냉연/표면처리 설비의 기본 엔지니어링 기법에 대한 고찰

Study on Basic Engineering Technique of Cold Rolling and Coating

文 景 植*
Moon, Kyoung Shik

* 산업기계기술사, 포스코개발(주) 설계본부 기계배관팀 차장.

1. 서론

일반적인 산업 Plant의 Engineering과 마찬가지로 제철 Plant를 공급하기 위하여 수행되는 일련의 작업은 Basic Engineering(BE), Basic Design(BD), Detail Design(DD) 및 Purchasing, Erection, Testing 등 순차적인 단계로 진행된다. Engineering사의 핵심기술은 기술적인 관점에서 유기적인 복합 기능을 발휘하는 Plant를 제작하기 위하여 요소 기술들을 취합하는 System Engineering(SE) 기술이다. 단위 또는 요소기술의 보유는 단품 공급회사에 국한되며 종합 E & C 회사에 관한 충분조건이 아닌 필요 조건일 따름이다.

이와 같은 SE 및 BE 기법을 우리는 아직 확보하지 못한 수준이므로 국내에 설치되는 설비뿐만 아니라 해외로부터 발주되는 설비에 대하여 외국 전문사들이 주도권을 장악하고 있는 실정이다. 또한 제철 조업기술에 대하여 POSCO가 보유한 높은 수준의 제철 조업 기술 및 노하우를 고려할 때 제철 설비기술과 조업기술간에 기술적 불균형이 초래되고 있다.

이런 상황에서 우리는 축적된 제철조업기술을 바탕으로 제철분야에서 시너지 효과를 극대화하여 E & C의 수익성을 제고하기 위하여 제철설비 자력 엔지니어링 기술의 확보 필요성이 시급히 요구되고 있다.

현재, 기술을 보유하고 있는 해외 전문Engineering 및 공급사들은 제철설비의 기술 이전을 철저히 제한하고 있는 실정이므로 후발 E & C사로 출범하여 제철 Plant를 공급하는 우리 회사는 기본적으로 관련 BE 기술들을 자체 개발해야 한다. 단시일 내에 외국 전문사로부터 기술을 이전 받는 방법도 효과적이지만 기술이전 역시 그 기술을 받아들일 수 있는 바탕이 먼저 갖추어져 있어야 할 것이다.

본 연구는 제철설비 가운데 냉연 및 표면처리 설비의 BE에 관한 것으로서 관련 설비의 독자적인 공급능력을 확충하기 위한 목적으로 수행하였다. 냉연 및 표면처리는 일반적으로 기계장치(Mechanical Equipment : M), 전기장치(Electrical Equipment : E), 계측제어장치(Instrument Equipment : I), 그리고 시스템제어 및 전산장치(Computer : C) 등으로 구분된다.

여기서 기계장치는 다시 입측 부분(Entr Section), 중앙처리 부분(Center Proce Section) 그리고 출측 부분(Delivery Sectior 로 구성된다. 전기장치는 연동 구동되는 L 반의 Strip 속도 및 장력 제어를 담당하는

모터 및 제어기 그리고 각종 Fan 모터를 포함한다. 계측제어장치는 중앙처리부분의 기계장치에 대하여 그 특정 기능을 분산 제어하는 계측제어 시스템으로 구성된다. 그리고 Computer는 처리 Coil의 정보 Tracking 및 주요 Setup 모델의 복잡한 연산을 처리한다.

본 연구는 냉연 및 표면처리설비의 BE단계에 대한 Engineering Flow 및 각종 기계장치들의 기본설계 데이터를 산정 하는 세부 연산기법에 관한 것으로, 설비의 적정 생산용량, Speed Map, Tension Map, 주요 구동 모터의 제원과 입, 출측 Looper 용량, Tension Bridle Roll Unit등에 대한 설계 데이터 산정 기법 등이 포함되었다. 그리고 전기장치에 해당하는 고정도 장력 제어 기법을 제시하였으며, Strip의 사행을 회복시키는 Steering 장치의 제어기법 개발 내용도 포함되었다.

2. 냉연/표면처리설비의 BE 기법

2.1 설비의 기본 설정 조건

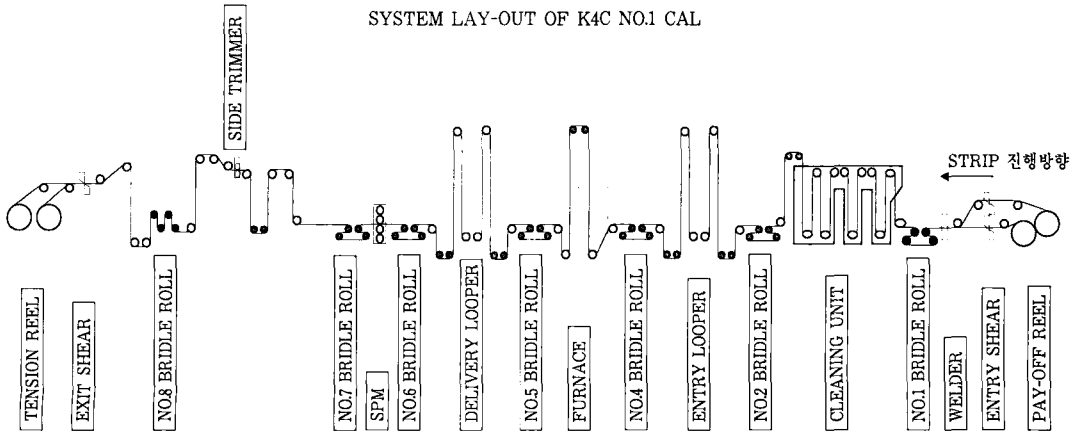
냉연 또는 제철설비를 발주하는 수요가(Costumer)는 일반적으로 다음과 같은 설비사양을 제시할 것이다.

