

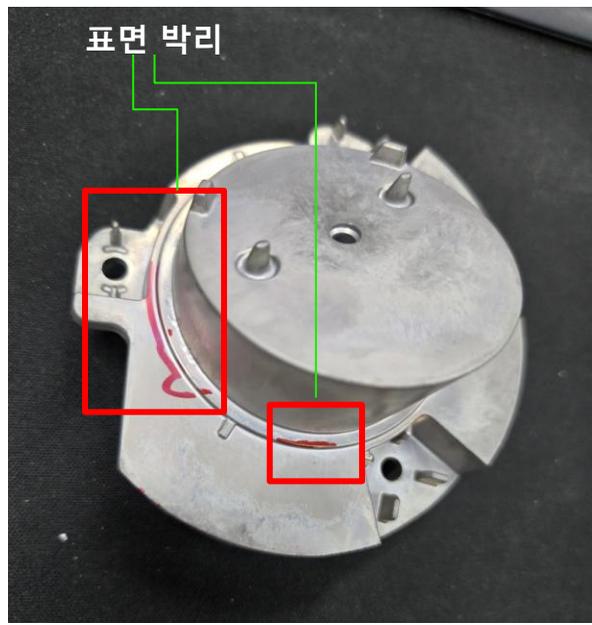
Heat Flux기반 계면 열전달 개선을 통한 박리 결함 개선 및 비용 절감

LUMINUS INC

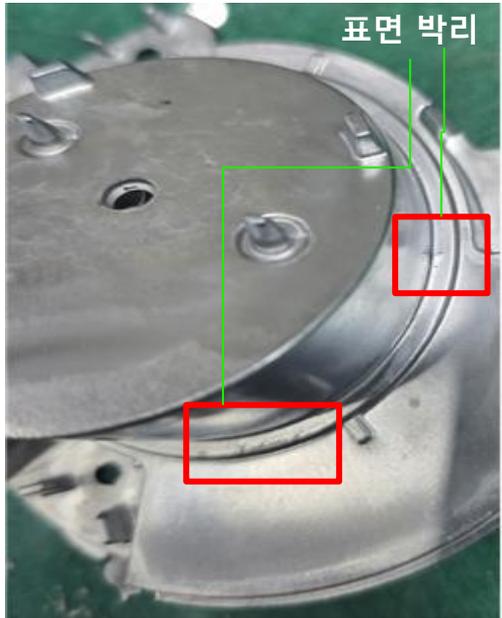
황두진 책임

Issue – Surface Delamination (Peeling)

개발품



초도 양산품



**박리 지속 발생
사상 공수 추가 결정**



현상 : 게이트 구조의 한계 / 과도한 주조 조건으로 개발 당시부터 양산까지 박리가 지속적으로 제품 실링 테두리 부분에 발생
결과 : 생산성 저하 / 후공정에서 사상 공수 추가 발생
사유 : 품질적으로 개선되지 않을 것으로 판단 , 후공정 공수 추가 협의 → **사상 공수 비용 추가 발생**

박리 발생 요소

- 금형-용탕간 계면의 열전달 불균일 (**Heat Flux**)
- 난류/가스 혼입으로 인한, 응고 지연과 온도 편차 (**Filling Time**)
- 반복 사이클에 따른 열피로 누적 (**Filling Temperature**)
- 과도한 유속에 의한 용탕 충돌 (**Velocity**)

Heat Flux : 단위 면적당 단위 시간에 이동하는 열의 양

$$q = \frac{Q}{A \cdot t}$$

- q : 히트플럭스 (W/m^2)
- Q : 전달된 열량 (J)
- A : 열이 통과하는 면적 (m^2)
- t : 시간 (s)

