

|||||||
論 文
|||||||

박육 스테인리스 주강의 유동성에 미치는 주조변수 및 합금원소의 영향

최학규 · 강상규 · 박흥일* · 정해용* · 배차현*

Effects of Casting Variables and Alloying Elements on the Fluidity of Thin Wall Stainless Steel Castings

Hak-Kyu Choi, Sang-kyu Kang, Heung-Il Park*, Hae-Yong Jeong* and Cha-Hurn Bae*

Abstract

The effects of casting variables and alloying elements on the fluidity of thin wall cast stainless steels were investigated. Melts were poured into the sand molds to produce thin wall test castings. The length of it was 245 mm and the thickness varied at the interval of 0.5 in the range of 1.6 to 2.6 mm. For the same casting condition, the fluidities of austenitic stainless steel, ferritic, precipitation hardenable and martensite ones were better in the order. The higher the pouring temperature, the shorter the pouring rate and the better the fluidity were. The fluidity was increased with the addition of Cr and decreased with W and Nb.

(Received September 30, 2000)

1. 서 론

최근 자동차 배기가스에 의한 환경오염 대책의 일환으로 엔진의 효율 극대화과 배출 가스량의 저감에 대한 연구가 활발하다[1]. 이러한 환경규제에 대응하기 위하여 자동차 부품 경량화 설계가 요구되고 있으며, 특히 자동차 부품용 주조품의 두께 감소화에 대한 관심이 높아지고 있다. 주조품의 박육화는 재료가 갖는 기계적 강도가 구조적으로 변형 및 파괴에 대한 위험을 피하도록 설계되어야 하고 또한 제조공법상으로 용이하고 경제적으로 제작이 가능해야 한다. 하지만 얇은 주물은 용탕의 흐름이 불량할 뿐만 아니라 주입된 용탕이 주형과의 접촉에 의해 온도가 급감하여 용탕의 유동성이 떨어져 응고함으로써 성형 불량이나 주조결함이 발생하고 있어 주물제조가 용이하지 않다.

용탕의 유동성은 급탕성과 더불어 주물의 건전성을 좌우하는 주요 인자이다. 유동성이라 함은 소정의 주입 온도로 주형에 주입할 때 소정의 단면 주형내를 흘러서 응고 정지할 때까지의 유동 길이로 정의될 수 있으며 주조품의 성형성을 결정하게 된다.

용탕의 유동성에 미치는 요인은 복잡하지만 크게 영

향을 주는 것은 첫째, 용탕의 흐르는 속도에 영향을 주는 인자와 둘째, 용탕이 흐르는 시간에 영향을 주는 인자의 두가지로 대별할 수 있다. 이들 중 주형의 재질이 동일하고 탕구계가 동일한 일정한 형태의 시험편에서 유동성에 직접적인 영향을 미치는 주조조건으로 합금의 종류, 주입금 온도 및 주입속도를 들 수 있다.

최근 자동차 부품인 exhaust manifold의 스테인리스 주강 개발에도 두께를 감소시키기 위한 연구가 이루어지고 있으며 일반적으로 진공감압주조법을 채택하고 있다[2-4]. 비철금속합금, 주철 및 주강의 유동성에 대한 많은 연구[5-13]가 수행되었으나 박육 스테인리스 주강의 유동성에 대한 정량적인 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 두께가 3 mm 이하인 박육판상의 스테인리스 주강을 주조하여 용탕의 유동성 및 충전성에 미치는 합금조성, 주입온도 및 주입속도의 영향을 조사 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 두께가 3 mm 이하인 스테인리스 주강 배기 매니폴드 개발을 위하여 판상의 주물시편을 설

창원기능대(Chang-Won Polytechnic College)
*부경대학교(Pukyong National Univ.)

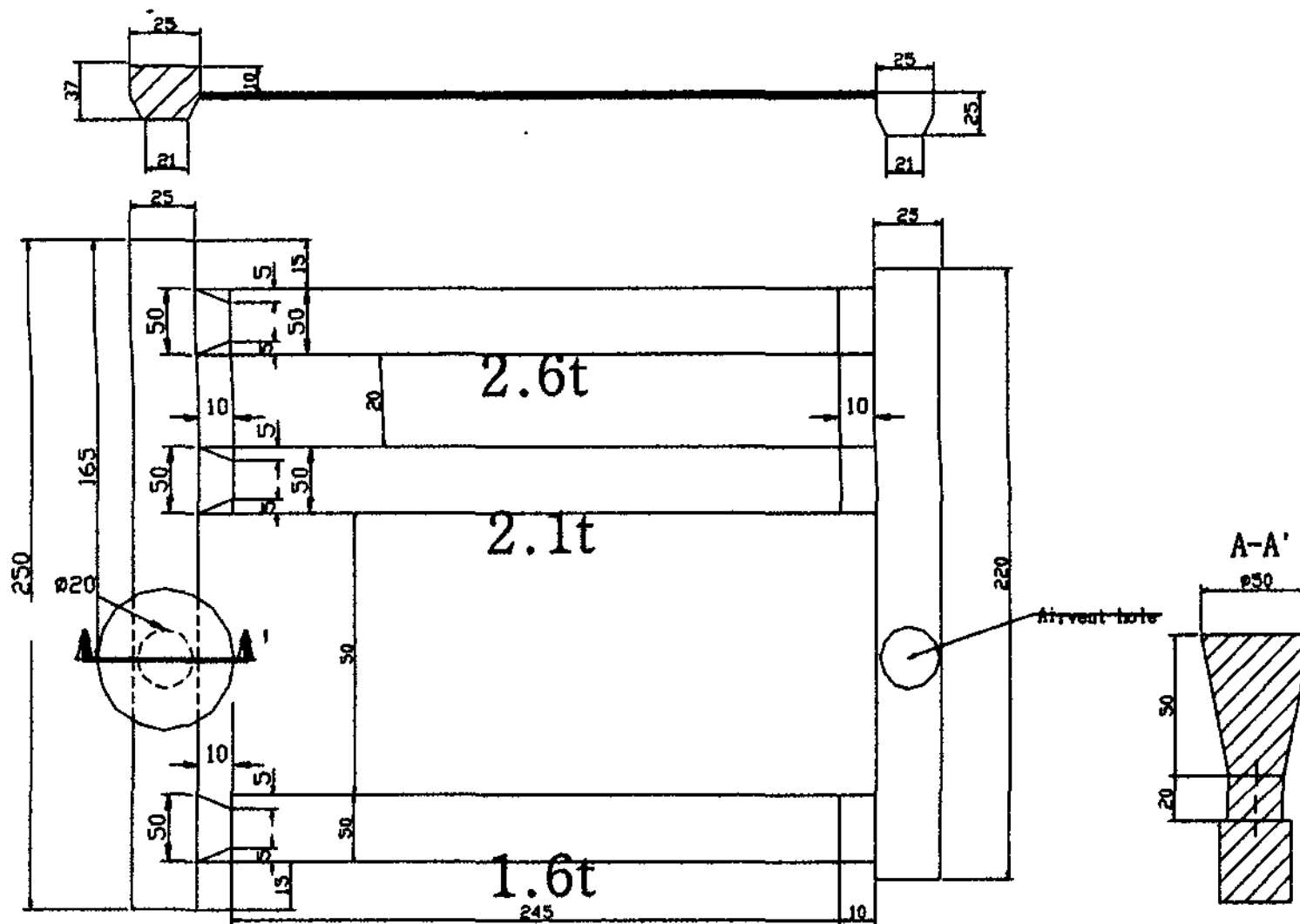


Fig. 1. Gating system for fluidity test casting.

