

고강도·고인성의 알루미늄 연속 주조기용 롤셸 개발

김병춘, 박영철, 김정태*, 이우동**,
소재개발연구팀, 기술연구원, 두산중공업*
주단생산기술팀, 주단BG, 두산중공업**

Development of Roll Shell for Aluminium Continuous Casters of High Strength and High Toughness

B. H. Kim, Y.C.Park and J.T.Kim*, W.D.Lee**

R & D Center, Doosan Heavy Industry & Construction Co.,LTD.*
Casting and Forging BG, Doosan Heavy Industry & Construction Co.,LTD.**

Abstract

The caster roll shells have the good thermal conductivity and the low thermal expansion and have to exhibit high enough strength and good ductility at temperature up to 600°C. Thermal stress in particular is very high due to the contact with the liquid aluminium. The main stresses are of thermal origin, which bring a plastic fatigue on surface. This paper will represent one survey about the investigation of the failure of roll shells for continuous casters and an analysis using the simulation of the temperature distribution and the state of stress during hot rolling. Moreover, there will be a discussion on the roll shell of Mod. HAR 5 which is developed by heat treatment process. Mod. HAR 5 has advantages of high strength, high toughness and increased thermal stress resistance while maintaining the same productivity as the conventional roll.

Key words : Roll Shell, Mod. HAR 5, Tempered Martensite, Quenching, Thermal Stress

1. 서론

알루미늄 연속주조기용 롤은 680~700°C의 용융 알루미늄을 5~12mm두께의 알루미늄 판재의 Coil을 만드는 롤, 즉 용융 알루미늄이 롤을 통과하면서 응고와 압연이 이루어져 용탕상태에서 바로 판재를 만드는 롤(Fig.1)이다(1-2). 롤셸 표면은 용융 알루미늄과 직접 접촉하여 약 550°C까지 급가열되고 Core와 Shell사이의 냉각수에 의하여 급속히 냉각되므로 열충격을 받고, 사용중 지속적인 가열, 냉각의 반복에 의하여 열피로가 발생된다. 또한 Core와 Shell의 조립시 열박음에 의한 Radial 및 Hoop Stress, 조업시 Bending, Torsional, Compressive Stress 및 Thermal Stress등 가혹한 응력이 작용하므로 내열충격성이 우수하고 항복강도 및 인성이 우수한 롤셸을 요구하고 있다(3-4).

따라서 본 연구에서는 기존 롤셸의 특성과약을 위해 가동중의 응력상태 및 공냉시의 시간에 따른 롤셸의 부위별 Equivalent Stress를 ABAQUS를 이용하여 해석하였으며 열처리 공정을 개선하여 새롭게 개발된 고강도를 유지하면서 고인성을 갖는 Mod. HAR 5 롤셸의 품질특성에 대하여 논하고자 한다.

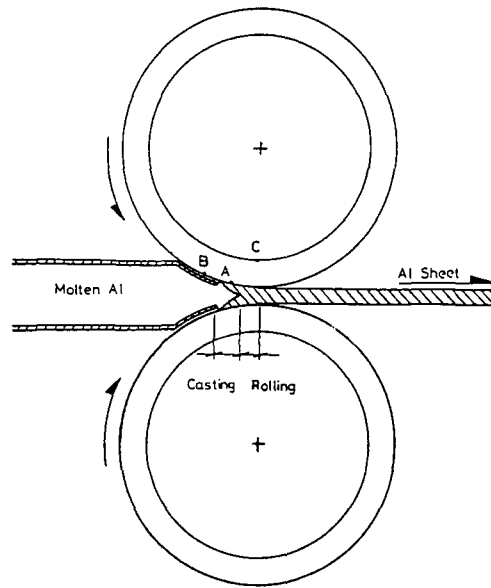


Fig. 1 The schematic diagram of aluminium continuous caster

2. 실험 방법

당사에서 기존에 생산하고 있던 롤셸(HAR 5)은 OD 840 x ID 674 x 1900L 의 3C Mill 에 사용되는 것과 OD 845 x ID 674 x 1650L 의 압연 Load 가 큰 3CM Mill 에 사용되는 롤셸을 주로 제작하여 왔으며 Table 1 에 당사 제품인 HAR 5 의 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of materials (wt%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
HAR 5	0.30 ~0.34	0.25 ~0.35	0.35 ~0.45	0.25 ~0.35	2.65 ~2.95	0.90 ~1.0	0.17 ~0.25

HAR 5 롤셸은 30ton 전기로에서 제강 후, Ingot를 제작하였다. 이후 4200ton에서 단조 후, 예비 열처리, 품질열처리를 한 후 내경을 Honing하여 롤셸을 제작하였다.

