온도하중을 고려한 인터모달 터미널 플랫폼의 설계 검토

김 경 수^{1*} · 김 다 애¹ · 김 흥 래¹ · 현 은 택²

¹평화엔지니어링 연구원 ²TG구조기술사사무소

Design Review of Inter-Modal Terminal Platform for Temperature Load

Kyoung-Su Kim^{1*}, Da-Ae Kim¹, Heung-Rae Kim¹ and Eun-Tack Hyun²

¹R&D Institute, Pyunghwa Engineering Consultants, Anyang, 14059, Korea

²TG Structure Engineering, Seoul, 04987, Korea

Abstract

In this study, we examined the proper spacing between the expansion joints according to the temperature load of the inter-modal terminal platform infrastructure to implement a new inter-modal automated freight transport system, which we intend to introduce in Korea. To review the proper expansion joint spacing of the terminal platforms, we set the maximum expansion joint spacing according to the regional temperature changes using the equation proposed by the Federal Construction Council (FCC) of the United States. Then, the maximum displacement value, which was calculated through the structural analysis program, and the limit of the horizontal displacement of the building structure were compared. The proper expansion joint spacing was selected as the slab length at which the maximum displacement of the structure, due to temperature changes, was below the horizontal displacement limit. Based on the application of maximum expansion joint spacing for each region calculated through the FCC's suggestion, the maximum displacement that could occur within the limit of the lateral displacement of the structure was determined.

Keywords : inter-modal terminal, plat-form, temperature load, expansion joint

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

현재 국내 대도시권은 도시의 외연적 확장과 도로 중심의 교통물류체계로 인해 심각한 교통혼잡이 야기되고 있다. 우리나라의 경우 협소한 국토구조 특성상 도로운송 위주의 화물 운송체계가 정착단계에 있어 도로혼잡으로 인한 내륙수송비 부담 증가, 도로파손에 따른 시설 유지보수 비용의 증가, 화물 차로 인한 대형 교통사고의 증가 등 크고 작은 문제가 지속되고 있다. 최근 새로운 개념의 친환경 무인자동화물 운송시스템 개발 패러다임에 맞춰 기존시설과의 연계 및 시설의 안정성 확보 등에 관한 관심이 높아지고 있는 추세이다.

최근 도로 위주의 화물 운송시스템에서 고질적인 문제가 되는

환경오염 문제를 해결하고 국가 물류비를 획기적으로 절감할 수 있는 신 물류 운송방안으로 인터모달 자동화물 운송시스템 기술 개발이 진행되고 있다.

인터모달 자동화물 운송시스템은 두 가지 이상의 운송수단을 연계하는데 필요한 하역과정을 획기적으로 단순화하고 두 물류 거점을 연결하는 새로운 방식의 자동운송기술로 이를 구현하기 위해서는 전용 터미널, 궤도 등 다양한 신규 인프라 시설 개발이 수반되어야 한다. 특히, 신규 인프라 시설은 도입 시 경제성 검토와 더불어 안전성을 담보할 수 있는 관련 기준이 없으므로 설계조건에 대한 세밀한 검토가 요구된다.

본 연구에서는 인터모달 전용 터미널 내 새롭게 도입되는 플랫폼 구조물에 대해 온도하중에 대한 영향을 저감하기 위한 적정 신축이음 간격을 선정하여 보았다.

인터모달 터미널 내 플랫폼은 도로와 철도간 운송수단의

* Corresponding author:

Tel: +82-31-420-7327; E-mail: kyoungsu1205@pec.kr

Received June 17 2019; Revised July 3 2019;

Accepted July 4 2019

©2019 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.

전환(modal shift)이 이루어지는 핵심 대형 구조시설물로 온도변화에 의해 발생하는 수평변위를 적절히 제어하여 내구성 확보할 필요성이 있다.

구조물은 온도하중에 의해 수축·팽창 거동을 하고 이에 따라 수평변위가 발생하는데, 이러한 수평변위는 기초와 상부구조물의 변위차를 유발하여 구조물의 수명 저하의 원인이 될 수 있다. 특히, 구조물의 규모가 커지게 되면 온도변화에 따른 구조물 체적변화의 영향을 최소화하기 위한 신축이음부의 설치가 필수적이다.

