

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘EMP 대응 건축설비시스템 요소기술 개발’(연구개발 기간 : 2015. 6. ~ 2017.6.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2017. 9. 21.

주관연구기관명 : 경민대학교 산학협력단 (대표자) 김환철 (인)

공동연구기관명 : 연세대학교 산학협력단 (대표자) 최문근 (인)

참여기관명 : 대한실드엔지니어링(주) (대표자) 이봉희 (인)

주관연구기관책임자: 방승기

공동연구기관책임자: 육종관

참여기관책임자: 최병권

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C09 8186-02	해당 단계 연구 기간	2016. 6. 24. ~ 2017. 6.23.	단계구분	1/1 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부과제명	EMP 대응 건축설비시스템 요소기술개발			
연구책임자	방승기	해당단계 참여 연구원 수	총: 20명 내부: 6 명 외부: 14명	해당단계 연구개발비	정부:197,000천원 기업: 67,000천원 정부 외: - 천원 계:264,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 17명 내부: 7명 외부: 10명	총 연구개발비	정부:395,000천원 기업:135,000천원 정부 외:- 천원 계:530,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	경민대학교 산학협력단			참여기업명 대한실드엔지니어링(주)	
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명:-	
위탁연구	연구기관명:-			연구책임자:-	
요약				보고서 면수: 184	
1. EMP 차폐장치 일체형 외기도입덕트 시뮬레이션, 배기덕트 설계 및 제작 가이드라인					
2. EMP 차폐장치 일체형 급수/배수/급유 배관 시뮬레이션, 설계 및 제작 가이드라인					
3. EMP 차폐를 위한 건축설비시스템의 요소기술 확보					
4. EMP 차폐일체형 형상최적화를 위한 Chart Tool 개발					
5. 다층형 EMP 차폐 방안 개발(덕트 및 배관용)					

연구의 목적 및 내용	미국의 국방기준에서 EMP 방호 최소성능은 80dB 이상이며, 주한미군의 차폐시설, 국방부의 차폐시설도 80dB이 기준이다. 1987-2001년 사이에 준공된 주한미군 EMP 방호시설 4곳 모두 100dB 이상이다. 우리나라의 경우도 2003년 준공된 국방부 청사 등의 EMP 방호시설이 모두 100dB 이상 급이다. 국내 민간시설의 경우 군용보다 강화된 기준을 적용하고 있다. 삼성전자의 경우 제품시험용 EMP 차폐실은 100dB 또는 110dB 이상(2002년), 쌍용자동차의 차량용 전자파 측정시설은 110dB 이상(2003년), 전파연구원의 전파측정시설은 110dB 이상으로 되어있다. 국내의 민간시설이 미국의 국방기준보다 강화된 기준을 사용하지만 국방시설의 경우는 많은 인원이 동시에 거주하는 시설이고 대형인 것에 반해서 민간시설의 경우는 소수의 인원이 실험을 위해서 잠시 사용하는 시설이기 때문이다. 따라서 본 연구에서의 최종목표는 EMP 차폐 일체형 급기/배기 덕트와 급수/배수/유류배관을 대상으로 하고, EMP 차폐성능 80dB급과 100dB 급으로 설정한다.				
연구개발성과	1. EMP 차폐장치 일체형 외기도입덕트 시뮬레이션, 배기덕트 설계 및 제작 가이드라인 2. EMP 차폐장치 일체형 급수/배수/급유 배관 시뮬레이션, 설계 및 제작 가이드라인 3. EMP 차폐를 위한 건축설비시스템의 요소기술 확보 4. EMP 차폐일체형 형상최적화를 위한 Chart Tool 개발 5. 망(網) Type 차폐 가능성 평가 6. 다층형 EMP 차폐 방안 개발(덕트 및 배관용)				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	1. 방호시설의 건축설비 요소에 대한 설계기술 및 관련제품 제작 기술 확보 2. 해당기술에 대한 설계/시공/제품제작 가이드라인제시 3. 설계방안 및 엔지니어링 기술 확보				
핵심어 (5개 이내)	전자기파	공조덕트	급배수관	방호시설	컴퓨터모사

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	According to military standard of the United States, the minimum requirement for electromagnetic pulse (EMP) shielding is 80 dB. US armed forces in Korea (USFK) and Korea military also have accepted identical standards. For instance, the USFK protective facilities which were completed in 1987 – 2001 satisfy shielding effectiveness of 100 dB. The government building of ministry of national defense of South Korea is built in 2003, which meets the 100 dB requirement. The stricter criterion is applied for private facilities: 100 dB or more than 120 dB for Samsung Electronics (2002), 100 dB for Ssangyong Motor (2003), and 110 dB for National Radio Research agency (RRA). Domestic private facilities usually adopt tightened shielding effectiveness criteria than military standard of the United States. However, military facilities include large scale buildings which can accommodate a number of people while private facilities are only available for a handful of people with the purpose of experiments. Consequently, the objective of this research is EMP shielding effectiveness of 80 dB and 100 dB. The analysis target is built-in EMP shielding ventilation duct and pipes for air supply and drainage. – Simulation for optimized shape – Shielding experiment in laboratory (EMP) – Built-in EMP shielding ventilation duct and pipes for air supply and drainage				
Results	1. Design guideline for built-in EMP shielding ventilation duct 2. Design guideline for built-in EMP shielding pipes for air supply and drainage 3. Possession of core technology for EMP shielding 4. Chart tool development for optimized EMP shielding facilities 5. Shielding effectiveness evaluation of mesh-type facilities 6. Development of multi-layered design for EMP shielding (duct and pipes)				
Expected Contribution	1. Design technology for elements of protection facilities 2. Guideline for design/construction/manufacturing for proposed technology 3. Development of core engineering technology and design strategy				
Keywords	EMP	Duct	Utility Pipe	Protection Facility	CFD

< Contents >

1. Summary of R & D achievements	7
2. Technology development status with domestic and abroad	12
3. Research activities and results	24
4. Goal achievement and contribution of related field	177
5. Utilization of R & D achievements	178
6. Abroad science and technology information in the research	178
7. Security rating of R & D achievements	178
8. Research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System	179
9. Implementation of safety measures in laboratories by R & D achievements	
10. Representative research performance of R & D achievements	179
11. Etc	180
12. References	181

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	12
3. 연구 수행 내용 및 성과	24
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	177
5. 연구개발성과의 활용 계획	178
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	178
7. 연구개발성과의 보안등급	178
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	179
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	179
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	180
11. 기타 사항	180
12. 참고 문헌	181

(1) 연구개발 목적

EMP(전자기파)탄은 미래전쟁의 양상을 바꿀 무기로 평가된다. 40 ~60km 고도에서 20kt 급 핵무기가 터질 경우 방출되는 전자기파는 반경 100 km 이내의 전자장비를 마비시킬 수 있는 전자기파가 방출된다. EMP에 대한 대책은 전자 장비를 중심으로 사용하는 스마트그리드 전력망, 송배전망 및 변전소, 발전소, 군 지휘 통제시설, 금융전산망 백업센터, 인터넷 데이터센터 등 많은 곳에서 나타나고 있으며 관련 시장의 경우도 급속도로 증가하는 추세를 나타내고 있다.

미국의 국방기준에서 EMP 방호 최소성능은 80dB 이상이며, 주한미군의 차폐시설, 국방부의 차폐시설도 **80dB이 기준**이다. 1987-2001년 사이에 준공된 주한미군 EMP 방호시설 4개소 모두 100dB 이상이다. 우리나라의 경우도 2003년 준공된 국방부 청사 등의 EMP 방호시설이 모두 100dB 이상 급이다.

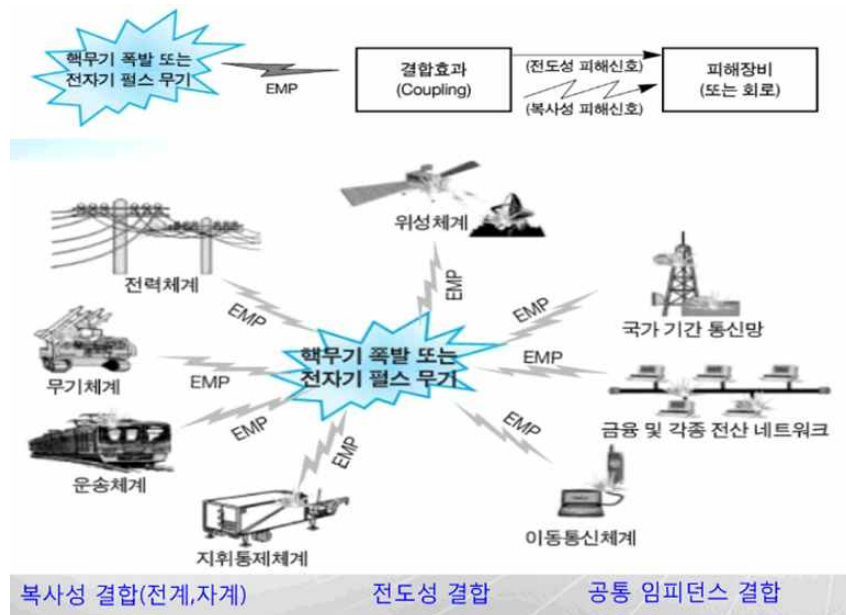
국내 민간시설은 군용보다 강화된 기준을 적용하고 있다. 삼성전자의 제품시험용 EMP 차폐실은 100dB 또는 110dB 이상(2002년), 쌍용자동차의 차량용 전자파 측정시설은 110dB 이상(2003년), 전파연구원의 전파측정시설은 **110dB 이상**으로 되어있다.

국내 민간시설이 미국의 국방기준보다 강화된 기준을 사용하지만 **국방시설은 많은 인원이 동시에 거주**하고 짧게는 2-3일, 길게는 일주일 이상 거주하는 시설이고 대형인 것에 반해서 민간시설은 소수의 인원이 실험을 위해서 잠시 사용하는 시설이고 대부분이 차폐 Room type이다. 또한 국방시설의 경우에는 **화생방**에 대한 고려도 함께 되어있기 때문에 단순하게 기준값 만을 가지고 평가하기에는 다소 무리가 있다.



[EMP탄 및 피해규모]

북한은 10-20기의 원자폭탄을 보유하고 있는 것으로 알려지고 있으며 핵폭발시 발생하는 EMP에 대한 적절한 방호대책은 유사시에 지휘 및 통신 기능을 발휘하기 위해 필수적인 요인이다. 이와 같은 EMP를 방호하기 위해 적용하는 방법은 크게 차폐 및 POE 처리, 여파, 접지 등으로 구분되어진다. 우리나라에서도 지금은 EMP 방호에 대한 중요성을 인식하고 군 시설을 중심으로 지속적인 EMP 방호 연구를 수행하여 왔으며, 상당한 수준의 EMP 방호기술을 보유하고 있다.



[EMP에 의한 피해 대상]

(2) 연구개발의 필요성

북한은 10-20기의 원자폭탄을 보유하고 있는 것으로 알려지고 있으며 핵폭발시 발생하는 EMP에 대한 적절한 방호대책은 유사시에 지휘 및 통신 기능을 발휘하기 위해 필수적인 요인이다. 이와 같은 EMP를 방호하기 위해 적용하는 방법은 크게 차폐 및 POE 처리, 여파, 접지 등으로 구분되어진다. 우리나라에서도 지금은 EMP 방호에 대한 중요성을 인식하고 군 시설을 중심으로 지속적인 EMP 방호 연구를 수행하여 왔으며, 상당한 수준의 EMP 방호기술을 보유하고 있다.

그러나 EMP 방호실 내로 유입되는 대형 공조덕트 혹은 급배수 배관에 적용할 유체용 다중 도파관에 대한 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 시설 외부로부터 내부로 유입되는 도파관을 통한 걱정 급기·급수·급유가 가능하도록 도파관 직경 및 유전체 종류에 따라 EMP의 차폐성능의 파악 및 공조덕트/급배수 배관에 대한 최적형상기술 및 설계/제작 가이드라인이 필요하다.

방호시설은 내부 인원의 활동 및 각종 장비의 운전을 위한 설비가 필요하다. 이러한 설비는 외기도입/배기 및 환기 등을 위한 덕트와 각종 배관으로, 방호도체를 관통하게 되며, 차폐판을 관통하는 덕트와 각종 배관을 통해 EMP가 시설내부로 유입되게 되면 시설내부에 설치된 모든 전자통신기기 및 전자부품이 사용된 각종 제어기기는 기능을 상실하게 된다.

MIL STD 188-125-1에서는 EMP 유입을 방지하기 위해서 덕트에는 Honeycomb를 설치하고, 파이프에는 도파관(WBC, Waveguide Below Cutoff)을 설치하여야 한다고 하지만, 덕트 및 파이프에 설치된 허니컴과 도파관에 의해 내부의 유효 단면적이 줄어들게 된다. 방호시설을 건설할 경우 차폐판 관통부에서의 구체적인 공조용 환기/배기덕트, 급배수관에서의 유효 단면적 감소에 따른 설계 및 제작기술은 없는 실정이다.

또한 덕트에 설치되는 EMP 차폐시설의 형태(원형,각형, Honeycomb)와 배관내의 유전체의 종류(물, 공기, 유류 등)에 따른 EMP 전파특성등에 관한 연구도 진행된 것이 없다.

국내의 전자 및 전기분야에서의 EMP 측정기술 및 EMP차폐를 위한 각종 소재, 부품 및 기기에 대한 기술과 연구는 활발하게 진행되고 있지만, 건축물에서 EMP에 대한 관련 제품 및 구체적인 설계/시공 방법에 대한 사항은 규정되어 있는 것이 없는 실정이다.

건설은 예술이다

NewDaily

K

경제

정치

사회

북한

글로벌

연예

스포츠

문화

건강

토론방

경제종합

금융·산업

중소기업

부동산

시장·자영업

IT 과학

매체·유통

포도뉴스

오피니언

누구나 쉽게 모국어를 습득하게 되는 원리!

66일 만에 선명하게 들린다!

윤재상영이

국방부, 국정원조차도 낮은 수준의 EMP 방호시설만

[단독] 정부, 국가주요시설 EMP 공격에 無대책

EMP 당당거건도 情통부→안행부→미래부도 미려치려 "해관심, 발호 자석 수동"

최종편집 2014.06.11 11:07:59

윤재상 기자가 다른 기사 보기

view@newdailybiz.co.kr

북한이 비대칭 공격능력을 하나로 꼽히는 EMP(전자기 충격파) 공격에 IT공화국 대한민국은 사실상 삼 무방비 상태로 노출된 것으로 드러났다.

군의 경우 EMP방호가 필요한 시설 221개소 중 EMP방호능력을 확보한 것은 한자리 숫자에 불과한 것으로 알려졌다.

이 같은 군 시설과 국정원 일부를 제외한 국가기간시설 대다수가 EMP공격에 무방비 노출상태인 것으로 알려져 충격을 주고 있다.

박근혜 대통령은 최근 법정부적인 재난 안전분야 컨트롤 타워 역할을 할 국가안전처 신설을 천명했다. 이와 관련 국가기간시설 마비 등에 대한 예방 및 대응책 마련하는 과정에서 최우선 과제로 'EMP탄 개발과 방어대책', 군사통신망 공격대비 방호시설 구축대책이 논의됐다.

중앙일보 뉴스

경제

라이프

오피니언

찾아취

포토

경제

정치

사회

자주본다

문화

지역

江南新聞

영어뉴스

글로벌뉴스

뉴스종합

보도자료

정치

최신기사

경제

문화·유통

한일대

외교

북한

국방

여론조사

1조원 쏟아붓고 무용지물? 軍 EMP방호사업 '부실종합세트'

[[머니투데이]] 입력 2014.7.16 11:24

금리보기

추천

공유하기

트윗

[[머니투데이]] 김성희 기자 sunnykim@mt.co.kr

[[the300]] "합참·계통대 설비성능 약화, 발주과정도 의혹"-與 김재원

▲합참 주요지휘관 회의, 2014.7.16. 사진은 기사의 핵심내용과 관계없음(서울=뉴스1)

KBS | 편성표 | 날씨

NEWS

2014-12-25 updated 19:45

뉴스 스포츠 시사 다큐 연예 인터넷 스포츠 지역 뉴스 시청자권

전체 정치 경제 사회 국제 IT 과학 문화 라이프

뉴스 > 정치 > 단신뉴스

정치

"합참 EMP 방호 시설, EMP 공격탄에 취약" 주장

입력 2014.08.01 (17:15) 단신뉴스

오늘의 HOT플래시

2012년 준공된 합동참모본부 신형사 지휘부의 EMP 방호 시설이 북한의 EMP 탄 공격에 취약하다는 주장이 제기되었습니다.

국회 김재원 의원은 오늘 배포한 보도자료에서, 합참 지휘부 EMP 방호 성능의 기준이 2009년 설계 당시와는 달리 사공 과정에서 낮아졌다고 지적했습니다.

김 의원은 또 1985년에 건설된 주한미군 지휘시설과 2000년에 지어진 국방부 지휘시설과 비교해도 합참 지휘부의 EMP 방호 성능이 더 떨어진다고 덧붙였습니다.

EMP탄은 강력한 전자기파를 이용해 레이더와 항공기 등의 전자장비를 무력화시키는 무기입니다.

이에 대해 국방부는 합참 지휘부의 EMP 방호 성능은 전문기관의 검사를 통과해 문제가 없는 것으로 판단되지만, 만약에 대비해 다시 한번 성능을 점검하겠다고 밝혔습니다.

10살 겨저 소녀에게 찾아온 크리스마스 선물

2014년 잊지 못할 '할당 코믹 스포츠' 선물

▶ '올해도 여집안이 내리산' 열을 받는 기부원사

▶ '인터뷰'를 오피스인 동시 배포-FM 데려오고

▶ [앨리] 2014년, K리그에 던

경북지역은 한국형시 문화의 본산

대국일보

사단 지역 정치 경제 사회 문화 교육 오비니언 스포츠 일반 포토 특집 PDF

HOME > 정치 > 정치

정치

"군 EMP 방호장사, 불법 하도급 의혹"

김재원 새누리당 의원 "주요시설 지체성능 기준 미달"

2014.08.11 09:00

새누리당 김재원(경북 군위·의성·성동) 의원은 10일 특급 군사시설의 전자파(EMP, Electromagnetic Pulse) 방호 성능기준이 100dB 이상임을 국방부 내부 문서 EMP방호시설 전략화 계획에서 확인했다고 밝혔다.

현재 8군에 EMP 방호시설을 구축 중이고 앞으로 50여 개소에 EMP방호시설을 더 구축할 계획인 국방부는 북핵발로 인한 EMP를 막기 위해서는 100dB이상의 차폐능을 가진다고 일부 언론에 표명해 왔는데 북핵발로 인한 EMP를 막기 위해서도 100dB 이상의 차폐능을 필요하다는 사실이 국방부 자체 문서에 의해 밝혀진 것이다.

김 의원은 특기사항을 차의적으로 해석하여 EMP 기술과 실적이 없는 회사들에게 불법으로 하도급을 주었다는 의혹에 대해서 국방부는 아직까지도 적법하게 하도급이 이루어졌다고 주장하고 있다고 밝혔다.

김 의원은 "특급군사시설 EMP 방호시설의 성능기준을 200여 년 전에 구축한 군 EMP 방호시설보다 낮은 이유, 연혁이 앞초 제척보다 20dB이나 낮춰 사용함으로써 군 지휘시설의 EMP방호가 불가능하도록 한 이유, 그리고 이러한 사실을 알고도 전담을 승가기(가짜)인 공군현인 이유를 따지는 모두 방에서 자란 연서 "안보를 미끼로 시민을 위해 국가안보를 위태롭게 한 책임방위를 잘못한 주사해야 한다"라고 말했다.

[국내 EMP 관련 시설 수준]

표1. 전자파 차폐 대상부대 및 구비 부대 현황

단위 : 개소

구분	대상 부대	구비	진행/예정	미구비
계	221	3	32	186
육군	143	1	2	140
해군	31	-	1	30
공군	39	-	26	13
국직	8	2	3	3

2012년 10월 안규백 민주당 의원이 공개한 군의 EMP 대비 실태.

정치일보

뉴스스크랩 뉴스보내기 뉴스링크 뉴스검색

[정치]

게재 일자 : 2013년 04월 08일(월)

北 EMP 방호시설 구축 사실상 의무화

전력 금융 통신 등 민간시설 - 병정부 차원 방어대책 수립

전력 금융 통신 등 국가 주요 기반시설에 대한 북한의 고출력 전자파(EMP) 폭탄 공격 우려가 높아지고 있는 가운데 미래청조과학부가 제도 개선을 통해 민간 주요 시설의 EMP 방호 설비 구축을 적극 유도키로 했다. 또 정부 차원에서 EMP 영향 분석 실험 등 EMP 차단기술 개발을 추진키로 해 주목된다. 관련기사 2면

정부는 병정부 차원에서 이 같은 내용의 EMP 방어대책을 수립한 것으로 확인됐다. 정부 관계자는 8일 "최근 북한의 연이은 핵 공격 도발 위협이 지속되고 있는 가운데 EMP 폭탄 공격 가능성도 거론되고 있다"며 "이에 대한 대응체계를 조속히 완벽할 필요가 있어 EMP 방어대책을 수립하게 된 것"이라고 밝혔다.

미래부는 전력·통신 등 주요 민간시설에 대한 EMP 방호 설비 구축 시 안전성 여부를 평가하는 제도 도입을 추진하고 있는 것으로 파악됐다. 미래부 관계자는 "EMP 안전성 평가를 위한 전파법 개정안을 이미 국회에 제출한 바 있다"며 "최근 북한 리스크가 높아짐에 따라 조속한 입법화를 통해 전력·통신 등 주요 민간 시설물이 사실상 의무적으로 EMP 방호 설비를 구축하도록 유도키로 했다"고 말했다.

(3) 연구개발 범위

본 과제에서는 TRL 2단계(개념 정립 및 특허출원)에서부터 시작하여 2개 년도에 걸친 연구기간 중 TRL 4단계(부품 및 시스템의 성능검증)의 컴퓨터를 활용한 시뮬레이션을 이용하여 최적화까지 집중적으로 기초/원천기술에 대한 연구를 실시하며 향후 연구 종료 후 TRL 5단계 진입이 가능하도록 유사환경에서의 Working Model 검증을 위한 핵심성능을 만족할 수 있는 기술을 개발하는 것을 목표로 한다.

연구개발 범위	기술성격	목표 설정 근거
EMP 차폐장치 일체형 외기도입덕트/배기덕트 설계 및 제작기술	-전산시뮬레이션 -형태 결정 -샘플제품(시험체)	- 미국 국방기준 EMP 방호 최소성능: 80dB 이상 - 주한미군 차폐시설, 국방부의 차폐시설: 80dB 기준 - 주한미군 EMP방호시설 4개소 :100dB 이상(1987-2001) - 국방부 청사(2003년) : 100dB 급 - 국내 민간시설은 군용보다 강화된 기준 적용 - 삼성전자 : 100dB 또는 110dB 이상(2002년) - 쌍용자동차: 차량용 측정시설: 110dB 이상(2003년) - 전파연구원: 110dB 이상
EMP 차폐장치 일체형 급수/배수/급유 배관 설계 및 제작기술	-전산시뮬레이션 -형태결정 -샘플제품(시험체) -제작/시공 가이드라인	- 국방시설: 많은 인원이 동시에 거주하고 대형. - 화생방에 대한 고려도 함께 되어있기 때문에 단순히 EMP 기준값을 가지고 평가하기에는 다소 무리가 있음. - 최종목표 : 80dB급과 100dB 급. <주요 연구 내용> - 차폐장치 일체형 외기도입/배기덕트의 용도별, 형태에 따른 시뮬레이션 및 EMMP 차폐도 실험 - 차폐장치 일체형 배관시스템의 용도별, 유전체별 시뮬레이션 및 EMP 차폐도 실험 - 설계기술 및 제작기술개발 - 시험실 실험

<연구개발 단계>

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	■	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	■	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	■	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	□	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

제2장. 국내외 기술 개발 현황

(1) 기존 연구

○ 본 연구개발과제와 관련된 유사한 전문기관 홈페이지 및 www.ntis.go.kr에서 기수행 또는 수행중인 유사, 중복 과제에 대한 조사 및 검토결과는 다음 표와 같다.

○ 중복성 검토 결과 1개 과제의 경우 본 연구진이 수행한 것으로 연구내용은 본 신청서에서 제안하는 내용과는 다른 건축물자체의 차폐 및 출입구 등의 방호기술에 대한 일반사항을 연구 하였고, 주요 내용은 다음과 같다.

- 주요 군사시설에 대한 EMP 적정 방호 등급
- 주요 지휘통제시설에 대한 EMP 방호대책, 방호성능 기준
- 주요 군사시설에 대한 EMP 방호를 위한 대책과 소요예산, 시험 평가 방법 등이며
- 북한 핵 및 EMP탄 공격 시 임무수행의 지속성 유지를 위한 주요 지휘통제시설인 B1, U3의 차폐시설 구축 현황 및 수준
- 북한의 핵 및 EMP탄 공격 시 공격형태 및 강도에 따른 적정의 보호수준 제시
- 보호수준에 따른 적정의 방호대책 구축 방안
 - 차폐시설 구축 범위, 예산, 소요 기간, 시험평가 방법.

<연구개발과제의 차별성 및 중복성 검토>

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비 고
한국산업기술 평가관리원	연구장비공동활용지원	Electromagnetic Pulse 방호용 차폐기술개발	0.493	정보통신
한국산업기술 평가관리원	연구장비공동활용지원	EMP/EMC Power Filter 개발	0.622	전기전자
산업통상자원	소재부품기술개발	EMP 필터용 고출력 전압 및 전류차단을 위한 부품개발	6.67	전기전자
국방부	국방행정지원	주요 지휘통제시설에 대한 EMP 방호용 차폐시설 구축방안 연구	0.283	건축 정책연구

지금까지 전자 및 통신 분야에서는 EMP 방호에 관한 연구는 소재, 부품 및 제품 개발 분야에서 매우 많이 이루어 졌지만 건축물에서의 EMP에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 건축물에 대하여, 본 과제의 공동연구책임자인 육종관(2012)등이 HEMP가 다층의 지면을 투과하여 방공호를 비롯한 지하 건축물에 미치는 피해를 분석한 바 있으며 이는 입사파의 투과 각도에 따라서 큰 차이를 가짐을 보였다. 차폐벽을 관통하는 덕트와 배관에 대한 연구로, 윤상호(2013)등은 급수, 급유가 가능한 도파관의 직경 및 유전체의 종류에 따른 EMP 방호 성능을 확인하였다. 실험결과 도파관을 이용해서 군지휘시설 내부로 공급되는 급수 및 급유가 가능하고 EMP를 적절하게 차단한다는 것을 연구결과로 제시하였다. 차폐물에 관한 연구로 노정선, 이문보(1993)는 건축물에서 전자파의 차폐에 대해서 실험을 실시하였다. 금속판에 의한 차폐효과는 금속망을 이용해서도 얻을 수 있으며, 이러한 효과는 망의 간격, 굵기 및 재질에 영향을 받으며, 군사시설과 같이 고도의 차폐가 요구되는 곳에서는 200-300mesh/inch 이상의 조밀한 동 또는 황동망을 제안하였다.

(2) 국내외 관련 기술 특허

www.ndsl.kr 및 특허관련 조사결과 “EMP+건축” 으로 검색한 결과 국내의 특허는 “통신선 보호용 EMP 차폐기구” 가 있으며 주요 내용은 벽체를 관통구를 통과하는 통신선을 전자기파로부터 차폐시키기 위한 내용이 특허출원 및 등록 되었다.

또한 “EMP+방호시설” 로 조사한 결과는 총 13건으로 주요 내용은 다음 표와 같다.

<관련특허 조사 내용>

번호	제목	내용	국적/보유자	비고
1	이옴피 방호시설	방호시설의 패널접합, 패널형태	한국 누리플랜	차폐 패널
2	기존지하병커의 EMP 방호시설 및 그 시공방법	기존 지하병커 출입구크기 및 병커방호벽과 EMP 방호벽사이에 전도성콘크리트 타설 방법	한국 정수진	건축시공
3	방호시설 차폐효과 감시 시스템	차폐효과를 측정 감시하는 시스템	한국 표준과학연구원	전기/ 전자
4	항파장 방호시설 전자파 신호필터	방호벽관통 필터 장치에 대한 특허	한국 표준과학연구원	전기/ 전자
5	이옴피 방호시설 시공방법	방호패널결합, 방호패널 시공방법	한국 누리플랜	패널 시공 (건축)
6	EMP 방호시설의 성능 감시장치	스펙트럼 분석기를 이용한 성능감시 장치	한국, 한국기술연구소	전기/ 전자
7	EMP 방호시설 본체	EMP 방호시설 패널 본체	한국,누리플랜	차폐 패널
8	EMP를 차폐하는 방호 시설에서 협소 공간의 방청방법 및 그 장치	협소공간의 방청 방법 및 방청제 분말	한국,윌테크놀로지	패널 방청
9	EMP 방호시설의 바닥 판 구조 및 그 시공방법	방호시설 바닥판 구조 및 시공방법	한국,윌테크놀로지	바닥 패널
10	직접냉각방식을 가지는 항파장 및 항전자 방호 관통구 시스템	EMP 및 TEMPEST 방호시설 필터 시스템 관통구+방열홀(공기배출순환구)	한국,셀드텍	전기/ 전자
11	이옴피 방호실 시공방법	소규모 방호실 시공방법 및 단계	한국, 셀드텍	전기/ 전자
12	다층구조 방호벽 제조방법	방호벽 다층구조 제조방법	한국, 누리플랜	차폐 패널
13	항파장 및 항전자 방호 관통구시스템	방열기능 방호관통구	한국 이중근, 글로벌(주)	전기/ 전자

관련 선행특허 분석 결과 기존 특허는 방호시설을 구성하는 패널, 패널의 시공방법 및 출입구 등에 대한 내용이 주를 이루고 있다. 또한 관통구의 경우 덕트, 배관과 같이 대형개구부에 대한 특허는 없으며 비교적 소형인 통신선 인입구, 전력선 인입부위에 대한 내용이다. 또한 각 패널들은 금속성이므로 재료의 방청에 관한 특허가 선행된 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 주로 연구하는 내용인 공조용 덕트, 급배수 배관등에 관한 선행특허는 없는 것으로 판단된다.

(3) 선행 논문

논문의 경우 “EMP + 방호시설”로 검색한 결과 관련 논문은 총 10 편으로 나타났다. 검색결과는 다음의 표와 같으며 이중 신청 과제와 관련된 건축설비에 관한 연구는 주관연구기관과 공동연구기관의 실적으로 3편이 검색되었다.

논문실적 조사결과 본과제와 관련된 내용은 본 연구진이 수행 내용 이외에는 없는 것으로 나타나 **과제와 관련된 기술은 학계 및 기술계에서 검토가 이루어지지 않은 것으로 판단할 수 있다.**

<선행 논문 검색결과>

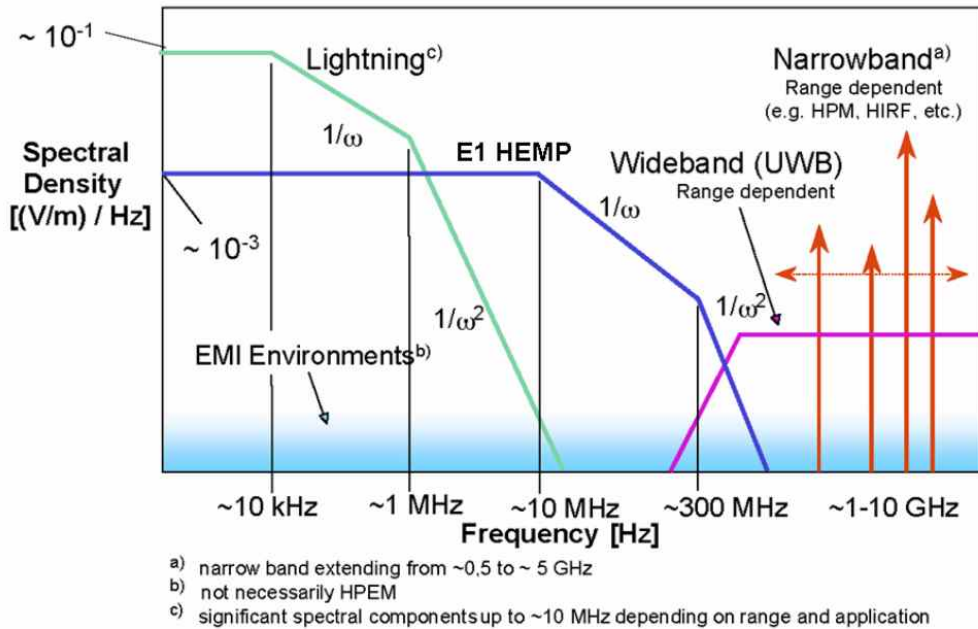
번호	제목	저자	게재논문집	비고
1	EMP 위협과 방호시설 평가	박우철	전자공학회지	전기전자
2	EMP 방호시설의 전자파 차폐효과 측정 방법	서만중외 5인	전자과학회논문집	측정법
3	방호시설용 EMP 필터의 성능평가 및 분석	김영진	아주대 석사학위	필터성능
4	EMP 방호대책 기술(방호시설 정비 유지 기법)	이원길	전자과학회지	유지관리
5	EMP 방호시설의 덕트 및 배관 최적설계 방안	방승기,김재훈 (주관연구기관)	지열에너지학회	건축설비
6	국방정책-EMP 방호시설 건설을 위한 효율적인 사업관리 절차	안병준	국방과학기술	정책연구
7	고출력 전자기파 방호 시설의 설계와 구축	육종관 외 1인 (공동연구기관)	전자파기술	고출력 전자기파
8	EMP 방호 대책 적용의 경제적 타당성 분석 방법	육종관 외 2인 (공동연구기관)	전자파기술	경제성 분석
9	고출력 전자기파 방호제도 도입에 관한 연구	정연춘	전자과학회지	고출력 전자기파
10	EMP 방호시설의 전기설계 주요사항	허창수	전자과학회지	전기설계

(4) 전자파 관련 기술개발 현황

EMP는 발생원에 따라서 크게 핵 EMP와 비핵 EMP로 나누어지며 아래의 그림과 같은 주파수 스펙트럼을 가진다. 핵 EMP는 우라늄과 같은 핵 물질을 사용하여 강력한 전자기파를 의도적으로 생성하는 기술이며, 비핵 EMP는 핵(우라늄)을 사용하지 않으며 강력한 전자기파를 생성하여 각종 전자기기의 고장 및 오작동을 유발시키는 기술을 의미한다. 비핵 EMP를 생성시키는 방법으로는 항공기투하탄이나 미사일 및 자속 압축 발생기를 사용하거나

배터리를 기반으로 강력한 전자기파를 발생시켜 방사하는 것이 있다. 비핵 EMP는 핵 EMP에 비해서 위력은 낮지만 운반 및 개인 휴대가 가능하므로 특정 지역 및 목표물에 대해서 피해를 줄 수 있는 장점을 가지게 된다. 비핵 EMP의 피해 영향은 기존의 핵 EMP와 마찬가지로 민감한 최신 전자기기의 부품(트랜지스터 및 반도체 등)에 피해를 주게 되므로, 중요한 전력 계통 및 통신 회로망에 대한 EMP에 대한 방호 방법이 고려되어야 한다.

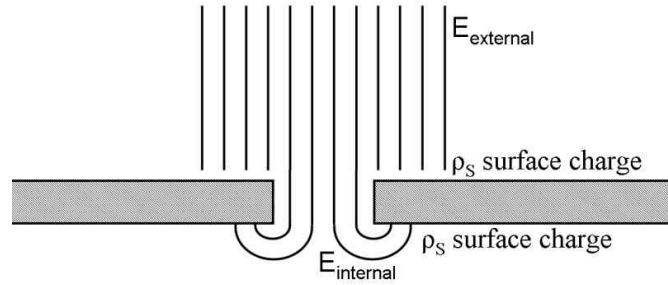
즉, 핵, 비핵 EMP 기술은 전자기파를 만드는 발생원의 차이로써 EMP 차폐를 고려할 때는 발생원에 대한 고려보다는 만들어진 전자기파가 생성된 주파수에서의 세기가 고려된다.



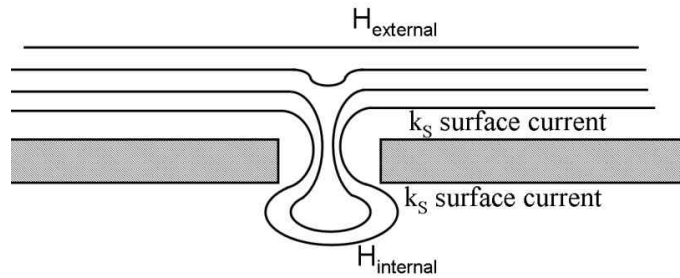
<다양한 종류의 고출력 전자파원의 주파수 스펙트럼>

EMP 차폐에 대한 필요성은 정보통신기반보호법, 원자력 시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법 및 전파법에서도 기술되어 있으며, 우리나라의 방호시설의 차폐 규격은 미국의 차폐 표준을 준수하고 있다. 하지만 현재 국내에서 사용하고 있는 EMP 관련 기준은 미군의 규격을 원용한 것으로써 국내 실정이나 대상에 대한 고려가 되어 있지 않다는 단점이 있다. 즉, 군용 C4I (Command, Control, Communication, Computer and Intelligence) 용 shelter나 시설을 대상으로 만든 기준이기 때문에 지하에 매설된 특수 시설물이나 민수용으로 외부에 노출된 시설에는 적용하기에 무리가 있다. 하지만 국내에서는 군과 정부 주요시설들에서 이에 대한 고려 없이 시설공사 및 측정 등이 진행되고 있다.

일반적으로 전력 및 통신 시스템의 취약성은 시스템 내부에서 발생하지만 핵, 비핵 EMP와 같은 공격은 외부에서부터 시작된다. 외부 에너지가 내부 장치로 침투 될 수 있는 방법은 다양하다. 흔히, 시스템 주위에 전도성 인클로저가 예시이다. 인클로저와 같은 개구로 인해 EMP 에너지가 새어 나올 수 있다. 아래 그림은 외부 전기장이 도체에서 정상적으로 종결되는 방법을 보여준다. 그러나 가운데 개구가 있는 경우, 외부 전기장의 일부가 내부로 들어가서 내부 벽에서 끝나게 된다. 따라서 EMP 신호의 일부는 내부로 침투하였고, 관련 자기장 및 표면전류로부터 전류가 발생된다. 아래 그림은 벽에 평행한 자기장이 개구를 통과하여 시스템 내부로 들어갈 수 있음을 보여준다. 표면 전류는 이러한 자기장과 관련이 있으며, 외부 전류 중 일부는 개구로 흘러 들어올 수 있다.



<전기장에 의한 내부 결합 개념도>

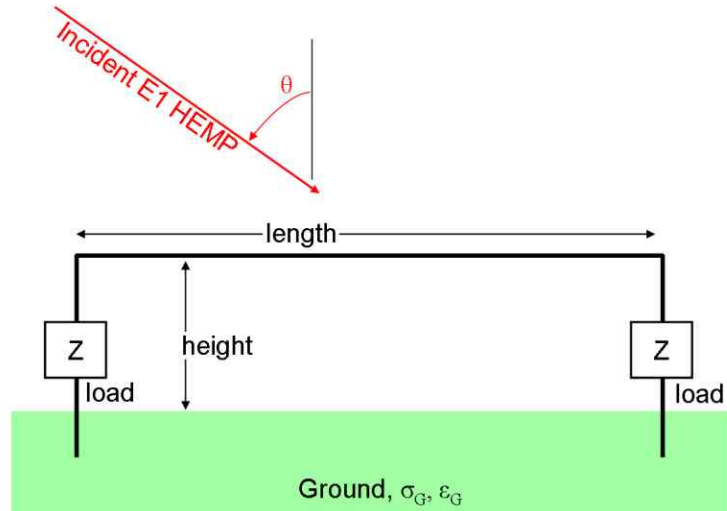


<자기장에 의한 내부 결합 개념도>

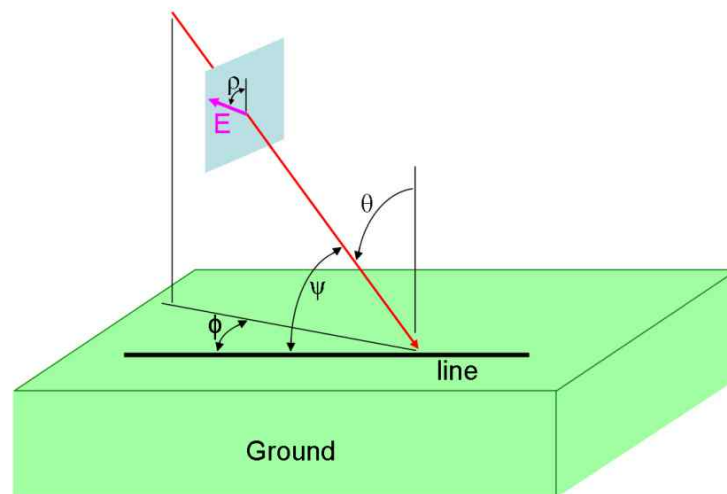
일반적으로 전력 시스템을 포함한 많은 시스템에서 가장 중요한 측면은 EMP가 선 (케이블 등)에 커플링 되는 것이다. 전압 및 전류 신호는 이러한 선에서 생성되며, 선에 연결된 회로로 흐르게 된다. 선에 연결된 끝의 회로에 나타나는 신호를 제어하는 많은 요소가 있으며, 몇 가지 중요한 요소는 다음과 같다.

1. EMP 파형 특성
2. EMP가 전파하는 방향에 상대적인 선의 기하학
3. EMP 전기장 벡터 방향과 관련된 선의 기하학
4. 지상 위 또는 아래의 선의 높이
5. 선의 길이
6. 선로의 종단 (회로 및 기타 임피던스)

몇 가지 상황 중 일부는 아래 그림과 같이 나타난다. 케이블의 길이와 높이를 가진 측면도이다. 끝단에는 수직으로 된 회로 임피던스 및 접지가 되어 있으며, EMP는 이런 상황에서 지면과 θ 만큼의 각도를 가지고 입사되며 전자기파가 케이블에 커플링 되어 시스템에 침투된다. 아래 그림을 보면 3차원적인 침투 상황을 볼 수 있다. 여기서 수평각도 ϕ 와 수직각도 θ 이 함께 총 각도 ψ 를 결정하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 입사된 EMP 평면과 그 평면 내의 전기장의 분극의 형태를 보여주며, 이러한 평면 형태와 두 개의 입사각은 전기장과 케이블이 얼마나 평행하는지를 결정하며, EMP가 커플링 되는 정도는 전기장의 벡터와 케이블 사이의 각도에 따라서 그 정도가 정해진다.



<입사되는 전자파에 의한 외부 도체선로 결합 개념도
(2차원 구조)>



<입사되는 전자파에 의한 외부 도체선로 결합 개념도
(3차원 구조)>

핵 또는 비핵 고출력 전자파에 의해 발생하는 전기장에 대한 전자기기에 대한 영향을 시험한 IEC 16000-1-3의 결과와 인위적인 고출력 전자파인 HPEM에 대한 IEC 61000-1-4의 기기영향 실험 결과가 아래와 같이 나타난다. 실험 데이터에 따르면 핵 EMP의 경우 6.7 kV/m의 시험에서도 전자기기에 치명적인 기능저하가 나타났으며, 비핵 EMP의 시험에서는 30 V/m 정도의 전기장에서 손실의 문제가 발생하였다. 앞서 언급되었듯이, 핵 EMP와 비핵 EMP는 만들어내는 전자기파의 세기의 차이를 나타낼 뿐, 두가지 발생원에 따라서 만들어내는 전자기파의 주파수는 다양하게 분포된다.

<비핵 EMP에 따른 전자기기의 피해도>

실험대상	주파수 (GHz)	전기장 (V/m)	신호형태 (변조)	결과 (영향)
133 MHz Pentium	2.713	30	CW	Loss of data
	2.770	50	AM	Loss of data

	1.133 2.675 2.887	50 50,70 75	AM, Pulse AM, Pulse AM	Reset Loss of access Loss of access
233 MHz Pentium II	1.070 1.460 1.480	100 100 100	Pulse CW, AM, Pulse CW	Disk write error Power down Power down
300 MHz Pentium II	1.040 1.400	45 100 100 100 75 75 50 85	Pulse CW AM AM Pulse Pulse Pulse Pulse	Power down Power down Power down Reset Power down Power down Power down Power down

<핵 EMP에 따른 전자기기의 피해도>

시험 품목 유형	시험 품목	각종 시험 수준에서의 영향		
		6.7 kV/m	12.4 kV/m	16.6 kV/m
이동 무선	A사	—	비치명적 기능저하	비치명적 기능저하
	B사	—	—	비치명적 기능저하
	C사	—	—	비치명적 기능저하
컴퓨터	D사	치명적 기능저하	치명적 기능저하	고장
	E사	치명적 기능저하	치명적 기능저하	—
	F사	—	—	치명적 기능저하
휴대폰	G사	치명적 기능저하	—	치명적 기능저하
	H사	—	—	치명적 기능저하
일반 전화	I사	치명적 기능저하	치명적 기능저하	치명적 기능저하
	J사	—	—	고장
위성 접시	K사	고장(미검증)	—	—

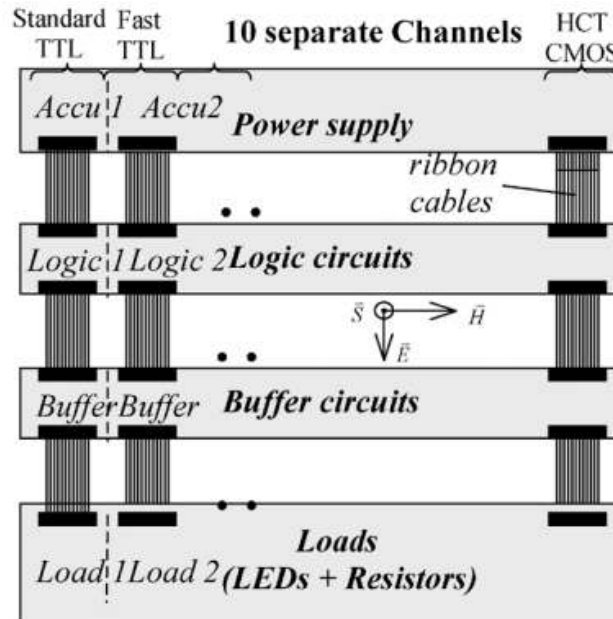
추가적으로 비핵 EMP를 생성시키는 위협적인 고출력 전자기파 발생 장치들은 현재까지도 개발되고 있다. 아래 표에서 볼 수 있듯이 고출력 전자기파 발생 장치에는 미 공군연구소에서 개발한 100 m 거리에서 53 kV/m의 전계강도를 발생시킬 수 있는 JOLT와 같이 트레일

러에 싼고 다니는 것부터 정전기 방전 권총처럼 쉽게 휴대할 수 있는 것까지 다양하고, 수백 MHz에서부터 수십 GHz까지 매우 넓은 주파수 대역에서 동작하는 장치가 있다.

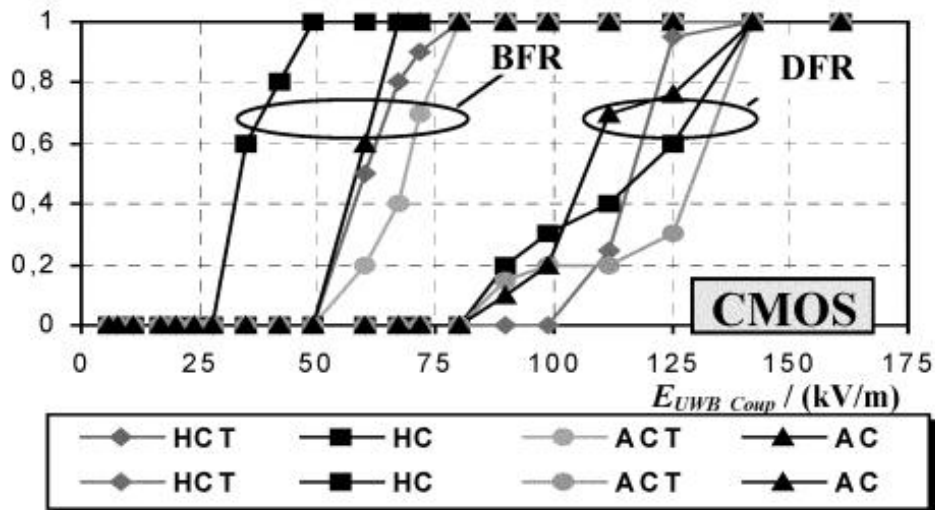
<비핵 EMP 발생원의 종류 및 특성>

위험 종류	공격기기의 예제	세기	주파수 대역
Electromagnetic wave attack-radiated	JOLT	500 kV/m @ 100 m	300 MHz ~ 10 GHz
	IRA (Hi-tech)	12.8 kV/m @ 100 m	300 MHz ~ 10 GHz
	Commercial radar (Mid-tech)	60 kV/m @ 100 m	1 ~ 10 GHz (1.285 GHz)
	Navigation radar	385 V/m @ 100 m	1 ~ 10 GHz (9.41 GHz)
	Magnetron generator	475 V/m @ 10 m	1 ~ 3 GHz
	Amateur wireless device	286 V/m @ 1 m	100 MHz ~ 3 GHz
Electrostatic discharge (ESD) attack	Compact amateur wireless device	169 V/m @ 10 cm	100 MHz ~ 3 GHz
	Illegal CB radio	573 V/m @ 10 m	27 MHz
	Stun gun	500 kV	100 MHz ~ 3 GHz
Electromagnetic wave attack-conducted	Lightning-surge generator	50 kV (charging voltage)	1.2/50, 10/700
	Compact lighting surge generator	10 kV (charging voltage)	1.2/50, 10/700
	CW generator	100 ~ 240 V / 4kV	1 Hz ~ 10 MHz
	Commercial power supply	100 ~ 240 V	50/60 Hz

이러한 EMP 피해를 연구하기 위해 세계 각국의 대학교 및 연구소에서 실제 HPEM 발생원으로 전자기기에 대한 피해에 대한 실험을 진행하고 있으며, 독일의 Federal Armed Forces Scientific Institute에서는 logic 소자 및 microcontrollers, PC 시스템과 네트워크에 대한 EMP 실험을 진행하였다. 아래 그림들은 반도체 및 CMOS와 같은 logic 소자들에 대한 EMP 실험 셋업 및 그에 따른 피해도 그래프를 나타낸다.

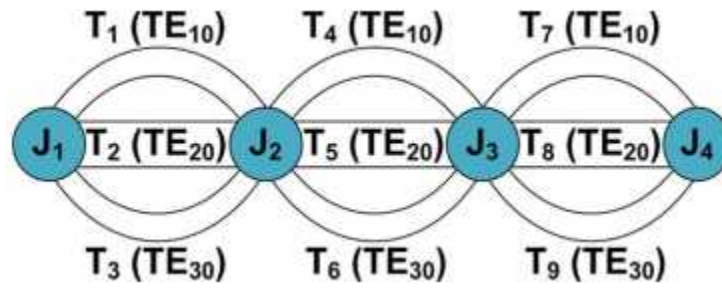


<Logic 시스템에 대한 테스트 셋업>

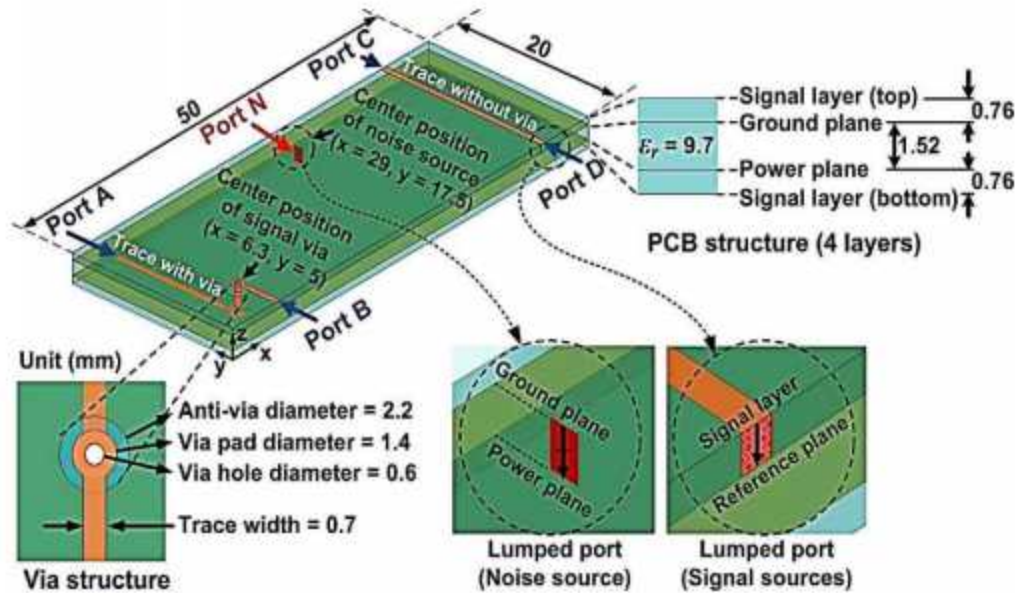


<CMOS 장치의 Breakdown (BFR)과 Destruction (DFR)>

또한, EMP가 발생했을 때 개구를 통하여 들어온 전자기파의 피해는 전자기기의 오작동을 유발하므로 개구를 통한 전자기파의 커플링 피해에 대한 분석이 요구된다. 여러 가지의 수치 해석 툴을 통하여 이러한 분석이 진행되지만 해석 대상이 커질수록 시간이 오래 걸리게 되는 문제점이 발생된다. 아래는 수정된 Baum-Liu-Tesche (BLT) 방정식과 FEM (Finite Element Method) 방법을 통해 EMP의 커플링 효과에 대한 PCB 분석을 보여주는 연구가 되겠다.

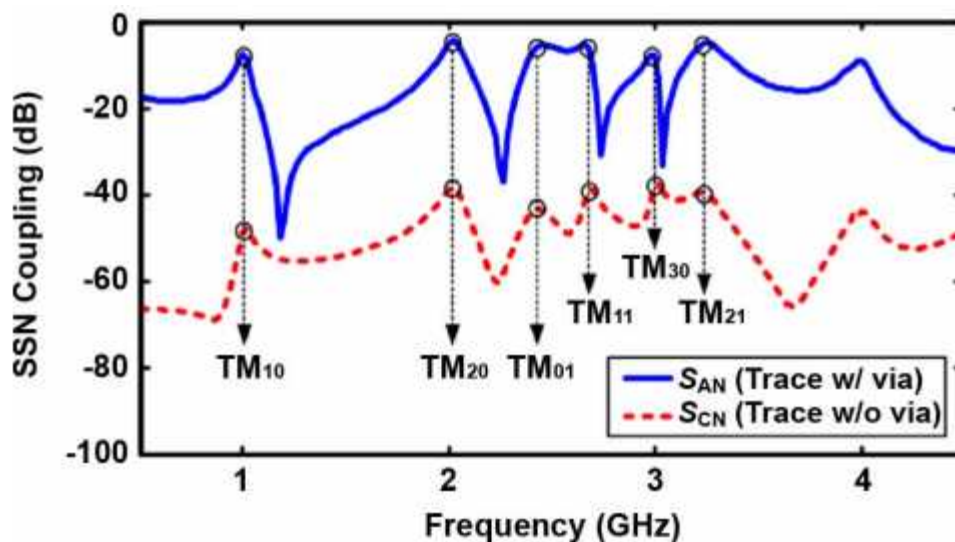


<도파관에 대한 topological 네트워크>



<PCB와 via에 대한 전개도>

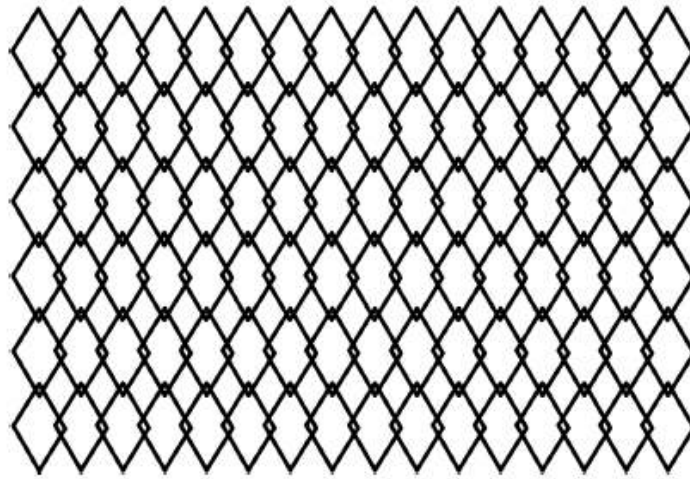
위와 같은 상황에서 IEMI에 의해 발생된 EMP가 입사되면 개구를 통해 들어온 전자기파는 PCB에 커플링 되어 피해를 주게 된다. 이러한 커플링 피해는 전자기파의 모드에 따라서 정도가 달라지며, 아래는 via의 유무 및 모드 종류에 따른 커플링 피해를 나타낸다.



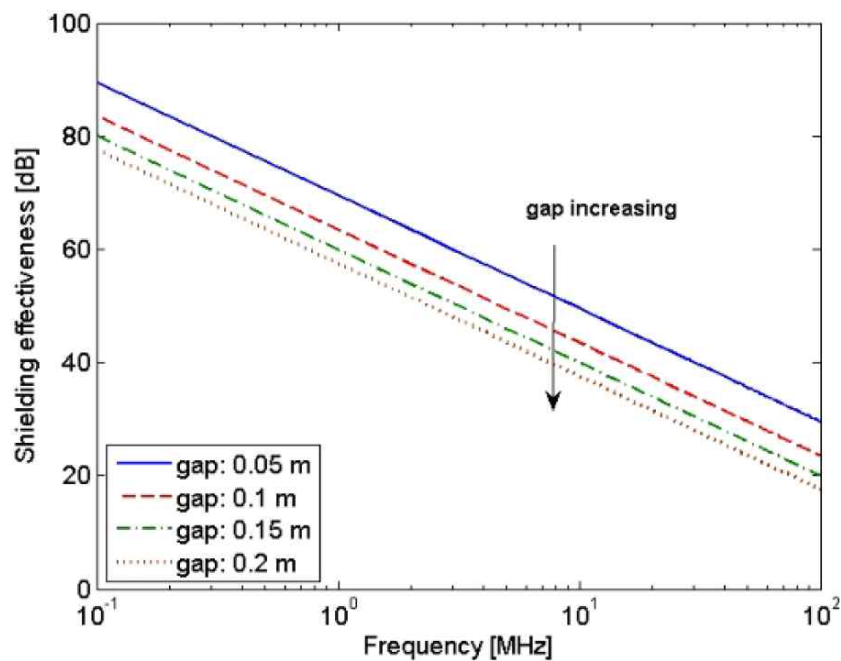
<Via의 유무에 따른 noise 발생원으로부터의 커플링>

EMP 차폐를 위해 금속 구조물의 격자 구조를 이용하여 지하 구조물에 투과되는 전자기파

를 저감하여 표준 규격을 만족시키는 연구가 진행되었다. 사각형 및 허니컴 형태의 격자 구조는 EMP로 발생된 전자기파의 투과 피해를 줄일 수 있으므로 필터링 하는 효과를 가지게 된다. 따라서 아래와 같은 격자 구조물을 지하 공기층 상단부에 적용하거나, 각 층의 경계면에 적용한다면, 지하 공기층으로 투과되는 고고도 전자기파의 크기를 줄일 수 있다.



<금속 격자 구조물>



<금속 격자 구조의 간격에 따른 차폐 효과>

아래 표에서 확인 할 수 있듯이, 금속 격자 구조물은 0.1 MHz와 1 MHz 대역에서 금속 간격에 따라 약 78 dB 이상의 차폐효과를 가지는 것을 확인 할 수 있다. 지하 공기층으로 투과된 0.1 MHz와 1 MHz의 E1 펄스는 각각 약 10 kV/m와 5 kV/m이며, 이를 로그 단위로 환산하면 각각 -15.01 dB와 -20.14 dB이다. 이렇게 투과된 E1 펄스는 금속 격자 구조물에 의하여 최대 -109.68 dB까지 줄일 수 있어, 지하 공기층에서의 차폐 효과를 기대할 수 있다.

<지하 공기층에서의 금속 격자 구조물의 간격에 따른 차폐 효과>

주파수 (MHz)	투과된 E1 (A_{dB})	금속 간격 (m)	차폐 효과 (SE_{dB})	필터링된 E1 ($A_{dB} - SE_{dB}$)
0.1	-15.01	0.05	89.54	-104.55
		0.10	83.52	-98.53
		0.15	80.00	-95.00
		0.20	77.50	-92.50
1.0	-20.14	0.05	89.54	-109.68
		0.10	83.52	-103.66
		0.15	80.00	-100.14
		0.20	77.50	-97.64

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

가. 해석 프로세스

본 보고서에서는 EMP 차폐를 위한 도파관 배열이 설치된 덕트와 배관내의 공기유동 및 급수, 배수의 유동을 평가하기 위하여 상용 프로그램인 CD-Adapco사의 STAR-CCM+(11.04.010 Double Precision, Win 64)과 Workstation(Dell 2687W V3-2CPU, Ram 256Gb)을 사용하여 해석을 실시하였다.

■ 사용프로그램의 특징

Single intergrated process
CAD Embedding
Surface wrapping
Automatic meshing technology
Additional physics modeling
Turbulence
Post-processing
Software and hardware technology

■ 해석 프로세스

해석 프로세스는 해석모델의 특성 정의, 유체모델 정의, 유체 해석 수행, 해석결과 검토의 4단계로 구분할 수 있다.

- 해석모델의 특성 정의

이 단계에서는 해석모델의 유형을 분석하고 물리적 모델의 기하학적 형상과 특성 및 유체조건을 설정한다. 구체적인 프로세스는 다음과 같다

- 물리적 모델의 기하학적 형상, 재료 특성 및 유체조건 설정
- 셀(cell)의 수, 크기, 분포 등의 메쉬(mesh) 디자인
- 밀도, 점성도, 비열과 같은 물리적 변수 및 난류모델 등 모델링 관련 변수 결정

- 유체모델 정의

- 모델의 기하학적 형상과 같은 유체 해석 영역을 나타내는 메쉬 형성
- 난류모델과 같은 유체·고체의 열역학 특성 설정
- 해석방법의 변수와 결과 데이터의 형식 설정
- 비정상상태의 유체거동 시뮬레이션을 위한 경계의 위치 및 조건과 순간 경계조건 및 시간조건 설정
- 다음 단계의 해석을 위한 입력조건 파일 생성

- 유체 해석 수행

입력된 조건에 의해 실제 계산을 수행하는 단계로 CFD 해석의 핵심부분이라고 할 수 있다. 해석 시간은 공간분할 수에 의해 결정되는데 계산결과를 얻을 때까지 수시간에서 수일이 걸린다.

- 해석을 위해 데이터 입력
- 해석통계와 다양한 모니터링 데이터분석에 의해 계산

- 해석결과 검토

CFD 해석결과는 많은 수치로 구성되며 이를 분석하고 평가하기 위해서는 이를 가시화할 필요가 있다. 가시화를 통해 해석결과에 문제가 발생된 경우에는 해석 대상에 대한 수정을 고려할 필요가 있다.

- 생성된 결과 제시 및 수정

가. 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics:CFD) 이론

(1) 유체의 분류

유체는 여러 가지 관점에 따라 분류한다. 액체(liquid)와 기체(gas)의 구분은 유체를 개방된 용기에 담을 수 있느냐 없느냐에 따른 분류로서 가장 원천적이고도 경험적인 입장에서의 분류법이다. 그 외 다양한 분류법이 있는데, 이렇게 유체를 분류하는 것이 CFD에서 중요한 이유는 유체의 성격에 따라 방정식의 형태가 달라지기 때문이다. 유체의 형태에 따라서 방정식을 단순화시킬 수 있다면 이는 계산시간의 단축을 기할 수 있기 때문에 이러한 분류법은 수치해석의 관점에서 매우 중요하다[3.1]. 유체의 분류법을 나열하면 아래와 같다.

① 압축성 여부에 따라

- 비압축성 유체(incompressible fluid); 압축이 힘든 유체로서, 물, 기름 등 유체가 이에 해당한다.
- 압축성 유체(compressible fluid); 압축이 쉬운 유체로서 대부분의 기체가 여기에 포함된다.

그러나, 기체라 하더라도 유동장 내의 위치 또는 시간에 따른 압력 (또는 밀도)변화가 작은 경우에는 비압축성 유체로 취급할 수 있다. 동시에 액체라 하더라도 미소한 압축 또는 팽창으로 압력이 크게 변하고 이에 따라 속도가 현저히 달라지는 경우 (예로서 수격현상, water hammering)에는 압축성 유체로 취급해야 한다[3.2]. 한편, 유체 내부의 위치에 따른 온도의 차이가 밀도를 변화시키고 이 밀도의 변화로 인해 유체의 흐름이 발생하는 자연대류의 문제에 있어서는, 밀도 그 자체는 일정한 값으로 가정하고 그 변화는 (온도의 함수로 가정하여) 무시하지 않는 경우가 있는데 이것을 Boussinesq 근사[3.3]라 부르며 자연대류의 문제에서 흔히 적용되는 방법이다. 즉, 밀도 그 자체를 일정한 값으로 가정하는 것은 유체를 비압축성으로 취급하는 것이요, 밀도의 변화를 온도의 함수로 고려하는 것은 유체를 압축성으로 가정하는 것이다. 유체를 비압축성으로 취급하는 경우에는, 유동의 미지 변수가 속도 성분(3차원에서는 세가지 성분 u, v, w)과 압력(p)뿐이다. 유체를 압축성으로 가정하는 경우에는, 밀도(ρ), 온도(T) 등을 미지의 변수로 취급하기 때문에 변수의 수가 증가하고 따라서 계산시간도 더 걸린다.

② 유체의 점성에 따라 유체를 정의하면 [3.4],

- 비점성 유체(invscid fluid); 점성을 무시할 수 있는 유체를 말한다.
- 점성 유체(viscous fluid); 점성을 고려해야 하는 경우의 유체를 말한다.

점성은 모든 유체의 보편적인 특성이다. 그러나 때로는 점성을 무시하여 계산해도 유효한 답을 얻을 수 있는 경우가 있는데, 이러한 조건을 가진 유체를 비점성 유체라 한다. 즉, 비점성 유체는 어디까지나 이론적인 유체이며 실제 존재하는 유체는 아니다. 실제유체를 비점성으로 취급할 수 있다면 방정식의 형태는 상당히 단순화되어 계산시간도 현격히 단축될 수 있으며,

때로는 이론적인 분석으로도 답을 얻어낼 수가 있다. 그러나, 실제적으로는 대부분의 경우 유체를 점성을 가정하여 해를 구한다.

③ 유체 성분의 수에 따라

- 단성분 유체(single-component fluid); 대상으로 하는 유체가 한 가지 종류의 물질만으로 구성된 것을 말한다[3.5]. 때로는 균질 유체(homogeneous fluid)라 부른다[3.6]. 예로서, 물, 공기 등.
- 다성분 유체(multi-component fluid); 여러 가지 종류의 물질로 구성된 유체를 말한다. 예로서, 공기와 메탄의 혼합 기체, 공기와 연기 등.

서로 다른 성분의 유체가 혼재하는 경우, 일반적으로 이들 성분은 분자 단위로 잘 섞여 있다고 가정한다. 압력과 속도는 이들 각각의 성분이 동일한 가중치를 가지며 각 성분의 질량 분율(mass fraction)은 위치와 시간에 따라서 변하는 것으로 취급된다.

④ 점성-전단변형율과의 관계에 따라

- 뉴턴 유체(Newtonian fluid); 점성이 전단변형율(shear strain-rate)에 비례하는 유체. 예; 물, 공기.
- 비뉴턴 유체(Non-Newtonian fluid); 점성과 전단변형율이 정비례하지 않는 유체. 예로서, 치약, 꿀, 혈액 등

(2) 유체유동의 분류

CFD에서는 유동형태에 따라서 변수정립방법이 달라지기 때문에 유동의 여러 가지 분류에 대해 설정하는 것이 중요하다. 유동의 여러 가지 분류법은 아래와 같다[3.7].

① 정상상태 여부에 따라

- 정상 유동(steady flow); 유동의 변수(즉 속도, 압력, 밀도, 온도 등)가 시간과 더불어 변하지 않는 유동.
- 비정상 유동(unsteady flow); 이것은 천이 유동(transient flow)이라고도 불리우는 것으로서, 각종 유동변수가 시간과 더불어 변하는 유동을 말한다.

앞에서 언급한 바와 같이 비정상 유동의 경우에는 시간의 경과에 따른 변수의 변화가 중요하기 때문에 수치해석 시 시간 간격 Δt 를 충분히 작게 잡지 않으면 인터벌간의 변수들이 정확한 값이 되지 않고 또한 결과도 물리적으로 일어날 수 없는 유동형태로 얻어질 수 있다. 인터벌을 작게 잡으면 물론 계산시간이 많이 걸리는 것은 당연하다. 그러나 만약 정상상태의 유동이 관심이라면 수치해석적 안정성이 보장되는 한 시간 간격은 아무리 길게 잡아도 상관없기 때문에 계산시간은 현격히 줄어들 수 있다. 어떠한 유동으로 취급하느냐 하는 것은 수치해석을 통해 얻고자 하는 정보가 무엇이냐에 따라 결정될 것이다. 하나의 예를 들자면, 액체 교반기 내 날개 주위의 흐름을 수치해석한다고 할 때 만약 날개 하나에 작용되는 힘을 알고 싶다면 정상 상태로 하여 해석하여도 어느 정도 충분히 정확한 값을 얻을 수가 있다.

② 차원의 수에 따라

- 2차원 유동(two-dimensional flow); 흐름이 두 개의 공간 변수(직교 좌표계인 경우에는 x, y)에 의해서 결정되는 경우를 말한다.
- 3차원 유동; 흐름이 3개의 공간 변수에 의해 결정되는 경우를 말한다.

수치해석시 2차원 유동을 취급할 수 있다면 이는 또한 계산시간의 현격한 단축을 의미한다. 만약 어떤 유체유동이 원동 좌표계로 분석하였을 때 원주방향(즉 θ -방향)으로 유동변수의 값들이 변하지 않는 경우는 축대칭 유동(axi-symmetric flow)이라 말하며 이것도 2차원 유동의 일종이다.

③ Raynolse number 에 따라,

- 층류(laminar flow); 유체가 층상을 유지하면서 곧고 질서있게 흘러가는 경우를 말한다.
- 난류(turbulent flow); 쉽게 말해 무질서한 흐름을 말한다.

층류와 난류는 관 내부 유동의 경우 레이놀즈의 실험으로 간단히 구분지을 수 있다. 즉, 관 내 유체 흐름에서 잉크나 연기를 흘렸을 때 이것이 곧게 흘러가는 경우는 층류이고, 이것이 무질서하게 마구 섞이면서 흐르는 경우는 난류이다. 층류와 난류는 보통 레이놀즈 수로써 개략적으로 판단할 수 있다. 만약 레이놀즈 수가 수백 정도 이하이면 흐름은 층류라 판단해도 좋다. 만약 레이놀즈 수가 몇 만 정도 이상이면 난류정의할 수 있다. 레이놀즈 수가 몇 천이면 이는 쉽게 판단할 수 없으며 실제 흐름에서는 층류와 난류의 중간 성질을 띄는 것이 보통이며 이러한 유동을 천이 유동(transition flow)이라 부른다[3.8]. 여기서, 물론 레이놀즈 수는 대표속도 $\times$ 대표길이/동점성계수로 계산되는데, 이 때 대표속도와 대표길이를 달리 선택한다면 레이놀즈 수 자체가 달라지게 된다. 요는, 레이놀즈 수의 계산에 사용되는 대표 물리량은 진정으로 그 유동장을 대표하는 값(최대 값 또는 평균 값)이 되어야 위와 같은 층류, 난류의 구분예측이 타당하게 된다.

흐름이 난류인 경우는 보통 다양한 크기의 소용돌이(eddy)가 형성된다. 컴퓨터를 이용한 수치해석에서 이러한 소용돌이의 거동을 제대로 표현하기 위해서는 격자의 크기를 충분히 작게 잡아야 한다. 격자의 크기는 다양한 크기의 소용돌이 중에서 가장 작은 크기의 소용돌이를 기준으로 결정하여야 한다. 격자의 크기를 충분히 작게 잡아서 모든 소용돌이의 영향을 모두다 직접 고려하는 수치해법을 직접수치모사(DNS, direct numerical simulation)라 부른다. 작은 소용돌이의 영향을 통계학적으로 적절히 처리할 수 있다면 격자의 크기를 다소 크게 해도 좋을 것이라는 논리가 대두되었고, 그러한 소규모 소용돌이의 효과를 어떻게 모델링(modeling)하느냐에 대해 다양한 연구가 수행되어 왔다. 이와 같이, 작은 소용돌이의 효과를 모델링하는 것을 난류 모델링(turbulence modelling)이라 부르며, 현재까지 매우 다양한 난류 모델들이 개발되어 사용되고 있다. 어떠한 난류 모델링을 사용하느냐에 따라 수치해석 결과는 상당히 달라질 수 있다.

④ 마하 수를 기준으로

- 아음속 유동(subsonic flow); 마하 수(Mach number)가 1보다 작은 유동을 말한다.
- 천음속 유동(transonic flow); 마하 수가 1 근처인 유동을 말한다.
- 초음속 유동(supersonic flow); 마하 수가 1보다 큰 유동
- 극초음속 유동(hypersonic flow); 마하 수가 1보다 월등히 큰 유동.

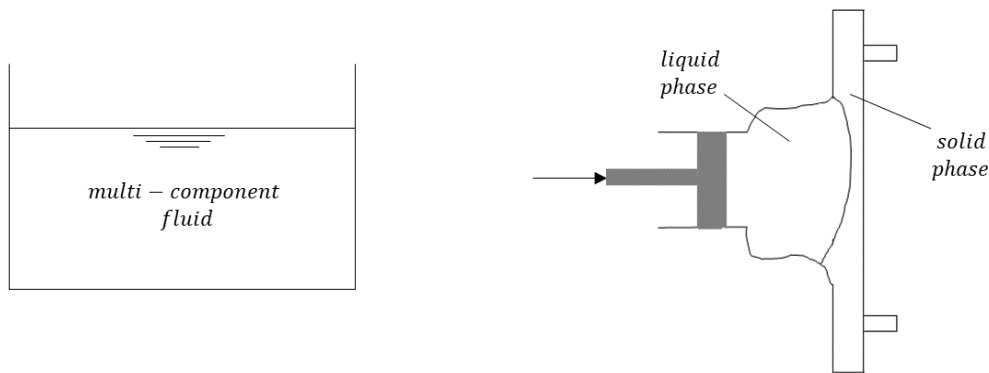
마하 수는 유동 속도 대 음속의 비를 말한다. 비압축성 유체유동의 경우는 보통 아음속 유동으로 하여 처리한다. 천음속, 초음속 등의 흐름은 압축성 유체유동에서만 나타난다.

⑤ 기 • 액 • 고의 상(phase)의 수를 기준으로

- 단상 유동(single-phase flow); 기체, 액체, 고체 중 하나의 상만으로 유체가 구성된 경우임
- 이상 유동(two-phase flow); 두 개의 상이 혼재된 경우로서, 물-공기, 물-모래 등이 이에 해당된다.
- 다상 유동(multi-phase flow); 3개 이상의 상으로 구성된 유체이다. 물-공기-모래가 대표적인 예이다.

물 속에 기포가 생겨 떠오르는 경우, 냉동기 내 관 속에 액화된 프레온 가스와 기체 프레온이 공존하는 경우는 기체-액체의 이상 유동에 해당한다. 자유표면을 가진 액화천연가스(LNG, Liquefied natural gas)가 항해하는 LNG 선에 실린 탱크 내에서 요동치는 문제는 LNG와 상부의 공기가 공존하는 이상유동으로 취급하여 수치해석할 수 있다. 다상 유동의 원래의 의미는 두 가지 이상의 서로 다른 상(phase)이 공존하는 경우를 의미한다. 그러나 같은 상이라 하더라도

서로 다른 유체가 공존하는 경우도 공학 문제에서 흔히 나타나는데, 물 위에 기름이 떠 있는 액체-액체의 문제가 하나의 좋은 예이다. 이러한 경우도 일반 상업용 CFD 코드들은 다상 유동으로 취급하여 문제를 풀 수 있도록 하고 있다. 그러면 이 경우 앞의 다성분 유체와 다른 점이 무엇인지 설명할 필요가 있겠다. 다성분 유체는 성분이 서로 다른 유체가 분자 단위(즉, 마이크로 스케일에서) 혼합되어 있는 경우이며, 다상 유동은 그렇지 않고 서로 분리되어 존재하는 것을 말한다. 다르게 표현하자면 다상 유동은 서로 다른 유체 사이에 계면(interface)이 뚜렷이 존재하는 경우를 말한다. 한 예를 들면 최근 마그네슘의 소형재 산업에서는 마그네슘을 액화온도까지 가열하여 고체와 액체가 공존하도록 하여 주조하는 rheo-casting의 주조법을 시도하고 있다. 이 경우 주형(die)에 들어가기 전의 물질은 미세한 크기의 고상 마그네슘이 액상 내에서 약 50%의 비율로 혼합되어 있으므로 다성분 유체로 취급할 수 있다. (아래 그림의 a). 그러다가 이것이 주형 내로 들어가서 압력을 받고 냉각되면 부분적으로 액상이 고상으로 변하는데 이때는 액상과 고상 사이의 경계가 뚜렷이 존재하는 이상 유동이 된다.(아래 그림의 b). 즉, rheo-casting의 공정은 다성분 유체의 다상 유동에 해당한다고 말할 수 있다.



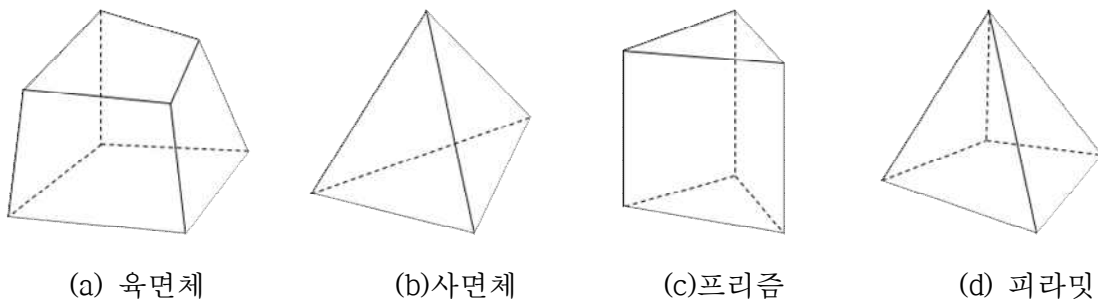
(a) 초기의 다성분 유체

(b) 주형 주입시의 다상 유동

[그림 1] Rheo-casting 공정에서의 다성분 유체와 다상 유동

(3) 격자계 구성

CFD 에서 격자 셀의 모양은 다양하게 선택할 수 있다. 그림 2는 4가지 대표적인 격자 셀의 기하학적 구조를 나타낸다.



(a) 육면체

(b)사면체

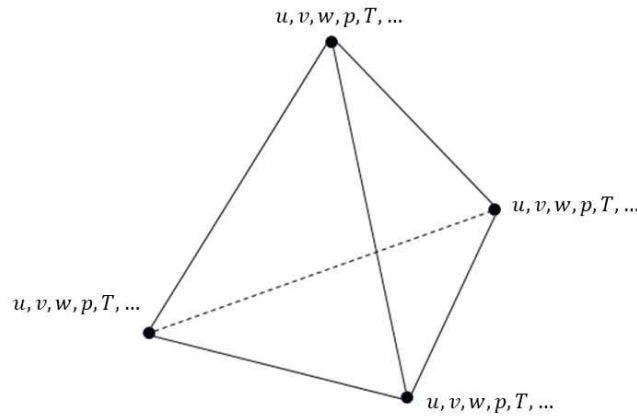
(c)프리즘

(d) 피라미트

[그림 2] 단위 격자 셀의 다양한 현상

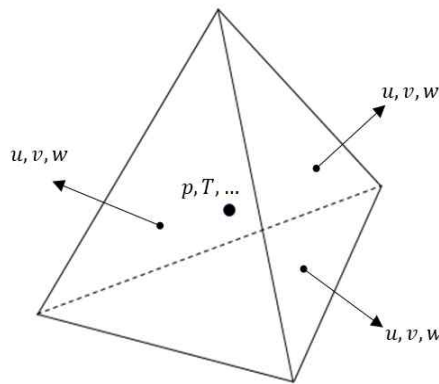
유체유동을 나타내는 변수는 3차원 유동의 경우 속도 벡터의 3가지 성분과 압력, 온도, 밀도 등의 스칼라로 구성된다. 이들 변수를 격자 셀의 어디에서 정의하느냐에 따라 대표적으로 아래와 같이 두 가지 방법으로 나뉘어진다.

① 집중 격자계(collocated grid system); 모든 변수들을 격자 셀의 노드에서 한꺼번에 정의하는 방법이다.



[그림 3] 집중 격자계

② 엇갈림형 격자계(staggered grid system); 벡터인 속도는 각 셀의 겉 표면에서 정의하고 압력과 온도 등 스칼라 양은 셀의 체적 중심에서 정의하는 방법이다.



[그림 4] 엇갈림형 격자계

집중 격자계로 구한 변수들은 지그-재그형태로 찌그러지는 경향이 있고, 엇갈림형 격자계는 이를 보완하기 위해 개발된 것이다. 그러나 엇갈림형 격자계는 프로그래밍 할 때 다소 까다로운 점이 있기 때문에 최근에 집중 격자계에서 지그-재그 문제를 개선한 기법이 개발되어 사용되고 있다.

(4) 이산화 방법

지배 방정식 중의 시간 미분 항을 차분화하는 방법에는 여러 가지가 있다. 그 중 대표적인 몇 가지를 소개한다면 아래와 같다[3.9].

① Euler 양해법(Euler explicit method); 기준 시점인 현재의 변수와 미래의 변수를 가지고 시간 미분항을 차분화하며 공간 미분은 현재의 변수로 차분화함으로써 기준 시점의 변수를 바로 (explicitly) 구할 수 있는 방법이다[3.10].

