천연가스 생산기지 내 UPS시스템의 해석모델 개발

국 승 규^{1*} · 홍 성 경² · 김 준 호² · 최 원 목² · 박 영 호³

¹부경대학교 토목공학과, ²한국가스공사, ³(주)엠에스엔이

Development of an Analysis Model for UPS System of LNG Receiving Terminal Facilities

Seung-Kyu Kook^{1*}, Seong-Kyeong Hong², Joon-Ho Kim², Won-Mog Choi² and Young-Ho Park³

¹Department of Civil Engineering, Pukyong Univ., Busan, 48513, Korea

²Korea Gas Corporation, Daegu, 41062, Korea

³MSnE Co., Ltd, Uiwang, 16006, Korea

Abstract

UPS system in the liquefied natural gas(LNG) receiving terminal is one of the fundamental equipment that need to sustain operation during earthquake. In this study, modal identification test of UPS system was performed based on IEEE Std. 693-2005 and natural frequencies and modal damping, mode shapes had been identified. In addition, tri-axial time history test was performed to check the behavior and stress of the equipment during earthquake. Eigenvalue analysis was performed and analysis model was modified by reflecting the results of the test. Static analysis by dead weight and response spectrum analysis were performed to compare the combined stresses with the stress results of test. Dynamic characteristics and combined stresses under seismic load condition of the improved analysis model were similar to the test results and in this regard the compatibility was proved.

Keywords : UPS system, earthquake, modal identification test, tri-axial time history test, eigenvalue analysis, response spectrum analysis, combined stress

1. 서 론

천연가스 설비는 대표적인 사회적 인프라 시설물로 지진 발생 시 피해 최소화는 매우 중요한 항목이라 할 수 있다. 이와 같은 “내진검증(Seismic Qualification)”은 크게 동적해석 및 진동대시험을 통해 이루어진다. 상대적으로 기기형태가 단순하고 기능성 보다는 구조적 진전성이 중요한 기기에 대해서는 동적해석을 통한 해석적 방법을 이용한 검증이 선호되는 반면, 전기 혹은 계측기와 같이 구조가 복잡하여 해석모델의 작성이 곤란하거나 지진 발생 시 기능성이 중요시 되는 기기에 대해서는 시험을 통한 내진검증 작업이 이루어진다. 캐비닛의 경우, 프레임과 강판으로 구성된 구조물의 내부에 전기 부품들이 복잡하게 설치되어 있기 때문에 상기 두 가지 방법을 혼용하거나 시험에 의한 내진검증을 수행하는 것이 일반적인 경향

이다(Jeon, *et al.*, 2008).

생산기지 변전소의 UPS시스템(uninterruptible power supply, 무정전전원장치)은 공급되는 상용 전원 및 발전기 전원의 변동 시 부하에 일정한 전압 및 주파수를 부하기기에 연속적으로 공급하며 정전 시에도 축전지 전원을 이용하여 지정된 시간동안 전력을 연속적으로 유지 공급하는 주요 설비 중 하나이다.

이 연구에서는 대형 진동시험대를 이용하여 UPS시스템의 주요 구성품인 Primary UPS캐비닛과 AVR캐비닛에 대한 동특성 탐색시험을 수행하고, 3축 시간이력시험을 통해 지진 시 UPS시스템의 거동 및 최대 발생응력을 확인하였다. 그리고 “IEEE Std 693-2005(IEEE, 2006)” 기준에 따라 동적해석을 수행하고 해석적 방법에 의한 UPS시스템의 동특성을 시험 결과와 비교, 분석하여 유한요소모델에 반영하고 모델을 수정

* Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6075; E-mail: skkook@pknu.ac.kr
Received September 28 2016; Revised October 11 2016;
Accepted October 12 2016

© 2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하였다. 또한, 자중해석 및 응답스펙트럼해석을 통한 조합응력을 시험 결과와 비교하여 수정된 모델의 적합성을 검증하였다.

2. 대상기기 및 조건

2.1 개요

대상기기는 변전소 내 UPS시스템 중에서 Primary UPS 캐비닛과 AVR 캐비닛으로 외부형상 및 진동대 설치 상태는 Fig. 1과 같다.

- 크기 : 1,650mm×1,000mm×2,075mm
(UPS : 1,100mm×1,000mm×2,075mm /
AVR : 550mm×1,000mm×2,075mm)
- 질량 : 1,578kg(UPS : 1,028kg / AVR : 550kg)

Fig. 1 UPS system installed on shake table

UPS와 AVR의 패널 및 프레임 등은 SS400을 적용하였으며, 허용응력은 "AISC ASD(allowable stress design) 9th Edition"에 따라 $0.6 \times 250 \times 4/3 = 200\text{MPa}$ 로 적용하였다. 여기서, 지진하중 재하 시 허용응력 할증계수로 4/3을 적용하였다(AISC, 1989).