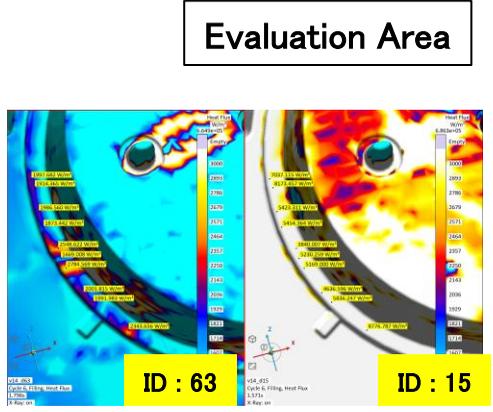
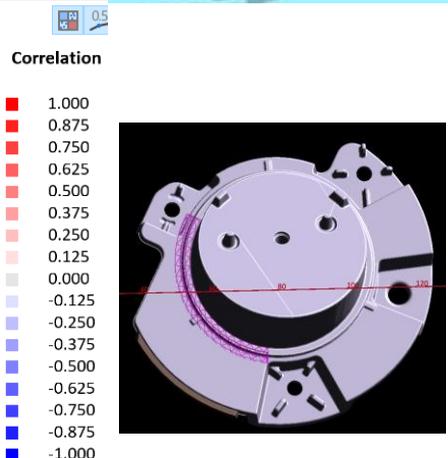
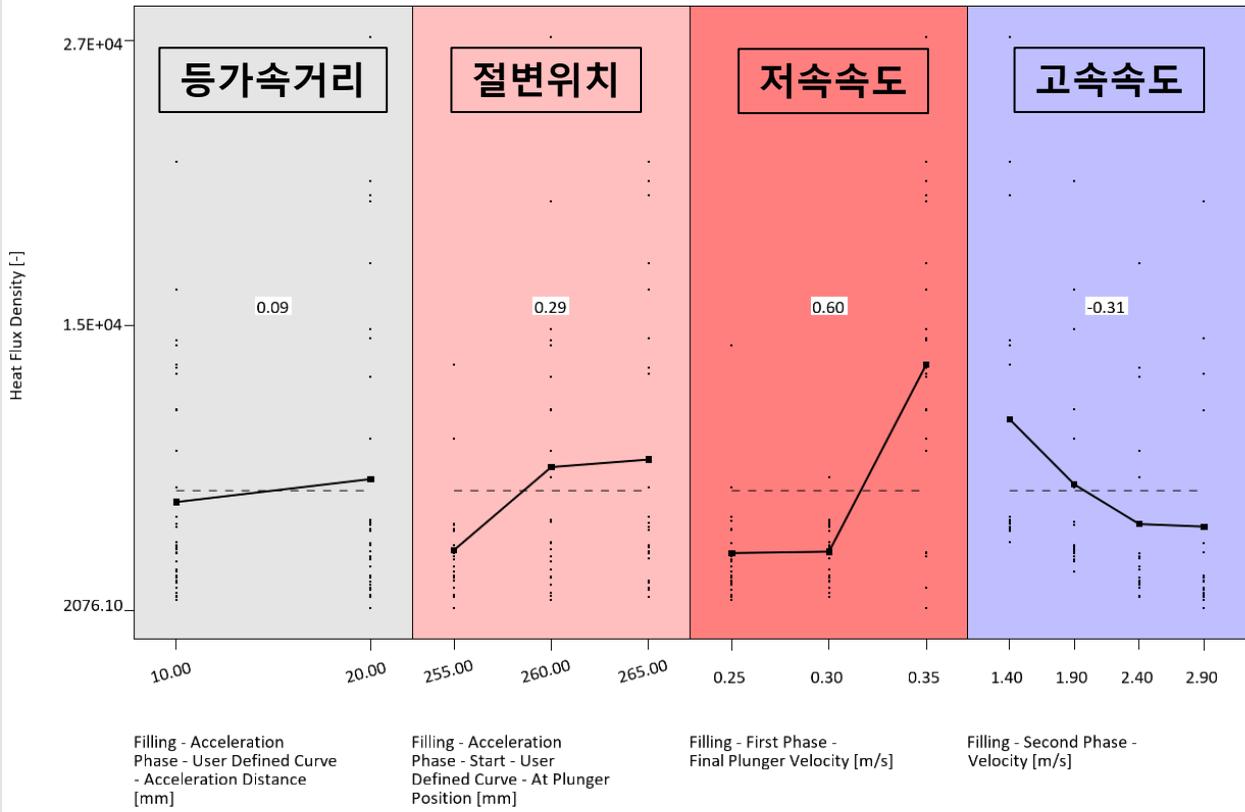
Heat Flux = 금형과 용탕 계면 사이의 열전달 속도의 지표

