

## 열간 단조 제품 A694-F70 플랜지의 항복강도 향상

우타관<sup>1</sup> · 이현우<sup>2</sup> · 전충환<sup>3</sup> · 장영준<sup>3</sup> · 김 철<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2010년 9월 27일, 원고수정일 : 2010년 11월 6일, 심사완료일 : 2010년 11월 6일)

### Improving Yield Strength of A694-F70 Flange Manufactured by Hot Forging Process

Ta-Kwan Woo<sup>1</sup> · Hyun-Woo Lee<sup>2</sup> · Chung-Hwan Jeon<sup>3</sup> · Young-June Chang<sup>3</sup> · Chul Kim<sup>†</sup>

**요약** : 용접 넥 플랜지는 파이프간의 상호연결에 널리 사용되고 있다. 이 플랜지는 열간 단조 공정으로 제작되며, 심해에서 고압이 요구되는 분야에 사용되는 경우 플랜지 기저부 및 목 부분에 높은 항복강도가 요구된다. 일반적으로 항복강도 향상을 위해 탄소함유량을 높이면 고 강도를 얻을 수 있으나, 용접이 요구되는 제품의 특성상 탄소함유량을 최대 0.47로 제한함으로써 고용체 강화에 의한 강도 향상에는 한계가 있다. 이러한 경우 탄소 함유량의 변화 없이 강도를 향상시킬 수 있는 결정립 미세화 강화를 이용하여 제품의 항복강도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 다구찌 기법을 통해 최적의 결정립 미세화를 위한 단조공정을 제시하고 타당성을 검토하기 위해 유한요소해석을 수행하였다.

**주제어** : 열간 단조, 플랜지, 결정립 크기, 항복강도, 다구찌 기법

**Abstract** : A welding neck flange is widely used for an interconnection between pipes. It is produced by a hot forging process, and required high yield strength under the high pressure condition, like a deep-sea. Generally, to increase yield strength, a increasing of carbon content is used, however a carbon content of welding neck flange is limited to 0.47. So, in this study, a strengthening by grain refinement without changing carbon content is used to increase yield strength. Taguchi method and FEM are used for the optimization of forging process and the experiment for the yield strength of the prototype with the optimal forging process is performed for validity.

**Key words** : Hot forging, Flange, Grain size, Yield strength, Taguchi method

### 1. 서 론

열간 단조 공정으로 제작되는 용접 넥 플랜지 [1~2]는 파이프간의 상호연결에 사용되며 현재 공조설비, 산업기계 등의 분야에 널리 적용되고 있다. 특히 심해와 같이 고압이 가해지는 환경에서 사용되는 경우, 플랜지의 기저부에 높은 항복강도가 요구된다. 이에 **Figure 1**과 같이 기저부는 높

은 응력에 견딜 수 있도록 설계되어 있으며, ASME CC(Code Case) SA 370(3)에서는 강도 측정 부위를 플랜지 기저부로 제시하고 있다. 그러나 현재 국내 A694-F70 grade 단조 플랜지는 작업자의 경험이나 시행착오에 의존하고 있기 때문에 요구되는 항복강도를 얻지 못하고 있으며, 이를 위한 연구 및 기술 개발 현황도 미흡한 실정이다.

일반적으로 항복강도 향상을 위해 탄소함유량을

<sup>†</sup> 교신저자(부산대학교 기계기술연구원, E-mail:chulki@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2489)

1 부산대학교 기계공학과 대학원

2 부산대학교 창의공학시스템학과

3 부산대학교 기계공학부

높이면 고강도를 얻을 수 있으나, 용접이 요구되는 제품의 특성상 탄소당량을 최대 0.47로 제한함으로써 고용체 강화에 의한 강도 향상에는 한계가 있다. 이러한 경우 결정립 재료의 조성변화 없이 강도를 향상시킬 수 있는 결정립 미세화 강화를 이용하여 제품의 항복강도를 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 A694-F70 grade 플랜지 열간 단조에 있어 가장 중요한 공정 변수인 단조비, 소재온도, 펀치속도에 따른 내부 결정입자의 크기를 유한요소해석을 통해 분석하고 다구찌법(Taguchi method)을 이용하여 각 공정 변수들이 결정입자의 크기에 미치는 영향도 분석을 통해 입자의 크기가 최소화되는 최적의 열간 단조공정을 제시하였다. 또한 최적 설계된 공정에 의해 실제 A694-F70 grade 플랜지를 제작하여 항복강도를 측정하였다.