계하여 유동해석을 수행한 결과를 토대로 원형을 제작 하였으며 정밀도가 양호한 펩셋(pep set)형 주형을 사용하였다. 사용된 주물사는 호주산으로 입형이 환형이고 입도는 50-80AFS 이었으며 도형제는 사용하지 않았다. Fig. 1은 폭 50, 길이 245, 두께가 각각 2.6, 2.1, 1.6 mm 인 박육 시험편의 탕구 방안을 나타내었으며, 용탕주입시 주형내의 공기저항을 배제하기 위해 탕구 반대편에 시편과 연결된 폭 20, 길이 220 mm의 릴리스와 지름 20 mm의 배기공(air vent)을 설치하였다.

Table 1은 유동성 시험에 사용된 스테인리스강 합금들의 화학조성을 보여주고 있다. 시험용탕은 고주파 유도용해로(100 kg, 100 Hz)에서 용해하였으며, 1200°C로 예열된 주입 레이들을 사용하여 각각 1665, 1630 및 1575°C로 시편주형에 주입하였다. 이때 주형은 바닥에 수평이 되도록 하였으며, 주입온도는 침지식 온도계(MARK III, DIGITAL METERSTIC, LEADS and NORTHRUP)를 사용하여 주형에 주입하기 직전에 용

탕 온도를 측정하였다.

시편이 냉각된 후 탈사하여 주입 합금, 주입 온도 및 주입 두께별로 각각의 시편의 유동된 길이를 측정하였으며, 유동성 시험은 연속 유동 길이(continuous-fluidity length)개념[11]을 도입하여 주물시편에서 용탕이 흘러 완전하게 형성되는 길이, 즉 주조시편에서 misrun이 생기는 시점까지의 길이를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 강종에 따른 유동길이의 영향

스테인리스강인 대표적인 오스테나이트계(SSC13), 페라이트계(STS430), 마르텐사이트계(HRSC3) 및 석출경화형 스테인리스강(SSC24)의 주입온도에 따른 박육 유동성을 조사하였다. 모든 합금 또는 주입온도에서 주입 시간은 1.5초로 일정하게 하였다.

Fig. 2는 주입된 시편 형상을 나타낸 것이며, Fig. 3

Table 1. Chemical compositions of test alloys(wt%)

Stainless Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Cu	Nb	SPEC.
SSC13	0.06	0.83	0.82	0.02	0.02	9.50	19.0	0.22	-	-	-	KS
STS430	0.06	0.26	0.40	0.02	0.01	0.40	17.1	0.30	-	-	-	KS
SSC24	0.06	0.60	0.50	0.02	0.01	4.06	15.6	0.13	-	3.17	0.24	KS
HRSC3	0.33	0.55	0.58	0.02	0.00	0.17	12.4	0.12	-	-	-	KS
STS430 (-2W-1Nb)	0.06	0.26	0.30	0.02	0.01	0.40	17.6	0.30	2.05	-	0.98	