② Euler 음해법(Euler implicit method); 역시 제2장, 제3장에서 설명한 바와 같이, 기준 시점이 현재의 변수와 과거의 변수로 시간 미분 항을 이산화하며, 공간 미분은 현재의 변수로 차분화하는 방법이다. 여기서는 미지의 변수들이 상호 얽혀 있기 때문에 행렬식을 풀어야만 하는

번거로움이 있지만 수치적으로 매우 안정한 방법이기 때문에 시간간격을 크게 해도 수렴된 해를 얻을 수가 있는 장점이 있어 정상 상태의 해를 구할 때 유리하다.

③ 2차-오더의 오일러 음해법(2nd-order Euler implicit method); 앞의 Euler 음해법은 1차-오더(1st order)의 정밀도를 가지기 때문에 시간 시스템을 크게 하였을 때는 정밀도가 떨어진다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 것이 2차-오더의 오일러 음해법이다. 이 방법에서는 임의 변수 ϕ 의 시간미분 $\partial\phi/\partial t$ 을 아래와 같이 차분화한다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} \cong \frac{3\phi - 4\phi^0 + \phi^{00}}{2\Delta t} \quad (\text{식 1})$$

여기서 우변의 ϕ 는 현재의 미지변수 ϕ^0 는 과거의 기지변수, ϕ^{00} 는 두 시간스텝 이전 과거 시점의 기지변수를 각각 나타낸다. 따라서, 이 방법에서는 두 단계 이전 시점의 변수까지 저장해 둘 필요가 있다.

④ Crank-Nicolson 방법; 이 방법에서는 기준 시점을 현재와 과거의 중간 시점으로 잡고 시간 미분을 중심차분으로 근사화하며 공간 미분은 현재 시점의 변수와 과거 시점의 변수의 평균으로 차분화하는 방법이다. 예로서, 식 1의 각 항은 아래와 같이 근사화한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} \cong \frac{u - u^0}{\Delta t} \quad (\text{식 2})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \cong \frac{1}{2} \left(\frac{u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i-1}^0 - 2u_i^0 + u_{i+1}^0}{\Delta x^2} \right) \quad (\text{식 3})$$

그러면 시간에 대해서 2차-오더의 정밀도를 가지면서 u^{00} 와 같은 변수들은 저장할 필요가 없게 된다. 물론 이 방법도 오일러 음해법과 같이 음해법의 일종이기 때문에 안정성이 우수하다.

공간 미분을 어떻게 차분화 하느냐에 따라서는 아래와 같은 방법이 있다.

① 중심차분법(CDS, central difference method); 공간에 대한 미분항들을 기준지점의 양 쪽에 위치한 변수들로써 차분화하는 방법이다. 예로서, 1차 및 2차 공간 미분은 아래와 같이 차분화한다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} \cong \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2\Delta x} \quad (\text{식 4})$$

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} \cong \frac{\phi_{i-1} - 2\phi_i + \phi_{i+1}}{\Delta x^2} \quad (\text{식 5})$$

중심차분은 항상 2차-오더의 정밀도를 가진다.

② 풍상 차분법(UDS, upwind difference method); 위의 중심차분이 정밀도 면에서 우수하기는 하지만 Navier-Stokes 방정식의 비선형 대류항으로 인하여 때로는 수치해석 과정이 불안정해지는 문제점을 유발한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 개발된 것이 풍상 차분법이다. 풍상 차분법은 인위적인 점성 항이 추가되기 때문에 안정한 것으로 밝혀져 있으며 따라서 이러한 인위적인 항 때문에 정밀도는 떨어진다고 볼 수 있다. 그러나 최근 보다 정밀하면서도 안정성이 우수한 풍상 차분법의 알고리즘이 개발되어 사용되고 있다.

(5) 연속방정식과 운동량 방정식의 연계

유동의 지배방정식을 풀 때 어려운 점 중의 하나는 운동량 방정식 내에 포함되어 있는 압력은 별도의 연속방정식이 만족되도록 결정되어야 한다는 점이다. 따라서 연속 방정식과 운동량 방정식은 압력이라는 끈을 통해 상호 밀접한 관계를 갖고 있다고 말할 수 있다. 그래서 수치해석 기법도 이러한 점을 염두에 두고 개발되고 있다. 여기서, 하나의 시간 스텝에서 압력과 속도를 동시에 구하느냐 혹은 압력을 먼저 구하고 이어서 속도를 구하느냐에 따라 두 가지 방법으로 나누어진다.

① segregated method; 연속 방정식이 만족되도록 압력을 먼저 구하고 이를 사용하여 속도를 구하는 방법이다.

② coupled method; 압력과 속도를 미지수로 놓고 동시에 푸는 방법이다.

위 두 가지 방법 중에서 알고리즘이 단순하다는 점에서는 전자의 방법이 유리하고 수렴이 빠르고 보다 정확하다는 점에서는 후자의 방법이 좋다.

③ SIMPLE(semi-implicit pressure method for pressure-linked equation); 이 방법은 전자와 후자의 중간 방법이라 볼 수 있다.

(6) 행렬식의 해법

차분화를 하였을 때 얻어지는 산술 방정식을 어떠한 반복 기법으로 푸느냐에 따라서도 다양한 방법이 소개되고 있다.

① SOR 법 (successive over-relaxation method); 여기서는 Gauss-Seidel 법으로 구한 해와 이전 단계에서 구한 해와의 차이(즉 수정량)에 이완 계수(relaxation factor)를 곱한 것을 새로운 수정량으로 하여 보정하는 방법이다. 프로그램이 단순하지만 병렬성이 떨어진다는 단점이 있다.

② CG 법 (conjugate gradient method); 이전 단계에서 구한 해에서 함수의 기울기(gradient)를 구한 뒤 이를 이용하여 수렴을 빠르게 하는 방법이다. 병렬성이 뛰어나 최근 더욱 많이 사용되고 있는 추세이다.

③ Multi-grid 법; 해의 스펙트럼이 다양한 파수를 보일 때 격자계의 크기를 바꾸어가면서 반복계산을 한다면 수렴이 빨라진다는 아이디어로 개발된 기법이다.

나. 난류유동의 수치해석

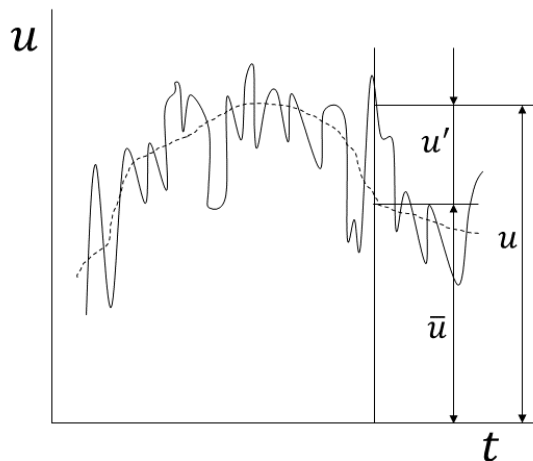
(1) 난류운동

자연과학이나 공학의 응용분야에서 일어나는 유동은 대부분 난류(turbulent flow)이다. 반면에, 층류유동(laminar flow)은 베어링 안에 있는 윤활유와 같이 유로의 크기가 매우 작고 점성이 높은 구조물에서만 볼 수 있는 보통의 유동이 아닌 예외적인 유동이다.

난류를 정확히 정의한다는 것은 매우 어려우나, 대략적인 난류유동의 특성을 나열하면 다음과 같다.

- ① 매우 불규칙적이고 임의성이 강하다.
- ② 강한 확산 특성(diffusivity)을 가진다. 따라서 혼합이 빠르며, 운동량, 열 및 질량 전달 속도가 증가된다.
- ③ 레이놀즈 수(Reynolds number)가 높은 곳에서 발생한다.
- ④ 3차원 특성을 가지며, 변동량(fluctuation)이 크다.
- ⑤ 강한 소산 특성(dissipation)을 가진다.
- ⑥ 연속체(continuum)특성을 가진다. 따라서 연속체 가정으로부터 유도된 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식의 지배를 받는다.
- ⑦ 유체(fluid)의 특징이 아닌 일종의 유동(flow) 현상이다.

난류에서는 속도나 압력과 같은 유동 상태량이 시간상에서 심하게 요동을 친다. 따라서 어느 일정 구간동안 시간-평균을 취하여 유동을 이해하는 것이 효적일 수 있는데, 이를 레이놀즈-평균(Reynolds average)이라 부른다: 실제로는 시간-평균 이외에도 공간-평균과 앙상블-평균(ensemble-average) 등이 있다. 이때 유동 상태량의 순간 값과 평균값의 차이를 변동(또는 섭동)량이라 정의한다.



[그림 5] 난류유동에서 시간에 따른 속도의 변화

난류유동 안의 어느 고정된 위치에서 속도를 측정하면, 그림 5와 같이 시간에 따른 속도의 변화를 얻을 수 있다. 순간 속도의 변동 성분이 시간-평균 속도를 기준으로 불규칙하게 나타난다. 순간속도 u 는 시간-평균 속도 $\bar{u}$ 와 변동 속도성분 u' 과의 합으로 다음과 같이 나타낸다.

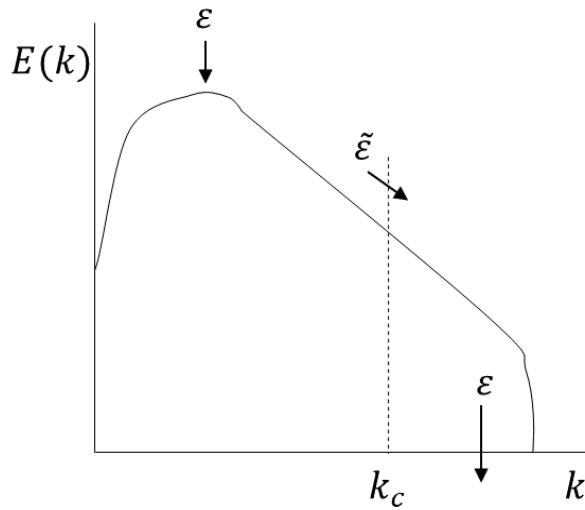
$$u = \bar{u} + u' \quad (\text{식 6})$$

참고로 유동이 층류이면 변동 속도성분이 $u'=0$ 이 된다. u' 은 난류 특성상 공간과 시간의 함수이지만 $\bar{u}$ 는 반드시 그렇지 않은 않다.

3차원 공간에서 (x,y,z)에 해당하는 속도 성분을 (u,v,w)라 하면 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)는 다음과 같이 정의된다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'^2 + v'^2 + w'^2} \quad (\text{식 7})$$

난류의 세기(intensity)가 증가할수록 변동량이 증가하며, 역시 난류 운동에너지도 증가한다. 따라서 난류 운동에너지는 난류의 세기를 나타내는 척도이다. 기하학적인 형태나 외부의 힘에 의해 유체에 에너지가 공급되면 큰 스케일의 소용돌이(eddy)가 형성되고, 이어 이 소용돌이들은 에너지 손실 없이 연속적으로 크기가 보다 작은 여러 개의 소용돌이들로 나뉘어진다. 다시 말하면, 큰 스케일의 소용돌이로부터 작은 스케일로 에너지가 전달되는데, 이를 에너지 캐스케이드(energy cascade)라 부른다. 마지막에는 난류가 가질 수 있는 가장 작은 스케일에서 난류 에너지가 점성효과(viscous effect)에 의해 내부 에너지(internal energy)로 바뀌는데, 이를 난류 에너지 소산(dissipation) 또는 점성소산이라 한다. 이에 대한 개요도를 운동 에너지와 파수(wave number)의 관계로써 그림 6에 나타내었다.



[그림 6] 스펙트럴 공간에서 운동에너지의 동적 특성.

여기서 파수는 소용돌이 크기의 역수와 밀접한 관계가 있으며, 따라서 큰 파수는 작은 소용돌이를 의미한다. 그림에 따르면 ε_I 는 외부에서 큰 스케일의 소용돌이로 에너지가 공급되는 속도(난류에너지 생성율, production rate)이며 $\tilde{\varepsilon}$ 와 ε 은 파수 k_c (cutoff)를 통과하는 에너지 전달 속도와 점성효과에 의한 난류에너지 소산율(dissipation rate)을 각각 나타낸다. 유동이 국소적으로 평형상태에 있으면, 결국 $\varepsilon_I = \tilde{\varepsilon} = \varepsilon$ 의 등식이 성립한다.

난류는 연속체 형상이기 때문에 유동은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식에 의하여 지배를 받는다. 그러나 에너지 캐스케이드 때문에 에너지는 난류가 가지는 가장 작은 스케일(점성소산이 일어나는)에서까지도 대부분 존재하며, 이 스케일은 레이놀즈 수가 커지면 커질수록 기하급수적으로 작아진다. 다시 말하면 수치해석으로 난류를 해석하기 위해서는 이처럼 작은 스케일까지 격자점을 충분히 두어 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 한다(직접 수치 모사; DNS; direct numerical simulation). 그러나, 현재의 컴퓨터 용량으로는 단지 레이놀즈 수가 매우 작은 유동에만 제한적으로 DNS를 적용할 수 있는 실정이다. 현재의 놀랄만한 컴퓨터 발전 상황을 감안하더라도, 공학적으로 관심이 있는 복잡한 난류유동에 대하여 이 방정식을 직접 해석하기란 가까운 미래에도 거의 불가능하다. 따라서 대부분의 난류유동 해석 모델링(modeling)을 필요로 한다. 이 방법은 격자점의 수를 현재의 컴퓨터 용량으로 해결할 수 있을 정도로 줄이는 대신에,

작은 스케일을 가지는 소용돌이의 영향을 모델링하는 것이다. 따라서 모델링을 이용하여 정확히 난류를 파악하는 것은 적용된 모델링의 정확성과 효율성에 달려있다.

지금까지 개발된 대표적인 모델링 방법으로는 레이놀즈-응력 모델(Reynolds-stress model)과 아격자 모델(subgrid-scale model)등이 있으며, 본 교재에서는 이들을 중심으로 설명한다. 설명의 편의를 위하여 일정한 물성 값(properties)을 가지는 비압축성 유체의 난류유동만을 다루기로 한다.

앞서 설명한 바와 같이, 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{식 8})$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (\text{식 9})$$

이때 u_i 는 속도벡터, p 는 수정된 압력(실제 압력을 밀도로 나눈 값), 그리고 ν 는 유체의 동점성 계수(kinematic viscosity)이다. 식 8과 식 9는 Einstein의 표기법을 이용하여 표현된 것이다. 이 표기법에서는 각 항(term) 안에 있는 두 번 반복된 인덱스(index)는 모든 차원에 대한 합(sum)을 의미한다. 예를 들면 식 9에서 $u_j \partial u_i / \partial x_j$ 는 인덱스 $j(j=1, 2, 3)$ 가 두 번 반복되었기 때문에

$\sum_{j=1}^3 u_j \partial u_i / \partial x_j$ 을 의미하며, 반면에 인덱스 $i(i=1, 2, 3)$ 가 반복되지 않았기 때문에 단순히 벡터 성

분을 나타낸다. 위에서 정의된 난류 운동에너지도 $\overline{u'_i u'_i} / 2$ 로 간단히 나타낼 수 있다. 인덱스 $i(i=1, 2, 3)$ 는 (x, y, z) 에 대응하며, 따라서 $u_i(i=1, 2, 3)$ 와 $x_i(i=1, 2, 3)$ 는 각각 (u, v, w) 와 (x, y, z) 을 의미한다.

(2) 레이놀즈-응력모델(Reynolds-stress models)

앞에서 설명한 바와 같이 속도나 압력과 같은 유동 상태량을 레이놀즈-평균과 변동량으로 나눌 수 있다. 임의의 상태량을 (ψ) 라 하면 레이놀즈-평균($\overline{\psi}$)과 변동량(ψ')은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{\psi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \psi(x, y, z, t) dt, \quad \psi' = \psi - \overline{\psi} \quad (\text{식 10})$$

여기서 Δt 는 적분구간의 크기를 나타내며, 이는 유동의 상태에 따라 결정된다. ψ' 은 반드시 시간의 함수(물론 공간의 함수이기도 함)이나, $\overline{\psi}$ 는 경우에 따라 시간의 함수가 아닐 수도 있다. 식 10에 따라 속도와 압력은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$u_i = \overline{u_i} + u'_i, \quad p = \overline{p} + p' \quad (\text{식 11})$$

연속방정식 8과 Navier-Stokes 방정식 9에 레이놀즈-평균을 적용하면 다음과 같은 레이놀즈-평균 지배방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{식 12})$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{식 13})$$

이때 $\tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ 는 레이놀즈-응력 텐서(tensor)이다.

(3) 에디-점성계수(eddy viscosity)

레이놀즈-평균속도 $\bar{u}_i$ 와 압력 $\bar{p}$ 에 대한 정보를 얻기 위해서는 식 12와 13을 풀어야 한다. 그러나 레이놀즈-응력 τ_{ij} 에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 이는 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 Boussinesq의 가정이 널리 쓰이고 있다. Boussinesq는 전단응력(Shear stress)과 속도 변형을 사이에 비례관계가 있는 층류유동에서처럼 레이놀즈-응력과 평균 변형을 사이에도 비례 관계가 있다고 다음과 같이 가정한다.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} = -2v_t \bar{s}_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} k = -v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (\text{식 14})$$

이때 $\bar{s}_{ij} = (1/2)(\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$ 는 레이놀즈-평균 속도 변형율이고, v_t 는 에디 점성계수(eddy viscosity)이다. 경우에 따라서는 밀도 ρ 를 곱한 μ_t 를 에디-점성계수 또는 난류 점성계수라 부르기도 하며, 이때를 v_t 를 에디-확산계수(eddy diffusivity) 또는 난류 확산계수라 부른다.

Boussinesq 가정에서 남아있는 문제는 에디-점성계수를 어떻게 정하느냐 하는 문제이다. 이와 같은 문제에서 가장 널리 쓰이는 방법이 차원해석(dimensional analysis)이다. 차원해석에 의하면 에디-점성계수는 특성속도(characteristic) V 와 특성길이(characteristic) L 의 곱으로 표시된다.

$$[v_t] = V \cdot L = [v] \quad (\text{식 15})$$

이때 $[\cdot]$ 차원(dimension)을 의미한다. 참고로 난류에서 자주 쓰이는 상태량의 차원을 미리 알 필요가 있으며, 대표적인 상태량의 차원을 정리하면 다음과 같다.

$$[k] = V^2 \quad (\text{식 16})$$

$$[\varepsilon] = V^3 L^{-1} \quad (\text{식 17})$$

$$[\bar{S}] = V L^{-1} \quad (\text{식 18})$$

식 16-18을 이용하면 $[v_t]$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$[v_t] = L^2 [\bar{S}] = [k]^{1/2} L = [k]^2 [\varepsilon]^{-1} \quad (\text{식 19})$$

$[v_t]$ 에 대한 관계식에서 어느 등식을 선택하느냐에 따라 여러 모델이 존재하며, 이를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 0-방정식 모델(zero-equation model)

$$v_t = c_\mu l_m^2 \left| \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right| (c_\mu) \text{는 무차원 상수} \quad (\text{식 20})$$

l_m 은 대수식(algebraic formula)으로부터 구함.

- 1-방정식 모델(one-equation model)

$$v_t = c_\mu k^{1/2} l \quad (\text{식 21})$$

k 는 수송방정식으로부터 그리고 l 은 대수식으로부터 구함.

- 2-방정식 모델(two-equation model)

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = c_\mu k^{1/2} l \quad (\text{식 22})$$

k 와 ε (또는 l) 둘 다 수송방정식으로부터 구함.

- 레이놀즈-응력 수송방정식 모델

(Reynolds-stress transport equation model)

$\overline{u_i u_j}$ 를 직접 수송방정식으로부터 구함.

앞서 설명한 바와 같이 레이놀즈-평균 지배방정식은 편미분 방정식으로 구성되었기 때문에, 이를 풀기 위해서는 평균 속도(또는 압력)에 대한 초기조건과 경계조건을 반드시 주어야 한다. 뿐만 아니라, 모델에 따라 풀어야 되는 수송 방정식도 역시 편미분 방정식으로 구성되어 있다. 따라서 난류 운동에너지, 소산율 등 각 수송방정식의 종속변수에 대한 초기조건과 경계조건도 역시 주어져야 한다.

(3) 아격자 응력모델(subgrid scale stress model)

큰-에디 모사(LES; large-eddy simulation)는 난류유동 안에 존재하는 각종 에디(또는 소용돌이)를 크기에 따라 이등분한 후, 단지 큰 스케일의 에디(large-scale eddy)만을 수치해석에 의해 직접 해석하는 방법이다. 따라서 작은 스케일의 에디에 대해서는 직접 해석하는 대신에 큰 스케일에 대한 영향만을 모델링을 통하여 반영하게 된다. 큰 에디가 대부분의 난류에너지를 가지고 있고 작은 에디는 난류의 보편적 특성을 가지고 있기 때문에, 아격자 모델은 유동의 종류에 따라 거의 변하지 않는 장점이 있다. 큰-에디 모사에서 큰 스케일의 에디와 작은 스케일의 에디 사이의 구분은 필터링(filtering)과정에 의하여 이루어진다.

큰 에디에 해당하는 물리량(속도나 압력 등)은 필터링 과정에 의하여 다음과 같이 정의되며, 일반적으로 윗줄(over-bar)로 표시한다.

$$\overline{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi, t') G(x - \xi, t - t') dt' d^3\xi \quad (\text{식 23})$$

여기서 G는 필터함수(filter function)이며, 적분은 전 유동영역(물리적 공간)에서 수행된다.

필터링 과정, 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식에 적용하면 큰-에디 모사를 위한 큰-에디 지배방정식으로서 다음을 얻게 된다.

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{식 24})$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u}_i \overline{u}_j) = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (\text{식 25})$$

결과적으로 위 지배방정식은 큰 스케일의 에디만을 지배하게 된다.

반면에 작은 스케일의 영향은 다음과 같은 아격자 응력(subgrid-scale stress)에 의하여 반영된다.

$$\tau_{ij} \equiv \overline{u_i u_j} - \overline{u}_i \overline{u}_j \quad (\text{식 26})$$

아격자 응력은 미지의 양이며, 따라서 큰 스케일의 정보를 이용하여 모델링되어야 한다.

큰-에디 지배방정식은 편미분 방정식으로 구성되었기 때문에, 이를 풀기 위해서는 평균 속도(또는 압력)에 대한 초기조건과 경계조건을 반드시 주어야 한다.

대부분의 아격자 모델에서 아격자 응력 τ_{ij} 는 에디-점성계수 모델(eddy-viscosity model)을 이용하여 다음과 같이 모델링한다.

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_t \overline{s}_{ij} = -\nu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{식 27})$$

차원해석에 따르면, 에디-점성계수 v_t 는 특성속도 V 와 특성길이 L 의 곱으로 표시된다. 아 격자 모델에서 특성길이는 주로 해석격자(grid)의 크기 $\overline{\Delta}$ 을 취하는데 반하여, 특성속도는 모델 마다 각기 다르다.

대표적인 모델은 Smagorinsky(1963)에 의한 에디-점성계수 모델로 특성길이와 특성속도를 각각 $L = C_s \overline{\Delta}$ (C_s 는 Smagorinsky 상수임)와 $V = L |\overline{S}| = (C_s \overline{\Delta}) |\overline{S}|$ 를 선택하였다. 결과적으로 에디-점성계수는 다음과 같이 표시된다.

$$v_t = (C_s \overline{\Delta})^2 |\overline{S}| = C \overline{\Delta}^2 |\overline{S}| \quad (\text{식 28})$$

이때 $|\overline{S}| = (2 \overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij})^{1/2}$ 는 큰-에디 변형율의 크기이며, C 는 모델상수이다.

다. 비상발전기 연도의 EMP 대책

(1) 서론

핵무기 또는 EMP 무기에 의해서 외부에서 공급되는 전원이 차단되는 경우를 대비해서 EMP 차폐를 위한 시설에는 비상발전기를 설치한다. 비상발전기는 보일러와는 달리 상시 운전이 되지 않으며 EMP 차폐시설의 비상발전기는 상시운전보다는 간헐운전으로 가정하여야 한다. 상시 운전하는 보일러는 자연배기식을 사용하기 때문에 연도내부의 배기속도는 3~5m/s 정도이며, 비상발전기는 강제배기식을 사용하고 배기가스의 속도는 20~25m/s로 속도를 설정한다.⁽¹⁾ 비상발전기는 사용되는 엔진의 제작사, 발전기의 형식 및 용량에 따라 각각 특징이 다르며 이에 따라 배기 연도의 환경도 달라진다.

디젤 발전기는 비교적 연료비가 저렴하고 작은 엔진으로부터 출력이 높은 선박용까지 다양한 크기가 있으며 주로 다용도 건물, 선박 등에 사용된다. 가솔린 엔진의 경우는 디젤 엔진에 비해 소음이 적지만 높은 출력의 엔진이 없어서 소규모 건물에 적용하는 경우가 많다.

상시운전의 경우 발전기와 보일러 연도의 배기속도를 거의 동일하게 맞추어야 하나 사용 중에 발생하는 하자로 인하여 많은 비용이 부담될 수 있다. 특히 발전기가 비상개념이 아닌 간헐적으로 동시에 가동되는 경우에는 연도 입상관을 분리하여야 한다. 비상발전기에 대한 내용은 건축법, 소방법 및 전기사업법에서 규정하고 있지만, 구체적인 시설에 대한 내용은 없고, 전기설비기술기준에서도 시설의무에 대한 규정은 없으며 예비전원은 사용전원과 전기적으로 분리되어야 한다⁽²⁾고 되어있다. KOSHA CODE E-84-2011 “비상전원의 선정 및 설치에 관한 기술지침”에서도 비상발전기의 용량, 비상발전기의 운전을 위한 환기 및 연소용 공기 등에 관한 사항만 기술⁽³⁾되어 있으며 EMP 차폐를 고려한 내용은 전혀 기술되어 있지 않다.

비상발전기의 연도는 보호시설의 EMP 차폐판을 관통하여 차폐효과를 떨어뜨리는 요인이 되고, EMP 차폐를 위하여 Waveguide Below Cutoff Array (WBC Array, 도파관 배열)를 설치하게 되면 연도의 유효 단면적이 줄어들게 된다.

따라서 본 논문에서는 WBC Array(도파관 배열)가 설치된 비상발전기 연도의 배기가스 배출특성을 고려하여 최적형상을 결정하는 것을 목표로 연구를 진행한다.

(2) 시뮬레이션

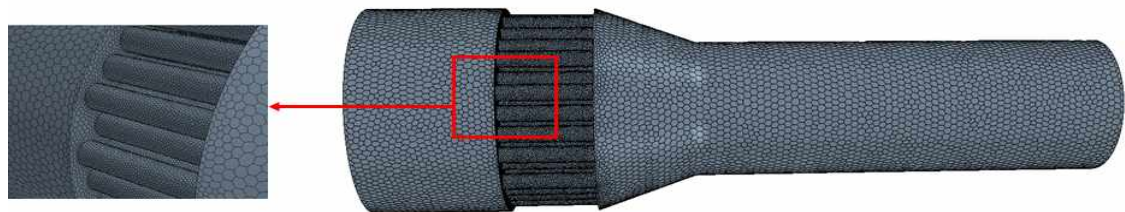
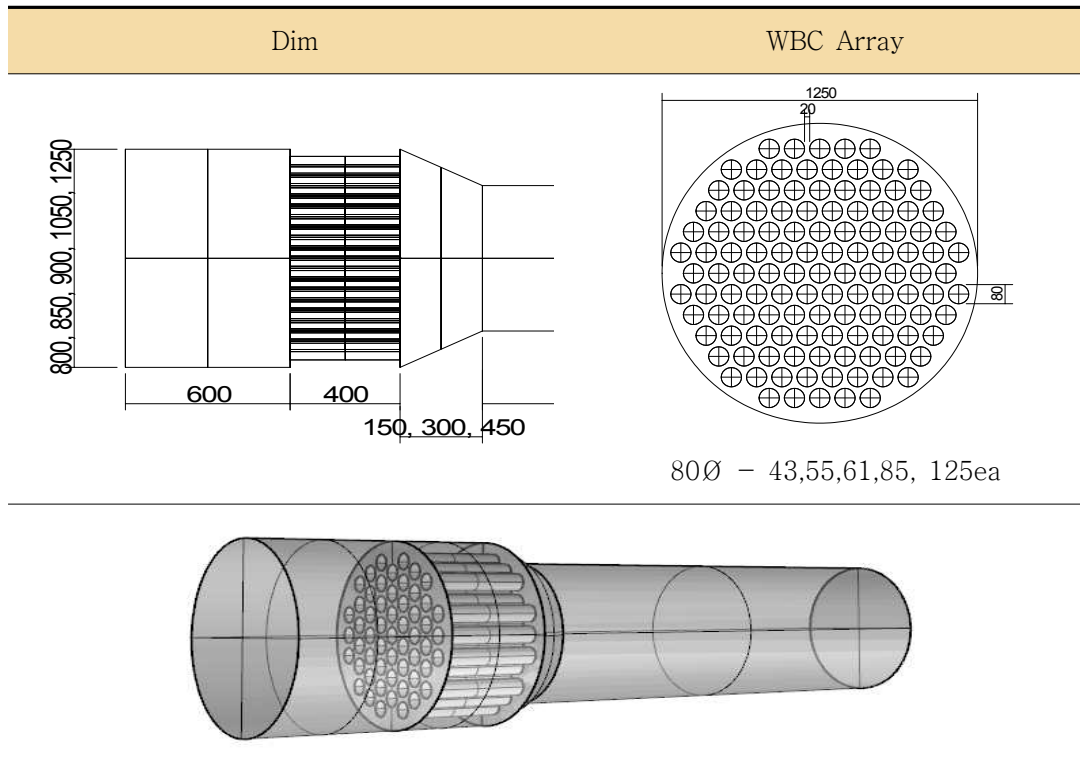
(가) 모델링 및 해석조건

비상발전기 연도 중간에 EMP 차폐를 위한 도파관이 설치되면 연도의 유효단면적이 줄어들게 되어 배기가스의 흐름이 원활하지 않게 된다. WBC 배열의 크기 및 형태의 최적화를 위해 CFD를 이용하여 해석을 실시하였다.

해석은 상용프로그램인 Star-CCM⁺ 10.04.009를 사용하였으며 이를 이용해서 도파관 배열의 입구, 중앙부 및 출구부분과 연도의 입구와 출구의 배기가스 유속을 해석하였다. 비상발전기의 연도는 발전기로부터 배기되는 부분인 Main 연도, EMP 차폐를 위한 도파관 배열이 설치되는 부분, Main 연도와 결합되는 접속부위 및 외부로 배출되는 추가연도로 나누어 4부분으로 형태를 구분하였다.

Main 연도의 관경은 700mm, 추가연도의 관경은 800, 850, 900, 1,050mm 및 1,250mm으로 하고 접속관의 길이를 150, 300mm와 450mm의 3가지로 하여 유속 등을 검토하였다. 표 1에 형태, 표 2에 시뮬레이션 케이스를 나타내었으며, 그림 7에 해석을 위한 Mesh 작성을 나타내었다.

[표 1] 비상발전기 연도의 형태



[그림 7] Volume Mesh 작성

[표 2] 시뮬레이션 조건

Connection diameters [mm]	WBC Array	Connection length to the main line [mm]	Exhaust air velocity [m/s]	Case
800	80Ø 43ea	150	15	800-150-15
			20	800-150-20
			25	800-150-25
		300	15	850-300-15
			20	800-300-20
			25	800-300-25
		450	15	800-450-15
			20	800-450-20
			25	800-450-25
850	80Ø 55ea	150	15	850-150-15
			20	850-150-20
			25	850-150-25
		300	15	850-300-15
			20	850-300-20
			25	850-300-25
		450	15	850-450-15
			20	850-450-20
			25	850-450-25
900	80Ø 61ea	150	15	900-150-15
			20	900-150-20
			25	900-150-25
		300	15	900-300-15
			20	900-300-20
			25	900-300-25
		450	15	900-450-15
			20	900-450-20
			25	900-450-25
1,050	80Ø 85ea	150	15	1050-150-15
			20	1050-150-20
			25	1050-150-25
		300	15	1050-300-15
			20	1050-300-20
			25	1050-300-25
		450	15	1050-450-15
			20	1050-450-20
			25	1050-450-25
1,250	80Ø 125ea	150	15	1250-150-15
			20	1250-150-20
			25	1250-150-25
		300	15	1250-300-15
			20	1250-300-20
			25	1250-300-25
		450	15	1250-450-15
			20	1250-450-20
			25	1250-450-25



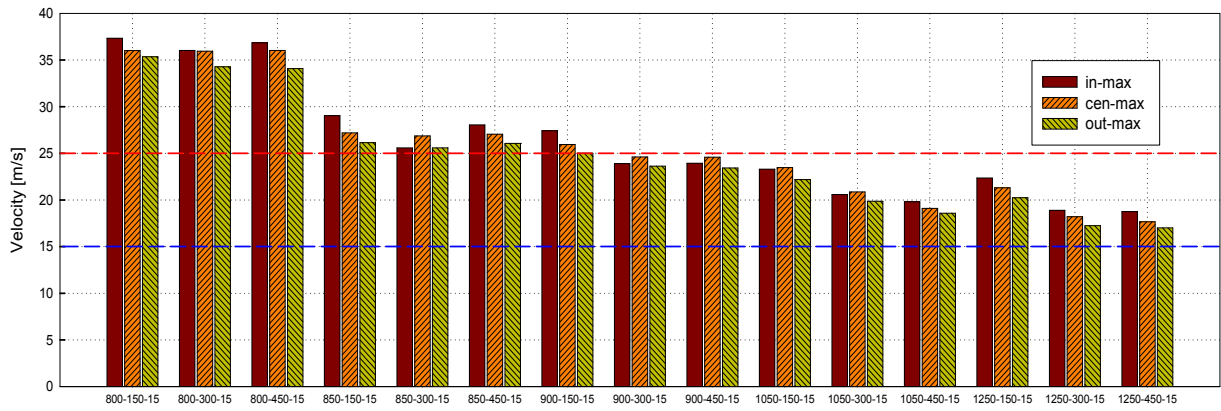
[그림 8] 비상발전기 연도의 EMP 차폐 평가

(나) 해석 결과

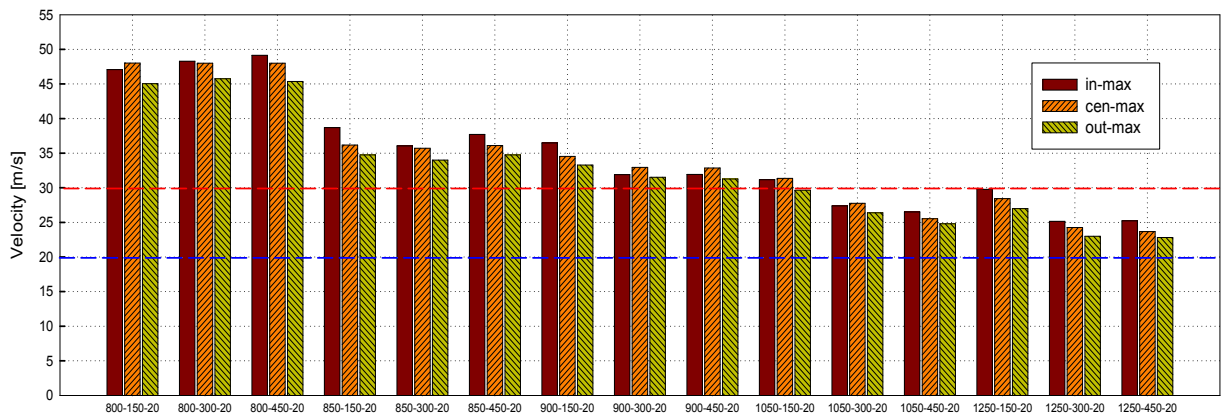
① 최대 배기속도

그림 9는 비상발전기의 배기속도를 15m/s로 한 경우 도파관 배열의 입구, 중앙부 및 출구에서의 배기가스 유속의 최대치를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 각 결과를 비교하면 도파관 배열을 설치한 외부 관경이 800mm인 경우는 접속 길이에 관계없이 비상발전기의 배기속도인 15m/s의 2배 이상의 값을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 도파관 배열의 외부 관경이 850, 900mm인 경우는 20 ~ 25m/s 내외, 1,050mm인 경우는 접속 길이가 150mm인 경우를 제외하고는 20m/s 정도의 값을 보이며 1,250mm인 경우도 1,050mm인 케이스와 유사한 값을 보이고 있다. 연도에서의 배기속도가 15m/s인 경우 도파관 배열에서의 배기속도가 10m/s 정도까지 빠른 것을 허용하면 도파관을 구성하는 외부관경이 800mm인 경우를 제외하고 대부분의 케이스가 만족하는 것으로 나타났다.

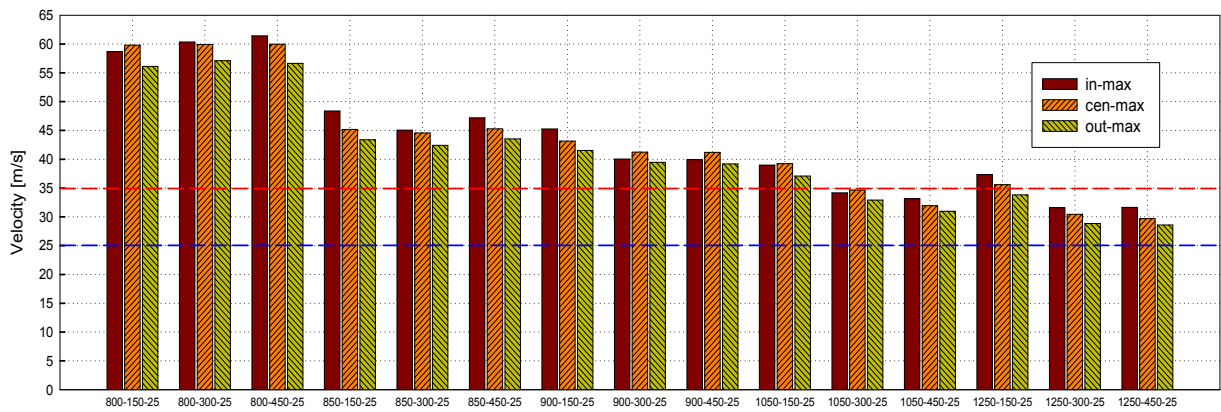
그림 10은 비상발전기에서의 배기속도가 20m/s인 경우, 도파관 배열에서의 배기속도를 기본배기속도보다 10m/s 정도 빨라지는 것을 허용하면 기본연도와 도파관 배열의 접속 길이가 150mm이고 도파관 배열의 외부 관경이 900mm인 경우를 제외하고 도파관 배열의 외부관경이 900, 1,050 및 1,250mm인 경우가 이 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 그림 11에서 비상발전기의 배기속도가 25m/s인 경우는 도파관 배열의 외부관경이 1050, 1,250mm인 경우가 동일한 조건을 만족시키는 것으로 나타났다.



[그림 9] WBC 배열 입구, 중앙부 및 출구에서의 최대속도 (15m/s)



[그림 10] WBC 배열 입구, 중앙부 및 출구에서의 최대속도 (20m/s).



[그림 11] WBC 배열 입구, 중앙부 및 출구에서의 최대속도 (25m/s).

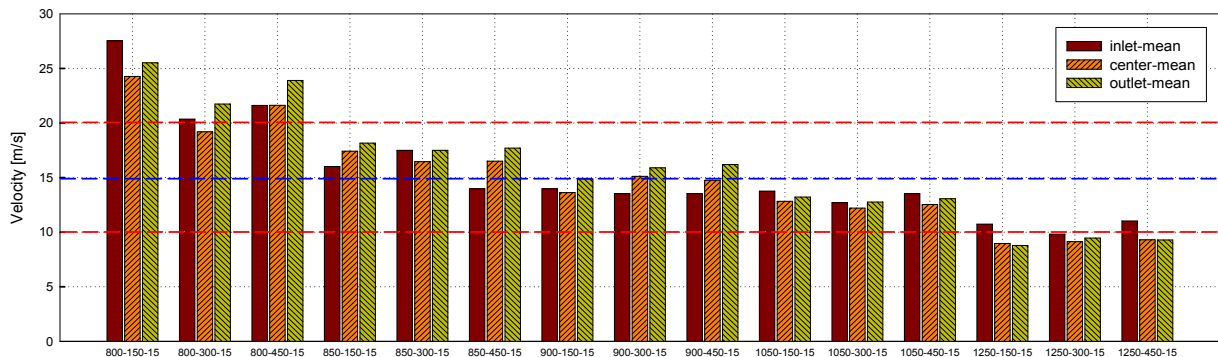
② 평균 배기속도

그림 12는 비상발전기의 배기속도가 15m/s인 경우 시뮬레이션 각 케이스의 도파관 배열의 입구, 출구 및 중앙부에서의 배기속도의 평균값을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 평균값은 배기속도 $\pm 5\text{m/s}$ 를 범위를 기준으로 하면 도파관 배열을 구성하는 외부 환경이 850, 900, 1,050mm인 케이스가 기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 또한 도파관 배열을 구성하는 외부 환경이 900mm인 경우가 비상발전기의 배기속도인 15m/s와 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다.

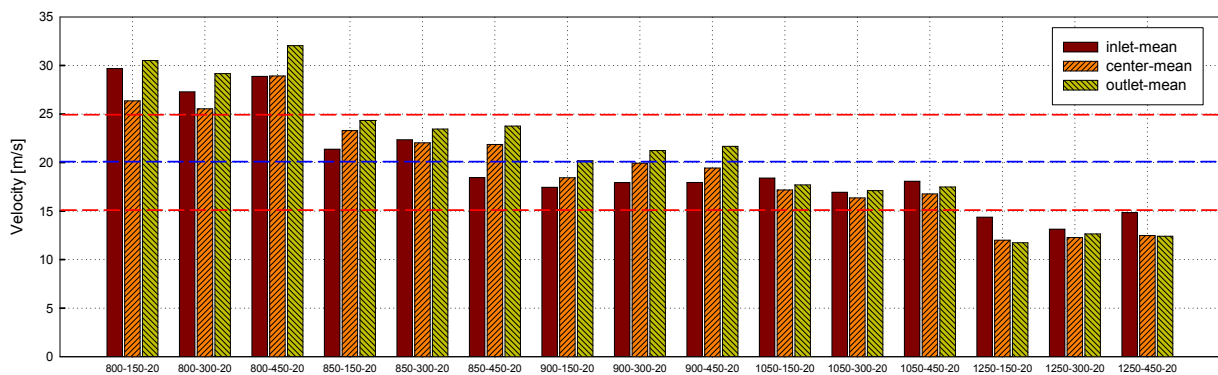
그림 13은 배기속도가 20m/s인 경우의 결과를 나타낸 것으로 15m/s의 경우와 유사한 결과를 보이며 도파관 배열을 구성하는 외부 환경이 850, 900mm인 경우가 비상발전기의 배기속도인 20m/s와 유사한 속도를 보이는 것으로 나타났다. 또한 배기속도 $\pm 5\text{m/s}$ 를 기준으로 하면 도파관 배열의 외부환경이 850, 900mm 및 1,050mm인 경우가 그기준을 만족하는 것으로

나타났다.

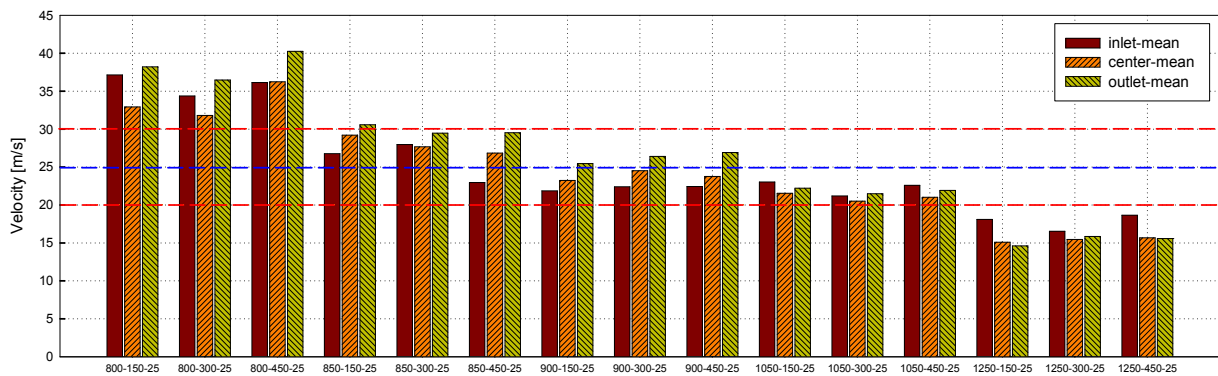
그림 14는 배기속도가 25m/s인 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 도파관 배열의 평균속도를 25m/s를 기준으로 하면 850, 900mm 인 경우가 거의 유사한 값을 보였으며 배기 속도 ± 5 m/s를 기준으로 하면 도파관 배열의 외부환경이 850, 900mm와 1,050mm인 경우가 기준을 만족시키는 것으로 나타났다.



[그림 12] WBC 배열 입구, 중앙부 및 출구에서의 평균속도(15m/s).



[그림 13] WBC 배열 입구, 중앙부 및 출구에서의 평균속도(20m/s).



[그림 14] WBC 배열 입구, 중앙부 및 출구에서의 평균속도(25m/s).

(3) 결과분석

도파관배열을 구성하는 외부 환경 크기, 배기속도의 최대 및 평균값을 이용하여 비상발전기 연도의 중간에 WBC 배열을 설치하는 경우 형상의 적정성을 검증하였다. 최대 배기속도는 비상발전기에서 배기되는 속도보다 10m/s를 넘는 경우를 제외하였고 평균배기속도는 비상발전기의 배기속도 ± 5 m/s를 기준으로 하여 그 범위를 넘는 케이스는 제외하는 것으로 평가를 실시하였다. 평가결과 비상발전기의 연도가 700mm, 비상발전기의 연도와 도파관 배열과의 접촉길이가 450mm이고 발전기의 배기속도가 15m/s 인 경우는 도파관 배열의 외부환경은 900mm를 사용하는 것이 가능하나 발전기의 배기속도가 20, 25m/s인 경우, 최대 배기속도를

이용하여 평가한 결과, 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 도파관 배열의 외부 환경 1,050mm, 접속길이 150mm, 발전기의 배기속도가 15m/s인 경우는 WBC 배열에서의 최대치와 평균값을 이용한 평가 모두 기준을 만족시키지만 비상발전기 배기속도가 20, 25m/s인 경우에는 그 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

또한 도파관 배열을 구성하는 외부환경이 1,050mm, 비상발전기 연도와의 접속 길이가 300mm는 비상발전기의 배기속도가 15, 20, 25m/s일 때 최고속도에 의한 평가, 평균값에 의한 평가모두 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 동일한 조건에서 접속 길이가 450mm인 경우도 각 조건을 만족시키는 것으로 나타났다.

(4) 결론

EMP 차폐를 위한 도파관 배열이 설치된 대형 비상발전기 연도의 최적형상을 결정하는 것을 목표로 연구를 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- EMP 차폐를 위한 도파관 배열을 연도에 설치하는 경우 도파관 배열의 외부환경, Main 연도와의 접속 길이가 배기가스 흐름에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 도파관 배열의 외부 환경 1,050mm, 접속 길이 150mm, 발전기의 배기속도가 15m/s인 경우는 도파관 배열에서의 최대 배기속도와 평균값을 이용한 평가 모두 기준을 만족시키지만 비상발전기 배기속도가 20, 25m/s인 경우에는 그 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.
- 도파관 배열의 외부환경이 1,050, 1,250mm이고 접속 길이가 300, 450mm인 경우는 비상발전기의 배기속도가 15, 25m/s 및 25m/s인 경우 모든 조건을 만족시키는 것으로 나타났다.

라. EMP 차폐를 위한 덕트의 다층형 도파관 배열 개발

(1) 서론

도파관 배열 (Waveguide - Below - Cutoff Array, WBCA)은 EMP를 차폐할 목적으로 위해 설치하는 것으로 사각형, 육각형, 및 원형의 형태가 일반적으로 많이 사용하고 있다. 전기, 전자분야에서는 도파관의 1개의 직경과 한변의 길이는 10mm이내의 비교적 작은 크기를 주로 사용하고 있지만 건축설비 분야의 외기도입 및 배기구에 사용하는 도파관의 크기는 압력 손실 및 원활한 공기유동을 위해 이보다 큰 크기를 사용하는 것이 일반적이다. 건축물에서 주로 사용하는 도파관의 형태는 사각형과 6각형이지만 도파관배열을 사용할 때 발생하는 압력손실, 도파관배열에서의 공기유동에 대한 평가는 이루어지지 않고 있다.

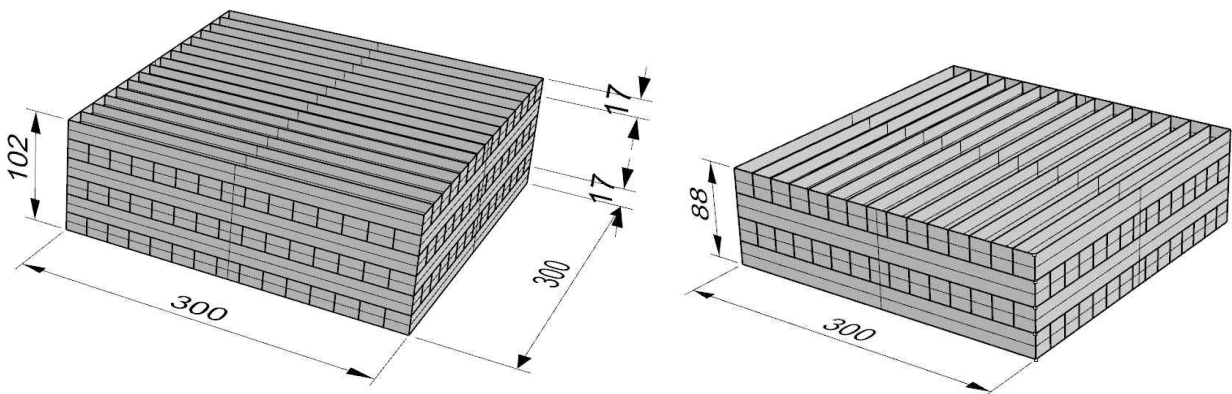
따라서 본 논문에서는 SE 80 및 SE 100의 성능을 갖는 사각형, 육각형 및 다층구조 도파관 배열을 대상으로 공기의 유동을 평가하는 것을 목표로 연구를 진행하였다.

(2) 유동 특성 시뮬레이션

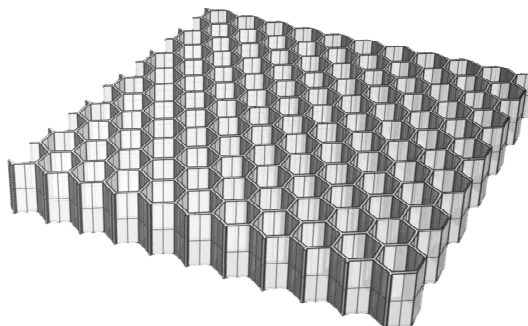
도파관의 형태에 따른 공기유동 특성을 평가하기 위하여 상용프로그램인 Star-CCM⁺ 11.02.009.를 이용하여 도파관배열에서의 공기 유동특성을 파악하였다.

해석은 각형(Grid Type), 육각형(Honeycomb Type)과 다층 구조(2-ply, 4-Ply, 6-Ply, 8-Ply)의 3가지 도파관 형태를 해석하고, 도파관을 구성하는 철판의 두께는 0.1mm, 1mm로 2 Case를 대상으로 하였다.

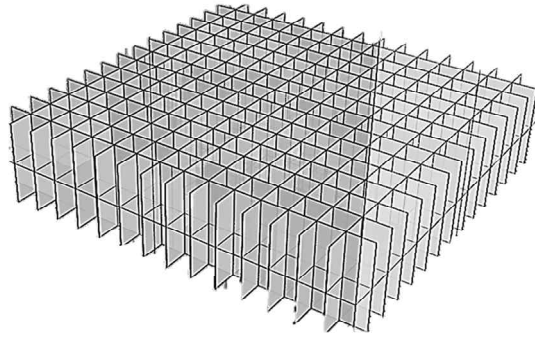
그림 15와 표 3에 해석에 사용한 도파관배열 형태와 치수를 나타내었으며 표 4에 시뮬레이션 Case를 나타내었다. 도파관의 모듈은 20mm와 30mm, 입구의 유속은 1, 3, 6, 9, 12m/s 및 15m/s로 하여 총 144 case를 해석하였다.



(a) Multi-layer Type



(b) Honeycomb Type



(c) Grid Type

[그림 15] Types of WBC arrays

[표 3] Simulation model

THK.	SE	WBC Type	Module size [mm]	Total length [mm]
0.1mm	80dB	2-Ply	20 (19.8)	110
		4-Ply		88
		6-Ply		80
		8-Ply		74
		Honeycomb		35.91
		Grid		50.65
	100dB	2-Ply		140
		4-Ply		116
		6-Ply		104
		8-Ply		95
		Honeycomb		47.40
		Grid		65.43
1mm	80dB	2-Ply	30 (28)	160
		4-Ply		136
		6-Ply		116
		8-Ply		108
		Honeycomb		57.28
		Grid		80.80
	100dB	2-Ply		205
		4-Ply		172
		6-Ply		153
		8-Ply		140
		Honeycomb		74.64
		Grid		103.20

[표 4] Simulation Case

THK.	SE	WBC-Array	Inlet-Vel [m/s]	Case
0.1mm	80dB	2-Ply	1,3,6,9, 12,15	6 case
		4-Ply		6 case
		6-Ply		6 case
		8-Ply		6 case
		Honeycomb		6 case
		Grid		6 case
	100dB	2-Ply		6 case
		4-Ply		6 case
		6-Ply		6 case
		8-Ply		6 case
		Honeycomb		6 case
		Grid		6 case
1mm	80dB	2-Ply	1,3,6,9, 12,15	6 case
		4-Ply		6 case
		6-Ply		6 case
		8-Ply		6 case
		Honeycomb		6 case
		Grid		6 case
	100dB	2-Ply		6 case
		4-Ply		6 case
		6-Ply		6 case
		8-Ply		6 case
		Honeycomb		6 case
		Grid		6 case
Total				144 case



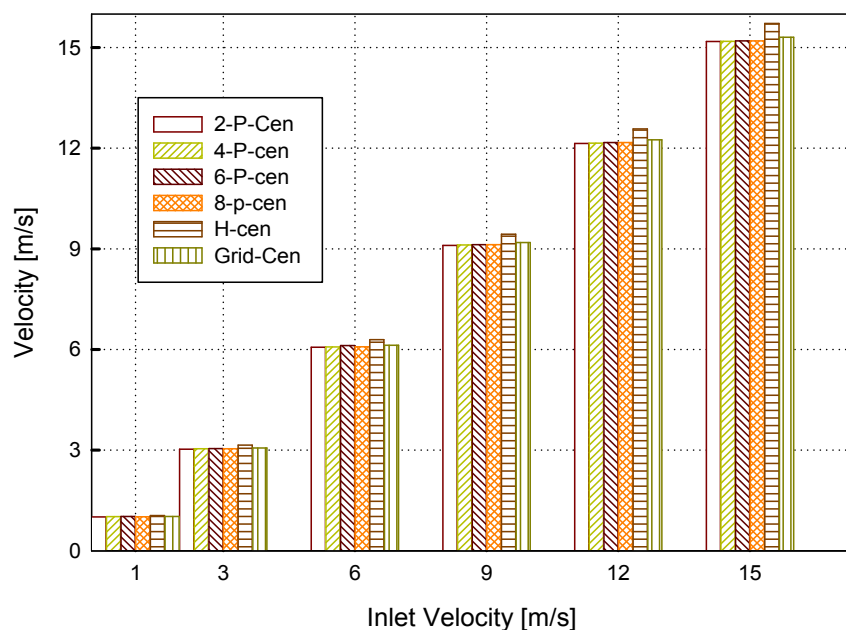
(3) 해석결과

(가) 도파관배열 중앙부의 유속

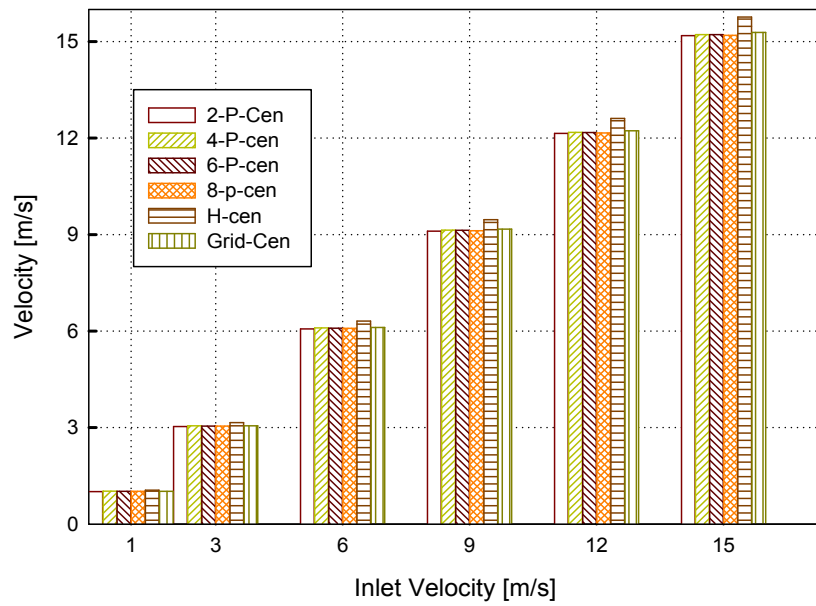
그림 16은 SE가 80dB 이고, 도파관의 철판 두께 0.1mm, 도파관 모듈의 한변의 길이가 20mm인 경우 다층형, 허니컴 Type 및 Grid Type의 도파관 배열 길이의 길이방향 중심부 유속을 해석한 결과를 나타낸 것이다. 외부에서의 입구 유속은 1,3,6,9,12m/s 및 15m/s의 6 종류를 대상으로 평가하였다.

해석결과 비교적 저속인 6m/s 이하에서는 도파관 배열 중앙부에서의 유속이 각 형태별로 거의 동일한 값을 보이고 있으나 Honeycomb Type의 경우 다른 형태에 비해 0.5~1.0m/s 정도 높은 값을 보였다. 그림 17은 그림 16과 동일한 조건에서 SE 가 100인 경우의 유속해석 결과를 나타낸 것이다. 그림 16과 비교적 유사한 형태의 결과를 얻을 수 있었으며 Honeycomb Type이 다른 형태에 비해 유속이 0.6~1.2m/s 정도 빠르게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 18은 철판의 두께가 1mm이고 도파관 모듈의 크기가 30mm인 경우 다층형, 각형 및 허니컴 형태의 도파관 배열의 길이방향 중심부에서의 유속을 평가한 결과를 나타낸 것이다. Fig에서 알 수 있는 바와 같이 철판의 두께가 0.1mm인 경우에 비해서 외부에서의 유속이 9m/s를 넘게 되면 각 Type 별로 다른 유속해석 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 입구의 유속이 9m/s인 경우 다층형 구조의 경우 각각 형태별로 중앙부에서의 유속 차이는 1m/s 이상이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 입구의 유속이 12m/s인 경우, 허니컴과 각형 도파관 배열에서의 유속은 14m/s 정도로 나타났다. 입구의 유속을 15m/s로 증가시키면 도파관 배열의 중앙부에서의 유속은 8-Ply Type의 경우 16.2m/s 정도로 유속이 나타나지만 Grid Type과 Honeycomb Type의 경우 17.5m/s 정도로 입구 유속에 비해 2.5m/s 정도 더 빨라지는 것으로 나타났다. 이는 다층형의 경우 중앙부에서의 단면적은 형태의 특성에 따라 가로방향, 세로방향으로 1개의 방향으로만 격벽이 발생하지만 Grid Type과 Honeycomb Type은 가로, 세로방향과 대각선방향에 2개 이상의 격벽이 발생되어 공기 유동면적이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

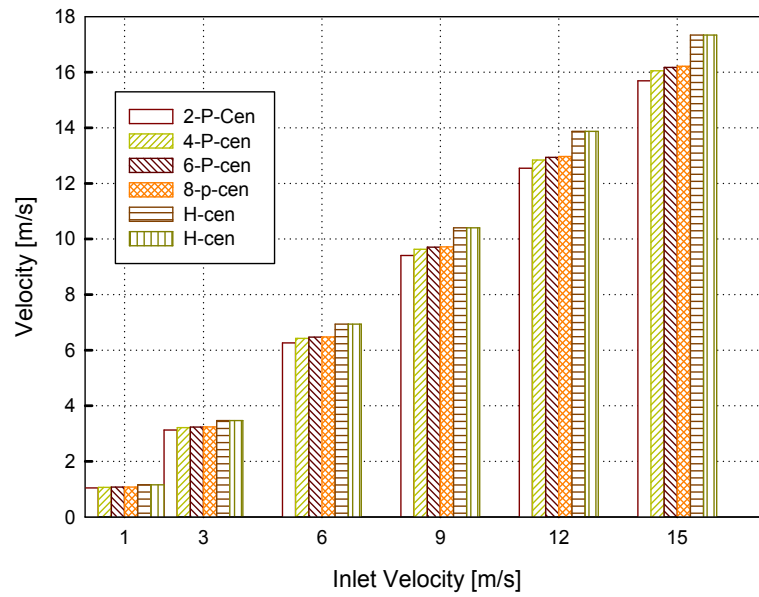
그림 19는 SE가 100dB인 경우의 도파관 배열의 중앙부에서의 유속 해석결과를 나타낸 것이다. 입구의 유속이 15m/s이면 다층형 Type은 각 Case가 유속의 차이가 거의 없으며 입구유속에 비해서 1.0m/s 정도 그 속도가 빨라지지만 Honeycomb, Grid Type은 입구유속에 비해서 2.5~2.8m/s정도 유속이 빨라지는 것을 알 수 있다.



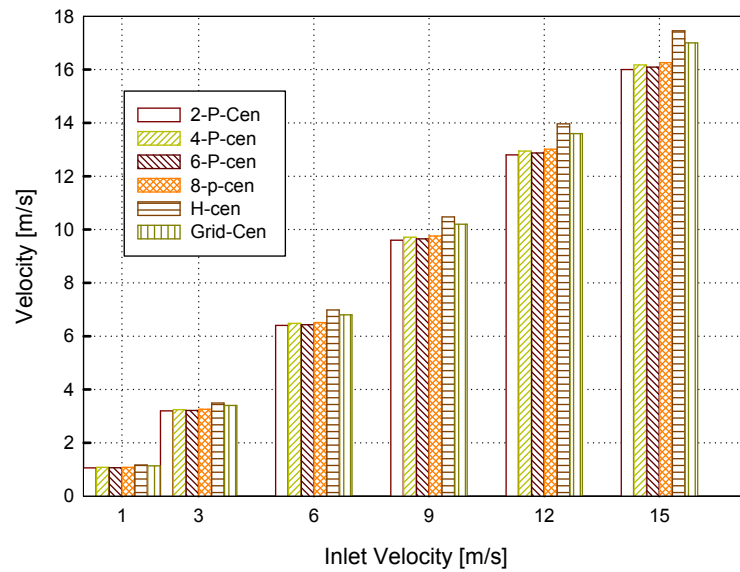
[그림 16] Flow velocities in center of WBC (0.1mm, SE 80dB)



[그림 17] Flow velocities in center of WBC (0.1mm, SE 100dB)



[그림 18] Flow velocities in center of WBC (1mm, SE 80dB)



[그림 19] Flow velocities in center of WBC (1mm, SE 100dB)

(나) 형태에 따른 도파관 중앙부 유속

다층형, 허니컴 및 각형 도파관 배열의 중앙부에서의 유속을 그래프를 이용해서 구하는 것은 정확한 값을 구하기 힘든 단점이 있다. 따라서 시뮬레이션 결과를 이용해서 각 형태와 입구의 유속에 따른 도파관 배열 중앙부에서의 유속을 예측하는 방안을 통계처리를 이용해서 표 5와 같이 나타낼 수 있다.

수식에서 x 는 입구의 유속이며 전체 Case를 1차원 예측식을 이용해서 도파관 배열 중앙부에서의 유속을 표현할 수 있는 것으로 나타났으며 결정계수 또한 0.99로 매우 높게 나타났다.

[표 5] Calculation of flow velocities in center of WBC according to various types of WBC

THK.	SE	WBC	Equation	R ²
0.1 mm	80 dB	2-Ply	$y = -0.0068 + 1.0124x$	0.99
		4-Ply	$y = 0.0075 + 1.0118x$	0.99
		6-Ply	$y = 0.0174 + 1.0125x$	0.99
		8-Ply	$y = 0.0018 + 1.0134x$	0.99
		Honeycomb	$y = 0.0056 + 1.0476x$	0.99
		Grid	$y = 0.0022 + 1.0204x$	0.99
	100dB	2-Ply	$y = -0.0060 + 1.0126x$	0.99
		4-Ply	$y = 0.0116 + 1.0139x$	0.99
		6-Ply	$y = 0.0051 + 1.0140x$	0.99
		8-Ply	$y = 0.0065 + 1.0127x$	0.99
		Honeycomb	$y = 0.0047 + 1.0506x$	0.99
		Grid	$y = 0.0001 + 1.0189x$	0.99
1 mm	80 dB	2-Ply	$y = -0.0167 + 0.9708x$	0.99
		4-Ply	$y = -0.0014 + 1.0703x$	0.99
		6-Ply	$y = -0.0040 + 1.0786x$	0.99
		8-Ply	$y = -0.0088 + 1.0814x$	0.99
		Honeycomb	$y = -0.00002 + 1.1558x$	0.99
		Grid	$y = -0.00005 + 1.1328x$	0.99
	100dB	2-Ply	$y = -0.0026 + 1.067x$	0.99
		4-Ply	$y = -0.0084 + 1.0778x$	0.99
		6-Ply	$y = -0.0085 + 1.0733x$	0.99
		8-Ply	$y = 0.0020 + 1.0840x$	0.99
		Honeycomb	$y = -0.0001 + 1.1638x$	0.99
		Grid	$y = -0.0008 + 1.1332x$	0.99

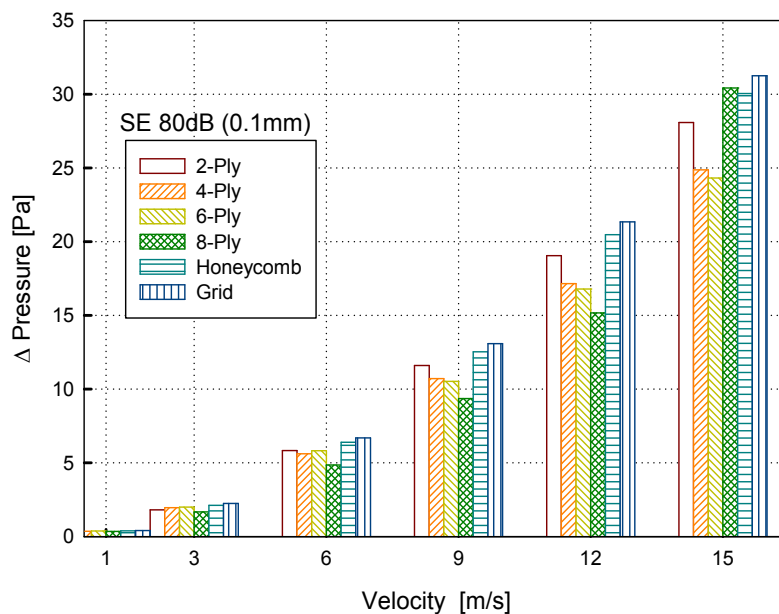
(다) 도파관배열의 평균 압력손실

입구의 유속에 따른 도파관 배열 입구와 출구에서의 평균압력손실을 해석한 결과를 그림 20~23에 나타내었다.

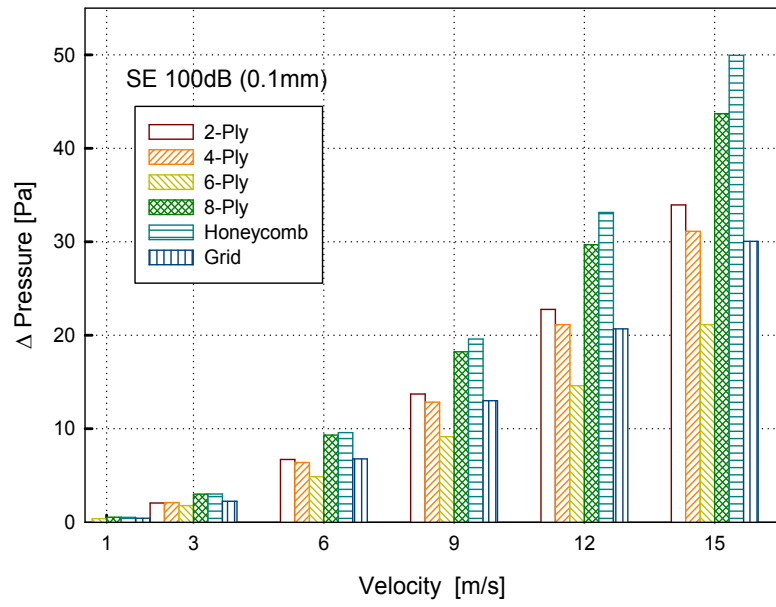
그림 20은 철판두께 0.1mm, SE 80dB이며 도파관의 모듈이 20mm인 경우 각 형태별 도파관 배열의 입구와 출구의 평균 압력 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 다층형 구조의 경우 입구의 유속이 1~12m/s인 경우에는 6층 구조의 도파관 배열이 가장 낮은 압력손실을 보이고 있으나 유속이 15m/s로 빨라지게 되면 압력손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Honeycomb Type과 Grid Type은 2개의 형태 모두 유사한 평균 압력손실을 보이고 있다.

SE 100dB인 경우 도파관배열의 입구와 출구의 평균 압력손실 해석결과를 그림 21에 나타내었다. 다층구조의 경우 6층으로 도파관 배열을 제작한 경우는 입구의 유속이 증가해도 2층, 4층 및 8층 구조에 비해 압력손실이 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 또한 Honeycomb Type의 경우 다른 형태에 비해 비교적 큰 압력손실을 보이며 Grid Type의 경우는 4층 구조의 도파관 배열과 유사한 평균 압력손실을 보이고 있다. 따라서 평균압력손실을 이용하여 도파관 배열의 성능을 평가한다면 6층-4층-Grid-2층-8층-honeycomb의 순으로 나타났다. 따라서 6층구조의 경우 도파관 모듈의 크기가 20mm이고 철판의 두께가 0.1mm이면 SE 80, SE 100dB 모두 6층 구조를 사용하는 것이 압력손실 측면에서 가장 유리한 것을 알 수 있다.

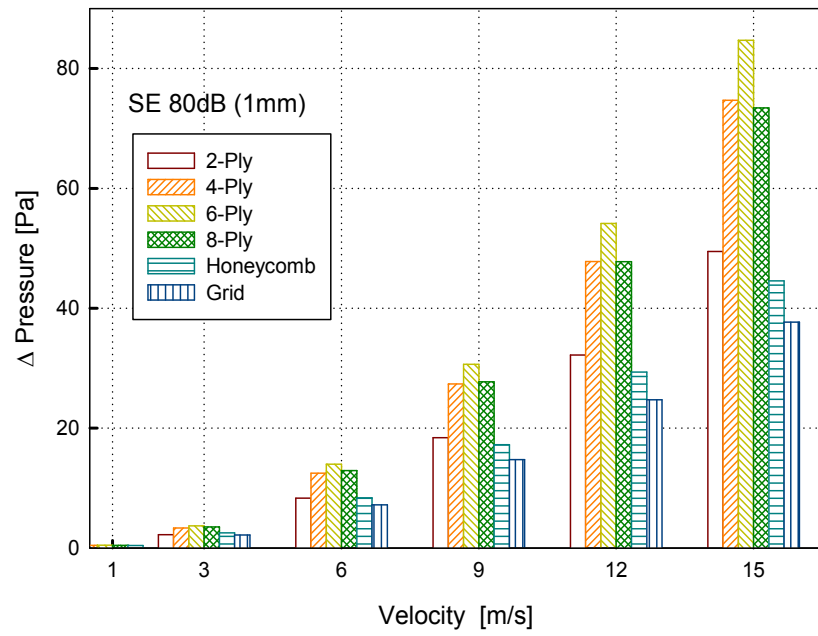
도파관 모듈의 크기 30mm, 철판의 두께가 1mm, SE 80dB, SE 100dB인 경우 도파관 배열의 입구와 출구에서의 평균압력손실 해석결과를 그림 22와 그림 23에 나타내었다.



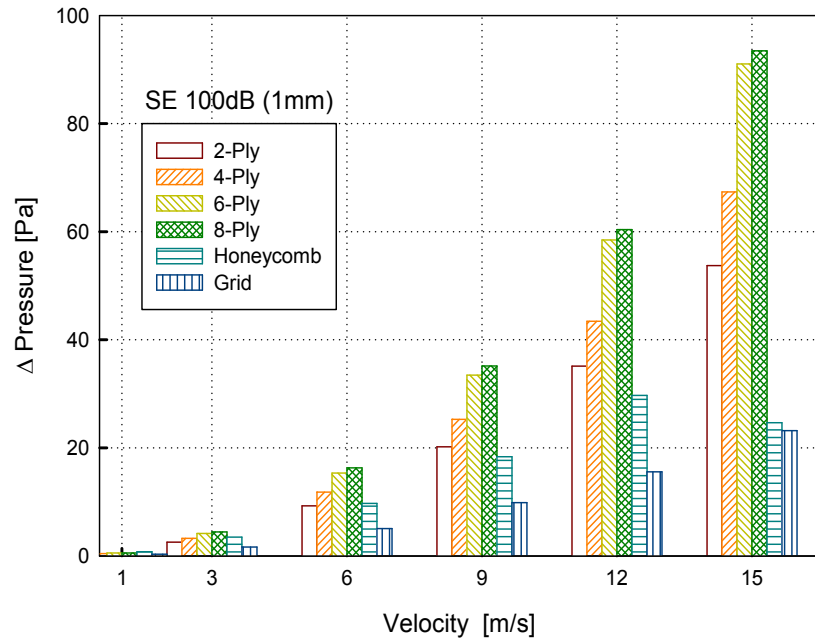
[그림 20] Pressure drop in WBC arrays (0.1mm, 80dB)



[그림 21] Pressure drop in WBC arrays (0.1mm, 100dB)



[그림 22] Pressure drop in WBC arrays (1mm, 80dB)



[그림 23] Pressure drop in WBC arrays (1mm, 100dB)

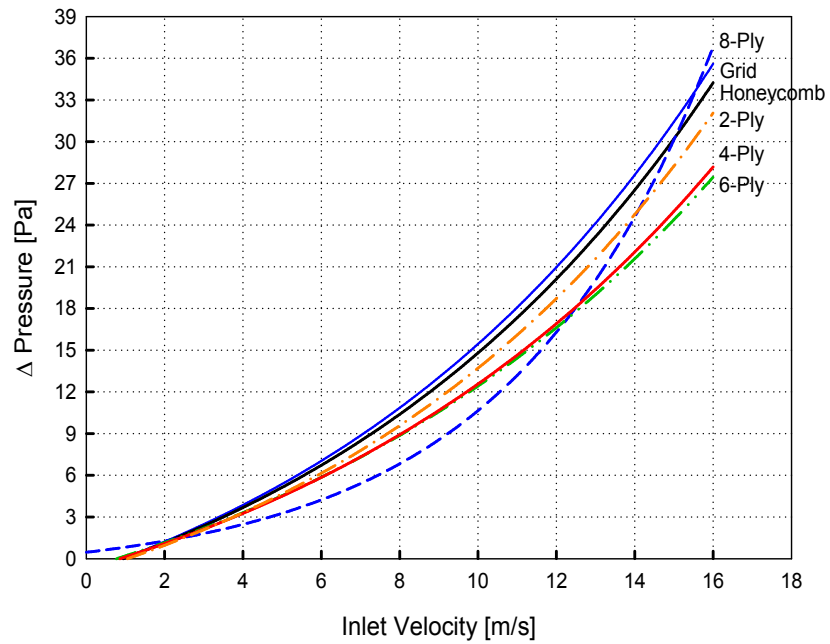
SE 80dB인 경우 모듈의 크기가 20mm인 경우와는 달리 모듈의 크기가 30mm가 되면 6층 구조의 도파관 배열의 압력손실이 가장 크게 나타났으며 압력손실이 가장 작게 나타나는 도파관 배열의 구조는 Grid인 것을 알 수 있다. 또한 SE 100dB인 경우에도 Grid Type이 가장 낮은 압력손실을 보이고 있으며 가장 큰 압력손실은 8층 구조의 도파관 배열인 것으로 나타났다. 따라서 모듈 30mm, 철판의 두께 1mm인 경우는 Grid Type을 사용하는 것이 압력손실의 측면에서 가장 유리한 것을 알 수 있다.

표 6과 그림 24~27은 입구의 유속에 따른 도파관배열의 입구와 출구의 평균 압력손실을 나타낸 것이다. 유속에 따른 압력손실은 지수함수를 이용하여 나타낼 수 있으며 이때 결정계수는 0.98이상으로 매우 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 도파관의 두께가 0.1mm이고 SE가 80dB인 경우 다층 구조인 2-Ply Type은 외부에서 공급되는 공기의 유속을 이용하여 “도파관 배열의 평균 압력손실은 $-10.3 + 9.327 \times e^{(0.0946 \times \text{입구 유속})}$ ” 로 나타낼 수 있으며 이때 결정계수는 0.99로 매우 높게 나타났다. 또한 다층구조의 경우 8-Ply Type은 입구의 유속이 12m/s를 넘게 되면 급격하게 압력손실이 커지는 것으로 나타났으며 6-Ply Type의 압력손실이 가장 작게 나타나 압력손실만을 고려한다면 도파관배열로 사용하는 것이 가장 좋을 것으로 판단된다.

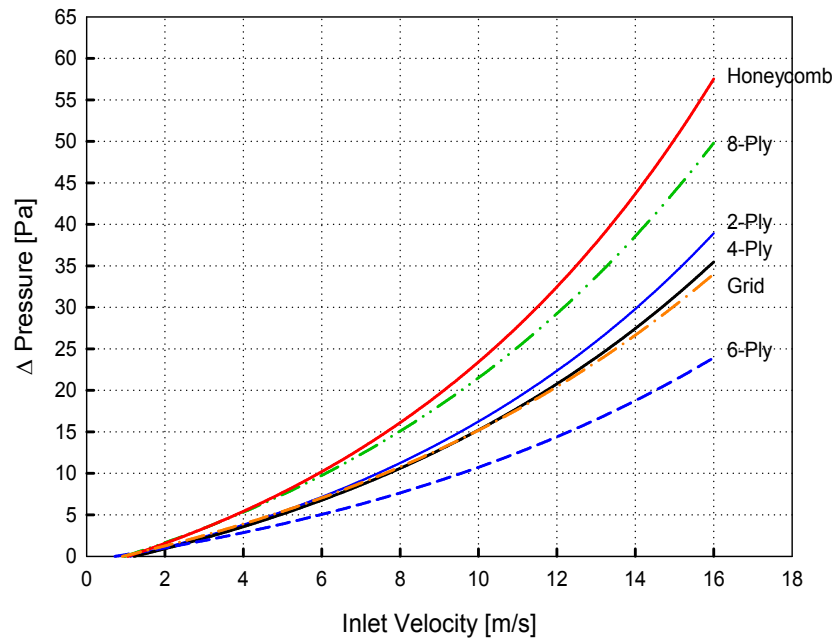
그림 24는 SE 100dB인 경우, 외부의 유속에 따른 도파관 배열의 입구와 출구 측의 평균 압력손실을 나타낸 것이다. Fig에서 볼 수 있는 바와 같이 다층구조의 6-Ply Type이 가장 낮은 압력손실을 보였으며 Honeycomb 구조가 가장 큰 압력손실을 보이는 것으로 나타났다.

