

이중보온 열수송관에 대한 동결차수공법개발에 관한 연구

유병희* · 안창구** · 김우철** · 신익호[†]

*텍사스주립대학교, **한국지역난방공사, 지이오에스

(2017년 8월 17일 접수, 2017년 9월 11일 수정, 2017년 9월 13일 채택)

The study of developing the freezing seal isolation method for the pre insulated heat transfer pipe

Byounghee You* · Changkoo Ahn** · Woocheol Kim** · Ikho Shin[†]

*Texas State University, **Korea District Heating Corporation, GEOS Co,

(Received 21 August 2017, Revised 11 September 2017, Accepted 13 September 2017)

요 약

우리는 원자력발전시스템에서부터 상수도까지 많은 배관시스템을 사용하고 있다. 그리고 이들 배관시스템의 적절한 운용을 위하여 배관시스템의 유지 및 보수 등을 수행하고 있다. 특히 한국지역난방공사와 같은 대형플랜트 배관시스템의 고장은 기업의 생산성과 이익에 직결된 문제일 뿐만 아니라 국민의 안전과 편의와 같은 매우 중요한 문제를 유발할 수 있기 때문에 빠른 대응과 안전한 수리가 가장 중요한 문제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 한국지역난방공사 사용 중인 이중보온 열수송관(300A)의 유지보수를 위하여 액화질소를 이용한 배관 동결차수공법을 개발하였다. 본 연구에서는 전산해석기법을 채용하여 대상 열수송관과 전용 재킷에 대한 내부 유동 및 열전달 해석을 수행하여 최적의 시스템을 선정하고, 상세 모델을 설계, 제작하였다. 실험실 규모 시험장치를 개발하여 차수공법에 대한 자체시험을 수행하고, 한국지역난방공사 세종지사 Test bed에서 현장적용 성능평가 시험을 수행하였다.

주요어 : 동결차수, 아이스플러그, 극저온, 이중보온 열수송관

Abstract - A lot of piping systems have been used from nuclear power systems to water supply systems. The maintenance of the piping systems is needed to ensure proper operation of the piping systems. Failure of the large pipe systems especially such as KDHC(Korea District Heating Corporation) can be a matter directly related to the enterprise productivity and profitability. It can also lead to very important issues in promoting public safety and convenience. Therefore a method of quick and safety repairs have been emerged as the most important problem. In this study, freezing seal isolation method using liquid nitrogen cryogenic refrigerant was developed for the maintenance of a pre insulated heat transport pipe of KDHC with a diameter of 300 mm. In this study, by employing computational analysis techniques we performed the flow and heat transfer analysis for the targeted pre insulated heat transfer pipe and freezing seal jacket(ice-Plug) and have selected for optimal system. The detailed design model based on the results of the computational analysis finally was produced. A laboratory-scale test apparatus were designed and the freezing seal isolation self-test carried out. Also the performance assessment tests in the test bed of KDHC were carried out for on-site application.

Key words : Freezing seal isolation, Freezing seal jacket, Ice-Plug, Cryogenic, Pre insulated heat transport pipe

[†]To whom corresponding should be addressed.
E-mail : ihshin@geos.kr

1. 서론

현재 우리는 원자력발전시스템에서부터 상수도까지 많은 배관시스템을 사용하고 있고, 이들 배관시스템의 적절한 운용을 위하여 배관시스템의 유지 및 보수 등을 수행하고 있다. 특히 한국지역난방공사와 같은 대형플랜트 배관시스템의 고장은 기업의 생산성과 이익에 직결된 문제일 뿐만 아니라 국민의 안전과 편의와 같은 매우 중요한 문제를 유발할 수 있기 때문에 빠른 대응과 안전한 수리가 아주 중요한 문제로 대두되고 있다.

