

연속 주조 공정에서 평균 토크전류 추종에 의한 인발력 분배 제어

(Load Sharing Control by Following Average Torque Current in Continuous Casting Process)

천창근* · 김철우

(Chang-Keun Chun · Cheul-U Kim)

요 약

연속 주조 공정에서 설정한 속도로 주편을 인발하는 스트랜드 구동롤에 인발력이 적절하게 분배가 되지 않으면 주형 레벨의 주기적인 변동을 유발시킴과 동시에 주편의 품질을 저하하게 된다. 따라서 본 논문에서는 주편의 속도를 제어함과 동시에 각 구동롤에 운전자가 원하는 비율로 인발력을 분배할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 전동기에 작용하는 토크 전류를 상위 제어기로 귀환하여 평균 토크 전류를 산출하고 각 구동롤 전동기의 토크 전류와 비교하여 전동기의 속도 기준값을 미소하게 변경함으로써 각 구동롤 전동기의 토크 전류가 평균 토크 전류에 추종하도록 하여 인발력을 분배한다. 그리고 과도상태 개선을 위하여 안티와인더업(anti-wind up) 제어기를 가진 인발력 제어기를 적용하였으며, 제안된 알고리즘의 확인을 위하여 포스코의 시험연주기에 적용하여 우수성을 입증하였다.

Abstract

If the withdrawal force of strand driven roll which is controlled with predetermined speed isn't distributed regularly in continuous casting process, mold level is changed cyclically and slab quality is not good. In this paper, both casting speed control and load sharing control algorithm of strand driven roll according to ratio which is set up by operator at same time is proposed. The proposed algorithm is to share the withdrawal force by following torque current of each driven roll as average torque current by changing speed reference of each driven roll motor. The load sharing control with anti-wind up for improvement transient state is adopted and the proposed algorithm is implemented in POSCO pilot caster.

Key Words : Load Sharing, Continuous Caster, Strand Driven Roll

1. 서 론

연속 구동 시스템은 하나의 부하에 여러 개의 전동기 구동시스템이 동시에 소재를 운반 또는 가공하는 시스템으로서, 주로 제철소의 연주, 압연 공정 등에서 많이 적용되며 구동시스템 제어의 주목적은 소재의 속도를 제어함과 동시에 각 구동롤 사이에 작

* 주저자 : 포항산업과학연구원 선임연구원
Tel : 054-279-5236, Fax : 054-279-6879
E-mail : ckchun@rist.re.kr
접수일자 : 2003년 10월 20일
1차심사 : 2003년 10월 30일
심사완료 : 2003년 12월 3일

용하는 장력을 운전자가 설정한 장력 지도에 따라 일정하게 제어하는 것이다. 만약 구동롤 사이에 작용하는 장력이 원하는 패턴으로 제어되지 못하면 소재의 사행이나 흠집 등이 발생하여 제품의 품질을 저하시키게 된다. 따라서 이러한 장력을 제어할 수 있는 많은 연구가 수행되었다[1]~[6].

그림 1과 같이 연속 주조 공정은 고온의 액체 용강을 주형(mold)으로부터 연속적으로 인발하면서 소재의 표면에 냉각수를 살수하면서 서서히 완전한 고체 금속으로 만드는 프로세스로서 전체 제철 공정에서 제품의 품질을 결정하는 중요한 프로세스이다. 이러한 연속 주조 공정에서 스트랜드 구동롤(strand driven roll)의 역할은 압력 제어로 동작하는 유압실린더(hydraulic cylinder)로 소재를 적절하게 압하함과 동시에 운전자가 설정한 주조 속도 제어 패턴에 따라 주편을 인발하는 기능을 수행하며, 만약 주편을 인발하는 인발력이 각 스트랜드 구동롤에 적절하게 분배가 되지 않으면 불규칙한 벌징(bulging)을 유발시켜 주형 레벨의 주기적인 변동을 발생시키고 동시에 주편의 품질을 저하시키게 된다[7]~[9].