*값이 높을수록, 금속이 금형에 잘 밀착되어, 열이 빠르게 금형으로 전달됨

*값이 낮을수록, 금형-용탕 계면에 공극/산화층 존재 → 열저항 증가, 난류/가스 혼입등의 결함 발생

Evaluation Area – Heat Flux

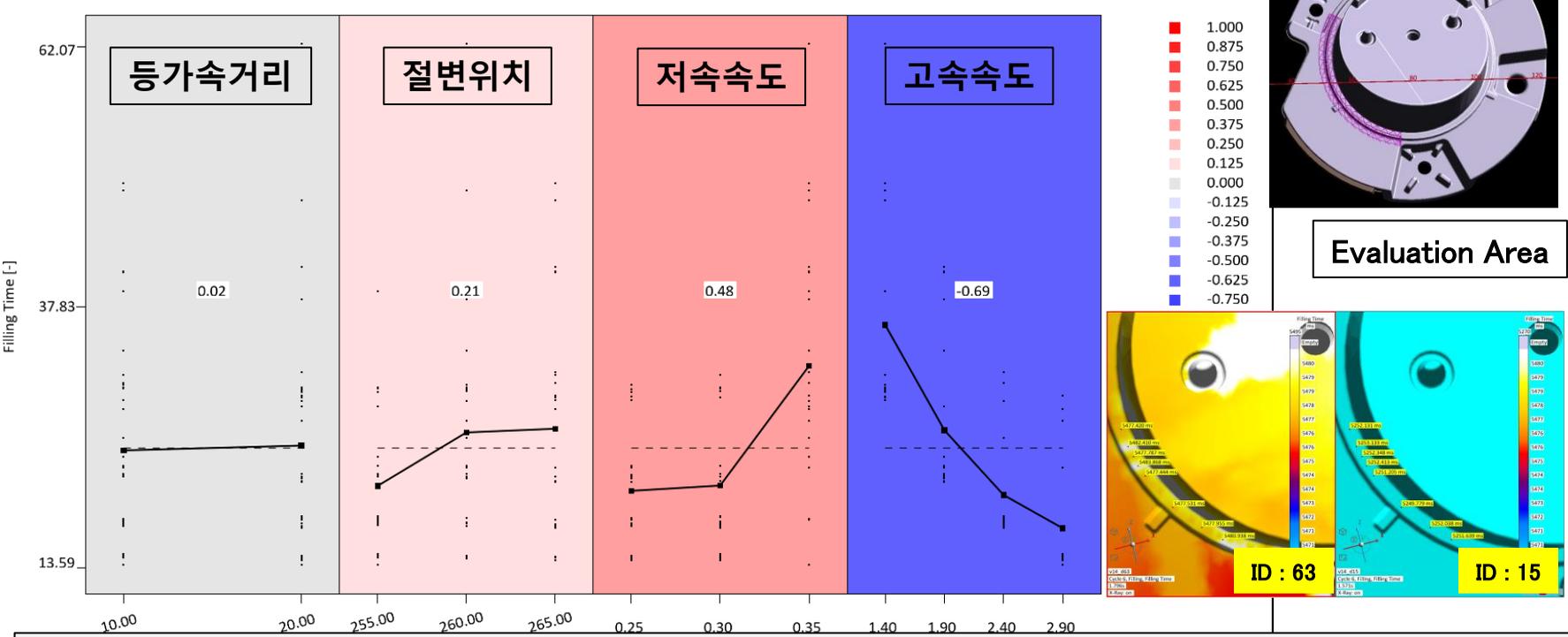
Heat Flux 중심의 박리 기여도



저속 구간 : 속도를 적정 수준으로 유지 / 저속을 길게 설정할수록 열유속(heat flux) 증가
 고속 구간 : 속도가 빠를수록 열유속 값이 감소 (요인: 충돌충진 형태로 열이 금형으로 전달되기 전에 반산 계면 접촉 불량/열저항 증가로 감소)
 결론
 저속 → 열유속 증가 → 계면 접촉 안정 → 박리 억제 경향
 고속 → 열유속 감소 → 열저항 증가 → 박리 위험 상승

Evaluation Area – Filling Time

충진 시간과 열전달의 연관성



저속 구간 : 저속을 길게 유지하거나 속도를 서서히 상승시키면 충진 시간 증가
 (요인 : 유동 안정성이 확보되어 금속 흐름이 균일하게 퍼지지만, 상대적으로 충진 완료까지의 시간이 길어짐)

