

고속철도 콘크리트 궤도 매립전 내 침투수의 결빙압에 의한 균열손상해석

Finite Element Analysis of Concrete Railway Sleeper Damaged by Freezing Force of Water Penetrated into the Inserts

문도영¹ · 지광습[†] · 김진균² · 장승엽³

Do Young Moon · Goangseup Zi · Jin Gyun Kim · Seung Yup Jang

Abstract Finite element analysis was undertaken to investigate the effect of freezing force of water unexpectedly penetrated into inserts used in railway sleeper on pullout capacity of anchor bolts for fixing base-plate onto concrete sleeper. Based on the in-situ investigation and measurement of geometry of railway sleeper and rail-fastener, the railway sleeper was modeled by 3D solid elements. Nonlinear and fracture properties for the finite element model were assumed according to CEB-FIP 1990 model code. And the pullout maximum load of anchor bolt obtained from the model developed was compared with experimental pullout maximum load presented by KRRI for verification of the model. Using this model, the effect of position of anchor bolt, amount of fastening force applied to the anchor bolt, and compressive strength of concrete on pull-out capacity of anchor bolts installed in railway sleeper was investigated. As a result, it is found that concrete railway sleepers could be damaged by the pressure due to freezing of water penetrated into inserts. And the pullout capacity of anchor bolt close to center of railway is slightly greater than that of the others.

Keywords : Concrete railway sleeper, Freezing force, Finite element analysis

초 록 본 연구에서는 콘크리트 궤도 침목 내에 설치되는 인서트에 예기치 못하게 침투된 수분의 결빙압이 앵커볼트의 인발강도에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 고찰하였다. 3차원 유한요소해석모델은 콘크리트 침목의 현장실험 결과, 도면 및 레일체결장치의 제원 실측치를 기반으로 수립되었으며, 비선형구성방식과 파괴 모델은 측정된 압축강도로부터 CEB-FIP 1990 모델코드를 이용하여 추정하였다. 해석모델의 적정성은 철도기술 연구원에서 수행한 현장 인발시험 결과 및 실내시험 결과와의 비교를 통해 확인하였다. 다양한 인자, 즉 결빙위치, 앵커볼트 초기 체결력의 크기 및 콘크리트 압축강도에 따른 해석을 수행하였으며, 그 결과를 제시하였다. 해석결과에 의하면, 매립전내 침투수의 결빙력은 균열손상의 가장 가능성 있는 직접적인 원인 중 하나로 간주될 수 있음을 확인하였다. 또한, 외측매립전의 결빙력이 내측 매립전 보다 작은 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않았다.

주요어 : 콘크리트 궤도, 결빙력, 유한요소해석

1. 서 론

콘크리트 궤도는 기존 자갈도상궤도의 과대한 보선작업[1]과 그로 인한 유지관리비용의 증대 등과 같은 문제를 해결함으로써, 성역화(省力化)를 가능케 하는 신형식 궤도로서 일본과 독일 등 철도 선진국으로부터 각광받고 있는 궤도 형식이다[2]. 국내에서는 경부 고속철도 2단계 사업구간에 이와 같은 콘크리트 궤도를 시공한 바 있으며, 호남고속철도 및 도심지 철도와 경량전철 구간 등에도 그 사용이 획기적으로 증가될 것으로 기대된다.

경부고속철도 2단계 대구-부산 구간에 시공되고 있는 콘크리트 궤도는 레다(RHEDA)2000으로써, Pandrol SFC system과 Vossloh system 300-1로 구분된다. 경부고속철도 2단계 구간에는 Pandrol SFC system을 사용하였으며, 상세 구성은 Fig. 1과 같다. 베이스 플레이트는 두개의 앵커볼트에 의하여 침목에 고정되며, Fig. 2와 같이 고정력의 확보를 위해 플라스틱 매립전, 너트와 와셔 등 부속물이 설치된다. 이때, 플라스틱 매립전은 앵커볼트의 설치 및 체결을 위한 공간확보를 위하여 설치되기 때문에 매립전 내에는 구조적으로 불필요한 공간의 발생이 불가피하다. 물론 빈 공간은 시공품질의 확보를 위하여 채적변화가 거의 없는 그리스나 폴리에틸렌 폼 등의 재료로 채우도록 규정하고 있다.

2009년 초 경부고속철도 2단계구간인 대구-부산 구간에 기부설된 콘크리트침목 상부 표면에 균열손상이 발견되었으며, 대한토목학회에서는 원인규명을 위한 조사위원회를 구성하