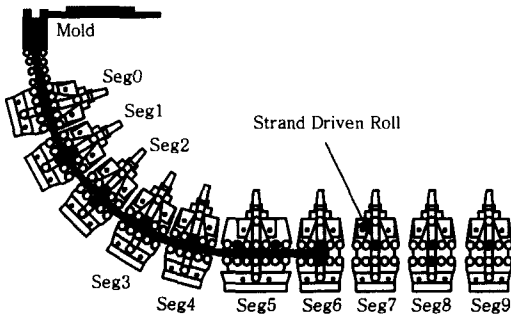


그림 1. 연속 주조 공정의 구성도
Fig. 1. Configuration of a continuous casting process

본 논문에서는 연속 주조 공정에서 소재의 속도를 설정된 패턴에 따라 제어함과 동시에 각 구동롤에 작용하는 인발력 비율을 운전자가 원하는 비율로 제어하는 방법을 제안하였다. 제안된 방식은 주조 중 주편을 인발하는 구동롤 전동기의 토크전류를 상위 제어기(programmable logic controller)로 귀환하여 평균 토크전류를 산출하고 각 구동롤의 속도 지령치

를 가감하여 각 구동롤 전동기의 토크전류가 평균 토크전류 값으로 추종하도록 하여 인발력을 분배시키는 방법이다. 그리고 주조 중에 주조 상태에 따라 전체 부하가 계속해서 변동되므로 과도 응답특성을 좋게 하기위하여 기존의 비례 적분 제어기에 안티와인더업(anti-wind up) 제어를 추가하였다.

2. 연속주조 공정라인의 모델링

그림 2는 연속 주조 공정에서 스트랜드 구동롤의 단위 구성도로서 주편을 인발하는 역할을 하는 2개의 구동롤과 주편을 지지하는 다수개의 지지롤(guide roll)을 표시하는 것으로, 질량 보존의 법칙과 후크의 법칙으로부터 주편에 작용하는 장력은 식(1)과 같이 구동롤의 속도와 장력의 곱으로 표현할 수 있으며, 각 구동롤 전동기의 출력 토크와 속도의 기계적 방정식은 식(2)와 (3)으로 표현할 수 있다.

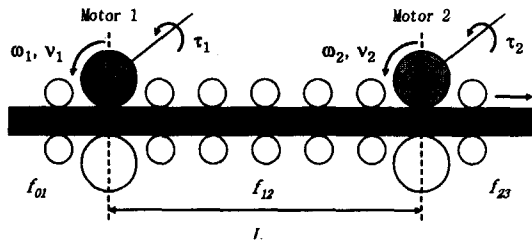


그림 2. 스트랜드 구동롤의 단위 구성도
Fig. 2. Configuration of strand driven roll

식(1)~(3)에서 f 는 각 구동롤 사이의 주편에 작용하는 장력을 의미하며, E 는 주편의 재료에 따라 결정되는 탄성 계수(Young's modulus)이고, A 는 주편의 폭과 두께의 곱인 단면적, L 은 구동롤 사이의 거리, J 는 전동기의 관성 모멘트이고, r 은 구동롤의 반지름이며, $v(=r\omega)$ 는 구동롤의 선속도, G 는 감속기의 기어비, τ 는 구동롤의 토크를 나타낸다[1]~[6].

$$\frac{df_{12}}{dt} = \frac{AE}{L} (v_2 - v_1) + \frac{1}{L} (v_1 f_{01} - v_2 f_{12}) \quad (1)$$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = G_1 \tau_1 + r_1 (f_{12} - f_{01}) \quad (2)$$

