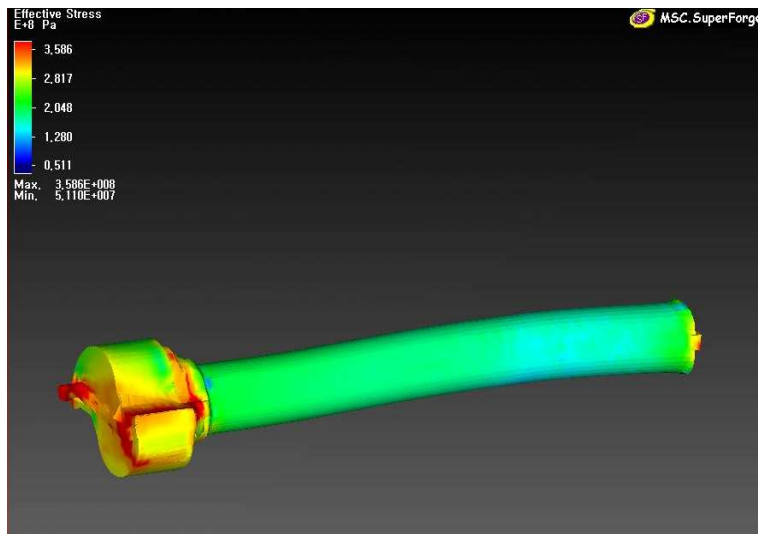


Fig. 4.38 Effective stress of S/CAM shaft 90%

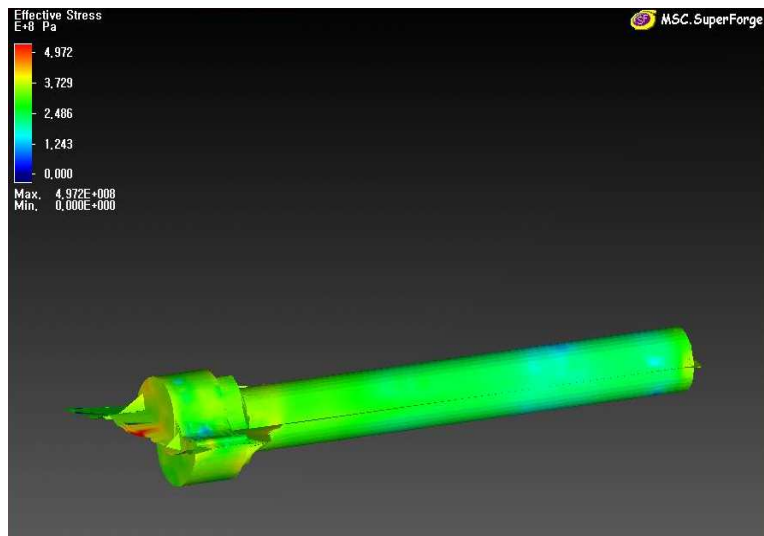


Fig. 4.39 Effective stress of S/CAM shaft 100%

4.5 표면경도 결과 분석

열간단조 방식으로 제작한 S/CAM 샤프트를 헤드부 및 축부로 나누어 브리넬 경도계를 이용하여 경도 실험을 실시하였다. S/CAM 샤프트는 선삭가공 및 세레이션 작업 후 표면열처리를 통하여 최종 제품이 된다. 따라서 본 연구에서는 열간단조 한 후 경도시험을 행한 것은 무의미함으로 최종단계인 표면열처리 후 경도시험을 행한 후에 실험을 실시하여 SM45C 소재의 일반 표준 경도가 도달하면 Q·C에 합격하는 것으로 하여 실험을 실시하였다. 그 결과 수회에 걸쳐 경도시험을 실시하였으나 제품이 표준강도에 미달하는 경우는 발생하지 않았다.

Table. 4.1는 브리넬 경도 실험한 결과이며, Fig. 4. 40은 그 결과를 그래프로 도시화 한 것이며, 6군대 정도를 선택하여 각각 10회씩 60회를 측정하였다. 그림에서와 같이 측정값이 210정도의 일정한 경도값으로 측정되어 제품의 품질기준에 도달하였음을 알 수 있었다.

