



Rubber Material Development and Performance Evaluation of Diaphragm Seal for Steam Generator Nozzle Dam

Chang-Su Woo[†], Chi-Sung Song^{*}, Han-Chil Lee^{**}, and Jin-Wook Kwon^{***}

Department of Nano Applied Mechanic, Korea Institute of Machinery & Materials 156,
Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

^{*}Research Planning and Coordination Division, Korea Institute of Machinery & Materials 156,
Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

^{**}Technical Research Center, MuJinKeeYeon 734-7, Ancheon-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 62210, Korea

^{***}Construction Materials Engineering Center, DRD Holding Co., Ltd. 28, Gongdandong-ro,
55 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46329, Korea

(Received July 20, 2020, Revised August 19, 2020, Accepted August 24, 2020)

Abstract: Rubber materials, used in nuclear power plants, need high heat-oxidation resistance to curing or cracking under a heat aging environment. This is because they are applied to environments with high temperature, high humidity, and radiation exposure. Nuclear radiation causes additional hardening or degradation, therefore, rubber materials need radiation resistance that satisfies the general and any accidental conditions produced in the power plant. Therefore, in this study, we developed a rubber material with excellent heat and radiation resistance for the diaphragm seal of a nuclear steam generator nozzle dam. The rubber material greatly improved the reliability of the steam generator nozzle dam. In addition, 30 inch and 42 inch diaphragm seals were manufactured using the developed rubber material. A nozzle dam was installed in a nuclear power plant and tested under the same conditions as a steam generator to evaluate safety and reliability. In the future, the performance and safety of diaphragm seals developed through field tests of nuclear power plants will be evaluated and applied to currently operating and new nuclear power plants.

Keywords: nuclear power plants, steam generator, nozzle dam, diaphragm seal, rubber material, performance test

Introduction

원자력발전에 사용되는 실링(Sealing), 오링(O-ring), 다이아프램(Diaphragm) 및 케이블(Cable) 등의 고무제품들은 고온, 습기 및 방사선 피폭 등과 같은 다양한 환경에 놓이게 된다. 이러한 특수요인에 의하여 고무제품들은 절연체의 탄성을 잃게 되어 안전성 조건을 만족시키지 못하여 결국에는 예기치 못한 안전사고가 발생하게 된다.

국내 고무 관련기술 분야는 명확한 이론적 설명과 재현이 매우 난해하여 경험적인 결과를 바탕으로 시행착오법을 시행하여 발전하여 왔으며 고무소재의 낮은 신뢰성으로 인해 다른 금속소재의 부품에 비해 비교적 물성치의 편차가 커서 신뢰성 구축 및 평가가 어려운 분야로 알려져 있다. 또한, 원전 기기에 사용되는 고무제품의 경우에는 아직까지 국산화가 진행되지 않고 있어 전량 수입에 의존하고 있는 실정이며 내방사성이 우수한 고무소재에 대한 배합과 제조법에 대한 국내 기술은 매우 취약한 상황이라 할 수 있다. 최근, 원자력 안전

및 신뢰성 확보에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 사용조건에서 운용되는 고무부품에 대한 고장 메카니즘 규명과 신뢰성평가기술 개발이 요구되고 있다.^{1,2,3} 지금까지 외국에서 수행한 연구결과나 프로그램을 고가로 구매하여 고무소재 물성평가 및 수명예측에 이용되고 있으나, 외국에서 수행한 소재의 물성과 국내 소재의 구성 성분이 다르기 때문에 국내의 신규제품이나 가동 중 원전기기의 수명예측에 그대로 적용하기에 무리가 있어 환경조건에 따른 소재 물성평가 및 부품의 신뢰성 평가를 위한 연구개발이 필요하다 하겠다. 또한, 원전 부품은 다른 기계부품에 비해 고무소재개발 및 물성 데이터 부족과 특성 및 수명예측기술 미비, 제조공정과 환경변화에 따른 제품의 불균일화 등으로 체계적인 설계기술과 시험평가 시스템이 구축되지 않아 품질 및 안전성 저하 등의 요인으로 작용하고 있어 부품의 신뢰성 확보를 위한 연구가 절실하다 하겠다.^{4,5}

