

## Characteristic Analysis for the Reduction Detent Force of Double-sided Slotted Type Permanent Magnet Linear Generator for Wave Energy Conversion

Sung-Won Seo, Jang-Young Choi, Min-Mo Koo, and Hyung-Il Park\*

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Keyyong Hong and Kyong-Hwan Kim

Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

(Received 22 January 2016, Received in final form 15 February 2016, Accepted 15 February 2016)

This study considered the reduction of the detent force of a permanent magnet linear synchronous generator (PMLSG). The PMLSG has a relatively large magnetic air gap. Thus, a slotted type of stator structure is generally employed. Furthermore, the detent force, which is caused by energy imbalances owing to the interaction between tooth-slot structures and the permanent magnets (PMs), must be minimized for start-up operation. Therefore, in this paper, the methods of auxiliary teeth and a notch in the teeth are applied to reduce the detent force.

**Keywords :** permanent magnet linear synchronous generator, detent force, auxiliary teeth, notch

### 파력에너지 변환용 양측식 슬롯티드 타입 선형 발전기의 디텐트력 저감을 위한 특성해석

서성원 · 최장영 · 구민모 · 박형일\*

충남대학교 전기공학과, 대전시 유성구 대학로 99, 34134

홍기용 · 김경환

선박해양 플랜트 연구소, 대전시 유성구 유성대로 1312, 34103

(2016년 1월 22일 받음, 2016년 2월 15일 최종수정본 받음, 2016년 2월 15일 게재확정)

본 논문은 파력에너지 변환용 양측식 슬롯티드 타입 선형 발전기의 디텐트력 저감을 위한 방법을 제시하였다. 양측식 선형 발전기는 비교적 큰 공극을 갖는다. 그렇기 때문에 일반적으로 선형기는 슬롯 구조를 갖는다. 이때의 디텐트력은 선형 발전기의 치슬롯과 영구자석 사이에 발생하는 힘으로 불필요한 에너지원으로 작용한다. 따라서, 본 논문에서는 슬롯구조를 갖는 선형 기기의 디텐트력을 줄이기 위한 세가지 방법인 보조치, 노치적용을 제시하고 유한요소해석법을 이용하여 본 연구의 타당성을 입증하였다.

**주제어 :** 영구자석 선형 발전기, 디텐트력, 보조치, 노치

#### I. 서 론

에너지 자원의 고갈 및 환경오염 문제 등으로 현대 사회는 신재생에너지가 각광받고 있다. 이 중, 영구자석을 이용한 에

너지 변환용 발전기는 계속 된 개발 및 연구가 진행되고 있다. 특히, 영구자석 발전기는 계자원으로 영구자석을 사용하기 때문에 영구자석 스스로 자력을 발생시켜 별도의 전원공급을 필요로하지 않고 비교적 간단한 구조를 갖는다. 또한, 높은 에너지 밀도를 갖는 희토류의 사용이 더해져 영구자석을 이용한 발전기는 효율 및 에너지 밀도가 높아 고속화가 가능하고 기기의 소형화 및 경량화가 가능해 졌다. 신재생 에

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

\*Corresponding author: Tel: +82-42-821-7601,

Fax: +82-42-821-8895, e-mail: phi1201@cnu.ac.kr

너지에 이용되는 영구자석 발전기는 크게 풍력발전에 사용되는 회전형 발전기와 파력에너지용 선형 발전기로 나눌 수 있다. 회전형 발전기는 회전 운동을 전기에너지로 변환이 가능하고 축을 중심으로 회전하기 때문에 축을 지지하는 부분에 대해 간단한 기술이 필요하여 실용화가 쉽게 이루어진다. 그러나 동력을 이용할 시 회전운동을 직선운동으로 변환하여야 하는 번거로움이 있어 기어나 크랭크 등 기계적 변환장치를 필요로 한다. 반면, 선형 발전기는 이러한 기계적 변환장치를 사용하지 않기 때문에 이를 사용함으로써 단점을 보완 할 수 있고, 특히 유지보수 측면과 기기의 부피 면에서 회전형 발전기의 한계를 극복할 수 있다[1-3]. 영구자석 선형 발전기는 회전형 발전기를 펼쳐놓은 것으로 유한한 길이를 갖기 때문에 회전기에서의 코강력과 같은 디텐트력이 존재한다[4]. 이러한 디텐트력은 영구자석과 발전기의 철심 사이에 발생하는 작용력에 의한 코강력과 선형 발전기의 양 끝단 철심과 영구자석사이의 인력으로 단부력이 생겨 만들어진 힘으로 선형 발전기의 추력 맥동의 원인이 되고 발전기의 효율 및 정현적인 역기전력 파형에 악영향을 미친다[5-7]. 디텐트력은 크게 두 가지로 나누게 된다. 영구자석과 유한한 길이를 갖는 이동자의 철심 사이에 발생하는 자기저항 차에 의한 철심 디텐트력과 영구자석과 코일이 감긴 치에 발생하는 자기 저항차에 의한 치 디텐트력이다.