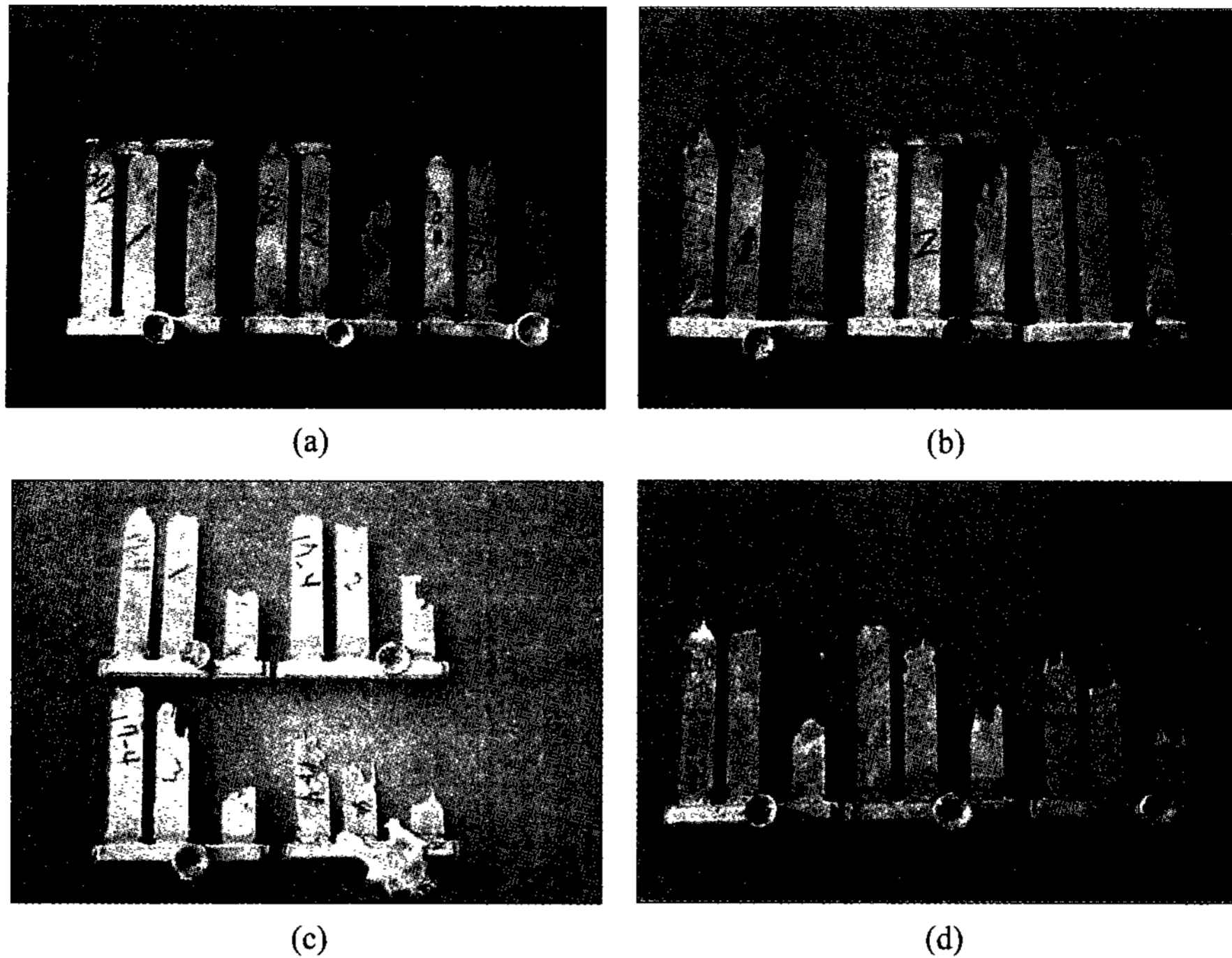


Fig. 2. Fluidity results of thin wall test castings. (a) SSC13, (b) STS430, (c) SSC24, (d) HRSC3.

은 각각 주입온도 1665, 1630 및 1575°C에서 주입된 시편의 유동된 길이를 측정된 결과이다. 주입된 모든 합금에서 시편 두께가 2.6 mm에서는 주입온도 1630°C 이상에서는 시편 최대 성형길이인 245 mm 까지 모두 양호하게 충전되었으나, 주입온도 1575°C에서 주입합금 HRSC3는 시편 길이 190 mm에서 misrun이 발생하였다. 시편 두께가 2.1 mm 인 경우 주입온도 1665°C에서는 주입합금인 SSC13, STS430 및 SSC24은 길이 245 mm의 시편에서는 주조결함(misrun)이 발견되지 않았으나, HRSC3 중은 시편 길이 188 mm에서 misrun이 발생되었고, 주입온도 1630°C에서 SSC13 및 STS430 은 완전히 성형되었으나 SSC24와 HRSC3은 각각 228와 118 mm에서 misrun이 발생하였다. 주입온도 1575°C에서는 155~230 mm의 범위에서 모두 misrun 이 발생하였다.

또한 시편 두께가 1.6 mm 인 경우에는 주입온도 1665, 1630 및 1575°C에서 각각 82~188, 85~128 및 48~140 mm 범위에서 misrun이 발생하여 건전한 주조품을 얻기가 어려웠다. 반면에 주입금속이 SSC13에서는 시편두께가 1.6 mm, 용탕 주입온도 1575°C의 경우, 140 mm의 유동길이를 나타내어 본 실험에서 사용된

합금계 중에서 유동성이 가장 좋게 나타난다. 스테인리스강 박육주조의 경우 Table 1에서 보이는 바와 같이 합금조성 중에서 Cr이 W을 제외한 다른 원소에 비하여 더 크게 유동성을 증가시켰다. 오스테나이트계 스테인리스강인 SSC13은 Cr 량이 19%로 가장 많이 함유되어 있을 뿐만 아니라 Ni 및 Si 등 유동성에 좋은 원소가 들어 있어 유동성이 가장 우수하였고, 페라이트계 강인 STS430에서는 오로지 Cr 량만 17.1%로 대량 들어 있어도 유동성이 SSC13 다음으로 좋은 것으로 나타났다. SSC24에서는 Cr 함량이 15.6%이고 Ni의 함량이 4.06%로 많이 함유되어 있으나 Ni이 유동성에 크게 영향을 주지는 못하였고, 마르텐사이트계인 HRSC3에서는 유동성 증가 원소인 C 함량이 0.34%로 가장 높음에도 불구하고 Cr의 12.4%로 함량이 낮기 때문에 유동성이 가장 나쁜 것으로 나타났다.

따라서 스테인리스강의 합금 원소에 따른 용탕의 유동성은 Cr의 함량의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며 본 연구에서는 동일한 시편과 동일한 주조조건인 경우 오스테나이트계 > 페라이트계 > 석출경화형 > 마르텐사이트계 스테인리스강 순서로 판상의 유동 길이가 길어짐을 알 수 있었다.

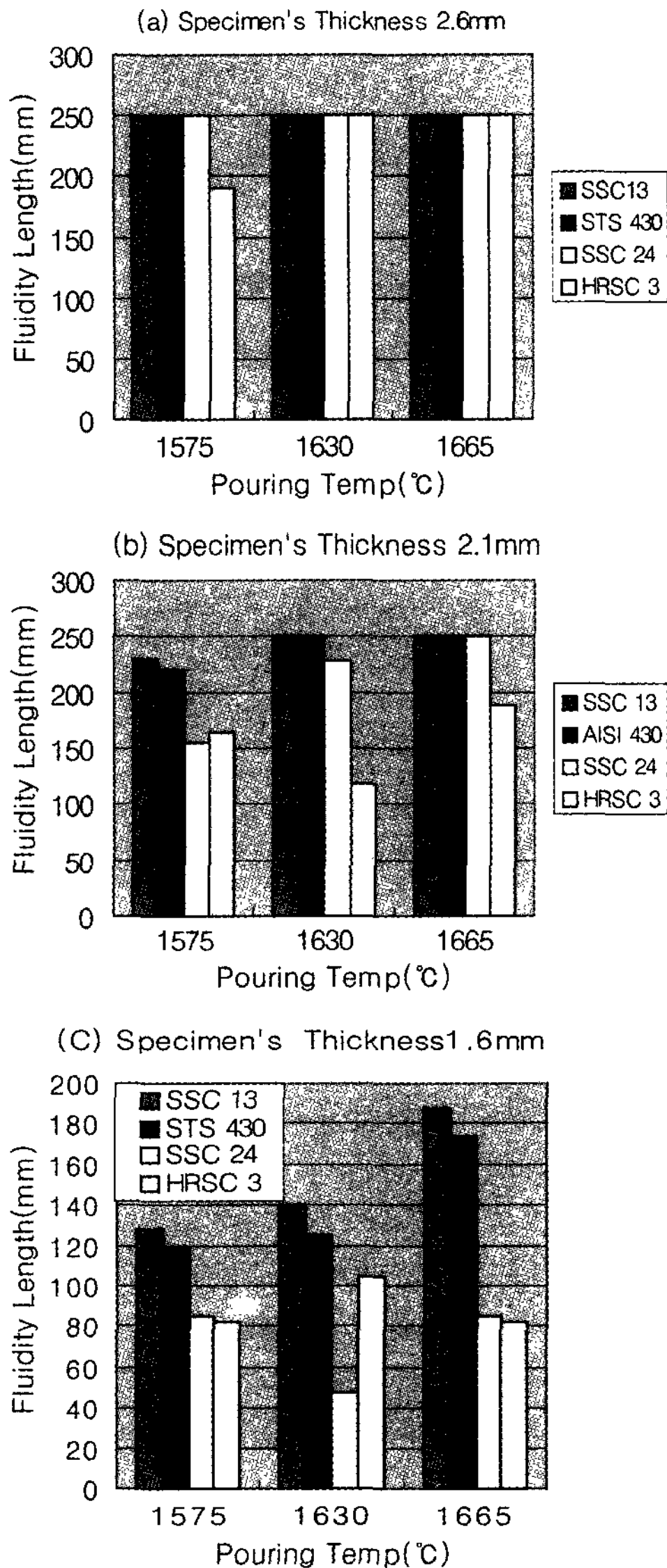


Fig. 3. Effects of chemical compositions and pouring temperature of stainless steels on the fluidity.