연속 주조 공정에서 평균 토크전류 주조에 의한 인발력 분배 제어

$$J_2 \frac{dw_2}{dt} = G_2 r_2 + r_2 (f_{23} - f_{12}) \quad (3)$$

주조 속도가 정상 상태에 도달하여 속도 변동이 없을 경우 식(2)와 (3)은 힘의 평형식(4), (5)와 같이 되어 입출력 장력과 인발력(=전동기의 토크, 롤의 반지름, 감속기 비율의 함수)으로 표현된다.

$$f_{01} = f_{12} + \frac{G_1 T_1}{r_1} \quad (4)$$

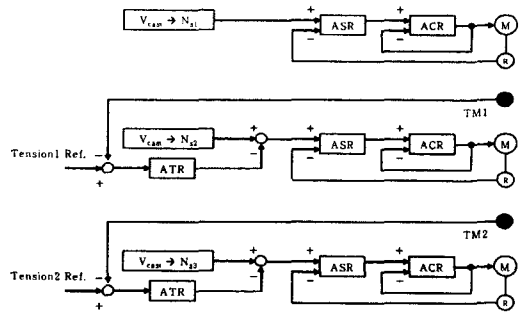
$$f_{12} = f_{23} + \frac{G_2 T_2}{r_2} \quad (5)$$

이와 같이 각 구동롤 사이에 작용하는 주편의 장력은 방정식(4)와 (5)와 같이 입력측 장력과 출력측 장력의 차이를 구동롤의 인발력이 담당하므로 각 구동롤 전동기의 토크를 적절하게 제어하면 운전자가 원하는 장력 패턴을 제어할 수 있다.

3. 기존의 장력제어와 연속 주조기의 구동롤 제어

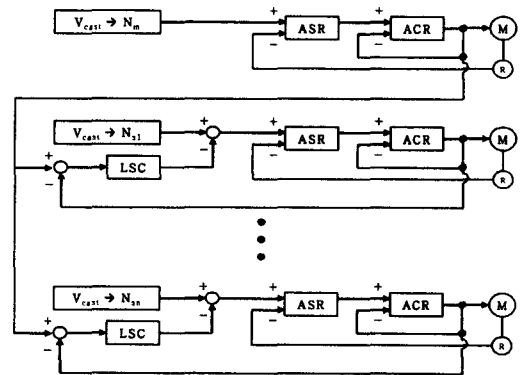
기존의 연속 주조 공정에서는 장력 제어의 필요성을 인식하지 못해 주로 주조 속도만을 제어하였다. 하지만 최근 연속 주조 공정에서 소재의 품질을 향상시키기 위해 스트랜드 구동롤의 인발력을 분배할 필요성을 인식하여 몇 가지 연구가 수행되었다 [9],[10].

기존에 많이 사용하고 있는 장력 피드백 제어는 그림 3과 같이 장력 지도로부터 발생한 기준 장력과 구동롤 사이의 소재에 설치한 장력 측정 센서로부터 측정된 장력간의 차이를 장력 제어기를 통해 인접한 롤의 전동기 속도 지령에 가감해 주는 방법이었다. 이러한 방법은 장력 측정을 위하여 장력 센서를 구동롤 사이에 설치하여야 하는 문제점과 장력 센서에서 나오는 신호가 미약하여 노이즈에 취약한 단점이 있었다[2]. 이후 장력 측정 센서를 설치하지 않고 구동롤 전동기의 인발력에 직접 비례되는 토크 전류를 상위제어기로 귀환하여 각 구동롤에 인가되는 인발력 분담 비율을 조정하는 방식들이 제안되었다.