[†]교신저자 : 고려대학교 건축사회환경공학부
E-mail : g-zi@korea.ac.kr

¹경성대학교 토목공학과

²고려대학교 건축사회환경공학부

³한국철도기술연구원 미래전략연구센터

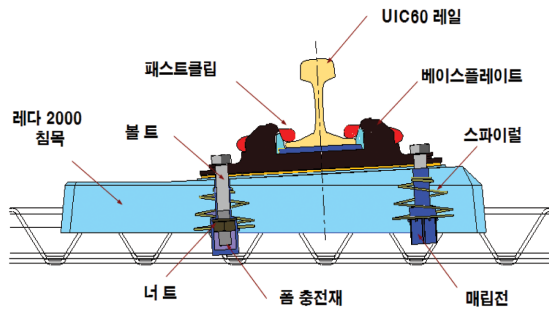


Fig. 1 Pandrol SFC system

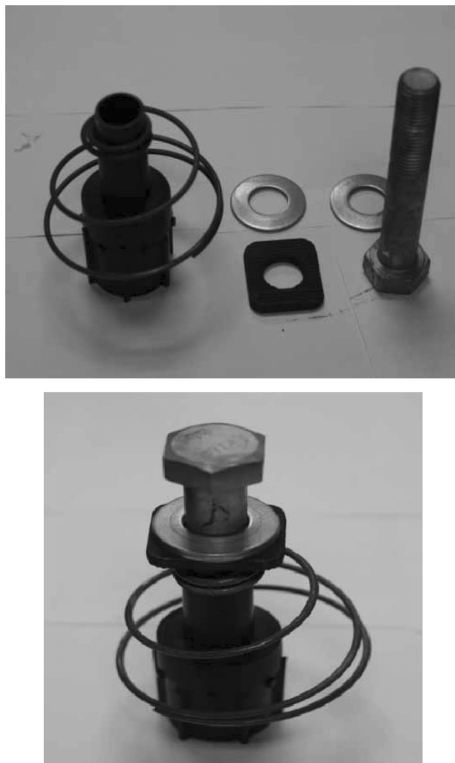


Fig. 2 Bolt, nut and an insert

여 그 원인을 조사, 분석하였다. 조사위원회는 매립전 내에 규정된 방수재료가 아닌 흡수재의 시공으로 인해 물이 침투되었으며, 침투된 물의 결빙은 콘크리트 침목의 균열손상 발생의 주요한 원인이 될 수 있다고 보고하였다[3]. 한편, Vidovskii[4]의 실험결과에 의하면 폐쇄된 공간에서 물의 결빙에 의한 팽창압은 90MPa에 이르는 것으로 보고하고 있다. 따라서, 이와 같은 실험결과에 의해서도, 매립전 내부에 침투수의 결빙압에 의한 침목의 균열손상 가능성은 충분하다고 판단된다.

본 논문에서는 매립전내 침투된 수분의 결빙압에 의한 앵커볼트의 인발거동과 인발력의 변화를 모사할 수 있는 3차원 유한요소모델을 제시하고, 철도기술연구원에서 수행한 실내 앵커볼트 인발실험 결과와 비교하여 검증하였다. 또한, 본 해석모델을 이용하여 결빙된 매립전의 위치, 초기 볼트 체결력의 크기 및 콘크리트 압축강도의 변화에 따른 거동 및

인발력 변화를 고찰하였다. 본 연구결과는 상기 고속철도 침목에 발생한 균열손상의 발생 매커니즘을 이해하고, 다양한 인자에 대한 변수해석결과를 제시함으로써, 향후 궤도구조의 유지관리를 위한 기초자료를 제공한다는 측면에서 그 의미가 있다. 2장에서는 유한요소해석모델에 적용된 콘크리트 모델 등 입력자료에 대하여 제시하였으며, 3장에서는 제시된 유한요소해석 모델의 결과를 실험결과와 비교, 검증하였으며, 4장에서는 다양한 인자에 대한 영향을 고찰하였다. 마지막으로 5장에서 본 해석을 통해 획득한 결론을 제시하였다.

2. 유한요소해석모델

2.1 하중전달 경로 및 볼트의 역할

레다 2000 궤도 시스템은 콘크리트에 매립된 침목의 형태로써, 침목이 현장 타설 콘크리트 슬래브에 매립되어 일체화된다. 따라서 레일에 직접적으로 작용하는 하중인 수직력(운하중 등), 횡방향력(원심력 등)과 종방향력(제동하중 등)은 강력한 체결력에 의하여 결합된 레다 2000 침목에 전달되어야 한다. 이때, 레일시스템(레일체결장치와 베이스플레이트 등)과 침목간의 체결력은 두 개의 볼트에 의하여 발휘된다. Fig. 2와 같이 볼트는 매립전 내의 너트와 체결된다. 따라서 매립전의 튜브부분과 볼트의 몸통부분은 접촉되어 있지 않은 상태이다. 따라서, 플라스틱 매립전과 볼트사이의 마찰에 의한 저항은 없는 것으로 간주할 수 있으며, 유한요소 모델시 이를 고려하였다. 볼트의 체결은 토크렌치를 이용하여 도입되며, 도면에 제시된 볼트의 회전우력은 300MNm이다. 이에 해당하는 앵커볼트의 초기 체결력은 65kN으로 산정된다[5]. 볼트에 도입되는 체결력으로 인해 매립전 상부의 콘크리트에 일종의 프리스트레스가 도입되어 볼트와 침목이 일체로 거동하게 된다.

2.2 하중전달 경로 및 볼트의 역할

2.2.1 유한요소망

본 해석은 ABAQUS 버전 6.5[6]를 사용하여 해석하였다. 해석을 위한 유한요소망은 Figs. 3 및 4와 같다. 모든 요소는 3차원 사면체 요소를 사용하여 모델링 하였으며, 중앙대칭조건을 고려하여 절반 만을 구현하여 매립전 주변의 침목 손상과 변형을 보다 명확하게 확인하도록 하였다. 또한 이론적으로 예견할 수 있는 균열면 해석의 정확성을 높이기 위해 예상되는 균열면 주변을 보다 정밀하게 구축하였다. 균열 형성이 예상되는 영역의 요소 크기는 동일한 파괴에너지를 구현하기 위해 일정한 특성길이를 가지도록 요소망을 구성했다.

2.2.2 물성치

본 해석에서 고려한 콘크리트의 물성치는 콘크리트 압축강도(f_{cu}), 인장강도(f_t), 파괴에너지(G_f), 점성균열모델이다. 콘크리트 압축강도는 기본적으로 콘크리트의 강도를 의미하며, 설계 시 주요변수로 사용되는 기본적인 물성치이다. 따라서 콘크리트 압축강도는 철도침목 균열손상 요인을 분석하기 위