따라서, 본 연구에서는 원자력 증기발생기(Steam generator) 노즐댐(Nozzle dam)의 다이아프램 씰(Diaphragm seal)에 사용되는 내열성 및 내방사성이 우수한 고무소재를 개발하여 증

[†]Corresponding author E-mail: cswoo@kimm.re.kr

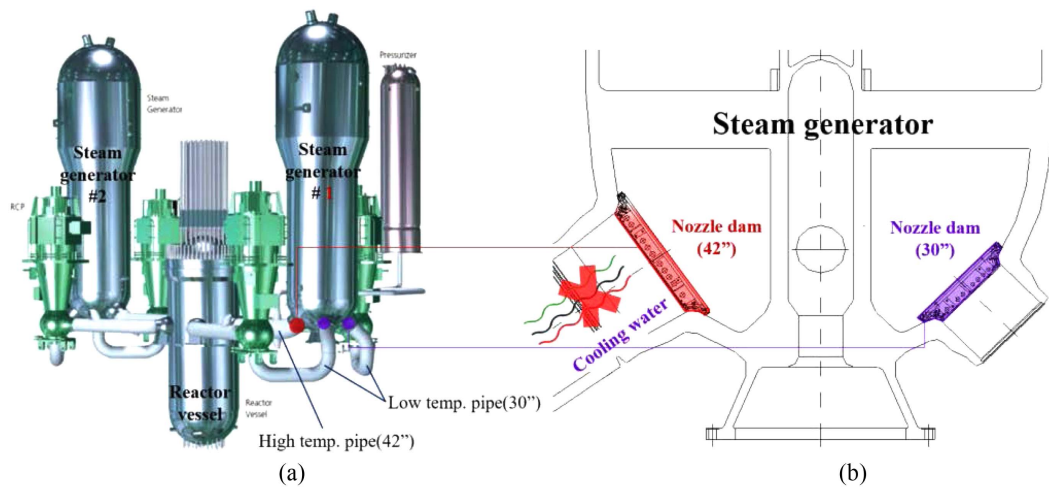


Figure 1. Steam generator nozzle dam installation schematic: (a) Primary equipment system of nuclear power plants (b) Steam generator nozzle dam.

기발생기 노즐댐에 대한 신뢰성 확보에 크게 기여하고자 한다. 증기발생기 노즐댐은 Figure 1에서와 같이 증기발생기내 냉각재 배관 입구에 설치된 밀폐장치로 원자로가 설치되어 있는 수조의 냉각수가 증기발생기로 유입되는 것을 차단하는 기능으로 작업자 안전을 확보하기 위한 중요한 안전장치로 원전1차 기기 계통에 설치된 노즐댐은 Figure 2에서와 같이 알루미늄 소재의 프레임(Frame)과 EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer)소재의 30인치와 42인치 다이아프램 씰(Diaphragm seal)로 구성되어 있다. 현재 국내에서 사용되고 있는 노즐댐은 웨스팅하우스(Westinghouse)와 CE(Combustion Engineering), NES(Nuclear Energy Services Inc.)에서 설계된 노

즐댐을 사용하고 있다.^{6,7}

Experimental

원자력 발전소에 사용되는 고무소재는 고온, 고습 및 방사선 피폭 등과 같은 환경에 적용하기 위해서는 열 노화 환경 하에서 경화 혹은 크래킹에 대한 열-산화 저항성이 커야 하며, 방사선 피폭에 의해 추가적으로 경화나 퇴화가 일어나기 때문에 원자력 발전소의 일반조건 및 사고조건을 만족하는 내방사선성을 가져야 한다. 일반적으로 원전용으로 사용되고 있는 고 에너지에 안정한 화합물이나 고분자들은 매우 고가이