한국지역난방공사의 경우 많은 배관 시스템을 사용하고 있고 이들 배관시스템의 적절한 운용을 위하여 배관시스템의 유지 및 보수 등이 필수적인 상황에 있다. 현장에서 관련 배관이나 밸브 등 계통기기의 보수를 요구할 때, 차단밸브가 없거나 차단밸브가 있다 하더라도 밸브가 손상되거나 배관 내부누설이 발생하여 차단이 불가능할 때가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 경우 통상적으로 관내의 유체를 모두 배출하여 배관의 압력을 해제한 후 배관수리 작업을 수행하게 되는데, 특히 원자력 발전소나 화학 공장 등에서는 계통 내의 유체가 방사능 등의 유독성을 띄거나 매우 값비싼 물질일 경우가 많아, 경제적 손실과 환경적으로 심각한 문제가 발생하게 된다. 따라서 관내의 유체를 급속으로 냉각하여 얼린 상태에서 배관의 관 막음을 수행할 수 있도록 하는 배관 동결 차단공법이 가장 효율적이고 경제적인 방법으로 이용될 수 있어 이러한 기술적, 방법적 활용에 대한 요구가 대두되고 있다.

본 연구의 배관 동결차수공법은 극저온 냉매를 이용하여 관내의 유체를 급속 냉각 결빙시켜 배관 내부 유체의 흐름을 차단시키는 것을 의미하는데 열수송관에 대한 본 기술의 적용 가능성과 안전에 대한 신뢰성

이 확보된다면 많은 배관 설비들로 이루어진 한국지역난방공사와 같은 곳에서 배관의 누설에 따른 위험성이나 계통의 정지로 인한 경제적인 손실을 최소화할 수 있어 안전성이나 경제성이 보장되는 좋은 방법이라고 할 수 있다. 열수송관 계통과 밸브류의 파손 및 누기 등의 문제가 발생한 경우, 신속하게 열수송관 내에 플러그를 형성하여 배관계통 일부 구간을 차단하여 수리 및 보전함으로써 열수송 배관계의 완전한 정지나 드레인 및 리필링을 위한 공기제거 등의 공정이 전혀 필요 없으며, 특히 시공 후 배관에 어떠한 물리적 손상(천공)이 없이 배관을 차단하고 보수할 수 있는 최신 기술이다.

기존 수리방식(Hot-Tap)은 한국지역난방공사의 중 고온 열수송관 수리를 위하여 용접 및 절단 작업이 불가피하고, 이로 인하여 2차적 피해가 불가피하지만 본 연구의 동결차수공법은 이러한 문제를 원천적으로 배제하고 배관 수리작업을 위하여 배관수리 임의 구간에 특수 제작한 극저온 재킷을 취부하고 그 부분을 급속 냉결하여 임시적으로 플러그를 생성하도록 한 기술로 수리 전후에 배관의 물리적 변형이 없어 기존 배관의 사용기한까지 영구적 사용이 가능한 신공법이다.

2. 연구배경 및 목표

2-1. 연구배경

수많은 배관 설비와 열수송관들로 이루어진 한국지역난방공사와 같은 플랜트(발전 및 난방)에서는 배관 또는 밸브의 누설로 인한 수리보수를 위하여 배관계통을 정지할 경우 막대한 경제적인 손실이 불가피하며, 조기대응이 늦어질 경우 국민편익에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 이 경우 언론보도 등으로 인한 2차적인 직·간접적 피해로 지역난방공사의 대외적인 이미

Table 1. Status of maintenance and year of using heat transport pipe in KDHC



지 손실 등이 발생할 수도 있다. 이를 최소화하고 배관시스템의 안전성과 경제성을 보장하는 수리보수 공법이 절실하게 요구되고 있다.

한국지역난방공사 열수송관의 수리 보수를 위하여 기존 Hot-Tap 공법으로 널리 시공되고 있으나 천공방식으로 배관의 물리적 변형(용접, 천공 등)이 불가피하고 By-pass라인 설치 및 전용 부착품의 제작과 용접 작업으로 영구 취부함으로 유지보수 비용과 시간이 많이 소요된다. 특히 배관에 취부된 용접품들은 수리보수 후 배관의 사용시간에 따라 배관진동에 따른 균열(Crack) 등으로 재시공 등의 2차적 문제를 빈번하게 야기하고 있다.

