

## 알루미늄 관의 동파 거동특성에 관한 수치적 연구

조승현<sup>1</sup>, 이동원<sup>1</sup>, 고영배<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>동양미래대학교 기계공학과, <sup>2</sup>한국생산기술연구원 금형기술연구실용화그룹

### Numerical analysis for deformation characteristics under the freezing and bursting of Al pipe

Seung-Hyun Choi<sup>1</sup>, Dong-won Lee<sup>1</sup>, Young-Bae Ko<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, University of Dongyang Mirae

<sup>2</sup>Molds & Dies Technology R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology

**요약** 본 최근 비닐하우스의 개폐를 위해 사용되는 스틸 관 대신에 가볍고 내식성이 우수한 알루미늄 관의 사용이 확대되었다. 하지만 이러한 알루미늄 관은 스틸 관에 비해 큰 열팽창 계수를 가지고 있기 때문에 겨울철에 스틸관에 비해 상대적으로 동파에 취약한 문제가 제기되고 있다. 본 논문은 기존 연구사례를 바탕으로 수치해석을 이용하여 동파가능성을 예측하였다. 이를 위해 알루미늄 관 내부의 얼음은 냉동되면서 최대 50%까지 부피가 팽창한다고 가정하여 얼음의 부피가 팽창되는 과정에서 관의 기계적·열적 거동을 관찰하였다. 해석결과 관 내부에 완전히 찬 얼음이 팽창할 때 높은 내압이 발생하며, 동시에 알루미늄 관은 항복강도 이상의 응력이 발생하였고, 얼음의 팽창율이 약 6 ~ 7%에 이르면 알루미늄의 연신율 17%에 이르게 되기 때문에 알루미늄관은 완전히 동파될 것으로 판단되었다. 따라서 이와 같은 동파해석을 통해 관은 좌·우의 유입구를 완전하게 밀봉하여 근원적으로 관내부에 얼음이 생성되지 않도록 하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

**Abstract** Recently, aluminum pipes have been used instead of steel pipes for open and shut machines in vinyl housing because of its corrosion-resistance and light weight. In particular, the light weight is very useful for fitting and removal by human resources. On the other hand, an aluminum pipe is weak in winter because aluminum has a larger thermal expansion coefficient than steel. This study examined the freezing and bursting of aluminum pipes by numerical analysis. The mechanical-thermal deformation characteristics were analyzed under the condition of ice volumetric expansion in aluminum pipes reaching 50%. From numerical analysis, large stresses above the yield stress occurred in aluminum pipe after ice expanded in the net diameter immediately. In addition, the freezing and bursting of aluminum pipes was predicted around an ice volumetric expansion of 6 - 7% because the thickness of the aluminum pipe reached an aluminum elongation ratio of 17%. Therefore, it is recommended that aluminum pipes be sealed perfectly to prevent water flow in the pipe. These results suggest that it is very difficult to prevent freezing and bursting of aluminum pipes by water freezing in the pipe.

**Key Words** : Al pipe, Elongation ratio, FEA, Freeze and burst

### 1. 서론

최근 국내의 쌀 자급율이 100%를 넘어서면서 쌀농사

를 대체하는 비닐하우스 농사는 점차 확산되고 있는데 비닐하우스는 사계절 농산물을 안정적으로 생산할 수 있고 농민의 고수익을 보장해준다는 장점이 있다. 비닐

본 논문은 한국생산기술연구원 내부 사업으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Young-Bae Ko(Korea Institute of Industrial Technology)

Tel: +82-32-850-0321 email: kaiser74@kitech.re.kr

Received April 11, 2014

Revised June 1, 2014

Accepted August 7, 2014

하우스는 비닐로 바람을 차단하고 내부를 보온하기 때문에 농작물의 성장을 위해서 주기적인 환기가 필요하다. 이때 사용되는 구조물이 비닐하우스 개폐기와 개폐용 관이다.