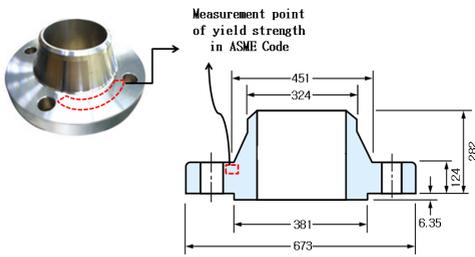


Figure 1: Welding neck flange.

## 2. 이론적 배경

ASTM A694-F70 Grade 단조 플랜지의 항복강도 개선을 위해 결정립 미세강화를 이용하였다. 결정립 미세강화기구는 결정립 재료의 조성변화 없이 강화되는 기구로서 플랜지 성형 시 고온 압축에 의해 전위가 축적되며 곧바로 재결정이 이루어진다. 이러한 동적 재결정 과정을 통해 결정립 크기가 미세화가 되고 소재의 기계적 성질이 향상된다. 이는 식 (1)의 Hall-Petch 관계식 (Hall-Petch relationship)을 통하여 알 수 있다.

$$\sigma = \sigma_i + kd^{-1/2} \quad (1)$$

$\sigma$  : 항복강도

$\sigma_i$  : 입내에서 전위의 이동을 방해하는 마찰응력

$k$  : 비례상수

$d$  : 결정립 직경

식 (1)에서는 대부분의 결정립 재료의 항복강도는 결정립 크기가 작아질수록 증가한다는 것을 의미한다.

## 3. 열간 단조 공정 해석

### 3.1 플랜지 제조 공정

주조 공정을 통해 얻어진 소재는 코킹, 단조, 피어싱, 열처리 공정 등을 통해 완제품이 얻어지며 이에 대한 개략적인 공정도를 Figure 2에 나타내었다.

상기의 공정 중에 결정립 크기에 영향을 미치는 공정은 코킹, 단조, 열처리 공정이다. 이 중 유한요소해석을 이용하여 결정립 크기의 예측이 가능하며, 이를 실험을 통해 확인할 수 있는 단조공정에 대하여 연구를 수행 하였다.

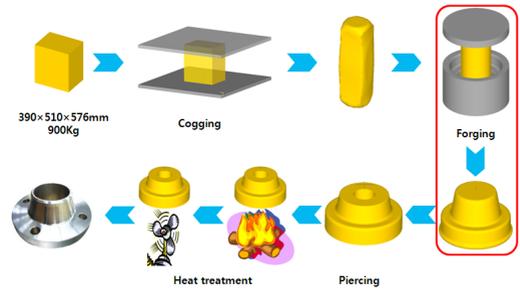


Figure 2: Schematic diagram of hot forging process for flange

### 3.2 모델링 및 경계조건

단조 공정 해석을 위한 모델은 Figure 3과 같다.

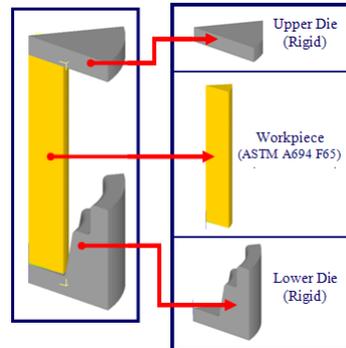


Figure 3: Modeling for numerical analysis

성형해석은 강소성 유한요소해석 상용코드인 DEFORM-3D를 사용하였고, 소재에 대한 열/탄성/소성 물성 획득을 위해 JMatPro를 사용하였다. ASTM A694 F70의 성분과 상온 항복강도, 결정립 크기, 오스테나이트화 온도 등을 입력하여 각 상에서의 탄성, 소성, 열 물성 값 및 유동곡선을 Figure 4와 같이 획득하였다.