Table 1과 같이 한국지역난방공사의 경우 매년 장기간 사용한 열수송관의 증가로 인하여 열수송 배관시스템의 고장 및 장애구간이 늘어남으로 인하여 열수송관의 유지보수 비용이 증가되고 있어 작업의 효율성이 높고 친환경적인 동결차수공법의 중요성이 대두되고 있다.

2-2. 연구 목표

본 연구에서는 열수송관에서 배관 및 밸브 등의 손상과 같은 유지보수의 상황이 발생되었을 때, 열수송관의 임의 선정된 부위에서 내부 유체를 극저온 냉매(액화질소 등)로 안전하게 급속 냉각하여 배관을 차단함으로 임시적인 플러그 효과를 가질 수 있도록 배관수리보수 시스템을 개발하고 성능시험 까지 진행하는 것을 핵심목표로 한다. 상세 개발성능 목표는 Table 2에 나타내었다.

3. 동결차수공법 시험장치와 시험결과

3-1. 동결차수용 아이스플러그 Jacket 개발

본 연구에서는 전산해석기법을 채용하여 전용 아이스플러그 Jacket에 대한 내부 유동 및 열전달 해석을 수행하여 최적의 시스템을 개발하였다. 전산해석기법은 현재 널리 사용 중인 상용 프로그램을 채용하여 유동해석 및 열전달 해석을 수행하였다.

Table 2. Research goals of freezing seal isolation method in pre insulated heat transport pipe(300A)

개발항목(성능지표)	규격/단위	개발목표
1. 300mm 배관냉결시간	시간(h)	13
2. 아이스플러그 내압력성능	kgf/cm ²	20
3. 배관인장강도	N/mm ²	380이상
4. 배관항복강도	N/mm ²	220이상
5. 바깥지름의 허용차	%	±0.8

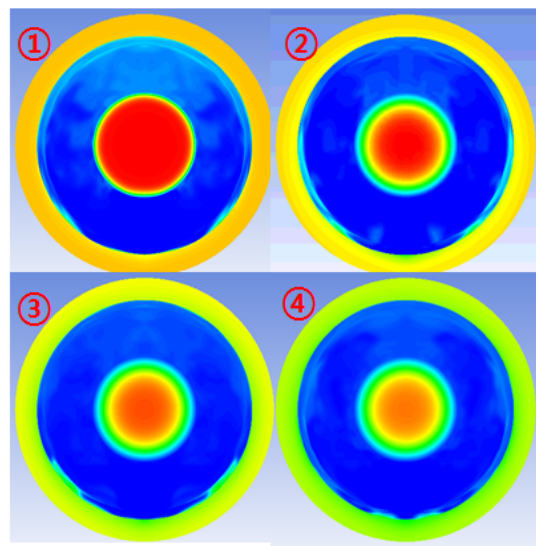
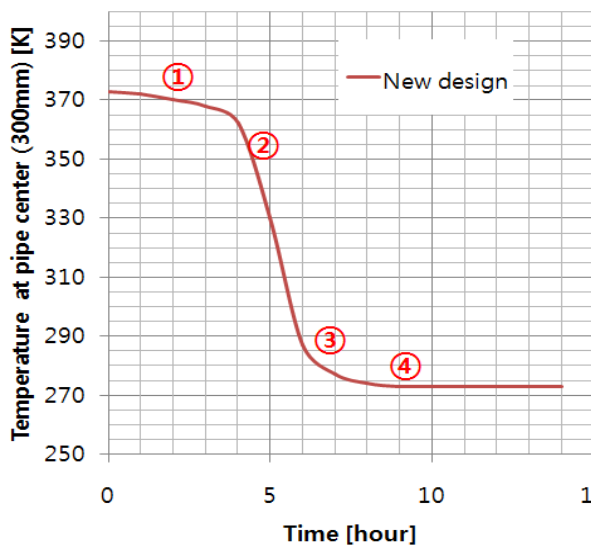