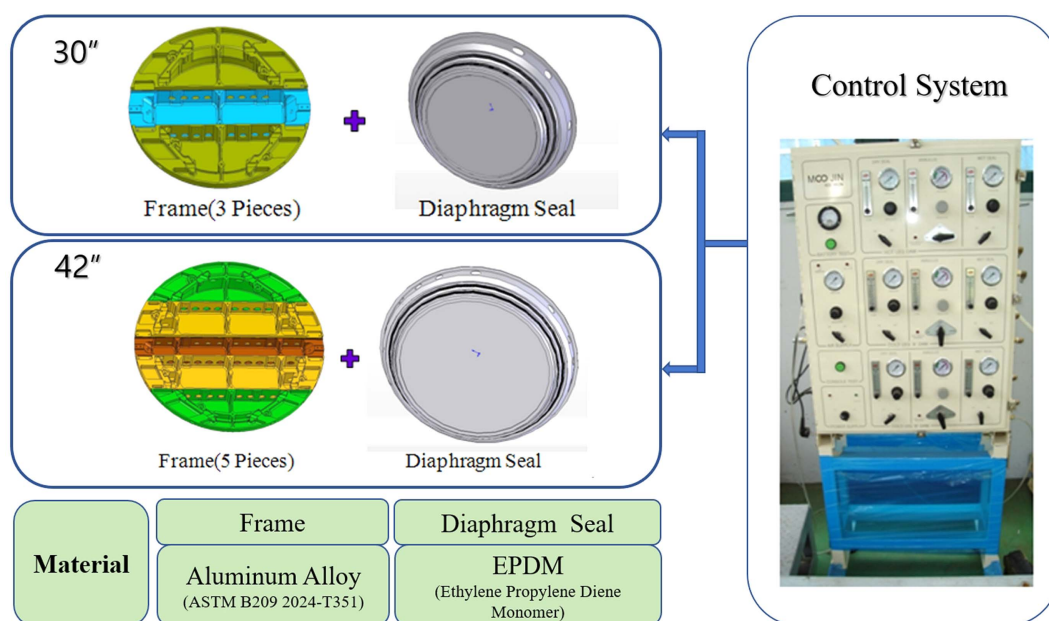
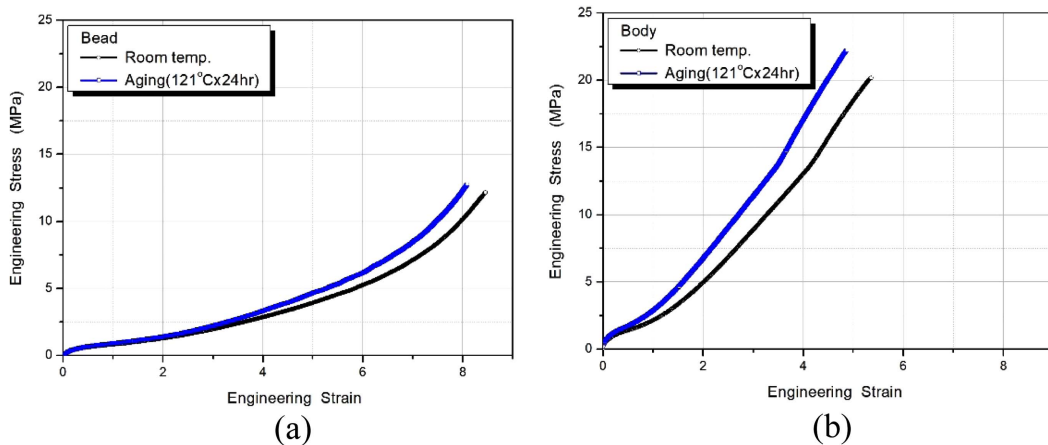


Figure 2. Nozzle dam composition.

Table 1. Rubber material properties at room temperature and heat aging

Type	Item	Test conditions		
		Room temp. (23°C)	Heat aging (121°C×24hr)	Rate of change (%)
Bead	Hardness (Hs)	35	38	+8.57
	Tensile strength (MPa)	12.1	12.8	+5.78
	Elongation (%)	845	809	-4.26
Body	Hardness (Hs)	57	61	+7.01
	Tensile strength (MPa)	20.2	22.0	+8.91
	Elongation (%)	535	487	-8.97

