

도금액의 내부 유입 방지를 위한 래버린스 시일 설계

이덕규 · 김완두[†]

한국기계연구원 나노자연모사연구실

Labyrinth Seal Design for Preventing Internal Inflow of Plating Solution

Duck-Gyu Lee and Wan-Doo Kim[†]

Department of Nature-Inspired Nanoconvergence Systems, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea

(Received September 28, 2017; Revised November 15, 2017; Accepted November 17, 2017)

Abstract – Molten zinc plating is a process in which zinc is thinly coated over a metallic or non-metallic surface. It is used in various industrial fields for corrosion resistance and decoration. During the process, a steel sheet is passed through a roll that rotates inside the molten zinc liquid in the temperature range of 460 °C to 680 °C, and the plating liquid flows into the roll causing abrasion and erosion of the roll surface. This problem is known to accelerate the replacement cycle of the roll and cause considerable economic loss owing to production line stoppage. Here, we propose a mechanism that operates at high temperature and pressure with a labyrinth type seal design to resolve this problem. We theoretically investigate the flow of the plating solution inside the seal and compute the minimum rotation speed required to prevent the plating solution from entering the seal chamber. In addition, we calculate the thermal deformation of the seal during operation and display thermally deformed dimensions at high temperatures. To verify the theoretical results, we perform experiments using pilot test equipment working in the actual plating environment. The experimental results are in good agreement with theoretical results. We expect our results to contribute towards the extension of the roll's life span and thereby reduce the economic losses.

Keywords – labyrinth seal(래버린스 시일), plating(도금), molten zinc(용융 아연), thermal expansion(열 팽창)

1. 서 론

도금은 금속이나 비금속의 표면에 특정 금속을 얇게 입히는 공정으로 내식성, 장식 등의 효과로 다양한 산업 현장에서 사용된다. 특히 용융 아연 도금은 아연 특유의 희생방식 효과가 뛰어나 다른 금속에 비해 탁월한 부식 방지효과가 있고 이로 인해 자동차 외장재나 가전 제품 등에 광범위하게 사용된다. Fig. 1(a)는 일반적으로 사용되는 용융 아연의 도금 공정을 나타낸 그

림이다. 금속 강판이 가열로 내부에 있는 용융 아연으로 들어가고 가열로 내에 있는 롤(roll)을 지나 가열로 밖으로 나오는 과정을 나타낸다. 이 때 롤은 460 °C ~680 °C의 가열로 내부에서 회전 운동을 하는데 롤 내부로 용융 아연이 유입되어 마모 및 침식을 야기한다(Fig. 1(b)). 이러한 마모 및 침식된 롤은 15~20일을 주기로 교체되며 약 5시간 정도의 교체 시간이 소요된다.

해당 롤 교체 시 도금 강판 생산 라인 정지로 인해 발생하는 생산량의 손실과 이로 인한 경제적 손실을 Table 1에 정리하였다. 롤 교체에 의한 도금라인의 경제적 손실이 막대하다는 것을 파악할 수 있다[2].

본 연구에서는 제철 분야에서 용융 아연 도금 공정

[†]Corresponding author : wdkim@kimm.re.kr
Tel: +82-42-868-7627, Fax: +82-42-868-7933

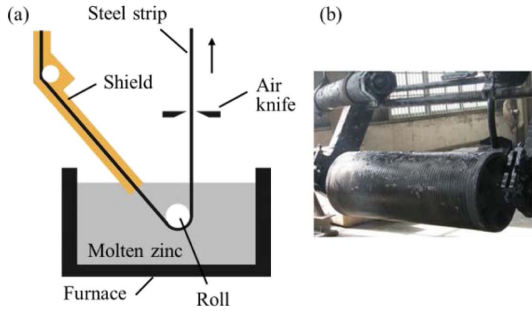


Fig. 1. (a) Schematic of a molten zinc plating process. (b) The surface of the roll used in (a) was corroded and worn by internal inflow of plating solution[1].