- 설비 종류
- 년간 생산용량
- 처리강종(Product Mixture) 및 Size Mixture
- 조업조건(Operating Condition) : 조업시간 등
- 처리 Coil 조건 : Inner/Outer 직경, Strip 두께/폭 범위, 단중 범위
- 소둔설비시 Heat Cycle
- 설비 설치공간 조건

이상과 같은 조건과 함께 설계 및 공급자는 온도 및 기후에 따른 설계 고려사항을 감안하여 설치 지역조건도 파악해야 한다.

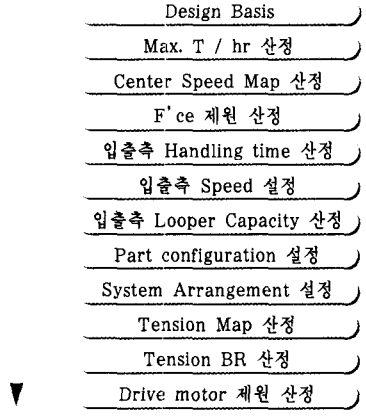
상기 조건을 분석한 결과가 여러 가지 설정된 조건을 충족시키는 설비의 구성이 불가능할 수도 있다. 이때는 수요가와 협의하여 기본 설정 조건을 가능한 한 범위 내로 조정할 필요가 있다.

〈그림 1〉에는 냉연설비의 일종인 연속소둔 설비의 General Layout를 하나의 예로 나타내었다.



〈그림 1〉 광양 4냉연 NO.1 CAL LAY-OUT

냉연 표면처리설비의 BASIC ENG'G FLOW



〈그림 2〉 Basic Engineering Flow

2.2 Basic Engineering에 대한 Data 산정 Flow

설비의 기본설정 조건으로부터 기본설계 Data를 도출하는 일반적인 BE 순서를 〈그림 2〉에 나타내었다.

2.3 시간당 생산용량 (Max. T/Hour : T/Hr) 산정

설비의 설계시에 가장 선행하여 산정을 요하는 요소는 설비의 시간당 생산용량인 Max. T/Hour이다. Furnace가 중앙처리부분의 중요 장치인 연속 소둔설비의 경우, Max. T/Hour은 다음과 같이 산출한다.

$$\text{Max. T/Hr} = \frac{\text{Annual Production Capacity}}{\text{Factor} \times \text{Operating Time}}$$

$$= \text{Ref. size} * \text{Max. speed of lowest strip Temp.}$$

여기서

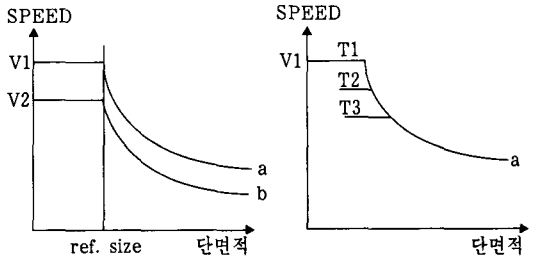
Factor = F1 x F2 x F3

F1 = Product Material Factor (~ 0.9)

F2 = Strip Thickness Factor (~ 0.9)

F3 = Speed Factor (0.6 ~ 0.9)

이다. 〈그림 3〉은 상기 Factor 가운데 F1, F2의 의미를 설명하기 위하여 나타내었다.



〈그림 3〉 Schematic Diagram in Explanation of Factor F1, F2

시간당 생산용량(Max. T/Hour : T/Hr) 산정식 예

$$\text{Max. T/Hr} = \frac{900{,}000}{0.9 * 0.9 * 0.7983 * 7139}$$

$$= 194.9 \text{ T/Hr}$$

여기서, 년간 생산량은 900,000톤이며, Speed Factor, F3은 0.7983 그리고 년간 조업시간 7139 Hr에 대하여 적정 최대 T/Hr는 194.9 T/Hr이다. 그러나 MHI사는 최종적으로 209 T/Hr로 설정하였다. 이것은 전술한 바와 같이 생산설비 관련 Factor F가 계산치로서 0.646인 반면, MHI는 0.60으로 설정하였기 때문이다. 따라서, MHI는 적정규모보다 10% 여유를 지닌 규모로 설계된 것으로 추정할 수 있다.

2.4 소둔로의 열용량 산정

소둔로를 포함하는 연속소둔설비의 경우 〈그림 3.1〉에서와 같이 상이한 강종 각각에 대한 Max. T/Hr을 산출하기 위하여 소둔로의 열용량을 산정 해야 한다. 이때 필요한 기본 설정조건은 강종별 최고 열처리 온도, 최고 열처리 온도에 해당하는 강종에 대한 설계치 온도, 그리고 가장 낮은 열처리 온도에 해당하는 강종에 대한 Max. T/Hr 등이다. 이와 같은 설정조건으로부터 소둔로의 열요량을 산정 하는 방법은 다음과 같다.

