

원자력발전소 적용 고밀도 폴리에틸렌 배관의 맞대기 용착절차 및 검증절차 분석

오 영 진* · 박 흥 배* · 신 호 상**†

*KEPCO E&C, 전력기술연구소, 재료기술연구그룹

**한국원자력안전기술원, 고리주재검사팀

Butt-fusing Procedures and Qualifications of High Density Polyethylene Pipe for Nuclear Power Plant Application

Young-Jin Oh*, Heung-Bae Park* and Ho-Sang Shin**†

*Structural Integrity & Materials Department, Power Engineering Research Institute, KEPCO Engineering & Construction Co. Inc., Yongin-si 446-713, Korea

**Resident Inspector Office (Kori), Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon 305-338, Korea

†Corresponding author : hsshin@kins.re.kr

(Received December 18, 2013 ; Accepted December 18, 2013)

Abstract

In nuclear power plants, lined carbon steel pipes or PCCPs (pre-stressed concrete cylinder pipes) have been widely used for sea water transport systems. However, de-bonding of linings and oxidation of PCCP could make problems in aged NPPs (nuclear power plants). Recently at several NPPs in the United States, the PCCPs or lined carbon steel pipes of the sea water or raw water system have been replaced with HDPE (high density polyethylene) pipes, which have outstanding resistance to oxidation and seismic loading. ASME B&PV Code committee developed Code Case N-755, which describes rules for the construction of buried Safety Class 3 polyethylene pressure piping systems. Although US NRC permitted HDPE materials for Class 3 buried piping, their permission was limited to only 10-year operation because of several concerns including the quality of fusion zone of HDPE. In this study, various requirements for fusion qualification test of HDPE and some regulatory issues raised during HDPE application review in foreign NPPs are introduced.

Key Words : High density polyethylene (HDPE), Code case N-755, Fusion qualification procedure

1. 서 론

고밀도 폴리에틸렌 배관은 원전 고온 배관의 적용에는 한계가 있지만, 폴리머 특유의 우수한 내부식성으로 인해 원수 및 해수계통 배관에 대한 적용이 최근 시도되고 있다. 고밀도 폴리에틸렌 배관을 원전 안전등급 3 매설배관에 적용하기 위한 ASME Code Case-N-755¹⁾가 발행되었으며, 최근에는 개정판 Code Case N-755-1²⁾이 발행되면서 재료, 설계 및 설치 등에 대한 전반

적인 요건들이 제시되었다.

고밀도 폴리에틸렌 배관은 우수한 내부식성에도 불구하고, 전반적으로 강도가 낮으며 점탄성 특성 등으로 인해 작용하중의 속도에 따라 탄성계수가 변화하고 가동시간의 증가에 따라 허용응력이 감소하는 등 기계적 관점에서 금속배관과 큰 차이를 갖고 있다³⁾. 한편, 우수한 인성 특성으로 인해 지진 등으로 인한 토양의 변형에도 쉽게 파단되지 않는 등 구조적 건전성 관점에서 좋은 장점도 갖고 있다³⁾.

고밀도 폴리에틸렌 배관에서 일반적으로 전기용착

(electro fusion) 또는 맞대기 열융착(thermal butt-fusion) 등의 방법으로 연결부를 제작하며, 원전 안전계통 배설배관에 적용될 수 있는 Code Case N-755에서는 맞대기 열융착 방법만을 허용하고 있다. 한편, 고밀도 폴리에틸렌 배관의 원전 안전등급 3 배설배관 적용에 대한 US NRC의 우려사항이 제시되었으며⁴⁾, 용착부의 저속균열성장 등 재료물성의 특성에 대한 우려를 포함하고 있다^{4,5)}. 본 연구에서는 원전 안전등급 3 배설배관에 고밀도 폴리에틸렌 배관을 적용함에 있어, 용착절차에 따른 용착부 물성특성의 영향을 파악하고자 하였다. 용착부의 건전성 입장에서 용착부 물성을 적절하게 측정하는 방법론에 대하여 고찰하였으며, 현재 표준요건에 따른 검증시험(qualification test)법을 기준으로 검증시험 방법론의 적절성에 대해서도 분석하였다.