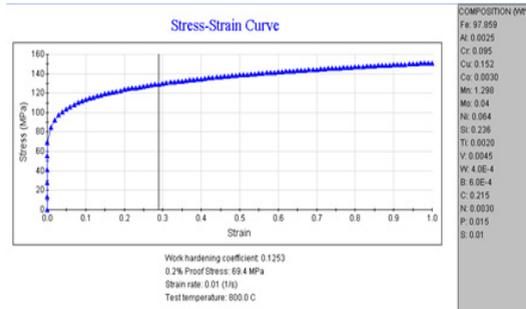


Figure 4: Stress-Strain curve on the high temperature obtained from JMatPro

소재 치수는 지름 411mm, 높이 864mm이며, 급형 온도는 200℃, 주위 온도는 25℃로 하여 단조 공정 중 열전달을 고려하였다. 결정입자 크기변화를 관찰하기 위해 입자의 크기는 100 $\mu\text{m}$ 로 초기화하였다[4].

### 3.3 현재 공정조건에 대한 유한요소해석

현장에서 적용중인 공정변수는 Table 1과 같으며, Figure 5에 현장에서 적용 중인 공정 변수에 대한 유한요소해석 결과를 나타내었다. 플랜지 기저부의 평균 결정입자 크기는 47.0 $\mu\text{m}$ 이며, 기저부에서 국부적으로 결정입자가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 1: Process variables of the current forging process

Process variables	Forging ratio	Punch speed (mm/s)	Temperature of billet(℃)
	1.5	10	1000

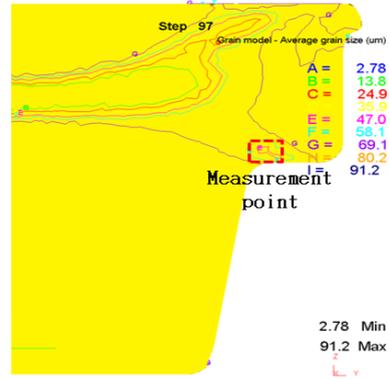


Figure 5: Grain size of the measurement point in the current forging process

## 4. 공정의 최적화

### 4.1 다구찌법을 이용한 최적설계

플랜지 기저부의 항복강도를 높이기 위해 결정입자 크기를 최소화하여야 한다. 이에 열간 단조 공정에서 중요 공정 설계인자로 선정된 단조비, 소재 온도, 펀치속도에 대한 수준은 현장에 적용되고 있는 공정조건, 좌굴이 발생하지 않는 범위(단조비 1.90, 펀치속도 25mm/s, 소재온도 1100℃ 이하) 및 가공장비의 용량을 기준으로 결정하여 Table 2에 나타내었다[5-6]. Minitab을 이용하여 Table 3과 같이 직교배열표(L16)을 얻었으며, 16가지 경우에 대한 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 2: Design factors for optimization

No.	Forging ratio	Punch speed (mm/s)	Temperature of billet(℃)
1	1.60	16	1000
2	1.70	19	1033
3	1.80	22	1066
4	1.90	25	1100

최적의 설계 값을 제시하기 위해서 다구찌 기법 중 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio, SNR) 개념을 이용하였다. 신호대 잡음비는 망소 특성(Smaller is better)에 의한 식으로 “식 (2)”와 같이 나타내어진다.

$$SNR = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

$n$  : 실험의 반복 횟수

$y$  : 특성치 (결정입자 크기)

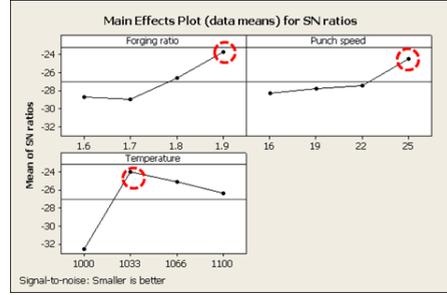
**Table 3:** L16(4<sup>3</sup>) orthogonal array for design of experiments

No.	Forging ratio	Punch speed (mm/s)	Temperature of billet (°C)	Grain Size (μm)
1	1.60	16	1000	56.1
2	1.60	19	1033	20.9
3	1.60	22	1066	21.0
4	1.60	25	1100	22.8
5	1.70	16	1033	22.5
6	1.70	19	1000	64.6
7	1.70	22	1100	21.5
8	1.70	25	1066	19.9
9	1.80	16	1066	17.9
10	1.80	19	1100	19.1
11	1.80	22	1000	56.0
12	1.80	25	1033	11.0
13	1.90	16	1100	20.1
14	1.90	19	1066	14.2
15	1.90	22	1033	12.4
16	1.90	25	1000	15.7

식 (2)에서는 특성치(결정입자 크기)가 작아질수록 신호대 잡음비는 커짐을 알 수 있다. 신호대 잡음비 결과를 근거로 각 공정변수의 변화에 따른 플랜지 기저부 결정입자 크기의 영향을 **Table 4**의 반응표 및 **Figure 6**의 주효과 그래프를 통해 요인을 분석하였다.