현재 국내 건축 구조물의 신축이음 간격은 미국의 F.C.C 제안식을 적용하여 산정하고 있다. 이 제안식은 구조물의 규모를 고려하지 않고 설계 온도변화를 주요 입력변수로 사용하여 최대 신축이음 간격을 결정하도록 함에 따라 인터모달 터미널 내 플랫폼 구조물의 신축이음간격 산정에 적용 타당한지에 대한 검토가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 인터모달 터미널 내 플랫폼의 적정 신축이음 간격을 설정하기 위해서 F.C.C 제안식을 통해 산정되는 최대 신축이음 간격과 수평변위량 검토를 실시하여 F.C.C 제안식의 적용성을 확인하고자 한다.

1.2 연구 동향

Lee(2010)은 “신축이음부 구조물의 해석방법에 관한 연구”에서 구조물의 신축이음부 해석기법(5가지 해석모델)에 따른 구조물의 거동 비교분석을 통해 신축이음부를 갖는 구조물의 수치해석 시 모델링 기법 및 합당한 해석모델을 제시하고 있다.

Ki(2012)는 “지하박스 구조물의 온도변화 및 건조수축으로 인한 신축이음길이 산정에 대한 연구”를 통해 지하박스 구조물의 기상조건에 따른 콘크리트 내 온도분포를 분석하여 연중 온도변화, 콘크리트 박스의 내·외부 온도차 및 건조수축에 의한 구조물의 신축거동에 대한 응력해석을 수행하여 구조적인 안정성 확보 및 지하박스 구조물에서 허용할 수 있는 신축이음 길이의 한계를 제시하였다.

Anjana와 Ananya(2016)은 “Seismic analysis of expansion gap for multistoried buildings”에서 건물이 지진으로 인해 여러 부분에서 발생할 수 있는 스트레스를 견디기 위한 요소를 분석하고 고층건물의 신축이음 영향 분석 및 적정 신축이음 간격을 검토하였다.

2. 연구 방향설정

본 연구에서 국내 건축구조물의 신축이음 간격 선정에 적용하는 미국 F.C.C 제안식의 적용성을 검토하고 이를 통하여 인터

모달 전용 터미널 내 플랫폼 구조물의 적정 신축이음 간격 검토하고자 한다.

이를 위해 인터모달 자동화물 운송시스템의 하중조건을 반영하여 분석대상이 되는 플랫폼의 규모를 결정하였다.

미국 F.C.C. 제안식을 활용하여 부산, 광양, 평택지역에 대해 온도변화에 따른 최대 신축이음 간격을 산정하였다. 신축이음 간격에 따라 발생하는 수평변위 변화를 검토하기 위하여 지역별 최대 신축이음 간격을 기준으로 10m 단위로 구조해석을 실시하였다. 신축이음 간격의 적정성은 신축이음 간격별 발생하는 수평변위 값과 건축구조물의 사용성을 고려한 수평변위 제한값의 비교를 통해 기준 만족 여부를 검토하여 판단하였다.

Fig. 1 Research flow

2.1 F.C.C. 제안식

본 연구는 분석대상의 신축이음 간격을 미국 F.C.C. (federal construction council, 1974)에서 제안한 식으로 산정하였으며, 다음과 같은 구조물의 특성을 고려하였다.

- (1) 건물이 난방구조물이고 기둥하부의 접합상태가 핀(Pin)일 때는 제안된 허용길이를 사용할 것.
- (2) 건물이 난방구조물일 뿐만 아니라 공기제어가 가능하다면, 허용길이를 15% 증가시킬 것(단, 이 경우 공기 제어시스템이 항상 작동하고 있어야 한다.).
- (3) 건물이 비난방구조물인 경우에는 허용길이를 33% 감소시킬 것.
- (4) 건물의 기둥하부의 접합상태가 고정(fix)일 때는 허용길이를 15% 감소시킬 것.
- (5) 건물이 평면치수들 중 어느 한 면에 대하여 횡변위에

대한 강성이 두드러지게 클 경우에는 허용길이를 25% 감소시킬 것.

F.C.C.에서 제안한 식과 계수는 다음과 같다.

$$\Delta T = \max(T_w - T_{m,\min}, T_{m,\max} - T_c) \quad (1)$$

ΔT = 설계온도변화

T_w = 연중 최고기온

$T_{m,\min}$ = 연평균 최저기온

$T_{m,\max}$ = 연평균 최고기온

T_c = 연중 최저기온

$$L_{allow} = L_{form} - (L_{form} - L_{material}) \times \frac{\Delta T - 15}{40 - 15} \quad (2)$$

L_{allow} = 플랫폼 최대 허용길이

L_{form} = 건물형태 별 허용 건물길이

$L_{material}$ = 건물재질 별 허용 건물길이

ΔT = 외기온도 연중 최대 변화량

$$L_{e,j} = L_{allow} \times (1.0 + M1 + M2) \quad (3)$$

$L_{e,j}$ = 최대 신축이음 간격

$M1$ = 보정계수

$M2$ = 보정계수

Table 1 Suggestion coefficient of F.C.C.