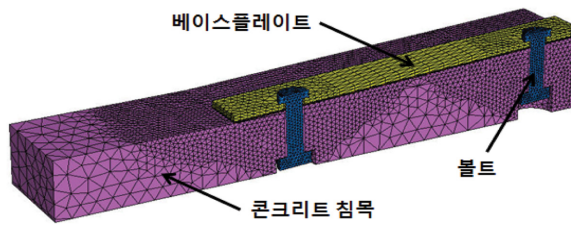


Fig. 3 Finite element mesh for analysis of the railway sleeper

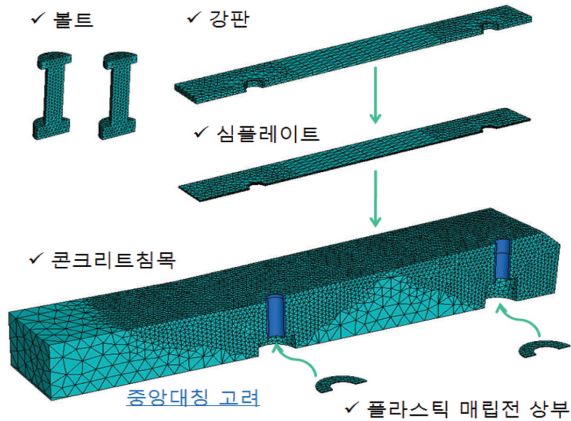


Fig. 4 Details of the mesh model

해 가장 먼저 고려해야 할 요소이다. 콘크리트 침목에 사용된 콘크리트의 설계 압축강도(f_{ck})는 50MPa이며, 실제 압축강도(f_{cu})는 현장 측정결과 평균 68MPa인 것으로 조사되었다. 본 해석은 설계 단계의 해석이 아니며 실제 구조물의 거동을 분석하기 위함이므로 실제 압축강도를 사용해서 타 물성치를 추정하였다. 이외에도 현장 콘크리트 압축강도의 불확실성을 고려하여 Table 1과 같이 4가지 서로 다른 압축강도도 역시 해석에 포함해서 분석을 수행하였다.

콘크리트의 인장강도는 CEB-FIP 1990모델코드[7]에 제시된 식(1)로부터 결정하였다.

$$f_t = f_{ctko,m} \left(\frac{f_{cu}}{f_{cko}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

여기서 $f_{ctko,m}$ 은 1.40MPa, f_{cko} 는 10MPa이며 앞서 언급하였듯이 f_{cu} 는 Table 1의 압축강도(최대 68MPa)를 사용하였다. 계

산된 인장강도(f_t)는 압축강도 68MPa인 경우 5.02MPa이다. 이 수치의 적합성은 후술할 현장 앵커볼트의 인발시험 결과와의 상호비교를 통해 확인하였다.

파괴에너지는 균열 성장 시 단위 균열면에서 소산되는 에너지를 의미하며 매우 중요한 재료 물성치이다. CEB-FIP 1990 모델코드에서 제시한 콘크리트 파괴 에너지(G_f)는 식 (2)와 같다.

$$G_f = G_{F0} \left(\frac{f_{cu}}{f_{cmo}} \right)^{0.7} \quad (2)$$

여기서, G_{F0} 는 파괴에너지의 기본값, f_{cu} 는 콘크리트 압축강도 평균값, f_{cmo} 는 콘크리트 압축강도의 기본값을 의미한다. 이때 f_{cmo} 는 10MPa를 사용하며, 파괴에너지의 기본값(G_{F0})은 골재크기에 따라 제시되어 있는데, 대상 침목의 굵은 골재크기는 11~19mm 범위에 있으므로 평균 16mm에 해당하는 골재크기에 따른 파괴 에너지 기본값(G_{F0})으로 0.030Nmm/mm²을 사용하였다.

강재는 요소망의 볼트와 베이스 플레이트를 구성한다. 이때 강재는 선형탄성거동을 한다고 가정하였으며, 탄성계수 200GPa, 포아송비 0.3을 사용하였다. 또한, 침목을 구성하는 재료는 강재와 콘크리트를 제외하고 플라스틱과 고무가 있다. 이때 두 재료는 강재와 마찬가지로 선형탄성거동으로 가정하였으며, 두 재료의 경우 강재와 콘크리트에 비해 재료의 탄성계수가 상대적으로 매우 작기 때문에 동일한 물성치로 가정하여 탄성계수 1GPa, 포아송비 0.3을 사용하였다.

2.2.3 점성균열모델

파괴가 실제 진행되는 영역 내에서는 재료의 분리가 발생한다. 이 영역은 파괴진행영역(failure process zone; FPZ)으로 통칭된다. FPZ의 크기는 재료의 점근적 물성치로 알려져 있다[8]. 콘크리트의 경우 FPZ의 크기는 약 10cm에서 30cm에 이르며 폴리아짐콘크리트의 경우는 50cm 이상까지도 보고되고 있다[9]. 간편한 선형탄성파괴역학을 사용하기 위해서는 FPZ의 크기가 대상 영역의 크기와 비교해서 상대적으로 작아야 하나, 본 대상침목의 높이는 약 130mm로서 FPZ의 크기가 침목과 비교해 약 40%에 해당되므로 선형탄성 파괴역학을 사용하는 것은 적절하지 않으며 결과분석에 큰 오차를 도입할 소지가 있다.

이를 극복하기 위해 개발된 모델로서 점성균열모델(cohesive

Table 1 Material properties

Materials	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Fracture energy
Concrete	31.3	0.18	4.10	50	0.0926
	32.5		4.41	56	0.1002
	33.6		4.72	62	0.1076
	34.7		5.02	68	0.1148
Steel	200.0	0.30	-	-	
Rubber	1.0	0.30	-	-	
Plastic	1.0	0.30	-	-	

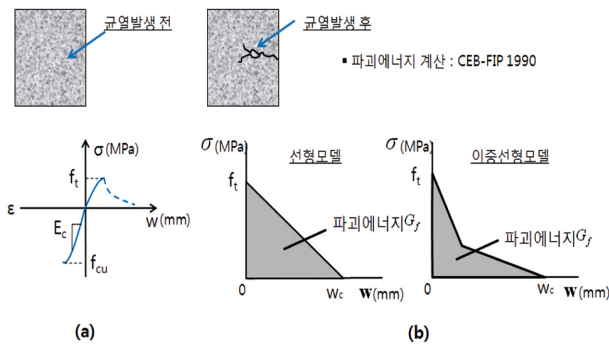


Fig. 5 Nonlinear material property for concrete element

crack model)이 있다[10-12 등]. 이 모델에서는 균열면이 형성됨에 따라 균열면에 작용하고 있는 응력이 재료의 인장강도에서부터 균열면의 상호 이격량이 증가함에 따라 점진적으로 감소하여 종국적으로는 0이 된다. 즉 물리적인 균열은 작용응력이 0으로 감소되는 균열 열림 또는 이격량 이후의 균열을 대상으로 한다. Fig. 5(b)의 점성 균열모델의 면적은 소산된 파괴에너지 G_f 와 같다.