Table.4.1 Brinell hardness test of S/CAM shaft

No.	test number										average
1	207	203	212	226	200	223	207	212	198	203	209.10
2	200	229	198	219	187	224	229	207	200	221	211.40
3	187	200	212	218	226	212	203	200	187	212	205.70
4	229	207	180	207	224	180	200	229	212	226	209.40
5	200	221	218	212	200	223	180	219	224	223	212.00
6	229	221	203	180	226	224	200	221	198	200	210.20
Total											209.63

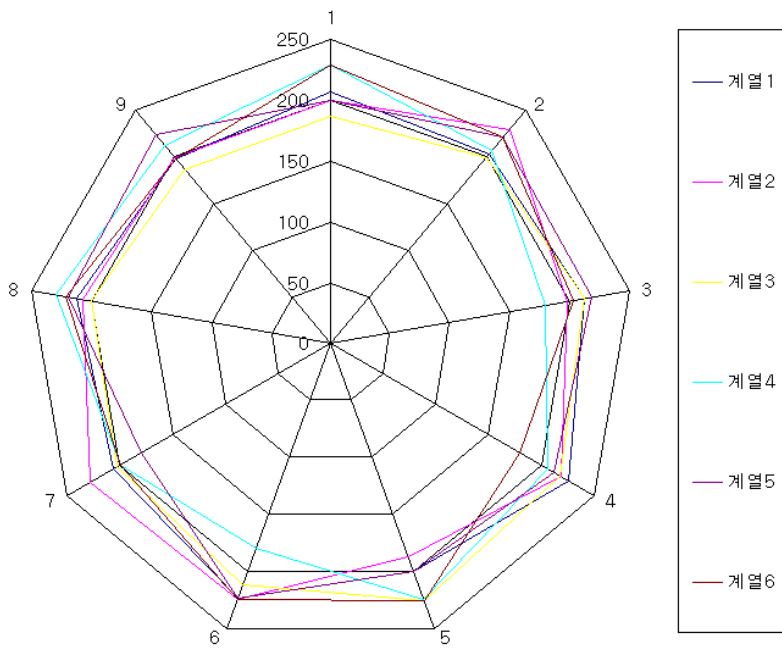


Fig. 4.40 Brinell hardness test

제 5장 결 론

본 연구에서는 상용차 브레이크 드럼 시스템의 S/CAM 샤프트 캠부 전용 개발을 위하여 생산공정을 개선하고 단조 금형에 따른 전산응용 프로그램을 이용하여 성형 해석을 하고자 하였으며, 실험과정을 통하여 최적의 금형조건을 설정하고자 하였다. 또한, 생산현장의 현황, 생산방식의 개선 및 제품 품질 향상을 위한 관련 연구를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전산응용 프로그램인 superforge2007을 이용하여 가압단조로 생산되는 S/CAM 샤프트를 이용하여 변형률, 응력, 온도변화 및 소재 유동거동 해석을 실시하였으며, 해석 결과 하부 금형 보다 상부 금형에서 금형과에 접촉이 먼저 일어나고 공정에 80%가 진행되었을 때에는 성형에 필요한 금형과에 일치하는 상부와 하부 모두 일치 가 일어나며 나머지 공정은 성형을 이루는 데 필요한 공정으로 분석되었다.
2. superforge2007을 이용하여 S/CAM 샤프트 단조금형시 스트레인 해석결과 상부 금형에 가압에 의하여 소재에서 일어나는 변형률이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 공정에 50%가 진행 되었을 때에는 소재가 금형과 1차적으로 접촉하는 부위에 변형률이 크게 나타남을 알 수 있었고, 단조 과정에서 금형과 소재가 100%접촉이 일어났을 때 변형률은 중심부 뿐 만 아니라 소재에 전체적으로 높은 변형률이 나타남을 알 수 있었다.
3. 축샤프트 길이가 다양한 특징을 가지고 있는 S/CAM 샤프트를 단일 금형으로 생산할 수 있도록 금형 개선을 통하여 하나의 금형으로 여러종류의 S/CAM를 제작이 가능하였으며, SM45C 소재를 1100℃~1300℃ 가열한 후 열간단조 방식을 이용하여 성형제품의 무절삭화 기술방식을 적용하였다.
4. 새로운 금형 방식을 채택하여 기존의 생산방식에서 단조후 회수율이 62-68%정도 인

것을 95%이상 회수율 상승효과가 있었으며, S/CAM 샤프트 생산공정이 기존에는 4차공정 까지 이루어져 작업자들의 작업시간 길고, 생산공정이 많아 생산량이 적었으나 개발된 금형방식에 따라 이러한 단점을 보완 할 수 있었으며, 저가정책으로 잠식하는 현재의 상황을 기술개발을 통하여 대처할 수 있었으며, 그 결과 생산에 따른 비용절감 효과를 가져왔다.

