



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](#)

공학석사 학위논문

마찰압접을 이용한 선박디젤엔진용  
피스톤 로드 제작공정 개발

Manufacturing Process Development of Piston Rod in Marine Diesel  
Engine using Friction Welding Process

지도교수 조 종 래



2011년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과 오 중 석

# 목 차

Abstract .....	i
기호 설명 .....	iii
List of Tables .....	v
List of Figures .....	vi
1. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 동향 .....	2
1.3 연구 목적 .....	4
2. 이론적 배경 .....	5
2.1 피스톤 로드 구성 및 기능 .....	5
2.2 피스톤 로드 사용환경 .....	8
2.3 기존의 피스톤 로드 제작 방법 .....	9
2.4 마찰용접을 이용한 새로운 제작 방법 .....	11
2.5 마찰용접 .....	13
2.6 유한요소 기본 방정식 .....	18
3. 마찰용접 유한요소 공정해석 .....	22
3.1 마찰용접 공정해석 .....	22
3.2 마찰용접 공정해석 결과 및 고찰 .....	26
4. 마찰용접 실험 .....	34
4.1 피스톤 로드 제작 .....	34

4.2 마찰용접부 특성 평가 .....	38
4.2.1 금속학적 평가 .....	39
4.2.2 인장특성 평가 .....	43
4.2.3 경도 특성 평가 .....	44
4.2.4 피로 특성 평가 .....	45
5. 결론 .....	48
참고문헌 .....	50



# Manufacturing Process Development of Piston Rod in Marine Diesel Engine using Friction Welding Process

Jung-Seok Oh

Department of Mechanical Engineering, Graduate School,  
Korea Maritime University

## Abstract

Inertia welding is a solid-state welding process in which butt welds in materials are made in bar or cylinder form at the joint face, and energy required for welding is obtained from a rotating flywheel. The stored energy is converted to frictional heat at the interface under axial load. The quality of the welded joint depends on many parameters, including axial force, initial revolution speed and energy, amount of upset, working time, and residual stresses in the joint. Inertia welding was conducted to make the large piston rod. Due to material characteristics, such as, thermal conductivity and flow stress, on the two sides of the weld interface, modeling is crucial in determining the optimal weld geometry and parameters. FE simulation was performed by the commercial code DEFORM-2D. A good agreement between the predicted and actual welded shape is observed. It is expected that modeling will significantly reduce the number of experimental trials needed to determine the weld parameters, especially for welds for which are very expensive materials or large rod. Many kinds of tests, including macro

and microstructure observation, tensile, hardness and fatigue test, are conducted to evaluate the quality of welded joints. Based on the results of the tests, it can be concluded that the inertia welding joints of the large piston rod are better properties than the base material.



## 기호 설명

$c$	: 비열(J/kg $^{\circ}$ C)
$E$	: 플라이휠 에너지(N-m)
$F$	: 표면력(surface traction, N)
$h_{lub}$	: 윤활 열전달 계수(W/m $^2$ °C)
$h$	: 대류 열전달 계수(W/m $^2$ °C)
$I$	: 플라이휠 관성모멘트(kg-m $^2$ )
$K_c$	: 열전도 계수(thermal conductivity, W/m°C)
$K_p$	: 벌칙 함수(penalty function)
$k^*$	: 변형에 대한 온도 변환율
$m^*$	: 마찰 상수
$m$	: 플라이휠 질량(kg)
$r$	: 플라이휠 반경(mm)
$T_a$	: 소재 주위 온도(°C)
$T_d$	: 금형 표면 온도(°C)
$T_w$	: 소재 표면 온도(°C)
$t$	: 시간(sec)
$\varepsilon^*$	: 복사율(emissivity)

- $\dot{\epsilon}$  : 유효 변형률 속도(effective strain rate)
- $\delta\pi$  : 범함수의 변분
- $\rho$  : 밀도(kg/mm<sup>3</sup>)
- $\sigma'_{ij}$  : 편차 응력텐서(deviatoric stress tensor)
- $\sigma^*$  : Stefan-Boltzmann 상수( $5.67 \times 10^{-14} \text{W/mm}^2 \text{K}^4$ )
- $\bar{\sigma}$  : 유효 응력(effective stress)
- $\omega$  : 플라이휠 각속도(rad/sec)



## List of Tables

Table 1 Hardness and depth of hardening

Table 2 Chemical composition of AISI4140

Table 3 Material property of AISI4140

Table 4 Thermo-mechanical processing and parameters of FE simulation

Table 5 Thermal conductivity and heat capacity of AISI4140

Table 6 Simulation parameter condition for friction welding process

Table 7 Simulation results of friction welding process

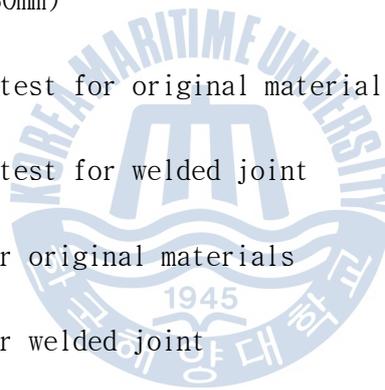
( $\varnothing_{in}=160\text{mm}$ ,  $\varnothing_{out}=280\text{mm}$ )

Table 8 Results of tensile test for original material

Table 9 Results of tensile test for welded joint

Table 10 Life of fatigue for original materials

Table 11 Life of fatigue for welded joint



## List of Figures

Fig. 1 Component of piston

Fig. 2 Thermal load in combustion chamber

Fig. 3 Original Process of manufacturing piston rod

Fig. 4 Manufacturing process of piston rod using friction welding

Fig. 5 Schematic of friction welding process

Fig. 6 Schematic of direct friction welding process

Fig. 7 Schematic of inertia friction welding parameter

Fig. 8 Schematic of geometric model for friction welding

Fig. 9 Schematic of FE simulation for friction welding

Fig. 10 Strain at each temperature for strain rate of 1.6

Fig. 11 Strain at each temperature for strain rate of 8

Fig. 12 Force curve versus time for friction welding process

Fig. 13 Energy curve versus time for friction welding process

Fig. 14 Upset length curve versus time for friction welding process

Fig. 15 Deformatin shape and temperature distribution after friction  
phase step

Fig. 16 Deformation shape and temperature distribution after upset phase step

Fig. 17 Inertia friction welding machine

Fig. 18 Fixed appearance of rotating part

Fig. 19 Fixed appearance of stationary part

Fig. 20 Manufactured piston rod by friction welding processing

Fig. 21 Schematic of friction welded piston rod

Fig. 22 Microstructure on vertical section

Fig. 23 Microstructure at 15mm from friction welding joint

Fig. 24 Microstructure at 10mm from friction welding joint

Fig. 25 Microstructure at 5mm from friction welding joint

Fig. 26 Microstructure at interface of friction welding joint

Fig. 27 Vickers hardness distribution for welded joint

Fig. 28 Schematic of fatigue test specimen on welded joint

Fig. 29 S-N curve for AISI4140 and welded joint

# 1. 서론

## 1.1 연구 배경

선박의 주 기관으로 주로 사용되는 2행정 디젤 엔진의 중요 부품들은 부품 문제 발생시에 예상되는 선박의 운전 안정성에 직접적인 영향을 끼치는 관계로 부품의 설계, 재질 선정, 및 제작 방법에 신중을 기하여 양질의 제품이 제작, 적용되어야 한다. 특히, 피스톤 로드의 경우에는 상부에 조립되는 피스톤 크라운이 연소실을 형성하며 하부에는 크랭크 샤프트로 동력을 전달하는 피스톤 로드(piston rod)가 조립되어 있어 엔진 1회전시 마다 반복적으로 압축하중을 받는다. 또한, 상부 피스톤 크라운이 연소가스에 직접 노출되어 있어 내부에서 냉각 오일을 이용하여 냉각을 시켜주어야 되므로 전체 길이 방향으로 냉각 오일의 이동 통로(피스톤 cooling oil pipe)용 공간이 필요한 관계로 중심부가 중공 형상으로 제작되어 있다.

대형 피스톤 로드 제작 방법으로는 인고트를 자유단조후 열처리 및 기계가공으로 제작하는 방법이 있다.

대형 피스톤 로드는 연결부와 피스톤 로드 몸통으로 구성되어 있으며, 모두 실린더 내부 즉, 고온, 고압 부식 등의 가혹한 환경에서 작동된다. 현재 대형 피스톤로드는 일체형으로 만들어진다. 그러나 일체형 제작법은 대용량의 기계가공장비 및 열처리 장비가 요구되고 생산성이 떨어진다. 따라서 일체형 제작을 부분 제작 후 결합하는 방식으로 된다면 제작에 유연성과 생산성이 향상을 기대할 수 있다.

이와 같이 대형의 축대칭 금속부품을 이용하여 빠르고 간편하며 높은 신뢰성을 확보 할 수 있는 접합기술의 대표적인 방법으로는 금속을 용해하지 않고 접촉면 마찰로 생기는 마찰열과 고온에서 일어나는 소성변형을 동시에 이용하는 마찰압접법이 있다. 본 연구에서는 마찰용접을 이용하여 소재들을 결

합시켜 일체형 제작 피스톤 로드보다 소재 비용, 가공비용, 생산비용에 있어 많은 이점을 갖고자 한다.

## 1.2 연구동향

마찰용접을 실제 기계부품에 적용할 경우 접합부의 기계적 특성이 문제가 될 수도 있지만 최적의 마찰용접 조건을 설정하면 모재의 특성보다 좋은 용접 효과를 얻을 수 있다.

Suh<sup>(6)</sup> 등은 HSS-Co와 SM55C 소재의 이중마찰용접부의 피로강도에 관한 연구를 하였다. Park<sup>(7-8)</sup> 등은 Nimonic 80A와 내열강 소재의 이중마찰용접부의 미세조직 관찰과 피로 특성에 대한 연구를 하였다. Cho<sup>(9)</sup> 등은 발전용 디젤엔진에 부착되는 축을 마찰용접하기 위해 인코넬(713C)와 탄소강(CM 440) 소재를 이중마찰용접 후 기계적 특성에 대한 연구를 하였다. Sahin<sup>(10)</sup> 등은 구리와 강에 대해 이중마찰용접 실험을 하였고 공정변수 영향을 파악하기 위해 해석을 수행하였다. Min<sup>(11-13)</sup> 등은 탄소강(SM45C)과 알루미늄 합금(A6063), 탄소강(SM45C)과 알루미늄 합금(A2024), 스테인레스강(SUS304)와 알루미늄 합금(A16351), 인코넬 합금과 스테인레스강(SUS304)에 대해 마찰용접 한 후 이중마찰용접부의 기계적 특성에 대한 연구를 하였다. Kim<sup>(14)</sup> 등은 열탄소성 응력 해석을 통해 티타늄과 알루미늄 소재의 이중마찰용접에서 발생하는 잔류응력과 소성변형에의 특징과 생성기구를 규명하였다. Sketchley<sup>(15)</sup> 등은 Fe<sub>3</sub>Al-ODS 합금과 Haynes 230 합금에 대한 동종 또는 이중 마찰용접을 한 후 상온 및 고온에서 기계적 특성을 연구하였다. Silva<sup>(16)</sup> 등은 Ti-6Al-4V에 대한 마찰용접 후 기계적 특성과 열영향부의 미세조직 변화에 대한 연구를 하였다. Lee<sup>(17)</sup> 등은 자동차 밸브에 사용되는 마르텐사이트 스테인레스강(STR3)과 오스테나이트 스테인레스강(STR35) 소재를 이용하여 이중마찰용접 한 후 용접부의 피로 특성에 대한 연구를 하였다. Satyanarayana<sup>(18)</sup> 등은 오스테나이트 스테인레스강(AISI304)과 페라이트 스테인레스강(AISI 430) 소재를 이용하여 이중마찰용접

한 후 마찰용접 공정변수가 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. D'Alvisea등은 마찰용접공정을 시뮬레이션 하기 위한 유한요소코드를 개발하고 실험적인 확인에 대한 연구를 하였다. Liu등은 2017\_T351 알루미늄 합금의 마찰교반용접성과 용접 공정변수/인자와 접합부의 인장 특성과의 관계에 대한 연구를 하였다. Silva등은 입자강화 TiC 합성물의 마찰교반용접 접합 가능성에 대한 연구를 하였다. Jeong등은 Nimonic 80A 과 SNCRW를 사용한 용접 제품의 기계적 특성 평가와 최적화된 공정에 대한 연구를 하였다. Jeong등은 관성 마찰용접 공정해석과 선박 터보 차차에서 대형 로터 샤프트의 기계적 성질 평가에 대한 연구를 하였다. Jeong등은 대형 초합금 스프링들의 이중 관성 마찰용접 공정의 개발에 대한 연구를 하였다.

다양한 소재에 대해 마찰용접 공정변수에 따른 실험과 기계적 특성을 평가하고 이를 바탕으로 최적의 마찰용접 조건을 구하는 연구가 진행되고 있다.

현재까지 연구는 크기가 비교적 작은 소재를 이용하여 마찰용접에 대한 연구를 하고 있다. 그리고 열점소성 유한요소법을 이용하여 마찰용접 공정변수에 대한 연구는 드물다.



### 1.3 연구목적

본 연구는 대형선박엔진에 사용되는 피스톤 로드의 일체형 제작 공정에서 여러 이점을 기대할수 있는 부분별 제작후 결합 방식으로 변경 방안을 모색중 마찰용접에 주목하였다. 대형 피스톤 로드를 부분별로 나누어 제작후 마찰용접으로 결합하여 하나의 완제품으로 제작하고자 한다.

관성마찰용접을 하기 위해서는 플라이휠 에너지, 플라이휠 관성모멘트, 회전수, 마찰압력, 마찰시간, 업셋 압력에 대한 공정 변수들의 조건이 필요하다. 또한 열전달, 기계적 특성, 유동응력등을 고려하여 최적의 마찰용접 공정 조건을 찾아야 한다. 그래서 관성마찰용접 공정에 대하여 열점소성 유한요소 해석을 이용하여 다양한 공정변수들이 마찰용접 공정에 미치는 상관관계에 대해 연구하였다.

관성마찰용접 공정해석을 통해서 공정변수들의 영향을 파악한 후 피스톤 로드를 관성마찰용접 방식으로 제작하였다. 선박용 대형 피스톤 로드는 고온, 고압의 아주 열악한 환경에서 작동이 되며 용접부 직경이 크므로 접합부 내외부에 대한 용접부의 기계적 특성에 대한 평가가 요구된다. 그래서 미세조직 관찰, 성분분석, 인장강도, 경도, 피로시험 등의 기계적, 금속적 특성평가를 통해 마찰용접부 내외부에 대한 신뢰성평가를 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 피스톤의 구성 및 기능

MDT사의 MC(E)/-C 타입 엔진을 실례로 하여 피스톤을 구성하고 있는 주요 부품을 살펴보면 다음과 같으며 Fig. 1에 설명된 부품들을 도시하였다.