[표 6] Average pressure drop in WBC arrays

Thk	SE	WBCA	Equation	R ²
0.1 mm	80dB	2-Ply	$y = -10.3041 + 9.3279 \times e^{(0.0946x)}$	0.99
		4-Ply	$y = -10.4977 + 9.7509 \times e^{(0.0861x)}$	0.99
		6-Ply	$y = -0.7209 + 10.0548 \times e^{(0.0834x)}$	0.99
		8-Ply	$y = -1.2494 + 1.7135 \times e^{(0.1938x)}$	0.99
		Honeycomb	$y = -11.1981 + 10.2558 \times e^{(0.093x)}$	0.99
		Grid	$y = -11.7869 + 10.8176 \times e^{(0.0923x)}$	0.99
	100dB	2-Ply	$y = -11.3633 + 10.1692 \times e^{(0.0999x)}$	0.99
		4-Ply	$y = -12.2026 + 10.9125 \times e^{(0.0922x)}$	0.99
		6-Ply	$y = -8.7719 + 8.2417 \times e^{(0.0861x)}$	0.99
		8-Ply	$y = -16.3045 + 14.9029 \times e^{(0.0931x)}$	0.99
		Honeycomb	$y = -14.6868 + 13.1356 \times e^{(0.1065x)}$	0.99
		Grid	$y = -12.9551 + 11.9836 \times e^{(0.0854x)}$	0.99
1 mm	80dB	2-Ply	$y = -12.7298 + 10.8876 \times e^{(0.1165x)}$	0.99
		4-Ply	$y = -17.6797 + 15.1097 \times e^{(0.1210x)}$	0.99
		6-Ply	$y = -17.6797 + 15.1097 \times e^{(0.1210x)}$	0.99
		8-Ply	$y = -19.5170 + 16.8719 \times e^{(0.1141x)}$	0.99
		Honeycomb	$y = -12.5054 + 11.0966 \times e^{(0.1095x)}$	0.99
		Grid	$y = -13.03 + 11.2047 \times e^{(0.1008x)}$	0.99
	100dB	2-Ply	$y = -14.2346 + 12.2750 \times e^{(0.1145x)}$	0.99
		4-Ply	$y = -17.0606 + 14.7772 \times e^{(0.1164x)}$	0.99
		6-Ply	$y = -21.8539 + 18.7218 \times e^{(0.1201x)}$	0.99
		8-Ply	$y = -24.1247 + 20.8292 \times e^{(0.1157x)}$	0.99
		Honeycomb	$y = 5.2331 \times e^{(0.1166x)}$	0.71
		Grid	$y = -8.727 + 8.0449 \times e^{(0.0920x)}$	0.99



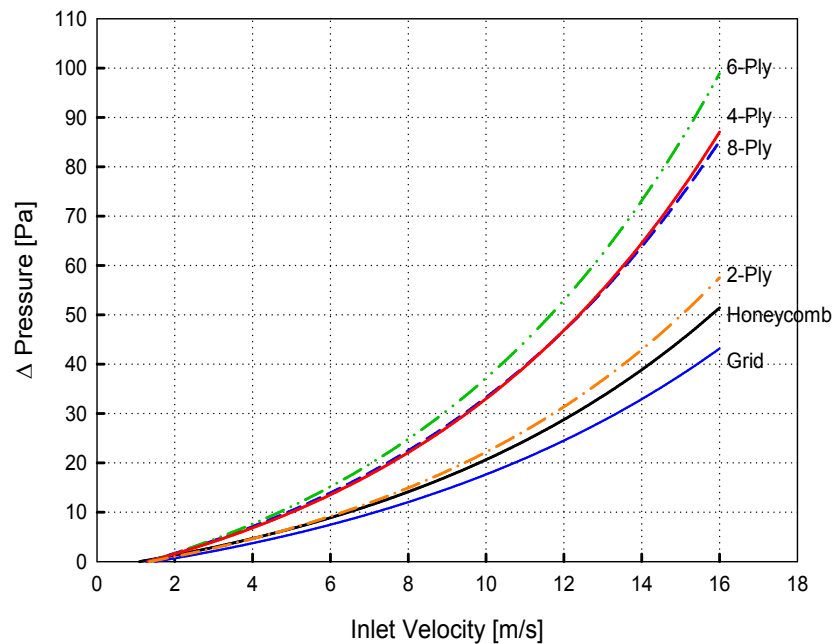
[그림 24] Pressure drop in WBC arrays (0.1mm, 80dB)



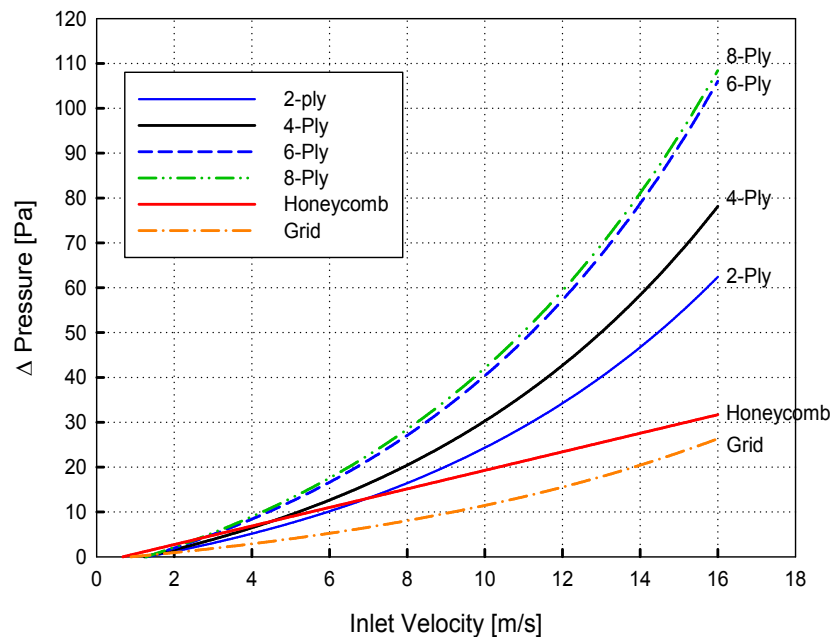
[그림 25] Pressure drop in WBC arrays (0.1mm, 100dB)

그림 24와 그림 25에서 알 수 있는 것은 도파관의 두께가 0.1mm인 경우에는 6층 구조가 도파관 배열의 입구와 출구에서의 평균 압력손실이 가장 낮은 것을 알 수 있으며 Honeycomb type과 8층 구조의 경우가 비교적 압력손실이 큰 것을 알 수 있다.

그림 26은 도파관의 두께가 1mm, 모듈이 크기가 30mm이며 SE가 80dB인 경우에 입구의 유속에 따른 도파관배열의 입구와 출구의 평균압력손실을 나타낸 것이다. Fig에서 볼 수 있는 바와 같이 도파관의 두께가 0.1mm와는 다른 형태를 보이고 있으며 Grid Type이 가장 적은 압력손실을 보이며 다층구조의 6층 구조가 가장 큰 평균 압력손실을 보이는 것으로 나타났다.



[그림 26] Pressure drop in WBC arrays (1mm, 80dB)



[그림 27] Pressure drop in WBC arrays (1mm, 100dB)

그림 27은 SE가 100dB인 경우에 입구의 유속에 따른 평균압력손실을 나타낸 것으로 SE 80dB와 유사한 결과를 보이고 있다. Grid Type의 도파관 배열이 가장 적은 평균 압력 손실 값을 보이고 있으며 다층 구조인 8층, 6층의 압력손실이 거의 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

(4) 결론

본 보고서에서는 도파관을 구성하는 철판의 두께가 0.1mm, 1mm, 도파관 모듈의 크기가 20, 30mm일 때 SE 80 및 SE 100의 성능을 갖는 사각형, 육각형 및 다층구조 도파관 배열을 대상으로 공기유동을 평가하였다.

시뮬레이션 결과를 이용해서 입구의 유속에 따른 도파관 배열의 길이 방향 중앙부에서의 유속과 도파관배열의 입구와 출구에서의 평균압력손실을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 다층형 도파관배열의 경우 중앙부에서의 단면적은 형태의 특성에 따라 가로방향, 세로방향으로만 도파관의 격벽이 발생하지만 Grid Type과 Honeycomb Type의 경우 가로, 세로 방향과 대각선방향에 격벽이 존재하기 때문에 공기의 유동면적이 줄어들기 때문에 도파관배열의 중심부에서의 유속이 빨라지는 것으로 나타났다.

- 도파관의 두께가 0.1mm, SE 100dB인 경우 6층으로 도파관 배열을 제작한 경우는 입구의 유속이 증가해도 2층, 4층 및 8층 구조에 비해 압력손실이 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

- 도파관 모듈의 크기가 20mm이고 철판의 두께가 0.1mm이면 SE 80, SE 100dB 모두 6층 구조를 사용하는 것이 압력손실 측면에서 가장 유리한 것을 알 수 있다.

- 모듈의 크기가 30mm, 철판의 두께가 1mm인 경우 SE 80dB, SE 100dB인 경우 압력손실이 가장 작게 나타나는 도파관 배열의 구조는 Grid인 것으로 나타났으며 가장 큰 압력손실을 나타내는 것은 8층 구조의 도파관 배열인 것으로 나타났다.

따라서 다층 구조의 도파관 배열은 6층으로 하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

마. 다층구조 개발을 위한 EMP 차폐성능 및 유속 분석

(1) 서론

Electromagnetic Pulse (EMP)에 의한 영향은 각종 전자기기의 오작동 및 고장을 일으키므로 방호 시설에 EMP 차폐를 위한 설계가 필수적이다. EMP에 의해서 정보 통신 기자재가 손상을 받게 되면, 사회 전반에 걸쳐 혼란을 야기 할 뿐 아니라, 전력 및 통신망을 비롯한 전자기기가 영향을 받게 되므로 국가적으로 막대한 피해를 끼칠 수 있다. 이러한 피해를 방지하기 위해 공간에 대한 보호 방안으로 건축물의 경우, 차폐 벽을 만들거나 강철 금속을 사용하여 이음새나 결합부를 전자기적으로 차폐해야 한다. 또한, EMP에 의한 영향을 보호하기 위해서는 모든 전력, 통신, 제어 인입선의 관통구 및 건축물의 배기관에 전자기파 억제 및 감쇠 소자가 설치되어야 한다.

이러한 EMP 차폐의 필요성에 의해 방호시설을 설계할 경우, 정부에서 지정한 차폐 안전성 평가 제도를 만족해야 한다. 차폐성능이란 입사되는 전자기파와 투과되는 전자기파의 비율을 나타내며, 차폐효과 (Shielding Effectiveness, SE)가 척도로 쓰인다. 차폐율은 EMP의 최댓값과 전자기기의 전자파 내성의 비로 최소 차폐율이 결정되며, 여기에 마진 값을 추가적으로 적용하여 정의된다. 실제 군사용 기기와 민수용 기기의 전자파 내성 기준은 다르며 이에 따라 적용되는 차폐규격이 달라진다. 아래 표는 군사용 및 민수용 기기에 따른 차폐율 계산을 보여 준다. 즉, EMP의 최대 출력이 기기에 직접적으로 도달할 시에 요구되는 차폐규격이 80 dB와 100 dB로 정해지는 것을 확인 할 수 있다.

[표 7] 군사용 정보통신 기기에 대한 차폐율 계산 방식

HEMP 최댓값	50 kV/m
군사용 전자기기의 전자파 내성	50 V/m
최소 차폐율	$20\log_{10}(50,000/50) = 60 \text{ dB}$
마진	20 dB
요구되는 차폐율	$60 + 20 = 80 \text{ dB}$

[표 8] 민수용 정보통신 기기에 대한 차폐율 계산 방식

HEMP 최댓값	50 kV/m
군사용 전자기기의 전자파 내성	3 V/m
최소 차폐율	$20\log_{10}(50,000/3) = 84.4 \text{ dB}$
마진	20 dB
요구되는 차폐율	$84.4 + 20 = 104.4 \text{ dB}$

안전성평가 제도에 의해 방호 시설 외부로부터 내부로 유입되는 관통구 및 배기관을 설계할 때 도파관의 형태 및 배열 구조를 고려하여 EMP 차폐성능을 향상시켜야 한다. 기존의 연구에서는 발생한 EMP가 방호시설의 관통구 및 배기관을 통하여 어느 정도 투과되는 지에 대한 연구가 수행되었으며, 시간 영역 유한 차분법과 MLFMM을 바탕으로 현상분석들이 수행되었다. 분석들을 토대로 투과되는 전자기파를 감쇠시키기 위하여 도파관 창문, 허니컴 도파관 혹은 격자구조의 도파관 등을 이용하여 차폐효과의 효율성을 향상시키는 연구가 진행되어왔다. 하지만 배기관 같은 경우, EMP에 대한 차폐도 중요하지만, 배기관으로서 역할이 중요하므로, 앞선 도파관들이 배기역할을 방해하게 된다면 그 역할이 미미해지게 된다. 즉, 차폐효과 뿐 아

니라 유속에 대한 분석 또한 중요한 요소가 된다. 실제 배기관은 적정 급기, 급수 및 배수가 가능하도록 유체의 흐름을 고려해주어야 한다. 배기관의 경우, 송풍 배기관과 환기 배기관의 2 종류가 있으며, 배기관내의 풍속은 주 배기관을 기준으로 저속방식에서는 주택은 3.4~4.5 m/s, 공공건물은 6.5~10 m/s, 공장의 경우는 8~12 m/s 정도를 권장풍속으로 하고 있다. 최대풍속은 주택의 경우는 8.5 m/s, 공공건물은 5.5~8 m/s이고 공장의 경우는 6.5~11 m/s이며 고속방식인 경우에는 12.5 m/s를 권장 값으로 하고 있으며 최대 30 m/s로 되어있다. 즉, 다층구조 도파관의 EMP 차폐효과가 높더라도 배기관의 기능을 제대로 하지 못하면 사용 시, 한계가 존재하게 되므로 이에 대한 분석이 중요하다.

기존에 방호시설에 설치되는 단일 사각형 도파관 배열은 차폐효과가 뛰어나지만, 각각의 단일 사각형을 착암해야 되는 번거로움이 필요하다. 또한 도파관의 전체길이가 길어질수록 착암 진행 시, 불량률이 높아져 비용 측면뿐만 아니라 제작 시간도 오래 걸리게 된다. 또한, 배기 측면에 경우, 공기의 흐름을 방해하여 유속 손실이 발생하게 된다.

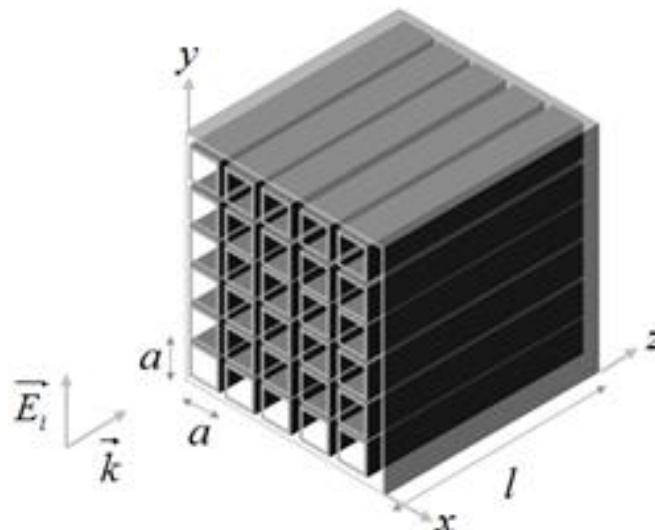
따라서 본 논문에서는 배기관에 다층 구조 도파관이 사용되었을 때 차폐효과를 보상하는 특성을 파악하며, 유속의 입구 및 출구 측 속도를 측정하여 분석하는 것을 목표로 연구를 진행하였다.

(2) 다층 구조 도파관의 차폐효과

(가) 단일 사각형 도파관 배열

그림 28과 같은 단일 사각형 도파관 배열은 외부에서 발생된 EMP 효과를 억제하는데 효과적이다. 외부에서 발생된 전자기파는 평면파 형태로 단일 사각형 도파관 배열을 향하여 입사한다고 가정한다. 전자기파는 한 변의 길이가 a 인 정사각형 도파관을 통과한다. 차폐효과가 가장 떨어지는 전자기파의 TE_{10} 모드가 발생하면, 정사각형 도파관 내부에서 투과되는 전력은 식 29와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{10} &= \frac{1}{2} Re(P_x \times P_y) \\ &= \frac{r^2}{2\pi^2} e^{-2\alpha l} Re(\beta)(\omega\mu_0 r |A_{10}| \times c |A_{10}|) \end{aligned} \quad (\text{식 29})$$



[그림 28] 단일 사각형 도파관 배열.

여기서 r 과 c 는 각각 단일 사각형의 가로길이를 나타내며 l 은 도파관 전체길이를 나타내며 A_{10} 은 임의의 전파의 크기, α 는 감쇠상수, β 는 전파상수, k_c 는 차단 파수를 나타낸다. 즉, 그림 1의 단일 사각형 도파관 배열의 투과되는 전력은 식 30로 표현된다.

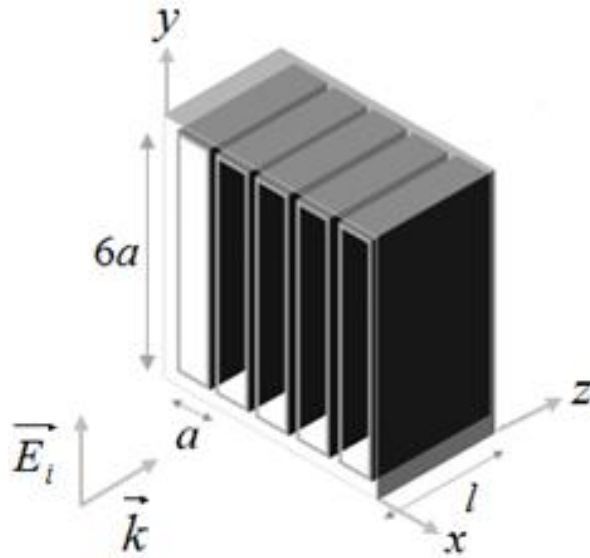
$$P_{10} = \frac{\omega\mu_0 a^4 |A_{10}|^2}{4\pi^2} Re(\beta) e^{-2\alpha l} \quad (\text{식 30})$$

이에 따라서 가로길이 및 세로길이가 길어질수록 전자기파의 투과되는 x 와 y 성분의 전력이 증가하게 된다. 따라서 가로길이와 세로길이가 짧을수록 도파관을 투과하는 전자기파의 전력이 감소하여 차폐효과가 높아지게 된다. 그러나 가로 및 세로 길이가 짧아질수록 공정의 난이도와 비용이 증가하게 되므로 이를 보완한 다른 방식의 도파관 설계가 필요하다.

(나) 직사각형 도파관 배열

전자기파가 세로 및 가로형 직사각형 도파관 배열로 입사하게 될 경우에는, 단일 사각형 도파관 배열과 달리 x 와 y 성분에서 투과되는 전력의 감쇠정도가 다르다. 그림 29는 가로가 a , 세로가 $6a$ 인 세로형 직사각형 도파관 배열을 나타낸다. 외부에서 발생된 전자기파가 세로형 직사각형 도파관 배열을 통과하게 될 경우, 전자기파는 가로길이 a , 세로길이 $6a$ 인 직사각형을 통과하게 된다. 전자기파가 도파관 전체길이 l 을 통과하는 동안, 내부에서 투과되는 전력은 식 31로 표현할 수 있다.

$$P_{10} = \frac{30\omega\mu_0 a^4 |A_{10}|^2}{4\pi^2} Re(\beta) e^{-2\alpha l} \quad (\text{식 31})$$

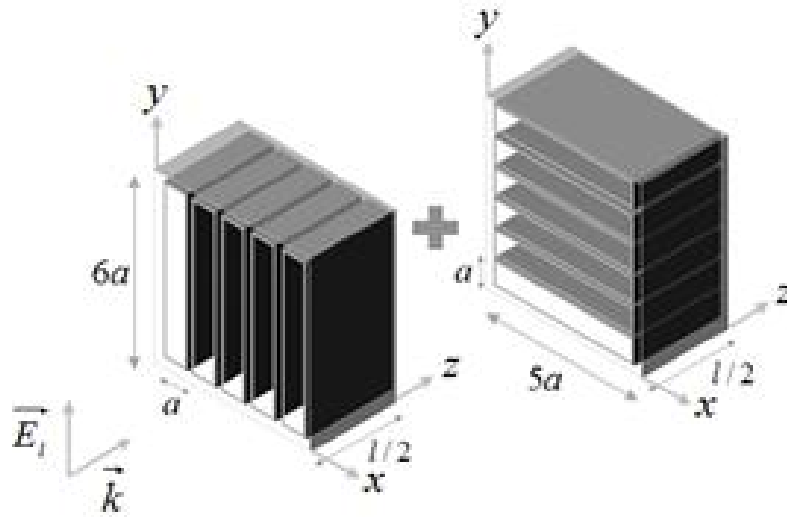


[그림 29] 세로형 직사각형 도파관 배열.

따라서 도파관의 가로길이가 짧아 전자기파의 투과되는 x 성분의 전력은 감소하는 반면, 도파관의 세로길이는 길어 전자기파의 투과되는 y 성분의 전력은 단일 사각형에 비해 증가하게 된다. 즉, 단일 사각형 도파관 배열과 비교하면 전자기파의 y 성분의 전력이 더 많이 투과되어 차폐효과가 떨어지게 된다. 반대로 가로형 직사각형 배열의 경우 도파관의 가로길이가 길어 전자기파의 투과되는 x 성분의 전력이 충분히 감쇠되지 않아 감쇠효과가 저감된다.

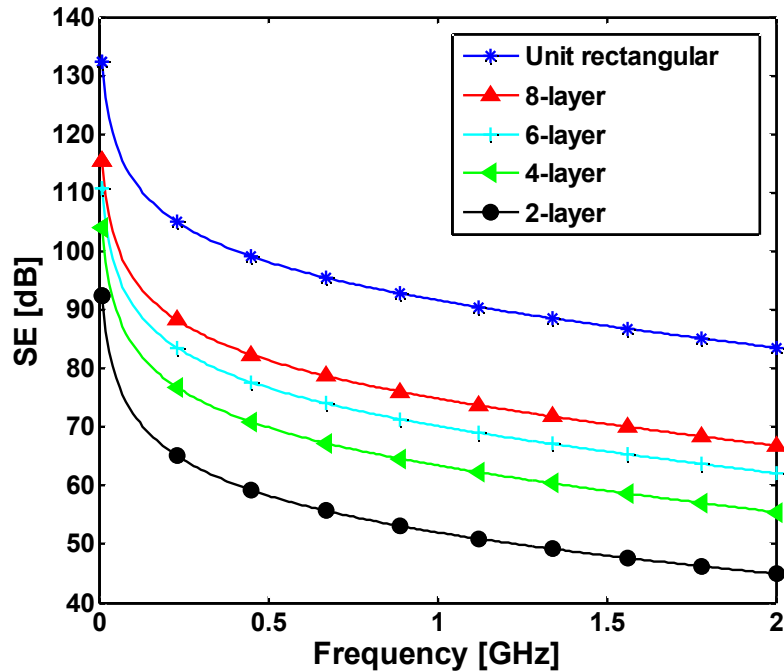
(다) 다층 구조 도파관

도파관 전체길이가 l 일 경우, 차폐효과 개선을 위해서 그림 30과 같은 2층 구조 도파관을 설계한다. 외부에서 발생된 전자기파는 첫 번째 세로형 직사각형 도파관 배열을 통과하게 된다. 도파관 전체길이 $\frac{l}{2}$ 를 통과하는 동안, 실제 전자기파는 가로길이 a , 세로길이 $6a$ 인 직사각형을 통과하게 되며, 길어진 세로길이 $6a$ 에 의해 전자기파의 y 성분 전력 투과량이 증가하게 되어 이 부분에 대한 추가적인 감쇠효과가 필요하게 된다. 통과된 전자기파는 두 번째 가로형 직사각형 도파관 배열을 통과한다. 전자기파는 가로길이 $5a$, 세로길이 a 인 직사각형을 통과한다. 따라서 첫 번째 세로형 도파관을 지날 때 충분히 감쇠되지 못한 y 성분 전력 투과량이 두 번째 가로형 도파관의 줄어든 세로길이 a 에 의해 감쇠된다. 즉, 그림 29의 세로형 직사각형 도파관 배열과 비교하게 되면 y 성분 전력의 투과량이 더욱 감쇠된다. 투과되는 x 성분 전력은 첫 번째 세로형 직사각형 배열 도파관을 통과하면서 가로길이 a 에 의해 감쇠된다. 따라서 외부에서 발생된 전자기파는 2층 구조 도파관을 통과하였을 경우, x 와 y 성분 전력의 투과량 모두 일정 수준 이상 감쇠시킬 수 있다. 이 경우에 대한 제작은 전체길이가 짧은 도파관 여러 개의 도파관을 제작한 후 다층으로 이어줌으로써, 기존의 단일 사각형 도파관 배열을 제작하는 것 보다 용이하게 된다. 도파관 전체길이가 l 일 경우, 세로 및 가로형 직사각형 도파관 배열의 교차하는 층을 증가시키면, 차폐효과는 더욱 효율적으로 나타날 수 있다. 실제 다층이 무한히 늘어난다고 하면, 그 형태는 기존의 단일 사각형 도파관 배열과 유사하게 되며, 차폐효과 또한 유사한 효과를 보이게 된다.



[그림 30] 2층 구조 도파관.

(라) 차폐효과 시뮬레이션



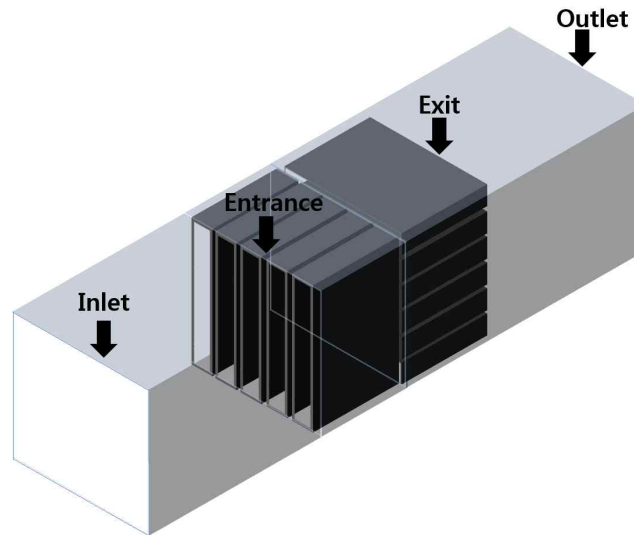
[그림 31] 다층 구조 및 단일 사각형 도파관 배열에 대한 차폐효과 시뮬레이션.

그림 31은 실제 건축설비 규격 크기를 적용한 다층 구조 도파관의 차폐효과에 대한 시뮬레이션 결과 값을 나타낸다. 차폐효과를 비교하기 위해서 Ansys사의 HFSS를 이용하여 투과계수를 확인하였다. 시뮬레이션 조건으로 세로형 직사각형과 가로형 직사각형 각각의 가로길이와 세로길이는 20mm 로 지정하였으며, 도파관의 전체길이는 58.04mm 로 지정하였다. 또한 실제 배기관의 크기를 적용하여 전체 다층 구조 도파관의 크기는 $300 \times 300\text{mm}^2$ 로 설정하였다. 그림 31은 단일 사각형 도파관 배열 및 다층 구조에 대한 차폐효과를 보여준다. 2층 구조 도파관의 경우 1 GHz 지점에서, 52 dB의 차폐효과를 나타나는 것을 확인할 수 있다. 8층 구조 도파관의 경우 1 GHz 지점에서, 75 dB의 차폐효과를 보이며 2층 구조 도파관에 비해서 향상된 것을 확인할 수 있다. 교차되는 다층이 증가할수록 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 수준에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

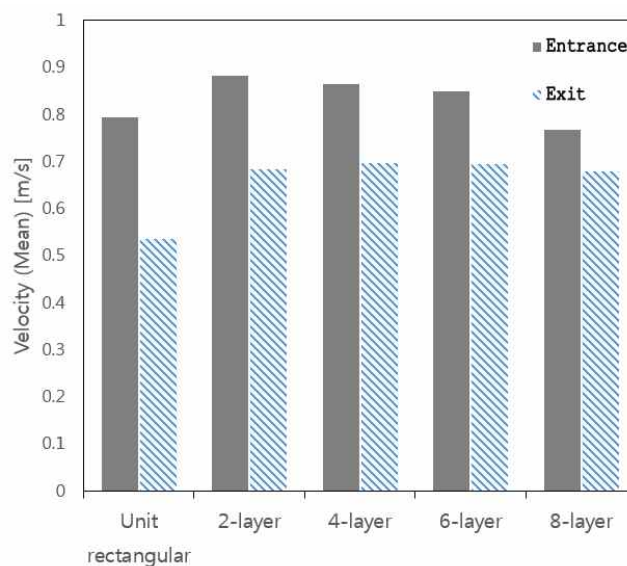
(3) 다층 구조 도파관의 유속

다층 구조 도파관이 삽입된 배기관은 본 목적에 의해서 유체의 흐름의 파악이 중요하다. 이에 따른 다층 구조 도파관의 유속 시뮬레이션이 필요하며, 그림 32와 같은 구조적 조건에 대하여 기존의 단일 사각형 도파관 배열과의 비교 분석이 필요하다. 시뮬레이션은 상용프로그램 CA-Adapco사에서 개발한 STAR-CCM⁺ 10.04(win64)를 사용하였으며 직사각형의 배기관 내부에 기준이 되는 단일 사각형 도파관 배열과 한 변의 길이가 긴 형태의 직사각형 도파관을 90° 방향으로 2층, 4층, 6층 및 8층으로 교차시킨 형태를 삽입하였다. 도파관 배열의 크기는 $300 \times 300 \times 58.04\text{mm}^3$ 로 하였으며 차폐판의 두께는 0.1mm , 각 차폐판의 내부 폭은 9.8mm 로 하였다. 차폐판의 기준이 되는 단일 사각형 도파관 배열과 직사각형 차폐판을 8층 구조 모델의 형태와 치수를 나타내었으며, 이때 도파관 배열의 높이는 58.04mm 로 동일하게 설정하였다. 그림 33에서는 배기관의 주입구 부분의 공기의 유속이 1m/s 인 경우, 단일 사각형 도파관 배열의 입구 측의 속도는 0.8m/s 정도로 나타났으며, 새로운 형태의 도파관을 2층, 4층, 6층을 사용

한 경우는 입구 측의 경우는 이보다 빠른 값을 나타내고 있으며, 출구 측의 경우는 단일 사각형 도파관 배열에 비해서 평균속도가 전부 빠르게 나타났다. 즉, 새로운 형태의 도파관을 사용하면 속도의 손실이 줄어드는 것을 알 수 있다.



[그림 32] 2층 구조 도파관에 대한 유속 시뮬레이션 구조적 조건



[그림 33] 다층 구조 및 단일 사각형 도파관 배열에 대한 공기의 유속 비교

[표 9] 단일 사각형 도파관 배열 및 다층 따른 1 GHz에서의 차폐효과와 입구 및 출구 측 유속

구조	차폐효과 (SE_{dB})	입구 측 유속 (m/s)	출구 측 유속 (m/s)
2층 구조 도파관	52.00	0.77	0.68
4층 구조 도파관	63.44	0.85	0.69
6층 구조 도파관	70.18	0.86	0.70
8층 구조 도파관	74.88	0.88	0.68
단일 사각형 도파관 배열	91.00	0.79	0.53

표 9는 단일 사각형 도파관 배열과 다층 구조에 따른 1 GHz 지점에서의 차폐효과와 입구 및 출구 측에 대한 공기의 유속 결과 값을 나타내며 8층 구조 도파관과 단일 사각형 도파관 배열을 비교할 시, 차폐효과 측면에서 일정수준 보상을 할 뿐 아니라, 입구 및 출구 측 유속 손실 면에서 효율적인 것을 확인 할 수 있다.

(4) 결론

본 절에서는 다층 구조를 이용하여 방호시설의 배기관에 사용되는 도파관 배열을 설계를 하였다. 우선 기존의 단일 사각형 도파관 배열과 달리, 제작 시간과 비용을 절감할 수 있다. 2층 구조 도파관에서부터 8층 구조 도파관까지의 차폐효과를 분석하여, 교차하는 층이 증가할수록 차폐효과를 일정수준 유지시키는 것을 확인하였다. 이를 토대로 다층 구조 도파관이 방호시설에 설치되었을 때, 차폐성능을 향상시킬 수 있다는 것을 검증하였다. 또한, 다층 구조 도파관에 대한 유속 측정 시뮬레이션을 통하여, 배기측면에서 도파관 마찰이 적어 유속의 손실이 적어져 기존의 단일 사각형 도파관 배열보다 효율적인 구조임을 검증하였다.

바. 덕트용 EMP 차폐 도파관의 형상결정 가이드라인

(1) 서론

EMP 차폐를 위한 보호시설은 외부에 직접 면하는 외기도입구 또는 외기도입 덕트에 EMP 차폐용 도파관배열(Waveguide-Below-Cutoff array, WBCA)을 설치하는 것이 권장된다.

도파관의 형태는 일반적으로 사각형, 육각형 및 원형이 일반적이다. 그러나 외기를 도입하는 경우 원형 도파관을 사용하면 원형 도파관 사이에 격벽이 육각형 형태의 도파관과 사각형 형태의 도파관에 비해 크게 된다. 따라서 원형 도파관을 사각형 덕트와 외기 도입구에 사용하게 되면 사각형이나 육각형 형태의 도파관에 비해 압력손실에 따른 속도저하가 발생할 가능성이 크다.

차폐효과 (Shielding Effectiveness, SE)는 원형도파관의 경우는 도파관의 지름, 도파관 배열의 길이와 주파수 등 여러 변수가 사용되고, 사각형 도파관과 육각형 형태의 도파관은 가장 긴 한 변의 길이, 장축의 길이 및 도파관 배열의 길이 등의 값을 고려한다. 이러한 차폐효과를 구하는 방정식은 수식이 복잡하여 전기 및 전자분야의 전문가가 아닌 현장의 건축 기술자들이 사용하기에는 다소 무리가 있다.

따라서 본 절에서는 현장에서 근무하는 건축 관련 기술자들이 쉽게 접근할 수 있는 원형 도파관의 지름, 사각형 도파관의 가장 긴 한 변의 길이 및 육각형 도파관의 장축의 길이를 이용하여 차폐효과에 따른 각 형태의 도파관 배열의 길이를 간단히 결정할 수 있는 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 한다.

(2) EMP 차폐

EMP 차폐가 필요한 시설의 차폐성능 기준에 대한 국내 기준이 전무하기 때문에 미국의 국방기준인 MIL-STD-188-125-1을 사용 한다. EMP 차폐성능은 투과되는 전자기파와 입사된 전자기파와의 크기를 이용하여 표기하며 차폐성능의 정도를 나타내기 위해서 차폐효과를 사용한다.

도파관의 형태에 따라 사용하는 차폐효과방정식의 값이 달라지며 식 32에는 원형도파관, 사각형 도파관 및 육각형 도파관의 방정식을 나타내었다. 표 10은 각각의 도파관 형태에 따른 변수를 나타낸다.

$$SE = A \frac{l}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{af}{B}\right)^2} - 20 \log N \quad (\text{식 } 32)$$

여기서, l : 도파관 배열의 전체길이

f : 주파수

N : 도파관의 개수

[표 10] Constants for SE equation

Pattern	A	B	a
Circular	31.95	175800	Diameter
Rectangular	27.3	150000	Unit side
Hexagonal	17.5	96659	Diagonal line

식 32에서 도파관의 개수가 증가하게 되면, N 과 무관한 형태로 방정식이 변하게 되며, 식 33과 같은 형태로 계산할 수 있다.

$$SE = A \frac{l}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{af}{B}\right)^2} - 20 \log \frac{2ka}{\pi} \quad (\text{식 33})$$

여기서, k : 파수 (wave number)

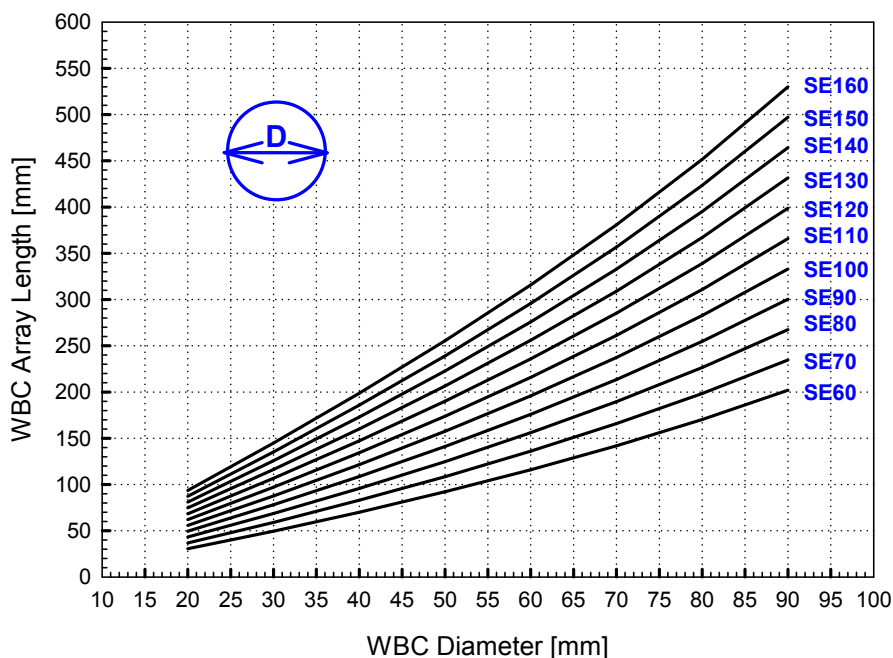
식 32와 식 33에서 도파관의 길이 l 이 커지면 차폐효과는 커지게 되며 도파관의 a 가 커지면 차폐효과가 감소한다.

(3) 도파관의 크기에 따른 차폐효과

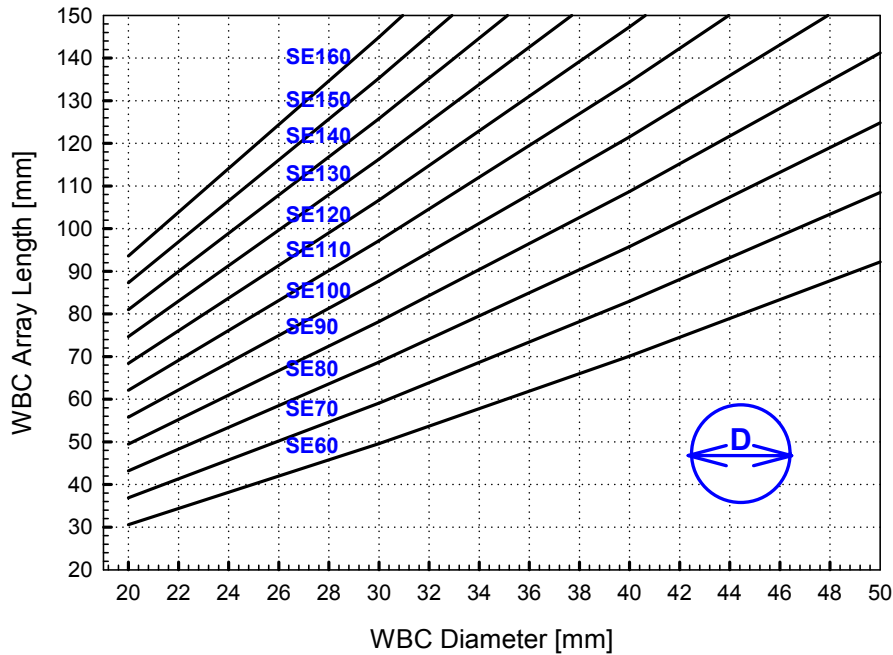
그림 34는 원형 도파관 배열의 경우 차폐효과 당 도파관 배열의 최소 필요 길이를 나타낸 것으로 x축은 원형 도파관의 지름, y축은 도파관 배열의 최소 필요길이(mm)를 나타낸 것이다. 그림 34에서 볼 수 있는 바와 같이 원형 도파관의 경우 지름이 커지게 되면 도파관 배열의 필요길이가 증가하게 되며, 차폐효과 값이 커지게 되면 배열의 필요길이가 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 35에는 실용적으로 많이 사용하는 지름 50 mm 이하의 원형 도파관 배열의 경우, 차폐효과 값과 도파관 지름에 따른 결과를 나타내었다. 원의 지름이 30 mm인 경우, 도파관 배열의 길이는 80 dB의 차폐효과를 얻으려면 70 mm정도의 도파관 배열의 길이가 필요하게 되며, 100 dB의 차폐효과를 얻으려면 88 mm의 길이가 필요한 것을 알 수 있다.

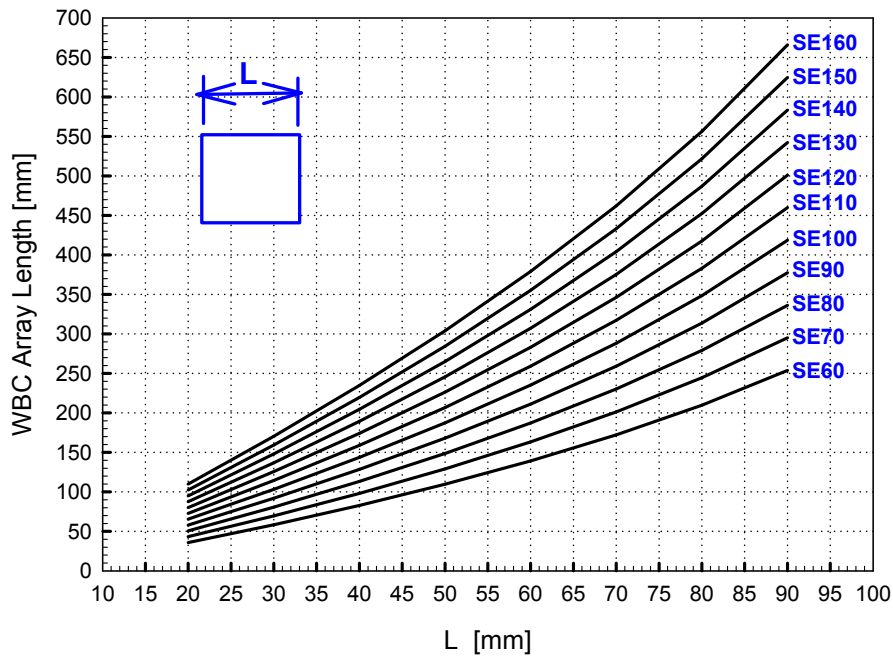
그림 36은 사각형 도파관 배열을 사용하는 경우 가장 긴 한 변의 길이와 원하는 차폐효과를 선택하여 도파관 배열의 최소 필요길이를 구하는 것을 나타낸 것이다. 그림 36에서 볼 수 있는 바와 같이 x축에서 사각형의 가장 긴 한 변의 길이를 선택하고 차폐효과 값을 선택하면 y축에서 도파관 배열의 최소 필요길이를 구할 수 있다.



[그림 34] Minimum length for various SE in circular WBCA



[그림 35] Zoom in the Fig. 34



[그림 36] Minimum length for various SE in rectangular WBCA

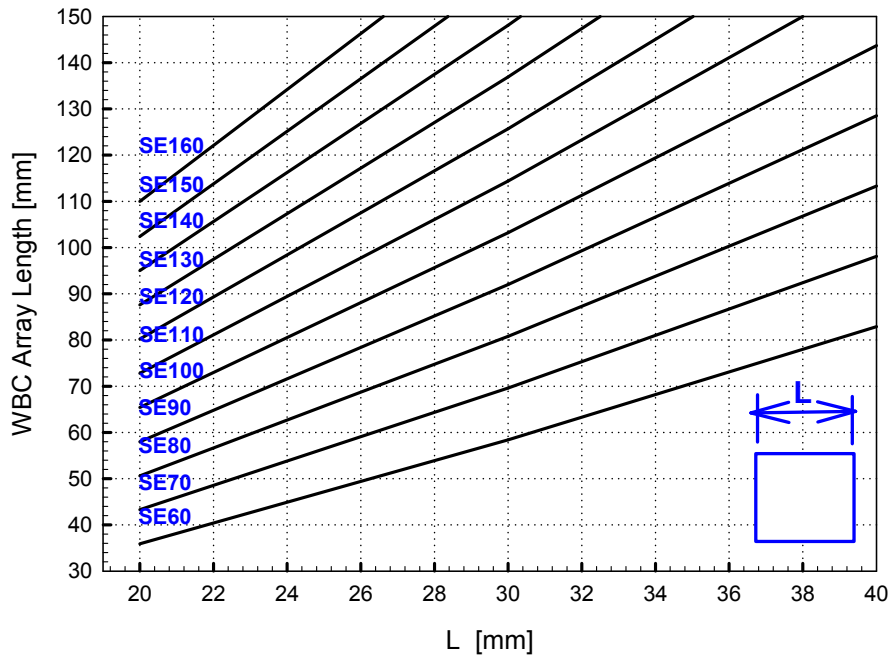
그림 37은 가장 긴 한 변의 길이가 40 mm이하인 경우를 확대해서 나타낸 것으로 사각형의 가장 긴 한 변의 길이가 30 mm인 경우, 차폐효과 값을 100 dB로 선택하면 도파관 배열의 최소필요길이는 103 mm 이상 이며, 차폐효과 값을 80 dB로 선택하면 도파관 배열의 최소 필요길이는 80 mm 정도인 것을 알 수 있다.

그림 38과 그림 39는 육각형 도파관 배열의 최소 필요길이를 구하는 것을 나타낸 것으로 그림 34와 그림 36의 원형, 사각형 도파관 배열의 길이를 구하는 방법과 동일하게 표현할 수 있다. 그림 39에서 육각형의 장축의 길이가 30 mm 일 때, 80 dB 의 차폐효과를 얻으려면 도파관 배열의 최소길이는 57 mm 이며, 100 dB의 차폐효과를 얻으려면 도파관 배열의 길이는 75 mm의 길이가 필요한 것을 알 수 있다.

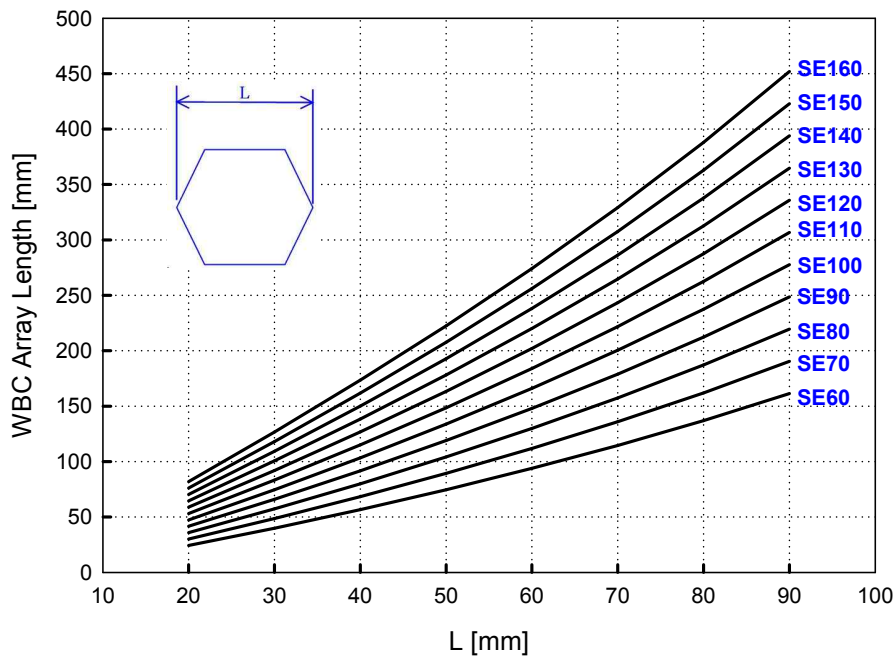
따라서 사각형 도파관의 경우와 비교하면 80 dB의 차폐효과를 얻는 경우에는 육각형 도파관을 사용하면 5 mm 정도 도파관 배열의 길이가 짧아지게 되며, 100 dB의 차폐효과를 얻는

경우에는 육각형 도파관 배열을 사용하는 것이 30 mm 정도 짧게 나타나는 것을 알 수 있다. 원형과 육각형의 경우 80 dB와 100 dB 모두 육각형 도파관 배열을 사용하는 것이 도파관 배열의 길이가 13 mm 짧아지는 것을 알 수 있다.

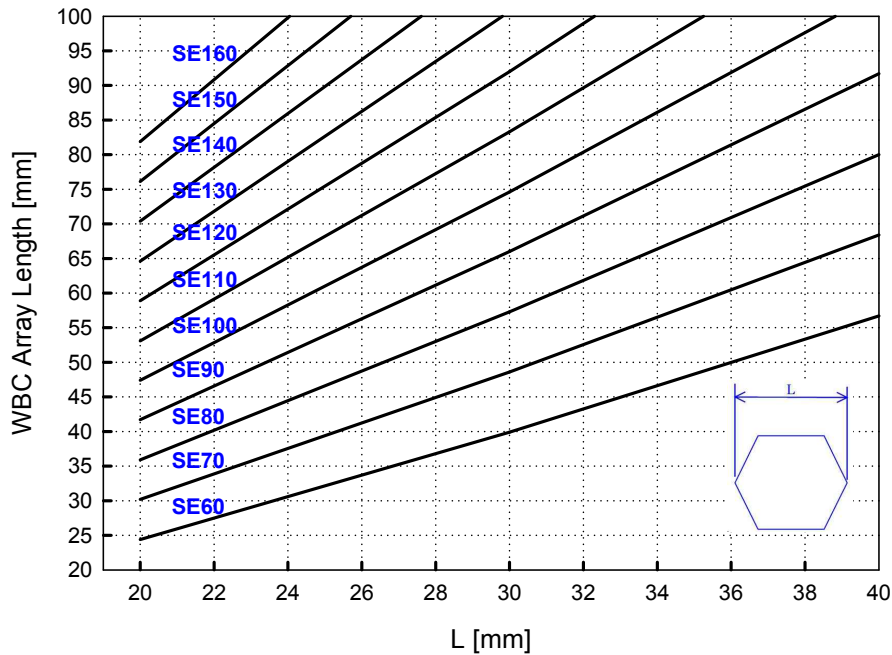
따라서 형태와 제작의 용이성 및 압력손실 등을 제외하고 도파관 배열의 길이만을 단순히 비교하면 육각형 형태의 도파관 배열을 사용하는 것이 공간의 절약 측면에서 가장 효율이 좋을 것으로 판단된다.



[그림 37] Zoom in the Fig. 36



[그림 38] Minimum length for various SE in hexagonal WBCA



[그림 39] Zoom in the Fig. 38

(4) 차폐효과에 따른 형상 결정

(가) 차폐효과에 따른 도파관배열 길이

표 11-표 13은 원형, 사각형 및 육각형 도파관의 도파관 배열의 길이를 구하는 식을 나타낸 것이다. 앞에서 나타낸 식 32~식 33은 변수의 입력 등이 복잡하여 사용하기 어려운 측면이 있어 간단하게 1차원 수식으로 나타내었다.

표 11에서 지름이 50 mm인 경우는 “도파관 배열의 길이 = $-5.7509 + 1.6324 \times SE$ 값”으로 계산할 수 있으며, 원하는 차폐효과 값을 수식에 적용하여 간단하게 도파관 배열의 길이를 구할 수 있다.

원형 도파관을 사용할 경우와 육각형 도파관을 사용할 경우에도 동일한 방법으로 도파관 배열의 길이를 구할 수 있으며 수식에서 “ x ”는 차폐효과를 의미한다.

[표 11] Minimum length required in circular WBCA with diameter

Diameter [mm]	Length of WBCA[mm]	R ²
90	$y = 5.1000 + 3.2800x$	0.99
80	$y = 1.5809 + 2.8119x$	
70	$y = -1.3882 + 2.3879x$	
60	$y = -3.8600 + 1.9978x$	
50	$y = -5.7509 + 1.6324x$	
40	$y = -7.0400 + 1.2858x$	
30	$y = -7.5527 + 0.9525x$	
20	$y = -7.200 + 0.6300x$	

[표 12] Minimum length required in rectangular WBCA with unit side

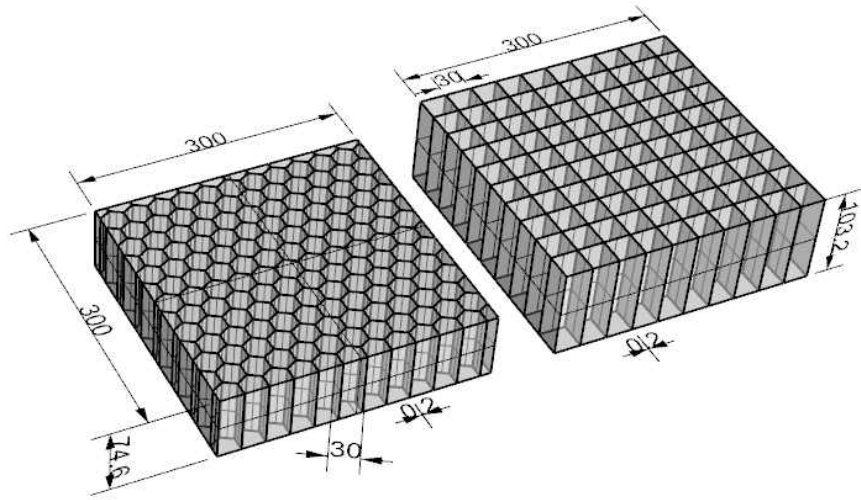
Unit side [mm]	Length of WBCA [mm]	R ²
90	$y = 6.5282 + 4.1208x$	0.99
80	$y = 1.9400 + 3.4642x$	
70	$y = -1.7073 + 2.8989x$	
60	$y = -4.6636 + 2.3982x$	
50	$y = -6.8536 + 1.9426x$	
40	$y = -8.3000 + 1.5200x$	
30	$y = -8.9045 + 1.1214x$	
20	$y = -8.5736 + 0.7401x$	

(나) 유동해석

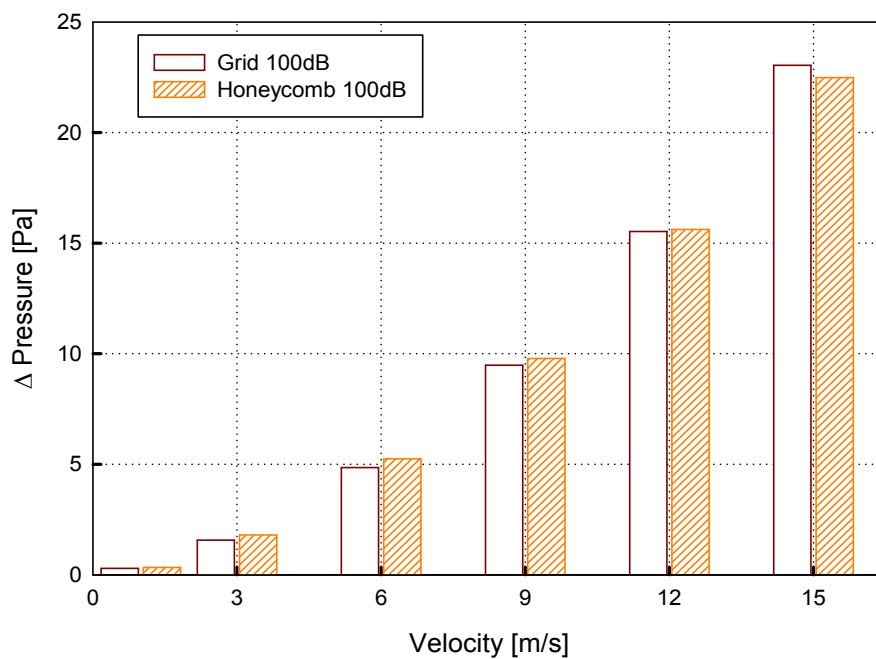
표 13과 그림 39에서 차폐효과 성능 100 dB인 육각형 도파관의 장축의 길이가 30 mm이면, 도파관 배열의 길이는 74.6 mm이다(그림 40). 동일한 차폐효과 성능을 갖는 100 dB급 사각형 도파관 배열의 길이는 103.2 mm가 된다. 또한 도파관 1개당의 공기유동 통로의 면적은 육각형 도파관의 경우는 584.6 mm²이며, 사각형 도파관은 900 mm²이다. 도파관 배열의 크기가 300×300 mm일 때 공기유동의 통로가 되는 총 입구면적은 육각형의 도파관 배열은 88,867.9 mm², 사각형 도파관 배열은 88,950.27 mm²이다.

[표 13] Minimum length required in honeycomb WBCA with diagonal line

Diagonal line [mm]	Length of WBCA [mm]	R ²
90	$y = -12.9209 + 2.9057x$	0.99
80	$y = -13.7082 + 2.5108x$	
70	$y = -14.2209 + 2.1457x$	
60	$y = -14.3209 + 1.8030x$	
50	$y = -14.0964 + 1.4787x$	
40	$y = -13.3882 + 1.1679x$	
30	$y = -12.1309 + 0.8676x$	
20	$y = -3.3808 + 0.7760x$	



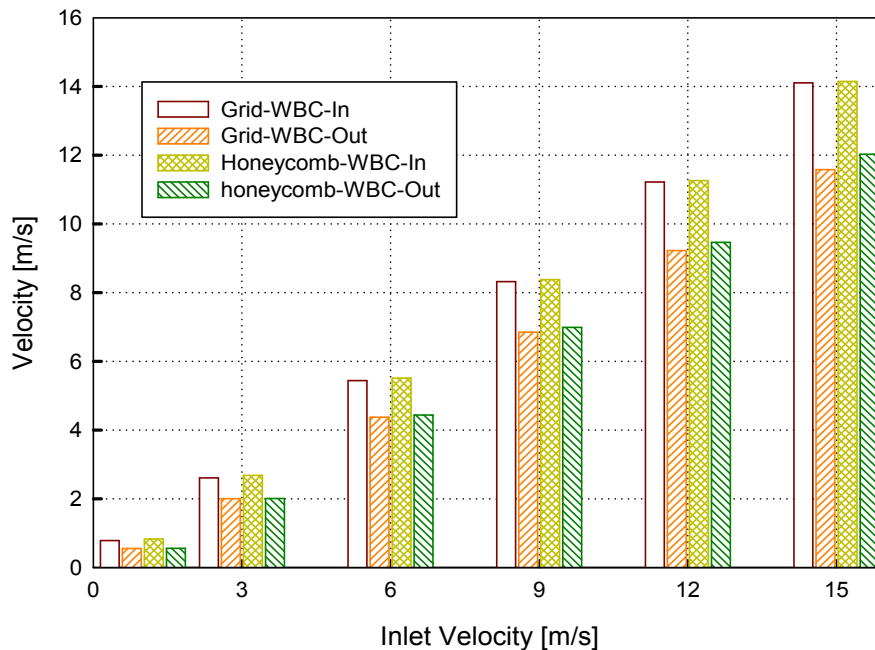
[그림 40] Modeling of WBC Array



[그림 41] Averaging pressure loss in entrance and exit of WBCA

평가를 위한 CFD 시뮬레이션은 외부로부터 유입되는 공기의 속도를 1, 3, 6, 9, 12 m/s 및 15 m/s인 경우를 대상으로 하였으며 2가지 모델에 대해서 각각 6case씩 총 12case를 해석하였다. 해석 항목은 도파관 배열에서의 압력손실과 도파관 배열 입구 및 출구에서의 평균 유속이다.

그림 41은 WBC 입구와 출구에서의 평균 압력손실을 비교한 것이며 그림 42는 WBC 입구와 출구에서의 평균유속을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 평균 압력손실은 육각형의 도파관을 사용한 경우가 저속에서는 평균압력손실이 사각형 형태의 도파관을 사용한 경우보다 다소 크게 나타났다. 하지만 입구의 유속이 9 m/s를 넘게 되면 육각형의 도파관의 압력손실이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 평균유속은 WBC의 입구에서 도파관의 형태에 따라 거의 차이가 없으며 출구에서는 육각형 형태의 도파관을 사용한 경우가 더 큰 값을 보였다. 따라서 동일한 차폐효과 성능을 갖는 육각형과 사각형 형태의 도파관인 경우 육각형의 도파관을 사용하는 것이 평균유속 및 평균 압력손실을 고려한다면 유리한 것으로 판단할 수 있다.



[그림 42] Averaging velocity of flow loss in entrance and exit of WBCA

(5) 결론

본 절에서는 건축분야의 기술자들이 사용할 수 있는 원형 도파관의 지름, 사각형 도파관의 가장 긴 한 변의 길이 및 육각형 도파관의 장축의 길이를 이용하여 간단하게 각 도파관 배열의 길이를 결정할 수 있는 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 연구를 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- EMP 차폐를 위한 원형 도파관의 배열의 크기는 각 지름별로 차폐효과 값을 이용하여 표현할 수 있으며, 도파관 지름이 50 mm 이면 “배열의 길이 = $-5.7509 + 1.6324 \times SE$ 값”으로 나타낼 수 있다.
- 사각형, 육각형 도파관의 경우도 원형 도파관과 동일한 형태로 배열의 길이를 차폐효과 값에 의한 1차원 함수로 표현할 수 있으며 이때 결정계수는 0.99로 매우 높게 나타났다.
- 30 mm를 기준으로 하면, 육각형 도파관 배열을 사용하여 80 dB의 차폐효과를 얻는 경우, 사각형 도파관 배열보다 5 mm 정도 도파관 배열의 길이가 짧아지게 되며, 100 dB의 차폐효과를 얻는 경우에는 30 mm정도 짧게 나타난다. 원형 도파관 배열의 경우와 비교하면 80 dB와 100 dB 모두 육각형 도파관 배열을 사용하는 것이 도파관 배열의 길이가 13 mm 가량 짧아지는 것을 알 수 있다.
- 동일한 차폐효과 성능을 갖는 육각형과 사각형 형태의 도파관 배열인 경우 육각형 형태의 도파관 배열을 사용하는 것이 평균유속 및 평균 압력손실을 고려한다면 유리한 것으로 판단된다.

사. 급수관의 EMP 차폐

(1) 서론

급수관의 환경은 관균등표에 의한 방법 또는 유량선도에 의한 방법을 사용하며, 관 균등표에 의한 방법은 일반적으로 소규모 건물을 설계할 때, 중규모 이상의 건물을 설계할 경우에는 유량선도에 의한 방법이 일반적으로 이용되고 있다. 급수관의 환경, 유속 및 압력해석에 대한 기존의 연구로는 수격작용에 의해 발생하는 이상 압력특성을 파악하기 위하여 배관 내 유속 1.5m/s, 초기압력 0.3MPa인 경우를 해석한 것이 있다. 대상 논문은 일반 급수관의 밸브 개폐에 따른 압력변동을 해석한 것이며, 환경은 대상으로 하고 있지 않다.

일반 급수관과는 달리 EMP 차폐용 배관은 WBC(Wave guide below cutoff, 도파관)를 설치하며, WBC 배열의 설치에 따라 배관의 유효 단면적이 줄어서 WBC 배열을 설치하는 부분의 환경을 확대하여 사용하는 것이 일반적이다.

WBC 배열이 설치된 배관 확대부와 기존 배관을 연결하는 방법은 크게 2가지가 있다. 첫 번째는 Concentric Reducer(편심)를 사용하는 방법, 두 번째는 Eccentric Reducer(정심)를 사용하는 것이다.

급수관에 대한 연구 중 EMP 차폐를 위한 WBC가 설치된 급수배관의 배관 확대에 대한 국내 연구는 없으며, 일반 배관에 관한 연구로 배수관을 대상으로 한 논문과 보일러 및 발전기의 연도를 대상으로 한 것이 있다. 배수관에 대한 연구는 배수관내 배수의 유수깊이를 깊게 하여 오물 이송능력을 크게 하기 위해 기존 원형 배수관의 단면을 V형으로 변형시킨 것이 있다. 여기서는 유수 깊이 측정을 통해 이러한 형태의 배수관의 배수능력을 평가하고, 원형관 및 V형관 모두 세척수량이 증가할수록, 구배가 작을수록 유수깊이가 깊어지는 것을 확인하였다. 그러나 이는 배수관에 대한 연구로 급수관과는 다른 조건을 가지고 있다. 급수관의 경우에는 평상시에도 배관 내가 만수가 되어있지만 배수관의 경우에는 평상시에는 배수관내에 배수가 흐르지 않아 비어있으며, 사용할 경우에도 배수관경의 1/2~1/3 정도만 흐르기 때문에 이러한 형태를 급수관에 적용할 경우에는 압력변동, 유속 및 유체의 흐름 등에 대한 추가 검토가 필요하다.

비상발전기, 보일러의 연도에 대한 연구로는 EMP 차폐를 위해서 연도 내에 WBC 배열을 설치하고 연도의 유효단면적이 좁아지기 때문에 최적 크기를 연구한 것이 있다. 대상 연구는 급수배관에 WBC 배열을 설치한 경우와 원리는 동일하지만 도파관 배열의 형태 및 도파관을 구성하는 재료의 두께가 다르며, 배관 내부를 통과하는 물질도 온도가 높은 배기가스를 대상으로 하고 있다.

따라서 본 논문에서는 급수관에 WBC 배열이 설치된 기존배관과 확대배관의 연결부위에 Concentric Reducer와 Eccentric Reducer를 사용한 경우를 대상으로 배관과 WBC 배열에서의 유속, reducer의 입구와 출구에서의 유속, 압력을 비교, 평가하는 것을 목적으로 연구를 진행하였다.

(2) 시뮬레이션

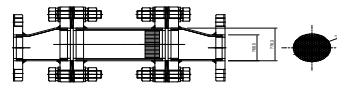
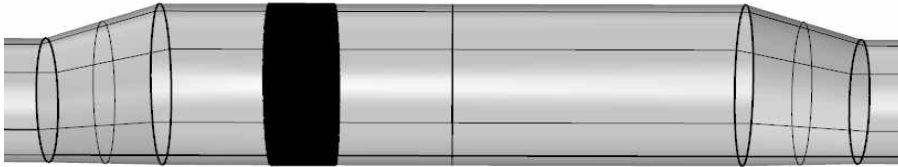
(가) 시뮬레이션 대상

그림 43은 WBC 배열이 설치된 배관 확대부와 기존 배관과의 연결을 위한 Concentric Reducer 및 Eccentric Reducer를 사용한 것을 나타낸 것이다. 편심 이음의 경우에는 하부는 '1' 자 형태로 직선으로 이어지게 설치하고 WBC는 출구 측에 가깝게 설치하였다. 정심 이음의 경우에도 동일한 위치에 EMP차폐를 위한 WBC 배열을 설치하였다. 배관은 배관용 탄소 강관(KSD 3507)을 사용하였으며 호칭경 50mm와 65mm로 하였다. WBC 배열의 길이

는 25mm, WBC cell은 지름 70.3mm인 원에 내접하는 honeycomb 형태이며, 두께는 1.5mm를 사용했다.



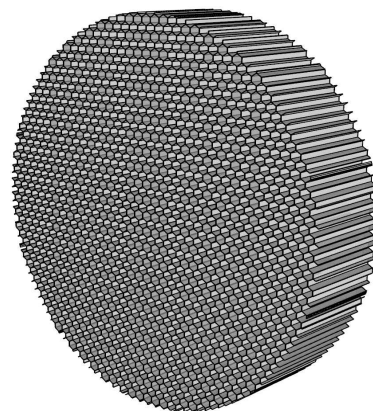
(a) standard



(b) Concentric Reducer

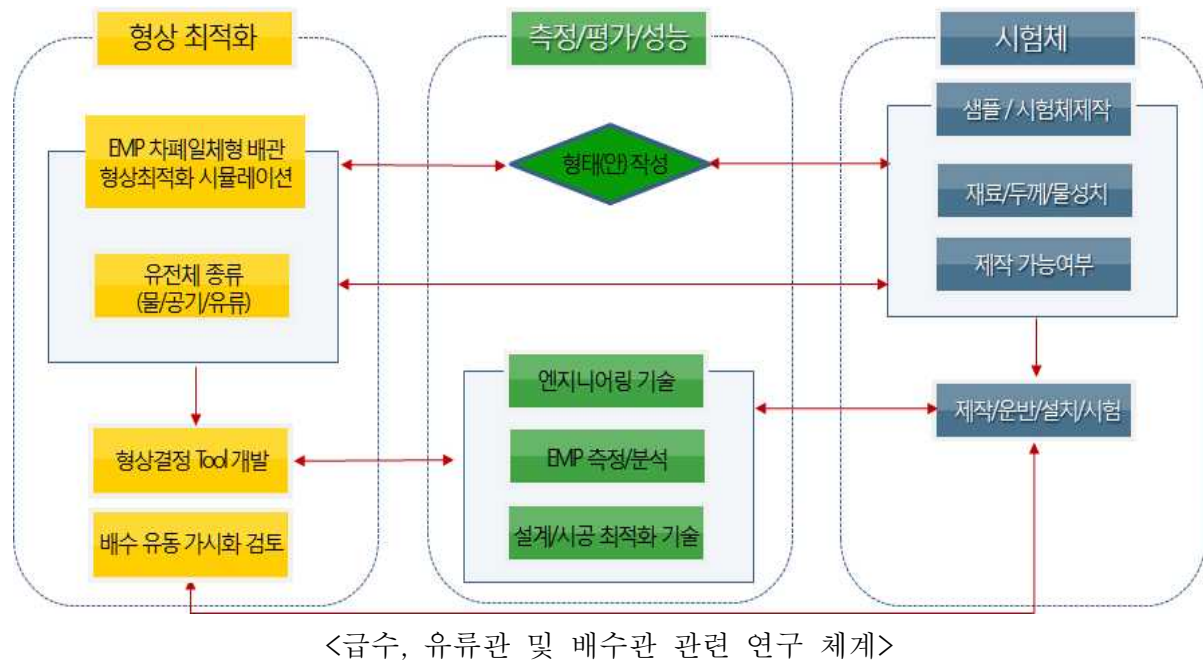


(c) Eccentric Reducer



(d) WBC(Wave guide below cutoff)

[그림 43] WBC, Concentric Reducer & Eccentric Reducer



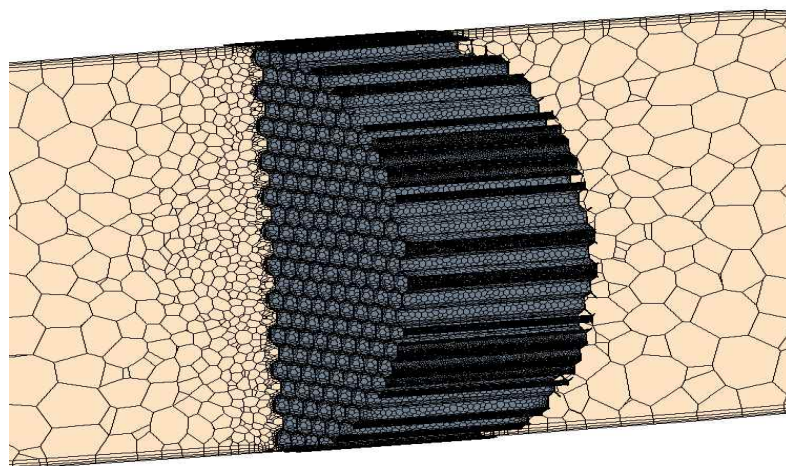
(나) 시뮬레이션

도파관 배열이 설치된 급수관내에서의 유체의 흐름, 압력 변동 등을 해석하기 위하여 CFD 시뮬레이션을 실시하였다.

급수배관 내에서의 유속은 배관의 종류에 따라 다르지만 급수본관에서의 권장유속은 1~2m/s, 급수분지관내에서의 권장유속은 0.5~0.7m/s이며 일반적으로 2.0m/s 이하가 바람직하다. 따라서 본 논문에서는 급수배관 입구에서의 유속을 표 14와 같이 0.5, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8m/s 및 2.0m/s의 6개의 유속을 대상으로 총 18 case를 해석하였다.

해석은 WBC 배열에서의 유속, 배관 확관부 입구와 출구에서의 유속 및 압력변동을 파악하고, 시간의 흐름(비정상)에 따른 VOF (Volume of Fluid)를 이용하여 WBC 배열 부위에서의 유동을 평가하였다.

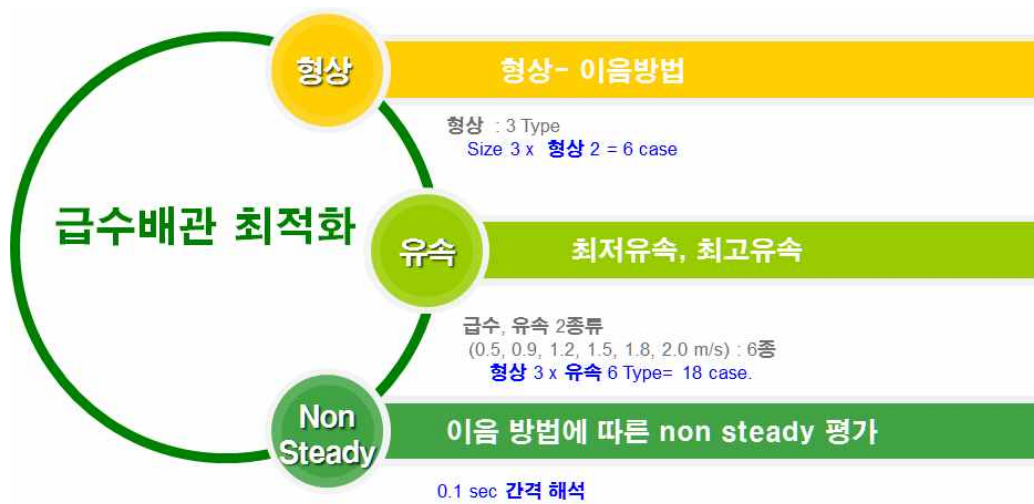
그림 44는 시뮬레이션을 위한 Volume Mesh를 나타낸 것으로 Polyhedral mesh를 이용하여 270만개로 정도로 작성하였다.



[그림 44] Volume Mesh (2,738,960 cells)

[표 14] Simulation Case

Inlet Speed [m/s]	Standard	Concentric Reducer	Eccentric Reducer	Cases
0.5	s-05	c-05	e-05	18
0.9	s-09	c-09	e-09	
1.2	s-12	c-12	e-12	
1.5	s-15	c-15	e-15	
1.8	s-18	c-18	e-18	
2.0	s-20	c-20	e-20	

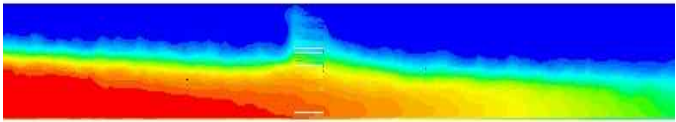
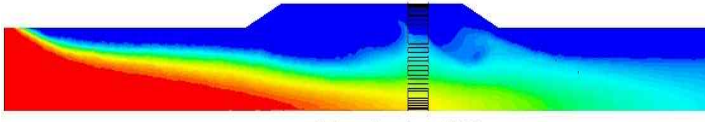
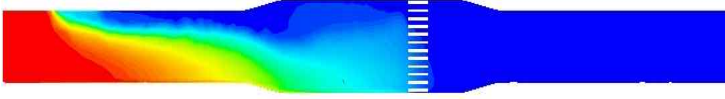
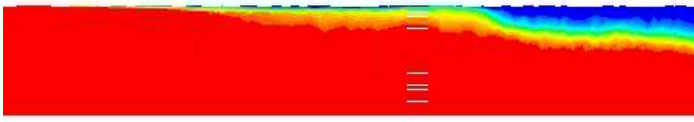
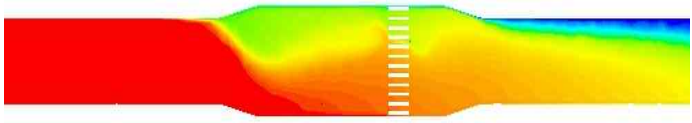
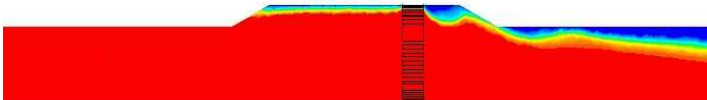
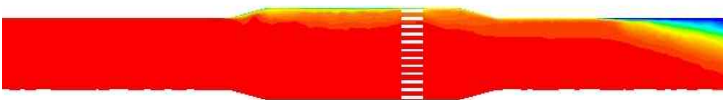


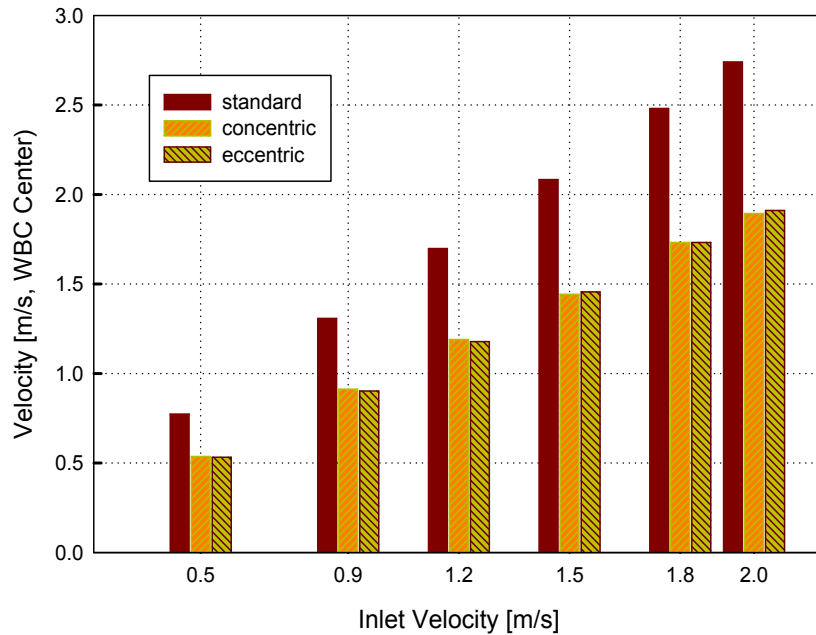
(3) 해석결과

(가) 유동평가 및 유속

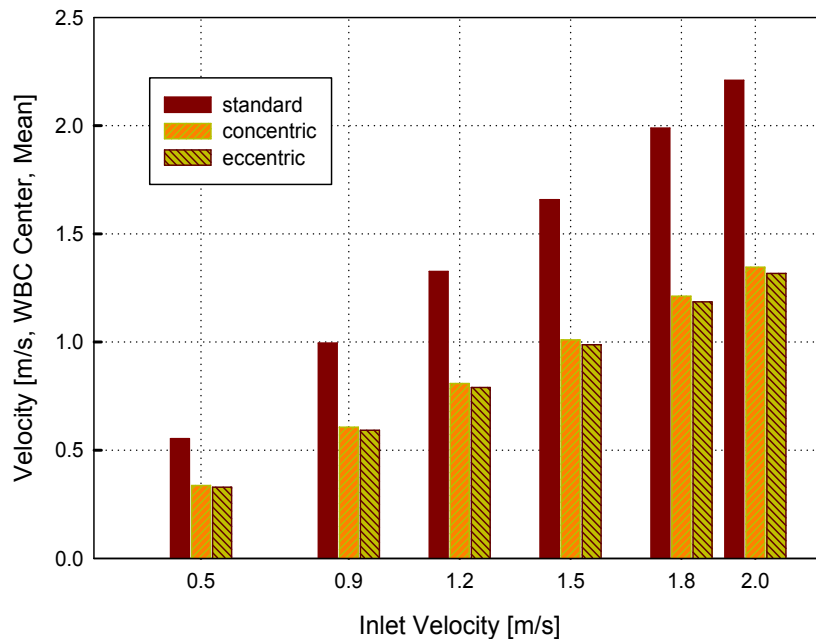
표 15는 WBC 배열이 설치된 배관에서 유체의 유동을 평가한 결과를 나타낸 것으로 배열이 설치된 부분에서는 급수초기에 유체의 역류가 일부 발생하였다. 이는 배관확대부에 설치된 WBC 배열의 영향으로 배관 확대부에서는 역류가 발생하지만 시간의 경과에 따라서 역류가 해소되어 WBC 배열을 유체가 통과하는 것을 알 수 있다

[표 15] Simulation Result

Case		Result (Volume Fraction)
1sec	s-05	
	c-05	
	e-05	
5sec	s-05	
	c-05	
	e-05	
10sec	s-05	
	c-05	
	e-05	



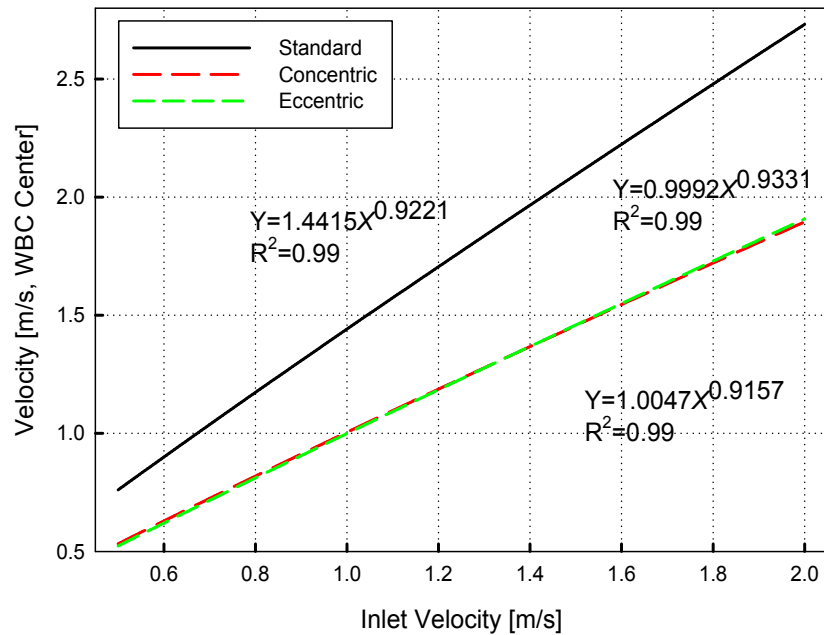
[그림 45] Maximum flow velocities at the center of the WBC array



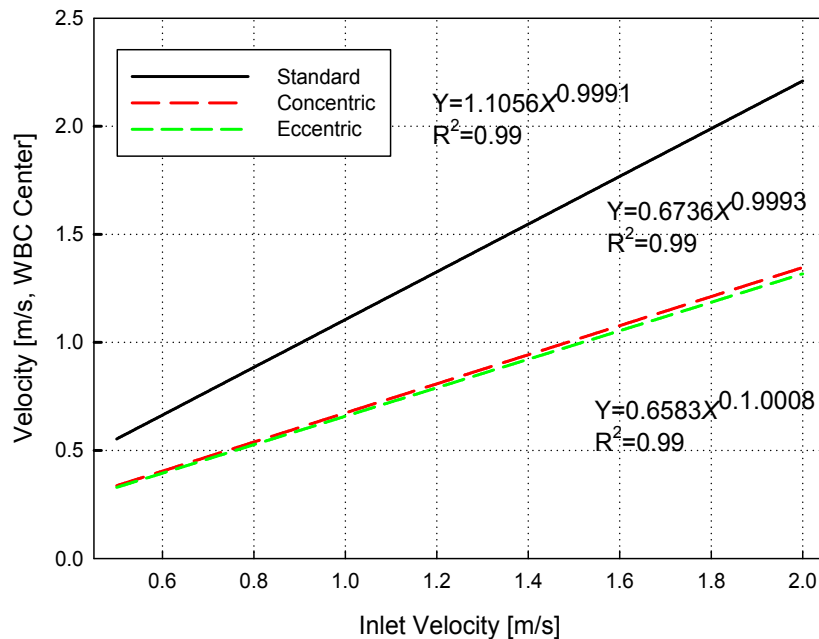
[그림 46] Average flow velocities at the center of the WBC array

그림 45는 배관내의 유속이 0.5, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8m/s 및 2.0m/s인 경우 WBC 배열의 중앙부의 최대 유속을 나타낸 것이다. 입구의 유속이 0.5m/s이면 WBC 배열의 중앙부에서는 배관을 확대하지 않으면 0.54m/s, 입구유속이 2.0m/s이면 배열 중앙부에서의 최대 유속은 2.74m/s로 나타났다. 그러나 편심이음과 정심이음을 사용한 경우에는 2개의 이음쇠 모두 0.50m/s로 최대 속도가 거의 비슷한 것을 알 수 있다.