개폐용관은 일반적으로 강관을 사용하며 개폐기에 연결하여 비닐하우스의 옆면이나 지붕 등 환기가 필요한 위치에 설치한다. 비닐하우스의 규모에 따라 강관은 연결하여 사용하는데 무게가 무거워 개폐에 어려움이 있거나 3 ~ 5년을 사용하면관이 부식되거나 동파되어 교체를 해야 한다. 그러나 농민의 고령화가 가속화되고 인력부족으로 인한 외국인 노동자를 고용하는 현실에서 비닐하우스 개폐기 관의 교체는 농민들에게 큰 부담이 되고 있다.

따라서 최근에는 비닐하우스 개폐용 관을 장기간 사용하고, 설치와 교체가 용이하도록 알루미늄 육각관이 제작되어 보급되고 있다. 이러한 알루미늄 육각관은 경량화로 인해 설치와 교체가 용이하고, 내부식성으로 장기간 사용이 가능하다는 장점이 있지만 강관에 비해 열팽창율이 높고 기계적 강도가 낮아 열변형이 크고 동파에 취약하다는 단점이 있다.

이것은 사계절의 온도변화가 크고, 특히 겨울철 동파에 의한 개폐기용 관의 파손이 가장 큰 교체원인이 된다는 점에서 반드시 극복해야 할 알루미늄 개폐기용 관의 내구성이라고 할 수 있다.

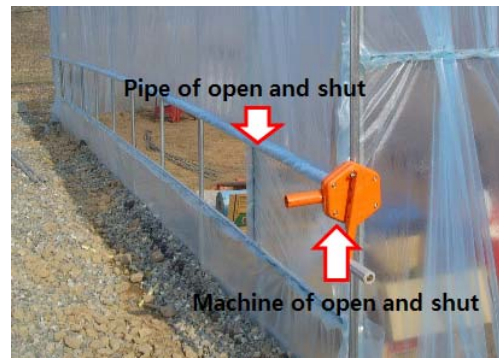
관에서 발생하는 동파의 연구사례로는 PVC플라스틱관에 관한 연구와 금속관으로써 구리 관과 알루미늄 관의 동파연구가 소개되고 있다. 연구결과에 의하면 플라스틱 관은 내부압력이 약 12 ~ 17Mpa범위에서 동파가 발생하였고, 구리 관은 약 24Mpa의 내부압력, 알루미늄 관은 약 30Mpa의 내부압력으로 동파되었다[1-3]. 또한, 유한요소법을 사용한 알루미늄의 내구성 수치해석은 열처리된 Al 7075-T6와 알루미늄 합금인 Al-SAF40등을 대상으로 수행한 사례가 있다[4,5].

따라서 본 논문에서는 기존 연구사례를 바탕으로 사계절 안정적인 개폐기용 알루미늄 관의 사용이 가능하도록 겨울철 비닐하우스 개폐기용 Al-6061 육각관의 기계적·열적 거동을 유한요소법에 의한 수치해석으로 고찰하고 동파가능성을 예측하고자 한다.