피스톤 크라운 (Item no. 143) :

실린더 커버 및 라이너와 함께 연소실을 구성하며, 측면에 피스톤 링의 그루브 자리를 제공한다. 또한, 피스톤 스커트와 함께 냉각 공간을 형성한다.

피스톤 스커트 (Item no. 059) :

피스톤 크라운과 함께 냉각 공간을 형성하며, 유압 체결용 스톱 및 너트에 의해 크라운의 하단부에 조립된다. 통상, 피스톤 상하 왕복 운동시 라이너 벽면의 탄소등의 찌꺼기를 제거하는 역할을 수행한다.

피스톤 링 (Item no. 096, 106, 118) :

피스톤 크라운 측면에 조립되며, 선박용 주기관으로 사용되는 2행정 기관에는 통상 4개의 피스톤 링이 적용되나, 최근 개발되고 있는 엔진에는 3개의 피스톤 링을 적용, 시험이 진행되고 있다. 피스톤 링은 연소가스의 누설을 방지하는 기밀 유지 및 라이너 벽면과의 윤활유의 조절을 하는 역할을 한다.

피스톤 로드 (Item no. 179) :

피스톤로드는 상단부에 조립되는 피스톤 크라운이 연소 가스로부터 직접적인 영향을 받는 관계로 오일로 냉각을 해 주어야 한다. 따라서, 피스톤 로드의 중간 부분은 피스톤 냉각유 파이프(piston cooling oil pipe)를 조립하기 위해 중공으로 제작하여야 한다.

피스톤 로드의 외경부는 스테핑 박스(Stuffing Box)를 통해 엔진 1회전시 1번씩 상하 운동을 하는 관계로 내 마모성을 향상시키기 위해 제작 공정 중에 표면 경도를 증가시키는 표면 처리(induction hardening)를 시행하며 타입별

요구하는 경도 및 경화 깊이는 다음과 같다.

Table 1. Hardness and depth of hardening

Type	Required hardening	Depth of hardening
MC(E)/-C	Min 380 HV <sub>20</sub>	0.8 + 1.0 / 0 mm
RTX(A)	520 ~ 620 HV <sub>20</sub>	1.5 + 1.5 / 0 mm

피스톤 로드(Foot)는 크로스헤드 핀(crosshead pin)과 연결 조립되어 피스톤의 상하 왕복 운동을 커넥팅 로드(connecting rod)를 거쳐 크랭크 샤프트의 회전 운동으로 변환된다. 피스톤 로드 하단부는 크로스헤드 핀 상부에 실린더 출력 레이아웃(layout) 조정 에 따라 적절한 두께의 shim과 함께 조립되며, 크로스헤드 핀 상하부에는 베어링 셸(bearing shell)이 각각 조립되며 이를 통하여 윤활 및 냉각유가 피스톤 냉각 파이프를 통하여 피스톤을 냉각 시킨 후 다시 크로스 헤드(crosshead)를 통하여 일부는 가이드 슈(guide shoe)를 윤활 시키고 나머지는 아웃렛 파이프(outlet pipe)를 통하여 크랭크 챔버(crank chamber)로 떨어진다.

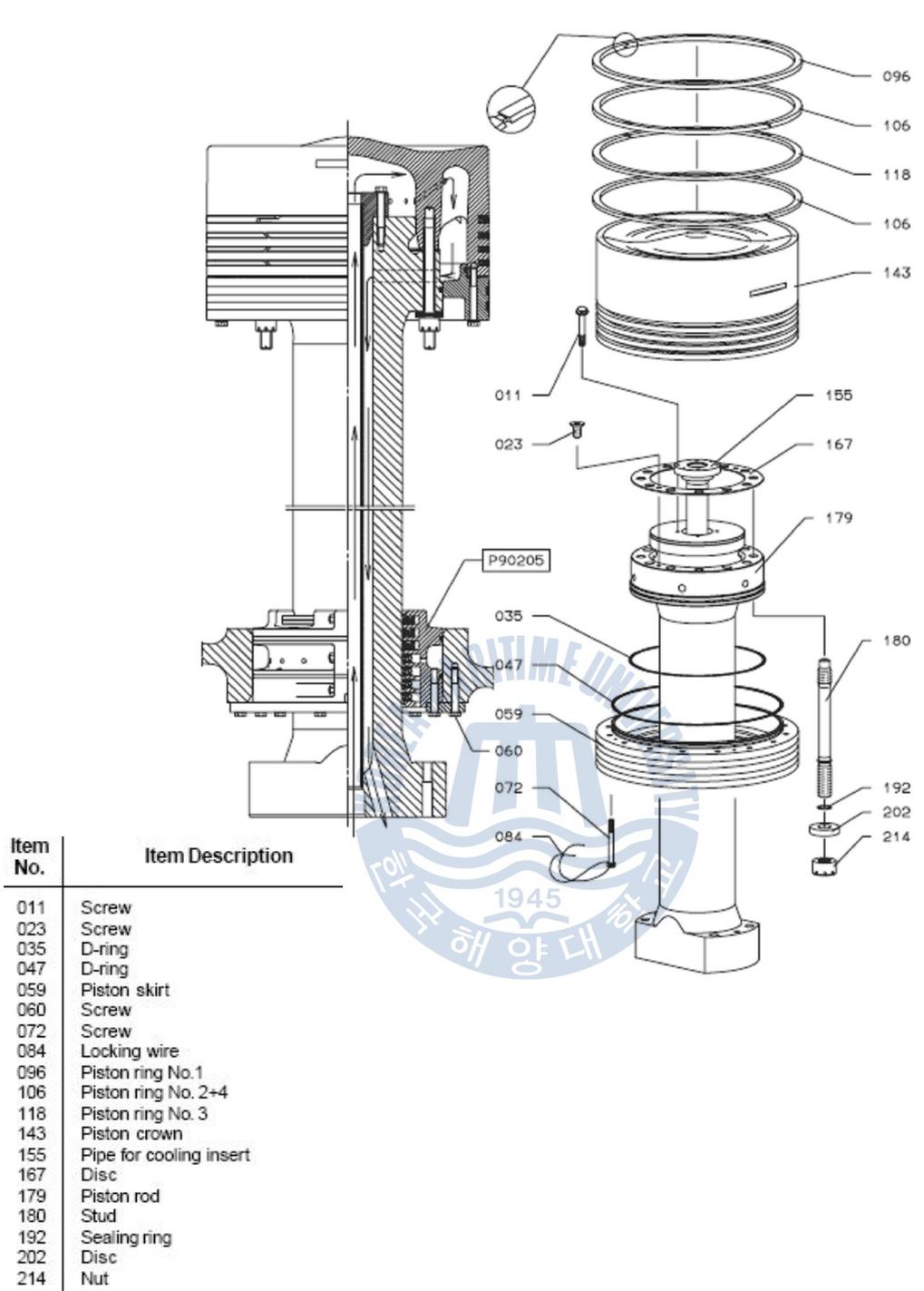


Fig. 1 Components of piston

## 2.2 피스톤 로드 사용환경

선박용 주기관으로 사용되고 있는 2행정 기관의 연소실부의 열부하를 도시하여 보면 대략적으로 그림2와 같다. 기하학적인 이유로 인해 배기밸브스핀들의 경우 냉각을 시켜줄 수가 없기 때문에 연소실 부품중 가장 온도가 높으며 (바닥부의 경우 평균 600도) 고온 강성 및 내부식성이 좋은 재질을 적용하여야 한다. 한편, 연소가스에 직접 노출되어 있는 피스톤 크라운의 상면부는 냉각 오일의 영향으로 평균 약 360도 정도이다. 또한, 최근 설계되고 있는 Mark 8 또는 Mark9 엔진의 경우에는 고온 부식성을 향상시키기 위해 피스톤 크라운 상부에 8~ 9mm 두께의 인코넬 용접을 제작시 시공하기도 한다.

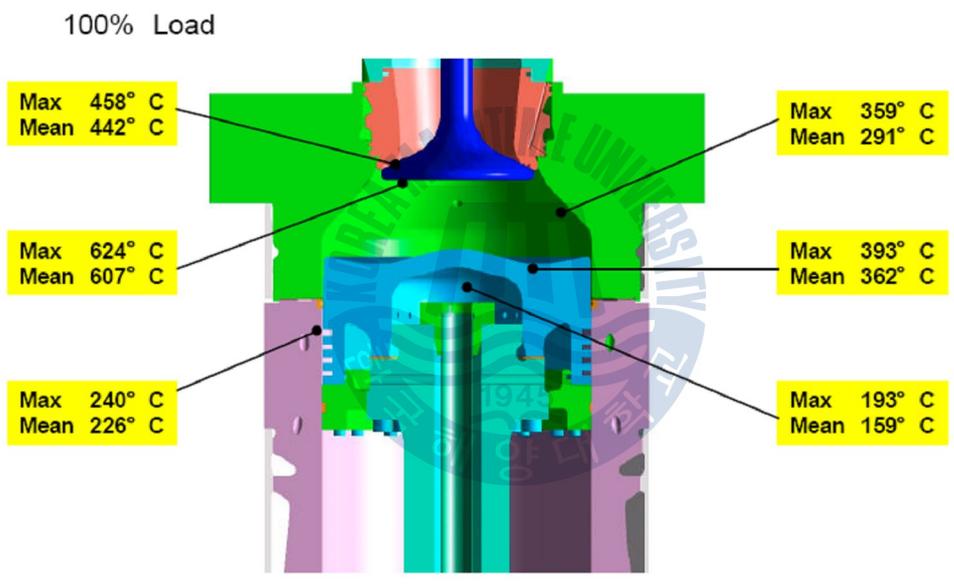


Fig. 2 Thermal load in combustion chamber

## 2.3 기존의 피스톤 로드 제작 방법

기존의 피스톤 로드 제작 방법은 Fig. 3과 같다. 대형 부품을 일체형으로 제작하다 보니 여러 문제점이 제기 되었다.

- 1) 인고트를 단조하기 위해 가열(최소 20시간 이상 소요) 후 업셋팅(upsetting), 코깅(cogging), 네킹(necking) 과정 및 최종 단조 작업 과정을 거쳐 단조 제품이 완성되기 때문에 단조 공정이 복잡하다.
- 2) 단조 중량이 큰 제품의 경우 약 5.5톤에 달해 큰 용량의 단조 프레스(forging press, 2500톤 이상)가 필요하며 중소규모의 단조 회사에서 제작 불가.
- 3) 제품의 길이가 1.8m에서 4.2m로 열처리시의 변형 및 자유 단조의 특성상 가공 여유를 편측 기준 25mm ~ 30mm를 두고 제작하므로 소재비 손실 및 황삭 가공비 상승의 원인이 됨.
- 4) 제품 중간 부분의 딥 홀(deep hole)을 가공으로 제작하는 관계로 소재 중량의 증가로 인한 소재비 손실 및 딥홀 가공에 따른 가공비 증가
- 5) 황삭 가공 전의 템퍼링(tempering) 및 가공 후의 응력 제거 열처리(황삭 가공시의 가공 경화 제거)의 중복
- 6) 제품의 크기가 크고 중량이 많은 관계로 대 용량의 열처리로 및 황삭 가공 장비가 필요함.

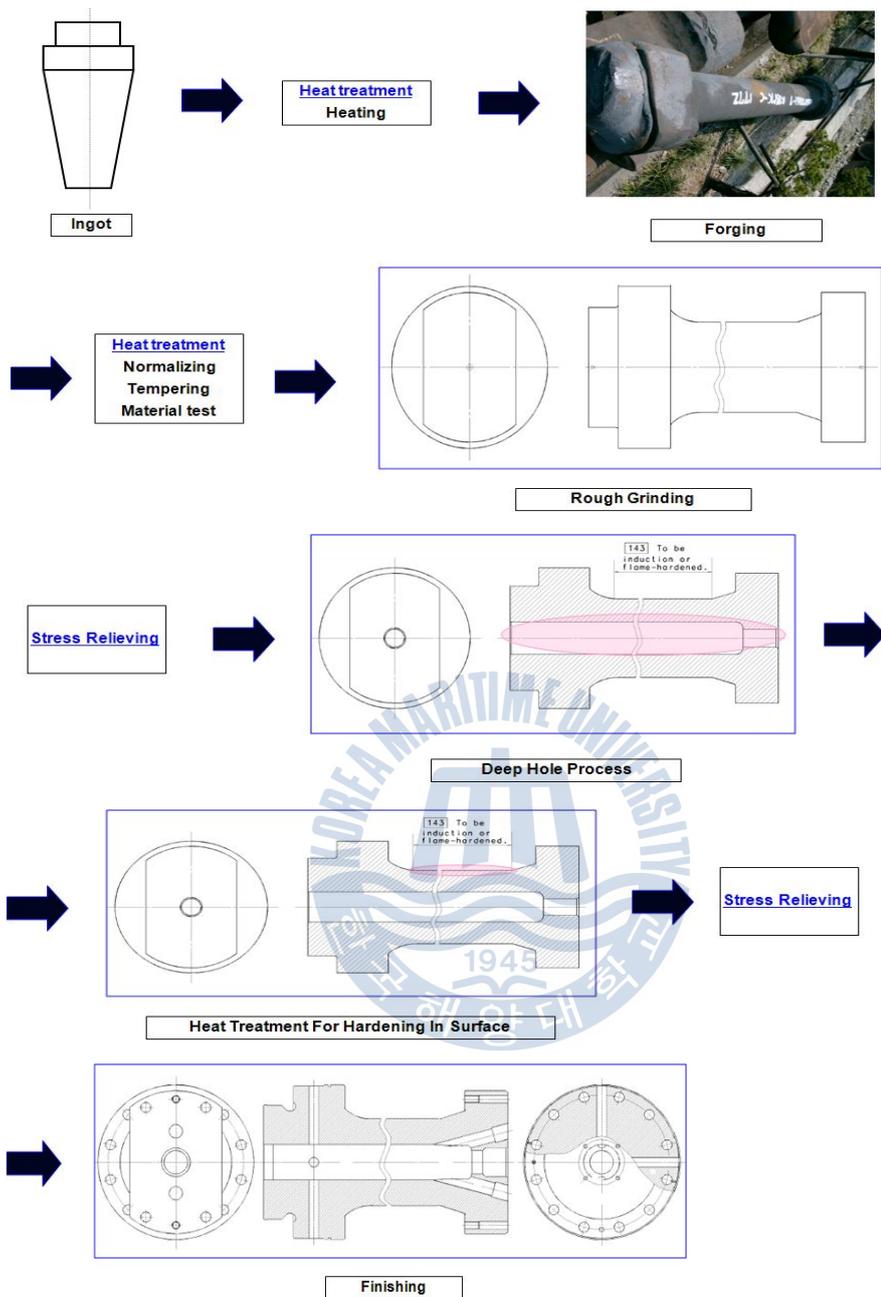
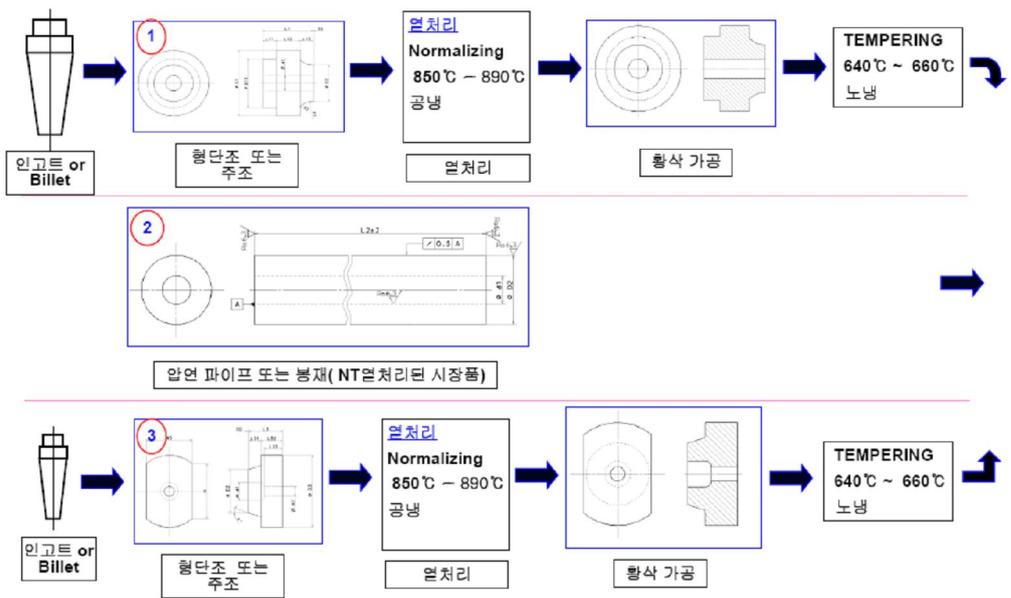