그림 46은 WBC 배열의 중앙부에서의 평균 유속 해석결과를 나타낸 것으로 배관의 확대가 없는 경우에는 평균 유속은 입구의 유속이 0.5m/s 이면 0.55m/s, 1.2m/s인 경우에는 1.32m/s, 입구의 유속이 2.0m/s인 경우에는 2.21m/s로 나타났다.



[그림 47] Maximum flow velocity calculation at the center of the WBC array



[그림 48] Average flow velocity calculation at the center of the WBC array

또한 편심이음은 WBC 배열의 중앙부에서의 평균 유속은 입구 유속이 1.2m/s이면 1.33m/s, 2.0m/s인 경우에는 2.20m/s로 나타났다.

그림 47은 WBC 배열 중앙부의 최대유속을 예측한 결과를 나타낸 것으로 각 예측식은 결정 계수가 0.99로 매우 높게 나타났다. 배관의 확대 없이 WBC 배열을 설치하면 WBC 배열 중앙 부위에서의 유속은 $1.4415 \times \text{입구유속}^{0.9221}$ 로 표현할 수 있으며 편심, 정심이음은 $1.0047 \times \text{입구유속}^{0.9157}$, $0.9992 \times \text{입구유속}^{0.9331}$ 로 나타났다. 따라서 정심이음과 편심이음을 사용한 경우는 WBC 배열의 중앙부에서의 최대유속이 거의 같은 결과를 보이는 것으로 나타났다. 그림 48은 입구유속에 따른 각 배관에서의 WBC 배열의 중앙부 평균유속을 예측한 결과를 나타 낸 것으로 최대치를 예측한 결과와 동일한 형태로 예측식을 작성할 수 있으며, 이때 각 식의 결정계수는 0.99로 매우 높게 나타났다.

(나) 압력손실

그림 49는 배관 이음쇠의 형상, 입구 유속에 따른 이음쇠 입구와 출구에서의 압력손실을 나타낸 것이다. 유속의 증가에 따라서 압력손실은 커지며, 배관 이음쇠의 종류에 따라서도 압력손실의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

WBC 배열의 중앙부에서의 최대 유속과 평균유속은 기본 배관을 사용한 경우를 제외하고 정심이음과 편심이음의 차이가 발생하지 않았지만 압력손실의 경우에는 그 차이가 나타나는 것을 알수 있다. WBC가 설치된 부위의 배관을 확대하지 않고 입구의 유속이 1.8m/s인 경우 압력손실은 1,050Pa, 편심이음은 570Pa이며 정심이음은 440Pa로 나타났다.

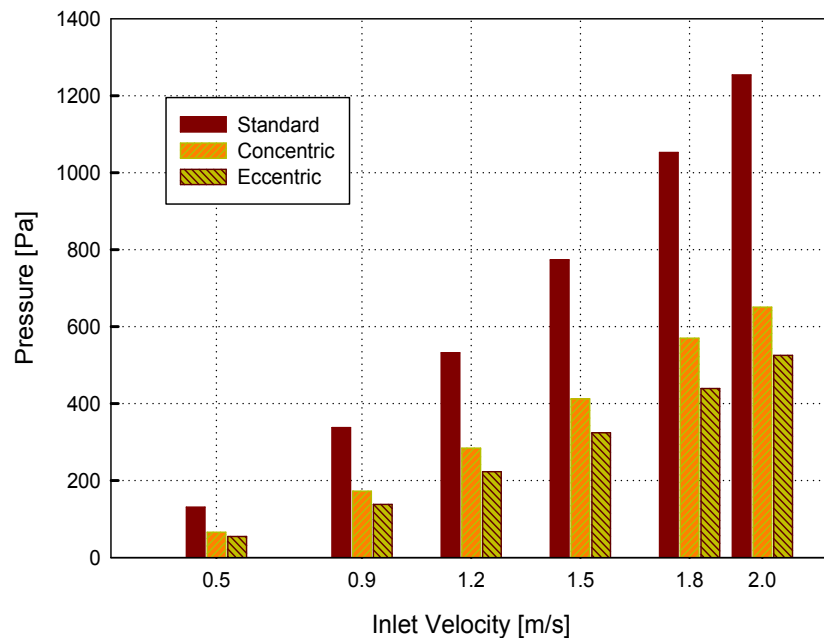
따라서 WBC 배열이 설치된 배관과 기존 배관을 연결하는 경우 WBC 배열이 설치되는 부위는 배관의 관경을 1단계 확대하고, 확대된 배관과 기존 배관의 연결은 정심이음쇠를 사용하는 것이 이음쇠에 따른 배관 내에서의 압력손실을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

그림 50은 이음쇠 종류별 입구유속에 따른 압력손실을 예측한 결과를 나타낸 것이다.

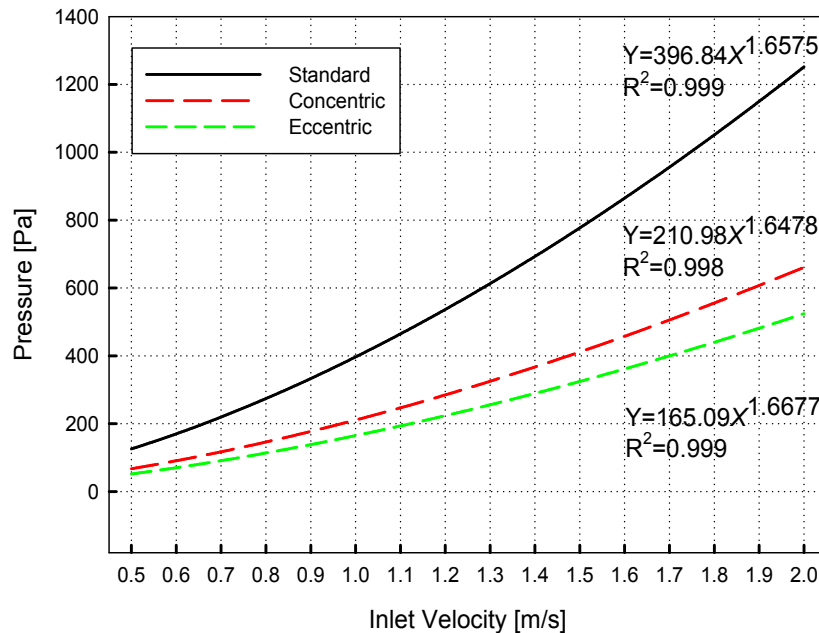
각 예측식은 WBC 중앙부분에서의 유속을 예측하는 형태와 동일하게 입구유속에 따른 함수로 나타낼 수 있으며 예측식도 모두 결정계수가 0.99로 나타나 입구의 유속을 이용해서 각 이음쇠 별 압력손실을 구할 수 있을 것으로 판단된다.

WBC 배열이 설치된 부분과 기존배관과의 연결을 정심이음쇠를 사용한 경우의 압력손실은 $165.09 \times \text{입구유속}^{1.6677}$ 로 표현할 수 있으며 결정계수는 0.999로 매우 높게 나타났다.

또한, 편심이음도 입구 유속을 이용하여 $210.98 \times \text{입구유속}^{1.6478}$ 로 표현할 수 있으며 결정계수는 0.9983으로 나타났다.



[그림 49] Pressure loss in accordance with types of reducer



[그림 50] Pressure loss calculation in accordance with types of reducer

(4) 결론

본 절에서는 급수관에 Concentric Reducer와 Eccentric Reducer를 사용한 경우와 WBC 배열이 설치된 부분을 확대하지 않은 경우를 대상으로 CFD를 이용하여 해석을 실시하였다. 해석내용은 WBC 배열에서의 유속, reducer의 입구와 출구에서의 유속, 압력손실을 평가하였으며, 평가결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- WBC 배열 중앙부의 최대 유속을 평가한 결과 입구의 유속이 0.5m/s 인 경우 배관의 확대 없이 WBC 배열을 설치한 경우는 최대 0.54m/s, 입구의 유속이 2.0m/s인 경우에는 2.74m/s로 나타났으며 편심이음과 정심이음의 경우에는 0.5m/s 정도의 거의 동일한 값을 보였다.
- 배관 이음쇠의 종류에 따른 WBC 배열 중앙부에서의 평균 유속은 기본 배관을 사용한 경우가 가장 높게 나타났으며 정심이음과 편심이음의 경우에는 거의 동일한 값을 보였다.
- 배관 이음쇠의 종류에 따른 이음쇠 입구와 출구에서의 압력손실을 평가한 결과 정심이음쇠는 $165.09 \times \text{입구유속}^{1.6677}$ 로 표현할 수 있으며 편심이음은 $210.98 \times \text{입구유속}^{1.6478}$ 로 표현할 수 있다.
- WBC 배열이 설치된 배관과 기존 배관을 연결하는 경우 WBC 배열이 설치되는 부위는 배관의 관경을 1단계 확대하고, 확대 배관과 기존 배관의 연결은 정심이음쇠를 사용하는 것이 배관에서의 압력손실을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

바. EMP 차폐를 위한 배수관의 형상별 유동 특성

(1) 서론

건물로부터의 배수는 생활배수, 우수 및 특수배수가 있지만 본 보고서에서는 EMP 보호를 위한 차폐시설의 경우 우수, 특수배수는 고려사항이 아니며, 생활배수만 해당이 된다. 생활배수는 대소변기와 같은 인간의 분뇨를 포함하는 오수와 일상생활에 의한 잡배수로 나누게 된다.

오수의 경우 EMP 보호를 위한 특수시설의 경우 72시간 정도 일정시간동안 외부로 배출하지 않고 실내에 별도의 오수조에 보관하게 되며 일반잡배수만 배수하는 것이 일반적이다.

따라서 본 절에서는 일반 잡배수관 중 수평배수관을 대상으로 도파관 배열의 설치에 따른 하수의 흐름을 평가하였다.

수평배수관의 구배가 완만하여 유속이 느리게 되면 유수에 의한 자정작용이 약해져서 오물이나 스케일이 배수관내에 발생하게 되며 최소 유속은 0.6m/s 정도로 하는 것이 일반적이며 구배를 크게하여 유속을 빠르게 하면 유수의 깊이가 낮고 오물을 반송시키는 능력이 떨어지게 된다. 또한 유수에 의한 파손 등을 고려하여 한계 유속은 1.5m/s 정도로 하는 것이 일반적이다.

EMP 방호를 위한 시설의 내부에는 재실자의 생활을 위한 각종 장비 및 기본적인 건축설비 요소들이 필요하다. 그 중에서 사람이 생활하는데 가장 기본적인 것은 급배수 설비와 환기설비이다.

환기설비에 대한 EMP 방호기술은 기존의 연구 및 문헌에서 EMP 방지용 Honeycomb, Grill 등을 설치하는 방법에 대한 원리와 응용사례가 간혹 있지만, 배수관을 대상으로 한 연구는 거의 없는 실정이다.

배수관은 수직배수관과 수평배수관이 있으며, EMP 방호시설의 차폐판을 관통하는 배수관은 반드시 외부로부터 침입하는 EMP를 방지하기 위하여 도파관(WBC, Waveguide below Cutoff)을 설치해야 한다. 이로 인해 배수관의 유효단면적이 줄어들어 원활한 배수의 흐름을 기대할 수 없다. 또한 급수관은 관내에 공기가 섞여있지 않아 비교적 그 유동해석이 용이하나 배수관의 경우에는 사용할 경우에만 간헐적으로 배수되는 물과 공기가 혼합되어 흐르기 때문에 유동특성이 매우 복잡하다.

따라서 본 절에서는 전산유체역학(CFD)을 이용하여 EMP 방호를 위한 도파관이 설치된 배수관 대상으로 도파관의 형상에 따른 배수의 흐름, 압력변동 및 유속 변화를 파악하는 것을 목적으로 한다.

(2) 문헌조사

외국에서 방호시설의 급배수관에 대한 문헌으로는 MIL-STD-188.125-1,(2005)이 있으며, 이 규격에 따르면 EMP 방지를 위한 도파관의 직경은 10cm를 넘지 않아야 하고 그 길이는 직경의 5배 이상으로 한다고 되어있다. 또한 직경이 큰 파이프 및 덕트에 삽입되는 허니컴은 가로와 세로의 길이는 10cm이하, 길이는 대각선 길이의 5배 이상으로 한다고 되어있다. 국내에서의 EMP 방호시설에서의 배수관을 대상으로 한 논문은 없는 실정이며 일반건물에서의 연구는 배수관내의 압력변동 및 유동특성에 관한 연구와 배수관의 형태를 변경하여 배수특성을 파악한 논문이 있다.

배수관내의 압력 및 유동특성에 대한 연구로는 이용화, 박정원(1997)의 연구가 있으며 여기서는 배수관내의 유동특성이 트랩의 봉수과괴에 어떻게 작용하고 설계시 주의할 점에 대해서 언급하였다. 또한 유건석(2003) 등은 수직배수관내의 배수흐름에 따른 배수관내의 정부압의 제어가 가능한 Positive Air Pressure Attenuator와 Air Admittance Valve를 결합하여 사

용하는 것을 검토하였다.

배수관의 형태를 변경하고 이에 따른 배수특성을 파악한 논문으로는 이용화, 박정원(2012)의 연구가 있으며 여기서는 현재 사용하고 있는 원형배수관을 V자형 단면을 가지는 배수관으로 변경하고 배수관의 구배에 따른 가시화실험을 하고 유수의 깊이를 측정하였다. 연구 결과 배관의 구배가 1/100인 경우 동일한 세척수량을 비교하면 유수의 깊이는 V형 배관의 경우는 46-50%, 원형배관의 경우는 31-34%이며 V형관이 원형관에 비해서 유수깊이가 10mm 정도 깊게 나타난다고 하였다.

(3) CFD 해석

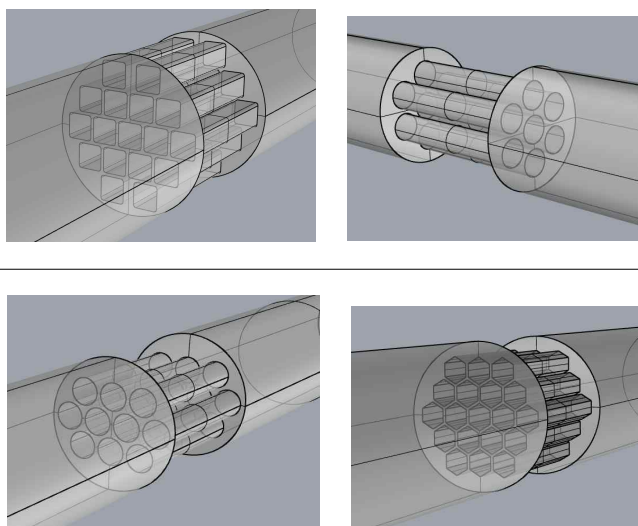
옥내배수관 계통에 있어서 수평관은 관경의 1/2 또는 최대 유수시에도 관의 2/3 이상으로 유수면이 높아지지 않도록 관경을 정하는 것이 좋으며, 일반적으로 배수관의 관경과 구배는 유속이 0.6-1.2m/s 정도로 유수 깊이가 되도록 구배를 결정한다. 관경이 200mm 이상이며 유속이 0.6m/s를 넘는 경우에는 배관의 최소구배보다 다소 완만하게 하여도 된다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 배수가 유입되는 부분인 inlet에는 관경의 1/2만 배수가 들어오도록 경계조건을 설정하고, 배수관의 구배는 1/100, 입구에서의 배수의 속도는 최소와 최대속도인 0.6m/s, 1.2m/s를 기준으로 설정하였다.

해석은 시간의 흐름에 따른 수평배수관과 EMP 도파관내의 배수의 유동특성을 파악하기 위하여 비정상(Implicit unsteady)으로 하였고 물과 공기가 함께 있는 Multiphase VOF(Volume of Fluid) 모델을 사용하였다.

배수관의 관경은 100, 125, 150A 및 200A를 대상으로 하였으며 도파관 배열이 설치되는 부분의 관경은 1단계 확대하는 것으로 하였다. 도파관의 형태는 원형, 4각형, 6각형이 일반적이나 원형의 경우 그림 51과 같이 내부의 유수로의 단면적이 손실이 크기 때문에 이를 제외하고 4각형, 6각형 및 다층형 도파관 배열을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다.

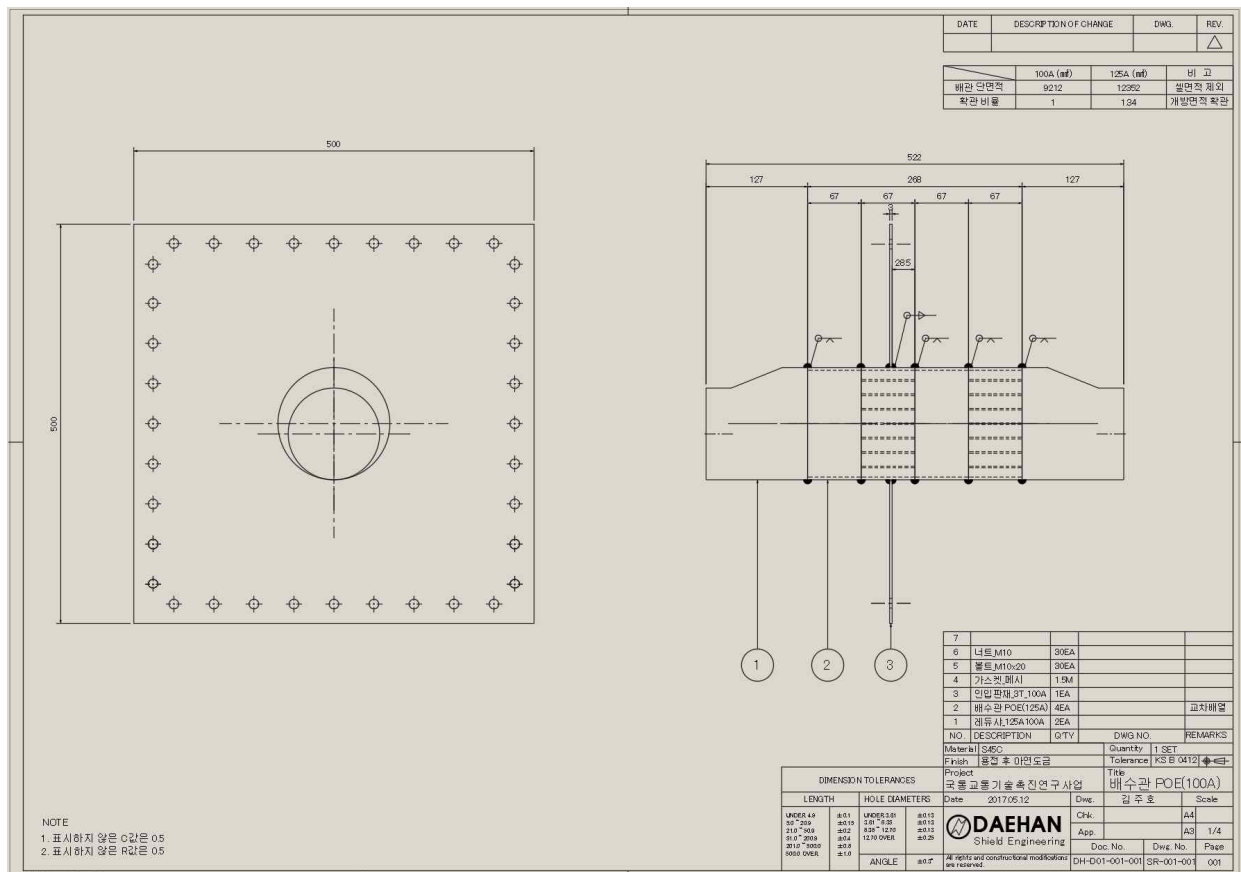
원형도파관의 경우 150A의 배관에 32A의 도파관을 설치하면 최대 7개 까지 도파관을 설치할 수 있고, 각형의 경우에는 30×30의 크기를 최대 17개, 벌집형 도파관을 설치할 경우에는 19개를 설치할 수 있어 유수 단면적의 손실은 원형 도파관 배열이 가장 큰 것으로 판단된다.



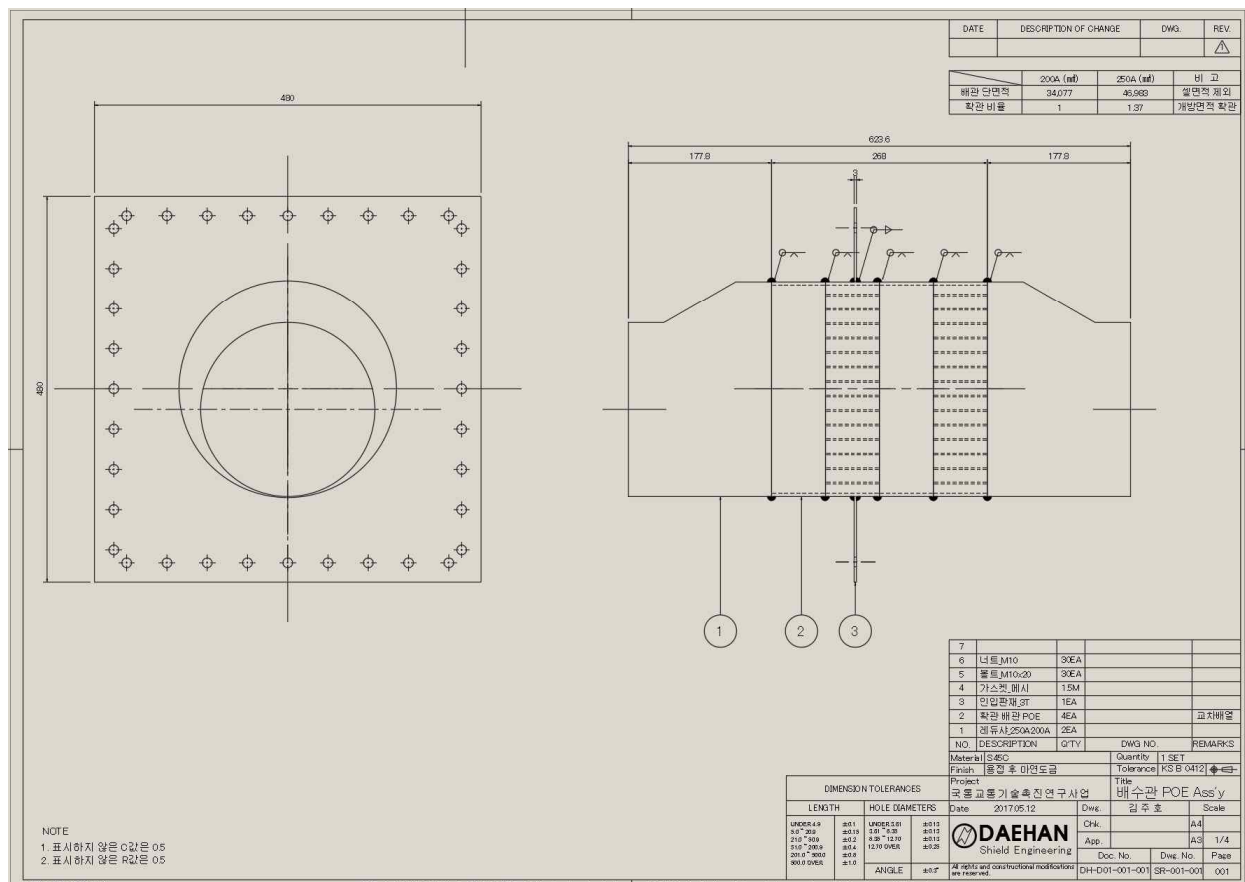
[그림 51] 도파관 형태별 유수 단면적 비교



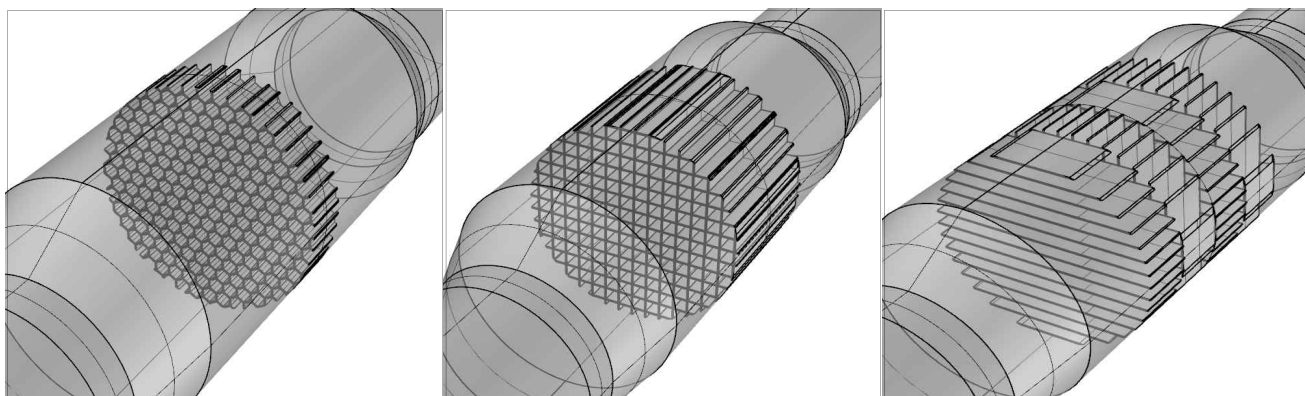
<EMP 차폐용 배수관의 유동특성 평가>



[그림 52] 100A 배수관



[그림 55] 200A 배수관



[그림 56] Honeycomb Type, Grid Type과 Multi-Layer Type 도파관 배열

그림 52~55는 도파관 배열이 설치된 배수관의 설계도면을 나타낸 것으로 배수관의 경우는 급수관과는 달리 편심이음을 사용하는 것으로 하였다. 배수관은 각각 100, 125, 150 및 250으로 하였으며 그림 56에 도파관 배열을 설치한 모습을 나타내었다. 배수관내에 설치하는 도파관 배열의 개별 도파관 길이는 SE 값이 80dB, 100dB를 대상으로 하였으며 그림 57에 시뮬레이션 방법을 표기하고 표 16에 시뮬레이션 케이스를 나타내었다.

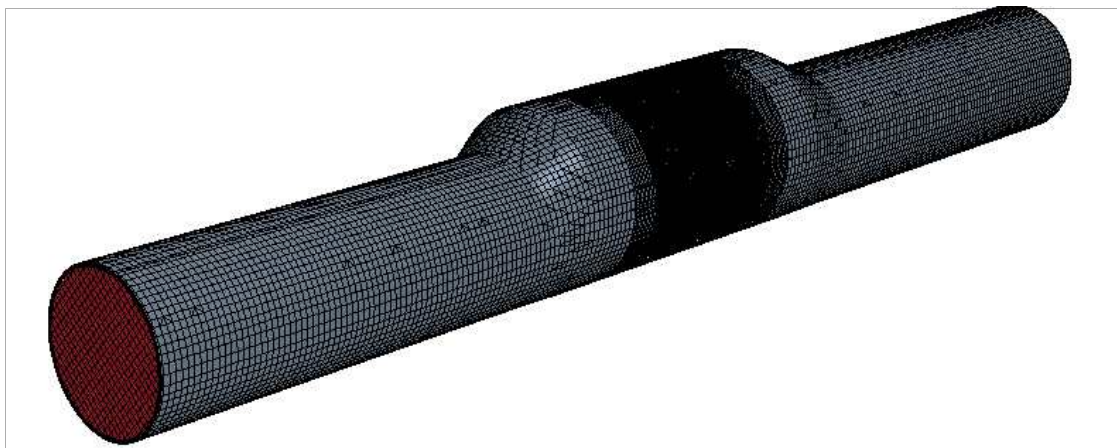
[표 16] 배수관의 시뮬레이션 Case

도파관 Type	관경	유속[m/s]	case	비고
Grid	100, 125, 150, 200	0.6	G-100-0.6	
			G-125-0.6	
			G-150-0.6	
			G-200-0.6	
		1.0	G-100-1.0	
			G-125-1.0	
			G-150-1.0	
			G-200-1.0	
		1.5	G-100-1.5	
			G-125-1.5	
			G-150-1.5	
			G-200-1.5	
		2.0	G-100-2.0	
			G-125-2.0	
			G-150-2.0	
			G-200-2.0	
Honeycomb	100, 125, 150, 200	0.6	H-100-0.6	
			H-125-0.6	
			H-150-0.6	
			H-200-0.6	
		1.0	H-100-1.0	
			H-125-1.0	
			H-150-1.0	
			H-200-1.0	
		1.5	H-100-1.5	
			H-125-1.5	
			H-150-1.5	
			H-200-1.5	
		2.0	H-100-2.0	
			H-125-2.0	
			H-150-2.0	
			H-200-2.0	
Multi-Layer	100, 125, 150, 200	0.6	M-100-0.6	
			M-125-0.6	
			M-150-0.6	
			M-200-0.6	
		1.0	M-100-1.0	
			M-125-1.0	
			M-150-1.0	
			M-200-1.0	
		1.5	M-100-1.5	
			M-125-1.5	
			M-150-1.5	
			M-200-1.5	
		2.0	M-100-2.0	
			M-125-2.0	
			M-150-2.0	
			M-200-2.0	

시뮬레이션은 배수관의 관경 4종류, 형태 3종을 대상으로 배수관내의 초기 배수 유입속도를 0.6, 1.0, 1.5m/s 및 2.0m/s로 설정하여 총 48종에 대하여 0.1초 간격으로 배수관내에서의 배수유동을 평가하였다. 그림 58에는 시뮬레이션을 위한 Volume Mesh 작성 결과를 나타내었다.



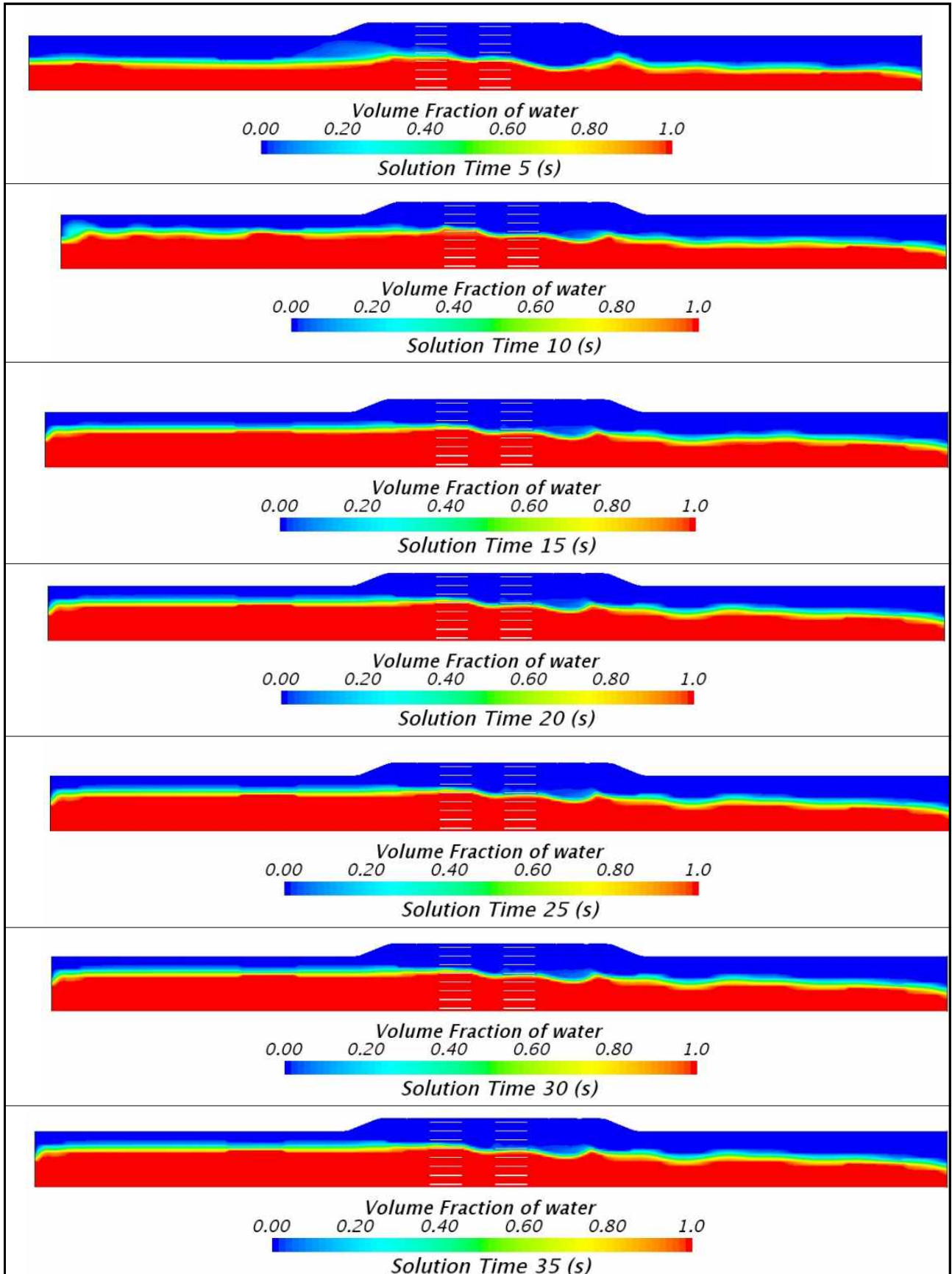
[그림 57] 시뮬레이션 방법



[그림 58] 해석을 위한 Volume Mesh

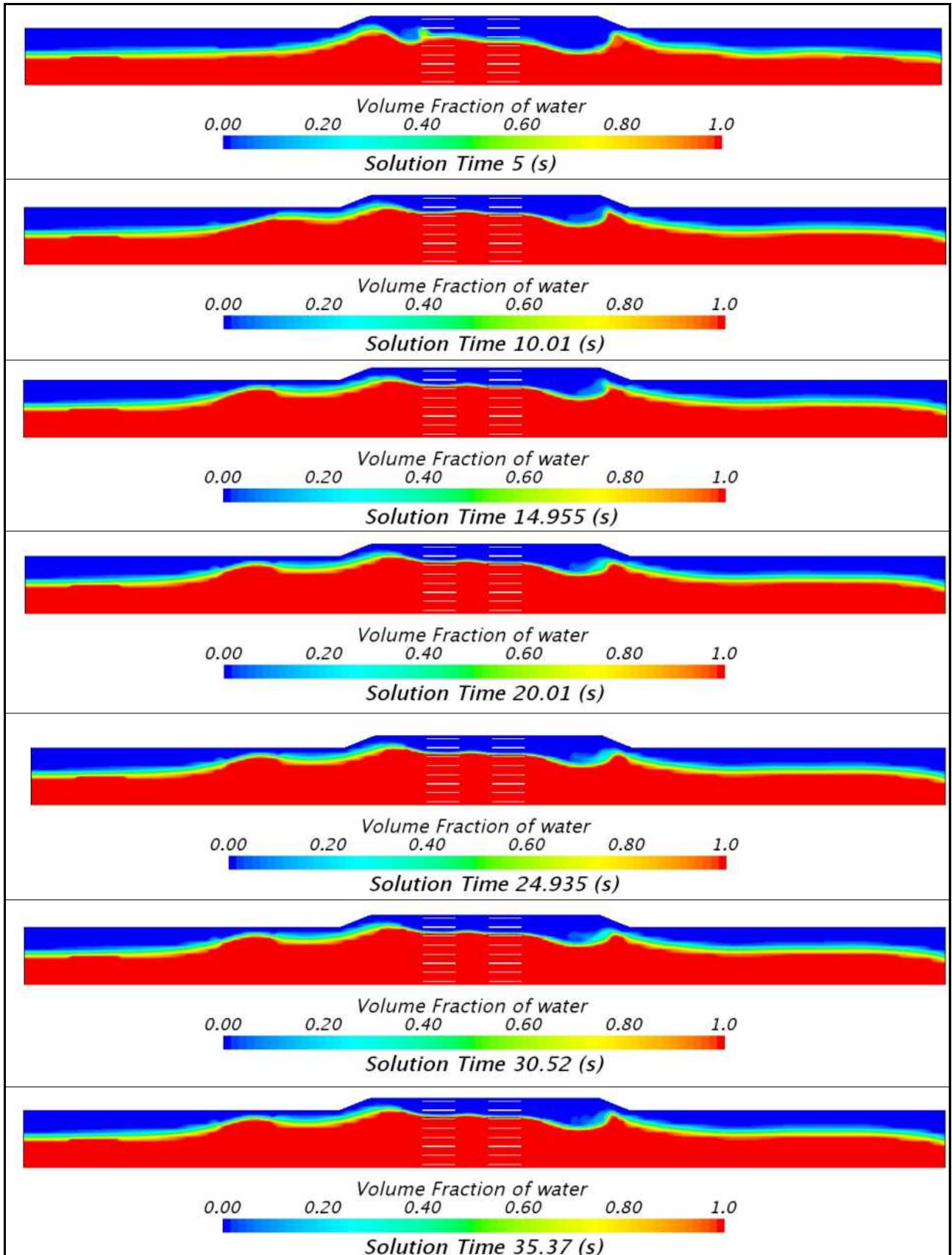
(4) CFD 해석 결과

[표 17] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-0.6m/s)



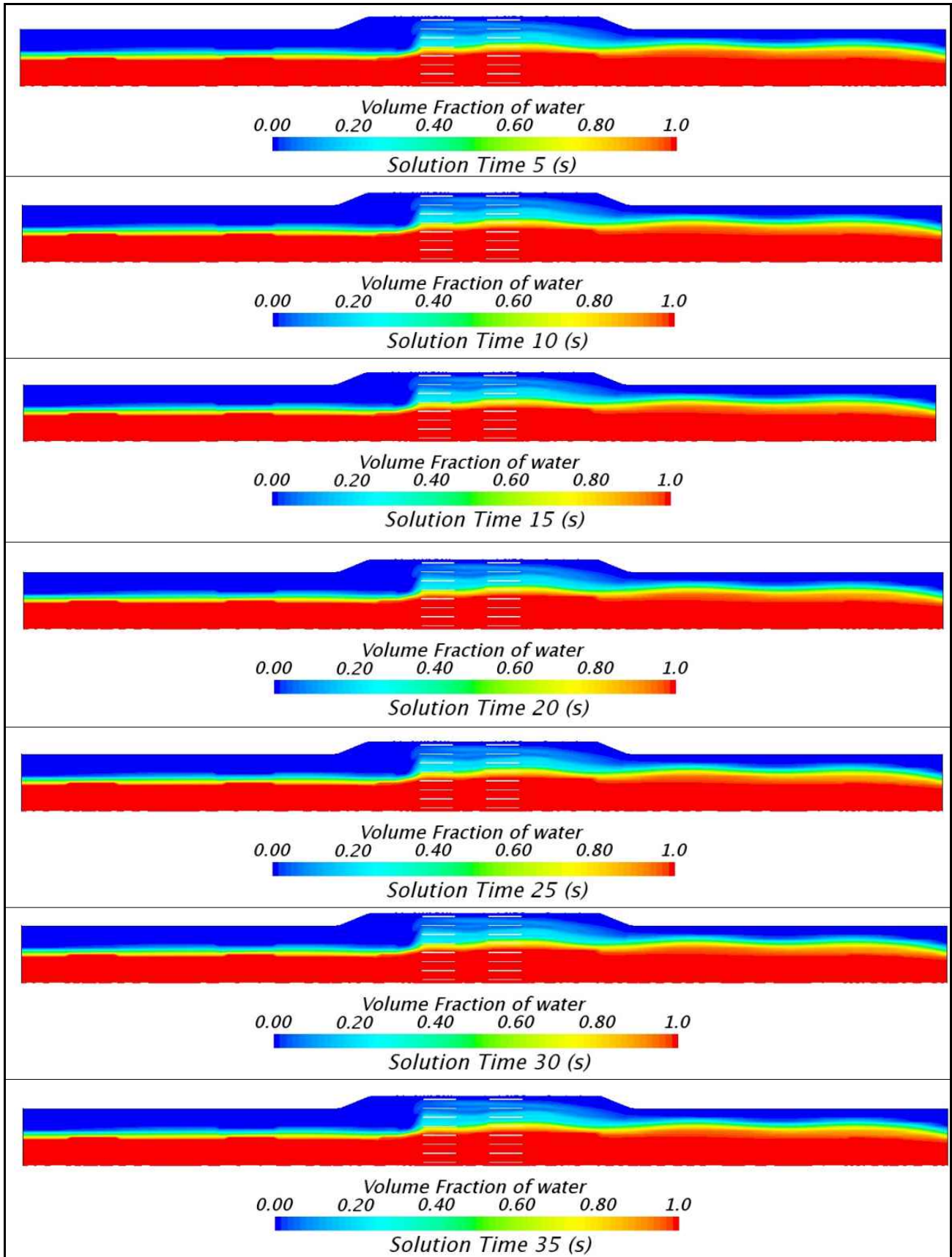
다층형 도파관 배열을 4층으로 설치한 배수관의 경우 관경이 100mm이고 입구의 유속이 0.6m/s로 유입되면 도파관배열에서 다소 하수 수위가 상승하는 것으로 나타났지만 전반적으로 배수의 흐름이 원활하게 이루어지는 것으로 나타났다.

[표 18] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-1.0m/s)



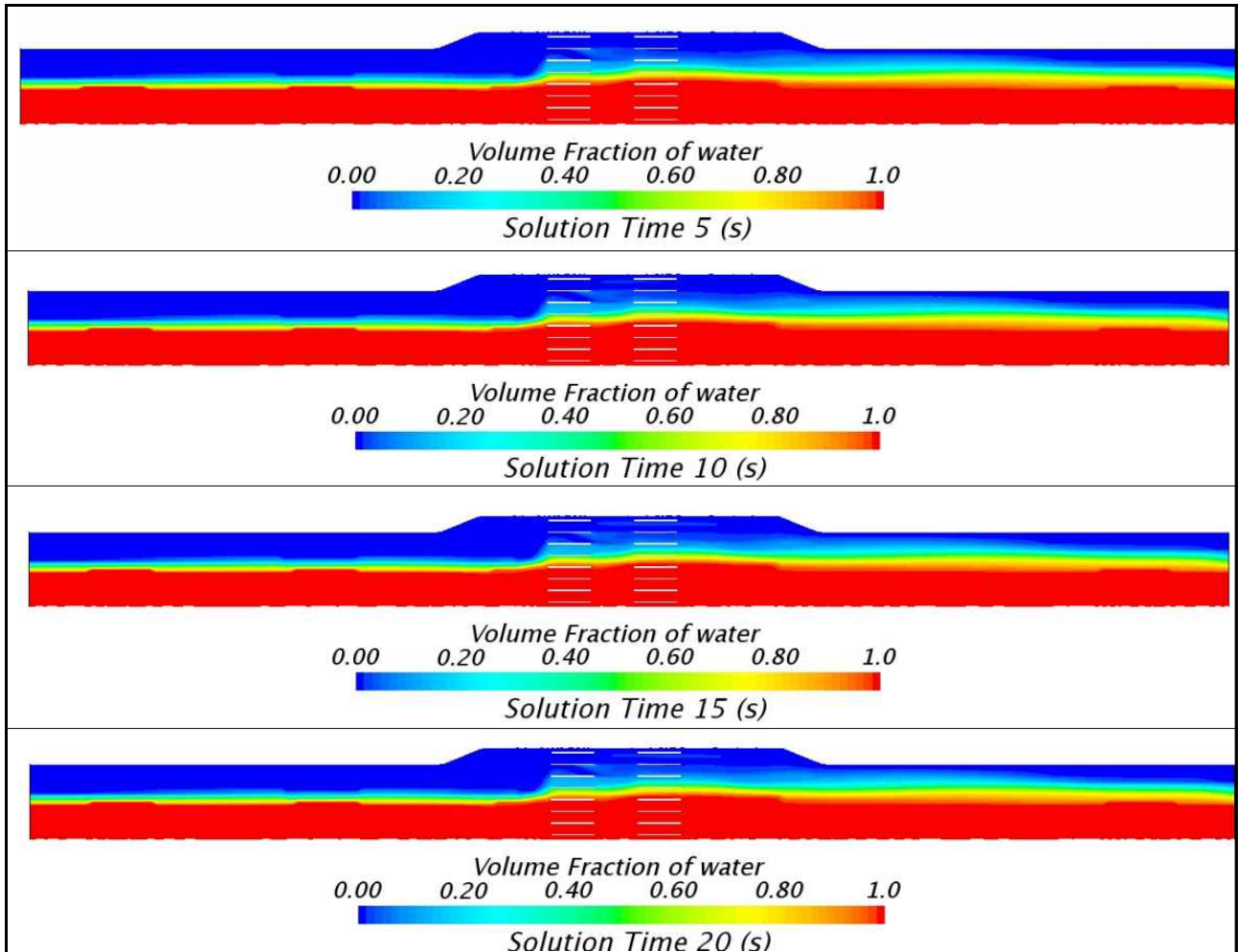
배수관의 관경이 100mm이고 입구의 유속이 1.0m/s로 유입되면 도파관배열에서 입구의 유속이 0.6m/s인 경우에 비해 다소 하수 수위가 상승하고, 도파관 배열의 전면부에서는 수위가 상승하여 원활한 배수의 흐름이 일어나지 않는 것으로 나타났다.

[표 19] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-1.5m/s)



배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 하수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열에서는 약간의 수위상승은 있으나 1.0m/s인 경우와는 다르게 전반적으로 원활한 흐름을 보이는 것으로 나타났다.

[표 20] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-2.0m/s)

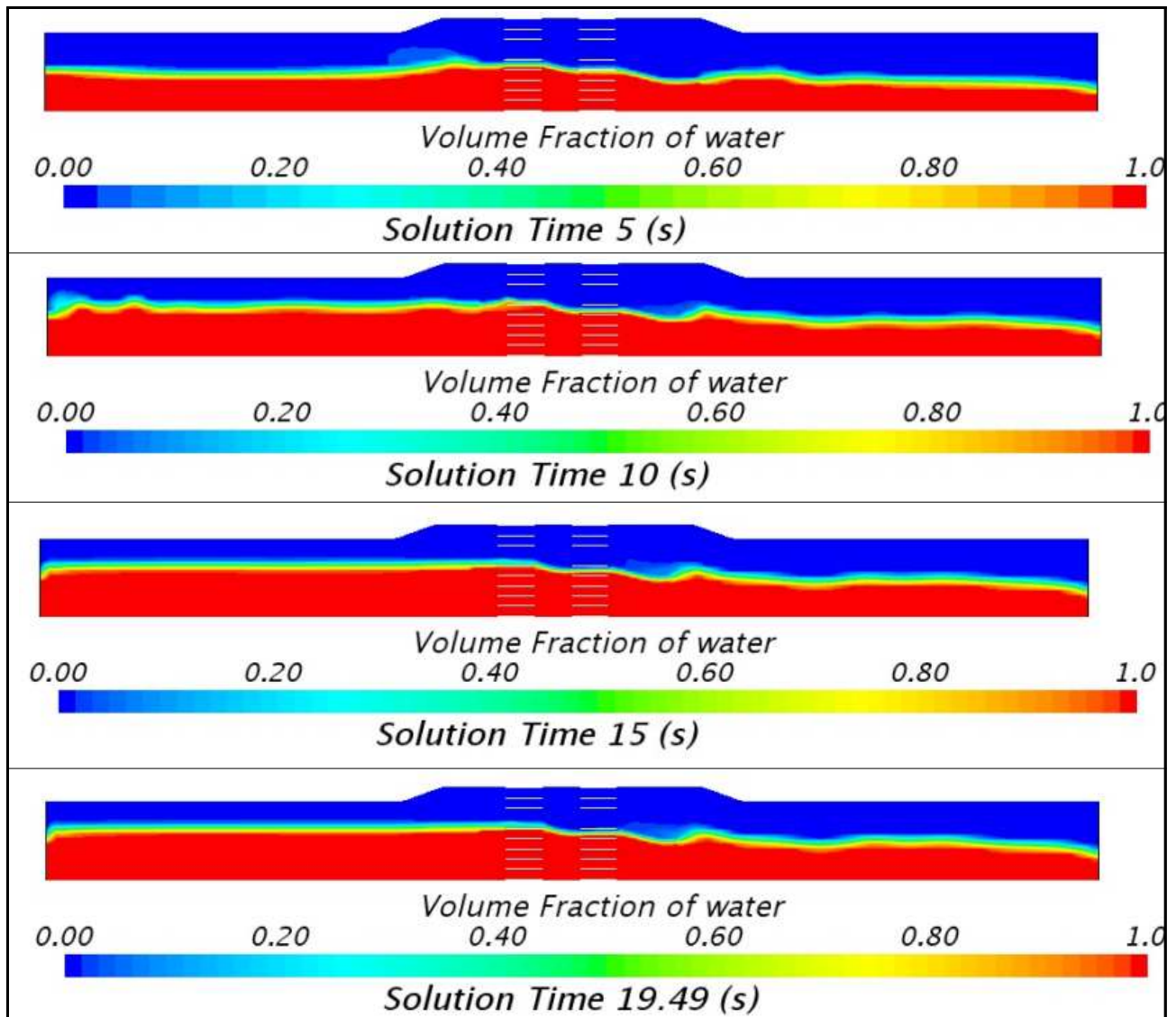


배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 하수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열에서는 약간의 수위상승은 있으나 도파관 배열의 전면부인 하수 유입구 측에서는 수위의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

따라서 하수관이 100mm인 경우에는 입구의 유속이 하수관의 최저 유속인 0.5m/s에 가깝게 느린 속도로 유입되면 하수관내에서의 수위 상승은 없으나 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열의 전면부에서 하수가 역류하여 유입구 측에서 하수 수면이 상승하는 것을 알 수 있다.

또한 하수의 유속이 1.5, 2.0m/s가 되면 유입구 측에서는 하수 수위의 상승이 없는 것으로 나타나 배수관이 100mm인 경우에는 하수의 유입 속도를 빠르게 하는 것이 도파관 배열에의 한 하수 흐름의 방해현상이 일어나지 않는 것으로 판단된다. 이러한 현상을 고려하면 하수관의 기울기를 1/100 이상으로 구배를 선정하여 하수의 흐름을 빠르게 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

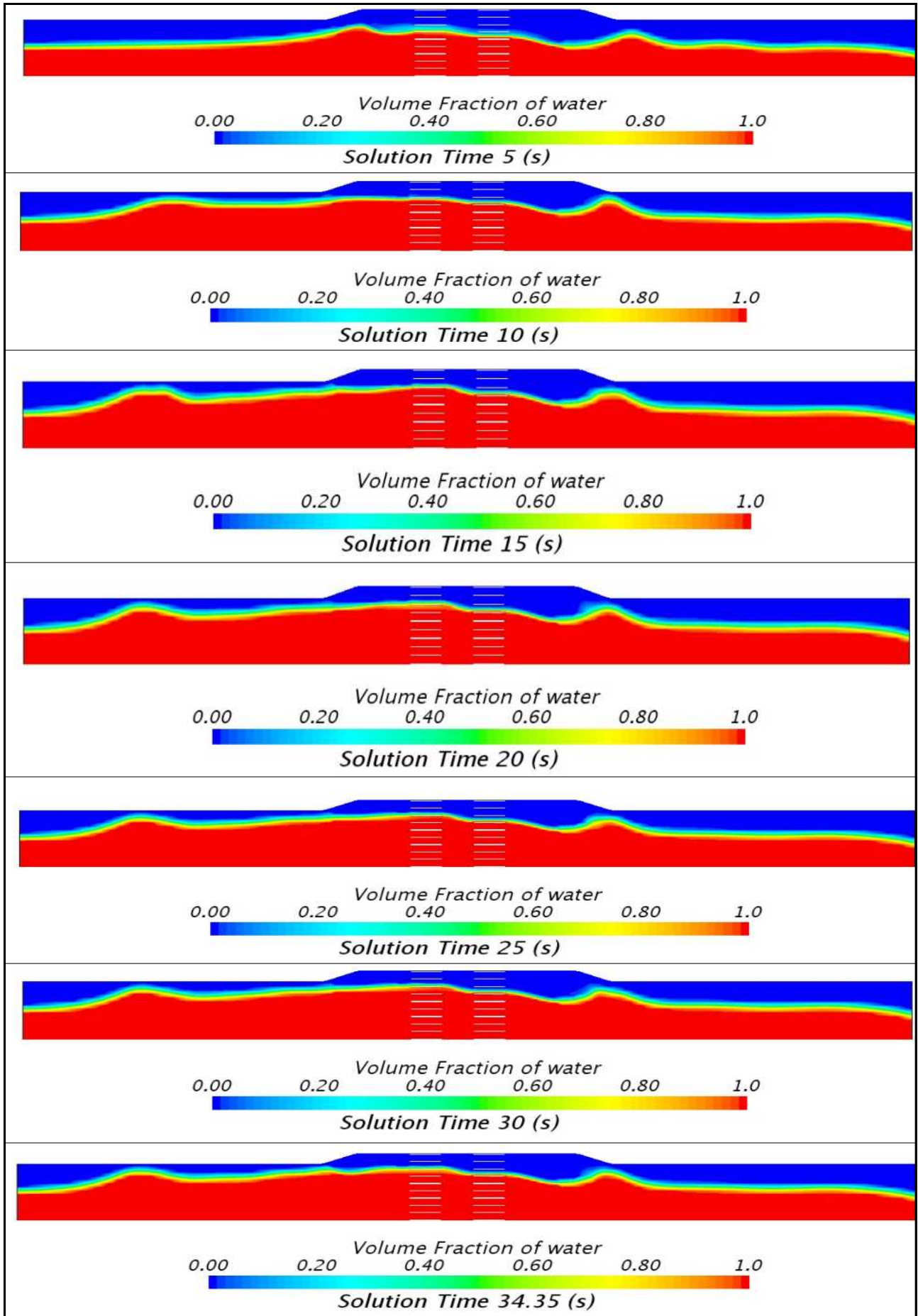
[표 21] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-0.6m/s)



배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 하수의 유속이 0.5m/s로 유입되면 5초 정도 시간이 흐르게 되면 도파관 배열의 전면부에서 수위가 상승하고 상승된 하수의 수위는 시간이 경과함에 따라도 지속적으로 유지되는 것으로 나타났다.

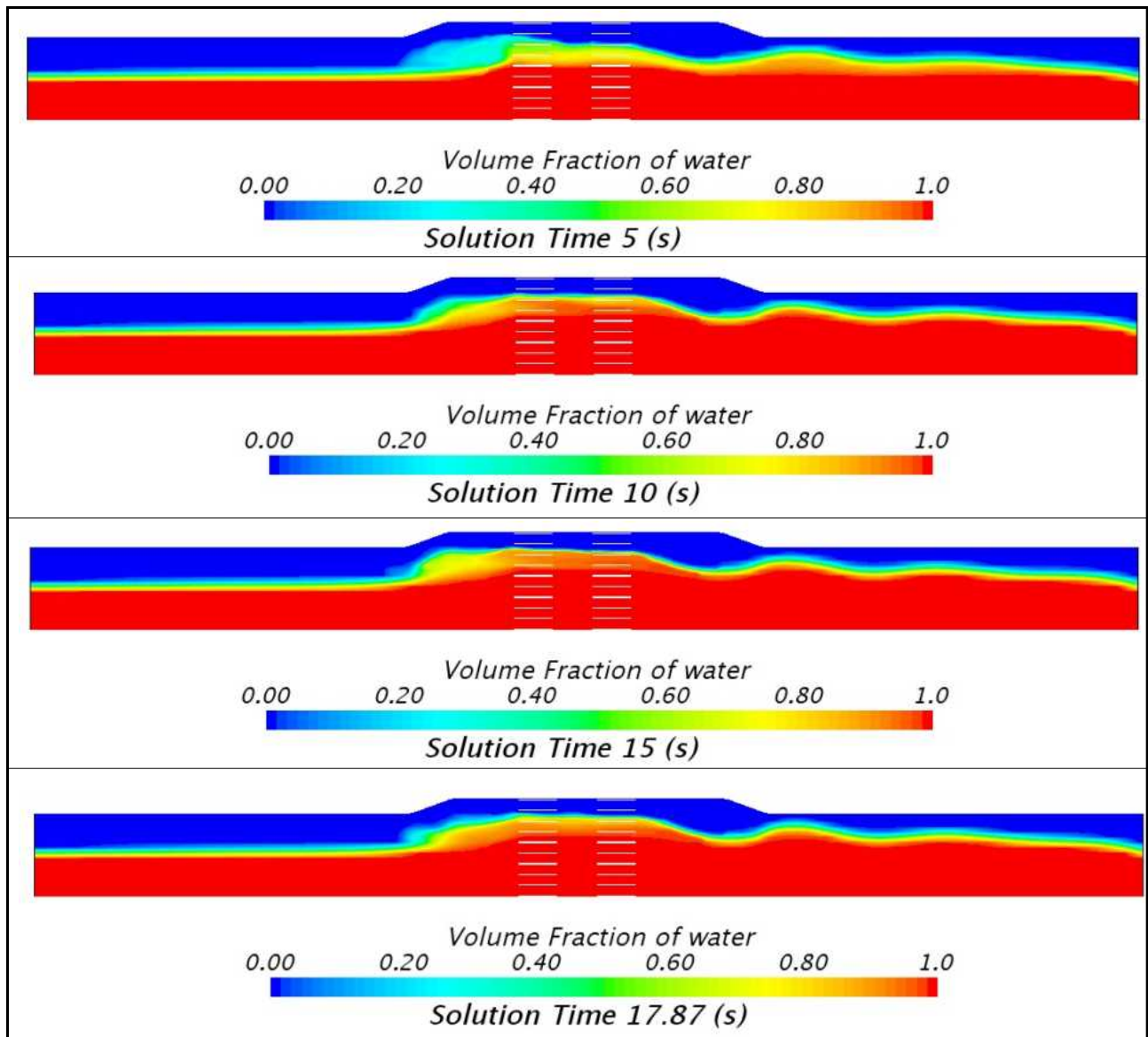
이는 하수의 흐름이 느리기 때문에 도파관 배열의 격벽에 의한 흐름의 저항이 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

[표 22] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-1.0m/s)



배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 하수가 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열에 의해서 유입구 측에서 배수관 내에서 전반적으로 수위가 상승하고 일부분 만수가 되는 것으로 나타났다.

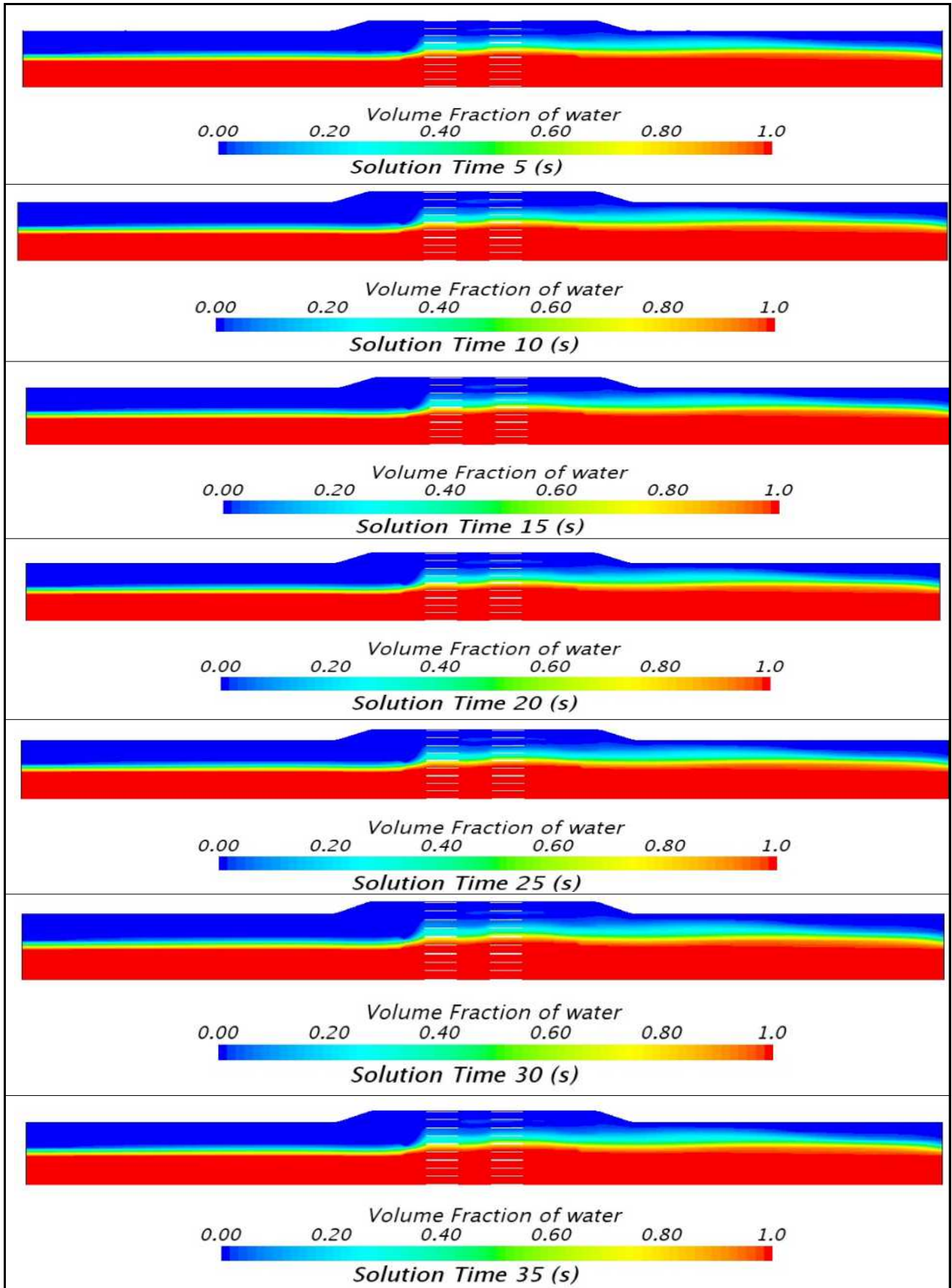
[표 23] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-1.5m/s)



배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 하수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 하수의 수위가 상승하며 도파관 배열의 후면에서도 하수의 수위가 상승하는 것으로 나타났지만 하수의 유입구 부분에서는 하수 수위의 상승은 일어나지 않았다.

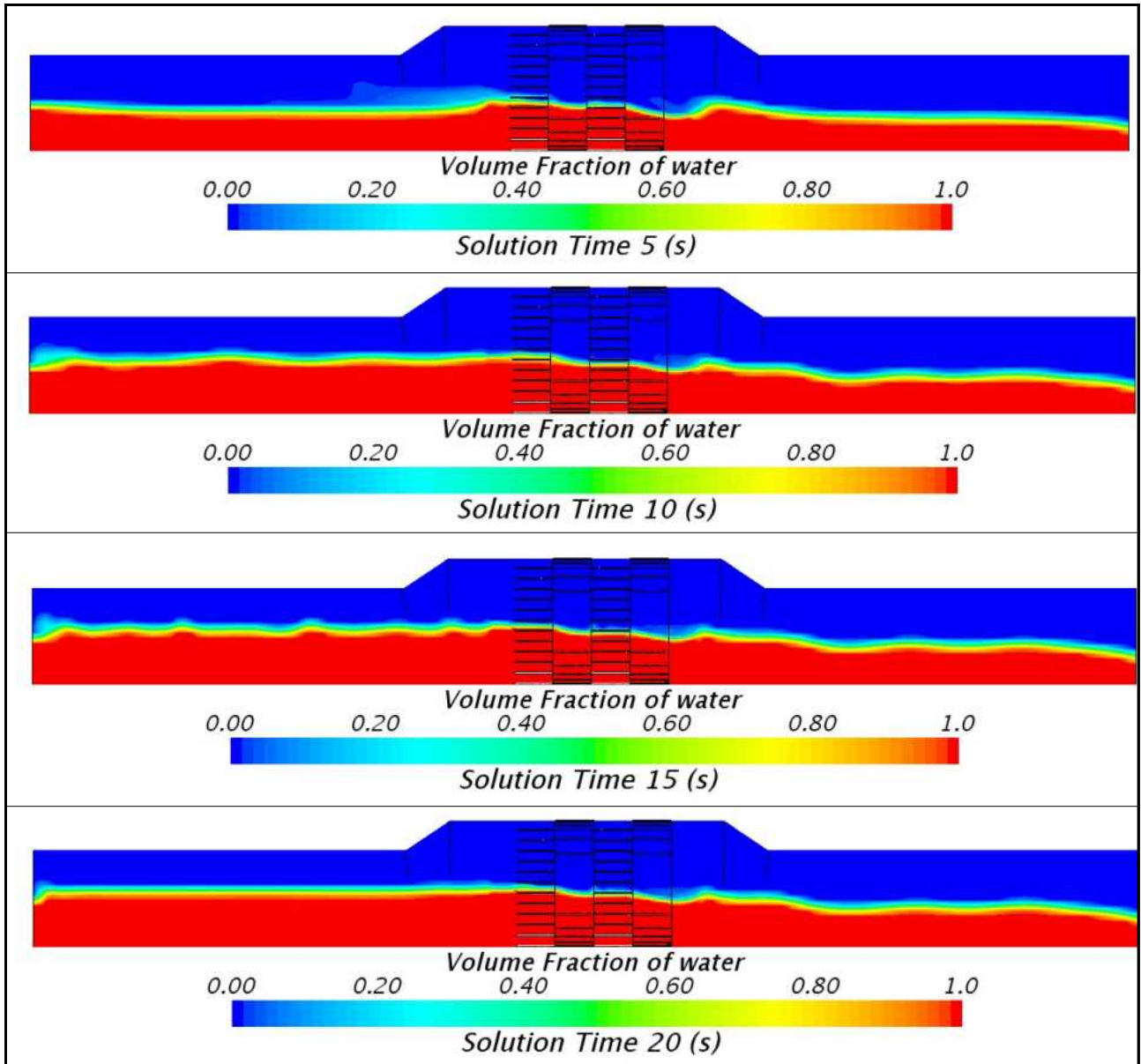
이는 빠른 속도로 유입되는 하수가 도파관 배열의 격벽에 의해 역류하지만 역류된 하수는 빠른 속도로 새로이 유입되는 하수와 함께 도파관 배열을 통과하기 때문인 것으로 판단된다.

[표 24] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-2.0m/s)



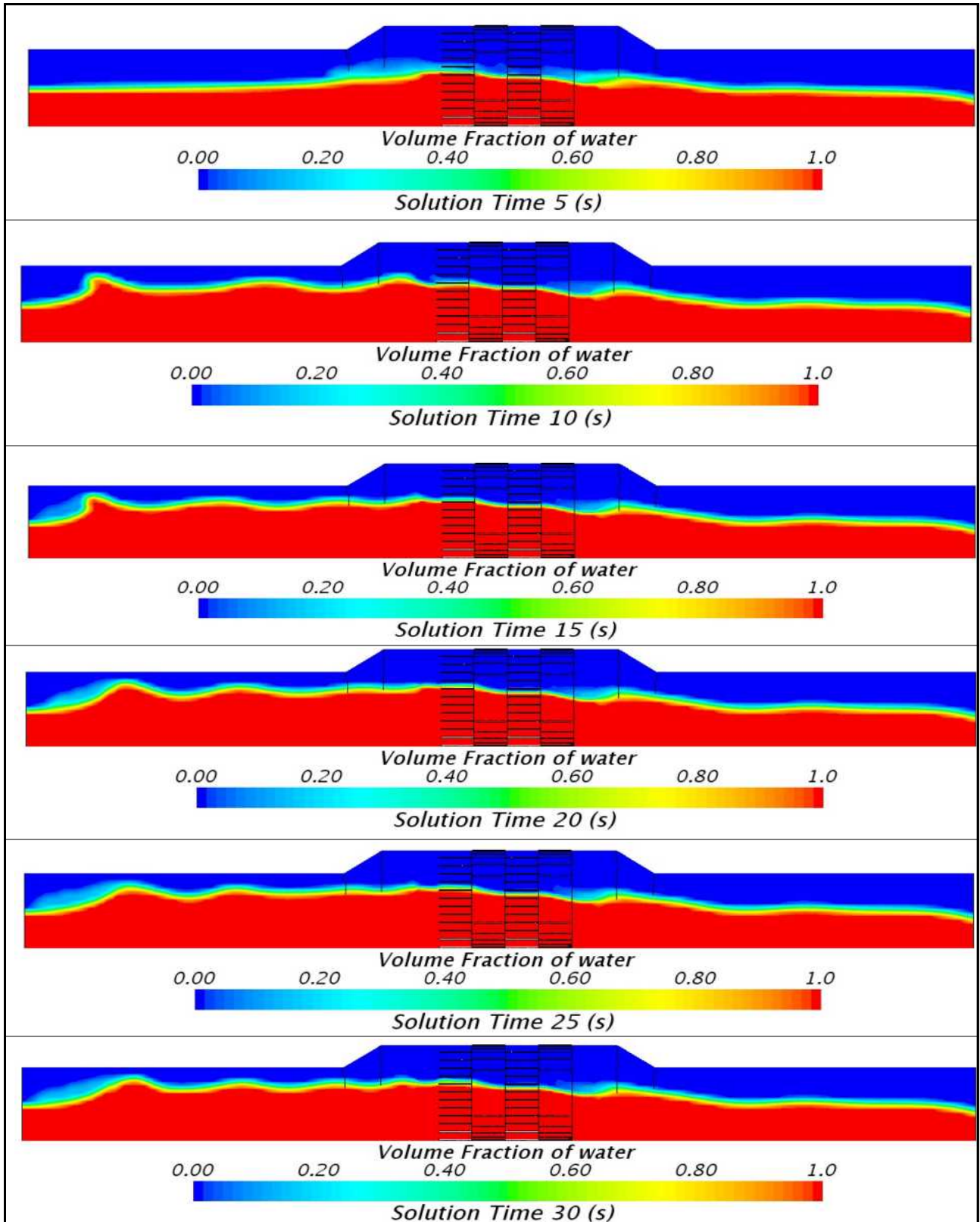
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 하수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 하수의 수위가 상승하며 도파관 배열의 후면에서도 하수의 수위가 상승하는 것으로 나타났지만 하수의 유입구 부분에서는 하수 수위의 상승은 일어나지 않았다. 하수의 유입속도가 빠를 수록 도파관 배열에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

[표 25] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-0.6m/s)



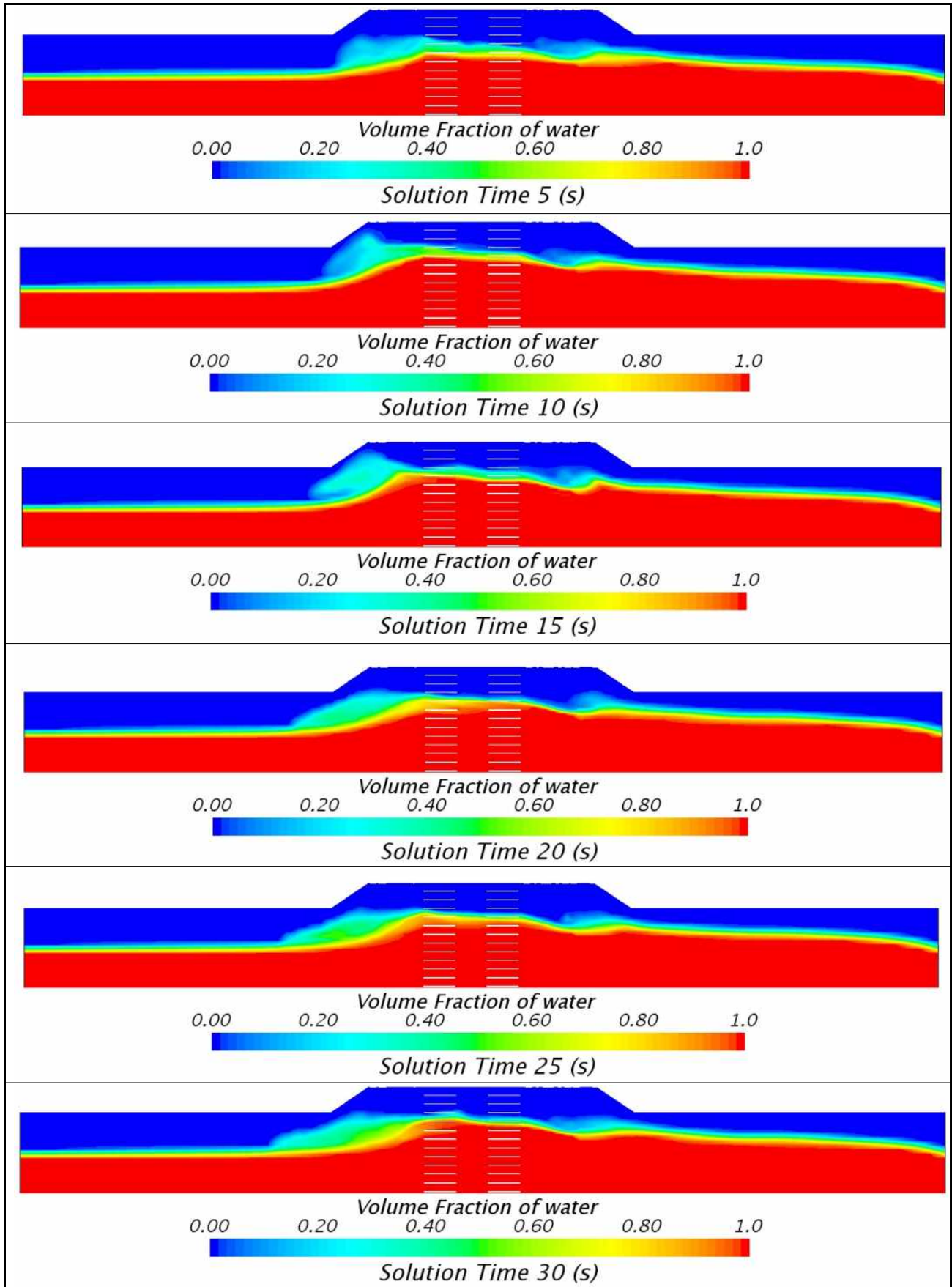
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 하수가 0.6m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 하수의 수위가 상승하며 이에 따른 영향으로 하수가 유입되는 부분까지 역류하여 도파관의 입구 측의 배수관 내의 수면이 상승하는 것으로 나타났다. 이는 느리게 유입된 배수가 도파관 배열의 격벽에 의해 흐름을 방해 받기 때문인 것으로 판단된다.

[표 26] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-1.0m/s)



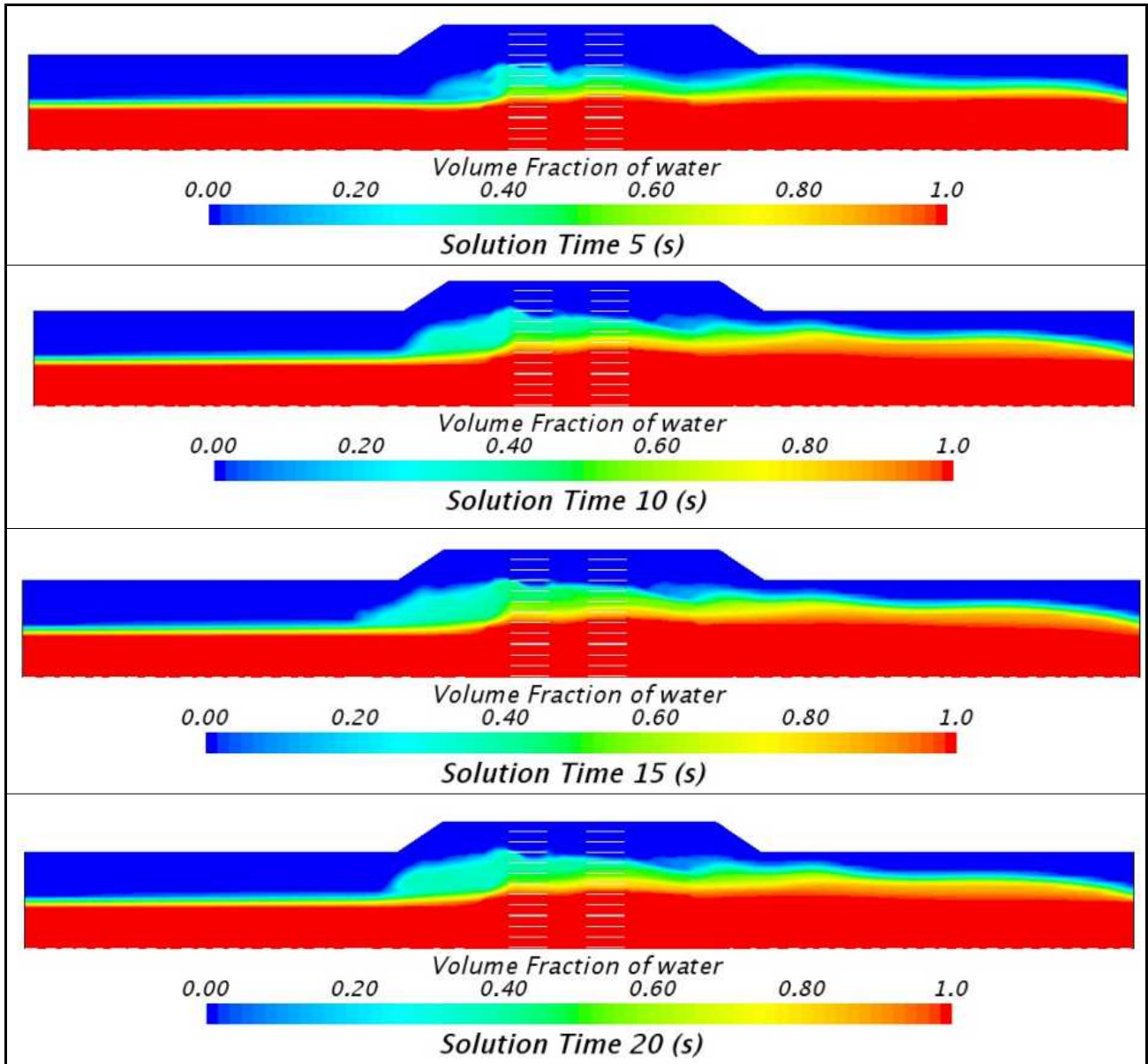
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 하수가 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 하수의 수위가 급격하게 상승하며 하수의 유입구 부분에서도 배수의 수위가 급격하게 상승하는 것으로 나타났다.

[표 27] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-1.5m/s)



배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 배수가 역류하여 수위가 상승하지만 입구측에서 빠른 속도로 유입되는 배수와 함께 도파관 배열을 통과하는 것으로 나타났다.

[표 28] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-2.5m/s)

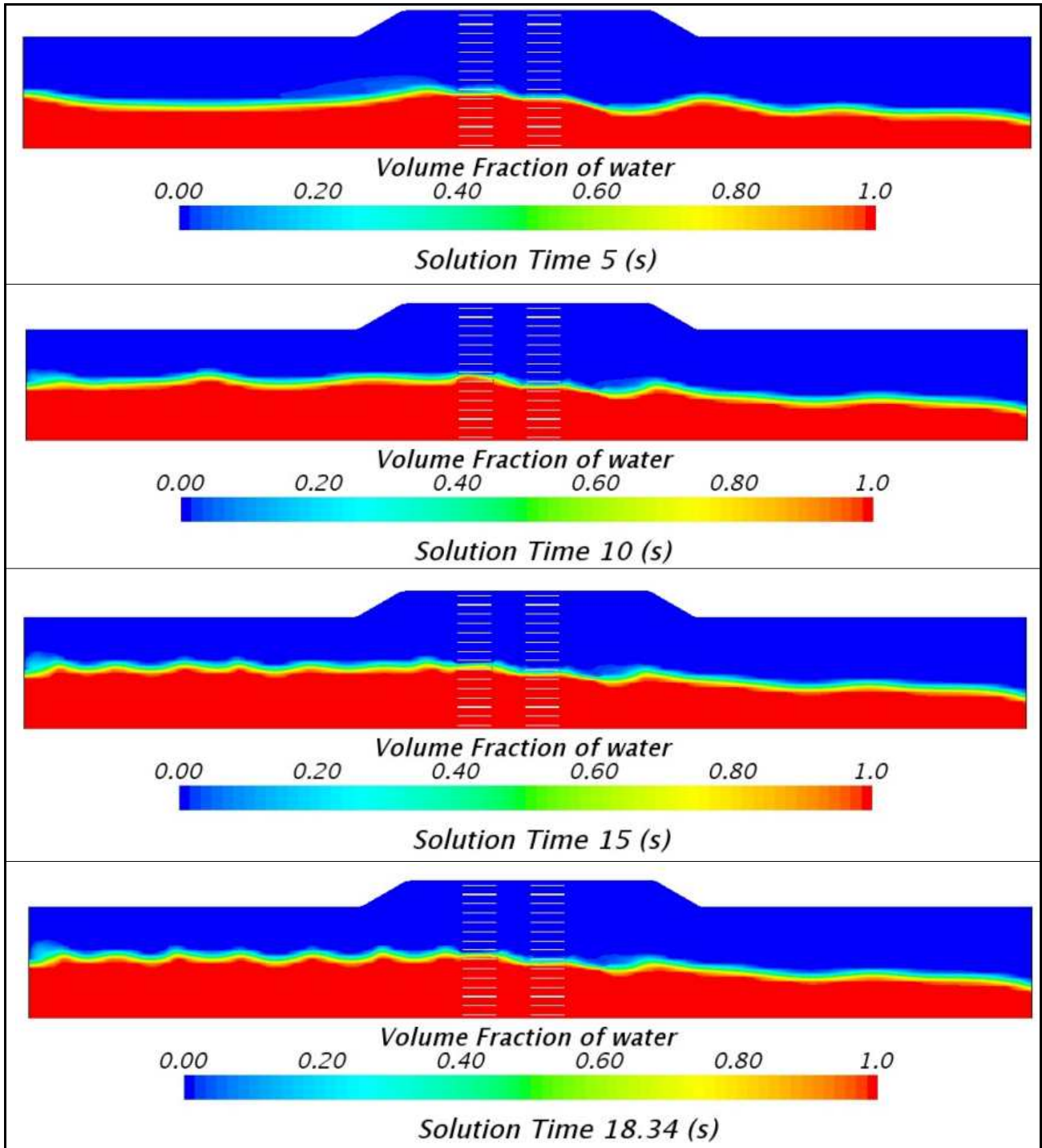


배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 배수가 역류하여 수위가 상승하지만 입구 측에서 빠른 속도로 유입되는 배수와 함께 도파관 배열을 통과하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 100mm의 배수관과 동일한 것으로 도파관 배열에 의해 역류되는 배수는 속도가 느리기 때문에 입구 측에서 빠른 속도로 유입되는 배수의 영향으로 역류된 배수가 도파관 배열을 통과하기 때문인 것으로 판단된다.