이러한 롤셸의 사용 조건을 분석하기 위해 가동중에 롤셸에 작용하는 각종 응력들을 계산하였으며 조업이 끝난후 공냉시 시간에 따른 롤셸의 부위별 Equivalent Stress 를 ABAQUS 를 이용하여 조사하였다.

3. 응력해석

롤셸에 작용하는 응력상태를 파악하기 위하여 파손 빈도가 높은 3CM Mill에서 조업조건을 모사하

기 위해 압연하중 750Ton을 기준으로 하여, 롤셸의 표면온도 차이에 따라 4가지의 경우에 대하여 검토한 결과를 Table 2에 나타내었다. 롤셸에 작용하는 응력으로는 롤셸과 Core의 열박음에 의한 Radial Stress, Hoop Stress 그리고 Roll의 Preload에 의한 Bending Stress, 전달된 Torque에 의한 Shear Stress, Metal Separating Force에 의한 Radial Stress 및 Hoop Thermal Stress등의 여러가지 응력이 조합 응력상태로 가해지고 있다.

계산 결과 온도차가 클수록 열응력의 증가에 의하여 전체 응력의 크기가 급격히 증가하고 있으며, 롤셸의 표면에서의 온도차가 520℃로 가장 클 경우에 항복응력을 넘어서는 큰 응력이 걸리고 있음을 알 수 있다. 계산 결과로부터 여러 가지의 응력 중에서 열응력이 가장 큰 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다.

Table 2 Calculation condition and result of simulation

No.	Input Data	CASE 1		CASE 2		CASE 3		CASE 4	
1	Outer Diameter of Shell(mm)	845		845		845		845	
2	Inner Diameter of Shell(mm)	673		673		673		673	
3	Shrinkage(mm)	1		1		1		1	
4	Freezing Distance(mm)	54.6		54.6		54.6		54.6	
5	Length of Roll(mm)	3770		3770		3770		3770	
6	Width of Cast(mm)	1750		1750		1750		1750	
7	Modulus of Elasticity (kg/mm ²)	21000		21000		21000		21000	
8	Thermal Expansion Coefficient	1.41E-05		1.41E-05		1.41E-05		1.41E-05	
9	Preload(kgf)	750000		750000		750000		750000	
10	Torque(kgf-mm)	1.05E+07		1.05E+07		1.05E+07		1.05E+07	
11	Temperature Difference(℃)	200.		295.5		462.2		520.	
No.	Output Data 1 (Stress Classification)	CASE 1		CASE 2		CASE 3		CASE 4	
		In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
1	Radial Stress due to Shrink Fit(kg/mm ²)	-5.7	0.0	-5.7	0.0	-5.7	0.0	-5.7	0.0
2	Hoop Stress due to Shring Fit(kg/mm ²)	-25.5	19.8	-25.5	19.8	-25.5	19.8	-25.5	19.8
3	Bending Stress due to Preload(kg/mm ²)	-14.6	-18.3	-14.6	-18.3	-14.6	-18.3	-14.6	-18.3
4	Shear Stress due to Transmitted Torque(kg/mm ²)	0.12	0.15	0.12	0.15	0.12	0.15	0.12	0.15
5	Radial Stress due to Metal Separating Force(kg/mm ²)	-31.4	-15.7	-31.4	-15.7	-31.4	-15.7	-31.4	-15.7
6	Hoop Thermal Stress(kg/mm ²)	0.0	-59.1	0.0	-87.4	0.0	-136	0.0	-154
합계	Equivalent Stress(kg/mm ²)	54.92	22.45	54.92	51.88	54.92	99.88	54.92	117.0
참고	Yield Stress(kg/mm ²)	116.		116.		116.		116.	