Fig. 3 Conventional process of manufacturing piston rod

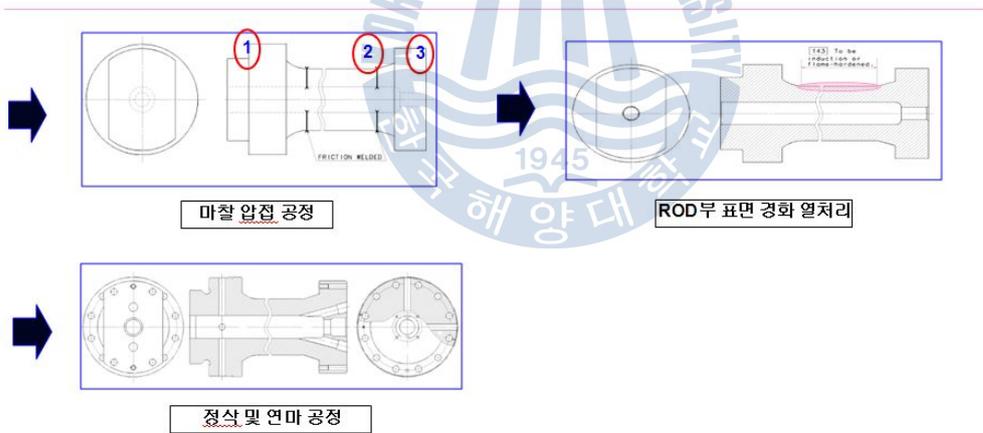
## 2.4 마찰 용접을 이용한 새로운 제작 방법

앞서 서술한 바와 같은 문제점들을 해결하고자 고안한 마찰용접을 통한 새로운 피스톤 로드 제작 방법은 Fig. 4와 같다. 마찰압접은 간단한 형상 부품들을 결합시킴으로써 복잡한 제품을 만들 수 있어 공정수를 감소시키고 열영향부의 범위가 좁아 용접효율이 좋으며 다른 용접에 비해 우수한 특성을 가지고 있다. 공정 변경으로 인해 비교적 긴 디프 홀을 가공할 필요 없고, 중량을 약 15% - 20% 감소시킬 수 있으며, 제품의 생산원가를 대폭 절감할 수 있고, 피스톤 결합부를 소형화 및 경량화할 수 있어 제작성을 대폭 향상시킬 수 있음은 물론 단조 프레스의 용량을 줄일 수 있으며, 열처리를 소형 열처리 로에서도 가능함은 물론 종래에 사용되던 동일 열처리 로에는 동시에 여러 제품을 열처리할 수 있어 제품의 생산율을 증대와 생산원가를 절감할 수 있는 것이다.





(a) manufacturing process of each parts



(b) Connection using fiction welding

Fig. 4 Manufacturing process of piston rod using friction welding

## 2.5 마찰용접공정

마찰용접은 Fig. 5와 같이 두 재료에 압력을 가한 상태에서 상대(회전)운동을 주어 발생하는 마찰열을 이용하여 고상상태로 접합하는 방식이다. 이 현상은 기계의 효율을 떨어뜨리고 손상시키는 마찰현상을 역으로 이용한 용접법이다. Fig. 5은 마찰용접시의 기본과정을 도시하였다. Fig. 5의 첫번째는 한쪽의 재료를 회전시키고 다른 쪽은 고정하는 단계이며 Fig. 5의 두번째는 적당한 회전속도에 도달하면 축방향으로 힘을 가하는 단계이며 Fig. 5의 세번째는 마찰면에서 국부적인 온도가 상승하고 업셋팅이 시작되는 단계이며 Fig. 5의 네번째는 최종적으로 회전이 정지되고 업셋팅이 종료되는 단계이다.

마찰용접은 회전에너지로 두 소재의 마찰을 이용하여 접합면에 열에너지로 자연스럽게 변환시키는 동시에 압접을 통해 재료의 열전도를 최대한 억제하여 일반 용접에 비하여 열영향부의 범위가 좁고, 마찰용접부 주위에는 소성변형이 일어나 재료 특유의 성질을 유지할 수 있으며 전기저항용접에 비해 적은 에너지로도 접합이 가능하다.

마찰용접은 다른 용접보다 공정변수가 적어 작업공정이 단순하고 용접시간이 적어 작업 능률이 높으며, 자동화가 가능하며 일정한 품질의 유지가 가능하므로 신뢰도가 높다. 특히 용융 접합법과 같이 용접에 사용되는 부재료(용접봉, 용가재 등)가 필요하지 않기 때문에 유해한 가스나 불꽃이 발생되지 않아 작업 환경이 청결하다. 또한 내열강, 공구강, 합금강, 티타늄, 알루미늄 등 단조가 가능한 모든 산업용 소재는 마찰용접이 가능하며 주조나 분말 소재도 용접이 가능하다. 또한 동종재료는 물론이고 알루미늄과 강, 구리와 알루미늄, 티타늄과 구리, 니켈합금과 강 등의 이종재료 접합에도 용이한 용접법이다. 또한 이종재료의 접합은 비용절감에 아주 용이하다. 이러한 여러 가지 장점을 가지고 있어 자동차, 전기, 조선, 화학, 원자력 등의 산업에서 우수한 특성을 활용하여 광범위하게 사용되고 있다<sup>(19)</sup>.

마찰용접 공정변수는 플라이휠 에너지, 플라이휠 관성모멘트, 회전수, 마찰

압력, 마찰시간, 업셋압력이 있다. 마찰시간이 너무 길면 생산성이 떨어지고 재료의 손실이 많아진다. 또 마찰시간이 짧으면 불균일하게 가열됨과 동시에 산화물이 잔류하며 계면상에 접합되지 않는 부분이 생기게 된다. 마찰압력은 용접부의 온도 구배, 회전 에너지, 축 방향의 길이 감소량을 지배한다. 가열시 압력은 산화 방지를 위해 충분히 밀착시킬 수 있도록 높아야 한다. 일정한 회전속도에서 압력이 낮으면 충분한 발열이 생기지 않으며 압력이 높으면 국부적으로 고온으로 가열되며 급속히 재료의 축 방향 길이가 짧아지게 된다.

마찰용접 방법은 크게 직접구동 마찰용접법(direct drive friction welding)과 관성 마찰용접법(inertia friction welding) 두 가지가 있다. 직접구동 마찰용접은 모터의 구동력으로 직접 회전을 하는 것이고, 관성 마찰용접은 플라이휠의 관성력으로 회전을 하는 방식이다.

Fig. 6, 7은 마찰용접 방식의 두 가지 형태를 보여주고 있다. Fig. 6는 직접구동 마찰용접 공정변수곡선이다. 먼저 모터를 이용하여 하나의 소재를 회전시킨다. 회전속도가 일정해지면 다른 소재를 1차 가압하여 마찰열을 발생시킨다. 마찰열이 발생하여 소재는 연화되고 변형이 발생하여 플래시를 생성한다. 이후 회전하는 소재를 정지와 동시에 2차 가압을 하여 마찰용접을 한다.

Fig. 7은 관성 마찰용접 공정변수곡선이다. 먼저 플라이휠을 이용하여 하나의 소재를 회전시킨다. 목표 회전속도까지 도달하면 다른 소재를 1차 가압하여 마찰열을 발생시킨다. 플라이휠 회전에너지가 열에너지로 바뀌어서 회전속도가 낮아지면서 마찰열이 발생한다. 소재는 연화되고 변형이 발생하여 플래시를 생성한다. Fig. 7(a)는 1차 가압으로 마찰용접을 하는 방법이며 Fig. 7(b)는 회전속도가 어느 정도 낮아지면 2차 가압을 하여 마찰용접을 하는 방법이다. 두 마찰용접 변수 제어 곡선에서 알 수 있듯이 용접 변수는 많은 시험과 경험을 통해 최적의 변수를 찾아내는 것이 필요하다.

두 가지 모두 마찰용접을 하는데 큰 차이점은 없으나 유동응력이 큰 소재나 직경이 큰 경우는 관성 마찰용접방식이 유리하다. 그 이유는 직접구동 마찰용

접방식은 대용량의 모터가 필요로 하나 관성 마찰용접방식은 큰 플라이휠의 관성력을 이용하므로 적은 모터 파워로도 가능하다. 또한 실험적인 결과 열영향부와 기계적 특성이 직접마찰용접보다 우수한 것으로 알려져 있다.



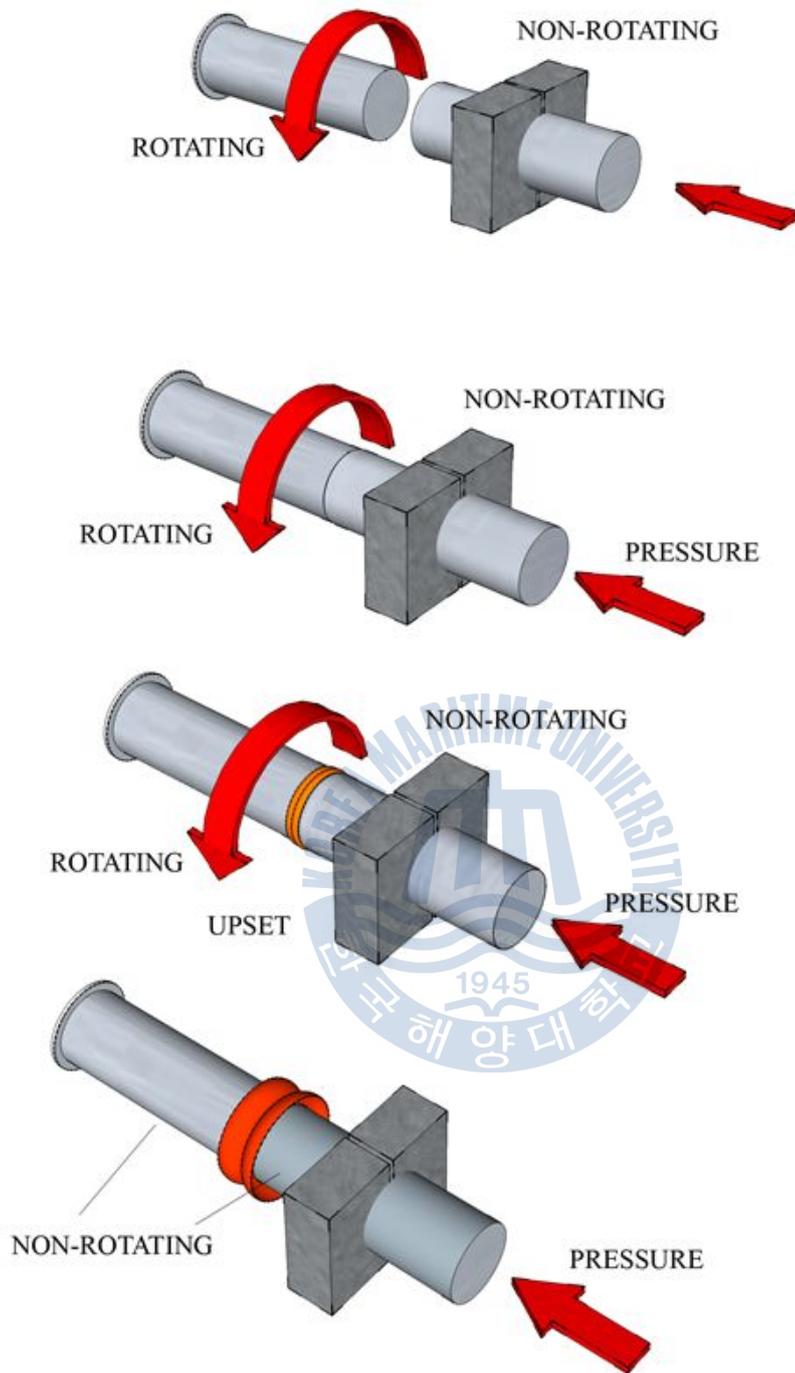


Fig. 5 Schematic of friction welding process

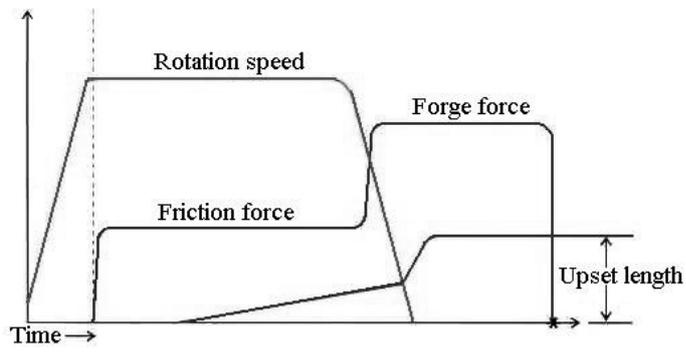
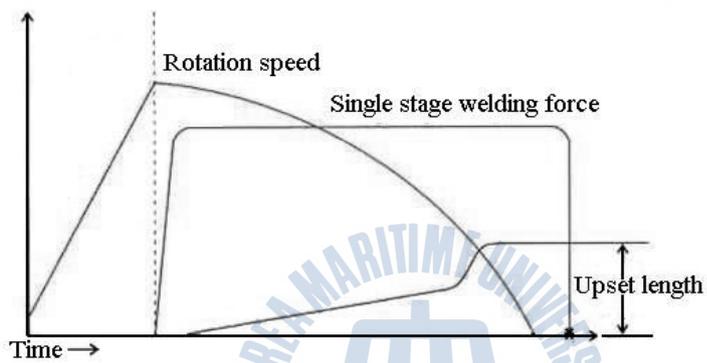
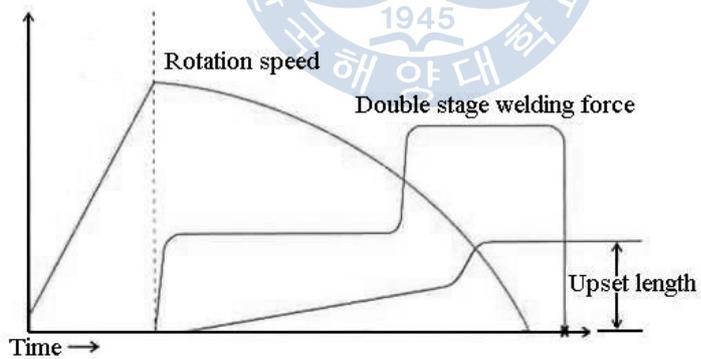


Fig. 6 Schematic of direct friction welding parameter



(a) Single welding force



(b) Double welding force

Fig. 7 Schematic of inertia friction welding parameter

## 2.6 유한요소 기본 방정식

유한요소법은 연속체를 여러 개의 적절한 크기의 유한 요소로 나누어서 각 절점의 값들을 변분원리, 가중잔류법, 에너지 균형법 등을 이용하여 미분 방정식을 세우고 이것을 이용하여 유한요소방정식을 만들어 각 절점에서의 변수 값들을 구하는 방법이다.