Category	Mark	Value
Plane configuration factor	L_{form}	180.0m
Material factor	$L_{material}$	105.0m
Modification factor	M1	-0.33(-33%)
	M2	-0.15(-15%)

Fig. 2 Maximum allowable building length without expansion joints for various design temperature changes

F.C.C. 제안식에서는 외기온도 연중 최대변화량을 적용함으로써 최대 신축이음 간격을 산정할 수 있으며, Fig. 2는 설계온도변화에 따른 허용건물길이를 제안하고 있다.

2.2 수평변위 제한값

Fig. 3 Concept map of lateral deformation in structure

Fig. 4 Spacing between building and building

수평변위 제한값은 구조부재에 발생하는 변위에 대해 사용성 확보를 위한 최대허용 수평변위로, 통상적으로 $H/250 \sim H/1000$ 을 사용한다. 캐나다 기준인 NBC(2010)에서는 내부 칸막이벽이 이동하여도 피해가 발생하지 않는다면 최대 수평변위의 한계는 $H/250 \sim H/1,000$ 으로 할 수 있고, 세밀한 해석이 수행되지 않았다면 $H/500$ 으로 할 수 있다고 언급하고 있다.

부재의 사용하중 조합에 의한 수평변위는 인접 건축물과 충돌을 유발하지 않도록 해야 하며 설계기준에 제시된 수평변위 제한값을 초과해서는 안 된다.

건축구조기준에서는 명확한 기준제시는 없으나 통상적으로 'H/500'을 사용하므로 본 연구에서도 'H/500'을 수평변위 검토기준으로 설정하였으며, 적정 신축이음 간격 검토를 위해 F.C.C. 제안식을 통해 산정한 신축이음 간격의 최대 변위량과 수평변위 제한값을 구조해석을 통해 비교하였다.

3. 온도하중에 따른 신축이음 적정성 검토

3.1 분석대상 설정

본 연구의 인터모달 자동화물 운송시스템의 하중조건을 반영하여 분석대상이 되는 플랫폼의 규모를 결정하였다. 플랫폼 규모는 2016년 6월에 제정된 건설기준코드(KDS)와 철도 기준을 준용하고, 부재설계는 극한강도설계법(U.S.D.)를 적용하였다.

플랫폼의 크기는 166.4m×108.6m 크기이며, 슬래브의 두께는 250mm, 층고(H)는 7.8m로 계획하였다.

Fig. 5 Layout of inter-modal terminal

Fig. 6 Drawing of inter-modal terminal platform

3.2 F.C.C. 제안식을 적용한 최대 신축이음 간격 산정

물류지지가 있는 세 지역(부산, 광양, 평택)을 선정하여 2.1장에서 언급한 F.C.C. 제안식을 적용함으로써 최대 신축이음 간격을 산정하였다.

최대 신축이음 간격을 도출하기 위해서는 외기온도 연중 최대

변화량을 산정하고 최대 신축이음 간격을 산출하였다.

외기온도 연중 최대변화량 산정을 위한 자료는 기상청의 기후 자료를 적용하였으며, 1900년부터 2019년까지 측정된 기후 자료를 적용하였다. 외기온도 연중 최대변화량 산정식 (1)을 이용하여 산출한 값은 Table 2에 나타났다.

$$\Delta T = \max(T_w - T_{m,\min}, T_{m,\max} - T_c) \quad (1)$$

Table 2 Climatic material(1900~2019)

Category	Mark	Busan	Gwang-yang	Pyeong-taek
Average temperature for the year(maximum)	T _{m, max}	15.8℃	19.2℃	19.0℃
Average temperature for the year(minimum)	T _{m, min}	12.4℃	9.3℃	5.2℃
Maximum temperature for the year	T _w	37.3℃	37.1℃	37.8℃
Minimum temperature for the year	T _c	-14.0℃	-12.6℃	-23.9℃
Maximum temperature change	ΔT	29.8℃	31.8℃	42.9℃