Fig. 2 는 압연조업이 끝난 롤셸의 공냉 시의 시간에 따른 롤셸의 부위별 Equivalent Stress 를 ABAQUS 로 해석 한 것이다. 공냉 시에도 롤셸 중심(point 1)에 비해 롤셸 표면(point 4)에서는 약 61kg/mm²(600MPa) 의 높은 Equivalent Stress 가 걸리는 것을 알 수 있다.

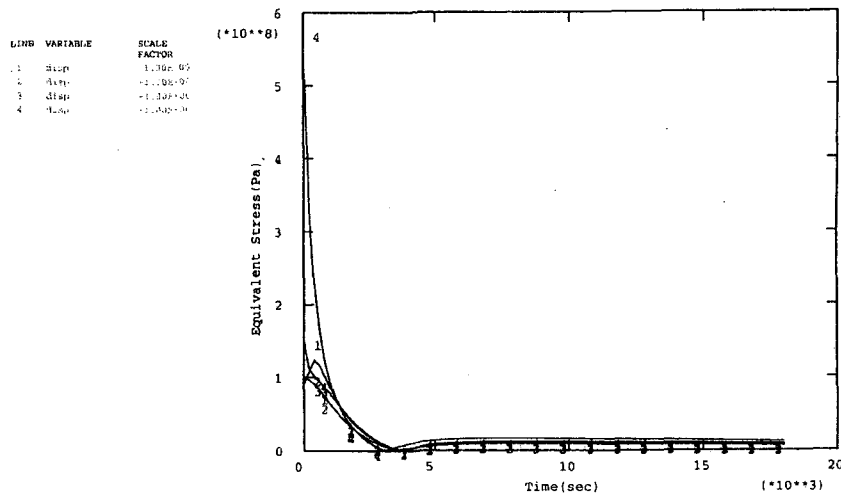


Fig. 2 Equivalent stress from center to surface of roll shell with cooling time

4. 실험결과 및 고찰

앞의 응력해석결과 가동중에는 롤셸 표면의 온도차가 클 경우에 항복응력을 넘어서는 큰 응력이 걸리고 있음을 알 수 있다. 또한 조업 후 냉각중에도 롤셸의 표면에서는 높은 응력이 걸리는 것을 알 수 있다. 따라서 HAR 5 소재의 기계적 성질을 향상시키기 위해 다음과 같은 실험을 실시하였다.

4.1. 미세조직

Fig. 3 은 기존 HAR 5 소재의 미세조직을 광학현미경으로 관찰 한 것이다. HAR 5 소재는 냉각속도가 느린 영역에서 나타나는 템퍼드 베이나이트 조직이 주로 관찰 되고 있었다. 따라서 열처리후의 품질특성을 개선하기위해 열처리공정을 Quenching 시 Oil 냉각을 하던 방식에서 수냉으로 변경시켜 미세조직을 관찰하였다. Fig. 4 는 유냉에 의한 HAR 5 재 및 수냉에 의한 Mod. HAR 5 열처리재의 SEM 미세조직을 관찰 한 것이다. 당사 기존공정에 의한 소재의 경우 유냉에 의한 조직은 주로 입상의 템퍼드 베이나이트 조직만으로 되어 있으나 Mod. HAR 5 열처리재의 조직은 빠른 냉각속도 영역에서 관찰되는 침상의 템퍼드 마르텐사이트와 템퍼드 베이나이트의 혼합조직으로 되어 있는 것을 알 수 있다.

4.2. 기계적 특성

Table 3 은 HAR 5 소재 및 Mod. HAR 5 소재의 인장시험 및 경도 측정된 결과이다. 당사에서 제작 한 HAR 5 소재의 인장강도 값은 134.7~139.2 kgf/mm² 이고, 개발강인 Mod. HAR 5 의 경우 인장강도는 133.1~133.6 kgf/mm² 으로 유냉재인 HAR 5 인장강도의 차이는 없다. 경도 값은 HAR 5 의 경우 385HB 이며, Mod. HAR 5 재는 401HB 로 약간 높은 값을 나타내고 있다.