Table 1. Economic losses due to roll maintenance and replacement

Contents	Value
Total number of continuous plating lines in Korea	About 43
Production losses due to the stop of a roll (line)	5 ktons/year
Replacement cost per roll (line)	KRW 288 million/year
Total production losses due to the stop of rolls in Korea	200 ktons/year
Total replacement cost	KRW 12,384 million/ year

에서 발생하는 문제, 즉 축수부 시일의 짧은 수명 주기 및 관련 문제로 인해 발생하는 경제적 손실을 줄이고자 현재까지 제철 분야에서 적용되지 않았던 래버린스 시일의 개발에 대해 다루었다. 래버린스 시일의 유동 해석을 위해 Boon[3]이 수행하였던 시일 내부 유동 해석을 검토하여 설계 안을 제시하였다. 또한 추가적으로 고온에서 발생하는 시일 내부의 열 변형 해석을 진행하였고 앞서 제시된 유동 해석 및 열 변형 해석의 결과로부터 도출된 시일 설계 결과의 검증을 위해 실험을 진행하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 래버린스 시일 내부 유동 해석

Fig. 2는 도금액의 일종인 용융 아연이 담겨 있는 가열로 내부에 깊이 H 에 위치한 래버린스 시일의 개념도이다. 가열로 내부의 온도는 아연의 용융점인

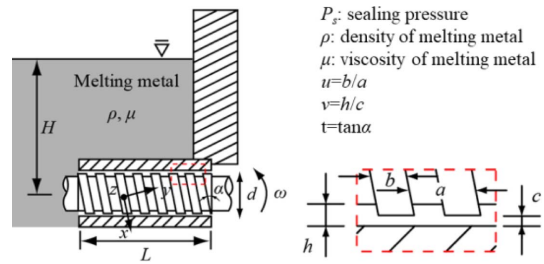


Fig. 2. Geometry of a labyrinth seal in a furnace containing molten metal.

460 °C로 유지되며, 이 때 용융 아연의 점도 μ 및 밀도 ρ 는 각각 6523 kg/m³과 3.418 mPa·s이다[4].

본 절에서는 임의의 깊이에 위치한 시일이 용융 아연과 맞닿아 있는 끝 단에 발생하는 침투압으로 인해 도금액이 시일 내부로 유입되지 않게 하는 시일의 회전수를 예측하고자 한다[3]. Fig. 2의 삽화는 가열로 내부에 있는 시일 표면의 형상 및 각 부위의 치수를 도식화한 것이다. 도금액 속 임의의 깊이 H 에 위치한 시일의 길이는 L 이며 시일 표면에 나선형의 폭 b 의 홈이 a 의 간격으로 배치되어 있다. 이 때 시일을 둘러싸고 있는 원형 관과 시일의 가장 바깥부분과의 간격은 c 이며, 홈이 파진 부분 까지를 기준으로 했을 경우는 해당 간격이 h 이다. 시일 표면에 있는 홈은 해당 축의 수직 축을 기준으로 a 의 각도로 기울어져 있으며, 회전축을 기준으로 회전 속도 ω 로 회전한다.

용융 아연이 담겨있는 가열로에 깊이 H 에 시일이 위치해 있으면 시일 끝 단에 해당 위치에 상응하는 용융 아연 무게에 의한 정수압이 작용한다. 결과적으로 해당 압력은 시일 내부의 침투압으로 작용하며 그 크기는 상대압 $\rho g H$ 로 작용한다. 시일의 지름 d 가 시일과 시일을 감싸고 있는 원형 관 사이의 간격 c 에 비해 굉장히 크다면 z 축 방향으로의 유동 및 유속 변화는 x, y 축 방향에 비해 무시할 수 있으며, 아래와 같이 수식으로 표현 할 수 있다.

$$V_z \ll V_x, V_z \ll V_y, \frac{\partial V_z}{\partial x} \ll \frac{\partial V_z}{\partial z}, \frac{\partial V_x}{\partial y} \ll \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (1)$$

만약 시일의 회전에 의한 유동이 정상상태에 도달 하였을 때, 유동에 대한 지배 방정식인 Navier-Stokes 방정식은 식 (1)의 가정과 함께 아래와 같이 단순화된 형태를 취한다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \quad (3)$$

시일 및 시일을 감싸고 있는 원형관의 사이를 흐르는 도금액의 유량을 유도하기 위해 식의 (2) 및 식 (3)을 적분한다.

$$V_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} z^2 + C_1 z + C_2 \quad (4)$$

$$V_y = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial y} z^2 + C_3 z + C_4 \quad (5)$$

