

# 화력발전소에 사용되는 개선된 오일 디플렉터 개발

## Development of an Advanced Oil Deflector Used in Thermoelectric Power Plant

최용훈<sup>1</sup>, 곽효서<sup>1</sup>, 이창렬<sup>2</sup>, 김철<sup>3,✉</sup>  
Yong Hoon Choi<sup>1</sup>, Hyo Seo Kwak<sup>1</sup>, Chang Ryeol Lee<sup>2</sup>, and Chul Kim<sup>3,✉</sup>

1 부산대학교 기계융합기술협동과정 (Mechanical Convergence Technology, Pusan National University)

2 포스텍 기술연구소 (R&D Center, POSTECH)

3 부산대학교 기계기술연구원 (Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University)

✉ Corresponding author: [chulki@pusan.ac.kr](mailto:chulki@pusan.ac.kr), Tel: +82-51-510-2489

Manuscript received: 2016.1.4. / Revised: 2016.4.23. / Accepted: 2016.5.3.

*Oil deflector prevents oil leakage that occurs in thermoelectric power plant at operating lubricant facilities. Vibration of rotating rotor-induced wear of aluminum tooth in existing oil deflector leads to oil leakage as well as life shortening of the tooth. In this study, an advanced oil deflector was developed for shock absorption and prevention of wear by decreasing clearance (from 0.5 mm to 0.2 mm) between rotor and tooth to minimize oil leakage, and by replacing 2 aluminum teeth in outmost of the oil deflector with hi-performance seal made of engineering plastic. The CFD results were compared between advanced vs. existing oil deflector to determine the amount of oil loss. Structural safety was verified through impact analyses according to the three kinds of engineering plastics, considering cost efficiency, and optimal material of hi-performance seal was chosen.*

KEYWORDS: Oil deflector (오일 디플렉터), Engineering plastic (엔지니어링 플라스틱), CFD analysis (CFD 해석), Impact analysis (충격해석)

### 1. 서론

오일 디플렉터는 화력발전소의 터빈 구동 시, 윤활설비의 운전 중에 발생하는 오일 누유를 최소화하기 위한 장치이며, 베어링 사이드 및 로터의 외측에 조립되어 오일 탱크내의 부압으로 외부 공기가 오일 디플렉터의 내측으로 흡입 시 대기의 이물질 및 미세먼지 침투를 방지한다. Fig. 1의 기존 오일 디플렉터의 경우, 회전하는 로터의 진동으로 인하여 알루미늄 (Aluminum) 투스 (Tooth)에

충격 및 마모가 발생하여 작동유의 누설 증가, 마모수명 단축, 설비의 청정도 및 설비효율 저하로 인하여 정기적인 정비가 필요하기 때문에 시간 및 비용이 과도하게 발생한다.<sup>1</sup> 증기터빈의 작동유 누설량 감소를 위한 Ha등은 패킹링의 톱니에 기울기 각을 부여한 후 누설을 저감시키는 방법을 제시하였으며,<sup>2</sup> Hur 등은 패킹링의 톱니 경사도에 따른 누설 변화를 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 이용하여 예측하였다.<sup>3</sup> Kim 등은 코일스프링을 사용하는 가변간극패킹에 대하여 역학적 설계

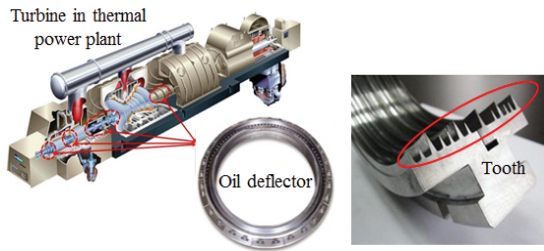


Fig. 1 The oil deflector in thermal power plant

수식 모델을 구현하여, 실에 작용하는 압력분포에 대한 연구를 수행하였으며,<sup>4</sup> Kweon 등은 가변간극 패키징을 실제 터빈에 장착하여 설치 전후의 터빈 성능시험을 통하여 터빈효율 및 에너지 효율을 평가하였고,<sup>5</sup> Kim 등은 와인딩 스프링 (Winding Spring)의 완충작용으로 유연성을 가진 플렉시블 패키징을 개발하여 증기터빈의 효율을 향상시켰다.<sup>6</sup>