ATR : Automatic Tension Regulator TM : Tension Meter
ACR : Automatic Current Regulator V_{cast} : Casting Speed
ASR : Automatic Speed Regulator N : Roll Speed R : Resolver

그림 3. 기존의 장력 제어 구성도
Fig. 3. Configuration of conventional tension controller



ACR : Automatic Current Regulator V_{cast} : Casting Speed
ASR : Automatic Speed Regulator N : Roll Speed R : Resolver
LSC : Load Sharing Controller

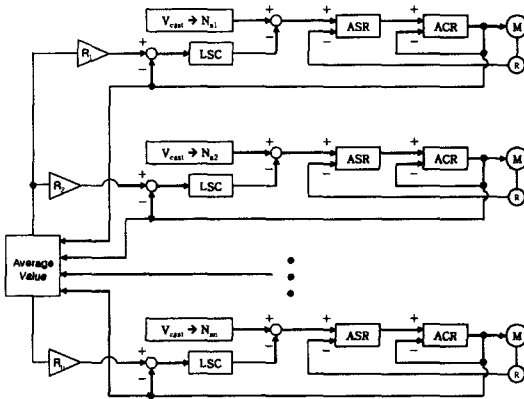
그림 4. 마스터와 슬레이버에 의한 인발력 분배제어의 구성도
Fig. 4. Configuration of load sharing controller by master and slaver

그림 4는 속도제어만을 수행하는 마스터(master)와 인발력 분배 제어기를 가진 슬레이버(slaver)로 구성되어있는 대표적인 인발력 분배 제어방식으로 본 방법은 정상적인 상태에서는 양호하게 인발력이 분배되지만 소재가 이동하고 있는 과도상태에서는 마스터 구동롤을 계속하여 다른 구동롤로 이동시켜야 하는 문제점이 있으며, 제어하는 동안 마스터가

고장이 발생하여 오동작을 할 경우 순간적으로 인발력 분배 제어가 되지 않는 문제점이 있었다.

4. 제안된 인발력 분배 제어

본 논문에서 제안한 평균 토크 전류 추종에 의한 인발력 분배제어는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 도출된 것으로 만약 주조 중 하나의 구동물에 이상이 발생한 경우에는 이를 검지하여 평균 토크 전류를 산출할 때 제외시켜버리면 되므로 순간적인 토크 전류의 흔들림이 적다는 장점이 있다. 인발력을 분배시키는 방법은 각 구동물의 절대적인 토크 또는 구동물 사이에 작용하는 절대적인 장력을 제어하는 것은 아니고 각 구동물에 인가되는 토크의 비율을 제어함으로써 각 구동물 사이에 존재하는 주편의 장력을 제어하는 것이다. 예를 들어, 소재를 인발하는 구동물이 3개가 있고 전체 인발력이 10[ton]이라면 2[ton]:4[ton]:4[ton] 또는 3[ton]:3[ton]:4[ton]의 비율로 제어할 수 있을 것이다.



ACR : Automatic Current Regulator V_{cast} : Casting Speed
 ASR : Automatic Speed Regulator N : Roll Speed R : Resolver
 LSC : Load Sharing Controller

그림 5. 제안한 인발력 분배 제어기의 구성도
 Fig. 5. Configuration of proposed load sharing controller

그림 5는 제안한 인발력 분배 제어의 블록도를 나타내는 것으로 우선 각 구동물의 선속도(N)는 주조기의 곡률 반경과 롤의 반지름, 감속기의 감속비를

이용하여 결정하고, 인발력 분배를 실시할 구동물 전동기의 토크 전류를 상위제어기(PLC)로 귀환하여 평균 토크 전류를 산정한다. 그 후 평균 토크 전류를 인발력 분배 비율(R)에 따라 각 구동물 전동기의 토크 전류 기준치로 계산되어 귀환된 토크 전류와 비교하여 그 차이 값이 부하 배분 제어기(load sharing controller)의 입력으로 들어가 속도 제어기의 기준치를 미소하게 변경함으로써 인발력을 분배시킨다.

인발력 분배 원리를 표 1과 그림 6을 보면서 자세히 설명하면 설정된 평균 토크 전류와 각 구동물 전동기로부터 귀환된 토크 전류와의 차이가 발생하면, 그 차이에 비례하는 크기만큼의 속도 기준치를 증가 또는 감소시키면 각 구동물의 토크 전류치는 평균 토크 전류치와 거의 비슷한 크기로 제어되게 된다.