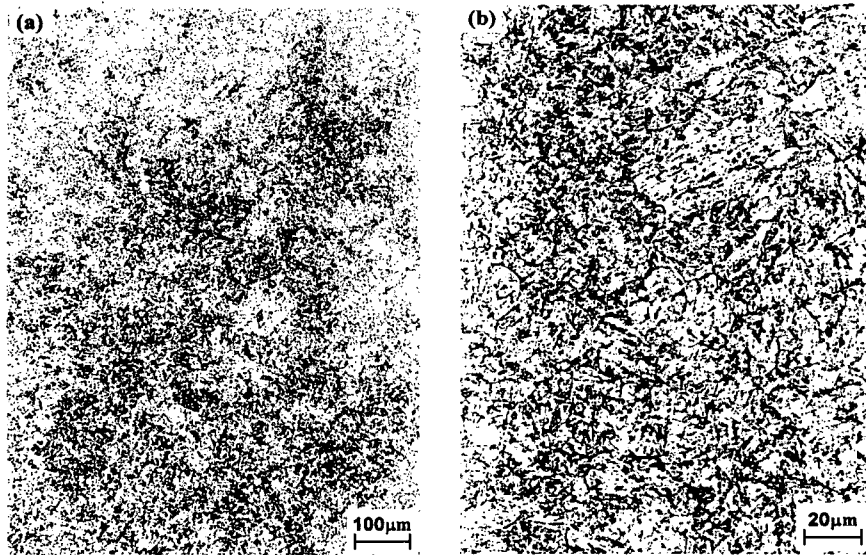


Fig. 3 Optical microstructure of HAR 5
a) x100 b) x500

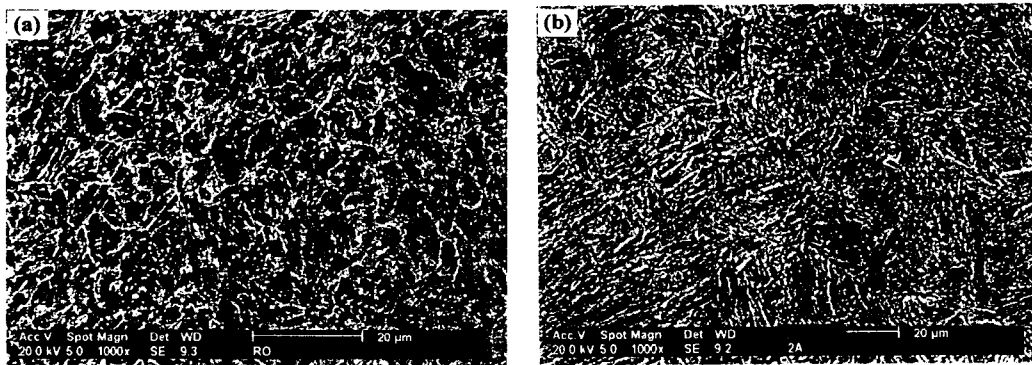


Fig. 4 SEM micrographs of the roll shell materials
a) HAR 5 b) Mod. HAR 5

Table 3 Mechanical properties of roll shell materials.

	Material	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Yield Strength (kgf/mm ²)	El.(%)	RA(%)	Hardness (HB)
HAR 5	2LS	134.7	116.3	18.6	61	385
	8LS	139.2	120.1	18.4	59	385
Mod. HAR 5	O.S	133.6	115.6	18	61	401
	1/2T	133.1	115.5	17	58	401

4.3. 충격특성

Fig. 5(a)은 당사 HAR 5 소재와 개발재인 Mod. HAR 5 재의 충격시험 결과를 나타낸 것이다. 상온에서의 V-notch 충격값을 보면 HAR 5 는 4.3~6.5ft-lbf 의 값을 가지나 개발재인 Mod. HAR 5 소재의 경우 40.5~43.4ft-lbf 의 우수한 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 냉각속도 차이에 따라 미세조직의 차이에 기인하여 충격특성이 향상 된 것으로 생각된다.