Fig. 7 Maximum changes of temperature for the year

지역별 외기온도 연중 최대변화량을 비교했을 때, 부산은 29.8℃로 온도변화량이 가장 적었으며, 광양은 31.8℃, 평택은 42.9℃로 외기온도 최대변화량이 가장 큰 지역이다. 앞서 외기온도 연중 최대 변화량(ΔT)과 플랫폼의 평면형태, 골조 형식을 고려하여 플랫폼 최대 허용길이(L_{allow})를 구하고, 최대 허용길이에 보정계수를 곱하여 신축이음의 최대 설치간격을 산정한다.

$$L_{allow} = L_{form} - (L_{form} - L_{material}) \times \frac{\Delta T - 15}{40 - 15} \quad (2)$$

$$L_{e,j} = L_{allow} \times (1.0 + M1 + M2) \quad (3)$$

지역별 최대 신축이음 간격은 Table 3과 같으며, 부산은 70m, 광양은 67m, 평택은 50m로 산출되었다.

Table 3 Maximum allowed length and maximum expansion joint spacing of platform for each city

Category	Busan	Gwangyang	Pyeongtaek
Maximum installation spacing(m)	70.5	67.4	50.1
Application value(m)	70	67	50

3.3 구조해석 부재 설정

F.C.C.를 통해 산정한 신축이음 간격의 적정성 검토를 위해, 구조해석 프로그램을 사용하여 지역별 신축이음 간격의 최대 변위량을 검토하였다. 구조해석은 일반구조물 범용 3차원 해석 프로그램인 'Midas Gen'을 사용하였으며, 구조물 재료로 철근 콘크리트를 사용하고 기준은 KCI-2012를 적용하였다. 콘크리트 재료의 물성치는 Table 4와 같다.

Table 4 Material property of concrete

Material strength	$f_{ck}=24\text{N/m}^2$
Coefficient of linear expansion	$1.00\times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Modulus of elasticity	$2.5791\times 10^7\text{kN/m}^2$

해석시 적용된 구조물은 슬래브, 보, 기둥으로 구성되고 슬래브 두께는 250mm(plate 요소), 보 단면은 600~800mm×1100mm(general beam 요소), 기둥 단면은 800mm×800mm(general beam 요소)로 입력하였다. 온도하중은 Midas Gen에 내장된 온도변화 하중해석(system temperature) 기능을 사용하였고, 초기온도에서 나중온도로 구조물 전체가 균등하게 온도가 변하는 것으로 가정하여 구조적 거동을 분석하였다. 온도변화 하중해석에 적용된 열변형률 식은 다음과 같다.

$$\epsilon_t = \alpha (T_2 - T_1) \quad (4)$$

ϵ_t = 열 변형률

α = 선팽창계수

T_1 = 구조물의 초기온도

T_2 = 구조물의 나중온도

구조해석 시 구조물의 지점(기둥하단)은 X, Y, Z 각 방향으로 이동은 불가하고 회전은 가능한 회전단을 적용하여 '최상단과 최하단(수평변위)' 간의 수평변위차에 의한 기둥 변형각도 함께 검토하였다.

Fig. 8과 같은 모형으로 지역별 최대 신축이음 간격을 기준으로 10m 단위로 구조해석을 하였으며, 구조해석에 사용된 지역별 부재는 Table 5에 제시하였다.

Fig. 8 Segmentalized plane

Table 5 Unit area by city

City	B×L
Busan	60m×70m
	70m×70m
	80m×70m
Gwangyang	57m×67m
	67m×67m
	77m×67m
Pyeongtaek	40m×50m
	50m×50m
	60m×50m

3.4 최대 신축이음 간격별 최대 변위량 검토

F.C.C. 제안식을 통해 산정된 신축이음 간격별 최대 변위량을 검토하기 위한 기준은 수평변위 제한값이며, 수평변위 제한값은 아래 그림과 같이 본 구조물의 층고가 7.8m이므로 15.6mm라는 것을 알 수 있다.

구조해석을 통해 도출된 신축이음 간격별 최대 변위량과 수평변위 제한값의 비교결과는 Table 5에 제시하였으며, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에 도식화하였다.

부재 크기 변화에 따른 수평변위 발생량의 차이는 부산에서 2.2, 광양은 2.3, 평택은 3.6으로 차이가 났으며, 부재 크기가 커질수록 수평변위 발생은 온도변화가 큰 곳에서 더 크게 변하는 것을 확인할 수 있다.