이 때 계산의 편의를 위해 시일은 고정되어 있고, 시일의 회전 방향의 반대방향으로 시일 주위가 회전한다고 가정하면 아래와 같은 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\text{Over the dam, } \begin{cases} V_{xD} = \frac{wd}{2} \cos \alpha \text{ at } z = 0 \\ V_{xD} = 0 \text{ at } z = c \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Through the groove } \begin{cases} V_{xG} = \frac{wd}{2} \cos \alpha \text{ at } z = 0 \\ V_{xG} = 0 \text{ at } z = h \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Across the dam } \begin{cases} V_{yD} = \frac{wd}{2} \sin \alpha \text{ at } z = 0 \\ V_{yD} = 0 \text{ at } z = c \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Across the groove } \begin{cases} V_{yG} = \frac{wd}{2} \sin \alpha \text{ at } z = 0 \\ V_{yG} = 0 \text{ at } z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

해당 경계조건을 식 (4) 및 식 (5)에 대입하면 아래와 같이 시일 표면에 있는 돌출부(dam) 및 홈(groove) 사이를 통과하는 유속을 구할 수 있다.

Over the dam

$$V_{xD} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} z(c-z) + \frac{wd}{2} \cos \alpha \frac{(c-z)}{c} \quad (10)$$

Through the groove

$$V_{xG} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} z(h-z) + \frac{wd}{2} \cos \alpha \frac{(h-z)}{h} \quad (11)$$

Across the dam

$$V_{yD} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{AD} z(c-z) - \frac{wd}{2} \sin \alpha \frac{(c-z)}{c} \quad (12)$$

Across the groove

$$V_{yG} = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{AG} z(h-z) - \frac{wd}{2} \sin \alpha \frac{(h-z)}{h} \quad (13)$$

시일 표면에 있는 돌출부(dam)와 홈(groove) 사이로 지나가는 용융 금속의 단위 폭 당 체적유량은 z축 방향으로 식 (10)부터 (13)까지 각각 적분하여 유도할 수 있으며 그 결과는 아래와 같다.

Over the dam

$$\phi'_{xD} = \int_0^c V_{xD} dz = -\frac{1}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} c^3 + \frac{wd}{4} \cos \alpha c \quad (14)$$

Through the groove

$$\phi'_{xG} = \int_0^h V_{xG} dz = -\frac{1}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} h^3 + \frac{wd}{4} \cos \alpha h \quad (15)$$

Across the dam

$$\phi'_{yD} = \int_0^c V_{yD} dz = -\frac{1}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{AD} c^3 - \frac{wd}{4} \sin \alpha c \quad (16)$$

Across the groove

$$\phi'_{yG} = \int_0^h V_{yG} dz = -\frac{1}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{AG} h^3 - \frac{wd}{4} \sin \alpha h \quad (17)$$

이 때 시일의 축 방향으로의 유량을 계산하면

$$\phi' = \phi'_{xD}(\sin \alpha) \pi d(1-u) + \phi'_{xG}(\sin \alpha) \pi du + \phi'_{yD}(\cos \alpha) \pi \quad (18)$$

이며, 두 개의 압력 관계식

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P}{l} \sin \alpha \quad (19)$$

$$\frac{dP}{dx} \Big|_b (1-u) + \frac{dP}{dy} \Big|_c u = \frac{P}{l} \cos \alpha \quad (20)$$

을 식(18)에 대입하여 축 방향으로의 유량을 계산하면 아래와 같다.

$$\phi' = \frac{\pi d P}{12\mu l} c^3 \frac{(1+t^2)v^3 + t^2 u(1-u)(v^3-1)^2}{(t^2+1)\{u+(1-u)v^3\}} + \frac{\pi \omega d^2 c}{2} \frac{u+(1-u)(v-1)(v^3-1)}{(t+1)\{u+(1-u)v^3\}} \quad (21)$$

식 (21)에서 $u = b/a$, $v = h/c$, $t = \tan \alpha$ 이다.

