

# 냉연신 공법을 이용한 압력용기의 제조에 관한 연구

한규택\*<sup>#,</sup>

\*부경대학교 기계공학과

## A Study on Pressure Vessel using Cold Stretch Method

Kyu-Tack Han\*<sup>#,</sup>

\*Department of Mechanical Engineering, PKNU

(Received 20 October 2017; received in revised form 30 November 2017; accepted 24 December 2017)

### ABSTRACT

A pressure vessel consists of an inner tank and the outer tank; the material of the inner tank is austenite stainless steel, and the outer tank is general carbon steel. As the storage amount increase, the size of the inner tank for LNG also increases, which eventually increases the weight of the LNG storage tank. The Cold Stretch method can transport and store the LNG in a larger amount than the conventional pressure container, and the weight of the pressure vessel can also be reduced at 50 - 70% due to the reduction of the thickness, which is excellent from an economic and energy consumption perspective. Although the Cold Stretch method has these advantages, the domestic situation has not developed any related legislation. In this study, the actual production of pressure vessels using the Cold Stretch method will be processed and the volume expansion after the Cold Stretch will be checked and compared with the mechanical properties.

**Key Words :** Cold Stretch(냉연신), Pressure Vessel(압력용기), LNG(액화천연가스), Manufacture(생산)

### 1. 서 론

냉연신(Cold Stretch) 공법은 기존 LNG 저장용 탱크의 내조탱크(inner tank)를 제작하여 ASME에서 제시하고 있는 요구응력에 대응하는 특정 수압을 가함으로써 내조탱크는 특정 수압에 따라 7%~9% 범위로 신장하게 된다. 이때의 오스테나이트 스테인리스강(AISI 304) 소재는 소성변형을 겪기 때문에 가공경화(work hardening)에 의해 강도

가 증가한다.<sup>[1~6]</sup> 이러한 공정특성으로 인하여 기존 LNG 저장탱크와 비교하여 더 많은 양의 LNG를 운반 및 저장할 수 있으며, 또한 중량 역시 내조탱크 소재의 두께 감소로 인하여 최대 50~70% 정도를 감소시킬 수 있어 경제적 및 에너지 소비 관점에서 매우 우수하다.<sup>[1~2]</sup> 그러나 이러한 장점을 가지고 있는 냉연신 공법은 국내에서는 관련법규가 없어 개발이 부진한 실정이다. 반면에 미국 및 중국에서는 냉연신 공법과 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 이러한 선행연구들은 실제 운용조건이 아닌 상온에서 시험을 수행하였으며, 또한 실제 LNG 저장탱크가 아닌 변형률 제

# Corresponding Author : [kthan@pknu.ac.kr](mailto:kthan@pknu.ac.kr)

Tel: +82-51-629-6135, Fax: +82-51-629-6126

어를 통한 인위적인 신장된 시편을 이용하였기 때문에, 실제 냉연신 공법을 사용한 LNG 저장탱크에 대한 기계적 시험자료 등 연구 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 ASME 규정<sup>[10]</sup>에 의거하여 냉연신 공법을 사용한 LNG 저장용 내조탱크를 제조하는 것이 목표이며, 연구내용 및 방법은 냉연신으로 인한 부피팽창 정도를 확인하고, 부위별(shell & head)로 시편을 채취하여 기존 오스테나이트 스테인리스강과 냉연신 후의 기계적 특성을 분석하여 냉연신 공법의 특성을 평가하며, 연구결과는 실제 제조공정 개발에 적용하게 된다.

## 2. 본 론

### 2.1 LNG 저장용 탱크구조

LNG 저장용 탱크의 일반적인 구조를 Fig.1에 나타내었다. 가장 보편적인 형상은 수직방향이지만 설치되는 환경에 따라 수평방향으로 제작하기도 한다. 저장탱크는 내조탱크와 외조탱크로 되어 있는 이중구조로 되어있고 내조탱크는 초저온(-196℃)에 있어서도 취성을 일으키지 않는 충분한 강도와 인성이 있는 오스테나이트 스테인리스강판을 사용하며, 외조탱크 소재로는 일반구조용 압연강판을 사용한다.