고속 구간 : 속도가 빠를수록 충진시간 감소, 금속이 빠르게 진행하지만 유동 균일성이 떨어지고, 국부적인 충돌 충진 및 가스 혼입 가능성 증가

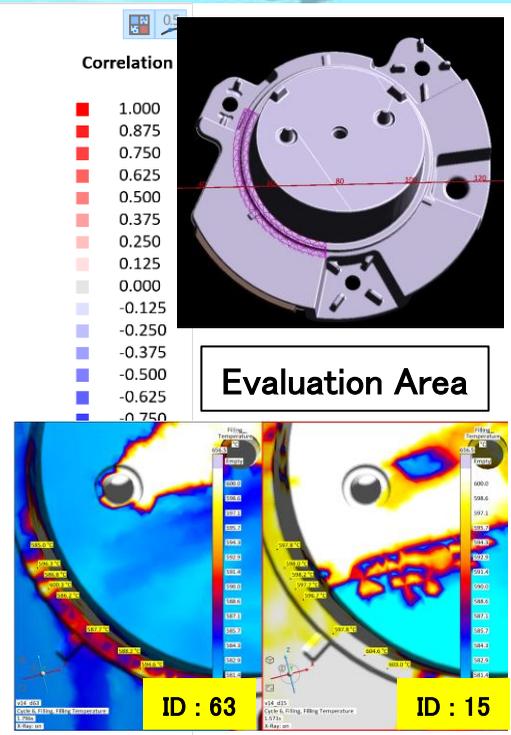
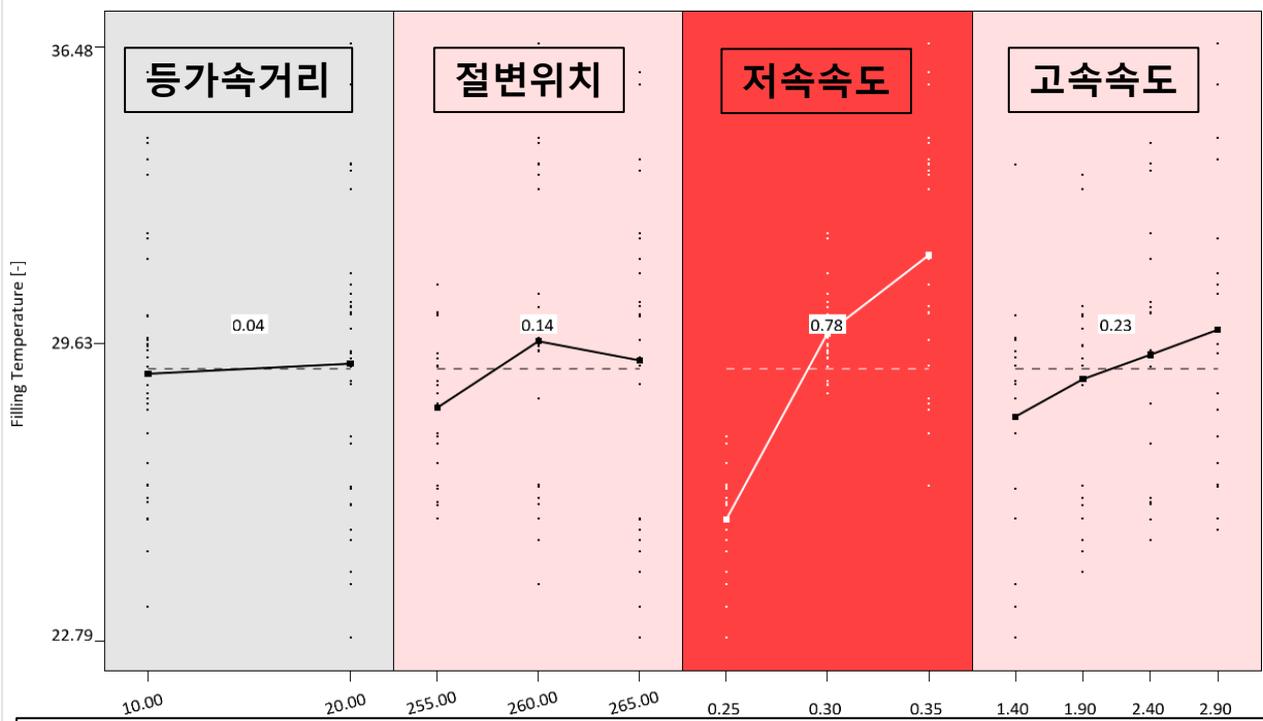
결론

저속 → 유동 안정성 확보 → 충진 균일도 향상 (응고 시 열저항 완화)

고속 → 충진 불균일 → 응고 경계 불안정 → 박리/가스 발생 가능성 증가

Evaluation Area – Filling Temperature.