본 논문에서는 이러한 발전기 효율에 악영향을 미치는 디텐트력을 저감하는 방법을 제안하였다. 디텐트력을 저감하는 방법으로는 현재까지 많은 연구가 진행되고 있고 여러가지 방법이 있다[8, 9]. 디텐트력 저감법은 일반적으로 영구자석의 자극폭을 조절, 영구자석의 형상을 변화시키는 방법, 영구자석을 비대칭적으로 배치하는 방법, 전기자나 영구자석에 스쿠를 주는 방법, 노치를 적용하는 방법, 보조치를 적용하는 방법 등이 있다[10-15]. 이 중 구조적으로 양측식 선형 발전기의 슬롯티드타입을 선정하여 영구자석의 자극 폭을 조절, 노치를 적용 및 보조치를 두는 방법으로 디텐트력 저감 해석을 실시하였다. 모든 해석은 유한요소 해석법을 이용하여 선형 발전기의 디텐트력을 해석하였고, 얻어진 결과의 비교를 통해 본 논문의 타당성을 입증하였다[16].

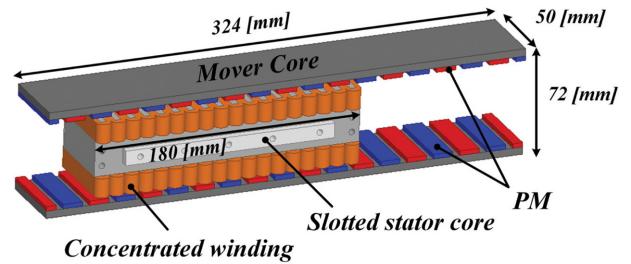


Fig. 1. (Color online) Structure of double sided slotted type permanent magnet linear generator.

## II. 해석 모델 및 이론

### 1. 디텐트력 해석을 위한 해석 모델 및 구조

Fig. 1은 디텐트력 해석을 위한 양측식 슬롯티드타입 선형 영구자석 발전기의 구조를 보여준다. Fig. 1과 같이 고정자의 권선은 집중권으로 감겨져 있고 고정자를 사이로 양측의 이동자에 속도를 주어 선형 운동을 하며 발전하는 원리이다. 본 논문에서 양측식 선형발전기는 1 m/s의 속력으로 구동되고 이때의 영구자석은 수직배열로 차차되어있고 이동자와 고정자는 해석 모델의 전체 길이를 벗어나지 않도록 설계되었다. 또한 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 일반적인 영구자석 기기에서 극호비로 불려지는 극 간격 대비 영구자석의 길이를 조정하여 선정하였다. 또한 디텐트력의 경우 영구자석과 철심 사이에 생기는 힘으로 실제 해석에는 Fig. 1의 권선부분이 해석되어지지 않았다. 해석 모델의 고정자 좌우 양측 홈은 디텐트력 저감법의 보조치를 실제로 연결하기 위한 홈이다. Table 1은 해석 모델의 설계 사양을 보여준다. 각각의 사양은 2차원 유한요소 해석에 이용되는 사양 및 실제 제작되어질 모델의 사양과 동일하다. 이 중 디텐트력을 해석하기 위해 설계변수를 주어 해석을 진행하였다[4-7]. Fig. 2는 디텐트력을 해석하기 위한 2차원 해석 모델을 보여준다. 이때의  $\tau_p$ 는 영구자석의 극간격을 나타내고  $\tau_m$ ,  $\tau_c$ ,  $\tau_n$  그리고  $h_c$ 는 각각 영구자석의 길이, 슬롯 간격, 치의 길이 그리고 치의 두께를 보여준다. 이러한 각각의 매개 변수를 이용하여 2차원 유한요소 해석을 진행하였다. 해석에 앞서 엄두한 점은 실제 제작을 할 시 가

Table I. Specification of analysis model.