균열 열림량과 작용응력 사이의 관계를 기술하기 위해 선형, 이중선형, 지수함수형 등 다양한 모델이 개발되었다. 이중 콘크리트에는 선형과 이중선형 두 가지 모델이 빈번하게 사용되며 CEB-FIP 1990 모델 기준에서도 이를 추천하고 있다.

균열이 발생하기 전에는 Fig. 5(a)의 실선으로 표시된 비선형 연속체의 구성방정식으로 콘크리트의 거동이 묘사된다. 이때 인장응력이 인장강도와 같아지면 균열이 도입되어 Fig. 5(b)와 같은 점성균열모델이 사용된다. 그러나 이 경우 유한요소망에 불연속성을 도입해야 하기 때문에 ABAQUS에서는 crack band 기법에 입각하여 요소의 크기와 점성균열을 내부에서 자동으로 처리해서 Fig. 5(a)의 점선으로 표시된 인장강도 도달 후의 거동을 결정한다. 즉, Fig. 5(a)의 인장부와 변형률 축간의 면적을 요소의 크기와 곱하면 파괴에너지 G_f 와 같다. 하지만 최근 개발된 확장유한요소법[11-16]이나 확장무요소법[12,17,18]을 사용할 경우 불연속성을 직접적으로 처리가 가능하나 아직 상용 프로그램에는 도입이 되지 않은 상태이다.

본 해석에서는 Fig. 5(b)의 이중선형모델을 사용하였다. 이때, 이중선형모델의 균열열림량 w_c 와 변곡점에 해당하는 w_1 은 식 (3)과 식 (4)를 통하여 계산하였다.

$$w_c = \alpha_f \frac{G_f}{f_{ctm}} \quad (3)$$

$$w_1 = 2 \frac{G_f}{f_{ctm}} - 0.15 w_c \quad (4)$$

여기서, 최대골재크기와 관련된 계수인 α_f 는 모델에 제시된 7을 사용하였으며, 파괴에너지와 인장강도는 각각 앞서 계산한 값 0.115 Nmm/mm^2 , 5.02 MPa 를 사용하였다. 따라서 w_c 와 w_1 은 각각 0.160 mm 과 0.02 mm 가 된다.

2.2.4 구속조건

침목에 배치되는 보강근(reinforcement)은 매립전 주변의 스파이럴(spiral) 철근, 침목을 슬래브에 고정시키기 위한 트러스철근, 그리고 이를 거치 및 고정하는데 필요한 고정철근 등으로 구성된다. 첫번째로 트러스철근은 콘크리트 슬래브와 침목을 연결하며, 침목을 슬래브에 고정시키는 역할을 한다. 4가닥의 철근이 침목과 슬래브를 연결하고 있으므로, 침목 바닥의 변위는 슬래브에 의해서 완전히 구속되는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 해석모델 구축 시 이를 고려하여 Fig. 6과 같이 침목 바닥면의 변위를 구속하였다. 두 번째로 매립전 주변에 배치되는 스파이럴 철근은 상부에서 하부로 갈수록 반경이 커지는 형태를 가지며 따라서 인발력에 의한 콘형태의 파괴에 다웰(dowel effect)거동을 통해 일부 대응할 수도 있을 것으로 생각될 수도 있지만 파괴면을 조사한 결과 파괴면과 스파이럴 철근이 단순히 일회 교차하고 있기 때문에 인발에 대한 저항력은 거의 없을 것으로 판단되어 본 해석모델에서는 제외하였다.

또한, 구성요소간에는 강결(tie) 방식과 접촉(contact) 방식을 이용하였다. 본 요소망은 Fig. 4와 같이 심플레이트, 강판, 볼트, 플라스틱 매립전, 그리고 콘크리트 침목으로 구성되어 있다. 이 중 심플레이트와 강판은 베이스 플레이트로 거동하고, 볼트와 플라스틱 매립전 역시 일체로 거동한다고 가정하였다. 따라서 이러한 경우 이격(separation)과 관입(penetration)을 허용하지 않는 강결 방식으로 결합하였으며, 추가적으로 볼트와 구조물의 접촉부인 볼트상단 하면과 강판, 볼트하단 상면과 콘크리트 침목 역시 강결 방식으로 결합하였다. 이와는 다르게 같은 접촉부를 공유하지만 물성치와 거동양상이 매우 다를 것으로 예상되는 베이스 플레이트 하면과 침목상단은 이격을 허용하는 접촉(contact) 방식을 이용하여 구성요소의 거동에 대한 개별성을 확보하였다[6].