충진 중 온도 상승의 기여도



저속 구간 : 저속 조건에서 속도를 점진적으로 상승시킬수록 충진 온도가 상승, 가장 큰 영향도를 보이며 충진 중 금속 유동의 체류 시간이 길어 금속이 금형 표면에 더 많은 열을 전달하고 국부 온도 상승을 유도

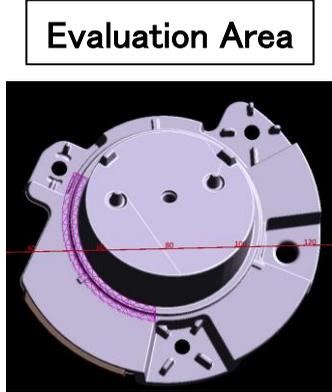
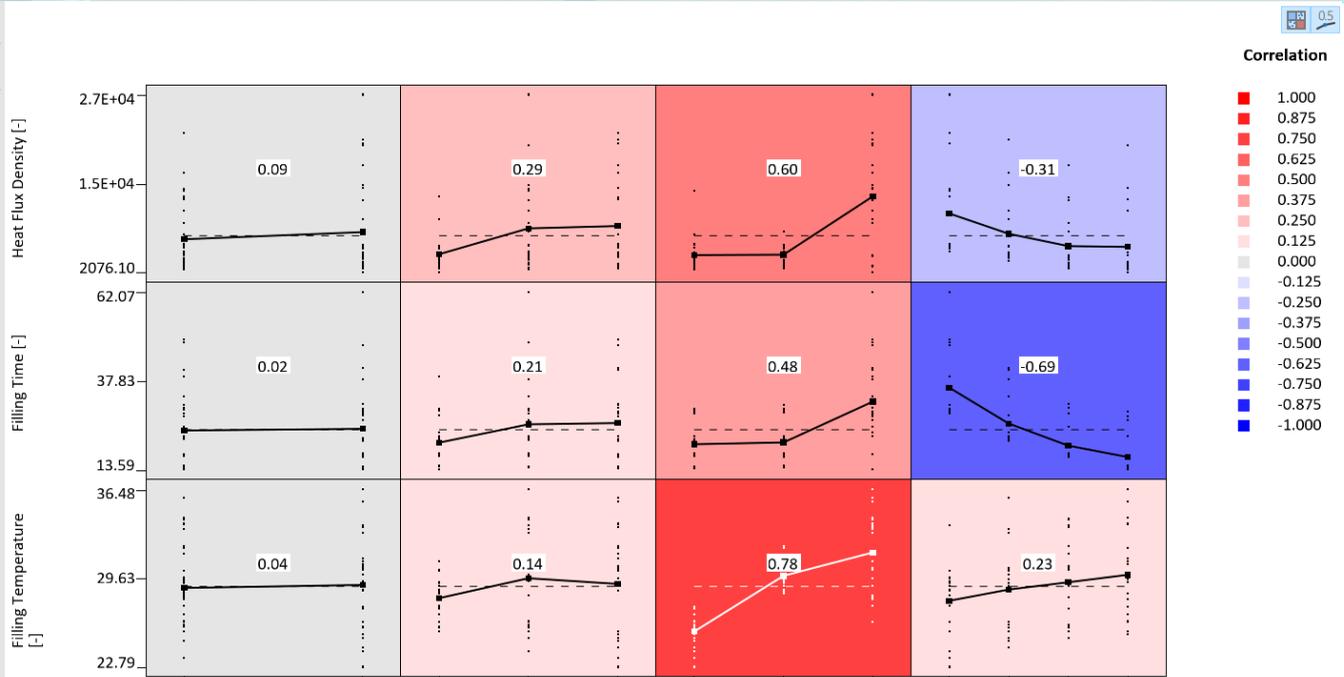
고속 : 속도가 빠를수록 충진 온도 상승

결론

저속 상승 → 안정적 유동 + 온도 상승 → 계면 열전달 우수

고속 상승 → 국부 과열층 형성 + 접촉 불균일 → 열저항 증가, 박리 유발 가능성 있음

Evaluation Area – Total correlation



Heat flux 영향도 분석

고속속도 구간의 특징 : 충전시간 빠름 / 온도 높음 / 열유속 낮음 = 박리의 원인

= 속도가 빠르는데 열유속(heat flux)이 감소 되는 이유 ?