일반적으로 LNG 저장탱크는 설계압력 이하의 조건에서 사용하도록 규정되고 있다. 냉연신 공법을 사용한 내조탱크는 제작과정에서 내조탱크에 설계압력 이상의 강화압력(수압)을 가함에 따라, Fig. 1의 내조탱크는 소성변형에 의해 소재의 두께가 줄어들고, 부피가 증가한다.

이로 인하여 내조탱크 소재가 받는 응력은 커지나 내조탱크에 사용된 오스테나이트 스테인리스강의 가공경화로 안정성을 확보하는 원리이다.

### 2.2 냉연신 공법

냉연신 공법을 적용한 내조탱크의 거동은 아래와 같다. 일반적으로 두께  $t$  및 반경  $r$ 을 지닌 내조탱크에 압력  $P$ 를 가하였을 때 허용인장응력  $\sigma$ 를 가질 경우, 내조탱크 소재의 두께는 아래의 식을 만족해야 한다.

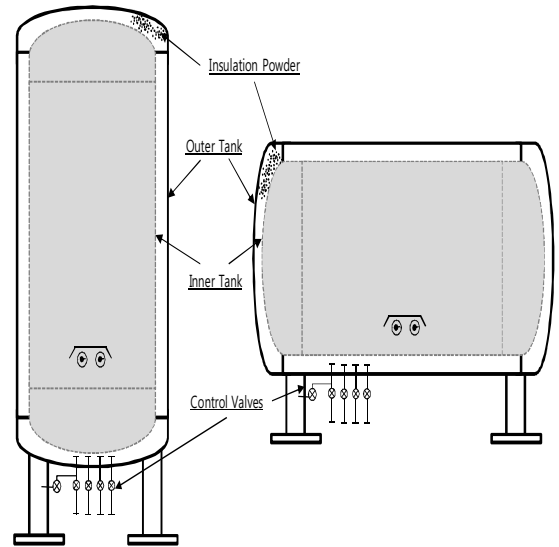


Fig. 1 Schematic drawing of pressure vessels, left is vertical pressure vessel, right is horizontal pressure vessel

$$t = (P \times r / 100 \times \sigma \times Z - 1.2 \times P) + \alpha \quad (1)$$

위의 식에서  $t$ 는 두께(mm),  $\sigma$ 는 인장응력(MPa)을 나타내며,  $Z$ 는 용접부의 효율을 나타내는데, 일반적으로 1.0을 적용한다. 또한  $\alpha$ 는 부식여유(mm)를 나타낸다. 이러한 경우 냉연신 시에 적용되는 압력수준  $P_K$ 는 아래의 식과 같다.

$$P_K = P \times \frac{S_f}{Z} \quad (2)$$

위의 식에서  $S_f$ 는 안전계수를 나타낸다.

이때 내조탱크에 발생하는 항복응력은  $\sigma_K$ 는 아래와 같다.

$$\sigma_K = \frac{P_K \times r}{t} \quad (3)$$

위의 식에 의하면 용접부의 효율이 1.0보다 작을

경우, 정해진 안전을 확보를 위해서는 재료의 두께를 키우는 방법이 있으나, P<sub>k</sub>값을 늘리는 방법도 있다.

### 3. 실 험

#### 3.1 내조탱크 설계 및 제작

##### 3.1.1 설계

LNG 저장용 내조탱크는 ASME SEC VIII DIV.1<sup>[10]</sup>의 Appendix44의 규정에 따라 설계하였다. Fig. 2는 설계한 내조탱크의 크기를 나타낸다. 또한 내조탱크의 부피 15.232m<sup>3</sup>, 내부 설계 압력 1.765 MPa, 운전 압력 1.300 MPa, 설계 온도 -196℃, 운전 온도 -163℃, 운전 하중 15,138 kg으로 하였다.

