

ESR 法溶解における溶解速度と凝固速度
との関係崔 炆*・依田 連平*²・徐 相 熙*

Effect of the Melting Rate on the Solidification Rate in the ESR Process

Ju CHOI, Renpei YODA and Sang Hee SUH

Synopsis :

This study was undertaken to investigate the effect of the melting rate on the solidification rate of ingot in the electroslag remelting process. Structural steel, SS41, was remelted in a copper mold of 85 mm in diameter. The average melting rate was varied from 310 g/min to 480 g/min. Iron sulfide powders were added into the molten metal at predetermined time intervals to determine positions of solidification fronts. Rising rate of solidification fronts V_I were calculated from the volume increase in the solidification front region.

The rising rates V_I were almost the same as the melting rates. The local solidification rate increases linearly with the melting rate in the range of low melting rate. As the melting rate enters the range of high melting rate, the local solidification rate approaches to a constant value.

1. 緒 言

ESR 法による溶解材は、スラグによる不純物の除去と、凝固組織の微細化によつて、衝撃強度と靱性がいちじるしく向上する。とくに、高速度鋼のような高合金鋼の場合には、凝固組織の微細化の寄与が大きい¹⁾²⁾。インゴットの大きさと鑄型の冷却水量を一定にしたとき、溶解速度が組織の微細化を支配するが、これまでの研究結果は必ずしも一致したものではない。HOLZGRUBER¹⁾によれば溶解速度がある値に達するまでは組織が比例して粗大化して行くが、その値を越えると逆に微細化するという結果を得ている。一方、著者らは、溶解速度が大きくなるほど組織が微細化することを確認した³⁾。一般に、凝固組織の微細化は 2 次樹枝状晶間の距離、あるいは炭化物セルの大きさで表すことができ、その大きさは冷却速度が増すにつれて、指数的に減少する⁴⁾。

ESR 法において、電算機シミュレーションで熔融金属プール (pool) のプロフィールを求めた研究者⁵⁾⁶⁾は、溶解速度、すなわち熔融金属層の上昇速度と凝固界面上昇速度は等しいと仮定しているが、実験的に証明されたものではない。そこで、本研究では溶解速度が組織の微細化にあたる影響の一端を知るために、溶解速度と凝固速度との関係を検討した。

2. 実験方法

2.1 ESR 溶解

直径 50 mm の一般構造用鋼 SS41 を溶解電極とし、内径 85 mm、高さ 420 mm の水冷銅モールドで、可飽和リアクトルで電流、電圧を連続的に変化させることができる 200 kVA 容量の直流電源を使つて溶解した。炉をコールドスタート (cold start) 法で始動し、まず 70%CaF₂-30%Al₂O₃ のスラグ 1 kg を装入した。インゴットの高さが約 50 mm 上昇するごとに 30 g のスラグを添加して、インゴットの皮膜として消費されるスラグ量を補充した。溶解速度をできるだけ一定に保つために、溶解進行中に電流および電圧を連続的に減らした。Table 1 はその操業条件であり、Fig. 1 はインゴット No. 2 の溶解時の電流と電圧のチャートである。

2.2 凝固界面と上昇速度の測定

溶解が進む間、3~6 min ごとに FeS 2g を Al 箔に包んで鑄型の中へ投入した。溶解後、インゴットを縦軸に沿つて切断し、サルファープリントによつて凝固界面のプロフィールを求めた。Photo. 1 はインゴット No. 3 の原寸のサルファープリントである。このプリントから、凝固界面はもちろんのこと、界面に垂直に成長している樹枝状組織も見分けることができる。そこで各凝固

昭和 60 年 5 月 28 日受付 (Received May 28, 1985)

* 韓国科学技術院 工博 (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Seoul, Korea)

*² 千葉工業大学 工博 (Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma Narashino 275)

Table 1. Electroslag remelting conditions.