32 주입온도의 영향

주입온도의 유동성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 SSC13 및 SSC24 조성의 용탕을 주입온도를 변화시키면서 주입하였다. 주입시간을 1.5 sec로 일정하게 하고 주입온도에 따른 SSC13 및 SSC24 조성의 용탕의 유동 변화는 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. Fig. 4(a)의 SSC13의 경우 주입온도를 각각 1530, 1575, 1630 및 1665°C에서 주입한 결과 시편 두께 2.6 mm는 모든 주입온도에서 245 mm 까지 모두 충전되었고, 시편 두

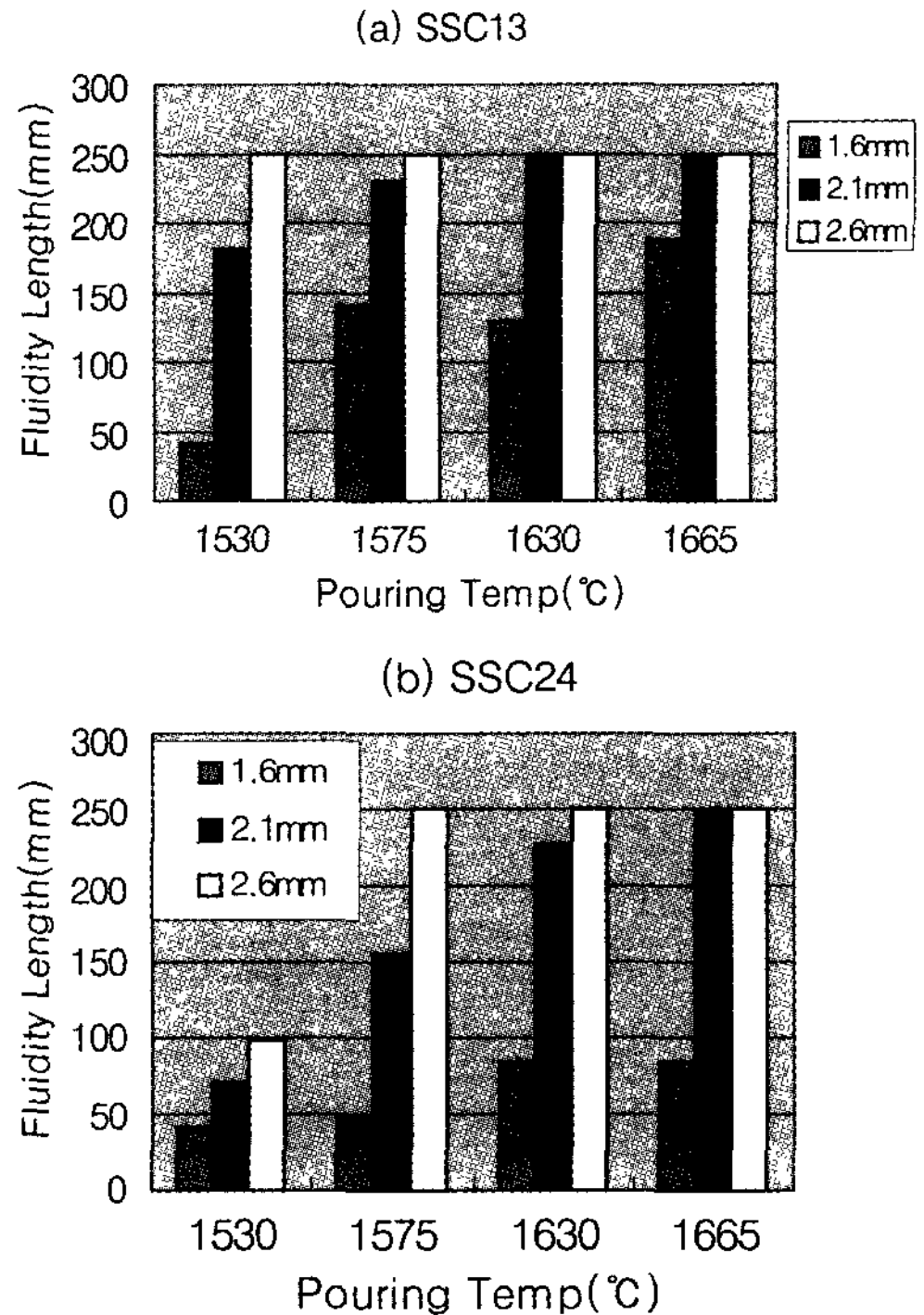


Fig. 4. Fluidity changes with the pouring temperature. (a) SSC 13, (b) SSC 24.

께 2.1 mm에서는 주입온도 1530와 1575°C 일 때 각각 182와 230 mm에서 misrun이 발생하였으나 주입온도 1630와 1665°C 일 때 모두 시편 길이 245 mm에 대하여 misrun이 발생하지 않았다. 시편 두께 1.6 mm에서는 각각의 주입온도에 대하여 각각 40, 140, 128 및 188 mm에서 misrun이 발생하였다. 이 결과에서 나타난 바와 같이 주입온도가 증가됨에 따라 유동성은 증가하였다. 특히 SSC13은 두께가 2.6 mm 인 경우 주입온도가 1530°C 이상에서는 misrun이 발생되지 않고 용이하게 충전될 수 있음을 나타내었고, 두께가 2.1 mm 인 경우 주입온도 1575°C 이상에서 주물성형이 가능한 반면, 두께 1.6 mm 인 경우에는 주입온도가 1665 °C에서도 misrun이 발생되었다.