Table 1 Material Property

Material	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio (-)	Density (kg/m ³)	Yield Stress (MPa)	Allowable Stress (MPa)
SS400	2.05×10^5	0.3	7.85×10^{-6}	250.0	200.0

2.2 유한요소 모델링

유한요소 해석 프로그램 midas NFX(MidasIT, 2010)을 사용하여 생성한 3D 해석모델은 Fig. 2와 같다. 패널 및 프레임은 형상의 중립면을 기준으로 2D shell 요소를 적용하였고, 전면 패널의 질량을 질량요소로 치환하여 경첩부에

반영하였다. 정류기/충전기, 인버터 등의 내부 구성품들은 3D solid 요소를 사용하여 모델링하였고 연결부가 2D Shell 요소와 중첩되도록 절점을 공유하여 연결하였다.

Fig. 2 Finite element model

2.3 경계조건 및 접촉조건

UPS 시스템은 바닥면에 볼트연결로 고정된다. 이에 따라 바닥면 볼트연결 지점에 병진자유도(Tx, Ty, Tz)를 구속하였고, 바닥 채널의 바닥면 전체에 수직방향 자유도(Tz)를 구속하였다.

UPS와 AVR의 구조체와 양 옆면 판넬은 외곽부의 볼트로 연결되고 외곽부를 제외한 부분은 단순접촉인 상태이기 때문에 판넬의 수직방향 휨변형은 차단하고 미끄러지는 거동은 허용하는 미끄러짐(bidirectional sliding) 접촉조건을 부여하였다.

Fig. 3 Boundary condition

Fig. 4 Contact condition

또한 UPS와 AVR이 단순접촉으로 설치되는 시험 조건을 고려하여 UPS와 AVR이 맞닿는 판넬 간에도 미끄러짐 접촉 조건을 부여하였다.

2.4 하중 및 하중조합

고정하중은 구조체와 영구적으로 부착된 비구조체의 모든 하중을 포함하는 하중이며, 중력가속도를 적용하여 자중으로 고려하였다. 지진하중은 "IEEE Std 693-2005(IEEE, 2006)" 기준에서 가장 가혹한 조건인 "High required response spectrum, 0.5g"의 2% 댐핑 하중을 적용하였고, 수직 방향은 수평 방향 지진하중의 80%를 적용하여 검토하였다. 각 모드별 응답결과를 SRSS(square root of the sum of the squares) 법으로 조합하여 전체 응답을 계산하였다.

공진탐색시험은 UPS와 AVR 캐비닛의 상단 판넬에 3축 가속도계를 부착하여 진행되었으며, 진동대에 부착된 가속계를 Reference 가속도계로 하고 캐비닛 상단에 부착된 가속도계를 Roving 가속도계로 하여 ODS FRFs(operation deflection shape frequency response functions) 분석방법을 사용하였다. 감쇠비(damping)는 공진탐색시험(resonance search test)의 결과를 토대로 Half-Power Bandwidth Method를 통해 계산된 값 중, 가장 작은 값인 12.38%를 적용하였다.

Fig. 5 High required response spectrum, 0.5g

공진탐색시험 결과와 계산된 각 방향별 감쇠비는 각각 Fig. 6, Table 2와 같다.

지진하중의 응력 결과는 3축 방향(X , Y , Z)의 스펙트럼 하중을 적용하여 이를 SRSS 조합법으로 조합하였다.

$$\sigma_{seismic} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} \quad (1)$$

Table 2 Damping ratio from resonance search test

Equipment	Direction	Damping ratio(%)
UPS	X	15.52
	Y	21.71
AVR	X	13.86
	Y	12.38

4.95Hz
UPS(X-dir.)

8.63Hz
UPS(Y-dir.)

5.03Hz
AVR(X-dir.)

11.30Hz
AVR(Y-dir.)

Fig. 6 ODS FRFs of UPS system in each direction

각 하중 조건에 대한 조합응력은 다음의 식으로 계산되었다.

$$\sigma_{total} = |1.0\sigma_{weight}| + |1.0\sigma_{seismic}| \quad (2)$$

3. 동특성 분석 및 해석모델 수정

3.1 고유치해석

고유치해석을 통해 UPS시스템의 고유진동수와 모드형상을 확인하고 이를 시험값과 비교하였다.