속도가 빠르면 계면에 닿는 시간과 충전 시간은 빠르지만, 상대적으로 계면의 열전달이 느리게 확산, 이때 난류가 발생,

열전달 속도가 지연, 열 방출이 쉽지 않아 열저항과 표면 온도 상승

열저항이 크기 때문에 속도가 빨라도 열유속은 감소하게 된다 (너무 느린 속도도 열전달이 느리기 때문에 응고 지연으로 열유속이 떨어진다)

참고 문헌

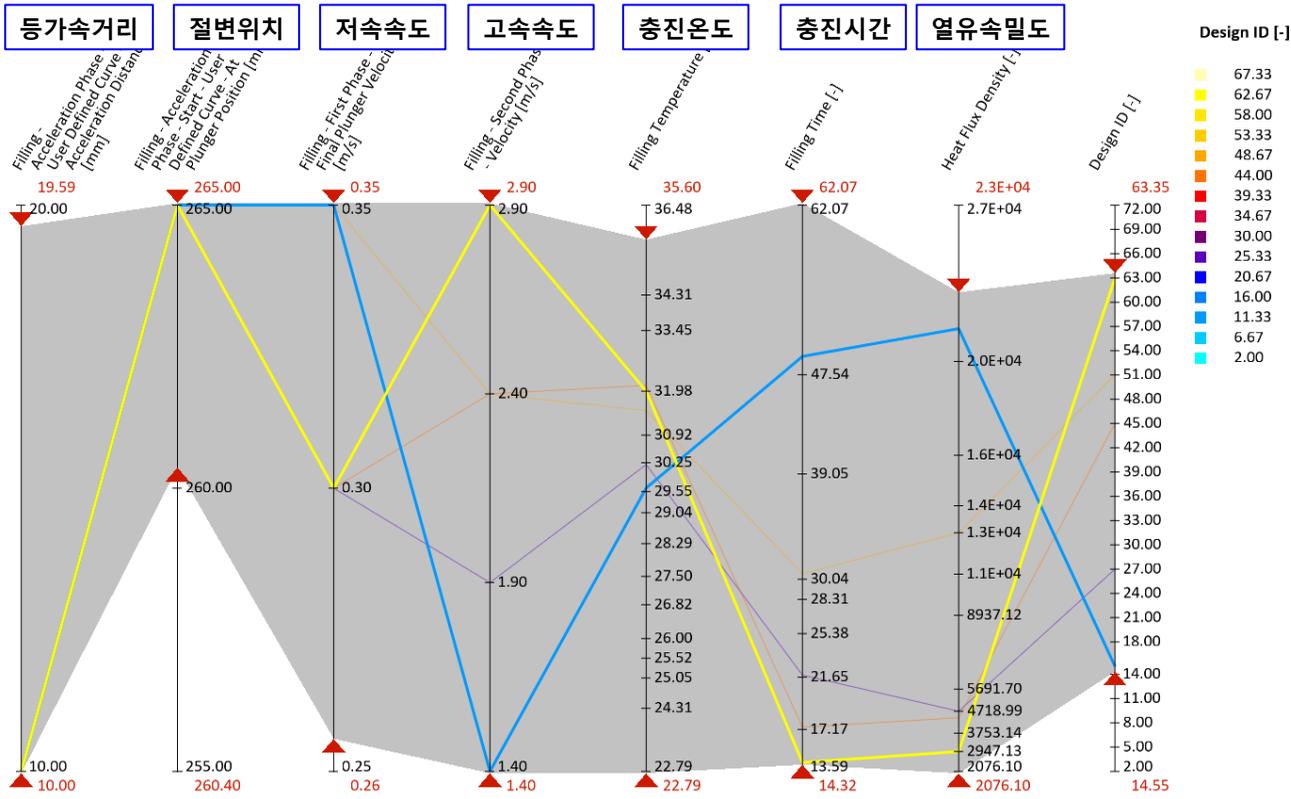
*Novel model for calculating the interface heat flux between roller and molten steel/solidified shell during twin-roll strip casting 캐스팅 계면의 열유속 / 열저항 변화)

*アルミニウム合金の高温での界面現象を利用した 高機能材料の創製계면을 통한 열유속 제어)

We set our goals as high as possible. Our key phrase in business is "make them impossible possible".