Fig. 1. Temperature Drop in heat transport pipe(300A) and ice-plug jacket depending on liquid nitrogen injection time

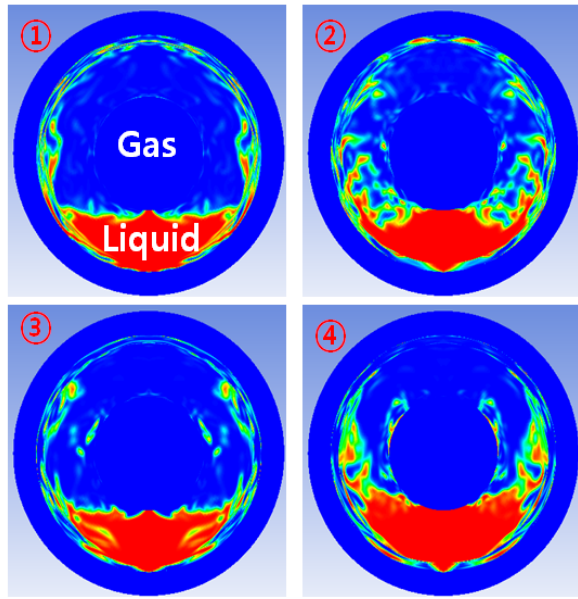


Fig. 2. Distribution of nitrogen in heat transport pipe(300A) and ice-plug jacket

먼저 Jacket의 성능규명에 앞서 열수송관 내부 유체에 대한 온도강하에 대하여 검토하였으며 Fig. 1에 고온 열수송관 온도강하에 대하여 나타내었다.

열수송관(300A) 전용 아이스플러그 Jacket 내부로 액화질소를 주입하는 초기에 열수송관 중앙부분은 Jacket 내부로 극저온 액화질소 투입에도 불구하고 상당시간 온도 변화가 거의 발생하지 않았다(①). 그러나 계속되는 극저온 액화질소 투입으로 열수송관 중앙부분과 열수송관 표면 온도의 큰 차이로 인하여 열전달이 활발히 발생하고, 열수송관 중앙 부분의 온도강하가 급격하게 발생한다(②). 이러한 급격한 온도강하가 이루어지게 하기 위하여 Jacket 내부로 액화질소 투입량이 많아지면 온도강하가 확연히 빨리 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 그러나 액화질소 투입량을 2배로 늘렸을 때 온도강하가 2배로 빨라지지는 않는다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 중앙의 온도가 응고점에 가까워지면, 열수송관 내부의 물은 전체적으로 얼음으로 상변화하며 잠열을 배관 밖으로 내보내고, 열수송관 중앙부분의 열전달 량 크기가 작아지면서 온도 강하속도가 확연히 늦어짐을 볼 수 있다(③, ④).

Fig. 2에서는 시간의 경과에 따라 열수송관(300A) 전용 아이스플러그 Jacket 내부의 액화 질소 및 질소 가스의 분포와 열수송관 주변의 질소 가스의 분포를 보여주고 있다.