**Figure 3.** Stress and strain curve at room temperature and heat aging conditions: (a) Bead (b) Body

며 수입에 의존하고 있기 때문에 사용에 제한이 있다. 일반 산업계에서 광범위하게 사용되는 EPDM은 상대적으로 저렴하고 분자내에 불포화도가 적어 밀봉에 가장 중요한 반발 탄성이 크고 압축 영구줄음률, 내오존성, 내후성이 우수하나 내열성이 불소계나 실리콘계 고무보다 낮아 고열이나 방사선 같은 고 에너지 환경 하에서는 안정적이지 않기 때문에 원전용으로 사용하는 데에는 제약이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 EPDM계를 중심으로 내열성, 내유성 및 내약품성이 좋은 다양한 공중합체에 다양한 충진제를 첨가하거나 가교형태 및 가교밀도의 최적화를 통한 내 굴곡균열성, 내압성 및 강성 증대, 내방사선 특성의 증대와 같은 다양한 기능을 보완하여 30인치와 42인치 다이어프램 씰에 사용할 수 있는 비드(Bead) 및 바디(Body)용 고무소재를 개발하여^{8,9} 다양한 환경조건 하에서 물성시험을 수행하였다. 또한 개발된 고무소재를 이용하여 다이어프램 씰을 제작하여 실제 원자력 발전소 현장에서 노즐댐이 설치되는 증기발생기와 동일한 여건 하에서 성능시험을 진행하여 건정성을 평가하였다.

Results and discussion

1. 고무소재 물성평가

개발된 고무소재에 대해 상온상태와 열화(121°C×24hr)시킨

조건에서 인장강도시험을 통해 기본물성을 비교한 결과, Table 1과 Figure 3에서와 같이 비드 고무소재보다 바디 고무소재의 정도 및 강성이 높게 나타났다. 비드 및 바디에 사용되는 고무소재 모두 열화상태에서는 정도와 인장강도는 상온상태보다 증가하였으나 신율은 감소하는 경향이 나타났으며 열화 후 물성변화율은 상온물성의 10% 이내로 사용기준을 만족하였다. 다음은 상온상태와 열화 후의 시편에 원자력 발전소의 일반조건인 정상 방사선 조사(Normal radiation, 2×10^4 Gy)와 사고조건인 비정상 방사선 조사(Abnormal radiation, 2×10^6 Gy)¹⁰ 후의 물성변화를 비교, 검토한 결과로 Table 2~3과 Figure 4~5에서와 같이 상온 및 열화상태의 고무시편에 정상 방사선 조사를 한 경우에는 비드와 바디용 고무소재의 정도, 인장강도, 신율의 변화는 방사선 조사전의 물성과 거의 유사하게 나타나 개발된 고무소재는 열화 및 내 방사선성이 우수해 원자력 노즐댐 다이어프램용 씰 재료로 사용 가능성을 알 수 있었으나, 사고조건인 비정상 방사선 조사를 한 경우에는 상당히 큰 물성변화가 발생하여 매우 취약해짐을 알 수 있었다.

2. 노즐댐용 다이어프램 씰 성능평가

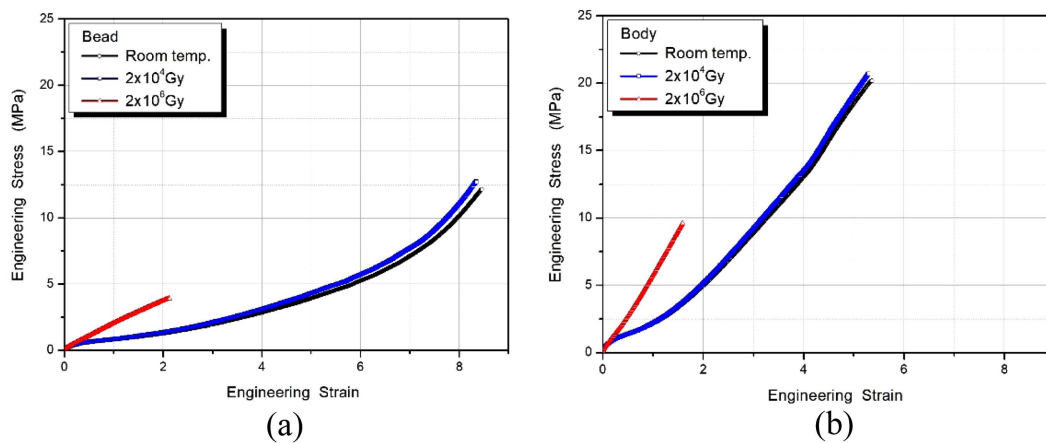
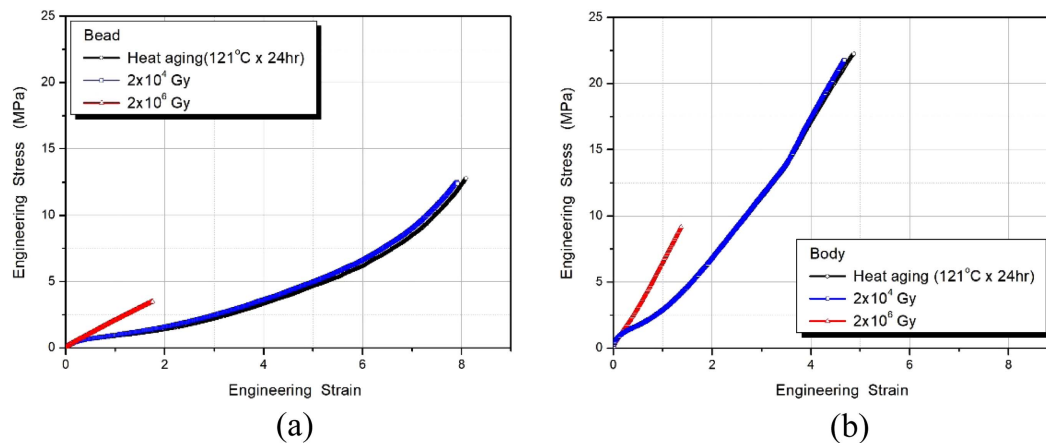
기존의 다이어프램 씰의 튜브는 중공형 구조로 되어 있으나 내부가 비어 있어 고무의 유동에 의해 형상 유지와 공기