Parameter	Value	Parameter	Value
전체길이	324 [mm]	극 간격	18 [mm]
고정자 길이	180 [mm]	영구자석 길이	13 [mm]
극수	18 [mm]	슬롯 간격	10 [mm]
영구자석 잔류 자속밀도	1.3 [T]	치 길이	13 [mm]
공극 두께	3 [mm]	치 두께	4 [mm]
슬롯당 턴수	20 [turns]	적층 길이	50 [mm]
슬롯 수	1.35 [mH]	고정자 철심 두께	14 [mm]
인덕턴스	18 [slots]	내부저항	0.85 [ohm]

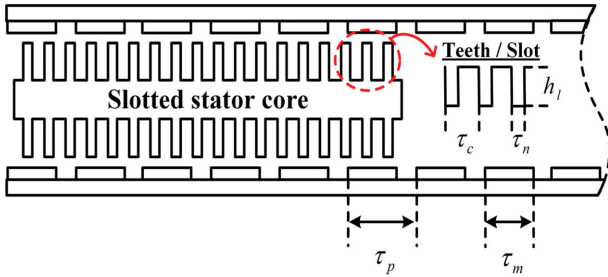


Fig. 2. (Color online) 2D analysis model of double-sided slotted type permanent magnet linear generator.

능한 수치를 고려하여 변수의 범위를 설정하였다.

### III. 디텐트력 저감 방법

#### 1. 영구자석 및 치 길이를 조절한 디텐트력 저감

앞에서 언급한 것과 같이 디텐트력은 영구자석과 이동자 철심의 치의 길이를 조절하여 디텐트력을 저감할 수 있다. 이러한 저감 방법은 Fig. 3의 표시된 부분인 영구자석의 길이와 치의 길이를 변경하면서 해석할 수 있다. Fig. 3과 같이 표시된 영구자석과 치의 길이인  $\tau_m$ 과  $\tau_n$ 를 변화하여 디텐트력 해석 결과를 비교하였다. 이때의 영구자석 길이는 최소 9 mm부터 최대 극간격을 고려하여 18 mm까지 해석을 진행하였다. 그 이유는 초기 설계 모델은 Table I에 보여지는 것과 같이 고정자가 10극 18슬롯의 구조로 한 극의 길이는 18 mm이기 때문이다. 또한, 본 논문에서는 편의를 더하기 위해 극간격 대비 영구자석의 길이를 극호비라 표현하였다. 또한 치의 길이는 슬롯 간격의 길이를 이용하여 간격이 늘어나면 치의 길이가 비례하게 줄어드는 방법을 이용하여 해석을 진행하였다. 이때의 슬롯 간격은 슬롯 오프닝으로 표현하였다.

#### 2. 노치 적용의 디텐트력 저감

Fig. 4는 해석 모델의 치부분에 노치의 여러 가지 형상을 보여준다. 노치란 Fig. 4의 표시된 부분과 같이 고정자 치에 의한 디텐트력을 줄이기 위한 방법으로 일정한 간격을 두고 치

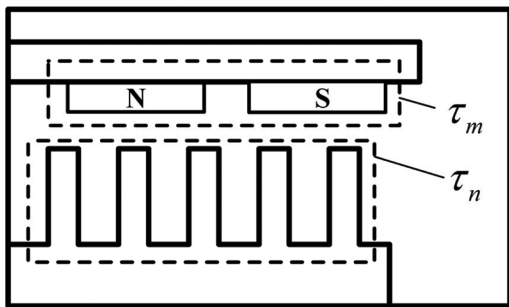


Fig. 3. Permanent magnet and teeth length for detent force decrease.

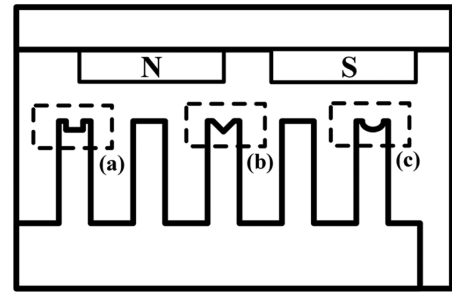


Fig. 4. Several notch shape.