초기에 액화 질소가 Jacket 아래쪽에 채워지면서 액

화 질소의 표면과 Jacket의 내부 표면에서 활발히 열전달이 일어나고 있다(①). 시간이 경과하면서 액화 질소가 충분히 채워지고 전체적으로 Jacket 내부 온도가 내려가면서 열수송관 표면에서 질소의 상변화와 함께 열전달이 활발히 발생하는 것을 볼 수 있다(②). 따라서 액상과 기상의 경계가 뚜렷하지 않고, 속도 분포 또한 Jacket 내부 표면을 따라 올라가는 질소 가스와 열수송관 아래쪽 및 좌우 표면에서 크게 나타난다. 열수송관의 온도강하가 상당히 이루어지면 열전달에 의한 상변화가 줄어든다. 또한 전체적으로 액상이 분포하는 영역이 Jacket 내부에서 증가되는 것을 볼 수 있다(③, ④). 이러한 경우 충분히 온도 강하가 이루어진 열수송관 아래쪽에서는 상변화 및 질소가스의 속도가 나타나지 않고 열수송관 좌우에서만 위쪽으로 상승하는 속도가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 위와 같은 온도 및 질소 상변화 등을 볼 때 열수송관의 온도강하를 위해서는 열수송관 표면에서 액화질소의 상변화가 직접 발생하게 하는 것이 온도강하에 보다 효과적일 것으로 판단되어진다. 열수송관(300A) 동결차수에 필요한 액화질소량은 약3,000L로 계산되었다.

3-2. 동결차수공법 시험장치

열수송관(300A)에 대한 동결차수공법 적용성능 검증과 아이스플러그 메커니즘 분석을 위하여 실험실 규모의 전용 Test chamber를 제작하였다. 본 연구에 사용된 시험장치는 한국지역난방에서 사용 중인 이중보온 열수송관(300A)을 사용하였으며, 고온수 인입측 4,500mm와 토출측 4,500mm 그리고 시험구간 2,500mm로 Fig. 3과 같이 구성되어 있다.

3-3. 동결차수공법 시험결과

열수송관(300A) 동결차수공법에 대한 적용성능 실증 시험과 현장 적용성능 실증 시험을 수행하여 성능을 검증하였으며, 열수송관 동결차수된 아이스플러그에 대한 내수압력시험을 수행하여 내압력 성능을 함께 평가하였다.

적용성능 실증시험은 배관 내부 유체 온도는 82℃이고 배관 내부 압력은 대기압의 조건에서 시험을 수행하였고, 극저온 냉매로 액화질소(비등점 -196℃)를 사용하였으며, 시험전경은 Fig. 4와 같다. 액화 질소 공급부는 실제 현장에서 사용이 가능하도록 산업체에서 많이 사용되고 있는 LGC Tank(175L)를 사용하였다.