본 연구에서는 기존 오일 디플렉터 투스의 충격 흡수 및 마모 방지를 위하여, 알루미늄으로 제작된 최 외각에 있는 투스 2개에 대하여 투스 상부에 판 스프링 (Plat Spring)을 장착한 후, 엔지니어링 플라스틱 (Engineering Plastic)으로 제작된 고성능 실 (Hi-Performance Seal)로 대체하였다. 또한, 기존의 로터와 투스 사이의 간극은 0.5 mm였으나, 작동유의 누설량을 최소화하기 위하여 로터와 고성능 실 사이의 간극을 0.2 mm로 감소시키고 투스의 각 형상에 대하여 편날각 (Single Edged Hi-Performance Seal) 및 양날각 (Double Edged Hi-Performance Seal)에 따른 오일 디플렉터의 유동해석을 수행하여 누설량 감소 여부를 판단하였다. 엔지니어링 플라스틱의 종류 및 고성능 실의 투스 형상에 따른 충격해석을 수행하여, 충격에 의한 구조안전성, 내마모성과 경제성을 동시에 고려한 최적의 고성능 실의 형상 및 소재를 결정하였다. 또한, 선정된 고성능실의 타당성을 검증하기 위하여 기존 및 개선된 오일 디플렉터의 마모시험을 수행하여 마모율을 비교하였다.

## 2. 오일 디플렉터의 유한요소해석

### 2.1 오일 디플렉터의 유동해석

상용 소프트웨어인 Ansys workbench CFX 15.0 ver 를 이용하여 기존 및 개선된 오일 디플렉터의 유동해석 결과를 비교하여, 작동유의 누설량 저감을 검증하였다.<sup>7,9</sup>

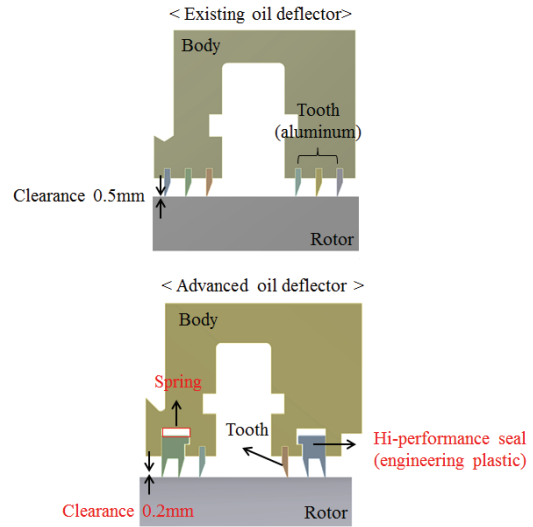


Fig. 2 Comparison of the advanced oil deflector with the existing one

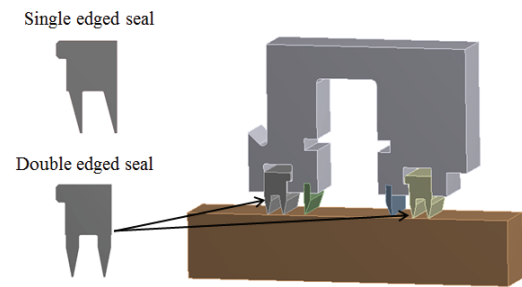


Fig. 3 Shapes of the single edged seal and double edged hi-performance seal

#### 2.1.1 모델링 및 경계조건

기존의 오일 디플렉터(편날각을 갖는 알루미늄 투스, 간극 0.5 mm)와 개선된 오일 디플렉터(고성능실, 간극 0.2 mm)의 3D 모델링을 Fig. 2에 나타내었다. 이때, 현장에서 측정된 회전하는 로터의 최대 진동 진폭이 0.2 mm이므로, 그 이하의 간극으로 설계할 경우 로터와 투스의 충돌 횟수에 따른 마모량이 증가한다. 이에, 투스 상부의 판 스프링에 의한 충격 완화 및 현재 화력발전소에서 사용되는 투스의 마모수명을 고려하여, 간극을 0.2 mm로 설정하였다.