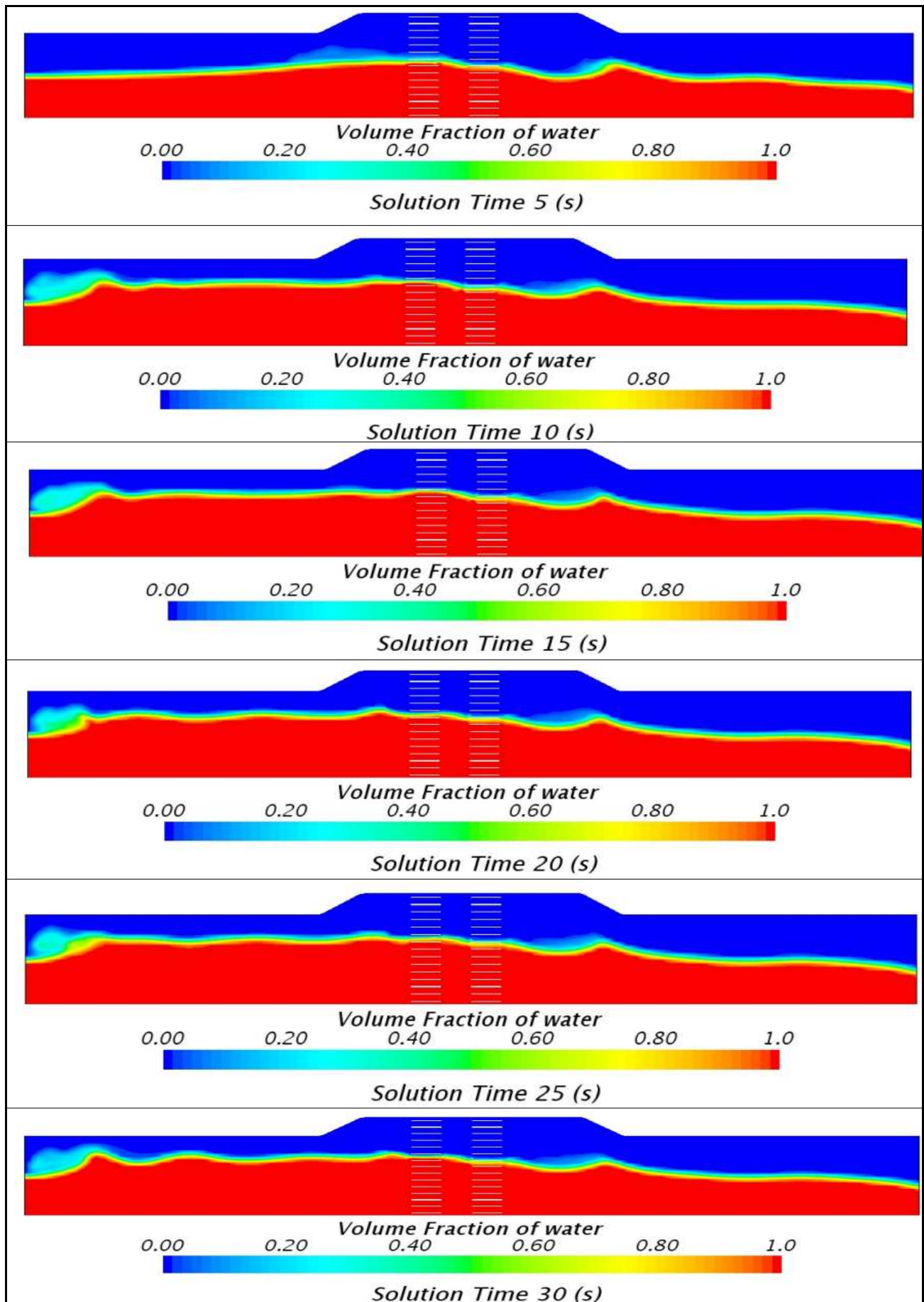
또한 도파관 배열의 후면에서도 수위의 상승이 일어나게 되는데 이러한 수위의 상승은 도파관 배열의 길이와 유사한 부위까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

[표 29] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-0.6m/s)



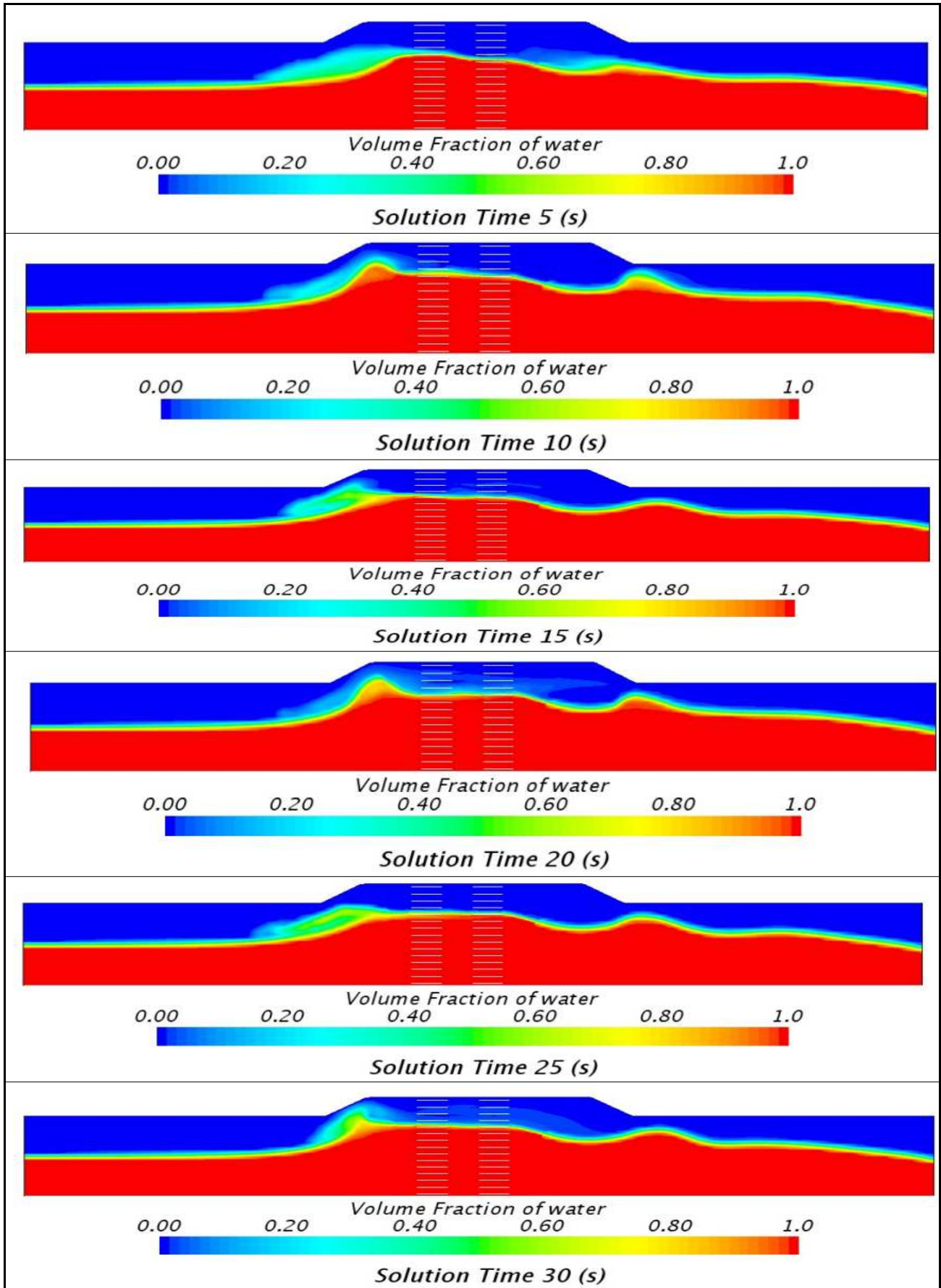
배수관의 관경이 200mm이고 유입되는 배수의 속도가 0.6m/s인 경우에는 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수는 느린 배수 속도의 영향으로 유입구에 가까운 부분까지 배수 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다. 배수관에 설치된 도파관 배열의 후면부에서는 배수의 수위가 1/2 이하로 되어 전반적으로 배수관의 수위가 상승되는 것을 확인할 수 있다.

[표 30] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-1.0m/s)



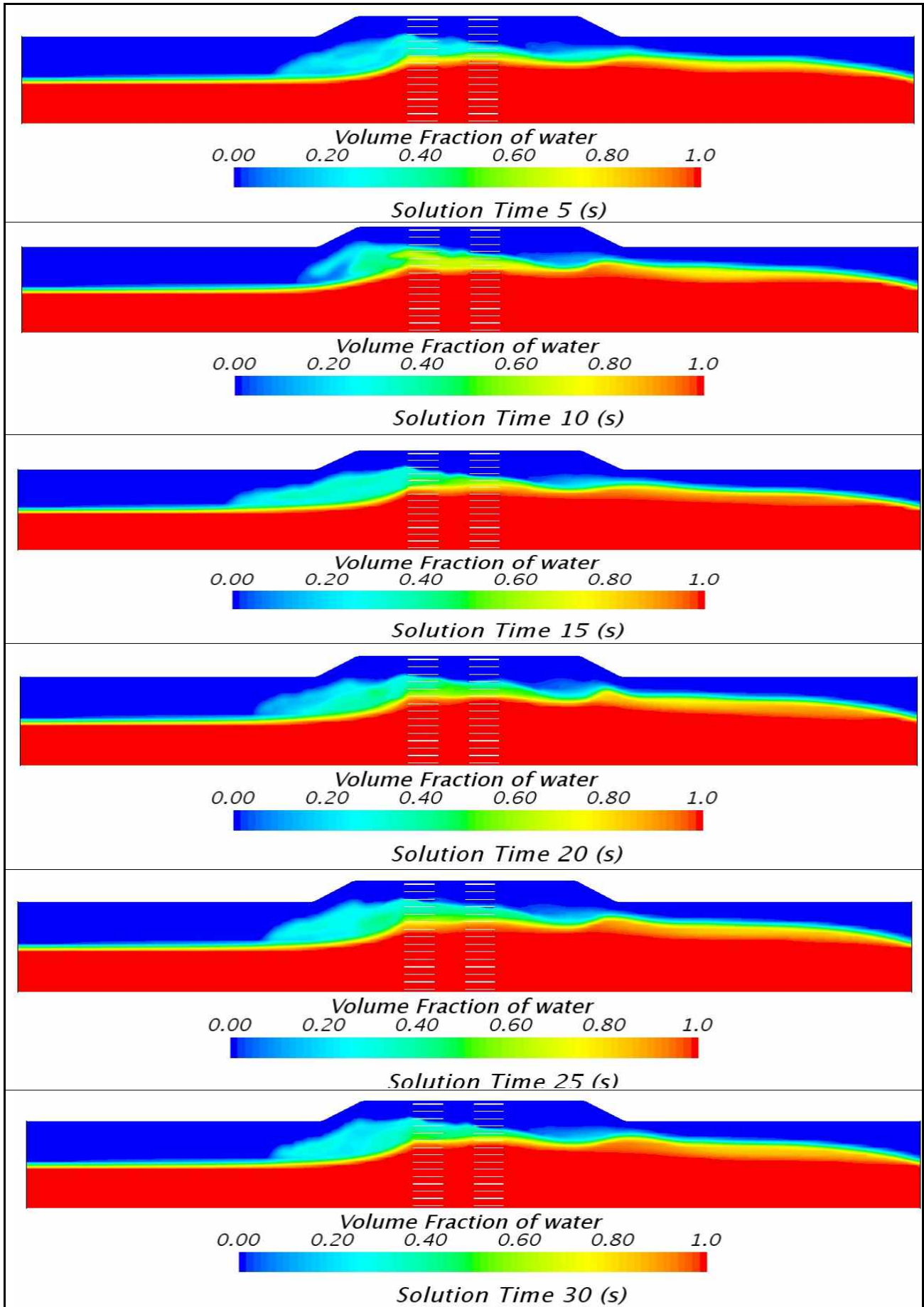
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 배수가 역류하여 수위가 상승하고 입구 측에서도 빠른 속도로 배수의 수위가 상승하는 것을 알 수 있다.

[표 31] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-1.5m/s)



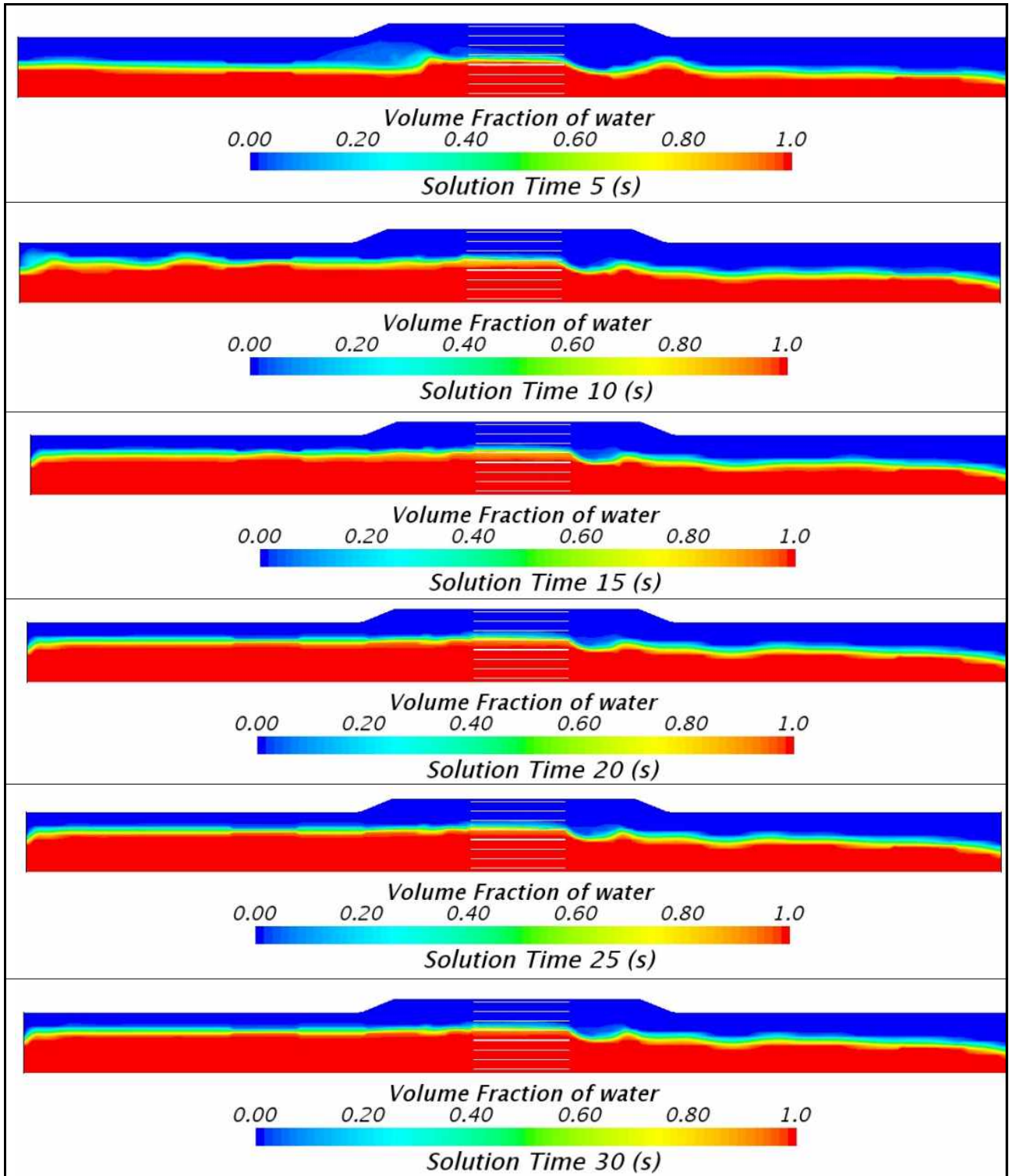
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 배수가 역류하여 수위가 상승하지만 입구부분에서의 수위상승은 일어나지 않는 것으로 나타났다.

[표 32] Multi-Layer Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-2.0m/s)



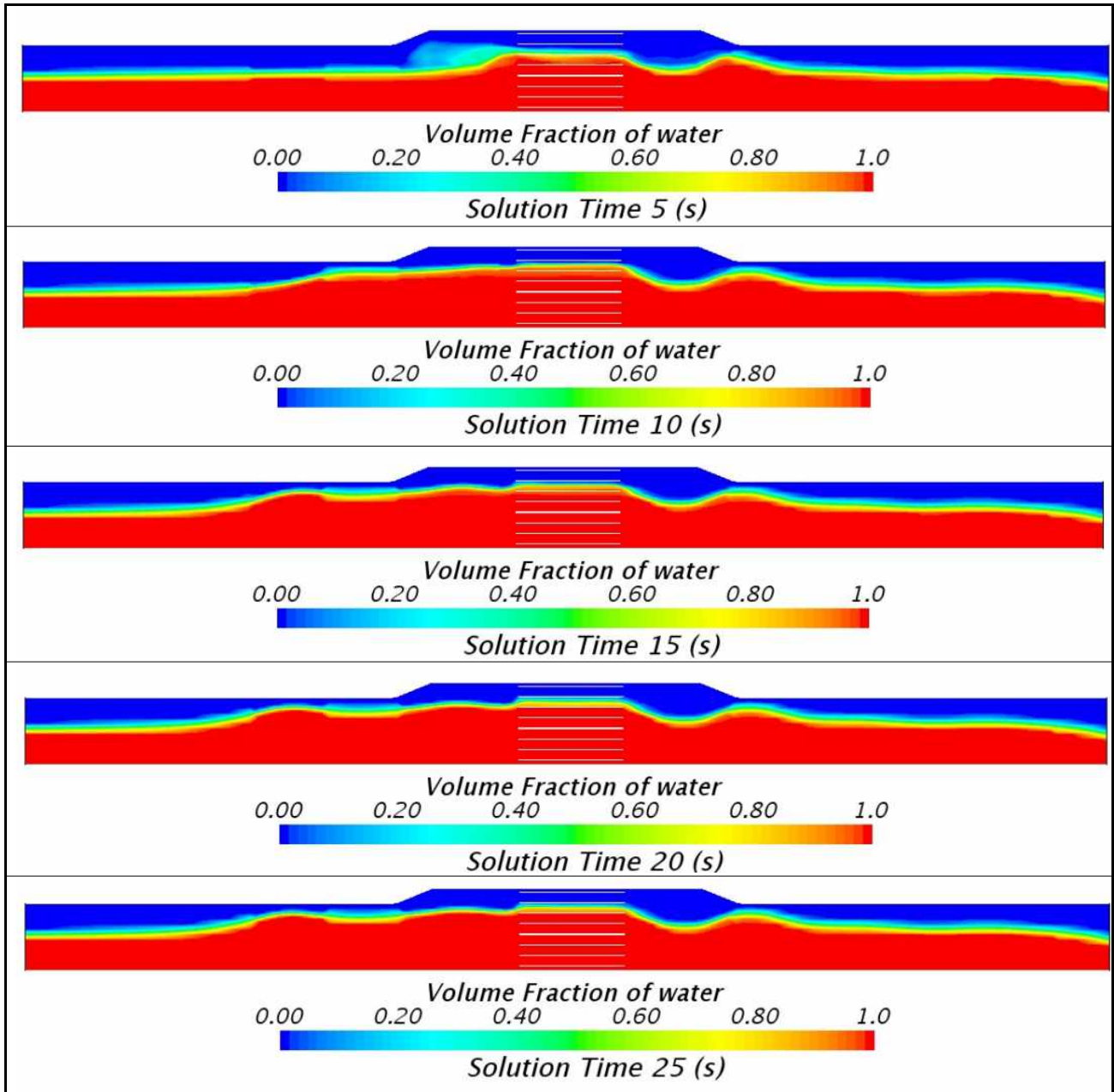
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 배수가 역류하여 수위가 상승하지만 입구부분에서의 수위상승은 일어나지 않는 것으로 나타났다.

[표 33] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-0.6m/s)



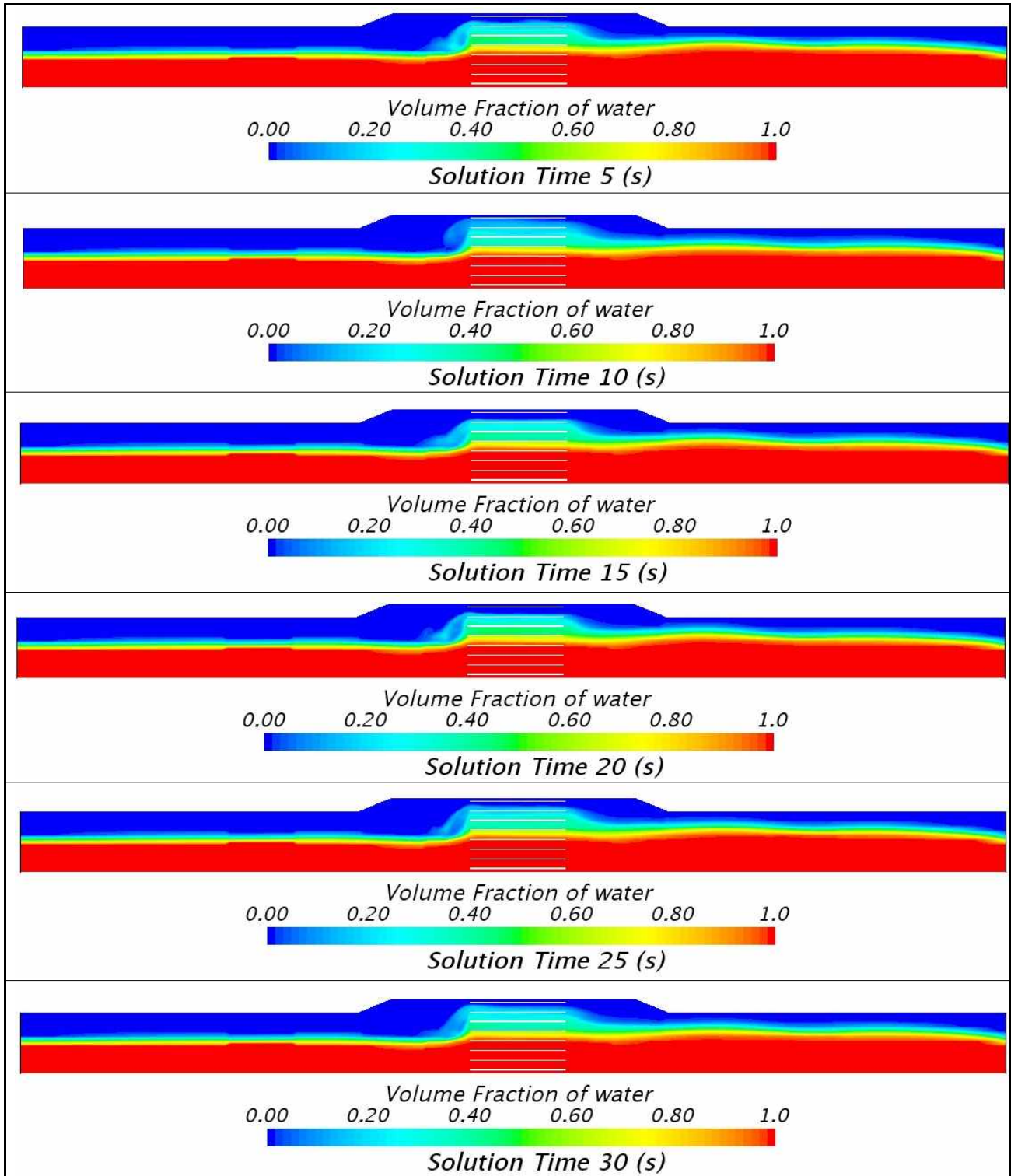
배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 배수가 역류하여 수위가 상승하고 느린 속도로 유입되는 배수와 도파관의 격벽에 의해 역류된 배수가 함께 작용하여 도파관 전면부의 배수관에서는 배수 수위의 상승이 일어나고 도파관 후면부에서는 유입되는 배수의 양이 줄어들어 전체관경의 1/2 이하의 수위가 유지되는 것을 알 수 있다.

[표 34] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-1.0m/s)



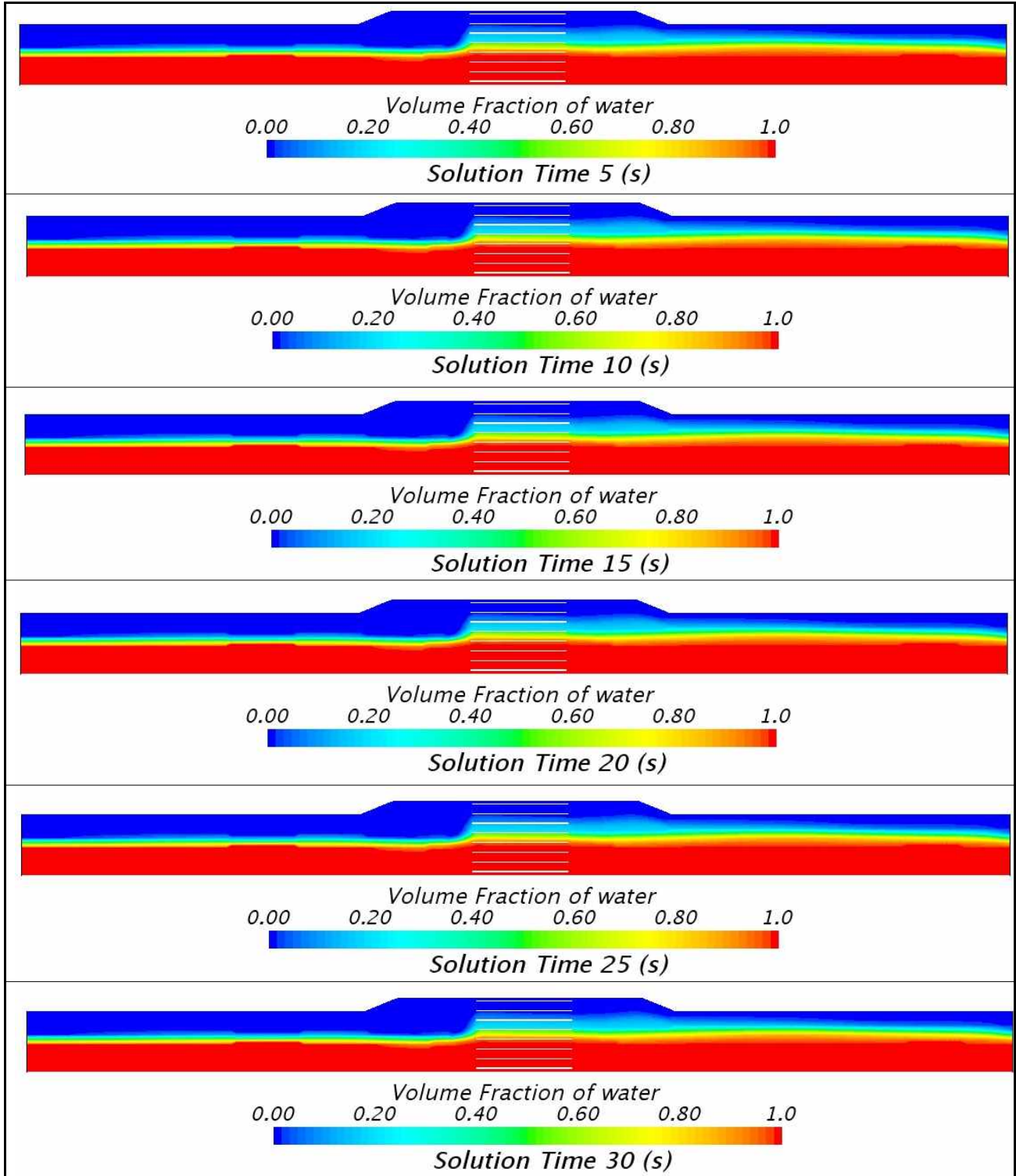
배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 배수가 역류하여 수위가 상승하고 유입되는 배수와 도파관의 격벽에 의해 역류된 배수가 함께 작용하여 도파관 전면부의 배수관에서는 배수 수위의 상승이 일어나고 도파관 후면부에서도 배수의 수위가 상승하는 것을 알 수 있다.

[표 35] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-1.5m/s)



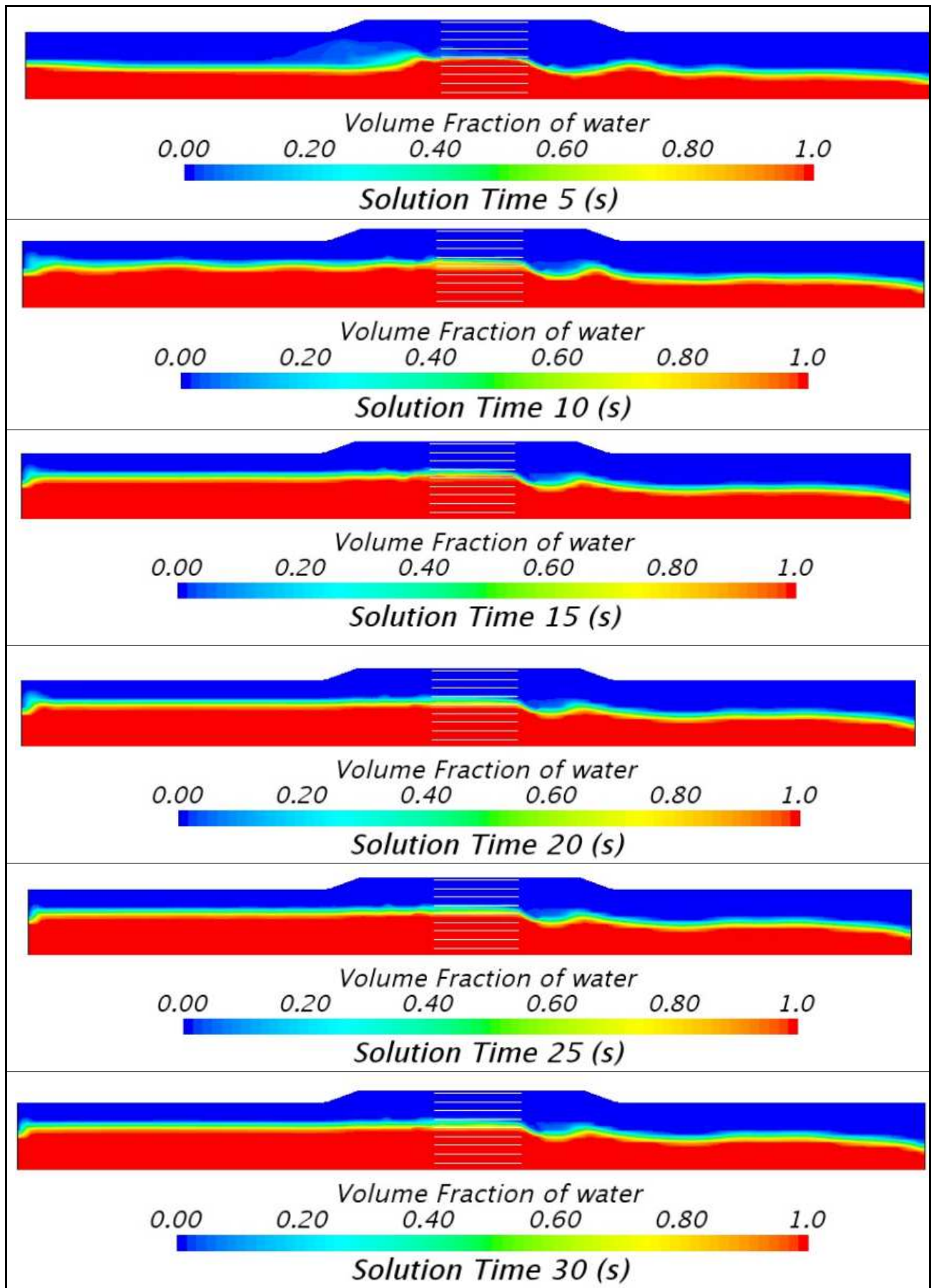
배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 도파관 배열의 격벽에 의해 수위가 상승하고 상승된 수위의 영향으로 도파관 배열의 후면부에서도 전반적으로 배수관의 1/2 이상의 수위를 보이는 것으로 나타났다. 또한 도파관 배열이 설치된 배관의 확대부에서도 전체의 100% 가까이 수위가 상승하는 것을 알 수 있다.

[표 36] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-2.0m/s)



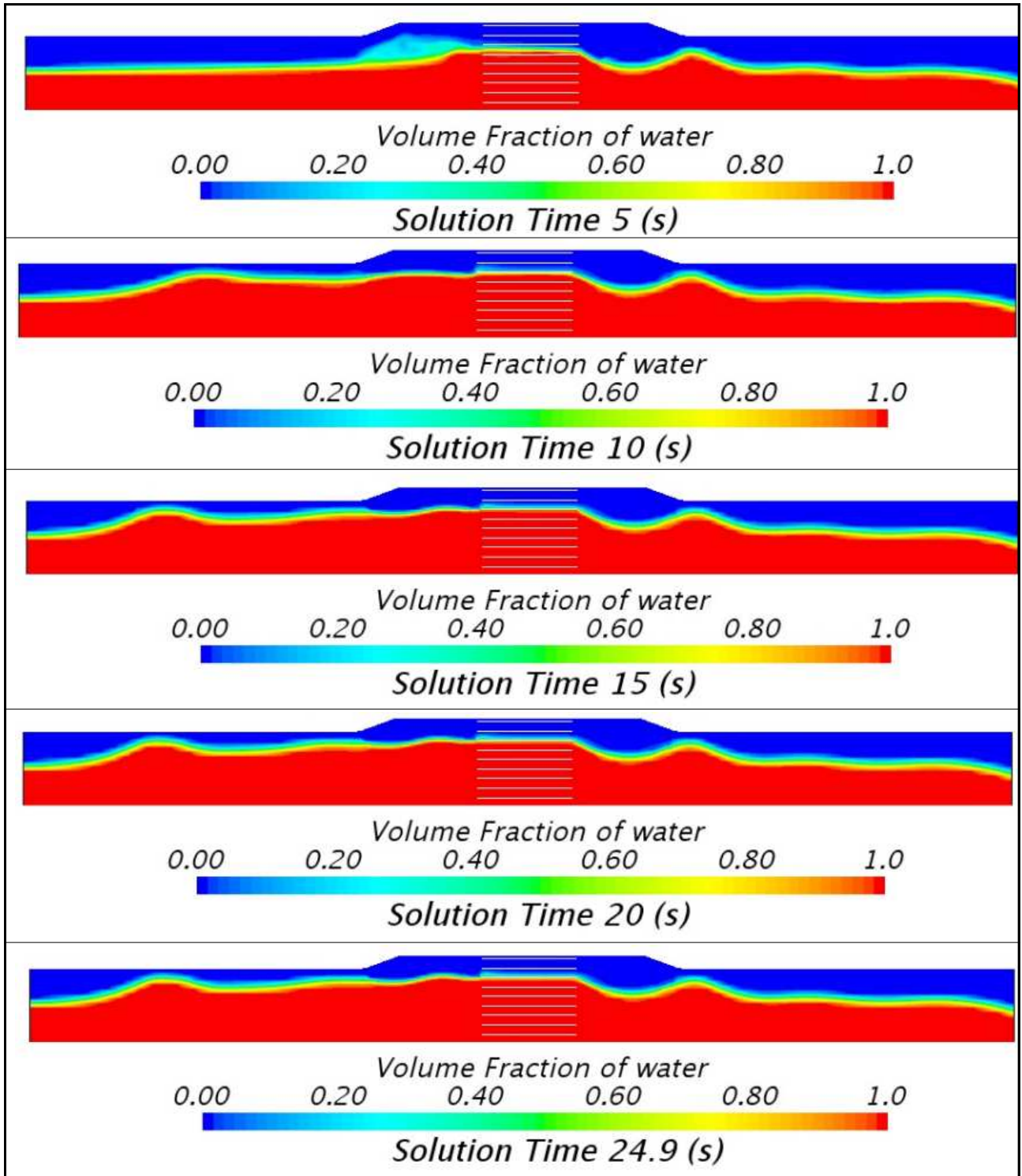
배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열이 위치한 부분에서는 도파관 배열의 격벽에 의해 수위가 상승하고 상승된 수위의 영향으로 도파관 배열의 후면부에서도 전반적으로 배수관의 1/2 이상의 수위를 보이는 것으로 나타났다. 또한 도파관 배열이 설치된 배관의 확대부에서도 전체의 80% 가까이 수위가 상승하는 것을 알 수 있다. 이러한 수위의 증가는 도파관 배열의 후면부에도 동일하게 유지되는 것을 알 수 있다.

[표 37] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-0.6m/s)



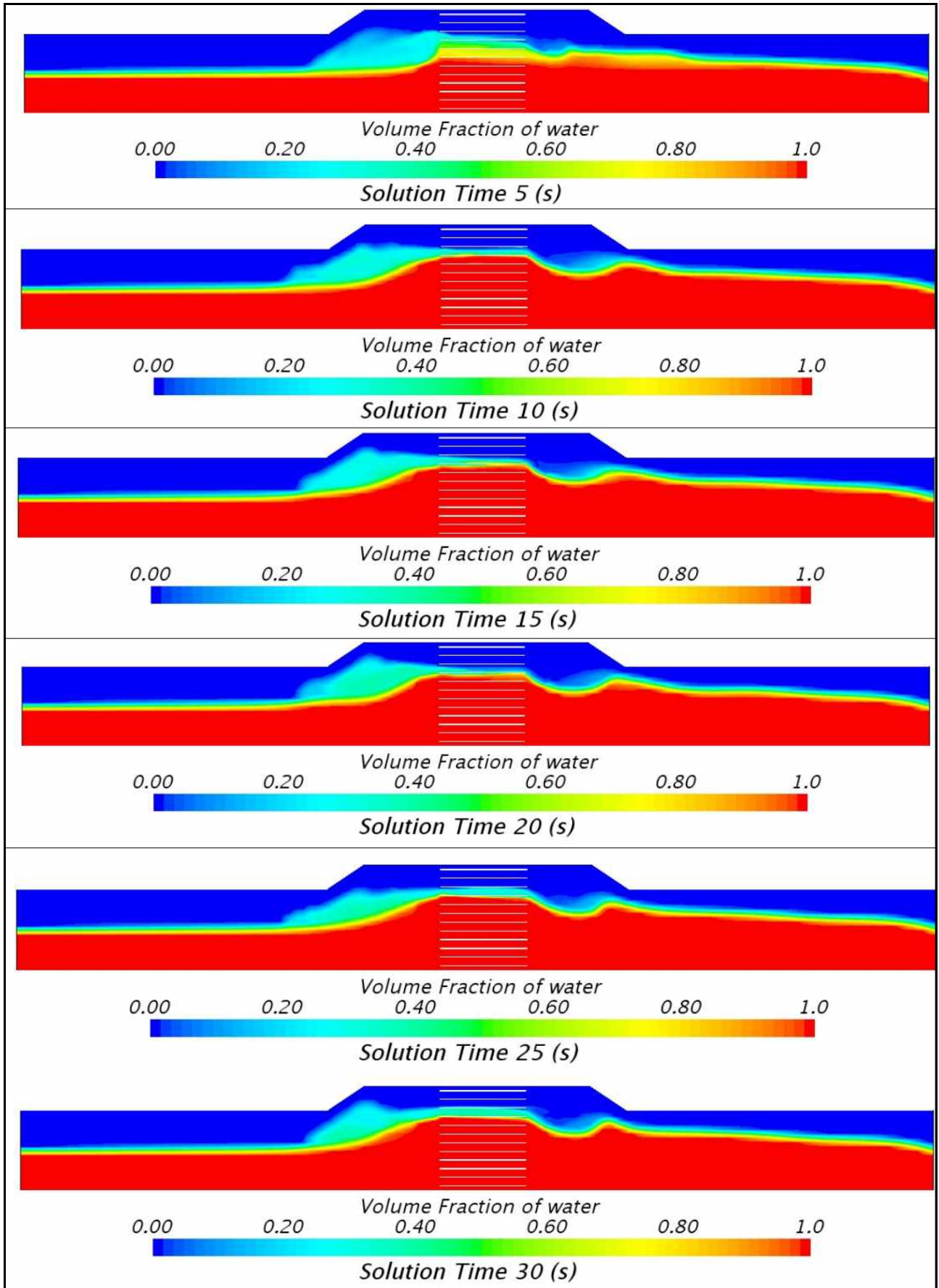
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입되면 도파관 배열과 유입배관 측 모두 수위의 상승이 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수와 유입되는 배수의 속도가 느리기 때문인 것으로 판단된다.

[표 38] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-1.0m/s)



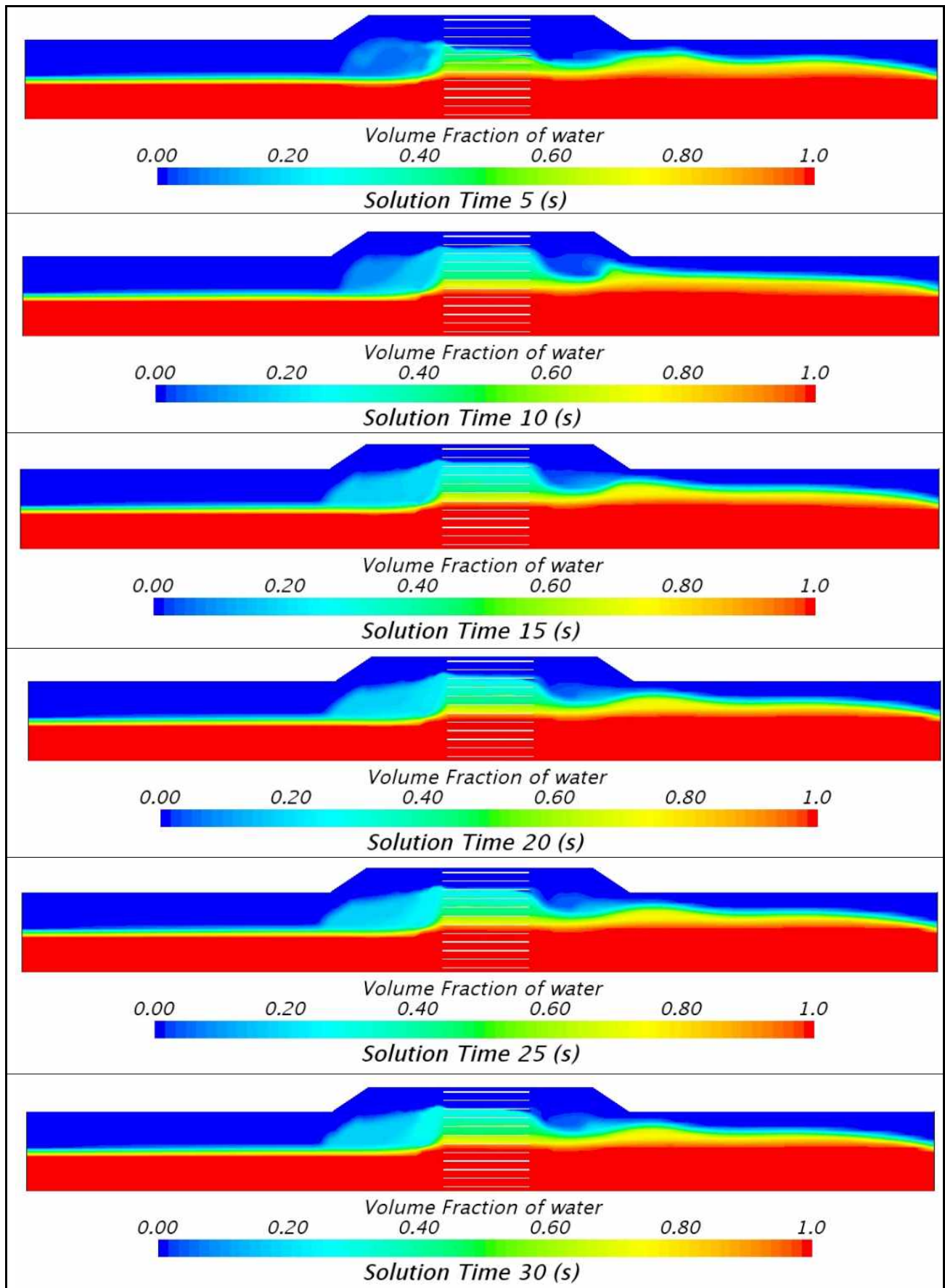
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열, 유입배관과 유출배관 모두 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다. 이는 도파관 배열의 형태가 사각형이기 때문에 격벽이 개수가 많아 유입하수가 역류하고 유입되는 배수의 유출이 정체되기 때문인 것으로 판단된다.

[표 39] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-1.5m/s)



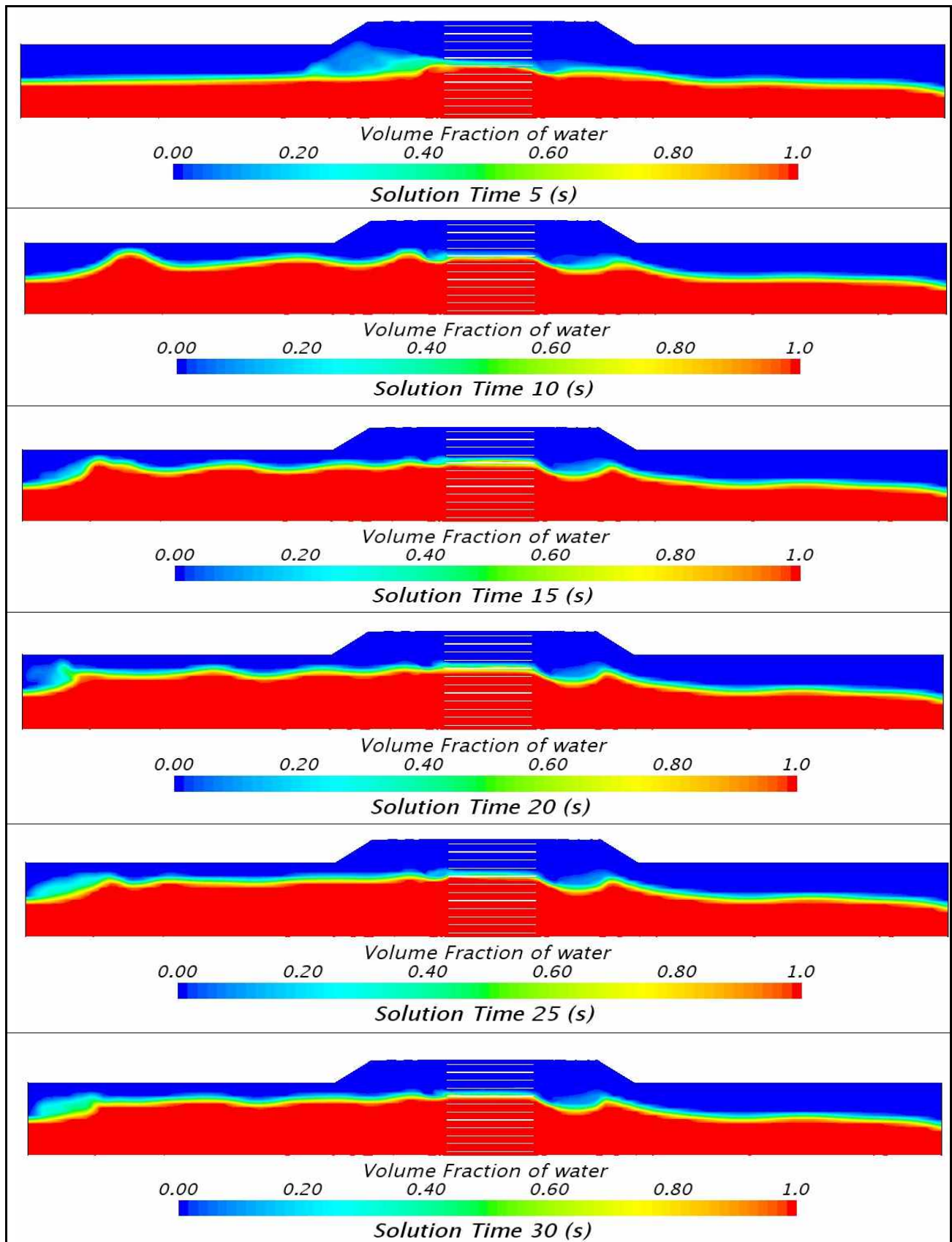
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열과 유출배관의 상승이 일어나는 것으로 나타났다. 이는 도파관 배열의 형태가 사각형이기 때문에 격벽이 개수가 많아 유입하수가 역류하고 유입되는 배수의 유출이 정체되기 때문인 것으로 판단된다.

[표 40] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-2.0m/s)



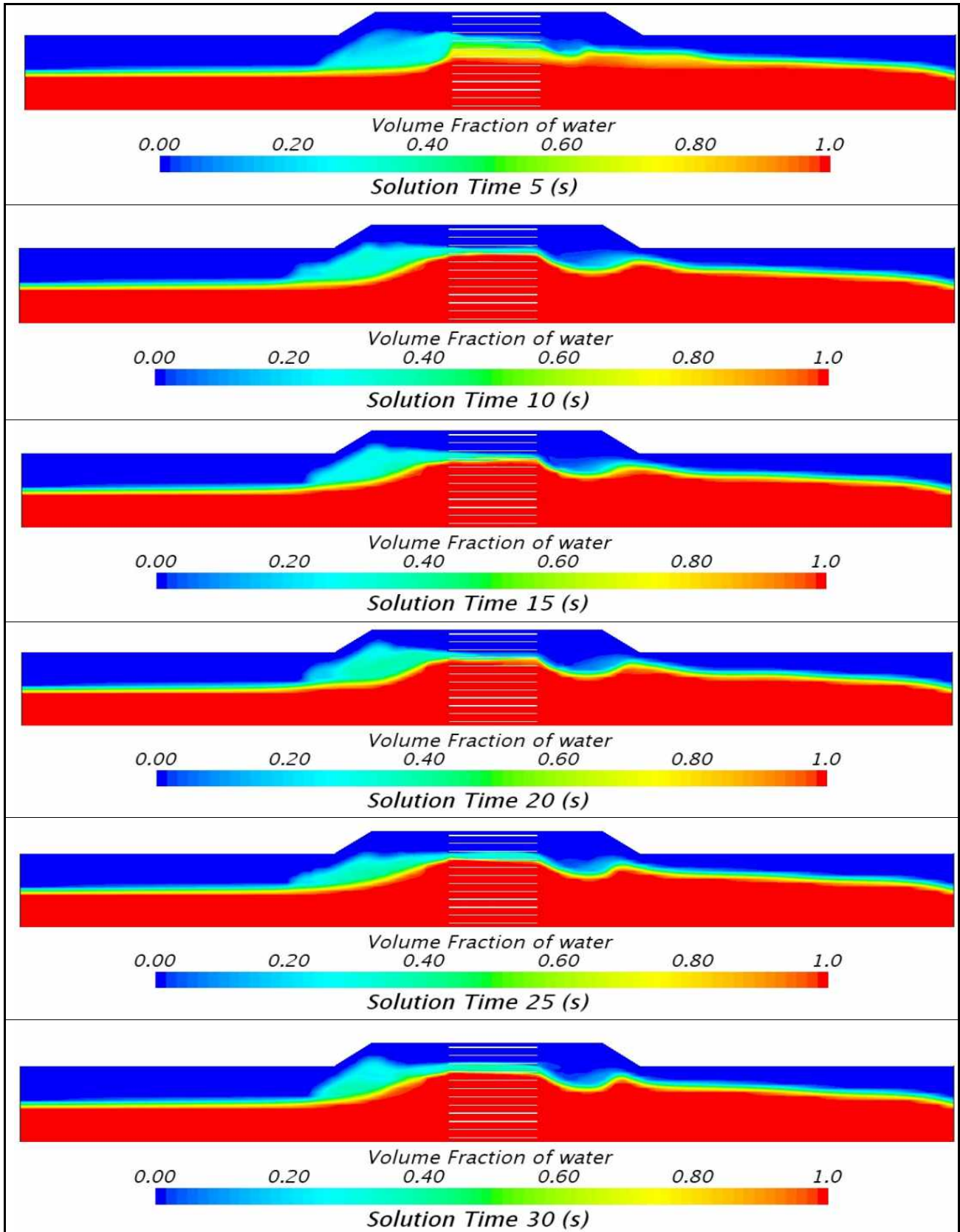
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열과 유출배관 측 모두 수위의 상승이 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수와 함께 비교적 빠른 속도로 유입되는 배수가 함께 도파관 배열을 통과해서 일어나는 현상으로 판단된다.

[표 41] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-0.6m/s)



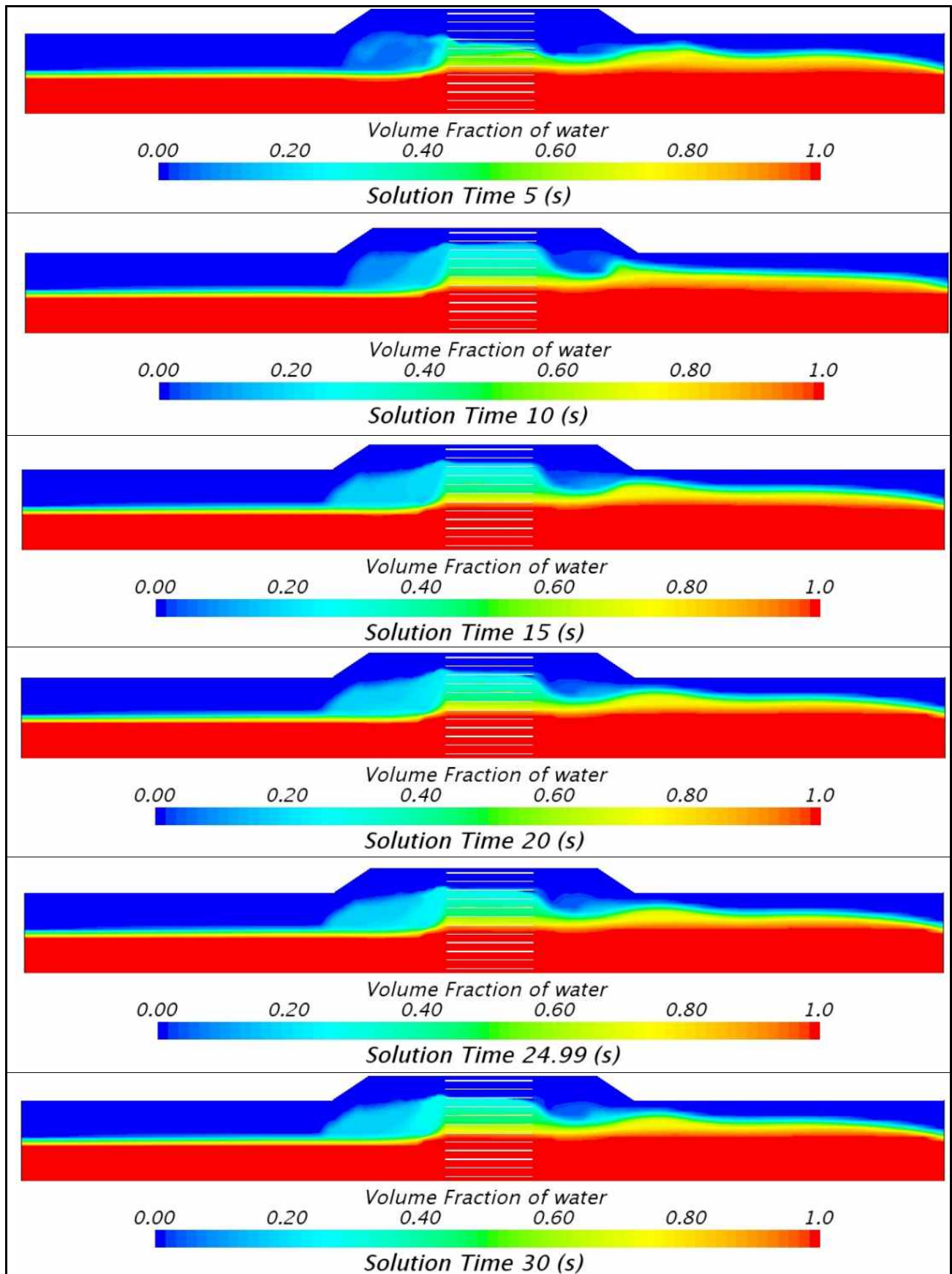
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입되면 도파관 배열과 도파관 배열의 전면부에서는 배수 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다. 이는 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수와 느린 속도로 유입되는 배수의 영향인 것으로 판단된다.

[표 42] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-1.5m/s)



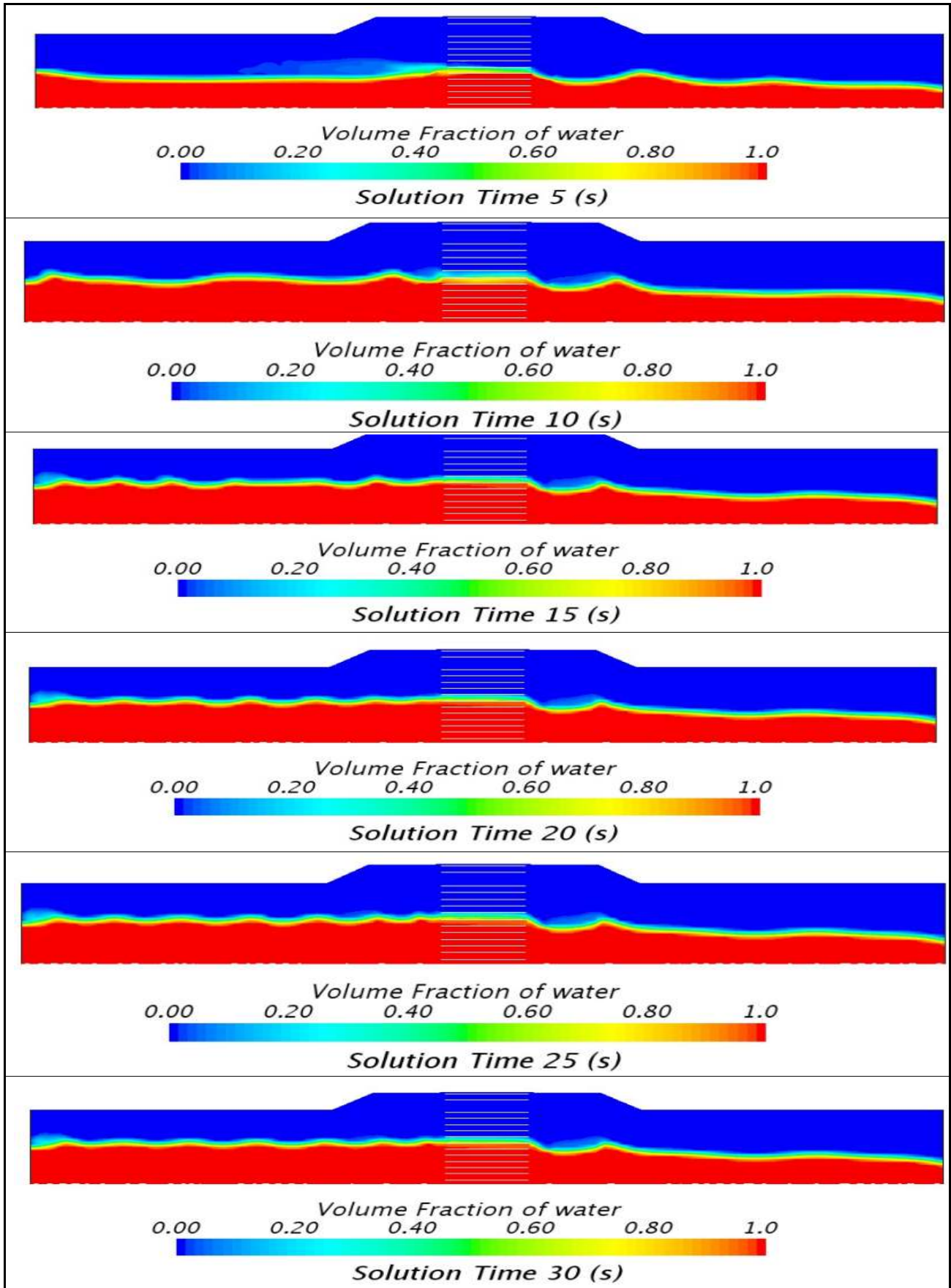
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열의 앞부분에서는 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수와 유입되는 배수의 합류에 의해 수위가 상승하지만 비교적 빠른 배수 유입속도로 인해 유입된 배수와 함께 도파관 배열을 통과하는 것으로 나타났다.

[표 43] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-2.0m/s)



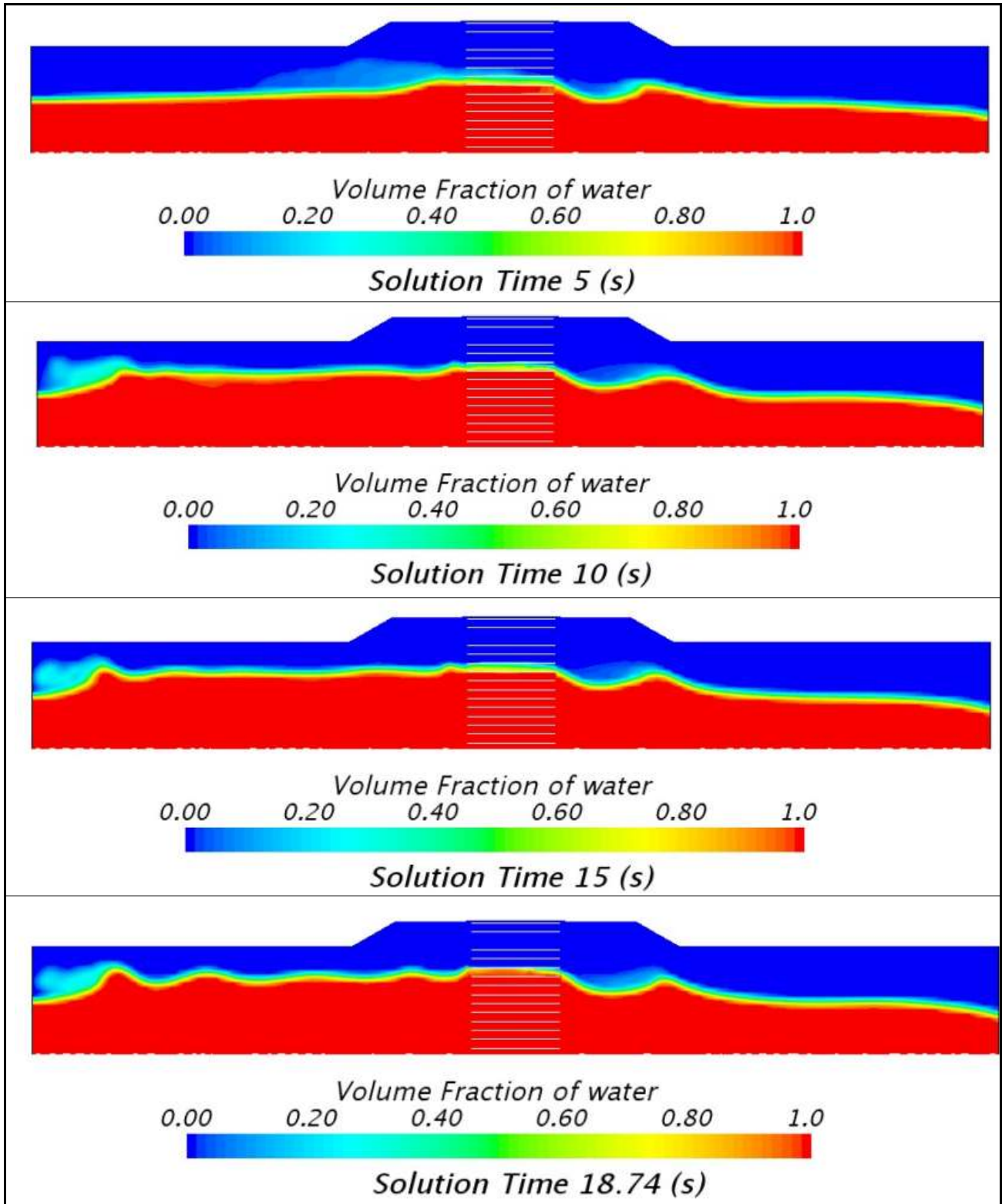
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 빠른 유입속도에 의해 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수가 유입 배수와 함께 도파관 배열을 통과하여 배열의 후편 배수관에서 관경의 1/2이상으로 수위가 상승하는 것을 알 수 있다.

[표 44] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-0.6m/s)



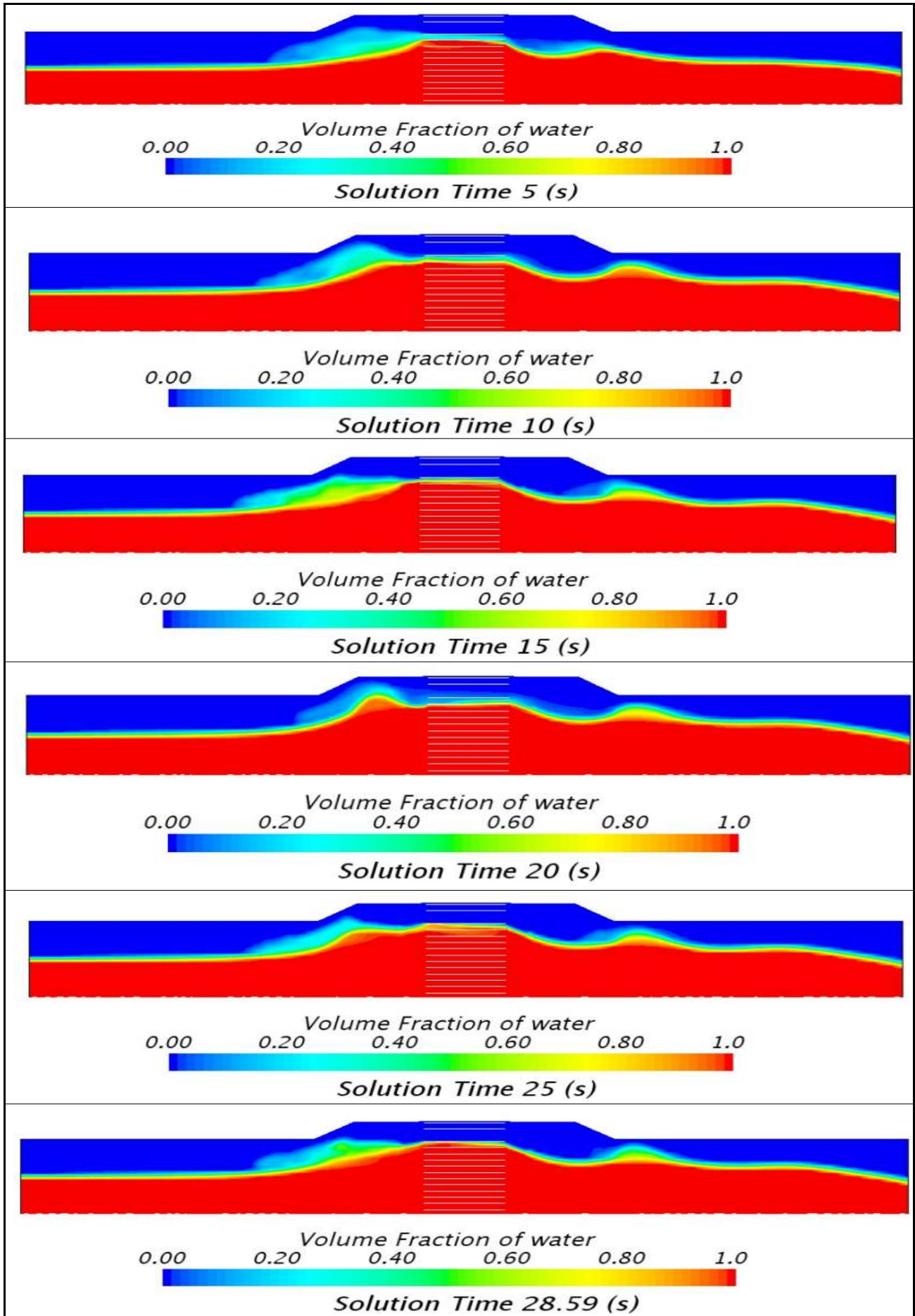
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입되면 느린 속도로 유입되는 배수와 도파관 배열의 격벽에서 역류된 배수의 영향으로 유입구부터 도파관 배열까지의 배수 수위가 1/2 이상으로 상승하는 것을 알 수 있다.

[표 45] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-1.0m/s)



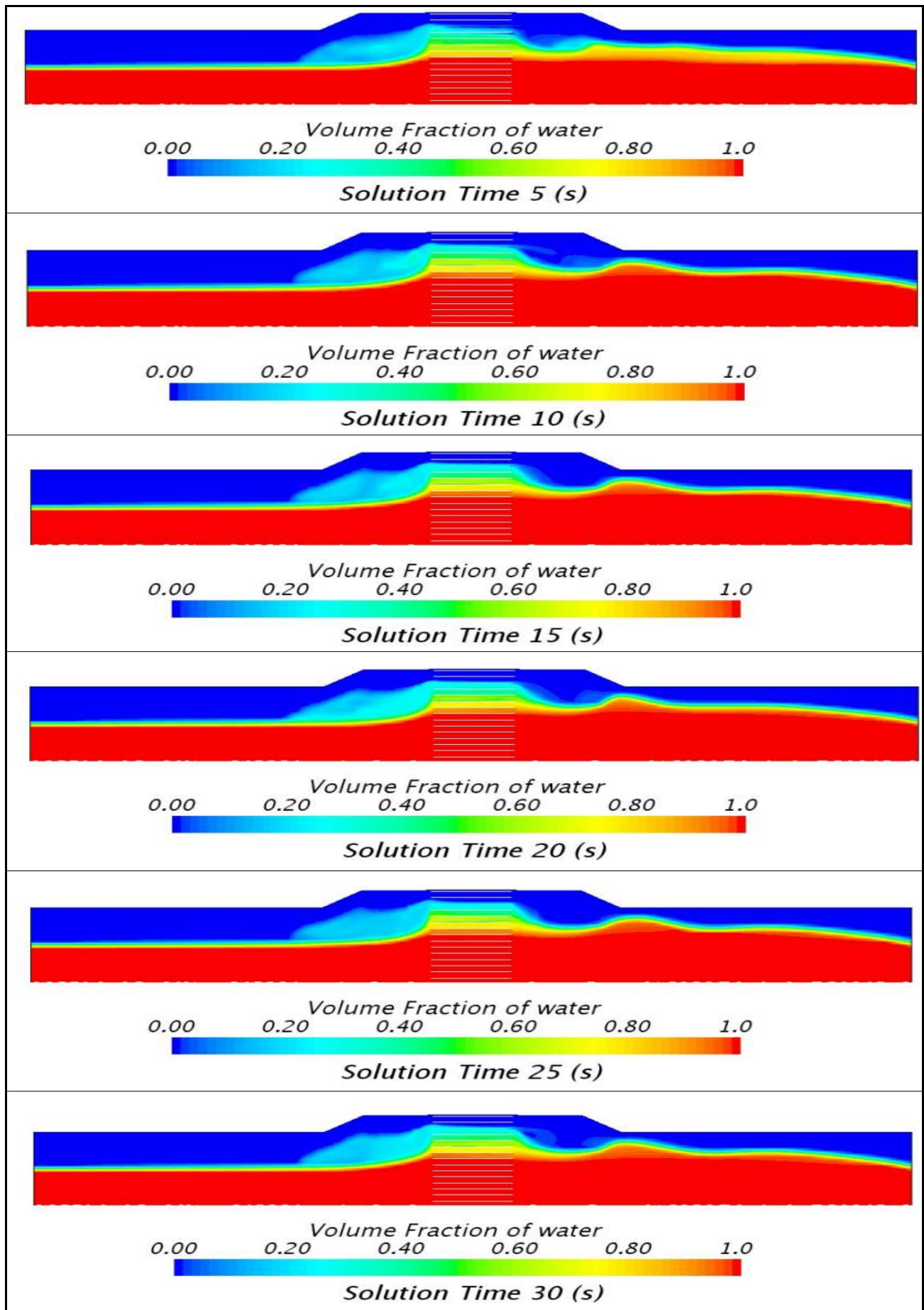
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열과 유출배관 측 모두 수위의 상승이 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 도파관 배열의 직후에도 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다.

[표 46] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-1.5m/s)



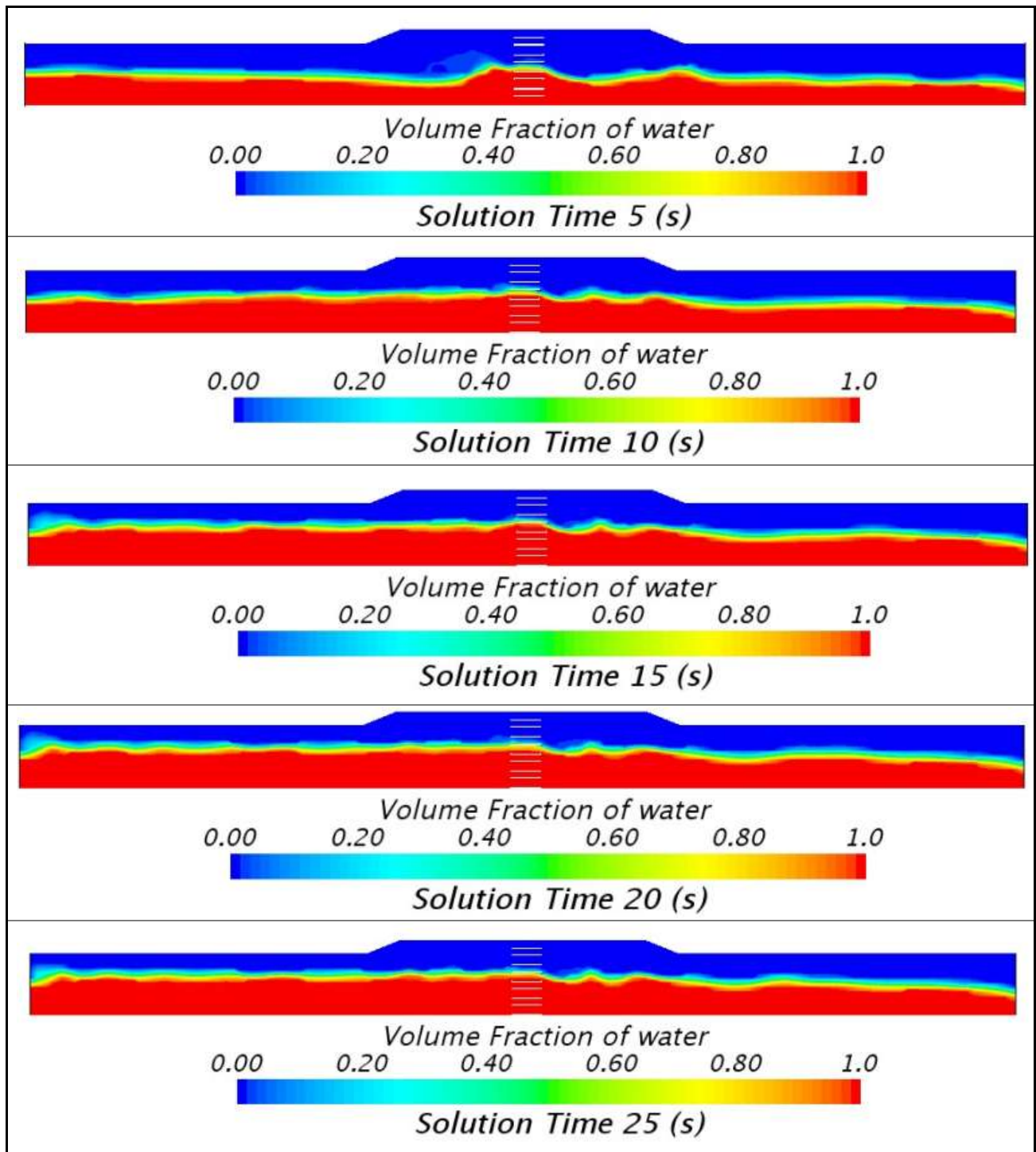
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열의 주위에서 전체 배관경의 90%까지 배수 수위의 상승이 일어나는 것을 알 수 있다.

[표 47] Grid Type 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-2.0m/s)



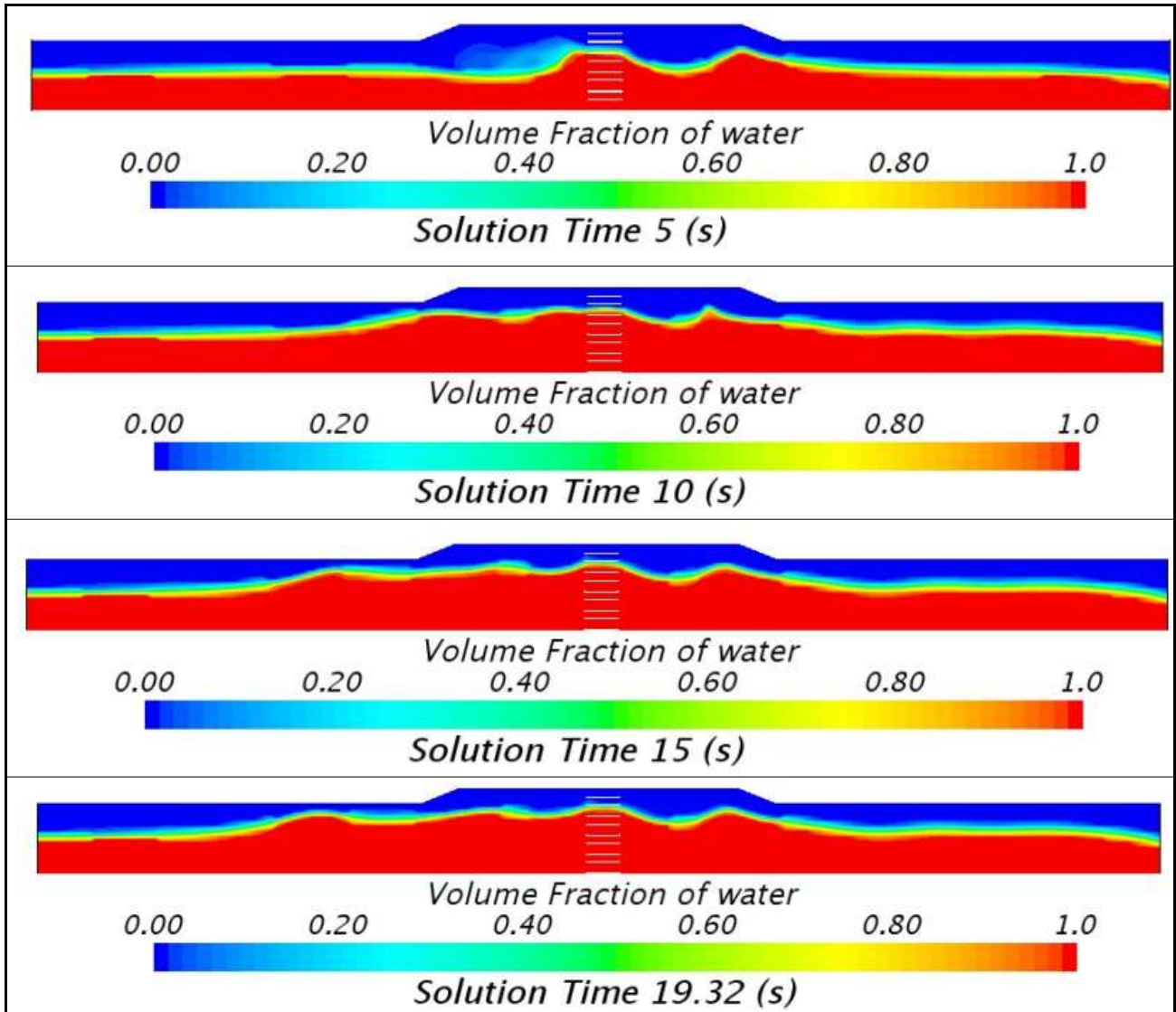
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 빠른 속도로 유입되는 배수와 도파관 배열에 의해 역류된 배수가 유입 배수의 영향으로 도파관 배열을 통과하여 후면부 배수관의 관경의 95% 정도까지 배수의 수위가 상승하는 것으로 나타났다.