2. 맞대기 용착의 표준절차

폴리에틸렌 배관의 연결 방법 중 하나로 널리 사용되고 있는 맞대기 열융착 방법은 기본적으로 열판을 이용한 용착면 가열 및 압착을 통해 배관을 영구적으로 접합시키는 방법이다. 일반적인 고밀도 폴리에틸렌 배관의 맞대기 열융착은 아래의 기본 절차를 따른다⁶⁾.

- 용착기에 배관설치, 이물질제거 및 정렬
(Clamp, clean and align the pipe ends)
- 배관 끝단접촉
(Face the pipe ends)
- 배관 정렬확인
(Check alignment)
- 배관 끝단용해
(Melt the pipe faces)
- 배관 가압용착
(Join the pipe faces at a predetermined pressure)
- 압력유지냉각
(Hold under pressure until cool)

ASME Code Case N-755는 고밀도 폴리에틸렌 배관을 원전 안전등급 3 배설배관에 적용하기 위하여 발행되었으며, mandatory appendix I에서는 표준용착절차 사양서(standard fusion procedure specification)를 제시하고 있다. 본 요건서는 플라스틱배관협회(PPI)의 발행문서 TR-33⁷⁾에 기술적 기반을 두고 있으며, 가열온도, 시간 및 용착압력에 대한 상세한 요건을 포함하고 있다.

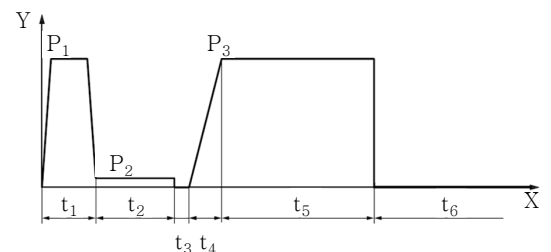
한편, 국제표준기구(ISO, International Standard

Organization)에서는 가스 및 물 이송계통의 건설에 사용되는 폴리에틸렌 배관 및 피팅류에 대한 맞대기용착(butt fusion jointing)에 대한 표준절차를 ISO 21307⁸⁾에서 제시하였다. 본 표준용착절차는 중밀도 및 고밀도 폴리에틸렌 배관에 모두 적용 가능하므로, 원전 안전계통에 적용되는 고밀도 폴리에틸렌 배관에서의 적용도 가능하다. ISO 21307에서는 아래의 세가지 종류의 용착절차를 제시하고 있다.

- 단일 저압 용착절차 (Single low-pressure fusion jointing procedure)
- 이중 저압 용착절차 (Dual low-pressure fusion jointing procedure)
- 단일 고압 용착절차 (Single high-pressure fusion jointing procedure)

압력제거 단계에서 2단계 감압을 수행하는 이 중저압 용착의 경우를 제외하고, 주요 용착변수들에 대하여 ISO 21307 단일저압용착, 단일고압용착 및 ASME CC-N-755 표준용착절차의 특성을 비교하여 Table 1에 요약하였다. Table 1에 나타난 주요 변수들을 Fig. 1에서 정의하였다.

Table에 나타난 바와 같이, 열판온도는 ISO 21307과 CC-N-755의 요건에 큰 차이가 없다. 가열유지시간의 경우 ISO 21307에서는 시간으로 요건을 제시한 반면 CC-N-755에서는 가열유지시간 동안 성장한 비드의 크기를 기준으로 요건을 제시했다는 차이가 있다. 그 밖에도 열판제거시간 및 압력유지냉각시간 등에도 일부 차이가 존재한다. ISO 21307 단일고압용착에서 제시된 용착압력은 단일저압용착에서 제시된 값보다 약 3배 큰 값이며, CC-N-755에서는 단일고압용착과 유사한 용착압력을 기준으로 더 넓은 범위의 값을 허용한다. 폴리에틸렌 배관의 맞대기용착 절차에 있어 가장



X : time
Y : pressure
t₁ : initial bead-up time
t₂ : minimum heat soak time
t₃ : maximum heater plate removal time
t₄ : maximum time achieve interfacial pressure
t₅ : minimum cooling time in the machine under pressure
t₆ : minimum cooling time out the machine
P₁ : initial bead-up pressure
P₂ : heat soak pressure
P₃ : fusion jointing pressure