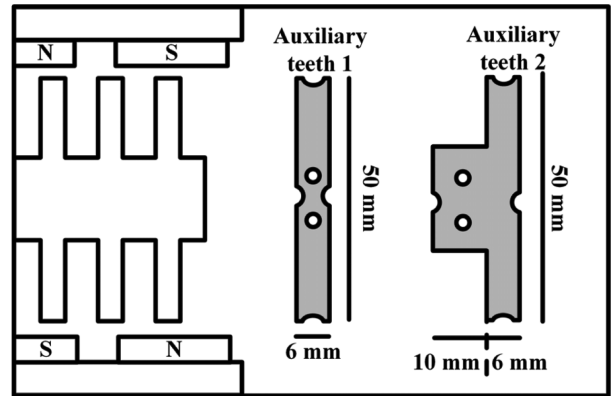


Fig. 5. Auxiliary teeth of two type for detent force decrease.

의 끝단을 깎아낸 구조를 말한다. 이때 기본적인 노치의 모양을 각각 (a), (b), (c)로 나타내었다. 실제로 노치 적용으로 인한 디텐트력의 저감은 본 논문의 해석 결과 장에서 보여준다. 또한 본 논문의 해석은 Fig. 4의 (c)형태의 노치를 사용하였다.

#### 3. 보조치를 이용한 디텐트력 저감

일반적인 디텐트력 저감법 중 가장 많이 이용되어지는 보조치를 이용한 방법은 해석 모델에 따라 그 모양이 무수히 다양하다. 그 중 본 논문에서 디텐트력을 해석한 양극식 슬롯티드타입 영구자석 선형 발전기는 Fig. 5의 두가지 타입의 보조치를 선정하였다. 이 중 첫 번째 보조치는 간단한 구조로써 슬롯 오프닝 길이를 늘리지 않는 구조이며 두 번째 보조치는 슬롯 오프닝 길이를 길게 늘린 구조로 되어있다. 또한 앞에서 언급된 노치를 적용하여 두가지의 보조치를 이용하여 디텐트력 저감에 효과적인 결과를 얻을 수 있다.

### IV. 해석 결과

Fig. 6은 실제 본 논문에서 해석된 2차원 유한요소 해석 모델을 보여준다. Fig. 6과 같이 3가지를 두고 해석을 진행하였고 이때의 기준은 보조치를 사용하지 않은 기본 모델과 두가지 타입의 보조치를 사용한 모델을 각각 해석하였다. 해석

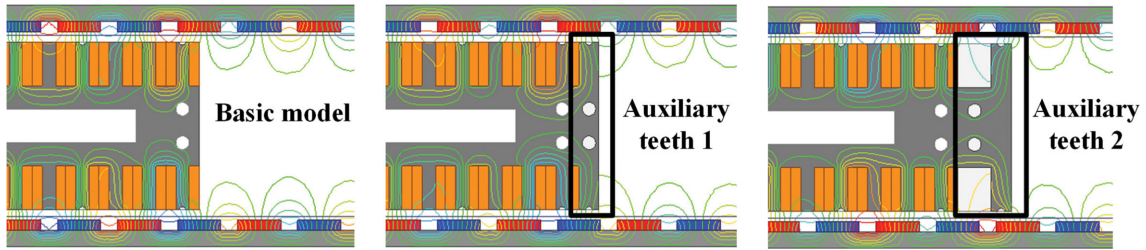


Fig. 6. (Color online) 2D Finite elements analysis model for detent force analysis.

과정은 앞에서 제시한 디텐트 저감 방법을 모두 사용하였고 영구자석 및 치의 길이를 이용한 후 노치효과와 두가지 타입의 보조치를 사용한 해석을 하였다. 그 결과는 다음과 같이 보여준다.