1) 순수 Strip가열에 소요되는 열량 산정 ; Q'H

먼저 가장 낮은 열처리 온도에 해당하는 강종에 대하여 순수 Strip 가열 소요열량 Q'H는 다음과 같다.

$Q'H = [T/Hr] \times [Tout - Tin] \times \alpha \times 10^3$ (Kcal/Hr)

여기서

Tout : Heating Zone의 출측 Strip 온도 (℃)

Tin : Heating Zone의 입측 Strip 온도 (℃)

α : Strip 비열 (Kcal/kg℃) = 0.1794이다.

2) 소둔로의 소요 열용량 산정 : Q'B

소둔로에서 Burner에 의하여 투입되는 열량 가운데, T4 강종의 경우 순수 Strip 가열에 소요되는 비율은 대략 0.55 이며, 나머지 0.45는 노벽 및 Duct 손실 0.1, 그리고 폐가스 열량 손실 0.35 등으로 손실된다.

Burner 투입열량 (1.0)

= Strip 수열량(η:0.55) + 노벽, Duc. 손실(0.1) + 폐 Gas 열량 (0.35)

이와 같이 T4 강종에 대한 소둔로의 열효율 η은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{Q'H}{Q'B} = 0.55$$

그리고 T3 강종에 대한 소둔로의 열효율 η은 0.5이므로 소요열용량 Q'B,T3는 다음과 같다.

$$Q'B,T3 = \frac{Q'H,T3}{0.5}$$

여기서 다음과 같은 조건이 성립해야 한다. 즉,

$Q'B, T3 \leq Q'B, T4$

3) 소둔로의 설계 열용량 산정 : Q'B,D

소둔로의 설계 최대 가열온도는 T3 강종에 대하여 750℃이고, 시간당생산량은 58.3T/Hr일때 설계열용량 Q'B,D은 다음과 같다.

$Q'B,D = 1/0.55 * 58.3 * (750 - 100) * 0.1794 * 10^3$

= 12360660 Kcal/Hr

4) 소둔로의 열용량 산정 : Q'B,E

소둔로의 최종 열용량은 설계열용량보다 여유치를 감안하여 설정하며 보통 10%의 여유를 둔다. 따라서 소둔로의 최종 열용량 설정치 Q'B,E는 다음과 같다.

$Q'B,E = 1.10 * Q'B,D$

= 13596726 Kcal/Hr

2.5 Speed Map 산정

냉연 및 표면처리 설비에 있어서 강종별, Strip Size별 Strip 처리 속도는 정해진 조업시간동안 이미 설정된 년간 생산량을 처리할 수 있도록 배정되어야 한다. 이때 설비의 특성에 따라 Speed Map을 산정 하는 방법이 각기 다르다. 여기서는 연속 소둔설비에 한하여 Speed Map을 산정 하는 방법을 기술하도록 한다. 2.3절에서 전술한 바와 같이 소둔 설비에 있어서 Strip의 두께 변화에 따라 중앙 처리부분에서의 Strip의 진행속도가 다르게 설정되어야 한다.

소둔설비에서는 이와 같은 효과를 산정하기 위하여 다음과 같은 방법이 사용된다.

즉, Max. Center Speed of Strip * Thickness of Ref.Size = Contant

소둔설비의 경우 처리 강종의 크기가 Ref.Size에 대한 조업속도가 그 설비의 최대 속도이다.

가령 Ref.Size 두께가 0.25mm인 Strip의 중앙처리속도가 1000 mpm인 경우, 두께가 0.35mm인 Strip의 중앙처리속도는 다음과 같다.

$0.35 * Center\ Speed = 0.25 * 1000$

$\therefore$ Center Speed of 0.35 thickness

= 0.25/0.35 * 1000

= 714 mpm

이와 같은 두께에 따른 속도 차등 원리를 이용하고, 또한 처리 강종의 Product Mix., Size Mix. 조업시간, 강종별 Max. T/Hr, 그리고 Speed Factor, 년간 생산량 등에 관한 정보로부터 생산조건을 충족시키는 강종별, Size별 Strip에 대한 속도 분포, 즉 Speed Map을 산출할 수 있다.

Speed Map 산정은 수작업으로 할 수 없으므로 본 연구에서는 전산프로그램을 개발하여 신속하고 정확하게 Speed Map을 산정 할 수 있도록 하였다.

또한 Product Mix. 및 Size Mix. 별 생산시간의 분배도 세부 설계는 전산프로그램을 활용하므로 정밀한 결과를 얻을 수 있다.

연속소둔설비의 Speed Map은 여러 가지 생산조건 및 조업조건의 함수이다. 즉 조업관련 Factor인 Speed Factor F3를 변경하면, Max. T/Hr가 변하며, Speed Map도 변경된다. 일반적으로 F3를 증가시키면 Max. T/Hr는 감소하고, Speed는 증가하게 된다.

2.6 Main Roll 직경 산정

냉연 및 표면처리 설비에서 주요구동 Roll 및 Deflector Roll의 직경을 적절하게 설정하는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 Roll의 직경을 산정 할 때 주안점은 Steel Strip이 Roll에 감겨 굽어져 진행할 때 Strip의 표면으로부터 굽힘 항복이 발생하지 않도록 한계 Roll직경보다 크게 설정해야 한다는 점이다. 이로부터 Roll 직경을 구하는 공식을 아래에 나타내었다.