Fig. 4(b)의 SSC24 인 경우 1530, 1575, 1630 및 1665°C에서 주입한 결과 두께 2.6 mm는 1530°C에서 만 유동 길이 175 mm에서 misrun이 발생한 것을 제외하고 모두 시편에 용탕이 완전히 충전되었다. 두께 2.1 mm 인 경우 각각의 주입온도에 대한 유동 길이는 126, 232, 238 및 245 mm 이었으며, 두께 1.6 mm 인 경우 각각의 주입온도에 대해 92, 87, 145 및 116

mm에서 misrun이 발생하였다. 이 결과에서도 주입온도가 증가됨에 따라 유동성은 증가하여 SSC13와 동일한 경향을 나타내었다. 한편 주물시편 두께에서 SSC24는 2.6 mm에서 주입온도 1575°C 이상에서는 유동성이 양호하여 245 mm misrun이 발생하지 않고 주조 성형이 가능한 반면 두께가 2.1 mm에서는 1630°C 이하에서는 유동성이 떨어져 misrun이 발생하였고, 두께가 1.6 mm에서는 SSC13 보다 약 절반이하의 유동 길이를 나타내어 오스테나이트계 스테인리스강보다 유동성이 훨씬 떨어짐을 알 수 있었다.

액상의 금속은 일종의 액체의 한 형태이므로 유동성은 점도와 역수의 관계가 있다. 일정한 압력에서 유동성(Ø)은 온도에 의존하게 되며 일반적으로 다음 식으로 표기될 수 있다.

$$\text{Ø} = A \exp(-q/kT) \quad (1)$$

여기서 A와 k는 상수이고, q는 활성화 에너지, T는 온도를 나타낸다.

위의 시험 결과에서도 주입온도가 높으면 유동성은 증가하게 되며 온도에 절대적으로 의존되는 것을 알 수 있다. 주입온도는 용탕의 열용량에 대해 영향을 주기 때문에 동일한 금속 또는 합금의 경우, 액상선 위로 과열시켜 액상의 온도가 증가하면 내부 에너지의 증가로 원자의 mobility 및 mean free path가 커져서 유동도가 증가하게 된다. 또한 용탕의 온도가 증가함에 따라 용탕의 표면장력이 저하되어 유동성은 증가하게 된다. 그러나 너무 용탕의 온도를 상승시키면 용탕속에 가스의 함유가 급증하며, 산화물이 증가하게 되고, 주입 후 주조품의 결정립이 커지기 때문에 박육 주조에서도 적당한 과열온도를 설정할 필요가 있다.

3.3 주입속도의 영향

주입속도(pouring rate 또는 casting rate)는 탕구로부터 주입되는 단위 시간당 주입중량, 즉 용탕의 주입 유속으로 표시할 수 있으며, 용탕 유속에 베르누이의 원리를 적용하면 주입컵 및 탕구를 통하여 주입될 때 유속은 마찰이 없고 압력이 일정하다 하면 다음 식으로 표기될 수 있다.

$$V = \sqrt{2gH} \quad (2)$$

여기서 V는 용탕의 유속이며, g는 중력가속도, H는 주입컵의 높이와 탕구의 높이를 합한 높이이다.

Hiratsuka 등은[13]는 vacuum suction fluidity test 법에서 액상의 흐름이 중지될 때까지의 총 길이를 나타내는 유동도를 다음과 같이 표기할 수 있다고 하였다.

$$L_f = VT_f \quad (3)$$

여기에서 L_f 는 fluidity(Length)[mm], V는 velocity of metal flow[mm/sec], T_f 는 fluidity life(sec)로 표시하였다.

(3)식에서 뜻하는 fluidity life는 vacuum suction fluidity test 법에서 감압력(suction force)의 크기와 측정온도 그리고 합금원소 등에 의해 결정되는 인자로 설명되었다. 위 (3)식은 주입금속의 합금이 동일하고 압력이 일정한 본 실험에 적용하기 위하여 T_f 를 주입되는 용탕온도에 국한하여 T_p 으로 대체하고 용탕의 유속 V를 주입속도 V_p 로 대체하면 유동길이는 다음과 같은 식으로 표기될 수 있다.

$$L_f = k V_p T_p \quad (4)$$

여기서 L_f 는 유동길이(mm)이고, k는 상수이며, V_p 는 주입속도(mm/sec), T_p 은 주입되는 용탕온도(°C)이다.

(1)식에서 유동성은 온도에 의존한다고 하였고 유동성은 유동길이를 표시되는 바, (4)식에 의해 유동길이는 주입금속, 탕구계 및 제품, 주형, 압력조건 등이 같은 경우, 주입속도와 주입온도에 따라서 달라지게 된다.

본 실험에서는 주입온도에 대한 주입속도가 용탕의 유동성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 SSC13 오스테나이트계 스테인리스 주강을 주조 실험하였다.

Fig. 5는 SSC13의 주입온도와 주입속도에 따른 유동성 시험편의 주조상태를 나타낸 것이며, Fig. 6은 주입온도와 주입속도 변화에 대한 유동된 길이를 시편 두께별로 나타낸 것이다. 주입온도를 1630°C로 일정하게 하고 주입속도를 2와 1 kg/sec로 변화시켜 주입한 시편의 유동성에서 주입속도 2 kg/sec는 각각 시편 두께 2.6, 2.1 및 1.6 mm에 대해 유동 길이가 245, 245 및 128 mm 인 반면, 주입속도가 1 kg/sec로 늦은 것은 시편 두께 2.6, 2.1 및 1.6 mm에 대한 유동 길이가 35, 203 및 118 mm로 짧게 나타났다. 주입온도 1575°C에서 주입속도를 더욱 늦추어 2 kg/sec와 0.75 kg/sec로 주입 성형되었을 때 주입속도 2 kg/sec 인 경우 각각의 시편 두께에 대하여 245, 230 및 140 mm 인 유동 길이는 주입속도 0.75 kg/sec 인 경우 각각의 시편 두께에 대해 유동 길이가 10, 160 및 10 mm로 현저하게