Ingot No.	Current (A)		Voltage (V)		Average melting rate (g/min)
	Bottom	Top	Bottom	Top	
1	1200	1000	34	28	310
2	1400	1200	40	34	360
3	1600	1400	42	38	480

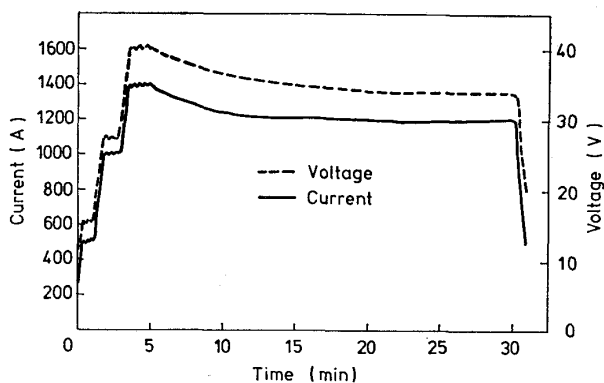


Fig. 1. Melting flow chart for constant melting rate (ingot No. 2).

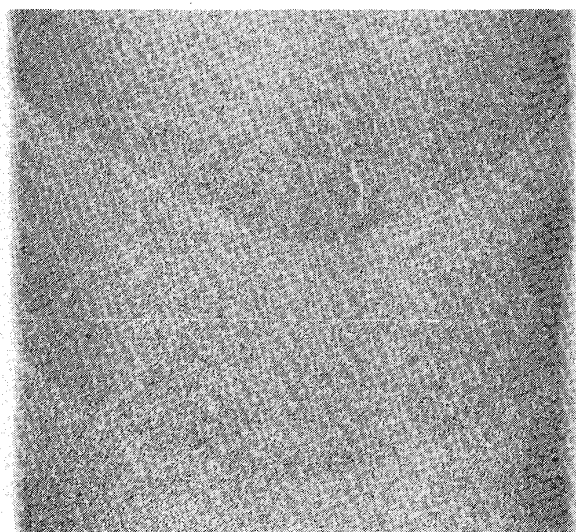


Photo. 1. Sulphur print of the ingot No. 3.

界面間の体積を測定し、その値を硫化物を投入した時間間隔でわつて、凝固界面上昇速度を算出した。

3. 実験結果

3.1 インゴットの成長による凝固界面上昇速度

Fig. 2~4 は、それぞれインゴット No. 1~3 の凝固層の増大に伴う熔融金属層の上昇速度、すなわち溶解速度 V_M と、凝固界面上昇速度 V_I の変化を示している。ここで V_M は電極の下降速度から求めることができる³⁾。

図から、インゴット No. 1 および No. 2 のばあい、インゴットの高さが 80 mm 以上になると、 V_M と V_I

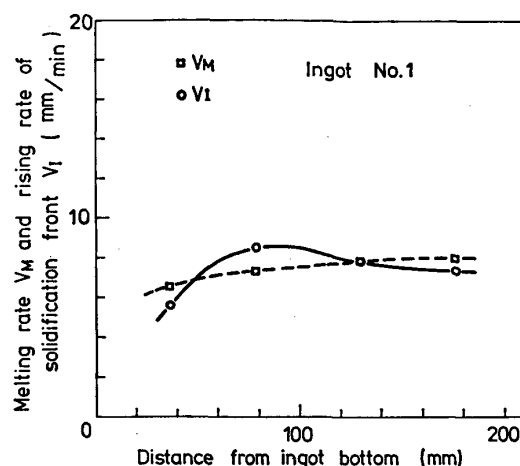


Fig. 2. Variation of the melting rate V_M and the rising rate of solidification front V_I during remelting of the ingot No. 1.

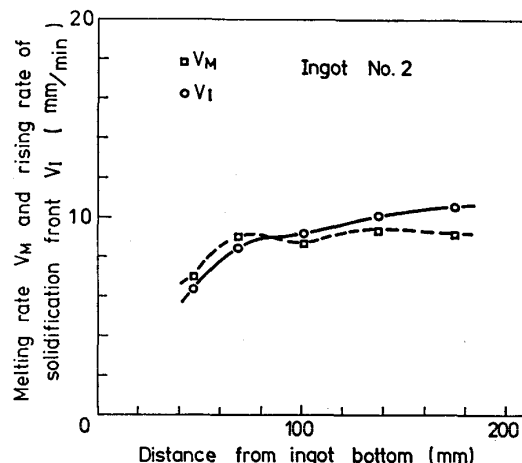


Fig. 3. Variation of the melting rate V_M and the rising rate of solidification front V_I during remelting of the ingot No. 2.