표 1. 인발력 분배 원리
 Table 1. Principle of load sharing

$I_{Ave} > I_q$ 일 경우, $w^*, v^* \uparrow \gg w, v \uparrow \gg I_q \uparrow$ (until $I_{Ave} \cong I_q$)
$I_{Ave} < I_q$ 일 경우, $w^*, v^* \downarrow \gg w, v \downarrow \gg I_q \downarrow$ (until $I_{Ave} \cong I_q$)

이와 같이 본 논문에서 제안한 인발력 분배 제어 방법은 주조 속도 기준값을 조절하여 인발력 분배 비율을 조정하므로 주조 속도 변동율을 너무 크게 설정하면 각 구동물의 인발력 분배는 빠르게 이루어 지지만 실제 주조 속도 변동이 증가하여 주형 레벨의 변동을 가중시켜 주편의 품질을 떨어뜨리는 효과가 발생하게 된다. 따라서 통상 주조 속도 변동율을 제한하는 것이 일반적이다. 이와 같이 제어기의 출력을 제한하면 비례 적분 제어기에서는 출력의 최대치 또는 최소치에 머물러 시간이 지남에 따라 적분항이 오차를 계속적으로 적분하여 매우 크게 되어 정상 상태에 도달하기 위해 많은 시간을 필요로 하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 피하기 위해 안티와인더업(anti-wind up) 적분기를 가지는 비례 적분 제어기를 적용하여 비례 적분 제어기의 출력이 최대 또는 최소치 내에 있으면 일반적인 비례 적분 제어기로 동작되지만 최대 또는 최소

연속 주조 공정에서 평균 토크전류 주중에 의한 인발력 분배 제어

치 범위를 벗어나면 그 차이에 비례하는 값을 적분기의 입력에서 제외함으로써 적분기의 영향을 줄일 수 있는 제어를 적용하였다.

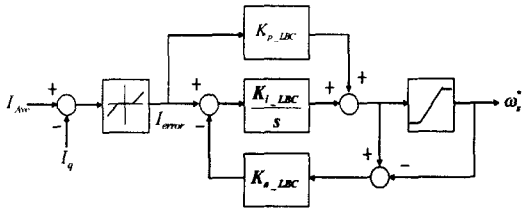


그림 6. 인발력 분배 제어기
Fig. 6. Controller of load sharing

5. 실험

본 논문에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위해 실험에 사용된 설비는 포스코(POSCO)의 시험연주기로 구동롤의 구성은 그림 1에와 같이 스트랜드 상부에 10개, 하부에 4개, 전체 14개의 구동롤로 구성되어있으며 구동롤 관련 설비의 상세한 사양은 표 2에 정리하였다.

표 2. 설비 사양
Table 2. Specification of mechanical device

Motor	유도기 7.5[kW] 정격 속도 : 1150[rpm] 정격 전류 : 13.9[A] 정격 전압 : 440[V]
Driven Roll Radius	Roll 1~2 : 75[mm] Roll 3~4 : 80[mm] Roll 5_1~5_2 : 90[mm] Roll 6~9 : 95[mm]
Distance of Driven Roll	LTop1~LTop2 : 1336[mm] LTop2~LTop3 : 1387[mm] LTop3~LTop4 : 1439[mm] LTop4~LTop5_1 : 1280[mm] LTop5_1~LTop5_2 : 1100[mm] LTop5_2~LTop6 : 1560[mm] LTop6~LTop7 : 2025[mm] LTop7~LTop8 : 2025[mm] LTop8~LTop9 : 2025[mm]
Gear Ratio	93 : 1