또한, F.C.C. 제안식으로 산출한 지역별 신축이음 간격은 수평변위 최대 허용치를 나타내고 있으며, 부산 70m, 광양 67m, 평택 50m가 적정 신축이음 간격으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 6 Comparison between maximum displacement and limitation of lateral deformation

City	B×L	Maximum displacement	Analysis result
Busan	60m×70m	13.9	O.K
	70m×70m	14.9	O.K
	80m×70m	16.0	N.G
Gwangyang	57m×67m	13.4	O.K
	67m×67m	14.5	O.K
	77m×67m	15.7	N.G
Pyeongtaek	40m×50m	13.8	O.K
	50m×50m	15.3	O.K
	60m×50m	17.4	N.G

Fig. 9 Maximum displacement in Busan **Fig. 10** Maximum displacement in Gwangyang **Fig. 11** Maximum displacement in Pyeongtaek

4. 결 론

본 연구에서는 신축이음 간격 선정에 적용하는 미국 F.C.C. 제안식의 적용성을 검토하고 이를 통해 인터모달 전용 터미널 내 플랫폼 구조물의 적정 신축이음 간격을 검토하고자 하였다.

F.C.C. 제안식을 통해 최대 신축이음 간격을 산출하고, 구조 해석 프로그램을 사용하여 신축이음 간격에 따라 발생하는 변위량을 분석하였다. 신축이음 간격의 적정성은 신축이음 간격별 발생하는 최대 변위량과 수평변위 제한값을 비교하여 판단하였다.

F.C.C. 제안식으로 산정된 지역별 최대 신축이음 간격은 부산 70m, 광양 67m, 평택 50m으로 산출되었다. 구조해석을 통해 산출된 변위량은 부재의 크기가 커질수록, 온도변화가 큰 지역일수록 발생량이 커진다는 것을 알 수 있었다. 또한, 최대 변위량이 수평변위 제한값 이하일 때 적절하다고 판단되는 기준을 통해 F.C.C. 제안식으로 산출된 신축이음 간격의 수평 변위량은 수평변위 제한값과 근사하고 기준을 만족하므로 합리적이라고 판단할 수 있다.

본 연구에서 F.C.C. 제안식으로 산정한 최대 신축이음 간격의 변위량은 수평변위 제한값인 15.6mm 이하로 만족했으며, 이는 F.C.C. 제안식을 통해 산출한 신축이음 간격이 인터모달 터미널 플랫폼에 적용 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(18TLRP-B134 108-02)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Anjana, C. J., Ananya, J. (2016) Seismic Anlalysis of Expansion Gap for Multistoried Buildings, *Int. Res. J. Eng. & Technol.*, 3(9), pp.1031~1033.
- Federal Construction Council (1974) Expansion Joints in Buildings : Technical Report No.65, p.49.
- Ki, J.H. (2012) The Study on The Length of Expansion Joint of Temperature Change and Shrinkage for Underground BOX-Type Structures, Master Thesis, University of Hanyang, p.69.
- Lee, J.H. (2010) A Study on Analysis method of Structure with Expansion Joint, Master Thesis, University of Dongyang, p.52.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) Structural Standard of Buildings.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport

(2018) Concrete Structural Standard of Buildings.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport

(2019) Design Loading of Structural Design Standard.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport

(2019) Foundation Structural Standard of Buildings.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport

(2019) Semis Design Code of Buildings.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport

(2019) Steel Structural Standard of Buildings.

National Research Council Canada (2010) User's Guide-NBC 2010 Structure Commentaries (Part 4 of Division B), NBC 2010.

요 지

본 연구에서는 국내에 새롭게 도입하고자 하는 인터모달 자동화물운송 시스템을 구현하기 위한 터미널 플랫폼 시설의 온도하중에 따른 적정 신축이음 간격을 살펴보았다. 터미널 플랫폼의 적정 신축이음 간격 검토는 미국 F.C.C.(federal construction council)에서 제안한 식을 이용하여 지역별 온도변화에 따른 최대 신축이음 간격을 설정하고, 구조해석 프로그램을 통해서 산출된 최대 변위값과 건축구조 수평변위 제한값을 비교하였다. 적정 신축이음 간격은 온도변화로 인한 구조물 최대 변위량이 수평변위 제한값 이하가 되는 슬래브 길이로 선정하였으며, F.C.C 제안식을 통하여 산정한 지역별 최대 신축이음 간격을 적용하여 구조물 최대 발생 변위를 살펴본 결과, 건축구조 수평변위 제한값 이내에서 발생될 수 있는 최대변위 값을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 인터모달 터미널, 플랫폼, 온도하중, 신축이음