탄성 변형량을 무시할 만큼의 많은 변형을 가지는 단조나 압출과 같은 소성 문제에는 강소성 유한요소법이<sup>(21-23)</sup> 사용되고, 이 방법은 벌크 성형 해석에 있어서 뛰어난 해석 정확도와 계산 효율이 우수한 것으로 알려져 있다. 마찰 용접하는 동안 소재는 마찰과 변형에 의한 국부적인 열과 소성변형이 발생한다. 따라서 열전달과 변형거동해석이 동시에 요구되므로 열점소성 유한요소해석이 요구된다. 또한 관성마찰용접 공정변수로는 플라이휠 에너지, 플라이휠 관성모멘트, 회전수, 마찰압력, 마찰시간, 엷압력이 있으며 최적의 공정 변수값을 찾기 위해서는 수치 해석적인 방법이 가장 효율적이다.

강소성 유한요소 수식화는 다음과 같은 가정을 따른다.

- (1) 재료는 강소성체이고, 탄성 변형은 무시한다.
- (2) 바우싱거 효과(Bauschinger effect)를 무시하며, 가공 후에도 등방성(isotropic)을 유지한다.
- (3) 재료는 변형동안 체적일정조건을 따른다.
- (4) 재료는 Von Mises 항복조건을 따른다.
- (5) 다이는 강체이며, 변형하지 않는다.

벌칙함수를 고려한 강소성 유한요소법의 범함수( $\pi$ )의 변분<sup>(22)</sup>은 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV + K_p \int_V \dot{\epsilon}_v \delta\dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서  $\bar{\sigma} (= \sqrt{\frac{3}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}})$ 는 유효 응력,  $\dot{\epsilon} (= \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}})$ 는 유효 변형률 속도,  $K_p (= \frac{\sigma_m}{\epsilon_v})$ 는 벌칙 상수(penalty constant)이며 매우 큰 수이다.  $T$ 는 표면력(surface traction)이며  $u$ 는 속도이다.

비틀림 항을 포함한 2차원 축대칭은 원주방향의 힘과 변위가 존재한다. 또한 축대칭이므로 원주방향의 변위는 일정하다.

$$\begin{aligned} u &= u(r, z) \\ v &= v(r, z) \\ w &= w(r, z) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_r \\ \dot{\epsilon}_z \\ \dot{\epsilon}_\theta \\ \dot{\gamma}_{rz} \\ \dot{\gamma}_{r\theta} \\ \dot{\gamma}_{z\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $u, v, w$ 는 각각 반경방향( $r$ ), 축방향( $z$ ), 원주방향( $\theta$ )의 속도이다.

6개의 편차응력텐서는 식(4)의 구성방정식(constitutive equation)에 의해 정의된다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (4)$$

비틀림 항을 포함한 경계조건(boundary condition)은 다음과 같다<sup>(23)</sup>.

$$\begin{aligned} w(r, z = h_t) &= r \omega \\ p(r, z = h_t) &= p(t) \\ u(r, z = h_b) &= v(r, z = h_b) = w(r, z = h_b) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $w$ 는 원주방향( $\theta$ )의 속도이며  $\omega$ 는 플라이휠 각속도,  $p$ 는 압력,  $t$ 는 시간,  $h_t$ 와  $h_b$ 는 경계조건의 축방향 항이며 두 항은 결합되어 있다.

소성가공에서 온도 분포 해석을 위한 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_V k_c T_{,ii} \delta T_{,ii} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS \\ - K^* \left( \int_V \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \delta T dV + \int_S (f_s)_i (u_s)_i \delta T dS \right) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $k_c$ 는 열전도 계수(thermal conductivity)이며  $\rho$ 는 밀도(density),  $c$ 는 비열(specific heat),  $\rho c$ 는 열용량(thermal capacity)이다.  $K^*$ 는 변형에너지를 열에너지로 변환되는 변환율로서 범위는 0.85~0.95이다.

열점소성 유한요소법에 대한 경계치 문제는 열평형 방정식으로부터 다음과 같은 경계조건을 갖는다.

자유표면에서는 대류 열유동(convection heat flux)과 복사 열유동(radiation heat flux)이 존재한다.

$$q_m^c = h(T_a - T_w) \quad (8)$$

$$q_m^r = \sigma^* \varepsilon^* (T_a^4 - T_w^4) \quad (9)$$

여기서,  $h$ 는 대류 열전달 계수,  $\sigma^*$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $\varepsilon^*$ 은 복사율(emissivity),  $T_a$ 는 소재 주위 온도,  $T_w$ 는 소재 표면 온도이다.

금형과 소재의 접촉면에서는 전도 열유동(conduction heat flux)과 마찰 열유동(friction heat flux)이 존재한다.

$$q_m^d = h_{lub}(T_d - T_w) \quad (10)$$

$$q_m^f = m^* k v_s \quad (11)$$

여기서,  $h_{lub}$ 는 윤활 열전달 계수,  $T_d$ 는 금형 표면 온도,  $m^*$ 은 전단마찰계수이다.



### 3. 마찰용접 유한요소해석

#### 3.1 마찰용접 공정해석

마찰용접은 두 재료에 압력을 가한 상태에서 상대회전운동을 주어 마찰접촉 부위에 발생하는 마찰열을 이용하여 접합하는 방식이며 마찰 단계와 압하 단계로 행하여진다. 먼저 마찰 단계에서는 하나의 소재를 플라이휠의 운동에너지를 이용하여 회전시키며 다른 소재는 정적인 상태에서 일정한 힘을 가한다. 두 소재의 접촉면은 마찰에 의해 열이 발생하며 두 소재는 국부적으로 연성이 상당히 증가하고 가압력에 의해 소재가 변형된다. 마찰 단계 후 압하 단계에서는 플라이휠 에너지가 감소되면 보다 큰 가압력으로 플라이휠 회전을 정지 시킴과 동시에 두 소재를 접합시킨다.

본 연구에 사용된 소재 AISI4140은 Cr-Mo강의 일종으로 내열성 및 내식성을 갖춘 비교적 저렴한 강종재이다. 또한 내마모성, 내피로성 등이 우수하여 자동차의 크랭크축, 연결봉, 강력볼트, 기어, 절삭공구류, 식품기계, 크레인 연결축 등 각종 기계부품의 재료로 광범위하게 활용되고 있다. AISI4140의 화학 조성비와 인장 특성을 Table 2과 3에 각각 나타내었다. 화학성분을 보면 AISI4140은 Mn 성분이 0.60~0.85%, C 성분이 0.38~0.43%, Si 성분이 0.15~0.35%로 구성되어 있다. 인장특성을 보면 상온에서 980MPa 인장강도를 가진다.

마찰용접 유한요소해석은 다음과 같은 방법으로 하였다. 먼저 상부 금형은 상부 소재와 함께 모터에 의해 회전이 가해지며 하부 금형은 하부 소재와 함께 정적 상태에서 일정한 1차 가압력을 가한다. 이렇게 되면 마찰열이 발생하여 소재는 연화되고 국부적인 변형이 생긴다. 균일한 온도분포와 변형이 되면 이후 회전을 정지시키고 1차 가압력보다 더 큰 2차 가압을 한다. 플래쉬가 생성되며 정지와 동시에 마찰용접이 된다.

Fig. 8은 소재의 기하학적 형상이고, Fig. 9은 마찰용접 공정의 유한요소해석을 위한 개략도이다. 해석에 사용된 소재의 직경은 각각 외경 280mm 내경 160mm이며 마찰부위의 형상이 증공축형이므로 축대칭으로 해석하였다. 또한 회전에 의해 두 소재가 접촉하는 부위에는 마찰계수에 의해 열발생이 일어나게 하였고, 소재의 외곽부는 열발생에 의해 소재와 대기와의 열전달 현상을 고려하기 위해 대류와 복사 열전달에 대한 경계조건을 주었다.

마찰용접동안 열발생과 소성변형이 발생하기 때문에 열전달과 변형거동해석이 동시에 요구되므로 열점소성해석에 사용되는 전용 프로그램 DEFORM-2D를 이용하여 열점소성 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 10~11는 유한요소해석에 사용된 재료의 온도별 변형을 데이터를 나타내었다. Table 3~5 은 열점소성 유한요소해석 동안 소재의 열전달과 변형에 관련된 소재 특성과 공정변수를 나타내었다. 직접구동 마찰용접에 대한 공정해석을 수행하기 위해선 회전수, 마찰압력, 마찰시간, 엷압력의 공정변수가 있어야 한다. 플라이휠 에너지와 관성모멘트는 관성마찰용접기의 성능과 마찰용접 소재의 종류와 크기에 따라 달라진다.

식 (12)는 플라이휠 에너지를 표현하는 수식이며 식 (13)은 플라이휠 에너지에 표현된 플라이휠 관성모멘트를 나타내는 수식이다.

$$E = \frac{I\omega^2}{2} \quad (12)$$

$$I = mr^2 \quad (13)$$

여기서, E는 플라이휠 에너지(N-mm), I는 플라이휠 관성모멘트(kg-mm<sup>2</sup>),  $\omega$ 는 각속도(rad/sec), m은 플라이휠 질량(kg), r은 플라이휠 반경(mm)이다.

Table 2 Chemical compositions of AISI4140

Materials	Composition (wt.%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
AISI4140	0.38~0.43	0.15~0.35	0.6~0.85	Max 0.03	Max 0.03	Max 0.9~1.2

Table 3 Material properties of AISI4140

Materials	Properties			
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
AISI4140	834	980.7	12	45

Table 4 Thermo-mechanical processing and parameters for FE simulation

Item	Value	Unit
Friction factor	0.25	-
Room temperature	20	°C
Convection coefficient	20	W/m <sup>2</sup> °C
Lubricant heat transfer coefficient	10000	W/m <sup>2</sup> °C
Emissivity	0.7	-

Table 5 Thermal conductivities and heat capacities of AISI4140

	20°C	300°C	600°C	800°C	1000°C	1350°C
Thermal conductivity (W/m°C)	53.3	45.7	33.9	24.8	32.9	29
Heat capacity (J/m <sup>3</sup> °C) × 10 <sup>6</sup>	3.7	3.1	5.6	4.9	4.3	4.3