1. 영구자석 길이 및 치 길이를 이용한 디텐트력 해석 결과

Fig. 7은 극간격 대비 영구자석 길이의 비율인 극호비를 이

용하여 디텐트력 해석을 보여준다. 극호비의 비율이 0.5부터 1까지 6가지의 영구자석 두께를 가지고 해석하였다. 이때 해석 결과는 10초에서 30초 사이를 보여주며 영구자석의 길이에 따라 디텐트력이 저감되는 것을 확인 할 수 있다. 특히 실제 극호비가 0.5일 때의 영구자석 길이는 9 mm이고, 이때

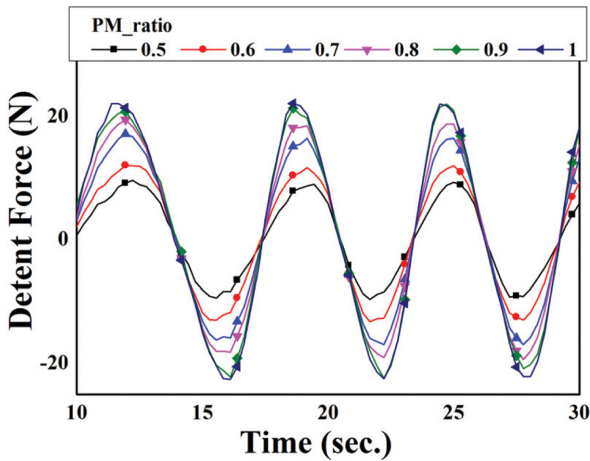


Fig. 7. (Color online) Detent force according to PM ratio.

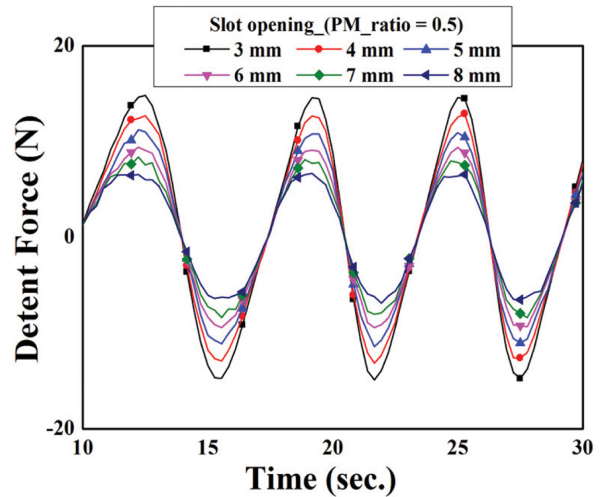


Fig. 8. (Color online) Detent force according to PM ratio 0.5/slot opening.

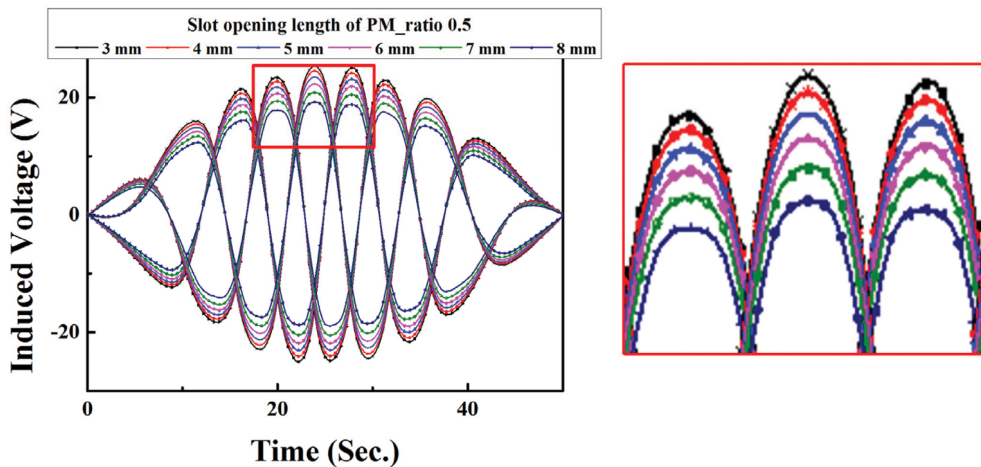


Fig. 9. (Color online) Back-emf\_analysis of PM ratio 0.5/slot opening.