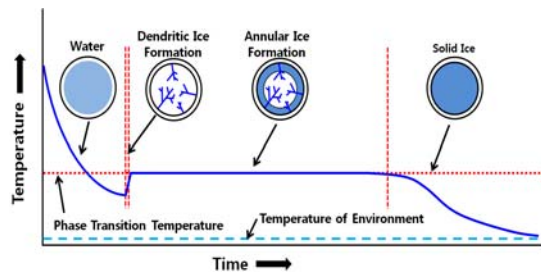
## 2. 본론

### 2.1 관 동파 메카니즘

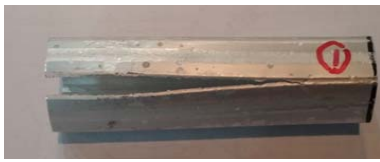
관내에서 얼음은 Fig. 2와 같이 몇가지 단계를 거치면서 발생한다. 내부에 물이 완전히 채워진 관이 영하의 온도에 노출되면 물로부터 관 표면을 통해 열전달이 발생하여 물의 온도가 떨어지는데, 물의 온도가 0°C이하로 떨어지면 얼음이 생성되기 전 과냉상태에 도달하게 된다. 이러한 과냉상태가 지속되는 동안 물에서 얼음 핵(Ice nucleation)이 생성되고 얼음수지(dendritic ice formation)내 결정(crystals)이 성장하기 시작한다. 얼음수지는 영하의 온도에서 관 표면에서부터 고체 얼음을 생성하고 얼음은 내부로 성장하여 관의 내부를 완전히 채우게 된다. 이와 같이 관 내부에 채워진 얼음은 관에 극한의 압력을 가하게 되어 관은 파괴에 이르며 이것을 동파(freezing and bursting)이라고 한다[1].



[Fig. 1] Al pipe for the machine of open and shut in vinyl house



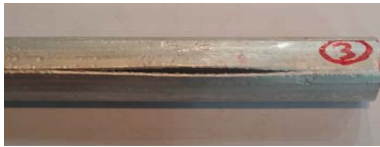
[Fig. 2] Schematic of ice formation in a piping system[1]



(a) specimen 1



(b) specimen 2



(c) specimen 3

[Fig. 3] Fracture phenomenon of Al pipes



** CONT **		AG-No.:6000		ST-No.:A6063		Series [6001]		Lot No [COCOPAK3]		AN- 205 TAN-4143		01-24-14 15:13	
N°	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn					
N° 1	98.547	.44752	.27511	.07779	.01996	.53496	.00836	.06576					
N°	Ni	Ti	Pb	Bi	Sb	[ISE]							
N° 1	.00526	.01697	.00098	.00000	.00000	.55060							

(c) specimen 3

[Fig. 4] Figure of optical microscope( $\times 400$ ) and test the ingredients of a specimens

## 2.2 수치해석

### 2.2.1 파괴조직 검사

Fig. 3은 동파에 의해 파괴가 일어난 알루미늄 관의 모습이다. 본 논문에서는 이러한 파괴가 발생한 관의 시료 중 3개를 선정하여 조직을 검사하였다. 이것은 관이 순수 알루미늄과 재생 알루미늄이 약 7:3의 비율로 혼합되어 압출에 의해 제조되기 때문에 소재에 파괴의 원인이 있는지 파악하기 위함이다. Fig. 4는 광학현미경(400배율)로 관찰한 알루미늄의 조직과 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)로 관찰한 알루미늄의 구성성분을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 조직에서 특이점은 관찰되지 않았으며, 구성성분도 Al, Si, Fe, Cu, Mn, Cr, Zn, Ni, Ti, Pb 등의 함량에도 차이점이 없는 것으로 보아 알루미늄 소재가 파괴의 원인은 아니라고 판단되었다. 따라서 알루미늄 관 파괴가 알루미늄 내부로 유입된 물이 냉동되면서 발생한 동파라고 가정하여 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 사용할 수 수치해석으로 동파 시뮬레이션을 수행하였다[6].



** CONT **		AG-No.:6000		ST-No.:A6063		Series [6001]		Lot No [COCOPAK1]		AN- 205 TAN-4141		01-24-14 15:04	
N°	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn					
N° 1	98.593	.45199	.21015	.05587	.01989	.55142	.00901	.02273					
N°	Ni	Ti	Pb	Bi	Sb	[ISE]							
N° 1	.06808	.01488	.00264	.00000	.00000	.55780							

(a) specimen 1



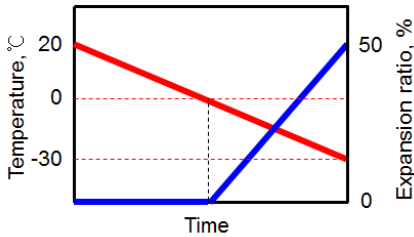
** CONT **		AG-No.:6000		ST-No.:A6063		Series [6001]		Lot No [COCOPAK2]		AN- 204 TAN-4142		01-24-14 15:09	
N°	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn					
N° 1	98.550	.43785	.28122	.07669	.01996	.53118	.00850	.06953					
N°	Ni	Ti	Pb	Bi	Sb	[ISE]							
N° 1	.00597	.01657	.00266	.00000	.00000	.55360							