Fig. 1 맞대기 용착의 압력-시간 곡선

Table 1 용착절차 주요 변수 비교 요약

주요 변수	ISO 21307		CC N-755
	단일저압용착	단일고압용착	
Heater plate temperature (°C)	200~245	200~230	204~232
Initial bead-up pressure (MPa)	0.17±0.02	0.52±0.1	0.41~0.62
Minimum initial bead-up size (mm)	0.5+0.1t _n ¹⁾	-	-
Minimum heat soak time (sec)	(11±1)t _n ²⁾	(11±1)t _n	-
Minimum bead size after heating (mm)	-	0.15t _n +1	1.5~14 ³⁾
Heat soak pressure (MPa)	0~p _{drag}	0~p _{drag}	0~p _{drag}
Maximum heater plate removal time (sec)	0.1t _n +4	0.1t _n +8	8~30 ⁴⁾
Fusion jointing pressure (MPa)	0.17±0.02	0.52±0.1	0.41~0.62
Maximum time to achieve interfacial pressure (sec)	0.4t _n +2	-	-
Minimum cooling time in the machine under pressure (min)	t _n +3	0.43t _n	0.5~1.5D ⁵⁾
Minimum cooling time out of the machine (min)	t _n +3	- ⁶⁾	-

- 주 1) 최대 6mm
 2) t_n : 배관 공칭두께 [mm]
 3) 배관 외경에 따라 결정. D/t=10의 경우 소구경(D=90mm)에서 단일고압용착 대비 2배, 대구경(D=800)에서 동일 D=800 초과시 단일고압용착대 비 작음
 4) 배관두께에 따라 결정. 현장 용착 기준 전체적으로 단일저압용착 대비 2배 이상 큼
 5) D=배관외경[in], 배관두께 2인치 초과시 1.5D 적용. D/t=10의 경우 단일고압용착 대비 46%
 6) 용착기가 제거된 후 과도한 배관 취급 전 일정한 냉각시간을 가질 것을 권장함. 그러나, 일반적인 대부분의 경우 추가의 냉각시간이 필요하지는 않음

중요한 공정변수가 열판온도 및 용착압력임을 고려할 때 용착압력에 대하여 각 표준절차에서 3배 이상의 값을 제시한 점은 주목할 만하다.

3. 맞대기 용착의 품질검증 방법

ASME Code Case N-755-1에서는 용착절차에 대한 인증 요건으로서 용착부 물성시험을 요구하고 있으며, ISO 21307에서도 폴리에틸렌 배관 용착부에 대한 품질시험을 요구하고 있다. 본 절에서는 표준별 용착부 시험요건을 검토하고, 관련된 최신 연구결과 분석을 통해 용착부 특성을 적절히 판별할 수 있는 재료시험 방법론에 대하여 고찰하였다.

3.1 용착부의 표준품질요건

Code Case N-755-1에서는 용착부 품질검사 방법으로 고속인장시험, 굽힘시험 및 장기내압시험을 요구하고 있다. 고속인장시험 및 장기내압시험은 용착절차사양서에 대한 자격인증 요건이며, 굽힘시험은 용착작업자에 대한 자격인증 요건이다. ISO 21307에서는 용착부 건전성시험 방법으로서 일반 인장시험, 내압시험 및 고속인장시험을 권장하고 있다.

Code Case N-755 및 ISO-21307에서 제시된 용착부 품질시험법을 Table 2에 요약하여 나타내었다. Table에 나타난 바와 같이, Code Case N-755 및 ISO-21307의 고속인장시험(high speed tensile test) 및

Table 2 용착부 품질시험법 요약

요건	시험방법	주요 변수 ¹⁾			합격기준
		시편 종류	시험 환경	하중 속도	
ASME Code Case N-755	고속인장충격시험	smooth tensile specimen ⁶⁾	23±2°C	152 mm/sec	연성파괴
	장기내압시험 ²⁾	pipe with internal pressure	80°C, 수환경	-	직관과 동일
	굽힘시험	general bedding specimen ⁷⁾	상온	-	용착부 파손/균열 없음
ISO-21307	인장시험 ³⁾	short length tensile specimen ⁸⁾	23±2°C	5 mm/min	없음
	정수압(내압)시험 ⁴⁾	pipe with internal pressure	80 °C	-	없음
	고속인장시험 ⁵⁾	smooth tensile specimen ⁶⁾	23±2°C	152 mm/sec	없음