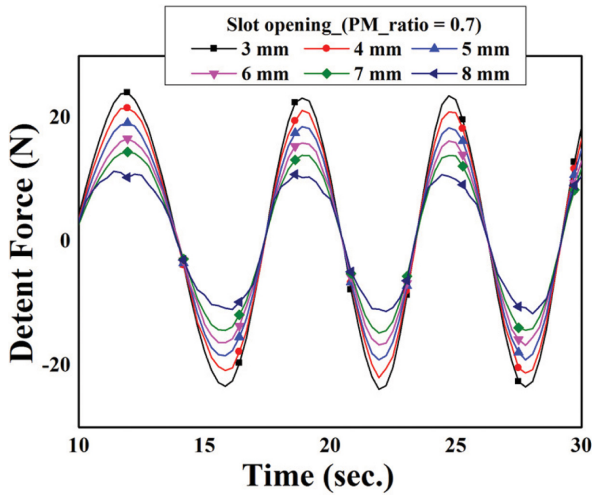


Fig. 10. (Color online) Detent force according to PM ratio 0.7/slot opening.

의 디텐트력이 가장 작지만 실제 제작에 있어 어려움이 있고 디텐트력 측면에서는 효과적일지 모르나 실제 발전기의 설계 시 원하는 출력을 얻기에는 제한이 될 수 있다. 이러한 제한을 고려하여 디텐트력 해석의 중간 비율의 0.7인 영구자석 길이 13 mm와 비교를 통하여 각각의 장단점을 확인 하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 극호비가 0.5일 때의 슬롯오프닝 길이를 조절하며 디텐트력을 해석한 결과와 그때의 역기전력 비교를 한 결과이다. 영구자석의 길이가 작아 디텐트력이 작고 이에 따른 슬롯의 간격에 따른 치의 두께의 변화로 인하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 10과 Fig. 11은 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 극호비가 0.7일 때의 디텐트력과 역기전력을 보여준다. 일반적으로 시간에 따른 쇄교자속의 변화를 역기전력이라 하며 영구자석의 양에 의해 역기전력은

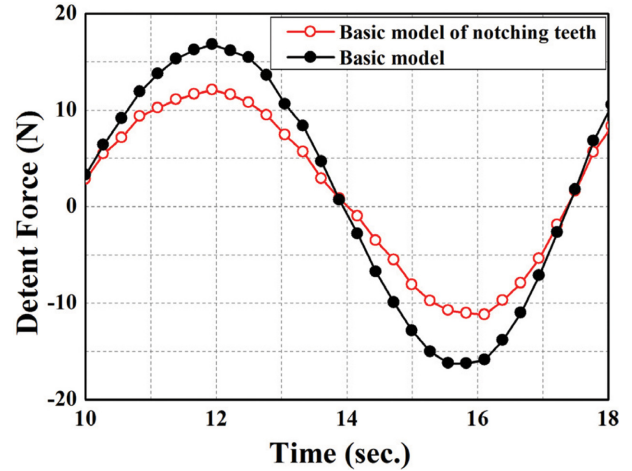


Fig. 12. (Color online) Comparison of analysis results of notch and basic mode.

극호비가 0.7일 때 높음을 알 수 있다. 또한 슬롯 간격에 따른 치의 변화와 영구자석의 두께 조절로 인하여 디텐트력은 변화 됨을 알 수 있다. 따라서 적절한 영구자석 및 치의 두께를 조정하여 선형 발전기의 효율에 악영향을 주는 디텐트력을 저감하는 결과를 얻을 수 있다.

## 2. 노치를 이용한 디텐트력 해석

Fig. 12는 고정차 치의 끝단에 노치효과를 주어 얻어진 디텐트력 해석 결과를 보여준다. 노치효과를 이용한 디텐트력 결과는 10초에서 18초 사이의 해석 결과를 나타 내었고 Fig. 12를 보면 알 수 있듯이 노치효과를 주었을 때 약 34%의 디텐트력 저감효과를 얻을 수 있다. 따라서 적절한 노치효과를 이용하여 슬롯티드 타입의 선형 기기에 치를 변화시켜 디텐트를 저감할 수 있고 이러한 결과로 노치효과에 대한 신뢰