Table 2. Properties of rubber material after normal and abnormal radiation of room temperature specimens

Type	Item	Room temp. (23°C)			Rate of change (%)	
		Before radiation	Normal (2×10^4 Gy)	Abnormal (2×10^6 Gy)	Normal (2×10^4 Gy)	Abnormal (2×10^6 Gy)
Bead	Hardness	35	38	42	+8.57	+20.0
	Tensile strength	12.1	12.7	3.6	+4.96	-70.2
	Elongation	845	834	217	-1.30	-74.3
Body	Hardness	57	61	66	+7.01	+15.8
	Tensile strength	20.2	20.9	9.6	+3.46	-52.5
	Elongation	535	527	159	-1.49	-70.3

Table 3. Properties of rubber material after normal and abnormal radiation of room temperature specimens

Type	Item	Heat aging (121°C×24hr)			Rate of change (%)	
		Before radiation	Normal (2×10^4 Gy)	Abnormal (2×10^6 Gy)	Normal (2×10^4 Gy)	Abnormal (2×10^6 Gy)
Bead	Hardness	38	40	42	+5.26	+10.5
	Tensile strength	12.8	12.4	3.5	-3.12	-72.6
	Elongation	809	792	175	-2.10	-78.3
Body	Hardness	61	62	64	+1.64	+4.82
	Tensile strength	22.0	21.7	9.2	-1.36	-58.2
	Elongation	487	467	136	-4.10	-72.1

**Figure 4.** Stress and strain curve after normal and abnormal radiation of specimen at room temperature condition: (a) Bead (b) Body.**Figure 5.** Stress and strain curve after normal and abnormal radiation of specimen at heat aging condition: (a) Bead (b) Body

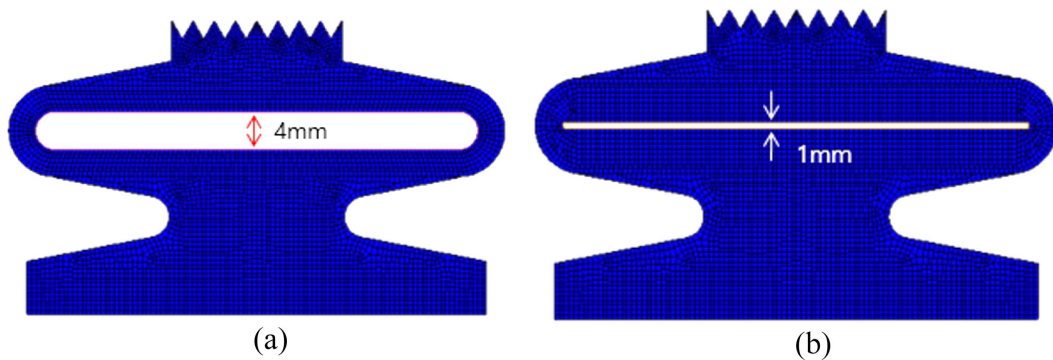


Figure 6. Tube structure for diaphragm seal: (a) Hollow type (b) Separation layer type.