개선된 오일 디플렉터의 경우, 투스의 각 형상에 따른 누설량을 확인하기 위하여 Fig. 3과 같이 편날각 및 양날각을 모델링 하였다. Solid model로부터 유동장을 추출 (Extract Fluid Field)하여 유동해

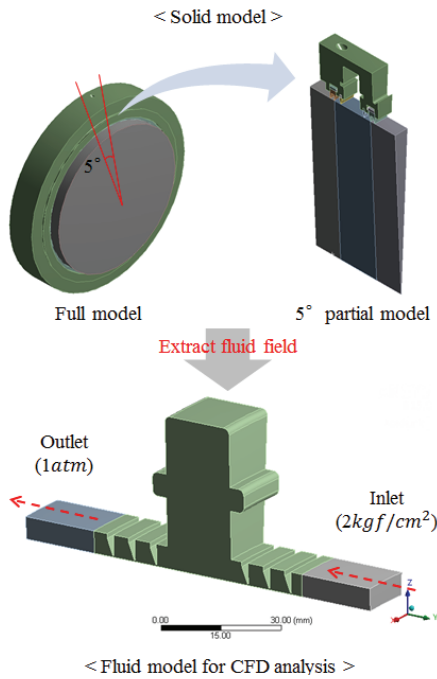


Fig. 4 Fluid field extracted for CFD analysis

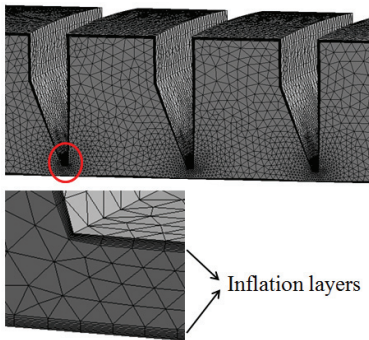


Fig. 5 Mesh for CFD analysis

석을 위한 3D모델을 생성하고 이를 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 해석시간의 단축을 위하여 전체 모델의 1/72 (5°) 부분 모델을 이용하였으며, 해석으로부터 도출된 유량을 72배한 전체 모델의 누설량을 비교하였다. 베어링 오일이 2 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 입구에서 흡입되고, 대기압 (1atm)으로 빠져나가며, k-e 난류모델을 적용하여<sup>10</sup> 정상상태 (Steady State) 유동해석을 수행하였다. 메쉬의 경우, 유체의 점성을 고려하기 위한 인플레이션 격자 (Inflation Mesh) 를 8개의 layer로 Fig. 5와 같이 생성하였으며, 베어링 오일의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of the bearing oil

Density	1.188 (g/cm <sup>3</sup> )
Specific heat capacity	2000 (J/kg·K)
Dynamic viscosity	38.016 (Centipoise)

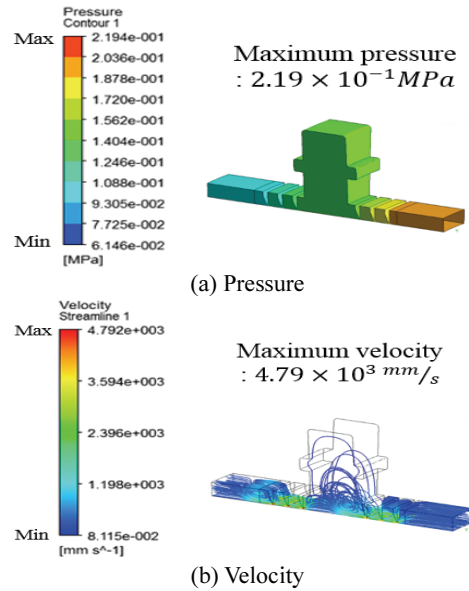


Fig. 6 CFD analysis result of the existing oil deflector

### 2.1.2 유동해석 결과

오일 디플렉터의 유동해석을 수행한 결과, 입구 측에서 최대압력이 나타나고 작동유가 고성능실을 지나가면서 압력이 점차적으로 낮아지며, 출구 측에서 최소 압력이 되는데, 이를 Figs. 6 - 8까지 나타내었다. 편날각 및 양날각을 갖는 개선된 오일 디플렉터의 최대 압력은 각각에 대하여  $2.23 \times 10^{-1}$  MPa 및  $2.21 \times 10^{-1}$  MPa로, 기존 오일 디플렉터 ( $2.19 \times 10^{-1}$  MPa)에 비하여 1.8% 및 0.9% 증가하였다. 또한, 투스와 로터 사이의 간격이 최소가 되는 부분에서 높은 속력이 나타났으며, 개선된 오일 디플렉터의 최대 속력은 3.91 m/s 및 4.01 m/s 로, 기존 오일 디플렉터 보다 (4.79 m/s) 각각 17.7% 및 16.3% 감소하였다. 이는, 고성능실과 로터 사이의 간극이 좁아 지지만 판 스프링의 영향으로 압력이 높아지고 속도가 낮아진 것으로 판단된다.