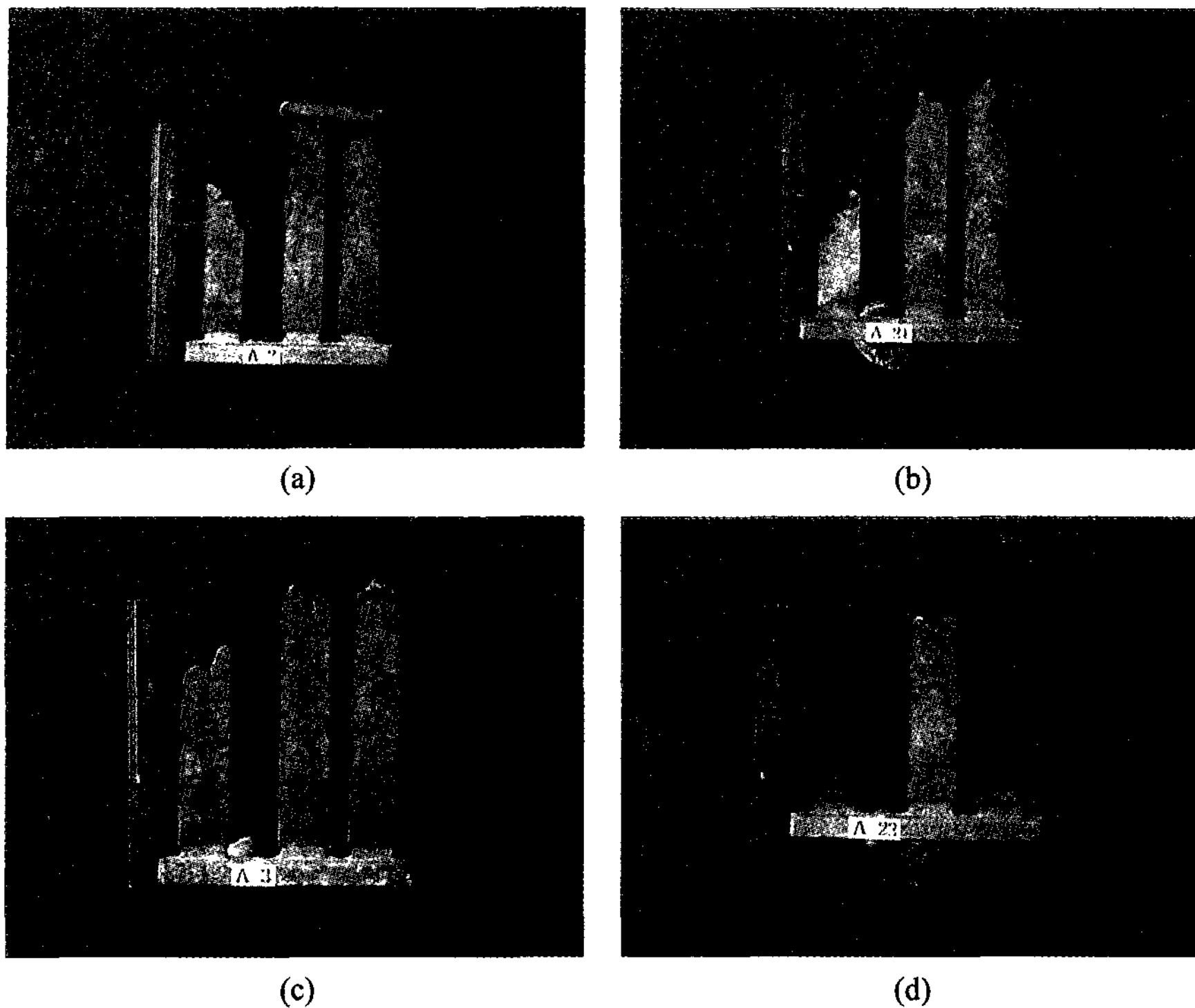


Fig. 5. Fluidity test castings of SSC13 at different pouring temp. and rate. (a)1630°C, 2 kg/sec, (b)1630°C, 1 kg/sec, (c)1575°C, 2 kg/sec, (d)1575°C, 0.75 kg/sec.

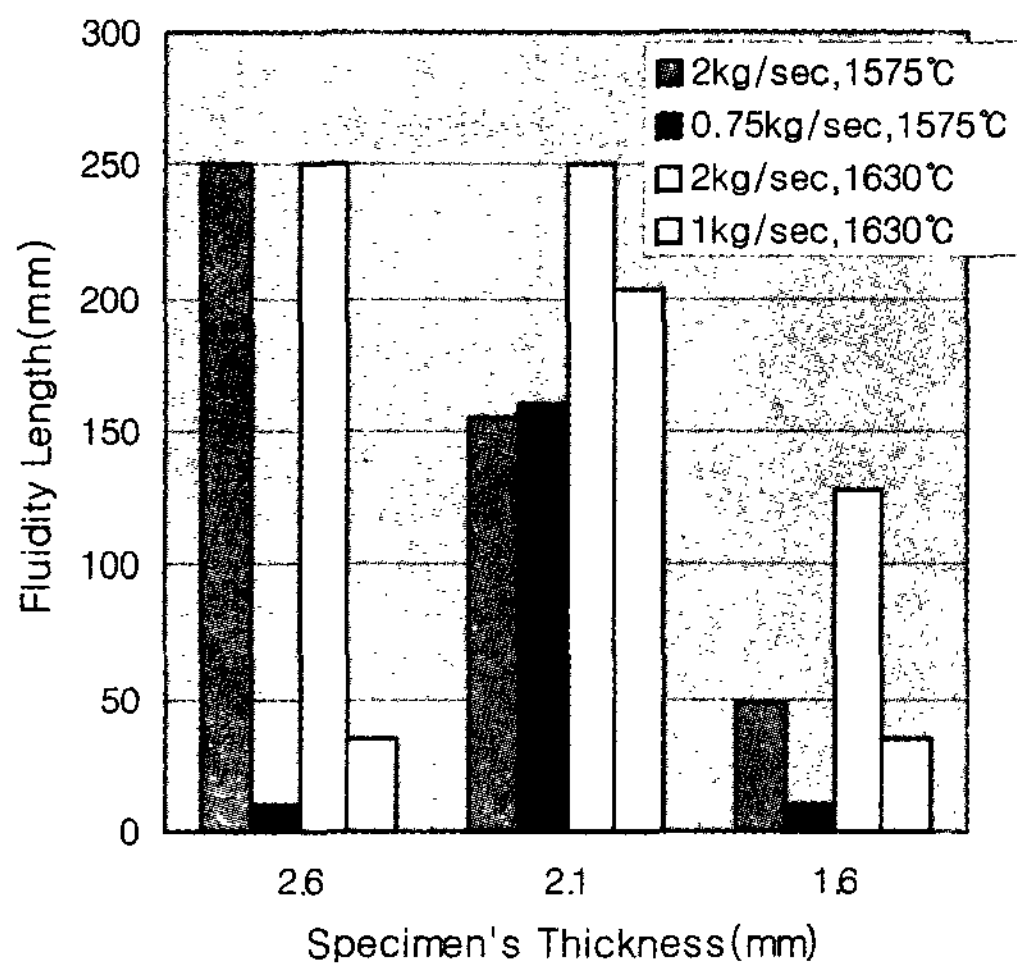


Fig. 6. Effect of pouring temp. and rates on the fluidity of SSC13.

유동 길이가 짧았다. 앞절에서 언급한 바와 같이 본 실험에서도 주입속도를 같게 하고 주입온도를 변화시켰을 때 주입온도가 높을수록 유동성은 증가하였다. 특히 시편 두께가 2.1 mm 인 경우 유동 길이는 조금 차이

가 났으나 두께가 2.6과 1.6 mm에서는 용탕이 거의 시편공간으로 흘러 들어가지 못하고 정지하였다.