**Table 4:** Response Table for signal to noise ratios

No.	Forging ratio	Punch speed (mm/s)	Temperature of billet(°C)
1	-28.75	-28.29	-32.52
2	-28.97	-27.82	-24.04
3	-26.62	-27.48	-25.13
4	-23.72	-24.47	-26.37
Delta	5.24	3.82	8.48
Rank	2	3	1



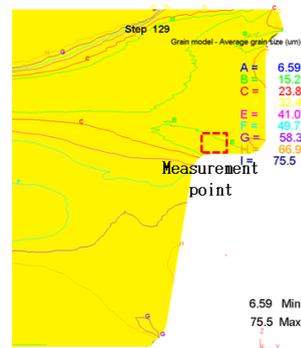
**Figure 6:** Main effects plot for SN ratios

신호대 잡음비 반응표는 효과의 상대적인 크기를 비교하여 델타 통계량을 기본으로 순위를 표시하였다. 델타 통계량은 각각의 공정변수로부터 가장 큰 평균에서 가장 작은 평균값의 차이이며 순위는 델타 값을 기본으로 정하였다.

반응표와 SN비로부터 **Figure 6**과 같이 주 효과의 그래프를 나타내었다. 주 효과 그래프는 망소 특성을 가지며 SN비에서 가장 큰 영향을 주는 공정변수는 소재온도(델타=8.48 순위=1)임을 알 수 있다. 그 다음 영향을 주는 공정변수는 단조비(델타=5.24 순위=2), 편치속도(델타=3.82 순위=3) 순이다.

**Table 5:** Optimal design values of hot forging

	Forging ratio	Punch speed (mm/s)	Temperature of billet(°C)
Optimal design value	1.90	25	1033



**Figure 7:** Grain size of the measurement point in the optimal process

최적 공정 조건을 제시하기 위해 각 공정변수마다 SN비가 가장 큰 수준을 선택하여 **Table 5**에 나타내었다. 최적 조건에 대한 해석 결과를 **Figure 7**에 나타내었으며, 해석 결과 기저부의 결정입자 크기는  $10.5\mu\text{m}$ 로 가장 작은 값을 얻을 수 있었다. 이는 기존 공정 조건에 대한 해석 결과인  $47.0\mu\text{m}$ 에 비해 결정입자 크기가 77.7% 감소하였다.

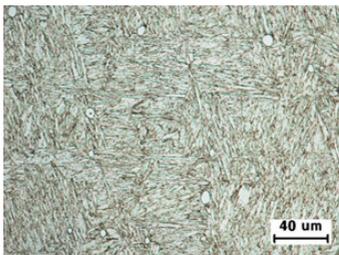
## 5. 시제품 제작 및 시험

다구찌법 및 유한요소해석을 통해 제시된 최적의 조건을 검증하기 위해 A694-F70 grade 열간 단조 플랜지 시제품 제작 및 기저부에 대한 물성평가를 수행하였다. 특히, 시제품 제작시 유한요소해석 결과의 타당성 검증을 위하여 단조공정 이외의 모든 공정은 동일한 조건으로 제작하였다.

기존 공정에 의한 플랜지 기저부의 금속 미세조직과 최적 공정에 의한 플랜지 기저부의 금속 미세조직을 **Figure 8**에 나타내었다. 최적 공정에 의한 플랜지 기저부의 미세조직이 기존 공정에 의한 플랜지의 미세조직보다 상대적으로 미세화되었고, 미세화 정도가 전체적으로 일정하게 나타났다. 최적화된 공정 변수에 의해 제작된 시제품은 **Figure 9**와 같으며 인장시험결과를 **Table 6**에 나타내었다.