본 절에서 유도하고자 하는 것은 시일 내부로 도금액이 유입이 되지 않게 하는 것으로 식 (21)에 있는 ϕ' 가 0이 되는 경우에 해당한다. 이 때 시일의 밀봉압력과 회전수의 관계식을 구하면 아래와 같다.

$$P = 3\lambda \frac{\mu \omega d l}{c^2} \quad (22)$$

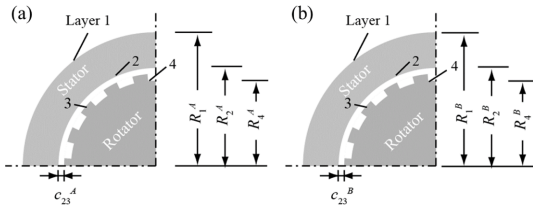


Fig. 3. Geometry of cross-sections of a labyrinth seal before (a) and after (b) exposing a hot temperature.

$$\text{위 식에서 } \lambda = \frac{tu(1-u)(v-1)(v^3-1)}{(t^2+1)v^3+t^2u(1-u)(v^3-1)^2} \text{ 이다.}$$

2.2. 래버린스 시일의 열 변형 해석

본 절에서는 고온에 노출된 시일의 변형이 밀봉 압력 변화에 미치는 영향을 정량화 하기 위해서 시일의 열 변형량을 예측하고자 한다. 우선 고온(460 °C)에서 작동하는 시일의 열 변형은 소재의 선형 열 팽창률 (α_T) 및 온도 변화(ΔT)에 의해 결정된다. Fig. 3은 열 변형 전과 열 변형 후 시일의 회전체(rotator) 및 고정체(stator)의 형상 및 해당 형상의 치수를 나타낸 그림이다. 그림에서는 축을 기준으로 특정 위치까지의 반지름을 R 로 표시하였으며, 간격을 c 로 하였다. 이때 변형 전, 후의 치수는 변수에 각각 상첨자 A와 B로 표시하여 나타냈으며, 특정 위치는 Fig. 3에 표시된 각 부위에 부여된 숫자를 하첨자로 하여 표기하였다. 예를 들어 R_1^A 는 열 변형 전 중심 축으로부터 5번 위치까지의 거리를 나타낸다.

열 변형 후의 치수(R_i^B)를 갖기 위한 열변형 전의 치수(R_i^A)의 상관관계를 α_T 와 ΔT 를 이용하여 구하면 아래와 같다.

$$R_i^B = R_i^A(1 + \alpha_T \Delta T) \tag{23}$$

2.3. Pilot test 용 래버린스 시일 장치 제작 및 설계 검증 실험

본 절에서는 실제 작업 환경에서 작동하는 시일 Pilot 장치를 제작하고 이론 식을 통해 제시된 밀봉 압력을 발생시키기 위해 필요한 시일의 회전수를 검증하기 위한 실험에 대해 다룬다. Fig. 4는 실제 작업 환경에서 작동하는 Pilot 장비로 모터, 래버린스 시일, 가열로 등으로 구성되어 있다. 모터의 회전수는 0 rpm에서 2000 rpm까지 변경 가능하며, 실험의 편의를 위해 시일을 가열로에 넣을 때는 크레인을 사용하였다. 가열로에는 실제 철판의 도금에 사용되는 460 °C에서 용

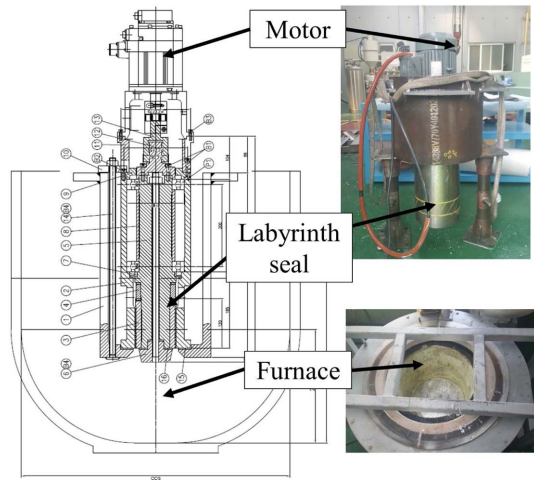


Fig. 4. Experimental setup for verifying the sealing effect of the labyrinth seal.