1) Condition : Max. Strip Size 0.6 * 1260 mm^2
   Min. uniaxiual yield strength 50 kgf/mm^2
2) Calculation

$A = 1 - 1/\sqrt{to} = 1 - 1/\sqrt{0.6} \simeq -0.29$

$t = (1 - A) * to = (1 + 0.29) * 0.6 = 0.77$

$Sb = 2.0 * sy = 2.0 * 50 = 100$ kgf

$\therefore D \geq t * E / (Sb - Tu)$

$= (0.77 * 21000) / (100 - 4) = 168.4mm$

여기서

A : 보정계수

to : Strip 두께 (mm) = 0.6 mm

t : 보정 두께 (mm)

E : Young's modulus(kgf/mm^2) = 21000 kgf/mm^2

Sb : 굽힘 항복강도 (kgf/mm^2)

Sy : 최소단축 항복강도 (kgf/mm^2) = 50 kgf/mm^2

D : Roll 직경

Tu : UNIT TENSION (kgf/mm^2) = 4 kgf/mm^2

이다.

또한 Strip 두께의 500 ~ 600배로 Roll 직경을 설정한다. 이때의 Roll 직경은 다음과 같다.

$D = 0.6 * 500 = 300$ mm

그런데 Pinch Roll과 같이 권부각이 작은 경우, Strip의 강성에 의하여 Strip의 곡률 반경이 Roll 반경보다 크게되므로 이와 같은 Roll의 직경은 작게 설정하도록 한다.

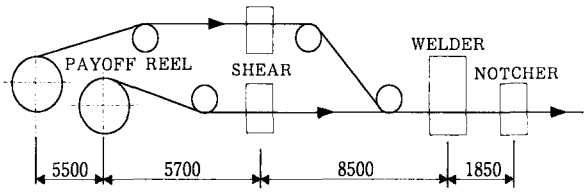
2.7 입, 출측 Handling Time 및 Looper 용량 산정

냉연 및 표면처리 설비는 연속통판 조업을 수행하므로 입, 출측에서 구 Coil의 후단부와 신 Coil의 전단부를 통판하기 위하여 입, 출측에서 Strip의 속도를 감가속 시키거나 Threading Speed 및 Zero Speed로 일정시간동안 운행해야 한다. 이와 같이 입 출측에서 중앙처리 속도보다 작은 속도로 조업하는 시간구간을 각각 Entry Down Time 및 Exit Down Time이라고 한다.

다음은 지면상 입측 부분에서의 Handling Time을 산정 하는 방법 및 유효 Looper 용량을 산정하는 방법을 나타내었다.

1) 입측 Handling Time 산정 방법

여기서 하나의 예시를 들어 용량산정 원리를 기술하도록 한다. 〈그림 4〉에는 입측 Handling Time 산정과 관련되는 입측 장치들을 도식적으로 나타내었다.



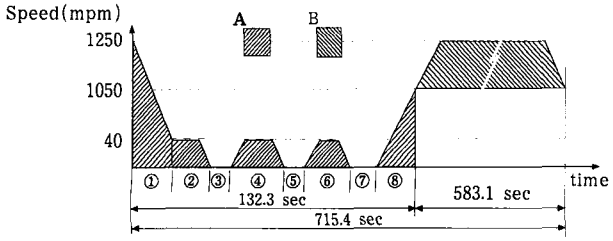
〈그림 4〉 Schematic Equipments of Entry Section

〈그림 4〉에 나타낸 바와 같이 입측 부분의 장치는 공통적으로 Payoff Reel, Entry Shear, Welder, Notcher, 그리고 각종 Pinch Roll 및 Deflector Roll로 구성된다. 또한 입측 속도 설정에 있어서 감가속 Rate는 50 mpm/s이며 Entry Shear로서 Double Cut Shear를 고려하였고 Welder Shear에서는 2 Cut Mode인 경우에 대하여 기술하기로 한다.

〈그림 5〉에는 이 경우에 대한 입측 Handling Time Schedule을 도식적으로 나타내었다.

〈그림 5〉에 나타낸 바와 같이 시간 ①부터 ⑧까지 소요된 시간을 합한 것을 Entry Down Time이라고 부른다.

본 예시에서의 Entry Down Time은 132.3 sec이고 이때 진행한 Strip의 길이는 389.98m가 된다. 이수치는 Looper의 소요길이를 산정 하는데 사용된다.



〈그림 5〉 Schematic of Entry Handling Time Schedule

2) 입측 Looper 용량

입측에서의 신, 구 Coil의 통판을 위하여 〈그림 6〉에서와 같이 Strip이 지연되는 Entry Down Time 동안, 중앙처리 부분에서는 Strip이 일정한 Center Speed로 진행을 하게 된다.

이때 입측부분에서 이 시간동안 공급되지 못한 분량의 Strip의 길이는 입측 Looper에 미리 채워진 Strip에 의하여 충당된다. 입측 Looper에서는 이때 충당되어야 하는 Strip 길이 이상의 길이를 보유하고 있어야 한다. 〈그림 6〉에서 Ahead-A로 표시된 부분이 이 Strip에 대한 입측 Looper의 소요 길이이다. 이상으로부터 입측 Looper의 소요길이 Lp를 산정 하면 다음과 같다.