5. 본 연구 개발로 생산원가가 25%이상 절감할 수 있었으며, 불량률도 30%이상 낮출 수 있었다. 또한 금형의 수명을 현재 1만 5천 횟수에서 2만 5천 횟수로 향상시켜 금형제작에 따른 기업이 부담하는 어려움을 해결 할 수 있었다.

REFERENCES

1. Jing Tao, Anzai Koichi, Niyama Eisuke, " Die life prediction in the die casting cycle simulation", Proceedings of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes, p.312, 1996.
2. E. S. Kim, K. H. Lee, Y. H. Moon, "A feasibility study of the partial squeeze and vacuum die casting process", Journal of Materials Processing.
3. A.J.DAY, "A finite element approach to drum brake analysis, 1999.
4. S.Y.Kim, M. Phill, "Drum brake noise and vibration analysis", 1993.
5. N. Rebelo, H. Rydstad and G. Schroder, "Simulation of material flow in closed-die forging by model techniques and rigid-plastic FEM, in numerical method in industrial forming process", Pineridge press, Swansea. U.K. p.237~249, 1980.
6. S. I. Oh, N. Rebelo and S. Kobayashi, Proc. IUTAM Symp. Metal Forming Plasticity, Springer, Berlin, p.273~291, 1979.
7. B. S. Sung and I. S. Kim "The molding analysis of automobile parts using the die-casting system", Journal of Materials Processing Technology, p.635~639, 2008.
8. C. H. Lee and S. Kobayashi, "New solution to rigid-plastic deformation problems using a matrix method", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 95, p.865, 1973.
9. D. H. Lee and C. G. Kang, "The die design for semi-solid forging process of computer simulation and experimental investigation of filling phenomenon", Transactions of Materials Processing, Vol. 10, No. 5, p.373~381, 2001.
10. S. H. Lim, "A study on prediction of microstructural evolution of hot forging steel by finite element analysis", 2002

11. K. R. Brown, M. S. Venie, R. A. Woods, "The Increasing Use of Aluminum in Automotive Applications", JOM, Vol. 47, Issue 7, pp. 20-23, July 1995.
12. S. Okaniwa, "アルミニウム押出しのメタソルフロー", 軽金属, Vol. 36, No. 8, pp.507-513, 1986.
13. S. Okaniwa, "アルミニウム押出し", 軽金属, Vol. 40, No. 1, pp.64-73, 1990
14. S. Okaniwa, "アルミニウム押出し", 軽金属, Vol. 45, No. 8, pp.471-489, 1995.
15. O. Lohne, N. Ryum, "Simulation of Hot Tearing of Aluminum Alloys", Proceedings of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 2, pp.303-308, 1988.
16. A. K. Das, "Special Features of Process Defects in Aluminum Alloy Extrusions", Preceding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 2, pp.227-233, 1988.
17. T. Sheppard, M. P. Clode, "The Origin of Surface Defects During Extrusion of AA6063 Alloy", Preceding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 2, pp.329-341, 1988.
18. J. Zasadzinski, W. misiol다, "Estimating Optimal Speed/Temperature Parameters to Maximize Hot Extrusion Exit Speed", Preceding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 2, pp.241-246, 1988.
19. M. P. Clode, T. Sheppard, "Extrusion Limit Diagrams Containing Structural and Topological Information for AA6063 Aluminum Alloy", Material science and technology, Vol. 9, pp.313-318, April 1933.
20. A. Jackson, T. Sheppard, "Observations on Production and Limit Diagrams for the Extrusion Process", Preceding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar, Vol. 2, pp.209-216, 1988.
21. A. Jackson, T. Sheppard, "Extrusion Limit Diagrams: Effect of