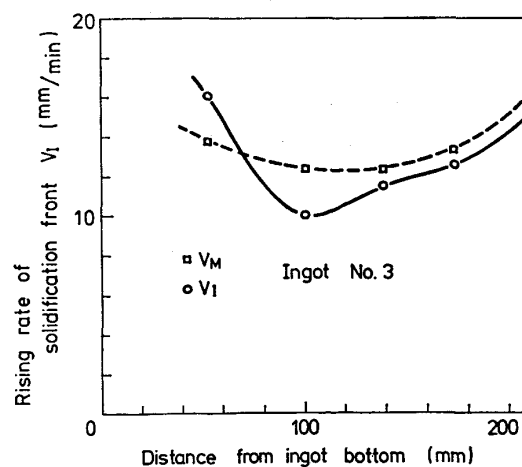


Fig. 4. Variation of the melting rate V_M and the rising rate of solidification front V_I during remelting of the ingot No. 3.

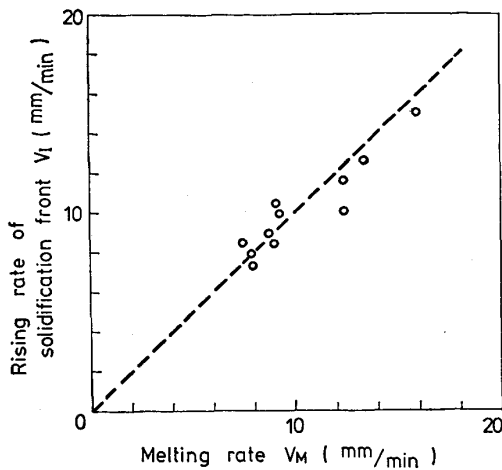


Fig. 5. Correlation of the melting rate V_M with rising rate of solidification front V_I .

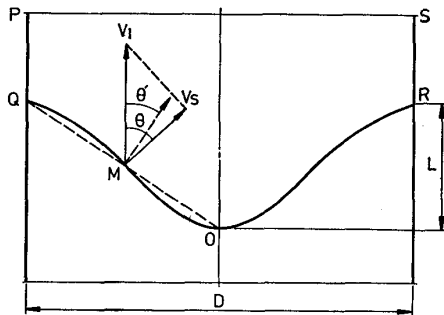


Fig. 6. Approximation of the angle θ between the solidification front and the ingot axis by the angle θ' .

はいずれもほぼ一定になり、その大きさにも大きな差はみられなくなる。一方、 V_M の変化がはげしかったインゴット No. 3 においては、初めは V_I が V_M より大きい、高さ 70 mm をすぎると逆転して V_M が V_I より大きくなり¹⁾、高さ 140 mm 以上になると V_I は V_M よりやや低目ではあるが、両者ともほとんど同じ変化を示している。この場合、両者とも時間と共に増加するが、これは溶解速度を一定にするために、電流と電圧を減らしたが、それが十分でなかつたと考えられる。

3.2 溶解速度と凝固界面の上昇速度

溶解速度 V_M と凝固界面の上昇速度 V_I との関係は Fig. 5 に示す。ここで点線は両速度が等しい場合である。 V_M は 10 mm/min までは V_I と等しいが、それ以上の速度では V_I よりやや高目になる傾向がみられる。しかしその差はわずかであり、両速度はほぼ等しいとみてよい。この結果は次のように考えられる。

溶融金属部のプロフィールは Fig. 6 のように円筒部 PQRS と円錐部 QOR になつている⁷⁾⁸⁾。溶解速度が大きくなれば円錐部の深さとともに円筒部の高さも大き