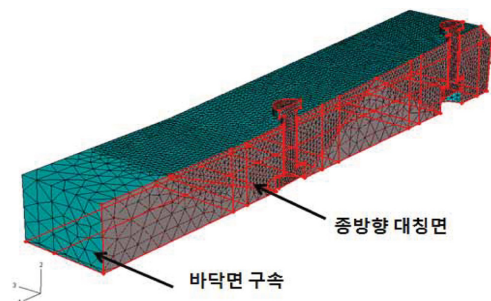


Fig. 6 Boundary conditions applied to finite element model

2.2.5 하중조건 및 해석문제 정의

실제 침목에 재하되는 하중은 앵커볼트 초기 체결력과 매립전 침투수의 결빙압으로 구분되며 요소망 구성에도 이와 동일한 하중을 고려하였다. 이때 체결력을 먼저 재하한 후 결빙압을 재하하는 순으로 하중을 도입하였다. 체결력은 볼트의 온도수축을 이용하여 프리스트레싱을 도입하는 방식으로 재하하였으며, 이후의 결빙압의 적용시에도 온도는 유지되는 것으로 모사하였다. 매립전 내부를 채우고 있는 물이

Table 2 Summary of variables for finite element analysis

	Fastening force applied to bolt(kN)	Compressive strength of concrete(MPa)	Freezing position
The effect of anchor bolt position	65	68	at internal anchor bolt
			at outer anchor bolt
			simultaneously
The effect of fastening force	33		simultaneously
	49		
	65		
	98		
	130		
The effect of compressive strength of concrete	65	50	simultaneously
		56	
		62	
		68	

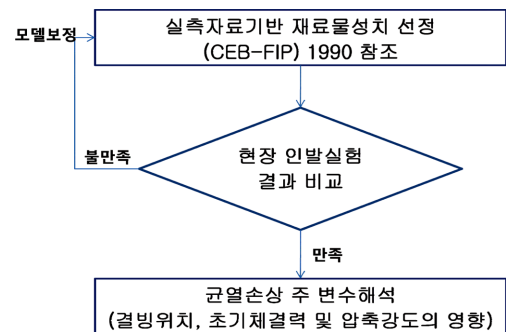
결빙함에 따라 압력이 생성되고 이 압력은 너트 하면을 상향으로 밀어 올리게 된다. 이 작용을 수치적으로 묘사하기 위해 두 가지 기법을 고려할 수 있다. 첫 번째는 너트 하면의 상향변위 제어 기법이며, 두 번째는 매립전 내부와 너트 하면에 균등한 평균압력이 작용한다고 가정하고 이 압력을 매개변수로 한 제어기법(arc-length control)이다.

제어 기법의 선정은 결빙조건이나 변형조건을 충분히 고려해서 선택해야 한다. 매립전 내부에서 발생하는 결빙작용은 동시에 이루어지는 것이 아니고 볼트와 너트 주변부터 액체상태와 고체상태가 뒤섞인 속칭 *mushy zone*을 형성하면서 변화한다. 즉 미리 형성된 얼음입자의 파괴팽창이 액체로 전달되면서 압력이 증가하는 방식이다. 따라서 너트 표면부터 순차적으로 형성된 얼음은 너트의 움직임을 제한하는 역할을 하므로 앞서 제시한 두 경우는 실제 상황의 상한 혹은 하한에 해당한다. 본 해석에서는 이를 비교하기 위하여 동일한 해석모델에 상기 두가지의 하중조건을 적용하여 해석을 수행하였으며, 그 결과를 비교, 분석하였다. 해석결과, 하중조건에 따른 해석결과의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 이후의 해석에서는 해석의 간편성과 수렴성을 고려하여 첫 번째 경우를 구현하였다. 본 논문에서 수행된 해석변수는 Table 2에 정리하였다.

3. 해석모델검증

3.1 검증절차 및 개요

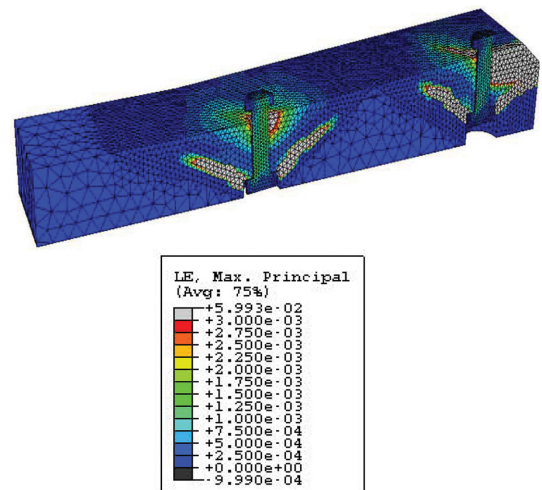
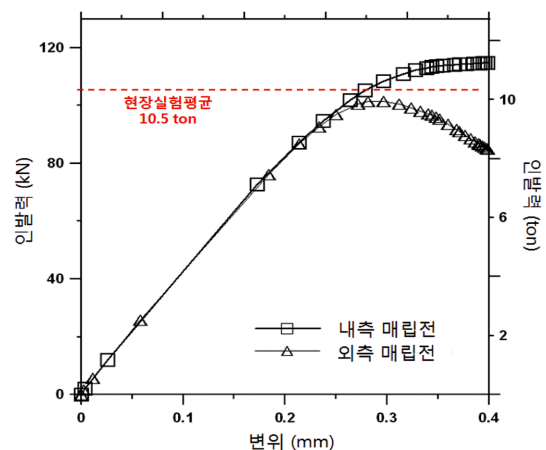
삼차원 해석 유한요소망을 구축한 후 해석 모델의 적정성을 검증하고 변수해석을 위해 Fig. 7과 같은 절차를 수행하였다. 먼저 실험자료를 기반으로 재료 물성치를 선정하였으며, 이를 현장 인발시험의 결과와 비교 검증하였다. 현장 인

**Fig. 7** Procedure for verification of for finite element model

발시험결과를 바탕으로 물성치 수정이나 요소망 재구축은 수행하지 않았음을 밝혀 둔다.