내조탱크 제작에 사용한 소재는 LNG 저장용 내조탱크에 일반적으로 사용되는 오스테나이트 스테인리스강인 SA 240 Type 304를 사용하였으며, 냉연신 공법을 사용한 내조탱크의 허용 응력( $\sigma_k$ )은 ASME SEC VIII DIV.1<sup>[10]</sup>에 명시된 소재에 따른 허용응력에 따라 270 N/mm<sup>2</sup>로 하여 판재의 두께를 계산하였다.

내조탱크의 각 부위별 두께는 ASME 규정에 따라 계산한 결과 동체(shell)는 7.9 mm, 경판(head)은 8.0 mm이다.

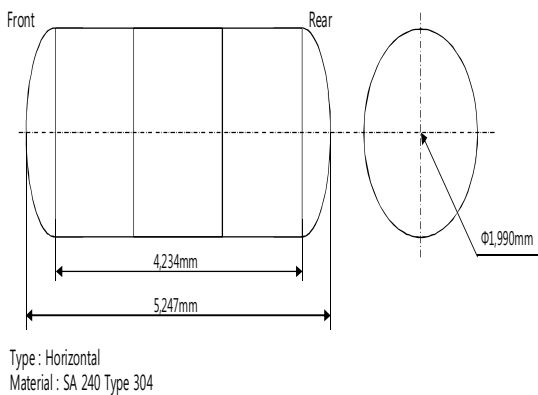


Fig. 2 Schematic drawing of inner tank size

##### 3.1.2 제작

내조탱크는 설계 도면에 따라 Fig. 3의 순으로 제작하였다. 내조탱크 제작에 사용한 소재는 SA 240 Type 304 철판(plate)으로 화학성분 및 기계적 특성을 Table 1에 나타내었으며, 설계 도면에 따라 Fig. 3(a)와 같이 가로 세로 허용오차 ±2 mm, 대각선 허용오차 ±2 mm로 절단하였다.

절단된 철판은 Fig. 3(b)와 같이 개선 및 벤딩(bending) 후 Fig. 3(c)와 같이 용접하였다. 용접 시작 전 시편(가로 500 mm × 세로 150 mm)을 부착하여 모재와 동일한 조건으로 용접하여 동체를 제작하였으며, 제작된 동체는 설계도면을 기준으로 하여 동체와 동체를 Fig. 3(d)와 같이 동체의 길이 이음용접의 위치를 고려하여 제작하였다.

경판은 1.221 × D(1,990 mm)로 절단하여 경판을 성형(forming)하였다. 성형 과정에서 철판의 손상을 방지하기 위해 프레스 성형기위에 형깊을 올려 상부 및 하부 경판을 성형하였으며, 제작된 상부 경판에는 노즐(nozzle)구멍을 뚫은 후 노즐을 설치하였다.

제작된 동체 및 경판은 각 용접이음매의 거리를 50mm 이상으로 하여 용접하였다. 상부경판은 Fig. 3(e)에 나타낸 것과 같이 맨홀을 통하여 용접 후 바깥쪽을 가공하는 백가우징(back gauging) 후 용접하였으며, 내조탱크에 설치할 배관과 부속품을 내조 제작도면에 따라 설치하였다.

Table 1 SA 240 Type304 (a) chemical composition and (b) mechanical properties

##### (a) Chemical Composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.023	0.39	1.49	0.031	0.001	8.10	18.20	0.045