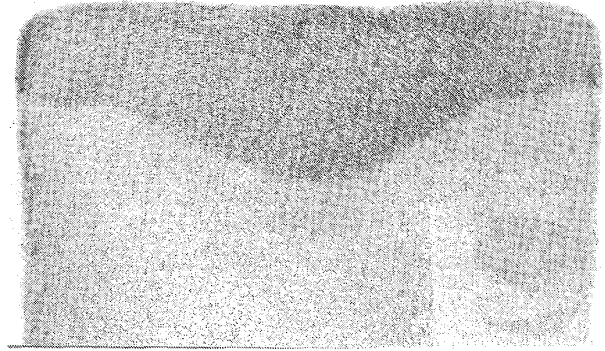


Photo. 2. Sulphur print of the ingot melted at 5.6 mm/min.

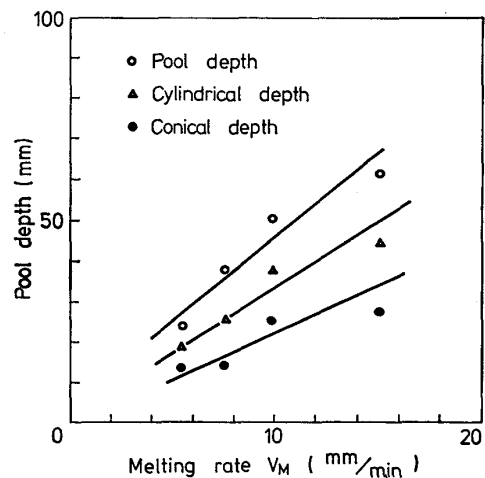


Fig. 7. Approximate correlation of the pool depth with the melting rate.

くなることが予想される。実際、円錐部を実測した結果、溶解速度が増すにつれて深くなる⁹⁾。しかし円筒部の高さを測定した報告はないので、本研究では便宜的な方法でこれを調べることにした。すなわち、溶解中 FeS を投入してから 10 s 後に電源を切つて溶解をおえ、溶融金属層をそのまま凝固させたのが Photo. 2 である。これより溶解速度による円筒部の高さ、円錐部の深さ、およびその合計である溶融プール深さの変化を示したのが Fig. 7 である。この結果、溶解速度が大きくなれば溶融金属部の体積が増し、したがつて水冷モールドで冷却される溶融金属部の表面積が大きくなつて凝固が進行する界面の広さが広がる。さらに溶解速度が大きくなればスラグスキンの厚さが薄くなり、凝固速度 V_S も大きくなる (Fig. 6)。以上二つの理由で、溶解速度が大きくなれば凝固界面の上昇速度も増加し、また両速度の大きさも等しくなると考えられる。

4. 考 察

Photo. 1 から知られるように、1次樹枝状晶の成長

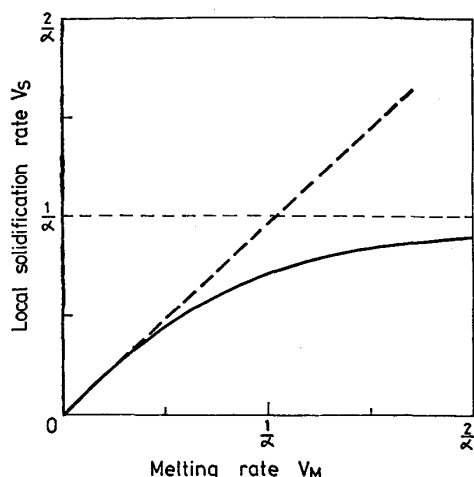


Fig. 8. Correlation of the melting rate V_M with the local solidification rate V_S .