실험 결과에서 (4)식에서 표기된 바, 유동길이는 주입온도가 같을 경우, 주입속도가 증가하면 길어지고, 주입속도가 같을 경우 주입온도가 높으면 유동길이가 길어졌다.

3.4 합금 첨가의 영향

페라이트 스테인리스강인 STS430과 동일한 용탕에 2%wt W와 1% Nb를 첨가하고 주입속도 1.5 sec, 주입온도를 각각 1,665 및 1,630°C로 변화시켜 합금의 첨가원소가 유동성에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 7은 주입온도 1665와 1630°C에서 첨가성분이 포함되지 않은 STS430과 STS430에 2% W와 1% Nb가 첨가된 유동성 시편의 주조상태를 보여준다. Fig. 8은 유동성에 미치는 주입온도와 주입된 시편 두께에 대한 첨가원소의 영향을 비교한 것이다. 주입온도 1665와 1630°C에서 두께 2.6 mm에서는 합금원소가 첨가되지 않은 STS430과 W 및 Nb가 첨가된 STS430 모두 시편 전체 길이 245 mm 까지 완전히 충전된 반면, 두께 2.1 mm, 주입

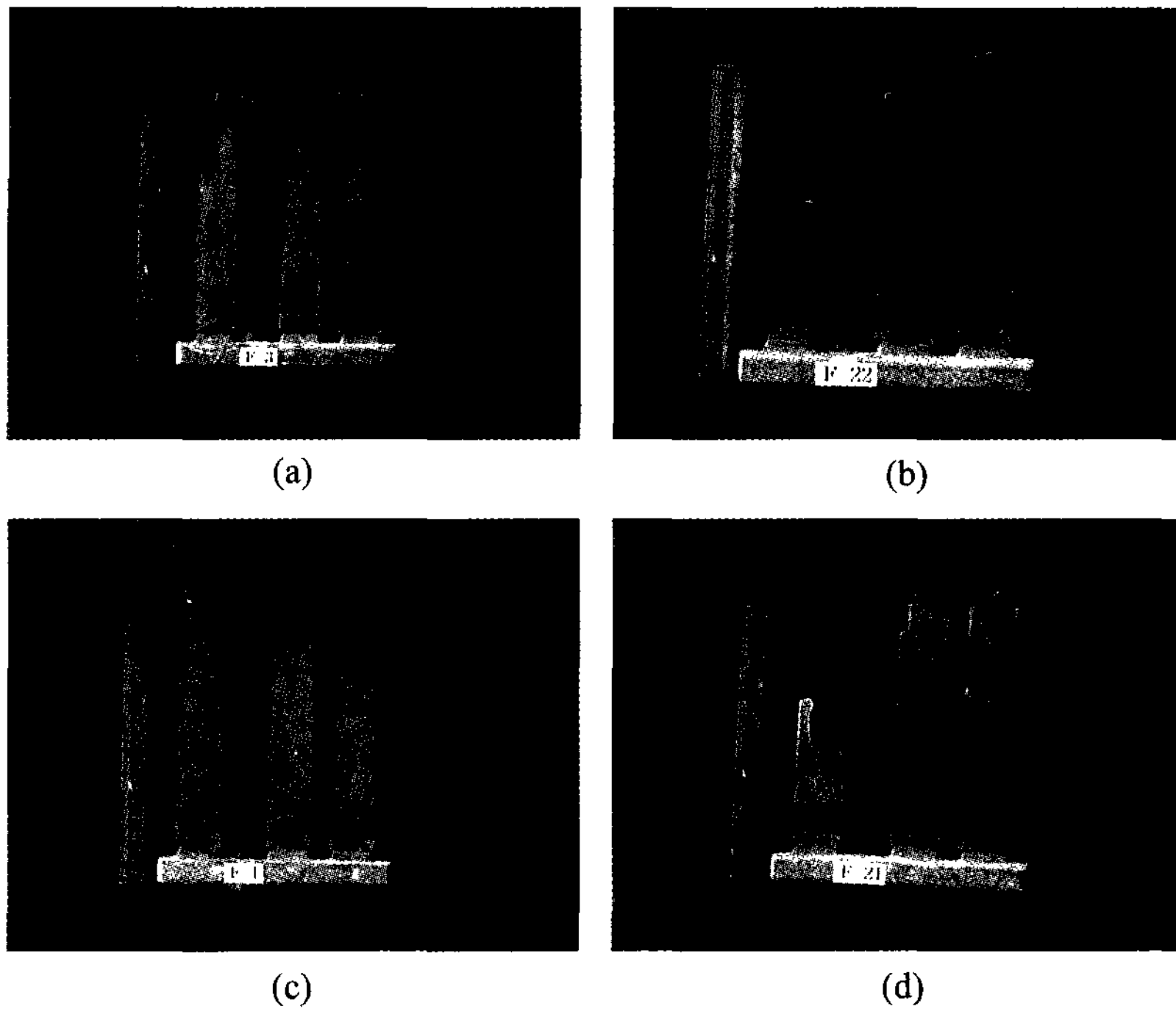


Fig. 7. Effects of alloying elements on the fluidity of STS430 with constant pouring rate. (a) without alloy addition (pouring temp. 1630°C), (b) with W and Nb addition (pouring temp. 1630°C), (c) without alloy addition (pouring temp. 1665°C), (d) with W and Nb addition (pouring temp. 1665°C).