(b) specimen 2

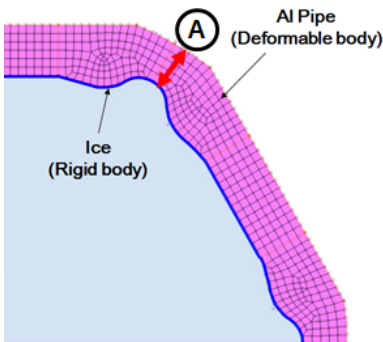
[Table 1] Mechanical and thermal properties of Al 6061

Properties	Value
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	2,700
Elastic modulus, GPa	67
Poisson's ratio	0.36
Yield stress, MPa	280
Thermal expansion coefficient, um/m·°C	24
Thermal conductivity, W/m·K	210
Specific heat capacity, kJ/kg·°C	900
Elongation(-30~25°C), %	17

Fig. 5는 동과해석을 위해 사용한 온도와 냉동에 따른 얼음팽창율 조건이다. 온도가 상온 20°C에서 영하 -30°C까지 떨어질 때 알루미늄 관 내부의 얼음은 냉동이 되면서 최대 50%까지 부피가 팽창한다고 가정하여 얼음의 부피가 팽창되는 과정에 알루미늄 관의 기계적·열적 거동을 관찰하였다.



[Fig. 5] Analysis conditions volume expansion ratio under the freezing temperature



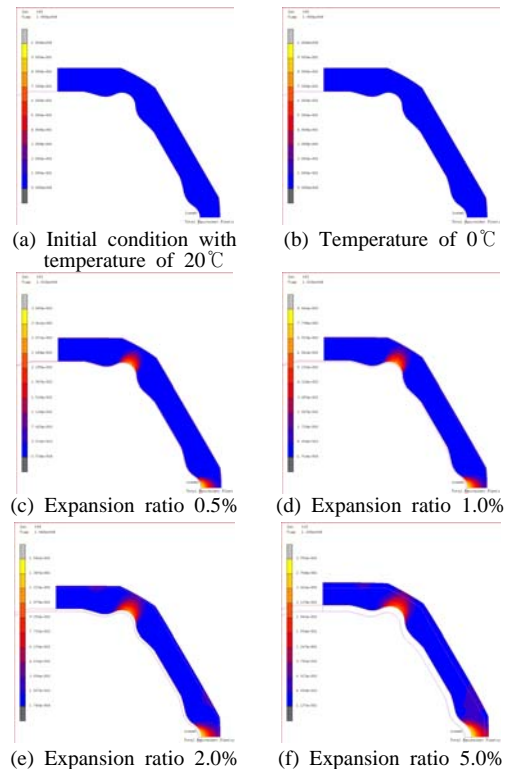
[Fig. 6] The freeze and burst modeling by Finite Element Method

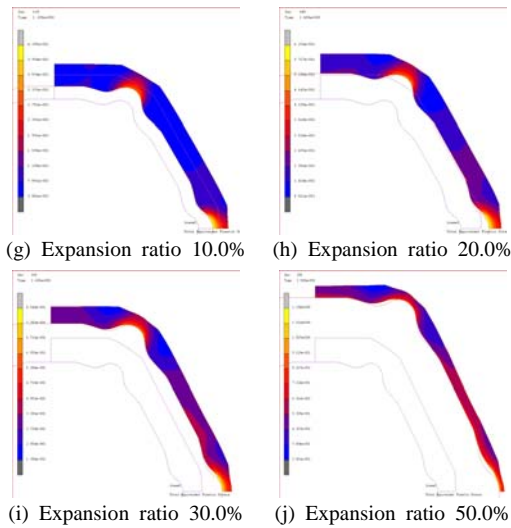
Fig. 6은 유한요소해석을 위한 모델링을 보여주고 있다. 축대칭 구조이기 때문에 1/4 모델을 사용하였고 4각

격자 요소를 사용하여 메쉬를 생성하였다. 동과해석을 위해 접촉(contact)모델을 적용하여 알루미늄 관은 변형이 가능한 요소(deformable element)를 사용하였고 관내 얼음이 완전히 채워진 조건에서 얼음은 변형 없이 팽창만 가능한 강체(rigid body)로 가정한 후 얼음이 팽창하는 동안 얼음과 알루미늄 관이 접촉한 상태에서 알루미늄의 기계적·열적 변형이 발생하도록 모델링하였다.