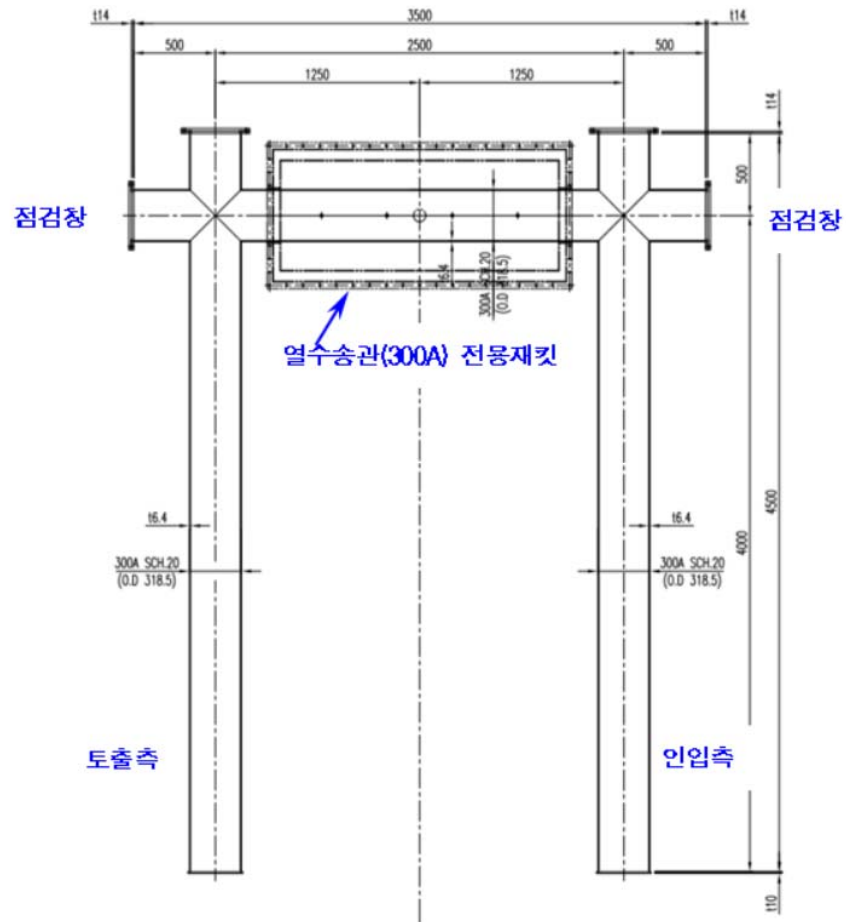


Fig. 3. Test Chamber for pre insulated heat transport pipe(300A) using in KDHC

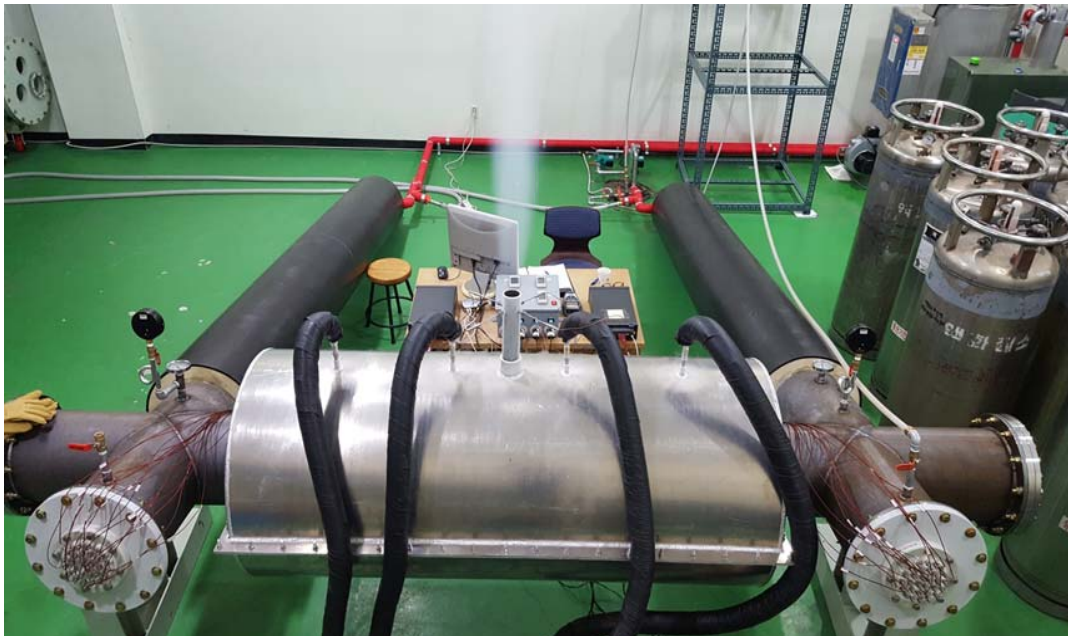


Fig. 4. Test of freezing seal isolation for pre insulated heat transport pipe(300A) using in KDHC



Fig. 5. Ice-Plug for freezing seal isolation in pre insulated heat transport pipe(300A) using in KDHC



Fig. 6. Test of freezing seal isolation for pre insulated heat transport pipe(300A) at KDHC

액화질소의 안전한 공급과 유량조절을 위하여 솔레노이드밸브와 제어기를 사용하여 유량을 제어하였고, 사용된 액화질소 소요량은 3,340L로 전산해석기법을

통하여 계산된 액화질소 소요량 과 유사함을 확인할 수 있었다.