##### (b) Mechanical Properties

T.S(MPa)	Y.S (MPa)	E.L (%)	HBW	Young's Modulus (MPa)
613	338	54	178	199,900

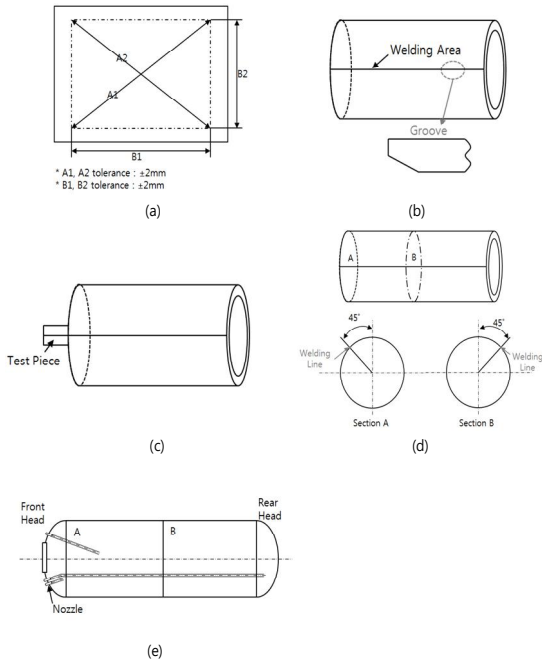


Fig. 3 Schematic drawing of pressure vessel manufacture procedure

### 3.1.3 냉연신 및 신장 길이 측정

내압시험이 완료한 내조탱크는 Fig. 4에 나타난 압력 시간 그래프와 같이 냉연신 공법을 실시하였다. 냉연신의 유지 압력은 설계압력(design pressure) 1.765 MPa의 1.5배 이상(2.67 ~ 2.70 MPa, 26.7 ~ 27.0 bar)으로 하여 내조탱크가 충분히 신장될 수 있도록 하였다.

또한 냉연신 동안의 동체의 각 부위별 신장되는 길이(동체 원주)를 측정하기 위하여 Fig. 9 및 Photo 1과 같이 냉연신전 줄자(Komelon, 0~20m)를 Fig. 5에 따라 동체에 고정시켰다. Fig. 6은 냉연신 동안 15분 간격으로 압력에 따른 구간별 늘어난 길이를 나타낸다. 냉연신은 내조탱크의 부피가 커짐에 따라 탱크 소재 두께가 감소하게 된다. 이를 확인하기 위하여 초음파식 두께 측정기(TQC, LD7016)를 사용하여 Fig. 7에 나타난 위치에서 경관 및 동체의 두께를 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