각 모델의 출구 측의 유량을 도출한 결과, 고성능 실과 로터 사이의 간극을 60% 줄임으로써, 편날각을 갖는 개선된 오일 디플렉터의 누설량은 0.8018 kg/s로 나타났으며, 이는 기존 오일 디플렉터 (2.36 kg/s)에 비하여 65.64% 감소한 결과이다. 또한,

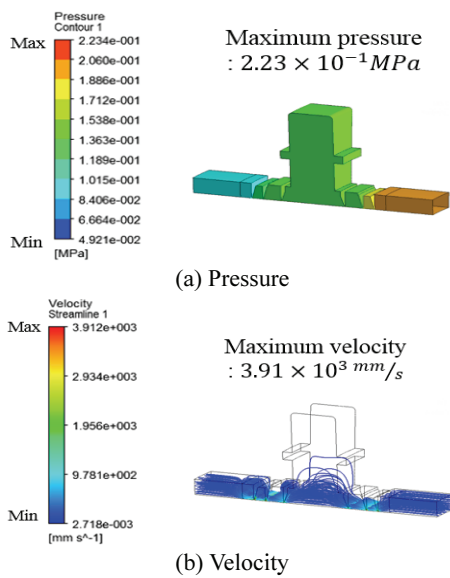


Fig. 7 CFD analysis result regarding to the advanced oil deflector: Single edged seal

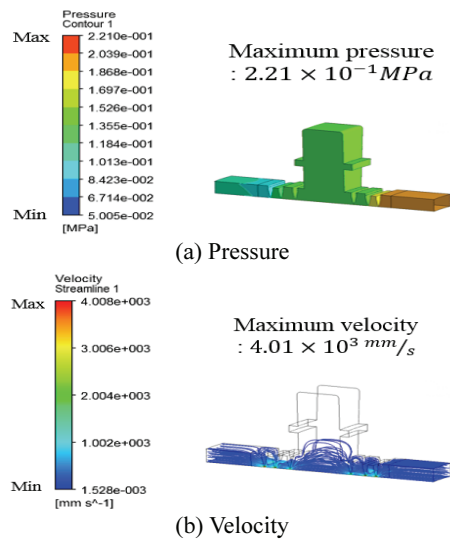


Fig. 8 CFD analysis result regarding to the existing oil deflector: Double edged seal

Table 2 Oil leakage of the oil deflectors

	Leakage (kg/s)
The existing oil deflector	2.36
The advanced oil deflector (Single-Edged)	0.8108
The advanced oil deflector (Double-Edged)	0.8337

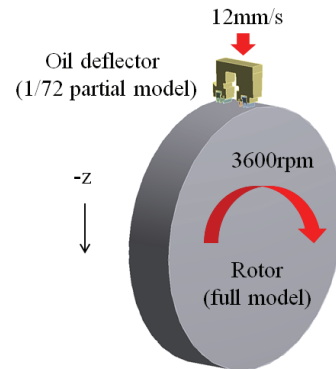


Fig. 9 3D model for impact analysis

편날각을 갖는 개선된 오일 디플렉터의 누설량은 양날각을 갖는 경우와 비교하여 약 4.0% 저감됨을 알 수 있었다.

## 2.2 오일 디플렉터의 충격해석

Fig. 2에서와 같이, 로터와 고성능 실 사이의 간극을 줄임으로써 야기되는 충격하중을 완화하기 위해 장착된 판 스프링의 효과를 검증은 위하여, 상용 소프트웨어인 Ansys workbench Explicit 15.0 ver 를 이용한 충격해석을 수행하였으며, 이를 토대로 고성능 실의 소재(엔지니어링 플라스틱) 및 투스의 각 형상(편날각 및 양날각)을 선정하였다.