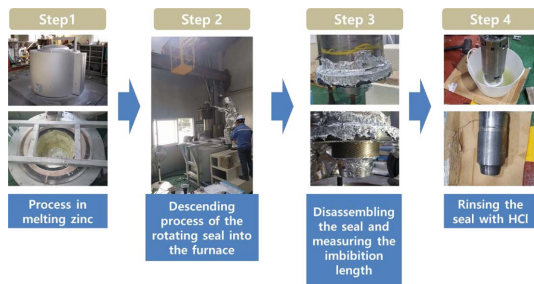


Fig. 5. Experimental procedure for verifying the sealing effect of the labyrinth seal.

해된 용융 아연이 담겨 있다.

Fig. 5는 실험 과정을 나타낸 그림으로 가열로에 아연을 넣고(step 1) 3일 정도 용해 시켜 안정된 상태의 용융 아연을 만든다. 시일을 가열로에 담그기 전에 특정 회전수로 회전을 시킨 후 크레인을 이용하여 시일을 가열로 내부로 하강 시킨다(step 2). 약 10초 정도 시일을 용융 아연에 노출 시킨 후 가열로 밖으로 꺼내고(step 3), 시일을 분해하여 용융 아연이 침투된 정도를 측정한다(step 3). 마지막으로 다른 회전수로 실험하기 전에 20% 농도의 염산에 시일을 10분 정도 담가 시일 표면에 묻은 아연을 제거한다(step 4).

3. 결과 및 고찰

3.1. 시일 내부 유동 해석 결과

본 절에서는 식 (22)을 이용하여 시일 내부로의 도

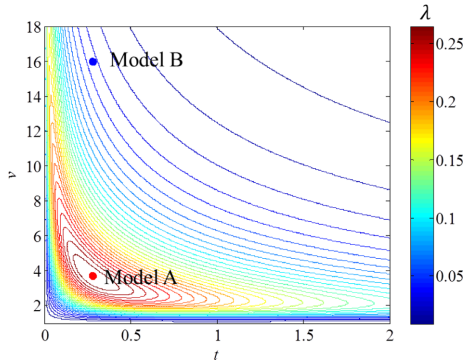


Fig. 6. Two different types of labyrinth seals at a room temperature: Red and blue circles represents λ for the model A and B, respectively.

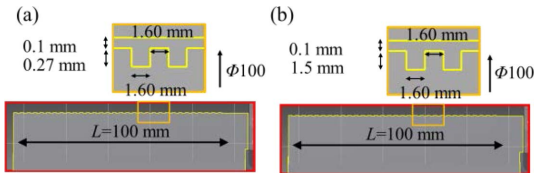


Fig. 7. Two different types of labyrinth seals at a room temperature: (a) model A and (b) model B.

금액 유입을 방지하기 위한 시일의 최소 회전수를 유도하고자 한다. 식 (22)에서 밀봉 압력을 높이기 위해서는 시일의 회전수 ω , 지름 d , 길이 L 및 시일 표면의 무차원 형상 변수 λ 를 크게 해야 한다. 특히 시일 표면의 형상 변수 u, v, t 로 구성된 무차원 변수 λ 의 최대값을 구하기 위해 $u=0.5$ 로 고정된 상태에서 v, t 변화에 따른 λ 변화를 계산하였다(Fig. 6). 이때 u 를 0.5로 설정한 이유는 임의의 v, t 에 대해 u 가 0.5일 때 λ 가 항상 최대 값이 되기 때문이다. Fig. 6에 의해 λ 가 최대값이 되기 위한 v, t 의 값은 $v=3.7, t=0.28$ 임을 알 수 있다. 특히 $t = \tan \alpha = 0.28$ 을 만족시키기 위한 α 는 15.7° 이다.

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 시일 이빨의 높이가 다른 두 종류의 시일을 선정하였으며, h 가 0.17 mm인 경우와 1.4 mm인 경우를 각각 model A, model B로 하였다. 이 때 각 시일의 밀봉 압력과 관련된 변수 λ 는 Fig. 6에서 각각 붉은 색($\lambda=0.27$)과 파란색 점($\lambda=0.039$)으로 표시하였으며, model B에 비해 model A의 λ 가 약 7배 큰 것으로 확인되었다. 이는 두 model이 동일 회전수로 회전하였을 시 model A가 B에 비해 7배 높은 밀봉 압력을 발생시키는 것을 의미한다.