- Homogenising Conditions and Extension to Productivity Analysis", *Materials science and technology*, Vol. 13, pp.61-68, January 1997.
22. O. Reiso, "The Effect of Billet Preheating Practice on Extrudability of AlMgSi Alloys", *Proceeding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar*, Vol. 1, pp.287-295, 1988.
 23. R. J. Dashwood, H. B. McShane, A. Jackson, "Computer Prediction of Extrusion Limit Diagrams", *Proceeding of the fourth Int'l aluminum extrusion technology seminar*, Vol. 1, pp.287-295, 1988.
 24. Y. Yamamoto, Y. Iwata and M. Nakamura; Imono. Vol.60 1988, p.770-776.
 25. N. S. Kim, C. G. Kang, " An investigation of flow characteristics considering the effect of viscosity variation in the thixoforming process", *Journal of material processing technology* Vol.103, 2000, p.237.
 26. 福永秀春, 粉離型劑の初期潤滑性について, *Japan Die Casting Association*, JD92- 04, 1992, p.28.
 27. C. Mitterer , F. Holler , F. Ü stel, D. Heim, "Application of hard coatings in aluminium die casting - soldering, erosion and thermal fatigue behaviour ", *surface and Coatings T echnology* Vol.125, 2000, p.233.
 28. G. Bar-Meir, E. R. G. Eckert, R. J. Goldstein, "Pressure Die Casting: A Model of Vacuum Pumping", *Journal of Manufacturing Science & Engineering - Transactions of the ASME* , Vol.118, 1996, p.259.
 29. L.H. Kallien, P.Bellity, F. Odor and J.C.Sturm : AFS casting congress 1992.
 30. P.N.Hansen, E. Flender and J. C. Sturm : int. Conf. On Best practice in foundries 11.1993.
 31. B.H.Hu, K.K. Tong, X.P. Niu, I. Pinwill, i *Journal of Materials Processing Technology* 2000 Vol. 105 p128-133.

32. Kelly, J. E., Michalek, K. P., O'Connor, T. G., Thomas, B. G. and Dantzig, J. A., 1988, "Initial Development of Thermal and Stress Fields in Continuously Cast Steel Billets," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 19A, pp. 2589~2602.
33. Song, R., Dhatt, G. and Cheikh, A. Ben, 1990, "Thermo-Mechanical Finite Element Model of Casting Systems," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 579~599.
34. Aboutalebi, M. Reza, Hasan, M. and Guthrie, R. I. L., 1995, "Coupled Turbulent Flow, Heat, and Solute Transport in Continuous Casting Processes," *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 28B, pp. 731~744.
35. Yimer, B. and Senthil, K., 1998, "Experimental and Analytical Phase Change Heat Transfer," *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, No. 9, pp. 889~897.
36. Thomas, B. G., Samarasekera, I. V. and Brimacombe, J. K., 1984, "Comparison of Numerical Modeling Techniques for Complex, Two-Dimensional, Transient Heat-Conduction Problem," *Metallurgical Transaction B*, Vol. 15B, pp. 307~318.
37. Tacke, K. H., 1985, "Discretization of the Explicit Enthalpy Method for Planar Phase Change," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21, pp. 543~554.
38. Storti, M., Crivelli, L. A. and Idelsohn, S. R., 1987, "Making Curved Interfaces Straight in Phase-Change Problems," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, pp. 375~392.
39. Gupta, R. S. and Kumar, A., 1988, "Isothermal Migration Method Applied to Fusion Problems with Convective Boundary Conditions," *International*

Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 26, pp. 2547~2558.

40. Hsiao, J. S., 1985, "An Efficient Algorithm for Finite-Difference Analysis of Heat Transfer with Melting and Solidification," Numerical Heat Transfer, Vol. 8, pp. 653~666.
41. Voller, V. R., 1985, "Implicit Finite-Difference Solutions of the Enthalpy Formulation of Stefan Problems," IMA Journal of Numerical Analysis, Vol. 5, pp. 210~214.
42. Reddy, M. P. and Reddy, J. N., 1992, "Numerical Simulation of Forming Processes using a Coupled Flow and Heat Transfer Model," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 35, pp. 807~833.
43. Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1980, "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer-I," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 22, pp. 699~705.
44. Wertheimer, T. B., "Thermal Mechanically Coupled Analysis in Metal Forming Processes," MARC Manual.
45. Rebelo, N., Nakazawa, S., Wertheimer, T. B. and Nagtegaal, J. C., "Coupled Thermomechanical Analysis : Numerical and Computational Issues," MARC Manual.
46. Peeters, F. J. H., "Thermal Analysis by means of Finite Element Methods," MARC Manual.
47. Brown, S. B., Kim, K. H. and Anand, L., 1989, "An Internal Variable Constitutive Model for Hot Working of Metals," International Journal of Plasticity, Vol. 5, pp. 95~130.
48. Lewis, R. W. and Bass, B. R., 1976, "The Determination of Stresses and Temperatures in Cooling Bodies by Finite Elements," Journal of Heat Transfer, ASME, Vol. 98, pp. 478~484.