### 2.2.1 모델링 및 경계조건

기존의 오일 디플렉터(편날각 알루미늄 투스, 간극 0.5 mm)와 개선된 오일 디플렉터(고성능실, 간극 0.2 mm)의 3D 모델링을 수행하였다. 개선된 오일 디플렉터의 경우, 판 스프링 및 고성능 실의 투스 형상에 따른 충격저감 효과를 판단하기 위하여, 판 스프링에 의한 하중의 유무와 편날각 및 양날각에 따른 충격해석을 수행하였다.

로터가 회전하면서 고성능 실과 접촉하는 현상을 시뮬레이션 하기 위하여, 로터는 전체형상을 모델링하였고, 오일 디플렉터는 해석 시간 단축을 위하여 Fig. 9와 같이 전체 모델의 1/72 (5°) 부분 모델을 이용하였다.<sup>11</sup> 또한 고성능 실의 소재에 따른 구조안전성을 판단하기 위하여 Table 3의 PEEK CA30, TORLON 4540 및 TORLON 4301 물성치를 이용하였다. 로터가 회전할 때 현장에서 측정된 오일 디플렉터의 최대 진동 진폭은 0.2 mm, 터빈의 정격 운전속도는 3,600 rpm이므로 1회전하는데 걸리는 시간은 1/60 s이며, 식(1)을 이용하여 -Z 방

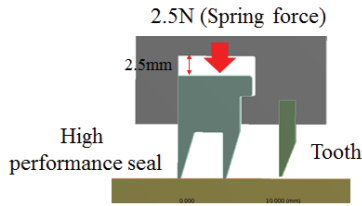


Fig. 10 Spring force of the advanced oil deflector

Table 3 Mechanical properties for impact analysis according to the material

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)
SS400 (Rotor, Body)	205	0.26	215
Aluminum (A356-T6)	71	0.33	165
PEEK CA30	9.2	0.4	144
TORLON 4540	3.96	0.4	90
TORLON 4301	6.21	0.4	103

향으로 12 mm/s의 충격속도를 계산하였다. 고성능 실 (Hi-Performance Seal)과 바디 (Body) 사이의 거리 ( $\delta$ )는 2.5 mm이고, 판 스프링 상수 ( $k$ )는 1 N/mm이므로, 식(2)로부터 도출된 최대 압축되었을 때의 스프링하중인 2.5 N을 고성능 실에 부여하여 이를 Fig. 10에 나타내었다. 또한, 로터의 회전을 구현하기 위하여 Cylindrical support 조건으로 반경방향 (Radial Direction) 및 축방향 (Axial Direction)을 구속하고 접선방향 (Tangential Direction)을 움직일 수 있게 설정하였다.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{0.2mm}{\frac{1}{60}s} = 12mm/s \quad (1)$$

$$F = k\delta = 1N/mm \times 2.5mm = 2.5N \quad (2)$$

2.2.2 충격해석 결과

기존의 편날각을 갖는 알루미늄 투스와 판 스프링이 장착되지 않는 엔지니어링 플라스틱 (PEEK CA30, TORLON 4540, TORLON 4301)의 편날각을 갖는 오일 디플렉터의 충격해석을 수행한 결과, 최대유효응력이 알루미늄 투스의 경우 53.27 MPa, 엔지니어링 플라스틱 투스의 경우 각각 13.14 MPa, 5.89 MPa, 및 9.09 MPa 으로 나타났으며

Table 4 Maximum equivalent stress obtained by the impact analysis

	Materials	Maximum equivalent stress (Mpa)
Single edged tooth without the spring	Aluminum (The Existing)	53.274
Single edged high performance without the spring	PEEK CA30	13.14
	TORLON 4540	5.89
	TORLON 4301	9.09
Single edged high performance with the spring	PEEK CA30	0.337
	TORLON 4540	0.272
	TORLON 4301	0.286
Double edged high performance with the spring	PEEK CA30	0.31
	TORLON 4540	0.26
	TORLON 4301	0.27