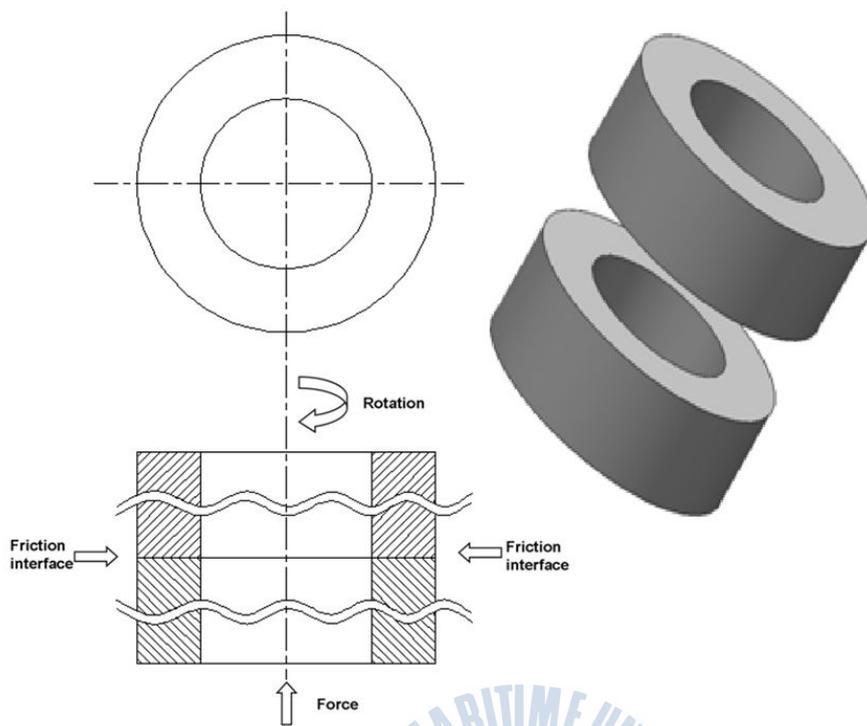


Fig. 8 Schematic of geometric model for friction welding

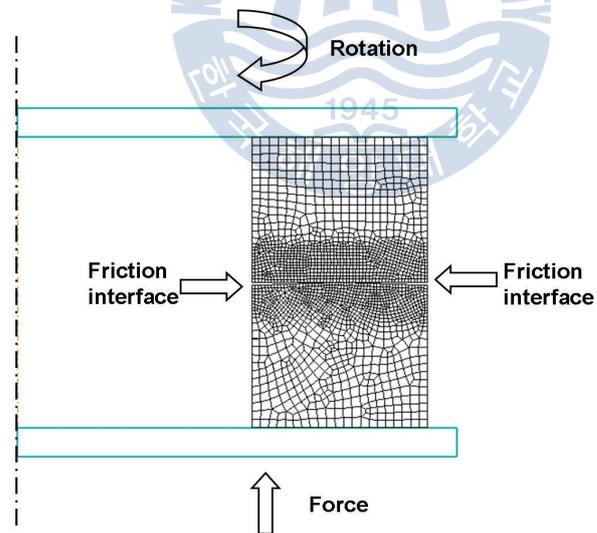


Fig. 9 Schematic of FE simulation for friction welding

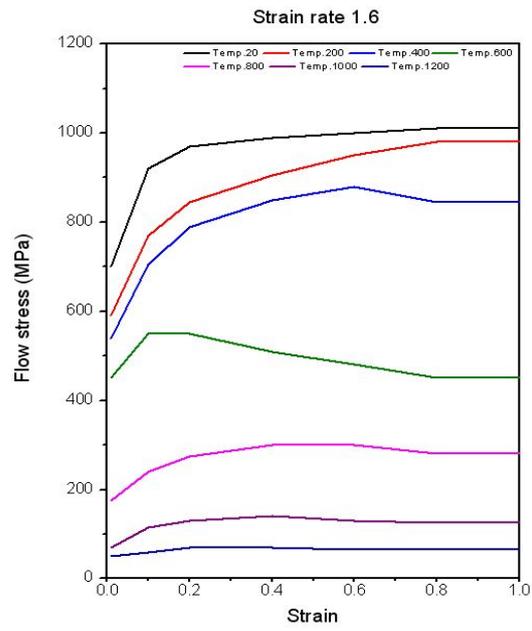


Fig. 10 Strain at each temperature for strain rate of 1.6

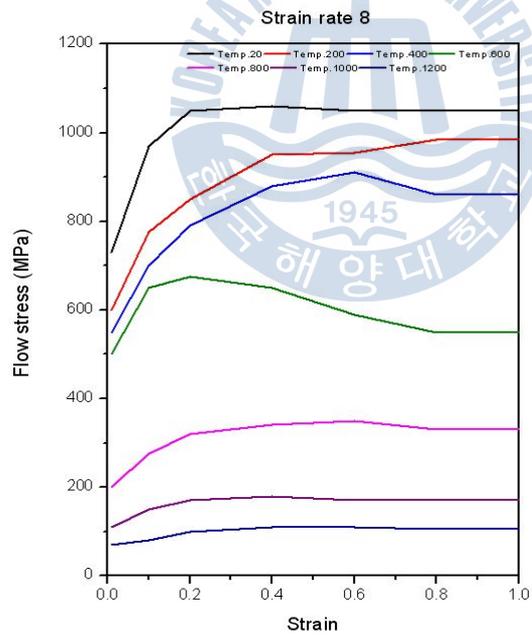


Fig. 11 Strain at each temperature for strain rate of 8

### 3.2 마찰용접 공정해석 결과 및 고찰

외경 280mm 내경160mm에 대한 마찰용접에 대한 해석을 고찰하고자 한다. Table 6에서 제시한 다양한 공정변수 조건들에 의해서 해석을 수행하였으며 마찰시간에 따른 변형된 양을 Table 8에 나타내었다.

해석조건 1, 2, 3와 4, 5의 경우 플라이휠 에너지와 1차 가압력은 같고 2차 가압력이 상대적으로 큰 경우 공정시간은 비슷하나 압하량이 많아짐을 알 수 있었다. 해석조건 2, 4와 3, 5의 경우 플라이휠 에너지와 2차 가압력은 같고 1차 가압력이 상대적으로 큰 경우 압하량이 많으며 공정시간은 짧아짐을 알 수 있었다.

Fig. 15은 마찰에 의한 가열단계로써 1차 가압력 후 두 소재의 온도분포와 압하된 형상을 나타내며 Fig. 16는 마찰에 의해 가열된 소재로부터 가압에 의해 접합단계로써 2차 가압력 후 온도분포와 압하된 형상을 나타낸다.

Table 6에서 제시한 공정변수들이 적용된 마찰용접 공정해석은 모두 좋은 해석결과를 얻었으나 제시된 공정변수 조건보다 적은 값이 적용된 경우의 해석에서는 접촉면에서의 균일한 열발생과 충분한 변형이 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

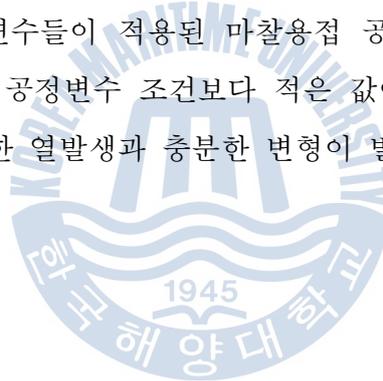


Table 6 Simulation parameters condition for friction welding process

Simulation number	Process parameters ( $\varnothing_{in}=160\text{mm}$ , $\varnothing_{out}=280\text{mm}$ )			
	Flywheel energy (N-m)	Inertia moment ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	Friction force (kN)	Forge force (kN)
1	$1.8 \times 10^5$	1.054	2,500	3,500
2	$1.8 \times 10^5$		2,500	4,000
3	$1.8 \times 10^5$		2,500	4,500
4	$1.8 \times 10^5$		3,000	4,000
5	$1.8 \times 10^5$		3,000	4,500

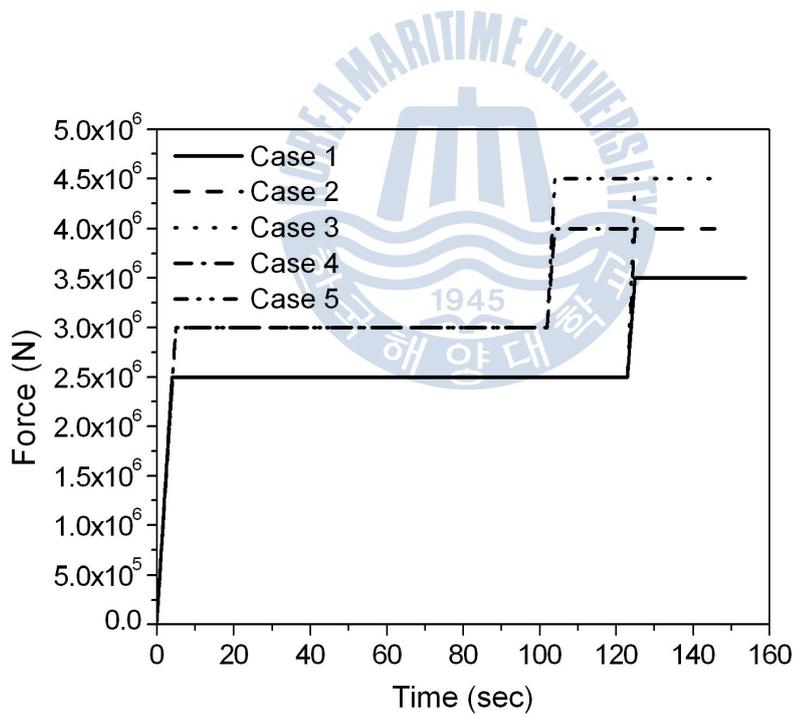


Fig. 12 Force versus time curve for friction welding process

Table 7 Simulation results for friction welding process

( $\varnothing_{in}=160\text{mm}$ ,  $\varnothing_{out}=280\text{mm}$ )

Simulation number	Friction time (sec)	Friction upset length (mm)	Total time (sec)	Total upset length (mm)
1	123	4.5	148	19.1
2	123	4.5	146	21.5
3	123	4.5	145	23.9
4	102	4.5	123	17.4
5	102	4.5	121	19.1

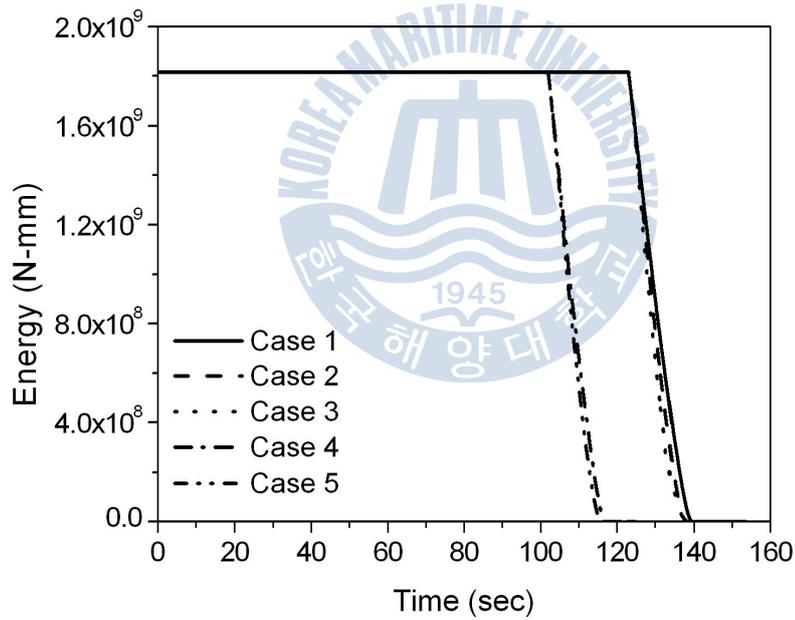


Fig. 13 Energy versus time curve for friction welding process

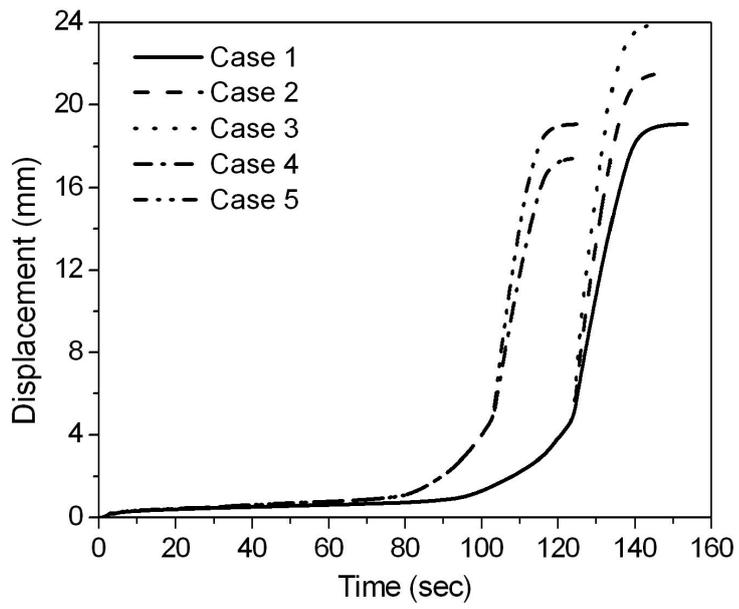
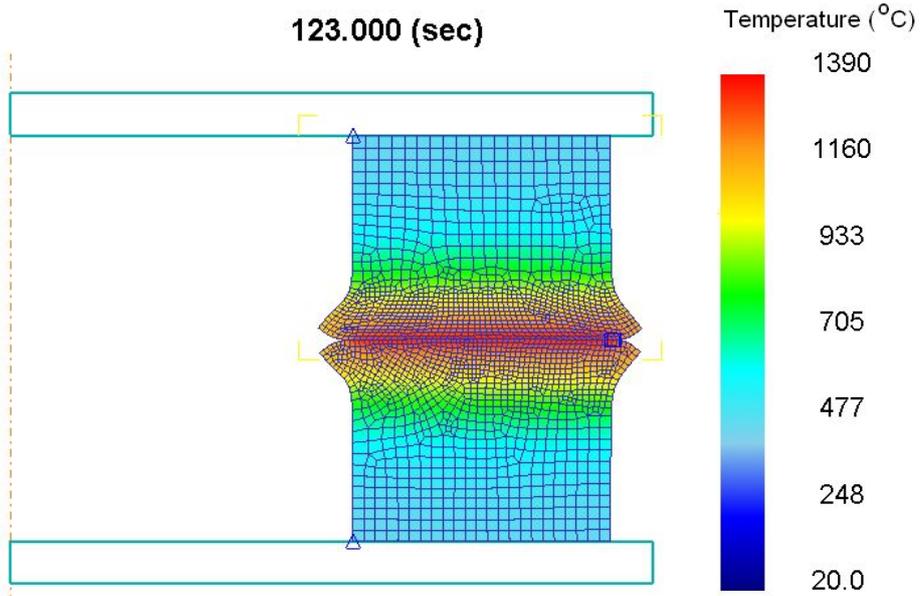
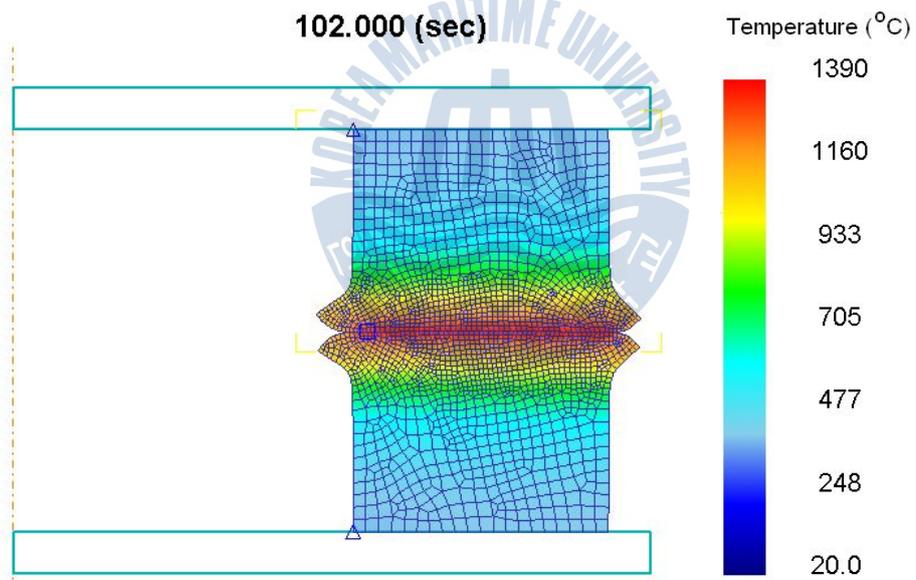