49. Kristiansson, J. O., 1982, "Thermal Stresses in the Early Stage of Solidification of Steel," Journal of Thermal Stresses, Vol. 5, pp. 315~330.
50. LW Garber, : Die casting Eng. 24(2) (1980)24-26
51. William T. Andresen : Die casting engineer
52. Z HANG Weishan, XIONG Shoumei, LIU baicheng : Journal of Materials processing technology 63 (1997) 707-711
53. J, Szekely and A. S. Jassal, Metall. Trans, 9B (1978)389.
54. J. Cambell, Mat. Sci. & Tech, Vol.17 (1991) 885.
55. 조인성, 홍준표 '3A 구조 vol. 12 No.5 (1992)
56. C.C Tai, J.C Lin : Journal of Materials Processing Technology 84 (1998)1-12
57. 박 삼수 : Die cast 현장기술
58. 김억수 이광학 : 구조 vol. 18 No. 3 (1998)
59. J. P. Holman "heat transfer" 7th edition
60. B.H.Hu, K.K. Tong, X.P. Niu, I. Pinwill, i Journal of Materials Processing Technology 2000 Vol. 105 p128-133
61. D.G.R. Sharma, M. Krishnan, AFS Transactions, 1991 429-438
62. Y.Nishida, H. Matsubara; British foundryman, Vol. 69, p274-278 (1976)
63. 부정숙, 서용권, 송동주, 김경천, 공역 : 유체역학 (2nd 48 edition)
64. E. Niyama and K. Anzai ; Material process vol.34, No.3 1993.
65. Y. Yamamoto, Y, Iwata and M. Nakamura; Imono. Vol.60 1988, p.770-776.
66. 이상목, 이영철, 최정길, 홍준표 Vol. 18, No. 2 P190-198. (1998)
67. L.H. Kallien, P.Bellity, F. Odor and J.C.Sturm : AFS casting congress 1992
68. P.N.Hansen, E. Flender and J. C. Sturm : int. Conf. On Best practice in foundries 11.1993
69. 김명제 최희호, 조남돈 : 구조, 14 (1994) P576
70. G. Bar- Meir : Die casting engineer, May/Jun (1998)

71. C. P. Hong, "State of the Art of Computer Simulation Based Casting Technology", Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol.15, No.1, p.5
72. C. P. Hong, H. F. Shen and S. M. Lee, "Prevention of Macrodefects in Squeeze Casting of an Al-7Wt Pct Si Alloy", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 31B, Iss. 2, 2000, p. 297
73. J. Campbell, "The concept of net shape for casting", Materials and Design, Vol. 21, 2000, p.373
74. C. C. Tai, J. C. Lin, "A runner - optimization design study of a die-casting die", Journal of materials processing technology, Vol. 84, 1998, p.1
75. Zhang Weishan, Xiong Shoumei, Liu Baicheng, "Numerical simulation of fluid flow in horizontal cold chamber die casting shot sleeves", Proceedings of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes, 1996, p341
76. Lu SC, Rebello AB, Miller RA, Kinzel GL, Yagel R, "A simple visualization tool to support concurrent engineering design", Computer -Aided Design , V.29, 1997, p.727
77. M. A. Osborne, C. E. Mobley, R. A. Miller, L. H. Kallien, "Modeling die casting process using Magmasoft", Transactions of the 17th International Die Casting Congress and Exposition, Ohio, USA, 1993, p.77
78. L. H. Kallien, M. Lipinski, "Optimization of die cast parts using numerical simulation of die filling and solidification", Transactions of the 17th International Die Casting Congress and Exposition, Ohio, USA, 1993, p.85
79. E. Niyama, K. Oda, K. Anzai, " A cyclic steady model for heat flow in die casting dies", Proceedings of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes, 1996, p1
80. Jing Tao, Anzai Koichi, Niyama Eisuke, " Die life prediction in the die