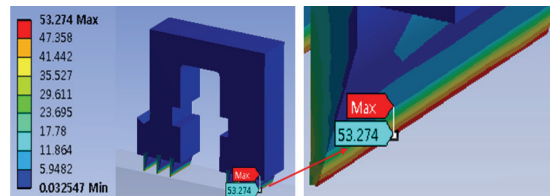


Fig. 11 The results of impact analysis : The existing oil deflector

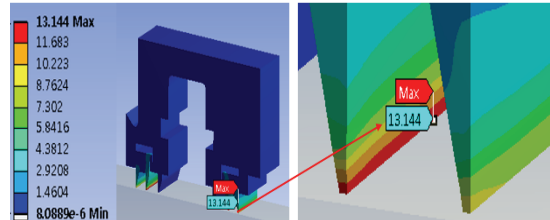


Fig. 12 The results of impact analysis : Equivalent stress of the single edged high performance seal without the spring (PEEK CA30)

이를 Table 4, Figs. 11 및 12에 각각 나타내었다. 판 스프링이 장착된 편날각을 갖는 고성능 실의 엔지니어링 플라스틱의 경우, 각각 0.34 MPa, 0.27 MPa 및 0.29 MPa 의 최대유효응력이 도출되었으며, 이를 Fig. 13에 나타내었다. 엔지니어링 플라스틱의 경우에는 낮은 탄성계수 및 판 스프링의 충격 완충 작용으로 인하여 고성능 실에 발생하는 응력이 매우 낮게 나타난 것으로 판단되며, 그 가운데 TORLON 4540 소재의 실이 가장 안전하다. 또한,

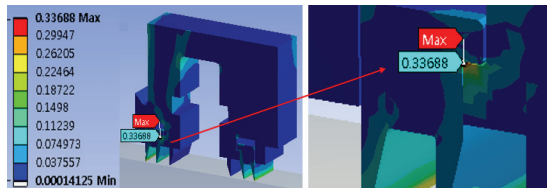


Fig. 13 The results of impact analysis : Equivalent stress of the single edged high performance seal with the spring (PEEK CA30)

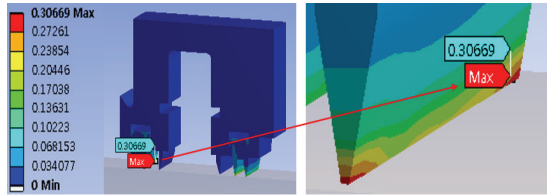


Fig. 14 The results of impact analysis : Equivalent stress of the double edged high performance seal with the spring (PEEK CA30)

Fig. 14에 의하면, 판 스프링이 장착된 양날각을 갖는 고성능 실의 소재에 따른 충격해석 결과, 최대 유효응력이 편날각을 갖는 고성능 실보다 각각 8.7% (0.307 MPa), 4.4% (0.258 MPa) 및 4.54% (0.271 MPa) 낮아졌으나, 편날각 보다 양날각이 충격완화 효과가 더 크나, 편날각을 갖는 고성능 실도 충격에 대하여 안전할 것으로 사료된다. 반면에, 편날각을 갖는 개선된 오일 디플렉터의 누설량 (0.8108 kg/s)은 양날각을 갖는 경우 (0.8337 kg/s)와 비교하여 약 4.0% 저감 되었는데, 이는 화력 발전소 터빈의 경우 증기 누설량을 저감시켜 효율을 극대화 시키는데 매우 중요한 역할을 하므로, 누설량 감소를 위한 편날각을 고성능 실의 투스 형상으로 결정하였다.

### 3. 고성능 실의 소재 선정

고성능 실의 소재를 결정하기 위해서, 누설량, 충격에 대한 안전성, 내마모성 및 경제적인 측면을 동시에 고려하였다. 개선된 오일 디플렉터의 소재에 따른 충격해석 결과, TORLON 4540이 가장 안전하나, 모든 엔지니어링 플라스틱에 대하여 최대유효응력이 각각의 항복강도보다 매우 낮은 값을 나타내므로 충격하중에 의한 파손은 발생하지 않을 것으로 사료된다. 또한, Tables 6 및 7과 같이

Table 5 Costs per volume of the engineering plastics

	PEEK CA30	TORLON 4540	TORLON 4301
Volume (mm <sup>3</sup> )	16t x 625 x 1,000	12t x 305 x 305	16t x 305 x 305
Cost (Won)/cm <sup>3</sup>	710	1182.5	907

Table 6 Ratios of maximum equivalent stress divided by yield strength: single edged seals