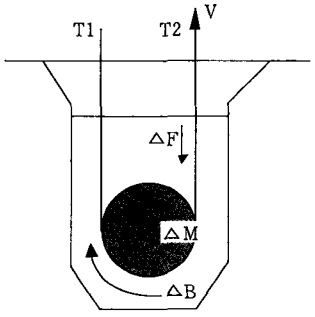
$$1050/60 * Td = Lp + 389.98$$

$$Td = 132.3 \text{ sec}$$

$$\therefore Lp = 1925.27 \text{ m}$$

여기는, Td : Entry Down Time

Lp : Looper 소요길이



〈그림 6〉 Schematic of Friction Loss

2.8 Tension Map 산정 기법

냉연 및 표면처리 설비는 〈그림 1〉에 나타낸 바와 같이 Strip이 각종 Process를 연속적으로 거치도록 상당히 긴 Line을 통과해야 한다. 이때 Strip이 Roll을 통하여 진행하므로 Strip의 사행(Strip Walking)이 불가피하게 발생하게 된다. 이와 같은 사행을 되도록 감소시키는 것이 설비의 정상가동과 생산효율의 증가에 매우 중요하

다. 일반적으로 사행을 감소시키는 방안으로는 Strip에 장력(Tension)을 부과하는 방안과 Roll의 표면에 만곡 Crown을 부여해 Strip의 고속 주행시 Roll 중앙으로 원심력이 작용하도록 하는 방안, 그리고 고온의 소둔로에 있어서, Strip과 Roll사이의 상호 열변형에 의하여 사행발생이 증가하게 되는데 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 Roll의 초기형상(Initial Crown)을 최적 설계하는 방안, 더 나아가 고온의 소둔작업시 Roll을 강제적으로 냉각하거나 가열하여 주행중 Roll의 표면 Crown을 제어하는 Thermal Crown 제어로써 노내의 사행을 감소시키는 방안 등이 있다.

장력부과 방안에 있어서, 장력을 증가시킬수록 사행정도가 감소하게 된다. 그러나 이때 과도한 장력을 부과하게 되면 구동 Motor의 용량이 불필요하게 증가하며, 특히 소둔로내에서 Roll과 Strip의 상호작용으로 Strip이 Buckling을 일으키게 된다. 따라서 적절한 장력을 설정하는 것이 안정조업 및 경제적 설비 구성측면에서 매우 중요하다. 냉연 및 표면처리 설비에 있어서, 〈그림 1〉에 나타낸 바와 같이 Line의 각 장치의 특성에 따라 장력이 각각 다르게 설정되어야 한다. 이와 같이 설비의 각 지점별로 Strip의 Size 및 강종에 따라 다르게 설정된 장력을 Tension Map이라고 한다. 장력은 기존 유사 설비의 조업 실적치 및 Buckling 모델 해석, 특정지점에서의 Strip Catenary량 예측, Tension Loss 산정기법 등을 활용하여 설정한다. 여기서는 지면상 Tension Loss 산정 방법에 관해서만 기술하도록 한다.

○ Tension Loss 산정 기법

일반적으로 Strip이 Line을 진행할 때 발생하는 Tension Loss 요인을 Bend Loss(ΔB), Mechanical Loss(ΔM), 그리고 Viscous Friction 등을 포함한 Friction Loss(ΔF) 등 크게 3가지로 구분할 수 있다. 〈그림 6〉에는 이와 같은 Tension Loss를 도식적으로 나타내었다. 여기서 Strip이 Sink Tank를 통과할 때 Tension Loss 요인으로서 ΔB, ΔM, ΔF 등이 발생한다. ΔF는 Strip이 Sink Tank 안의 유체를 통과할 때 유체의 점성저항에 의하여 발생하는 Viscous Friction을 의미한다. 이때 힘의 평형원리로부터 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\Sigma F = T2 - \Delta B - \Delta M - \Delta F - T1 = 0$$

$$T2 = T1 + \Delta B + \Delta M + \Delta F$$

여기서 T1, T2는 각각 Sink Tank의 입측 및 출측장력이다. 이 관계식으로부터 Strip이 정속으로 진행하기 위하여 Sink Tank 출측에서의 장력 T2는 입측에서 설정된 장력 T1보다 커야 하며 Tension Loss의 크기만큼 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 Strip이 진행하는 방향으로 Tension 설정을 증가시켜야 한다. Tension Loss 요인들을 다음 기회에 구체적으로 기술하기로 한다.

2.9 Tension Bridle Roll Unit 기본설계 Data 산정

앞절에서는 설비전체에 대한 Tension Map을 설정하는 방법에 관하여 기술하였다. 이와 같이 설정된 Tension은 Tension Bridle Roll Unit에 의하여 부과된다. 가령, 입측 Looper의 후단에 소둔로가 연결되는 경우 Looper 후단에 가해지는 장력이 소둔로의 입측 장력으로는 상당히 높아 적절치 않으므로 입측 Looper의 출측장력을 소둔로의 입측에 적합한 장력으로 감소시켜야 한다.

이때 Strip의 두 지점간의 장력을 조정 변경하는 장치를 Tension Bridle Roll Unit라고 부른다.