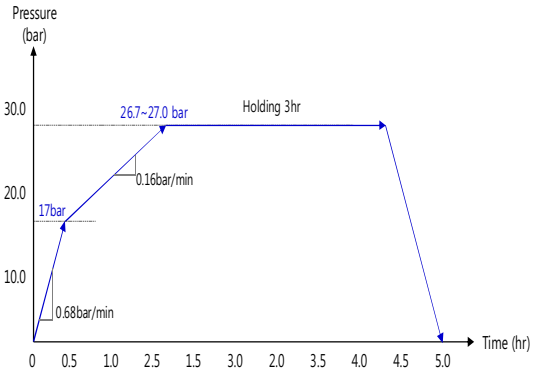


Fig. 4 Schematic diagram of cold stretch pressure & time

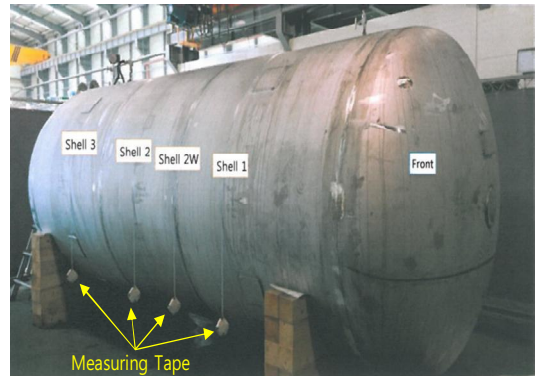


Photo 1 Appearance of inner tank

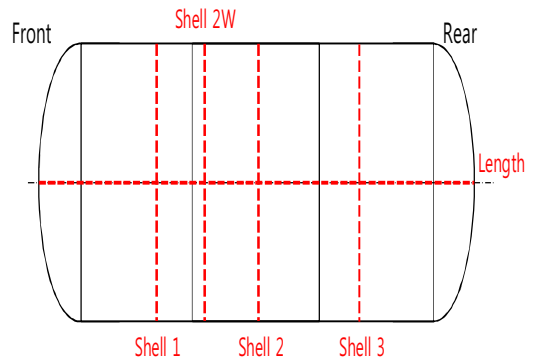


Fig. 5 Schematic drawing of measured location in inner tank

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 냉연신 전후의 부피 비교

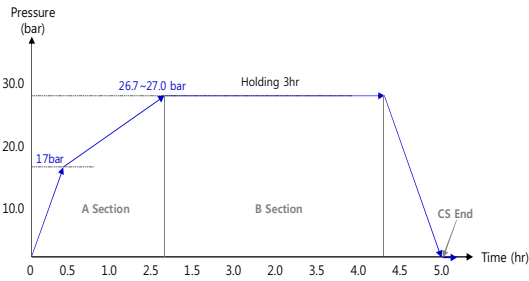
냉연신 후의 내조탱크의 경판의 두께 변화는 Fig. 7에서 나타낸 두께측정위치에서의 결과인 Table 2의 결과에서 확인할 수 있듯이 7.9 mm, 8.0 mm로 변화가 없었다. 하지만 동체의 경우 냉연신이 진행되는 동안 동체의 원주길이가 증가하는 것을 Fig. 6의 냉연신 전후의 원주길이측정 결과에서 확인할 수 있다. 즉 냉연신 후 부피의 팽창은 내조탱크의 동체의 크기로 결정되는 것을 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서 제작된 내조탱크의 냉연신 전후의 신장된 길이 및 두께 감소를 바탕으로 하여 동체의 내경 및 외경의 치수를 Fig. 8 및 9에 나타내었다.

냉연신 전후의 부피비교를 위하여 동체의 길이 방향은 Fig. 6의 치수 측정결과인 4,160mm로 하였으며, 냉연신 전후의 지름은 동체의 직경 평균 값인 2,005.6mm, 2062.5mm에서 평균두께를 15.8mm(2×7.9mm), 15.6mm(2×7.8mm)을 제외한 1,989.8 mm, 2,046.9 mm로 하여 부피를 계산하였다. 계산결과 본 연구에서 제작된 내조탱크는 냉연신(26.7 bar ~ 27.0 bar, 3hr)을 통하여 동체의 부피는 12.9 m<sup>3</sup>에서 13.7 m<sup>3</sup>으로 약 9.5% 부피가 증가하였다.

### 4.2 냉연신 전후의 인장 및 경도특성 비교

냉연신 후 내조탱크의 각 부위별 인장시험결과를 Fig. 10에 나타내었다. 동체의 인장강도는 평균 691.1MPa, 항복강도 평균 470.5MPa, 연신율 평균 44.78%이다. 경판은 인장강도 평균 654.5MPa, 항복강도 평균 447.8MPa, 연신율 27.6%로 동체와 비교 하여 낮은 인장, 항복강도 및 연신율이 나타났다.

각 부위별 인장 특성을 모재와 비교하였을 때 동체의 경우 인장강도 12.7%, 항복강도 39.2%가 증가하였으며, 연신율은 20.5%감소하였다. 경판은 인장강도 6.8%, 항복강도 32.5%증가하였으며, 연신율은 51%감소하였다.