Figure 7. Diaphragm seal for nozzle dam: (a) 30 " diaphragm seal (b) 42 " diaphragm seal.

주입구의 기밀이 상대적으로 어렵다는 단점이 있어 본 연구에서는 중공부를 없애고 공기 주입 시 튜브 형태를 쉽게 만들 수 있고 공기 주입구 기밀이 양호하게 이형 분리층을 가지도록 공정을 개발하여 제품의 품질 균일성 확보가 가능하게 하였다. 이형 분리층은 고무 층 사이에 이형 분리 고무를 넣어 단면이 격리되도록 하는 구조로 중공형 구조보다 성형 및 가황 작업이 용이하다는 장점을 가지고 있으나 이형 분리층 내부의 공간이 중공형 구조에 비해 작아서 튜브의 팽창이 작을 수 있지만 Figure 6에서와 같이 유한요소 해석을 통해 기능상 문제가 없음을 확인한 후 Figure 7과 같이 30인치와 42인치 다이아프램 씰의 시제품을 제작하였다.

제작된 다이아프램 씰의 성능시험을 위하여 실제 원자력 발전소 현장에서 노즐댐이 설치되는 증기발생기와 동일한 여건 하에서 성능시험을 진행하여 건정성을 평가할 목적으로 Figure 8과 같이 증기발생기 하부 구조물 모형(Mock-up)을 설계, 제작하였다. 맨웨이(Man way) 및 각 노즐(Nozzle) 등 치수와 구조는 증기발생기와 동일하게 하였으며 기능상 문제가 없는 구조에 대해서는 시험용도 상 접근 및 설치가 용이한 구조로 변경하여 제작하여 30인치 및 42인치 다이아프램 씰의

성능을 평가하기 위해 수압 지그를 이용하여 상온 및 방사선 조사 조건에서 성능시험을 수행하였다.

Figure 9와 Figure 10에서 보는 바와 같이 상온에서 수압 2 bar, 공압 5 bar 조건으로 누수시험(Leakage test)과 공압 1.3 bar (Free state) 조건에서 기밀시험 결과, 누수와 누기가 없음을 확인하였다. 다음은 상온시험을 진행한 30인치와 42인치 제품을 일반조건인 정상 방사선 조사로 진행한 후 동일한 시험방법으로 누수 및 기밀시험을 실시한 결과 누수와 누기가 없어 개발된 다이아프램 씰의 성능은 우수함을 확인하였다. 향후, 추진예정인 원자력 발전소 현장 적용시험을 통해 개발된 다이아프램 씰의 성능과 안전성을 최종 평가하여 현재 가동 중인 원전 및 신규 원전에 적용할 계획이다.

Conclusions

본 연구에서는 원자력 증기발생기 노즐댐에 사용되는 다이아프램 씰의 고무소재 개발과 성능평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다이아프램 씰에 사용할 수 있는 EPDM계 고무소재를

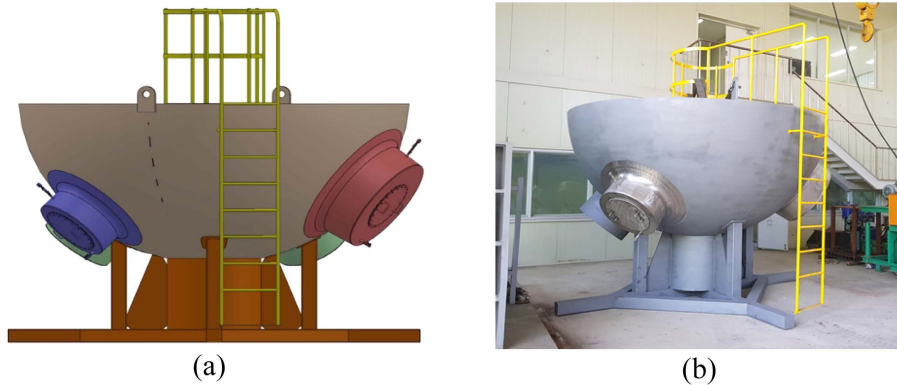


Figure 8. Steam generator substructure mock-up and production appearance: (a) Steam generating substructure (b) Completed mock-up.