Fig. 14 Upset length versus time curve for friction welding process



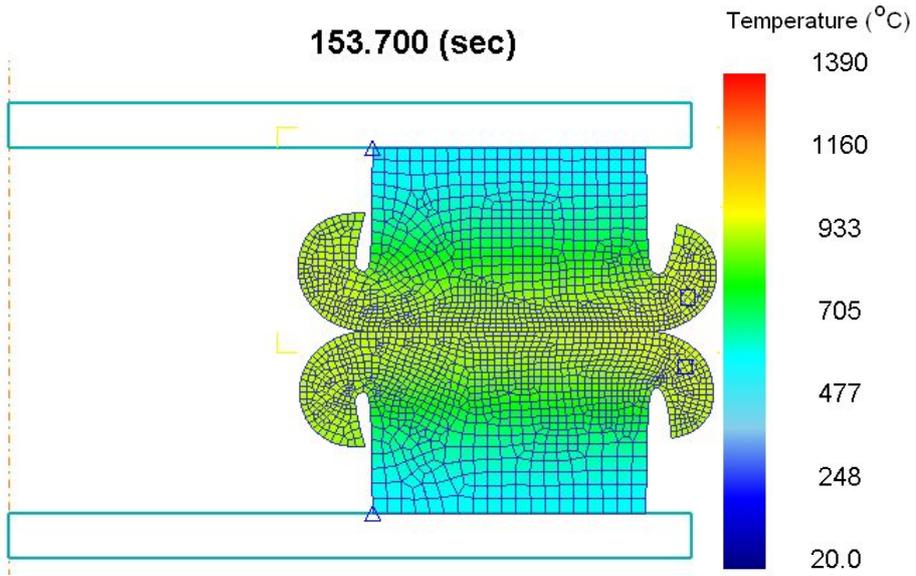


(a) Case 1, 2, 3

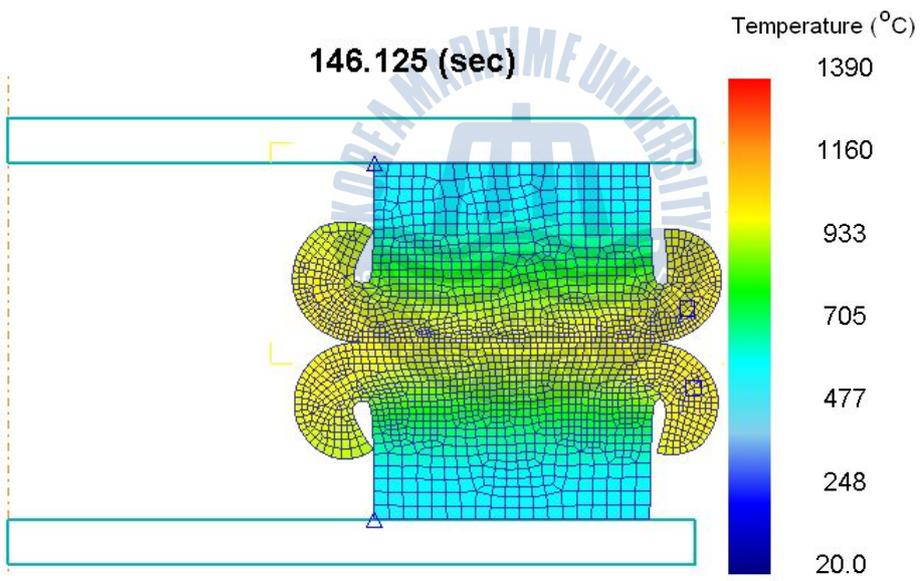


(b) Case 4, 5

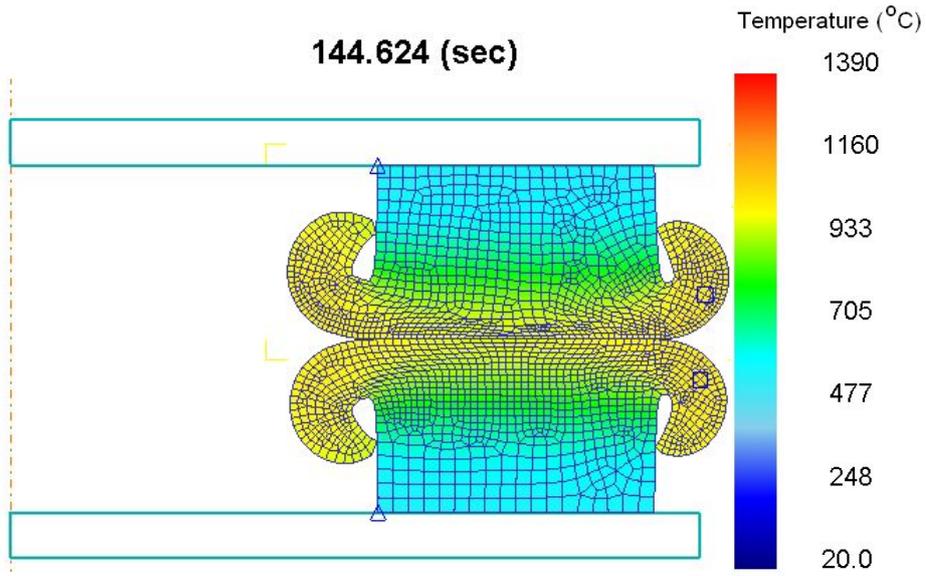
Fig. 15 Deformation shape and temperature distribution after friction phase step



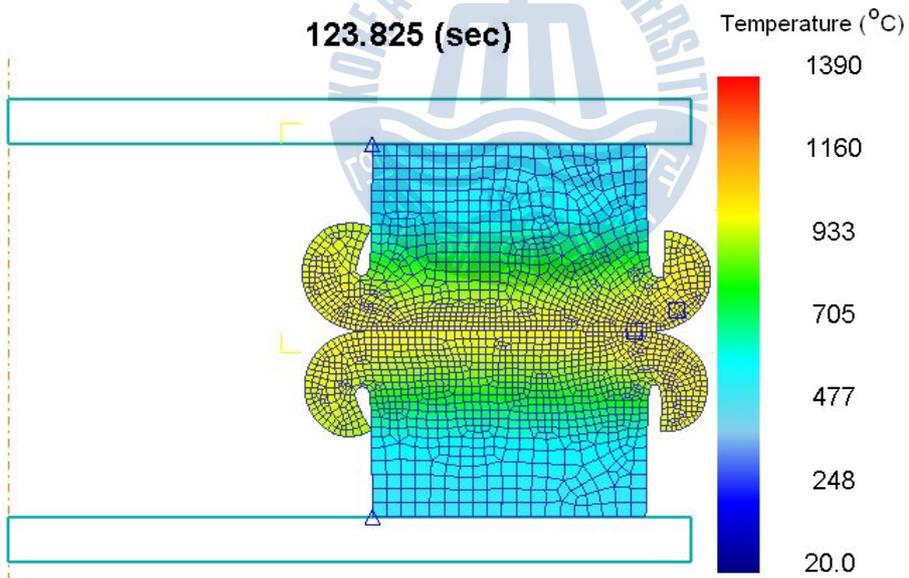
(a) Case 1



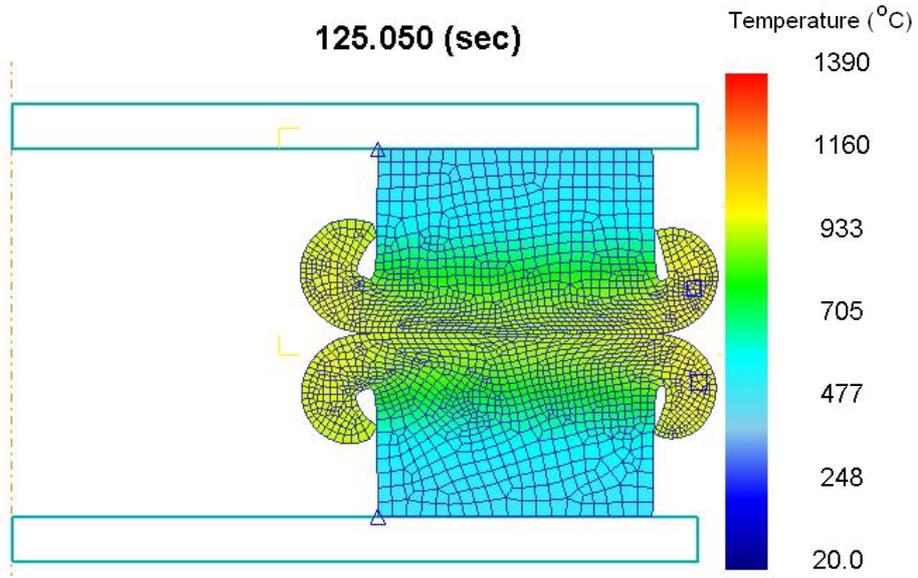
(b) Case 2



(c) Case 3

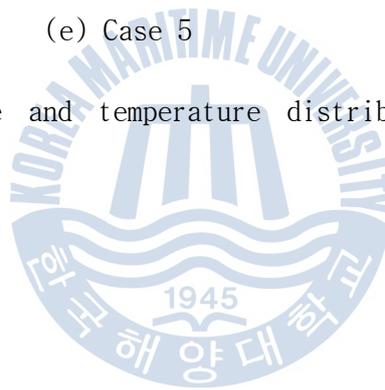


(d) Case 4



(e) Case 5

Fig. 16 Deformation shape and temperature distribution after upset phase step



## 4. 마찰용접 실험

### 4.1 피스톤 로드 제작

초대형 피스톤 로드의 마찰용접에 대한 일체화 시험을 수행하였다. 대형 선박용 피스톤 로드의 경우 일체형으로 제작되기 때문에 대형 피스톤 로드의 마찰용접 적용은 원가절감 및 생산성향상을 기대할수 있다.

마찰용접에 의한 피스톤 로드 개발은 압연 파이프나 봉재에 형단조나 주조로 제작된 부품을 마찰용접을 통해 접합하였다.

Fig. 17은 마찰용접기 사진이며 용량은 400 ton이다. 실험을 하기 전 외경 280mm, 내경160mm 소재에 대한 유한요소해석을 한 결과, 해석에서 얻어진 하중이 마찰용접기의 용량보다 적게 나왔으므로 마찰용접기의 용량이 충분함을 알 수 있었다.

Fig. 18와 Fig. 19은 각각 마찰용접기에 회전부와 고정부의 사진이며, Fig. 20는 실제품을 마찰용접으로 실험하는 마찰용접공정과 마찰용접 공정 완료 후 일체화된 피스톤 로드 사진을 보여준다.

실험에서 사용된 마찰용접 공정변수는 공정해석에 사용된 시뮬레이션 조건 1(플라이휠 에너지:  $1.8 \times 10^5$  N-m, 플라이휠 관성모멘트:  $1.054$  N-m<sup>2</sup>, 마찰하중: 2,500 kN, 압하하중: 3,500 kN)을 선택하여 실험을 하였다. 시뮬레이션 조건 3은 마찰시간, 압하하중, 압하길이가 해석 결과 중 최적의 조건이었다.



Fig. 17 Inertia friction welding machine





Fig. 18 Fixed appearance of rotating part



Fig. 19 Fixed appearance of stationary part

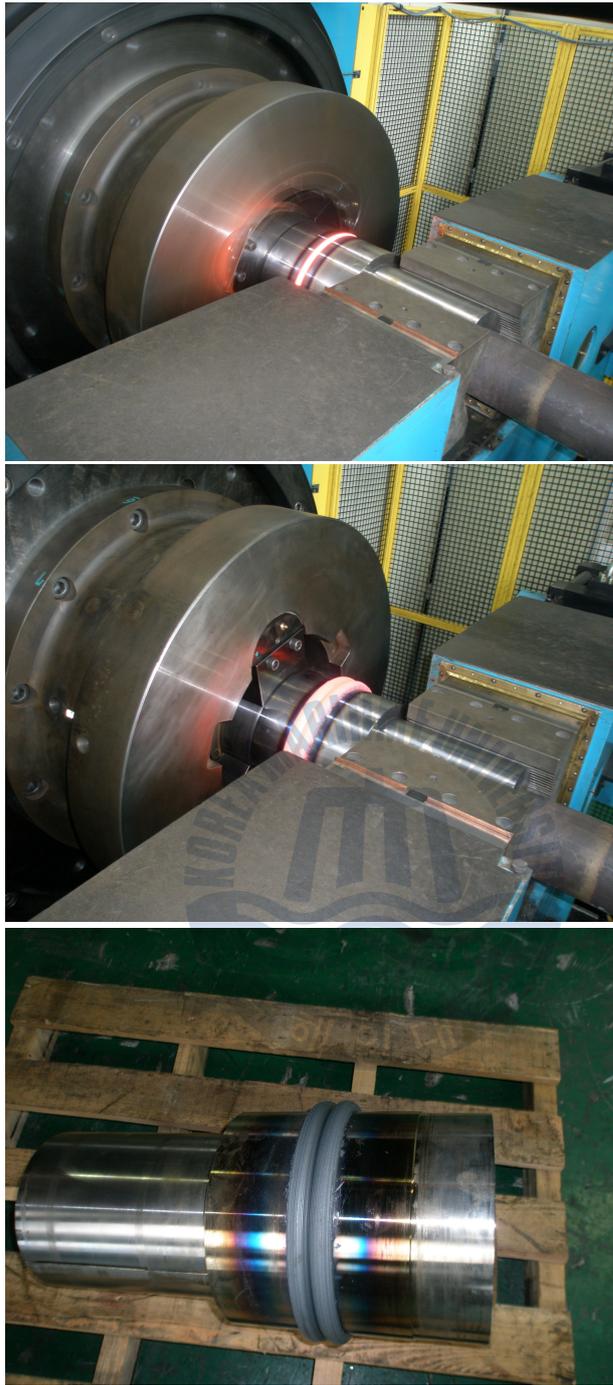


Fig. 20 Manufactured piston rod by friction welding processing

## 4.2 마찰용접부 특성 평가

피스톤 로드는 고온, 고압, 열적 기계적 반복하중에 의한 가혹한 환경에서 작용되는 부품이다. 실제 마찰용접으로 제작된 부품이 실제 환경에 적용되었을 경우 현재 일체화로 제작되는 부품보다 품질이 같거나 우수하여야 한다. 그래서 마찰용접으로 제작된 대형 피스톤 로드의 용접부 특성을 평가하고 마찰용접품에 대한 신뢰성 평가가 필요하다. 용접부 특성 평가는 금속학적, 기계적 특성을 평가하였다. 용접부에 대한 미세조직 변화 관찰로 금속학적 특성을 평가하고 인장, 경도, 피로 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. Fig. 21는 마찰용접된 피스톤 로드를 도시하였으며 용접부의 위치를 표시하고 있다.