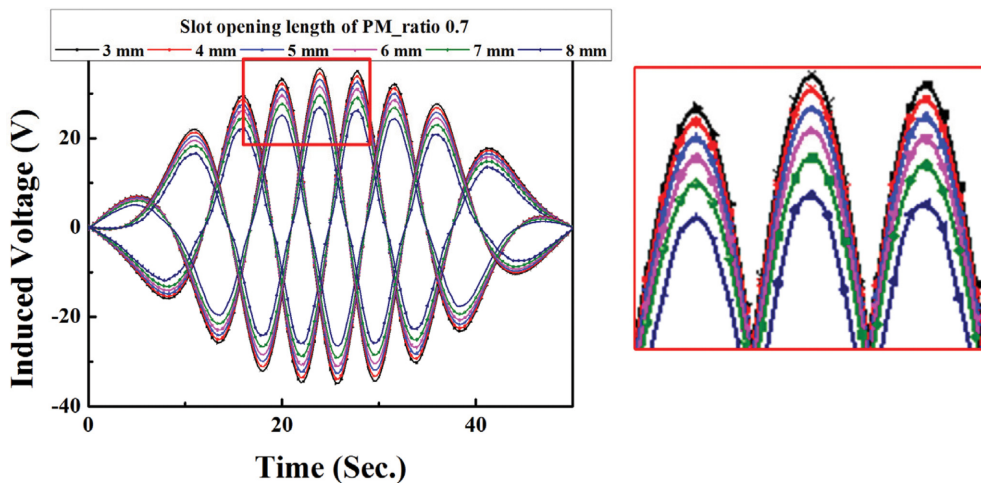


Fig. 11. (Color online) Back-emf analysis of PM ratio 0.7/slot opening.

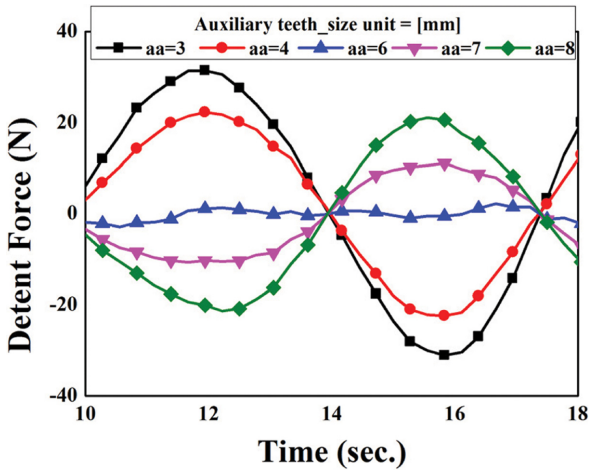


Fig. 13. (Color online) Detent force analysis according to auxiliary teeth first type.

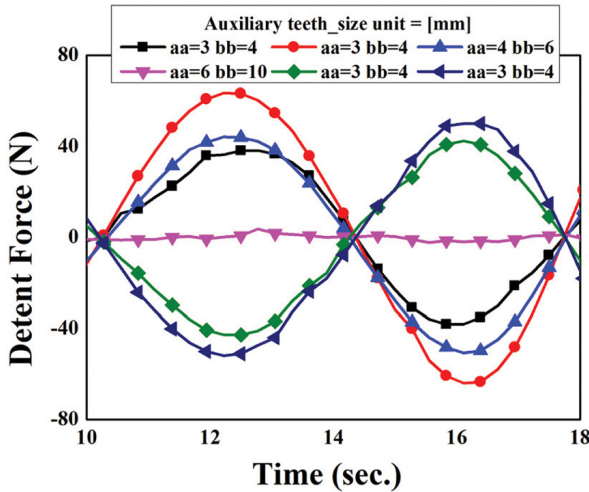


Fig. 14. (Color online) Detent force analysis according to auxiliary teeth second type.

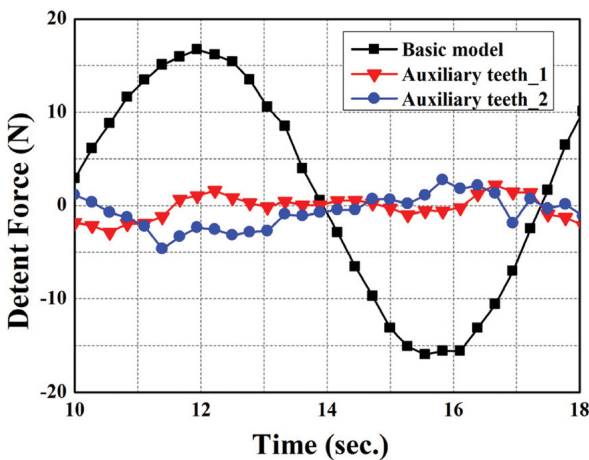


Fig. 15. (Color online) Detent force analysis comparison according to each type.