Figure 9. Performance test of diaphragm seal: (a) Performance test (b) Leakage test and result.

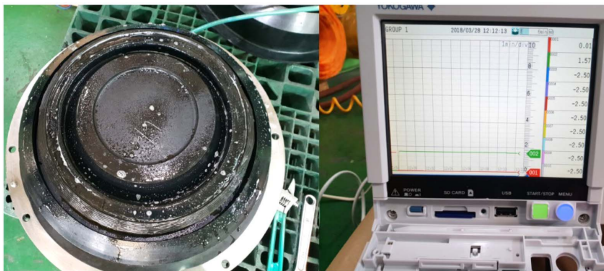


Figure 10. Air leakage test of diaphragm seal at free state.

개발하여 상온 및 열화상태와 정상 방사선 조사와 비정상 방사선 조사 등 다양한 환경조건 하에서 물성평가를 수행한 결과, 열화상태와 정상 방사선 조사(2×10^4 Gy)후 물성변화율은 상온물성의 10% 이내로 사용기준을 만족하여 원자력 노즐댐 다이어프램용 씰 재료로 사용 가능함을 알 수 있었으나, 사고 조건인 비정상 방사선 조사(2×10^6 Gy)를 한 경우에는 상당히 큰 물성변화가 발생하여 매우 취약해짐을 알 수 있었다

(2) 개발된 고무소재를 이용하여 30인치와 42인치 다이어프램 씰을 제작하여 실제 원자력 발전소 현장에서 노즐댐이 설치되는 증기발생기와 동일한 여건 하에서 수압 및 기밀시험을 진행하여 누수와 누기가 없어 개발된 다이어프램 씰의 성

능은 우수함을 확인하였다.

(3) 향후, 추진예정인 원자력 발전소 현장 적용시험을 통해 개발된 다이어프램 씰의 성능과 안전성을 최종 평가하여 현재 가동 중인 원전 및 신규 원전에 적용할 계획이다.

(4) 본 연구를 통해 전량 수입에 의존하던 원자력발전소용 고무소재 및 다이어프램 씰의 국산화 개발을 통해 수입대체 및 자체기술로 제품의 품질 안전성 확보와 신속한 유지보수 대응이 가능하리라 기대된다.

References

1. S. E. Jo, C. H. Ha, Y. J. Nam, H. C. Lee, and J. S. Kim, "The development of production steam generator nozzle sealing equipment", *Korea Science and Engineering Foundation*, TRKO200900071874 (2015).
2. J. H. Oh, D. Lee, and T. R. Kim, "Composite nozzle dam in the steam generator of nuclear reactor", *Composite Structure*, **38**, 203-213 (1997).
3. T. Sueyasu, "Long term aging and life forecast of large rubber products, *Proc. of 141th Rubber Technology Symposium*, **27** (2008).

4. K. Takeuchi, M. Nakagawa, H. Yamaguchi, and T. Okumoto, "Fatigue test technique for rubber materials of vibration insulator," *International Polymer Science and Technology*, **20** (1993).
5. C. S. Woo, H. S. Park, I. K. Sung, S. H. Yun, and J. M. Lee, "Service Life Prediction of Marine Rubber Fender", *Elastomer & Composites*, **54**, 1 (2019)
6. C. Evans, "Segmented nozzle dam", U.S. Patent No. 4957215, Sep. 18 (1990).
7. F. X. McDonald, "System for installing steam generator nozzle dam", U.S. Patent No. 5032350, Jul. 16 (1991).
8. H. S. Kim, Y. H. Noh, H. B. Noh, and K. W. Park, "EPDM for nuclear power plant with hard clay for improvement of resistant radiation and mixing method", KR Patent No. 20120047063A, Dec. 27 (2012).
9. S. J. Kim, K. S. Kim, and J. H. Bae, "Polymer resin composition for preparing insulation material having reinforced thermal stability", U. S Patent No. 20150104659A1, Apr. 16 (2015).
10. J. T. Jeong, T. W. Kim, and J. J. Ha, "A comparative estimation of the health effects for a normal operation and severe accidents of nuclear power plants", KAERI/TR-2853 (2004).