- 주 1) D_n=300 SDR11 기준 (OD=318mm, t=28.9mm)
 2) ASTM D3035 or ASTM F714
 3) ISO-13953
 4) ISO-1167-1, -3 and -4
 5) ASTM F2634
 6) 그림 2의 (a) 참고
 7) 그림 2의 (b) 참고
 8) 그림 2의 (c) 참고

내압시험(pressure test)은 시험환경 및 방법이 완전히 동일하다. 반면에 Code Case N-755에서는 굽힘시험(free bend test)을 요구하고 있으나, ISO-21307에서는 짧은 인장시편(short length tensile specimen)을 이용한 인장시험을 권장하고 있다는 차이점이 있다. 모

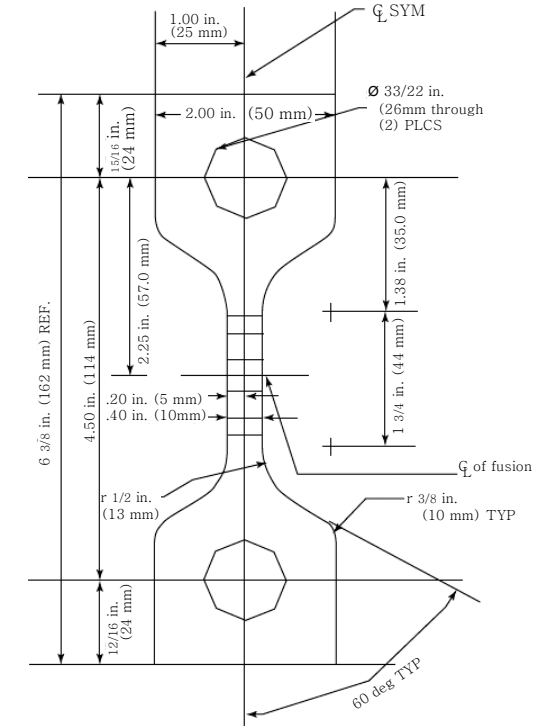
든 시험법에 대하여 Code Case N-755에서는 합격기준을 제시하고 있는 반면, ISO-21307에서는 별도의 합격기준을 제시하고 있지 않으므로 실제 산업에 적용되기 위해서는 추가의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 선행연구결과 검토 - Troughton

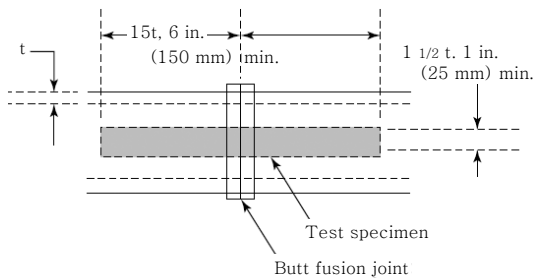
Troughton은 ISO-21307 저압용착 요건을 기준으로 고압용착 및 저온용착에 따른 물성변화 특성을 분석하였다⁹⁾. 시험된 용착요건의 주요 사항은 아래와 같으며, 용착조건별로 용착부의 단기 및 장기물성을 측정하여 비교하였다.

- 조건 1 (ISO-21307 저압용착) : 19bar - 230°C
- 조건 2 (고압용착) : 95bar - 230°C
- 조건 3 (저온용착) : 19bar - 160°C

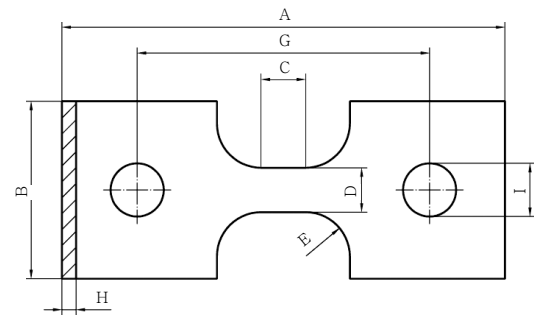
단기물성시험으로서 굽힘시험, 단순인장시험 및 노치인장시험이 수행되었으며, 시험편 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 시험결과 모든 굽힘시험 및 단순인장시험에서 용착부의 파괴가 발생하지 않았으며(시험경험 및 타 문헌 등을 참고할 때, 굽힘시험의 경우 모재 및 용착부에 균열이 발생하지 않았으며, 인장시험의 경우 모재에서 연성파단이 발생하였다는 의미로 추정), 저자는 본 결과에 대하여 굽힘시험 및 단순인장시험이 용착부제작에 대한 품질요건 시험으로서의 부적절성을 나타내는 결과라고 주장하였다.