냉연 및 소둔설비에 있어서 이와 같은 장치는 설비의 길이가 증가할수록, 그리고 처리 Strip의 두께가 두꺼울수록 많이 소요된다. Tension Bridle Roll에 의한 장력 변동은 Roll 표면과

trip 표면사이의 정지마찰력에 의하여 이루어진다. 이때 장력 변동 범위는 이러한 정지마찰력 이내로서, 이 이상의 장력변동을 시도할 경우 Roll과 Strip 사이에 미끄럼(Slip)이 발생하여 Strip 표면에 Scratch가 발생하게 된다. 그리고 이러한 장력 변동시 소요되는 힘은 Bridle Roll 구동 Motor에 의하여 공급된다.

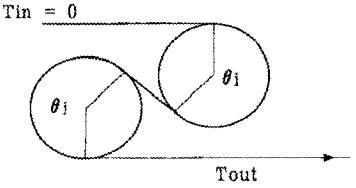
설비전체에 대한 Tension Map이 설정된 경우, Tension Bridle Roll Unit의 기본설계 Data

즉, Bridle Roll의 수량을 설정하는 방법은 다음과 같다. 임의의 한지점에 대하여 적절한 장력을 부과하기 위하여 장력변동이 필요한 경우, Tension Bridle Roll 설계에 필요한 초기 Data는 그 지점에서의 처리 Strip들에 대한 전후 설정 장력 및 Roll과 Strip간의 정지마찰 계수이다.

이때 정지마찰계수는 Strip이 마른(Dry) 상태인 경우 보통 0.11에서 0.13 정도 되고, 젖은(Wet) 상태인 경우 0.08에서 0.1 정도이다. <그림 7>에는 Tension Bridle Roll Unit를 도식적으로 나타내었다. 여기서 임의의 한 지점에서 처리 Strip의 한 경우에 대하여 장력을 Tin으로부터 Tout로 변경시키고자 한다. 이때 정지마찰계수는 μ이고, 각 Roll에 의하여 Strip의 접촉 각도를 각각 θi라고 한다.

정상속도의 조업인 경우, 즉 Snubber Roll을 작동시키지 않는 경우 먼저 고려한다.

입측 설정장력에 대하여 이와 같은 Bridle Roll에 의하여 출측에서 얻을 수 있는 장력치의 최대 Tfric. 다음과 같다.



<그림 7>Schematic of Tension Bridle Roll Unit

$$Tfric = Tin \times \exp(\Sigma\theta i/180 \times \pi \times \mu) \geq Tout$$

이로부터 Roll과 Strip이 접촉해야 하는 최소 각도를 구할 수 있으며 다음과 같이 나타내어진다.

$$\therefore \Sigma\theta i \geq (180 / \pi * \mu) * Ln(Tout / Tin)$$

여기서 Roll의 배치 및 Strip의 진행방향에 따라 Roll의 수량이 결정된다.

2.10 Main Drive Motor Power 및 제원 산정

냉연 및 표면처리 설비는 Product Mix. 및 Size Mix.별 다양한 Strip에 대하여 각각 설정된 Tension을 유지시키며, 각각 정해진 속도로 연속적으로 진행시킨다.

즉, 앞에서 구한 Speed 및 Tension Map 구동 조건에 따라 운전된다. 이때 소요되는 구동력은 주요 구동 Motor를 사용하여 얻게 된다. 구동 Motor가 장착되는 주요 구동 Roll은 Payoff Reel, 각종 Tension Bridle Roll, 입, 출측 Looper Drum, Tension Reel 등이다. 이와 같은 구동 Motor의 제원을 설정하는데 있어서 고려할 사항은 그 설비에서 처리해야 할 다양한 Strip의 구동조건을 모두 충족시키는 최대 용량의 제원을 선정해야 한다는 것이다. 냉연 및 표면처리설비는 부분별로 속도 및 장력 설정 등 구동조건 및 조업 Sequence가 다양하므로 Motor의 용량 및 제원을 산정 함에 있어서 설비 자체의 운전 조업 조건을 구체적으로 분석하는 것이 선행되어야 한다. 설비의 각 부분별, 또는 각종 구동 Roll의 조업조건에 따라 고려해야 할 사항과 각종 구동 Motor의 제원 산정 방법은 다음 기회에 기술하겠다.

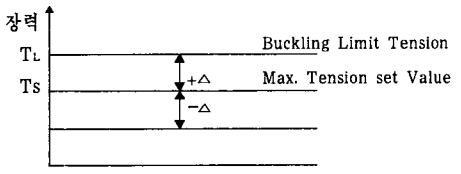
3. 고정도 Strip 장력제어 기법

전술한 바와 같이 냉연 및 표면처리 설비에서

Line의 Strip 장력은 사행방지 및 Buckling과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 Strip의 장력을 감소시키면 사행발생이 증가하고 장력을 증가시키면 Buckling이 발생한다. 따라서 적절한 장력 설정이 조업 안정을 위하여 매우 중요하다.