A Section (unit:mm)								
Location	Before CS*	Time (minute)						
		0"	15	30	45	60	75	90
Shell 1	6303.5	114.5	130.5	137.5	142.0	144.5	146.5	149.5
Shell 2W	6296.5	156.5	176.0	182.0	188.5	192.0	194.0	198.0
Shell 2	6301.5	190.5	210.5	220.5	226.5	229.0	232.0	236.0
Shell 3	6302.0	117.0	132.0	140.0	144.0	146.5	148.5	151.5

B Section								CS End
Location	Before CS*	Time (minute)						
		105	120	135	150	165	180	
Shell 1	6303.5	151.5	153.5	155.0	155.5	156.0	156.5	144.0
Shell 2W	6296.5	200.0	203.0	204.0	205.0	206.0	206.5	193.0
Shell 2	6301.5	238.5	241.5	243.0	243.5	244.5	245.0	231.5
Shell 3	6302.0	153.5	155.5	157.0	157.5	158.5	158.5	146.5

	Before CS	After CS
Length	4,160mm	4,160mm

\* CS : Cold Stretch

Fig. 6 Circumferential & length measurement by section

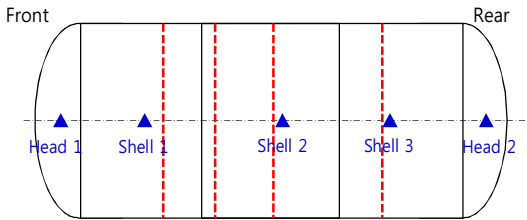


Fig. 7 Schematic drawing of thickness measured location

Table 2 Thickness verification of inner tank

(unit : mm)						
Location	Before CS*		After CS		Reduce Rate(%)	
	1	2	1	2	1	2
Shell 1	7.9	7.9	7.7	7.7	2.5%	2.5%
Shell 2	7.9	7.9	7.6	7.7	3.8%	2.5%
Shell 3	7.9	7.9	7.7	7.9	2.5%	0.0%
Head 1	7.9	7.9	7.9	7.9	0.0%	0.0%
Head 2	8.0	8.0	8.0	8.0	0.0%	0.0%
AVE.	7.9	7.9	7.8	7.8	1.77%	1.01%

\* CS : Cold Stretch

경도 값은 Fig. 11에 나타난 것과 같이 경판의 경도값이 모재의 경도값과 비교하여 33.9% 증가하였으며, 동체의 경우 16.9% 증가하였다.

위의 결과는 오스테나이트 스테인리스강의 상변태로 인한 강화이론과 부합된다.<sup>[1,2,7,8]</sup> 즉 소성 변형이 많이 가할수록 오스테나이트 스테인리스강의 오스테나이트 조직이 경한 마르텐사이트 조직으로 변태되어 강도 및 경도 값은 증가하나, 연신은 감소한 것으로 사료된다. 이러한 특징은 앞서 냉연신 전후의 오스테나이트 스테인리스강 소재의 미세조직 및 EBSD(electro back scattered diffraction)이 이용하여 상 변태 측정된 참고문헌에서도 확인 할 수 있다<sup>[1,3,9]</sup> 이에 제작된 내조탱크의 모재와 냉연신 후의 조직을 비교하였다. Photo 2(a)는 냉연신 전의 오스테나이트 스테인리스강의 SEM 조직을 나타내며, Photo 2(b)는 냉연신 후의 SEM 조직을 나타낸다. 관찰결과 냉연신 후에는 오스테나이트 조직의 결정입내에 흰색의 띠 형상으로 마르텐사이트 조직이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 즉 냉연신으로 인한 소성변형으로 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되어 조직의 조밀현상으로 인장, 항복, 경도가 증가한 것을 확인할 수 있다.<sup>[1,3,9]</sup>

또한 냉연신 후 치수의 변화가 없는 경판에서 모재 및 동체와 비교하여 가장 낮은 연신특성 및 가장 높은 경도 값이 측정된 것은 프레스 가공으로 동체의 벤딩과 냉연신으로 인해 발생한 소성 변형이 동체에서 보다 경판이 크기 때문에 더 많은 마르텐사이트 조직이 변태되었기 때문이라 생각된다.