[표 48] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-0.6m/s)



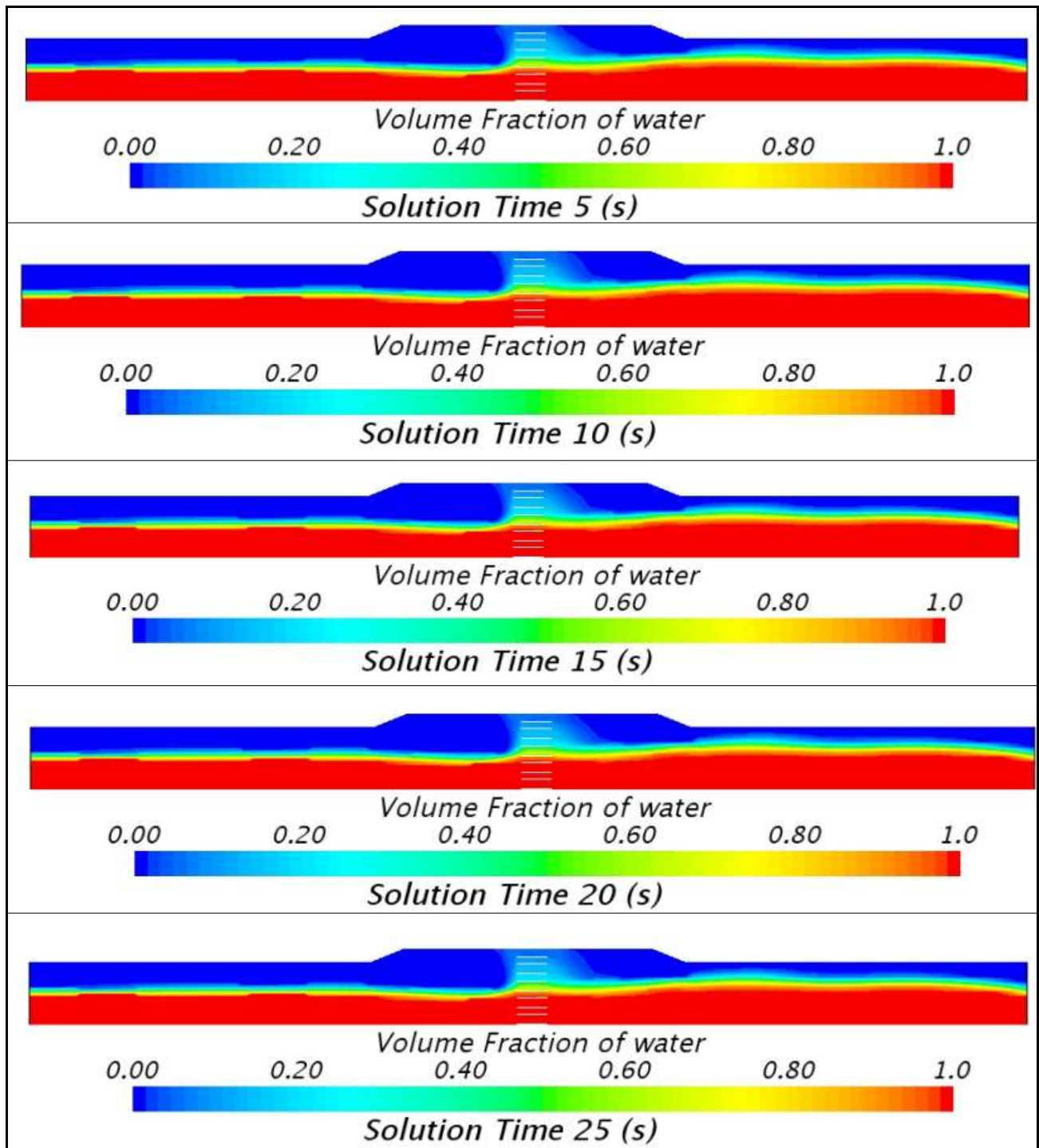
배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입될 경우 도파관 배열과 유입구 측 배수관의 배수 수위가 상승되며 이는 도파관 배열에 의해 역류된 배수가 느리게 유입되는 배수와 합류되어 도파관 배열을 천천히 통과하기 때문인 것으로 판단된다.

[표 49] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-1.0m/s)



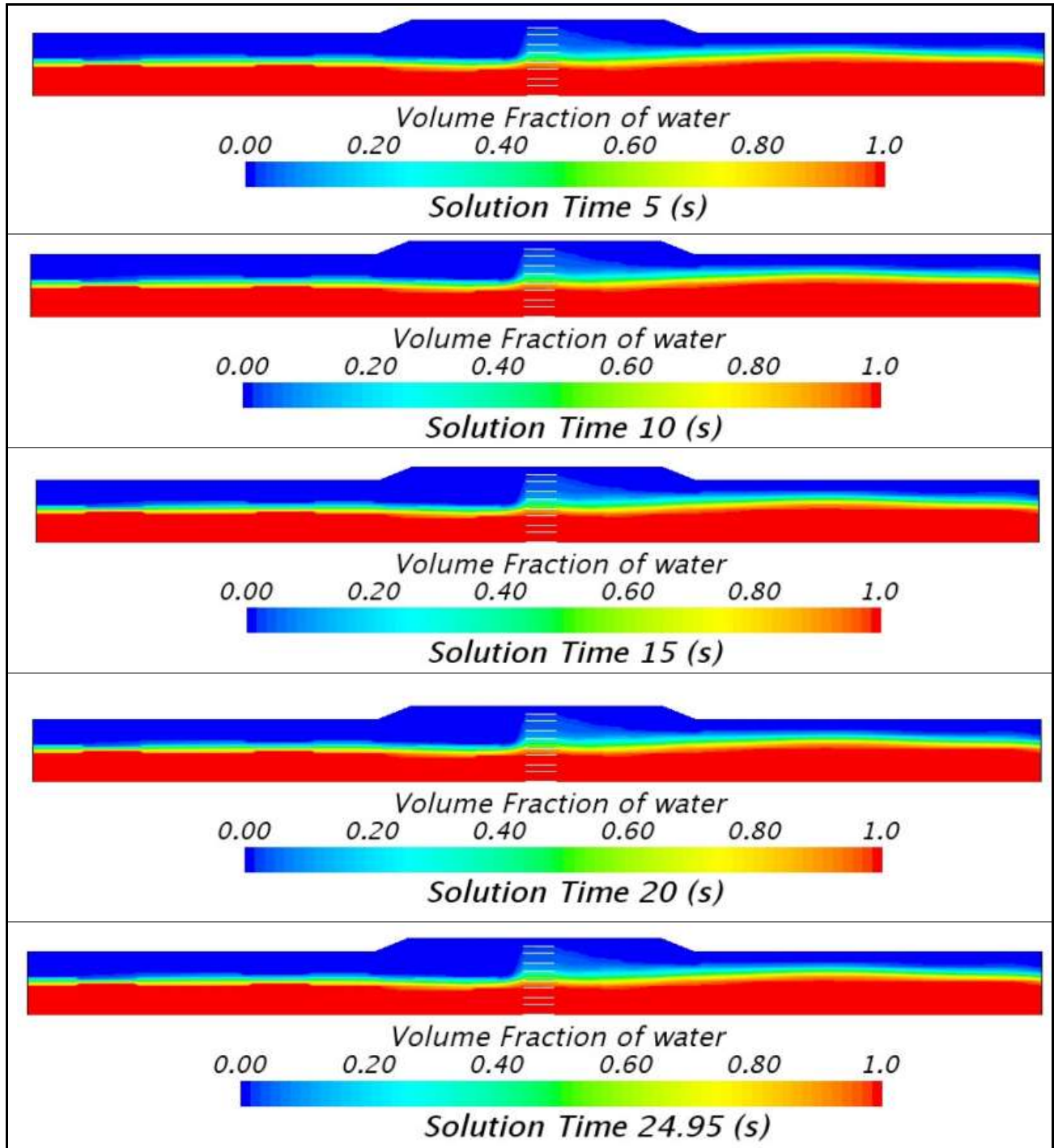
배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열과 도파관 배열이 설치된 앞부분, 뒷부분 모두 배수 수위의 상승이 일어나는 것을 확인하였다.

[표 50] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-1.5m/s)



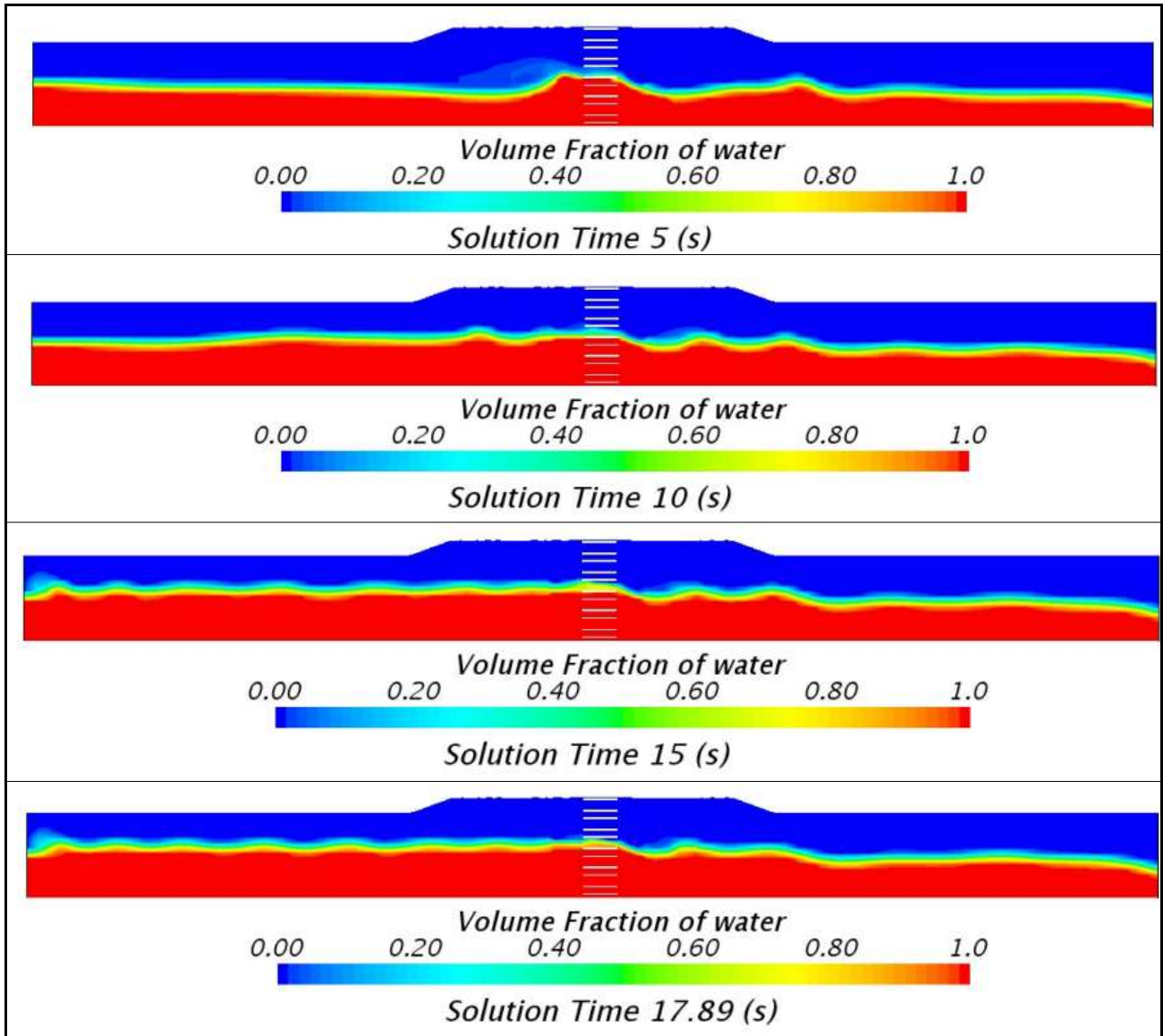
배수관의 관경이 100mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 빠른 배수 유입으로 인하여 도파관 배열에서는 배수 수위가 일시적으로 100%에 가깝게 되며 도파관 배열의 후측에 위치한 배수관 관경의 80% 정도까지 배수 수위가 상승하는 것을 알 수 있다.

[표 51] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (100A-2.0m/s)



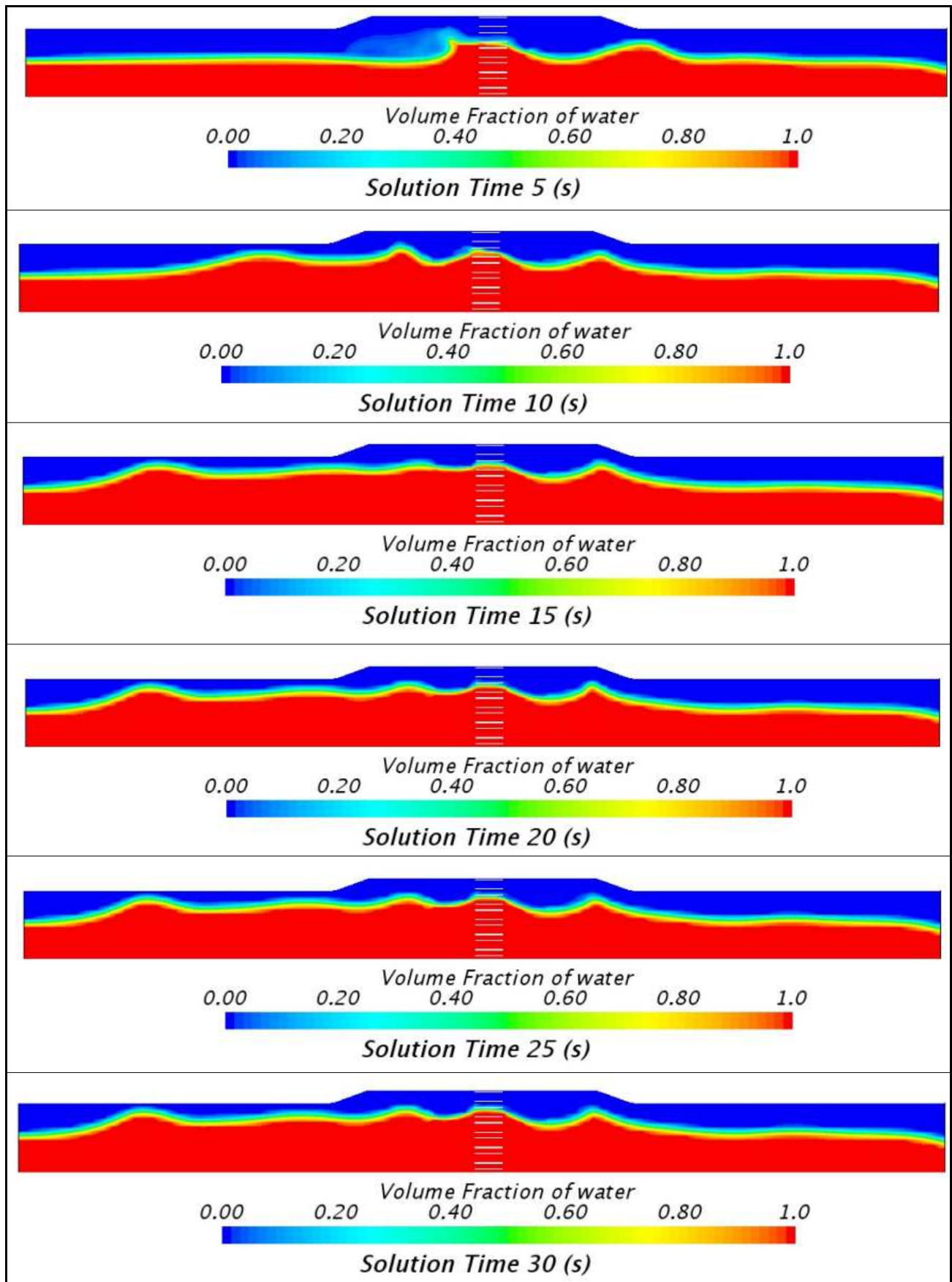
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 빠른 하수의 유입으로 인하여 도파관 배열의 격벽에서 역류된 배수가 유입되는 배수와 함께 빠른 속도로 도파관을 통과하며 통과된 배수는 도파관 배열의 후면에 위치한 배수관에서 전체 배관의 80% 정도 까지 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다.

[표 52] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-0.6m/s)



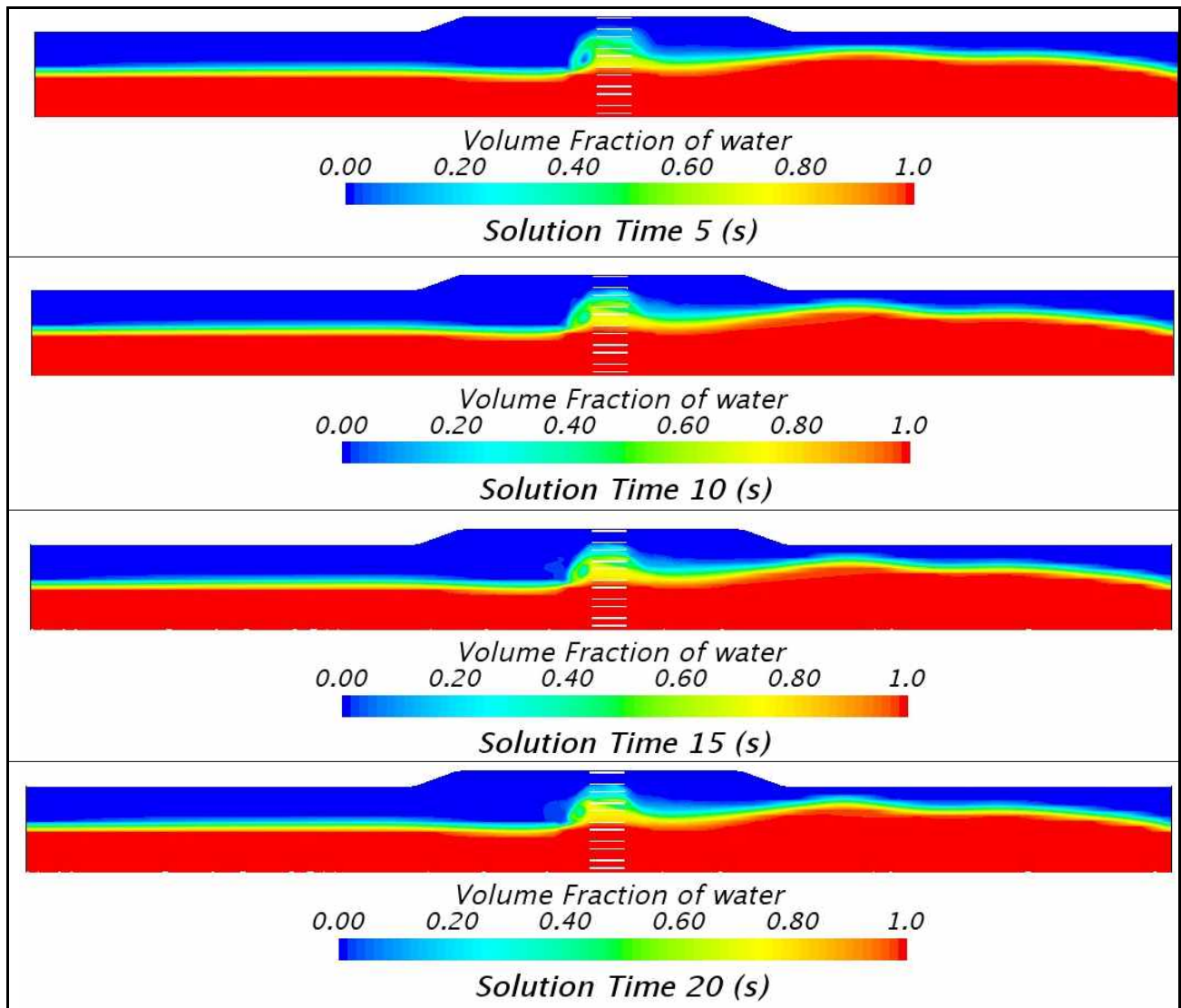
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입되면 도파관 배열과 도파관 배열 전면 배수관에서 유입된 하수가 느린 속도로 통과하기 때문에 배수 수위의 상승이 일어나는 것으로 판단된다.

[표 53] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-1.0m/s)



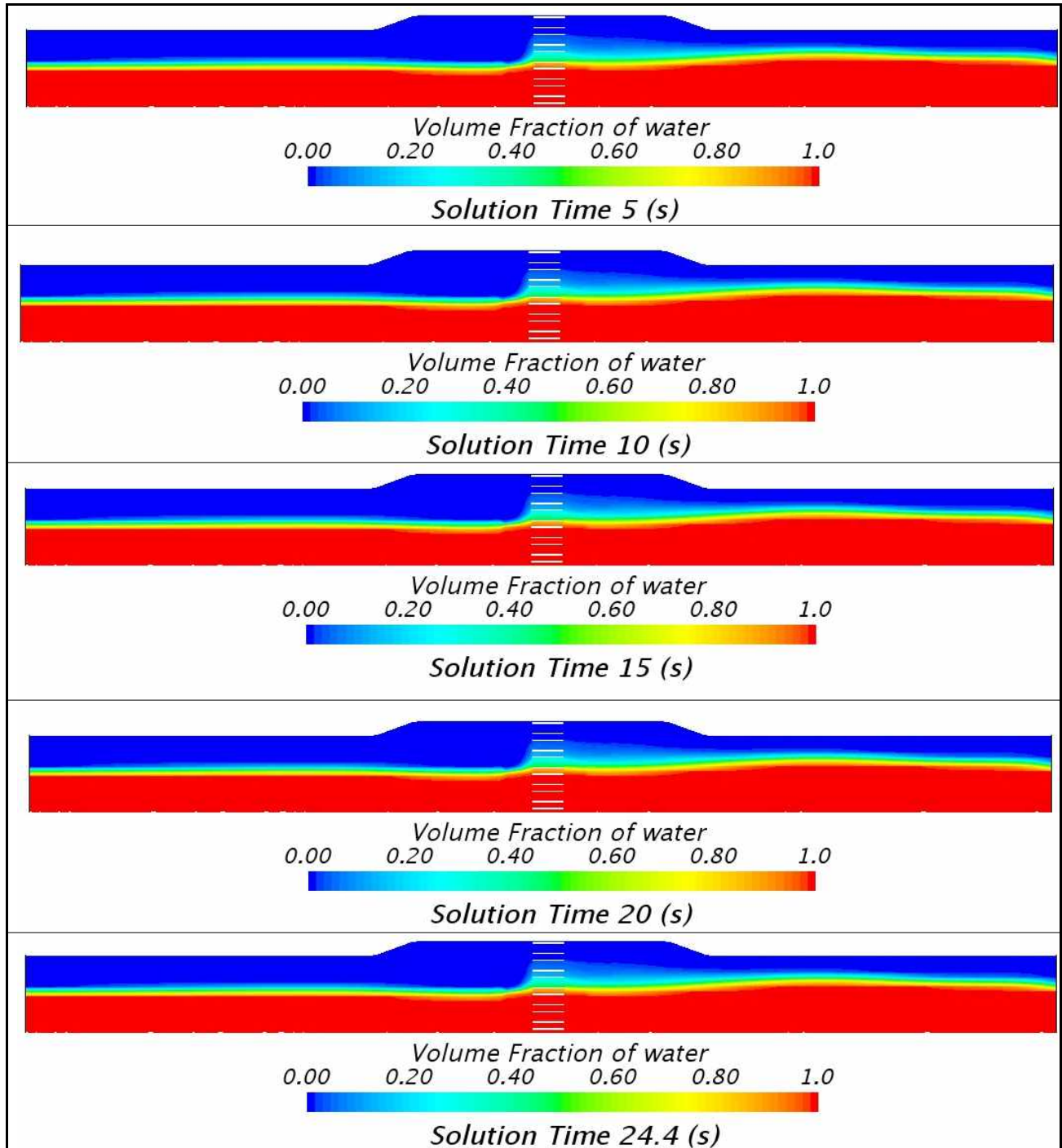
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 유입구부터 도파관 배열의 후면부 까지 배수 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다. 이는 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수가 유입되는 배수와 합류되기 때문인 것으로 판단된다.

[표 54] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-1.5m/s)



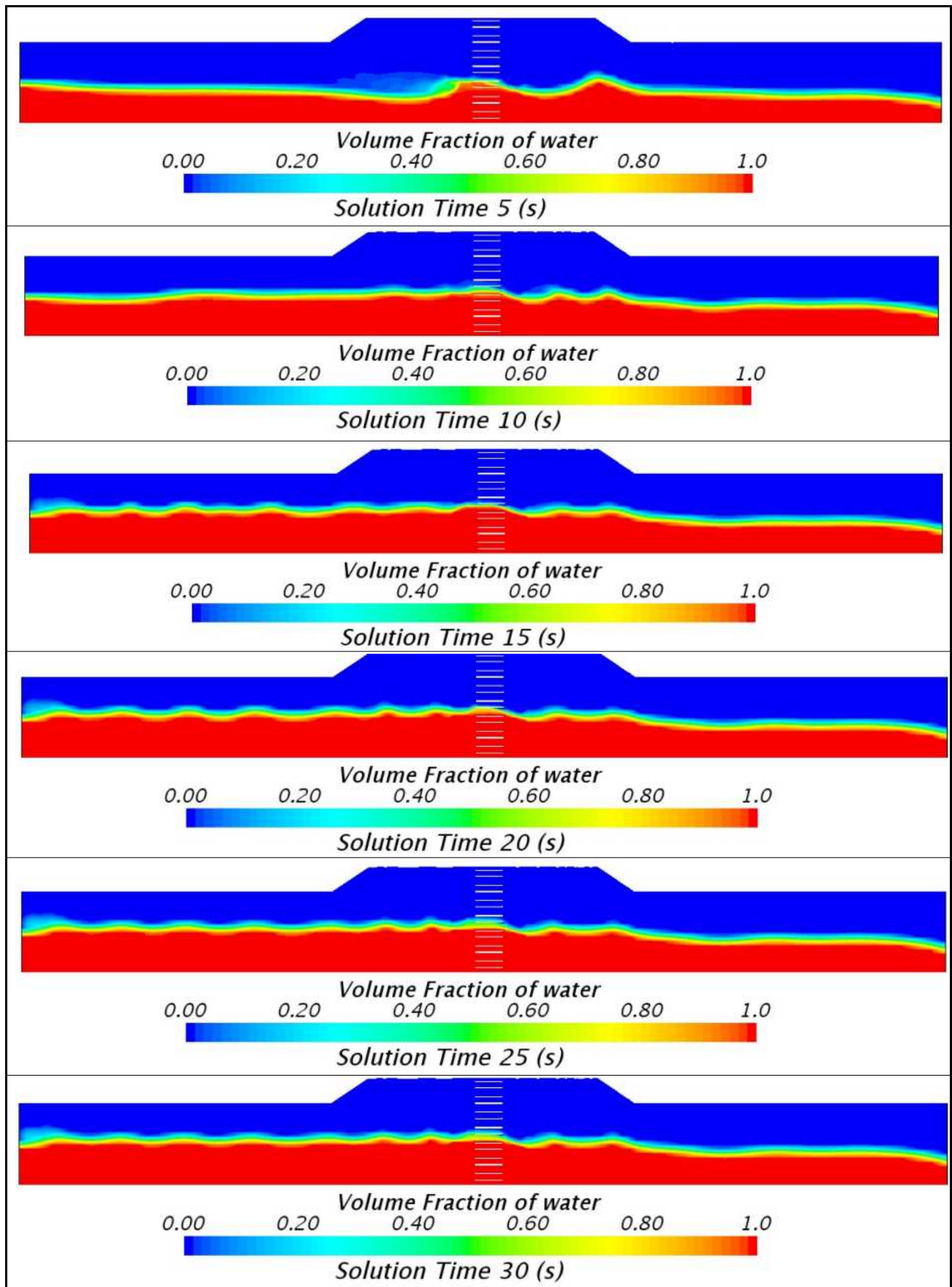
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열에서는 배관 관경의 80%까지 배수 수위가 상승하며, 도파관 배열의 후면부의 배수관에서는 90%까지 배수 수위가 상승하는 것으로 나타났다. 이는 비교적 빠른 속도로 유입되는 배수와 도파관 배열에서 역류된 배수가 합류되어 비교적 빠른 속도로 도파관 배열을 통과하기 때문인 것으로 판단된다.

[표 55] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (125A-2.0m/s)



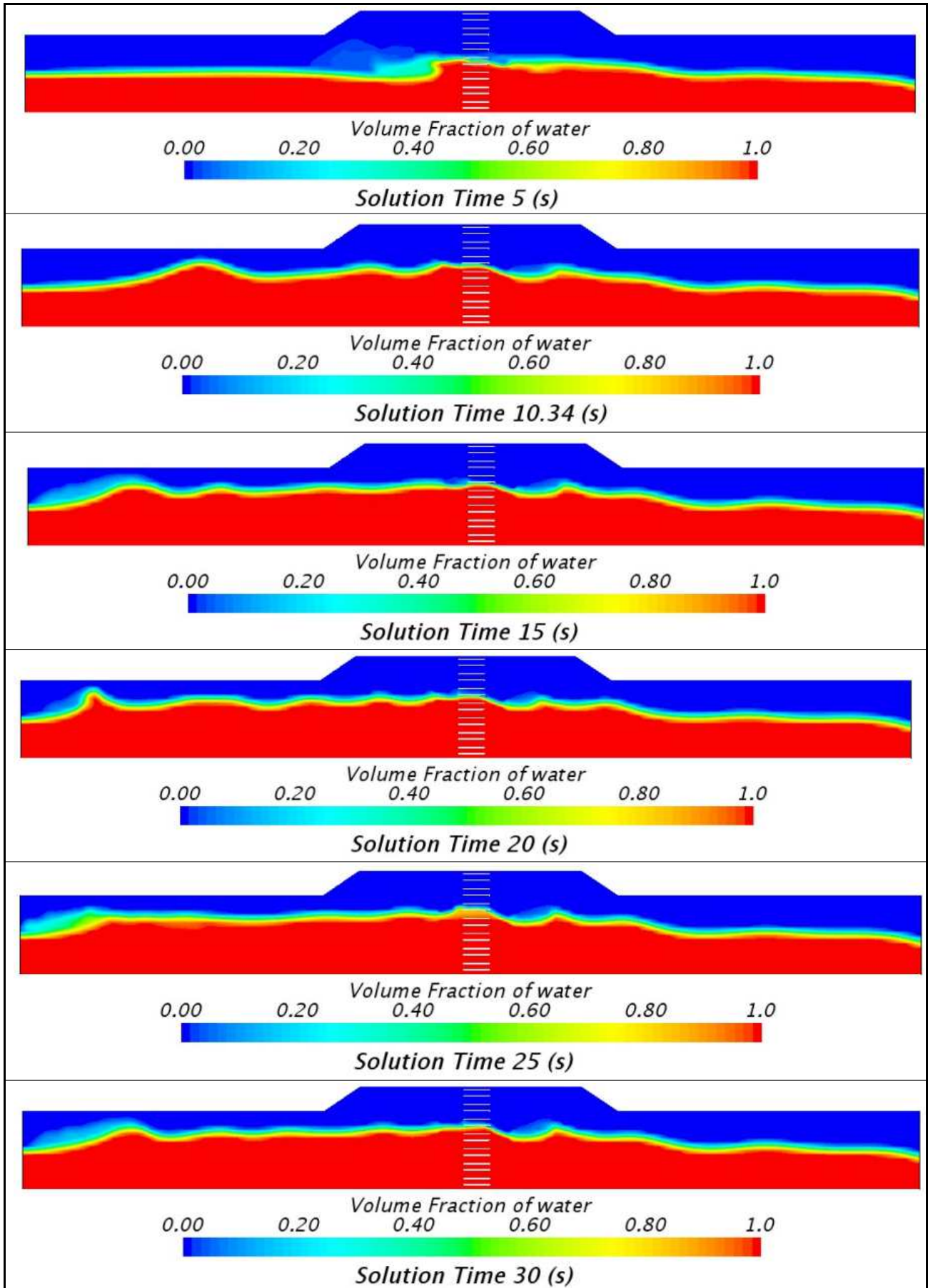
배수관의 관경이 125mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열과 도파관 배열의 후면 배수관에서는 배수관 관경의 80%까지 배수의 수위가 상승하는 것으로 나타났다.

[표 56] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-0.6m/s)



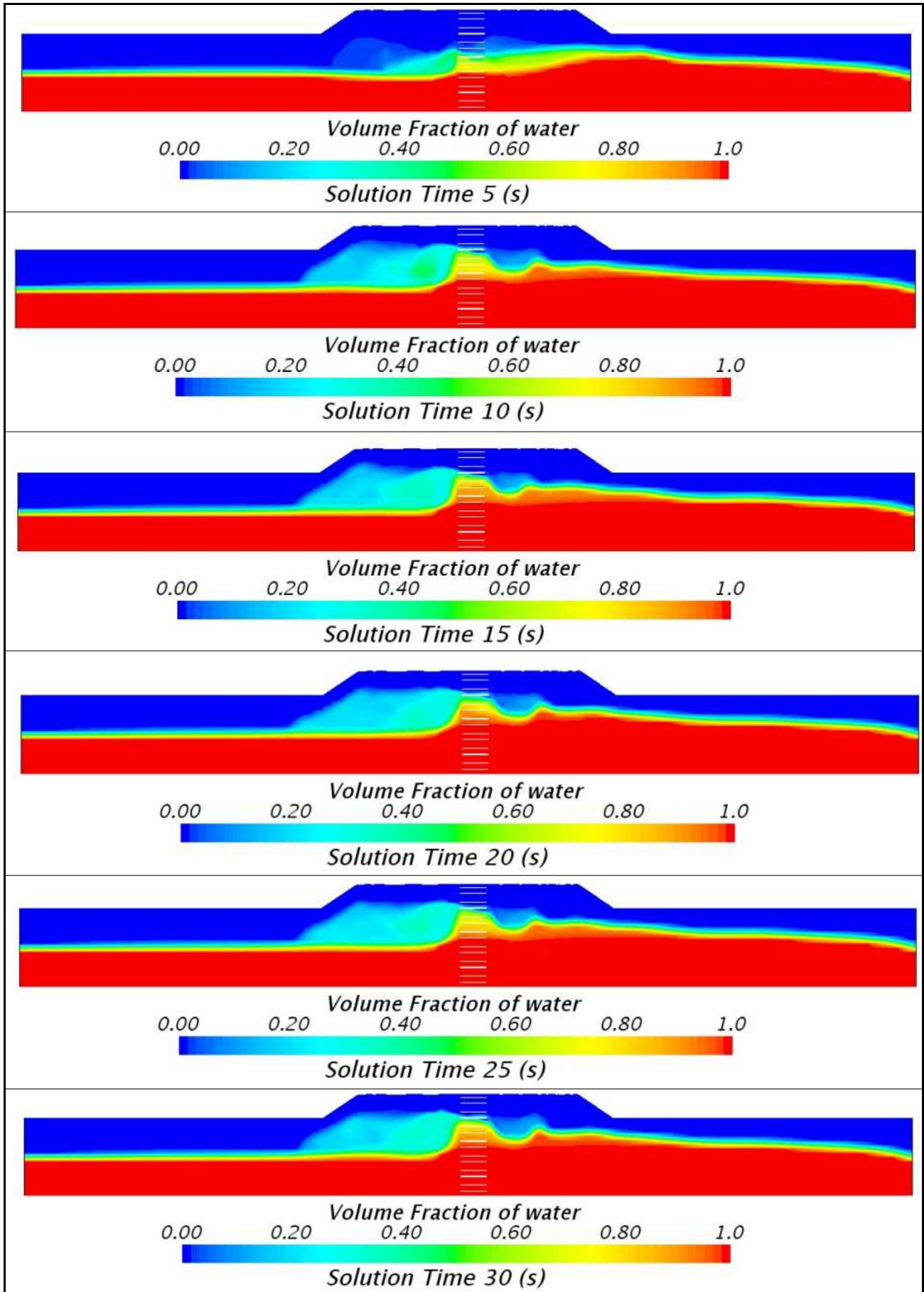
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입되면 도파관 배열, 도파관 배열 전면부의 배수관에서 모두 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다. 이는 도파관 배열의 격벽에서 역류되는 배수와 느리게 유입되는 배수가 합류되기 때문인 것으로 판단된다.

[표 57] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-1.0m/s)



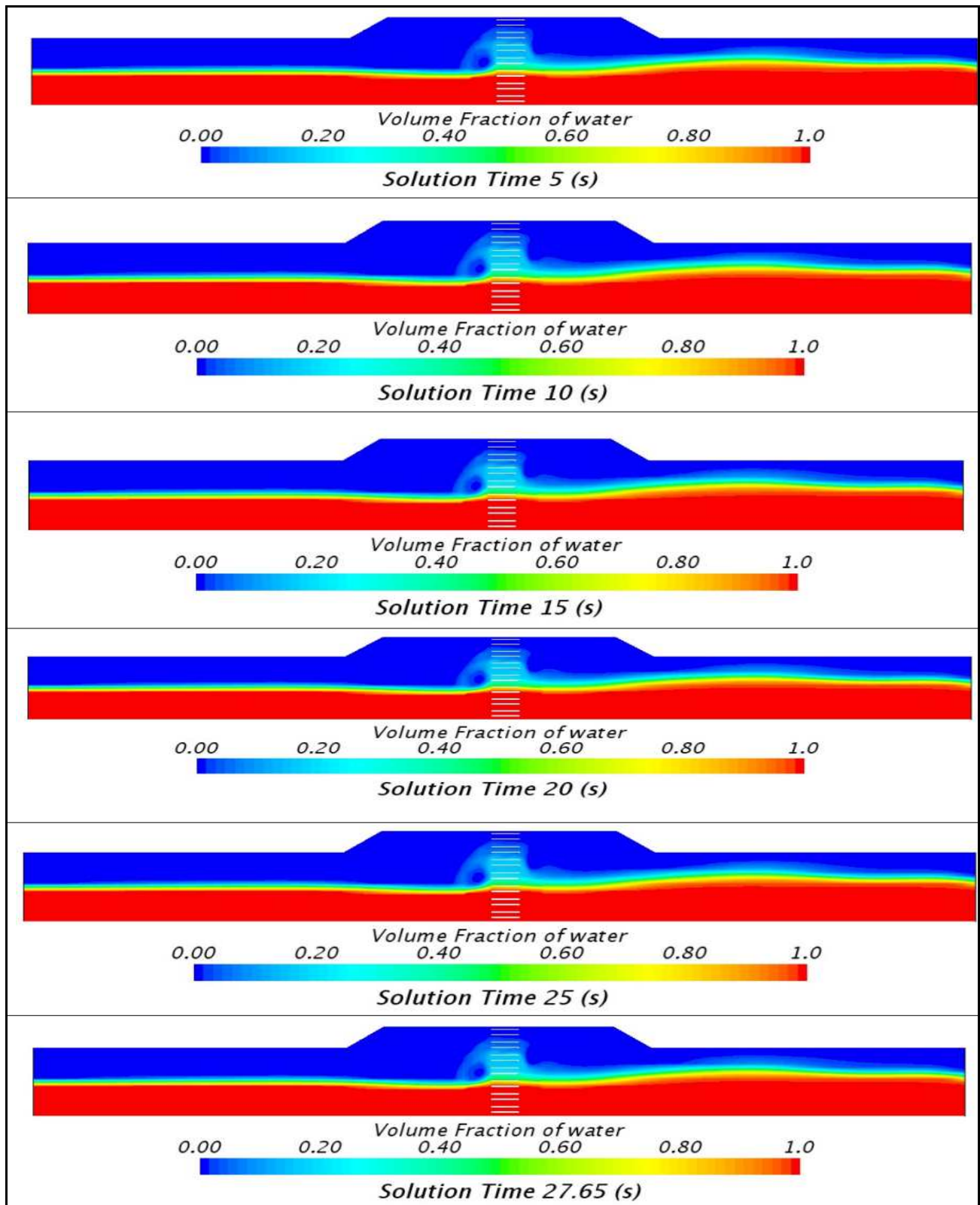
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 배수 유입구부터 도파관 배열의 후면까지 배수 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다.

[표 58] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-1.5m/s)



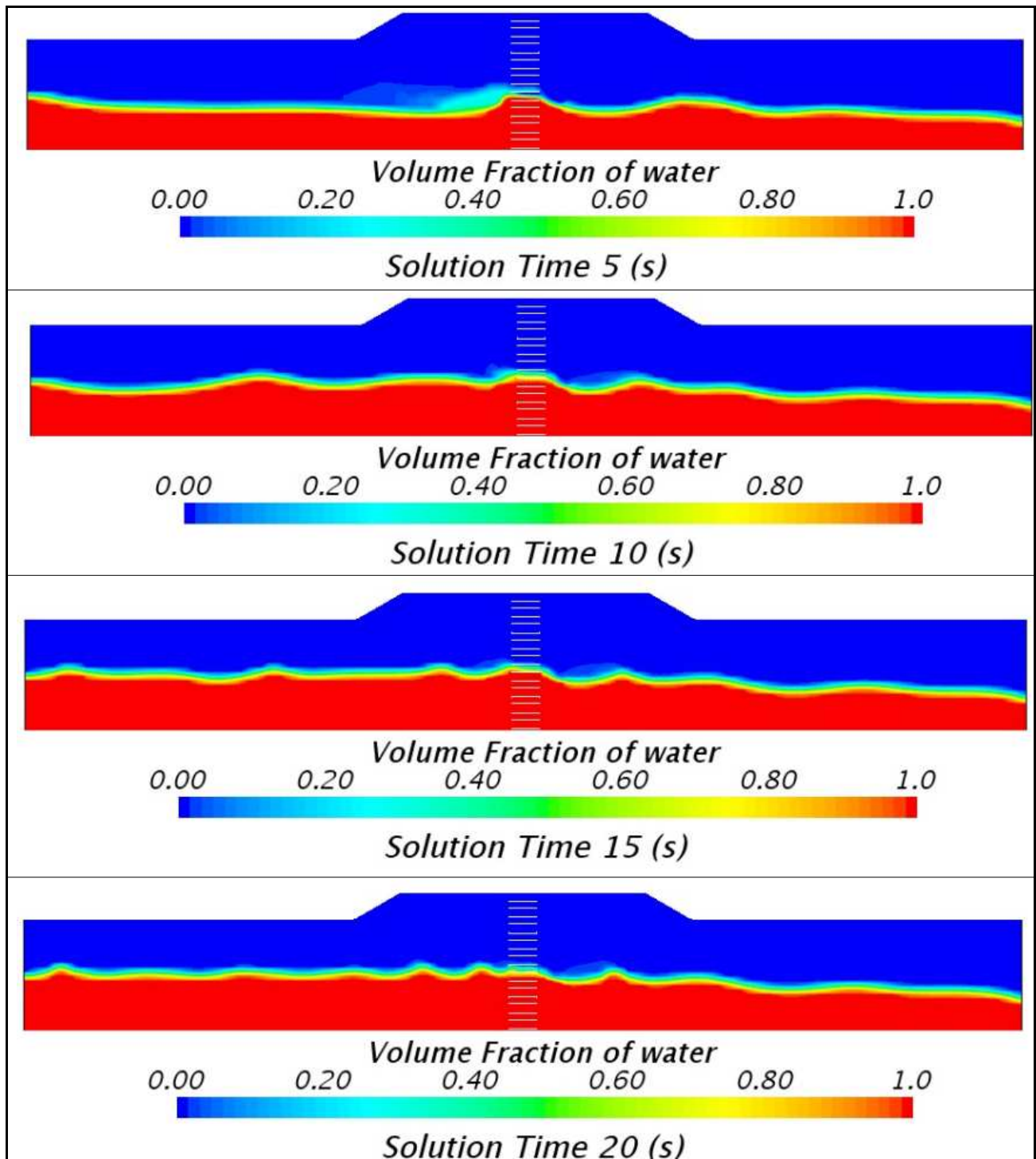
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열의 전면부에서 역류된 배수와 유입되는 배수가 합류되어 전체 배관 관경의 90%가깝게 배수 수위가 상승하며, 도파관 배열의 후면부에서는 배수관 관경의 80%가 배수 수위가 상승하는 것으로 나타났다.

[표 59] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (150A-2.0m/s)



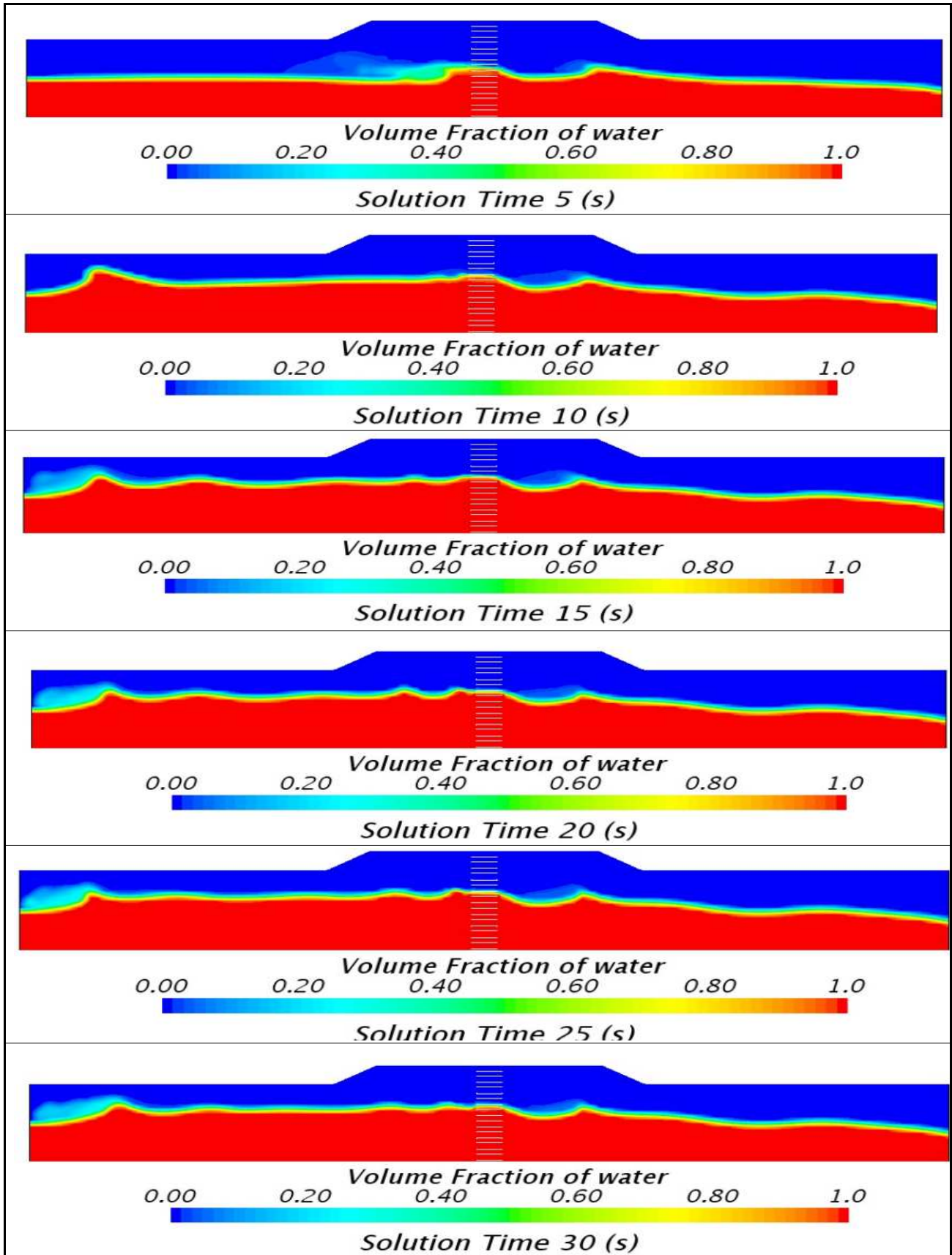
배수관의 관경이 150mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열에서 역류된 배수는 빠른 속도로 유입되는 배수와 합류되어 도파관 배열을 통과하고 도파관 배열 후면의 배수관에서는 배수관 관경의 75% 정도까지 배수의 수위가 상승하는 것으로 나타났다.

[표 60] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-0.6m/s)



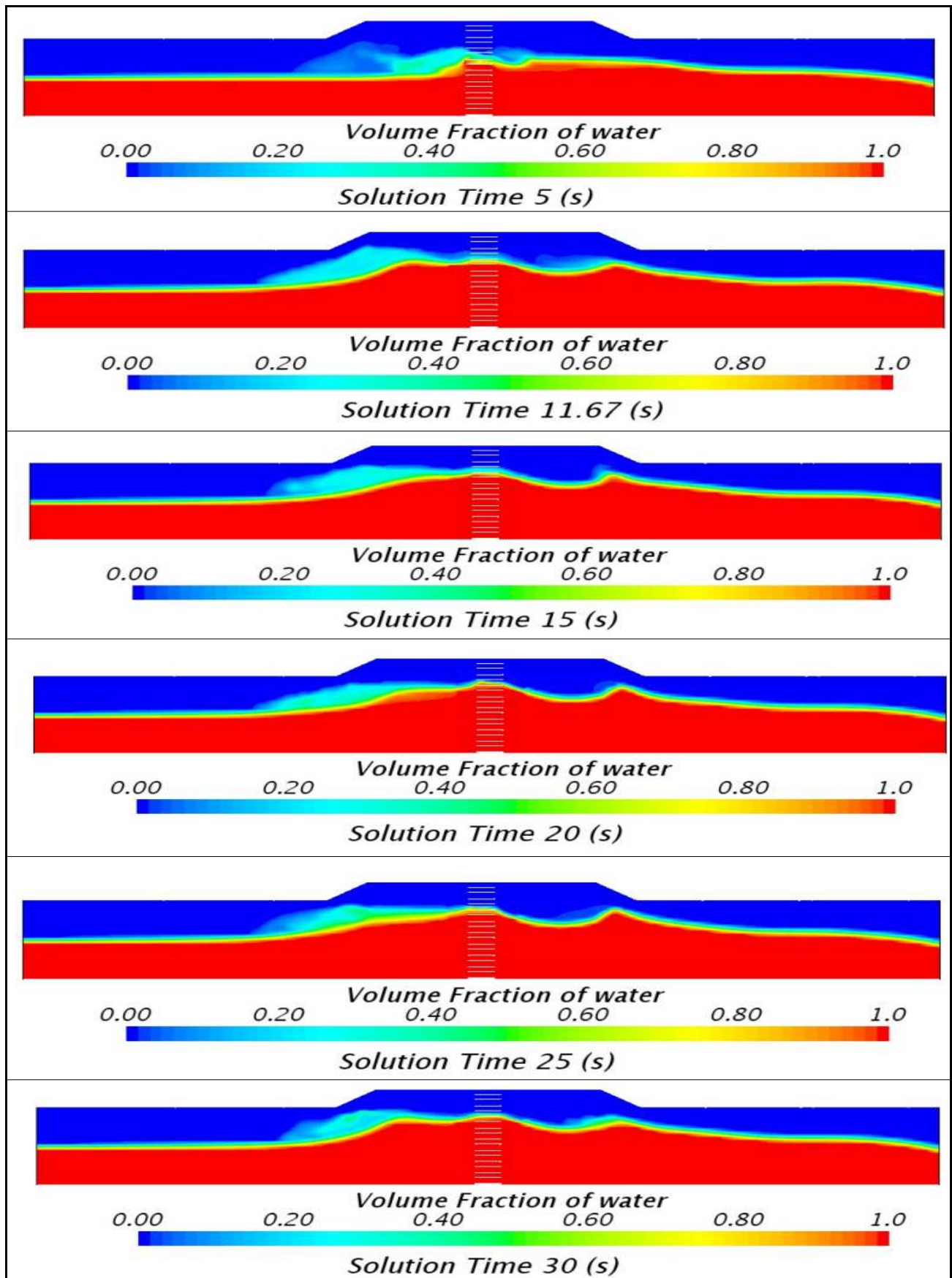
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 0.6m/s로 유입되면 느리게 유입되는 배수와 도파관 배열의 격벽에 의해 역류된 배수가 합류되어 유입구부터 도파관 배열까지의 배수관에서는 수위의 상승이 일어나며 이는 도파관 배열을 통과한 이후에는 점차 낮아지는 것으로 나타났다.

[표 61] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-1.0m/s)



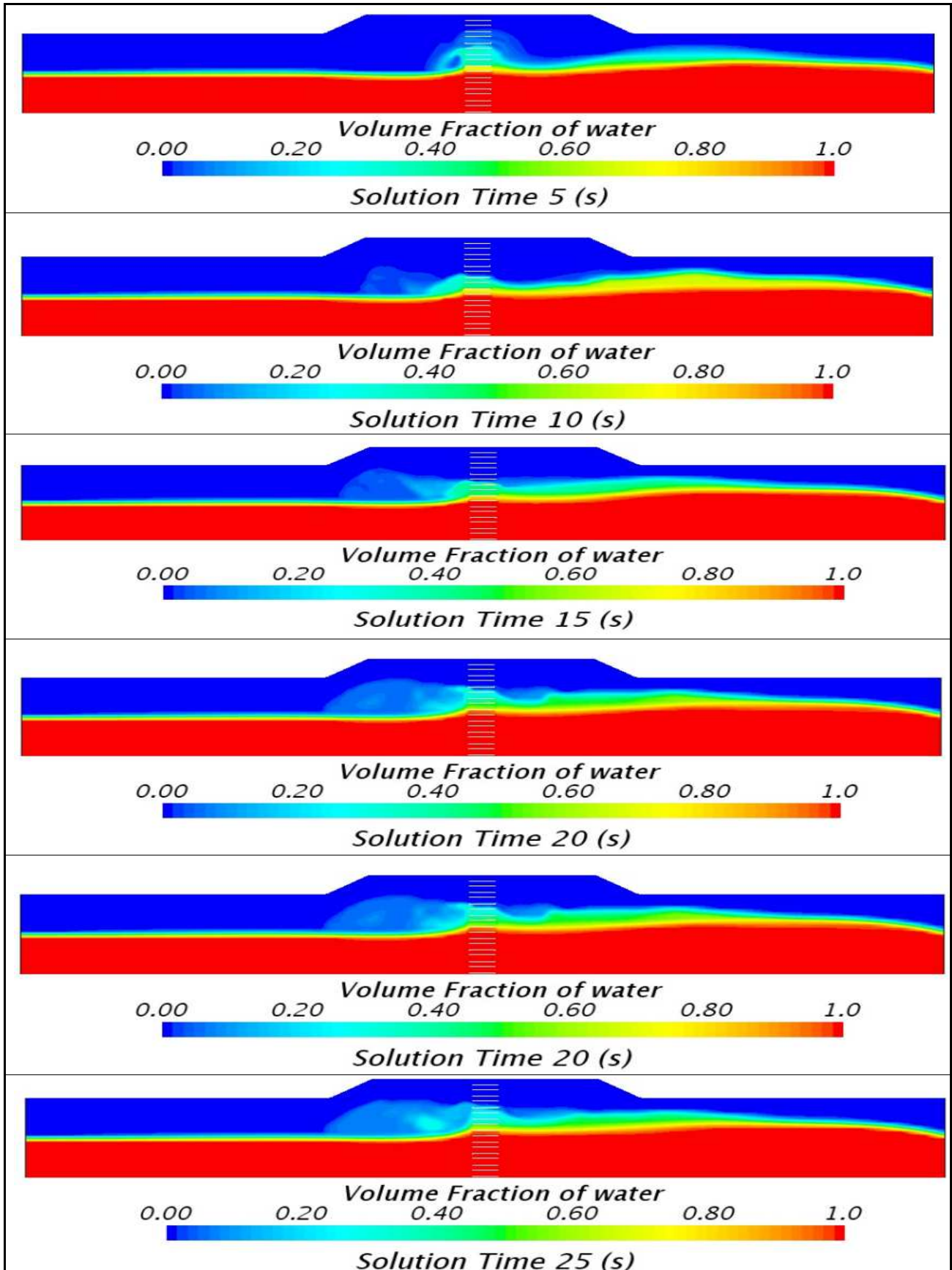
배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 1.0m/s로 유입되면 배수 유입구부터 도파관 배열의 직후까지 배수 수위가 관경의 80% 정도까지 수위가 상승하는 것으로 나타났다.

[표 62] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-1.5m/s)



배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 1.5m/s로 유입되면 도파관 배열에서 역류하는 배수가 빠르게 유입된 배수와 합류하여 일시적으로 도파관 배열과 배열의 전후에서 일시적으로 배수의 수위가 상승하며 유출구에 가까워지면 배수의 흐름이 안정되는 것으로 나타났다.

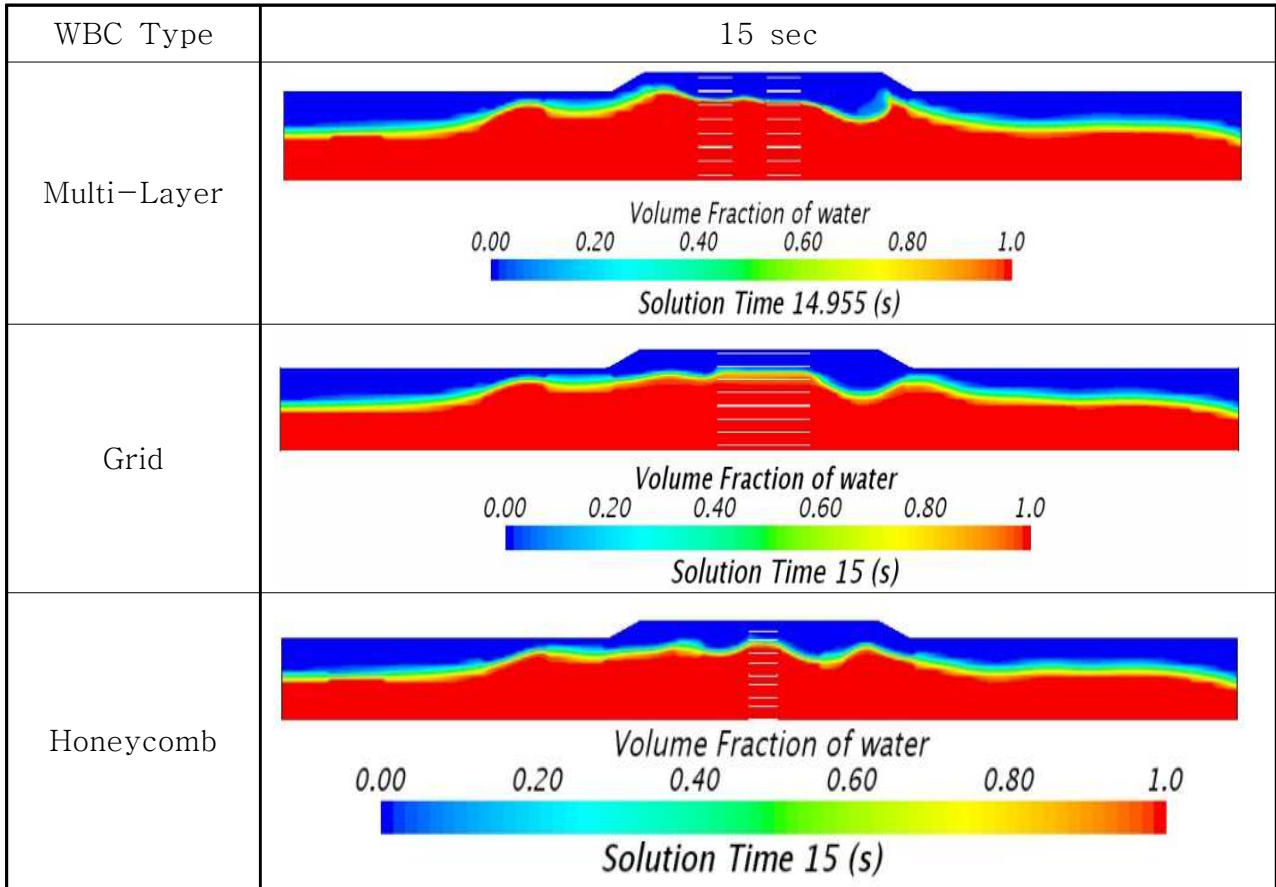
[표 63] Honeycomb 도파관 배열의 시간 경과에 따른 하수 흐름 (200A-2.0m/s)



배수관의 관경이 200mm이고 입구에서 배수가 2.0m/s로 유입되면 도파관 배열에서 역류된 배수가 유입되는 빠른 배수와 함께 도파관 배열을 통과해서 배열의 후면 배수관에서 전체의 90%까지 일시적으로 배수 수위가 상승하지만 유출구에 가까워지면 배수의 수위가 50% 정도로 안정되는 것을 알 수 있다.

[표 64] 15초 경과후 배수 흐름 비교

관경 100mm, 배수유입 : 1.0m/s



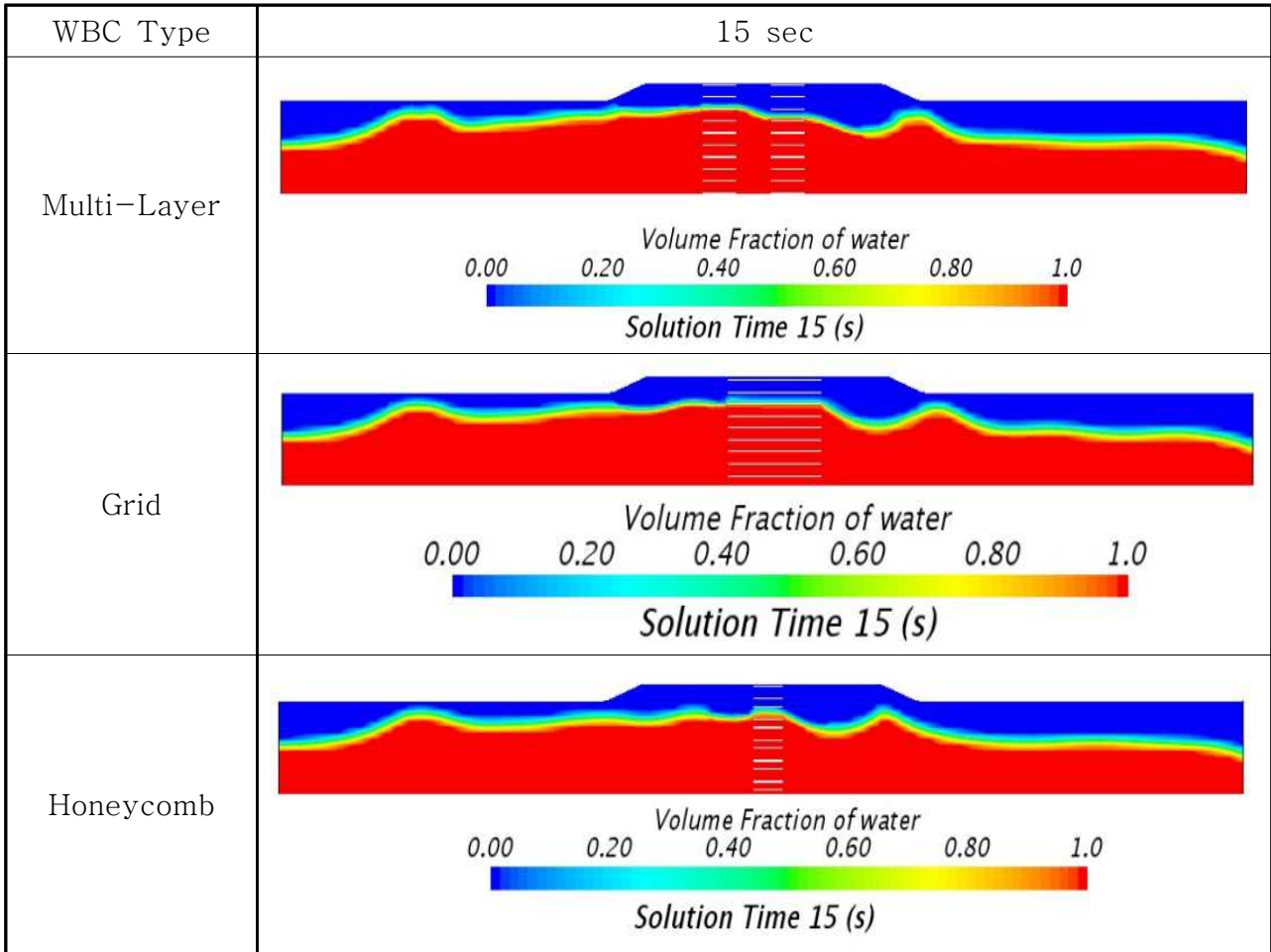
배수관의 관경이 100mm로 동일하고 외부에서 유입되는 배수가 배수관 관경의 1/2로 1.0m/s로 유입되면 도파관 배열이 설치된 부분에서는 Grid Type의 도파관을 설치한 경우가 가장 배수 수위가 높게 나타났으며 배수의 흐름은 도파관이 6각형인 honeycomb의 경우가 가장 많은 수위 변화를 보이는 것으로 나타났다.

그러나 전반적으로 배수의 흐름은 유사한 경향을 보이며, 도파관 배열에 의해 도파관 배열의 전면부에서 배수가 역류하여 점차 배수 수위가 높아지는 것을 알 수 있다.

표 64는 관경이 125mm, 배수의 유입속도가 1.0m/s 인 경우 각 도파관의 형태별로 비교한 것으로 다층형 도파관을 사용한 경우가 도파관 배열을 통과한 이후 배수의 흐름이 비교적 안정되는 것을 알 수 있다. 또한 도파관 배열 격벽의 영향으로 일부 배수가 역류하여 유입구까지 지속적으로 배수의 수위가 상승하는 것을 알 수 있다.

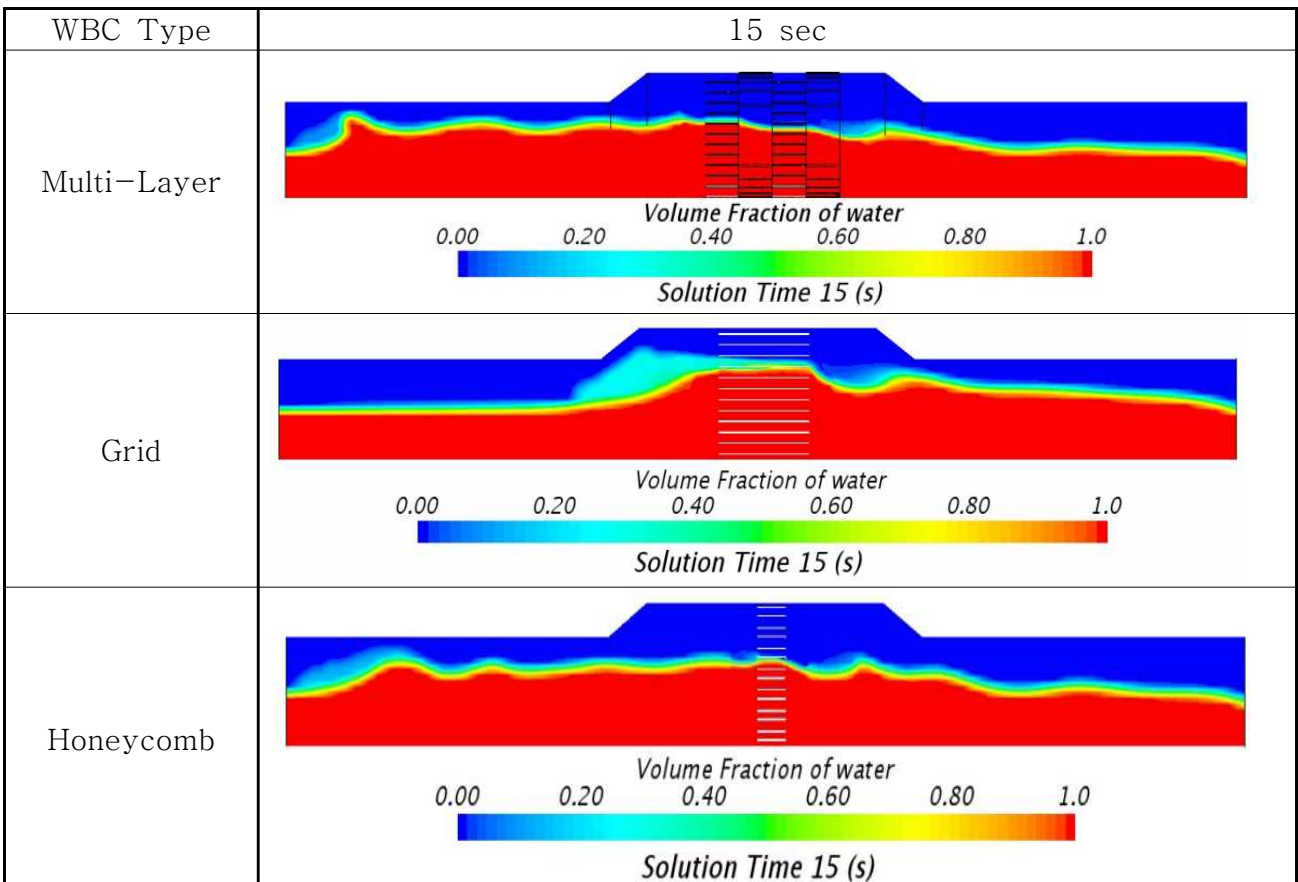
[표 65] 15초 경과후 배수 흐름 비교

관경 125mm, 배수유입 : 1.0m/s



[표 66] 15초 경과후 배수 흐름 비교

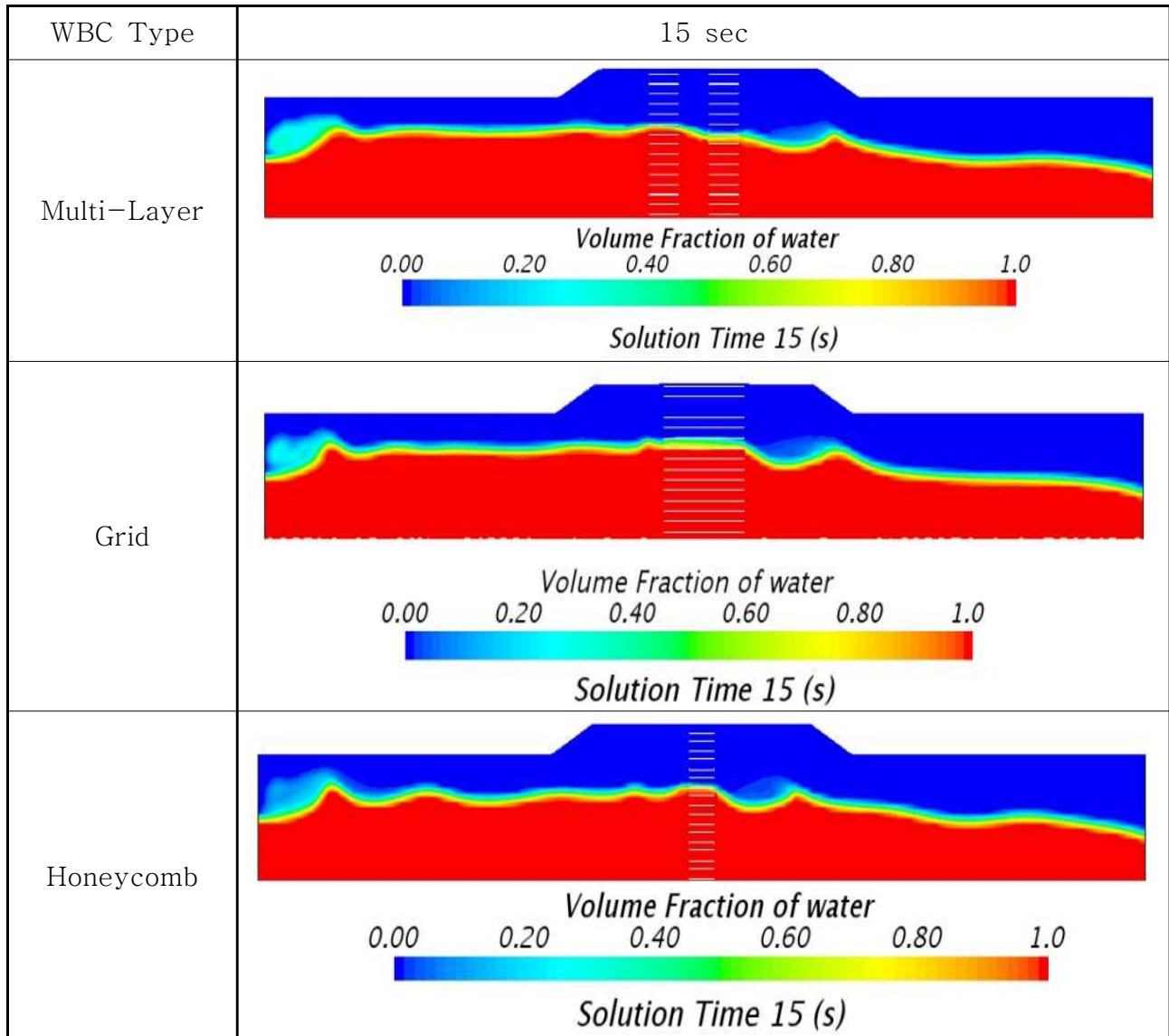
관경 150mm, 배수유입 : 1.0m/s



배수관의 관경이 150mm인 경우 배수유입속도가 1.0m/s일 경우 각 도파관의 형태에 따라 배수의 흐름을 비교한 결과 배수 수위의 상승면 에서는 큰 차이가 없었지만 도파관 배열을 통과한 배수는 다층형 도파관을 사용한 경우가 배수 수면이 상대적으로 안정되는 것으로 나타났으며, 4각형 형태의 도파관을 사용하는 경우 도파관 배열의 부근에서 배수 수면이 배수관경의 90% 이상으로 상승하는 것으로 나타나 가장 불리한 것으로 판단된다.

[표 67] 15초 경과후 배수 흐름 비교

관경 200mm, 배수유입 : 1.0m/s



배관의 관경이 200mm인 경우 배수의 유입이 1.0m/s로 발생하면 도파관 형태별 배수의 흐름은 각 Type 모두 거의 유사한 형태를 보이며 입구부터 도파관 배열까지 배수 수위의 상승이 일어나는 것으로 나타났다. 또한 도파관 배열이 설치된 부분에서 배수 수면의 형태도 유사하며 각 경우 모두 도파관 배열을 통과한 이후에는 배수의 수위가 점차 낮아지는 것을 알 수 있었다.

아. EMP 차폐를 위한 배수관의 형상별 유동 특성

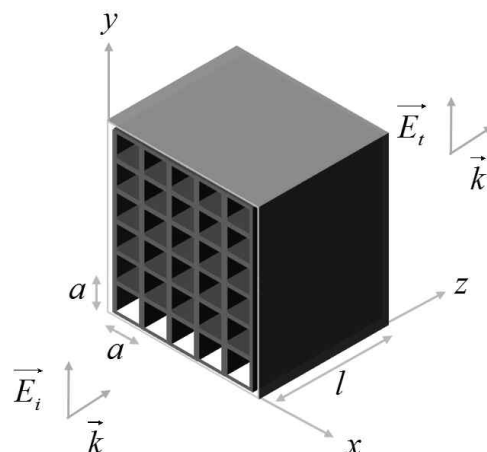
Electromagnetic Pulse (EMP) 공격에 대한 위협이 증가함에 따라 방호기술이 대두되고 있으며, 특히 군사 및 정보통신 건축물에 대한 방호설계가 필수로 자리 잡고 있다. EMP 공격에 노출된 부분에 대해서 차폐물을 설계하여 피해를 예방하며, 차폐물의 차폐정도를 나타내는 척도로 차폐효과 (Shielding Effectiveness, SE)가 쓰인다. 대부분 건축물의 이음새나 결합부 및 개구부를 통해서 전자기파가 투과되므로 각 부분에 대해서 차폐 벽이나 차폐구조물을 인입하여 피해를 차단한다. 기존에 사용되는 차폐방법으로 도파관 창문이나 단일 도파관 배열 및 허니컴 도파관을 이용하여 차폐효과를 높이는 방법이 제시되었다. 하지만 이러한 차폐방법들이 배기관이나 급수관과 같은 유속을 고려해야 되는 부분에 사용될 경우 본래의 배기 및 급수역할을 방해하는 요소가 되기도 한다. 따라서 새로운 구조의 차폐물을 사용해야 하며, 그 방법 중 하나로 다층 구조 도파관이 사용된다. 다층 구조 도파관은 기존의 단일 도파관 배열에 비해 공정의 이점을 가지며 유속 손실을 줄이는 장점을 가지고 있다. 또한, 겹치는 층을 증가시켜 차폐효과를 일정 수준으로 보상할 수 있으므로 건축방호시설에서 유용하게 쓰이게 된다. 하지만 이러한 다층 구조 도파관을 설계할 때, 다층 구조 도파관의 차폐효과를 예측하기 위해서는 EM 시뮬레이션 도구를 이용한 시뮬레이션을 통해 오랜 시간이 걸린 후 결과 값을 얻어낼 수 있으므로 건축 및 전기전자 분야에서 적용하는데 한계로 작용한다.

따라서 차폐방법으로 사용되는 다층 구조 도파관을 고려함으로써 시뮬레이션 없이 수정된 차폐효과 방정식을 통하여 차폐효과를 예측하는 방법을 제시하였다. 또한, 다층 구조 도파관 내부에 상태에 따라서 공기가 채워졌을 경우와 다른 유체가 채워졌을 경우를 고려하여 시뮬레이션과의 비교분석을 통해 방정식의 타당함을 증명하였다.

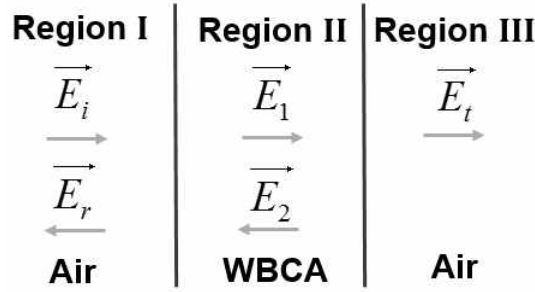
(1) 다층 구조 도파관의 차폐 방정식

(가) 단일 사각형 도파관 배열 차폐 방정식

외부에서 발생된 전자기파는 그림 59과 같은 단일 사각형 도파관 배열을 통과하게 되면서 감쇠 하게 된다. 전자기파가 통과되는 영역에 따라서 그림 60와 같이 정의할 수 있으며, 차폐효과는 입사되는 전자기파와 투과되는 전자기파의 비율로 나타낼 수 있다. 아래 식 (1)은 차폐효과의 정의가 된다.



[그림 59] 단일 사각형 도파관 배열.



[그림 60] 영역에 따른 전기장 정의.

$$SE = 10 \log \frac{P_i}{P_t} = 20 \log \frac{E_i}{E_t} \quad (\text{식 } 34)$$

이때, 단일 사각형 도파관 배열에 입사되는 전자기파가 평면파로 입사된다고 정의하게 되면, 각 영역에서의 전자기파는 경계조건을 만족해야 한다. 즉, 영역 I과 영역 II가 만나는 지점 및 영역 II와 영역 III이 만나는 지점에서의 전기장과 자기장이 연속적 이어야 되며 이를 다음 식 35-38와 같이 표현한다. 이때, 단일 사각형 도파관 배열 내부는 공기로 채워진 경우이다.

$$E_i + E_r = E_1 + E_2 \quad (\text{식 } 35)$$

$$\frac{E_i}{\eta_0} - \frac{E_r}{\eta_0} = \frac{E_1}{\eta_0} - \frac{E_2}{\eta_0} \quad (\text{식 } 36)$$

$$E_1 + E_2 = E_t \quad (\text{식 } 37)$$

$$\frac{E_1}{\eta_0} - \frac{E_2}{\eta_0} = \frac{E_t}{\eta_0} \quad (\text{식 } 38)$$

위에서 나열된 식을 연립하여 입사되는 전자기파와 투과되는 전자기파의 비율을 나타낼 수 있으며, 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 같은 경우 다음과 같이 방정식으로 정의된다.

$$SE = R + A = 20 \log \left| \frac{\eta_0}{4\eta_0} \right| + 20 \log e^{a l} + 20 \log \frac{2ka}{\pi} \quad (\text{식 } 39)$$

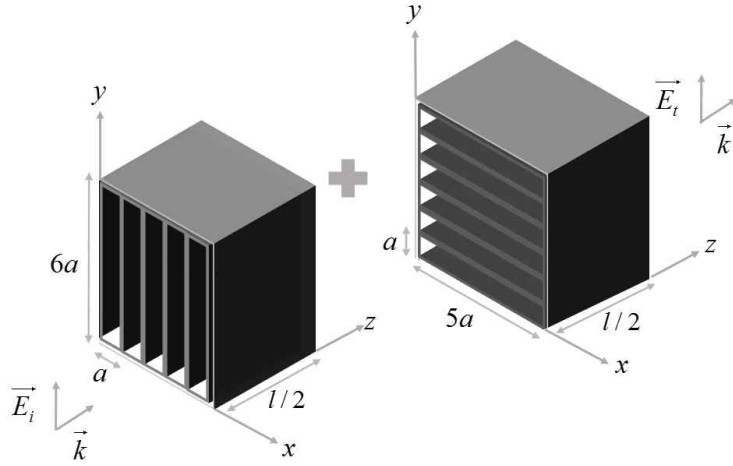
식 39에서 R 은 Reflection loss에 의해 발생된 차폐효과이며 A 는 Absorption loss에 의해 발생된 차폐효과를 나타낸다. 또한, a 는 단일 사각형의 한 변의 길이이며 l 은 도파관 전체길이를 나타내며 k 는 파수이다. α 는 도파관 배열의 감쇠상수로 도파관이 금속일 경우 α 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\left(\frac{f_c}{f} \right)^2 - 1} \quad (\text{식 } 40)$$

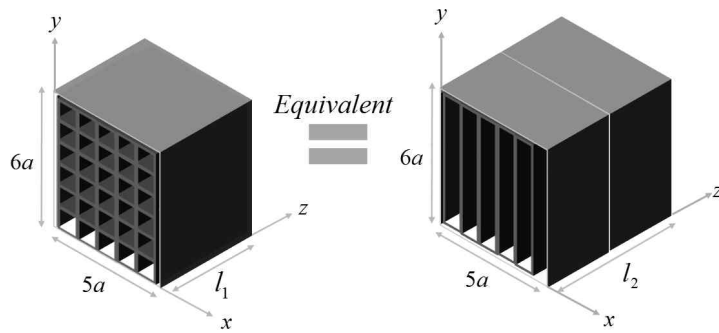
여기서 f_c 는 단일 사각형의 차단 주파수를 의미한다. 따라서 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 방정식은 식 40을 식 39에 대입하여 얻게 된다. 높은 차폐효과를 얻기 위해서는 한 변의 길이 a 를 줄이거나 도파관 전체길이인 l 을 늘려서 만족시킬 수 있다.

(나) 공기로 채워진 다층 구조 차폐효과 방정식

다층 구조 차폐 방정식은 위에서 구한 차폐효과 방정식에서부터 얻을 수 있다. 먼저 다층 구조 차폐 방정식은 도파관 내부에 물질에 따라서 변할 수 있으므로, 크게 공기인 경우와 다른 매질로 채워진 경우로 나눌 수 있으며, 먼저 공기로 채워진 경우에 대한 차폐효과 방정식을 유도할 수 있다.



[그림 61] 2층 구조 도파관.



[그림 62] 2층 구조 도파관의 등가화 모델.

다층 구조 도파관은 평행한 판들을 연결하여 설계할 수 있으며, 평행한 판의 방향에 따라서 세로형 직사각형 도파관과 가로형 직사각형 도파관으로 나누어진다. 그림 61은 2층 구조 도파관을 나타내고 있으며, 세로형 직사각형 도파관과 가로형 직사각형 도파관을 연결하여 설계된다. 단일 사각형 도파관 배열은 도파관 전체 길이 l 을 통과하는 동안 전자기파의 x 성분 및 y 성분이 계속해서 감소되지만, 다층 구조 도파관일 경우, 통과되는 층 방향에 따라서 동일한 방향에 대한 전자기파의 성분만이 감소되므로 단일 사각형 도파관 배열에 비해서 차폐효과가 상대적으로 낮아져서 더 긴 도파관 길이가 필요하다. 즉, 단일 사각형 도파관 배열을 2층 구조 도파관으로 등가화 하면 그림 62와 같이 나타낼 수 있으며 l_2 는 항상 l_1 에 비해서 길어야 된다. 따라서 다층 구조 도파관의 전체길이를 l_{eff} 로 표현하면 표 68에 주어진 *Effective*와 l 값의 곱으로 나타낼 수 있으며, *Effective*는 겹치는 층이 증가할수록 1에 수렴하는 것으로 확인할 수 있다.