	Maximum equivalent stress (MPa)	Maximum equivalent stress / Yield strength (%)
PEEK CA30	0.337	0.23
TORLON 4540	0.272	0.30
TORLON 4301	0.286	0.28

Table 7 Ratios of maximum equivalent stress divided by yield strength: double edged seals

	Maximum equivalent stress (MPa)	Maximum equivalent stress / Yield strength (%)
PEEK CA30	0.307	0.21
TORLON 4540	0.258	0.29
TORLON 4301	0.271	0.26

각 소재의 마모수명을 항복강도에 대한 최대유효응력의 비율로 평가한 결과, 실의 형상이 편날각 및 양날각인 경우에 대하여 PEEK CA30이 가장 낮은 값을 가진다. 따라서, 소재 별 가공비는 동일하므로, 충격 완화 및 내마모성이 우수하고, Table 5에 의하면 가격이 가장 저렴한 PEEK CA30로 제작된 고성능 실(편날각)이 적합한 것으로 판단되었다.

기존 및 개선된 오일 디플렉터의 마모시험을 통하여, 판 스프링이 장착된 편날각을 갖는 고성능 실 (PEEK CA30)의 내구성을 검증하였다. Fig. 15과 같이, 마모시험기에 기존의 알루미늄 투스 및 판 스프링이 부착된 고성능 실 (PEEK CA30)을 가지는 오일 디플렉터를 설치하였다. 실제보다 가혹한 조건의 시험을 위하여, 발전 터빈 비상정지 진동 규정치 (228 μm)의 2.2배인 500 μm의 진동 진폭으로 투스 및 고성능 실을 로터에 접촉시켜 마모를 발생시켰다. 로터의 회전수는 900 rpm, 마모 시험 시간은 60분으로 설정하였으며, 시험의 정확성을 위하여 6개의 시편에 대한 시험을 수행하였다. Fig. 16과 같이 시편의 마모시험 전 및 후의 폭 ( $l$ ,  $l'$ )을 측정된 후, 식(3)을 이용하여 마모율 ( $W$ )을

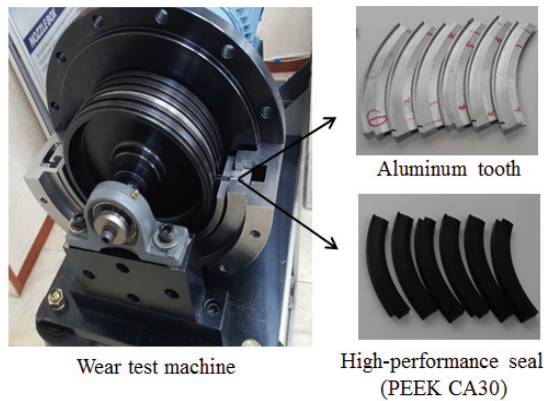


Fig. 15 Prototypes regarding to the existing oil deflector and the advance one for wear test

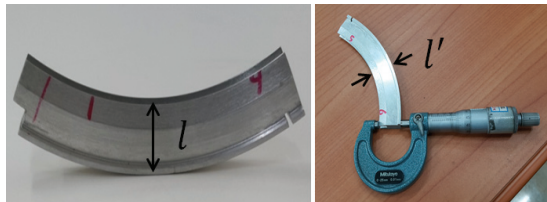


Fig. 16 Measurement of the prototype width after wear test

Table 8 Wear rates of the aluminum tooth and high-performance seal (PEEK CA30) with the spring

	Width before wear test ( <i>l</i> )	Width after wear test ( <i>l'</i> )	Wear rate ( <i>W</i> )
Aluminum tooth	18.91 mm	18.30 mm	3.2%
High-Performance seal with spring	18.89 mm	18.85	0.2%

계산하였고, 6개의 시편에 대한 평균 마모율을 Table 8에 나타내었다.