3.2 현장 인발시험 비교

본 해석을 통해 획득한 최대주변형률 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 제시된 그림은 내부 및 외부 매립전에서 동시에

**Fig. 8** A result of principal strain contours**Fig. 9** A comparison with a result of pullout test conducted by Korea Railroad Research Institute

결빙이 일어나는 해석경우의 결과이다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 파괴형상이 뚜렷하게 진행되는 것을 확인할 수 있다. 또한 내측볼트에 비해 외측볼트 주변부가 더 크게 파괴되는 것을 확인할 수 있다. 철도기술연구원에서 수행한 바 있는 현장 인발실험 결과로부터 획득한 앵커볼트의 인발력-수직 변위 결과는 Fig. 9에 제시하였으며, 본 해석의 결과와 비교하여 나타내었다. 현장실험은 전술한 바와 같이 철도기술연구원에서 수행하였으며, 지지점을 침묵상면에 두고 실험한 결과들의 평균치이다. 평균치는 그림과 같이 약 103kN이며 해석결과와 현장실험평균 최대인발력과 약 5%의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 본 해석모델과 사용된 비선형 재료모델의 적정성을 확인할 수 있다.

4. 결빙압에 의한 균열손상해석

4.1 균열손상 발생 매커니즘

Fig. 10은 Fig. 11의 결빙력-변위 그래프에 숫자 <1>, <2> 및 <3>으로 명기한 외측 매립전의 변위-결빙력 선도에 따른 각 단계별 균열양상을 도시한 것으로 초기 볼트체결력을 고려한 1 단계, 최대결빙력이 발생한 2 단계, 균열발생이후 3 단계로 구분하여 외측 매립전의 균열양상을 나타내고 있다. 그림과 같이 1 단계에서 미소한 인장 변형률이 침묵에 발생한 것을 확인할 수 있으며, 2 단계에서 최대 결빙력 발생 시 균열이 성장하는 것을 볼 수 있다. 그러나 급격한 균열성장은 초기균열 발생 후 최대 결빙력이 발생하는 변위 0.2mm 이후에 발생하는 것을 확인할 수 있으며 약 0.35mm 변위에서 원뿔 모양 파괴 형상이 상당부분 진척되어 있는 것을 확인할 수 있다.

4.2 파괴위치에 의한 영향

결빙이 내측매립전과 외측매립전에 동시에 발생할 경우와 독립적으로 발생하는 경우를 해석하였으며, 그 결과를 상호 비교하였다.

4.2.1 동시결빙시

Fig. 11은 내외측 매립전 동시결빙 시 내측과 외측 각각에서 발생하는 결빙력을 도시한 것이다. 내측 매립전의 최대 결빙력은 96kN으로 외측 매립전의 최대 결빙력 91kN에 비해 5%의 차이를 가진다. 이와 같은 차이는 매우 작은 것이기 때문에 침투수의 양 등 기초조건에 의한 영향이 더 클

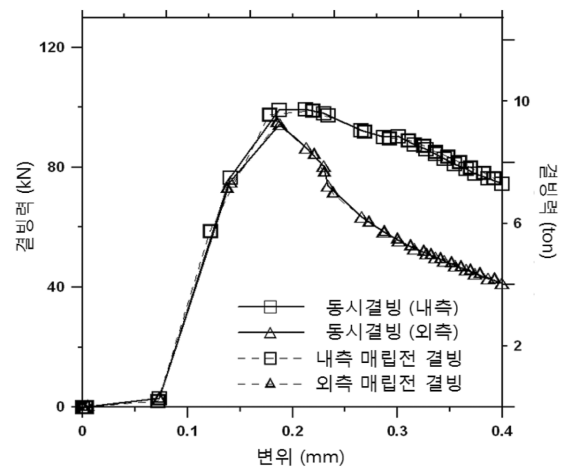


Fig. 11 Freezing force vs. displacement-the effect of anchor bolt position

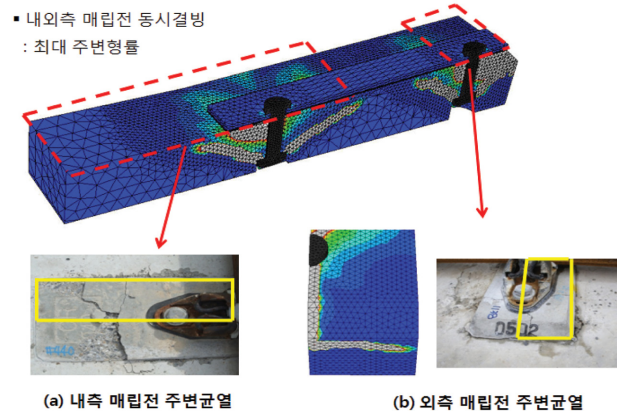


Fig. 12 A result of the maximum principal strain obtained from finite element analysis and crack pattern inspected

수 있음을 의미한다. 결과적으로 초기 볼트체결력과 베이스 플레이트를 고려할 경우 기존 현장 실험검증 모델에 비해 6.9kN 정도 최대결빙력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이와 같은 차이는 체결력에 의한 영향과 베이스 플레이트 등 추가적인 구속에 의해 발생하는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 12는 내외측 매립전이 동시에 결빙될 때, 해석의 주변형률 결과를 실제 현장균열양상과 비교한 것이다. 내측과 외측 매립전의 수치해석 균열이 현장균열과 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다.