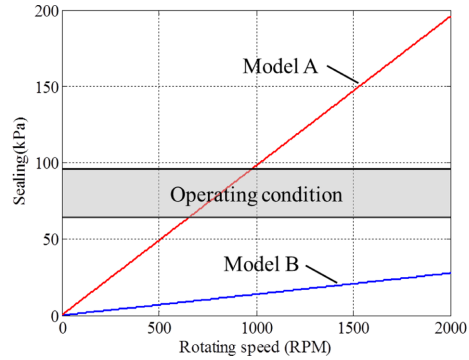


Fig. 8. Dependence of a rotating speed of a seal on the sealing pressure.

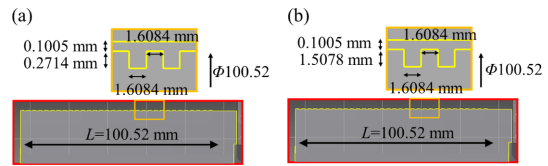


Fig. 9. Two different types of labyrinth seals after thermal expansion at $T=460^\circ\text{C}$: (a) model A and (b) model B.

Fig. 8은 실제 작업 환경에서의 시일이 놓일 깊이인 1~1.5 m에서 시일 내부로 용융 아연이 침투하지 못하게 하는 시일의 적정 회전 수에 대한 그래프이다. 해당 깊이에 시일이 놓일 경우 시일 끝 단에 작용하는 침투 압력은 용융 아연에 의한 정수압에 의해 65~96 kPa 정도가 되는데, Model A의 경우 약 650~980 rpm의 회전수를 발생 시켜야 시일 내부로 용융 아연이 침투되는 것을 방지 할 수 있는 것 알 수 있다. 하지만 Model B의 경우 2000 rpm이상의 회전수가 요구 됨을 알 수 있다.

3-2. 열팽창 해석 결과

Fig. 9는 고온 상태($T=460^\circ\text{C}$)에 노출된 Model A와 B의 열팽창 후 시일 형태를 나타낸다.

각 Model의 치수는 Fig. 7에 있는 상온 상태의 시일 치수와 시일의 재료인 steel의 선팽창 계수 $\alpha_r = 12 \times 10^{-6}$ 및 온도 변화 $\Delta T = 435^\circ\text{C}$ 를 식 (23)에 대입하여 얻었다. 상온 상태에서의 치수와 비교할 때 약 0.52%의 열팽창이 진행된 것을 확인 할 수 있다.

3-3. Pilot test 용 래버린스 시일 설계 검증 실험 결과

앞 절에서 다룬 래버린스 시일의 설계 및 용융 아연

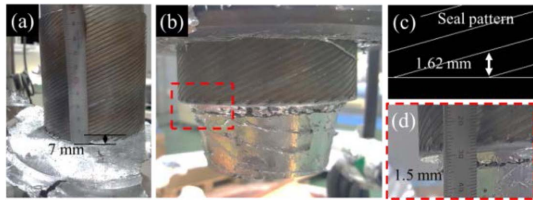


Fig. 10. Seal surfaces after exposure to the molten zinc. Seals (a) and (b) rotate at 500 rpm and 2000 rpm, respectively. The imbibition length of the zinc into the seals is 7 and 1.5 mm for seals (a) and (b), respectively.

의 시일 내부로의 침투를 막기 위한 시일 회전수 등의 검증에 대해 실제 용융 아연에서 작동하는 pilot test 장비를 이용하여 실험을 진행하였다. 앞 선 결과에서 알 수 있듯이 동일 회전수에서 7배의 밀봉 압력을 발생시키는 model A를 CNC 머신을 이용하여 정밀 가공하였다. Fig. 10(a)와 (b)는 각각 회전수 500 rpm과 2000 rpm에서 시일을 회전시킨 후 시일 표면을 촬영한 사진이다. 각 경우에 대해 용융 아연의 침투 길이가 7 mm와 1.5 mm임을 알 수 있다. 500 rpm의 경우 2000 rpm으로 회전한 경우 보다 상대적으로 많은 양의 용융 아연이 시일 내부로 침투한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10(c)는 실제 시일 표면의 모양을 나타낸 그림으로 시일 표면이 끝나는 점에서 바로 옆 시일 표면까지의 거리가 1.62 mm임을 알 수 있다. 해당 수치는 2000 rpm으로 회전 하는 시일의 침투 길이인 1.5 mm와 비슷하다. 이를 통해 시일의 양쪽 면이 아닌 한쪽 면만 있는 시일 끝 단의 경우 밀봉 효과가 발생되지 않는 것을 간접적으로 파악할 수 있다.