고유치해석 결과, UPS와 AVR의 고유진동수가 시험값과 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 캐비닛의 양 옆면과 위아래 판넬은 두께 3mm이하의 박판이므로, 쉽게 휨변형이 가능하고 볼트 체결로 구조체와 연결되므로 실제적인 단면 성능을 기대하기 어렵다. 하지만, 유한요소 해석에서는 그 특성상 강성이 실제와 다르게 강하게 모델링되므로 이에 대한 문제를 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 7 Mode shape of UPS system in each direction

Table 3 Comparison of Natural Frequency of equipment test and analysis

Equipment	Direction	Natural Frequency(Hz)		
		Test	Analysis	Deviation
UPS	X	4.95	21.22	+16.27
	Y	8.63	28.69	+20.06
AVR	X	5.03	21.22	+16.19
	Y	11.30	42.66	+31.36

3.2 해석모델 수정

해석모델의 고유치해석 결과와 시험값의 차이를 보정하기 위해 다음과 같이 모델수정을 검토하였다. UPS와 AVR의 질량은 실측한 결과를 기반으로 적용하였기 때문에 수정사항에서 제외하고 모델의 강성을 조절하는 것을 주요 수정사항으로 설정하였다.

- Case1 : 질량요소로 표현한 전면판넬을 실제 모델링에 반영
- Case2 : 바닥면의 수직방향(Tz) 변위 구속 반영 여부
- Case3 : 구조체와 양 옆면 판넬의 접촉조건 반영 여부
- Case4 : 양 옆면 판넬과 전면 판넬의 해석 포함 여부
- Case5 : 재료의 강성을 조절

각 경우의 수정모델로 해석을 수행한 결과, 시스템적인 강성 조절보다는 재료의 강성을 축소하여 입력하는 방법을 적용하였을 경우에 시험값과 유사한 고유진동수를 얻을 수

Fig. 8 Mode shape of UPS system modified elastic modulus

Table 4 Comparison of Natural Frequency of equipment test and case study

Equip.	Dir.	Natural Frequency(Hz)					
		Test	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
UPS	X	4.95	25.16	13.32	11.73	6.29	6.12
	Y	8.63	28.29	22.96	26.31	7.61	8.28
AVR	X	5.03	25.16	13.32	11.47	6.29	6.12
	Y	11.30	37.21	31.19	36.48	8.99	12.31

있음을 확인하였다. 적합한 축소 비율을 찾기 위해 재료의 강성을 변경하는 해석을 수행하였고 강성을 1/12로 줄였을 때 시험값과 유사한 결과를 얻는 것으로 확인되었다. 따라서 이 연구에서는 UPS시스템의 동적해석을 위하여 재료의 강성을 1/12로 축소하여 진행하였다.

4. 해석 결과

4.1 스트레인 게이지 위치

해석의 조합응력을 3축 시간이력시험의 시험값과 비교하기 위하여 UPS와 AVR에 각각 12개, 9개의 스트레인 게이지를 부착하였다. UPS와 AVR의 바닥 채널에 각각 4개씩(UB_1~UB_4, AB_1~AB_4) 부착하였고 UPS 구조체의 후면에 8개, AVR 구조체의 후면에 5개의 스트레인 게이지를 부착하였다.

Strain gage of UPS

Strain gage of AVR

Fig. 9 Location of strain gages

4.2 질량참여율

기기의 동적 응답을 올바르게 표현하기 위해서는 충분히 많은 수의 모드가 고려되어야 하며, 모든 모드의 유효 질량 참여율의 합이 90%이상 되도록 해야 한다. 이 연구에서는 500개의 모드를 고려하여 주요 거동 방향인 X, Y 방향에 대하여 90% 이상의 질량참여율을 확보하였다.

Table 5 Effective mass percent

Direction	Total Mass (kg)	Cumulative participating mass(kg)	Effective mass percent
X	1,578	1,467.2	93.0%
Y		1,447.5	91.7%

4.3 응력 결과

자중해석 결과와 응답스펙트럼해석 결과를 조합한 응력 분포를 확인하였다.

UPS의 최대 조합응력은 Fig. 8의 DC_Choke가 설치되는 바닥면에서 163.04MPa로 확인되었으며, 이는 허용응력 기준인 200MPa를 만족한다. 스트레인 게이지가 부착된 각 위치별 응력결과는 Fig. 10과 같다.