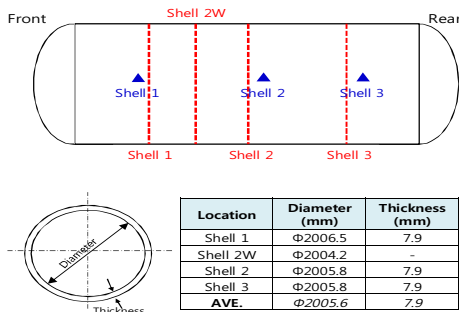
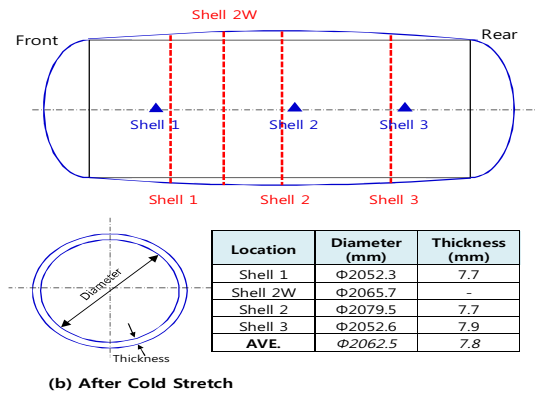


Fig. 8 Diameter & wall thickness of shell by each location before Cold Stretch



(b) After Cold Stretch

Fig. 9 Diameter & wall thickness of shell by each location after Cold Stretch

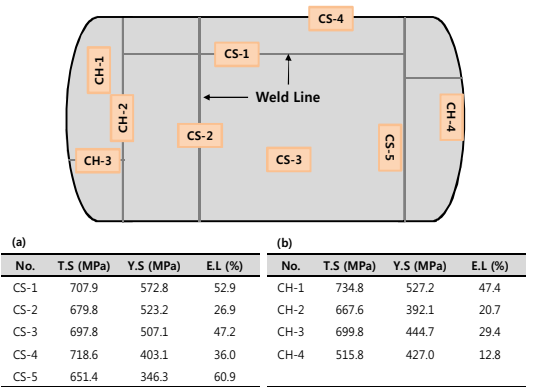


Fig. 10 Tensile test result (a) shell and (b) head

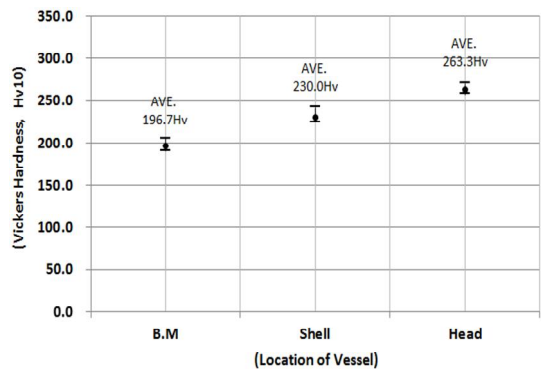


Fig. 11 Vickers hardness test result

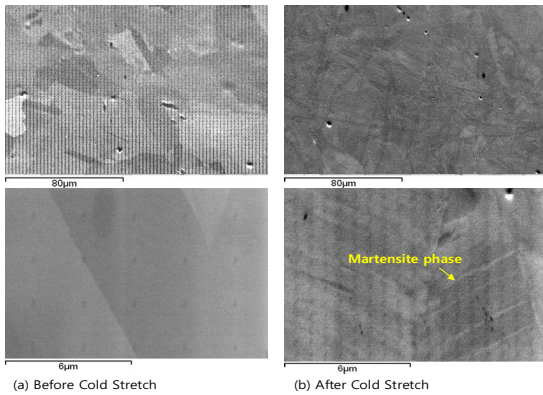


Photo 2 SEM analysis of microstructure (a)before cold stretch and (b)after cold stretch(white area martensite phase)