Evaluation Area – Parallel Coordinates



Selected Design(s): 15;63



최적 조건 선택

개선 전 조건 _ CASE ID 63 (노랑색) : 고속 ↑ / 온도 ↑ / 시간 ↓ / 열유속 ↓ = 박리의 원인

* 과속→금형과 용탕 접촉되는 충전시간이 짧아짐→열손실 최소로 충전온도 상승→열전달은 상대적으로 느려짐→열계면에 받는 열저항이 급증 →열유속 감소→ 박리의 원인

개선적용조건 _ CASE ID 15 (파랑색) : 고속 ↓ / 온도 ↓ / 시간 ↑ / 열유속 ↑ = 현장 적용

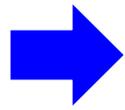
* 저속구간 속도를 상향→계면부 접촉시간 충분히 확보함으로 안전정인 열전달 → 긴 충전시간으로 열손실은 발생 → 충전온도는 다소 낮음
→계면 열전달은 고르게 확산→열저항 감소→열유속상승 → 박리 완화 기대

Conclusion

개선조건 ID-15 적용



조건 ID	저속(m/s)	절변(mm)	고속(m/s)
개선(전) ID : 63	0.3	260	2.8
개선(후) ID : 15	0.35	265	1.4



최종 양산 개선품



->사상 공수 비용 절감 (원가절감)

월/년간 발생하는 사상 공수 비용의 평균 값 산출 (사상 비용은 제품 1개당 ₩ 60원 협의 내용을 준 함)

▶ 2CAV 기준 : (월평균 3000개 출하기준 X2) X (제품1개 사상비용 X2) (양산 25/08월 출하 기준으로 산정)

제품 1SET 당 사상 공수 비용 = ₩ 120원 발생

- 월간 공수비용 : 6000 X ₩ 120원 = **₩ 720,000 발생**
- 연간 공수비용 : ₩ 720,000 X 12 = **₩ 8,640,000 발생**
- 4년간 양산 출하 요청으로 발생 할 수 있는 공수 비용 = **₩ 34,560,000 발생 예상**

Name	Scenario	Scenario 1
price	f(x) 360,000 원	360,000 원
월 평균 출하량	3,000 개	3,000 개
사상비용	30 원/1개	30 원/1개
연간 공수비용	f(x) 4,320,000 원	4,320,000 원
4년간 공수비용	f(x) 17,280,000 원	17,280,000 원

MAGMA ECONOMICS 적용

We set our goals as high as possible. Our key phrase in business is "make thempossible possible".

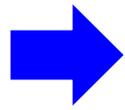


Conclusion

개선조건 ID-15 적용



조건 ID	저속(m/s)	절변(mm)	고속(m/s)
개선(전) ID : 63	0.3	260	2.8
개선(후) ID : 15	0.35	265	1.4



최종 양산 개선품



->사상 공수 비용 절감 (원가절감)

월/년간 발생하는 사상 공수 비용의 평균 값 산출 (사상 비용은 제품 1개당 ₩ 60원 협의 내용을 준 함)

▶ 2CAV 기준 : (월평균 3000개 출하기준 X2) X (제품1개 사상비용 X2) (양산 25/08월 출하 기준으로 산정)

제품 1SET 당 사상 공수 비용 = ₩ 120원 발생

- 월간 공수비용 : 6000 X ₩ 120원 = **₩ 720,000 발생**
- 연간 공수비용 : ₩ 720,000 X 12 = **₩ 8,640,000 발생**
- 4년간 양산 출하 요청으로 발생 할 수 있는 공수 비용 = **₩ 34,560,000 발생 예상**

종합 평가

- * 문제 요인 : 고속 충진으로 인한 계면 과열층 및 박리 발생
- * 개선 조치 : 절변 위치 조정 + 고속 속도 감속
- * 결과 : 열유속(heat flux) 균형 회복 → 계면 안정화 → 박리 완전 억제
- * 추가 효과 : 사상 공수비용 절감 + 양산 안정성 확보

본 개선은 구조 변경이 아닌 공정 변수 최적화로만으로 달성된 결과이며, 동일 금형 조건에서 박리 불량을 완전히 제거함과 동시에 연간 약 860만원 이상의 비용 절감을 실현하였습니다