실험 방법은 길이 8000[mm], 두께 100[mm]의 소재를 연주기의 출구 방향에 있는 구동롤 9번으로부터 주형 방향으로 1[m/min]의 일정한 속도로 이동하면서 인발력 분배 제어를 실시할 경우와 실시하지 않을 경우에 각 구동롤에 작용하는 토크 전류를 분석하였다. 그리고 소재의 길이가 연주기의 길이보다 짧으므로 소재의 위치를 정확하게 추적하여 시간에 따라 순차적으로 각 구동롤을 소재 방향으로 압하여 소재를 인발하는 역할을 수행하며, 시간에 따른 각 구동롤의 압하 시퀀스(sequence)는 모드별로 구분하여 표 3에 정리하였으며, 그림 8에서 적용한 인발력 분배 알고리즘을 적용하는 구동롤 시퀀스와 동일하게 된다.

표 3. 각 구동롤의 시간에 따른 압하 시퀀스
Table 3. Pressure sequence of driven roll

모드	시간[sec]	소재를 압하하는 구동롤
mode1	164~273	#9, #8B, #8T
mode2	274~385	#9, #8B, #8T, #7
mode3	386~473	#8B, #8T, #7, #6B, #6T
mode4	474~503	#8B, #8T, #7, #6B, #6T, #5-2
mode5	504~528	#7, #6B, #6T, #5-2
mode6	529~608	#7, #6B, #6T, #5-2, #5-1
mode7	609~682	#6B, #6T, #5-2, #5-1, #4
mode8	683~721	#6B, #6T, #5-2, #5-1, #4, #3
mode9	722~758	#5-2, #5-1, #4, #3
mode10	759~808	#5-2, #5-1, #4, #3, #2B, #2T
mode11	809~831	#5-1, #4, #3, #2B, #2T
mode12	832~856	#5-1, #4, #3, #2B, #2T, #1T, #1B
mode13	857~887	#4, #3, #2B, #2T, #1T, #1B

그림 7은 인발력 분배 알고리즘을 적용하지 않고 주조 속도만을 제어하였을 때 각 구동롤에 작용하는 토크 전류를 표시한 것으로 소재가 이동하는 전체 시간 동안을 표시하였다. 표 3에서 표시한 각 모드 구간에서 각 구동롤의 토크 전류는 이웃하는 구동롤의 토크 전류와 비슷한 크기의 패턴을 가지지 않고 시간에 따라 독립적으로 변화되는 것을 볼 수 있었으며, #8 bottom roll이나 #6 bottom roll은 부(-)의 토크 전류를 발생하여 소재를 인발하는 역할을 수행하는 것이 아니고 오히려 소재에 끌려가고 상대적으