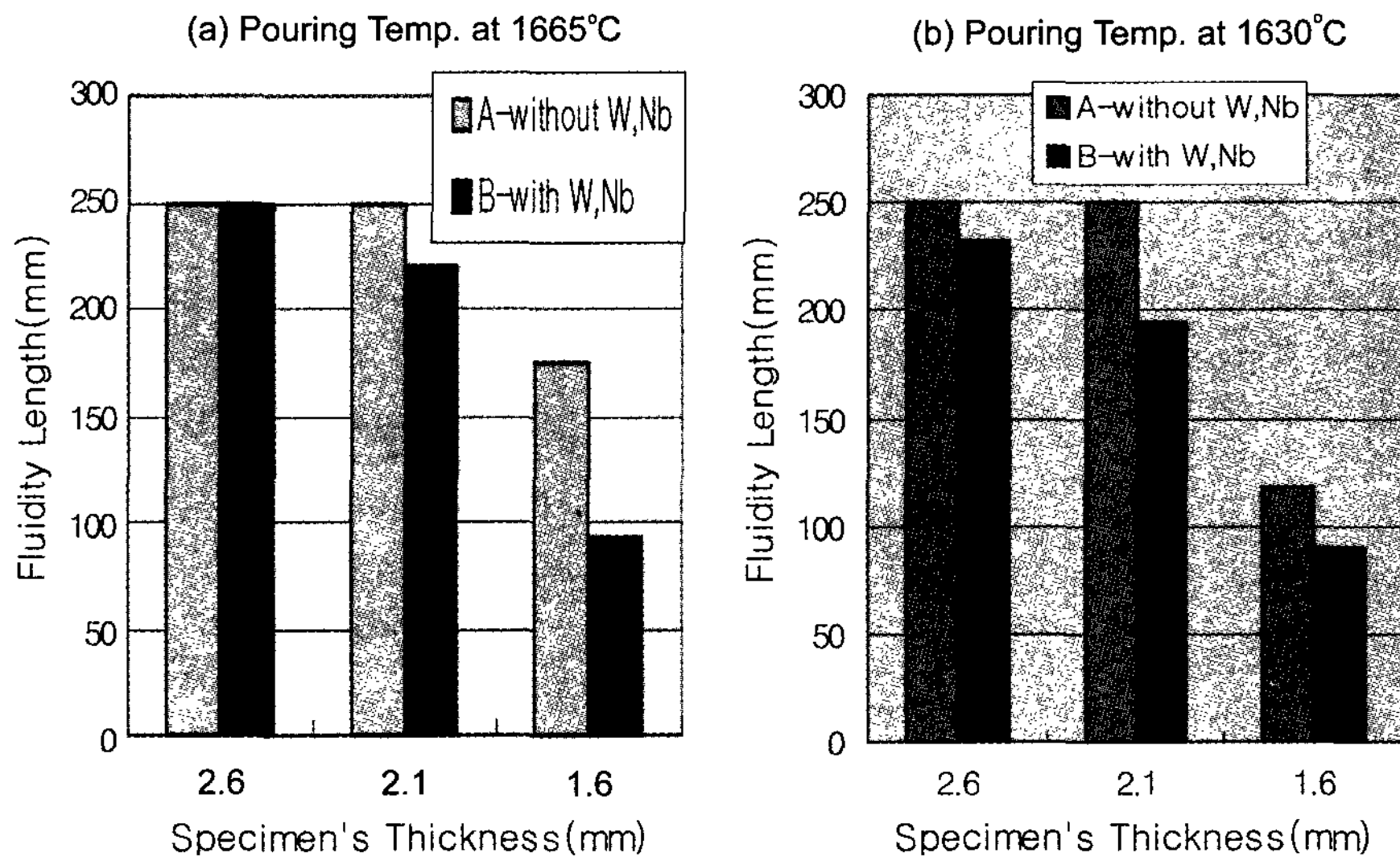


Fig. 8. Effect of W and Nb on the fluidity of STS 430.

온도 1630°C에서 합금원소가 첨가되지 않은 STS430은 245 mm 까지 완전 충전되었으나, W 및 Nb가 첨가된 STS430은 시편 길이 215 mm에서 misrun이 생

겼다. 두께 1.6 mm에서 각 주입온도에 대해 합금원소가 첨가되지 않은 STS430은 유동길이가 245 및 232 mm 이었으나, 합금이 첨가된 STS430은 각 주입온도

에 대한 유동 길이가 148 및 120 mm 이었다. 이 결과 W와 Nb이 첨가된 STS430이 합금이 첨가되지 않은 STS430보다 유동성이 떨어짐을 나타내었으며 주입온도가 낮을수록, 시편의 두께가 얇은 것일수록 유동성의 저하가 심하게 나타났다.

특히 합금원소가 첨가된 주입금속에서, Nb는 구조성이 좋은 것으로 알려져 있으나[14], W은 용질의 비중이 무겁고 용점이 높아 용탕의 밀도가 증가함으로써 유동성을 저하시킨다고 생각된다.

4. 결 론

스테인리스 주강 박육 구조품의 성형 가능성을 검토하기 위하여 유동성에 미치는 합금종류, 주입온도, 주입속도 및 합금첨가의 영향을 조사 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 구조조건에서 오스테나이트계(SSC13)>페라이트계(STS430)>석출경화형(SSC24)>마르텐사이트계 스테인리스강(HRSC3)의 순서로 유동성이 좋았다.

2. 오스테나이트계 스테인리스 주강인 SSC13와 석출경화형 스테인리스 주강인 SSC24에서 주입속도가 같을 경우 주입온도가 높은 것이 유동성은 증가하였다.

3. 오스테나이트계 스테인리스 주강인 SSC13에서 주입온도가 같을 경우 주입속도가 빠를수록, 주입속도가 같을 경우 주입온도가 높을 수록 유동성은 증가하였다. 즉 유동길이는 주입속도와 주입온도에 의존하였다.

4. 페라이트계 스테인리스강인 STS430에서 2 wt% W 및 1 wt% Nb의 합금원소를 첨가했을 때 유동성은 저하하였으며, 주입온도가 낮을수록, 유동성 저하에 미치는 합금첨가의 영향이 더 컸다.

후 기

본 연구는 2000년 중소기업기술혁신사업의 일부로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Yoon, A and D Consultants, Monthly Report on the Global Automotive and Its component Industry, No. 3, March (2000) 23
- [2] T. Shimamoto, K. Asano, Y. Shioya, S. Ando, Development of the Stainless Cast-Steel Exhaust Manifold, SAE Technical Paper Series, 930621 (1993)
- [3] Chandley G. D., Counter-Gravity Casting Process for Making Thinwall Steel Exhaust Manifolds, SAE Technical Paper Series, 970920 (1997)
- [4] M. Ike, "Develop of Heat-Resistant Cast Steel for Exhaust Manifolds", in int. J. of Materials and Product Technology, Vol. 6, No. 3 (1991)
- [5] Feliu S. TAFS, 72 (1964) 129
- [6] Andrew J. H. Percival R. T. Bottomley G. T. C., Iron and Steel Special Report, 15 (1936) 43
- [7] Evans E. P. BCIRA J., 4(319) (1951) 86
- [8] H. Nieswaag, H. J. J. Dean, Experiments on mould flow in thin wall castings, 57th world foundry congress (1990)10
- [9] J. Campbell, Thin wall castings, Materials Science and Technology, 4 (1988) 194
- [10] Campbell J., Olliff I. D., AFS Cast Metals Research J., June (1971) 55
- [11] Feliu S. TAFS, 70 (1962) 838
- [12] Woo-Sik, Lee, Byung-Joon Ye, Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol. 19, No. 4 (1999) 310
- [13] S. Hiratsuka, E. Niyama, T. Funakubo, K. Anzai, Trans Japan of Foundrymen's Society, 13 (1994) 18
- [14] Peter Y. Chen, Richard Lyons, *et al*, SAE Technical Paper Series, 962169 (1996) 59