(a) 고속인장시험시편 (high speed tensile test specimen) - CC N-755²⁾

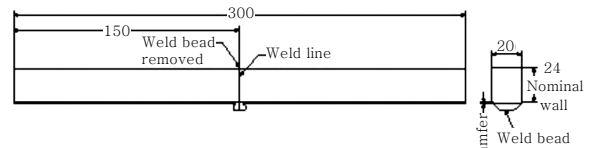


(b) 굽힘시험 (free bend specimen) - CC N-755²⁾

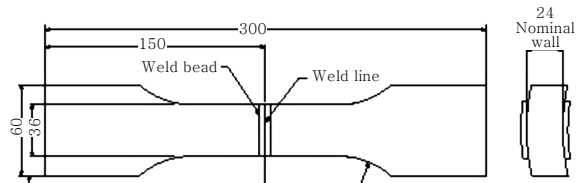


(c) 짧은 인장시험 시편 (short length tensile specimen) - ISO 21307 (ISO 13953)

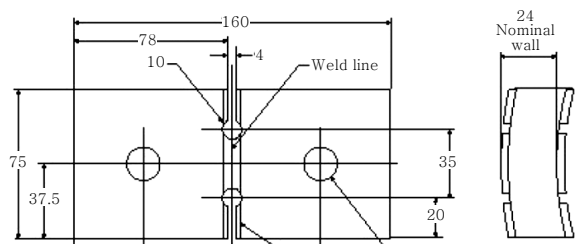
Fig. 2 용착부 물성시험을 위한 시편형상



(a) 굽힘시험



(b) 단순인장시편



(c) 노치인장시편

Fig. 3 Troughton의 용착부 단기물성시험 시편형상

노치인장시험을 이용한 단기물성시험에서는 파단하중을 기준으로 모재 및 각 용착부에 따른 차이가 거의 나타나지 않았으나, 파단변형률에너지의 경우 모재에 비해 용착방법별로 큰 편차가 나타났다. 모재의 파단변형률에너지가 가장 높게 나타났으며, 용착부에서는 고압 및 저온용착부에 비해 저압표준용착부의 파단변형률에너지가 높게 나타났다. 저자는 용착부 단기물성 특성을 나타내는 인자로서 파단변형률에너지가 가장 적절하며, 단순인장시험 및 굽힘시험은 품질시험으로서 부적절하다는 점을 강조하였다.

장기물성시험으로서 노치크립시험, 배관인장크립시험 및 배관내압시험이 수행되었다. 노치크립시험의 경우 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 40mm 선단반경의 노치를 포함하고 있으며, 배관인장크립시험에서는 배관 전체에 축방향 인장하중을 가하였으며 내압은 적용하지 않았다. 노치크립시험 결과 저온용착부의 파단시간이 가장 길게 나타났으며, 배관인장크립시험에서는 고압용착에서 파단시간이 가장 길게 나타났다. 노치크립시험과 배관인장크립시험 결과가 일관성을 갖지 않는 것에 대하여 저자는 용착부에서의 응력분포 차이에 기인한 것으로 추정하였으며, 배관인장크립시험이 실제 배관 용착부의 특성을 더 잘 나타낼 것이라고 주장하였다. 하지만, 내압을 가하지 않은 배관인장시험의 응력분포 특성이 실제 배관에서 가해지는 응력분포 특성과 유사할 것

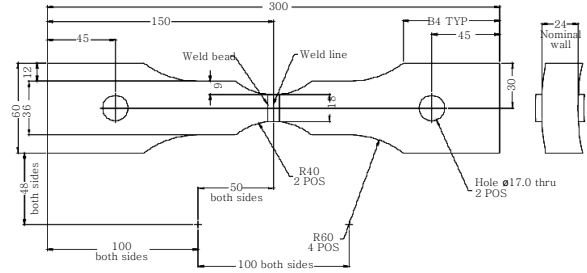


Fig. 4 Troughton의 용착부 장기물성시험 시편형상⁹⁾

이라고 추정하는 것은 적절하지 않은 것으로 판단된다.