기존 및 개선된 오일 디플렉터의 마모시험 결과, 판 스프링이 장착되지 않은 알루미늄 투스의 경우 마모율이 3.2%, 판 스프링이 장착된 편날각을 갖는 고성능 실 (PEEK CA30)의 마모율이 0.2%로 나타나, 마모 성능이 16배 향상됨을 알 수 있었다.

$$W = \frac{l-l'}{l} \times 100 \quad (3)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 오일 디플렉터의 누설량을 최소화하기 위하여 로터와 투스 사이의 간극을 기존 0.5 mm에서 0.2 mm로 감소하였고, 충격 흡수 및 마모 수명 향상을 위하여 최 외각 알루미늄 투스2개를 판 스프링을 장착한 후, 엔지니어링 플라스틱 (Engineering Plastic)의 고성능 실 (Hi-Performance Seal)로 대체한 오일 디플렉터 (Advanced oil Deflector)를 개발하였다. 개선된 오일 디플렉터에 대한 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 유동해석을 통하여, 간극이 감소된 편날각을 갖는 오일 디플렉터의 누설량을 도출하였고, 기존 오일 디플렉터와 비교하여 65.64% 저감됨을 알 수 있었다.

(2) 고성능 실의 소재 (PEEK CA30, TORLON 4540 및 TORLON 4301), 판 스프링의 장착 여부 및 투스의 각 형상(편날각 및 양날각)에 따른 충격 해석을 수행한 결과, 판 스프링이 장착된 양날각을 갖는 TORLON 4540 고성능 실이 충격에 대하여 가장 안전하였다.

(3) 충격해석으로부터 얻은 최대유효응력 대비 소재의 항복강도의 비로 내마모성을 평가하였으며, 누설량, 내충격성, 내마모성 및 가격 경제성을 모두 고려하여 편날각을 갖는 고성능실의 소재 (PEEK CA30)를 결정하였다.

(4) 개선된 오일 디플렉터의 마모시험을 통하여, 판 스프링이 장착된 편날각을 갖는 고성능 실 (PEEK CA30)의 내구성이 기존의 오일 디플렉터보다 마모성능이 16배 향상됨을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2014년 중소기업청 구매조건부신제품개발사업의 일환으로 수행하였음(201410760001).

#### REFERENCES

1. Yang, S. H., Park, C. H., Kim, J. C., and Ha, H. C., "Examination of the Periodic High Vibration by the Accumulated Carbide at Oil Deflector of a Steam Turbine for Power Plant," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 11, pp. 897-903, 2002.
2. Ha, T. W. and Kang, J. H., "Leakage Analysis of

- Angled-Labyrinth-Packing-Ring Seal for Steam Turbine Using CFD,” Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 25, No. 5, pp. 298-304, 2009.
3. Hur, J. H., Ahn, J. H., Park, J. G., Moon, S. J., Lee, J. H., et al., “Analysis of Leakage through Labyrinth Seal in a Steam Turbine due to Modification the Teeth Angle,” Proc. of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea on Winter Annual Conference, pp. 313-318, 2009.
  4. Kim, J. W. and Pack, J. W., “A Study on Mathematical Model for Analysis of the Retractable Packing Seals for Steam Turbine Rotors,” Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers on Fall Annual Conference, pp. 43-48, 2007.
  5. Kweon, Y. S. and Suh, J. S., “A Study on the Turbine Performance in the Steam Seal Variable Clearance Packing Type of Steam Turbine,” Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers on Fall Annual Conference, pp. 1676-1681, 2004.
  6. Kim, J. H., Bae, J. H., Lee, C. R., and Kim, C., “Development of Flexible Packing Ring in Steam Turbine for Reduction of Leakage by using CFD Flow Analysis,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 7, pp. 741-748, 2013.
  7. ANSYS Inc., “ANSYS CFX Introduction,” 2015.
  8. Ivanov, A. V. and Moskvicев, A. V., “Influence of Geometry on Vortex Configuration and Dimension in LRE Turbopump Labyrinth Seal,” Procedia Engineering, Vol. 106, pp. 126-131, 2015.
  9. Wang, W.-Z., Liu, Y.-Z., Jiang, P.-N., and Chen, H.-P., “Numerical Analysis of Leakage Flow through Two Labyrinth Seals,” Journal of Hydrodynamics Ser. B., Vol. 19, No. 1, pp. 107-112, 2007.
  10. Hu, J. H., “Analysis of the Leakage Through Labyrinth Seal in a Steam Turbine due to Modification of the Teeth Shape,” Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 2010.
  11. Xiaodong, Q. and Xiuli, S., “Multidisciplinary Design Optimization of Turbine Disks based on ANSYS Workbench Platforms,” Procedia Engineering, Vol. 99, pp. 1275-1283, 2015.