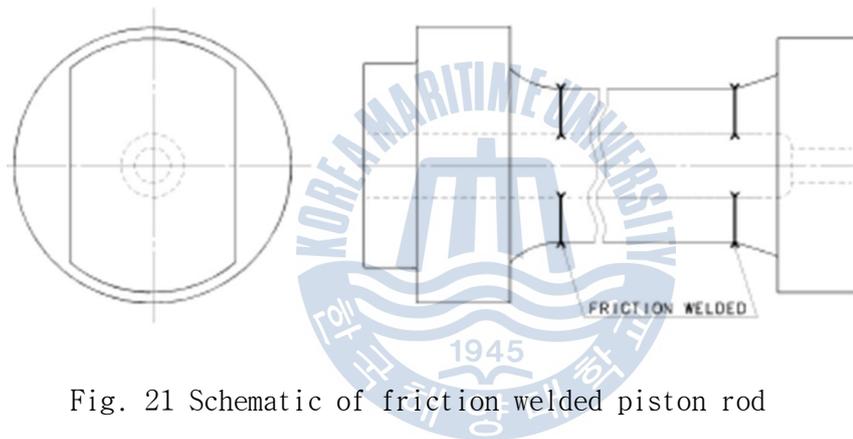


Fig. 21 Schematic of friction welded piston rod

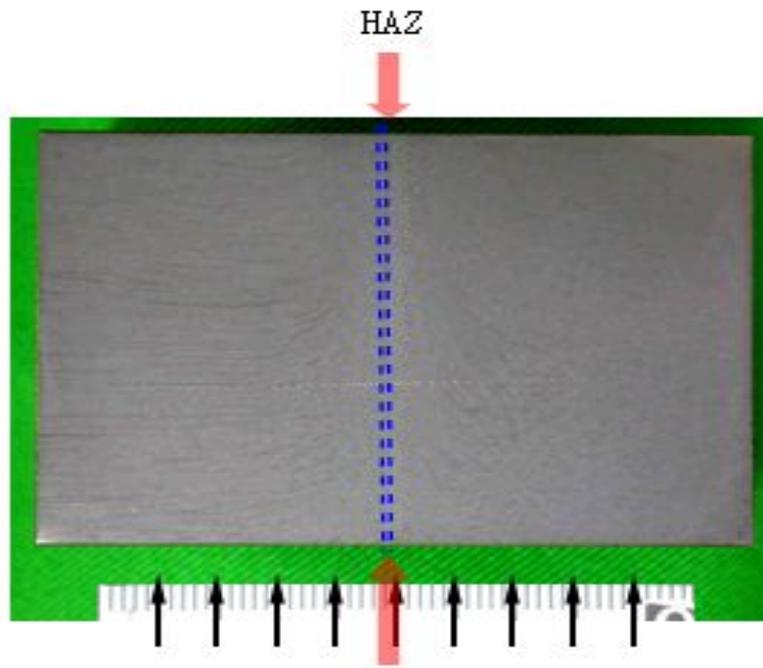
### 4.2.1 금속학적 특성평가

마찰용접부 최적화 구축을 위한 중공형태 AISI4140합금 마찰용접을 실시하여 중공형태의 마찰용접 최적화를 구축하였다. 따라서 이에 따라 마찰용접부 특성평가는 금속학적, 기계적 특성을 평가하였다. 용접부에 대한 미세조직 변화 관찰을 통한 금속학적 특성을 평가하고 경도, 인장, 피로시험을 통해 기계적 특성을 평가 하였다.

중공 마찰용접된 용접부 및 모재의 미세조직은 광학현미경(OM: optical microscope)을 사용하여 각각 위치 변화를 분석하였다. 이는 마찰용접시 석출상의 유무, 미세조직의 형상, 페리이트상의 상분을 변화를 시각적으로 비교하기 위해서이다.

시편은 연마지를 사용하여 습식연마를 하고 1 $\mu$ m 다이아몬드 페이스트와 메틸계 윤활제를 연마포에 도포하여 정마 하였다.정마 후 나이탈용액(C2H5OH 100ml +HNO3 2ml)으로 화학 에칭 후 미세조직을 관찰하였다. Fig. 22 는 모재와 마찰용접부의 거시조직 사진이다. 용접부 경계면에 따라 마찰용접시 나타나는 두 소재의 열영향(heat affected zone)부분이 아주 미세하게 나타남을 알수 있었고, 용접부 수직단면에서 용접결함이 없음을 확인하였다. Fig. 23는 모재와 마찰용접경계면에서 15mm위치에서 관찰된 미세조직사진이며 원소재에 조직인 마르텐사이트(martensite)조직으로 관찰되었다. Fig. 24, Fig. 25는 모재와 마찰용접경계면에서 10mm위치 5mm 에서 관찰된 미세조직사진이며 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다. 용접경계면에서 15mm에서 10mm까지의 미세조직은 마찰용접시 발생한 열영향에 의한 어떤 조직적 변화가 없는 원소재 마르텐사이트 조직과 일치하였다. Fig. 26는 용접경계면을 관찰된 미세조직사진이며 오스테나이트(austenite)를 임계냉각속도 이상으로 급랭시키면 형성되는 마르텐사이트 침상조직이 생성된다.

이는 두 모재가 마찰용접시 마찰열에 의해서 온도가 1200 $^{\circ}$ C 수준의 단조온도까지 올라갔을때 대용량의 유압을 가해서 압접을 시키므로 용접부위를 단련 효과 및 빠른 속도에 냉각속도에 의해 마르텐사이트 침상조직이 됨을 알 수 있다.



F.W JOINT

Fig. 22 Microstructure on vertical section

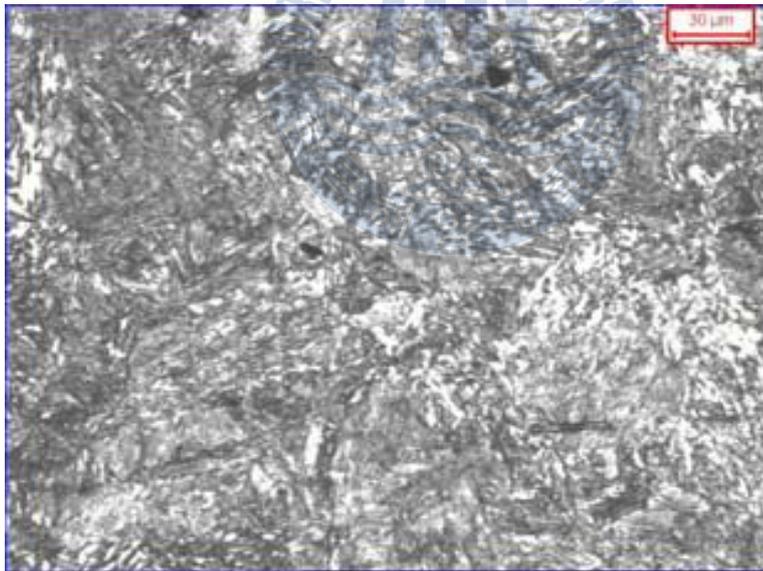


Fig. 23 Microstructure at 15mm from friction welding joint

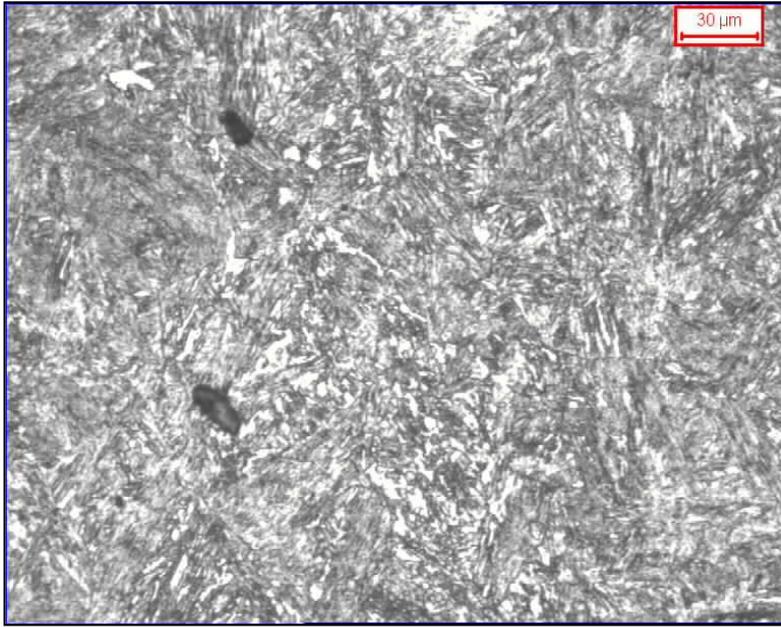


Fig. 24 Microstructure at 10mm from friction welding joint

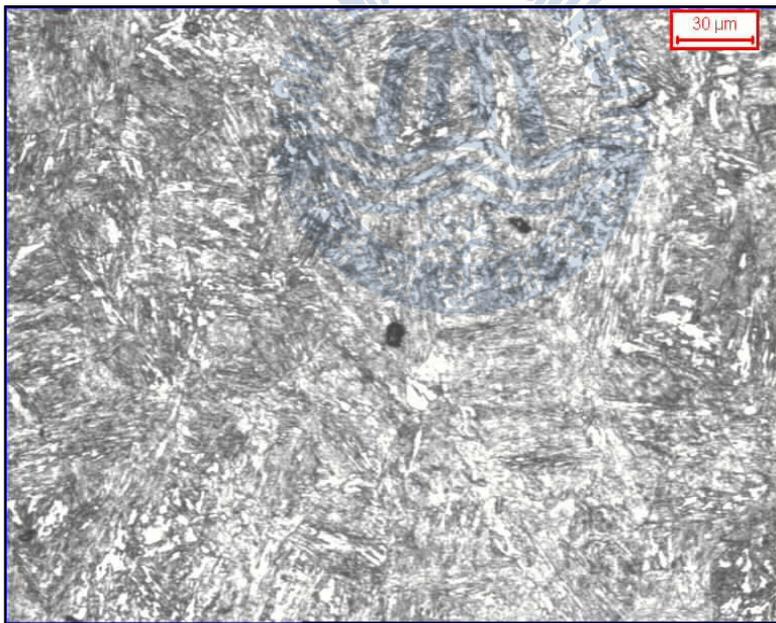


Fig. 25 Microstructure at 5mm from friction welding joint

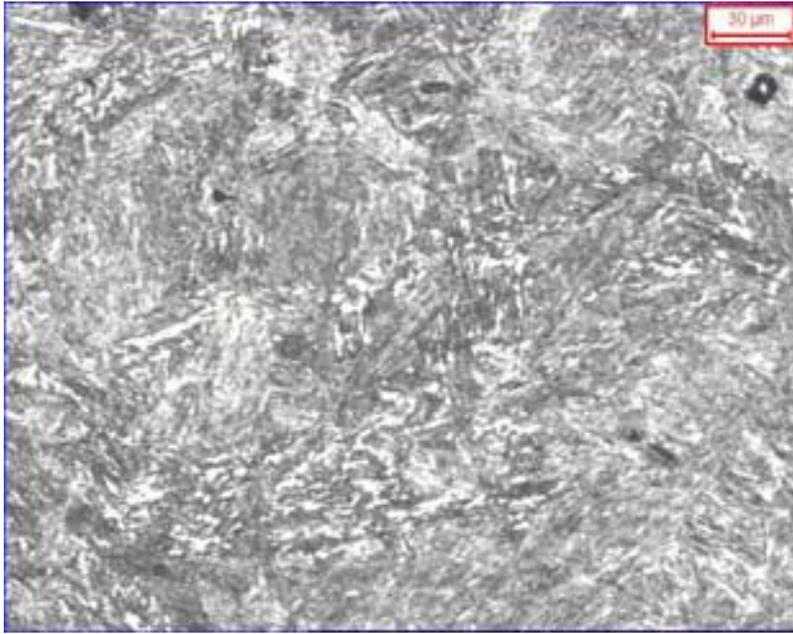


Fig. 26 Interface of friction welding joint



#### 4.2.2 인장 특성 평가

마찰용접된 중공부 용접부에 대한 기계적 물성특성을 관찰하기 위하여 원소재 인장시험, 마찰용접 인장시험을 각각 시험을 하였다.

인장시험은 직경 12.5mm, 표점거리 50mm인 표준시편을 사용하여 시험을 하였다. 상온에서 접합부의 기계적 특성인 항복, 인장강도와 연신율, 단면수축률을 평가하였다.

Table 8과 Table 9은 원소재와 마찰용접시편 인장시험에서 구한 값들을 도식화 하였다. 인장강도는 용접부의 인장강도가 조금 더 높았으며 항복강도 또한 용접부의 항복강도가 조금 더 높았다. 이로 인해 용접부의 인장강도가 모재의 인장강도보다 같거나 우수하다고 판단할 수 있었다.

Table 8 Results of tensile test for original material

Inspection Item		Tensile Strength	Yield Strength	Elongation	Reduction of area
Unit		(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
Specimen	Max	830			
	Min	730	530	13	
Result		782	538	14	36

Table 9 Results of tensile test for welded joint

Inspection Item		Tensile Strength	Yield Strength	Elongation	Reduction of area
Unit		(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
Specimen	Max	830			
	Min	730	530		
Result		791	548	9	26

#### 4.2.3 경도 특성 평가

경도시험은 마찰용접후 용접부의 응력제거(Stress Relieving) 620℃에서 8시간 유지후 200℃까지 로냉 후 경도변화를 살펴보았다. 경도시험은 5kg의 하중으로 하여 1mm간격으로 압입자를 10초 동안 가압하여 측정하였고, Fig. 27는 마찰용접 중공상태 소재의 측정된 경도분포를 나타내었다.

AISI4140 중공형태 소재보다는 경도값이 높게 관찰되었고, 마찰경계면에 따라 경도에 크게 변화가 없는 것으로 관찰하였다.

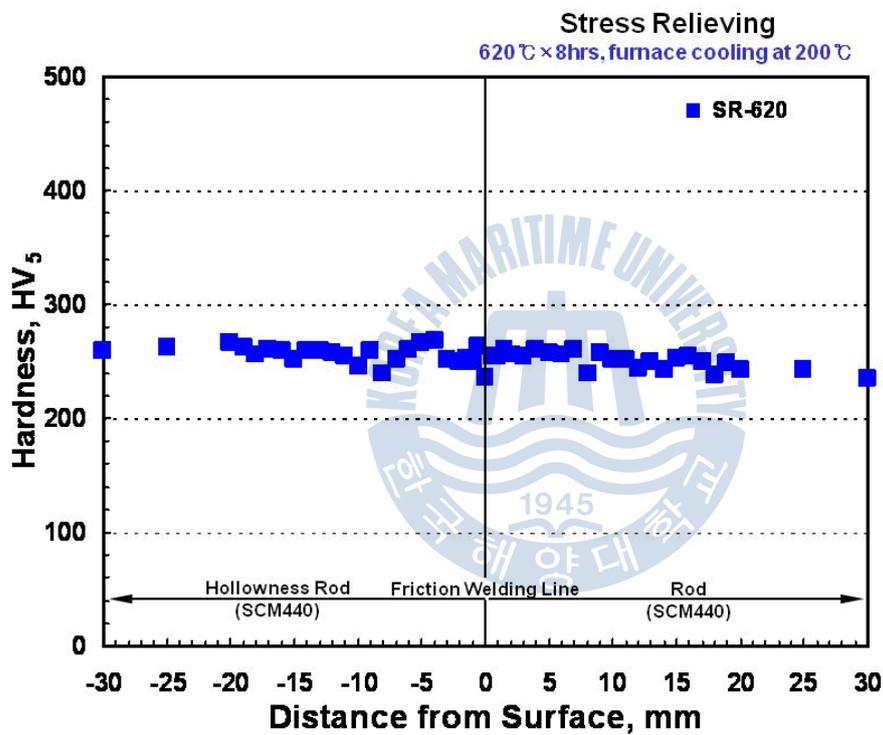


Fig. 27 Micro-Vickers hardness distribution for welded joint

#### 4.2.4 피로 특성 평가

마찰용접된 증공부 용접부에 대한 피로한도 특성을 관찰하기 위하여 원소재 피로한도, 마찰용접 피로한도를 회전 굽힘 피로시험기를 사용하여 시험을 하였다.