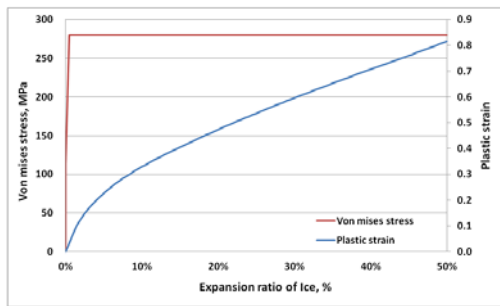
### 3. 연구결과 및 고찰

Fig. 7은 알루미늄 관 내부의 얼음이 팽창하는 동안 알루미늄 관에서 발생한 소성변형율의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)는 온도가 감온되기 전, 즉 초기 알루미늄 관의 모습이고, Fig. 7(b)는 온도가 감은 되어 0°C 되었을 때 알루미늄 관 형상으로 수축되었으나 20°C 변화에 따른 열변형량이 작아서 크게 수축된 것은 확인되지 않았다. Fig. 7(c) ~ Fig. 7(j)는 얼음이 팽창되면서 소성변형이 발생하는 과정을 나타내었다. 이때 Fig. 6의 “A” 위치에서 발생하기 시작한 소성변형은 얼음의 팽창율이 증가하면서 알루미늄 관 전체로 확대되었다.

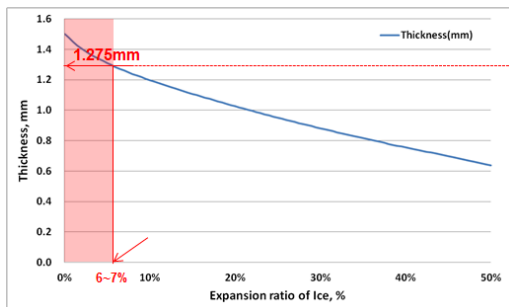




[Fig. 7] Plastic strain distribution of an Al pipe under ice expansion



[Fig. 8] Von Mises stress and plastic strain of an Al pipe as a function of the ice expansion ratio in a Al pipe



[Fig. 9] Thickness decreasing of a Al pipe as a function of the ice expansion ratio in a Al pipe

Fig. 8은 얼음의 팽창률에 따라 Fig. 6의 “A”위치에서 발생한 von Mises 응력과 소성변형율을 나타낸 그림이

다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 알루미늄 관에서 발생한 von Mises 응력은 얼음의 팽창에 의해 소성이 발생한 후 크게 증가하지 않았다. 이것은 알루미늄에서 발생한 응력이 항복응력보다 크게 발생하면 응력은 응력-변형률 특성에 따라 변화면서 크게 증가하지 않고 알루미늄 전체로 확산되기 때문이며, 알루미늄의 재료특성 값으로 응력-변형률 특성을 고려하지 않고 항복응력만을 고려했기 때문이다. 일반적인 응력-변형률 특성을 고려했다면 응력-변형률 특성에 따라 응력이 완만하게 증가할 것으로 예상된다. 그러나 알루미늄 관에서 발생한 소성변형율은 얼음이 팽창하면서 초기에 크게 증가한 후 얼음의 팽창률이 약 6 ~ 7%가 넘어서면서 일정한 비율로 증가하였다. 이것은 관의 기계적·열적 변형이 얼음의 팽창에 따라 선형적으로 증가하기 때문이다.