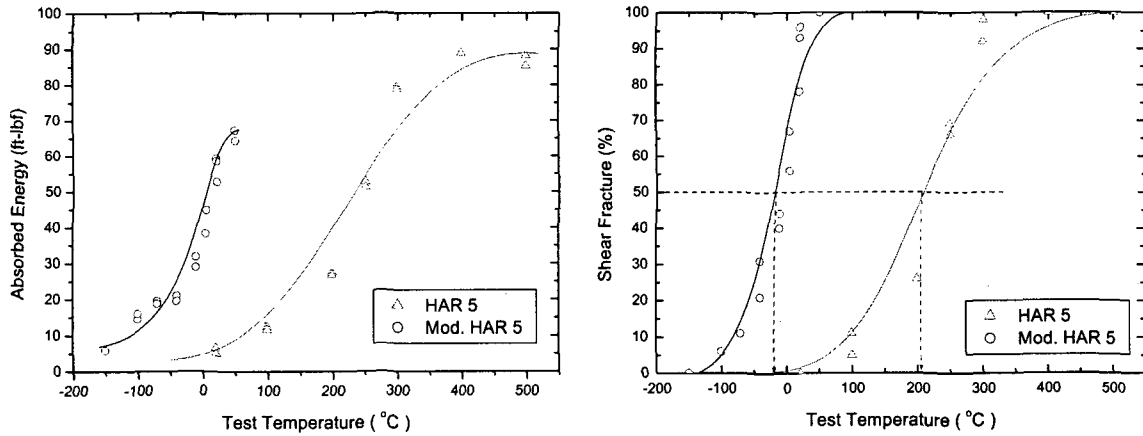


Fig. 5 Charpy impact absorbed energy and transition curves for roll shell materials
a) Absorbed Energy b) FATT₅₀

인성을 평가하기 위해 50% 연성인 영역과 50% 취성인 영역을 나타내는 연성취성파괴 천이온도(FATT₅₀)를 측정하여 Fig. 5(b)에 비교하여 나타내었다. 당사의 HAR 5 소재는 연성취성파괴 천이온도가 약 200°C이었으며 개발재인 Mod. HAR 5 소재는 약 -20°C로 인성이 우수 하였다. 이는 알루미늄 연속주조기의 조업이 종료후 롤셸이 냉각후 상온에 도달하였을 때 당사 파단재의 경우 약 200°C로 연성영역에서 취성영역으로 천이하는 영역이므로 압연중에 소재 표면에 발생한 열응력에 의해 취성파괴가 일어날 가능성이 있으나 Mod. HAR 5 소재는 연성취성파괴 천이온도(FATT₅₀)가 -20°C이므로 연성영역에 있다.

5. 결론

인성을 향상시킨 우수한 Mod. HAR 5를 개발하여 품질특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충격특성은 개발재인 Mod. HAR 5 소재의 경우 40.5~43.4ft-lbf 의 우수한 값을 나타내고 있었으며 연성취성파괴 천이온도(FATT₅₀)도 약 -20°C로 기존 HAR 5 에 비해 우수한 인성을 나타내었다.

- 2) 냉각속도에 따라 입상의 베이나이트에서 침상의 마르텐사이트로 기지조직이 바뀔에 따라 충격 특성이 향상되었다.
- 3) 롤셸 가동중 응력상태 계산결과, 롤셸의 표면에서의 온도차가 520℃로 가장 클 경우에 항복응력 이상의 Equivalent Stress 가 발생할 가능성이 있기 때문에 롤셸은 충분한 항복강도와 인성이 필요한 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 김종각, "알루미늄 스트립 연속 주조방법과 특성", 압연기술의 진보, p.163-179(1993).
2. KANTOC' S Technical Report, About Aluminium Continuous Casting Shell(Super-X), ref. No.3170 p.1~23(1985).
3. Chavanne-Ketin' s Report, Shells and Roll Cores for Aluminium Continuous Casters, p1-9
4. G.Stein, U.Riepe, " Shells and Cores for Aluminium Continuous Casters" , 11th International Forgemasters Meeting, p.XI.I.1-9(1991).