[표 68] 다층에 따른 Effective 상수

Number of layers	Effective
2	0.55
4	0.70
8	0.85
16	0.95
32	0.99
64	1.00

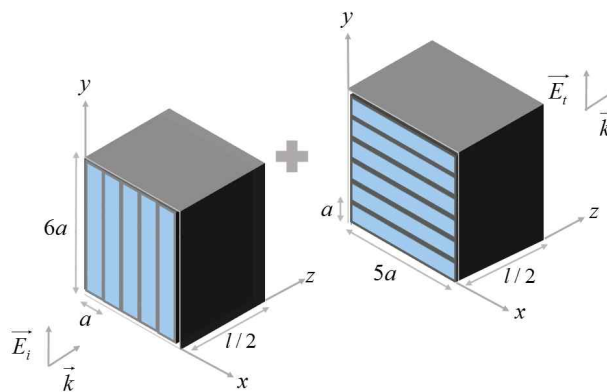
앞서 구한 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 방정식의 l 값을 l_{eff} 으로 치환해주어 차폐효과 방정식을 수정한다. 아래 식 41은 다층 구조 도파관의 차폐 방정식을 나타낸다.

$$SE = R + A = 20 \log \left| \frac{\eta_0}{4\eta_0} \right| + 20 \log e^{al_{eff}} + 20 \log \frac{2ka}{\pi} \quad (\text{식 41})$$

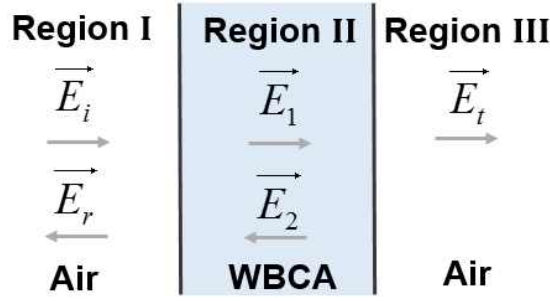
(다) 다른 매질로 채워진 다층 구조 차폐효과 방정식

다층 구조 도파관 내부가 비유전율이 1이 아닌 특정 매질로 채워지게 되면, 차폐효과 방정식은 변하게 된다. 기존에 내부가 공기였을 경우, 입사되는 영역과 투과되는 영역 또한 공기이므로 다중 반사효과가 나타나지 않게 된다. 본래의 차폐효과 방정식은 Reflection loss 와 Absorption loss 및 Multiple-reflection loss로 나타내어진다. 그림 60과 같이 각각의 영역이 공기일 경우, Multiple-reflection loss는 0에 가까워지게 되어 생략된다. 하지만, 도파관 내부가 특정 매질로 채워지게 되면, 매질이 변하는 경계지점에서 다중 반사효과가 발생하여 차폐효과 방정식이 변하게 된다. 그림 63은 2층 구조 도파관 내부에 매질이 가득 채워진 상태를 나타낸다.

그림 64는 다층 구조 도파관 내부에 매질이 채워졌을 때를 도식화한 그림이다. 매질이 변하는 부분에서 다중 반사효과가 일어나는 것을 인지 할 수 있으며, 각 영역에서의 전자기파의 경계 조건을 적용하면 아래와 같이 연립 방정식이 나오게 된다.



[그림 63] 매질이 채워진 2층 구조 도파관.



[그림 64] 영역에 따른 전기장 정의.

$$E_i + E_r = E_1 + E_2 \quad (\text{식 42})$$

$$\frac{E_i}{\eta_0} - \frac{E_r}{\eta_0} = \frac{E_1}{\eta} - \frac{E_2}{\eta} \quad (\text{식 43})$$

$$E_1 + E_2 = E_t \quad (\text{식 44})$$

$$\frac{E_1}{\eta} - \frac{E_2}{\eta} = \frac{E_t}{\eta_0} \quad (\text{식 45})$$

여기서 η 는 매질에서의 임피던스를 나타낸다. 즉, 매질이 차있는 부분에서의 임피던스가 변하게 되며 입사되는 전자기파와 투과되는 전자기파로 연결하였을 때, 차폐효과 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$SE = R + A + M = 20 \log \left| \frac{\eta_0}{4\eta_0} \right| + 20 \log e^{\alpha_{eff}} \quad (\text{식 46})$$

$$+ 20 \log \frac{2ka}{\pi} + 20 \log (1 - R^2 e^{-2\alpha_w l_{eff}} e^{-2\beta_w l_{eff}})$$

[표 69] 다층에 따른 β 상수

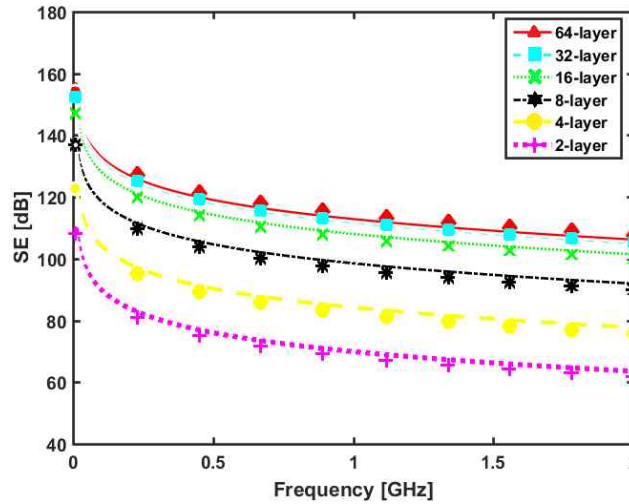
Number of layers	β
2	$\omega \sqrt{\epsilon \mu}$
4	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 2$
8	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 4$
16	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 8$
32	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 16$
64	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 32$

α_w 와 β_w 는 매질에서의 감쇠상수와 위상상수를 나타낸다. 식 39에서 추가된 M 부분이 다중 반사효과로 인한 차폐효과를 나타낸다. 다중 반사효과는 다중 구조 도파관의 차단 주파수 전, 후에 따라서 그 효과가 변하게 된다. 또한, 차단 주파수 전에서는 다층에 따라서 다중 반사효과 정도가 변하게 된다. 이러한 이유는 β 값이 다층에 따라서 변하기 때문이다. 다층이 적을수록 차단 주파수 전에서의 다중 반사 효과가 커지며, 다층이 증가할수록 차단 주파수 전에서의 다중 반사 효과가 줄어들게 된다. 이러한 변화는 다층 개수에 반비례하므로 표 69와 같이 기준의 β 를 정의할 수 있다.

다층이 증가할수록 β 값이 줄어들어서 다중 반사효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 즉, 표 69의 β 상수를 식 39에 대입하면 다층 구조 도파관 내부에 매질이 채워졌을 경우에 대한 차폐효과 방정식이 정의된다.

(3) 다층 구조 도파관의 시뮬레이션 및 차폐방정식 결과 비교

다층 구조 도파관에 대한 차폐효과 방정식의 결과 값은 FEM 시뮬레이션과의 비교를 통하여 타당함을 확인 하였다. 시뮬레이션 조건으로는 세로형 및 가로형 직사각형 도파관의 각각의 가로길이와 세로길이인 a 를 10mm 로 지정하였으며, 도파관의 전체길이는 l 을 35mm 로 지정하였다. 시뮬레이션 결과는 도파관 내부가 공기로 채워졌을 경우와 물로 채워졌을 경우로 나누어서 진행 하였다.



[그림 65] 다층 구조 도파관의 시뮬레이션 및 수정된 차폐 방정식 결과 비교.

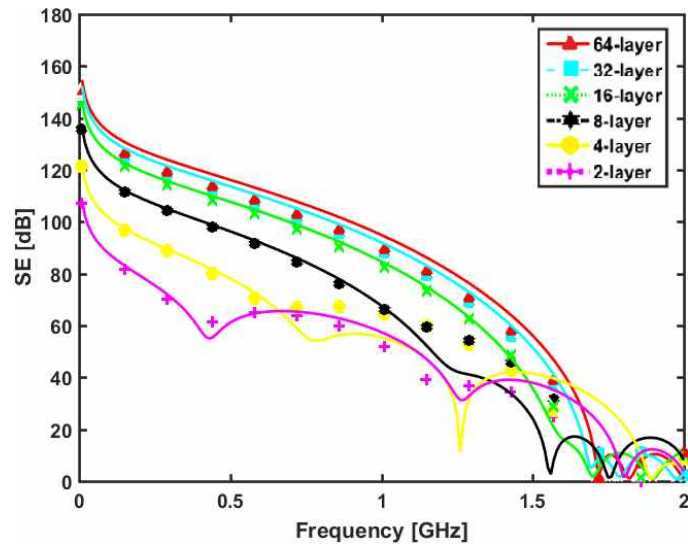
(가) 공기에서의 차폐효과

공기에서의 다층 구조 도파관은 2층 구조부터 64층 구조까지 진행되었으며, 주파수는 2 GHz까지로 진행 되었다. 그림 65는 시뮬레이션과 수정된 차폐효과 방정식을 통해 비교한 그래프이다.

그래프의 선들은 상용프로그램을 통한 결과이며, 도형들은 수정된 차폐효과 방정식을 통하여 얻은 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 결과 값이 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 다층이 증가할수록 차폐효과가 증가하게 되며 일정 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이 경우, 다층 구조 도파관의 차단 주파수를 구하게 되면 $f_c = \frac{v}{2a} = 15\text{GHz}$ 로 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

(나) 물에서의 차폐효과

다음으로는 도파관 내부가 매질로 채워졌을 경우에 대한 차폐효과에 대한 비교이다. 이때, 매질은 순수한 물로 설정하였으며, $\epsilon_r = 81$ 로 주어진다. ϵ_r 값이 변하므로, 차폐효과에서는 차단 주파수가 $1/9$ 로 줄어들게 되며, 다중 반사효과가 추가되게 된다. 이 경우에도 다층 구조 도파관은 2층 구조부터 64층 구조까지 진행되었으며, 주파수는 2 GHz까지로 진행 되었다. 그림 66은 도파관 내부에 물이 채워졌을 경우에 대한 시뮬레이션과 수정된 차폐효과 방정식을 통해 비교한 그래프이다.



[그림 66] 물에서의 다층 구조 도파관의 시뮬레이션 및 수정된 차폐 방정식 결과 비교.

결과에서 볼 수 있듯이, 다층 구조 도파관의 차단 주파수가 $f_c = \frac{v}{2a} \simeq 1.7 \text{ GHz}$ 으로 감소한 것을 확인 할 수 있다. 또한, 차단 주파수 전으로 다중 반사효과가 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 다층 구조가 적은 2층 구조일 경우 효과가 많이 반영이 되었으며 64층 구조로 증가할수록 효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 차폐효과 방정식에 추가된 $M=20\log(1-R^2e^{-2\alpha_w l_{eff}}e^{-2\beta_w l_{eff}})$ 효과에 의해서 시뮬레이션 결과와 차폐효과 방정식 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

(4) 결론

본 보고서에서는 EMP 차폐에 사용되는 다층 구조 도파관의 차폐효과를 예측하기 위해 수정된 차폐효과 방정식을 정의하였다. 기존에 사용되는 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 방정식을 기반으로 수정하여 2층 구조부터 64층 구조까지의 방정식을 구할 수 있었다. 또한, 도파관 내부에 비유전율이 1이 아닌 매질이 채워졌을 경우, 다중 반사효과 및 차단 주파수에 대한 변화를 고려하여 더 넓은 범위에서 사용될 수 있도록 방정식을 수정하였다. FEM 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때, 수정된 차폐효과 방정식의 결과 값이 일치하는 것을 확인하였다.

건축설계 상황을 고려하여 적절한 다층 구조 도파관을 제작할 경우, 제안된 수정된 차폐효과 방정식을 사용하면 시뮬레이션 없이 결과 값을 예측 할 수 있으므로, 전기전자 분야 뿐 아니라 EMP 건축 설비분야에서도 많은 이점을 얻게 될 것이다.

자. 유류관의 EMP 차폐

(1) 비상발전기용 유류관 설치일반

EMP 도파관이 설치되는 군 지휘시설, 전산시설 및 사회간접자본시설의 경우 재난상황에 따라 일정시간동안 건물의 최소기능유지에 필요한 전기에너지를 공급하기 위해 비상발전기가 설치되어 있으며, 기능유지에 필요한 최소한의 전력량과 공급시간에 따라 다양한 규모의 비상발전기가 설치된다.

일반적인 비상발전기의 경우 부하의 종류에 따라서 다음 표 70 과 같은 최저 작동시간 동안 전기를 공급하는 용량으로 설치해야 한다.

[표 70] 부하의 종류에 따른 비상용발전기 최적 작동시간

부하의 종류	내 용	법적 최저동작시간
동력 및 전달장치	오수,배수,양수펌프 소화펌프,자동화재설비 전원 엘리베이터,환기 팬,충전기 컴퓨터,중앙감시 제어반 기타 보안상 필요한 부하	30분
전등부하	보안등(계단,복도,비상등) 지하실,무창층 및 창이없는 방의 전 등 변전실, 전화교환실 각 사무실의 전등부하 기타 보안상 필요한 부하	30분
소방법에 의한 부하	소화설비(소화전,스프링 쿨러) 비상 콘센트설비, 배연설비 자탐설비,비상경보설비,유도등 무선통신 보조설비 증폭기	30분 이상
사업자설비 이외의 전기통신설비에 대한 전원설비설치 기준	구내교환설비로서 국선용량이 10회 선 이상의 것(정전이 되어도 국선으 로부터의 호출에 대하여 응답이 가 능한 것은 제외한다)	최변시 소비전류로서 3시간 이상 유지
건축법에 의한 부하	비상용 조명장치 배연설비 비상용 배수설비 비상용 엘리베이터	30분 이상 단, 엘리베이터는 1시간
의료법에 의한 부하	수술실 등.	용 량(의료법 시행규칙 별표3) 공공전기시설을 사용하지 아니하더라 도 당해 의료기관의 필요한 곳에 공급 할 수 있는 자가발전시설을 갖추어야 한다. 성 능 10초 이내에 정격전압을 확립할 수 있 을 것. UPS 적용.

이러한 비상발전기는 다양한 정의에 따라 분류할 수 있는데[3.12], 부하기능에 따라 비상용발전기, 상용발전기, 피크등의 다양한 형태가 있으며, 구동방법 및 연료에 따라 디젤/가솔린, 가스 터빈형으로 분류할 수 있다. 설치방법에 따라 대용량에 적용되는 고정 거치형과 200kVA 미만에 적용되는 이동형 비상발전기가 있다.

초기시동방법으로 일반적인 전기식방식과 방폭지역에 사용하는 특수한 형태의 공기식을 채용하고 있으며, 공기식을 채용하는 경우 6 회 이상의 기동용량의 압력탱크가 필요하며, 압력유지 장치로는 20~30 kg/cm²의 압력유지장치가 필요하다.

비상발전기의 냉각방식은 주로 소용량에 사용되는 공기냉각식방법과 수배관을 이용하는 수냉식으로 구분할 수 있는데 공기냉각식의 경우 용량이 500kVA 미만으로 제한되며, 대용량의 경우 독립순환식과 냉각탑과 연계된 냉각탑 순환식, 방류식으로 구분된다.

비상발전기의 연료소비량(Q)은 발전용량(L)과 연료소비율 등을 이용해 다음의 식 47을 활용하여 계산할 수 있으며,

$$Q(\text{kg/h}) = [L(\text{kVA}) \times \text{역률}(\text{pf}) \times \text{연료소비율}(\text{b})] / (0.736 \times \text{발전기효율} \times 1000) \quad (\text{식 47})$$

1 시간당 연료소비율(b)는 일반적으로 다음과 같다.

- 고속 소형기관(170~180 g/psi h)
- 중속 소 용량기관(160~170 g/psi h)
- 중속 대 용량기관(150~160 g/psi h)
- 저속 대 용량기관(145~160 g/psi h)

위 사항을 고려하여 발전용량과 필요전압이 주어지는 경우의 연료소비량은 다음 표 71과 같이 계산할 수 있다.

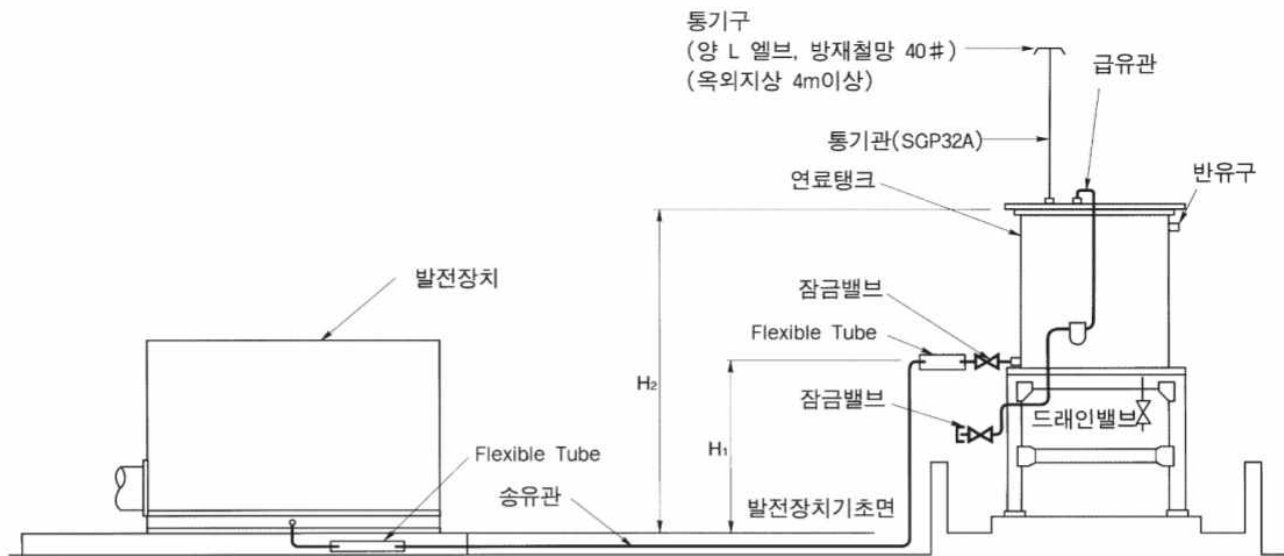
[표 71] 비상발전기 용량별 연료소비량(역률 0.8, 경유 기준)

발전용량(kVA)	전압(V)	연료소비량(L/h)
187.5	380/220~6,600	115
225		125
250		135
300		145
500		260
750		305
1,000		465
1,500		620
2,000		695
4,000	3,300/6,600	1,390
5,000		1,835
6,000		2,050

일반적인 발전기실은 건물기초와 연관이 없는 장소에 발전기의 기초를 설치하여야 하며, 적절한 방진조치를 수행한다. 공기압축기는 냉각수배관이 용이하고 분해 조립할 수 있는 공간을 확보하여야 하고, 공기탱크는 시동기관 공기구 입구 근처에서 핸들이 조작이 쉬운 곳에 위치하도록 한다. 아울러 연료저장시설은 연료펌프보다 1m 이상의 높이에 설치하고 통로에 방해가 되어서는 안 된다.

특히 특수시설의 경우 송유관을 통해서 유입되는 전자기파가 비상발전기의 운전 신뢰성에 크게 영향을 미치기 때문에 발전장치와 연결된 급유관에 있어서 적절한 전자기파 차폐조치가 필요하다.

외부에서 연료를 공급받아 사용하는 비상발전기는 연료탱크와 접속하게 되는데 개략적인 구조는 다음 그림 67 과 같다.



[그림 67] 비상발전기와 연료탱크 결합 일반

연료탱크에 사용하는 급유관의 직경은 비상용발전기의 용량에 따라 SGP 15A ~40A 까지 다양한 관경이 사용되고 있으나 연료탱크와 발전장치의 연결부위인 송유관의 경우 발전장치의 안정적인 운전을 위해 SGP 25A, 32A 를 주로 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 해당 두 관경에 대하여 유효한 차폐관의 형상과 구조를 탐색하고자 한다.

(2) 유류관 해석 조건

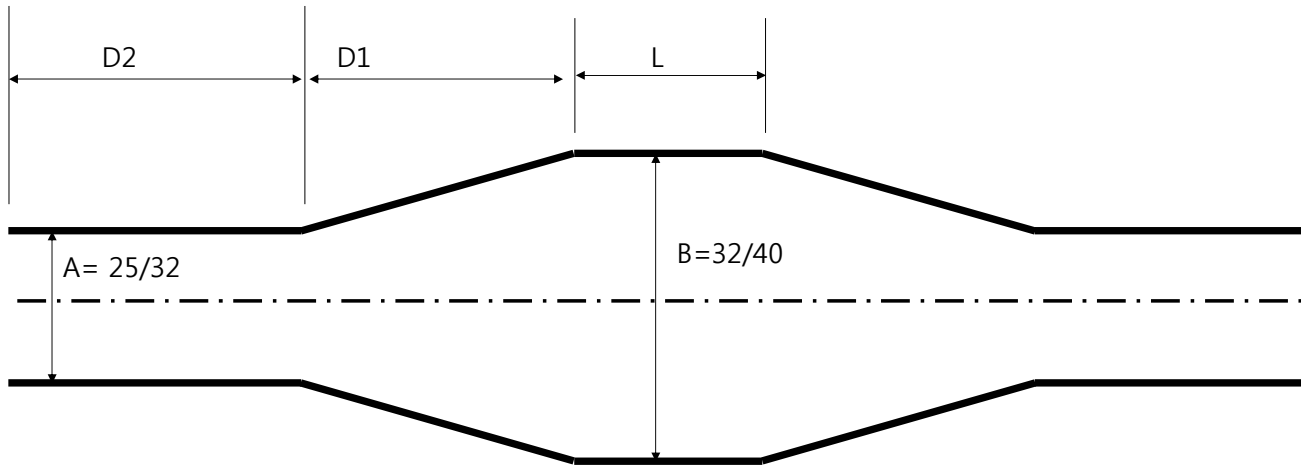
(가) 배관접합부의 기하학적 형상

일반적으로 사용되는 급유관의 관경 SPG 25A 와 32A 를 사용할 때 동일 관경으로 도파관을 설치하는 경우 관로내 저항의 급격한 증가와 함께 유체거동의 불안정으로 인한 압송손실이 발생하여 비상발전기의 안정적인 연료공급이 어려워지기 때문에 급유관로에 설치되는 도파관은 다음 그림 68 과 같이 1 치수가 큰 배관을 활용하여 구성하며, 유체의 이송을 적절히 보장할 수 있도록 중심이음의 플랜지 형태로 구성한다.

일반적으로 사용되는 급유관의 관경 SPG 25A 와 32A 를 사용할 때 동일 관경으로 도파관을 설치하는 경우 관로 내 저항의 급격한 증가와 함께 유체거동의 불안정으로 인한 압송손실 및 캐비테이션이 발생하여 비상발전기의 안정적인 연료공급이 어려워지기 때문에 급유관로에 설치되는 도파관은 다음 그림 68 과 같이 1 치수가 큰 배관을 활용하여 구성하며, 유체의 이송을 적절히 보장할 수 있도록 중심이음의 플랜지 형태로 구성한다.

도파관의 관경(B)는 주관경이 25A의 경우 32mm를 주관경이 32A인 경우 40mm를 산정하고 전체 도파관의 두께(L)은 차폐계수(SC=80, 100 dB)에 따라 앞서 결정된 치수를 사용한다.

주관경과 도파관의 접합부의 접합길이(D1)은 주관경의 1.5 배를 적용하여 계산되었으며, 유체의 거동이 충분히 반영될 수 있도록 접합부 주변의 주배관 길이(D2)는 주관길이의 5 배(5*A)를 산정하여 유체가 그 특성을 충분히 발현할 수 있도록 하였다.



[그림 68] 급유관과 도파관의 접합부

(나) 도파관의 단면형상 및 두께 산정

도파관의 단면형상의 경우 앞서 급유관, 배수관과 동일하게 정사각형 단독, 육각형 단독, 유체통과길이를 이용한 다층(4층, 6층)적층구조에 대한 분석을 수행하였으며, 필요 차폐효과에 따른 각 단면형상별 필요길이(L)은 다음 표 72와 같다.

동일 차폐계수를 동일 유체통과단면길이를 활용해 도파관을 구성하는 경우 정사각형 및 다층구조에 비해 육각형의 단면형상이 도파관의 두께를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

[표 72] 차폐계수와 유체통과 단면길이에 따른 필요 도파관 두께

SE (dB)	유체통과 단면길이 (mm)	도파관 두께(L)*			
		정사각형	육각형**	4층구조	6층구조
80	5	9	6	13	11
	10	22	16	34	27
100	5	13	9	19	16
	10	29	21	45	39

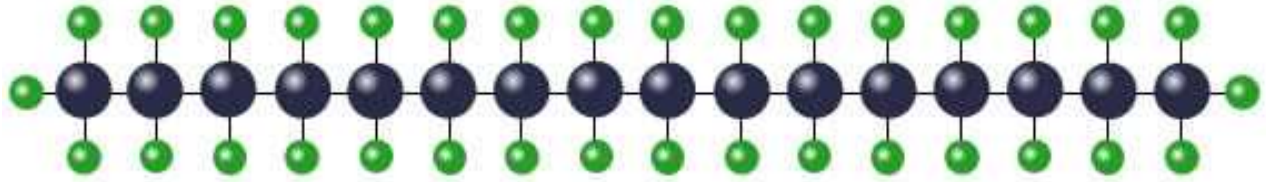
*철판의 두께를 2mm로 산정시 필요두께

**육각형구조의 경우 유체통과단면길이는 대각선의 길이로 산정

(다) 전달유체

비상발전기의 경우 다양한 연료(경유(디젤유), Fuel #6, 가솔린, 천연가스)가 사용되고 있지만, 본 연구의 해석대상 유체는 가격이 상대적으로 저렴하지만 오염원 배출이 낮아 비상용발전기에 주로 사용되고 있는 디젤유를 선정하였다.

디젤유의 화학적 구성 및 유체역학적 물리적 특성은 다음 그림 69 와 표 73 과 같다.



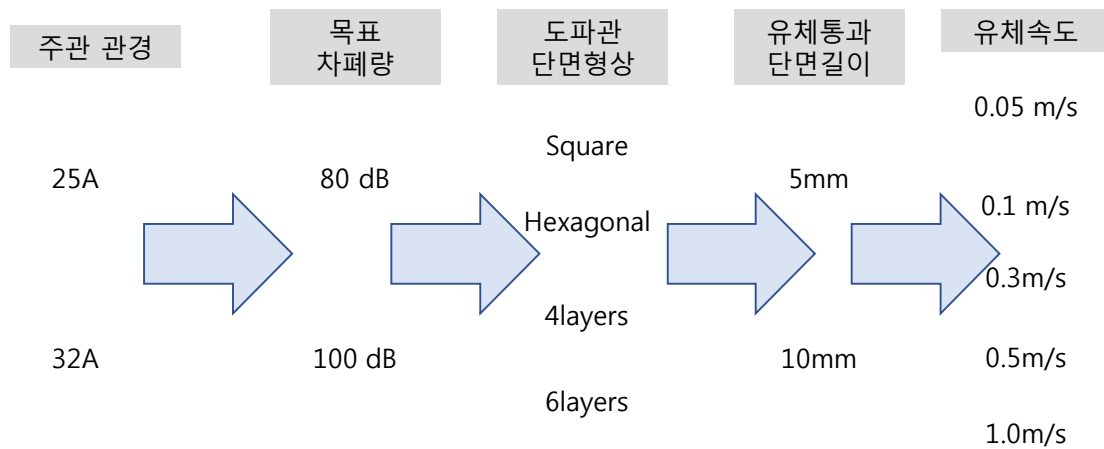
[그림 69] 디젤유(C16H34)의 화학적 조성

[표 73] 디젤유의 물리적 특성

항목	물리량
분자량	184.43 g/mol
밀도	830 kg/m ³ (780~860 kg/m ³ at 40 °C)
열팽창계수	800 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹ . 880 kg/m ³
냉각점	-30 °C
점성	3 · 10 ⁻⁶ m ² /s (2.0E-6~4.0E-6 m ² /s at 40 °C)
증기압	1~10 kPa at 38 °C
Cetane number	45 (44~50)
발열량	HHV=47 MJ/kg, LHV=43 MJ/kg
열용량	2.05 kJ/kg-K

(라) 해석조건

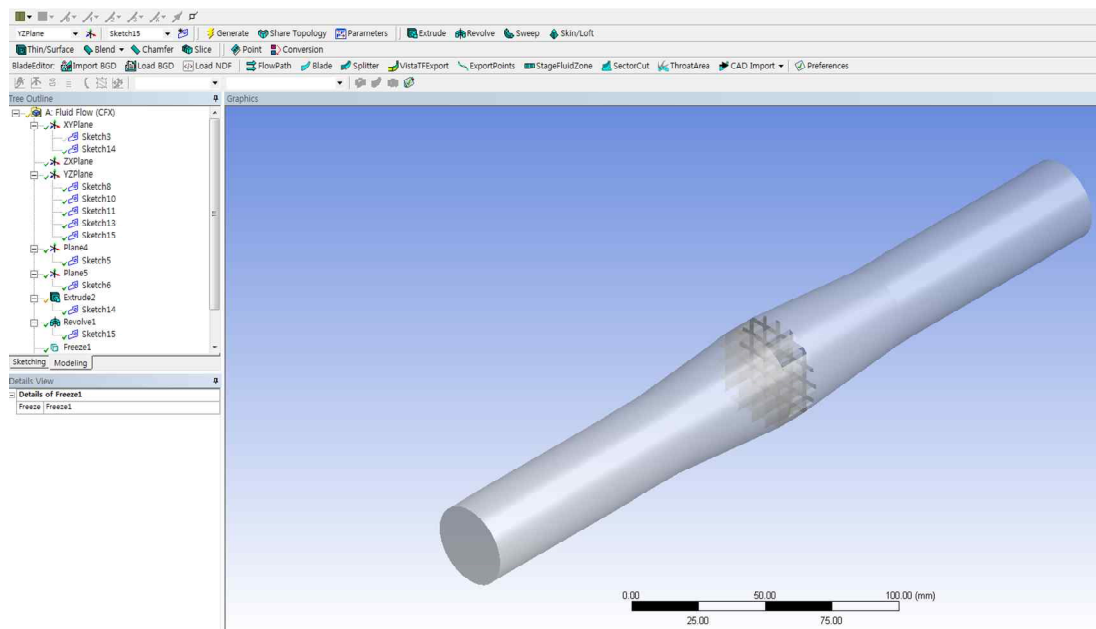
비상발전기 급유관의 도파관 설치에 따른 유체이동 특성을 분석하여 적절한 급유펌프의 필요압력을 파악하기 위하여 주관종류(2 종), 필요차폐계수(2 종), 단면형상(4 종), 유체통과단면길이(2 종) 및 유체속도(5 종)에 대해 다음 그림 70 과 같은 조합으로 160 개의 해석조건을 도출하였으며, 이에 대하여 전산유체해석 모델을 개발하고 관로 전체의 정압해석과 함께 도파관 전후단의 전압(Total pressure)차이를 계산하여 도파관에 따른 국부저항을 계산하였다.



[그림 70] 해석대상

(마) 해석도구

전산유체역학을 통한 유체의 유동에 대한 해석은 연구자들이 스스로 개발하는 코드를 사용하거나, Openfoam, Code-Sature 등의 오픈소스코드를 사용하고 있다. 본 연구에서는 결과의 신뢰성 및 주요변수의 변동에 대한 검토속도를 향상시키기 위하여 Commercial CFD 코드의 하나인 ANSYS CFX 17.1을 사용하였다. CFX는 실제 자연계의 유체상태인 Multiphysics를 응용할 수 있도록 구성되어 있으며, 세계적으로 신뢰성과 정확도를 인정받고 있다. 특히, 회전 유체분야와 같은 고성능 유체해석에서의 높은 정확성이 인정되고 있으며, 다상의 공간에 대한 해석능력이 뛰어나다는 평가를 받고 있다. 다음 그림 71은 ANSYS Workbench Model 내에서 실험대상 조건에 대한 모델링의 결과의 예를 나타낸다.



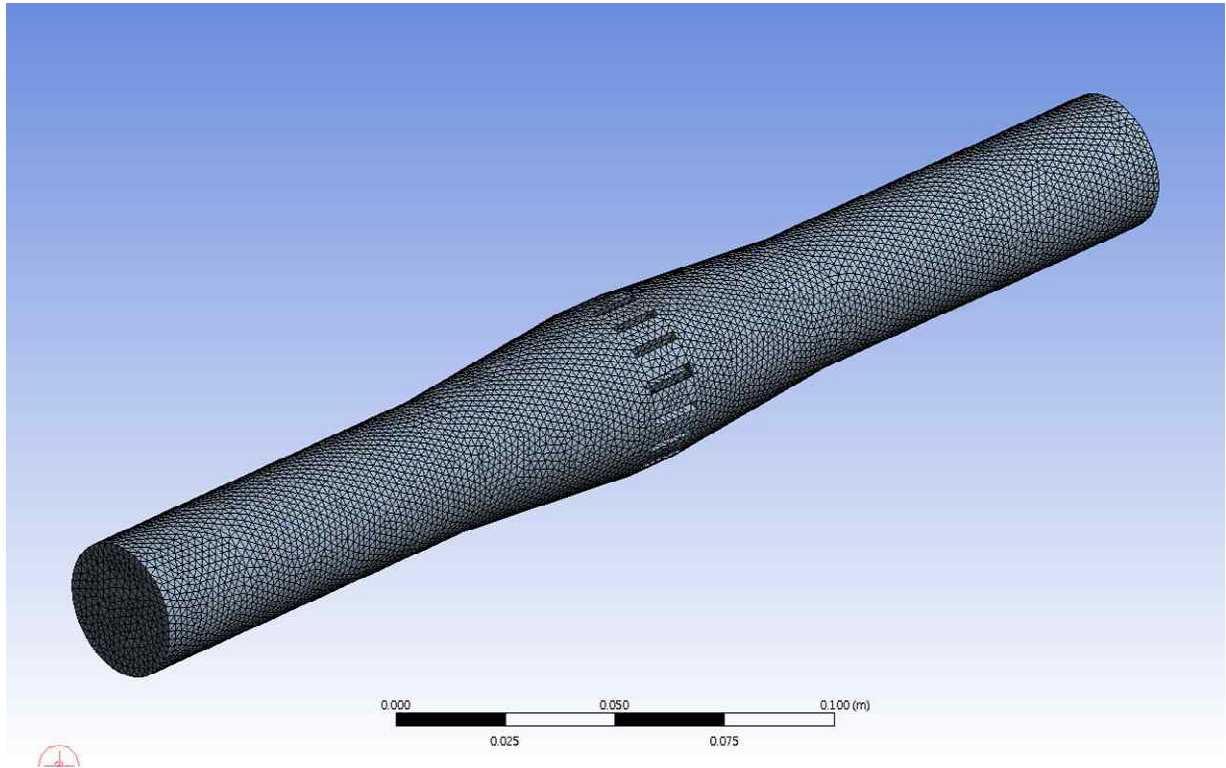
[그림 71] Geometry 개발

(바) 격자체계구성

아주 작은 면적 또는 부피에 대한 에너지 밸런스 해석을 위해서는 격자체계를 적절히 구성하는 것이 매우 중요하다. 앞서 언급된 격자체계 구성방법 가운데 유체이동에 따른 Internal force 해석에 용이한 구성을 가지는 Hex dominant option을 활용하였으며, 격자체계에 따른 해석결과의 상이성을 검토한 결과 격자체계의 단위크기가 작아질수록 해석결과가 달라지지만,

최소 Body size $1.0E-5m$, 최대 Body size 경우 $1.0E-3m$ 의 이하에서는 해석결과의 차이가 없으므로, 해당 크기의 사이즈를 기본으로 설정하였다.

이러한 격자체계를 가지는 경우, 환경이 크기와 도파관의 구조에 따라 격자개수가 달라지나, 노드(Node)개수의 경우 65,000~98,000 개, Element 개수는 346,720~435,320 개를 형성하게 된다.



[그림 72] Mesh condition

(사) 해석방법

앞서 전산유체역학이론에 설명된 다양한 난류거동이론 모델중 일반 k-e 모델을 난류해석방법으로 적용하였으며, 관내 유체의 상태를 연속유체(Continuous fluid)로 적용하여 해석하였다. 비록 유체속도가 빠른 관개로 중력(Gravity)이 없는 상태이며, 외부와의 열교환이 없는 Isothermal 상태의 유체이동이긴 하나 비중이 높은 전달유체의 특성상 1 차적으로 중력가속 (9.8 m/s^2)을 적용하였다. 급유관내의 마찰저항에 따른 유체의 거동을 적절히 처리하기 위하여 Scalable 함수를 활용하여 관내벽체 및 도파관 통과 유체의 특성을 분석하였다. 부력에 따른 난류거동 및 관내 온도에 따른 복사에너지는 negligible 조건으로 입력하였다.

편미분차항 해석을 위한 Advection 스키마는 High resolution 을 이용하였으며, 난류해석을 위한 산정식은 앞서 설명된 다양한 방법 가운데 1 차항(First order)정리를 활용하여 계산을 수행하였다. 이산화 방법식은 앞서 설정된 연속방정식을 이용하여 해석하고, 수렴조건은 Root Mean Square 오차를 활용하는 기법을 적용하였으며 압력장과 속도장의 RMS 가 $1.0E-4$ 에 이르면 해석을 종료하는 조건을 적용하였다.

(3) CFD 해석결과

(가) 25A 급유관

① 차폐계수(SE) 80dB 조건

주관의 관경이 25mm 이고 도파관의 관경이 32mm 인 조건하에서 EMP 차폐목표치가 80dB 인 조건에서 관내유체(디젤유)의 속도가 0.05~1.0m/s 로 변화하는 경우에 대한 해석을 수행하였다.

다음 표 74~75 는 유체통과 단면길이(a)가 5mm 인 도파관이 설치된 조건하에서 관내유체 속도가 각각 0.05 m/s 과 1.0 m/s 로 적용하는 경우 $Y=0.003m$ 지점에서의 관내 유체압력분포를 나타낸다. 저속구간인 0.05 m/s 의 입력유속이 발생하는 경우 도파관을 통과시 격벽에 따른 마찰저항으로 인해 일부구간에 대한 압력강하가 크게 발생하게 되고 도파관이후 구간에서는 압력을 회복하는 양상을 보이고 있다. 동일 유체입구 속도하에서의 관내 전압변동을 살펴보면 4 layer 특히 각형(square)의 경우 출구근처에서 역압이 발생하여 원활한 연료공급이 어려운 것으로 판단된다. 중-고속 유체속도인 1.0 m/s 에서는 도파관 통과즉시 속도가 회복됨과 동시에 높은 유체속도에 의한 역압이 발생하였다. 이러한 현상은 유류관의 관내속도가 0.3m/s 이상이 발생하는 경우 주관 25A 의 급유관에 도파관을 설치하는 것은 원활한 연료공급이 용이하지 않다는 것을 의미한다.

다음 표 76-78 은 유체통과 단면길이(a)가 10mm 인 도파관이 설치된 조건하에서 관내유체속도가 각각 0.05 m/s 과 1.0 m/s 로 적용하는 경우 $Y=0.003m$ 평면에서의 관내 유체압력분포를 나타낸다. $a=5mm$ 의 조건에 비하여 단면통과유량이 증가함에 따라서 압력손실량이 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 저속구간의 경우 각형(Square)를 제외하고 다른 형태의 도파관의 경우 출구측 압력이 양압을 유지하고 있으나, 속도증가에 의한 유체거동의 불안정이 예상된다. 고속 유체속도인 1.0 m/s 에서는 단면통과유량이 증가함에도 불구하고 도파관을 통과한 유체의 속도가 과도하게 발생하여 역압이 발생하는 것으로 예측되었다. 특히 다층형구조(4-layer, 6-layer)의 경우 역압증가양상이 크게 나타나 해당 주관에 적용시 원활한 연료공급이 어려운 것으로 판단된다.

다음 그림 73 과 74 는 $a=5mm$, $a=10mm$ 를 가지는 도파관이 설치될 때, 차폐계수가 80dB 인 도파관 전-후단부의 전압손실(ΔP)을 나타낸 그래프이다.

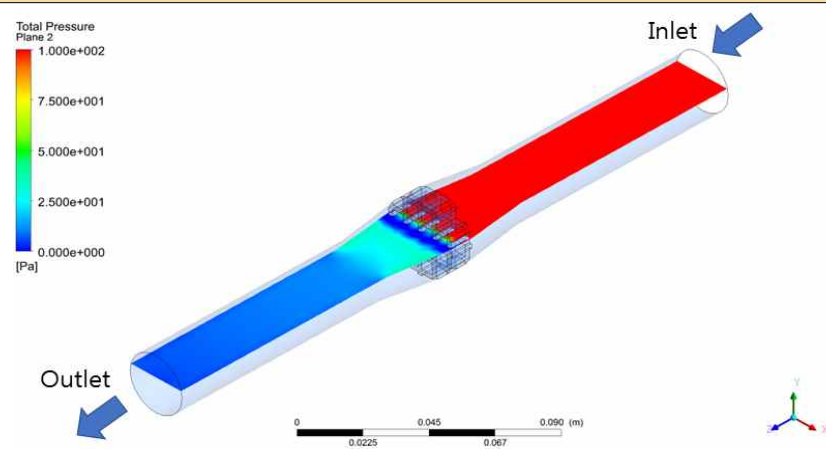
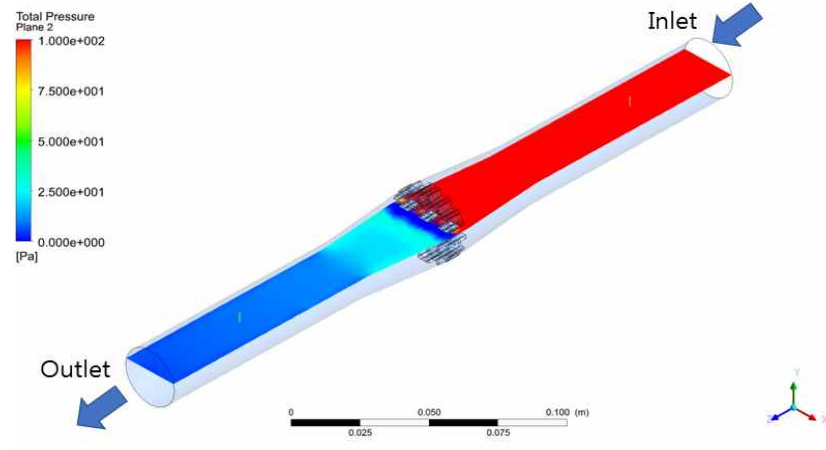
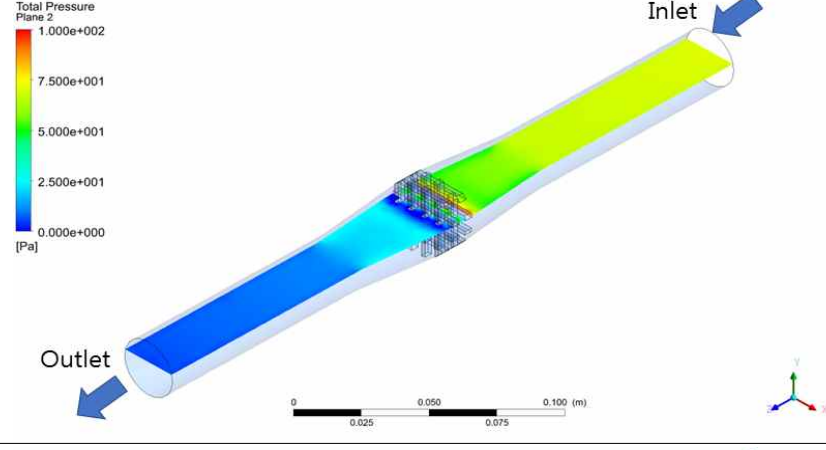
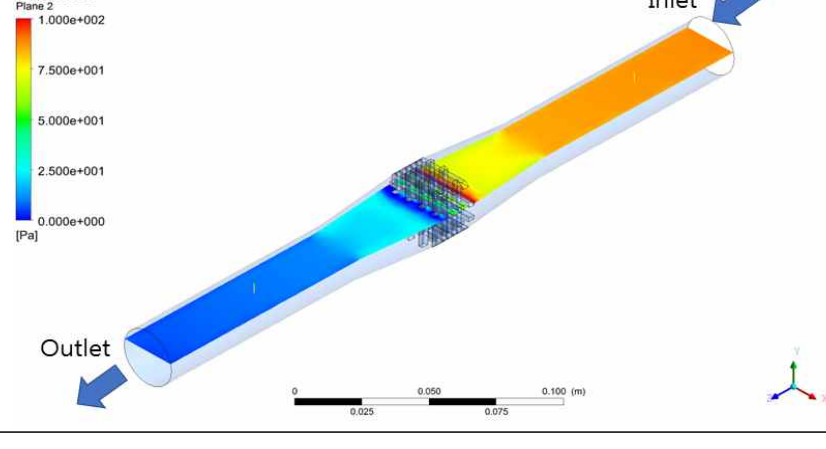
$a=5mm$ 의 경우 도파관 전후의 전압손실은 4-layer<6-layer<Hexagonal<Square 순으로 크게 나타났으며, 동일한 입구유속을 가지는 경우 4-layer 구조가 가장 전압손실량이 작은 것으로 나타났다. 특히 속도증가에 따른 압력손실량이 기하급수적으로 증가하게 되는데 이는 도파관의 형상이 복잡해질수록 도파관 인근의 유류속도가 높아지는 원인으로 판단된다. $a=10mm$ 의 경우 도파관 전후의 전압손실량의 크기순서는 $a=5mm$ 의 경우와 유사한 패턴을 보이고 있으나, 도파관의 단면에 따른 압력손실의 차이는 크게 나타나지 않았다.

② 차폐계수(SE) 100dB 조건

주관의 관경이 25mm 이고 도파관의 관경이 32mm 인 조건하에서 EMP 차폐목표치가 100dB 인 조건에서 관내유체(디젤유)의 속도가 0.05~1.0m/s 로 변화하는 경우에 대한 해석을 수행하였다.

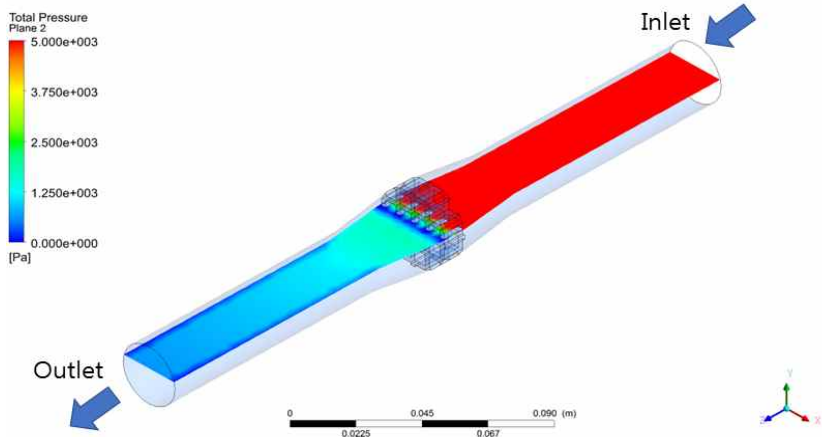
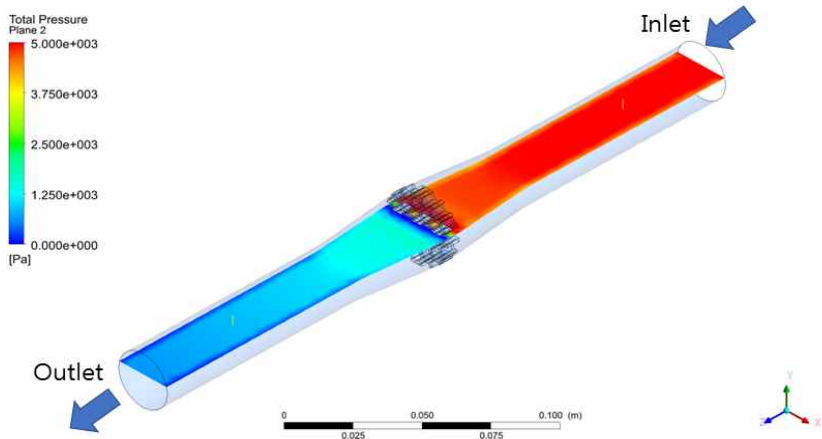
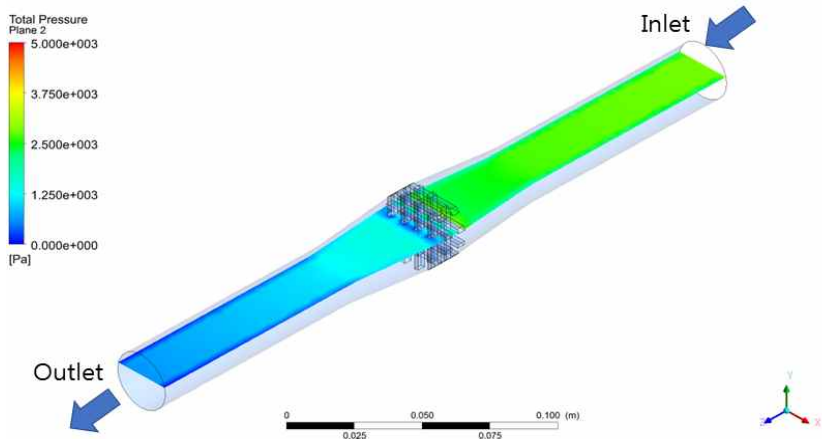
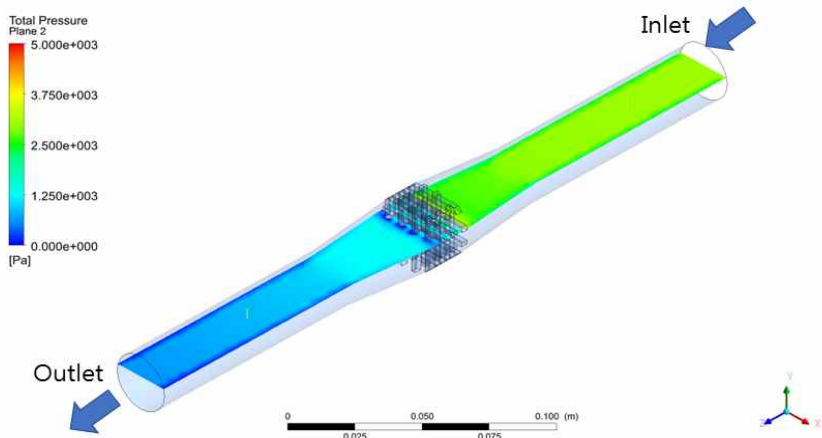
다음 표 77-78 은 유체통과 단면길이(a)가 5mm 인 도파관이 설치된 조건하에서 관내유체 속도가 각각 0.05 m/s 과 1.0 m/s 로 변하는 경우 $Y=0.003m$ 지점에서의 관내 유체압력을 나타낸다. 목표차폐계수 80dB 와 유사한 패턴을 보이고 있으나, 압력강하 및 압력분포에서 4-layer 구조가 가장 안정적인 것으로 나타났다. 그 외의 조건으로는 6-layers 구조가 square 와 Hexagonal 은 저속 유체에서는 square 가 고속구간에서는 Hexagonal 구조가 유리한 것으로 파악된다. 차폐계수 80dB 에 비하여 동일한 유속에서 도파관의 두께가 증가함에 따라 유체의 속도상승의 증가가 예측되며, 이에 대한 압력불균형이 발생할 수 있다.

[표 74] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포 (25A, a=5mm, SE=80dB)

도파관형상	해석결과	관내 평균압 력손실 (Pa)
Square		186.36
Hexagonal		158.61
4-layers		60.30
6-layers		78.17

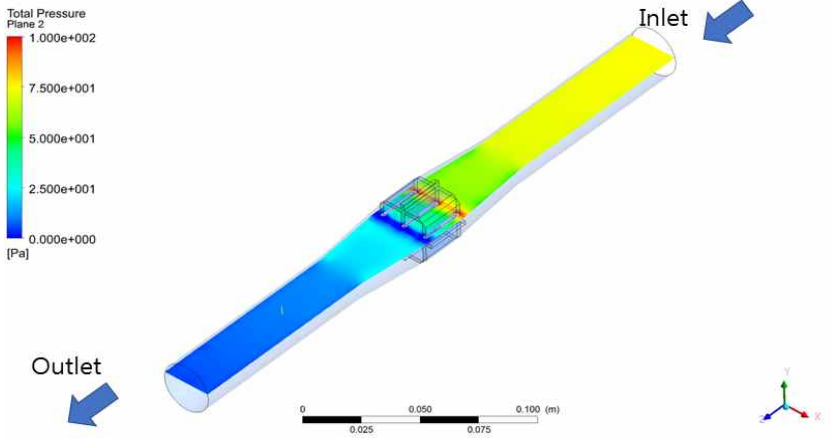
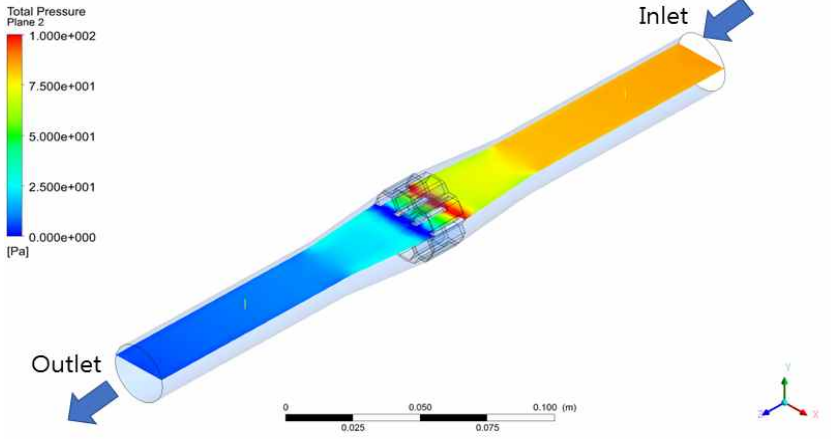
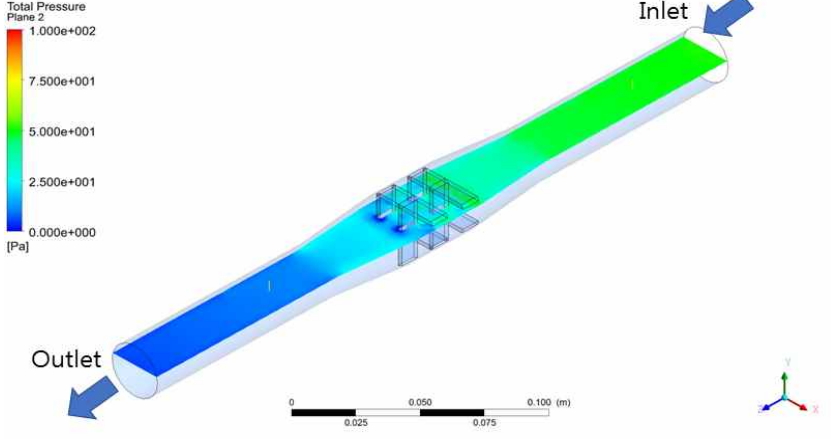
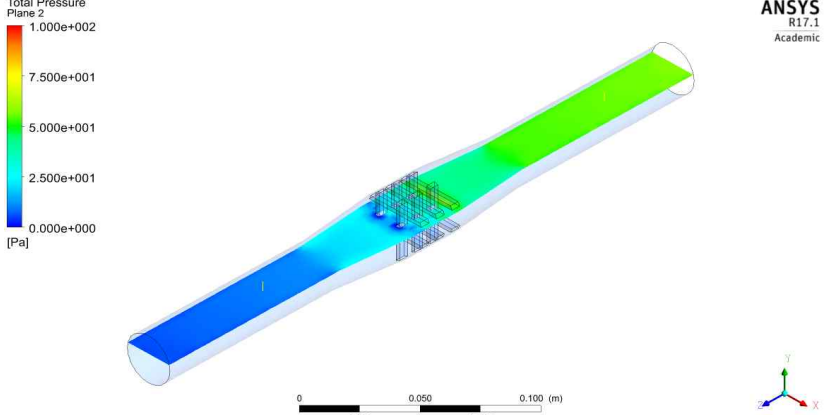
*1atm 기준 상대압력

[표 75] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(25A, a=5mm, SE=80dB)

도파관형상	해석결과	관내 평균압 력손실 (Pa)
Square		5152.779
Hexagonal		4317.31
4-layers		1276.78
6-layers		2206.91

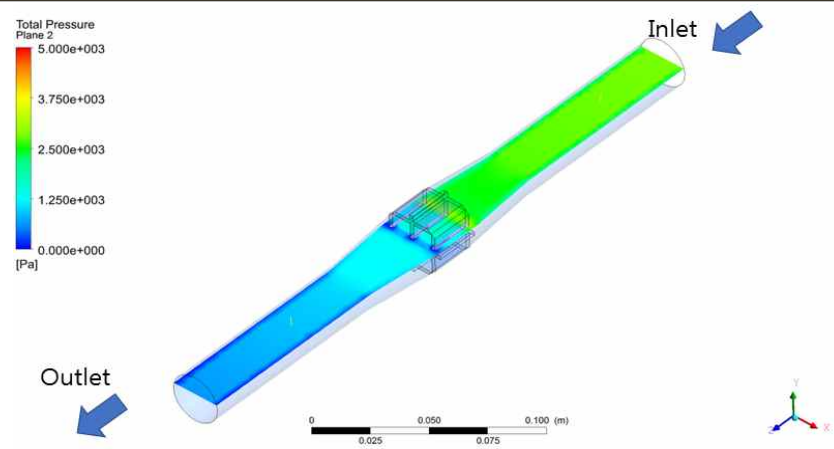
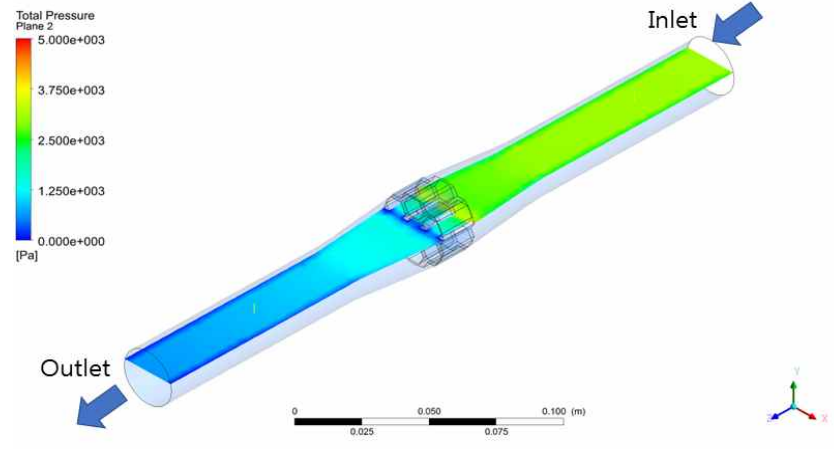
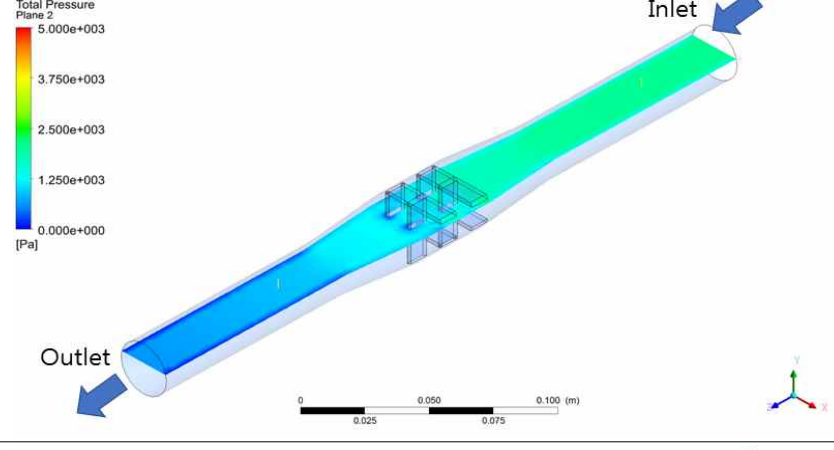
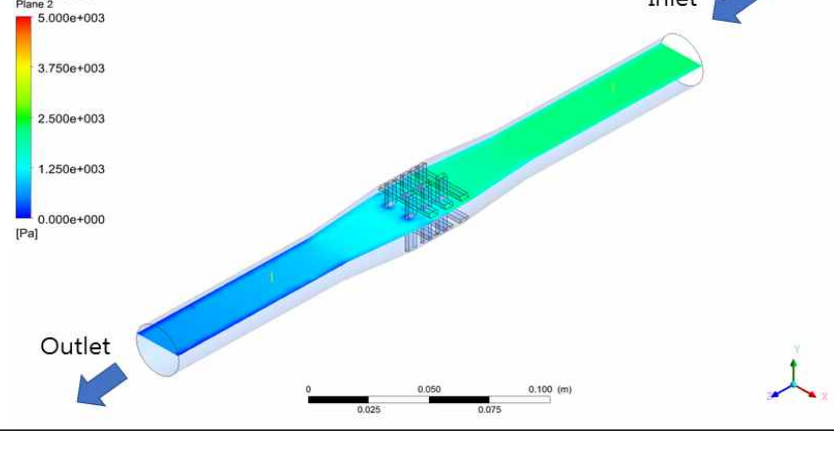
*1atm 기준 상대압력

[표 76] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포(25A, a=10mm, SE=80dB)

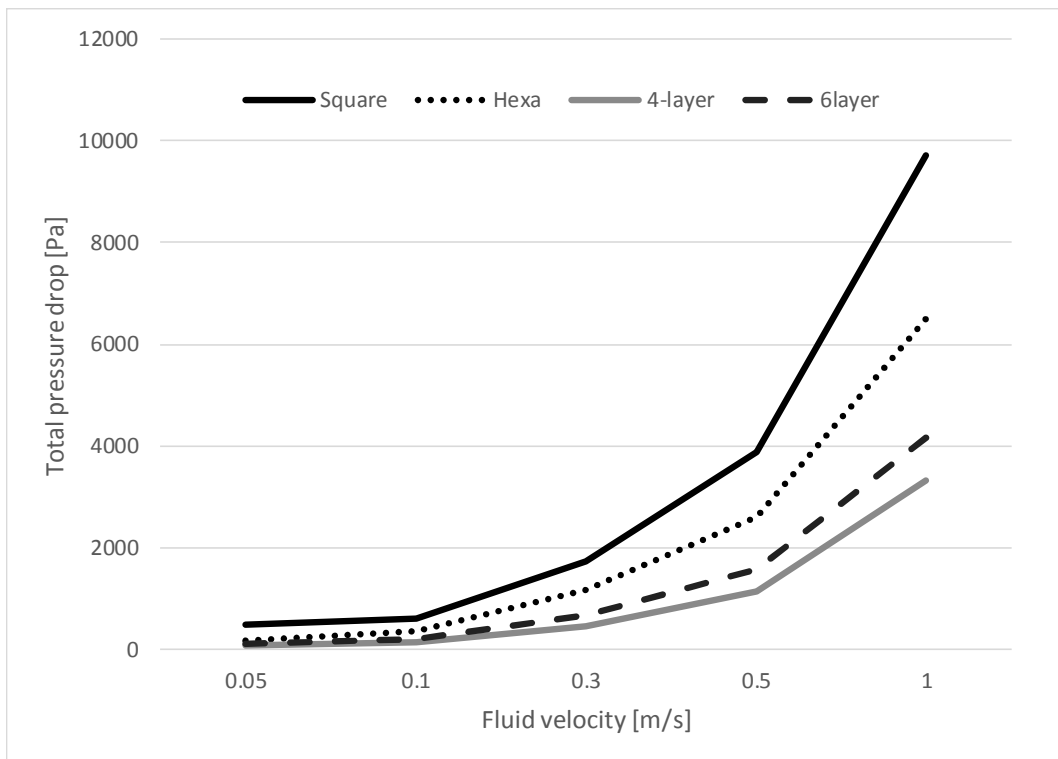
도파관형상	해석결과	관내 평균압 력손실 (Pa)
Square		63.38
Hexagonal		75.38
4-layers		39.11
6-layers		45.38

*1atm 기준 상대압력

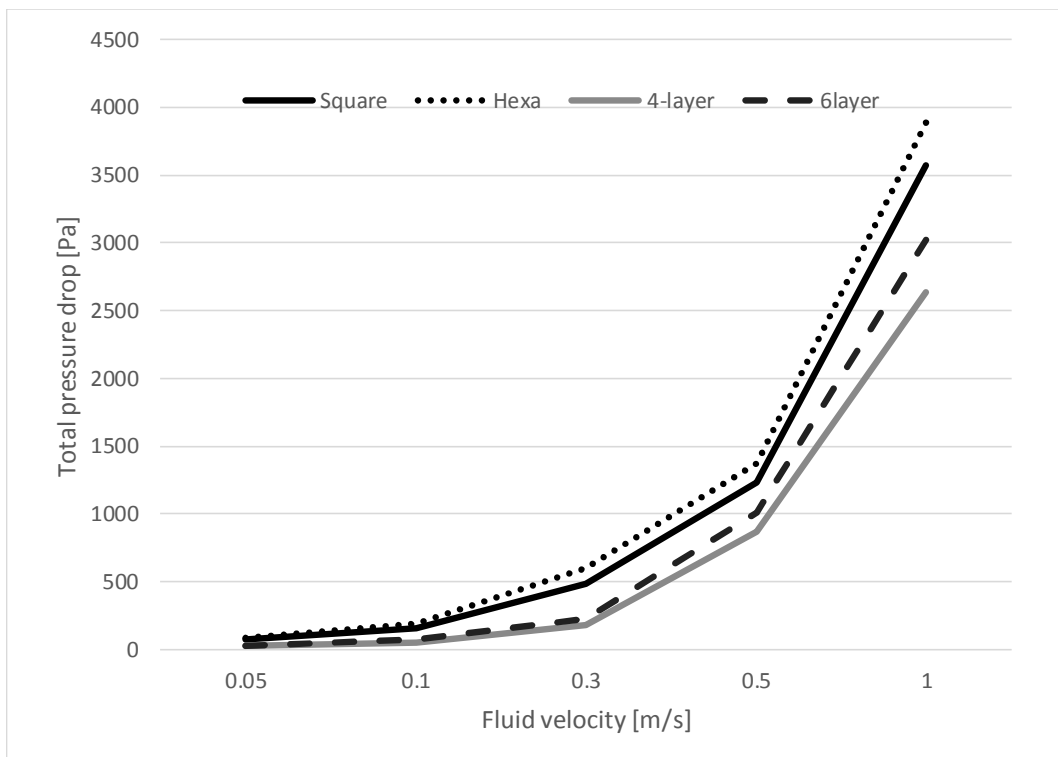
[표 77] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(25A, 10=5mm, SE=80dB)

도파관형상	해석결과	관내 평균압 력손실 (Pa)
Square		1917.53
Hexagonal		2202.4
4-layers		1185.44
6-layers		1843.64

*1atm 기준 상대압력



[그림 73] 도파관 전-후단 압력손실 (25A, SE=80, a=5)



[그림 74] 도파관 전-후단 압력손실 (25A, SE=80, a=10)

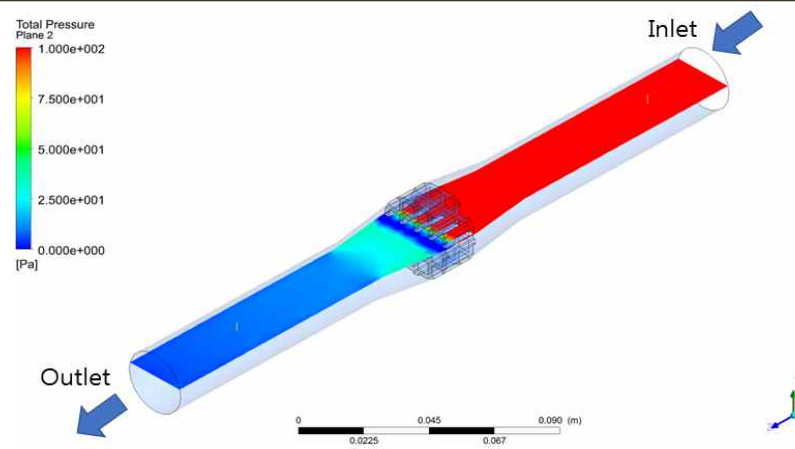
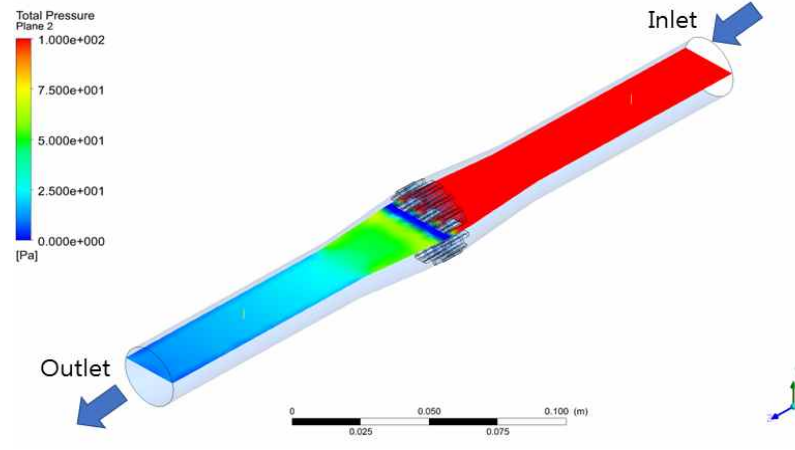
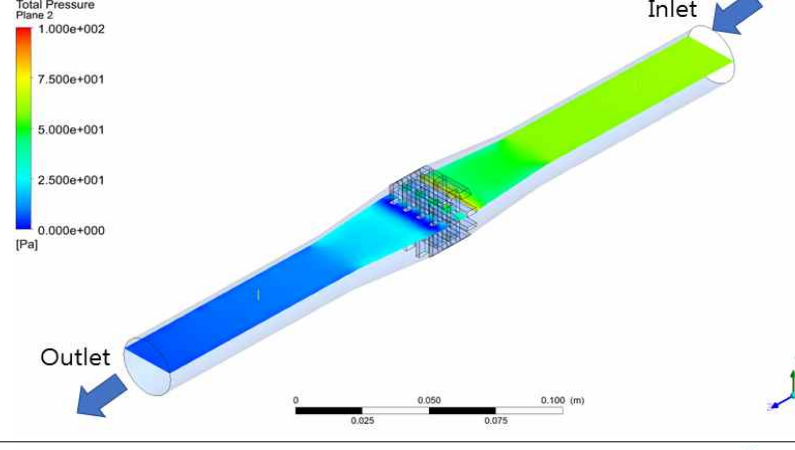
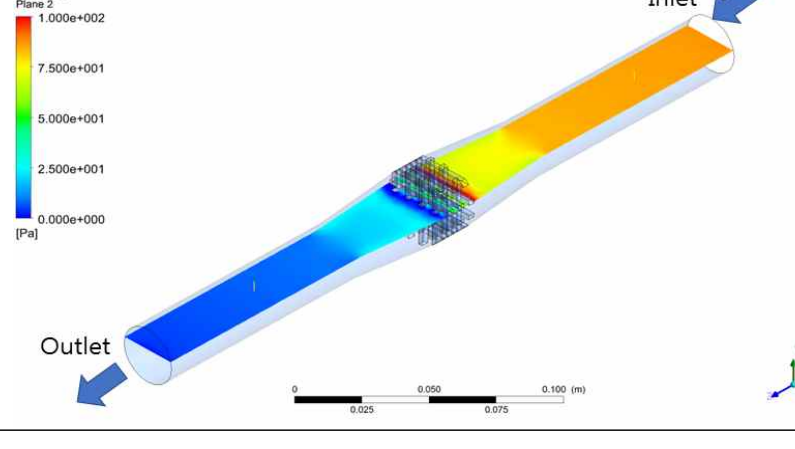
다음 표 78-79 는 유체통과 단면길이(a)가 10mm 인 도파관이 설치된 조건하에서 관내유체 속도가 각각 0.05 m/s 과 1.0 m/s 로 변하는 경우 $Y=0.003m$ 지점에서의 관내 유체압력을 나타낸다. 유체통과 단면의 폭이 증가하여 $a=5mm$ 인 경우에 비하여 압력변동이 비교적 일정하게 형성되는 것으로 나타났으며, 다른 경우와 마찬가지로 4-layer 구조가 가장 유리한 것으로 나타났다.

다음 그림 75 와 그림 76 은 $a=5mm$, $a=10mm$ 를 가지는 도파관이 설치될 때, 차폐계수가 100dB 인 도파관 전-후단부의 전압손실(ΔP)을 나타낸 그래프이다.

$a=5mm$ 의 경우 도파관 전후의 전압손실은 4-layer<6-layer<Hexagonal<Square 순으로 크게 나타났으며, 동일한 입구유속을 가지는 경우 4-layer 구조가 가장 전압손실량이 작은 것으로 나타났다. 유속이 1.0m/s 의 설정조건하에서, $a=5mm$ 의 도파관을 설치하는 경우 square 형상의 전압차이는 8.45 kPa, 4-layer 구조의 전압차이는 3.14 kPa 로 square 구조의 도파관에 비하여 4-layer 구조의 전압저하가 약 73% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 유체의 흐름의 방향에 있어서 비록 전체단면결손면적이 높다고 하더라도, 유체의 이동통로상의 면적이 확보되는 형상인 적층형구조가 유체의 흐름을 원활히 하는데 효과적인 것으로 판단된다.

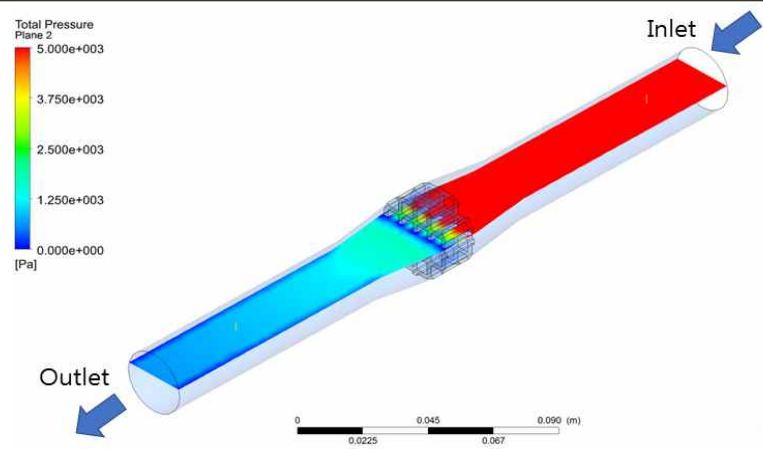
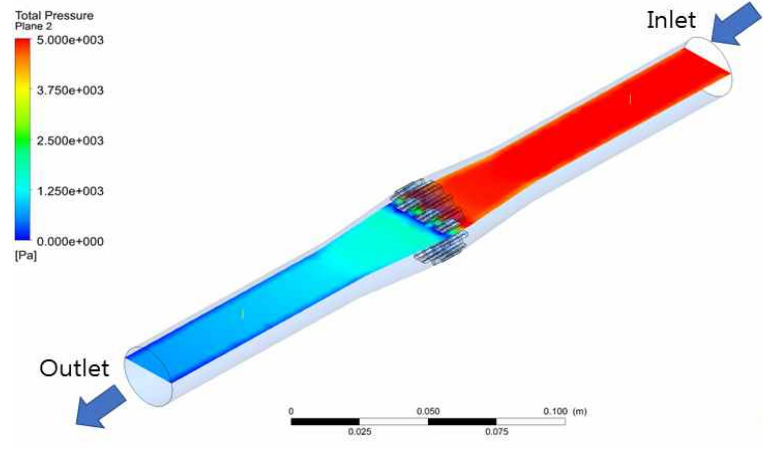
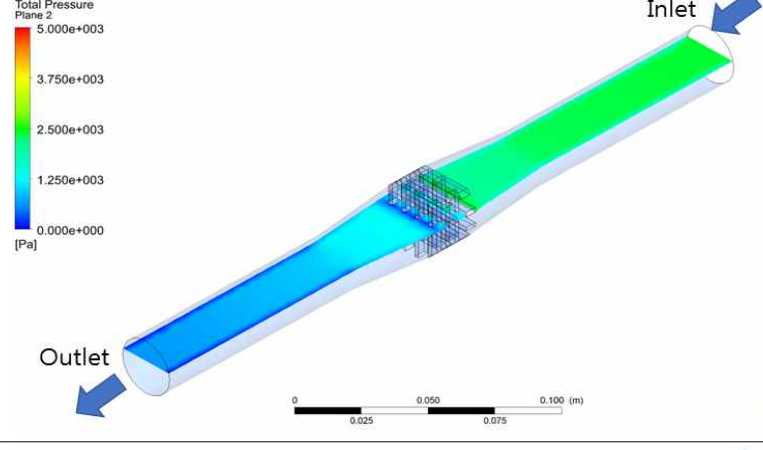
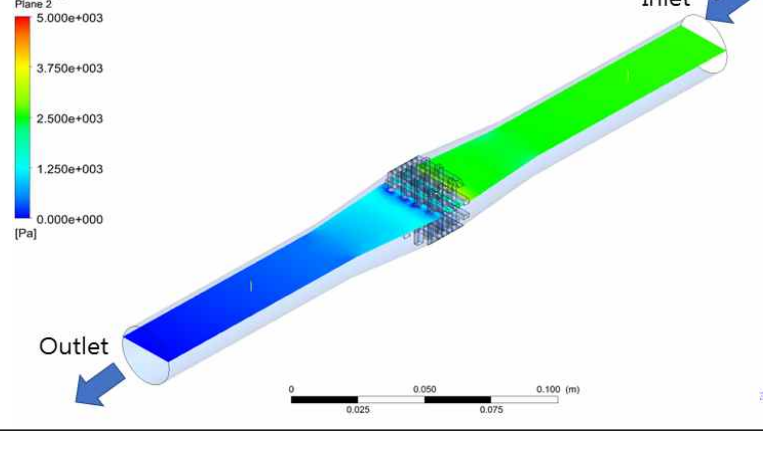
$a=10mm$ 의 경우 도파관의 단면형상별 전압손실의 차이는 4-layer<6-layer<Square<Hexagonal 순으로 나타났으며, $a=5mm$ 인 상황과 일정부분 변동이 있으나, 각 단면형상별 전압차 변화율은 15%(0.05m/s)에서 32%(유속 1.0m/s)로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

[표 78] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포(25A, a=5mm, SE=100dB)

도파관형상	해석결과	관내평균압력변동 (Pa)
Square		184.34
Hexagonal		338.33
4-layers		50.98
6-layers		402.45

*1atm 기준 상대압력

[표 79] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(25A, a=5mm, SE=100dB)

도파관형상	해석결과	관내평균압력변동 (Pa)
Square		5125.3
Hexagonal		4276.37
4-layers		1350
6-layers		2293.39

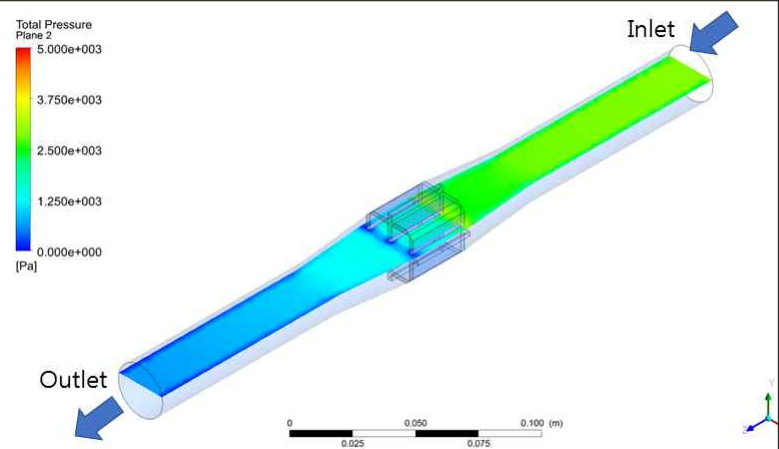
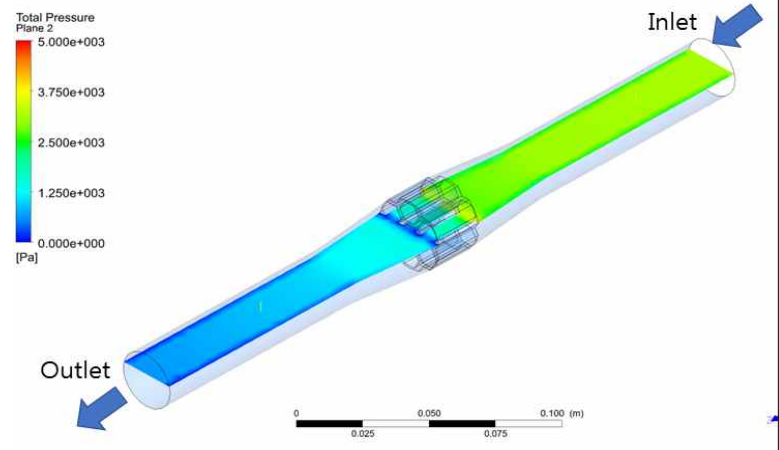
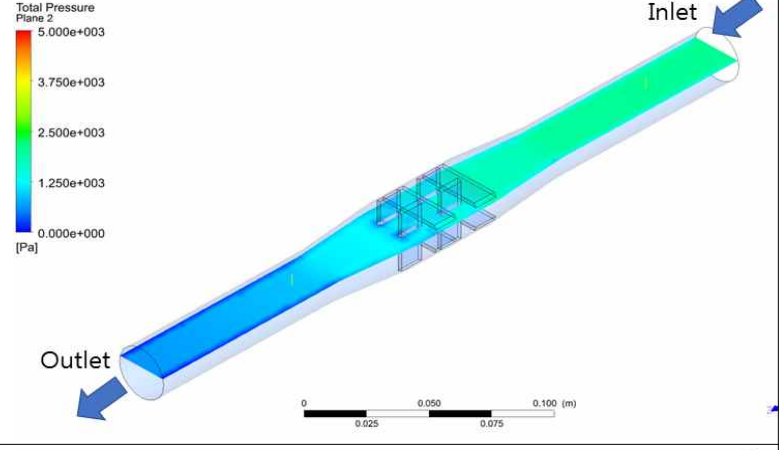
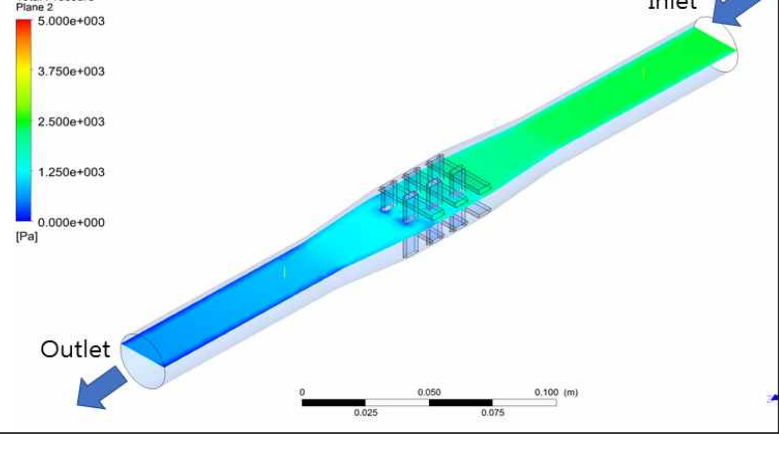
*1atm 기준 상대압력

[표 80] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포(25A, a=10mm, SE=100dB)

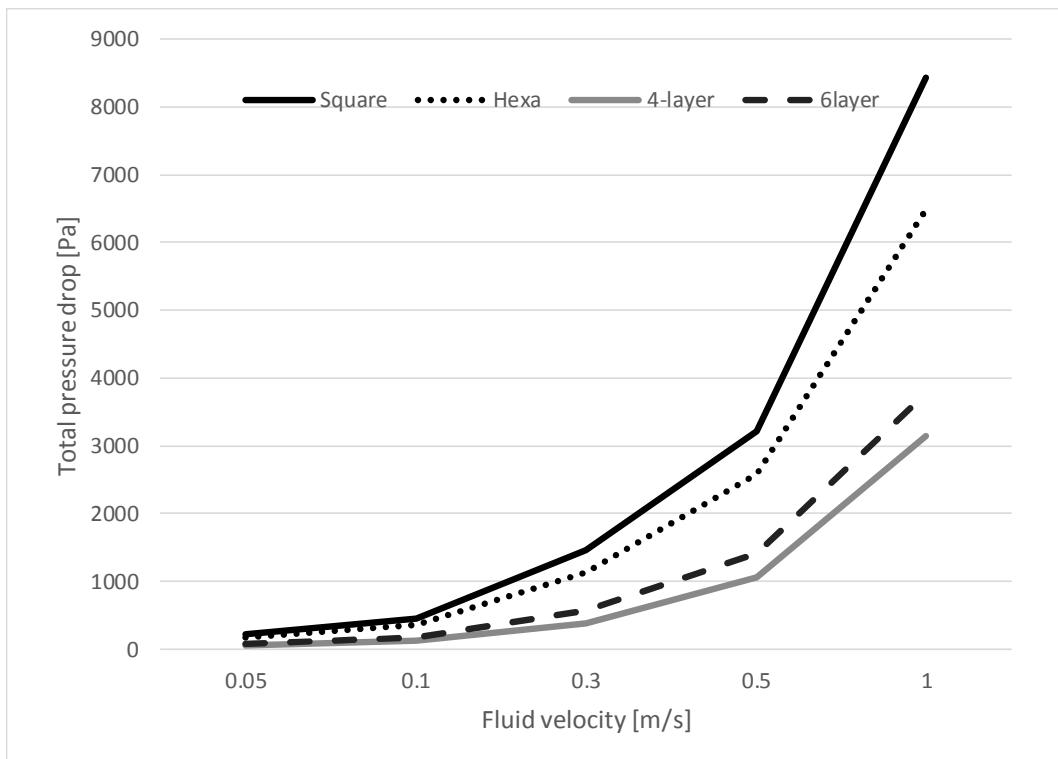
도파관형상	해석결과	관내평균압력변동 (Pa)
Square		63.73
Hexagonal		74.69
4-layers		37.40
6-layers		49.8

*1atm 기준 상대압

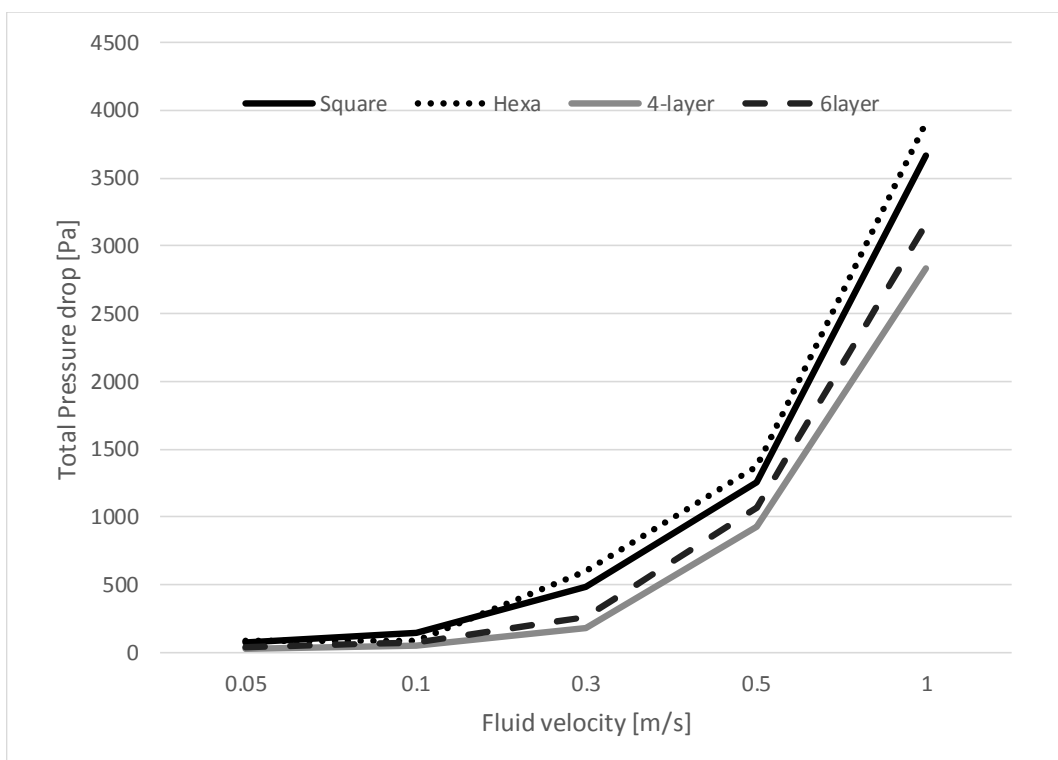
[표 81] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(25A, a=10mm, SE=100dB)

도파관형상	해석결과	관내평균압력변동 (Pa)
Square		2150.34
Hexagonal		2236.69
4-layers		1109.85
6-layers		1452.39

*1atm 기준 상대압력



[그림 75] 도파관 전-후단 압력손실(25A, a=5mm, SE=100)



[그림 76] 도파관 전-후단 압력손실(25A, a=5mm, SE=100)

(나) 32A 급유관

① 차폐계수(SE) 80dB 조건

주관의 관경이 32mm 이고 도파관의 관경이 40mm 인 조건하에서 EMP 차폐목표치가 80dB 인 조건에서 관내유체(디젤유)의 속도가 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 m/s 로 변화할 때 도파관과 연결관 그리고 주관내의 유체압력을 해석하였다.