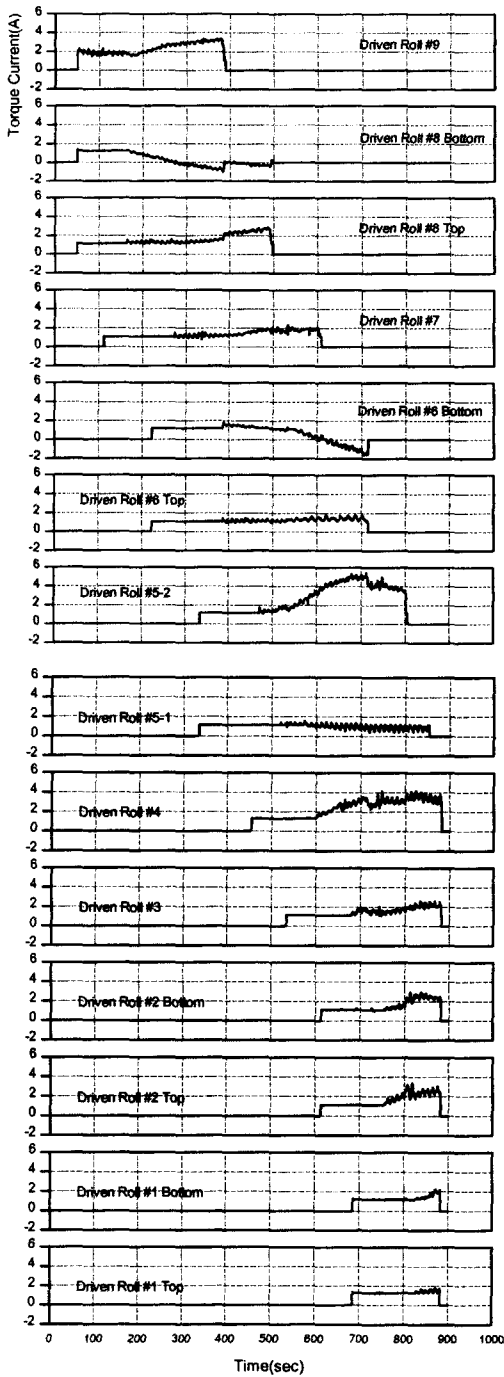


그림 7. 속도 제어만을 수행하였을 경우의 각 구동롤 전동기 토크 전류
 Fig. 7. Torque current of driven roll motor with speed controller only

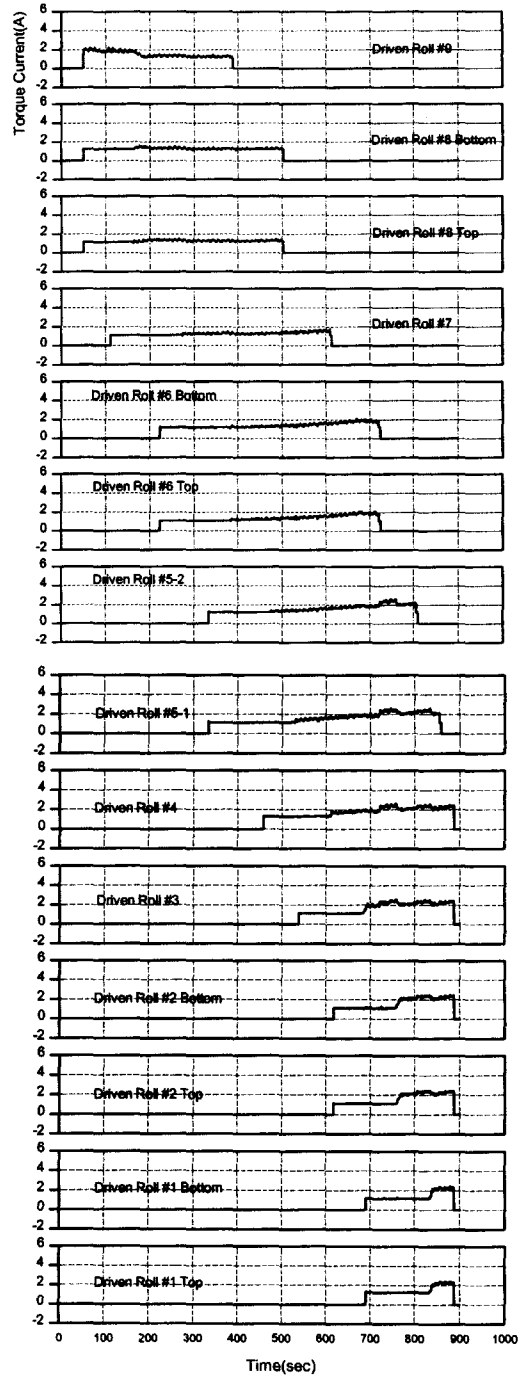


그림 8. 인발력 분배 알고리즘을 적용한 경우의 각 구동롤 전동기 토크 전류
 Fig. 8. Torque current of driven roll motor with load sharing algorithm

로 다른 구동률에 큰 토크 전류가 발생하는 모습을 보이고 있다.