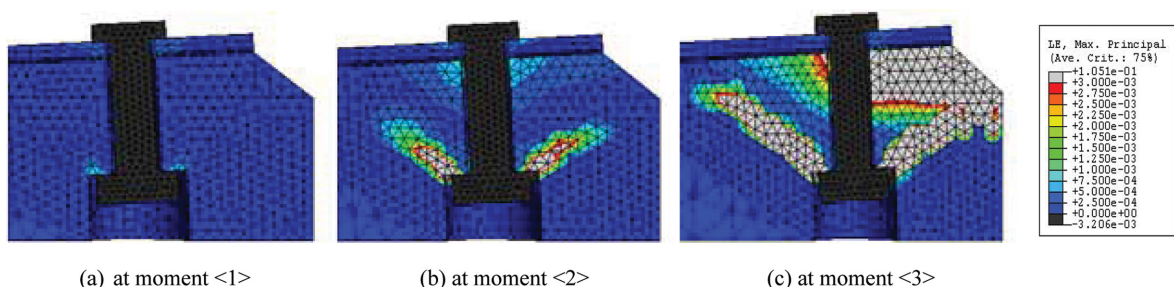


Fig. 10 Crack propagation in railway sleeper due to freezing force

4.2.2 내측 및 외측 개별 결빙시

Fig. 13과 Fig. 14는 내측과 외측 매립전을 개별적으로 결빙시켰을 경우에 발생하는 주변형률 결과를 나타내고있다. 주변형률 형상은 결빙에 의해 발생하는 내측과 외측 매립전의 균열이 각각 독립적으로 거동하여 서로의 거동에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 보여준다. 이는 Fig. 11의 개별결빙결과와 동시결빙결과와의 비교에서, 내외측 매립전 모두 동시 결빙하는 경우와 개별적으로 매립전이 결빙하는 경우 모두 거동이 거의 동일한 것을 통해서도 확인할 수 있다.

4.3 체결력에 의한 영향

Fig. 15는 초기 볼트 체결력에 따른 최대 결빙력 차이를 도시한 것으로 초기 볼트 체결력 증가 시 최대 결빙력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Table 3은 초기 볼트 체결력과 최대 결빙력을 비율로 정리한 것으로, 초기 볼트 체결력이 65kN에서 130kN으로 두 배 증가할 경우 최대 결빙력은 95kN에서 81kN으로 약 14% 정도 감소하였다.

• 내측 매립전 결빙 : 최대 주변형률

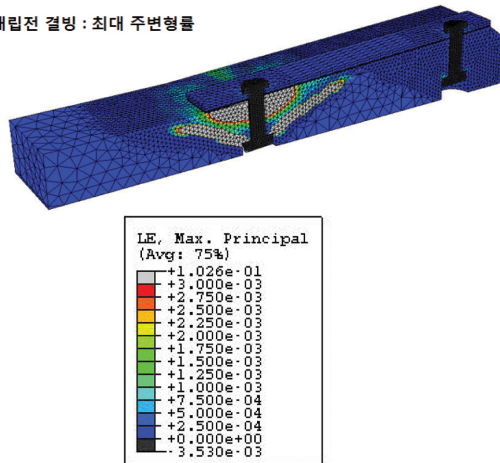


Fig. 13 The maximum principal strain for the case of freezing at the position of internal anchor bolt

• 외측 매립전 결빙 : 최대 주변형률

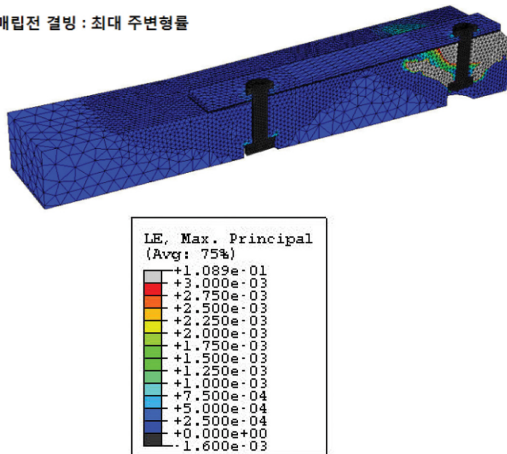


Fig. 14 The maximum principal strain for the case of freezing at the position outer anchor bolt

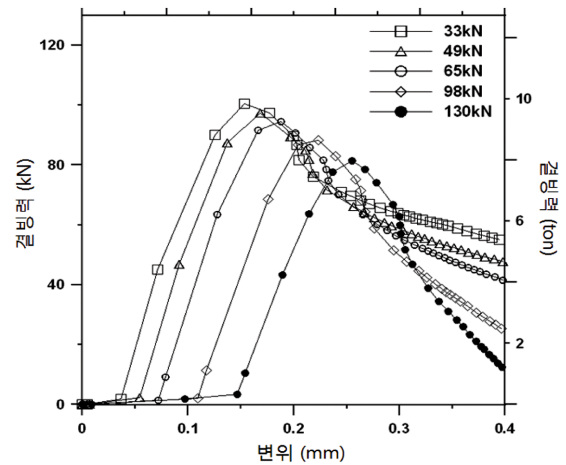


Fig. 15 Freezing force vs. displacement - the effect of fastening force applied to anchor bolt

Table 3 Freezing force results according to fastening forces applied to anchor bolts

Fastening force applied to anchor bolt		Freezing forces	
kN	%	kN	%
33kN	50	101.0kN	106
49kN	75	97.3kN	102
65kN	100	95.0kN	100
98kN	150	89.0kN	94
130kN	200	81.0kN	86

4.4 압축강도에 의한 영향

Fig. 16은 압축강도에 따른 결빙력 변화를 나타낸 것으로 압축강도가 증가함에 따라 최대 결빙력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 설계 압축강도 50MPa에 대한 결빙력 해석에서 최대 결빙력은 80.6kN으로 나타났다. 이 값을 기준으로 압축강도 56MPa에서 최대 결빙력은 85kN(초기값 대비 6%

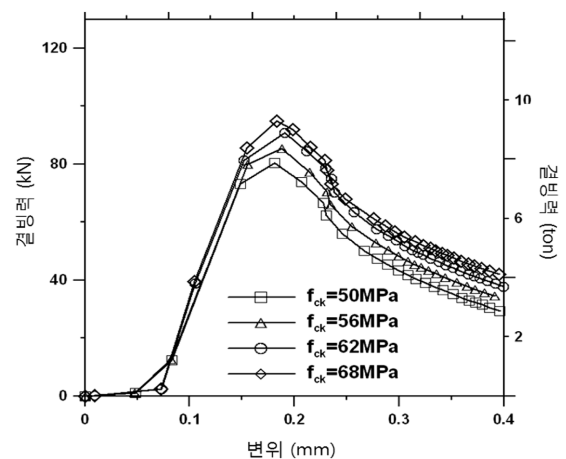


Fig. 16 Freezing force vs. displacement - the effect of compressive strength of concrete

증가), 압축강도 62MPa 일 때 91kN(11% 증가), 압축강도 68MPa일 때 95kN(15% 증가)인 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 논문의 유한요소해석을 통해 획득된 결론은 다음과 같다.