배관내압시험의 경우 모두 모재부에서 파손되었다. 하지만, 용착부의 경우 축응력에 대한 취약성을 나타낼 것으로 추정되는 반면, 배관내압시험에서는 축응력에 비해 원환응력이 약 2배 크게 작용하게 됨을 고려할 때 배관내압시험 결과 모재에서 파손되었다는 사실이 모재에 비해 용착부의 특성이 우수함을 입증할 수는 없음을 알 수 있다.

3.3 선행연구결과 검토 - Beech et. al.

Beech 등은 용착절차 표준별 차이점을 보완하는 국제표준(global standard) 개발을 위한 연구를 수행하고 있으며, 이를 2008년 이후로 Plastic Pipe Conference에 발표해 오고 있다¹⁰⁻¹²⁾. 용착부는 ISO-21307 기준

Table 3 용착부 시험용 용착배관 제작요약 - 용착변수 요건표

DN300, DR11 : OD 319.7 mm (12.59 inch), t 31.2 mm (1.228 inch) ID 257.3 mm, Crossover area 282.78 cm ²					
Parameters		Cond. 1 ¹⁾	Cond. 2 ¹⁾	Cond. 3 ²⁾	Cond. 4 ²⁾
Heater plate temperature [°C]	T	208.0 (±3.0)	230.0 (±3.0)	208.0 (±3.0)	230.0 (±0.0)
Drag pressure [bar]	p _{drag}	-			
Initial bead-up pressure [bar]	p ₁	p ₃			
Initial bead-up size [mm]	d ₁	- ³⁾	- ³⁾	≥ 3.23	≥ 3.23
Initial bead-up time [sec]	t ₁	70 ⁴⁾	60 ⁴⁾	90 ⁴⁾	90 ⁴⁾
Bead size after heating [mm]	d ₂	≥ 6.0	≥ 6.0	- ⁵⁾	- ⁵⁾
Heat soak time [sec]	t ₂	328 ⁶⁾	200 ⁶⁾	≥ 328	≥ 328
Heat soak pressure [bar]	p ₂	p _{drag}			
Heater plate removal time [sec]	t ₃	≤ 5.0			
Fusion jointing pressure [bar]	p _{int} ⁷⁾	4.6 (±0.4)	4.6 (±0.4)	1.7 (±0.4)	1.7 (±0.4)
Time to achieve interfacial pressure [sec]	t ₄	≤ 12.9			
Cooling time in the machine under pressure [sec]	t ₅	≥ 1080	≥ 1080	≥ 1860	≥ 1860
Cooling time out of the machine [sec]	t ₆	-	-	≥ 1860	≥ 1860

주 1) CC N-755-1 기반. 일부 사항 ISO 21307 high pressure 참조
 2) ISO 21307 low pressure 기반
 3) 눈으로 360도 비드 형성 여부만 확인. 비드크기 요건 없음
 4) 초기비드 크기요건을 기준으로 예비시험 결과를 바탕으로 통일된 초기비드 형성시간 적용
 5) 가열 후 비드크기 요건 없음. 가열유지시간 기준으로 열판 제거
 6) 가열 후 비드크기 요건을 기준으로 예비시험 결과를 바탕으로 통일된 가열유지시간 적용
 7) P_{int} = P₃ - P_{drag}

단일저압, 이중저압 및 단일고압 용착절차에 따라 제작되어 시험되었다. 각 용착절차별 용착압력은 아래와 같다.

- 단일저압 : $0.17 \pm 0.02 \text{MPa}$
- 이중저압 : $0.15 \pm 0.02 \text{MPa} \rightarrow 0.025 \pm 0.002 \text{MPa}$
- 단일고압 : $0.52 \pm 0.10 \text{MPa}$

단기물성시험으로서 노치인장시험(WIS 4-32-08¹³) 기준 및 굽힘시험이 수행되었다. 노치인장시험결과 이중저압용착부의 변형률에너지가 가장 높게 나타났으며, 단일저압 및 단일고압용착부가 비슷한 경향을 나타내었으나, 평균값 기준으로 단일저압용착부의 변형률에너지가 단일고압용착부에 비해 약 6% 높게 나타났다. 굽힘시험 결과에서도 이중저압용착부에서만 파손이 전혀 나타나지 않았으며, 단일저압 및 단일고압용착부에서는 일부 시편에서 파손이 나타났다.