Fig. 9는 얼음의 팽창율에 따라 fig. 5의 “A”위치에서 알루미늄 두께의 변화와 동파에 따른 알루미늄 관의 파괴가 가능한 얼음의 팽창율을 나타낸 그림이다. 초기 알루미늄 관“A”위치의 두께는 1.54mm인데 얼음의 팽창율이 6 ~ 7%까지는 급격히 감소한 후 알루미늄 두께는 일정한 비율로 감소하였다. 알루미늄 6061의 연신율이 -30°C ~ 25°C 온도 범위에서 약 17%이므로 17%의 연신이 발생했을 때 “A”위치의 두께는 약 1.275mm이다. 그러므로 Fig. 9의 결과에 의하면 얼음의 팽창율이 약 6 ~ 7%가 될 때 연신율 17%에 이르게 되어 알루미늄은 완전 동파되었다고 판단된다. 그러나 Fig. 7 ~ Fig. 8의 결과로부터 알루미늄 관은 내부의 얼음이 팽창되는 직후부터 소성변형이 발생하는 것으로 보아 얼음이 발생하는 직후부터 동파의 가능성이 있다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 유한요소법을 이용한 알루미늄 관의 동파해석을 통해 알루미늄 관의 영하온도에서의 변형거동을 분석하였다. 해석결과에 의하면 관내부에 완전히 찬 얼음이 팽창할 때 대단히 높은 내압이 발생하면서 얼음의 팽창과 동시에 알루미늄관은 항복강도 이상의 응력이 발생하였다. 또한, 얼음의 팽창율이 약 6 ~ 7%에 이르면 알루미늄의 연신율 17%에 이르게 되기 때문에 알루미늄관은 완전히 동파될 것으로 판단된다. 동파는 냉각에 의해 재료의 수축이 이루어진 상태에서 발생하기 때문에 상온

에서의 파손보다 더욱 빠르게 진행될 것으로 예상된다. 따라서 이와 같은 동파해석을 통해 관은 좌·우의 유입구를 완전하게 밀봉하여 근원적으로 관내부에 얼음이 생성되지 않도록 하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

## References

- [1] J. Cruz, B. Davis, P. Gramann, A. Rios, "A study of the freezing Phenomena in PVC and CPVC Pipe Systems", *ANTEC 2010 CONFERENCE PROCEEDINGS*, Society of Plastics Engineers, pp. 255-267, 2010
- [2] M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah, "Freezing phenomena in ice-water systems", *J. Energy Conv. Management*, Vol. 43 pp 1773-1789, 2002  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00129-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00129-7)
- [3] M. Akyurt, "Ice-based technique for burst testing of tubular elements", *Eng. Sci.*, Vol. 16 No. 1 pp. 103-130, 2005.
- [4] Seung-Ok Bang et. al, "Design and Impact Analysis of Automotive Bumper Beam Using Aluminum Foam", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 4 pp. 1552-1558, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.4.1552>
- [5] Hae-Kyu Choi et. al, "Study on Structural Analysis of DCB Specimen Bonded with Aluminum Foam Composite", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 4 pp. 1488-1495, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1488>
- [6] "MSC/MARC volume A : Solution procedures for nonlinear systems", Version V2013, MARC
- [7] www. matweb.com

## 조 승 현(Seung-Hyun Cho)

[정회원]



- 2004년 8월 : 홍익대학교 일반대학원 기계공학과 (박사)
- 2004년 12월 ~ 2009년 2월 : 삼성전기(주) 중앙연구소 책임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 동양미래대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

구조해석, 열전달해석, 최적설계

## 이 동 원(Dong-won Lee)

[학생회원]



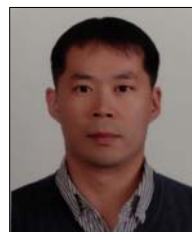
- 2009년 3월 ~ 현재 : 동양미래대학교 기계공학과 (학사과정)

<관심분야>

구조해석, FEM

## 고 영 배(Young-Bae Ko)

[정회원]



- 2001년 8월 : 홍익대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 선임연구원

<관심분야>

사출성형, 열/구조 해석, 실리콘 성형, LED system