- casting cycle simulation", Proceedings of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes, 1996, p312
81. 이재경, 최정길, 홍준표, 유동한계 고상올법을 이용한 수축공 생성의 수치해석, 주조 제18권 제6호, 1998, p.555.
 82. 김억수, 김용현, 이광학, 김홍식, 스퀴즈 병용 다이캐스팅법에 의한 Al- 12%Si 합금의 결함제어에 관한 연구 , 주조 제15권 제4호, 1995, p.377.
 83. E. S. Kim, K. H. Lee, Y. H. Moon, "A feasibility study of the partial squeeze and vacuum die casting process", Journal of Materials Processing Technology Vol.105, 2000, p.42.
 84. Nahed A. El-Mahallawy, Mohamed A. Taha, Engenius Pokora and Friedrich Klein, "On the influence of process variables on the thermal conditions and properties of high pressure die- cast magnesium alloys", J. of Mat . Science and T ech. Vol.73, 1998, p.125.
 85. S. C. Lu, A. B. Rebello, R. A. Miller, G. L. Kinzel, R.Y. Yagel, "A simple visualization tool to support concurrent engineering design", Computer Aided Design, Vol.29, No.10, 1997, p.727.
 86. Zhang Weishan, Xiong Shoumei and Liu Baicheng, "Study on a CAD/ CAE System of Die Casting", J. of Mat . Science and T ech. Vol.63,1997, p.707
 87. Shamsuddin Sulaiman and Tham Chee Keen, "Flow Analysis along the Runner and Gating System of a Casting Process", J . of Mat . Science and T ech. Vol.63, 1997, p.690.
 88. MAGMA Gi ereitechnologie GmbH, "MAGMASOFT User ' s Tutorial Manual". 1997.
 89. 박형진, 강충길, 김병민, 최재찬, 반응용 단조품의 제조공정 및 금형설계, 주조 제19권 제2호, 1999, p.142.

감사의 글

처음의 마음으로 시작하였고 다시 처음의 마음으로 돌아가는 듯싶습니다. 처음 실험실에 들어왔을 때의 마음가짐과 2년이 지나고 나서의 마음가짐이 새롭기만 합니다. 학문을 일깨워 주시고, 논문을 위해 세심한 지도와 격려를 배려해주신 차용훈 교수님과 논문 심사과정에서 세심한 지도와 조언을 아끼지 않은 홍명석 교수님, 최병기 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 많은 지도, 격려와 배려를 해주신 성백섭 교수님 진심으로 감사를 드립니다. 실험실 생활함에 있어 항상 후원이 되어주시는 김덕중 교수님, 이연신 교수님을 비롯하여 저를 지금에 있게 도와주신 한국 폴리텍 최순호 교수님, 김지호 교수님, 강대진 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 항상 따뜻한 마음으로 실험실 일을 중추적인 역할을 하며 항상 바쁘게 생활하는 고생하는 미애 그리고 장난스럽지만 묵묵히 뒤에서 도와주는 주홍이 학과 조교생활과 실험실 일을 하면서 바쁜 승원이 모두 나이는 어리지만 자기 일에 최선을 다하는 실험실 선배님들이 열심히 하는 모습을 보면서 많은걸 배우게 되었습니다.

오늘의 저를 있게 해주신 아버님 어머님 진심으로 감사드리며 친 자식처럼 생각하시는 장인어른과 장모님, 항상 열심이 뒤에서 도와주는 형님, 형수님, 나의 후원이 되주는 누나, 매형, 처남 일천이, 일갑이, 조카 그리고 지금까지 저를 지켜봐 주시고 격려해주신 모든분 들에게 머리 숙여 감사드립니다.

끝으로 내 곁에 있어줘서 항상 고맙고 항상 잘해주지 못해 미안하기만한 나의 부인과 나의 사랑스러운 제자들 모두에게 진심으로 감사드립니다.

2008년 8월

_____님께 진심으로 감사 드립니다.

전 영 민 올림

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학번	20067519	과정	석사
성 명	한글: 전영민	한문: 全榮珉	영문: Jeon Young Min		
주 소	전라남도 광양시, 읍 칠성리 상아@ 102-807				
연락처	E-mail : peach8968@nate.com				
논문제목	한글: 상용차 드럼브레이크 시스템의 S/CAM 샤프트 열간단조 성형 해석				
	영문: Hot Forging Molding Analysis of S/CAM Shaft to the Commercial Vehicle Drum Brake System				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(0) 반대()

2008 년 8 월 일

저작자: 전 영 민 (인)

조선대학교 총장 귀하