(1) 삼차원 유한요소해석을 통해 매립전내 침투수의 결빙에 의한 침목의 균열손상의 가능성과 발생기구를 확인하였다. 즉, 매립전 내부에 침투한 물의 결빙압에 의해 볼트에 상당한 인발력이 발생한다는 것을 확인하였다. 체적팽창에 의한 상향변위가 0.2mm에 도달하였을 때, 앵커볼트 심부에 본격적인 균열의 성장이 발생하며, 0.35mm의 변위에서 콘 파괴의 형태가 나타난다. 특히 현장의 균열면과 주변형률 결과 거의 유사한 결과를 나타냄으로써, 매립전내 침투수의 결빙압에 의하여 현장에서 발견된 형태의 균열손상의 발생이 충분히 가능한 것을 확인하였다. 초기볼트 체결력을 고려한 상태에서 앵커볼트의 인발강도는 95kN인 것으로 예측되었다.

(2) 파괴위치에 따른 결빙력을 비교 검토한 결과, 외측 매립전의 결빙력이 내측 매립전의 결빙력에 비해 작은 것으로 나타났으며, 하중-변위 거동은 상호 독립적인 것으로 확인되었다. 특히, 최대 결빙력의 차이도 5%로 매우 작은 것으로 나타났다. 따라서 결빙에 따른 균열손상가능성은 매립전의 위치보다는 침투수의 양 등 기타 조건에 의한 영향이 더 클 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 침목에 초기 볼트 체결력만을 재하하는 경우로는 침목 전체에 콘 파괴를 일으킬 수 없는 것으로 판단된다. 그러나, 초기 볼트 체결력을 65kN에서 130kN으로 두 배 증가시킬 경우 발현 가능한 최대 결빙력은 95kN에서 81kN으로 약 14% 감소하였다.

(4) 압축강도의 변동에 의한 결빙력을 고찰한 결과, 압축강도 증가에 따라 결빙에 따른 인발강도가 증가하는 것을 확인하였다. 침목 콘크리트의 압축강도가 설계기준강도가 50MPa 일 때 결빙력은 80.6kN이었으며 68MPa일 때 95kN으로 14% 증가하는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2010-0015690)과 건설교통부 건설기술혁신사업 “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발”(과제번호: 05첨단융합B01) 사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] J.-H. Rho, Y.-C. Ku, S.-H. Yun, H.-I. Park, H.-B. Kwon, D.-H. Lee (2009) Ballast flying probability analysis for ballast types and underbody flow conditions, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(6), pp. 829-834.
- [2] T. Takahashi, E. Sekine, T. Horike, S. Matsuoka, H. Hoshiro (2008) Study on the applicability of short fiber reinforced concrete to precast concrete slabs for slab track, *Quarterly Report of RTRI*, 49(1), pp. 40-46.
- [3] Korean Society of Civil Engineers (2009) Investigation of crack damages on railway sleepers constructed in the KTX railway connect to Daegu-Busan, Korean Society of Civil Engineers.
- [4] A.L. Vidovskii. (1972) Experimental determination of pressure during ice expansion, *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 8, pp. 40-47.
- [5] Korean agency for technology and standards (2004) *High strength bolt for steel structures*, RS D 0030.
- [6] ABAQUS (2005) *ABAQUS Analysis User's Manual*.
- [7] CEB-FIP (1991) *CEB-FIP 1990 Model Code*, Thomas Telford, London, pp. 33-81.
- [8] G. Zi, Z.P. Bazant (2003) Decontamination of radionuclides from concrete by microwave heating. II: Computations, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 129(7), pp. 785-792.
- [9] Z.P. Bazant, J. Planas (1998) *Fracture and Size Effect: in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC Press, New York.
- [10] A. Hillerborg, M. Modeer, P.E. Petersson (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Concrete and Cement Research*, 6, pp. 773-782.
- [11] G. Zi, T. Belytschko (2003) New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57(15), pp. 2221-2240.
- [12] G. Zi, J.-K. Jung, B. M. Kim (2006) A meshless method using the local partition of unity for modeling of cohesive cracks, *Journal of KSCE*, 26(5A), pp. 861-872.
- [13] G. Zi, J.H. Song, E. Budyn, S.H. Lee, T. Belytschko (2004) A method for growing multiple cracks without remeshing and its application to fatigue crack growth, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12(5), pp. 901-915.
- [14] G. Zi, J.-H. Song, S.-H. Lee (2005) A new method for growing multiple cracks without remeshing and its application to fatigue crack growth, *Journal of KSCE*, 25(1A), pp. 183-190.
- [15] G. Zi, H. Chen, J. Xu, T. Belytschko (2005) The extended finite element method for dynamic fractures, *Shock and Vibration*, 12(1), pp. 9-23.
- [16] G. Zi, S. Yu, T. Chau-Dinh, S. Mun (2010) Analysis of static crack growth in asphalt concrete using the extended finite element method, *Journal of KSCE*, 30(4D), pp. 387-393.
- [17] G. Zi, T. Rabczuk, W. Wall (2007) "Extended meshfree methods without branch enrichment for cohesive cracks." *Computational Mechanics*, 40(2), 367-382.
- [18] T. Rabczuk, G. Zi, S. Bordas, H. Nguyen-Xuan (2008) A geometrically nonlinear three dimensional cohesive crack method for reinforced concrete structures, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, pp. 4740-4758.

접수일(2010년 11월 22일), 수정일(2011년 2월 15일),
게재확정일(2011년 3월 28일)