Fig. 10 Combined stress in each location of strain gages of UPS

AVR의 최대 조합응력은 바닥 채널에서 49.17MPa로 확인되었으며, 이는 허용응력 기준인 200MPa를 만족한다. 스트레인 게이지가 부착된 각 위치별 응력결과는 Fig. 11과 같다.

UPS와 AVR의 조합응력 결과를 3축 시간이력시험의 시험 값과 비교한 결과, 최대응력이 발생하는 지점 등에서 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 스트레인 게이지 별 해석값과 시험 값은 Fig. 12에 제시하였다.

Fig. 11 Combined stress in each location of strain gages of AVR

Table 6 Max. combined stress of UPS & AVR

Equipment	Max. combined stress(MPa)	Allowable stress(MPa)	State
UPS	163.04	200	OK
AVR	49.17	200	OK

Combined stress results of UPS

Combined stress results of AVR

Fig. 12 Comparison of combined stress of test and analysis

"UUV_1" strain gage of UPS

"AMH_1" strain gage of AVR

Fig. 13 von Mises stress of tri-axial time history test

5. 결 론

이 연구에서는 "IEEE Std 693-2005(IEEE, 2006)" 기준을 적용하여 UPS시스템의 고유치해석을 수행하고, 이를 동특성 탐색시험의 시험값과 비교하여 모델을 수정하였다. 그리고 응답스펙트럼 해석을 수행하여 개선된 UPS시스템 해석모델의 적합성을 검토하였다. 이러한 연구 과정을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) UPS시스템과 같은 캐비닛 구조물의 경우, 판넬이 박판으로 구성되고 용접 혹은 볼트 연결 등 다양한 접합부의 존재 등으로 인하여 강성의 변화가 예상되며, 이를 해석 모델에 반영할 필요가 있다.
- 2) 시스템적인 강성 조절보다는 재료의 강성을 축소하여 입력하는 것이 시험값과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- 3) 시험과 해석에서 구한 고유치를 비교한 결과, 재료의 강성을 1/12로 축소하여 적용하였을 경우, 시험값과 유사한 결과를 얻는 것으로 확인되었다.
- 4) 개선된 UPS시스템 해석모델의 적합성은 지진하중을 적용하여 해석으로 구한 조합응력과 3축 시간이력시험으로 구한 시험값을 비교, 검토하여 확인하였다.
- 5) 개선된 해석모델의 적합성을 향상시키기 위해서 다양한 크기의 캐비닛에 대한 시험과 재료의 비선형성 고려 등의 추가 연구가 필요하다.

References

- AISC (1989) *Allowable Stress Design and Plastic Design*, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- IEEE (2006) *IEEE Std 693-2005*, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Jeon, J.H., Cho, S.G., Jeong, Y.W., Baek, S.N. (2008) Verification of Seismic Adequacy for Outlier Cabinets in Korean Operating Power Plant, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, pp.99~106.
- Jhung, M.J., Park, K.B., Hwang, W.G. (1992) Seismic Qualification of Plant Protection System Cabinet for Nuclear Power Plant, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, pp.148~155.
- Joe, Y.H., Park, H.G., Cho, S.G. (1999) Comparative Study of Analytical Modal Properties of Instrumentation Cabinet of Nuclear Power Plant, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, pp.186~192.
- Joe, Y.H., Park, H.G. (1999) Modal Testing of Seismic Monitoring System Cabinet of Nuclear Power Plant, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, pp.449~456.
- MidasIT (2010) *midas NFX Analysis Manual*.

요 지

천연가스 생산기지 내의 UPS시스템은 지진 시에도 기능성을 유지해야 하는 주요 설비 중 하나이다. 이 연구에서는 IEEE Std 693-2005 기준을 토대로 대형 진동대를 이용한 UPS시스템의 동특성 탐색시험을 수행하고 기기의 고유진동수와 모드감쇠, 모드형상 등을 도출하였다. 또한, 3축 시간이력시험을 통해 지진 시 기기의 거동 및 부재의 발생응력을 확인하였다. 유한요소모델을 생성하여 고유치해석을 수행하고 이를 동특성 탐색시험의 시험값과 비교, 분석하여 해석모델을 개선하고 자중해석과 응답스펙트럼 해석을 수행하여 조합응력을 3축 시간이력시험의 시험값과 비교하였다. 개선된 유한요소 해석모델의 동특성과 조합응력이 시험 결과와 유사함을 입증하여 개선된 UPS시스템 해석모델의 적합성을 제시하였다.

핵심용어 : UPS시스템, 지진, 동특성 탐색시험, 3축 시간이력시험, 고유치해석, 응답스펙트럼 해석, 조합응력