3.3.1 장기물성시험으로서 일반인장시편 크립시험

(EN 12814-3¹⁴ 기준) 및 균열시편시험(full notched creep test, FNCT, ISO-16770¹⁵ 기준)이 수행되었다. 일반인장시편 크립시험은 아직 시험이 진행중이며, FNCT 시험에서는 단일저압 및 이중저압 용착부의 파단시간이 높게 나타났으며, 단일고압 용착부의 파단시간은 단일저압 및 이중저압 용착부와 비교하여 약 38% 작게 나타났다.

4. HDPE 원전 안전등급 적용관련 규제검토

지금까지 HDEP가 원전 안전등급에 적용된 사례는 영국 및 미국 원전 안전등급 3 필수냉각계통 등에 제한되고 있다. 이러한 적용상의 제한은 다음과 같은 현안사항이 존재하기 때문으로, 이에 대한 해결이 원전 안전등급계통 HDPE 적용확대에 중요한 선결조건이다.

4.1 용착품질

탄소강 배관의 용접과는 달리 원전에 적용된 경험이 많지 않은 HDPE 배관은 현장 설치과정에서 불완전한 용착(Cold Joints 등)이 발생할 가능성이 높다는 우려가 제기된다. 이러한 불완전한 용착문제와 관련하여 HDPE 제품간 불균일성이 주요원인으로 지목되고 있다. 폴리머의 레진 및 배관 제작사, 공급사에서 제공되는 제품의 균질성 유지가 이러한 불완전 용착문제를 해결하기 위한 중요한 관건으로, 효과적인 품질관리를 위하여 HDPE 재료 및 배관 공급망에 대해서 원자력 제품에 적용되는 것과 같은 수준의 엄격한 품질보증프로그램의 도입이 요구된다고 할 수 있다.

특히, 해외 원전 안전등급 3 배관에 적용되고 있는 PE4710의 경우, 폴리머 제작단계의 포함되는 첨가물이 제작사 특허 및 지적재산권 문제로 배관성능 검증기관에 상세한 첨가물 성분 및 함량의 공개가 제한되고 있는 상황이며, 이에 따른 제작사간 폴리머 재료특성의 차이가 존재하고, 시공단계에서 표준 용착절차 적용에도 불구하고, 용착이음부간 특성차이가 초래될 수 있다.

표준 용착절차는 시간의 경과에 따른 레진 및 배관의 일관성, 공급자간 레진 및 배관의 일관성이 요구되는 것으로, 미국을 비롯한 해외 원전 규제기관에서도 표준 용착절차서 일관성 결여에 대해 문제를 제기하고 있다.

4.2 비파괴검사 제한성

HDPE 배관 용착시 발생할 수 있는 냉간 용착(Cold Fusion) 등 폴리머 배관에서 발생할 수 있는 결함은 금속성배관에 적용되는 일반적인 비파괴검사방법(UT 또는 RT 등)으로 검출이 어렵다.

냉간 용착은 가동중 HDPE 배관누설을 야기하여 배관의 구조적 건전성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, HDPE 배관에 건전한 용착부가 형성되었는지 확인할 수 있도록 현행 비파괴검사(Non-Destructive Examination, NDE) 성능 확인, 필요시 보완할 수 있는 검사 및 평가방안을 개발해야 한다. HDPE 용착부에 적용가능한 NDE는 절차 및 검사원에 대한 인증과 실제 검사수행 범위(100% 또는 표본검사 등) 및 검출가능 최소결함 크기가 명확히 정의 되어야 한다.

미국 Callaway 발전소의 경우 필수냉각계통에 적용된 HDPE 매설배관의 모든 용착부에 대하여 100% UT를 수행하도록 하였으며, UT에 대한 모의시험을 통해 결함검출 및 크기측정에 대한 성능을 입증하도록 하였다. 이와함께 검사에 대한 합격기준을 별도로 개발하여 확인된 결함에 대해서는 모두 보수하도록 하였다.

4.3 기타 설계고려사항

HDPE 배관은 재질적인 특성상 탄성계수가 시간, 온도 및 응력에 의존하며, 이로 인해, 장기간 성능평가 및 성능확보에 어려운 점이 있다.

이외, HDPE 배관 및 재료 설계에서 고려하여야 하는 사항은 다음과 같다.