3-4. 고찰

본 절에서 수행한 이론 및 실험을 통해 축수부 시일 표면의 최적 형상 계수 및 해당 시일로 도금액이 유입되지 못하게 하는 시일의 회전 수를 도출하였다.

본 연구에서 수행된 시일의 회전에 의한 도금액 침투 방지뿐만 아니라 향후 시일 표면의 물리, 화학적 물성 변화를 통한 도금액 침투 방지 방식에 대한 추가 연구도 필요하다. 본 연구에서는 시일 표면의 물리, 화학적 변화에 따른 시일 표면과 용융 아연 젖음성에 대한 기초 연구를 진행하였다 Fig. 11는 알루미늄 용사 코팅 된 금속(Fig. 11(a))과 해당 표면에 초소수성 물질인 trichloro (1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctyl) silane

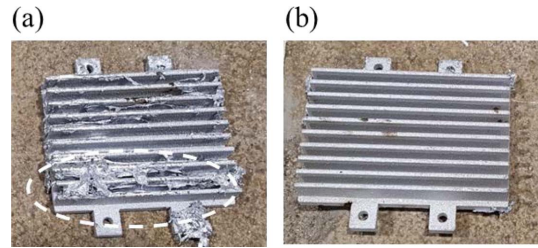


Fig. 11. Aluminum metallized surfaces exposed to molten zinc liquid: sample (b) is coated with superhydrophobic material FOTS but sample (a) is not coated.

(FOTS) 코팅 처리된 금속(Fig. 11(b) 표면에 460 °C의 용융 아연을 노출시킨 후 각 금속 표면을 촬영한 사진이다. 그림에 보는 것과 같이 초소수성 표면 처리가 된 표면에서는 용융 아연이 전혀 묻지 않은 것을 확인할 수 있으며, 향후 해당 기술과 관련된 심도 있는 연구의 진행이 필요한 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 고온에서 회전하는 래버린스 시일의 설계 및 검증에 대해 수행되었다. 용융 아연이 담겨있는 고온(T=460 °C)의 가열로 내에서 시일이 회전 할 때 용융 아연이 시일 내부로 침입하지 못하도록 하기 위한 시일의 회전수를 찾기 위해 단순화된 Navier-Stokes 방정식을 이용하였고, 밀봉 압력을 시일 표면의 치수가 결정 되었을 때 밀봉을 위한 최소 회전수를 도출하였다. 또한 고온에서 작동하는 시일의 열팽창에 대해 다루었으며, 결과적으로 열팽창에 의한 밀봉 압력에 변화는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 이론에서 도출한 도금액 유입을 방지 할 수 있는 시일의 회전 수를 검증하기 위해 실제 용융 아연이 담겨있는 가열로 내부에 steel로 제작된 시일을 담가 500 rpm 및 2000 rpm으로 회전하여 시일의 회전수에 따른 밀봉 효과를 파악하였다. 향후 본 연구는 고온, 고압에서의 도금액에서 작동에서 축수부 개발 시 기초 설계자료로 사용될 것으로 기대 된다.

Acknowledgements

본 연구는 국가과학기술연구회 및 한국연구재단의 지원을 받아 수행 되었습니다(과제 번호: 후속 R&D-2016001, NRF-2017M3C1B7014218).

References

- [1] Wang, L., Zhou, Y., Chen, G., Xu P., Rao, S., "Analysis on dominant influencing factors of on-line life cycle in sink roll system and effective improved methods", *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 58, pp. 8-18, 2015.
- [2] Plating process technology R&D report, Samwoo Eco Co.,Ltd, 2015.
- [3] Boon, E. F., Tal, S. E., "Hydrodynamische dichtung für rotierende wellen", *Chemie-Ing. Techn.*, Vol. 31, No. 3. pp. 202-212, 1959.
- [4] Assael, M. J., Armyra, I. J., Brillo, J., Stankus, S. V., Wu, J., Wakeham, W. A., "Reference data for the density and viscosity of liquid cadmium, cobalt, gallium, indium, mercury, silicon, thallium, and zinc", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 41, No. 3, 033101, 2012.