특히 소둔로 내에서의 Strip의 재질이 연질로 변화하기 때문에 Heat Buckling을 고려하여 높은 장력을 부과할 수 없다. 따라서 소둔로에서의 장력설정의 범위가 줄어들어 사행이 발생하기가 수월하다. 이때 소둔로에서의 사행을 되도록 감소시키기 위하여 소둔로내의 장력을 Buckling 발생 한도까지 높게 설정하게 된다. 그러나 Buckling 한계에 가까운 장력을 부과하여 조업할 때 장력 변동이 발생하여 순간적으로 Strip의 Buckling 한도 이상의 장력이 걸리면 Strip이 Buckling 되므로 이러한 현상을 방지하기 위하여 특히 소둔로내에서의 장력 변동을 최소화하여야 한다.

여기서 장력 변동의 허용범위는 〈그림 8〉에 나타낸 바와 같이 고려될 수 있다. Strip의 Buckling Limit는 재료물성에 의하여 결정되므로 Strip의 설정장력은 T_L을 초과할 수 없지만, 장력변동범위, △를 감소시키는 방안을 강구하면 장력 설정치를 증가시킬 수 있으므로 사행을 최소화 할 수 있다. 일본 KSC 제철소의 CHIBA 4 CAL의 경우, 자체적으로 개발한 Buckling Simulation 기법을 통하여, 0.15 * 1067mm의 처리 Strip에 대한 설정장력치 및 장력변동 허용범위를 각각 0.5 kgf/mm^2, ± 12 kgf로 결정하였으며, 실제 조업에서 ± 10 kgf 이내의 장력변동 실적을 달성한 것으로 보고하고 있다.



〈그림 8〉Max. Tension Set of Strip in Furnace

소둔로 좌우의 Looper 내에서 발생한 장력변동이 Strip을 통하여 소둔로내의 Strip으로 전달되어 발생하는 것과, 역시 감가속시 소둔로의 Helper 구동 Roll들 사이에 속도 동기성이 불량하여 장력변동이 유발되는 것 등 다양한 원인이 있다. 여기서 Helper Roll간 속도 동기성 저하는 다음과 같은 요인에 기인한다. 즉, ① 기계적 불일치응답성, ② Drooping에 의한 속도 비동기, ③ Strip의 관성효과, ④ 비구동 Roll의 관성효과, ⑤ Mechanical Loss, 그리고 ⑥ 장력제어 응답성 불량 등이다.

이와 같은 장력변동에 대한 해소 방안은 다음과 같다. 첫째로, Looper내의 장력변동이 소둔로내로 전파되는 것을 방지하기 위하여 저관성 고응답 장력변동 흡수장치를 소둔로 앞단에 설치하는 것이다.

4. Strip Steering System 설계

냉연 및 표면처리 설비는 Payoff Reel 에서부터, Tension Reel에 이르기까지 Strip 주행길이가 상당히 길어 어느 정도 진행을 하다가 진행 중심 선상을 이탈하게 된다. 이와 같은 현상을 유발시키는 원인은 다양하다. 이러한 요인으로서 설비의 Alignment불량, Strip과 Roll간의 미끄러짐, Strip 장력부족에 의한 일탈현상 가속 등을 지적할 수 있다. Strip의 Roll 통과시 발생하는 사행의 정도에 관한 경험식이 다음과 같이 제시되어 있다.

$$d\ (mm) = 0.0273\ K1 * K2 * L^2$$

여기서 K1, K2는 경험적인 수치이며, 다음과 같다.

K1 : Copper 및 Bracer에 대하여 1.0
Steel 및 Aluminum에 대하여 0.65

K2 : 1.5 : $0 < \sigma y < 0.7031$ kgf/mm^2
1.0 : $0.7031 < \sigma y < 1.406$ kgf/mm^2
0.65 : 1.406 kgf/s $< \sigma y$

L : Free Span (m)

그런데 이와 같은 사행량의 정도를 해석적으로 예측하는 방법은 다음과 같다.

$$dYLi(t)/dt = - V \theta i(t)$$

여기서

YLi(t) : i번째 Roll에서의 사행량
dYLi(t)/dt : i번째 Roll에서의 사행량 발생 속도
V : Strip Line Speed
θi(t) : i번째 Roll에서의 Roll에 대한 Strip의 입사각

이다. 이 방법에서는 각각의 Roll에 대하여 임의의 Roll Alignment를 설정함으로써 확률적으로 사행량의 발생정도를 예측한다. 여기서 Roll Alignment는 Strip Size 및 장력, Roll Crown 등에 대한 함수이다. 이와 같이 예측된 사행량 발생정도 분석 결과는 Line상의 Steering 장치 설치 위치를 판단하기 위한 유용한 정보를 제공하게 된다.

5. 고 찰

본 연구에서는 냉연 및 표면처리설비의 Basic Engineering의 기법을 현장조사 및 자료수집을 통하여 이론을 정립하는데 많은 부분을 할애하였다. 이 보고서에 기술된 내용은 특별히 학술논문 이나 기술서적에서 참고하거나 인용한 것이 아니고, 외국의 제철설비 Engineering사 또는 공급사가 POSCO에 설비를 공급할 때 부분적으로 제시하거나, 설명한 자료들, 그리고 견적사양 회의록에 기술된 기술메모 등을 수집, 정리하고 궁극적으로 종합적인 분석을 수행함으로써 정립한 설비 전체의 BE에 관한 것이다. 이것은 냉연 및 표면처리 설비의 Turn Key 공급시에 필수적으로 보유하여야 할 일련의 기술 Package 중의 하나이다. 금번 연구결과를 단적으로 표현한다면 다음과 같이 나타낼 수 있을 것이다. 즉, 수요가(Costumer)가 일정한 Size Mix. 및 Product Mix.에 관하여 년간 50만톤 생산할 수 있는 연속소둔설비(CAL)를 발주할 경우, 이러한 최소한의 수요가 제시조건만으로 최적용량의 설비구성 및 각 장치의 용량 산정, 그리고 Basic Design에 필요한 설계 관련 기술 Data를 체계적이며, 신속하게 산출할 수 있는 일련의 Engineering 기법을 자체적으로 개발 정립하였다는 것이다.