성을 얻을 수 있다.

### 3. 보조치를 이용한 디텐트력 해석

보조치를 이용한 해석은 먼저 보조치 형상을 선정 한 후 해석을 통하여 크기를 결정 하였다. Fig. 13과 Fig. 14는 그 과정을 보여준다. Fig. 13의 1번 타입의 보조치 크기 선정 결과로써, 이때의 aa는 보조치의 길이를 나타낸다. 또한 Fig. 14의 aa와 bb는 2번 타입의 보조치 구조의 길이를 나타낸다. 해석결과는 노치의 해석 결과 구간과 같은 10초에서 18초 사이를 보여주며 디텐트 저감에 효과적인 크기를 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 결과로 실제 제작 된 보조치의 각각의 크기를 검증 할 수 있었고 Fig. 15와 같이 보조치를 이용하여 보조치를 이용하지 않은 해석 모델과의 비교 할 수 있었다. 이 결과는 본 논문의 디텐트력 저감 방법으로 제시된 3가지 요구조건을 앞선 해석 결과를 통해 해석 모델에 적용하여 해석한 결과이다. 따라서 이 결과로 인하여 본 논문의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 양축식 슬롯티드타입 영구자석 선형 발전기의 디텐트력 저감법에 대해 제안하였고 해석 결과를 통하여 제시한 방법들의 타당성을 얻었다. 실제로 제작될 모델을 기준으로 디텐트력에 영향을 주는 영구자석과 치의 길이를 조절하여 해석을 진행하였다. 또한 디텐트력 저감에 있어 널리 이용되어 지는 방법들 중 본 논문의 해석 모델에 적용이 가능한 노치효과와 보조치를 이용하여 적절한 방법으로 해석을 진행 하였다. 이러한 결과를 통하여 선형 발전기가 사용되는 산업처에 발전기 설계시 성능 개선에 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] H. Polinder, F. F. A. van der Pijl, G. J. de Vilder, and P. J. Tavner, IEEE Trans. Energy. Conv. **21**, 543 (2006).
- [2] Y. Amara, J. B. Wang, and D. Howe, IEEE Trans. Energy Conv. **20**, 761 (2005).
- [3] M. Leijon, H. Bernhoff, O. Agren, J. Isberg, J. Sundberg, M. Berg, K. Karlsson, and A. Wolfbrandt, IEEE Trans. Energy Conv. **20**, 219 (2005).

- [4] M. Inoue and H. Sato, IEEE Trans, Magn. **36**, 1890 (2000).
- [5] T. Ishikawa and G. Slemon, IEEE Trans, Magn. **29**, 2028 (1993).
- [6] Z. Q. Zhu and D. Howe, IEEE Trans Magn. **28**, 1371 (1992).
- [7] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, D. Howe, and P. H. Mellor, IEE Proc. Elect. Eng. **B-144**, 227 (1997).
- [8] D. W. Chung and Y. M. You, J. Magn. **19**, 273 (2014).
- [9] D. W. Chung and Y. M. You, J. Magn. **20**, 176 (2015).
- [10] Y. Chen, S. Chen, Z. Q. Zhu, D. Howe, and Y. Y. Ye, IEEE Trans. Magn. **42**, 3416 (2006).
- [11] C.-L. Chiu, Y.-T. Chen, and W.-S. Jhang, IEEE Trans. Magn. **44**, 2317 (2008).
- [12] D.-R. Huang, T.-F. Ying, S.-J. Wang, and C.-m. Zhou, IEEE Trans. Magn. **34**, 2075 (1998).
- [13] D. R. Huang, C. Y. Fan, S. J. Wang, H. P. Pan, T. F. Ying, C. M. Chao, and Eric G. Lean, IEEE Trans. Magn. **35**, 839 (1999).
- [14] A. Hamler and B. Hribernik, IEEE Trans. Magn. **32**, 1545 (1996).
- [15] Y. U. Park, J. H. Cho, S. H. Rhyu, and D. K. Kim, J. Magn. **18**, 114 (2013).
- [16] J. H. Kim, J. M. Seo, H. K. Jung, and C. Y. Won, J. Magn. **19**, 411 (2014).