그림 8은 본 논문에서 제시한 평균 토크 전류 추정에 의한 인발력 분배 알고리즘을 적용한 경우의 실험 파형으로, 본 실험에서는 각 구동률 전동기에 작용하는 토크 전류의 비율이 일정하게 유지되도록 설정하여 제어를 수행하였다. 그리고 실제 주조 속도 변동을 일정 범위로 제한하기 위하여 인발력 분배 제어기의 출력인 주조 속도 기준치의 변동율을 1[%]로 제한하여 실험하였다. 표 3에서 표시한 각 모드 구간에서 소재를 압하하는 구동률에 작용하는 토크 전류의 파형을 살펴보면 토크 전류의 크기가 거의 동일하게 작용하여 그림 7에서 표시한 부하배분을 적용하지 않았을 경우의 토크 전류에 비해 양호한 결과를 보이고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 철강공정의 중간 프로세스인 연속 주조 공정에서 주편의 속도를 제어함과 동시에 각 구동률에 작용하는 인발력에 비례하는 토크 전류를 상위 제어기로 귀환하여 평균 토크 전류를 산출하고 각 구동률 전동기의 토크 전류와 비교하여 그 차이 값에 비례하는 각 구동률 전동기의 속도 기준값을 미소하게 변경하여 각 구동률 전동기의 토크 전류가 평균 토크 전류에 추종하도록 하여 인발력을 분배할 수 있는 알고리즘을 도출하였으며, 부하 변동이 심할 경우에도 인발력 분배가 효과적으로 이루어질 수 있도록 하기 위하여 안티와인더업(anti-wind up) 적분기를 가진 비례적분 제어기를 인발력 분배 제어기로 적용하였다. 그리고 속도 제어만을 수행하여 실험한 경우에 각 구동률 전동기의 토크 전류와 제안된 인발력 분배 알고리즘을 적용하여 실험한 경우에 각 구동률 전동기의 토크 전류를 비교하여 제안된 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

References

- [1] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "Design and Control of Multi-span Tension Simulator", IEEE Trans. on Industry Applications Vol.36 No. 2 pp 640~648, 2000.
- [2] 송승호, 설승기, "연속 부하 분담 제어를 이용한 연속

- 구동 시스템의 속도 및 장력 제어 특성 개선", 전기학회 논문지, 49B권 9호, pp. 503~509, 1999.
- [3] 송승호, 설승기, "장력 관측기를 이용한 폴림롤/감김롤의 장력제어", 전기학회 논문지, 49B권 1호, pp. 62~69, 2000.
- [4] 이정욱, 최창호, 현동석, "연속 공정 라인의 실시간 마찰 손 보상을 통한 장력 제어 특성 개선" 전기학회 논문지, 49B권 10호, pp. 701~707, 2000.
- [5] 송승호, "연속 공정용 전동기 구동장치를 위한 통합형 토크 및 속도제어 알고리즘", 전력전자학회 논문지, 제 7권 2호, pp. 186~193, 2002.
- [6] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "A New Tension Controller for Continuous Strip Processing Line", IEEE Trans. on Industry Applications Vol.36 No. 2 pp 633~639, 2000.
- [7] 谷川 宪士 외 6명, "Development of Continuous Torque Control Casting for High Speed Casting", CAMP-ISIJ Vol.6, pp. 1120, 1993.
- [8] Davy Distington Limited, "광양 1연주공장 4연주기 Electrical Equipment Requirement", 1995.
- [9] Michael Pillwax, "Drive Load Sharing on Slab Casters", AISE Specialty Conference, 2003.
- [10] 천창근, 김철우, "연속주조기에서 스트랜드 구동률의 인발력 분배 제어", 전력전자학회 논문지, 제8권 4호, pp. 321~327, 2003.

◇ 저자소개 ◇

천창근 (千昌根)

1968년 2월 29일생. 1993년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1995년 1월 포항산업과학연구원 입사. 현재 포항산업과학연구원 선임연구원.

김철우 (金喆禹)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경 공업 대학 전기전자공학과 객원 교수. 1986년 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 교수. 당 학회 평의원.