## 5. 결론

냉연신 공법을 사용한 압력용기 제작 및 소재의 특성을 실험 및 관찰을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 15.232 m<sup>3</sup>의 내조탱크에 냉연신(수압 26.7 bar ~ 27.0 bar, 유지시간 3시간)공법을 적용한 결과 내조탱크 동체의 부피는 12.9 m<sup>3</sup>에서 13.7 m<sup>3</sup>으로 약 9.5% 부피가 증가하였으며, 경관은 부피변화가 없었다.
2. 냉연신으로 부피가 늘어난 내조탱크 동체의 소재두께 감소는 7.9 mm에서 7.8 mm로 소폭 감소하였다.
3. 냉연신 후 동체 및 경관 인장 및 경도 측정 결과 모재대비 항복강도 35.8%, 인장강도 9.7%, 경도 25.4% 증가하였으나, 연신율은 35.7% 감소하였다.
4. 오스테나이트 스테인리스강인 SA 240 Type 304소재는 외력이 증가함에 따라 오스테나이트 조직의 결정입내에 띠 형상의 마르텐사이트 조직이 변태되어 나타난다.
5. 오스테나이트 스테인리스강의 오스테나이트 조직의 결정입내의 마르텐사이트 조직이 증가함에 따라 인장, 항복, 경도값은 증가하며, 연신율은 감소한다.

6. 냉연신 공법을 활용한 내조탱크는 냉연신 공법을 사용하지 않은 내조탱크와 비교하여 강도 및 허용응력이 증가함에 따라, 설계과정에서 소재의 두께를 30% 이상 감소시킬 수 있으며 이를 통해 원가절감의 효과를 얻을 수 있다.
7. 냉연신 공법을 활용한 내조탱크는 냉연신 공법을 사용하지 않은 내조탱크와 비교하여 공차중량(gross weight)이 감소하여 더 많은 LNG 운반이 가능함에 따라 운송비의 절감효과를 얻을 수 있다.

## 후기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.”

## REFERENCES

1. Choi, H. S., Kim, J. H., Oh, K. K. and Na, S. H., “Tensile and Fatigue Behavior of ASS304 for Cold Stretching Pressure Vessels at Cryogenic Temperature”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 40, No.5, pp. 429-435, 2016.
2. Choi, H. S., Kim, J. H., Oh, K. K. and Na, S. H., “Mechanical and Fatigue Behavior of AISI304 for Cold Stretch Pressure Vessels at Cryogenic temperature,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 39, No.3 pp.347-353, 2015.
3. Lee, Y. H., Jang, K. M., Lee, J. H., Kim, J. H. and Choi, H. S., “A Technical Review of Cold-stretch for a Cryogenic Storage Tank,” 3<sup>rd</sup> International conference on Materials and Reliability, Jeju, Korea, Nov. pp. 23-25, 2015.
4. Oiqiao, CHEN Congsheng, “Study on technique and Properties of Cold Stretching for Austenitic Stainless Steels”, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 48, No. 2, pp.283-286, 2012.

5. Lu, Y.Q., and Hui, H., "Investigation on Mechanical Behaviors of Cold Stretched and Cryogenic Stretched Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels", *Procedia Engineering* 130, pp.628-637, 2015.
6. Kim, C. H., "Optimal Design of Dual-Structured Disc of a Safety-Valve for the Specialized Pressure Vessel Considering Thermal Expansion", *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp.81-85, 2007.
7. Galle, S., Manach, P.Y. and Thuillier, S., "Mechanical behavior of a metastable austenitic stainless steel under simple and complex paths", *Material Science and Engineering A*, Vol.466, No.1-2, pp. 47-55, 2007.
8. W, Z., and H, H., "Characterization of a Metastable Austenitic Stainless Steel with Severe Plastic Distortions," *Procedia Engineering* 99, pp. 1323-1329, 2015.
9. Rodriguez, J. A., Pesci, R. and Rusinek, A., "Experimental study on the martensitic transformation in AISI304 steel sheets subjected to tension under wide ranges of strain rate at room temperature", *Materials Science and Engineering: A*, Vol, 528, No. 18, pp. 5974-5982, 2011.
10. ASME Section VIII Div.1, Coldstretching of Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels, Appendix. 44, 2013.