**Figure 8(a):** Microstructure of the flange in the nonoptimal process



**Figure 8(b):** Microstructure of the flange in the existed process



**Figure 9:** ASTM A694-F70 Grade Flange according to the optimal process

**Table 6:** Tensile test results

	Tensile Stress(MPa)	Yield stress(MPa)	Elongation (%)
Test result	762	557	20

시험결과 인장강도 762MPa, 항복강도 557MPa, 연신율 20%를 나타내었으며, 기존의 공정에 의한 항복강도 445~455MPa와 비교하였을 때 약 24%의 항복강도 증가를 나타내었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 열간 단조를 이용하여 플랜지의 항복강도를 향상시키는 방법으로 결정립 미세화를 제시하였으며, 다구찌법과 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 다구찌법과 유한요소해석을 이용한 공정해석을 통하여 플랜지 기저부의 항복강도와 밀접한 관련이 있는 결정입자 크기에 대하여 중요 설계변수의 영향도를 분석한 결과 결정입자의 크기에 가장 큰 영향을 미치는 중요설계변수는 소재 온도이고 그 다음은 단조비, 펀치속도 순으로 나타났으며, 플랜지 기저부의 항복강도를 향상시킬 수 있는 최적의 열간 단조 공정조건은 단조비 1.90, 펀치속도 25mm/s, 소재온도 1033℃이다.

2) 유한요소해석을 수행한 결과 기존의 열간 단조 공정에 의한 플랜지 기저부의 결정입자 크기 ( $47.0\mu\text{m}$ )에 비해 본 연구에서 제안한 최적 단조 공정 조건에서의 결정입자 크기가  $15.2\mu\text{m}$ 로서 약 32%의 크기로 감소하였다.

3) 제시된 최적 공정조건을 검증하기 위해 열간 단조 플랜지의 시제품 제작 및 물성평가시험을 수행한 결과 인장강도 762MPa, 항복강도 557MPa,

연신율 20%로, 이는 기존 공정에 의한 항복강도 445~455MPa 보다 약 24% 증가하였다.

## 후 기

본 사업은 지식경제부의 대학전력연구센터 지원 사업의 지원으로 수행된 연구결과임.

## 참고문헌

- [1] Y. S. Chang, J. H. Choi, B. D. Ko, H. Y. Lee and B. B. Hwang, "A study on the process sequence design of a short-neck flange", J. Kor. Soc. Precision Eng. vol. 17, no. 6, pp. 127-134, 2000(in Korean).
- [2] G. D. Choi, W. J. Kang, W. B. Bae and J. R. Cho, "A study on the forming process development of a long-neck flange using a long pipe", J. Kor. Soc. Precision Eng. vol. 19, no. 8, pp. 212-219, 2002(in Korean).
- [3] ASME Case Code SA 370 code, "Test methods and definitions for mechanical testing of steel products", pp. 643-701, 2007.
- [4] G. P. Kang, K. H. Lee and S. U. Lee, "Computer simulation of recrystallization and grain growth during hot forging process of waspaloy", Trans. Mater. Process. vol. 17, no. 2, pp. 113-116, 2008(in Korean).
- [5] B. C. Hwang, W. H. Lee, W. B. Bae and C. Kim, "Process planning and die design for the super hot forging product, the piston crown used in marine engine", Trans. Mater. Process. vol. 17, no. 8, pp. 600-606, 2008(in Korean).
- [6] H. K. Moon, S. C. Moon, J. G. Eom and M. S. Joun, "Optimization of a hot forging process using six sigma scheme and computer simulation technology considering required metal flow lines",

Trans. Mater. Process. vol. 14, no. 9, pp. 798-803, 2005(in Korean).

- [7] P. J. Ross, "Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design", 2<sup>nd</sup>Ed., McGraw-Hill, NewYork, USA, 1996.

## 저 자 소 개



### 우타관(禹他官)

1994년 경성대학교 경영학과 졸업(학사), 1998년 University of Scranton MBA(석사), 2002년 The Pennsylvania State University 금속공학과 졸업(학사), 2007년~현재 부산대학교 기계공학과 박사과정



### 이현우(李賢優)

2008년 동의대학교 기계공학과 졸업(학사), 2010년 부산대학교 창의공학시스템 졸업(석사), 2010년~현재 부산대학교 창의공학시스템 박사과정



### 전충환(全忠煥)

1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사), 1994년 부산대학교 졸업(박사), 2003~현재 부산대학교 기계공학부 교수



### 장영준(張英俊)

1975년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1977년 부산대학교 대학원 졸업(석사), 1986년 동경공업대학교 졸업(박사), 1978~현재 부산대학교 기계공학부 교수



### 김철(金徹)

1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사), 1997년 부산대학교 졸업(박사), 2003년~현재 부산대학교 기계기술연구원 교수, 2010년~현재 부산대학교 산학협력단 기획부단장