열수송관(300A) 시험용 Chamber에서 배관 동결차



Fig. 7. Ice-Plug for freezing seal isolation in pre insulated heat transport pipe(300A) at KDHC

수 완료시간은 최초 액화질소 주입시간으로부터 6 시간 20분(380분)이 소요되었다. 열수송관(300A) 동결차수된 아이스플러그는 Fig. 5와 같다.

열수송관(300A)에 형성된 아이스플러그의 한 쪽은 대기에 오픈하고 다른 쪽에 내압력 시험을 수행하였다. 가압속도는 분당 3kgf/cm^2 로 증가하였으며, 최고 압력 33kgf/cm^2 에서 10분 지속하여 내압력 성능이 유지됨을 확인하였다.

현장적용성능 실증시험은 한국지역난방공사 세종지사 열수송관(300A0)를 사용하였으며, 배관 내부 유체 온도는 85°C 이고 배관 내부 압력은 10kgf/cm^2 에서 시험을 수행하였고, 시험전경은 Fig. 6와 같다. 현장적용성능 실증시험에서 배관 동결차수 완료시간은 최초 액화질소 주입시간으로부터 10시간 23분 (623분)이 소요되었다. 사용된 액화질소 소요량은 4,710L로 실험실 규모 실증시험과 비교하여 41% 많이 소요되었다. 이는 실제 현장의 열수송관(300A) 내부 유체 온도와 압력이 높아서 동결차수에 필요한 액화질소량이 더 많이 소요되는 것으로 판단된다. 현장 열수송관(300A) 동결차수된 아이스플러그는 Fig. 7과 같다.

4. 결론

본 연구에서는 한국지역난방공사 이중보온 열수송관(300A)를 이용하여 고온 배관에 대하여 극저온 냉매를 이용한 동결차수가 가능함을 확인하였다. 본 연구에서는 전산해석기법을 통하여 고온 배관에 대한 동결차수 메커니즘을 규명하고 해석모델 및 해석기법을 개발하였다. 개발된 해석기법을 통하여 한국지역난방공사 이중보온 열수송관(300A) 전용 아이스플러그를 개발하고 제작하였다. 개발된 아이스플러그를 이용하여 시험실 규모 실증시험과 현장 적용성능 실증시험을 수행하고 동결차수에 성공하였다. 개발된 동결차수용 아이스플러그는 최고압력 33kgf/cm^2 까지 내압력 성능이 있음을 확인하였다. 본 과제를 통하여 개발된 동결차수시공 시스템을 사용하여 한국지역난방공사 이중보온 열수송관(300A)에 대하여 배관차수를 시행할 경우 현재 널리 사용 중인 Hot-Tap시공비용 대비 배관차수시공원가를 40% 절감할 수 있게 되었다. 이와 같이 한국지역난방공사 이중보온 열수송관(300A)에 동결배관차수공법을 적용할 경우 경제적으로 보다 저

렵하고 친환경적이며, 사용상 보다 안전하고 편리하게 배관차수 시공이 가능하게 되었다.

사 사

이 논문은 한국지역난방공사 2015년도 중소기업 협력기술개발사업으로 지원받아 수행된 연구임.

References

1. Jeong, G. H., et al., 2002, Numerical Analysis of Phase Change and Natural Convection Phenomena During Pipe Freezing Process, ASME, Pressure Vessels and Piping Conference, pp. 1-5
2. Park, Y. D., et al., 2002, Integrity evaluation of ice plugged pipes applied on short jacket, KNS, Vol. 34, No. 2, pp. 105-116
3. Pak, B. D., et al., 2001, The experimental study for liquid freezing phenomena in a pipe during ice plugging, KSME, Vol. 25, No. 3, pp. 366-372
4. Wigley, D. A., 1984, Basic mechanism of plug formation during cryogenic pipe freezing, Proceedings of the tenth international cryogenic engineering conference, pp. 503-506