方向は凝固界面に垂直である。そこで Fig. 6 において、凝固速度 V_S と凝固界面上昇速度 V_I との間に

$$V_S = V_I \cos \theta \dots \dots \dots (1)$$

が成り立つ。ここで θ は凝固界面での垂直線とインゴット軸がなす角である。

溶解速度が大きくなれば V_I も大きくなるが、溶融金属部の深さも深くなつて θ はかえつて大きくなり、 $\cos \theta$ は減ることになる。したがつて(1)式において、溶解速度の変化による V_S の変化を見るためには V_I と $\cos \theta$ の対照的な効果を考えなければならない。

Fig. 6 から、凝固界面半分の中間点である M での θ は点線で示したように、凝固界面を正円錐形と仮定したときの θ' とほぼ等しい。したがつて、円錐部の深さを L 、モールドの直径を D とすれば次の関係式が得られる。

$$\cos \theta = \cos \theta' = \frac{1}{\sqrt{1 + (2L/D)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + l'^2}} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 l' は $2L/D$ である。

また、 l' は溶解速度 V_M (mm/min) との間で、

$$l' = \alpha V_M \dots \dots \dots (3)$$

が成り立つ⁹⁾。ここで α は常数で Fig. 7 から求めれば 0.06 min/mm になる。

さて、Fig. 5 に示した本実験結果から明らかなように、 $V_M = V_I$ であるから凝固速度 V_S は(1)、(2)および(3)から

$$V_S = \frac{V_M}{\{1 + (\alpha V_M)^2\}^{1/2}} \dots \dots \dots (4)$$

になる。これを図示したのが Fig. 8 である。この図から V_S は V_M が $0.5(1/\alpha)$ になるまではほぼ等しいが、

V_M がそれ以上になるとしだいに鈍化し、 V_M をいくら高めても V_S は $(1/\alpha)$ 以上になることはできない。

実際の ESR 操業では、円錐部プールの深さ L はモールド半径の $1/2$ から 1 倍程度である¹⁰⁾。すなわち、 V_M は $0.5(1/\alpha)$ から $(1/\alpha)$ の間の値をもつのが大部分である。したがつて、大部分の ESR 操業では溶解速度が増すにしたがつて、凝固速度も大きくなるが、その増加率は減ることになる。

以上、溶解速度と凝固速度との関係を検討したが、凝固組織の微細化に直接影響を与えるのは冷却速度であり、この速度はまた凝固速度と温度勾配との積で表される。したがつて、溶解速度と組織の微細化との関係を明らかにするためには、温度勾配に対してさらに詳しく調べることが必要である。

5. 結 論

ESR 炉における溶解速度が組織の微細化に与える影響の一端を知るために、溶解速度と凝固速度との関係を求めて、次の結果を得た。

- (1) 凝固界面上昇速度は溶融金属面上昇速度とほぼ等しい。
- (2) 溶融金属面上昇速度が増すにつれて、凝固界面上昇速度も大きくなる。
- (3) 溶解速度の増加にしたがつて凝固速度も増加したが、その増加率はしだいに減少した。

文 献

- 1) W. HOLZGRUBER: Proc. the Fifth Int. Symp. on Electroslag and Other Special Melting Technol., ed. by G. K. BHAT and A. SIMKOVICH (1974), p. 70 [Carnegie-Mellon Inst. of Research]
- 2) J. PETRMAN: The Third Int. Symp. on Electroslag and Special Melting Technol., ed. by G. K. BHAT and A. SIMKOVICH (1971), p. 108 [Mellon Inst.]
- 3) 崔亨燮, 徐相熙, 崔 炷: 大韓金属学会誌, 14 (1976), p. 129
- 4) M. C. FLEMINGS: Solidification Processing (1974), p. 148 [McGraw-Hill Book Co.]
- 5) A. S. BALLANTYNE, A. MITCHELL and R. L. KENNEDY: 文献 1), p. 345
- 6) J. F. ELLIOTT and M. MAULVAULT: Proc. the Fourth Symp. on ESR Processes (1973), p. 69 [The Iron and Steel Inst. of Japan]
- 7) K. YAMAGUCHI, M. FUNAZU and T. ICHIHARA: 文献 6), p. 91
- 8) D. M. LONGBOTTOM, A. A. GREENFIELD and G. HOYLE and M. J. RHYDDERCH: 文献 6), p. 126
- 9) H. KAJIOKA, K. YAMAGUCHI, N. SATO, K. SOEJIMA and S. SAKAGUCHI: 文献 6), p. 102