피로시험은 시험 개수의 제한으로 인해 S-N선도의 경사부에서는 외곽부 시험편과 내곽부 시험편을 섞어서 시험하였다.

피로 시험기는 회전 굽힘 피로시험기를 사용하였고 피로시험편(직경 12 mm)은 마찰용접부가 중앙에 오도록 가공하였다. 피로시험편은 먼저 마찰용접을 실시한 후 단면에서 적당한 크기로 길이방향으로 절단하고 황삭과 정삭을 거쳐서 가공되었다. 시험편의 치수는 Fig. 28에 나타내었다. 피로시험기의 회전 속도는 2500 rpm으로 설정하였다.

원소재의 실험 결과는 Table 10 에 나타내었고 접합부의 실험 결과는 Table 11 에 나타내었다. 앞의 두결과를 바탕으로 용접부와 원소재의 S-N커브 작성, 비교를 Fig. 29에 하였다.



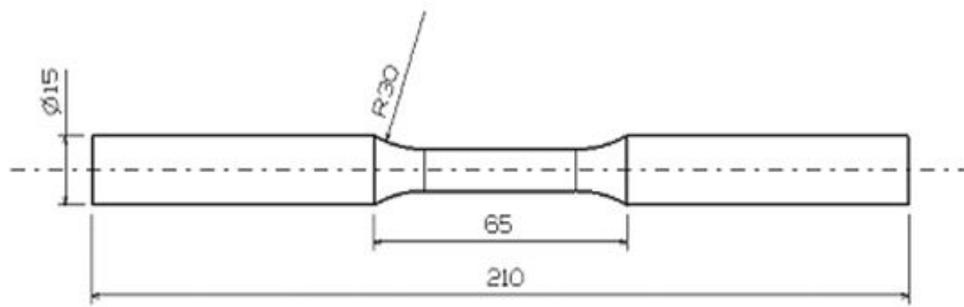


Fig. 28 Schematic of fatigue test specimen on welded joint

Table 10 Fatigue life for original materials

Specimen No.	Weight (Kg)	Stress (MPa)	Number of Cycle	Fracture
F1	18	25.16	1e7	x
F2	20	27.95	1e7	x
F3	21	29.35	4.3e6	o
F4	22	30.75	5.8e5	o
F5	24	33.55	4.7e4	o
F6	26	36.34	1.6e4	o
F7	28	39.14	4.1e3	o
F8	30	41.93	2.3e3	o

Table 11 Fatigue life for welded joint

Specimen No.	Weight (Kg)	Stress (MPa)	Number of Cycle	Fracture
F1	20	27.95	1e7	x
F2	21	29.35	1e7	x
F3	22	30.75	1e7	x
F4	23	32.15	3.2e6	o
F5	25	34.94	2.3e5	o
F6	28	39.14	5.8e3	o
F7	30	41.93	3.6e3	o

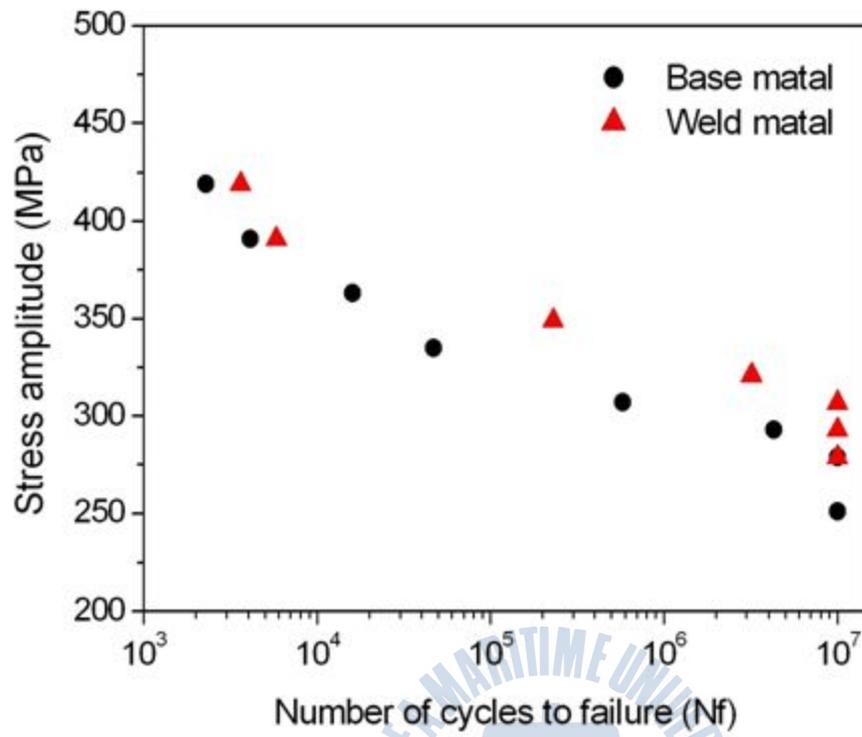


Fig. 29 S-N curve for AISI4140

## 5. 결론

대형 선박용 디젤엔진에 사용되는 피스톤 로드용 마찰용접에 의한 일체화에 대한 연구를 하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 마찰용접 공정해석을 다양한 공정조건에서 열점소성 유한요소법을 이용하여 수행하였으며 플라이 휠 에너지, 1차 및 2차 가압력에 대한 공정변수들의 성형조건 한계 및 범위를 확인하였다

(2) 선박용 대형 디젤엔진 피스톤 로드의 마찰용접에 대한 일체화를 성공적으로 수행하였다.

(3) 마찰용접으로 제작된 대형 피스톤 로드의 용접부 특성에 대한 신뢰성을 평가하였다. 용접부에 대한 미세조직 변화 관찰과 성분분석을 통한 금속학적 특성을 평가하고 인장, 경도, 피로 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다.

(4) 금속 현미경을 이용하여 접합부의 열발생과 변형에 의한 재결정과 금속유동을 확인하였다.

(5) 인장시험을 통해 용접부의 인장강도가 모재보다 같거나 우수하다고 판단되었으며 용접과정에서 소성변형이 발생하여 이로 인해 모재의 항복강도보다 높아졌음을 알 수 있었다.

(6) 경도시험을 통해 용접부에서 경도가 모재의 경도와 비교하여 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있었다.

(7) 로타리밴딩 피로시험을 통해 용접부의 피로 특성은 모재의 피로 특성과 비슷하게 나타났다.



## 참고문헌

- [1] 왕지석, 박태인, "전기 업셋팅 가공시의 열탄소성 해석에 관한 연구", 한국박용기관학회지, Vol. 18, No. 4, 1994, pp. 423~430.
- [2] 이홍수, "축대칭 전기업셋단조 공정의 유한요소 해석", 창원대학교 석사학위논문, 1994.
- [3] 강범수, 최민식, 배진영, 박노광, "초내열합금 밸브의 성형공정 설계 및 미세조직 분석" 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, 1996, pp. 99~104
- [4] D.K Kim, D.Y. Kim, S.H Ryu, D.J Kim, "Application of nimonic 80A to the forging of an exhaust valve head", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, 2001, pp. 148~152.
- [5] 조민수, "대형 디젤엔진 배기밸브의 전기업셋팅 공정 해석에 대한 연구", 한국해양대학교 석사학위논문, 2004.
- [6] 서창민, 서덕영, 이동재, "HSS-Co와 SM55C 이중 마찰 용접재의 피로강도에 관한 연구(1)", 대한기계학회논문집 제19회 제4호, 1995, pp. 918~928
- [7] Yun-Geun Koo, Pyung-Woo Shin and Nho-Kwang Park, "Nimonic 80A와 마르텐사이트계 내열강 마찰압접재의 조직 및 기계적 특성", 대한금속학회지, Vol. 34, No. 6, 1996, pp. 763~772
- [8] S.H. Kim, J.O. Ham, Y.B. Yun and N.K. Park, "Nimonic 80A와 내열강 마찰용접부의 미세조직과 고온 저주기 피로 특성", 대한금속학회지, Vol. 35, No. 9, 1997, pp. 1244~1253
- [9] 조현수, 서성재, "Inconel 713C와 SCM 440의 마찰용접", Journal of KWS, 제15권, 제6호, 1997, pp. 564~570.
- [10] Ahmet Z. Sahin, Bekir S. Yibas, M. Ahmed, J. Nickel, "Analysis of the Friction Welding Process in Relation to the Welding of Copper

- and Steel Bar", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 82, 1998, pp. 127~136.
- [11] 김의환, 민택기, "스테인리스강(STS304)과 알루미늄합금(A16351) 마찰용접부의 기계적 특성에 관한 연구", 한국공작기계학회지 제9권 제4호 2000. 8.
- [12] 강성보, 민택기, "탄소강(SM45C)과 알루미늄합금(A6063)의 마찰용접성에 관한 연구", Journal of KWS, Vol. 16, No. 2, 1998, pp. 100~106.
- [13] 강성보, 윤병수, 민택기, "삽입재를 사용한 A2024-T6와 SM45C의 마찰용접에 관한 연구", Journal of KWS, Vol. 16, No. 5, 1998,
- [14] 김유철, 박정웅, "티탄과 알루미늄의 마찰용접에서 발생하는 잔류응력·소성변형", Journal of KWS, Vol. 18, No. 5, 2000, pp. 624~629.
- [15] P.D. Sketchley, P.L. Threadgill, I.G. Wright, "Rotary friction welding of an Fe<sub>3</sub>Al based ODS alloy", Materials Science and Engineering A329-331, 2002, pp. 756~762.
- [16] Antonio A.M. da silva, Axel Meyer, Jorge F. dos Santos, Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski, Telmo R. Strohaecker, "Mechanical and Metallurgical Properties of Friction welded TiC Particulate Reinforced Ti-6Al-4V", Composites Science and Technology, Vol. 64, 2004, pp. 1495~1501.
- [17] D.G. Lee, K.C. Jang, J.M. Kuk, I.S. Kim, "Fatigue Properties of Inertia dissimilar Friction-welded Stainless Steels", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155-156, 2004, pp. 1402~1407.
- [18] V.V. Satyanarayana, G. Madhusudhan Reddy, T. Mohandas, "Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels", Journal of Materials Processing Technology 160, 2005, pp. 128~137
- [19] Ho-Shin Jeong and Takeshi Shinoda, "Fundamentals and Basic

Application of Friction Welding", Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, 1997, pp. 1~12.

- [20] "Manufacturing Technology, Inc. catalog"
- [21] T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, "Metal forming fundamentals and applications", American Society for Metals, 1983.
- [22] S. Kobayashi, S.I. Oh and Altan, "Metal forming and the finite-element method", Oxford University Press, 1989.
- [23] 조종래, "3차원 열간단조의 열-점소성 유한요소해석", 한국과학기술원 박사학위논문, 1993.
- [24] O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, "The Finite Element Method", Vol. 2, London, McGraw-Hill Book Company, 1991.
- [25] "Special metal catalog".
- [26] "DEFORM 2D manual", SFTC.
- [27] Ho-Seung Jeong, Jong-Rae Cho, Jung-Seok Oh, Euong-Nam Kim, Sung-Gyu Choi and Man-Young Ha, "Inertia Friction Welding Process Analysis and Mechanical Properties Evaluation of Large Rotor Shaft in Marine Turbo Charger", International Journal Of Precision Engineering and Manufacturing Vol. 11, No. 1, pp. 83~88
- [28] H. S. Jeong, J. R. Cho and H. C. Park, "Development of Dissimilar Inertia Welding Process of Large Superalloy Spindle", Key Engineering Materials Vols. 345-346 (2007)pp. 1429-1432

## 감사의 글

대학 학부 졸업 후 15년 만에 도전한 석사 과정에 여러 가지로 부족한 점이 많은 저를 열정과 따뜻한 관심으로 헌신적인 지도를 하여 주신 조종래 지도교수님께 먼저 감사의 인사를 올립니다. 그리고 본 논문 심사 과정에서 많은 조언으로 지도해 주신 왕지석 교수님 및 최일동 교수님께 감사를 드립니다.

또한, 각종 Simulation 및 자료 정리에 도움을 주신 정호승 박사, 손창우씨의 전산고체역학 실험실 연구원 모두에게 진심으로 고마움을 표하고 싶습니다.

저에게 이러한 배움의 기회를 부여한 현대중공업 및 엔진설계실 김응성 상무님, 김주태 상무님, 김창곤 상무님, 손진록 상무님, 김발영 부장님 이외 대형엔진설계부 모든 동료 분들에게도 "Many thanks!"라는 표현으로 감사의 인사를 올립니다. 또한, 바쁜 업무 속에서도 지속적으로 배려를 하여주신 윤갑식 부장님, 김관주 차장님 및 고참의 업무 공백을 묵묵히 업무를 잘 수행하여준 김형태 대리 고맙습니다.

본 연구의 시험편의 제작을 적극 지원하여 주신 케이에스피 이상욱 전무님, 최성규 부장님 이외 전 임직원에게도 감사의 인사를 올립니다. 뒤 늦은 본인의 학업에 따뜻한 관심과 걱정을 하여 주시고 인생의 선배로서 따뜻한 조언을 하여 주신 정창근 사장님, 이동훈 차장님, 윤영기 사장님, 김상훈 사장님, 조병조 상무님, 김세영 사장님, 김동탁 부장님, 권영괄 사장님, 금순모 사장님, 정재영 사장님, 김병주 사장님께 감사를 드립니다.

현대중공업 엔진사업부를 멋진 회사로 만들어 보자고 17년 전 신입사원 시절 결성된 우리 힘셈 동기들, 연구소 한명섭 책임, 황종현 책임 모두 감사드립니다.

항상 상식이 통하는 범위에서 행동하고 몸조심을 당부하셨던 아버지, 어머니, 항상 큰 믿음으로 지켜 봐주시는 장인어른, 장모님 감사를 드립니다.

바쁜 저를 대신해서 집안의 대소사를 챙겨주는 큰누나, 작은 누나 및 자형들, 가까이에서 소주 한잔하면서 격려해준 작은 동서, 처형, 처남 등 울산 가족들에게도 감사를 드리며, 뒤 늦은 신랑 공부 시킨다고 고생한 사랑하는 아내 김정희씨 정말 고맙고, 내년이면 중학교에 입학하는 내 딸 건영, 오늘 아침 매미처럼 긴 베개에 매달려 자고 있는 모습이 유독 귀여웠던 내 아들 동은, 건영이와 동은이가 항상 밝고 건강하게 자라주길 바라면서 감사의 글을 마무리하겠습니다.

2010년 12월 오 중 석