다음 표 82-83 은 목표차폐성능이 80dB 이고, 유체통과 단면길이(a)가 5mm 인 도파관이 설치된 조건하에서 관내유체속도가 각각 0.05 m/s 과 1.0 m/s 로 변하는 경우 Y=0.003m 지점에서의 관내 유체압력을 나타낸다.

32mm 를 주관으로 사용하는 경우 전 속도대에서 25mm 주관 사용시보다 안정적인 압력형성이 가능한 것으로 나타났으며, 앞서의 경우와 마찬가지로 4-layers 구조가 압력변동을 최소화할 수 있다.

입구측의 유속이 0.05 m/s 로 유입되는 경우 도파관을 통과시 격벽에 따른 마찰저항으로 인해 도파관 인근의 압력강하가 크게 발생하게 되고 도파관이후 구간에서는 압력을 회복하는 양상을 보이고 있다. Hexagonal 단면형태의 경우 출구측 연결배관 내의 유류거동이 불안정할 것으로 판단된다. 중-고속의 영역인 1.0m/s 의 경우 적층구조(4-layer, 6-layer)가 도파관 전단과 후단의 압력차이가 다른 조건(Hexagonal, Square)에 비하여 작은 것으로 나타났다. 이는 25mm 를 사용하는 조건과 유사한 패턴을 나타내고 있다.

다음 표 84-85 은 유체통과단면길이(a)가 10mm 인 도파관이 설치된 조건하에서 관내유체속도가 각각 0.05 m/s 과 1.0 m/s 로 변하는 경우 Y=0.003m 지점에서의 관내 유체압력을 나타낸다. 저속의 경우 a=5mm 의 조건에 비하여 단면통과유량이 증가함에 따라서 압력손실량이 전체적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 저

다음 그림 77 과 그림 78 은 a=5mm, a=10mm 를 가지는 도파관이 설치될 때, 차폐계수가 80dB 인 도파관 전-후단부의 전압손실(ΔP)을 나타낸다.

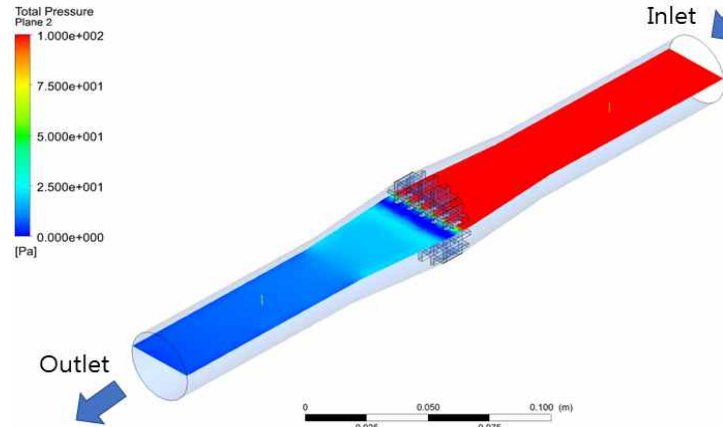
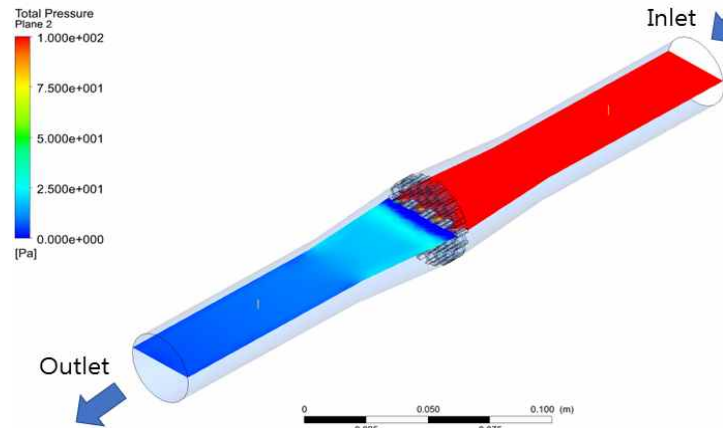
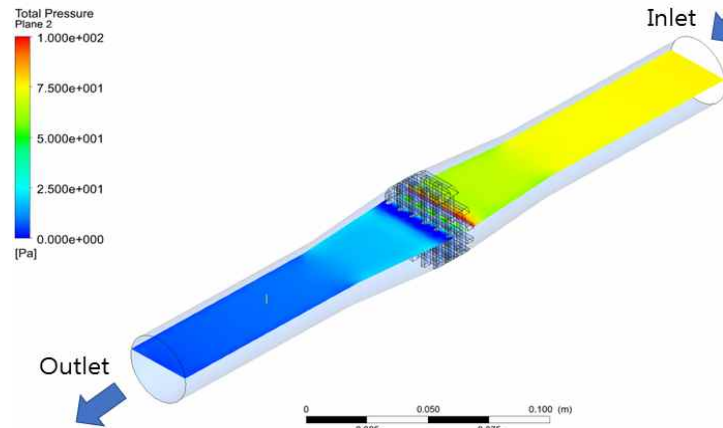
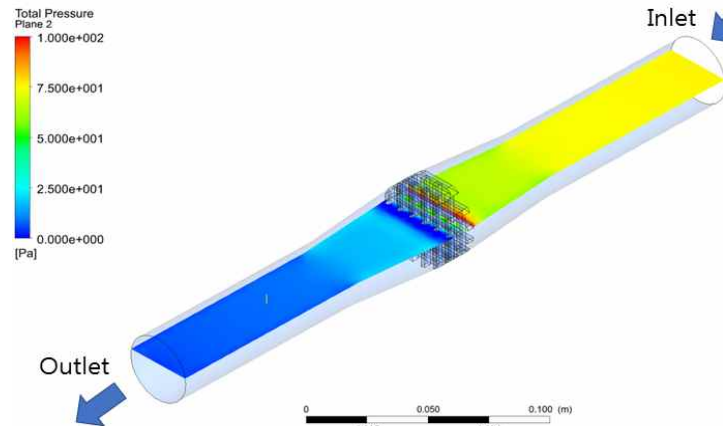
a=5mm 의 경우 도파관 전후의 전압손실은 4-layer<6-layer<Hexagonal<Square 순으로 크게 나타났으며, 동일한 입구유속을 가지는 경우 4-layer 구조가 가장 전압손실량이 작은 것으로 나타났다. 특히 속도증가에 따른 압력손실량이 기하급수적으로 증가하게 되는데 이는 도파관의 형상이 복잡해질수록 도파관 인근의 유류속도가 높아지는 원인으로 판단된다. a=10mm 의 경우 도파관 전후의 전압손실량의 크기순서는 4-layer<6-layer<Square<Hexagonal 순으로 나타났으며, 이는 유체통과단면길이의 증가에 따른 도파관의 두께변화에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 도파관의 단면형상에 따른 압력손실차이는 a=5mm 조건과는 다른 패턴을 보이고 있으나, 도파관의 단면형상에 따른 압력손실의 차이는 크지 않는 것으로 분석되었다.

② 차폐계수(SE) 100dB 조건

주관의 관경이 25mm 이고 도파관의 관경이 32mm 인 조건하에서 EMP 차폐목표치가 100dB 인 조건에서 관내유체(디젤유)의 속도가 0.05~1.0m/s 로 변화하는 경우에 대한 관내 압력해석을 수행하였다.

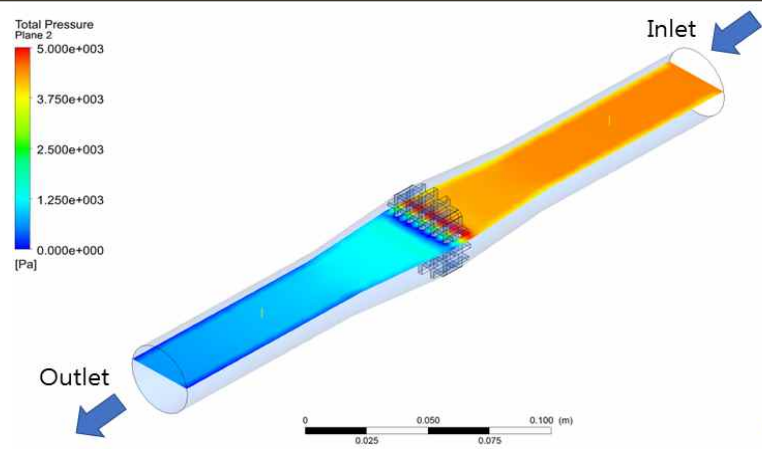
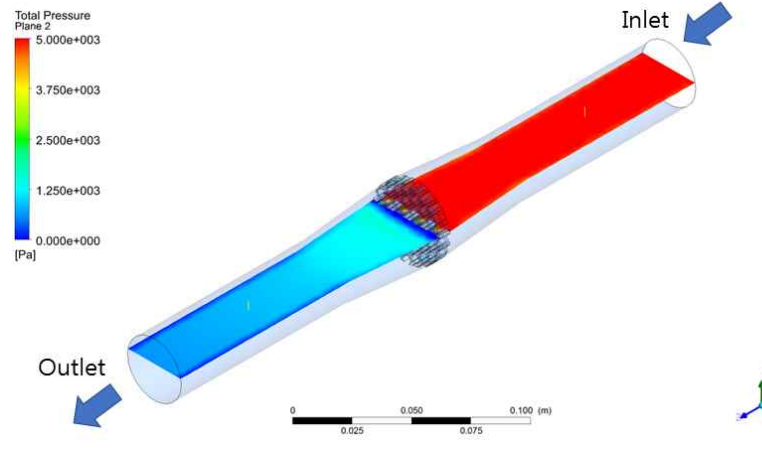
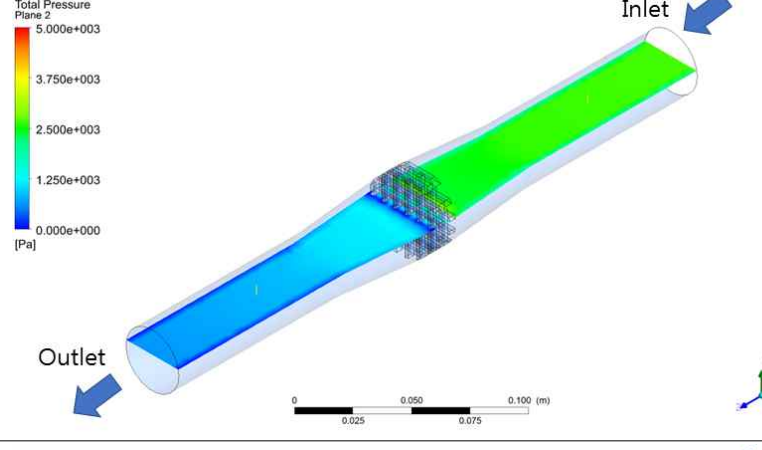
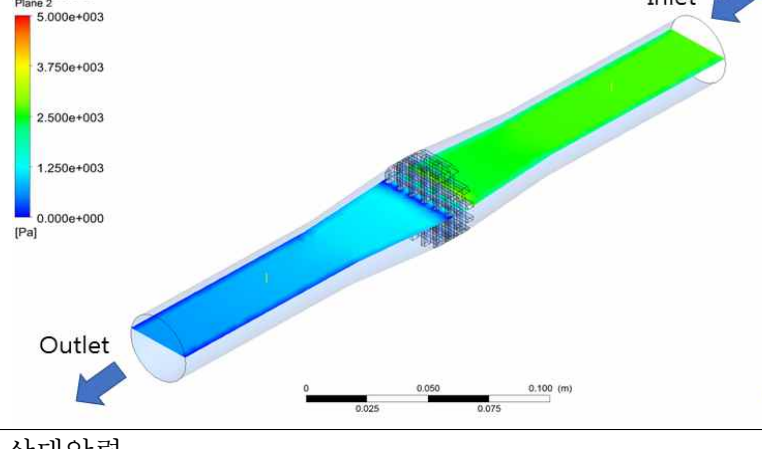
다음 표 86-87 은 유체통과단면길이(a)가 5mm 인 도파관이 설치된 조건하에서 관내유체속도가 각각 0.05 m/s 과 1.0 m/s 로 변하는 경우 Y=0.003m 지점에서의 관내 유체압력을 나타낸다. 목표차폐계수 80dB 와 유사한 패턴을 보이고 있으며, 4-layers 구조가 압력변동폭이 가장 작은 것으로 나타났다.

[표 82] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=5mm, SE=80dB)

도파관형상	해석결과	관내평균압력변동(Pa)
Square		129
Hexagonal		175.32
4-layers		66.52
6-layers		66.64

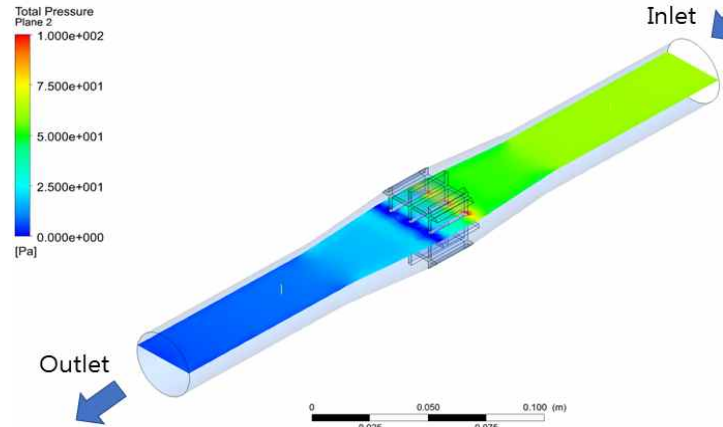
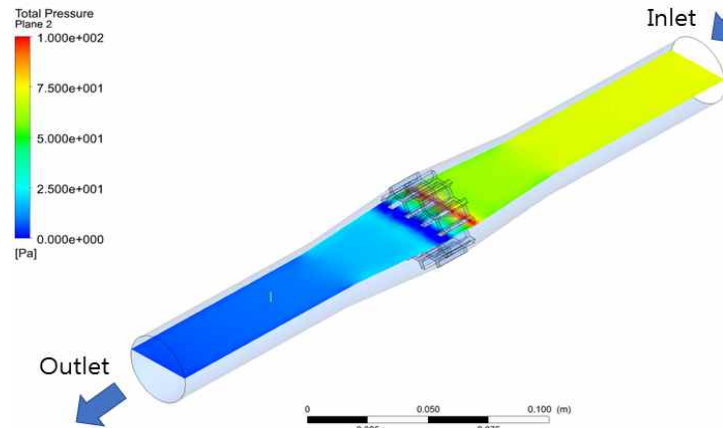
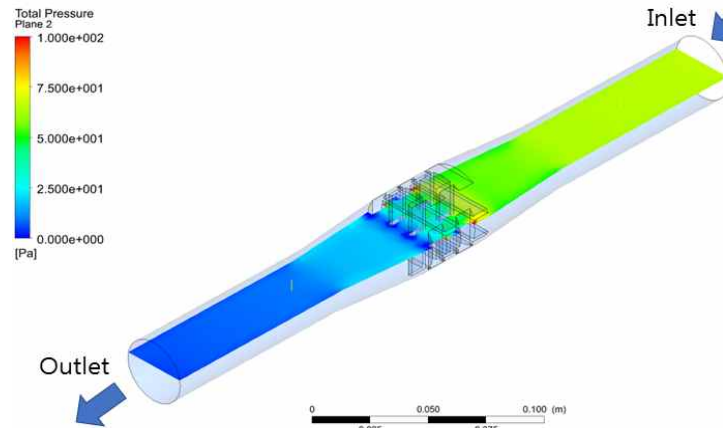
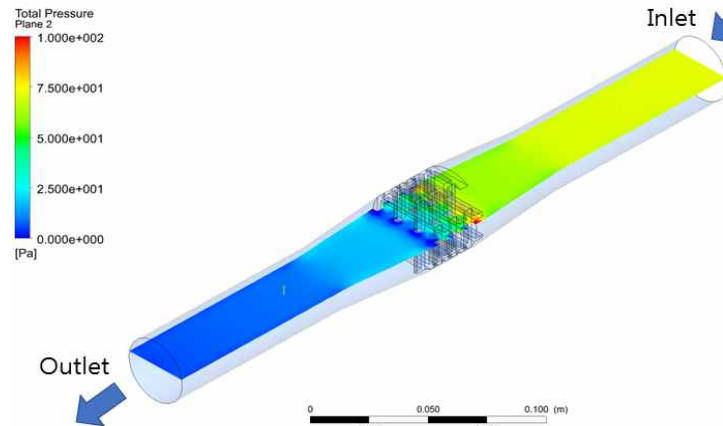
*1atm 기준 상대압력

[표 83] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=5mm, SE=80dB)

도파관형상	해석결과	관 내 평 균 압 력 변 동 (Pa)
Square		3583.14
Hexagonal		4472.61
4-layers		1839.08
6-layers		1854.02

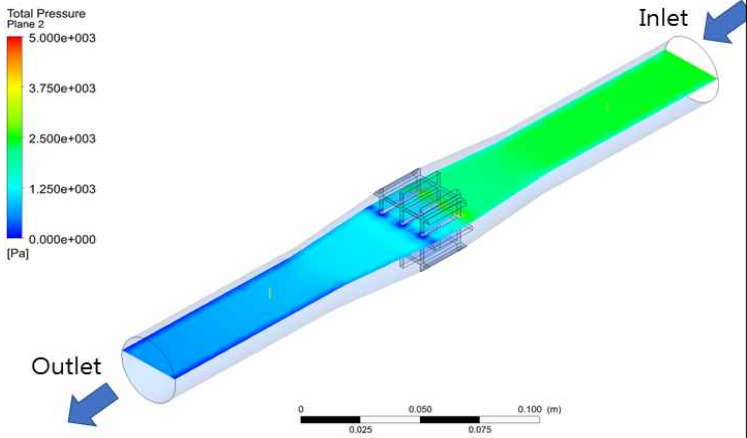
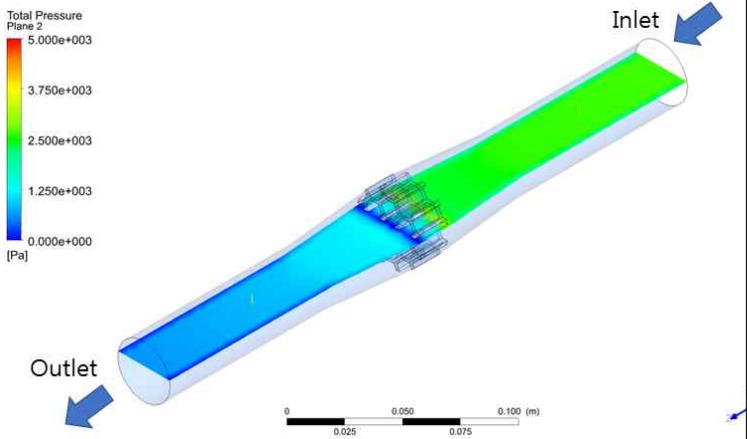
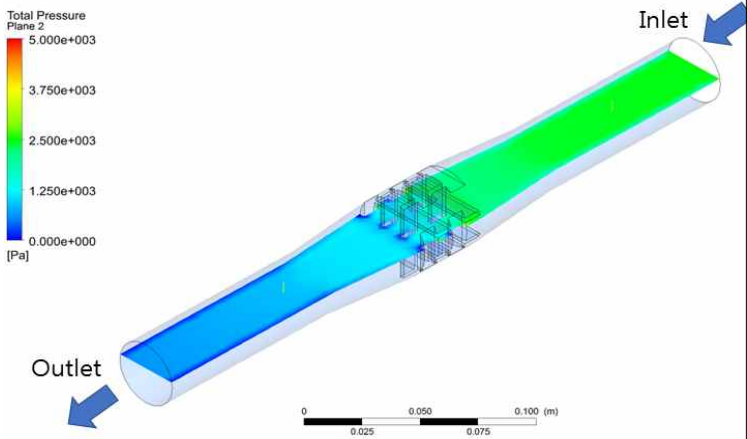
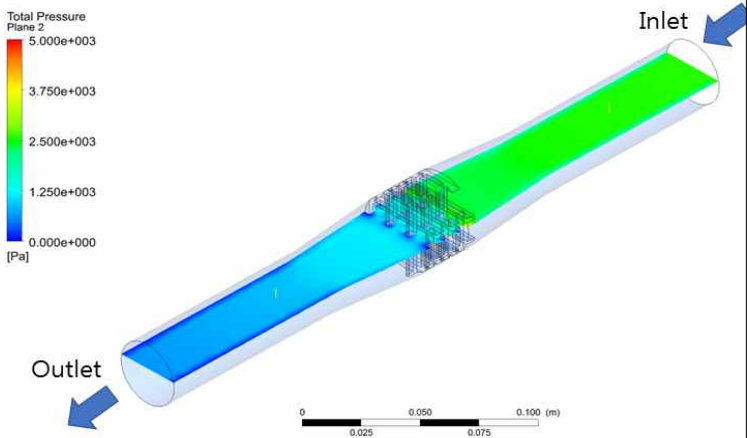
*1atm 기준 상대압력

[표 84] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=10mm, SE=80dB)

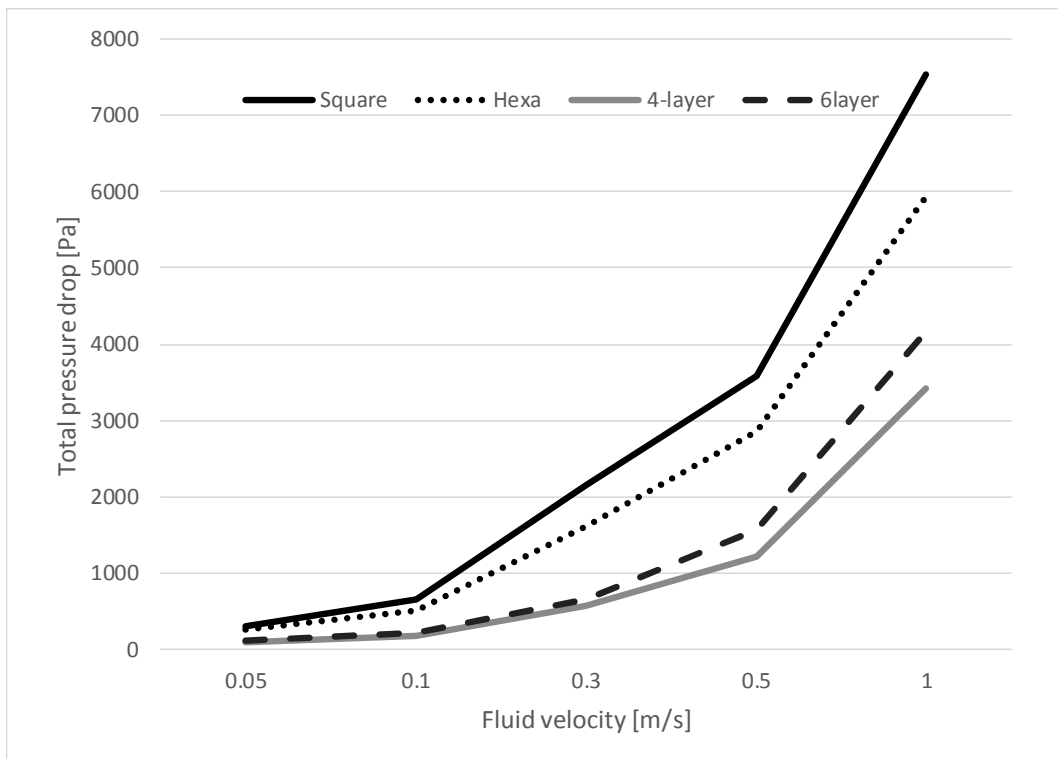
도파관형상	해석결과	관내평균압력변동 (Pa)
Square		52.6
Hexagonal		61.95
4-layers		55.3
6-layers		61.8

*1atm 기준 상대압력

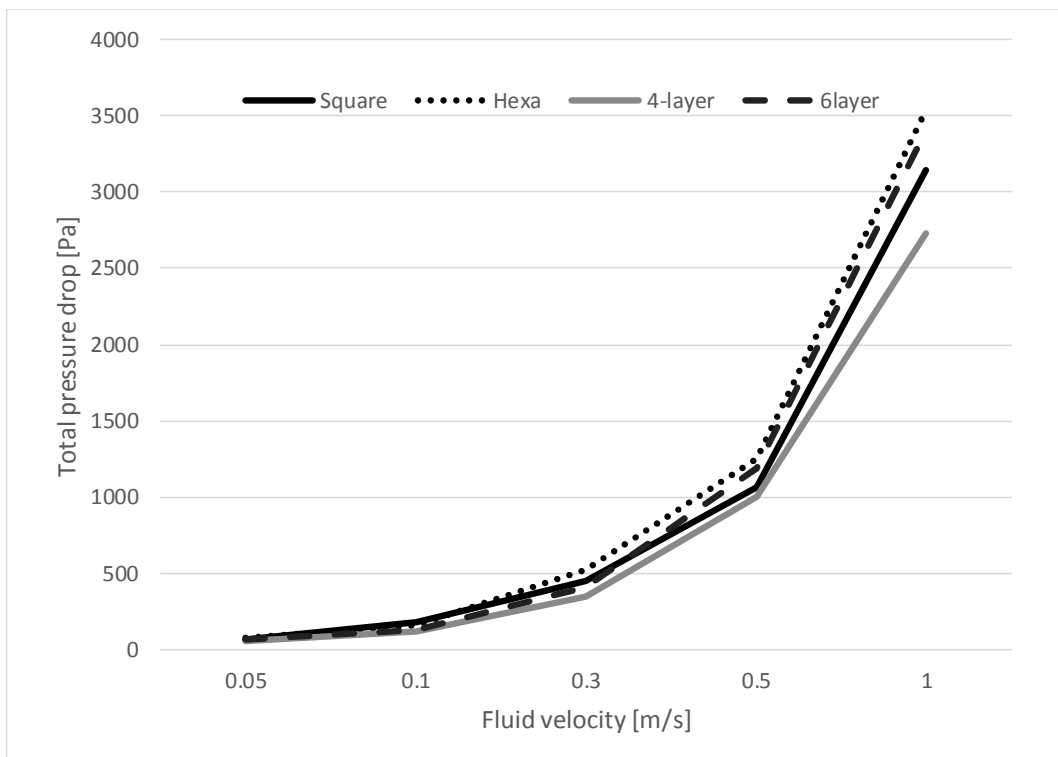
[표 85] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=10mm, SE=80dB)

도파관형상	해석결과	관 내 평 균 압 력 변 동 (Pa)
Square		1632.13
Hexagonal		1809.03
4-layers		1548.63
6-layers		1710.48

*1atm 기준 상대압력

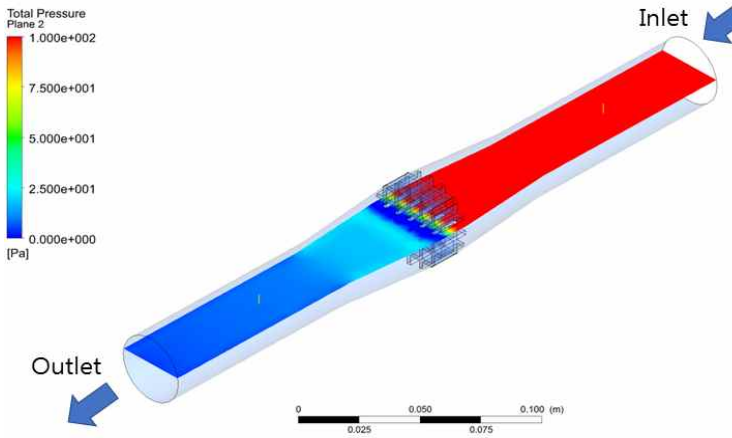
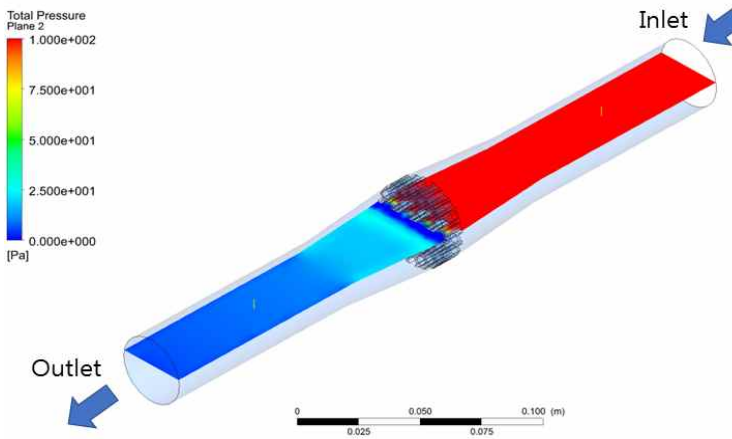
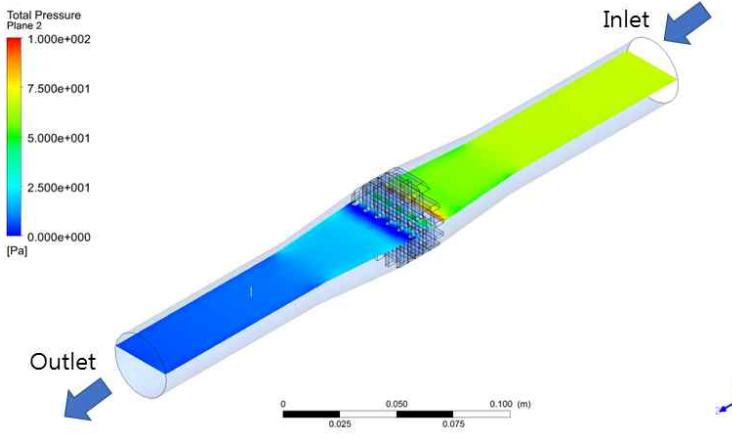
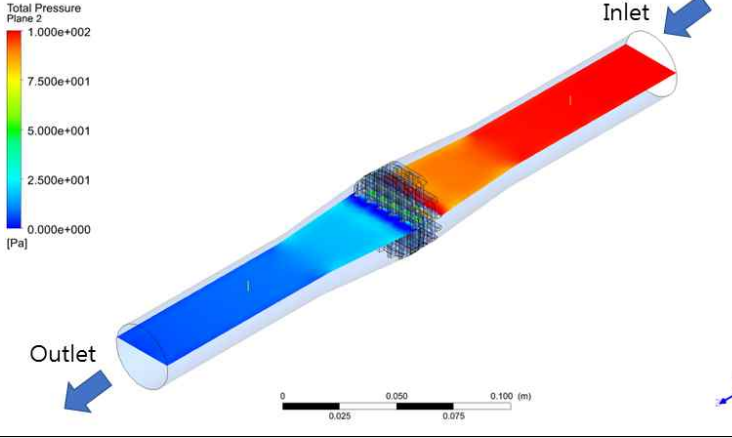


[그림 77] 도파관 전-후단 압력손실 (32A, a=5mm, SE=80)



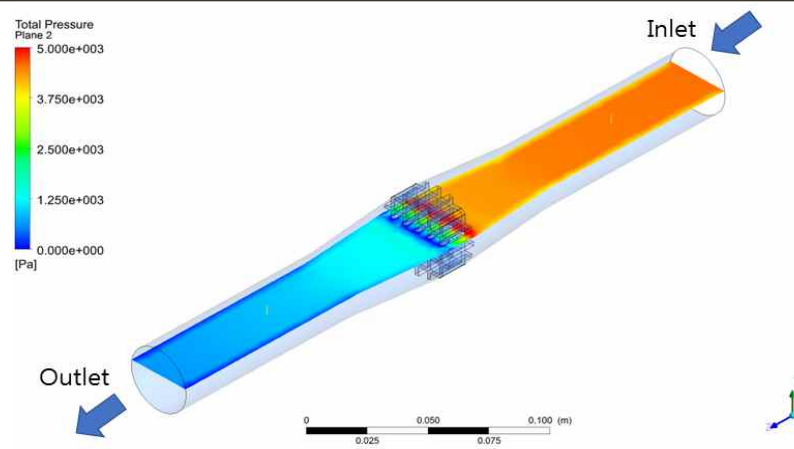
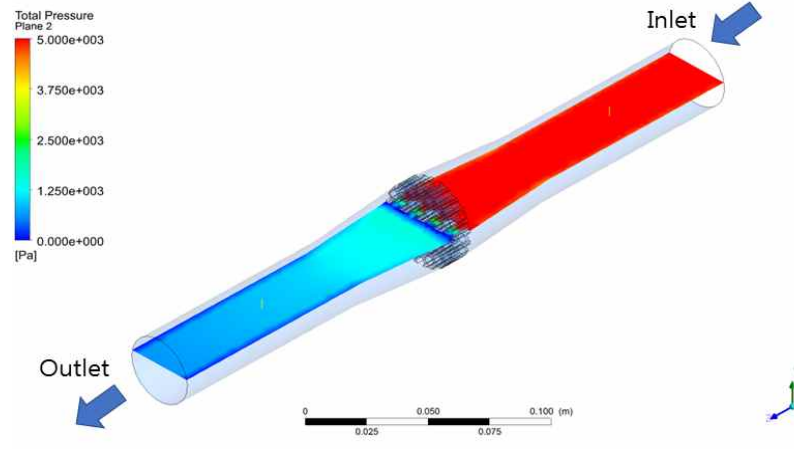
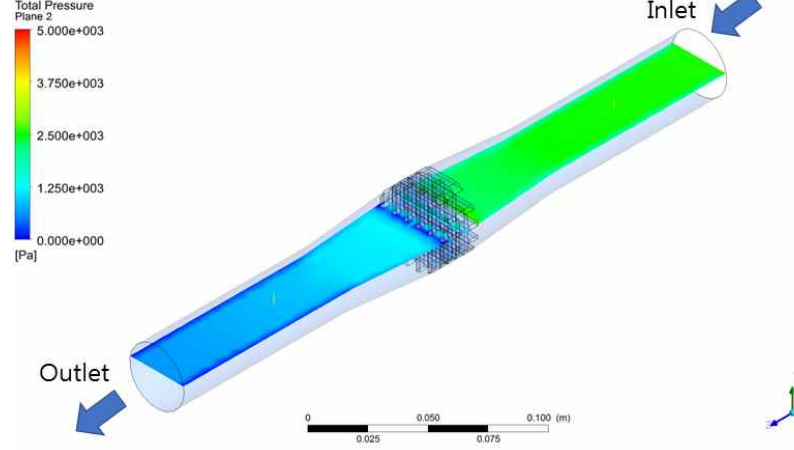
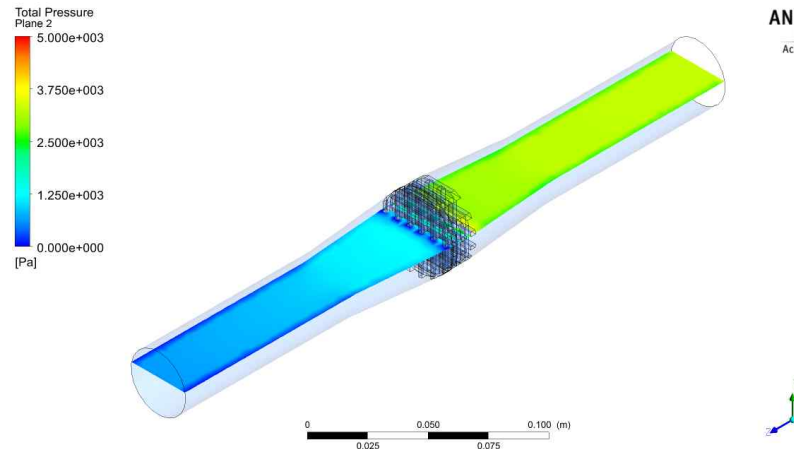
[그림 78] 도파관 전-후단 압력손실 (32A, a=10mm, SE=80)

[표 86] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=5mm, SE=100dB)

도파관형상	해석결과	관 내 평 균 압 력 변 동 (Pa)
Square		132.5
Hexagonal		171
4-layers		57.56
6-layers		93.46

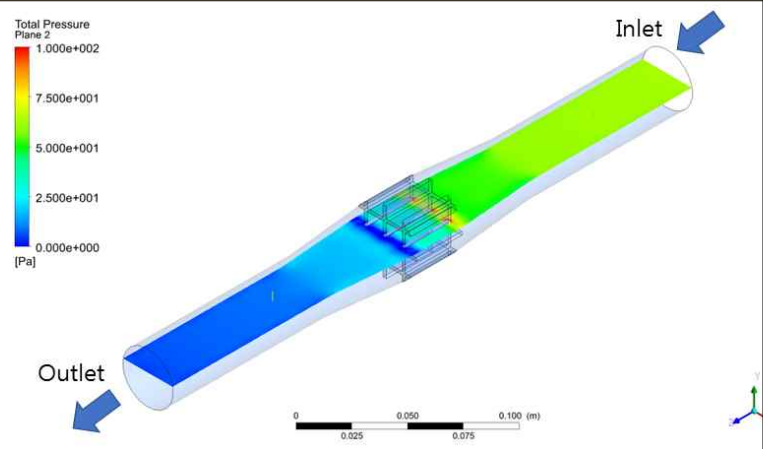
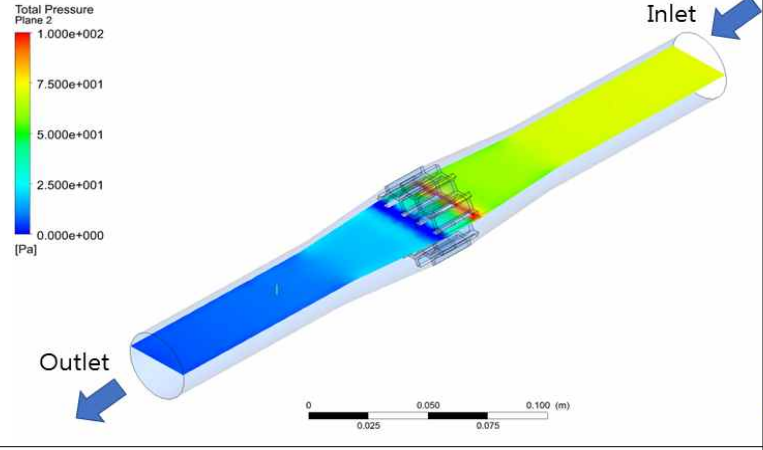
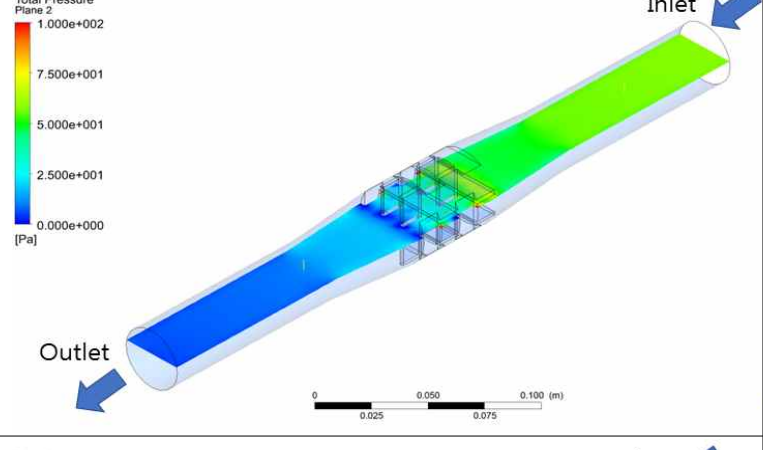
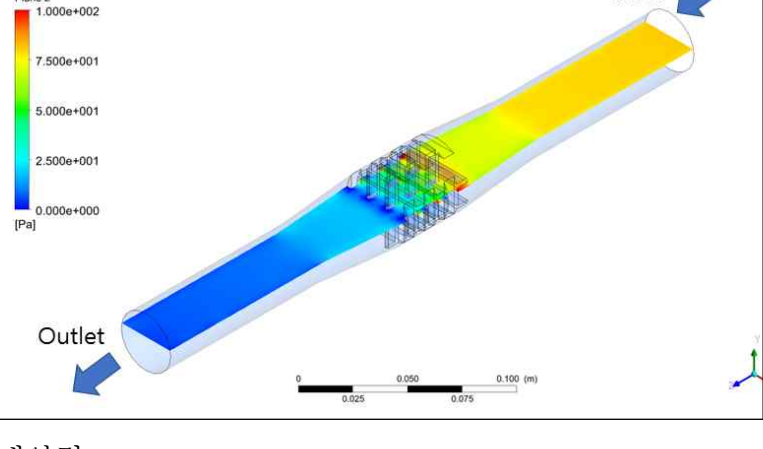
*1atm 기준 상대압력

[표 87] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=5mm, SE=100dB)

도파관형상	해석결과	관내평균압력변동 (Pa)
Square		1610.75
Hexagonal		4441.32
4-layers		3762.25
6-layers		4463.12

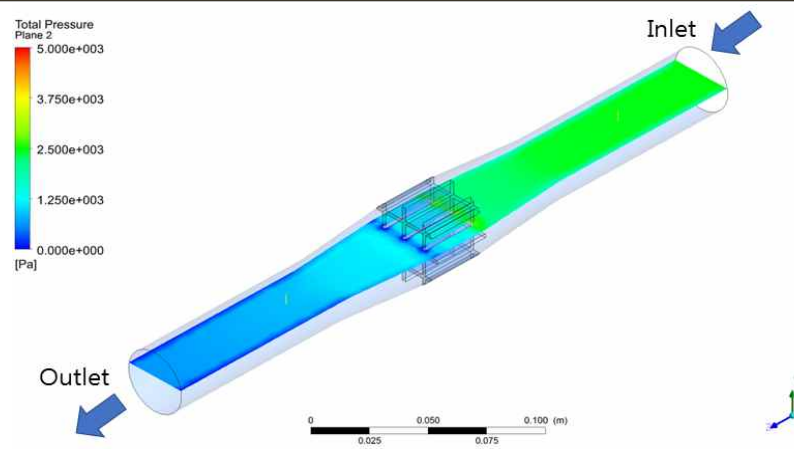
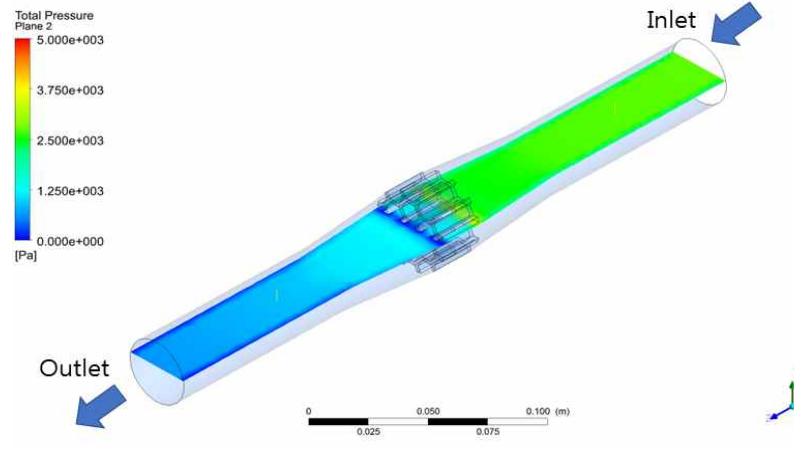
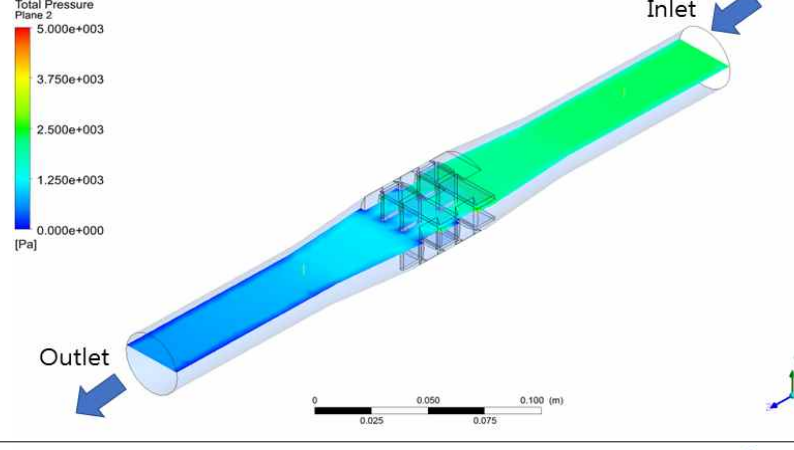
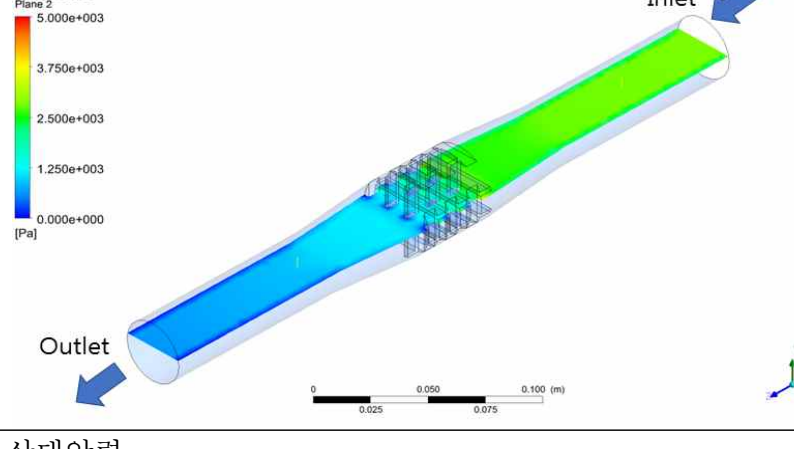
*1atm 기준 상대압력

[표 88] 유체속도 0.05 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=10mm, SE=100dB)

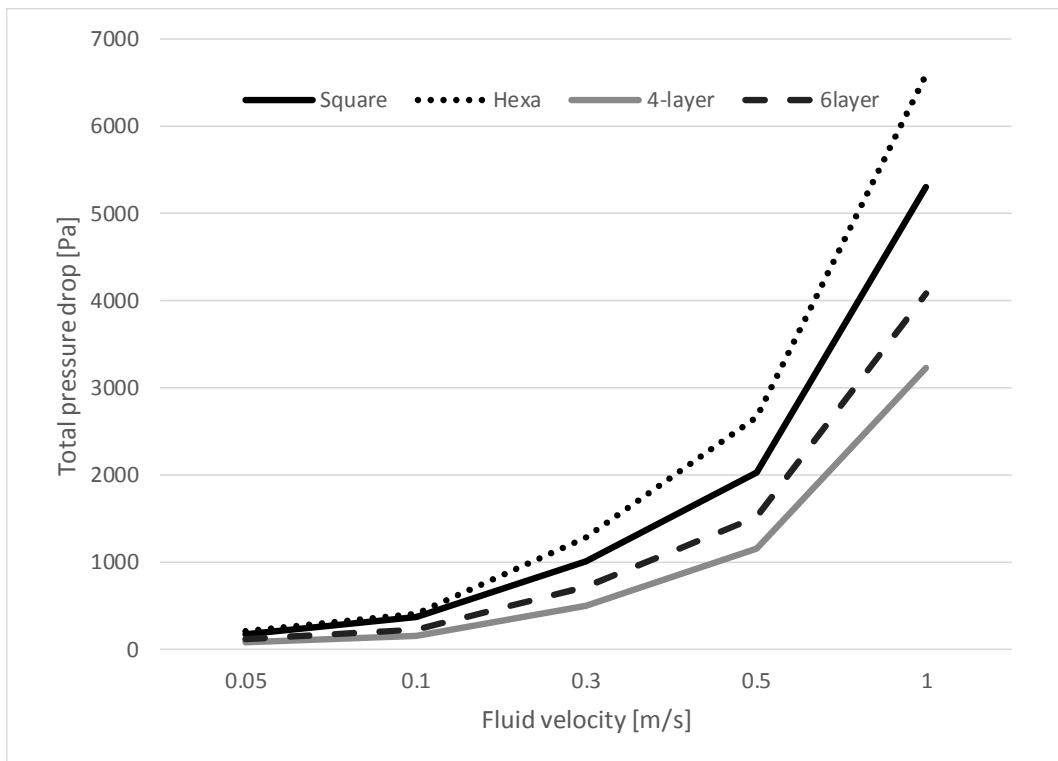
도파관형상	해석결과	관내 평균 압력 변동 (Pa)
Square		52.4
Hexagonal		61.24
4-layers		45.5
6-layers		69.8

*1atm 기준 상대압력

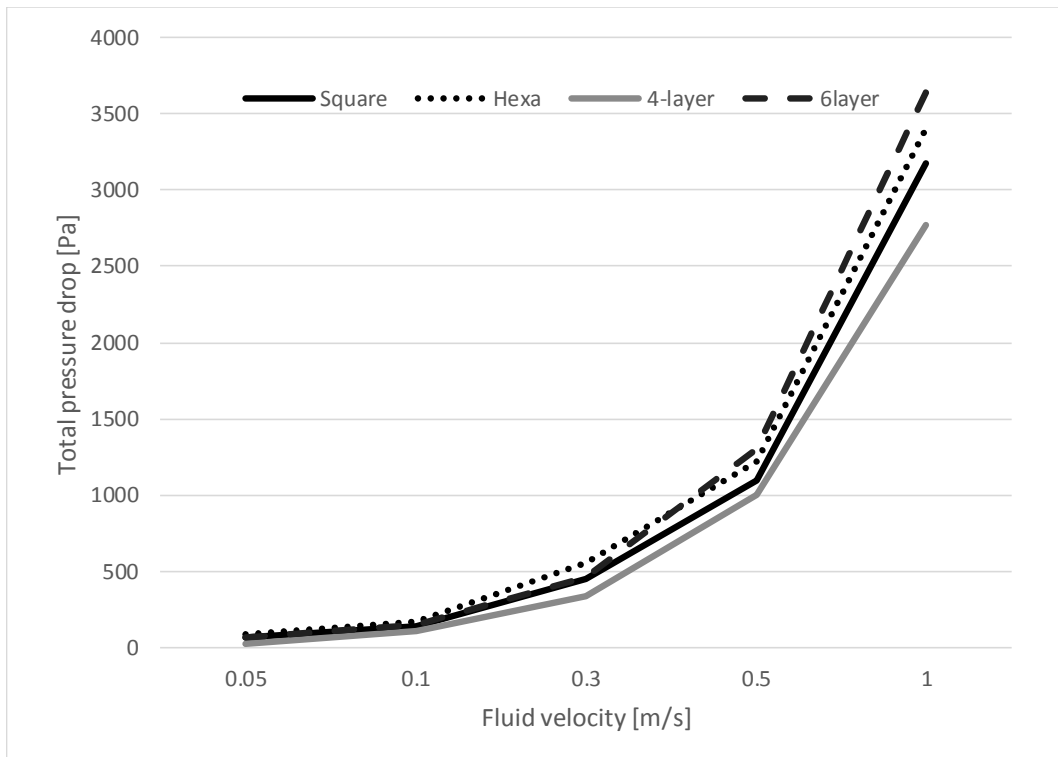
[표 89] 유체속도 1.0 m/s 의 관내 압력분포(32A, a=10mm, SE=100dB)

도파관형상	해석결과	관내평균압력변동 (Pa)
Square		1578.99
Hexagonal		1859.83
4-layers		1306.87
6-layers		1891.75

*1atm 기준 상대압력



[그림 79] 도파관 전-후단 압력손실 (32A, a=5mm, SE=100)



[그림 80] 도파관 전-후단 압력손실 (32A, a=5mm, SE=80)

(4) 결론

비상발전기의 안정적인 운전과 비상시의 신뢰성을 확보하기 위해 급유탱크 및 저류조의 연결 부위에 도파관의 적용을 위한 분석을 수행하였다. 비상용 발전기에 사용되는 비교적 환경이 작고 점성이 높은 전달유체의 특징을 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 단일한 단면적을 가지는 도파관(Square, Hexagonal)보다는 적층형형태(4-layers, 6-layers)구조가 관내의 안정압력을 형성하는데 효과적이며, 특히 검토대상 단면형상 가운데 각 영역에서 모두 4-layers의 구조가 압력분포의 안정성과 도파관 전후단의 전압최소화에 있어서 가장 유리한 것으로 나타났다.
- 비상발전기의 용량에 따라 급유탱크의 계산에 있어서 도파관 설치에 따른 압력손실을 충분히 고려하여야 하며, 비상발전기내의 펌프양정에 대한 검토시 해당 압력강하에 대한 검토를 수행해야 한다.
- 대용량의 비상발전기를 사용하는 경우 급유탱크 필요유속이 증가하게 되어 도파관 인근부분의 과도한 동압에 따른 압력불균형이 예상되며 이는 연료공급을 불균일하게 하므로 비상발전기의 원활한 운전을 위해 필요급유탱크에 따른 급유탱크속이 1.0m/s 이상이 되는 경우 관경의 확대와 함께 필요한 배관부속을 활용하여 안정적인 압력분포 확보가 필요하다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

■ 1차년도

구분	핵심연구성과	성과물	질적성과지표	목표수준	
				목표치	달성치
1	외기도입/배기덕트 기술	시뮬레이션(유속/압력)	일반덕트계와 비교평가	유사속도	100%
			시뮬레이션	54건	350%
2	덕트EMP차폐평가	시뮬레이션	일반EMP 차폐 성능	80dB	100%
			EMP 차폐성능	100dB	100%
			가이드라인	1건	200%
3	덕트 시험체	제작 및 시험	시험체 제작	5건	120%
			성능평가 시험	5건	120%

■ 2차년도

구분	핵심연구성과	단위성과물	질적성과지표	목표수준	
				목표치	달성치
1	배관형상 기술	유전체별 시뮬레이션(유속/압력)	유동가시화	8건	48건
			확대부 설계방안	1건	3건
			시뮬레이션	36건	98건
2	배관 EMP차폐평가 및 가이드라인	유전체별 시뮬레이션	EMP차폐성능	80dB	100%
			EMP차폐성능	100DB	100%
			가이드라인	1건	3건
			유전체 종류별 평가	3건	3건
3	배관제작/시험	유전체별 제작 및 시험	시험체 제작	5건	6건
			성능평가 시험	5건	6건

■ 항목별 연구목표 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	유전체별 최적화 시뮬레이션	급수관 시뮬레이션, 18건	100%
2	유전체별 최적화 시뮬레이션	배수관 시뮬레이션, 48건	800%
3	유전체별 최적화 시뮬레이션	유류관 시뮬레이션, 32건	177%
4	시험체 공인시험	공인시험성적서, 6건(12case)	120%
5	설계가이드라인	사각, 허니컴, 다층형 각 2건	120%
6	차폐도 달성(성능목표)	80dB/100dB	100%
7	유전체 종류별 차폐도 평가	급수, 배수, 유류 각 1건	100%

- 당초 계획 논문 4건 대비 학술지 논문 8건 게재 : 200% 달성
- 당초 계획 출원 1건 대비 특허출원 3건 : 300% 달성
- 당초 공인시험 10건 대비 14건 수행 : 140% 달성

2. 관련 분야 기여도

가. 연구결과의 활용방안

본과제는 TRL 2,3,4 단계의 기초원천 연구로 방호시설에서의 현재 기술력이 미흡한 건축설비요소 시스템의 EMP 차폐일체형 덕트 및 배관시스템의 최적형상, 제작기술 및 설계 및 시공을 위한 엔지니어링 기술을 정립하는 연구이다. 본 연구의 결과를 활용하여 TRL 5단계의 Working Model의 신뢰성을 확보하였다.

연구결과는 추후 방호시설의 설계 및 시공의 기초 원천기술로 활용할 수 있으며, 본 과제에서 제안한 덕트의 형상 최적화, 급수, 배수 및 유류배관의 형상 최적화를 이용해서 실제 시공에 활용할 수 있다. 국방관련시설공사, 병원의 특수시설, 금융기관의 서버실 등에 관련된 건축설계사무소, 건축설비사무소, EMP 관련시설 제조업체 및 건설회사에서 활용할 수 있다.

- 향후 민수/국방 부문의 활용을 위한 건축설비시스템의 요소 원천기술 확보
- 제품생산을 사업화를 위한 전 단계과제로 시뮬레이션, 실험실 검증
- 성능검증을 통해 설계(안)작성 및 시제품 제작
- 개발 관련기술의 참여기업 이전
- 건축설비사무소, 건축설계사무소 및 건설사 활용
- 군시설, 국가기간시설, 병원 특수시설, 은행 등의 서버실 등 적용가능

나. 기대성과 및 파급효과

- 국내는 EMP 관련 건설시장은 진입단계, 현재 **국방부문의 수요가 주된 시장임**
- **향후** 민수부분은 금융전산망, 항공관제시스템, 교통통제시스템 및 데이터센터 등 다양한 **국가 인프라가 대상 시장**
- 방위산업시장규모는 전세계적으로 2009년을 기점으로 연평균 복합성장율(CAGR)기준 7.3%의 견고한 성장을 유지하며 2018년 388조원 규모 시장형성(Homeland Security Research, 2014)
- 전통적인 방위물품 산업이외에 **통신/정보전 대응 예산이 지속적으로 성장**
- 국내 방위산업은 2013~2017년 까지 연평균 6% 성장 예상.
- 2017년 기준 전체 국방예산은 40조가 넘어설 것으로 예상(기획재정부, 2013)
- 전자폭탄(E-bomb) 및 전자기파 전쟁/테러에 대응 시장 및 시장성숙도 미흡으로 구체적인 집계가 어려우나, 국내외 방위산업의 시장추세를 고려하는 경우 향후 지속적인 성장이 예상됨.

다. 개발 제품의 우수성

- 기존 EMP 차폐를 위한 도파관 배열의 경우 제작 시간이 오래걸리며 크기가 증가할수록 공정이 복잡해 지는 단점이 있음.
- 기존 제품의 경우 유지관리의 어려움이 있으며 차폐효과를 증가시키기 위하여 도파관 배열의 크기를 증가시키면 유속 및 압력손실이 과다하게 발생됨.
- 개발기술은 기존의 EMP 차폐 설비를 대신하여 다층으로 교차하여 쌓아올림으로써 EMP 차폐 효과를 일정 수준 이상으로 유지하는 동시에 차폐설비 입/출구에서 발생하는 유동 특성을 크게 개선하였다. 또한 소요되는 금속의 양이 크게 감소하는 동시에 금속 간 용접면이 줄어들어 제작에 필요한 비용을 절감 가능함.
- 드릴링 및 용접의 과정을 일부 제거하여 제작 공정이 단순화 됨.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 참여기업에서 제품화 예정
- 다양한 크기의 시제품을 대상으로 성능시험 확인 후 현장적용.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제7장. 연구개발성과의 보안등급

해당사항 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
경민대	Main Workstation	T7910	1	2015.7.27	24.464	080-850-5050	경민대	NFEC-2015-08-204091

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

■ 연구책임자 및 연구원에 대한 연구활동종사자 안전교육 실시

방송가능 환영합니다. 홈 · 로그아웃 · 마이페이지 · 웹메일 · 사이트맵 LANGUAGE 검색단어입력

대학소개 입학안내 학과소개 대학생활 발전기금

대학교입니다
기술인재의 요람

출 > 마이페이지 > 교직원업무공지

교직원업무공지

[공지] 당직근무 명단 안내(2017년 6월~8월) 김보배

공지사항

전체 학사 NCS 학생 행정 시설 연구 산학 입시/홍보 취업 도서 전산 평생 국제 학과 부설/부속 대발문 현장실습

출게시물 4개 페이지 1/1

번호	발송처	제목	작성자	작성일	회신마감	HIT
4	학사	2016학년도 2학기 연구활동종사자 정기교육 시행의 건...	손대환	2016.09.05		117
3	학사	2016학년도 1학기 연구활동종사자 정기교육 시행의 건...	손대환	2016.03.18		129
2	시설	연구활동종사자 안전교육 참여 독려의 건	여중호	2015.11.17		87
1	시설	연구실(실험실습실) 안전관리 시행의 건	여중호	2015.09.02		97

http://www.safetyedu.org/SduCertificate 안전교육센터

경민대학교 KYUNGMIN COLLEGE 안전교육센터 Center for Safety Education

소개 안전교육 Safety Education 실험실 안전교재 자료실

안전교육 이수증명서

안전교육 연구실안전교육 안전강의실 이수증명서

안전교육 이수 목록입니다. 이수과정 선택 후 증명서를 출력할 수 있습니다.

Q (총 4건) 년도 전체 교육구분 전체 검색 증명서출력

☐	교육과정	과정명	이수일자	이수시간	이수번호
☐	경기	2015년 2학기 연구실 안전교육	2015.11.15	6 / 6	경민대학교_20151115_00189
☐	경기	2016년 전반기 연구실 안전교육	2016.03.25	6 / 6	경민대학교_20160325_00079
☐	경기	2016년 하반기 연구실 안전교육	2016.09.22	6 / 6	경민대학교_20160922_00468
☐	경기	2017년 전반기 연구실 안전교육	2017.06.18	6 / 6	경민대학교_20170618_00825

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	EMP 차폐를 위한 비상발전기 연도의 최적 형상 결정	경민대	책임	대한민국	0.13	2015.12.01	단독	1차년도
2	논문	도파관 배열이 설 치된 비상발전기 연도의 유속 예측 및 EMP 차폐평가	경민대	책임	대한민국	0.11	2016.03.01	단독	1차년도
3	논문	EMP 차폐 도파관의 형상 결정 가이드라인 작성	경민대	책임	대한민국	0.13	2016.03.01	단독	1차년도
4	논문	EMP 차폐를 위한 도파관 형상과 SE에 따른 유동 특성 평가	경민대	책임	대한민국	0.11	2016.09.01	단독	2차년도
5	논문	Concentric Reducer와 Eccentric Reducer를 사용한 EMP 차폐 100dB급 급수관의 유동특성 평가	경민대	책임	대한민국	0.11	2017.03.01	단독	2차년도
6	논문	도파관 배열에 의한 국부저항계수 산정	경민대	책임	대한민국	0.80	2017.07.10	단독	2차년도
7	논문	다층 구조를 이용한 도파관 배열의 EMP 차폐성능과 유동 분석	연세대	공동	대한민국	0.28	2016.08.01	단독	1차년도
8	논문	수정된 차폐효과 방정식을 이용한 다층 구조 도파관의 EMP 차폐 분석	연세대	공동	대한민국	0.28	2017.06.01	단독	2차년도
9	특허	다층구조를 가지는 도파관장치	연세대	-	대한민국	-	2016.02.24	단독	1차년도
10	특허	방공구조물	경민대	-	대한민국	-	2017.06.19	단독	2차년도
11	특허	도파관 장치	연세대	-	대한민국	-	2017.07.04	단독	2차년도

제11장. 기타 사항

수상 경력

연도	수상명	수상 내용
2016.5	연구책임자 교육부 장관표창	학술진흥 분야

- [1] S. K. Pang, Y. T. Chae, J. G. Yook, Ynna Kim, Sangin Kim,, “Air Stream around EMP Protective Device for Emergency Power System” , Proceedings of the Geothermal Energy Engineers, Vol. 1, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Daejeon, Korea, pp.41–44.
- [2] S. J. Lee,, “Demand Response Controls using On-site Electricity Generator for Emergency “, KOREA ENERGY ECONOMICS INSTITUTE
- [3] KOREA OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH AGENCY, KOSHA CODE E-84-2011, Technical Report for Design and Application of Emergency Electricity Supplier.
- [4] Richard B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, “Shielding theory and practice “, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 30, no. 3.
- [5] Y. R. Jeong, I.-P. Hong, H.-J. Chun, Y. Park, Y. J. Kim, J. G. Yook,, “Scattering analysis of curved FSS using Floquet harmonics and asymptotic waveform evaluation technique “, Steel and composite structures.
- [6] W. A. Bereuter, D. Chang,, Shielding effectiveness of metallic honeycombs, IEEE Transactions on EMC.
- [7] Yong-Wha, Park Jung-Won, “Pneumatic and hydraulic characteristics of drain-age pipe” , Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea, 25(5),, pp.375–382.
- [8] Whang In-Tae, Kim Deok-Ho, “Near-Field Hydrodynamic Analysis of the Submerged Thermal Discharge Using CFD Model” , Jounal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers of Korea, 23(6),, pp.466–473.
- [9] Lee Se-Yoon, Kim Joong-Gu, Lee Il-Haeng, “Performance evaluation of high-impact drain pipe(DH Pipe System) for High-rise buildings construction” Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea, (2010), pp.83–88.
- [10] Lee Yong-Wha, Park Jung-Won, “Flow Characteristics in V Shaped Fixture Drain” Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea, (2012), pp.165–168
- [11] Lee Yong-Wha, “The Study of Water Hammer in Polybutylene Double Pipeing System” Society of Air-conditioning and refrigerating engineers of Korea, 21(7), (2009), pp.380–385.
- [12] Yoo Kun-Suk, Lee Yong-Wha, “Mitigation of air pressure fluctuations within the drainage pipe” , International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 32(10), (2003), pp.27–30.
- [13] Seung-Ki Pang, Jae-Hu Kim, Jong-Gwan Yook, Yuna Kim, Sangin Kim, Design Guideline of Waveguide-Below-Cutoff Array for Electromagnetic pulse Shielding, 2016, Journal of Energy Engineers, Vol. 25, no.1,
- [14] 서만중, 지서원, 김영진, 박우철, 강호재, 허창수, "EMP 방호시설의 전자파 차폐효과 측정 방법.", 한국전자과학회 논문지, 25(5), pp. 548–558, 2014년 5월.
- [15] 허창수, "EMP 방호시설의 전기 설계 주요 사항." 전자파기술, 23(4), pp. 16–23,

2012년 7월.

- [16] X. Jin-shi., L. Wen-hua., Z. Shi-Ying., and Z. Jin-Hua., "Simulation of high power EMP effects on a cylinder object with openings using FDTD method.", IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), pp. 1865-1858, May 2010.
- [17] C. Fang, Q. Zhang, H. Tan, D. Wen, E. D., and D. Xie, "Computation of shielding effectiveness of a rectangular case with MLFMM between 0-5GHz.", IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), pp. 1817-1820, May 2010.
- [18] C. Fang, Q. Zhang, and D. Xie, "Simulation of shielding characteristic of a typical decay waveguide window for EMP." IEEE Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), pp. 780-783, Sept 2010.
- [19] 현세영, 이경원, 김민석, 육종관, "철근 콘크리트에 의한 전자기파 차폐 효과 모델링", 한국전자과학회 논문지, 23(3), pp. 384-391, 2012년 3월.
- [20] 방승기, 김재훈, "EMP 방호시설의 덕트 및 배관 최적 설계 방안.", 한국지열에너지학회 논문집 10(4) pp. 15-24, 2014년 12월.
- [21] 서승직, 건축설비계획, 일진사, p.382, 2011.
- [22] D. M. Pozar, Microwave Engineering. Reading, MA: Addison-Wesley, pp. 106-116, 1990
- [23] W. A. Bereuter, D. Chang, "Shielding effectiveness of metallic honeycombs", IEEE Transactions on EMC, Feb. 1982.
- [24] 이경원, 정영철, 홍익표, 육종관, "수정된 설계 방정식을 이용한 허니컴 구조의 차폐 효과 예측", 한국전자과학회 논문지, 16(9), pp. 862-871, 2005년 9월.
- [25] Donald R. J. White, Michel Mardiguian, "A handbook series on electromagnetic interference and compatibility, electromagnetic shielding", Interference Control Technologies, Inc., Gainesville, Virginia., vol. 3, 1988.
- [26] Leland H. Hemming, "Applying the waveguide below cut-off principle to shielded enclosure design", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug. 1992.
- [27] 권종화, 정연춘, "고출력 전자파 대책 기술 연구 동향." 전자파기술, 25(3), pp. 34-47, 2014년
- [28] 지재용, "특수무기 발전추세 및 개발동향. 국방과 기술, (426), pp. 50-65, 2014년.
- [29] 최진수, 임동우, "전자기펄스 발생과 응용." 물리학과 첨단기술, pp. 36-41, 2006년.
- [30] 정연춘, "전자파 보안 기술 동향." 전자파기술, 21(1), pp. 100-113, 2010년.
- [31] 현세영, 두진경, 육종관, "EMP 방호 대책 적용의 경제적 타당성 분석 방법." 전자파기술, 25(3), pp. 15-23, 2014년.
- [32] 김상인, 김유나, 방승기, 김석봉, 육종관, "다층 구조를 이용한 도파관 배열의 EMP 차폐성능과 유동 분석." 한국전자과학회논문지, 27(8), pp. 735-741, 2016년.
- [33] 현세영, 두진경, 김우주, 육종관, "고출력 전자기파에 대한 전력망 피해 비용 산출." 한국전자과학회논문지, 25(7), pp. 757-766, 2014년.
- [34] 강희도, 오일영, 김정호, 육종관, "다층 지하 구조물로의 고고도 전자기파 (HEMP) 커플링 현상에 대한 전자기적 모델링." 한국전자과학회논문지, 23(3), pp. 392-401, 2012년.
- [35] 이원길, "EMP 방호대책과 소요 기술." 전자파기술, 24(1), pp. 79-96, 2013년.

- [36] 김홍섭, “EMP 위협의 실상과 발전방안.” 국방과 기술, (414), pp. 98–103, 2013년.
- [37] 장태현, “EMP 표준화 동향.”, 전자파기술 27(1), pp. 37–44, 2016년 1월.
- [38] 조규표, 천제희, “핵 및 전자기 펄스 무기의 EMP 방호대책 연구.” 국방과 기술, (346), pp. 54–63, 2007년.
- [39] 권중화, 정연춘, “고출력 전자파 대책 기술 연구 동향.” 전자파기술, 25(3), pp. 34–47, 2014년.
- [40] 진정희, 정성우, 서현욱, “군용차량에 대한 EMC/EMP 규격 동향 및 적용방안 연구.” 2012년 한국자동차학회 학술대회 및 전시회, pp. 2693–2693, 2012년.
- [41] 서만중, 지성원, 김영진, 박우철, 강호재, 허창수, “EMP 방호시설의 전자파 차폐효과 측정 방법.” 한국전자파학회논문지, pp. 548–558, 2014년.
- [42] 정도희, 김기영, 황동수, “항공용 EMP 보호기 개발에 관한 개념설계.” 한국항공우주학회 2013년도 춘계학술대회, pp. 340–344, 2013년.
- [43] 정수진, “EMP 방호 세계 최고기술 대한민국에 있다.” 전자파기술, 25(6), pp. 62–66, 2014년.
- [44] 방승기, 안혜린, 육종관, “EMP 차폐를 위한 도파관 형상과 SE 에 따른 유동 특성 평가.” 한국지열에너지학회논문집, 12(3), pp. 1–8, 2016년.
- [45] 방승기, 김재훈, 육종관, 김유나, 김상인, 김석봉, “도파관 배열이 설치된 비상발전기 연도의 유속 예측 및 EMP 차폐평가.” 한국지열에너지학회논문집, 12(1), pp. 1–6, 2016년.
- [46] 방승기, 김재훈, 육종관, 김유나, 김상인, “EMP 차폐 도파관의 형상 결정 가이드라인 작성.” 에너지공학, 25(1), pp. 86–91, 2016년.
- [47] 육종관, 두진경, 현세영, “EM Topology 를 이용한 거대구조의 전자파 결합 특성 분석.” 전자파기술, 23(4), pp. 24–31, 2012년.
- [48] 이선의, 김진영, 박우철, “HEMP 분석과 방호 효율성.” 한국위성정보통신학회논문지, 8(3), pp. 20–24, 2013년.
- [49] 이선의, 황유민, 박우철, 김진영, “HEMP 시스템의 차폐 성능 분석.” 한국정보통신설비학회 학술대회, pp. 203–204, 2014년.
- [50] 이성동, 막수영, 박복룡, 안희남, 정보통신기반시설 고출력전자파 영향 및 대책 연구, 국립전파연구원, 2014년 12월.
- [51] 2015 전자파 보안 워크숍, “고출력 비핵 전자기파 (IEMI) 위협과 대책” 한국전자파학회.
- [52] S. Y. Hyun, K. W. Lee, and J. G. Yook, “Modeling of shielding effectiveness of reinforced concrete walls for electromagnetic pulse.” IEEE Radar Conference (EuRAD), pp. 453–456, Oct 2012.
- [53] S. Y. Hyun, J. K. Du, H. J. Lee, K. W. Lee, J. H. Lee, C. Jung, E. J. Kim, W. Kim, and J. G. Yook, “Analysis of shielding effectiveness of reinforced concrete against high-altitude electromagnetic pulse.” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 56(6), pp. 1488–1496, Dec 2014.
- [54] S. Y. Hyun, I. Jung, I. P. Hong, C. Jung, E. J. Kim, and J. G. Yook, “Modified Sheet Inductance of Wire Mesh Using Effective Wire Spacing.” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 58(3), pp. 911–914, June 2016
- [55] J. K. Du, J. W. Ahn, S. M. Hwang, and J. G. Yook, J. G., “Analysis of coupling effects in waveguides using the BLT equation and numerical methods.” IEEE Microwave Symposium Digest (MTT), pp. 1–3, June 2012.

- [56] J. K. Du, S. M. Hwang, J. W. Ahn, and J. G. Yook, "Analysis of Coupling Effects to PCBs Inside Waveguide Using the Modified BLT Equation and Full-Wave Analysis." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(10), pp. 3514–3523, Oct 2013.
- [57] D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, J. L. ter Haseborg, H. Garbe, "Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(3), pp. 380–389, 2004.
- [58] M. Kreitlow, F. Sabath, H. Garbe, "Analysis of IEMI effects on a computer network in a realistic environment." *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 1063–1067, Aug 2015.
- [59] M. Camp, H. Gerth, H. Garbe, H. Haase, "Predicting the breakdown behavior of microcontrollers under EMP/UWB impact using a statistical analysis." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(3), pp. 368–379, Aug 2004.
- [60] X. Jin-shi, L. Wen-hua, Z. Shi-ying. and Z. Jin-hua, "Simulation of high power EMP effects on a cylinder object with openings using FDTD method." *IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, pp. 1865–1868, May 2010.
- [61] V. Pereira, and G. R. Kunkolienkar, "EMP (Electro-Magnetic Pulse) weapon technology along with EMP shielding & detection methodology." *Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1–5, July 2013.
- [62] C. Wilson, "High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments." 2004.
- [63] MIL-STD-188-125-1, High-Altitude Electromagnetic Pulse (Hemp) Protection For Fixed Ground-Based Cifacilities Performing Critical, Time-Urgent Missions.
- [64] IEC TS 61000-5-10 Ed. 1: Guide to the application of HEMP and IEMI publications.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.