다른 산업 Plant와 마찬가지로 냉연 및 표면처리설비도 Line의 운전, 조업방식을 정확하게 파악해야만 비로소 설비의 각 장치에 대한 용량산정이 가능하다는 사실을 재차 확인하였다.

그리고 설계자의 의도에 따라 설비의 구성이 다소 변경될 수 있으며, 따라서 기능성과 경제성의 이율배반적인 점을 병행 고려한 설비 구성이 가능하게 되었다. 일례로서, 어느 특정부위에 있어서 Motor 하나의 추가여부에 따라 설비의 기능에 미치는 영향을 정량적으로 산출함으로서, 상황에 따라 설치 여부를 판단할 수 있다. 이것은 설비 전체에 대한 Basic Engineering을 수행할 수 있어야 가능한 것이다. 또한 Line 전체의 BE는 수작업으로 수행 불가능하므로 관련 전산

프로그램을 개발 활용하여야 한다. 본 연구에서는 BE를 신속하고 정확하게 수행하여 수주활동시 기동성을 향상시키기 위해 BE관련 연산을 전산처리 할 수 있도록 프로그램화하였다.

일반적으로 제철설비의 경우 기계장치의 부분이 타 부분에 비하여 비중이 크며, 기계장치 공급사는 EIC와의 Interface Integration 기술을 확보한다면 일괄수주 및 컨소시엄 수주의 주체가 될 수있고 최종 성능을 보장하는 역할도 감당하게된다. 따라서 금번 연구 결과를 바탕으로, 기계 및 EIC의 Interface기술을 확보하기 위한 연구를 수행 할 예정이다.

본 보고서에는 냉연 및 표면처리 설비의 Process 장치에 대한 세부적인 내용은 포함되어 있지 않다.

이러한 장치의 설계를 위해서는 많은 실험과 실적 데이터의 분석을 요하며, Process의 Mechanism의 이해가 선행되어야 한다. 향후 연구에서는 이와 같은 Process 장치에 관한 기본설계 및 장치의 계측제어(Instrument) 기법을 병행하여 연구하고자 한다.

6. 결 론

본 연구는 냉연 및 표면처리설비의 BE단계에 대한 Engineering Flow 및 각종 기계장치들의 기본 설계 데이터를 산정 하는 세부 연산기법에 관한 것으로 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 수요가가 제시한 최소한의 설비사양 조건으로부터 설비구성 및 각 장치의 용량을 체계적으로 산출할 수 있는 BE Flow 및 연산기법을 정립하였다. 또한 이러한 연산을 처리할 수 있는 전산프로그램을 개발하여 기계장치의 기본설계 Data를 일괄적으로 산출하는 것이 가능케 되었다.

2) 설비의 BE 단계에서 결정하는 생산규모 설정은 설비의 가동 효율 즉, 속도 달성율에 크게 관련되고 이 속도 달성율은 설비의 자동화 정도 및 조업/정비실적 등의 요인에 좌우되는 변수이다.

3) 연속소둔설비의 경우, Strip의 Reference 두께 설정에 따라 Speed Map 및 Max. T/Hr이 다소 변하며, 초기 Reference 두께는 평균 두께로부터 잠정 설정하여 초기 Speed Map을 산정 한다.

4) 입출측 Looper의 용량은 Strip의 Reference Size의 입출측 최대속도 및 감가속 Rate, Threading Speed, Threading Time 또는 길이, 그리고 Entry Shear Time, Clipping Time 및 Exit Shear Time 등의 함수이다. 이때 새로운 Coil이 장입되어 준비되는 시간 또는 선행 Coil이 처리되는 시간이 Production Time보다 작아야 한다.

5) Line의 Tension Map은 조업장력 실적치 및 해석적으로 구한 Tension Loss에 의하여 설정되고, Tension Loss는 Bend Loss, Mechanical Loss, 그리고, Viscous Friction Loss 등으로 구분하여 산출한다. 이때, Tension Loss를 보상하기 위한 Motor의 설치여부에 따라 Tension Map이 다르게 설정된다.

6) Tension Bridle Roll Unit 설계시, Roll과 Strip간의 최대 마찰력의 크기는 설정된 전후 장력보다 크도록 접촉각을 결정한다. 이때 마찰력은 Roll 구동 Motor에 의하여 제공된다.

7) 주요 구동 Motor의 제원은 설비의 운전조업 특성에 따라 산정 해야 한다. 그리고 Tension Bridle Roll Unit의 경우, Roll 사이의 Strip에 작용하는 Tension은 Load Balance 기법에 따라 산정하고 그 결과에 의하여 Motor 제원을 산정 한다.

(원고 접수일 1999. 3. 15)