HDPE 배관은 낮은 열전도율로 인해 두꺼워 질수록 열경사도 응력(thermal gradient stress)이 발생하게 되며, 설계시 이를 고려하여야 한다.

HDPE 저온 크립 현상도 발전소 설계별 배관의 장기간 성능확보를 위해 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 배관 맞대기용착에 대한 ASME Code Case N-755 및 ISO-21307에서 제시한 표준용착절차에는 용착압력 측면에서 큰 차이가 존재한다. 본 논문에서는 원전 안전계통 적용을 위한 고밀도 폴리에틸렌 배관 맞대기 용착과 관련하여 기술기준에서 제시된 용착 절차 및 검증에 대해 고찰하고, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 현재의 PE 배관 맞대기용착 표준에서는 일반인장, 고속인장, 굽힘 및 배관내압시험(고온)이 요구되고 있음
- 2) HDPE 재료 및 배관 건전성 확보와 관련하여 HDPE 공급망에 대해 원자력 제품에 적용되는 수준의 엄격한 품질보증관리프로그램이 마련되어야 함
- 3) 원전 안전등급 매설배관으로서 HDPE가 국내 원전에 적용되기 위해서는, 해외 원전 사례를 반영하여, 추가적인 파괴 시험 및 NDE 보완이 고려되어야 함
- 4) 10년이상 장기간 HDPE 원전 안전등급 적용을 위해서는, HDPE 재질특성을 고려한 설계 및 장기성능 평가 방법이 개발되어야 함

References

1. ASME, Code Case N-755, "Use of Polyethylene Plastic Pipe Sections, III, Division I and XI", 2007
2. ASME, Code Case N-755-1, "Use of Polyethylene Plastic Pipe Sections, III, Division I and XI", 2011
3. Plastic Pipe Institute, "Handbook of PE Pipe", 2nd Edition
4. Eric Focht, "NRC Concerns Regarding the Use of HDPE Piping in Safety-Related Nuclear Applications", Use of HDPE for Power Plant Piping Systems Workshop, Charlotte, North Carolina, 2011

5. D.J. Shim, P. Krishnaswamy and E. Focht, "Comparison of parent and butt fusion material properties of high density polyethylene", Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-78066, 2009
6. Steve Sandstrum, "HDPE Pipe - Connections", Use of HDPE for Power Plant Piping Systems Workshop, Charlotte, North Carolina, 2011
7. Plastic Pipe Institute, TR-33, "Generic butt fusion joining procedure for field joining of polyethylene pipe", 2012
8. International Standard, ISO 21307, second edition, corrected version, "Plastic pipes and fittings - Butt fusion jointing procedures for polyethylene(PE) pipes and fittings used in the construction of gas and water distribution systems", 2011
9. Mike Troughton, "A comparison of mechanical test methods for butt fusion joints in polyethylene pipes", NACE northern area western conference, Calgary, Alberta, 2010
10. S.H. Beech and M. Ritz, "Harmonisation of polyethylene pipe buttfusion procedures and test methods", Plastic pipes XIV Conference Budapest, Hungary, 2008
11. S. Beech, J. Grieser, D. Lowe and P. Vanspeybroeck, "Harmonisation of polyethylene pipe buttfusion procedures and test methods", Plastic pipes XV Conference Vancouver, 2010
12. S. Beech, C. Salles and U. Schulte, "Harmonisation of polyethylene pipe buttfusion procedures and test methods - Final conclusions", Plastic pipes XVI Conference Barcelona, 2012
13. UK Water Industry, WIS 4-32-08, Issue 3, "Specification for the fusion joining of polyethylene pressure pipeline systems using PE80 and PE100 materials", 2002
14. British Standard, EN 12814-3:2000, "Testing of welded joints of thermoplastic semi-finished products-Part 3: Tensile creep test", 2000



- 오영진
- 1975년생
- 한국전력기술(주) 전력기술연구소
- 파괴역학, 재료강도, 건전성평가
- e-mail : yjoh2@kepco-enc.com



- 신호상
- 1968년생
- 한국원자력안전기술원
- 용접야금, 비파괴검사, 부식피로
- e-mail : hsshin@kins.re.kr



- 박홍배
- 1964년생
- 한국전력기술(주) 전력기술연구소
- 경년열화평가, 재료강도, 환경피로
- e-mail : hbpark@kepco-enc.com